**Ткань космоса: Пространство, время и структура реальности**

Посвящается Трэйси

The fabric of the cosmos: space, time and the texture of reality / Brian R. Greene.

Random House, Inc., New York, 2004

ISBN 0-375-41288-3

© Copyright перевод Юрий Артамонов

2006

y-a-arta@yandex.ru

**Оглавление**

Предисловие

Часть I Арена реальности

1. Дороги к реальности

*Пространство, время и почему вещи таковы, каковы они есть*

2. Вселенная и ведро

*Пространство – придуманная человеком абстракция или физическая сущность?*

3. Относительность и абсолют

*Пространство-время – придуманная Эйнштейном абстракция или физическая сущность?*

4. Запутанное пространство

*Что означает быть разделенным в квантовой вселенной?*

Часть II Время и опыт

5. Замороженная река

*Течет ли время?*

6. Случайность и направленность

*Имеет ли время направление?*

7. Время и кванты

*Проникновение в природу времени из квантовой области*

Часть III Пространство-время и космология

8. О снежинках и пространстве-времени

*Симметрия и эволюция космоса*

9. Испаряя вакуум

*Теплота, пустота и объединение*

10. Разборка Взрыва на составляющие

*Что взорвалось?*

11. Кванты в небе с алмазами

*Инфляция, квантовое дрожание и стрела времени*

Часть IV Первоисточники и объединение

12. Мир на струне

*Ткань в соответствии с теорией струн*

13. Вселенная на бране

*Размышления о пространстве и времени в М-теории*

Часть V Реальность и воображение

14. Вверх в небеса и вниз на Землю

*Эксперименты с пространством и временем*

15. Телепортаторы и машины времени

*Путешествие сквозь пространство и время*

16. Будущее в намеках

*Панорама пространства и времени*

*Толковый словарь*

*Советы для дальнейшего чтения*

*Предметный и именной указатель*

*Комментарии*

**Предисловие**

Пространство и время притягивают воображение как никакой другой объект науки. И не без оснований. Они формируют арену реальности, ту самую ткань космоса. Наше существование в целом – все, что мы делаем, думаем и чувствуем, – имеет место в некоторой области пространства в течение некоторого интервала времени. До сих пор наука бьется за понимание того, что в действительности представляют из себя пространство и время. Являются ли они реальными физическими сущностями или просто удобными идеями? Если они реальны, то являются ли они фундаментальными или они суть проявления более основополагающих составных частей? Что означает для пространства быть пустым? Имеет ли время начало? Имеет ли оно направленность, неумолимо протекая из прошлого в будущее, как нам подсказывает повседневный опыт? Можем ли мы манипулировать пространством и временем? В этой книге мы проследим три сотни лет страстных научных изысканий в поисках ответов или хотя бы проблесков ответов на подобные основополагающие и глубокие вопросы о природе вселенной.

Наше путешествие вновь и вновь будет приводить нас к другим, тесно связанным вопросам, тоже охватывающим нечто неуловимое: Что есть реальность? Мы, люди, имеем доступ только к внутренним переживаниям от ощущений и мышления, так как же мы можем быть уверены, что они правильно отражают внешний мир? Философы долго постигали эту проблему. Кинематографисты популяризировали ее через серии историй про искусственные миры, которые создавались путем тонкой нейростимуляции и существовали исключительно в разуме их носителя. И физики, как и ваш покорный слуга, остро осознают, что наблюдаемая нами реальность – материя, эволюционирующая на платформе пространства и времени, – может иметь мало отношения к реальности, которая находится где-то далеко, если таковая имеет место. Тем не менее, поскольку наблюдения – это все, что мы имеем, мы воспринимаем их всерьез. Мы выбираем в качестве путеводителя надежные данные опытов и структуру математики, а не безудержные фантазии или жесткий скептицизм, и разыскиваем простейшие из теорий с наибольшей сферой охвата, способные объяснить и предсказать результаты сегодняшних и будущих экспериментов. Такой подход весьма сильно ограничивает рассматриваемые нами теории. (В этой книге, например, мы не собираемся искать намеки на то, что я плаваю в капсуле, соединенной с тысячами стимулирующими мозг проводами, которые внушают мне единственную мысль, что я сейчас пишу этот текст). Однако, в течение последнего столетия исследования в физике вызвали пересмотр нашего повседневного восприятия реальности, который настолько же драматичен, настолько же переворачивает ум и настолько же смешивает системы понятий, как это делает самая богатая на воображение научная фантастика. Эти революционные потрясения будут сопровождать наш поход на протяжении следующих страниц. Многие из вопросов, которые мы исследуем, являются, хотя и в разных видах, теми же самыми, которые заставляли морщить лоб Аристотеля, Галилея, Ньютона, Эйнштейна и многих и многих других на протяжении эпох. И поскольку эта книга стремится передать идеи науки в действии, мы следуем за этими вопросам так, как они были озвучены, снабжены ответами в одном поколении, опровергнуты его наследниками, уточнены и заново интерпретированы учеными последующих столетий.

Например, по поводу запутанного вопроса, является ли полностью пустое пространство, подобное чистому холсту, реальной сущностью или просто абстрактной идеей, мы следуем за маятником научных взглядов, когда он качается между декларацией 17-го века Исаака Ньютона о том, что пространство реально, заключением Эрнста Маха в 19-м веке о том, что это не так, и драматической переформулировкой самого вопроса, совершенной Эйнштейном в 20-м веке, в которой он связал воедино пространство и время и почти совершенно опроверг Маха. Затем мы столкнемся с последующими исследованиями, которые еще раз трансформировали вопрос путем переопределения понятия "пустой", заметив, что пространство неизбежно заполнено тем, что называется квантовыми полями и, вероятно, рассеянной однородной энергией, называемой космологической постоянной, – современным отголоском старого и дискредитированного представления о заполняющем пространство эфире. И, более того, мы затем опишем, как планируемые в космосе эксперименты могут частично подтвердить характерные черты выводов Маха, что оказывается в согласии с эйнштейновской общей теорией относительности, хорошо иллюстрируя очарование и запутанную паутину научного поиска.

В нашу собственную эру мы столкнемся с впечатляющим взглядом инфляционной космологии на стрелу времени, богатым выбором дополнительных пространственных измерений в теории струн, радикальным указанием М-теории на то, что пространство, в котором мы обитаем, может быть кусочком, плавающим в большем космосе, и современные дикие спекуляции на тему, что видимая нами вселенная может оказаться не более, чем космической голограммой. Мы еще не знаем, окажется ли большинство из этих новейших теоретических предположений верными. Но, соглашаясь, что звучат они скандально, мы принимаем их всерьез, так как они – это то, к чему привел наш настойчивый поиск глубинных законов вселенной. Странная и необычная реальность может вырасти не только из богатого воображения научной фантастики, она может также появиться из поисков на переднем крае современной физики.

*Ткань Космоса* предназначается, преимущественно, для массового читателя, который не имеет или имеет мало формального опыта в науке, но который жаждет понимать, как явления вселенной обеспечивают стимул для развития большого числа сложных и спорных концепций. Как и в моей первой книге,*Элегантная Вселенная*, я повсюду сосредоточился на ядре научных идей, исключив математические детали в пользу метафор, аналогий, историй и иллюстраций. Когда мы достигаем более сложных разделов книги, я предупреждаю читателя и предоставляю короткие обобщения для тех, кто решит пропустить или поверхностно ознакомиться с более углубленными обсуждениями. Таким образом, читатель должен быть в состоянии пройти путь открытий и получить не просто знание о текущем общем взгляде на физику, но и понимание того, как и почему этот общий взгляд получает преимущество.

Студенты, читатели, интересующиеся общими разделами науки, преподаватели и профессионалы также должны найти в книге много интересного. Хотя начальные главы охватывают необходимый, но стандартный основополагающий материал по теории относительности и квантовой механике, акцент на единстве и реальности пространства и времени в этом подходе отчасти необычен.

Следующие главы охватывают широкий перечень явлений – некоторые из них: теорема Белла, эксперименты с отложенным выбором, квантовые измерения, ускоряющееся расширение, вероятность создания черных дыр в следующем поколении ускорителей частиц, фантастические червоточины, машины времени, – и должны обогатить читателей знанием о большом числе наиболее любопытных и обсуждаемых достижений.

Некоторый материал, который я охватил, является спорным. Для тех публикаций, которые остаются дискуссионными, я обсудил ведущие точки зрения в основном тексте. Для спорных вопросов, по которым я чувствую, что достигнуто некоторое согласие, я перенес обсуждение отличных точек зрения в комментарии. Некоторые ученые, а именно те, которые придерживаются нераспространенных точек зрения, могут отвергнуть некоторые из моих вердиктов, но на протяжении основного текста и комментариев я старался соблюсти баланс трактовок. В комментариях особенно прилежный читатель найдет также более полные истолкования, объяснения и углубления тех позиций, которые я упростил, а также (для тех, кто к этому склонен) краткие математические дополнения к использованным в основном тексте описаниям без уравнений. Краткий толковый словарь обеспечивает быстрые пояснения для некоторых из более специальных научных терминов.

Книга даже такого объема не может исчерпать обширную тему пространства и времени. Я сосредоточился на тех особенностях, которые я нахожу одновременно как наиболее интересными, так и существенными для формирования полной картины реальности, которую рисует современная наука. Нет сомнений, что многое из этого выбора отражает персональный вкус, и я прошу прощения у тех, кто сочтет, что его собственной работе или передовой области исследований не было уделено адекватного внимания.

Во время написания *Ткани Космоса* мне посчастливилось получить существенный отклик от большого числа привлеченных читателей. Рафаэль Каспер, Льюбос Мотл, Дэвид Стейнхардт и Кен Вайнберг прочитали различные версии готовой рукописи, временами повторно, и предложили многочисленные, детальные и глубокие советы, которые существенно повысили как ясность, так и точность изложения. Я выражаю им сердечную благодарность. Дэвид Альберт, Тэд Балтц, Николас Боулз, Трэйси Дэй, Петер Демчук, Ричард Истер, Анна Холл, Кит Голдсмит, Шелли Голдстейн, Майкл Гордин, Джошуа Грин, Артур Гринспун, Гэвин Гуерра, Сандра Кауфман, Эдвард Кастенмайер, Роберт Крулвич, Андрей Линде, Шани Оффен, Маулик Парик, Майкл Поповитц, Мэриин Скалли, Джон Стэйчел и Ларс Стрэйтер прочитали всю рукопись или ее часть, их комментарии были исключительно полезны. Я получил большую помощь от бесед, в которых участвовали Андреас Альбрехт, Майкл Бассет, Шон Кэррол, Андреа Кросс, Рита Грин, Алан Гут, Марк Джексон, Дэниэл Кабат, Уилл Кинней, Джастин Хоури, Хирания Пэйрис, Сол Периматтер, Конрад Шалам, Пол Стейнхардт, Леонард Сасскайнд, Нейл Турок, Генри Туе, Уильям Вармус и Эрик Вайнберг. Я должен специально поблагодарить Рафаэля Гуннера, чей острый ум, проявившийся в точных аргументах, и чья готовность критиковать мои старания оказались неоценимы. Эрик Мартинец обеспечил важную и неустанную помощь на стадии издания книги, а Джейсон Северс проделал звездную работу по созданию иллюстраций. Я благодарю моих агентов, Катинку Мэтсон и Джона Брокмана. И я в большом долгу признательности моему издателю Марти Эшеру за постоянный источник поощрения, советов и резкого проникновения в суть, что в значительной степени улучшило качество изложения.

На протяжении моей карьеры мои научные исследования финансировались Департаментом Энергии, Национальным Научным Фондом и Фондом Альфреда П. Слоана. Я с благодарностью выражаю свою признательность за их поддержку.

**I Арена реальности**

**1 Дороги к реальности**

***ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ И ПОЧЕМУ ВЕЩИ ТАКОВЫ, КАКОВЫ ОНИ ЕСТЬ***

**К**ниги в старом пыльном книжном шкафу моего отца не были под запретом. Однако, пока я рос, я никогда не видел, чтобы кто-нибудь вынимал их. Наиболее массивные тома – полная история цивилизации, серии томов великих произведений литературы вестерна, многих других я не могу уже вспомнить, – казались почти слившимися с полками, что слабо прогибались от десятилетий жесткой нагрузки. Но на подъеме к самой высокой полке был тонкий небольшой текст, который то и дело привлекал мои глаза, поскольку он казался слишком неуместным, как Гулливер среди бробдингнагцев. Оглядываясь назад, я не вполне могу вспомнить, почему я так долго выжидал, прежде чем ознакомиться с ним. Вообще, с годами книги кажутся в меньшей степени материалом, который ты прочитал, и в большей степени фамильной ценностью, которой ты восторгался издалека. В конце концов, такая почтительность дает путь к завершению юности. Я дотянулся до маленького текста, сдул с него пыль и открыл на первой странице. Первые несколько строк были, чтобы не сказать больше, поразительными.

"Имеется одна по-настоящему философская проблема и это самоубийство". Я содрогнулся. "Имеет или нет мир три измерения или разум девять или двенадцать категорий", продолжался текст, "проявится позже"; такие вопросы, объяснял текст, являются частью игры, в которую играет человечество, но они заслуживают внимания только после того, как будет определен правильный исход жизни. Книга была *Миф о Сизифе* и была написана философом алжирского происхождения и нобелевским лауреатом Альбером Камю. Со временем ледяное ощущение от этих слов растаяло под светом понимания. Да, конечно, думал я. Вы можете обдумывать ту или иную проблему или анализировать, что будет после дождичка в четверг, но настоящий вопрос заключается в том, будут ли убеждать вас все ваши размышления и анализы, что жизнь стоит того, чтобы быть прожитой.

Это значит, что все приходит к краху. Все другое – это мелочи.

Моя случайная удачная встреча с книгой Камю должна была произойти во время периода особой впечатлительности; его слова стоят передо мной более, чем любые другие, прочитанные мной. С течением времени я снова представлял себе, как разные люди, с которым я встречался, или о которых слышал или видел по телевизору, будут отвечать на этот главнейший из всех вопросов. Однако, ретроспективно, это второе утверждение Камю – относительно роли научного прогресса – является особым вызовом для меня. Камю признавал важность понимания структуры вселенной, но, как я уже говорил, он отвергал возможность, что такое понимание может внести изменение в нашу оценку ценности жизни. Конечно, мое юношеское чтение экзистенциальной философии было похоже на такое же извращение, как чтение романтической поэзии Бартом Симпсоном, но даже так заключение Камю потрясло меня и оставило отметину. Такому упертому физику, как я, кажется, что содержательная оценка жизни обязательно требует полного понимания арены жизни – вселенной. Я не забываю думать, что если бы наш вид обитал в пещерах, выходящих в скрытые глубокие подземелья и до сих пор только таким образом узнавал земную поверхность, алмазный солнечный свет, океанский бриз и звезды, что лежат сверху, или если бы эволюция происходила по другому пути и мы получали бы знания только из наших тактильных ощущений от непосредственного окружения, или если бы ментальные способности человека останавливались в своем развитии во время раннего детства, так что наши эмоциональные и аналитические умения не прогрессировали бы выше тех, что мы имеем в пятилетнем возрасте, – короче, если наш жизненный опыт рисовал бы нам лишь ничтожную часть портрета реальности, – наше определение стоимости жизни было бы совершенно подорвано. Когда бы мы нашли, в конечном счете, наш путь к земной поверхности, или когда мы, в конце концов, добыли бы способность видеть, слышать, чувствовать запахи и вкус, или когда бы, наконец, наш разум получил свободу развиваться, как он это делает обычно, наш коллективный взгляд на жизнь и космос неизбежно радикально изменился бы. Наше предыдущее ущербное понимание реальности осветилось бы совершенно иным светом на эти наиболее фундаментальные из всех философских вопросов.

Вы можете спросить, ну и что с того? Конечно, всякая взвешенная оценка должна привести к заключению, что хотя мы не можем понять всего о вселенной, – понять каждый аспект поведения материи или функции жизни, – мы причастны к прояснению ситуации, к украшению холста природы взмахами широкой кисти. Конечно, как объявил Камю, прогресс в физике, такой как понимание числа пространственных измерений, или прогресс в нейропсихологии, такой как понимание всех организационных структур мозга, или, коли на то пошло, прогресс в любом числе других научных дисциплин может осуществиться в важных деталях, но его влияние на нашу оценку жизни и реальности будет минимальным. Конечно, реальность есть то, что мы думаем о ней; ральность обнаруживается нами через наш опыт.

В той или иной степени многие из нас придерживаются этого взгляда на реальность, пусть даже неявно. Я определенно нахожусь в раздумьях об этом в повседневной жизни; легко обмануться, что лицо природы открывается непосредственно нашим чувствам. К тому же за десятилетия, прошедшие с первого знакомства с текстом Камю, я понял, что современная наука рассказывает очень разные истории. Обобщающий урок, который вытекает из расследования науки за последнее столетие, заключается в том, что человеческий опыт часто вводит в заблуждение, если руководствоваться им, двигаясь к правильной природе реальности. Прямо под поверхностью каждого дня лежит мир, который мы с трудом постигаем. Последователи оккультизма, посвященные астрологии и те, кто придерживается религиозных принципов, которые говорят о реальности вне опыта, с давних пор пришли к сходному заключению. Но это не то, что я имею в виду. Я ссылаюсь на работы изобретательных новаторов и неутомимых исследователей – мужчин и женщин науки, – которые слой за слоем снимают одежды космической луковицы, решают загадку за загадкой, и открывают вселенную, которая одновременно удивительна, непривычна, возбуждающа, элегантна и совершенно не похожа на то, что кто-либо мог ожидать.

Эти исследования разнообразны в деталях. Прорывы в физике вызывали и продолжают вызывать драматические изменения в нашей концепции космоса. Я остаюсь убежденным теперь, как был и десятки лет назад, что Камю справедливо выбрал стоимость жизни как основной вопрос, но понимание современной физики склонило меня к тому, что оценивание жизни через линзу повседневного опыта напоминает рассматривание Ван Гога через пустую бутылку колы. Современная наука подвергается одним нападкам за другими на основании умозаключений, сделанных из наших рудиментарных ощущений, часто дающих затуманенное представление о мире, в котором мы обитаем. Так что, когда Камю выделяет физические вопросы и обозначает их, как вторичные, я становлюсь убежденным, что они главные. Для меня физическая реальность как предоставляет арену, так и обеспечивает толкование для борьбы с вопросами Камю. Оценка существования при одновременном отказе от попытки воспользоваться пониманием современной физики похожа на борьбу в темноте с неизвестным противником. При углублении нашего понимания правильной природы физической реальности мы основательно перерабатываем наше ощущение самих себя и наше восприятие вселенной.

Центральной темой этой книги является объяснение некоторых из наиболее заметных и стержневых переосмыслений нашей картины реальности с особым вниманием на те из них, которые влияют на долгосрочный проект человечества по пониманию пространства и времени. От Аристотеля до Эйнштейна, от астролябии до Космического телескопа Хаббла, от пирамид до горных обсерваторий пространство и время придают форму мышлению с тех пор, как мышление началось. С наступлением эры современной науки их важность гигантским образом возросла. За последние три столетия разработки физики раскрыли пространство и время как наиболее сбивающие с толку и наиболее спорные концепции, и как наиболее эффективные концепции в нашем научном анализе вселенной. Эти разработки также показали, что пространство и время возглавляют список самых старых научных конструкций, которые фантастическим образом пересматриваются передовыми исследованиями.

Для Исаака Ньютона пространство и время просто были – они формировали инертную универсальную космическую платформу, на которой сами собой разыгрывались события вселенной. Для его современника и часто соперника Готфрида Вильгельма фон Лейбница "пространство" и "время" были только названиями отношений между тем, где были объекты и когда имели место события. Ничего более. Но для Альберта Эйнштейна пространство и время были сырым материалом, лежащим в основе реальности. Через свои теории относительности Эйнштейн потряс наши представления о пространстве и времени и раскрыл принципиальную роль, которую они играют в эволюции вселенной. С тех пор пространство и время постоянно являются сверкающим драгоценным камнем физики. Они одновременно привычны и мистичны; полное понимание пространства и времени стало для физиков самым пугающим вызовом и вожделенным призом.

Исследования, которые мы охватим в этой книге, сплетают ткань пространства и времени различными путями. Некоторые идеи будут настаивать, что свойства пространства и времени настолько основополагающие, что на столетия, если не на тысячелетия, они кажутся вне обсуждаемых вопросов. Другие будут искать связь между нашими теоретическими представлениями о пространстве и времени и характерными чертами, которые мы в целом знаем по опыту. Еще другие будут поднимать вопросы, не исследуемые в пределах границ обычного восприятия.

Мы только в минимальной степени будем говорить о философии (и совсем не будем о самоубийстве и смысле жизни). Но в нашем научном поиске для решения тайн пространства и времени мы будем непоколебимы и неудержимы. От мельчайшей частицы вселенной и самого раннего момента времени к ее удаленнейшим областям и самому отдаленному будущему мы будем исследовать пространство и время в окружающей среде, как привычной, так и отдаленной, с твердым взглядом отыскивая их правильную природу. Поскольку история пространства и времени еще только пишется полностью, мы не хотим выносить какие-либо окончательные оценки. Однако, мы столкнемся с сериями исследований – отчасти в высшей степени странными, отчасти более удовлетворительными, отчасти экспериментально проверенными, отчасти совершенно спекулятивными, – которые покажут, насколько близко мы подошли к вплетению нашего ума в ткань космоса и к прикосновению к правильной структуре реальности.

Классическая реальность

Историки расходятся в оценках, когда началась эра современной науки, но обычно о времени Галилео Галилея, Рене Декарта и Исаака Ньютона они говорят, что это было освежающее движение вперед. В те дни новое научное мышление прочно вышло на ведущие позиции, в то время как результаты, полученные в земных и астрономических опытах, делали все более ясным, что имеется порядок во всем, приходящим из космоса и уходящим в космос, порядок, пригодный для осторожных рассуждений и математического анализа. Эти первопроходцы современного научного мышления приводили аргументы, что если придерживаться правильного пути, происходящее во вселенной не только объяснимо, но и предсказуемо. Сила науки для предсказания аспектов будущего – согласованного и количественного – была раскрыта.

Ранее научное исследование фокусировалось на видах вещей, которые можно видеть или ощущать в повседневной жизни. Галилей сбрасывал тяжести с наклонной башни (или так гласит легенда) и наблюдал за шариками, скатывающимися по наклонной плоскости; Ньютон изучал падающие яблоки (или так гласит легенда) и орбиту Луны. Целью этих исследований было приспособление нарождающегося слуха науки к природным гармониям. Есть уверенность, что физическая реальность была материалом для ощущений, но сложной задачей было услышать рифму и причину за ритмом и регулярностью. Многие воспетые и невоспетые герои внесли вклад в быстрый и впечатляющий прогресс, который был осуществлен, но Ньютон обошел всех. С горсткой математических уравнений он воспроизвел все известное о движении на земле и в небесах и, делая это, соединил главные моменты, прийдя к тому, что известно как*классическая физика*.

В течение десятилетий, следующих за трудами Ньютона, его уравнения были развиты в законченную математическую структуру, что существенно расширило как их область действия, так и практическую ценность. Классическая физика постепенно стала изощренной и зрелой научной дисциплиной. Но ясно сияющим сквозь все эти достижения остается сигнальный огонь оригинального прозрения Ньютона. Даже сегодня, более чем через три сотни лет, вы можете увидеть ньютоновские уравнения, небрежно написанные во всем мире мелом на школьных досках при введении в физику, напечатанные в расчетах траекторий в полетных планах НАСА и встроенные в сложные расчеты передовых исследований.

Ньютон привел богатство физических явлений в простые теоретические рамки.

Однако, во время формулирования своих законов движения Ньютон столкнулся с критически сбивающим с толку препятствием, одним из тех, что особенно важны для нашей истории (Глава 2). Каждый знает, что вещи могут двигаться, но как насчет арены, в рамках которой движение имеет место? Хорошо, мы все ответим, это пространство. Но, отзовется Ньютон, что есть пространство? Является ли пространство физической сущностью или это абстрактная идея, рожденная усилиями человека для осмысления космоса? Ньютон осознавал, что на этот ключевой вопрос должен быть ответ, поскольку без установления смысла пространства и времени его уравнения, описывающие движение, оказываются бессмысленными. Понимание требует контекста; проникновение в суть должно быть закреплено.

Итак, через несколько коротких высказываний в своих *Принципах математики* Ньютон озвучил концепцию пространства и времени, декларируя абсолютные и неизменные сущности, которые обеспечивают вселенной жесткую, не подверженную изменениям арену. Согласно Ньютону, пространство и время обеспечивают невидимую платформу, которая дает вселенной порядок и структуру. Никто не согласился. Некоторые убедительно аргументировали, что имеет мало смысла приписывать существование тому, что вы не можете почувствовать, схватить или подвергнуть воздействию. Но объяснительная и предсказательная сила ньютоновских уравнений успокоила критику. В течение следующих двух сотен лет его абсолютная концепция пространства и времени была догмой.

Релятивистская реальность

Классический ньютоновский взгляд на мир радовал. Он не только описывал природные явления с поразительной точностью, но и детали описания – математика – строго соответствовали опыту. Если вы что-либо толкнете, его скорость возрастет. Чем сильнее вы бросите мяч, тем большее сотрясение он получит, когда шлепнется о стену. Если вы давите на что-либо, вы чувствуете его обратное давление на вас. Чем более массивным является предмет, тем сильнее его гравитационное притяжение. Все это находится в числе наиболее основных свойств естественного мира, и когда вы изучаете теорию Ньютона, вы видите их представление в его уравнениях, ясных как день. В отличие от необъяснимого фокуса-покуса с магическим кристаллом действие ньютоновских законов демонстрировало полноту для всех с минимальной математической тренировкой. Классическая физика обеспечила строгое основание для человеческой интуиции.

Ньютон включил силу гравитации в свои уравнения, но так было до 1860х годов, пока шотландский ученый Джеймс Клерк Максвелл не расширил рамки классической физики, приняв во внимание электрические и магнитные силы. Максвеллу понадобилось создать дополнительные уравнения, и математика, которую он применил, потребовала более высокого уровня тренировки, чтобы понять ее полностью. Но его новые уравнения были во всех отношениях столь же успешны для объяснения электрических и магнитных явлений, как ньютоновские были успешны для объяснения движения. С конца 1800х было очевидно, что секреты вселенной больше не сопротивляются силе человеческого интеллектуального могущества.

В самом деле, с успешным присоединением электрических и магнитных сил, было растущее ощущение, что теоретическая физика скоро завершится. Физики, предполагали некоторые, быстро получат конечные объекты, и их законы скоро будут высечены в камне. В 1894 известный физик-экспериментатор Альберт Майкельсон заметил, что "большинство из великих основопологающих принципов твердо установлены", и он сослался на "видного ученого", – вероятнее всего, это был британский физик лорд Кельвин, – который сказал, что все, что остается, – это детали определения некоторых чисел до более высоких десятичных цифр после запятой.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_1_1" \o ) В 1900 Кельвин сам отметил, что "два облачка" нависают на горизонте, первое связано со свойствами движения света, а второе с поведением излучающих объектов, испускающих излучение при нагревании, но есть полная уверенность, что это всего лишь детали, которые, несомненно, скоро найдут свои объяснения.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_1_2" \o )

В течение десяти лет все изменилось. Как и ожидалось, две проблемы, которые поднял Кельвин, быстро нашли свои объяснения, но они оказались какими угодно, но только не незначительными. Каждая породила революцию, и каждая потребовала фундаментального переписывания законов природы. Классические концепции пространства, времени и реальности – те самые, которые на протяжении сотен лет не только работали, но также лаконично выражали наши интуитивные ощущения мира, – были низвергнуты.

Релятивистская революция, к которой привело первое из "облачков" Кельвина, датируется 1905 и 1915 годами, когда Альберт Эйнштейн завершил свои*специальную и общую теории относительности* (Глава 3). Во время борьбы с головоломками, включающими электричество, магнетизм и движение света, Эйнштейн осознал, что ньютоновская концепция пространства и времени, краеугольный камень классической физики, раскололась. После нескольких недель интенсивного труда весной 1905 он определил, что пространство и время не являются независимыми и абсолютными, как думал Ньютон, а являются запутанными и относительными таким способом, который бросает вызов повседневному жизненному опыту. Примерно через десять лет Эйнштейн вбил последний гвоздь в гроб ньютонианства, переформулировав законы гравитационной физики. В это время, но не только, Эйнштейн показал, что пространство и время являются частью единого целого, он также показал, что через деформации и искривления они принимают участие в космической эволюции. В отличие от жестких и неизменных структур, которые представлял Ньютон, пространство и время в переработке Эйнштейна эластичны и динамичны.

Две теории относительности являются наиболее драгоценными достижениями человеческого рода, и с их помощью Эйнштейн опрокинул ньютоновскую концепцию реальности. Даже если ньютоновская физика, кажется, сильно поддерживает математически то, что мы ощущаем физически, действительность, которую она описывает, не является действительностью нашего мира. Наша действительность релятивистская. К тому же, поскольку различие между классической и релятивистской реальностями проявляется только в экстремальных условиях (таких как экстремально высокие скорости и гравитация), ньютоновская физика все еще обеспечивает приближение, которое демонстрирует экстремальную точность и применимо во многих условиях. Но утилитарность и реальность суть очень разные стандарты. Как мы увидим, характерные черты пространства и времени, которые для многих из нас являются второй натурой, оказались фикцией, вытекающей из ложных ньютоновских взглядов.

Квантовая реальность

Вторая аномалия, о которой упоминал лорд Кельвин, привела к квантовой революции, одному из величайших потрясений, которому когда-либо подвергались современные человеческие представления. Со временем огонь утих и дым рассеялся, облицовка классической физики была отменена вновь возникшими рамками квантовой реальности.

Коренная особенность классической физики заключается в том, что если вы знаете положения и скорости всех объектов в отдельный момент времени, ньютоновские уравнения вместе с их максвелловскими дополнениями могут предсказать вам их положения и скорости в любой другой момент времени, прошлый или будущий. Без всякой неопределенности классическая физика декларирует, что прошлое и будущее выгравированы в настоящем. Эта особенность также присуща как специальной, так и общей теориям относительности. Хотя релятивистские концепции прошлого и будущего более утонченные, чем их классические двойники (Главы 3 и 5), релятивистские уравнения вместе с полным знанием о настоящем определяют их так же полностью.

Однако, к 1930м годам физики приложили усилия для введения целой новой концептуальной схемы, названной *квантовой механикой*. Совершенно неожиданно они нашли, что только квантовые законы были в состоянии разрешить массу головоломок и объяснить многообразие вновь полученных данных из атомной и субатомной областей. Но в соответствии с квантовыми законами, даже если вы делаете максимально возможно точные измерения того, в каком состоянии вещи находятся сегодня, лучшее, что вы можете в любое время надеяться сделать, это предсказать *вероятности* того, что вещи будут в том или ином состоянии в некоторый выбранный момент времени в будущем, или что вещи были в том или ином состоянии в некоторый выбранный момент времени в прошлом. Вселенная, согласно квантовой механике, не выгравирована в настоящем; вселенная, согласно квантовой механике, принимает участие в игре случая. Хотя все еще идут споры о точности, с которой указанные исследования должны интерпретироваться, большинство физиков согласны, что вероятность глубоко вплетена в ткань квантовой реальности. В то время как человеческая интуиция и ее воплощение в классической физике рассматривают реальность, в которой вещи всегда определяемы в том или ином состоянии, квантовая механика описывает реальность, в которой вещи в какой-то момент времени находятся в неопределенности, в неясности существования, частично в одном состоянии и частично в другом. Вещи становятся определенными только тогда, когда на них воздействует подходящее наблюдение, чтобы отставить квантовые вероятности и получить определенный результат опыта. При этом результат, который реализуется, не может быть предсказан, – мы можем предсказать только возможность, что вещи окажутся в том или ином состоянии.

Это, окровенно говоря, странно. Мы не привыкли к реальности, которая остается неопределенной до восприятия. Но странности квантовой механики на этом не заканчиваются. По меньшей мере, поразительной является особенность, восходящая к статье Эйнштейна, написанной в 1935 с двумя юными коллегами, Натаном Розеном и Борисом Подольским, и предназначавшейся для атаки на квантовую теорию.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_1_3" \o ) Вместе с происходившими затем извивами научного прогресса сейчас статья Эйнштейна может рассматриваться как одна из первых, указывающих, что квантовая механика – если брать по сути – подразумевает, что нечто, что вы сделали здесь, может мгновенно быть связанным с чем-то, происходящим где-то, несмотря на расстояние. Эйнштейн рассматривал такие мгновенные связи как нелепые и интерпретировал их появление из математики квантовой механики как свидетельство, что теория нуждается в больших доработках, прежде чем она достигнет приемлемой формы. Но в районе 1980х, когда как теоретические, так и технологические разработки привели экспериментальные наблюдения к рождению этих подразумевающихся квантовых абсурдностей, исследователи подтвердили, что возможна мгновенная связь между тем, что происходит в сильно удаленных друг от друга местах. При четких лабораторных условиях реально происходит то, что Эйнштейн считал абсурдом (Глава 4).

Проявления этих особенностей квантовой механики для нашей картины реальности являются объектом продолжающихся исследований. Многие ученые, я в том числе, рассматривают их как часть радикального квантового обновления смысла и свойств пространства. Обычно пространственная удаленность влечет за собой физическую независимость. Если вы хотите проконтролировать, что происходит на другой стороне футбольного поля, вы идете туда или, в самом крайнем случае, вы посылаете кого-нибудь или что-нибудь (ассистирующего тренера, скачущие молекулы воздуха, передающие речь, луч света для привлечения чьего-либо внимания и т.п.) через поле для передачи своего воздействия. Если вы не делаете этого, – если вы остаетесь пространственно изолированными, – вы не оказываете влияния, так как лежащее в промежутке пространство обеспечивает отсутствие физического взаимодействия. Квантовая механика ставит под вопрос такой взгляд, показывая, как минимум, в определенных обстоятельствах, способность преодолеть пространство; дальнодействующие квантовые взаимодействия могут обойти пространственное разделение. Два объекта могут находиться в пространстве на большом расстоянии друг от друга, но, что касается квантовой механики, они ведут себя так, как если бы они были единой сущностью. Более того, поскольку Эйнштейн нашел тесную связь между пространством и временем, квантовые взаимодействия также протягивают щупальца во времени. Мы коротко столкнемся с некоторыми остроумными и в полном смысле слова удивительными экспериментами, которые недавно исследовали ряд потрясающих пространственно-временных взаимодействий, которые влечет за собой квантовая механика, и, как мы увидим, они сильнейшим образом бросают вызов классическому интуитивному мировоззрению, которого большинство из нас придерживается.

Немотря на эти и многие другие впечатляющие наблюдения, остается одна из основополагающих особенностей времени, – то, что оно кажется имеющим направление из прошлого в будущее, – для которой ни теория относительности, ни квантовая механика не обеспечивают объяснения. Вместо этого убедительный прогресс пришел только из исследований в области физики, именуемой *космологией*.

Космологическая реальность

Раскрыть наши глаза на правильную природу вселенной всегда было одной из приоритетных целей физики. Тяжело представить себе, что многочисленные головоломные эксперименты учат, как мы имеем на протяжении последнего столетия, что реальность, которую мы ощущаем, является лишь отблеском существующей реальности. Но физика имеет также не менее важную заботу объяснить элементы реальности, которые мы действительно ощущаем. Из нашего быстрого марша сквозь историю физики может показаться, как будто это уже достигнуто и как будто повседневный опыт адресуется к достижениям физики до двадцатого века. В некоторой степени это правильно. Но даже когда речь идет о повседневности, мы далеки от полного понимания. И среди особенностей повседневного опыта, что сопротивляются полному объяснению, есть одна, которая приводит к одной из глубочайших нерешенных тайн в современной физике – тайне, которую великий британский физик сэр Артур Эддингтон назвал *стрелой времени*.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_1_4" \o ) Мы принимаем на веру, что имеется направление, в котором вещи раскрываются во времени. Яйцо разбивается, но не собирается вновь; свечи плавятся, но не сплавляются назад; воспоминания относятся к прошлому, никогда к будущему; люди стареют, но не молодеют. Эти асимметрии управляют нашей жизнью; отличие между прямым и обратным во времени есть господствующий элемент экспериментальной реальности. Если прямое и обратное во времени проявляло бы ту же симметрию, какую мы видим между левым и правым, или между назад и вперед, мир был бы нераспознаваем. Яйцо складывалось бы так же часто, как и разбивалось; свечи сплавлялись бы так же часто, как и расплавлялись; мы помнили бы о будущем столько же, сколько и о прошлом; люди молодели бы так же часто, как и старели. Определенно, такая симметричная во времени реальность – не наша реальность. Но откуда происходит асимметрия времени? Что отвечает за это наиболее основное из всех свойств времени?

Оказывается, что известные и признанные законы физики не проявляют такой асимметрии (Глава 6): каждое направление во времени, вперед или назад, трактуется законами без отличий. *И в этом причина великой головоломки*. Ничто в уравнениях фундаментальной физики не отмечает рассмотрение одного направления во времени отлично от другого, и это полностью отличается от всего, что мы ощущаем.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_1_5" \o )

Удивительно, что даже если мы фокусируемся на обычных особенностях повседневной жизни, наиболее убедительное разрешение этого рассогласования между фундаментальной физикой и повседневным опытом требует от нас пристально рассмотреть наиболее необычное из событий – начало вселенной. Осмысление этого началось с работы великого физика девятнадцатого столетия Людвига Больцмана и за последующие годы разрабатывалось многими исследователями, наиболее примечательный из которых британский математик Роджер Пенроуз. Как мы увидим, специальные физические условия в начале вселенной (сильно упорядоченная внешняя среда в момент или сразу после Большого взрыва) могут оставить след в направлении времени, точно как завод часов, перевод их пружины в сильно упорядоченное начальное состояние позволяет им тикать вперед. Таким образом, в смысле, который мы можем определить, разбивание – в противоположность собиранию – яйца дает свидетельство условий при рождении вселенной примерно 14 миллиардов лет назад.

Эта неожиданная связь между повседневным опытом и ранней вселенной позволяет проникнуть в вопрос, почему события разворачиваются одним образом во времени и никогда обратным, но это не есть полное разрешение тайны стрелы времени. Наоборот, это сдвигает головоломку в область космологии – изучения происхождения и эволюции космоса в целом – и вынуждает нас искать, действительно ли вселенная имела высокоупорядоченное начало, как этого требует объяснение стрелы времени.

Космология находится среди старейших вещей, увлекающих наш род. И это не чудо. Мы рассказчики историй, а какая история может быть более великой, чем история творения? На протяжении последних нескольких тысячелетий мировые религиозные и философские традиции взвешивали версии, каким образом все сущее – вселенная – началось. Наука тоже за свою долгую историю прикладывала руки к космологии. Но было открытие Эйнштейном общей теории относительности, что отмечается как рождение современной научной космологии.

Вскоре после публикации Эйнштейном его общей теории относительности и он и другие применили ее ко вселенной в целом. В течение нескольких десятилетий их исследования привели к основным понятиям того, что сейчас называют теорией *Большого взрыва*, приближению, которое успешно объясняет многие особенности астрономических наблюдений (Глава 8). В середине 1960х свидетельства в поддержку космологии Большого взрыва еще более усилились после того, как наблюдения открыли почти однородный газ микроволнового излучения, пронизывающий пространство, – невидимый для невооруженного глаза, но легко измеримый микроволновыми детекторами, – что было предсказано теорией. И определенно, в 1970е после десятилетия подробных исследований и значительного прогресса в определении того, как основные явления в космосе соответствуют экстремальным начальным изменениям в тепле и температуре, теория Большого взрыва закрепила за собой место ведущей космологической теории (Глава 9).

Несмотря на свои успехи, теория страдает существенными недостатками. Она с трудом объясняет, почему пространство всюду имеет вид, открываемый детальными астрономическими наблюдениями, и она не позволяет объяснить, почему температура микроволнового излучения, интенсивно изучаемая с момента его открытия, оказывается строго однородной по небу. Более того, что имеет отношение первостепенной важности к обсуждаемой нами истории, теория Большого взрыва не обеспечивает неопровержимых доводов, почему вселенная могла быть более упорядочена вблизи самого начала, как требуется для объяснения стрелы времени.

Эти и иные спорные вопросы инспирировали серьезный прорыв в конце 1970х и начале 1980х, известный как *инфляционная космология* (Глава 10). Инфляционная космология модифицирует теорию Большого взрыва путем введения экстремально короткого периода поражающе быстрого расширения во время самой ранней вселенной (в этом приближении размер вселенной увеличился на множитель, больший чем миллион триллионов триллионов, за время, меньшее чем миллионная триллионной триллионной доли секунды). Как станет ясно, этот сумасшедший рост молодой вселенной обходным путем движется к заполнению дыры, остающейся в модели Большого взрыва, – к объяснению картины пространства и однородности микроволнового излучения, а также к предположению, почему ранняя вселенная могла быть высоко упорядоченной, – так что мы все переживаем существенный прогресс в объяснении как астрономических наблюдений, так и стрелы времени (Глава 11).

Однако, вопреки этим высоким достижениям, за два десятилетия инфляционная космология утаивала свой собственный смущающий вопрос. Как и стандартная теория Большого взрыва, которую она модифицирует, инфляционная космология основывается на уравнениях Эйнштейна, открытых вместе с его общей теорией относительности. Несмотря на большое число исследовательских статей, подтверждающих силу уравнений Эйнштейна для точного описания больших и массивных объектов, физики давно знают, что точный теоретический анализ малых объектов, – таких как наблюдаемая вселенная, когда ее возраст был всего лишь долю секунды, – требует использования квантовой механики. Проблема, однако, в том, что когда уравнения общей теории относительности пытаются объединить с уравнениями квантовой механики, результат получается бедственный. Уравнения полностью разрушаются, и это мешает нам определить, как родилась вселенная и выполнялись ли при ее рождении условия, необходимые для объяснения стрелы времени.

Не будет преувеличением описать эту ситуацию как кошмар теоретиков: отсутствие математических средств, с которыми нужно анализировать важнейшие области, которые лежат вне экспериментальной достижимости. И поскольку пространство и время так сильно связаны с этой специфической недостижимой областью – истоком вселенной, – понимание пространства и времени полностью требует от нас поиска уравнений, которые могли бы справиться с экстремальными условиями огромных плотностей, энергий и температур, характеризующих ранние моменты вселенной. Это абсолютно важнейшая цель и она, во что верят многие физики, требует разработки так называемой *единой теории*.

Единая реальность

На протяжении последних нескольких столетий физики пытались объединить наши представления о естественном мире, для чего пытались показать, что несходные и, очевидно, особые явления в действительности управляются одним набором физических законов. Для Эйнштейна эта цель объединения – объяснение широчайшего массива явлений через несколько физических принципов – стала страстью жизни. Своими двумя теориями относительности Эйнштейн объединил пространство, время и гравитацию. Но этот успех только раззадорил его на большие размышления. Он мечтал найти простую и все в себя включающую систему взглядов, способную охватить все законы природы; он называл эту систему взглядов *единой теорией*. Хотя теперь и тогда распространялись слухи, что Эйнштейн нашел единую теорию, все такие заявления оказывались необоснованными; мечта Эйнштейна осталась неисполненной.

Эйнштейновская сосредоточенность на единой теории на протяжении последних тридцати лет его жизни отстранила его от генерального пути физики. Многие более молодые физики рассматривали его отшельнические поиски величайшей из всех теорий как бред великого человека, который в свои последние годы свернул на ложный путь. Но за десятилетия с момента ухода Эйнштейна растущее число физиков подхватили его незавершенный поиск. Сегодня разработка единой теории расценивается как одна из наиболее важных проблем теоретической физики.

За многие годы физики нашли, что центральной помехой для реализации единой теории является фундаментальный конфликт между двумя главными прорывными направлениями физики двадцатого века: общей теорией относительности и квантовой механикой. Хотя эти две системы обычно применяются в сильно отличающихся областях – общая теория относительности для больших тел вроде звезд и галактик, квантовая механика для малых тел вроде молекул и атомов, – каждая теория претендует на универсальность и на способность работать во всех областях. Однако, как отмечалось выше, как только теории используются в связке, их объединенные уравнения дают бессмысленные ответы. Например, когда квантовая механика используется с общей теорией относительности для расчета вероятности некоторого процесса или имеет место иное включение гравитации, ответ, который часто находится, не похож на ответ вроде вероятности 24 процента, или 63 процента или 91 процент; вместо этого из объединенной математики неожиданно появляется бесконечная вероятность. Такая высокая вероятность не означает, что вы должны биться об заклад на нее, поскольку ее можно вспугнуть. Вероятности более 100 процентов бессмысленны. Расчеты, которые производят бесконечную вероятность, просто показывают, что объединенные уравнения общей теории относительности и квантовой механики сходят с ума.

Ученые осведомлены о напряженных отношениях между общей теорией относительности и квантовой механикой больше половины века, но в течение долгого времени сравнительно немногие чувствововали необходимость поиска решения. Вместо этого большинство исследователей использовали общую теорию относительности исключительно для анализа больших и массивных объектов, тогда как для квантовой механики отводили задачу исключительно анализа малых и легких объектов, тщательно удерживая каждую теорию на безопасном расстоянии от другой, так что их взаимная враждебность держалась под контролем. В течение лет эта попытка ареста позволила достигнуть ошеломляющих успехов в нашем понимании каждой из областей, но это не привело к прочному миру.

Очень немногие области – экстремальные физические ситуации, в которых объекты и массивны и малы, – попали прямо в демилитаризованную зону, требуя, чтобы общая теория относительности и квантовая механика воздействовали одновременно. Центр черной дыры, в которую обрушиваются целые звезды под их собственным весом в мельчайшую точку, и Большой взрыв, в котором целая наблюдаемая вселенная, как предполагается, была сжата до ядрышка, значительно меньшего, чем отдельный атом, представляют два наиболее типичных примера. Без успешного союза между общей теорией относительности и квантовой механикой конец коллапсирующей звезды и начало вселенной навсегда останутся тайнами. Многие ученые были настроены сохранять эти области подальше друг от друга или, как минимум, откладывали раздумья о них до появления другой, более разрешимой проблемы.

Но некоторые исследователи не могли ждать. Конфликт среди известных законов физики означает неспособность ухватить глубинную истину, и этого было достаточно, чтобы легко удержать этих ученых от покоя. Те, кто глубоко задумывается, находят глубины вод и бурление потоков. На протяжении длительного времени исследователи добились лишь небольшого прогресса; вещи выглядели мрачными. Даже при этих условиях упорство тех, кто имел решимость установить курс и оставил в живых мечту об объединении общей теории относительности и квантовой механики, было вознаграждено. Ученые теперь записывают на свой счет пути, обнародованные такими исследователями, и приближаются к гармоничному слиянию законов большого и малого. Подход, который, как согласны многие, является лидером соревнований, это *теория суперструн* (Глава 12).

Как мы увидим, теория суперструн начинается с предложения нового ответа на старый вопрос: что является мельчайшей неделимой составляющей материи? В течение многих десятилетий общепринятый ответ был, что материя состоит из частиц – электронов и кварков, – которые моделируются как точки, которые неделимы и которые не имеют размера и внутренней структуры. Общепринятая теория утверждала, а эксперименты подтверждали, что эти частицы соединяются различными путями, образуя протоны, нейтроны и широкое разнообразие атомов и молекул, создавая все, с чем мы постоянно сталкиваемся. Теория суперструн рассказывает иную историю. Она не отрицает ключевую роль, которую играют электроны, кварки и другие виды частиц, проявляющихся в эксперименте, но утверждает, что эти частицы не являются точками. Вместо этого, в сответствии с теорией суперструн каждая частица составлена крошечной нитью энергии, в несколько сотен миллиардов миллиардов раз меньшей, чем отдельные атомные ядра (намного меньше, чем мы можем в настоящее время исследовать), которая имеет форму маленькой струны. И точно так же, как струна скрипки может вибрировать различными способами, каждый из которых создает различные музыкальные тона, нити теории суперструн также могут колебаться различными способами. Но эти колебания не производят различные музыкальные ноты; поразительно, теория утверждает, что они производят различные свойства частиц. Крошечная струна, вибрирующая одним образом, будет иметь массу и электрический заряд электрона; в соответствии с теорией такая колеблющаяся струна будет тем, что мы традиционно называем электроном. Крошечная струна, вибрирующая другим образом, будет иметь все необходимые свойства, чтобы идентифицировать ее как кварк, нейтрино или любой другой вид частицы. Все семейства частиц унифицируются в теории суперструн, поскольку каждая появляется из различных колебательных состояний (мод), осуществляемых одним и тем же лежащим в основании объектом.

Двигаясь от точек к струнам-которые-так-малы-что-выглядят-как-точки, можно не отследить, что такого ужасно важного изменится в перспективе. Однако такое есть. Из такого скромного начала теория суперструн объединяет общую теорию относительности и квантовую механику в единую последовательную теорию, изгоняя разрушительные бесконечные вероятности, от которых страдали первоначально предпринимавшиеся объединения. И если этого недостаточно, теория суперструн обнаруживает широкую необходимость вшивания всех сил природы и всей материи в один и тот же теоретический гобелен. Короче говоря, теория суперструн является главным кандидатом на роль единой теории Эйнштейна.

Это главные утверждения и они, если они правильны, представляют монументальный шаг вперед. Но более ошеломительная особенность теории суперструн, которая, я в этом почти не сомневаюсь, вызвала бы сердечный приступ у Эйнштейна, это ее глубокое воздействие на наши представления о ткани космоса. Как мы увидим, предлагаемый теорией суперструн синтез общей теории относительности и квантовой механики будет математически осмыслен, только если мы подвергнем нашу концепцию пространства-времени еще одному потрясению. Вместо трех пространственных измерений и одного временного измерения, следующих из повседневного опыта, теория суперструн требует *девяти* пространственных измерений и одного временного. А в более сильной инкарнации теории суперструн, известной как *М-теория*, объединение требует *десять* пространственных и одно временное измерение – космический фундамент складывается в целом из одиннадцати пространственно-временных измерений. Поскольку мы не видим эти дополнительные измерения, теория суперструн говорит нам, что *мы слишком бегло осмотрели ограниченный ломтик реальности*.

Конечно, отсутствие наблюдательного подтверждения дополнительных измерений может также означать, что они не существуют и что теория суперструн ложная. Однако, движение к такому заключению будет экстремально поспешным. Даже за десятилетия до открытия теории суперструн мечтательные ученые, включая Эйнштейна, обдумывали идею о пространственных измерениях вне тех, которые мы видим, и выдвигали возможности, где эти измерения могут быть скрыты. Струнные теоретики, по-существу, усовершенствовали эти идеи и нашли, что дополнительные измерения могут быть так тесно скрученными, что они слишком малы для нас или любого нашего существующего оборудования, чтобы их видеть (Глава 12), или он могут быть большими, но невидимыми в рамках тех способов, которыми мы исследуем вселенную (Глава 13). Каждый сценарий приводит к глубоким следствиям. Через их влияние на струнные колебания геометрический образ мельчайших скрученных измерений может содержать ответы на некоторые из самых основных вопросов, вроде того, почему наша вселенная имеет звезды и планеты. А пространство, обеспечиваемое большими дополнительными измерениями, может позволять даже нечто более примечательное: другие соседние миры – не соседние в обычном пространстве, а соседние в дополнительных измерениях, – о которых мы поэтому полностью не осведомлены.

Обе идеи существования дополнительных измерений не просто теоретическое парение в облаках. Они в скором времени могут быть проверены. Если они существуют, дополнительные измерения могут привести к зрелищным результатам в следующем поколении атомных ускорителей, таким как первая синтезированная человеком микроскопическая черная дыра или производство гигантского разнообразия новых, никогда ранее не наблюдавшихся видов частиц (Глава 13). Эти и другие экзотические результаты могут обеспечить первое проявление размерностей, лежащих вне непосредственно видимых, обеспечивая нам шаг к установлению теории суперструн, как давно разыскиваемой единой теории.

Если теория суперструн подтвердит свою точность, мы будем в силах допустить, что реальность, которую мы знаем, является тонким шелком, накинутым на толстую и богато структурированную ткань космоса. Вопреки декларации Камю, определение числа пространственных измерений – и, в особенности, нахождение, что их не просто три, – обеспечит намного больше, чем интересные для науки, но, в конечном счете, несущественные детали. Открытие дополнительных измерений покажет, что полнота человеческого опыта оставляет нас полностью неосведомленными об основных и существенных аспектах вселенной. Это будет сильнейший аргумент в пользу того, что даже те особенности космоса, которые мы представляли себе легко доступными для человеческих ощущений, могут не быть таковыми.

Реальность прошлого и будущего

С разработкой теории суперструн исследователи настроены оптимистично, что мы, наконец, имеем структуру, которая не разрушится при любых условиях, не важно, насколько экстремальных, позволяя нам когда-нибудь всмотреться с нашими уравнениями назад и изучить, что происходило в тот момент, когда вселенная, насколько мы это знаем, началась. На сегодня никто не достиг достаточной сообразительности, чтобы недвусмысленно применить теорию к Большому взрыву, но понимание космологии в соответствии с теорией суперструн становится одним из высших приоритетов сегодняшних исследований. На протяжении последних нескольких лет энергичные исследовательские программы по суперструнной космологии во всем мире привели к новым космологическим системам взглядов (Глава 13), предлагающим новые пути для проверки теории суперструн с использованиям астрофизических наблюдений (Глава 14) и обеспечивающим некоторые первые взгляды на роль, которую теория может сыграть в объяснении стрелы времени.

Стрела времени через определяющую роль, которую она играет в повседневной жизни, и ее интимную связь с началом вселенной лежит на уникальном пороге между реальностью, которую мы ощущаем, и более утонченной реальностью, которую наука переднего края пытается раскрыть. Раз так, то вопрос о стреле времени обеспечивает общую нить, которая бежит через многие разработки, которые мы будем обсуждать, и он снова и снова будет всплывать на поверхность в следующих главах. Это пробный камень. Среди многих факторов, формирующих жизнь, которую мы ведем, время находится среди наиболее доминирующих. Раз уж мы продолжаем добывать выгоды из теории суперструн и ее расширения, М-теории, наши космологические взгляды будут углубляться, делая видение и начала времени, и его стрелы все более четким. Если мы позволим нашему воображению двигаться совершенно свободно, мы можем даже узреть, что глубина наших представлений однажды позволит нам плавать в пространстве-времени и, следовательно, освободиться от пространственно-временных цепей, в которые мы были закованы тысячелетия (Глава 15).

Конечно, экстремально маловероятно, что мы когда-либо достигнем такой мощи. Но даже если мы никогда не добудем способности контролировать пространство и время, глубокое понимание принесет свои собственные возможности. Наше понимание истинной природы пространства и времени будет проверкой способностей человеческого интеллекта. Мы, наконец, придем к знанию пространства и времени – молчаливым, всегда присутствующим меткам, очерчивающим крайние границы человеческого опыта.

Совершеннолетие в пространстве и времени

Когда я много лет назад перевернул последнюю страницу *Мифа о Сизифе*, я был приятно удивлен текстом, который внушил объемлющее чувство оптимизма. Как-никак, когда человек приговорен к закатыванию камня на гору при полном знании, что он скатится вниз и ему потребуется начать закатывать камень снова, это не тот сорт историй, от которых вы можете ожидать счастливого конца. Однако Камю нашел сильную надежду в способности Сизифа бороться за свободу воли, давить на несокрушимое препятствие и утверждать свой выбор продолжения существования, даже когда он приговорен к абсурдному занятию в безразличной вселенной. За пределами прямого опыта, при прекращении любого поиска более глубокого понимания или глубокого смысла, утверждает Камю, Сизиф торжествует.

На меня произвела серьезное впечатление способность Камю находить надежду, когда многие другие будут видеть только безысходность. Но как юноша, и только после многих десятилетий я нашел, что я не могу принять утверждение Камю, что более глубокое понимание вселенной ничего не даст для того, чтобы сделать жизнь более богатой или достойной. В то время как Сизиф был героем Камю, величайшие ученые – Ньютон, Эйнштейн, Нильс Бор и Ричард Фейнман – стали моими. И когда я читал фейнмановское описание розы, – в котором он объяснял, как он может ощущать аромат и красоту цветка так же полно, как и любой другой человек, но как его знание физики весьма обогащает ощущения, поскольку он может также принять в изумлении и великолепии лежащие в основе молекулярные, атомные и субатомные процессы, – я крепко сел на крючок. Мне захотелось того, что описывал Фейнман: оценивать жизнь и ощущать вселенную на всех возможных уровнях, а не только на тех, что кажутся достижимыми нашим хрупким человеческим ощущениям. Поиск более глубокого понимания космоса стал моей плотью и кровью.

Как профессиональный физик, я долго осуществляю то, что было более наивным в моей институтской страсти к физике. Физики в целом не расходуют свои рабочие дни, созерцая цветы в состоянии космического трепета и мечтательности. Вместо этого мы уделяем большую часть нашего времени борьбе со сложными математическими уравнениями, написанными каракулями поперек исчерканной мелом доски. Прогресс может быть слабым. Многообещающие идеи, более часто, чем нет, приводят в никуда. Такова природа научного поиска. Хотя, даже в периоды минимального прогресса я нахожу, что только усилия, использованные на головоломки и расчеты, дают мне ощущение тесной связи с космосом. Я нахожу, что вы можете прийти к знанию вселенной не только разрешая ее тайны, но и также погружаясь с головой в них. Ответы велики. Ответы, подтвержденные экспериментом, еще более велики. Но даже ответы, которые в конце концов оказываются ложными, представляют результат глубокого свидания с космосом – свидания, которое излучает интенсивный свет на вопросы и, следовательно, на саму вселенную. Даже когда камень, ассоциирующийся с отдельным научным объяснением, оказывается катящимся назад в самое начало, мы, тем не менее, чему-то учимся и наши ощущения космоса обогащаются.

Конечно, история науки показывает, что камень наших коллективных научных исследований – с учетом вклада бесчисленных ученых через все континенты и столетия – не скатывается вниз с горы. В отличие от Сизифа, мы не начинаем все с самого начала. Каждое поколение наследует камень у предыдущего, отдает дань уважения тяжелой работе, проницательности, творчеству своих предшественников и понемногу толкает его дальше. Новые теории и более усовершенствованные измерения отмечают прогресс науки, и такой прогресс достраивает то, что пришло раньше, почти никогда не вытирая грифельную доску до чистоты. Поскольку это так, наша работа далека от абсурда или бесцельности. Вкатывая камень на гору, мы предпринимаем наиболее лучшие и благородные действия: обнаружив новое, мы сообщаем об этом заинтересованным людям, чтобы наслаждаться чудесами, которые мы открываем, и чтобы передать наши знания тем, кто идет следом.

Для представителя вида, который по космической шкале времени только сейчас научился ходить вертикально, предстоящие проблемы ошеломительны. Кроме того, за последние три столетия, пока мы продвигались от классической к релятивистской, а затем к квантовой реальности, и движемся сегодня к изучению единой реальности, наше мышление и инструменты охватили от края до края великие просторы пространства и времени, приведя нас ближе чем когда-либо к миру, который проявляет искусное мастерство маскировки. И поскольку мы продолжаем медленно снимать маски с космоса, мы зарабатываем хорошие знания, которые приходят только от приближения к ясности истины. Исследованиям еще очень далеко идти, но многим кажется, будто наш биологический вид, наконец, достиг окончания детства.

Несомненно, наше взросление здесь на окраине Млечного пути[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_1_6" \o ) происходит уже долгое время. Так или иначе, мы тысячи лет исследовали наш мир и обозревали космос. Но за большую часть этого времени мы совершали только ограниченные вторжения в неизведанное, каждый раз возвращаясь домой слегка более мудрыми, но сильно не изменившимися. Потребовалось вмешательство Ньютона, чтобы прочно установить флаг современного научного исследования, и никогда не возвращаться к старому. Мы с тех пор направились выше. И все наше путешествие начинается с простого вопроса.

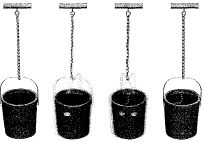
Что такое пространство?

**2 Вселенная и ведро**

***ПРОСТРАНСТВО – ПРИДУМАННАЯ ЧЕЛОВЕКОМ АБСТРАКЦИЯ ИЛИ ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ?***

**Н**ечасто бывает, чтобы ведро воды было в центре дебатов, длящихся триста лет. Но ведро, принадлежавшее сэру Исааку Ньютону, есть не обычное ведро, а маленький эксперимент, который он описал в 1689 году и который оказал с тех пор глубокое влияние на некоторых из величайших физиков мира. Эксперимент таков: берем ведро, наполненное водой, подвешиваем его на веревку, туго закручиваем веревку так, что она готова раскручиваться, и отпускаем ведро. Во-первых, ведро начинает вращаться, но вода внутри остается явно стационарной; поверхность стационарной воды остается гладкой и плоской. Когда ведро набирает скорость, мало-помалу его движение передается воде через трение, и вода начинает вращаться тоже. Когда это происходит, поверхность воды принимает вогнутый вид, выше возле обода и ниже в центре, как показано на Рис. 2.1.

Этот эксперимент – не совсем такой, от которого начинает сильно биться сердце. Но небольшое размышление покажет, что это ведро с вращающейся водой экстремально головоломно. И подход к его пониманию, что мы не могли сделать триста лет, оценивается как один из наиболее важных шагов к пониманию структуры вселенной. Понимание, почему тут возникает некоторое двойное дно, стоит усилий.



***Рис 2.1****Поверхность воды сначала плоская и остается такой, когда ведро начинает вращаться. Впоследствии, когда вода также начинает вращаться, ее поверхность становится вогнутой, и она остается вогнутой, пока вода вращается, даже когда ведро замедляется и останавливается. Реальность до Эйнштейна*

Слово "относительность" мы ассоциируем с Эйнштейном, но сама концепция гораздо старше. Галилей, Ньютон и многие другие были хорошо осведомлены, что скорость – быстрота и направление движения объекта – относительна. В современных терминах с точки зрения бейсболиста хорошо поданный быстрый мяч может делать приблизительно 100 миль в час. С точки зрения бейсбольного мяча есть подающий, чья скорость приблизительно 100 миль в час. Оба описания точны; это просто вопрос ракурса. Движение мыслится только в относительном смысле: скорость объекта может быть определена только по отношению к другому объекту. Вы, вероятно, ощущали это. Когда поезд, на котором вы находитесь, оказывается рядом с другим и вы видите относительное движение, вы не можете немедленно сказать, какой поезд на самом деле движется по рельсам. Галилей описывал этот эффект, используя транспорт его дней, а именно, корабли. Уроните монету на плавно плывущем судне, говорил Галилей, и она ударится у ваших ног точно также, как это будет на твердой земле. С вашей точки зрения вы можете определенно заявить, что вы стационарны, а вода обтекает корпус корабля. И поскольку с этой точки зрения вы не движитесь, движение монеты относительно ваших ног будет точно такое же, какое оно было до вашей посадки на корабль.

Конечно, есть условия, при которых ваше движение кажется существенным, когда вы можете чувствовать его и полагаете возможным заявить без помощи внешних сравнений, что вы определенно движетесь. Это происходит в случае ускоренного движения, то есть движения, при котором ваша скорость и/или ваше направление изменяются. Если лодка, на которой вы находитесь, неожиданно накреняетя тем или иным образом, или тормозится, или ускоряется или изменяет направление на круглой излучине реки, или попадает в водоворот и крутится круг за кругом, вы знаете, что вы движетесь. И вы определите это без оглядки по сторонам и без сравнения вашего движения с некоторой выбранной точкой отсчета. Даже если ваши глаза закрыты, вы знаете, что вы движетесь, поскольку вы чувствуете это. Итак, в то время как вы не можете чувствовать движение с постоянной быстротой, которое направлено по неизменной прямолинейной траектории, – так называемое движение с постоянной скоростью, – вы можете чувствовать изменения в вашей скорости.

Но, если вы подумаете об этом минуту, есть что-то странное во всем этом. Что такого есть вокруг изменений в скорости, что позволяет им оставаться особенными, иметь внутренний смысл? Если скорость есть нечто, что имеет смысл только при сравнениях, - говорят, что это движение по отношению к чему-либо, - как так получается, что изменения в скорости тем или иным образом отличаются и не требуют тоже сравнений для придания им смысла? Фактически, может ли быть, что они на самом деле требуют сделать сравнение? Может ли быть, что имеются некоторые неявные или скрытые сравнения, которые на самом деле работают все время, когда мы обращаем внимание или ощущаем ускоренное движение? Это центральный вопрос, к которому мы направляемся, так как, вообще-то неожиданно, он затрагивает глубочайшие проблемы, окружающие смысл пространства и времени.

Прозрения Галилея по поводу движения, его более всего цитируемое высказывание, что земля вертится, навлекли на него гнев инквизиции. Более осмотрительный Декарт в его *Принципах философии* пытался уклониться от аналогичной судьбы и выразил свое понимание движения в двусмысленной системе, которая не смогла подняться до замкнутых исследований, которые дал Ньютон почти через тридцать лет. Декарт говорил об объектах, которые сопротивляются изменению их состояния движения: нечто неподвижное будет оставаться неподвижным, пока кто-нибудь или некоторые силы не сдвинут его; нечто, движущееся по прямой линии с постоянной скоростью, будет сохранять это движение до того момента, пока кто-нибудь или какие-либо силы не изменят его. Но что, спрашивал Ньютон, в действительности означают эти термины "неподвижный" или "прямолинейный с постоянной скоростью"? Неподвижность или постоянная скорость по отношению к чему? Неподвижность или постоянная скорость с чьей точки зрения? Если скорость не постоянна, по отношению к чему или с чьей точки зрения она не постоянна? Декарт правильно обратил внимание на аспекты смысла движения, но Ньютон осознал, что он оставил без ответа ключевые вопросы.

Ньютон – человек столь неистовый в поисках истины, что однажды он втолкнул тупую иголку между своим глазом и углублением в кости, чтобы изучить глазную анатомию, и позже в жизни как магистр правосудия, вершил суровейшее наказание фальшивомонетчикам, послав более ста из них на виселицу, – не терпел фальшь или неполное обоснование. Так именно он решил применить письменную фиксацию опытов. Это им было введено ведро.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_1" \o )

Ведро

Когда мы оставили ведро, и оно и содержащаяся в нем вода вращались, а поверхность воды образовала вогнутую форму. Проблема, которую поднял Ньютон, в следующем: Почему поверхность воды приняла эту форму? Поскольку она вращается, скажете вы, и точно так, как мы ощущаем давление со стороны борта машины, когда та резко поворачивает, вода подвергается давлению со стороны стенок вращающегося ведра. И единственное, что остается сжатой воде, это двигаться вверх. Это обоснование звучит так же долго, как существует задача, но оно уклоняется от реальной цели ньютоновского вопроса. Он хотел знать, что это значит, сказать, что вода вращается: вращается по отношению к чему? Ньютон боролся за очень тщательное обоснование движения и был далеко не готов признать, что ускоренное движение, такое как вращение, каким-то образом оказывается не требующим внешних сравнений (\*).

*(\*) "Понятия центробежной и центростремительной сил иногда используются, когда описывается вращательное движение. Но они являются просто описательными обозначениями. Наша же цель понять, почему вращательное движение возникает".*

Естественное предположение состоит в использовании самого ведра как объекта отсчета. Но, утверждал Ньютон, это не проходит. Вы видите, во-первых, когда мы позволяем ведру начать вращаться, определенно имеется относительное движение между ведром и водой, поскольку вода не начинает двигаться немедленно. При этом поверхность воды еще остается плоской. Далее, немного позднее, когда вода вращается и нет относительного движения между ведром и водой, поверхность воды вогнута. Итак, если ведро есть наш объект отсчета, мы получаем в точности противоположное тому, что ожидали: когда есть относительное движение, поверхность воды плоская; а когда нет относительного движения, поверхность вогнута.

В действительности мы можем рассмотреть ньютоновский эксперимент с ведром на один небольшой шаг вперед. Когда ведро продолжает вращаться, веревка будет снова закручиваться (в другом направлении), замедляя вращение ведра и очень скоро наступит состояние покоя, в то время как вода внутри продолжает вращаться. В этот момент относительное движение между водой и ведром то же самое, как оно было вблизи самого начала эксперимента (исключая несущественное различие движения по и против часовой стрелки), но форма поверхности воды отлична (первоначально была плоская, а теперь остается вогнутой); это окончательно показывает, что относительное движение не может объяснить форму поверхности.

Исключив ведро из подходящих систем отсчета для движения воды, Ньютон смело сделал следующий шаг. Представьте, предлагает он, другую версию эксперимента с вращающимся ведром, который проводится в глубоком, холодном и полностью пустом пространстве. Мы не можем в точности провести тот же эксперимент, поскольку форма поверхности воды зависит частично от притяжения земной гравитации, а в этой версии Земля отсутствует. Так что, чтобы создать более подходящий пример, представим, что мы имеем огромное ведро, – столь же большое, как те, что качаются в увеселительных парках, – которое парит в темноте пустого пространства, и представим, что бесстрашный астронавт, Гомер, привязан ремнем к внутренней стенке ведра. (Ньютон на самом деле не использовал этот пример; он предлагал использовать два камня, связанных вместе веревкой, но суть от этого не меняется). Контрольное устройство отмечает, что ведро вращается, аналог воды прижимается наружу, представляя изогнутую поверхность, это то, что будет чувствовать Гомер, прижатый в направлении от внутренности ведра, кожа на его лице растянута, его желудок слабо сжат, а его волосы (обе пряди) вытянуты в направлении к стенке ведра. Вопрос: в полностью пустом пространстве – нет Солнца, нет Земли, нет воздуха, нет благ цивилизации, ничего нет – что могло бы, возможно, обеспечить "нечто", по отношению к чему вращается ведро? Во-первых, поскольку мы представили пространство полностью пустым, за исключением ведра и его содержимого, то кажется, что если там просто нет ничего, то и нечему служить чем-то. Ньютон не согласен.

Он находит ответ, фиксируя конечное вместилище как подходящую систему отсчета: само пространство. Он предполагает, что прозрачная пустая арена, в которую мы все погружены и внутри которой имеют место все движения, существует как реальная физическая сущность, которую он назвал *абсолютным пространством*.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_2" \o ) Мы не можем схватить или сжать абсолютное пространство, мы не можем попробовать его на вкус, или понюхать, или услышать, но, тем не менее, Ньютон декларировал, что абсолютное пространство это что-то. Оно есть нечто, предположил он, что обеспечивает правильный отсчет для описания движения. Объект действительно покоится, когда он покоится по отношению к абсолютному пространству. Объект действительно движется, когда он движется по отношению к абсолютному пространству. И самое важное, заключает Ньютон, объект действительно ускоряется, когда он ускоряется по отношению к абсолютному пространству.

Ньютон использовал это предположение для объяснения земного эксперимента с ведром следующим образом. В начале эксперимента ведро вращается по отношению к абсолютному пространству, но вода стационарна по отношению к абсолютному пространству. Это причина того, что поверхность воды плоская. Когда вода подхватывается ведром, она теперь вращается по отношению к абсолютному пространству, и поэтому ее поверхность становится вогнутой. Когда ведро тормозится перекрученной веревкой, вода продолжает вращаться – вращаться по отношению к абсолютному пространству – и это то, почему ее поверхность продолжает оставаться вогнутой. Итак, в то время как относительное движение между водой и ведром не может объяснить наблюдения, относительное движение между водой и абсолютным пространством может. Пространство само обеспечивает правильную систему отсчета для определения движения.

Ведро всего лишь пример; конечно, обоснование намного более общее. В соответствии со взглядами Ньютона, когда вы входите в изгиб дороги на машине, вы чувствуете изменение в вашей скорости потому, что вы ускоряетесь по отношению к абсолютному пространству. Когда самолет, в котором вы находитесь, готовится оторваться от земли, вы чувствуете давление со стороны вашего сидения, поскольку вы ускоряетесь относительно абсолютного пространства. С другой стороны, если кто-нибудь окажется в состоянии закрутить целую ледяную арену, в то время как вы стоите спокойно (предполагаем идеализированную ситуацию коньков без трения), – вызывая такое же относительное движение между вами и льдом, – вы не почувствуете, что ваши ноги ускользают из-под вас, поскольку вы не будете ускоряться относительно абсолютного пространства. И еще, просто чтобы убедить вас, что не надо упираться в несущественные детали примера, в котором использовалось человеческое тело, когда ньютоновские два камня, связанные вместе веревкой, приводятся во вращение в пустом пространстве, веревка туго натягивается, поскольку камни ускоряются по отношению к абсолютному пространству. Абсолютное пространство имеет последнее слово во всем, что подразумевает движение.

Но что такое абсолютное пространство на самом деле? Ньютон отвечал на основании кусочка фантазии и под действием настроения. Сначала он писал в*Принципах* "Я не определяю время, пространство, место и движение, поскольку [они] хорошо известны всем",[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_3" \o ) отсекая любые попытки описать эти концепции строго или точно. Его следующие слова стали знамениты: "Абсолютное пространство по своей природе, безотносительно к любому внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным". Итак, абсолютное пространство просто есть и есть вовеки. Пауза. Но есть намеки, что Ньютон не совсем комфортно чувствовал себя, просто декларируя существование и важность чего-то такого, что вы не можете непосредственно увидеть, измерить или затронуть. Он писал: "Несомненно, предметом великой сложности является описать и результативно охарактеризовать правильные движения отдельных тел из видимого, поскольку часть этого неподвижного пространства, в котором происходят эти движения, не дает способов попасть под наблюдение наших чувств".[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_4" \o ) Итак, Ньютон оставил нас в несколько неловком положении. Он ввел абсолютное пространство, фронт и центр в описании наиболее основного и существенного элемента физики – движения, – но он оставил его определение неясным и признал свой собственный дискомфорт в отношении положения такого важного яйца в такой эфемерной корзине. Многие другие разделили этот дискомфорт.

Пространственные трудности

Эйнштейн однажды сказал, что если кто-нибудь использует слова вроде "красный", "тяжелый" или "разочарованный", мы все, как правило, знаем, что он имеет в виду. Но как быть со словами "пространство", "чье отношение с психологическим опытом менее прямое, где существует далеко идущая неопределенность интерпретации".[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_5" \o ) Эта неопределенность простирается далеко: попытки подойти к пониманию свойств пространства тянутся из древности. Демокрит, Эпикур, Лукреций, Пифагор, Платон, Аристотель и множество их последователей сквозь эпохи тем или иным путем боролись со смыслом "пространства". Есть ли различие между пространством и материей? Имеет ли пространство существование независимо от присутствия материальных объектов? Есть ли такая вещь как пустое пространство? Являются ли пространство и материя взаимно исключающими? Конечно или бесконечно пространство?

В течение тысячелетий философские анализы пространства часто возникали в тандеме с теологическими изысканиями. Бог, в соответствии с некоторыми из них, вездесущ как идея, которая придает пространству божественный характер. Эта линия обоснования развивалась Генри Мором, теологом и философом семнадцатого столетия, который, как некоторые думают, мог быть наставником Ньютона.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_6" \o ) Он верил, что если пространство пустое, оно не может существовать, но он также обосновывал, что это не имеющее отношения к делу наблюдение, потому что, даже когда пространство свободно от материальных объектов, оно наполнено духом, так что оно никогда не бывает пустым по-настоящему. Ньютон сам говорил о версии этой идеи, позволяя пространству быть заполненным "духовной субстанцией", так же как и материальной субстанцией, но он озаботился добавить, что такой сверхъестественный материал "не может быть препятствием для движения материи; не более, чем если бы вообще ничего не было на ее пути".[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_7" \o )Абсолютное пространство, заявлял Ньютон, является областью чувств Бога.

Такие философские и религиозные размышления о пространстве могли быть убедительными и стимулирующими, однако, как в приведенном выше предостерегающем замечании Эйнштейна, им не хватало критической ясности описания. Но имеется фундаментальный и точно сформулированный вопрос, который появляется из таких рассуждений: должны ли мы приписывать пространству независимую реальность, как мы это делаем для других более обычных материальных объектов вроде книги, которую вы сейчас держите, или мы должны думать о пространстве просто как о языке для описания соотношений между обычными материальным объектами?

Великий немецкий философ Готфрид Вильгельм фон Лейбниц, который был современником Ньютона, твердо верил, что пространство не существует в любом общепринятом смысле. Разговор о пространстве, утверждал он, есть не более чем простой и общепринятый путь обозначения, где находятся вещи по отношению к другим вещам. Но без объектов в пространстве само пространство не имеет независимого смысла и существования. Подумаем об английском алфавите. Он содержит последовательность двадцати шести букв - он содержит такие соотношения, как за "а" следует "b", "d" есть шестая буква перед "j", "x" есть третья буква после "u" и так далее. Но без букв алфавит не имеет смысла – он не имеет "сверхбуквенного" независимого существования. Вместо этого алфавит приходит к бытию вместе с буквами, чьи лексикографические отношения он представляет. Лейбниц утверждал, что то же самое верно и для пространства: пространство не имеет смысла вне обеспечения естественного языка для обсуждения соотношений между положением одного объекта и другого. Следуя Лейбницу, если все объекты удалены из пространства – если пространство полностью пусто – оно будет так же бессмысленно, как алфавит, который потерял свои буквы.

Лейбниц далее предлагает ряд аргументов в поддержку своей так называемой *реляционистской* позиции. Например, он утверждает, что если пространство на самом деле существует как объект, как фоновая субстанция, Бог должен был бы выбрать, где в этой субстанции поместить вселенную. Но как может Бог, все решения которого имеют славу безошибочных и никогда не бывают случайны или бессистемны, иметь возможность различения одного положения в однородном вакууме пустого пространства от другого, хотя все они идентичны? Для чувствительных в научном плане ушей этот аргумент звучит слабо. Но если мы удалим теологический элемент, как сам Лейбниц делал в других аргументах, которые он предложил впоследствии, мы останемся с тяжелой проблемой: Что такое положение вселенной в пространстве? Если вселенная движется как целое, – оставляя все относительные положения материальных объектов нетронутыми, – десять шагов влево или вправо, как мы можем это знать? Что такое скорость целой вселенной через субстанцию пространства? Если мы фундаментально не способны детектировать пространство или изменения в пространстве, как мы можем утверждать, что оно действительно существует?

Это то, к чему Ньютон подошел со своим ведром и драматически изменил характер дебатов. Хотя Ньютон соглашался, что точные свойства абсолютного пространства кажется тяжело или вообще невозможно детектировать напрямую, он утверждал, что существование абсолютного пространства имеет следствия, которые наблюдаемы: ускорения, подобные тем, что действуют во вращающемся ведре, есть ускорения по отношению к абсолютному пространству. Так что вогнутая форма воды, согласно Ньютону, есть следствие существования абсолютного пространства. И Ньютон утверждал, что однажды кто-нибудь получит некоторое убедительное подтверждение существования чего-то такого, не важно, насколько косвенным путем, что положит конец дискуссии. Одним хитрым ударом Ньютон сдвинул дебаты о пространстве от философских размышлений к научно проверяемым данным. Эффект был ощутимым. В этом направлении Лейбниц был принужден согласиться: "я допускаю, что имеется разница между абсолютным правильным движением тела и всего лишь относительным изменением этой ситуации по отношению к другому телу".[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_8" \o ) Это не была капитуляция перед Ньютоновским абсолютным пространством, но это был сильный удар по твердой реляционистской позиции.

В течение следующих двухсот лет аргументы Лейбница и других против обозначения пространства, как независимой реальности, едва возбуждали эхо в научном сообществе.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_9" \o ) Вместо этого обсуждение явно повернулось к ньютоновскому взгляду на пространство; его законы движения, основанные на его концепции абсолютного пространства, заняли центральное положение. Несомненно, успех этих законов в описании наблюдений был существенной причиной их признания. Однако, требуется заметить, что сам Ньютон рассматривал все свои достижения в физике просто как формирование убедительного обоснования для поддержки того, что он рассматривал как свое действительно важное достижение: абсолютного пространства. Для Ньютона на этом вопрос о пространстве заканчивался.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_10" \o )

Мах и смысл пространства

Когда я еще рос, я играл в игру с моим отцом, когда мы гуляли по улицам Манхэттена. Один из нас оглядывался по сторонам и фиксировал про себя нечто, что происходило, – подъехал автобус, пижон уселся на подоконник, мужчина случайно уронил монетку, – и описывал, как это могло бы выглядеть из необычного ракурса, такого как колесо велосипеда, пижон в полете или квартал, провалившийся внутрь земли. Трудность была в выборе необычного описания вроде "я гуляю по темной цилиндрической поверхности, окруженной низкими ребристыми стенами, а хаотичная группа толстых белых усиков опускается с неба", что означало, что это был взгляд муравья, гуляющего по хот-догу, который уличный продавец украшает соусом. Хотя мы прекратили играть до того, как я получил свой первый урок физики, игра, по крайней мере, частично, виновата в том, что я получил изрядное количество затруднений, когда столкнулся с законами Ньютона.

Игра поощряла осмотр мира с различных точек наблюдения и особо подчеркивала, что каждая из них применима так же, как любая другая. Но в сответствии с Ньютоном, хотя вы определенно свободны обозревать мир с любого ракурса, который вы выберете, различные точки наблюдения при этом не означают равного положения. С точки зрения муравья на ботинке фигуриста имеется лед и арена, которые вращаются; с точки зрения наблюдателя на трибунах есть фигурист, который крутится. Две точки наблюдения, как кажется, должны быть одинаково применимы, они кажутся находящимися в равном положении, они кажутся находящимися в симметричном отношении, когда каждая вращается по отношению к другой. Хотя, согласно Ньютону, один из этих ракурсов более правильный, чем другой, поскольку, если в действительности есть фигурист, который вращается, его или ее руки отбрасываются наружу, тогда как, если в действительности есть арена, которая вращается, его или ее руки отбрасываться не будут. Принятие ньютоновского абсолютного пространства означает принятие абсолютной концепции ускорения и, особенно, принятие абсолютного ответа в отношении того, кто или что в действительности вращается. Я пытался понять, как это может быть правильным. Все источники, к которым я обращался, – книги, а также преподаватели, – соглашались, что только относительное движение уместно, когда рассматривается движение с постоянной скоростью, так почему же, я вечно ломаю голову, ускоренное движение будет столь отличным? Почему относительное ускорение, подобное относительной скорости, не может служить единственной вещью, которая пригодна для рассмотрения движения с непостоянной скоростью? Существование абсолютного пространства диктует другое, но для меня это кажется совершенно экстравагантным.

Много позже я изучил, что на протяжении последних нескольких столетий многие физики и философы – временами шумно, временами не привлекая всеобщего внимания, – боролись точно с такой же проблемой. Хотя кажется, что ньютоновское ведро определенно показывает, что абсолютное пространство есть то, что выбирает одну точку зрения среди других (если кто-либо или что-либо вращается относительно абсолютного пространства, он или оно действительно вращается; в противном случае нет), этот вердикт оставляет много людей, которые обдумывали эту проблему, неудовлетворенными. За пределами интуитивного восприятия, что ни один ракурс не должен быть "более верным", чем любой другой, и за пределами в высшей степени резонных предположений Лейбница, что только относительное движение между материальными объектами имеет смысл, концепция абсолютного пространства оставляет много таинственного, как абсолютное пространство может позволить нам правильно идентифицировать ускоренное движение, как с ведром, тогда как оно не может обеспечить способ идентификации движения с постоянной скоростью. Как-никак, если абсолютное пространство действительно существует, оно должно обеспечивать точку отсчета для всех движений, а не только для ускоренного. Если абсолютное пространство действительно существует, почему оно не может обеспечить способ для идентификации, где мы находимся в абсолютном смысле, чтобы не было нужно искать наше положение по отношению к другим материальным объектам, как к точке отсчета? И если абсолютное пространство действительно существует, как оно может влиять на нас (например, отбрасывая наши руки, если мы вращаемся), в то время как мы, несомненно, не имеем способа влиять на него?

В течение столетия после ньютоновских трудов эти вопросы временами дебатировались, но ничего не происходило до середины 1800х, когда на сцене появился австрийский физик и философ Эрнст Мах, который предложил смелый, точный и экстремально важный новый взгляд на пространство – взгляд, который в свое время среди других вещей оказал глубокое влияние на Альберта Эйнштейна.

Чтобы представить взгляды Маха – или, более точно, современное прочтение идей, часто приписываемых Маху\*, – вернемся на время к ведру. Есть кое-что странное в аргументах Ньютона. Эксперимент с ведром требует от нас объяснить, почему поверхность воды плоская в одной ситуации и вогнутая в другой. В погоне за объяснениями мы исследовали две ситуации и осознали, что ключевое отличие между ними, вращалась вода или нет. Конечно, мы пытались объяснить форму поверхности воды, аппелируя к состоянию ее движения. Но тут есть одна вещь: до введения абсолютного пространства Ньютон сосредоточился исключительно на ведре, как на возможной системе отсчета для определения движения воды, и, как мы видели, эта попытка провалилась. Но есть другие системы отсчета, которые мы можем естественным образом использовать для калибровки движения воды, такие как лаборатория, в которой проводится эксперимент – ее пол, потолок и стены. Или, если нам пришлось проводить эксперимент в солнечный день в открытом поле, окружающие здания, или деревья или почва под нашими ногами могут обеспечить "стационарную" систему отсчета для определения, вращается ли вода. И если нам пришлось проводить этот эксперимент во время парения в открытом пространстве, мы можем привлечь удаленные звезды в качестве нашей стационарной системы отсчета.

*(\*) "Имеются споры, касающиеся точных взглядов Маха на следующий ниже материал. Некоторые из его записей были немного двусмысленны, а некоторые из приписываемых ему идей выросли из более поздних интерпретаций его трудов. Поскольку он, кажется, был осведомлен об этих интерпретациях и никогда не предлагал уточнений, некоторые пришли к мысли, что он согласен с их заключениями. Но историческая точность будет лучше соблюдена, если всегда, когда я пишу "Мах утверждал" или "идеи Маха" вы будете читать это, подразумевая "доминирующую интерпретацию, предположительно инициированную Махом".*

Это приводит к следующему вопросу. Мог ли Ньютон отбросить в сторону ведро как систему отсчета с такой легкостью, что он слишком быстро перескочил через относительные движения, которые мы склонны привлекать в реальной жизни, такие как между водой и лабораторией, или водой и землей, или водой и фиксированными звездами в небе? Может ли быть, что такое относительное движение способно описать форму поверхности воды, устраняя необходимость введения концепции абсолютного пространства? Это была линия вопросов, которой занялся Мах в 1870е годы.

Чтобы понять точку зрения Маха более полно, представьте, что вы парите в открытом пространстве, полном тишины, в отсутствие движения и веса. Вы осматриваетесь, и вы можете видеть удаленные звезды, и они действительно являются совершенно стационарными. (Это настоящее мгновение дзен). И прямо в это время кто-либо подплывает, хватает вас за какую-нибудь опору и придает вам круговое вращение. Вы отметите две вещи. Первое, ваши ноги и руки будут чувствовать отталкивание от вашего тела и, если вы им позволите двигаться, они оттолкнутся прочь. Второе, когда вы пристально вглядываетесь в направлении звезд, они больше не будут казаться стационарными. Вместо этого они будут казаться вращающимися по большой круговой дуге через удаленные небеса. Ваш опыт, таким образом, обнаруживает тесную связь между ощущением силы, действующей на ваше тело, и очевидным движением по отношению к удаленным звездам. Сохраните это в уме, когда мы будем проводить эксперимент снова, но в отличающихся внешних условиях.

Теперь представьте, что вы погрузились в черноту полностью пустого пространства: нет звезд, нет галактик, нет планет, нет атмосферы, нет ничего, кроме полной черноты. (Настоящее экзистенциальное мгновение). В это время, если вы начнете вращаться, будете ли вы чувствовать это? Будут ли ваши ноги и руки казаться отталкивающимися прочь? Наш опыт в повседневной жизни приводит нас к ответу "да": всякий раз, когда мы изменяем состояние от отсутствия вращения (состояние, в котором мы не чувствуем ничего) к вращению, мы чувствуем разницу, так как наши конечности отталкиваются прочь. Но рассматриваемый пример не похож ни на что, что любой из нас когда-либо ощущал. Во вселенной, насколько мы ее знаем, всегда есть другие материальные объекты или вблизи, или, в самом крайнем случае, вдали (как удаленные звезды), что может служить системой отсчета для наших различных состояний движения. Однако, в этом примере для вас нет абсолютно никакого способа, чтобы отличить "не вращение" от "вращения" путем сравнения с другими материальными объектами; там нет никаких других материальных объектов. Мах принял это наблюдение близко к сердцу и продвинул его на гигантский шаг дальше. Он предположил, что в этом случае также не может быть никакого способа, чтобы почувствовать отличие между различными состояниями вращения. Более точно Мах доказывал, что в пространстве, пустом во всех иных отношениях, нет отличий между вращением и не вращением – там нет концепции движения или ускорения, если нет точки отсчета для сравнения, – так что вращение и не вращение есть одно и то же. Если ньютоновские два камня, связанные вместе веревкой, приведены во вращение во вселенной, пустой во всех остальных отношениях, Мах утверждает, что веревка останется ослабленной. Если вы вращаетесь вокруг себя во вселенной, пустой во всем остальном, ваши ноги и руки не будут отталкиваться прочь, и флюиды не будут влиять на ваши уши; вы ничего не будете чувствовать.

Это глубокое и тонкое утверждение. Чтобы действительно прочувствовать его, вам нужно поместить себя в пример, убедительно и полностью представляющий черное, однородное, неподвижное, абсолютно пустое пространство. Это не похоже на темную комнату, в которой вы чувствуете пол под вашими ногами, или в которой ваши глаза слабо различают маленькое количество света, просачивающееся снаружи через двери или окна; вместо этого вы представляете, что там нет вещей, так что нет пола и абсолютно нет света, чтобы привыкнуть к нему. Несмотря на то, что вы смотрите или протягиваете руку, вы абсолютно ничего не увидите и не почувствуете. Вы заключены в кокон неизменной черноты без каких-либо материальных точек отсчета для сравнения. А без таких точек отсчета, доказывает Мах, сами концепции движения и ускорения теряют смысл. Это не только то, что вы ничего не почувствуете, если вы вращаетесь; это более основная вещь. Во вселенной, пустой во всех остальных отношениях, состояния полной неподвижности и равномерного вращения неразличимы.\*

*(\*) "Хотя мне нравятся примеры с человеческим телом, поскольку они устанавливают немедленную связь между физикой, которую мы обсуждаем, и природными ощущениями, помехой является наша способность двигать по собственной воле одну часть нашего тела относительно другой – на самом деле для использования одной части нашего тела в качестве точки отсчета для движения других частей (вроде кого-нибудь, кто крутит одну из своих рук по отношению к своей голове). Я выделяю однородное вращательное движение – вращательное движение, в котором каждая часть тела вращается совместно с другими, – чтобы избежать таких не имеющих отношения к делу усложнений. Итак, когда я говорю о вращении вашего тела, представьте себе, что, подобно ньютоновским двум камням, связанным веревкой, или фигуристу в финальные моменты олимпийской программы, каждая часть вашего тела вращается в той же степени, как и любая другая."*

Ньютон, конечно, был не согласен. Он утверждал, что даже полностью пустое пространство все еще пространство. И хотя пространство не осязаемо или непосредственно не воспринимаемо, Ньютон доказывал, что оно все равно обеспечивает нечто, по отношению к чему о материальных объектах можно говорить как о движущихся. Но вспомним, как Ньютон пришел к этому заключению: он обдумывал вращательное движение и предположил, что результаты, привычные в лаборатории (поверхность воды становится вогнутой; Гомер чувствует давление со стороны стенки ведра; ваши руки отталкиваются прочь, когда вы раскручиваетесь; веревка, привязанная между двумя камнями, становится натянутой), останутся справедливыми, если эксперимент будет перенесен в пустое пространство. Это предположение привело его к поиску чего-нибудь в пустом пространстве, по отношению к чему движение может быть определено, и это что-нибудь он свел к самому пространству. Мах решительно опровергал ключевое предположение: он доказывал, что то, что происходит в лаборатории, не есть то, что будет происходить в полностью пустом пространстве.

Мах был первый, кто высказал существенные сомнения в ньютоновских работах за более чем два столетия, и со временем это внесло волну шока в сообщество физиков (и вне него: в 1909 во время жизни в Лондоне Владимир Ленин написал философский памфлет, который среди прочих вещей обсуждал аспекты трудов Маха[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_2_11" \o )). Но, если Мах прав и нет определения вращения в пустой во всех иных смыслах вселенной, – состояние дел, которое отвергает ньютоновские установки для абсолютного пространства, – то все еще остается проблема объяснения земного эксперимента с ведром, в котором вода определенно принимает вогнутую форму. Без обращения к абсолютному пространству, – если абсолютное пространство не есть что-то, – как Мах будет объяснять форму воды? Ответ появляется из размышлений о простых возражениях по поводу аргументов Маха.

Мах, движение и звезды

Представим вселенную, которая не полностью пуста, как рассматривал Мах, но, вместо этого, имеет просто горстку звезд, разбросанных по небу. Если вы теперь осуществляете эксперимент по вращению в открытом пространстве, звезды – даже если они кажутся всего лишь отблесками света, приходящего с громадного расстояния, – обеспечивают средство калибровки вашего состояния движения. Если вы начинаете вращаться, удаленные отблески света будут казаться крутящимися вокруг вас. И поскольку звезды обеспечивают визуальную систему отсчета, которая позволяет вам отличить вращение от не вращения, вы можете ожидать, что вы его тоже почувствуете. Но как могут несколько удаленных звезд создать такое отличие, что их присутствие или отсутствие почему-то действуют как тумблер, который включает или выключает ощущение вращения (или более общо, ощущение ускоренного движения)? Если вы можете почувствовать вращательное движение во вселенной просто с несколькими удаленными звездами, это вообще означает, что идея Маха просто ложная, - вероятно, как предполагал Ньютон, в пустой вселенной вы все еще будете чувствовать вращение.

Мах предложил ответ на это возражение. В пустой вселенной, согласно Маху, вы ничего не чувствуете, если вы вращаетесь (более точно, там даже нет концепции вращения против не вращения). С другого конца спектра, во вселенной, населенной всеми звездами и другими материальными объектами, существующими в нашей реальной вселенной, отталкивающие силы на ваши руки и ноги есть то, что вы ощущаете, когда вы действительно вращаетесь. (Испытайте это). И – в этом суть – во вселенной, которая не пуста, но которая имеет меньше материи, чем наша, Мах предположил, что силы, которые вы будете ощущать от вращения, будут лежать между полным отсутствием и тем значением, которое вы будете ощущать в нашей вселенной. Так что силы, которые вы ощущаете, пропорциональны количеству материи во вселенной. Во вселенной с одной звездой вы будете чувствовать исчезающе малое воздействие на ваше тело, если вы начнете вращаться. С двумя звездами воздействие будет чуть сильнее, и так далее и тому подобное, пока вы не придете к вселенной с содержанием материала как в нашей собственной, в которой вы почувствуете полное обычное воздействие от вращения. В этом подходе силы, которые вы чувствуете от ускорения, возникают как коллективный эффект, коллективное влияние всей другой материи во вселенной.

С другой стороны, предложенное содержит все виды ускоренного движения, не только вращение. Когда самолет, на котором вы находитесь, ускоряется на взлетной полосе, когда машина, в которой вы находитесь, скрипит тормозами перед остановкой, когда лифт, в котором вы находитесь, начинает подъем, идеи Маха подразумевают, что силы, которые вы ощущаете, представляют собой объединенное влияние всей остальной материи, наполняющей вселенную. Если там больше материи, вы будете чувствовать большую силу. Если там меньше материи, вы будете чувствовать меньшую силу. И если там нет материи, вы не будете чувствовать вообще ничего. Итак, следуя пути рассуждений Маха, только относительное движение и относительное ускорение имеют смысл. *Вы чувствуете ускорение только тогда, когда вы ускоряетесь относительно среднего распределения другого материала, населяющего космос*. Без другого материала – без какой-либо точки отсчета для сравнения – не будет способа ощутить ускорение, утверждает Мах.

Для многих физиков это одно из наиболее привлекательных предположений о космосе, сделанных в течение последних более чем ста лет. Поколения физиков находили его крайне волнующим, вместо предположения, что неприкасаемая, неощутимая, несжимаемая ткань космоса в действительности есть нечто - нечто материальное, достаточное для обеспечения окончательной, абсолютной точки отсчета для движения. Для многих кажется абсурдным или, по меньшей мере, научно безответственным основывать представления о движении на чем-то настолько незаметном, настолько полностью лежащем вне наших ощущений, что это граничит с мистикой. Однако, те же самые физики были настойчивы в вопросе, как же в этом случае объяснить ньютоновское ведро. Взгляды Маха действуют воодушевляюще, поскольку они дают возможность новых ответов, один из которых, что пространство не есть нечто, возвращает нас назад к реляционистской концепции пространства, которую защищал Лейбниц. Пространство, с точки зрения Маха, очень сильно похоже на то, что представлял Лейбниц, – это язык для выражения отношений между положениями одних объектов и положениями других. Но, как алфавит без букв, пространство не обладает независимым существованием.

Мах против Ньютона

Я изучал идеи Маха, когда я был студентом, и они были подарком Бога. Здесь, в конце концов, дана теория пространства и движения, которая ставит все точки зрения на одинаковое основание, поскольку только относительное движение и относительное ускорение имеют смысл. Вместо ньютоновской точки отсчета для движения – невидимого нечто, именуемого абсолютным пространством, – предлагаемая Махом точка отсчета находится вовне, доступная наблюдению всех, – материя, распределенная по всему космосу. Я чувствовал уверенность Маха, что это ответ. Я также узнал, что я не одинок среди имеющих такую реакцию; я проследовал вдоль длинной линии физиков, включая Альберта Эйнштейна, которые были ошеломлены, когда впервые столкнулись с идеями Маха.

Прав ли Мах? Привлек ли Ньютон такое внимание к воронке в своем ведре, что он пришел к невыразительному заключению относительно пространства? Существует ли ньютоновское абсолютное пространство, или маятник решительно склоняется к реляционистской перспективе? В течение первых нескольких десятков лет после введения Махом его идей эти вопросы не могли иметь ответа. Причина, большей частью, была в том, что предположения Маха не составляли полную теорию или описание, поскольку он никогда не пытался определить, каким образом содержимое вселенной оказывает предлагаемое воздействие. Если его идеи были бы верны, то как удаленные звезды и дом у дороги вносят вклад в ваше ощущение, что вы вращаетесь, когда вы поворачиваетесь вокруг? Без определения физического механизма для реализации его предположений было тяжело изучать идеи Маха с какой-нибудь точностью.

С нашей современной точки зрения разумной гипотезой является то, что гравитация может делать кое-что, оказывая влияния, содержащиеся в предположениях Маха. В следующие десятилетия эта возможность привлекла внимание Эйнштейна, и он почерпнул из предложений Маха большое вдохновение во время разработки своей собственной теории гравитации, общей теории относительности. Когда пыль от теории относительности окончательно осела, сам вопрос, является ли пространство чем-то – и чей взгляд на пространство является правильным, абсолютистский или реляционистский, – трансформировался таким образом, что вдребезги разбил все предыдущие способы рассмотрения вселенной.

**3 Относительность и абсолют**

***ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ – ПРИДУМАННАЯ ЭЙНШТЕЙНОМ АБСТРАКЦИЯ ИЛИ ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ?***

**Н**екоторые открытия обеспечивают ответы на вопросы. Другие открытия настолько глубоки, что бросают на вопросы совершенно новый свет, показывая, что предыдущие тайны не осознавались из-за недостатка знаний. Мы можем тратить время жизни – в античности некоторые так и делали – интересуясь тем, что произойдет, когда вы достигнете края земли, или пытаясь постигнуть, кто или что живет в земных недрах. Но когда вы изучите, что Земля круглая, вы увидите, что предыдущие тайны не решены; вместо этого они оказались не имеющими отношения к делу.

В течение первых десятилетий двадцатого столетия Альберт Эйнштейн совершил два глубоких открытия. Каждое повлекло за собой радикальную перетряску нашего понимания пространства и времени. Эйнштейн демонтировал жесткую абсолютную структуру, которую соорудил Ньютон, и выстроил свою собственную башню, объединив пространство и время способом, который был полностью неожиданным. Когда он закончил, время оказалось настолько перепутанным с пространством, что реальность одного нельзя больше обдумывать отдельно от реальности другого. Итак, к третьему десятилетию двадцатого века вопрос о реальности пространства устарел; настала, как мы коротко говорили об этом, эйнштейновская реформация: является ли пространство-время чем-то? С этим обманчиво незначительным изменением наши представления об арене реальности были полностью трансформированы.

Пусто ли пустое пространство?

Свет был главным героем в релятивистской драме, написанной Эйнштейном в первые годы двадцатого столетия. И это было заслугой Джеймса Клерка Максвелла, который подготовил почву для впечатляющих Эйнштейновских прозрений. В середине 1800х Максвелл открыл четыре важных уравнения, что, в первую очередь, установило строгую теоретическую основу для понимания электричества, магнетизма и их внутренних взаимоотношений.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_1" \o ) Максвелл разработал эти уравнения при тщательном изучении трудов английского физика Майкла Фарадея, который в начале 1800х провел десятки тысяч экспериментов, которые раскрыли до того времени неизвестные особенности электричества и магнетизма. Ключевым достижением Фарадея была концепция *поля*. Позже развитая Максвеллом и многими другими, эта концепция оказала громадное влияние на физические исследования во время последних двух столетий и легла в основу многих маленьких тайн, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни. Когда вы проходите через контроль в аэропорту, как происходит, что машина, которая не прикасается к вам, может определить, несете ли вы металлические объекты? Когда вы проходите флюорографическое обследование, как происходит, что прибор, который остается вне вашего тела, может выдать детальную картину ваших внутренностей? Когда вы смотрите на компас, как происходит, что вращающаяся стрелка указывает на север, даже если кажется, что ничто ее не подталкивает? Привычный ответ на последний вопрос привлекает земное *магнитное поле*, и концепция магнитного поля помогает объяснить также и предыдущие два примера.

Я никогда не видел лучшего способа понять внутренний смысл магнитного поля, чем демонстрационный опыт элементарной школы, в котором железные опилки рассыпаются вблизи бруска магнита. После легкого встряхивания железные опилки выстраиваются упорядоченным образом в виде арок, которые начинаются у северного полюса магнита и огибают его вокруг, чтобы закончиться у южного полюса магнита, как показано на рис.3.1. Картина, очерченная железными опилками, есть непосредственное проявление того, что магнит создает невидимое нечто, которое пронизывает пространство вокруг него, – нечто, которое может, например, вызывать силы, действующие на чешуйки металла. Невидимое нечто есть магнитное поле и в соответствии с нашей интуицией оно похоже на дымку или эссенцию, которая может заполнять область пространства и, тем самым, вызывать силы вне области физического присутствия самого магнита. Магнитное поле обеспечивает магниту то же, что армия обеспечивает диктатору и что аудиторы обеспечивают информационно-поисковой системе: влияние вне их физических границ, которое позволяет силам действовать вовне в виде "поля". Поэтому магнитное поле также называется *силовым полем*.



***Рис 3.1****Железные опилки, рассыпанные вблизи бруска магнита, очерчивают его магнитное поле. Эта способность магнитного поля распространяться и заполнять пространство делает его столь полезным. Магнитное поле в металлодетекторе аэропорта проникает сквозь вашу одежду и побуждает металлические объекты выдать наружу свои собственные магнитные поля – поля, которые затем оказывают обратное влияние на детектор, заставляя его подавать тревогу звонком. Магнитное поле флюорографического аппарата проникает в ваше тело, побуждая отдельные атомы вращаться по кругу точно таким образом, чтобы генерировать их собственные магнитные поля – поля, которые машина может обнаружить и декодировать в виде картины внутренних тканей. Магнитное поле Земли протекает через компас, окружая и вращая стрелку, заставляя ее указывать вдоль дуги поля, которая в результате чудовищно долгих геофизических процессов развернута примерно в направлении юг-север.*

Магнитные поля являются одним из привычных видов поля, но Фарадей также анализировал другой: *электрическое поле*. Это поле заставляет ваш шерстяной шарф потрескивать, обжигает вашу руку в покрытой ковром комнате, когда вы касаетесь металлической дверной ручки, и щиплет вашу кожу, когда вы поднимаетесь в горы во время мощной грозы. И если вам случится испытать компас во время такой грозы, направление его магнитной стрелки отклонится от курса, что в случае, когда электрические разряды молнии сверкают рядом, даст вам намек на глубокую взаимосвязь между электрическим и магнитным полями, – примерно это впервые было открыто датским физиком Гансом Эрстедом и тщательно исследовано Фарадеем путем дотошных экспериментов. Точно так, как развитие фондового рынка может влиять на рынок облигаций, который может, в свою очередь, влиять на фондовый рынок и так далее, эти ученые нашли, что изменения в электрическом поле могут производить изменения в близком магнитном поле, которое может затем вызвать изменения в электрическом поле и так далее. Максвелл нашел математический фундамент этой взаимозависимости, и, поскольку его уравнения показывают, что электрическое и магнитное поля переплетены так же, как волоски в растаманских ужасных прическах, они в конечном счете были названы*электромагнитными полями*, а влияние, которое они оказывают, *электромагнитными силами*.

Сегодня мы постоянно погружены в океан электромагнитных полей. Ваш сотовый телефон и автомобильное радио работают на громадных расстояниях, поскольку электромагнитные поля, передаваемые телефонными компаниями и радиостанциями покрывают впечатляюще широкие области пространства. То же самое относится к беспроводным Интернет-соединениям; компьютеры могут выудить целую WWW-сеть из электромагнитных полей, которые колыхаются вокруг нас, – фактически, прямо сквозь нас. Конечно, во времена Максвелла электромагнитные технологии были менее развиты, но среди ученых его подвиг был, тем не менее, признан: используя язык полей, Максвелл показал, что электричество и магнетизм, хотя они первоначально выглядели как отдельные явления, в действительности оказываются просто разными проявлениями одной физической сущности.

Позднее мы столкнулись с другими видами полей – гравитационные поля, ядерные поля, поля Хиггса и так далее – и стало все более ясно, что концепция поля является центральной для нашей современной формулировки физических законов. Но в то время следующий критический шаг в нашей истории произошел также из-за Максвелла. В дальнейшем анализе своих уравнений он нашел, что изменения или возмущения электромагнитного поля путешествуют подобно волнам с особой скоростью: 670 миллионов миль в час. Поскольку это в точности та величина, которую другие эксперименты нашли для скорости света, Максвелл заключил, что свет должен быть ничем иным, как электромагнитной волной, такой, что имеет правильные свойства для взаимодействия с химическими веществами в нашей сетчатке и дает нам чувство зрения. Это достижение сделало открытия Максвелла, уже великие, тем более выдающимися: оно связало силы, производимые магнитами, влияние, оказываемое электрическими зарядами, и свет, который мы используем, чтобы видеть вселенную, – но оно также подняло глубокий вопрос.

Когда мы говорим, что скорость света составляет 670 миллионов миль в час, ощущения и наши предыдущие обсуждения учат нас, что это будет бессмысленным утверждением, если мы не определим, относительно *чего* измеряется эта скорость. Забавная вешь, что уравнения Максвелла просто дают это число, 670 миль в час, без точного определения или очевидного указания на любую такую систему отсчета. Это было похоже на то, как если бы кто-нибудь указал место для вечеринки, как 22 мили севернее, без точного определения положения точки отсчета, без точного определения, севернее чего. Многие физики, включая Максвелла, пытались объяснить скорость в его уравнениях, действуя следующим образом: привычные волны, такие, как океанские волны или волны звука, переносятся посредством субстанции, среды-переносчика. Океанские волны переносятся водой. Звуковые волны переносятся воздухом. И скорость этих волн определяется *по отношению к среде-переносчику*. Когда мы говорим, что скорость звука при комнатной температуре составляет 767 миль в час (скорость, также известная как 1 Мах после того, как Эрнст Мах столкнулся с тем же ранее), мы имеем в виду, что звуковые волны путешествуют через неподвижный в других отношениях воздух с этой скоростью. Тогда, естественно, физики высказали догадку, что волны света – электромагнитные волны – должны также путешествовать через некую особенную среду, такую, которая никем не может быть увидена или детектирована, но которая должна существовать. Чтобы оказать этой невидимой светоносной материи должное почтение, ей было дано имя: *светоносный эфир*, или *эфир* для краткости, последнее суть античный термин, который Аристотель использовал для описания магической удерживающей субстанции, из которой, как представлялось, были сделаны небесные тела. И, чтобы привести это предложение в соответствие с результатами Максвелла, было выдвинуто предположение, что его уравнения неявно выражают взгляд кого-то, неподвижного по отношению к эфиру. Тогда 670 миллионов миль в час, появляющиеся в его уравнениях, есть скорость света относительно стационарного эфира.

Как вы можете видеть, имеется поразительное сходство между светоносным эфиром и ньютоновским абсолютным пространством. Они оба возникли в попытках обеспечить ссылку на систему отсчета для определения движения; ускоренное движение приводит к абсолютному пространству, движение света приводит к светоносному эфиру. Фактически, многие физики рассматривали эфир как приземленный взгляд на божественный дух, который, как были уверены Генри Мор, Ньютон и другие, пронизывает абсолютное пространство. (Ньютон и другие в его время даже использовали термин "эфир" в своем описании абсолютного пространства). Но что такое эфир в действительности? Что под ним понимать? Откуда он взялся? Везде ли он существует?

Эти вопросы об эфире те же самые, что сотни лет назад задавались об абсолютном пространстве. Но, в то время как полный принцип Маха для абсолютного пространства включал в себя круговое вращение в недостижимом полностью пустом пространстве, физики были в состоянии предложить исполнимые эксперименты для определения, существует ли эфир на самом деле. Например, если вы плывете по воде навстречу приходящей водяной волне, волна подступает к вам более быстро; если вы уплываете от волны, она подступает к вам более медленно. Аналогично, если вы движетесь через предполагаемый эфир навстречу или от наступающей световой волны, наступление световой волны по тем же причинам будет быстрее или медленнее, чем 670 миллионов миль в час. Но в 1887 году, когда Альберт Майкельсон и Эдвард Морли измеряли скорость света, они раз за разом находили точно ту же скорость 670 миллионов миль в час *независимо от их движения или от движения источника света*. Все разновидности искусных аргументов были придуманы, чтобы объяснить эти результаты. Может быть, предполагали некоторые, эксперименты непредумышленно сдвигали эфир вместе с тем, что двигается. Может быть, несколько смело, оборудование деформируется, когда оно движется через эфир, искажая результаты измерений. Но все это не сделало объяснение прозрачным, пока Эйнштейн не достиг своего революционного прозрения.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_2" \o )

Относительное пространство, относительное время

В июне 1905 года Эйнштейн написал статью с бесхитростным названием "К электродинамике движущихся тел", которая раз и навсегда повлекла за собой конец светоносного эфира. Одним ударом она также навсегда изменила наше представление о пространстве и времени. Эйнштейн формулировал идеи в статье в течение интенсивного пятинедельного периода в апреле и мае 1905 года, но спорные вопросы, которые она, наконец, похоронила, беспокоили его более десяти лет. В юности Эйнштейн боролся с вопросом, на что будет похожа световая волна, если вы догоняете ее точно со скоростью света. Поскольку вы и свет будете проносится через эфир точно с одной и той же скоростью, вы будете перемещаться полностью наравне со светом. А раз так, заключил Эйнштейн, с вашей точки зрения свет должен выглядеть так, как будто он не движется. Вы должны быть в состоянии потянуться и схватить в пригоршню неподвижный свет точно так, как вы можете зачерпнуть в горсть вновь выпавший снег.

Но здесь есть проблема. Она вызывается тем, что уравнения Максвелла не позволяют свету быть стационарным – то есть выглядеть так, как будто он все же стоит. И определенно, нет ни одного достоверного сообщения, что кто-то когда-либо действительно удерживал стационарный ком света. Итак, спрашивал юный Эйнштейн, что мы должны сделать с эти явным парадоксом?

Десятью годами позднее Эйнштейн дал миру свой ответ в его *специальной теории относительности (СТО)*. Было много дебатов касательно интеллектуальных источников эйнштейновского открытия, но не было сомнений, что его непоколебимая вера в простоту сыграла определяющую роль. Эйнштейн был осведомлен, по меньшей мере, о некоторых экспериментах, которые не смогли найти доказательство существования эфира. Так зачем зацикливаться на попытках найти то, что расходится с экспериментами? Вместо этого Эйнштейн декларировал простой подход: экспериментам не удалось найти эфир потому, что нет никакого эфира. И поскольку максвелловские уравнения описывают движение света – движение электромагнитных волн – не надо привлекать никакую среду, эксперимент и теория приводят к одному и тому же заключению: свет, в отличие от любых других когда-либо встречавшихся видов волн, не нуждается в среде для своего распространения. Свет одинокий путешественник. Свет может путешествовать сквозь пустое пространство. Но что тогда нам делать с уравнениями Максвелла, дающими свету скорость 670 миллионов миль в час? Если нет эфира, чтобы обеспечить стандарт покоя, то что это такое, по отношению к чему интерпретируется эта скорость? И снова Эйнштейн нарушил конвенцию и ответил с максимальной простотой. Если теория Максвелла не привлекает никакого особого стандарта покоя, то наиболее простое объяснение заключается в том, что нам не нужен такой стандарт. Скорость света, декларировал Эйнштейн, равна *670 миллионов миль в час относительно чего угодно и всегда*.

Итак, это определенно простое утверждение; оно хорошо согласуется с изречением, часто приписываемым Эйнштейну: "Делай все так просто, как это возможно, но не проще". Проблема в том, что оно также кажется сумасшедшим. Если вы бежите вслед за улетающим лучом света, здравый смысл диктует, что с вашей точки зрения скорость улетающего света должна быть меньше, чем 670 миллионов миль в час. Если вы бежите навстречу приближающемуся лучу света, здравый смысл диктует, что с вашей точки зрения скорость приближающегося света должна быть больше, чем 670 миллионов миль в час. На всем протяжении своей жизни Эйнштейн бросал вызов здравому смыслу, и этот случай не исключение. Он убедительно доказывал, что независимо от того, как быстро вы движетесь навстречу или прочь от луча света, вы всегда будете измерять его скорость 670 миллионов миль в час – ни на йоту быстрее, ни на йоту медленнее, несмотря ни на что. Это определенно решает парадокс, который ставил его в тупик в юности: теория Максвелла не допускает стационарного света, поскольку свет никогда не бывает стационарен; невзирая на ваше состояние движения, преследуете ли вы луч света, или убегаете от него, или просто стоите, свет сохраняет одну и ту же фиксированную и никогда не изменяющуюся скорость 670 миллионов миль в час. Но, мы естественно спросим, как может свет, вообще, вести себя таким странным образом?

Задумаемся на минуту о скорости. Скорость измеряется тем, как далеко что-либо сдвигается и как долго оно будет попадать в конечное состояние. Это измерение пространства (протяженность путешествия), поделенное на измерение времени (продолжительность перемещения). Всегда со времен Ньютона пространство рассматривалось как абсолютное, как существующее вовне, как существующее "безотносительно к чему-нибудь внешнему". Измерения пространства и пространственных промежутков должны, следовательно, также быть абсолютными: независимо от того, кто измеряет расстояние между двумя телами в пространстве, если измерения проведены адекватным образом, ответы всегда будут согласованы. И хотя мы еще не обсуждали это напрямую, Ньютон декларировал, что то же самое справедливо и для времени. Его описание времени в *Принципах* подражает языку, который он использовал для пространства: "Время существует само по себе и течет одинаково безотносительно к чему-нибудь внешнему". Другими словами, согласно Ньютону, имеется универсальная, абсолютная концепция времени, которая применима везде и всегда. Во вселенной Ньютона независимо от того, кто измеряет, сколько времени требуется для того, чтобы что-то произошло, если измерения проделаны аккуратно, ответы всегда будут согласованы.

Эти допущения о пространстве и времени совпадают с нашим повседневным опытом, и по этой причине являются основанием нашего заявления на основе здравого смысла, что свет должен перемещаться более медленно, если мы догоняем его. Чтобы увидеть это, представим, что Барт, который только что получил новую доску для скейта на ядерном двигателе, решает принять наивысший вызов и догнать луч света. Хотя он немного расстроился, увидев, что максимальная скорость доски равна только 500 миллионов миль в час, он решил дать ей шанс на лучший выстрел. Его сестра Лиза встала в готовности с лазером; она ведет обратный отсчет от 11 (любимое число ее героя Шопенгауэра), и когда она достигает 0, Барт и луч лазера стартуют на дистанцию. Что видит Лиза? Итак, за каждый прошедший час Лиза видит, что свет пролетел 670 миллионов миль, тогда как Барт – только 500 миллионов миль, так что Лиза правильно заключит, что свет обогнал Барта на 170 миллионов миль за час. Теперь привлечем Ньютона в нашу историю. Его взгляды требуют, чтобы наблюдения Лизы над пространством и временем являлись бы абсолютными и универсальными в том смысле, что кто угодно, если он проведет эти измерения, должен получить те же ответы. Для Ньютона такие факты о движении через пространство и время были так же объективны, как два плюс два равно четырем. Тогда, согласно Ньютону, Барт согласится с Лизой и сообщит, что луч света обогнал его на 170 миллионов миль за час.

Но когда Барт вернется, он не согласится совсем. Вместо этого он уныло заявит, что безразлично,что он делал – безразлично, сколько он выжимал из скейта, – он увидел скорость удаления света 670 миллионов миль в час, ни на йоту меньше.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_3" \o ) И если вы по неким причинам не верите Барту, примите во внимание, что на протяжении последних ста лет были проведены тысячи таких же дотошных экспериментов, которые измеряли скорость света, используя движение источников и приемников, обеспечивая точность проводимых наблюдений.

Как такое может быть?

Эйнштейн разгадал это, и найденный им ответ является логически еще более глубоким дальнейшим развитием нашего обсуждения. Должно быть, что измерения Бартом расстояний и длительностей, входные данные, которые он использует для вычисления, как быстро свет удаляется от него, отличаются от измерений Лизы. Подумайте об этом. Поскольку скорость есть ни что иное, как расстояние, деленное на время, для Барта нет иного пути, чтобы найти отличный от Лизиного ответ, как быстро свет убегает от него. Итак, заключил Эйнштейн, ньютоновские идеи об абсолютном пространстве и абсолютном времени ложны. Эйнштейн сделал вывод, что эксперименты людей, которые движутся друг относительно друга, как Барт и Лиза, не будут находить одинаковые значения измерений для расстояний и длительностей. Головоломные экспериментальные данные о скорости света могут быть объяснены, только если их восприятия пространства и времени различны.

Изощренный, но не злонамеренный

Относительность пространства и времени это поразительное заключение. Я знаю о ней более чем двадцать пять лет, но даже теперь, всякий раз, когда я спокойно сижу и обдумываю это, я удивляюсь. Из хорошо установленного утверждения, что скорость света есть константа, мы заключаем, что *пространство и время существуют в глазах очевидца*. Каждый из нас носит свои собственные часы, наш собственный монитор передвижения во времени. Каждые часы одинаково точны, хотя когда мы движемся относительно других, наши часы не согласуются. Их синхронизация расстраивается; они измеряют различные величины прошедшего времени между двумя выбранными событиями. То же самое справедливо и для расстояния. Каждый из нас носит свою собственную линейку, наш собственный монитор расстояния в пространстве. Каждая линейка одинаково точна, хотя когда мы движемся относительно других, наши линейки не согласуются; они измеряют различные расстояния между местоположениями двух определенных событий. Если бы пространство и время не вели себя указанным образом, скорость света не была бы постоянной и зависела бы от состояния движения наблюдателя. Но она постоянна; пространство и время ведут себя указанным образом. Пространство и время приспосабливаются таким образом, чтобы точно компенсировать различия в состоянии движения, так что наблюдения за скоростью света дают один и тот же результат независимо от скорости наблюдателя.

Получение количественных деталей того, насколько точно различаются измерения пространства и времени, более запутано, но требует только институтской алгебры. Это не глубины математики, которые делают эйнштейновскую специальную теорию относительности сложной. Это ступень, на которой идеи становятся чуждыми и очевидно не согласующимися с повседневным опытом. Но однажды Эйнштейн получил ключевое прозрение – объяснение, которое потребовалось ему для разрушения более чем двухсотлетних взглядов Ньютона на пространство и время, – оно было не сложным для выполнения в деталях. Он смог точно показать, как измерения одной персоной расстояний и длительностей должны отличаться от таких измерений другой персоны для обеспечения того, что каждый измеряет одинаковую скорость света.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_4" \o ) Чтобы понять более полный смысл того, что нашел Эйнштейн, представим себе Барта, который с тяжелым сердцем провел принудительную настройку своей доски для скейта, которая теперь имеет максимальную скорость 65 миль в час. Если он направляется точно на север с максимальной скоростью, – читая, посвистывая, зевая и иногда поглядывая на дорогу, – а затем вливается в автостраду, ведущую в северо-восточном направлении, его скорость в северном направлении будет меньше, чем 65 миль в час. Причина этого ясна. Сначала вся его скорость тратится на движение к северу, но когда он немного изменит направление, некоторая часть этой скорости отвлекается в восточном направлении, оставляя немного меньшую часть в северном направлении. Эта предельно простая идея, как ни странно, позволяет нам ухватить суть СТО. Начнем же:

Мы привыкли к факту, что объекты могут двигаться сквозь пространство, но есть иной вид движения, который одинаково важен: объекты также могут двигаться сквозь время. Прямо сейчас часы на вашем запястье и часы на стене отстукивают, показывая, что вы и все вокруг вас неотвратимо движетесь во времени, неотвратимо от одной секунды к другой и последующим. Ньютон думал, что движение через время полностью отделено от движения через пространство, – он думал, что эти два вида движения никак друг на друга не влияют. Но Эйнштейн нашел, что они теснейшим образом связаны. Фактически, революционное открытие СТО заключается в следующем: Когда вы смотрите на что-нибудь вроде припаркованного автомобиля, который стационарен с вашей точки зрения, – то есть, не движется через пространство, – все его движение есть движение через время. Автомобиль, его водитель, улица, вы, ваша одежда – все это движется через время с превосходной синхронизацией: секунда следует за секундой, отстукиваясь равномерно. Но если автомобиль уезжает, некоторая часть его движения через время тратится на движение через пространство. И точно так же, как скорость Барта в северном направлении уменьшается, когда он тратит некоторую часть своего движения к северу на движение к востоку, скорость автомобиля через время уменьшается, когда он тратит некоторую часть своего движения через время на движение через пространство. Это значит, что перемещение автомобиля через время замедляется и, следовательно, время протекает более медленно для движущегося автомобиля и его водителя, чем оно протекает для вас и всего, что остается стационарным.

Это, вкратце, и есть СТО. На деле, мы можем быть немного точнее и продолжить описание на один шаг дальше. Вследствие новой настройки скейта Барт не имеет иного выбора, кроме ограничения его максимальной скорости величиной 65 миль в час. Это важно для нашей истории, поскольку, если бы он достаточно ускорился, когда он повернул на северо-восток, он смог бы скомпенсировать изменение скорости и поэтому достиг бы той же самой исходной скорости в направлении к северу. Но из-за настройки, неважно, насколько сильно он нагружал двигатель скейта, его полная скорость – комбинация его скорости по направлению к северу и его скорости по направлению к востоку – остается фиксированной на максимуме 65 миль в час. Так что когда он меняет свое направление даже на йоту в сторону востока, он неизбежно получает уменьшение направленной на север скорости.

СТО декларирует аналогичный закон для любого движения: *общая скорость любого движения объекта через пространство и его движения через время всегда в точности равна скорости света*. Во-первых, вы можете инстинктивно отвергнуть это утверждение, поскольку все мы привыкли к идее, что ничто, кроме света, не может двигаться со скоростью света. Но эта привычная идея относится исключительно к движению через пространство. Мы же сейчас говорим о чем-то связанном, но к тому же более общем: об объединенном движении объекта через пространство и время. Ключевой факт, открытый Эйнштейном, что эти два вида движения всегда взаимно дополнительны. Когда припаркованный автомобиль, который вы видели, уезжает, реально происходит то, что некоторая часть его движения со скоростью света отвлекается от движения через время на движение через пространство, сохраняя полную объединенную скорость неизменной. Такое отвлечение неизбежно означает, что движение автомобиля через время замедляется.

В качестве примера, если Лиза могла бы увидеть часы Барта, когда он летел со скоростью 500 миллионов миль в час, она увидела бы, что они тикают примерно со скоростью две трети от скорости ее собственных часов. За каждые три часа, которые пройдут по часам Лизы, она увидит, что по часам Барта прошло только два часа. Его быстрое движение через пространство обеспечивает существенное снижение его скорости через время.

Более того, максимальная скорость через пространство достигается тогда, когда все движение со скоростью света через время полностью израсходуется на движение со скоростью света через пространство – это один из способов понять, почему через пространство невозможно двигаться со скоростью, большей скорости света. Свет, который всегда путешествует со скоростью света через пространство, особый случай, в котором всегда достигается такое полное отвлечение движения. И точно также, как движение точно на восток не оставляет движения для перемещения на север, движение со скоростью света через пространство не оставляет движения для перемещения во времени! Время останавливается, если что-то перемещается со скоростью света через пространство. Часы, которые несла бы частица света, не будут тикать совсем. Свет реализует мечту Понсе де Леона\* и косметической индустрии: он не стареет.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_5" \o )

Как прояснило это описание, эффекты СТО более заметны, когда скорости (через пространство) составляют существенную часть скорости света. Но непривычная, взаимодополнительная природа движения через пространство и время применима всегда. Чем меньше скорость, тем слабее отклонение от нерелятивистской физики, – то есть, от здравого смысла, – но отклонение все еще здесь, будьте уверены.

*(\*)"Испанский конкистадор Хуан Понсе де Леон (1460–1521) сопровождал Колумба в его второй экспедиции в "Западную Индию", с 1508 был губернатором острова Пуэрто-Рико, в 1513 открыл побережье Флориды, вел истребительные войны против индейцев. Известен настойчивыми поисками легендарного острова Бимини, где по слухам был источник вечной молодости. – (прим. перев.)".*

В самом деле. Это не умелая игра слов, ловкость рук или психологическая иллюзия. Это то, как работает наша вселенная.

В 1971 году Джозеф Хафеле и Ричард Китинг запустили в полет вокруг земного шара на коммерческом лайнере компании "Пан Америкэн" атомные часы, сделанные на разновидности радиоактивного цезия. Когда они сравнили летавшие на самолете часы с идентичными часами, остававшимися стационарными на земле, они нашли, что по движущимся часам протекло меньшее время. Разница была мизерная – несколько стомиллиардных долей секунды, – но она в точности соответствовала предсказаниям Эйнштейна. Вы не сможете получить большего удовлетворения, чем это.

В 1908 году начала распространяться информация, что новые, более изощренные эксперименты нашли доказательства существования эфира.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_6" \o ) Если бы это было так, это бы означало, что имеется абсолютный стандарт покоя и что СТО Эйнштейна не верна. Услышав этот слух, Эйнштейн заметил: "Господь Бог изощрен, но не злонамерен". Заглянуть глубоко в работу природы, чтобы выудить понимание пространства и времени, было чрезвычайной проблемой, одной из тех, которые беспокоили лучших вплоть до Эйнштейна. Но чтобы позволить такой потрясающей и прекрасной теории существовать, и при этом сделать ее не имеющей отношения к деятельности вселенной, надо быть злонамеренным. Эйнштейн таким не был; он выбросил из головы новые эксперименты. Его вера была крепкой. В конечном счете, эксперименты оказались ложными и светоносный эфир испарился из научной тематики.

А как насчет ведра?

Это, определенно, неплохая история о свете. Теория и эксперимент согласны, что свет не нуждается в среде для распространения его волн и что независимо от движения как источника света, так и наблюдающей персоны его скорость постоянна и неизменна. Любая выделенная точка отсчета действует на равных основаниях с любыми другими. Нет абсолютного или преимущественного стандарта покоя. Великолепно. Но как насчет ведра?

Вспомним, хотя многие рассматривали светоносный эфир как физическую субстанцию, придающую достоверность ньютоновскому абсолютному пространству, она ничего не сделала с тем, почему Ньютон ввел абсолютное пространство. Напротив, после спора по поводу ускоренного движения, такого как вращающееся ведро, Ньютон не высказал никаких альтернатив, кроме введения некоторого невидимого основополагающего материала, по отношению к которому движение может быть недвусмысленно определено. Уйдя от эфира, нельзя уйти от ведра, так как же Эйнштейн и его СТО справляется с этой проблемой?

Ну, честно говоря, в СТО главное внимание Эйнштейна было обращено на особый вид движения: *движение с постоянной скоростью*. Так было вплоть до 1915 года, почти десятью годами позже, когда он полностью подошел к пониманию более общего, ускоренного движения через свою общую теорию относительности. Но даже до того Эйнштейн и другие неоднократно рассматривали вопросы вращательного движения с использованием понятий СТО; они пришли к заключению, подобно Ньютону и вопреки Маху, что даже в пустой во всех других отношениях вселенной вы будете чувствовать отталкивание наружу от вращения – Гомер будет чувствовать давление со стороны внутренней стенки вращающегося ведра; веревка между двумя вращающимися камнями будет туго натянута.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_7" \o ) Демонтировав ньютоновское абсолютное пространство и абсолютное время, как Эйнштейн объяснил это?

Ответ неожиданный. Вопреки своему названию эйнштейновская теория не объявляет, что все относительно. СТО утверждает, что некоторые вещи относительны: скорости относительны, расстояния через пространство относительны, промежутки текущего времени относительны. Но теория на самом деле вводит великую, новую, полностью абсолютную концепцию: *абсолютное пространство-время*. Абсолютное пространство-время абсолютно для СТО так же, как абсолютное пространство и абсолютное время были для Ньютона, и частично по этой причине Эйнштейн не поддерживал или очень не любил название "теория относительности". Вместо этого, он и другие физики поддерживали название всеобщая теория, акцентируя внимание на том, что теория в своей сути включает нечто, с чем каждый согласится, нечто, что не является относительным.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_8" \o )

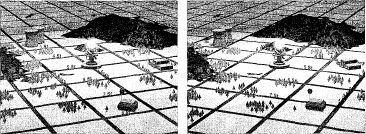
Абсолютное пространство-время является важной следующей главой в истории ведра, поскольку, даже если удалить все материальные точки отсчета для определения движения, абсолютное пространство-время СТО обеспечит нечто, по отношению к чему объект можно назвать ускоренным.

Разрезая пространство и время

Чтобы увидеть это, представим, что Марджи и Лиза, находя некоторую пользу в совместном времяпровождении, поступили на расширенный курс Института Бёрнса по возрождению городов. В качестве своего первого задания они получили перепланировку расположения улиц и аллей Спрингфилда (родного города семейки Симпсонов) в соответствии с двумя требованиями: первое, сетка улиц/аллей долна быть расположена так, чтобы Высотный Ядерный Монумент располагался прямо в центре сетки, на 5-й улице и 5-й аллее, и, второе, в проекте должны быть использованы улицы длиной 100 метров и аллеи, которые проходят перпендикулярно улицам, так что их длина тоже 100 метров. Прямо перед классом Марджи и Лиза сравнили свои проекты и пришли к выводу, что что-то ужасно неправильно. После необходимого планирования своей сетки, так что Монумент попал в центр, Марджи обнаружила, что супермаркет "Квик-е-Март" ("На скорую руку") находится вблизи угла 8-й улицы и 5-й аллеи, а атомная электростанция – у 3-й улицы и 5-й аллеи, как показано на Рис. 3.2а. Но в проекте Лизы адреса полностью отличаются: супермаркет находится вблизи угла 7-й улицы и 3-й аллеи, тогда как атомная электростанция – у 4-й улицы и 7-й аллеи, как показано на Рис. 3.2b. Ясно, что кто-то сделал ошибку.

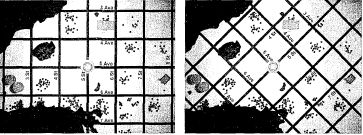
После минуты раздумий Лиза, однако, пришла к пониманию, что произошло. Ошибок нет. Она и Марджи обе правы. Они просто выбрали различные ориентации своих сеток улиц и аллей. Улицы и аллеи Марджи направлены под углом по отношению к Лизиным; их сетки повернуты относительно друг друга; они разделили Спрингфилд на улицы и аллеи двумя различными способами (см. Рис. 3.2c). Урок отсюда простой, хотя важный. Есть свобода в том, как в Спрингфилде – области пространства – можно организовать улицы и аллеи. Нет "абсолютных" улиц или "абсолютных" аллей. Есть широкий выбор, такой же приемлемый, как у Лизы, – или в любой другой возможной в указанном смысле ориентации сетки.

Запомним эту идею, когда будем дорисовывать время на картинках. Мы привыкли думать о пространстве как об арене вселенной, но физические процессы происходят в некоторой области пространства в течение некоторого интервала времени. В качестве примера представим, что Итчи (Чесун) и Скрэтчи (Скрипун) участвуют в дуэли, как показано на Рис.3.3а, и события записываются момент за моментом посредством тех самых перекидных книжек старых времен.



(а) (b)

***Рис 3.2****(а) Проект улиц Марджи, (b) Проект улиц Лизы.*

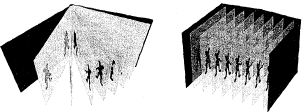


***Рис 3.2(с)****Обзор проектов планировки улиц/аллей Марджи и Лизы. Их сетки отличаются на поворот.*

Каждая страница представляет собой "временной срез" – подобно отдельному кадру в кинопленке, – который показывает, что происходит в области пространства в отдельный момент времени.\* (Конечно, пространство трехмерно, в то время как страницы двумерны, но допустим это упрощение для легкости размышлений и рисования фигур. Это не обесценит ни одно из наших заключений). По поводу терминологии, область пространства, рассматриваемая в течение интервала времени, называется областью пространства-времени; вы можете думать об области пространства-времени как о записи всех событий, которые происходили в некоторой области пространства в течение выбранного промежутка времени.

*(\*)"Подобно страницам в любой перекидной книжке, страницы на Рис. 3.3 показывают только характерные моменты времени. Это может подсказать вам интересный вопрос, является ли время дискретным или бесконечно делимым. Мы вернемся к этому вопросу позднее, а пока представим, что время бесконечно делимо, так что наша перекидная книжка на самом деле должна содержать бесконечное число страниц, вставленных между теми, которые показаны."*

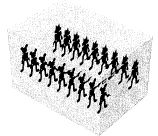
Теперь, следуя взгляду на эйнштейновскую математику, предложенную профессором Германом Минковским (который однажды назвал своего молодого студента ленивой собакой), рассмотрим область пространства-времени как сущность саму по себе: рассмотрим полную перекидную книжку как объект в его собственном порядке. Чтобы сделать это, представим, что, как на Рис. 3.3b, мы растянем переплет перекидной книжки, а затем представим, что, как на Рис.3.3c, все страницы полностью прозрачны, так что, когда вы смотрите на книжку, вы видите один непрерывный блок, содержащий все события, которые происходят в течение данного временного интервала. С этой точки зрения страницы должны мыслиться просто как обеспечение удобного способа организации содержимого блока – то есть организации событий



(а) (b)

***Рис 3.3****(а) Перекидная книжка о дуэли, (b) Перекидная книжка с растянутым переплетом в пространстве-времени. Также как сетка улиц/аллей позволяет нам простейшим образом определить положения объектов в городе, задавая их адреса через номер улицы и аллеи, разделение пространственно-временного блока на страницы позволяет нам простейшим образом определить события (Итчи стреляет из своего пистолета, Скрэтчи поражен и так далее) путем задания времени совершения события – страницы, на которой оно возникает, – и положения внутри области пространства, изображенной на странице.*

Здесь имеется важный момент: Точно так же, как Лиза осознала, что имеются отличающиеся, но равно применимые способы для разделения области пространства на улицы и аллеи, Эйнштейн осознал, что имеются отличающиеся, но равно применимые способы разделения области пространства-времени – блока, похожего на изображенный на Рис. 3.3c, – на области пространства в моменты времени.



**Рис*3.3(c)****Блок пространства-времени, содержащий дуэль. Страницы или "временные срезы" организуют события в блок. Промежутки между срезами оставлены только для визуальной ясности; они не означают предположения, что время дискретно, этот вопрос мы обсудим позднее.*

*Страницы на Рисунках 3.3 а, b и c*, – где, еще раз, каждая страница обозначает один момент времени, – *представляют лишь один из многих возможных способов разделения*. Это может звучать как совсем незначительное развитие того, что мы интуитивно знаем о пространстве, но это является основой для ниспровержения некоторых из наиболее важных интуитивных представлений, которыми мы пользуемся тысячи лет. До 1905 года бытовало представление, что каждый чувствует течение времени одинаково, что каждый согласится, что события происходят в данный момент времени, и отсюда, что каждый будет согласен с тем, что принадлежит данной странице перекидной книжки пространства-времени. Но когда Эйнштейн осознал, что два наблюдателя, движущиеся друг относительно друга, имеют часы, которые тикают различным образом, все это поменялось. Часы, которые двигаются относительно других, нарушают синхронизацию и, следовательно, дают различное представления об одновременности. Каждая страница на Рис. 3.3b является только взглядом одного наблюдателя на события в пространстве, имеющие место в данный момент его или ее времени. Другой наблюдатель, движущийся относительно первого, будет утверждать, что события на одной из этих страниц не все происходят в одно и то же время.

Это обстоятельство известно как *относительность одновременности*, и мы можем увидеть ее непосредственно. Представим, что Итчи и Скрэтчи, пистолеты в руках, находятся друг напротив друга на противоположных концах длинного движущегося железнодорожного вагона с одним судьей на поезде и с другим, исполняющим обязанности с платформы. Чтобы сделать дуэль настолько честной, насколько это возможно, все стороны договорились отказаться от правила, когда дуэль начинается на счет три, вместо этого дуэлянты начнут, когда взорвется маленькая кучка черного пороха, помещенная в середине пути между ними. Первый судья, Эп, поджигает фитиль, делает маленький глоток освежающего и отступает на шаг назад. Порох вспыхивает, и оба дуэлянта, Итчи и Скрэтчи, начинают стрелять. Поскольку Итчи и Скрэтчи находятся на одинаковом расстоянии от пороха, Эп определяет, что свет от вспышки достигнет их одновременно, так что он поднимает зеленый флаг и объявляет, что начало было честным. Однако второй судья, Мартин, который наблюдал с платформы, бурно протестует против нечестной игры, утверждая, что Итчи получил сигнал света от взрыва раньше, чем Скрэтчи. Он объясняет, что поскольку поезд движется вперед, Итчи направляется навстречу свету, тогда как Скрэтчи движется прочь от него. Это значит, что свет не может пролететь точно то же расстояние, чтобы достичь Итчи, так как они двигаются навстречу друг другу; более того, свет пролетит большее расстояние, чтобы достичь Скрэтчи, поскольку тот движется прочь от света. Поскольку скорость света, двигающегося налево или направо с чьей бы то ни было точки зрения, постоянна, Мартин утверждает, что свет задержался дольше, чтобы достичь Скрэтчи, поскольку он прошел большее расстояние, делая дуэль нечестной.

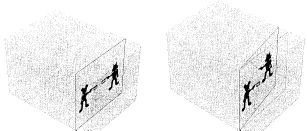
Кто прав, Эп или Мартин? Неожиданный ответ Эйнштейна состоит в том, что правы оба. Хотя заключения наших двух судей различаются, наблюдения и объяснения каждого безукоризненны. Так же, как в случае с подающим и бейсбольным мячом, они просто имеют различные точки зрения на одни и те же последовательности событий. Шокирующее обстоятельство, которое обнаружил Эйнштейн, что их различные точки зрения дают различные, но одинаково применимые утверждения о том, какие события происходят в одно и то же время. Конечно, при повседневных скоростях, подобных скорости поезда, расхождение мало – Мартин утверждает, что Скрэтчи увидит свет менее чем на миллиардную долю секунды позже Итчи, – но если бы поезд поехал быстрее, со скоростью порядка световой, различие во времени стало бы существенным.

Подумаем о том, что это означает для страниц перекидной книжки, рассекающих область пространства-времени. Поскольку наблюдатели, двигаясь друг относительно друга, не согласны с тем, какие вещи происходят одновременно, способы, которыми каждый из них будет разрезать блок пространства-времени на страницы, – с каждой страницей, содержащей все события, которые происходят в данный момент времени с точки зрения каждого наблюдателя, – также не будут в согласии. Вместо этого наблюдатели, двигающиеся друг относительно друга, разрежут блок пространства-времени на страницы, на временные сечения, различными, но одинаково применимыми способами. То, что Лиза и Марджи нашли для пространства, Эйнштейн нашел для пространства-времени.

Поворачивая разрезы

Аналогия между сеткой улиц/аллей и временными сечениями может быть продолжена еще дальше. Точно так, как проекты Марджи и Лизы отличаются на поворот, временные сечения Эпа и Мартина, их страницы перекидной книжки, также отличаются на поворот, но он теперь включает и пространство и время. Это показано на Рис. 3.4а и 3.4b, на которых мы видим, что сечение Мартина повернуто относительно сечения Эпа, приводя Мартина к заключению, что дуэль была нечестной. Существенное отличие деталей, однако, в том, что, тогда как угол поворота между схемами Марджи и Лизы являеся просто выбором дизайнера, угол поворота между сечениями Эпа и Мартина определяется их относительной скоростью. С минимальными усилиями мы можем увидеть, почему.

Представим, что Итчи и Скрэтчи помирились. Вместо того, чтобы пытаться пристрелить друг друга, они просто хотят убедиться, что часы в передней и задней частях вагона полностью синхронизированы. Поскольку они все еще находятся на равных расстояниях от кучки пороха, они решили осуществить следующий план. Они согласились установить свои часы точно на полдень, как только они увидят свет от вспышки пороха. С их точки зрения, свет пролетит одну и ту жедистанцию, чтобы достигнуть каждого из них, а поскольку скорость света постоянна, он достигнет каждого из них одновременно.



(а) (b)

***Рис 3.4****Временные сечения, соответствующие точкам зрения (а) Эпа и (b) Мартина, которые находятся в относительном движении. Их сечения отличаются на поворот через пространство и время. С точки зрения Эпа, который находится на поезде, дуэль честная; с точки зрения Мартина, который находится на платформе, нет. Обе точки зрения равно применимы. В (b) выделен угол, на который различаются их сечения пространства-времени.*

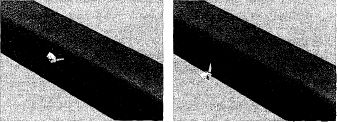
Но по тем же причинам Мартин и любой другой, кто смотрит с платформы, будет говорить, что Итчи направляется навстречу испущенному свету, тогда как Скрэтчи движется от него, так что Итчи получит световой сигнал немного раньше, чем Скрэтчи. Следовательно, наблюдатели на платформе прийдут к заключению, что Итчи установит свои часы на 12:00 раньше Скрэтчи и, следовательно, будут утверждать, что часы Итчи установлены на мгновение вперед часов Скрэтчи. Например, для наблюдателя на платформе вроде Мартина, когда на часах Итчи 12:06, на часах Скрэтчи может быть только 12:04 (точное значение зависит от длины и скорости вагона; чем длиннее он и чем быстрее движется, тем больше будет расхождение). Хотя с точки зрения Эпа и любого, кто находится на поезде, Итчи и Скрэтчи осуществили синхронизацию часов точно. Опять, хотя с этим тяжело полностью смириться, здесь нет никакого парадокса: *наблюдатели, находящиеся в относительном движении, имеют разные точки зрения на одновременность – они не согласятся с тем, что некоторые вещи происходят в одно и то же время*.

Это значит, что одна страница перекидной книжки, которая выглядит с точки зрения кого-нибудь на поезде как страница, содержащая события, рассматриваемые указанными наблюдателями как одновременные, – такие как установка часов Итчи и Скрэтчи, – содержит события, которые лежат на разных страницах с точки зрения тех, кто наблюдает с платформы (по мнению наблюдателей на платформе, Итчи установит свои часы *раньше* Скрэтчи, так что эти два события лежат на разных страницах с точки зрения наблюдателей на платформе). Ну, вот, мы это получили. Отдельная страница с точки зрения тех, кто на поезде, содержит события, которые лежат на более ранних или более поздних страницах с точки зрения наблюдателей на платформе. В этом причина того, почему сечения Мартина и Эпа на Рис. 3.4 повернуты друг относительно друга: то, что является временным разрезом, соответствующим одному моменту времени с одной точки зрения, распадается на многие временные разрезы с другой точки зрения.

Если бы ньютоновская концепция абсолютного пространства и абсолютного времени была справедлива, любой бы согласился с выделенным сечением пространства-времени. Каждое сечение будет представлять абсолютное пространство, как оно выглядит в данный момент абсолютного времени. Но это не то, как устроен мир; и переход от жесткого ньютоновского времени к вновь найденному эйнштейновскому гибкому влечет за собой сдвиг в наших представлениях. Вместо того, чтобы рассматривать пространство-время как жесткую перекидную книжку, временами можно думать о нем как об огромном, свежем батоне хлеба. И вместо фиксированных страниц, составляющих книжку, – фиксированных ньютоновских временных сечений – думать о большом количестве углов, под которыми вы можете разрезать батон на параллельные куски хлеба, как на Рис. 3.5а. Каждый кусок хлеба представляет пространство в один момент времени с точки зрения наблюдателя. Но, как иллюстрирует Рис. 3.5b, другой наблюдатель, движущийся относительно первого, будет резать пространственно-временной батон под другим углом. Чем больше относительная скорость двух наблюдателей, тем больший угол будет между их соответствующими параллельными сечениями (как объясняется в комментариях в конце книги[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_9" \o ), предельный выбор скорости, равной скорости света, приводит к максимальному углу поворота этих сечений в 45о) и тем больше расхождение между тем, о чем наблюдатели будут сообщать как о происходящем в один и тот же момент времени.

Ведро с точки зрения СТО

Относительность пространства и времени требует драматических изменений в нашем мышлении. Кроме того, есть важный момент, упоминавшийся ранее и проиллюстрированный теперь с помощью батона хлеба, который часто теряется: не все в теории относительности относительно. Даже если вы и я представим себе сечение батона хлеба двумя различными способами, все равно останется нечто, в чем мы будем полностью согласны друг с другом: цельность самого батона. Хотя наши сечения будут отличаться, если я представлю все мои сечения сложенными вместе, и вы представите то же самое для всех ваших сечений, мы восстановим тот же самый батон хлеба. И как может быть иначе? Мы оба представляли процедуру сечения одного и того же батона. Соответственно, цельность всех сечений пространства в подходящие моменты времени с точки зрения любого выделенного наблюдателя (см. Рис. 3.4) при их объединении дает ту же самую область пространства-времени.



(а) (b)

***Рис 3.5****Точно также, как батон хлеба может быть разрезан под разными углами, блок пространства-времени "режется по времени" наблюдателями, находящимися в относительном движении, под различными углами. Чем больше относительная скорость, тем больше угол (с максимальным углом 45°, соответствующим выбору максимальной скорости, равной скорости света).*

Другие наблюдатели рассекают область пространства-времени другими способами, но сама область, подобно батону хлеба, имеет независимое существование. Так что, хотя Ньютон определенно ошибался, его интуитивная уверенность, что имеется нечто абсолютное, нечто, с чем каждый будет согласен, не была полностью развеяна специальной теорией относительности. Абсолютное пространство не существует. Абсолютное время не существует. Но, в соответствии с СТО, существует абсолютное пространство-время. После этого обзора навестим еще раз наше ведро. Во вселенной, пустой во всех других отношениях, по отношению к чему ведро крутится? По Ньютону ответом было абсолютное пространство. По Маху в указанной ситуации не было смысла, в котором ведро могло бы быть даже названо вращающимся. По специальной теории относительности Эйнштейна ответ – абсолютное пространство-время.

Чтобы понять это, посмотрим еще раз на предложенное деление Спрингфилда на улицы и аллеи. Вспомним, что Марджи и Лиза не сошлись в определении адресов по улицам и аллеям для супермаркета и атомной электростанции, поскольку их сетки были повернуты друг относительно друга. Но независимо от того, как каждая выбирает расположение сетки, есть некоторые вещи, которые определенно остаются одинаковыми для обеих. Например, если в интересах повышения эффективности использования обеденного перерыва рабочих нарисован рельсовый путь по земле от атомной электростанции прямо до супермаркета, Марджи и Лиза не будут согласны с перечнем улиц и аллей, которые пересекают рельсы, как вы можете видеть на Рис. 3.6. Но они определенно согласятся с формой рельсов: они согласятся, что это прямая линия. Геометрическая форма нарисованного рельсового пути не зависит от того, какую специальную сетку улиц/аллей пришлось использовать.

Эйнштейн осознал, что нечто похожее верно и для пространства-времени. Даже если два движущихся друг относительно друга наблюдателя рассекают пространство-время различным образом, имеются вещи, с которыми они все равно согласны. Для начала рассмотрим прямую линию не просто через пространство, но через пространство-время. Хотя введение времени делает такую траекторию менее привычной, небольшое размышление раскрывает ее смысл. Для того, чтобы траектория объекта через пространство-время была прямой, объект должен не только двигаться по прямой линии через пространство, но его движение через время должно быть также однородным; так что как величина, так и направление его скорости должны быть неизменными, а следовательно, он должен двигаться с постоянной скоростью. Теперь, даже если различные наблюдатели рассекают батон пространства-времени под разными углами и, следовательно, будут не согласны в том, сколько времени протекло или какая дистанция покрыта между различными точками на траектории, такие наблюдатели будут, как Марджи и Лиза, все еще согласны с тем, является ли траектория через пространство-время прямой линией. Точно так же, как геометрическая форма нарисованного рельсового пути к торговому центру не зависела от использованного кем-то деления на улицы/аллеи, геометрическая форма траектории в пространстве-времени не зависит от использованного кем-то временного сечения.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_10" \o )

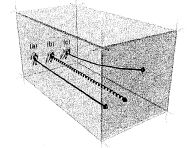
Это простое и, тем не менее, решающее утверждение, поскольку с ним специальная теория относительности обеспечивает абсолютный критерий – такой, что все наблюдатели, независимо от их постоянных относительных скоростей, согласятся с ним, – для решения, ускоряется или нет что-нибудь. Если траектория объекта, движущегося через пространство-время, есть прямая линия, как у мягко приземляющегося астронавта (а) на Рис. 3.7, он не ускоряется.



***Рис 3.6****Независимо от того, какая сетка улиц использована, каждый согласится, что форма рельсового пути, в данном случае, есть прямая линия.*

Если траектория движущегося объекта в пространстве-времени имеет любую другую форму, кроме прямой линии, он ускоряется. Например, пусть астронавт включает свой реактивный ранец и летает по кругу, снова и снова, как астронавт (b) на Рис. 3.7, или пусть он уносится в сторону глубокого пространства с все время возрастающей скоростью, как астронавт (с), его траектория через пространство-время будет искривляться – верный признак ускорения. Итак, с помощью этих заключений мы получили, что геометрическая форма траекторий в пространстве-времени обеспечивает абсолютный стандарт, определяющий, ускоряется ли что-либо. Пространство-время, но не отдельное пространство, обеспечивает точку отсчета для сравнения любых движений.

В этом смысле, следовательно, СТО говорит нам о том, что само пространство-время является окончательным арбитром для ускоренного движения. Пространство-время обеспечивает фон, по отношению к которому что-либо, вроде вращающегося ведра, может быть названо ускоряющимся, даже во вселенной, пустой во всех остальных отношениях. С этой точки зрения маятник опять качнулся назад: от реляциониста Лейбница к абсолютисту Ньютону, затем к реляционисту Маху, и теперь назад к Эйнштейну, чья СТО опять-таки показывает, что арена реальности, – выглядящая как пространство-время, но не как пространство, – является чем-то достаточным, чтобы обеспечить окончательную точку отсчета для движения.[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_11" \o )



***Рис 3.7****Пути через пространство-время, по которым двигаются три астронавта. Астронавт (а) не ускоряется и поэтому движется через пространство-время по прямой линии. Астронавт (b) периодически летает по кругу и поэтому движется через пространство-время по спирали. Астронавт (с) ускоряется в глубину пространства и поэтому движется по иной искривленной траектории в пространстве-времени.*

Гравитация и старый вопрос

В этом месте вы можете подумать, что мы достигли окончания истории с ведром, при этом идеи Маха дискредитированы, а радикальное обновление ньютоновских абсолютных концепций пространства и времени, сделанное Эйнштейном, одержало победу. Правда, однако, более тонкая и более интересная. Но если вы еще не привыкли к идеям, которые мы осветили так широко, вы можете нуждаться в перерыве, прежде чем продолжить активно заниматься последними секциями этой главы. В Таблице 3.1 вы можете найти краткий перечень для освежения вашей памяти, прежде чем вы снова будете готовы вступить в бой.

Хорошо. Если вы читаете эти слова, я делаю вывод, что вы готовы к восприятию дальнейшего значительного этапа в истории пространства-времени, этапа, инициированного, в значительной степени, никем иным, как Эрнст Мах. Хотя СТО, в отличие от теории Маха, пришла к выводу, что даже в пустом во всех иных отношениях пространстве вы будете чувствовать давление со стороны внутренней стенки вращающегося ведра и что веревка, привязанная между двумя крутящимися камнями, будет туго натянута, Эйнштейн остался глубоко восхищен идеями Маха. Однако он осознал, что серьезное рассмотрение этих идей требует их существенного развития. Мах на самом деле никогда не указывал на механизм, с помощью которого удаленные звезды и другая материя во вселенной могут играть роль в том, как сильно ваши руки отталкиваются прочь, когда вы крутитесь, или насколько сильно вы чувствуете давление со стороны внутренней стенки вращающегося ведра. Эйнштейн начал с подозрения, что если здесь имеется некий механизм, он должен быть как-то связан с гравитацией.

Это осознание было особенно привлекательно для Эйнштейна, поскольку в СТО, чтобы сохранить возможность довести анализ до конца, он полностью проигнорировал гравитацию.

***Таблица 3.1****Сводка различных позиций по поводу природы пространства и пространства-времени*.

|  |
| --- |
|  |
| НЬЮТОН Пространство есть нечто, реально существующее; ускоренное движение не относительно; абсолютистская позиция. |
| ЛЕЙБНИЦ Пространство реально не существует; все аспекты движения относительны; реляционистская позиция. МАХ Пространство реально не существует; ускоренное движение относительно к среднему распределению масс во вселенной; реляционистская позиция. |
| ЭЙНШТЕЙН Пространство и время индивидуально относительны; пространство-время (СТО) есть нечто, абсолютно реально существующее. |

 Возможно, рассуждал он, более сильная теория, которая будет включать в себя как СТО, так и гравитацию, придет к иному заключению относительно идей Маха. Возможно, предполагал он, обобщение СТО, которое включит в себя гравитацию, покажет, что материя, как близкая, так и дальняя, определит силы, которые мы чувствуем, когда мы ускоряемся.

Эйнштейн также привел вторую, отчасти более настоятельную причину для обращения его внимания на гравитацию. Он осознал, что СТО с ее центральным предписанием, что скорость света превышает любую скорость, с которой может путешествовать любое тело или любое возмущение, находится в прямом конфликте с ньютоновским универсальным законом тяготения, монументальным достижением, который более двух сотен лет предсказывал с фантастической точностью движение Луны, планет, комет, и всех тел, подброшенных в небо. И все же вопреки экспериментальным успехам закона Ньютона, Эйншиейн осознал, что в соответствии с Ньютоном гравитация распространяет свое действие от места к месту, от Солнца до Земли, от Земли до Луны, от чего угодно здесь до чего угодно там мгновенно, не затрачивая времени, намного быстрее света. И это прямо противоречит СТО.

Для иллюстрации противоречия представьте, что у вас случился полностью разочаровывающий вечер (клуб домашних бальных танцев распался, никто не вспомнил о вашем дне рождения, кто-то съел последний кусок сыра) и вам нужно немного побыть в одиночестве, так что вы забираете семейную лодку, чтобы немного расслабится в ночном катании по волнам. С Луной над головой вода высоко поднялась (из-за притяжения водяных масс за счет лунной гравитации и происходят приливы), и чудесные отблески лунного света танцуют на ее волнующейся поверхности. Но затем, как будто ваша ночь и так уже недостаточно надоела, враждебные инопланетяне стирают Луну и переправляют ее прямо поперек на ту сторону галактики. Определенно, неожиданное исчезновение Луны будет странным, но если закон тяготения Ньютона справедлив, это происшествие будет проявлять нечто еще более странное. Закон Ньютона предсказывает, что вода начнет отступать назад от высокого прилива из-за потери лунного гравитационного притяжения примерно на полторы секунды раньше, чем вы увидите исчезновение Луны с неба. *Как спринтер, выпрыгивающий раньше стартового пистолета, вода будет казаться отступающей на секунду с половиной быстрее, чем нужно*.

Причина в том, что согласно Ньютону в тот же момент, когда Луна исчезнет, ее гравитационное притяжение мгновенно исчезнет тоже, а без лунной гравитации приливы немедленно начнут уменьшаться. И еще, поскольку свету нужна секунда с половиной, чтобы пролететь четверть миллиона миль между Луной и Землей, вы не увидите немедленно, что Луна исчезла; в течение полутора секунд будет казаться, что приливы отступают от Луны, которая по-прежнему, как обычно, сияет над головой. Так что, согласно ньютоновскому подходу гравитация может влиять на нас быстрее света – гравитация может обогнать свет, – а этого, Эйнштейн выяснил определенно, не может быть.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_12" \o )

Итак, около 1907 года Эйнштейна захватила цель сформулировать новую теорию гравитации, которая, как минимум, была бы столь же точна, как и ньютоновская, но не вступала бы в противоречие со специальной теорией относительности. Это оказался вызов выше всех остальных. Гигантский интеллект Эйнштейна наконец вступил в эту схватку. Его записная книжка того периода заполнена наполовину сформулированными идеями, рядом с неудачами в которых маленькие ошибки приводили к долгим скитаниям по ложным путям, а восклицания, что он взломал проблему, быстро приводили к осознанию, что он сделал другие ошибки. Наконец, в 1915 году Эйнштейн вышел на свет. Хотя Эйнштейн в критических местах получал помощь, наиболее значительную от математика Марселя Гроссмана, открытие *общей теории относительности (ОТО)* было необыкновенной героической борьбой отдельного разума за овладение вселенной. Результат является драгоценным камнем, венчающим доквантовую физику.

Эйнштейновский путь к ОТО начался с ключевого вопроса, который Ньютон, до некоторой степени застенчиво, обошел двумя столетиями раньше. Как гравитация распространяет свое влияние через гигантские участки пространства? Как безмерно удаленное Солнце влияет на движение Земли? Солнце не касается Земли, так как же оно делает это? Короче говоря, как действует гравитация? Хотя Ньютон рассматривал уравнение, которое описывает действие гравитации с огромной точностью, он полностью осознавал, что он оставил без ответа важнейший вопрос о том, как гравитация работает в действительности. В своих *Принципах* Ньютон, морщась, писал: "Я оставляю эту проблему на рассмотрение читателя".[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_13" \o ) Как вы можете видеть, имеется сходство между этой проблемой и проблемой, которую Фарадей и Максвелл решили в 1800х годах, используя идею магнитного поля, в отношении способа, которым магнит оказывает воздействие на тела, которых он непосредственно не касается. Так что вы можете предложить сходный ответ; гравитация оказывает свое влияние через другое поле, гравитационное поле. И, грубо говоря, это правильное предположение. Но реализовать этот ответ способом, который не приводит к конфликту с СТО, это легче сказать, чем сделать. Намного легче. Это была та задача, которой Эйнштейн смело посвятил себя, и с помощью блестящей системы, которую он разработал после завершения десяти лет поисков в темноте, Эйнштейн сверг уважаемую ньютоновскую теорию гравитации. Что не менее изумительно, так это то, что история полностью прошла по кругу, поскольку ключевое прозрение Эйнштейна тесно связано с той самой проблемой, которую Ньютон выдвинул на первый план в истории с ведром: Какова правильная природа ускоренного движения?

Эквивалентность гравитации и ускорения

В СТО Эйнштейн главное внимание сосредоточил на наблюдателях, которые двигаются с постоянной скоростью, - наблюдателях, которые не чувствуют движения и, отсюда, все уверены в заявлении, что они стационарны, а остальной мир движется относительно них. Итчи, Скрэтчи и Эп на поезде не чувствуют никакого движения. С их точки зрения есть Мартин и любой другой на платформе, которые движутся. Мартин также не чувствует движения. Для него есть поезд и его пассажиры, которые находятся в движении. Ни одна из точек зрения не является более корректной, чем другая. Но ускоренное движение отличается, поскольку вы можете чувствовать его. Вы чувствуете, как вас вжимает в сидение автомобиля, который ускоряется вперед, вы чувствуете давление сбоку, когда поезд двигается по кругу на крутом повороте, вы чувствуете давление от пола лифта, который ускоряется вверх.

Тем не менее, силы, которые вы чувствовали, Эйнштейн отбросил как очень привычные. Когда, например, вы приближаетесь к резкому повороту, ваше тело сжимается, поскольку вы пристегнуты, от давления сбоку, так как надвигающаяся на вас сила неотвратима. Нет способа защититься от ее влияния. Единственный способ уклониться от силы, это изменить ваши планы и не входить в поворот. Это прозвучало для Эйнштейна громким колоколом. Он понял, что точно такие же особенности характеризуют гравитационное поле. Если вы стоите на планете Земля, вы подвергаетесь гравитационному притяжению от планеты Земля. Это неизбежно. Нет способа уклониться от этого. В то время, как вы можете экранировать себя от электромагнитных и ядерных полей, нет способа экранироваться от гравитации. И в один из дней 1907 года Эйнштейн осознал, что это была не просто аналогия. В одной из тех вспышек озарения, в страстном желании которых ученые проводят свою жизнь, Эйнштейн осознал, что гравитация и ускоренное движение суть две стороны одной монеты.

Точно так же, как при изменении вашего запланированного движения (чтобы избежать ускорения), вы можете избежать ощущения вжимания в сидение вашего автомобиля или ощущения давления сбоку в поезде, Эйнштейн понял, что подходящим образом изменяя ваше движение, вы можете также избежать ощущений от обычных восприятий, связанных с гравитационным притяжением. Идея чудесно проста. Чтобы понять ее, представим, что Барни отчаянно хочет попытаться выиграть Спрингфилдские игры, месячной длины соревнования среди всех мужчин, борющихся с длиной ремня, чтобы посмотреть, кто избавится от наибольшего количества дюймов. Но после двух недель жидкой диеты (пиво), когда он все еще имел отвратительную форму, судя по весам из бассейна, он потерял всякую надежду. Итак, в приступе отчаяния он выпрыгнул через окно бассейна с весами, привязанными к его ступням. Во время его пути вниз, точно перед тем как отвесно упасть в бассейн его соседа, Барни взглянул на шкалу весов, и что же он увидел? Эйнштейн был первым, кто осознал и осознал полностью, что Барни будет видеть снижение цифры на шкале весов до нуля. Весы падают точно таким же образом, как это делает Барни, так что его ступни не давят на них. *В свободном падении Барни ощущает такое же отсутствие веса, какое ощущают астронавты во внешнем пространстве*.

Фактически, если мы представим, что Барни выпрыгнул из своего окна в большую печную трубу, из которой был удален весь воздух, так что на его по пути вниз не только будет ликвидировано сопротивление воздуха, но, поскольку каждый атом его тела будет падать в точно одинаковом темпе, все обычные внешние телесные нагрузки и растяжения – его ступни подталкивают его лодыжки, его ноги упираются в его бедра, его руки оттягивают его плечи – будут также ликвидированы.[[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_14" \o ) Закрыв свои глаза в ходе десантирования, Барни будет чувствовать в точности то же самое, что почувствовал бы, если бы он плавал в темноте глубокого пространства. (И, опять же, если вы предпочитаете не связанные с человеком примеры: если вы роняете два камня, связанные веревкой в безвоздушную трубу, веревка останется ослабленной, точно такой, какой она будет, если камни плавают во внешнем пространстве). Итак, путем изменения своего состояния движения – путем полной "отдачи во власть гравитации" – Барни способен сымитировать безгравитационное окружение. (В качестве фактического материала, НАСА тренирует астронавтов для нахождения в безгравитационном окружении внешнего пространства тем, что берет их в полет на модифицированном Боинге 707, имеющем кодовое название Рвотная Комета, который периодически входит в состояние свободного падения).

Аналогично, подходящим изменением в движении вы можете создать силу, которая, по существу, идентична гравитации. Например, представим, что Барни присоединился к астронавтам, плавающим без веса в их пространственной капсуле, с весами из бассейна, все еще привязанными к его ступням и все еще показывающими нуль. Если капсула включит свои двигатели и ускорится, ситуация существенно изменится. Барни почувствует давление на пол капсулы, точно также как вы чувствуете давление на пол поднимающегося с ускорением лифта. И поскольку ступни Барни теперь давят на весы, их показания больше не равны нулю. Если капитан включит двигатели точно с нужной силой, показания весов будут в точности те, которые Барни видел в бассейне. Через подходящее ускорение Барни теперь чувствует силу, которая неотличима от гравитации. То же самое верно для других видов ускоренного движения. Пусть Барни присоединился к Гомеру в ведре во внешнем пространстве и, как и ведро, крутится, стоя справа от Гомера, – ступни и весы возле внутренней стенки ведра, – весы будут регистрировать ненулевые показания, поскольку его ступни будут давить на них. Если ведро крутится точно в нужном темпе, весы выдадут те же показания, которые Барни находил ранее в бассейне: ускорение крутящегося ведра также имитирует земную гравитацию.

Все это привело Эйнштейна к заключению, что сила, которая ощущается от гравитации, и сила, которая ощущается от ускорения, есть одна и та же сила. Они эквивалентны. Эйнштейн назвал это *принципом эквивалентности*.

Посмотрим, что это означает. Прямо сейчас вы ощущаете влияние тяготения. Если вы стоите, ваши ступни чувствуют пол, поддерживающий ваш вес. Если вы сидите, вы чувствуете поддержку кое-где в другом месте. И пока вы читаете в самолете или в автомобиле, вы, вероятно, также думаете, что вы стационарны, – что вы не ускоряетесь или даже совсем не двигаетесь. Но, в соответствии с Эйнштейном, на самом деле вы ускоряетесь. Поскольку вы все еще сидите, это звучит немного глупо, но не забывайте задать обычный вопрос: ускоряемся в соответствии с какой точкой отсчета? Ускоряемся с какой точки зрения?

Со своей СТО Эйнштейн провозгласил, что абсолютное пространство-время обеспечивает точку отсчета, но СТО не принимает во внимание гравитацию. Тогда с учетом принципа эквивалентности Эйнштейн предложил более ясную точку отсчета, которая включает эффекты гравитации. И это повлекло за собой радикальные изменения в точке зрения. *Поскольку гравитация и ускорение эквивалентны, если вы чувствуете влияние гравитации, вы должны ускоряться*. Эйнштейн утверждал, что только те наблюдатели, которые совсем не чувствуют силы, – включая силу гравитации, – оправданно могут утверждать, что они не ускоряются. Такие свободные от воздействия сил наблюдатели обеспечивают правильные точки отсчета для обсуждаемого движения, и это понимание означает, что требуется значительное изменение взглядов на способ, которым мы обычно думаем о таких вещах. Когда Барни выпрыгнул из своего окна в пустую трубу, мы, как обычно, описывали его как ускоряющегося вниз к земной поверхности. Но это не то, с чем согласится описание Эйнштейна. В соответствии с Эйнштейном Барни не ускоряется. Он не чувствует сил. Он не имеет веса. Он чувствует, как он парит в глубокой темноте пустого пространства. Он обеспечивает стандарт, с которым должны сравниваться все движения. И при этом сравнении, когда вы невозмутимо читаете дома, вы ускоряетесь. С точки зрения Барни, когда он свободно падает от своего окна, – с точки зрения правильной, согласно Эйнштейну, точки отсчета для движения, – вы, и Земля, и все другие вещи, которые мы обычно рассматриваем как стационарные, *ускоряются вверх*. Эйнштейн утверждал, что это была голова Ньютона, которая стремительно бросилась на встречу с яблоком, а не наоборот.

Ясно, что это радикально другой способ размышлений о движении. Но он закреплен в простом утверждении, что вы чувствуете влияние гравитации, только когда вы сопротивляетесь ей. Наоборот, когда вы полностью поддаетесь гравитации, вы не чувствуете ее. Предполагая, что вы не подвергаетесь любым другим воздействиям (таким, как сопротивление воздуха), когда вы поддаетесь гравитации и позволяете себе падать свободно, вы чувствуете, как будто вы свободно парите в пустом пространстве, – точка зрения, которую мы без колебаний рассматриваем как не ускоренную.

Подводя итоги, только те индивидуумы, которые свободно парят, безотносительно к тому, находятся ли они в глубинах внешнего пространства или на пути к столкновению с земной поверхностью, будут справедливы, утверждая, что они не чувствуют ускорения. Если вы следуете за таким наблюдателем и имеется относительное ускорение между вами двумя, то, согласно Эйнштейну, вы ускоряетесь.

В качестве фактического примера отметим, что ни Итчи, ни Скрэтчи, ни Эп, ни Мартин не могут в полном смысле слова быть уверены в своих словах, что они были стационарны во время дуэли, поскольку все они чувствовали притяжение от гравитации вниз. Это никак не сказывается на нашей предыдущей дискуссии, поскольку там мы были ограничены только горизонтальным движением, движением, которое не было подвержено вертикальному тяготению, ощущавшемуся всеми участниками. Но как важный пункт идеи, связь, которую Эйнштейн нашел между гравитацией и ускорением, означает, еще раз, что мы уверены только в наблюдаемой стационарности тех наблюдателей, которые не чувствуют каких бы то ни было сил.

Изобретя связь между гравитацией и ускорением, Эйнштейн был теперь готов принять вызов Ньютона и найти объяснение, как гравитация оказывает свое воздействие.

Деформации, искривления и гравитация

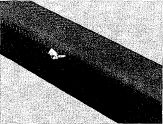
В СТО Эйнштейн показал, что каждый наблюдатель разрезает пространство-время на параллельные сечения, которые он или она рассматривает как представляющие все пространство в последовательные моменты врмени, с неожиданным поворотом, что наблюдатели, двигающиеся относительно других с постоянной скоростью будут разрезать пространство-время под другим углом. Если один такой наблюдатель начнет ускоряться, вы можете предположить, что изменения момент-за-моментом в его скорости и/или в направлении движения будут приводить к изменениям момент-за-моментом в наклоне и ориентации его сечений. Грубо говоря, именно это и происходит. Эйнштейн (используя геометрические озарения, озвученные Карлом Фридрихом Гауссом, Георгом Бернхардом Риманом и другими математиками 19-го столетия) разработал эту идею, – как начальную, – и показал, что проведенные под разными углами разрезы пространственно-временного батона плавно сливаются в сечения, которые искривлены, но подогнаны друг к другу с таким же совершенством, как ложки на серебряном подносе, как схематически проиллюстрировано на Рис. 3.8. *Ускоренный наблюдатель искривляет пространственные сечения, так что они становятся деформированными*.

С этой идеей Эйнштейн смог осуществить принцип эквивалентности в сильном варианте. Поскольку гравитация и ускорение эквивалентны, Эйнштейн понял, что сама гравитация должна быть ничем иным как деформациями и искривлениями в ткани пространства-времени. Посмотрим, что это означает.

Если вы катите мраморный шар вдоль гладкого деревянного пола, он перемещается по прямой линии. Но если вы ранее имели ужасное наводнение и пол рассохся со всеми сортами выпуклостей и деформаций, то катящийся мраморный шар больше не будет двигаться вдоль той же траектории. Вместо этого, траектория будет отклоняться туда и сюда деформациями и искривлениями на поверхности пола. Эйнштейн применил эту простую идею к ткани вселенной. Он представил, что в отсутствии материи или энергии – нет Солнца, нет Земли, нет звезд – пространство-время, подобно гладкому деревянному полу, не имеет деформаций и искривлений. Оно плоское. Это схематично иллюстрируется на Рис. 3.9а, на котором мы сосредоточились на одном сечении пространства. Конечно, пространство реально трехмерное, так что Рис. 3.9b более аккуратное изображение, но чертежи, которые иллюстрируют два измерения, более легко представить, поэтому мы будем продолжать пользоваться ими. Эйнштейн затем представил, что присутствие материи или энергии оказывает на пространство эффект, очень похожий на эффект, который наводнение оказало на пол. Материя и энергия, вроде Солнца, приводят пространство (и пространство-время\*) к деформации и искривлению, как показано на Рис. 3.10а и 3.10b. И точно так же, как катящийся мраморный шар перемещается по деформированному полу вдоль кривой траектории, Эйнштейн показал, что любое движение через деформированное пространство – вроде того, как Земля движется в окрестности Солнца, – будет проходить вдоль кривой траектории, как показано на Рис 3.11а и 3.11b.

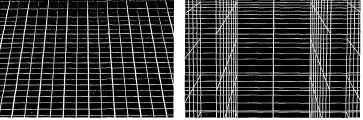
*(\*) "Легче нарисовать деформированное пространство, но вследствие их тесной связи, время также деформируется материей и энергией. И так же, как деформация пространства означает, что пространство растянуто или сжато, как на Рис 3.10, деформация времени означает, что время растянуто или сжато. Это значит, что часы, испытывающие различное гравитационное притяжение, – подобно одним на Солнце, а другим в глубоком пустом пространстве, – отсчитывают время с различной скоростью. Фактически, оказывается, что деформация пространства, происходящая от обычных тел вроде Земли или Солнца (в отличие от черных дыр), намного менее выражена, чем деформация, которую они причиняют времени".* [[15]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_15" \o )

Это похоже на то, как будто материя и энергия оставляет след на сетке в виде углублений и бугров, вдоль которых объекты управляются невидимой рукой пространственно-временной ткани. Что, в соответствии с Эйнштейном, и есть то, как гравитация оказывает свое воздействие. Та же идея применима и рядом с домом. Прямо сейчас ваше тело как бы соскальзывает в углублении пространственно-временной ткани, вызванном присутствием Земли. Но ваше движение блокировано поверхностью, на которой вы сидите или стоите. Давление вверх, которое вы чувствуете едва ли не в каждый момент вашей жизни, – происходит ли оно от почвы, пола вашего дома, краешка удобного кресла или вашей двуспальной кровати, – действует так, чтобы удержать вас от соскальзывания по горбу в пространстве-времени. Напротив, если вы бросаетесь вниз с высоко летящей доски для дайвинга, вы отдаетесь гравитации, позволяя свободно перемещать ваше тело вдоль одной из пространственно-временных впадин.



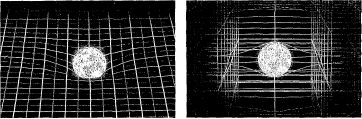
***Рис 3.8****В соответствии с ОТО не только пространственно-временной батон может быть рассечен на пространство в моменты времени под разными углами (от наблюдателей в относительном движении), но сами сечения будут в присутствии материи или энергии деформированы или искривлены.*

Рисунки 3.9, 3.10 и 3.11 схематично показывают триумф десятилетней эйнштейновской борьбы. Много его работ в течение этих лет были нацелены на определение точной формы и размера деформаций, которые будут вызываться данным количеством материи или энергии. Математический результат, найденный Эйнштейном, лег в основу этих рисунков и воплощен в то, что называется полевыми уравнениями Эйнштейна. Как свидетельствует название, Эйнштейн видел деформацию пространства-времени как проявление – геометрическое воплощение – гравитационного поля. Чтобы придать проблеме геометрическую форму, Эйнштейну пришлось найти уравнения, которые для гравитации играют ту же роль, что уравнения Максвелла для электромагнетизма.[[16]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_16" \o )



(а) (b)

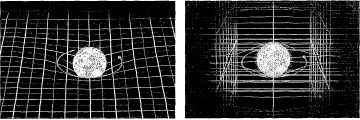
***Рис 3.9****(а) Плоское пространство (2D версия), (b) Плоское пространство (3D версия).*



(а) (b)

***Рис 3.10****(а) Пространство, деформированное Солнцем (2D версия), (b) Пространство, деформированное Солнцем (3D версия).*Используя эти уравнения, Эйнштейн и многие другие сделали предсказания для траектории, которой будет следовать эта или та планета, или даже для света, испущенного далекой звездой, когда он движется через искривленное пространство-время. Эти предсказания не только были подтверждены с высокой степенью точности, но и в соревновании голова к голове с предсказаниями ньютоновской теории теория Эйнштейна последовательно согласуется с реальностью с лучшей точностью.

Не менее важно, что, поскольку ОТО описывает детальный механизм действия гравитации, она обеспечивает математическую схему для определения, как быстро передается воздействие гравитации.



(а) (b)

***Рис 3.11****Земля находится на орбите вокруг Солнца, поскольку она следует искривлению пространственно-временной ткани, обусловленной присутствием Солнца, (а) 2D версия, (b) 3D версия.*

 Скорость передачи сводится к вопросу о том, как быстро форма пространства может вызвать изменения во времени. Иначе говоря, как быстро могут деформации и рябь – рябь, подобная той, что возникает на поверхности пруда из-за бултыхнувшегося булыжника, – нестись от места к месту через пространство? Эйнштейн смог решить задачу, и ответ, к которому он пришел, был чрезвычайно радующий. Он нашел, что деформации и рябь, – то есть, гравитация – не распространяется от места к месту мгновенно, как это было в ньютоновских расчетах гравитации. Вместо этого, *она путешествует в точности со скоростью света*. Ни на йоту быстрее или медленнее, полностью придерживаясь ограничений скорости из СТО. Если инопланетяне сорвут Луну с ее орбиты, прилив начнет спадать на полторы секунды позже, точно в тот же самый момент, когда мы увидим, что Луна пропала. Где ньютоновская теория терпит неудачу, ОТО Эйнштейна торжествует.

ОТО и ведро

Помимо того, что ОТО дала миру математически элегантную, концептуально мощную и, в первую очередь, полностью непротиворечивую теорию гравитации, она также основательно преобразовала наш взгляд на пространство и время. Как в ньютоновской концепции, так и в СТО пространство и время обеспечивали неизменную платформу для событий вселенной. Хотя сечение космоса на пространство в последовательные моменты времени имело гибкость в СТО, недоступную в ньютоновские времена, пространство и время не реагировали на происходящее во вселенной. Пространство-время – батон, как мы его называли, – принимался как данность, раз и навсегда. В общей теории относительности все это поменялось. Пространство и время стали игроками в развивающемся космосе. Они ожили. Материя "здесь" заставляет пространство деформироваться "там", что заставляет материю двигаться через деформированную область, что заставляет пространственный путь через деформированную область искажаться еще больше, и так далее. ОТО обеспечивает хореографию для причудливого космического танца пространства, времени, материи и энергии.

Это ошеломляющее развитие. Но мы теперь вернемся к нашей центральной теме: Как насчет ведра? Обеспечила ли ОТО физическую основу для реляционистских идей Маха, на что надеялся Эйнштейн?

На протяжении лет этот вопрос породил много дебатов. Сначала Эйнштейн думал, что ОТО полностью включает в себя взгляды Маха, эту точку зрения он считал настолько важной, что окрестил указанные взгляды принципом Маха. Фактически, в 1913, когда Эйнштейн неистово работал, чтобы вставить на место заключительные кусочки ОТО, он написал Маху воодушевленное письмо, в котором описал, как ОТО подтвердит анализ Маха ньютоновского эксперимента с ведром.[[17]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_17" \o ) И в 1918, когда Эйнштейн написал статью, перечисляющую три важнейшие идеи после ОТО, третьим пунктом в этом списке был принцип Маха. Однако, ОТО коварна и она содержит особенности, которые обсуждались физиками, включая самого Эйнштейна, многие годы, прежде чем удалось разобраться в них полностью. Лучше всех понимая эти особенности, Эйнштейн столкнулся с возрастающими трудностями, пытаясь полностью включить принцип Маха в ОТО. Мало по малу он стал терять иллюзии по поводу идей Маха, и в последние годы своей жизни пришел к отказу от них.[[18]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_18" \o )

После дополнительных пятидесяти лет исследований и сомнений мы можем по-новому рассмотреть рамки, в пределах которых ОТО соответствует рассуждениям Маха. Хотя все еще имеются некоторые разногласия, я думаю, что наиболее точным утверждением будет то, что в некоторых аспектах ОТО имеет отчетливый привкус махианства, но она не совпадает с полностью реляционистскими взглядами, которые защищал Мах. Это то, что я думаю.

Мах доказывал[[19]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_19" \o ), что когда поверхность вращающейся воды становится вогнутой, или когда вы чувствуете, что ваши руки отбрасываются прочь, или когда веревка, привязанная между двумя камнями, туго натягивается, это не имеет ничего общего с некоторым гипотетическим – и, с его точки зрения, полностью вводящим в заблуждение, – понятием абсолютного пространства (или абсолютного пространства-времени в нашем более современном представлении). Напротив, он доказывал, что это есть проявление ускоренного движения по отношению ко всей материи, которая рассеяна по всему космосу. Не было бы материи, не было бы понятия ускорения и не происходило бы никаких измеримых физических эффектов (вогнутая вода, отбрасываемые руки, туго натянутая веревка).

Что говорит ОТО?

В соответствии с ней точкой отсчета для любого движения, а для ускоренного движения в особенности, являются свободно падающие наблюдатели – наблюдатели, которые полностью поддались гравитации и не подвергаются действию никаких других сил.

Далее, ключевым моментом является то, что гравитационная сила, которой уступает свободно падающий наблюдатель, возникает от всей материи (и энергии), рассеянной в космосе. Земля, Луна, удаленные планеты, звезды, газовые облака, квазары и галактики – все они вносят вклад в гравитационное поле (на геометрическом языке – в кривизну пространства-времени) прямо там, где вы сейчас сидите. Тела, которые более массивны и менее удалены, оказывают большее гравитационное воздействие, но гравитационное поле, которое вы чувствуете, представляет объединенное влияние материи, которая "не здесь".[[20]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_20" \o ) Траектория, которой вы следуете, когда вы полностью поддались гравитации и получили свободное падение, – точка отсчета, которой вы стали, чтобы рассудить, являются ли некоторые другие объекты ускоренными, – будет подвержена влиянию от всей материи в космосе, от звезд в небесах и от соседней двери дома. Поэтому в ОТО, когда объект называют ускоряющимся, это значит, что объект ускоряется по отношению к точке отсчета, определяемой материей, распыленной по всей вселенной. Это заключение, которое вызывает ощущения, которые защищал Мах. Итак, в этом смысле ОТО включает в себя некоторые из размышлений Маха.

Тем не менее, ОТО не соответствует всем рассуждениям Маха, как мы можем прямо видеть из повторного рассмотрения вращающегося ведра в пустой во всех иных отношениях вселенной. В пустой неизменной вселенной – нет звезд, нет планет, нет совсем ничего – нет и гравитации.[[21]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_21" \o ) А без гравитации пространство-время не деформировано - это соответствует простейшей неискривленной форме, показанной на Рис 3.9b, - а это значит, что мы вернулись в простейшее окружение СТО. (Вспомним, что Эйнштейн, пока разрабатывал СТО, игнорировал гравитацию. ОТО восполнила этот дефицит путем включения гравитации, но когда вселенная пуста и неизменна, там нет гравитации, так что ОТО сводится к СТО). Если мы теперь введем ведро в эту пустую вселенную, то оно имеет такую малую массу, что ее присутствие не окажет сильного воздействия на форму всего пространства. Так что обсуждение, которое мы вели ранее для ведра в СТО, также хорошо применимо для ОТО. В отличие от предсказаний Маха ОТО дает тот же ответ, как и СТО, и утверждает, что даже в пустой во всех иных отношениях вселенной вы будете чувствовать давление со стороны внутренней стенки вращающегося ведра; в пустой во всем остальном вселенной ваши руки будут отталкиваться прочь, если вы крутитесь кругом; в пустой во всем остальном вселенной веревка, привязанная между двумя крутящимися камнями, будет натягиваться. Заключение, к которому мы приходим, таково, что даже в ОТО пустое пространство-время обеспечивает точку отсчета для ускоренного движения. Отсюда следует, что хотя ОТО включает некоторые элементы размышлений Маха, она не присоединяется к полностью относительной концепции движения, которую отстаивал Мах.[[22]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_22" \o ) Принцип Маха является примером провокационной идеи, которая обеспечила вдохновение для революционного открытия, хотя это открытие, в конечном счете, не включило в себя полностью породившую его идею.

Пространство-время в третьем тысячелетии

Вращающееся ведро имело долгую историю. От ньютоновского абсолютного пространства и абсолютного времени к реляционистским концепциям Лейбница и Маха, к осознанию Эйнштейном в СТО, что пространство и время относительны и только в их единстве возникает абсолютное пространство-время, к его последующему открытию в ОТО, что пространство-время является активным игроком в раскрывающемся взгляду космосе, ведро всегда присутствовало там. Прокрутив время в уме назад, видим, что ведро обеспечило простой и спокойный тест, является ли невидимый, абстрактный, неощутимый материал пространства – и, более общо, пространства-времени – реально достаточным, чтобы обеспечить полную систему отсчета для движения. Вердикт? Хотя проблема все еще обсуждается, как мы теперь видим, наиболее прямое прочтение Эйнштейна и его ОТО есть то, что пространство-время может обеспечить такую точку отсчета: *пространство-время есть нечто*.[[23]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_23" \o )

Хотя отметим, что это заключение также вызывает торжество среди последователей более широко определенного реляционистского мировоззрения. С точки зрения Ньютона, а также с точки зрения СТО пространство и пространство-время привлекаются как сущности, которые обеспечивают систему отсчета для определения ускоренного движения. И, поскольку в соответствии с этими точками зрения пространство и пространство-время абсолютно неизменяемы, это определение ускорения абсолютно. В ОТО, однако, характер пространства-времени совершенно иной. Пространство и время активны в ОТО: они изменчивы; они реагируют на присутствие массы и энергии; они не абсолютны. Пространство-время и, в особенности, способ, которым оно деформируется и искривляется, есть воплощение гравитационного поля. Так что в ОТО ускорение по отношению к пространству-времени далеко от абсолютной, непоколебимо нереляционистской концепции, привлекаемой предыдущими теориями. Вместо этого, как выразительно утверждал Эйнштейн за несколько лет до своей смерти,[[24]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_3_24" \o ) ускорение по отношению к пространству-времени ОТО относительно. Это не ускорение относительно материальных объектов вроде камней или звезд, но это есть ускорение относительно чего-то точно существующего, материального и изменяемого: поля – гравитационного поля.\* В этом смысле пространство-время – будучи инкарнацией гравитации – настолько реально в ОТО, что точка отсчета, которую оно обеспечивает, является тем, что многие реляционисты могут спокойно принять.

*(\*) "В СТО – специальном случае ОТО, в котором гравитационное поле равно нулю, – эта идея используется без изменений; нулевое гравитационное поле все еще поле, то есть нечто такое, что может быть измерено и изменено, а потому обеспечивает нечто, по отношению к чему может быть определено ускорение."*

Дебаты по поводу проблем, обсуждавшихся в этой главе, будут, без сомнения, продолжены, как только мы нащупаем понимание того, что же представляют из себя пространство, время и пространство-время на самом деле. С развитием квантовой механики интрига только запутывается.

Концепция пустого пространства и пустоты получила в итоге новый смысл, на сцену вышла квантовая неопределенность. В самом деле, с 1905 года, когда Эйнштейн избавился от светоносного эфира, идея о том, что пространство заполнено невидимыми субстанциями, боролась за решительное возвращение. Как мы увидим в следующих главах, ключевые разработки в современной физике вводили заново различные формы подобных эфиру сущностей, ни одна из которых не устанавливала абсолютный стандарт для движения подобно первоначальному светоносному эфиру, но все из которых полностью подвергали сомнению наивную концепцию о том, что означает для пространства-времени быть пустым. Более того, как мы сейчас увидим, сама основная роль, которую пространство играет в классической вселенной, – как среда, которая отделяет один объект от другого, как промежуточный материал, который позволяет нам определенно утверждать, что один объект отличен и независим от другого, – основательно ставится под вопрос поразительными квантовыми связями.

**4 Запутанное пространство**

***ЧТО ОЗНАЧАЕТ БЫТЬ РАЗДЕЛЕННЫМ В КВАНТОВОЙ ВСЕЛЕННОЙ?***

**Ч**тобы принять СТО и ОТО, надо отказаться от ньютоновского абсолютного пространства и абсолютного времени. Поскольку это не легко, вы можете потренировать ваш ум, чтобы сделать это. Всякий раз, когда вы перемещаетесь, представьте себе, что вы отодвигаетесь от текущих моментов, переживаемых всеми остальными, которые не движутся вместе с вами. В то время, как вы едете вдоль магистрали, представьте ваши часы, тикающие с отличающимся темпом по сравнению с хронометрами в домах, которые вы проезжаете. Пока вы обозреваете окрестности с вершины горы, представьте, что вследствие деформированного пространства-времени время для вас течет более быстро, чем для тех, кто подвержен действию более сильной гравитации на земле далеко внизу. Я говорю "представьте". Поскольку в обычных обстоятельствах, подобных перечисленным, релятивистские эффекты настолько мизерны, что проходят полностью незамеченными. Таким образом, повседневный опыт не может вскрыть, как на самом деле работает вселенная, и в этом причина, почему за сто лет после Эйнштейна почти никто даже среди профессиональных физиков не ощущает релятивистские эффекты в своих делах. Это не удивительно; затруднительно найти долговечные преимущества, предлагаемые глубоким пониманием теории относительности. Порочные ньютоновские концепции абсолютного пространства и абсолютного времени великолепно работают при малых скоростях и умеренной гравитации, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, так что наши чувства находятся в неизменном затруднении, чтобы обнаружить релятивистский мир. Следовательно, требуются глубокая осведомленность и правильное понимание того, что мы усердно используем наш интеллект, чтобы заполнить пробелы, оставляемые нашими чувствами.

В то время, как теория относительности представила монументальный слом традиционных идей о вселенной, другая революция между 1900 и 1930 перевернула физику вверх дном. Она началась на рубеже двадцатого столетия парой статей о свойствах радиации, принадлежащих одна Максу Планку, а другая Эйнштейну; они и привели после тридцати лет интенсивных исследований к формулировке *квантовой механики*. Как и с теорией относительности, чьи эффекты становятся существенными при экстремальных скоростях или гравитации, новая физика квантовой механики проявляется в полной мере только в другой экстремальной ситуации: в области экстремально малого. Однако есть резкое отличие между потрясениями, вызванными теорией относительности и квантовой механикой. Необычность теории относительности возникает вследствие того, что наши собственные ощущения пространства и времени отличаются от ощущений других. Это необычность, рожденная сравнением. Мы вынуждены признать, что наш взгляд на реальность лишь один из многих, – фактически, из бесконечного числа, – которые все сводятся воедино в рамках монолитного целого пространства-времени.

Квантовая механика иная. Ее необычность ясна вне сравнения. Ввести в ваш ум квантовомеханическую интуицию тяжелее, поскольку квантовая механика разбивает вдребезги нашу собственную, персональную, индивидуальную концепцию реальности.

Мир в соответствии с квантовым подходом

Каждая эпоха разрабатывает свои истории и метафоры о том, как была задумана и структурирована вселенная. В соответствии с древнеиндийским мифом творения вселенная была создана, когда боги расчленили изначального гиганта Пурушу, чья голова стала небом, чьи ступни стали землей, а дыхание ветром. По Аристотелю вселенная являлась собранием пятидесяти пяти концентрических кристаллических сфер, самая дальняя из которых от центра была небесами, окружающими планеты, Землю и их элементы, и, наконец, семь кругов ада.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_1" \o ) Во время Ньютона с его точной, математически определенной формулировкой движения описание опять изменилось. Вселенная была связана с ходом гигантского великого часового механизма: после того, как он был заведен и установлен в исходное состояние, часовой механизм вселенной тикает от одного момента к следующему с совершенной регулярностью и предсказуемостью.

СТО и ОТО отметили важную тонкость метафоры часового механизма: там нет единственных, привилегированных, универсальных часов; там нет согласия о том, что создает момент, что формирует понятие "сейчас". Даже при этих условиях мы все еще говорим об истории эволюционирующей вселенной в терминах часового механизма. Часы это ваши часы. История это ваша история. Но вселенная раскрывается с той же регулярностью и предсказуемостью, как и в ньютоновской системе. Если каким-то образом вы знаете состояние вселенной прямо сейчас, – если вы знаете, где находится каждая частица и как быстро и в каком направлении каждая частица движется, – тогда, Ньютон и Эйнштейн согласны, вы можете, в принципе, использовать законы физики, чтобы предсказать все о вселенной произвольно далеко в будущем или обрисовать, как она выглядела произвольно далеко в прошлом.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_2" \o )

Квантовая механика уничтожает эту традицию. Мы *не можем* когда-либо узнать точное положение и точную скорость даже одной частицы. Мы не можем с полной определенностью предсказать результат даже простейшего эксперимента, не говоря об эволюции целого космоса. Квантовая механика показывает, что лучшее, что мы можем когда-либо сделать, это предсказать *вероятность*, что эксперимент закончится тем или иным образом. И поскольку квантовая механика проверена в течение десятилетий фантастически точными экспериментами, ньютоновские космические часы, даже с улучшениями Эйнштейна, являются непроверяемой метафорой; они не показывают, как работает мир.

Но разрыв с прошлым еще более полный. Хотя ньютоновская и эйнштейновская теории резко расходятся во взглядах на природу пространства и времени, даже они согласны в определенных базовых фактах, определенных истинах, которые кажутся самоочевидными. Если между двумя объектами есть пространство, – если в небе есть две птицы и одна улетает от вас направо, а вторая налево, – мы можем рассматривать и рассматриваем два объекта независимыми. Мы рассматриваем их как отдельные и отличные сущности. Пространство, как бы оно ни было фундаментально, обеспечивает среду, которая разделяет и различает один объект от другого. Это то, что делает пространство. Тела, занимающие различные положения в пространстве, являются разными телами. Более того, чтобы один объект повлиял на другой, первый должен некоторым образом преодолеть пространство, их разделяющее. Одна птица может полететь к другой, преодолев пространство между ними, и тогда уже клюнуть или подтолкнуть своего компаньона. Одна персона может повлиять на другую путем выстрела из рогатки, заставив камень преодолеть пространство между ними, или путем крика, вызвав эффект домино среди прыгающих молекул воздуха, когда одна толкает следующую, пока некоторые не ударятся в барабанную перепонку адресата. Будучи еще более изощренным, некто может оказать влияние на другого, выстрелив из лазера, вызвав электромагнитную волну – луч света – для преодоления лежащего между ними пространства; или, будучи более претенциозным (как внеземные хулиганы предыдущей главы), он может потрясти или подвигать массивное тело (вроде Луны), послав гравитационное возмущение, проносящееся от одного местоположения к другому. Будьте уверены, если мы находимся здесь, мы можем повлиять на кого-нибудь там, но вне зависимости от того, как мы это делаем, процедура всегда включает кого-нибудь или что-нибудь, передвигающееся отсюда туда, и только когда кто-нибудь или что-нибудь окажется там, влияние может быть оказано.

Физики называют это свойство вселенной *локальностью*, подчеркивая тот момент, что вы можете непосредственно подвергнуть воздействию только вещи, которые находятся вблизи вас, которые локальны. Культ Вуду оспоривает локальность, поскольку он содержит действие чего-либо здесь и оказание влияния на что-либо там без необходимости чему бы то ни было перемещаться отсюда туда, однако наш общий повседневный опыт приводит нас к мысли, что проверяемые, повторяемые эксперименты будут подтверждать локальность.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_3" \o ) И в большинстве случаев они это делают.

Однако группа экспериментов, осуществленных в течение последней пары десятилетий, показала, что нечто, что мы делаем здесь (вроде измерения определенных свойств частицы), может быть тонко переплетено с чем-то, что происходит где-то там (вроде результата измерения определенных свойств другой частицы) без пересылания отсюда туда чего бы то ни было. В то время как интуиция заходит в тупик, это явление полностью соответствует законам квантовой механики, и было предсказано с использованием квантовой механики задолго до того, как технология смогла осуществить эксперимент и увидеть, что поразительно, что предсказание точно. Это звучит подобно Вуду; Эйнштейн, который был среди первых физиков, осознавших – и резко критиковавших – это возможное свойство квантовой механики, назвал его "призраком". Но, как мы увидим, дальнодействующие связи, которые подтверждают эти эксперименты, предельно чувствительны и находятся, в точном смысле этого слова, фундаментально за пределами нашей возможности контроля.

Тем не менее, эти результаты, возникшие как из теоретических, так и из экспериментальных исследований, жестко поддерживают заключение, что вселенная допускает взаимосвязи, которые нелокальны.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_4" \o ) Что-нибудь, что происходит здесь, может быть переплетено с чем-то, что происходит там, даже если ничего не перемещается отсюда туда – и даже если нет достаточно времени для чего бы то ни было, даже света, чтобы переместиться между событиями. Это значит, что пространство не может мыслиться так, как это когда-то делалось: промежуточное пространство безотносительно к тому, как его много, не гарантирует, что два объекта разделены, поскольку квантовая механика позволяет существовать между ними запутыванию, разновидности связи. Частица, подобная одной из бесчисленного количества, из которых состоите вы или я, может передвигаться, но не может спрятяться. В соответствии с квантовой теорией и многочисленными экспериментами, которые подтверждают ее предсказания, квантовые связи между двумя частицами могут сохраняться, даже если они находятся на противоположных концах вселенной. С позиции их запутывания, несмотря на многие триллионы миль пространства между ними, дело обстоит так, как если бы они находились прямо на макушке друг друга.

Из современной физики появляются многочисленные атаки на наше интуитивное понимание реальности; мы будем сталкиваться со многими из них в следующих главах. Но из тех их них, что экспериментально проверены, я не нахожу более поражающих воображение, чем недавнее понимание того, что наша вселенная нелокальна.

Красное и синее

Чтобы почувствовать природу нелокальности, возникающей из квантовой механики, представим, что агент Скалли, давно не использовавшая отпуск, уединяется в имении своей семьи в Провансе. Перед тем, как она начинает распаковывать вещи, звонит телефон. Это агент Малдер звонит из Америки.

"Ты получила пакет, обернутый в красную и синюю бумагу?"

Скалли, которая свалила всю свою корреспонденцию в кучу у двери, осматривает ее и видит посылку. "Малдер, пожалуйста, я убралась ко всем чертям не для того, чтобы возиться еще с одной кипой секретных материалов."

" Нет, нет, посылка не от меня. Я получил такую тоже, и внутри нее находятся маленькие защищенные от света титановые коробочки, пронумерованные от 1 до 1000, и письмо, говорящее, что ты получишь идентичную посылку."

"Да, и что?" – Скалли медленно реагирует, начиная опасаться, что титановые коробочки могут каким-то образом повернуться, прервав ее отпуск.

"Хорошо," – продолжает Малдер, – "письмо говорит, что каждая титановая коробочка содержит инопланетную сферу, которая сверкнет красным или синим в момент, когда открыта маленькая дверца на боку коробочки."

"Малдер, предполагается, что я должна быть поражена?"

"Еще нет, но дослушай. Письмо говорит, что до того, как любая данная коробочка открыта, сфера имеет возможность сверкнуть или красным или синим, и она делает выбор хаотически между двумя цветами в момент открытия дверки. Но здесь есть странная часть. Письмо говорит, что хотя твои коробочки работают точно таким же образом, как и мои, – хотя сферы внутри каждой из наших коробочек и выбирают хаотично между красным и синим сверканиями, – наши коробочки неким образом работают в тандеме. Письмо утверждает, что имеется таинственная связь, так что если будет синяя вспышка, когда я открою мою коробочку 1, ты также обнаружишь синюю вспышку, когда ты откроешь твою коробочку 1; если я вижу красную вспышку, когда я открою коробочку 2, ты тоже увидишь красную вспышку в твоей коробочке 2 и так далее."

"Малдер, я действительно измучена; пусть салонные фокусы подождут, пока я вернусь."

"Скалли, пожалуйста. Я знаю, ты в отпуске, но мы не можем просто так оставить это. Нам надо только несколько минут, чтобы убедиться, что это верно."

С неохотой Скалли осознает, что сопротивление бесполезно, так что она идет вперед и открывает свои маленькие коробочки. И, сравнивая цвета, которые вспыхивают внутри каждой коробочки, Скалли и Малдер действительно находят соответствие, предсказанное в письме. Временами сфера в коробочке сверкает красным, временами синим, но при открывании коробочек с одинаковыми номерами Скалли и Малдер всегда видят вспышку одинакового цвета. Малдер приходит во все большее возбуждение и ажиотаж от инопланетных сфер, но Скалли совершенно не впечатляется.

"Малдер," – мрачно говорит в телефон Скалли, – "тебе в самом деле нужен отпуск. Это глупо. Очевидно, что сферы внутри каждой из наших коробочек запрограммированы, чтобы мигать красным, или они зпрограммированы, чтобы мигать синим, когда дверца их коробочки открыта. И кто-то послал нам эти бессмысленно и одинаково запрограммированные коробочки, так что ты и я обнаруживаем одинаковые цвета вспышек в коробочках с одинаковыми номерами."

"Ну нет, Скалли, письмо говорит, что каждая инопланетная сфера случайно выбирает между синими и красными вспышками, когда дверца открыта, а не то, что сфера предварительно запрограммирована на выбор одного или другого цвета."

"Малдер," – вздыхает Скалли, – "мое объяснение имеет безупречный смысл и соответствует всем данным. Чего ты еще хочешь? И взгляни сюда, в конец письма. Это величайшая шутка. "Инопланетяне" информируют нас мелким шрифтом, что вспышка сферы внутри коробочки вызывается не только открыванием дверцы коробочки, но и любые другие действия с коробочкой, направленные на то, чтобы выяснить, как она работает, – например, если мы попробуем выяснить процесс образования цвета или химический состав сферы перед открытием дверцы, – также приведут к вспышке. Другими словами, мы не можем проанализировать предполагаемый случайный выбор красного или синего, поскольку любая такая попытка испортит сам эксперимент, который мы пытаемся провести. Это как если бы я тебе сказала, что я на самом деле блондинка, но я становлюсь рыжей как только ты или кто-нибудь или что-нибудь посмотрит на мои волосы или подвергнет их анализу любым образом. Как ты сможешь подтвердить, что я вру? Твои маленькие зеленые человечки очаровательно остроумны – они все так устроили, что их уловки не могут быть разоблачены. А теперь иди и играй со своими маленькими коробочками, пока я буду наслаждаться маленьким миром и покоем."

Может показаться, что Скалли заняла обоснованную позицию на стороне науки. Однако тут есть одно обстоятельство. Физики, занятые квантовой механикой – ученые, а не инопланетяне – около восьмидесяти лет делали утверждения о том, как работает вселенная, которые полностью соответствовали описанным в письме. Камень преткновения заключается в том, что сейчас имеется строгое научное подтверждение, что точка зрения Малдера – не Скалли – подтверждается данными опыта. Например, в соответствии с квантовой механикой частица может удерживаться в состоянии разрыва между тем, иметь ей одно или другое отдельное свойство – подобно тому, как "инопланетная" сфера находится в неопределенности, мигать красным или мигать синим до открытия дверцы ее коробочки, – и только когда частица увидена (измерена), она хаотично фиксируется в том или ином определенном состоянии. Если это недостаточно странно, квантовая механика еще предсказывает, что могут быть взаимосвязи между частицами, сходные с теми, что объявлены существующими между инопланетными сферами. Две частицы могут быть так переплетены квантовыми эффектами, что их хаотичный выбор между одним или другим свойством скоррелирован: точно как каждая из инопланетных сфер случайно выбирает между красным и синим, а затем каким-то образом цвета, выбранные сферами в коробочках с одинаковыми номерами, оказываются скоррелированными (обе мигают красным или обе мигают синим), свойства, выбранные случайно двумя частицами, даже если они удалены в стороны в пространстве, могут быть подобным образом совершенно упорядочены. Грубо говоря, хотя две частицы удалены друг от друга на большое расстояние, квантовая механика показывает, что что бы ни сделала одна частица, другая сделает связанную вещь.

В качестве конкретного примера, если вы носите пару солнечных очков, квантовая механика показывает, что с вероятностью 50 : 50 отдельный фотон – вроде того, который отразился к вам от поверхности озера или от асфальтовой дороги, – сможет пробраться сквозь ваши уменьшающие яркость поляризованные линзы: когда фотон достигает стекла, он случайным образом "выбирает" между тем, отразиться назад или пройти насквозь. Поразительная вещь в том, что фотон может иметь партнера-фотона, который мчится в милях отсюда в противоположном направлении и, однако, когда он столкнется с той же вероятностью 50 : 50 пройти сквозь другие поляризованные линзы солнечных очков, он каким-то образом повторит все, что бы ни сделал начальный фотон. *Даже если каждый результат определен случайным образом и даже если фотоны разнесены в пространстве, если один фотон пройдет насквозь, так же сделает и другой*. Это разновидность нелокальности, предсказанная квантовой механикой.

Эйнштейну, который никогда не был большим поклонником квантовой механики, было противно согласиться, что вселенная действует в соответствии с такими причудливыми правилами. Он отстаивал более традиционные объяснения, которые отказывались от утверждения, что частицы хаотично выбирают свои свойства и признаки, когда измеряются. Вместо этого, Эйнштейн утверждал, что если две широко разнесенные в пространстве частицы наблюдаются, чтобы определить некоторые признаки, не понятно, какое таинственное квантовое взаимодействие мгновенно коррелирует их свойства. Уж лучше, точно как доказывала Скалли, что сферы не выбирают случайно между красным и синим, а просто запрограммированы на мигание особым цветом при наблюдении, Эйнштейн заявлял, что частицы не выбирают случайным образом между тем, иметь им одну особенность или другую, а вместо этого сходным образом "программируются", чтобы получить отдельное определенное свойство, когда будет подходящее измерение. Корреляции между поведением сильно удаленных фотонов есть свидетельство того, утверждал Эйнштейн, что фотоны были наделены одинаковыми свойствами в момент испускания, но не того, что они подвержены некоторому причудливому дальнодействующему квантовому запутыванию.

Пока не истекли пятьдесят лет, проблема, кто же прав – Эйнштейн или сторонники квантовой механики, – оставалась нерешенной, поскольку, как мы увидим, дебаты проходили очень похожие на диалог Скалли и Малдера: любая попытка опровергнуть предложенные странные квантовомеханические взаимодействия и оставить нетронутым более традиционный взгляд Эйнштейна приводила к пониманию, что сами эксперименты с необходимостью будут портить те свойства, которые и пытаются изучить. Все это изменилось в 1960е годы. С ошеломляющей проницательностью ирландский физик Джон Белл показал, что проблема может быть решена экспериментально, что и было сделано в 1980е. Наиболее прямое прочтение результата таково, что Эйнштейн ошибался, и в действительности могут иметься странные, таинственные и подобные "призракам" квантовые взаимодействия между вещами здесь и вещами там.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_5" \o )

Обоснования, следующие после этого утверждения, столь тонки, что обсуждались физиками более тридцати лет, прежде чем были полностью поняты. Но после осмотра существенных особенностей квантовой механики мы увидим, что главные аргументы сводятся к чему-то, не более сложному, чем детская головоломка.

Смотр волн

Если вы посветите лазерной указкой на маленький кусочек черной засвеченной 35-миллиметровой пленки, с которой вы соскребли эмульсию в двух очень близких друг к другу и узких линиях, вы увидите прямое доказательство, что свет это волна. Если вы никогда этого не делали, стоит попытаться (вы можете использовать много вещей вместо пленки, таких как проволочная сетка из кофейной машины). Картина, которую вы увидите, когда лазерный луч пройдет через щели в пленке и упадет на экран, состоит из светлых и темных полос, как показано на Рис. 4.1, и объяснение этого рисунка основывается на главном свойстве волн. Волны на воде проще всего увидеть, так что сначала объясним существенные особенности волн на большом спокойном озере, а затем применим наши представления к свету.

Водяные волны возмущают плоскую поверхность озера, создавая области, где уровень воды выше, чем обычно, и области, где он ниже, чем обычно. Самая высокая часть волны называется ее *гребнем* (или *пиком*), а наинизшая *впадиной*. Типичная волна содержит периодическую последовательность: гребень следует за впадиной, следующей за гребнем, и так далее. Если две волны направляются навстречу друг другу, – если, например, вы и я кидаем каждый по булыжнику в озеро недалеко друг от друга, – то когда они пересекаются, возникает важный эффект, известный как интерференция, что показано на Рис. 4.2а.

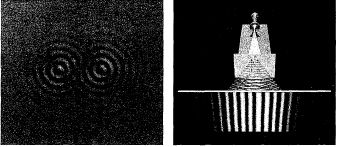


***Рис 4.1****Лазерный свет, проходя через две щели, вытравленные каждая на черной пленке, дает интерференционную картину на приемном экране, показывая, что свет это волна.*

 Когда гребень одной волны и гребень другой пересекаются, высота воды как раз возрастает, становясь равной сумме высот двух гребней. Аналогично, когда впадина одной волны пересекается со впадиной другой волны, понижение уровня воды становится больше, составляя сумму двух понижений. И имеется наиболее важная комбинация: когда гребень одной волны пересекает впадину другой, они стремятся погасить друг друга, так как гребень пытается поднять воду вверх, тогда как впадина пытается опустить ее вниз. Если высота гребня одной волны равна глубине впадины другой, будет полная компенсация при их пересечении, так что вода в этом месте совсем не будет двигаться.

Те же принципы объясняют картину, которую создает свет, когда он проходит через две щели, как на Рис. 4.1. Свет это электромагнитная волна; когда он проходит через две щели, он распадается на две волны, которые направляются к экрану. Как и в обсуждавшемся только что случае двух водяных волн, две волны света интерферируют друг с другом. Когда они достигают произвольной точки на экране, то иногда обе волны находятся на их гребнях, создавая на экране яркое пятно; иногда обе волны находятся в их впадинах, также создавая яркое пятно; но иногда одна волна находится на ее гребне, а другая в ее впадине и они уничтожаются, делая эту точку экрана темной. Мы проиллюстрировали это на Рис. 4.2b.

Когда движение волны анализируется в математических деталях, включая случаи частичных взаимопогашений волн, находящихся на различных стадиях между гребнями и впадинами, то можно показать, что яркие и темные пятна объединяются в полосы, изображенные на Рис. 4.1. Яркие и темные полосы, следовательно, являются явным знаком, что свет это волна, проблема, которая всегда горячо обсуждалась с тех пор, как Ньютон заявил, что свет это не волна, а, напротив, он создается потоком частиц (большим числом в единицу времени).



(а) (b)

***Рис 4.2****(а) Перекрывание водяных волн создает интерференционную картину; (b) Перекрывание световых волн создает интерференционную картину.*

 Более того, этот анализ равно применим к любым видам волн (световая волна, волна на воде, звуковая волна, что пожелаете), и поэтому интерференционные картинки обеспечивают метафорический дымящийся пистолет: вы знаете, что вы имеете дело с волной, если, когда она вынуждена проходить через две щели с правильно подобранным размером (определяемым расстоянием между гребнями и впадинами волны), итоговая картинка интенсивности выглядит как на Рис. 4.1 (с яркими областями, представляющими высокую интенсивность, и темными областями с низкой интенсивностью).

В 1927 году Клинтон Дэвиссон и Лестер Гермер направили луч электронов – индивидуальных сущностей без всякой видимой связи с волнами – на кусочек кристалла никеля; детали нас не должны интересовать, но что важно, так это то, что этот эксперимент эквивалентен обстрелу лучом электронов барьера с двумя щелями. Когда экспериментаторы позволили электронам, которые проходили через щели, пролететь вперед к фосфорному экрану, где их место столкновения регистрировалось слабой вспышкой (такой же вид вспышек отвечает за картинку на вашем телевизионном экране), результаты оказались ошеломительными. Полагая электроны маленькими шариками или пульками, вы, естественно, ожидали, что положения их столкновений с экраном сформируют линии за двумя щелями, как показано на Рис. 4.3а. Но это не то, что нашли Дэвиссон и Гермер. Их эксперимент произвел данные, схематически показанные на Рис. 4.3b: положения соударений электронов с экраном заполняют интерференционную картинку, характеризующую волны. Дэвиссон и Гермер нашли дымящийся пистолет. Они показали, что *луч отдельных электронов должен быть, неожиданно, одним из видов волн*.

C:\0\tkankosmosa_files\i75e0637adc

(а) (b)

***Рис 4.3****(а) Классическая физика предсказывает, что электроны, падающие на барьер с двумя щелями, произведут две яркие полосы на детекторе, (b) Квантовая физика предсказывает, а эксперимент подтверждает, что электроны будут производить интерференционную картинку, показывая, что они обладают волновыми свойствами*.

Далее, вы можете подумать, что это не есть особый сюрприз. Вода состоит из молекул Н2О, но волны воды возникают, когда многие молекулы движутся согласованным образом. Одна группа молекул Н2О движется вверх в одном месте, тогда как другая группа движется вниз в соседнем месте. Возможно, результаты, приведенные на Рис. 4.3, показывают, что электроны, как и молекулы Н2О, иногда могут двигаться согласованно, создавая в своем общем, макроскопическом движении присущие волнам картинки. Несмотря на то, что. на первый взгляд, это кажется обоснованным предположением, реальная история оказалась намного более неожиданной.

Мы сначала представляли, что поток электронов непрерывно исторгается из электронной пушки на Рис. 4.3. Но мы можем уменьшить настрой пушки так, что она будет выстреливать все меньше и меньше электронов каждую секунду; фактически, мы можем уменьшить его совсем, так что она будет испускать, скажем, один электрон каждые десять секунд. При достаточном терпении мы можем проводить этот эксперимент в течение длительного периода времени и фиксировать положения соударений каждого индивидуального электрона, который прошел через щели. Рис. 4.4а – 4.4с показывают итоговые обобщенные данные после часа, половины дня и полного дня. В 1920-е годы изображения, подобные этим, перевернули основания физики. *Мы видим, что даже индивидуальные, отдельные электроны, двигаясь к экрану независимо, отдельно от остальных, один за одним, выстраивают интерференционную картинку, характеризующую волны*.

Это похоже на то, как если бы индивидуальная молекула Н2О каким- то образом стала себя вести подобно водяной волне. Но как, о боги, такое может быть? Волновое движение кажется коллективным свойством, которое не имеет смысла, когда применяется к отдельным идивидуальным составляющим. Если каждые несколько минут индивидуальные зрители в белом встают и садятся по-отдельности, независимо, волна не возникнет. Более того, интерференция волн, кажется, требует, чтобы волна *отсюда* пересеклась с волной *оттуда*. Но как вообще может быть интерференция применима к отдельной, индивидуальной, обособленной части целого? Тем не менее, каким-то образом, как это засвидетельствовано в интерференционных данных на Рис.4.4, даже если индивидуальные электроны являются мельчайшими частицами материи, каждая и любая также обладает волновым характером.

C:\0\tkankosmosa_files\i2a4f5dfd97   
  
C:\0\tkankosmosa_files\ieb10bde44a

(а) (b) (c)

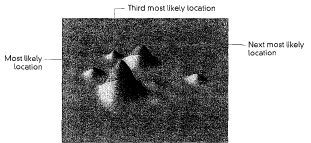
***Рис 4.4****Электроны, выстреливающиеся один за одним в сторону щелей, создают интерференционную картину точка за точкой. На (а) – (с) мы иллюстрируем, как указанная картина формируется с течением времени.*

Вероятность и законы физики

Если индивидуальный электрон также и волна, то что именно колеблется? Эрвин Шредингер рассмотрел это в первой гипотезе: возможно, что материал, из которого сделаны электроны, может размазываться в пространстве, и эта размазанная электронная эссенция и колеблется. Частица электрон с этой точки зрения должна быть резким сгущением в электронном тумане. Однако, быстро было понято, что такое предположение не может быть верным, поскольку даже волна резко заостренной формы – подобная гигантской приливной волне – в конечном счете расплывается. И если заостренная электронная волна распространяется, мы можем ожидать найти часть отдельного электрического заряда электрона здесь или часть его массы там. Чего мы никогда не делаем. Если мы локализуем электрон, мы всегда находим всю его массу и весь его заряд сконцентрированными в мельчайшей, подобной точке области. В 1927 году Макс Борн выдвинул другое предположение, которое оказалось решающим этапом, побудившим физику ввести радикально новую область. Он объявил, что волна не есть размазанный электрон, она не есть и что-либо, с чем когда-либо ранее сталкивались в науке. Волна, предположил Борн, есть*волна вероятности*.

Чтобы понять, что это означает, нарисуем моментальный снимок водяной волны, который показывает области высокой интенсивности (вблизи гребней и впадин) и области низкой интенсивности (вблизи плоских переходных областей между гребнями и впадинами). Чем выше интенсивность, тем больший потенциал имеет водяная волна для оказания силового воздействия на находящийся рядом корабль или прибрежные структуры. Волна вероятности в представлении Борна также имеет области высокой и низкой интенсивности, но значение, которое он приписывал этому виду волны, неожиданное: *размер волны в данной точке пространства пропорционален вероятности, что электрон находится в этой точке пространства*. Места, гда вероятностная волна велика, это места, где электрон наиболее легко может быть найден. Места, гда вероятностная волна мала, это места, где электрон найти маловероятно. И места, где вероятностная волна равна нулю, это места, где электрон не будет найден.

Рис. 4.5 дает "моментальный снимок" вероятностной волны с отметками, подчеркивающими борновскую вероятностную интерпретацию. Хотя, в отличие от фотографии водяной волны, этот снимок не может в действительности быть сделан камерой. Никто никогда не наблюдал непосредственно вероятностную волну, и традиционные квантовомеханические объяснения говорят, что никто никогда и не будет. Вместо этого мы используем математические уравнения (разработанные Шредингером, Нильсом Бором, Вернером Гейзенбергом, Полем Дираком и другими), чтобы вычислить, на что должна быть похожа волна вероятности в данной ситуации. Затем мы проверяем такие теоретические расчеты путем сравнения их с экспериментальными результатами следующим образом. После расчета искомой вероятностной волны для электрона в данной экспериментальной ситуации, мы выполняем идентичную расчетной ситуации версию эксперимента снова и снова с нуля, каждый раз фиксируя измеренное положение электрона.



***Рис 4.5****Вероятностная волна частицы, такой как электрон, дает нам вероятность нахождения частицы в том или ином месте. <****Надпись слева:****Наиболее вероятное положение; Надпись справа: Следующее более вероятное положение; Надпись сверху: Третье более вероятное положение>.*

В  отличие от того, чего ожидал бы Ньютон, идентичные эксперименты и стартовые условия не обязательно приводят с идентичным измерениям. Вместо этого наши измерения дают большое число измеренных положений. Иногда мы находим электрон здесь, иногда там, а довольно часто мы находим его след вон там. Если квантовая механика правильна, число случаев, когда мы находим электрон в данной точке, должно быть пропорционально величине (на самом деле, квадрату величины) вычисленной нами вероятностной волны в этой точке. Восемьдесят лет экспериментов показали, что предсказания квантовой механики подтверждаются с впечатляющей точностью.

Только часть волны вероятности электрона показана на Рис. 4.5: в соответствии с квантовой механикой каждая вероятностная волна простирается по всему пространству, через всю вселенную.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_6" \o ) Хотя во многих случаях волна вероятности частицы быстро спадает почти до нуля вне некоторой малой области, что свидетельствует об огромной вероятности, что частица находится в этой области. В таких случаях часть вероятностной волны за пределами Рис. 4.5 (часть, простирающаяся по оставшейся области вселенной) оказывается очень похожей на части вблизи краев рисунка: спокойная плоскость со значением вблизи нуля.Тем не менее, поскольку вероятностная волна где-нибудь в галактике Андромеды имеет ненулевое значение, не важно, насколько малое, имеется исчезающий, но реальный – ненулевой – шанс, что электрон может быть найден там.

Итак, успех квантовой механики заставляет нас признать, что электрон, составляющая материи, которую мы обычно рассматриваем как занимающую ничтожную, подобную точке область пространства, также имеет описание, включающее волну, которая, наоборот, распространена по целой вселенной. Более того, в соответствии с квантовой механикой это корпускулярно-волновое слияние присуще всем составным частям природы, не только электронам: протоны одновременно подобны частицам и волнам; нейтроны одновременно подобны частицам и волнам, и эксперименты в начале 1900х годов даже установили, что свет – который демонстративно вел себя как волна, как на Рис. 4.1, – также может быть описан в терминах подобных частицам составляющих, маленьких "пучков света", названных фотонами, упоминавшимися ранее.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_7" \o ) Привычные электромагнитные волны, испускаемые стоваттной лампочкой, например, могут быть с одинаковым успехом описаны в терминах иcпускаемых лампочкой примерно ста миллиардов миллиардов фотонов ежесекундно. В квантовом мире мы обучились тому, что любая вещь имеет как корпускулярные, так и волновые свойства.

За последние восемьдесят лет повсеместное распространение и полезность квантовомеханических вероятностных волн для предсказания и объяснения экспериментальных результатов установились вне всяких сомнений. Хотя тут есть все еще не универсальный, основанный на соглашении способ рассмотрения, что же в действительности представляют из себя квантовомеханические волны вероятности. Должны ли мы сказать, что электронная волна вероятности и есть электрон, или что она связана с электроном, или что она есть математическая конструкция для описания движения электрона, или что она есть *реализация того, чего мы можем знать* об электроне, все еще обсуждается. Хотя ясно, что через эти волны квантовая механика вводит вероятности в законы физики способом, который никто не мог предвидеть. Метеорологи используют вероятности, чтобы предсказать возможность дождя. Казино используют вероятности, чтобы предсказать вам возможность во время игры в кости выбросить "глаза змеи". Но вероятность играет роль в этих примерах постольку, поскольку мы не имеем полной информации, необходимой, чтобы сделать определенные предсказания. В соответствии с Ньютоном, если бы мы знали во всех деталях состояние окружающей среды (положения и скорости всех ее составляющих частей до одной), мы были бы в состоянии предсказать (дать обоснованный расчетный прогноз) с определенностью, будет ли дождь завтра в 16:07; если бы мы знали все физические детали, имеющие отношение к игре в кости (точную форму и состав игральных костей, их скорость и ориентацию, когда они покидают вашу руку, состав стола и его поверхности и так далее), мы были бы в состоянии предсказать с определенностью, как лягут кости. Поскольку на практике мы не можем собрать всю эту информацию (а даже если бы могли, мы еще не имеем достаточно мощных компьютеров, чтобы произвести вычисления, которые требуются, чтобы сделать такие предсказания), мы опускаем глаза и предсказываем только вероятность данного исхода в погоде или в казино, делая правдоподобные предположения о данных, которых мы не имеем.

Вероятность, введенная квантовой механикой, носит иной, более фундаментальный характер. Безотносительно к усовершенствованиям в системах сбора данных или в мощности компьютеров, лучшее, что мы только можем сделать в соответствии с квантовой механикой, это предсказать вероятность того или иного исхода. Лучшее, что мы только можем сделать, это предсказать вероятность, что электрон, или протон, или нейтрон, или любая другая составная часть природы будет найдена здесь или там. Вероятность властвует верховно в микрокосмосе.

В качестве примера, объяснение, которое дает квантовая механика для отдельных электронов, которые один за одним с течением времени выстраивают картинку из светлых и темных полос на Рис. 4.4, теперь ясно. Когда электрон испускается, его вероятностная волна проходит через обе щели. И точно так же, как со световыми волнами и водяными волнами, вероятностные волны, истекая из двух щелей, интерферируют друг с другом. На некоторой точке детектирующего экрана две вероятностные волны усиливаются и результирующая интенсивность велика. В другой точке волны частично гасятся и интенсивность мала. В некоторых точках гребни и впадины вероятностных волн полностью гасятся и результирующая интенсивность волны в точности равна нулю. Так что на экране есть точки, куда очень вероятно попадет электрон, точки, где намного менее вероятно, что туда прилетит электрон, и точки, где совсем нет шансов, что электрон туда попадет. С течением времени электроны попадают в места, которые распределены в соответствии с этим вероятностным профилем, и поэтому мы получаем некоторые яркие, некоторые более серые, а некоторые совсем темные области на экране. Детальный анализ показывает, что эти светлые и темные области будут выглядеть в точности как на Рис. 4.4.

Эйнштейн и квантовая механика

Из-за своей неотъемлемой вероятностной природы квантовая механика резко отличается от любого более раннего фундаментального описания вселенной, качественного или количественного. С момента ее зарождения за последнее столетие физики старались соединить эту странную и неожиданную систему с общепринятыми взглядами на мир; эти попытки все еще на полном ходу. Проблема лежит в согласовании макроскопического опыта повседневной жизни с микроскопической реальностью, обнаруженной квантовой механикой. Для жизни в этом мире мы пользуемся тем, что, хотя допустимо подвергаться бредовым идеям экономического и политического происхождения, по крайней мере, пока речь идет о его физических свойствах, проявляется стабильность и надежность. Вас не беспокоит, что атомные составляющие воздуха, который вы сейчас вдыхаете, внезапно рассеются, оставив вас хватать ртом воздух, когда они проявят свои квантовые волноподобные свойства путем рематериализации, скажем, на обратной стороне Луны. И вы правы, не беспокоясь о таком исходе, поскольку согласно квантовой механике вероятность такого исхода, хотя и не нуль, но до смешного мала. Но что делает вероятность столь малой?

Грубо говоря, тому есть две причины. Первая: по шкале атомных расстояний Луна чудовищно далека. И, как упоминалось, во многих случаях (хотя и не во всех) квантовые уравнения показывают, что вероятностная волна обычно имеет заметную величину в некоторой малой области пространства и быстро спадает почти до нуля, как только вы удаляетесь от этой области (как на Рис. 4.5). Так вероятность того, что даже отдельный электрон, который вы ожидаете найти в том же помещении, что и вы, – как один из тех, что вы просто выдыхаете, – будет найден на секунду или две на обратной стороне Луны, хотя и не нуль, но экстремально мала. Так мала, что вероятность того, что вы заключите брак с Николь Кидман или Антонио Бандерасом, будет в сравнении казаться огромной. Вторая: имеется уйма электронов, так же как и протонов и нейтронов, формирующих воздух в вашей комнате. Вероятность того, что все эти частицы сделают то, что экстремально маловероятно даже для одной из них, настолько мала, что ее тяжело оценить мимолетной мыслью. Это будет подобно не только женитьбе на вызывающей у вас сердечный трепет кинозвезде, но также и выигрышу каждую неделю каждой из проводимых лотерей, для чего потребуется промежуток времени, по сравнению с которым текущий возраст вселенной покажется лишь космическим мгновением.

Это придает определенный смысл тому, почему мы непосредственно не сталкиваемся с вероятностными аспектами квантовой механики в повседневной жизни. Тем не менее, поскольку эксперименты подтверждают, что квантовая механика описывает фундаментальную физику, она представляет прямую атаку на наши базовые убеждения по поводу того, из чего состоит реальность. Эйнштейн, в частности, был глубоко обеспокоен вероятностным характером квантовой теории. Физика, подчеркивал он снова и снова, заключается в деятельности по определению с достоверностью, что происходило, что происходит и что будет происходить в мире вокруг нас. Физики не гадальщики, а физика не есть деятельность по подсчету нерегулярностей. Но Эйнштейн не мог отрицать, что квантовая механика потрясяюще успешна в объяснении и предсказании, экспериментальных наблюдений микромира, хотя и в статистической форме. И вместо того, чтобы пытаться показать, что квантовая механика неверна (задача, которая уже кажется похожей на бесплодную затею в свете беспрецедентных успехов теории), Эйнштейн потратил много усилий на попытки показать, что квантовая механика не является последним словом о том, как работает вселенная. Даже если он не мог сказать, что это, Эйнштейн хотел убедить каждого, что имеется более глубокое и менее эксцентричное описание вселенной, которое еще будет найдено.

В течение многих лет Эйнштейн выпускал серии все более изощренных вопросов, имеющих целью вскрыть пробелы в структуре квантовой механики. Один из таких вопросов, озвученный в 1927 году на 5-й физической конференции Сольвеевского института,[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_8" \o ) содержал факт, что даже если вероятностная волна электрона может выглядеть как на Рис. 4.5, когда бы мы не измерили местонахождение электрона, мы всегда найдем его в том или ином определенном положении. Но, спрашивал Эйнштейн, не значит ли это, что вероятностная волна есть просто временное приближение для более точного описания, – которое еще предстоит открыть, – которое будет предсказывать положение электрона с определенностью? В конце концов, если электрон найден в точке Х, не означает ли это в действительности, что он был *в точке Х или очень близко* в момент времени перед тем, как измерение было завершено? А если так, подталкивал Эйнштейн, не означает ли это, что уверенность квантовой механики в вероятностной волне – волне, которая в этом примере говорит, что электрон имел некоторую вероятность находится далеко от точки Х, – свидетельствует о неадекватности теории для описания правильной лежащей в основе всего реальности?

Позиция Эйнштейна проста и убедительна. Что может быть более естественным, чем ожидать, что частица будут находиться в месте или, в самом крайнем случае, близко от места, где она найдена моментом позже? Если это так, то более глубокое понимание физики должно обеспечить эту информацию и обойтись без грубой схемы вероятностей. Но датский физик Нильс Бор и его окружение из защитников квантовой механики были не согласны. Подобные аргументы, утверждали они, проистекают из традиционного мышления, в соответствии с которым каждый электрон следует отдельной определенной траектории, по которой он путешествует туда и сюда. А эта мысль полностью противоречит Рис. 4.4, так как если каждый электрон следует по определенной траектории – подобно классическому образу пули, выпущенной из пистолета, – будет экстремально тяжело объяснить наблюдаемую интерференционную картину: что с чем будет интерферировать? Отдельные пули, выстреливаемые одна за одной из отдельного пистолета определенно не могут интерферировать друг с другом, так что если электрон летит как пуля, как мы будем объяснять картину на Рис. 4.4?

Вместо этого, согласно Бору и Копенгагенской интерпретации квантовой механики, которую он убедительно отстаивал, *до того, как кто-нибудь измерит положение электрона, не имеет смысла даже спрашивать, где он*. Он не имеет определенного положения. Вероятностная волна шифрует возможность того, что электрон, когда он будет подходящим образом исследован, будет найден здесь или там, и это в полном смысле слова все, что можно сказать о его положении. Пауза. Электрон имеет определенное положение в обычном интуитивном смысле только в момент, когда мы "смотрим" на него – в момент, когда мы измеряем его положение, – идентифицируя его локализацию с определенностью. Но до (и после) этого мы должны принять, что все, что электрон имеет, это потенциальное положение, описываемое вероятностной волной, которая, как и всякая волна, подвержена интерференционным эффектам. Это не то, что электрон имеет положение и мы не знаем этого положения, пока мы не проведем наше измерение. Точнее, вопреки тому, что вы ожидали, электрон просто не имеет определенного положения перед тем, как измерение проведено.

Это предельно странная реальность. С этой точки зрения, когда мы измеряем положение электрона, мы не измеряем объективное, существующее заранее свойство реальности. Скорее, акт измерения глубоко вмешивается в создание самой реальности, которая измеряется. Перенеся это от электронов на повседневную жизнь, Эйнштейн саркастически заметил: "Вы действительно верите, что Луна не здесь, пока мы не посмотрим на нее?" Адепты квантовой механики отреагировали версией старой байки про дерево, упавшее в лесу: если никто не смотрит на Луну, – если никто не "измеряет ее положение путем разглядывания ее", – то для нас нет способа узнать, там ли она, так что нет смысла и задавать этот вопрос. Эйнштейн нашел это в высшей степени неудовлетворительным. Это было дикое расхождение с его концепцией реальности; он твердо верил, что Луна здесь, смотрит на нее кто-нибудь или нет. Но приверженцы квантовой механики остались при своих убеждениях.

Второй вопрос Эйнштейна, поднятый на Сольвеевской конференции в 1930 году, следовал вплотную за первым. Он описывал гипотетический прибор, который (через хитрую комбинацию линейки, часов и подобного фотографическому затвора), казалось, устанавливал, что частица вроде электрона должна иметь определенные свойства – до того, как их измерят или определят, – что квантовая механика считает невозможным. Детали несущественны, но результат отчасти ироничен. Когда Бор изучил вызов Эйнштейна, он был полностью выбит из колеи – сначала он не увидел изъянов в аргументах Эйнштейна. Еще через день он пришел в норму и полностью опроверг заявления Эйнштейна. А удивительной вещью было то, что ключом к отзыву Бора оказалась ОТО! Бор выяснил, что Эйнштейн упустил из виду свое собственное открытие, что гравитация деформирует время, – так что часы тикают с темпом, зависящим от гравитационного поля, которое они испытывают. Когда это дополнение было включено, Эйнштейн был вынужден согласиться, что его заключения оказываются прямо в русле ортодоксальной квантовой теории.

Хотя его построения были разрушены, Эйнштейн остался глубоко неудовлетворен квантовой механикой. В последующие годы он держал Бора и его коллег на прицеле, выдавая один новый вызов за другим. Его наиболее сильная и долго длившаяся атака была нацелена на нечто, известное как *принцип неопределенности*, прямое следствие квантовой механики, сформулированный в 1927 году Вернером Гейзенбергом.

Гейзенберг и неопределенность

Принцип неопределенности обеспечивает четкую количественную меру того, насколько тесно вероятность вплетена в ткань квантовой вселенной. Чтобы понять это, представим себе меню фиксированной цены в обычном китайском ресторане. Блюда выстроены в две колонки, А и В, и если, например, вы заказали первое блюдо из колонки А, вы уже не можете заказать первое блюдо из колонки В; если вы заказали второе блюдо из колонки А, вам уже нельзя заказать второе блюдо из колонки В, и так далее. Таким образом, ресторан устанавливает диетический дуализм, кулинарную дополнительность (она, в частности, призвана уберечь вас от заказа набора из наиболее дорогостоящих блюд). По меню фиксированной цены вы можете получить утку по-пекински или лобстера по-кантонски, но не их обоих.

Принцип неопределенности Гейзенберга сходен с этим. Он утверждает, грубо говоря, что физические свойства в микроскопической области (положения частиц, скорости, энергии, угловые моменты и так далее) могут быть разделены на два списка, А и В. И, как открыл Гейзенберг, знание первого свойства из списка А фундаментально подрывает вашу возможность получить знание о первом свойстве из списка В; знание второго свойства из списка А фундаментально подрывает вашу возможность получить знание о втором свойстве из списка В; и так далее. Более того, подобно допустимости блюда, содержащего немного утки по-пекински и немного лобстера по-кантонски, но только в пропорции, которая дает туже самую общую цену, чем более точно ваше знание о свойстве из одного списка, тем менее точно может быть ваше знание о соответствующем свойстве из второго списка. Фундаментальная невозможность одновременно определить все свойства из обоих списков – определить с достоверностью все эти свойства микроскопической области – и есть неопределенность, обнаруживаемая принципом Гейзенберга.

Например, чем более точно вы знаете, где частица находится, тем менее точно вы можете любым путем узнать ее скорость. Аналогично, чем более точно вы знаете, как быстро частица движется, тем менее вы в состоянии определить, где она находится. Отсюда квантовая теория устанавливает свою собственную дуальность: вы можете точно найти некоторые свойства микроскопической области, но при этом вы уничтожаете возможность точного определения некоторых других свойств, дополнительных к первым.

Чтобы понять, почему это так, проследуем грубому описанию, разработанному самим Гейзенбергом, которое дает приемлемую интуитивную картину, несмотря на неполноту в отдельных аспектах, которые мы будем обсуждать. Когда мы измеряем положение любого объекта, мы в общем случае взаимодействуем с ним некоторым образом. Если мы ищем выключатель в темной комнате, мы знаем, что мы определим его местоположение, когда коснемся его. Когда летучая мышь ищет полевую, она отбрасывает на свою цель ультразвуковой луч и интерпретирует отраженную волну. Самый общий пример из всех – это фиксация чего-либо путем взгляда, путем получения света, который отражается от объекта и попадает в наши глаза. Ключевым моментом является то, что это взаимодействие влияет не только на нас, но также влияет на объект, чье положение определяется. Любой свет, когда он отражается от объекта, передает ему мельчайший толчок. Конечно, на объекты, с которыми приходится сталкиваться в повседневной жизни, вроде книги в ваших руках или часов на стене, исчезающе малый толчок от падающего света не оказывает заметного воздействия. Но когда свет сталкивается с мельчайшей частицей вроде электрона, он оказывает большое влияние: когда свет отскакивает от электрона, он изменяет скорость электрона, почти как ваша собственная скорость меняется от сильного порывистого ветра, который хлестнул из-за угла улицы. Фактически, чем более точно вы хотите идентифицировать положение электрона, тем более остро определенным и энергичным должен быть световой луч, тем большее влияние он окажет на движение электрона.

Это означает, что если вы измеряете положение электрона с высокой точностью, вы неизбежно испортите свой собственный эксперимент: акт точного измерения положения нарушит скорость электрона. Вы, следовательно, можете точно узнать, где находится электрон, но вы не можете так же точно узнать, как быстро в этот момент он движется. И наоборот, вы можете точно измерить, как быстро движется электрон, но, проделав это, вы уничтожаете возможность точного определения его положения. Природа имеет встроенный предел точности, с которой такие дополнительные свойства могут быть определены. И хотя мы состредоточились на электронах, принцип неопределенности совершенно общий: он применим к чему угодно.

В повседневной жизни мы запросто говорим о вещах вроде автомобиля, пересекающего контрольную отметку на дороге (положение) в то время, как он проезжает 90 миль в час (скорость), одновременно определяя эти два физических свойства. В действительности квантовая механика говорит, что такое определение не имеет точного смысла, поскольку вы никогда не можете одновременно измерить определенное положение и определенную скорость. Смысл, который мы придаем таким некорректным описаниям физического мира, заключается в том, что на повседневном уровне величина неопределенности ничтожна и всегда может быть проигнорирована. Вы видите, что принцип Гейзенберга не просто декларирует неопределенность, он также устанавливает – с полной ясностью – минимальную величину неопределенности в каждой ситуации. Если вы примените его формулу к скорости вашего автомобиля в тот момент, когда он пересекает контрольную отметку на дороге, положение которой известно с точностью до сантиметра, то неопределенность в скорости окажется в пределах миллиардной от миллиардной от миллиардной от миллиардной доли от мили в час. Действия финишной команды будут полностью соответствовать законам квантовой физики, если она объявит, что ваша скорость была между 89,999999999999999999999999999999999999 и 90,000000000000000000000000000000000001 миль в час, когда вы промчались мимо контрольной отметки; настолько точно, насколько это возможно в рамках принципа неопределенности. Но если вы замените ваш массивный автомобиль на утонченный электрон, чье положение вы знаете с точностью до одной миллиардной метра, то неопределенность в его скорости составит чудовищную величину 100 000 миль в час. Неопределенность всегда присутствует, но становится существенной только на микроскопических масштабах.

Объяснение неопределенности как проявления неизбежного возмущения, возникающего из-за процесса измерения, обеспечивает физиков полезным интуитивным руководством, а также мощной объясняющей схемой в определенных конкретных ситуациях. Однако, оно может также ввести в заблуждение. Оно может дать впечатление, что неопределенность возникает только когда мы, нагромождая эксперименты, вмешиваемся в вещи. Это не верно. Неопределенность строится из волновой природы квантовой механики и существует независимо от того, проводим мы или не проводим грубые измерения. Как пример, посмотрим на очень простую вероятностную волну частицы, аналог мягко перекатывающейся океанской волны, показанную на Рис. 4.6. Поскольку все гребни однородно движутся направо, вы можете считать, что эта волна описывает частицу, движущуюся со скоростью гребней волн; эксперимент подтверждает это предположение. Но где частица находится? Поскольку волна однородно распределена по пространству, для нас нет способа определить, что электрон находится здесь или там. После измерения он безусловно будет найден где-нибудь. Итак, пока мы точно знаем, как быстро движется частица, имеется гигантская неопределенность в ее положении. И, как вы видите, это заключение не зависит от нашего возмущения, действующего на частицу. Мы ее даже не касались. Вместо этого, неопределенность зависит от базового свойства волн: они могут быть распределенными в пространстве.

Хотя детали могут различаться, аналогичные объяснения применимы ко всем другим формам волн, так что общий урок понятен. В квантовой механике неопределенность просто есть.



***Рис 4.6****Вероятностная волна с однородной последовательностью гребней и впадин представляет частицу с определенной скоростью. Но поскольку гребни и впадины однородно распределены в пространстве, положение частицы полностью не определено. Она с равной вероятностью может быть где угодно.*

Эйнштейн, неопределенность и вопросы реальности

Важный вопрос, который уже мог прийти вам на ум, является ли принцип неопределенности утверждением о том, что мы знаем о реальности, или это утверждение о самой реальности. Имеют ли объекты, составляющие вселенную, положение и скорость подобно обычным классическим объектам, которые мы представляем, – летящему бейсбольному мячу, бегуну на дорожке, медленному восходу Солнца, отслеживающему его путь через небо, – хотя квантовая неопределенность говорит нам, что эти свойства реальности всегда находятся вне нашей способности знать их одновременно, даже в принципе? Или квантовая неопределенность полностью разрушает классический шаблон, говоря нам, что список характерных признаков, которые наша классическая интуиция приписывает реальности, список, возглавляемый положениями и скоростями тел, составляющих мир, вводит в заблуждение? Говорит ли квантовая неопределенность нам, что в любой выбранный момент частицы просто не имеют определенного положения и определенной скорости?

Для Бора эта проблема была на одном уровне с мировоззрением. Физика имеет дело только с вещами, которые мы можем измерить. С точки зрения физики это и есть реальность. Пытаться использовать физику для анализа "более глубокой" реальности, находящейся за пределами того, то мы можем узнать путем измерений, похоже на попытку использовать физику для анализа хлопка одной ладонью. Но в 1935 году Эйнштейн вместе с двумя коллегами, Борисом Подольским и Натаном Розеном, представил эту проблему таким убедительным и хитрым образом, что началось нечто, подобное хлопку одной ладонью, отозвавшемуся через пятьдесят лет в виде грозового раската, который провозгласил намного более мощную атаку на наше представление о реальности, чем даже Эйнштейн когда-либо имел в виду.

Целью статьи Эйнштейна-Подольского-Розена было показать, что квантовая механика, неоспоримо успешная в предсказаниях и объяснениях данных, не может быть последним словом в объяснении физики микромира. Их стратегия была проста и основывалась на простой постановке вопроса: они хотели показать, что каждая частица обладает определенным положением и определенной скоростью в любой данный момент времени, а отсюда они хотели обосновать заключение, что принцип неопределенности выражает фундаментальное ограничение на сам квантовомеханический подход. Если каждая частица имеет положение и скорость, но квантовая механика не может работать с этими свойствами реальности, тогда квантовая механика обеспечивает только частичное описание вселенной. Квантовая механика, хотели показать они, следовательно, является неполной теорией физической реальности и, вероятно, просто очередным этапом на пути к более глубокой схеме, которая, как ожидается, будет открыта. На самом деле, как мы увидим, они заложили основы для демонстрации кое-чего еще более потрясающего: нелокальности квантового мира.

Работа Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР) была частично инспирирована грубым объяснением принципа неопределенности, принадлежащим самому Гейзенбергу: когда вы измеряете, где находится что-либо, вы с необходимостью возмущаете его, при этом портите любую попытку одновременного определения его скорости. Хотя, как мы видели, квантовая неопределенность есть более общее понятие, чем указание на "возмущающую" трактовку, Эйнштейн, Подольский и Розен убедительно и хитроумно показали, что возникает в конце концов, если неаккуратно обращаться с любым источником неопределенности. Что если, предположили они, вы можете провести непрямое измерение как положения, так и скорости частицы способом, который никогда не приведет вас в контакт с самой частицей? Например, используя классическую аналогию, представим, что Род и Тодд Фландерс приняли решение предпринять важное одинокое путешествие по заново созданной Спрингфилдовской ядерной пустыне. Они стартовали спина к спине из центра пустыни и договорились шагать прямо в противоположных направлениях с точно одинаковой, оговоренной заранее скоростью. Представим далее, что девятью часами позже их отец, Нэд, возвращаясь после своего восхождения на Пик Спрингфилда, и поймав глазами Рода, побежал к нему и безнадежно спросил о местонахождении Тодда. К этому времени Тодд ушел далеко, но расспросив Рода и наблюдая его, Нэд, тем не менее, смог узнать многое о Тодде. Если Род находится точно в 45 милях к востоку от стартовой точки, Тодд должен находиться точно в 45 милях к западу от нее. Если Род шагает со скоростью точно 5 миль в час на восток, Тодд должен шагать точно со скоростью 5 миль в час на запад. Так что, хотя Тодд удален примерно на 90 миль, Нэд может определить его положение и скорость, хотя и косвенно.

Эйнштейн и его коллеги применили похожую стратегию к квантовой сфере. Имеются хорошо известные физические процессы, при которых две частицы испускаются из одного места со свойствами, которые соотносятся примерно таким же образом, как движение Рода и Тодда. Например, если начальная единая частица распадается на две частицы одинаковой массы, которые разлетаются "спина к спине" (подобно тому как взрыв выбрасывает два осколка в противоположных направлениях), будет нечто, что является общим в области физики субатомных частиц, а именно, скорости двух составляющих будут равны и противоположны. Более того, положения двух составляющих частиц будут также тесно связаны и, для простоты, частицы могут мыслиться как всегда находящиеся на одинаковом расстоянии от их места рождения.

Важное отличие между классическим примером с Родом и Тоддом и квантовым описанием двух частиц заключается в том, что, хотя мы можем сказать с определенностью, что тут имеется четкая взаимосвязь между скоростями двух частиц, – если одна измерена и найдена движущейся влево с данной скоростью, то вторая будет с необходимостью двигаться вправо с той же скоростью, – мы не можем предсказать действительную численную величину скорости, с которой частицы движутся. Вместо этого, лучшее, что мы можем сделать, это использовать законы квантовой физики, чтобы предсказать вероятность, что одной из частиц достигнута любая определенная скорость. Аналогично, в то время как мы можем сказать с определенностью, что имеется четкая связь между положениям частиц, – если положение одной измерено в данный момент и найдено соответствующим некоторой точке, положение другой с необходимостью будет на том же расстоянии от точки старта, но в противоположном направлении, – мы не можем предсказать с определенностью действительное положение каждой частицы. Вместо этого, лучшее, что мы можем сделать, это предсказать вероятность, что одна из частиц находится в любом выбранном положении. Таким образом, квантовая механика не дает определенных ответов по поводу скоростей или положений частиц, она дает в определенной ситуации четкие указания по поводу соотношений между скоростями и положениями частиц.

Эйнштейн, Подольский и Розен попытались использовать эти соотношения, чтобы показать, что каждая из частиц на самом деле имеет определенное положение и определенную скорость в любой заданный момент времени. Это делалось так: представим, что вы измеряете положение летящей направо частицы и, таким образом, косвенно получаете положение летящей налево частицы. ЭПР утверждают, что поскольку вы ничего, абсолютно ничего не делали с летящей налево частицей, она должна иметь это положение, и все, что вы сделали, определяет его, хотя и косвенно. Тогда ЭПР остроумно замечают, что вы могли вместо этого выбрать измерение скорости летящей направо частицы. В этом случае вы косвенно получите определение скорости летящей налево частицы, без какого-либо ее возмущения. И опять, утверждают ЭПР, поскольку вы ничего, абсолютно ничего не делали с летящей налево частицей, она долна иметь именно эту скорость, и все, что вы сделали, определяет эту скорость. Объединяя оба случая вместе – измерение, которое вы сделали, и измерение, которое вы могли бы сделать, – ЭПР заключают, что летящая налево частица имеет определенное положение и определенную скорость в любой заданный момент времени.

Поскольку это тонко и критически важно, позволю себе повторить еще раз. ЭПР доказывают, что ничто в вашем акте измерения летящей направо частицы не может оказать никакого воздействия на летящую налево частицу, поскольку они суть отдельные и разделенные расстоянием сущности. Летящая налево частица полностью не имеет понятия о том, что вы делаете или можете сделать с летящей направо частицей. Между частицами могут быть метры, километры или световые годы, когда вы проделываете ваши измерения над летящей направо частицей, так что, коротко, летящая налево частица может не беспокоиться о том, что вы делаете. Поэтому любое свойство, которое вы сейчас изучаете или можете изучать в принципе по поводу летящей налево частицы путем исследования ее летящего направо дубликата, должно быть определенным, существующим свойством летящей налево частицы, полностью независимым от ваших измерений. А поскольку, если вы измеряете положение правой частицы, вы получите знание о положении левой частицы, а если вы измеряете скорость правой частицы, вы получите знание о скорости левой частицы, должно быть так, что летящая налево частица на самом деле имеет определенные как положение, так и скорость. Конечно, эта дискуссия полностью может быть проведена и в том случае, если поменять ролями летящие налево и летящие направо частицы (и, фактически, до проведения измерения мы даже не можем сказать, какая частица летит налево, а какая направо); это приводит к заключению, что обе частицы имеют определенные положения и скорости.

Следовательно, заключают ЭПР, квантовая механика есть неполное описание реальности. Частицы имеют определенные положения и скорости, но квантовомеханический принцип неопределенности показывает, что эти свойства реальности находятся вне границ действия теории. Если в соответствии со сказанным и вместе с большинством других физиков вы верите, что полная теория природы должна описывать каждый атрибут реальности, отказ квантовой механики описывать одновременно положения и скорости частиц означает, что она пропускает некоторые существенные черты реальности и, следовательно, не является полной теорией; она не является последним словом. Это то, что решительно отстаивали Эйнштейн, Подольский и Розен.

Квантовый ответ

Когда ЭПР приходили к заключению, что каждая частица имеет определенное положение и скорость в любой заданный момент времени, отметим, что если вы проследуете по их процедуре, вы упустите действительное определение указанных атрибутов. Я говорил выше, что вы могли бы выбрать измерение скорости летящей направо частицы. Если вы сделаете это, вы внесете возмущение в ее положение; с другой стороны, если вы выберете измерение ее положения, вы исказите ее скорость. Если же вы не имеете обоих этих атрибутов летящей направо частицы в руках, вы не имеете их обоих и для летящей налево частицы. Так что *тут нет противоречия с принципом неопределенности*: Эйнштейн и его сотрудники полностью отдавали себе отчет, что так одновременно определить положение и скорость любой данной частицы нельзя. Однако, и в этом соль, даже без одновременного определения положения и скорости обеих частиц, аргументы ЭПР показывают, что каждая имеет определенное положение и скорость. Для них это был вопрос реальности. Для них теория не может претендовать на полноту, если имеются элементы реальности, которые она не описывает.

После небольшой интеллектуальной суеты в ответ на это неожиданное наблюдение, защитники квантовой механики успокоились на своем обычном прагматическом подходе, хорошо обобщенном выдающимся физиком Вольфгангом Паули: "Напрягать ум по поводу проблемы, существует ли нечто, о чем никто не может ничего знать, нужно не в большей степени, чем по поводу античного вопроса, сколько ангелов можно посадить на острие иглы".[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_9" \o ) Физика в целом и квантовая механика в частности могут иметь дело только с измеряемыми свойствами вселенной. Все другое просто находится вне сферы физики. Если вы не можете измерить одновременно положение и скорость частицы, то нет смысла и разговаривать о том, имеет ли она одновременно положение и скорость.

ЭПР с этим не согласны. Реальность, утверждали они, есть нечто большее, чем показания детекторов; она есть нечто большее, чем полная совокупность всех наблюдений в данный момент. Они верили, что когда совсем никто, абсолютно никто, ни прибор, ни устройство, ни что-нибудь еще "не смотрит" на Луну, Луна все еще там. Они верили, что Луна все еще остается частью реальности.

В известном смысле это выступление перекликается с дебатами между Ньютоном и Лейбницем по поводу реальности пространства. Может ли нечто рассматриваться как реальное, если мы не можем в действительности потрогать его, или увидеть его или каким-либо образом измерить его? В главе 2 описывалось, как ньютоновское ведро изменило характер споров о пространстве, внезапно предположив, что влияние пространства должно наблюдаться непосредственно в искривленной поверхности вращающейся воды. В 1964 году одним ошеломляющим ударом, который один комментатор назвал "самым глубоким открытием науки",[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_10" \o ) ирландский физик Джон Белл сделал то же самое для споров о квантовой реальности.

В следующих четырех секциях мы опишем открытие Белла, благоразумно избегая все, даже минимальные технические подробности. Тем не менее, даже если обсуждение использует менее сложные обоснования, чем те, что решают разногласия в игре в кости, оно должно включать несколько этапов, которые мы должны описать и затем связать вместе. В зависимости от ваших индивидуальных пристрастий к деталям, можно прийти к месту, когда вы точно захотите паузы. Если это произойдет, смело перепрыгивайте на восемь страниц вперед (секция "Нет дыма без огня"), где вы найдете обобщение и обсуждение выводов, вытекающих из открытия Белла.

Белл и спин

Джон Белл переработал центральную идею статьи Эйнштейна-Подольского-Розена из философских спекуляций в вопрос, какие ответы можно получить из конкретного экспериментального измерения. Неожиданным оказалось, что все, что ему потребовалось, чтобы совершить это, было рассмотрение ситуации, в которой имелись не просто два свойства – например, положение и скорость, – которые квантовая неопределенность запрещает нам определять одновременно. Он показал, что если имеются три или более свойств, которые одновременно находятся под зонтиком неопределенности, – три или более свойств, отличающихся тем, что измеряя одно, вы портите остальные и, следовательно, не можете определить какое-либо из них, – тогда имеется экперимент, проясняющий вопрос реальности. Простейший такой пример включает нечто, известное как *спин*.

С 1920-х годов физикам было известно, что такое спин частиц, – грубо говоря, частицы исполняют вращательное движение, похожее на вращение футбольного мяча вокруг себя, когда он направляется к цели. Но большое число существенных особенностей теряется при таком классическом образе, и самым главным для нас будут следующие два момента. Первый, частицы – например, электроны и протоны, – могут вращаться только по часовой стрелке или против часовой стрелки с некоторым никогда не изменяющимся темпом вокруг любой выбранной оси; ось вращения частицы может изменять направление, но темп ее вращения не может замедлиться или ускориться. Второй, квантовая неопределенность применительно к спину показывает, что так же, как вы не можете одновременно определить положение и скорость частицы, вы не можете одновременно определить спин частицы относительно более чем одной оси. Например, если футбольный мяч вращается относительно оси, ориентированной на северо-восток, его спин распределен между направленной на север и направленной на восток осями – и при подходящем измерении вы можете определить, какая часть спина ориентирована относительно каждой из осей. Но если вы измеряете спин электрона относительно любой произвольно выбранной оси, вы не сможете найти частичное количество спина. Никогда. Это похоже на то, как если бы само измерение влияло на электрон, собирая вместе все его вращательные движения и выстраивая их или по или против часовой стрелки относительно оси, на которой вам случилось сосредоточиться. Более того, поскольку ваши измерения влияют на спин электрона, вы теряете возможность определить, как он вращался относительно горизонтальной оси, относительно оси, идущей назад и вперед, или относительно любых других осей, выбранных перед вашим измерением. Эти особенности квантовомеханического спина тяжело описать полностью, и тяжело выделить пределы классических представлений при раскрытии правильной природы квантового мира. Но математика квантовой теории и десятилетия экспериментов убеждают нас, что эти характеристики квантового спина несомненны.

Смысл введения спина здесь не в том, чтобы погрязнуть в сложностях физики частиц. Скорее, пример спина частицы ненадолго обеспечит нам простую лабораторию для извлечения чудесных неожиданных ответов на вопрос реальности. А именно, имеет ли частица одновременно определенную величину спина относительно каждой и любой оси, хотя мы никогда не можем узнать его для более чем одной оси в один момент вследствие квантовой неопределенности? Или принцип неопределенности говорит нам что-то другое? Говорит ли он нам, вопреки классическим представлениям о реальности, что частица просто не имеет и не может иметь такие свойства одновременно? Говорит ли он нам, что частица пребывает в состоянии квантового чистилища, не имея определенного спина относительно любой выбранной оси, пока кто-нибудь или что-нибудь не измерит его, побудив его к схлопыванию в положение "смирно" и достижению – с вероятностью, определяемой квантовой теорией, – той или иной определенной величины спина (по или против часовой стрелки) относительно выбранной оси? При изучении этих вопросов, по существу, тех же самых, которые мы задавали в случае положений и скоростей частиц, мы можем использовать спин для исследования природы квантовой реальности (и для получения ответов, которые значительно превосходят по важности частный пример спина). Посмотрим на это.

Как было ясно показано физиком Дэвидом Бомом,[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_11" \o ) аргументы Эйнштейна, Подольского и Розена легко могут быть распространены на вопрос, имеют ли частицы определенные спины относительно любой или всех выбранных осей. Далее излагается, как это происходит. Выберем два детектора, приспособленных для измерения спина входящего электрона, один в левой стороне лаборатории, а второй в правой стороне. Установим для двух электронов режим испускания их "спина к спине" из источника, находящегося посередине между двумя детекторами, так что их спины – еще проще, чем их положения и скорости, как в наших более ранних примерах, – скоррелированы. Детали того, как это происходит, не важны; что важно, так это то, что это можно сделать и, фактически, можно сделать легко. Корреляция может быть устроена так, что если левый и правый детекторы настроены на измерение спинов вдоль оси, располагающейся в одном и том же направлении, они будут получать одинаковые результаты: если детекторы настроены на измерение спина соответственно приходящих к ним электронов относительно вертикальной оси и левый детектор обнаруживает, что спин ориентирован по часовой стрелке, так же будет и в правом детекторе; если детекторы настроены на измерение спина вдоль оси, наклоненной на 60 градусов по часовой стрелке от вертикали, и левый детектор измеряет ориентацию спина против часовой стрелки, так же будет и в правом детекторе; и так далее. Еще раз, в квантовой механике лучшее, что мы можем сделать, это предсказать вероятность, что детекторы найдут ориентацию спина по или против часовой стрелки, но мы можем предсказать со 100 процентной определенностью, что какое бы значение спина не было найдено первым детектором, второй найдет такое же.\*

*(\*)"Чтобы избежать лингвистических сложностей, я описываю электронные спины как полностью скоррелированные, хотя более общепринятым описанием является то, в котором они полностью антикоррелированы: какой бы результат не получил первый детектор, второй покажет противоположный. Для сравнения с традиционным описанием представьте, что я переставил местами на одном из детекторов все метки, отмечающие ориентации по и против часовой стрелки."*

Усовершенствование Бомом аргументов ЭПР теперь сводится к тому, что все намерения и цели остаются теми же, которые были в оригинальной версии, которая ориентировалась на положения и скорости. Корреляция между спинами частиц позволяет нам косвенно измерить спин двигающейся налево частицы относительно некоторой оси путем измерения спина у ее двигающегося направо компаньона относительно этой оси. Поскольку это измерение проводится далеко на правой стороне лаборатории, оно не в состоянии повлиять на двигающуюся налево частицу никаким образом. Отсюда последняя должна всегда иметь величину спина точно определенной; все, что мы сделали, измеряет ее, хотя и косвенно. Более того, поскольку мы можем выбрать проведение этого измерения относительно любой оси, такое же заключение должно сохраняться для любой оси: летящий налево электрон должен иметь определенный спин относительно любой и каждой оси, даже если мы можем явно определить его только относительно одной оси в данный момент времени. Конечно, роли левого и правого могут быть изменены друг на друга, что приводит к заключению, что каждая частица имеет определенный спин относительно любой оси.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_12" \o )

На этом этапе, не наблюдая очевидной разницы с экспериментом с положениями/скоростями, вы можете последовать примеру Паули и склониться к заключению, что нет смысла в размышлениях о таких проблемах. Если вы не можете в действительности измерить спин относительно отличающейся оси, то какое значение имеет знание о том, имеет ли частица, тем не менее, определенный спин – по или против часовой стрелки – относительно нее? Квантовая механика и физика в целом связаны только с оценками тех свойств мира, которые могут быть измерены. И никто, ни ЭПР, ни Бом не утверждали, что измерения могут быть произведены. Вместо этого, они утверждали, что частицы обладают свойствами, запрещенными принципом неопределенности, даже если мы никогда не сможем явно узнать их точные значения. Такие свойства известны как скрытые свойства, или, более общо, *скрытые переменные*.

На этом этапе Джон Белл все перевернул. Он открыл, что даже если вы не можете в действительности определить спин частицы относительно более чем одной оси, тем не менее, если фактически она имеет определенный спин относительно всех осей, тогда имеются тестируемые, наблюдаемые следствия этого спина.

Тестирование реальности

Чтобы ухватить сущность прозрения Белла, вернемся к Малдеру и Скалли и представим, что каждый из них получил другую посылку, также содержащую титановые коробочки, но с существенно новыми свойствами. Вместо наличия одной дверки каждая титановая коробочка имеет три: одну сверху, одну сбоку и одну спереди.[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_13" \o ) Сопровождающее письмо информирует их, что сфера внутри каждой коробочки теперь хаотически выбирает между красными вспышками и синими вспышками, когда любая одна из трех дверок коробочки открыта. Если у Малдера и Скалли открыты разные дверки (верхняя против боковой против передней) на данной коробочке, цвет, случайно выбираемый сферой, может отличаться, но раз одна дверка открыта и сфера мигнула, нет способа определить, что произойдет, когда будет выбрана другая дверка. (В физических приложениях это свойство фиксирует квантовую неопределенность: раз уж вы измерили одно свойство, вы не можете сказать чего-либо по поводу других). Наконец, письмо говорит им, что опять имеется таинственная связь, странное запутывание между двумя наборами титановых коробочек: даже если все сферы хаотически выбирают, каким цветом им мигать, когда одна из трех дверок на их коробочках открыта, если как Малдер, так и Скалли откроют одинаковую дверку на коробочке с одинаковым номером, письмо предсказывает, что они увидят вспышку одинакового цвета. Если Малдер откроет верхнюю дверку на своей коробочке 1 и увидит синий цвет, тогда письмо предсказывает, что Скалли также увидит синий цвет, если она откроет верхнюю дверку на ее коробочке 1; если Малдер откроет боковую дверку на его коробочке 2 и увидит красный, тогда письмо предсказывает, что Скалли также увидит красный, если откроет боковую дверку на ее коробочке 2, и так далее. Конечно, когда Скалли и Малдер откроют первые несколько дюжин коробочек, – согласовывая по телефону, какую дверку открывать на каждой, – они проверят предсказания письма.

Хотя Малдер и Скалли поставлены в немного более сложную ситуацию, чем ранее, на первый взгляд кажется, что те же объяснения, которые Скалли использовала ранее, одинаково хороши и здесь.

"Малдер," – говорит Скалли, – "это такая же глупая посылка, как и вчерашняя. И опять, тут нет тайны. Сфера внутри каждой коробочки должна быть просто запрограммирована. Ты не видишь?"

"Но теперь тут три дверки," – предостерегает Малдер, – "так что сфера не может "знать", какую дверку мы будем открывать, правильно?" "Это и не нужно," – объясняет Скалли. – "Это часть программы. Посмотри, вот пример. Возьми быстренько следующую неоткрытую коробочку, номер 37, и я сделаю то же самое. Теперь представь, для обсуждения, что сфера в моей коробочке 37 запрограммирована, скажем, мигать красным, если открыта верхняя дверка, синим, если открыта боковая, и снова красным, если открыта фронтальная дверка. Я называю это программу *красный, синий, красный*. Тогда ясно, что кто бы ни послал нам этот материал, он вложил в твою коробочку 37 ту же самую программу, и если мы оба откроем одинаковые дверки, мы увидим одинаковые цвета вспышек. Это объясняет "таинственную связь": если коробочки в наших соответствующих коллекциях с теми же номерами запрограммированы одинаковыми инструкциями, то мы будем видеть одинаковые цвета, если мы окрываем одинаковые дверки. Тут нет тайны!"

Но Малдер не верит, что сферы запрограммированы. Он верит письму. Он верит, что сферы хаотически выбирают между красным и синим, когда одна из дверок на их коробочке открыта, и отсюда он пылко верит, что его коробочки и коробочки Скалли имеют некоторую таинственную дальнодействующую связь.

Кто прав? Поскольку нет способа проверить сферы перед или во время предполагаемого случайного выбора цвета (вспомним, каждое такое тайное действие немедленно приводит сферу к случайному выбору между красным и синим, расстраивая любые попытки исследовать, как она реально работает), кажется невозможным определенно проверить, кто прав, Малдер или Скалли.

Однако, что удивительно, после небольшого раздумья Малдер осознал, что имеется эксперимент, который решит вопрос полностью. Рассуждения Малдера прямолинейны, но они требуют коснуться чуть более явных математических обоснований, чем мы это делали ранее для большинства рассмотренных вещей. Это определенная цена за попытку проследовать за деталями – их не то, чтобы много, – но не расстраивайтесь, если некоторые из них проскользнут мимо, мы коротко суммируем ключевые заключения.

Малдер осознал, что он и Скалли могут не только рассмотреть, что случится, если они каждый откроют одинаковые дверки в коробочке с данным номером. И, как он возбужденно излагает Скалли после ее обратного звонка, можно изучить вариант, когда они не всегда выбирают одинаковые дверки и, вместо этого, случайным образом и независимо выбирают, какую дверку открыть в каждой из их коробочек.

"Малдер, пожалуйста. Просто дай мне насладиться моим отпуском. Что мы можем изучить, делая это?"

"Хорошо, Скалли, мы можем определить, является ли твое объяснение правильным или ложным".

"Ладно, я слушаю".

"Это просто," – продолжает Малдер. – "Если ты права, тогда будет то, что я осознал: если ты и я отдельно друг от друга и случайным образом выберем, какую дверку открыть в данной коробочке, мы должны найти, что мы увидим одинаковые цвета вспышек более чем в 50 процентов случаев. Но если это не так, если мы найдем, что цвета вспышек не совпадают *более* чем в 50 процентах коробочек, тогда ты не можешь быть права."

"В самом деле, почему так?" – Скалли немного заинтересовалась.

"Хорошо," – продолжает Малдер, – "есть пример. Предположим, что ты права и каждая сфера работает в соответствии с программой. Просто для конкретности представим, что программа для сферы в отдельной коробочке производит синий, синий и красный цвета. Теперь, поскольку мы оба выбираем одну из трех дверок, всего имеется девять возможных комбинаций дверок, которые мы можем выбрать для открывания для данной коробочки. Например, я могу выбрать верхнюю дверку на моей коробочке, тогда как ты можешь выбрать боковую дверку на твоей коробочке; или я могу выбрать фронтальную дверку, а ты можешь выбрать верхнюю дверку; и так далее."

"Да, конечно." – Скалли подскочила. – "Если мы назовем верхнюю дверку 1, боковую дверку 2, а фронтальную дверку 3, то девять возможных комбинаций дверок это просто (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2) и (3,3)."

"Да, все верно," – продолжает Малдер. – "Теперь важный момент: Из этих девяти возможностей отметим, что пять комбинаций дверок – (1,1), (2,2), (3,3), (1,2) и (2,1) – приводят к тому результату, что мы видим, как сферы в наших коробочках вспыхивают одинаковыми цветами. Первые три комбинации дверок те самые, в которых мы выбираем одинаковые дверки, и, как мы знаем, это всегда приводит к тому, что мы видим одинаковые цвета. Остальные две комбинации дверок (1,2) и (2,1) приводят к тем же самым цветам, поскольку программа диктует, что сферы будут мигать одним цветом – синим – если или дверка 1 или дверка 2 открыты. Итак, поскольку 5 больше, чем половина от 9, это значит, что для более чем половины – более чем 50 процентов – возможных комбинаций дверок, которые мы можем выбрать для открывания, сферы будут вспыхивать одинаковым цветом."

"Но подожди," – протестует Скалли. – "Это только один пример особой программы: синий, синий, красный. В моем объяснении я предполагала, что коробочки с разными номерами могут и в общем случае будут иметь разные программы."

"В действительности, это не имеет значения. Вывод действует для любых из возможных программ. Смотри, мои рассуждения с синим, синим, красным в качестве программы связаны только с тем фактом, что два цвета в программе одинаковы, так что идентичное заключение следует для любой программы: красный, красный, синий или красный, синий, красный и так далее. Любая программа имеет как минимум два одинаковых цвета: программы, которые на самом деле отличаются, это те, в которых все три цвета одинаковы – красный, красный, красный и синий, синий, синий. Но для коробочек с любой из таких программ мы имеем одинаковый цвет вспышки безотносительно к тому, какую дверку мы открыли, так что общая доля вариантов, в которых мы должны увидеть одинаковые цвета, будет только расти. Итак, если твое объяснение правильно и коробочки действуют в соответствии с программами, – даже с программами, которые меняются от одной коробочки к другой, – мы должны согласиться, что мы увидим одинаковые цвета более чем в 50 процентах случаев."

Таков аргумент. Трудная часть закончилась. Суть в том, что имеется тест для определения, права ли Скалли и действует ли каждая сфера в соответствии с программой, которая однозначно определяет, какой цвет вспыхнет в зависимости от того, какая дверка открыта. Если она и Малдер независимо и случайно выберут, какую из трех дверок на каждой из их коробочек открывать, а затем сравнят увиденные ими цвета – коробочка за следующей коробочкой – они должны найти согласие более чем в 50 процентах коробочек. Если выражаться на языке физики, как это будет сделано в следующей секции, прозрение Малдера есть ничто иное как прорыв Джона Белла.

Подсчет ангела за ангелом

Полученный результат прямо переводится на физическую задачу. Представим, что мы имеем два детектора, один в левой стороне лаборатории, а другой в правой стороне, которые измеряют спин входящих частиц вроде электронов, как в эксперименте, обсуждавшемся в предпоследней секции. Детекторы требуют от вас выбора оси (вертикальной, горизонтальной, идущей вперед-назад или одной из бесчисленных осей, которые лежат между указанными), вдоль которой будет измеряться спин; для простоты исследования представим, что мы имеем фиксированно настраиваемые детекторы, которые позволяют сделать только три выбора для осей. При каждом конкретном проведении эксперимента вы будете находить, что входящий электрон вращается по или против часовой стрелки относительно выбранной вами оси.

Согласно Эйнштейну, Подольскому и Розену каждый входящий электрон обеспечивает детектор, в который он влетает, тем, что можно считать программой: даже если оно скрыто, даже если вы не можете его измерить, ЭПР заявляет, что каждый электрон имеет определенное значение спина – или по или против часовой стрелки – относительно любой и каждой из осей. Отсюда, когда электрон попадает в детектор, электрон четко определяет, можете ли вы измерить его спин как направленный по или против часовой стрелки относительно какой-либо оси, которую вы выбрали. Например, электрон, вращающийся по часовой стрелке относительно каждой из трех осей, обеспечивает программу "*по, по, по*" часовой стрелке; электрон, который вращается по часовой стрелке относительно первых двух осей и против часовой стрелки относительно третьей, обеспечивает программу "*по, по, против*" часовой стрелки, и так далее. Чтобы объяснить корреляции между летящими налево и летящими направо электронами, Эйнштейн, Подольский и Розен просто объявили, что каждый из электронов имеет идентичный спин и, таким образом, обеспечивает детекторы, в которые они попадают, одинаковыми программами. Поэтому, если выбраны одинаковые оси для левого и правого детекторов, спиновые детекторы дадут одинаковые результаты.

Отметим, что эти спиновые детекторы в точности воспроизводят все, с чем столкнулись Скалли и Малдер, хотя и с упрощающими заменами: вместо выбора дверок на титановой коробочке мы выбираем оси; вместо разглядывания красной или синей вспышки мы регистрируем спин по или против часовой стрелки. Итак, точно так же, как открывание одинаковых дверок на паре одинаково пронумерованных титановых коробочек приводит к одинаковому цвету вспышек, выбор одинаковых осей на двух детекторах приводит к измерению одинакового направления спина. Точно так же, как открывание определенной дверки на титановой коробочке лишает нас любого знания по вопросу, какой бы цвет вспыхнул, если бы мы открыли другую дверку, измерение спина электрона относительно определенной оси лишает нас из-за квантовой неопределенности любого знания, какое направление спина мы бы нашли, если бы мы выбрали другую ось.

Все предыдущее означает, что анализ Малдера по выяснению, кто прав, в точности таким же образом применимо к ситуации с детекторами, как и к случаю инопланетных сфер. Если ЭПР корректно и каждый электрон действительно имеет определенную величину спина относительно всех трех осей, – если каждый электрон обеспечивает "программу", которая однозначно определяет результат любого из трех возможных измерений спина, – тогда мы можем сделать следующее предсказание. Внимательное изучение данных, собранных по итогам большого числа экспериментов, – в которых оси каждого детектора выбирались случайно и независимо, – покажет, что больше, чем в половине случаев спины двух электронов согласуются, являясь либо оба ориентированными по часовой стрелке, либо оба против часовой стрелки. Если спины электронов не согласуются более чем в половине случаев, Эйнштейн, Подольский и Розен ошиблись.

Это и есть открытие Белла. Оно показывает, что даже если вы не можете реально измерить спин электрона относительно более чем одной оси – даже если вы не можете явно "прочитать" программу, которая подразумевается приложенной к детектору, в который влетает электрон, – это не означает, что попытка изучить, не имеется ли, тем не менее, определенного значения спина относительно более чем одной оси, сродни подсчету ангелов на острие булавки. Далеко не так. Белл нашел, что имеется хорошо определенный проверяемый вывод, связанный с частицами, имеющими определенные значения спина. Используя оси в трех ракурсах, Белл обеспечил путь к подсчету ангелов Паули.

Нет дыма без огня

В случае, если вы пропустили детали, подведем итоги того, где мы находимся. Через принцип неопределенности Гейзенберга квантовая механика заявила, что имеются свойства мира – вроде положения и скорости частицы или спина частицы относительно различных осей, – которые не могут одновременно иметь определенные значения. *Частица согласно квантовой механике не может иметь определенное положение и определенную скорость; частица не может иметь определенный спин (по часовой стрелке или против часовой стрелки) относительно более чем одной оси; частица не может иметь одновременно определенные значения для величин, которые находятся на противоположных сторонах "водораздела" неопределенности*. Вместо этого частицы парят в квантовом чистилище, в размытой, аморфной, вероятностной смеси всех возможностей; и только в процессе измерения выбирается один определенный результат из многих. Ясно, что эта картина реальности радикально отличается от той, которую рисовала классическая физика.

Эйнштейн, вечный скептик в отношении квантовой механики, вместе со своими коллегами, Подольским и Розеном, попытался использовать этот аспект квантовой механики как оружие против самой теории. ЭПР утверждали, что даже если квантовая механика не позволяет одновременно определить такие свойства, частицы, тем не менее, должны иметь определенные значения положения и скорости; частицы должны иметь определенные значения спина относительно всех осей; частицы должны иметь определенные значения для всех величин, запрещенных квантовой неопределенностью. ЭПР, таким образом, утверждали, что квантовая механика не может контролировать все элементы физической реальности – она не может управиться с положением и скоростью частицы; она не может управиться со спином частицы относительно более чем одной оси – и, следовательно, это неполная теория.

Долгое время проблема того, правы ли ЭПР, казалась вопросом больше метафизики, чем физики. Как говорил Паули, если вы не можете реально измерить свойства, запрещенные квантовой неопределенностью, то какую разницу может вообще принести то, что они, тем не менее, существуют в некотором скрытом изгибе реальности? Но, на удивление, Джон Белл нашел нечто, что скрылось от Эйнштейна, Бора и других гигантов теоретической физики двадцатого столетия: он нашел, что простое существование определенных вещей, даже если они находятся за пределами явного измерения или определения, вносит различие – различие, которое можно отследить экпериментально. Белл показал, что если ЭПР были правы, результаты, полученные двумя далеко разнесенными в пространстве детекторами, измеряющими определенные свойства частиц (спин относительно различных случайно выбранных осей в рассмотренной нами схеме), будут согласовываться более чем в 50 процентах случаев.

Белл получил свой результат в 1964 году, но в то время не существовала технология, чтобы провести требуемые эксперименты. В начале 1970х она появилась. Сначала в работах Стюарта Фридмана и Джона Клаузера из Беркли, затем в работах Эдварда Фрая и Рэндалла Томпсона в Техасском Университете А&М и, как кульминация, в начале 1980х в работе Алана Аспекта и сотрудников, работавших во Франции, были проведены все более совершенные и впечатляющие версии этих экспериментов. В эксперименте Аспекта, например, два детектора располагались на расстоянии 13 метров, а контейнер с возбужденными атомами кальция был посередине между ними. Хорошо известная физика показывает, что каждый атом кальция, возвращаясь в свое нормальное, низкоэнергетическое состояние, испускает два фотона, разлетающиеся спина к спине, чьи спины полностью скоррелированы, точно так же как в обсуждавшемся нами примере с коррелированными спинами электронов. В самом деле в эксперименте Аспекта всякий раз, когда настройки детекторов были одинаковы, два фотона после измерения имели спины, полностью выстроенные в одном направлении. Если к детекторам Аспекта подключался свет, вспыхивающий красным в ответ на спин по часовой стрелке и синим в ответ на спин против часовой стрелки, входящие фотоны вызывали указанные вспышки детекторов с указанными цветами.

Итак, и в этом ключевой момент, когда Аспект исследовал данные от большого числа повторений экперимента – данные, в которых левый и правый детекторы настраивались не всегда одинаково, напротив, изменялись независимо и хаотично от эксперимента к эксперименту, – он нашел, что *показания детекторов не согласуются более чем в 50 процентах случаев*.

Этот результат был подобен землетрясению. Это один из тех результатов, от которых перехватывает дыхание. Но в случае, если с вами этого не произошло, позвольте мне объяснить дальше. Результат Аспекта показал, что Эйнштейн, Подольский и Розен были опровергнуты экспериментом – не теорией, не размышлениями, но самой природой. И это означало, что имеется нечто неправильное в аргументации ЭПР, использованной для заключения, что частицы обладают определенными значениями величин – вроде величины спина относительно определенных осей, – для которых определенные значения запрещены принципом неопределенности.

Но где они могли ошибиться? Вспомним, что аргументы Эйнштейна, Подольского и Розена держались на одном центральном предположении: в данный момент времени вы можете определить свойства объекта путем эксперимента, проводимого с другим, пространственно удаленным объектом, так что первый объект должен иметь эти свойства все время. Их обоснование для этого предположения было простым и полностью здравым. Ваши измерения проводятся здесь, тогда как первый объект удален и находится там. Два объекта пространственно разделены, поэтому ваше измерение не может оказать какое-либо влияние на первый объект. Более точно, поскольку ничто не двигается быстрее, чем скорость света, если ваши измерения над одним объектом некоторым образом повлекли изменения в другом объекте, – например, заставили другой объект принять идентичное первому вращательное движение относительно выбранной оси, – должна быть задержка перед тем, как это может произойти, задержка, как минимум, на такое время, которое потребуется свету, чтобы преодолеть дистанцию между двумя объектами. Но как в наших абстрактных рассуждениях, так и в реальном эксперименте, две частицы исследовались детекторами в одно и то же время. Следовательно, что бы мы не изучали по поводу первой частицы путем измерения второй, должно быть свойство, которым первая частица обладает полностью независимо от того, проводили ли мы эксперимент вообще. Короче говоря, ядро аргументов Эйнштейна, Подольского и Розена состоит в том, что *объект, удаленный отсюда, не ощущает, что вы делаете с другим объектом тут*.

Но, как мы уже видели, этот аргумент приводит к предсказанию, что детекторы должны находить одинаковые результаты более чем в половине случаев, предсказанию, которое было опровергнуто экспериментом. Мы вынуждены заключить, что предположение, сделанное Эйнштейном, Подольским и Розеном, не важно, насколько оно кажется правдоподобным, не может иметь отношения к функционированию нашей квантовой вселенной. Так что, через эту косвенную, но аккуратно рассмотренную аргументацию эксперименты привели нас к заключению, что *удаленный отсюда объект должен чувствовать, что вы делаете здесь с другим объектом*.

Даже если квантовая механика показывает, что частица хаотически получает то или иное свойство во время измерения, мы изучили, что хаотичность может быть связанной через пространство. Пары подходящим образом приготовленных частиц – они называются *запутанными* частицами – не получают свои измеряемые характеристики независимо. Они похожи на два комплекта магических игральных костей, из которых один брошен в Атлантик Сити, а другой в Лас Вегасе, каждый комплект хаотически показывает то или иное число, однако эти числа всегда каким-то образом оказываются равными. Запутанные частицы действуют сходным образом, исключая то, что им не нужна магия. *Запутанные частицы, даже если они пространственно разделены, не действуют автономно*.

Эйнштейн, Подольский и Розен намеревались показать, что квантовая механика обеспечивает неполное описание вселенной. На полстолетия позже теоретические построения и экспериментальные результаты, инспирированные их работой, потребовали от нас повернуть их анализ к его цели и заключить, что наиболее основная, интуитивно убедительная, классически осмысленная часть их аргументов ошибочна: *вселенная нелокальна*. Вывод в том, что то, что вы делаете в одном месте, может быть связано с тем, что происходит в другом месте, даже если ничто не передвигается между двумя местоположениями – даже если нет достаточно времени для чего-либо, чтобы завершить перемещение между двумя местами. Интуитивно привлекательное предположение Эйнштейна, Подольского и Розена, что такие дальнодействующие корреляции возникают просто вследствие того, что частицы имеют определенные, существующие заранее, скоррелированные свойства, исключается данными опыта. Это и делает результат настолько шокирующим.[[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_14" \o )

В 1997 году Николас Гизин и его ко в Женевском университете провели версию эксперимента Аспекта, в которой два детектора были удалены друг от друга на 11 километров. Результат не изменился. На микроскопических масштабах длин волн фотонов 11 километров это великанская величина. Она может с тем же успехом быть равной 11 миллионам километров – или 11 миллиардам световых лет. Имеются все основания верить, что корреляции между фотонами будут сохраняться не зависимо от того, как далеко разнесены детекторы.

Это звучит совершенно странно. Но теперь есть непреодолимая очевидность этой так называемой *квантовой запутанности*. Если два фотона запутаны, успешное измерение спина любого фотона относительно одной оси "заставляет" другой, удаленный фотон иметь такой же спин относительно той же оси; акт измерения одного фотона "вынуждает" другой, возможно, удаленный фотон схлопнуться из тумана вероятности и принять определенное значение спина – значение, которое в точности равно спину его удаленного компаньона. И это поражает разум.\*

*(\*)"Многие исследователи, включая меня, верят, что аргументы Белла и эксперимент Аспекта убедительно устанавливают, что наблюдаемые корреляции между далеко разнесенными частицами не могут быть объяснены рассуждениями, использованными выше Скалли, – рассуждениями, которые приписывают корреляциям не больше неожиданности, чем частицам, имеющим приобретенные, определенные, скоррелированные свойства, когда они (первоначально) находятся вместе. Другие пытаются уклониться или преуменьшить ошеломляющее заключение о нелокальности, к которому это нас привело. Я не разделяю их скептицизм, но некоторые работы для широкого круга читателей, в которых обсуждаются некоторые из таких альтернатив, цитируются в разделе комментариев."**[[15]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_15" \o )*

Запутанность и СТО: стандартный взгляд

Я выше поместил слова "заставляет" и "вынуждает" в кавычки, поскольку, в то время как они передают ощущения, вытекающие из нашей классической интуиции, их точный смысл в этом контексте важен для определения того, насколько мы должны быть потрясены. Со своими повседневными значениями эти слова вызывают в мыслях образ волевой причинности: мы выбираем нечто, что сделаем здесь, так что это вызовет пробуждение особого чего-то, что случится там. Если это правильное описание того, как два фотона взаимосвязаны, СТО повесится. Эксперименты показывают, что с точки зрения экспериментатора в лаборатории в точный момент, когда измеряется спин одного фотона, другой фотон немедленно начинает обладать тем же самым спиновым свойством. Если нечто переходит от левого фотона к правому фотону, предупреждая правый фотон, что спин левого фотона был определен через измерение, то оно будет перемещаться между фотонами мгновенно, что противоречит установленному СТО пределу скорости.

Среди физиков достигнут консенсус, что любой такой кажущийся конфликт с СТО иллюзорен. Интуитивная причина в том, что даже если два фотона пространственно разделены, их общее происхождение устанавливает фундаментальную связь между ними. Хотя они удаляются друг от друга и становятся пространственно разделенными, их история оплетает их; даже когда они разнесены в пространстве, они являются частью одной физической системы. Раз так, в действительности нет того, что измерение одного фотона заставляет или вынуждает другой удаленный фотон принять идентичные свойства. Скорее, два фотона так тесно связаны, что оправдано рассматривать их – даже если они пространственно разделены – как части одной физической сущности. Тогда мы можем сказать, что одно измерение этой единой сущности – сущности, содержащей два фотона, – воздействует на эту сущность; то есть, оно воздействует на оба фотона сразу.

Хотя этот образ может сделать связь между фотонами немного легче для усвоения, как указано, она неуловимая – что же в действительности означает сказать, что две пространственно разделенные вещи суть одна? Более точное обсуждение следующее. Когда СТО говорит, что ничто не может двигаться быстрее, чем скорость света, "ничто" обозначает привычную материю или энергию. Но случай, рассматриваемый нами, более тонкий, так как не возникает ситуации, что любая материя или энергия путешествует между двумя фотонами, так что тут нет ничего, чью скорость мы могли бы измерить. Тем не менее, есть способ изучить, не вступили ли мы неосторожно в конфликт с СТО. Общим для материи и энергии свойством является то, что они, переносясь с места на место, могут передавать информацию. Фотоны, путешествуя от радиопередающей станции к вашему приемнику, переносят информацию. Электроны, путешествуя через кабели Интернета к вашему компьютеру, переносят информацию. В любой ситуации, где нечто – даже нечто неидентифицированное – подразумевается движущимся быстрее скорости света, безошибочным тестом будет спросить, передает ли оно или, как минимум, может ли оно передавать информацию. Если ответ нет, проходят стандартные рассуждения, что ничто не превышает скорости света и СТО остается неоспоренной. На практике этот тест физики часто применяют для определения, не нарушает ли некоторый тонкий процесс законы СТО. (Ничто не пережило этот тест). Применим его и здесь.

Есть ли в нашем случае какой-либо способ, чтобы при измерении спина летящего налево и летящего направо фотона относительно некоторой данной оси мы могли бы послать информацию от одного к другому? Ответ нет. Почему? Ну, выходные данные, найденные в любом детекторе, левом или правом, есть ничто иное как случайная последовательность результатов, соответствующих ориентации спина по и против часовой стрелки, поскольку при любом данном эксперименте имеется одинаковая вероятность, что частица будет закручена одним образом или другим. Вы не можете проконтролировать или предсказать никаким способом результат любого отдельного измерения. Поэтому нет сообщения, нет скрытого кода, нет какой бы то ни было информации в любом из этих двух случайных списков. Единственная интересная вещь, относящаяся к этим двум спискам, это то, что они идентичны – но это невозможно распознать, пока оба списка не доставлены друг к другу и не подвергнуты сравнению некоторым традиционным более-медленным-чем-свет способом (факс, электронная почта, телефонный звонок и т.п.). Таким образом, стандартное обсуждение приводит к заключению, что хотя измерение спина фотона вызывает мгновенное воздействие на другой фотон, при этом не передается информация от одного к другому, и лимит скорости СТО остается в силе. Физики говорят, что результаты измерения спинов скоррелированы, поскольку списки идентичны, – но не находятся в традиционном причинно-следственном соотношении, поскольку ничто не перемещается между двумя разделенными пространством местами.

Запутанность и СТО: противоположный взгляд

Так ли это? Разрешен ли полностью потенциальный конфликт между нелокальностью квантовой механики и СТО? Ну, возможно. На основании предыдущих рассмотрений большинство физиков обобщают их, произнося слова, что имеется гармоничное сосуществование между СТО и результатами Аспекта по запутанным частицам. Короче говоря, СТО уцелела, оставив кусок шкуры в их зубах. Многие физики находят это убедительным, но другие имеют навязчивое чувство, что это еще не конец истории.

По-хорошему, я всегда разделял сосуществующие взгляды, но нельзя отрицать, что проблема деликатная. В конце концов, не имеет значения, какие красивые слова кто-то использовал или какой недостаток информации кто-то подчеркивал, две далеко разнесенные в пространстве частицы, каждая из которых управляется хаотичностью квантовой механики, каким-то образом находятся полностью "в соприкосновении", так что, что бы одна ни делала, другая мгновенно сделает то же. И это, кажется, наводит на мысль, что между ними действует некоторый вид чего-то, более-быстрого-чем-свет.

Где же мы остановились? Тут нет жесткого, универсально признанного ответа. Некоторые физики и философы предполагают, что прогресс тесно связан с нашим осознанием, что центр дискуссии несколько потерялся: действительное ядро СТО, ее правильное указание заключается не столько в том, что свет устанавливает лимит скорости, сколько в том, что скорость света есть нечто, с чем согласны все наблюдатели, независимо от их собственного движения.[[16]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_16" \o )Более общо, эти исследователи подчеркивают, что центральный принцип СТО заключается в отсутствии преимущественной точки наблюдения, выделенной среди всех других. Так что они предполагают (и многие согласны), что если эквивалентная трактовка всех движущихся с постоянной скоростью наблюдателей может быть согласована с экпериментальными результатами по запутанным частицам, напряженность с СТО будет разрешена.[[17]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_17" \o ) Но достижение этой цели есть нетривиальная задача. Чтобы увидеть это конкретно, подумаем о том, насколько хорошо старомодный учебник квантовой механики объясняет эксперимент Аспекта.

В соответствии со стандартной квантовой механикой, когда мы проводим измерение и находим, что частица здесь, мы заставляем ее вероятностную волну измениться: предыдущий набор потенциальных исходов редуцируется к одному действительному результату, который и находит наше измерение, как проиллюстрировано на Рис. 4.7. Физики говорят, что измерение заставило вероятностную волну сколлапсировать, и они усматривают, что чем больше была начальная вероятностная волна в некотором месте, тем больше вероятность, что волна сколлапсирует в эту точку – это значит, что тем больше вероятность, что частица будет найдена в этой точке. В стандартном подходе коллапс происходит мгновенно через целую вселенную: раз вы нашли частицу здесь, то надо думать, что вероятность ее обнаружения где-нибудь еще немедленно падает до нуля, и это отражается в мгновенном коллапсе вероятностной волны.

В эксперименте Аспекта, когда измерялся и был найден спин летящего налево фотона, скажем, ориентированный по часовой стрелке относительно некоторой оси, это схлопнуло его вероятностную волну через все пространство, мгновенно установив ориентированную против часовой стрелки часть спина равной нулю. Поскольку этот коллапс происходит где угодно, он происходит также и в точке летящего направо фотона. И, возвращаясь, это воздействует на ориентированную против часовой стрелки часть вероятностной волны летящего направо фотона, заставляя ее сколлапсировать до нуля тоже. Так что не имеет значения, как далеко находится летящий направо фотон от летящего налево фотона, его вероятностная волна мгновенно подвергнется воздействию от изменения вероятностной волны летящего налево фотона, обеспечив, что он имеет тот же спин вдоль выбранной оси, как и летящий налево фотон. Тогда в стандартной квантовой механике есть это <Надпись: *Измерение*> мгновенное изменение вероятностной волны, которое отвечает за влияние, более-быстрое-чем-свет.



***Рис 4.7****Когда частица наблюдается в некотором положении, вероятность найти ее в любом другом положении падает до нуля, поскольку ее вероятность поднимается до 100 процентов в положении, где она наблюдается.*

Математика квантовой механики делает это качественное обсуждение точным. И действительно, дальнодействующие воздействия, возникающие из коллапсирующих вероятностных волн, изменяют предсказание того, как часто левый и правый детекторы Аспекта (когда их оси выбираются хаотично и независимо) будут показывать одинаковые результаты. Чтобы получить точный ответ, необходим математический расчет (смотрите секцию [[18]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_18" \o )комментариев, если вы интересуетесь), но когда математика сделана, она предсказывает, что показания детекторов должны совпадать точно в 50 процентах случаев (вместо предсказанного согласия более чем в 50 процентах случаев – результат, как мы видели, найденный с использованием гипотезы ЭПР о локальной вселенной). С впечатляющей точностью это тот самый результат, который нашел Аспект в своих экспериментах, 50-ти процентное согласие. Стандартная квантовая механика впечатляюще соответствует данным опыта.

Это эффектный успех. Тем не менее, здесь имеется загвоздка. После более чем семи десятилетий никто не понимает, как в действительности происходит коллапс вероятностной волны или даже происходит ли. На протяжении лет предположение, что вероятностные волны коллапсируют, подтверждалось убедительной связью между вероятностями, которые предсказывает квантовая теория, и определенными результатами, которые показывают эксперименты. Однако это предположение чревато загадками. С одной стороны, коллапс не возникает из математики квантовой теории; он вводится руками, и нет согласованного или экспериментально подтвержденного пути сделать это. С другой стороны, как это возможно, что путем нахождения электрона в вашем детекторе в Нью-Йорке вы вынудите электронную вероятностную волну в галактике Андромеды мгновенно схлопнуться до нуля? Согласитесь, раз уж вы нашли частицу в Нью-Йорке, она определенно не будет найдена в Андромеде, но какой неизвестный механизм заставляет произойти это с такой впечатляющей оперативностью? Как, образно говоря, часть вероятностной волны в Андромеде и во всех других местах "узнает", что надо мгновенно схлопнуться до нуля?[[19]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_19" \o )

Мы продолжим рассмотрение этой квантовомеханической проблемы в Главе 7 (и, как мы увидим, имеются иные предложения, которые совсем обходятся без идеи о коллапсе вероятностной волны), а здесь достаточно заметить, что, как мы обсуждали в Главе 3, нечто одновременное с одной точки зрения, является не одновременным с другой точки зрения, движущейся относительно первой. (Вспомните Итчи и Скрэтчи, устанавливающих свои часы на движущемся поезде). Так что, если вероятностная волна подверглась одновременному коллапсу по всему пространству по мнению одного наблюдателя, она не подвергнется такому одновременному коллапсу по мнению другого наблюдателя, который находится в движении. По существу, в зависимости от своего движения, некоторые наблюдатели сообщат, что левый фотон был измерен первым, тогда как другие наблюдатели с равной достоверностью сообщат, что правый фотон был измерен первым. Поэтому, даже если идея коллапса вероятностной волны правильна, не может быть объективной истины по поводу того, какое измерение – левого или правого фотона – воздействовало на другой. Так что коллапс вероятностных волн, кажется, выбирает одну точку отсчета как специальную – одну, относительно которой коллапс происходит одновременно во всем пространстве, одну, относительно которой левое и правое измерения происходят в один и тот же момент. Но выбор специальной системы отсчета создает существенное противоречие с универсальным ядром СТО. Были сделаны предложения, чтобы обойти эту проблему, но продолжаются споры по поводу того, какие из них успешны, если это вообще имеет место.[[20]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_4_20" \o )

Итак, хотя взгляд большинства заключается в том, что имеется гармоничное сосуществование, некоторые физики и философы рассматривают точную взаимосвязь между квантовой механикой, запутанными частицами и СТО как открытый вопрос. Определенно возможно, и, на мой взгляд, привлекательно, что взгляд большинства в конце концов одержит победу в некоторой более определенной форме. Но история показывает, что тонкие фундаментальные проблемы иногда высеивают семена будущих революций. Так ли это, покажет только время.

Что мы понимаем во всем этом?

Рассуждения Белла и эксперименты Аспекта показывают, что вид вселенной, воображаемой Эйнштейном, может существовать в уме, но не в реальности. Вселенная Эйнштейна та, в которой то, что вы сделаете прямо здесь, окажет немедленное воздействие только на вещи, которые также находятся прямо здесь. Физика, с его точки зрения, чисто локальна. Но мы теперь видим, что данные опытов отвергают такой вид мышления; данные опытов отвергают такой вид вселенной.

Эйнштейновской была также вселенная, в которой объекты обладают определенными значениями всех возможных физических величин. Величины эти не плавают в чистилище, ожидая измерения экспериментатора, чтобы привести их к существованию. Большинство физиков скажут, что Эйнштейн ошибался и в этом пункте тоже.

Свойства частиц с этой точки зрения большинства приходят к бытию, когда измерения побуждают их к этому, – эту идею мы изучим позже в Главе 7. Когда частицы не наблюдаются или не взаимодействуют с окружением, их свойства имеют неопределенное размытое существование, характеризуемое исключительно вероятностью, что та или иная потенциальная возможность может быть реализована. Наиболее экстремистски настроенные из тех, кто придерживается этого взгляда, заходят настолько далеко, что декларируют, что в самом деле, когда никто и ничто не "наблюдает" Луну и не взаимодействует с ней любым образом, она не существует.

При таком исходе присяжные тихо покидают зал. Эйнштейн, Полольский и Розен доказывали, что осмысленное объяснение того, как измерения могут показать, что далеко разнесенные частицы имеют идентичные свойства, заключается только в том, что частицы обладали этими определенными свойствами всегда (и, как следствие их общего прошлого, их свойства скоррелированы). Десятилетия спустя анализ Белла и данные опытов Аспекта продемонстрировали, что это интуитивно привлекательное предложение, основывающееся на предпосылке, что частицы всегда имеют определенные свойства, не годится для объяснения экспериментально наблюдаемых нелокальных корреляций. Но неудача в объяснении тайн нелокальности не означает, что замечание, что частицы всегда имеют определенные свойства, само по себе исключается. Данные опытов исключают локальную вселенную, но они не исключают частицы, имеющие такие скрытые свойства.

Фактически, в 1950е годы Бом сконструировал свою собственную версию квантовой механики, которая включала в себя как нелокальность, так и скрытые переменные. Частицы в этом подходе всегда имеют определенное положение и определенную скорость, даже если мы никогда не можем измерить их одновременно. Подход Бома делал предсказания, которые полностью соответствовали аналогичным предсказаниям традиционной квантовой механики, но его формулировка вводила даже более нахальный элемент нелокальности, в котором силы, действующие на частицу в одном месте, зависят мгновенно от условий в удаленном месте. То есть, в известном смысле версия Бома предлагала, как можно частично достичь цели Эйнштейна по возвращению некоторых интуитивно осмысленных свойств классической физики, – частицы имеют определенные свойства, – которые были отставлены квантовой революцией, но она также показала, что сделать это можно ценой принятия еще более явной нелокальности. Из-за такой непомерной цены Эйнштейн нашел слабое утешение в подходе Бома.

Необходимость отказаться от локальности есть наиболее поразительный урок, появившийся из работ Эйнштейна, Подольского, Розена, Бома, Белла и Аспекта, а также многих других, кто сыграл важную роль в этом направлении исследований. Вследствие своего прошлого объекты, которые в настоящий момент находятся в совершенно разных областях вселенной, могут быть частью квантовомеханически запутанного целого. Даже если они далеко разнесены, такие объекты ведут себя случайным, но скоординированным образом.

Мы использовали мысль, что основное свойство пространства заключается в том, что оно разделяет и различает один объект от другого. Но мы теперь видим, что квантовая механика радикально подвергает сомнению такой взгляд. Два тела могут быть разделены чудовищным количеством пространства и при этом не иметь полностью независимого существования. Квантовая связь может объединить их, сделав свойства каждого зависящими от свойств другого. Пространство не различает такие запутанные объекты. Пространство не может преодолеть их взаимосвязь. Пространство, даже гигантское количество пространства не ослабляет их квантовомеханическую взаимозависимость.

Некоторые люди интерпретируют это, говоря нам, что "все соединено со всем остальным", или что "квантовая механика запутывает нас всех в одно универсальное целое". После всего сказанного возникают рассуждения, что при Большом взрыве все появилось из одного места, поскольку, как мы верим, все места, которые мы сейчас мыслим как различные, сводятся к одному и тому же месту при возвращении к началу. А поскольку, как два фотона появились из одного и того же атома кальция, все появилось из одного и того же нечто в начале, все должно быть квантовомеханически запутано со всем остальным.

Хотя мне нравится это мнение, такое сильное высказывание является необоснованным и преувеличенным. Квантовые связи между двумя фотонами, появляющимися из атома кальция, определенно присутствуют, но они экстремально тонкие. Когда Аспект и другие проводили свои эксперименты, критическим было то, что фотонам позволялось путешествовать абсолютно беспрепятственно от их источника к детекторам. Если бы они столкнулись со случайными частицами или врезались в части оборудования перед тем, как достигнуть одного из детекторов, квантовая связь между фотонами стала бы невообразимо более трудной для идентификации. Вместо поиска корреляций в свойствах двух фотонов, теперь пришлось бы искать сложную систему корреляций, затрагивающих фотоны и все другое, во что они могли врезаться. И поскольку все эти частицы двигаются своими путями, сталкиваясь и врезаясь еще и в другие частицы, квантовое запутывание становится настолько распределенным через эти взаимодействия с окружением, что становится фактически невозможно его детектировать. Несмотря на все усилия и намерения, исходное запутывание между фотонами будет уничтожено.

Тем не менее, совершенно удивительно, что такие связи существуют и что в должным образом подготовленных лабораторных условиях они могут быть непосредственно наблюдаемы на значительных расстояниях. Это показывает нам на фундаментальном уровне, что пространство не есть то, что мы давно о нем думаем.

А как насчет времени?

**II Время и опыт**

**5 Замороженная река**

***ТЕЧЕТ ЛИ ВРЕМЯ?***

**В**ремя находится среди наиболее привычных, но, вместе с тем, наименее понятых концепций, с которыми человечество всегда сталкивалось. Мы говорим, что оно течет, мы говорим, что оно деньги, мы пытаемся сохранить его, мы раздражаемся, когда теряем его. Но что есть время?

Перефразируя святого Августина и судью Поттера Стюарта\*, мы знаем его, когда мы видим его, но, несомненно, на заре третьего тысячелетия наше понимание времени должно быть глубже этого. В некотором смысле оно есть. В другом смысле его нет. Через столетия размышлений и решения головоломок мы достигли проникновения в некоторые из тайн времени, но многие остались. Откуда приходит время? Что означало бы иметь вселенную без времени? Может ли быть более чем одно временное измерение, точно так же, как имеется более чем одно пространственное измерение? Можем ли мы "путешествовать" в прошлое? Если можем, то можем ли мы изменить последующее развитие событий? Существует ли абсолютное, минимально возможное количество времени? Является ли время абсолютно фундаментальной составляющей в строении космоса или просто удобной конструкцией для организации наших восприятий, но не входящей в словарь, с помощью которого записаны наиболее фундаментальные законы вселенной? Может ли время быть производным понятием, возникающим из некоторой более основной концепции, которую еще предстоит открыть?

*(\*)"Святой Августин (354–430), считающийся одним из отцов-основателей Римской католической церкви, на чей-то вопрос: "Объясни, что такое Бог, определи Бога. Что ты имеешь в виду, когда ты произносишь слово "Бог"? ответил: "Это все равно как пытыться объяснить, что такое время. Я могу говорить о нем, но если вы просите его определить, объяснить, что это такое, я теряюсь."*

*Судья Верховного суда США Поттер Стюарт при жизни говаривал, что не может словами описать, что же такое порнография, но если он ее увидит, то без труда сможет распознать. – (прим. перев.)"*

Поиск всесторонних и полностью убедительных ответов на эти вопросы находится в ряду самых амбициозных целей современной науки. К тому же большие вопросы отнюдь не ограничиваются только этими. Даже повседневное ощущение времени приоткрывает путь к некоторым наиболее острым загадкам вселенной.

Время и опыт

СТО и ОТО вдребезги разбили универсальность, исключительность времени. Эти теории показали, что каждый из нас подбирает осколки ньютоновского старого универсального времени и несет их с собой. Возникают наши собственные персональные часы, наш собственный персональный ведущий, безжалостно перетягивая нас от одного момента к следующему. Мы поражаемся теориям относительности, то есть вселенной, поскольку, хотя время наших персональных часов кажется тикающим неизменно и в согласии с нашим интуитивным чувством времени, сравнение с другими часами выявляет различия. Время для вас не обязано быть тем же самым, как время для меня.

Примем этот урок как данность. Но что представляет собой действительная природа времени для меня? Что представляет собой полная характеристика времени как переживаемого и ощущаемого индивидуально, без прямого сосредоточения на сравнениях с переживаниями других? Отражают ли эти переживания действительную природу времени? И что они могут нам сказать о природе реальности?

Наши ощущения учат нас и подавляющим образом, что прошлое отличается от будущего. Будущее, кажется, дарит нам богатство возможностей, тогда как прошлое связано с единственной ситуацией. С фактом, который в действительности произошел. Мы чувствуем способность влиять, воздействовать на будущее и формировать его в той или иной степени, тогда как прошлое кажется не подлежащим изменению. И между прошлым и будущим имеется скользкая концепция настоящего, темпоральная точка сосредоточения, которая сама пересоздается из момента в момент, подобно кадрам в кинофильме, когда они проносятся мимо сильного луча света от проектора и на мгновение становятся явными. Время кажется текущим в бесконечном, совершенно однородном ритме, достигая мимолетного пункта назначения в настоящем с каждым ударом барабанной палочки.

Наши ощущения также учат нас, что имеется несомненная однобокость того, как вещи раскрываются во времени. Совершенно не нужно плакать над пролитым молоком, поскольку будучи один раз пролитым, оно никогда не будет "пролито обратно": мы никогда не видели, что расплескавшееся молоко собирается воедино, поднимается с пола и сливается в чашке, которая устанавливается прямиком на кухонный стол. Наш мир, кажется, твердо придерживается однонаправленной стрелы времени, никогда не отклоняясь от фиксированного условия, что вещи могут начаться как это, а закончиться как то, но они никогда не могут начаться как то, а закончиться как это.

Наши ощущения, следовательно, учат нас двум всеобъемлющим вещам о времени. Первое, *время кажется текущим*. Это похоже на то, как будто мы стоим на берегу реки времени, как мощного несущегося мимо потока, подтягивающего будущее по направлению к нам, становящегося настоящим в тот момент, когда он достигает нас, и уносящегося прочь, когда он отступает вниз по течению в прошлое. Или, если это, на ваш вкус, слишком пассивный взгляд, перевернем метафору: мы движемся вместе с рекой времени, тогда как она непреодолимо несется вперед, увлекая нас из одного настоящего в следующее, тогда как прошлое отступает назад вместе с проходящим пейзажем, а будущее всегда дожидается нас вниз по течению. (Наши ощущения также обучали нас, что время может вызывать и некоторые более мягкие сравнения). Второе, *время кажется имеющим стрелку-направление*. Течение времени кажется происходящим одним образом и только одним образом в том смысле, что вещи происходят в одной и только в одной темпоральной последовательности. Если кто-нибудь даст вам ящик, содержащий короткую кинопленку о том, как разливается чашка молока, но кинопленка разрезана на отдельные кадры, то вы можете путем изучения этой кучи фотографий расположить кадры в правильном порядке без какой-либо помощи или инструкций со стороны изготовителя пленки. Время кажется имеющим внутреннее направление, следующее из того, что мы называем прошлым, по направлению к тому, что мы называем будущим, и вещи проявляют изменения – молоко разливается, яйца разбиваются, свечи сгорают, люди стареют – в универсальной ориентации вдоль этого направления.

Эти легко осознаваемые свойства времени генерируют некоторые из его наиболее дразнящих загадок. Течет ли время на самом деле? Если течет, то что в действительности течет? И как быстро происходит это течение материала времени? Имеет ли время на самом деле направление? Пространство, например, не проявляет наличия присущего ему направления – для астронавта в темном глубинном космосе понятия влево и вправо, назад и вперед, вверх и вниз все действуют на равных основаниях – так откуда возникает стрела времени? Если имеется стрела времени, является ли она абсолютной? Или есть вещи, которые могут эволюционировать в направлении, противоположном тому, в котором стрела времени кажется ориентированной?

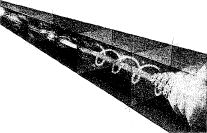
Теперь построим наше текущее представление, сначала подумав об этих вопросах в контексте классической физики. Итак, для оставшейся части этой и следующей главы (в которых мы обсудим, соответственно, течение времени и стрелу времени) мы будем игнорировать квантовую вероятность и квантовую неопределенность. Тем не менее, многое из того, что мы изучим, переносится непосредственно на квантовую область, и в Главе 7 мы обсудим квантовую точку зрения.

Течет ли время?

С точки зрения ощущающего ответ очевиден. Когда я печатаю эти слова, я ясно чувствую, что время течет. С каждым нажатием на клавишу каждое настоящее дает путь следующему. Когда вы читаете эти слова, вы, без сомнения, чувствуете течение времени тоже, пока ваши глаза следуют от слова к слову по странице. Однако, как бы сильно физики не старались, никто не нашел в рамках законов физики убедительных улик, которые бы подтвердили это интуитивное ощущение, что время течет. Фактически, переработка некоторых выводов Эйнштейна из СТО делает очевидным, что время не течет.

Чтобы понять это, вернемся к описанию пространства-времени в виде батона хлеба, введенного в Главе 3. Повторим, что сечения, формирующие батон, таковы для данного наблюдателя; каждое сечение представляет пространство в один момент времени с его или ее точки зрения. Объединение, получаемое путем расположения сечения за сечением в том порядке, в котором наблюдатель переживает их, заполняет область пространства-времени. Если мы расширим этот взгляд до логических пределов и представим, что каждое сечение описывает все пространство в данный момент времени согласно точке зрения одного наблюдателя, и если мы включим все возможные сечения от древнего прошлого до удаленного будущего, батон будет заключать в себе всю вселенную на протяжении всего времени – целое пространство-время. Каждое событие, независимо от того, когда или где оно произошло, представлено некоторой точкой в батоне.

Это схематически проиллюстрировано на Рис.5.1, но следствия должны заставить вас почесать вашу голову. "Внешняя" переспектива на рисунке, в которой мы видим целую вселенную, все пространство и каждый момент времени, это фиктивная точка наблюдения, такая, которую никто из нас никогда не будет иметь.



***Рис 5.1****Схематическое изображение всего пространства в течение всего времени (изображена, конечно, только часть пространства в течение части времени), показывающее формирование некоторых первичных галактик, формирование Солнца и Земли, а также завершающую гибель Земли, когда Солнце разрастется до красного гиганта, в чем мы в настоящее время видим наше удаленное будущее.*

 Мы все находимся внутри пространства-времени. Каждое переживание вы или я всегда получаем в некотором месте пространства в некоторый момент времени. И поскольку Рис.5.1 кажется описывающим все пространство-время, он включает в себя всю совокупность таких переживаний целиком – ваше, мое, а также всякого и всевозможного. Если бы вы могли увеличить масштаб и внимательно исследовать все приходящее на планету Земля и уходящее с нее, вы смогли бы увидеть Александра Великого, получающего урок от Аристотеля, Леонардо да Винчи, кладущего последние штрихи на портрет Моны Лизы и Джорджа Вашингтона, пересекающего Делавэр; если бы вы продолжили сканировать изображение слева направо, вы были бы в состоянии увидеть вашу бабушку, играющую еще маленькой девочкой, вашего отца, отмечающего свое десятилетие, и ваш собственный первый день в школе; глядя еще дальше направо в изображение, вы смогли бы увидет себя, читающего эту книгу, рождение вашей пра-пра-внучки, а немного далее ее инаугурацию в качестве Президента. Давая грубое разрешение Рис.5.1, вы не можете в действительности видеть эти моменты, но вы можете (схематически) видеть историю Солнца и планеты Земля от их рождения из сгущающегося газового облака до смерти Земли, когда Солнце разбухнет до красного гиганта. Все это там есть.

Бесспорно, Рис.5.1 есть воображаемая перспектива. Точка зрения, с которой мы наблюдаем, находится вне пространства и времени. Это взгляд из ниоткуда и из никогда. Даже при этих условиях, – даже если мы не можем на самом деле встать вне границ пространства-времени и полностью окинуть взглядом вселенную, – схематическое изображение Рис.5.1 обеспечивает убедительный способ анализа и прояснения основных свойств пространства и времени. Главное в том, что интуитивное ощущение течения времени может быть отчетливо описано в рамках данного рассмотрения как разновидность метафоры, использующей фильмопроектор. Мы можем вообразить свет, который освещает одно темпоральное сечение за другим, на мгновение оживляя сечение в настоящем, – делая само сечение на мгновение настоящим, – только чтобы тотчас отпустить сечение снова в темноту, когда свет удалится к следующему сечению. Прямо сейчас в рамках этого интуитивного способа размышлений о времени видно, что свет освещает сечение, в котором вы, сидя на планете Земля, читаете эти слова, а теперь он освещает сечение, в котором вы читаете это слово. Однако повторим, что, хотя этот образ кажется соответствующим ощущениям, физики не в состоянии найти хоть что-нибудь в законах физики, что воплотило бы такой движущийся свет. Они не нашли физический механизм, который бы отбирал момент за моментом, становящиеся на мгновение реальными, – становящиеся на мгновение настоящим, – как механизм, всегда продвигающийся вперед к будущему.

В самом деле все наоборот. Хотя картина Рис.5.1 определенно нереальна, имеются убедительные свидетельства, что пространственно-временной батон – полное пространство-время, а не последовательность сечений одно за одним, – реален. Менее широко оценено следствие трудов Эйнштейна, что реальность СТО трактует все моменты времени одинаково. Хотя выделение настоящего играет центральную роль в нашем мировоззрении, теория относительности еще раз ниспровергает нашу интуицию и объявляет нашу вселенную как вселенную равноправных моментов, в которой каждый момент времени реален настолько же, как и любой другой. Мы упорядочили эти идеи в Главе 3, когда размышляли о вращающемся ведре с точки зрения СТО. Там же через непрямые рассуждения, аналогичные ньютоновским, мы пришли к заключению, что пространство-время является чем-то, как минимум, достаточным для обеспечения точки отсчета для ускоренного движения. Здесь же мы обсуждаем проблему с другой точки зрения и движемся дальше. Мы утверждаем, что каждая часть пространственно-временного батона на Рис.5.1 существует на том же основании, что и любая другая, намекая на то, что, как верил Эйнштейн, реальность включает в себя прошлое, настоящее и будущее одинаково и что воображаемое нами течение, переносящее одно сечение к свету, тогда как другое уходит в темноту, является иллюзорным.

Устойчивая иллюзия прошлого, настоящего и будущего

Чтобы понять точку зрения Эйнштейна, нам необходимо выработать определение реальности, алгоритм, если хотите, для определения того, что вещи существуют в данный момент. Имеется один общий подход. Когда я обозреваю реальность, – что существует в этот момент, – я рисую перед своим мысленным взором разновидность моментального снимка, воображаемое статическое изображение единой вселенной прямо сейчас. Когда я печатаю эти слова, мое ощущение того, что существует прямо сейчас, мое ощущение реальности, сводится к списку всех тех вещей, – отбивания полночи на моих кухонных часах; моего кота, сорвавшегося и отправившегося в полет между подоконником и полом; первого луча утреннего солнца, осветившего Дублин; гвалта в торговом зале Токийской фондовой биржи; слияния двух отдельных атомов водорода в Солнце; испускания фотона туманностью Ориона; последнего момента жизни умирающей звезды, перед тем как она сколлапсирует в черную дыру, – которые имеются в данный момент в моем статическом воображаемом изображении. Все это вещи, происходящие прямо сейчас, так что это вещи, которые я объявляю существующими прямо сейчас. Существует прямо сейчас Карл I Великий? Нет. Существует прямо сейчас Неро? Нет. Существует прямо сейчас Линкольн? Нет. Существует прямо сейчас Элвис? Нет. Никого из них нет в моем текущем списке настоящего. Существует ли прямо сейчас кто-нибудь, родившийся в 2300 или 3500 или 57000 году? Нет. Опять-таки, никого из них нет в моем статическом мысленном изображении, никого из них нет в моем текущем временном сечении, так что никого из них нет в моем текущем списке настоящего. Следовательно, я говорю без колебаний, что они в настоящее время не существуют. Это то, как я определяю реальность в любой заданный момент; это интуитивный подход, который используют большинство из нас, часто неосознанно, когда размышляют о существовании.

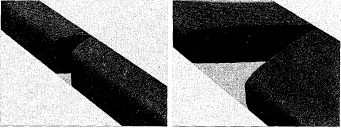
Я использую эту концепцию ниже, но имейте в виду один хитрый момент. Список настоящего – реальность при таком образе мыслей – смешная вещь. Ничто из того, что вы видите прямо сейчас, не соответствует вашему списку настоящего, поскольку свету необходимо время, чтобы достичь ваших глаз. Любая вещь, которую вы видите прямо сейчас, уже произошла. Вы не видите слов на этой странице так, как они есть прямо сейчас; вместо этого, если вы держите книгу в футе от вашего лица, вы видите их такими, какими они были миллиардную долю секунды назад. Если вы оглядите обыкновенную комнату, вы увидите вещи, какими они были от 10 до 20 миллиардных долей секунды назад; если вы бросите взгляд на Большой Каньон, вы увидите его противоположную сторону такой, какой она была примерно одну десятитысячную долю секунды назад; если вы посмотрите на Луну, вы увидите ее такой, какая она была полторы секунды назад; для Солнца вы видите его таким, какое оно было около восьми минут назад; для звезд, видимых невооруженным глазом, вы видите их такими, какими они были грубо от нескольких лет до 10 000 лет назад. Это странно, хотя воображаемая статическая картинка охватывает наше ощущение от реальности, наше интуитивное ощущение "того, что находится не здесь", она состоит из событий, которые мы не можем почувствовать, на которые мы не можем повлиять или даже зафиксировать прямо сейчас. Вместо этого, настоящий список реальности может быть составлен только постфактум. Если вы знаете, как далеко находится что-либо, вы можете определить, когда был испущен свет, который вы видите в настоящий момент и отсюда вы можете определить, с каким из ваших темпоральных сечений он был связан - на каком из уже прошедших списков настоящего он должен быть записан. Тем не менее, и это главный момент, если мы используем эту информацию для составления списка настоящего для любого данного момента, непрерывно дополняя его по мере получения световых сигналов от все более далеких источников, вещи, которые перечислены в списке, есть вещи, по поводу которых мы интуитивно верим, что они существуют в данный момент.

Удивительно, что этот кажущийся простым путь размышлений приводит к неожиданно всеобъемлющей концепции реальности. Вы видите в соответствии с ньютоновским абсолютным пространством и абсолютным временем, что статическая картина вселенной для каждого человека в данный момент времени содержит в точности одинаковые события; настоящее для каждого человека это одно и то же настоящее, так что список настоящего для каждого человека для данного момента времени идентичен другим спискам. Интуиция большинства людей все еще ограничивается таким образом мышления, но СТО рассказывает совершенно другую историю. Посмотрите снова на Рис. 3.4. Два наблюдателя, находящиеся в относительном движении, имеют каждый настоящее, – отдельный момент времени с точки зрения каждого, – которое отличается от другого: их "настоящие" режут пространство-время под разными углами. А разные "настоящие" означают разные списки настоящего. *Наблюдатели*, *движущиеся друг относительно друга, имеют разное представление о том, что существует в данный момент времени, а следовательно, они имеют различные представления о реальности*.

При повседневных скоростях угол между сечениями – "настоящими" двух наблюдателей – ничтожен; это именно то, почему в повседневной жизни мы никогда не отмечаем расхождение между нашим определением настоящего и чьим-либо еще. Под этой причине большинство дискуссий по поводу СТО сосредоточиваются на том, что произойдет, если мы движемся с гигантской скоростью – скоростью вблизи световой, – поскольку такое движение будет страшно усиливать эффекты. Но имеется другой путь усиления расхождения между концепциями реальности двух наблюдателей, и я нахожу, что он обеспечивает подход к вопросам реальности, чрезвычайно проясняющий суть дела. Он основывается на следующем простом факте: если вы и я разрезаем обычный батон под слегка различающимися углами, вряд ли это хоть как то повлияет на получившиеся куски хлеба. Но если батон гигантский, результат будет иным. Точно так же, как малейшее раскрытие лезвий чудовищно длинных ножниц приведет к большому расстоянию между концами лезвий, разрезание гигантского батона хлеба под слегка отличающимися углами дает сечения, которые расходятся на гигансткую величину на далеких расстояниях от места пересечения сечений. Вы можете видеть это на Рис. 5.2.

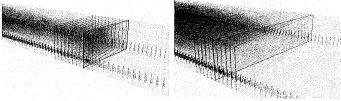
То же самое справедливо для пространства-времени. При повседневных скоростях сечения, изображающие настоящее для двух наблюдателей, находящихся в относительном движении, будут ориентированы только под слабо отличающимися углами. Если два наблюдателя находятся рядом, это вряд ли приведет к заметному эффекту. Но, точно так же, как в батоне хлеба, мельчайшие углы приведут к большим различиям между сечениями, когда их сравнение проводится на больших расстояниях. А для сечений пространства-времени большое расхождение между сечениями означает существенное рассогласование того, какие события каждый из наблюдателей рассматривает как происходящие сейчас. Это проиллюстрировано на Рис. 5.3 и 5.4, и это подразумевает, что индивидуумы, двигающиеся друг относительно друга, даже при обычных, повседневных скоростях, будут иметь все более различающиеся представления о настоящем, если они находятся на все большем расстоянии друг от друга в пространстве.

Чтобы сделать это конкретным, представим, что Шеви находится на планете в далекой-далекой галактике – 10 миллиардов световых лет от Земли, – лениво сидя в своей жилой комнате. Представим далее, что вы (просто сидя и читая эти слова) и Шеви не двигаетесь друг относительно друга (для простоты проигнорируем движение планет, расширение вселенной, гравитационные эффекты и так далее). Поскольку вы покоитесь друг относительно друга, вы и Шеви полностью согласны по вопросам пространства и времени: вы будете разрезать пространство-время одинаковым образом, так что ваши списки настоящего будут в точности совпадать. По истечении небольшого времени Шеви встает и отправляется гулять – спокойным, расслабленным, легким шагом – в направлении, которое развернуто прямо от вас. Это изменение в состоянии движения Шеви означает, что его концепция настоящего, его сечение пространства-времени слегка повернется (см. Рис. 5.3). Это ничтожное угловое изменение не окажет заметного эффекта по соседству с Шеви: различие между его новым настоящим и настоящим кого-либо, все еще сидящего в его жилой комнате, исчезающе мало.



(а) (b)

***Рис 5.2****(а) В обычном батоне сечения, проведенные под слабо отличающимися углами, не расходятся сильно; (b) Но чем больше батон при том же угле, тем больше расхождение.*

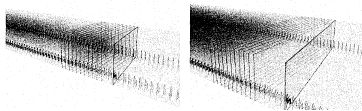


(а) (b)

***Рис 5.3****(а) Два индивидуума в покое друг относительно друга имеют идентичное представление о настоящем и поэтому идентичные временные сечения. Если один наблюдатель удаляется от другого, их временные сечения – то, что каждый наблюдатель рассматривает в настоящий момент, – поворачиваются относительно каждого; как иллюстрируется, затемненное сечение настоящего для движущегося наблюдателя поворачиватеся в прошлое стационарного наблюдателя. (b) Большее расстояние между наблюдателями дает большее отклонение между сечениями – большее расхождение в их концепциях настоящего.*

Но на гигантском расстоянии 10 миллиардов световых лет этот ничтожный сдвиг в точке зрения Шеви на настоящее будет усилен (как в переходе от Рис. 5.3а к Рис. 5.3b, но с главными героями, теперь находящимися на гигантском расстоянии друг от друга, существенно усиливающим сдвиг между их "настоящими"). Его настоящее и ваше настоящее, которые были одним и тем же, пока он еще сидел, прыжком разнесутся друг от друга вследствие его скромного движения.

Рис. 5.3 и 5.4 схематично иллюстрируют ключевую идею, но, используя уравнения СТО, мы можем рассчитать, насколько отличными будут ваши представления о настоящем.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_1" \o ) Если Шеви уходит от вас со скоростью около 10 миль в час (Шеви имеет довольно быструю походку), события на Земле, которые принадлежат его новому списку настоящего, будут событиями, которые произошли около 150 лет назад по отношению к вам! В соответствии с его концепцией настоящего – концепцией, в которой каждый кусочек настолько же правомерен, насколько и ваш, и которая до недавнего момента полностью совпадала с вашей, – вы еще не родились. Если он движется по направлению к вам с той же скоростью, угловой сдвиг будет противоположным, как схематично показано на Рис. 5.4, так что его настоящее будет совпадать с тем, что вы будете считать как происходящее через 150 лет в будущем! Теперь в соответствии с его настоящим вы больше не можете быть частью этого мира. А если вместо простой прогулки Шеви прыгнет в самолет Фалькон Миллениум, двигающийся со скоростью 1 000 миль в час (меньше, чем скорость Конкорда), его настоящее будет включать события на Земле, которые с вашей точки зрения имели место 15 000 лет назад или будут иметь место через 15 000 лет в будущем, в зависимости от того, летит он от вас или к вам.



(а) (b)

***Рис 5.4****(а) То же, что и на Рис. 5.3а, исключая то, что когда один наблюдатель движется ко второму, его сечение настоящего поворачивается в будущее, а не в прошлое другого наблюдателя; (b) То же, что и на Рис. 5.3b, – большее разнесение в пространстве дает большее отклонение в представлениях о настоящем для одной и той же относительной скорости – с поворотом, направленным в будущее вместо прошлого.*

 Если задать подходящий выбор направления и скорости движения, то Элвис, или Неро, или Карл I Великий, или Линкольн или кто-нибудь, родившийся на земной стороне в момент, который вы называете будущим, будут частью его списка настоящего.

Несмотря на необычность, ничто из этого не влечет за собой противоречий или парадоксов, поскольку, как мы объяснили выше, чем дальше находится нечто, тем дольше придется ждать, чтобы получить испущенный этим нечто свет, и отсюда определить, что входит, а что не входит в отдельный список настоящего. Например, даже если Джон Уилкс Бут, приближающийся к государственной трибуне у театра Форд, будет входить в новый список настоящего Шеви, если тот поднимется и будет удаляться от Земли со скоростью около 9,3 мили в час,[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_2" \o ) Шеви не сможет ничего предпринять, чтобы спасти Президента Линкольна. На такой гигантской дистанции потребуется гигантское количество времени, чтобы получить и обменяться сообщениями, так что только потомки Шеви миллиарды лет спустя в действительности получат световой сигнал от той трагической ночи в Вашингтоне. Суть в том, что даже если его потомки используют эту информацию для внесения дополнений в громадную коллекцию прошлых списков настоящего, они найдут, что предательское убийство Линкольна входит в тот же список настоящего, который содержит подъем Шеви с кресла и его прогулку от Земли. И еще они также найдут, что в момент перед тем, как Шеви поднялся, его список настоящего содержал среди большого количества других вещей вас, все еще сидящего на Земле двадцать первого столетия, читая эти слова.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_3" \o )

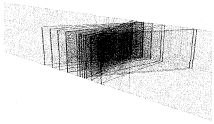
Аналогично, имеются вещи о нашем будущем, вроде вопроса, кто победит на президентских выборах США в 2100 году, который кажется полностью открытым: более чем похоже, что кандидаты на эти выборы даже еще не родились, не говоря о том, чтобы делать карьеру. Но если Шеви поднимается из своего кресла и движется в направлении Земли со скоростью около 6,4 мили в час, его список настоящего – его представление о том, что существует, его концепция о том, что происходит, – будет включать выборы первого президента США двадцать второго века. Что-то, что кажется совершенно неопределенным для нас, является чем-то, что для него уже произошло. Еще раз, Шеви не может узнать итоги выборов раньше, чем через миллиарды лет, поскольку это столько времени, сколько нужно нашему телевизионному сигналу, чтобы достичь его. Но когда данные об итогах выборов достигнут потомков Шеви и они используют их для обновления созданной Шеви перекидной книги истории, его коллекции прошлых списков настоящего, они увидят, что итоги выборов входят в тот же список настоящего, в котором Шеви поднялся с кресла и отправился гулять по направлению к Земле – список настоящего, отметят потомки Шеви, который появляется моментом позже списка, который содержит вас в первые годы двадцать первого века, завершая этот параграф книги Шеви.

Этот пример подчеркивает два важных момента. Первое, хотя мы использовали идею, что релятивистские эффекты становятся очевидными при скоростях вблизи скорости света, даже при малых скоростях релятивистские эффекты могут быть чрезвычайно усилены, если рассматривать объекты на больших расстояниях в пространстве. Второе, пример дает проникнуть в проблему, является ли пространство-время (батон) действительно чем-то существующим или просто абстрактной концепцией, абстрактным объединением пространства прямо сейчас вместе с его историей и подразумеваемым будущим.

Вы видите, что концепция реальности Шеви, его воображаемый статический образ, его представление о том, что существует сейчас, является в каждом кусочке столь же реальной для него, как наша концепция реальности для нас. Так что при определении, что составляет реальность, она будет чрезмерно узко понимаемой, если мы также не включим его точку зрения. Для Ньютона такой равноправный подход не мог привести к каким-либо различиям, поскольку во вселенной с абсолютным пространством и абсолютным временем сечения настоящего совпадают для каждого наблюдателя. Но в релятивистской вселенной, нашей вселенной он приводит к большим различиям. В то время, как наша обычная концепция того, что существует прямо сейчас, составляет отдельное сечение настоящего, – мы обычно видим прошлое как ушедшее и будущее как еще не наступившее, – мы должны расширить этот образ через сечение настоящего Шеви, то есть такое сечение настоящего, которое, как показало обсуждение, существенно отличается от нашего собственного. Более того, поскольку начальное положение Шеви и скорость, с которой он движется, произвольны, мы должны включить сечения настоящего, связанные со всеми возможностями. Эти сечения настоящего, как в нашем обсуждении выше, будут центрированы на начальном положении Шеви – или на положении некоторого иного реального или гипотетического наблюдателя – в пространстве и будут поворачиваться на угол, зависящий от выбранной скорости. (Единственное исключение следует из выбора предельной скорости, равной световой, как объяснено в комментариях, в графическом представлении, которое мы использовали, это переводится в предел угла поворота в 45 градусов либо по, либо против часовой стрелки). Как вы можете видеть на Рис. 5.5 собрание всех таких сечений настоящего заполняет солидную область пространственно-временного батона. Фактически, если пространство бесконечно, – если сечения настоящего распространяются бесконечно, – то вращающиеся сечения настоящего могут быть центрированы произвольно далеко, а отсюда их объединение охватывает каждую точку пространственно-временного батона.\*

*(\*)"Отметим любую точку в батоне. Проведем сечение, которое включает эту точку и которое пересекает наше текущее сечение настоящего под углом менее 45 градусов. Это сечение будет представлять сечение настоящего – реальность – удаленного наблюдателя, который был сначала в покое относительно нас, как Шеви, но теперь движется относительно нас со скоростью меньше скорости света. По построению это сечение включает (произвольную) точку в батоне, которой случилось быть отмеченной нами".*

Итак, если вы принимаете замечание, что реальность состоит из вещей в вашем статическом воображаемом изображении прямо сейчас, и если вы согласны, что ваше настоящее не более действительно, чем настоящее кого-нибудь, располагающегося далеко в пространстве, кто может свободно двигаться, то реальность заключает в себе все события в пространстве-времени.



***Рис 5.5****Пример сечений настоящего для различных наблюдателей (реальных или гипотетических), находящихся на различных расстояниях от Земли и двигающихся с различными скоростями.*

Полный батон существует.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_4" \o ) Точно так, как мы воображали все пространство, которое в действительности может быть не здесь, как реально существующее, мы должны также вообразить все время, которое в действительности может быть не здесь, тоже как реально существующее. Прошлое, настоящее и будущее определенно становятся особыми сущностями. Но, как сказал однажды Эйнштейн, "Как мы убеждаем физиков, разница между прошлым, настоящим и будущим есть только иллюзия, однако стойкая".[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_5" \o ) Единственная вещь, которая реальна, это пространство-время в целом.

Опыт и течение времени

При этом образе мышления события независимо от того, когда они происходят с любой отдельной точки зрения, просто есть. Все они существуют. Они вечно занимают их особое положение в пространстве-времени. Здесь нет течения. Если вы провели замечательное время в момент полуночи накануне нового 1999 года, вы все еще его имеете, поскольку это просто одно неподвижное место в пространстве-времени. Тяжело принять такое описание, поскольку наше мировоззрение жестко проводит различие между прошлым, настоящим и будущим. Но если мы внимательно посмотрим на эту привычную темпоральную схему и противопоставим ей холодные тяжелые факты современной физики, то единственное место убежища для нее кажется лежащим в человеческом разуме.

Неоспоримо, что наш сознательный опыт кажется охватывающим все сечения. Это так, хотя наш разум обеспечивает прожекторный свет, обращенный к прошлому, так что моменты времени оживляются, когда они освещаются силой сознания. Текущие ощущения от одного момента к следующему возникают из нашего сознательного распознавания изменений в наших мыслях, чувствах и ощущениях. И последовательность изменений кажется имеющей непрерывное движение; она кажется разворачивающейся в связанную историю. Но – без какой бы то ни было претензии на психологическую или нейробиологическую точность – мы можем вообразить, как мы можем ощущать течение времени, даже если в действительности может и не быть такого феномена. Чтобы увидеть, что я имею в виду, представим проигрывание *Унесенных ветром* на неисправном DVD-проигрывателе, который хаотически прыгает вперед и назад: некоторые кадры вспыхивают на мгновение на экране, а за ними моментально следуют другие из совершенно другой части фильма. Когда вы смотрите эту перепутанную версию, для вас тяжело придать смысл происходящему. Но Скарлетт и Рэтт проблем не имеют. В каждом кадре они делают то, что они всегда делали в этом кадре. Если бы вы могли остановить DVD на некотором отдельном кадре и спросить их об их мыслях и воспоминаниях, они бы откликнулись c теми же самыми ответами, которые они дали бы, если бы вы проигрывали DVD на нормально функционирующем проигрывателе. Если бы вы спросили их, не сбивает ли их с толку легкое прохождение Гражданской войны не по порядку, они бы посмотрели на вас насмешливо и посчитали бы, что вы выпили слишком много мятной водки. В любом данном кадре они имеют мысли и память, которые они всегда имели в этом кадре, – и, в особенности, эти мысли и память будут давать им ощущение, что время гладко и последовательно течет вперед, как обычно.

Аналогично, каждый момент в пространстве-времени – каждое временное сечение – похож на один из тех же кадров в фильме. Он существует, освещает его некоторый свет или нет. Как для Скарлетт и Рэтта, для вас, кто находится в любом таком моменте, это и есть настоящее, это момент, который вы ощущаете в данное мгновение. И это всегда будет. Более того, внутри каждого индивидуального сечения ваши мысли и память полностью стремятся дать ощущение, что время непрерывно текло к этому моменту. Это чувство, это ощущение, что время течет, не требует, чтобы предыдущий момент – предыдущий кадр – был "последовательно освещен".[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_6" \o )

И если вы подумаете об этом несколько дольше, вы осознаете, что это очень хорошая вещь, поскольку фиксирование светом прожектора последовательно приходящих моментов жизни чрезвычайно проблематично по другой, даже более основной причине. Если свет прожектора правильно выполняет свою работу и освещает данный момент – скажем, наступление полуночи в канун нового 1999 года, – что будет означать для этого момента уйти затем в темноту? Если момент был освещен, то быть освещенным будет свойством момента, свойством таким же вечным и неизменным, как все другое, происходящее в этот момент.

Ощущать освещение – быть "действительным", быть существующим, быть настоящим – и затем ощущать темноту – быть "скрытым", быть в прошлом, быть тем, что было, – значит ощущать изменение. *Но понятие изменения не имеет смысла по отношению к отдельному моменту времени*. Изменение будет возникать через время, изменение будет отмечать прохождение времени, но как понятие времени могло сделать это возможным? По определению, моменты не включают прохождение времени – по меньшей мере, мы осознаем не время, – поскольку моменты просто есть, они представляют собой сырой материал времени, они не изменяются. Отдельный момент может изменяться во времени не больше, чем отдельное положение может изменяться в пространстве: если положение передвинулось, это будет уже другое положение в пространстве; если момент во времени изменился, это будет уже другой момент во времени. Интуитивный образ света прожектора, который приносит каждое новое настоящее в жизнь, непосредственно не поддается аккуратной проверке. Вместо этого, каждый момент времени освещается и каждый момент остается освещенным. Каждый момент есть. При ближайшем рассмотрении текущая река времени более точно соответствует гигантскому блоку льда, причем каждый момент навечно вморожен в его объем.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_7" \o )

Эта концепция времени существенно отличается от той, с которой большинство из нас свыклось. Даже если она появилась из его собственного понимания, Эйнштейн не остался безразличным к трудности полного постижения таких основательных изменений в точке зрения. Рудольф Карнап[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_5_8" \o )подробно изложил поразительный разговор, который он имел с Эйнштейном по этому поводу: "Эйнштейн сказал, что проблема настоящего сильно его беспокоит. Он объяснил, что ощущение настоящего означает нечто специальное для человека, нечто существенно отличное от прошлого и будущего, но что это важное отличие не возникает или не может возникнуть в рамках физики. То, что это ощущение не может быть охвачено наукой, казалось ему фактом неприятного, но неизбежного поражения".

Эта уступка оставляет открытым главный вопрос: наука не в состоянии охватить фундаментальное свойство времени, которое человеческий разум видит так же легко, как легкие вдыхают воздух, или человеческий разум наделяет время свойством своего собственного изготовления, таким, что оно искусственное и поэтому не отражается в законах физики? Если вы зададите мне этот вопрос в течение рабочего дня, я примкну к последней точке зрения, но с наступлением ночи, когда критическое мышление смягчается до обычной жизненной рутины, становится тяжело сохранять полную невосприимчивость к первой точке зрения. Время тонкая вещь, и мы далеки от полного его понимания. Возможно, что некоторая проницательная личность однажды огласит новый способ рассмотрения времени и откроет глубокое физическое обоснование времени, которое течет. Тогда опять приведенное выше обсуждение, основанное на логике и теории относительности, может оказаться полной чушью. Однако, определенно, чувство, что время течет, глубоко укоренилось в наших ощущениях и полностью наполняет наше мышление и язык. Так что заслуживает внимания, что мы опустились и будем продолжать опускаться к обыкновенным разговорным описаниям, которые ссылаются на текущее время. Но нельзя смешивать язык и реальность. Человеческий язык намного лучше при описании человеческих ощущений, чем при выражении глубоких физических законов.

**6 Случайность и направленность**

***ИМЕЕТ ЛИ ВРЕМЯ НАПРАВЛЕНИЕ?***

**Д**аже если время не течет, все равно имеет смысл спросить, имеет ли оно направленность – имеется ли направление пути, по которому вещи развертываются во времени, которое может быть распознано в законах физики? Есть вопрос, имеется ли некоторый внутренний порядок в том, как события разбросаны вдоль пространства-времени и имеется ли существенное научное отличие между таким упорядочением событий и обратным упорядочением. Как уже всякий знает, определенно появляется гигантское различие такого сорта; это то, что придает жизни перспективу и делает острыми переживания. И еще, как мы увидим, объяснение различия между прошлым и будущим тяжелее, чем вы думали. Весьма поразительно, что ответ, который мы установим, тесно связан с точными условиями в начале вселенной.

Головоломка

Тысячи раз в день наши ощущения обнаруживают различие между вещами, развертывающимися прямым путем во времени и обратным. Очень горячая пицца охлаждается по дороге от пиццерии, но мы никогда не найдем пиццы, ставшей горячее, чем когда она была вынута из духовки. Сливки, размешанные в кофе, образуют однородную желтовато-коричневую жидкость, но мы никогда не увидим чашку некрепкого кофе, размешанного "назад" и разделенного на белые сливки и черный кофе. Яйца падают, разбиваясь и разбрызгиваясь, но мы никогда не увидим расплескавшиеся яйца и скорлупки, собирающиеся вместе и объединяющиеся в неразбитые яйца. Сжатый углекислый газ в бутылке колы вырывается наружу, когда мы откручиваем крышку, но мы никогда не найдем рассеявшийся углекислый газ собравшимся воедино и втянувшимся обратно в бутылку. Кубик льда, брошенный в стакан воды комнатной температуры тает, но мы никогда не увидим молекулы в стакане воды комнатной температуры, объединившиеся в твердый кубик льда. Эти общие последовательности событий, как и бесчисленные другие, происходят только в одном темпоральном порядке. Они никогда не происходят в обратном порядке, так что они обеспечивают представление о "до" и "после" – они дают нам непротиворечивую и кажущуюся универсальной концепцию прошлого и будущего. Эти наблюдения убеждают нас, что если бы мы исследовали все пространство-время извне (как на Рис. 5.1), мы бы увидели существенную асимметрию вдоль оси времени. Разбившиеся яйца во всем мире будут лежать с одной стороны – стороны, которую мы обычно называем будущим, – по отношению к их целым, неразбившимся двойникам.

Вообще, большинство из всех отмеченных примеров таково, что наш разум кажется имеющим доступ к собранию событий, которые мы называем прошлым – нашей памятью, – но никто из нас не кажется способным вспомнить собрание событий, которое мы называем будущим. Так что кажется очевидным, что имеется большая разница между прошлым и будущим. Кажется, что есть явная ориентация того, как гигантское разнообразие вещей разворачивается во времени. Кажется, что есть явное различие между вещами, которые мы можем вспомнить (прошлое), и вещами, которые мы вспомнить не можем (будущее). Это и есть то, что мы подразумеваем под наличием у времени ориентации, направления или стрелы.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_1" \o )

Физика и, более общо, наука ищет закономерности. Ученые изучают природу, ищут модели и выражают эти модели в законах природы. Следовательно, вы можете подумать, что огромный избыток закономерностей приводит нас к ощущению, что очевидная стрела времени будет подтверждена фундаментальным законом физики. Глупый способ формулирования такого закона будет заключаться во введении Закона Разливающегося Молока, устанавливающего, что чашки молока разливаются, но не "сливаются" назад, или Закона Разбрызгивающихся Яиц, устанавливающего, что яйца разбиваются и разбрызгиваются, но никогда не собираются воедино и не восстанавливаются. Но этот вид законов нам ничего не дает: это просто описание, оно не предлагает никакого объяснения вне простого наблюдения за тем, что происходит. Мы же ожидаем, что где-нибудь в глубинах физики должен быть менее глупый закон, описывающий движение и свойства частиц, который увязывает пиццу, молоко, яйца, кофе, людей и звезды – фундаментальные составляющие всего – и который показывает, почему вещи развиваются в определенном порядке этапов, но никогда в обратном. Такой закон даст фундаментальное объяснение наблюдаемой стреле времени.

Сбивающей с толку вещью является то, что никто не открыл ни одного такого закона. И более того, законы физики, которые были четко сформулированы от Ньютона, через Маквелла и Эйнштейна и до сегодняшних дней, *показывают полную симметрию между прошлым и будущим*.\* Нигде в любом из этих законов мы не найдем оговорки, что они применимы в одном направлении во времени, но не в другом. Нигде нет никакого различия между тем, как законы выглядят или ведут себя, когда они применяются к тому или иному направлению времени. Законы рассматривают то, что мы называем прошлым и будущим, на полностью одинаковом основании. Даже если ощущения снова и снова выявляют, что имеется направление-стрелка, в котором события разворачиваются во времени, эта стрелка, кажется, не находится в фундаментальных законах физики.

*(\*)"Имеется исключение из этого утверждения, связанное с определенным классом экзотических частиц. В той степени, в какой это относится к обсуждаемым в этой главе вопросам, я рассматриваю это как, скорее всего, мало значимое и не хочу обращать внимания на эту оговорку в дальнейшем. Если вы интересуетесь, вопрос коротко обсужден в комментарии[2]."*

Прошлое, будущее и фундаментальные законы физики

Как это может быть? Законы физики не обеспечивают подведение фундамента под различение прошлого от будущего? Как может не быть закона физики, объясняющего, что события разворачиваются в этом порядке, но никогда в обратном?

Ситуация даже более загадочная. Известные законы физики на самом деле декларируют, – в отличие от наших ощущений в ходе жизни, – что некрепкий кофе может быть разделен на черный кофе и белые сливки; расплескавшийся желток и кучка перемешанных кусочков скорлупы могут собраться вместе и сформировать совершенно гладкое неразбитое яйцо; растаявший лед в стакане воды при комнатной температуре может сплавиться воедино назад в кубик льда; газ, выделившийся, когда вы открыли вашу газировку, может втянуться назад в бутылку. Все физические законы, которыми мы бережно владеем, полностью поддерживают то, что известно как *симметрия по отношению к обращению времени*. Это означает, что если некоторая последовательность событий может разворачиваться в одном темпоральном порядке (сливки и кофе смешиваются, яйца разбиваются, газ улетучивается), то эти события могут также разворачиваться и в обратном порядке (сливки и кофе разделяются, яйца восстанавливаются, газ втягивается назад). Я скоро это конкретизирую, но обобщение в одну фразу таково, что известные законы не только не способны сказать нам, почему мы видим события развивающимися только в одном порядке, они также говорят нам, что в теории события могут разворачиваться в обратном порядке.\*

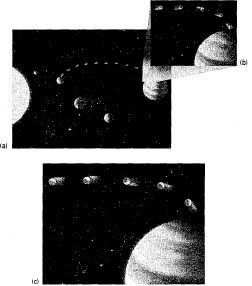
*(\*)"Отметим, что симметрия по отношению к обращению времени не означает, что само время разворачивается или "бежит" назад. Вместо этого, как мы описывали, указанная симметрия заключается в том, могут ли события, которые происходят во времени в одном отдельном темпоральном порядке происходить также и в обратном порядке. Более подходящим выражением может быть симметрия по отношению к обращению событий или обращению процессов или обращению порядка событий, но мы будем придерживаться общеупотребительного термина."*

Животрепещущий вопрос таков: Почему мы никогда не видим таких вещей? Я думаю, можно смело заключать пари, что никто никогда на самом деле не был свидетелем восстановления разбитого яйца.Но законы физики позволяют это, и если, более того, эти законы рассматривают разбивание и восстановление эквивалентным образом, то почему одно никогда не происходит, в то время как другое имеет место?

Симметрия по отношению к обращению времени

В качестве первого шага к решению этой головоломки нам надо понять в более конкретных терминах, что означает для известных законов физики быть симметричными по отношению к обращению времени. С этой целью представьте, что идет двадцать пятый век и вы играете в теннис в новой межпланетной лиге с вашим партнером по имени "Крутой удар" Вильямс. Немного не привыкший к уменьшенной гравитации Венеры, "Крутой удар" делает сильнейший удар слева, который запускает мяч в глубокую уединенную темноту пространства. Пересекающий пространство шаттл производит киносъемку мяча, когда тот пролетает рядом, и посылает ленту в CNN (Celestial News Network – небесная сеть новостей) для телепередачи. Теперь вопрос: если техники CNN сделали ошибку и запустили пленку о теннисном мяче в обратном направлении, может ли быть какой-нибудь способ это отличить? Ну, если вы знали направление и ориентацию камеры во время съемок, то вы будете в состоянии распознать эту ошибку. Но если вы смогли ознакомиться с сюжетом исключительно путем просмотра самой пленки, без дополнительной информации? Ответ – нет. Если в правильном направлении времени (вперед) пленка показывает мяч летящим слева направо, то в обратном направлении он будет показан летящим справа налево. И определенно, законы классической физики позволяют теннисным мячам двигаться как налево, так и направо. Так что движение, которое вы видите, когда пленка прокручивается как в прямом направлении времени, так и в обратном, превосходно согласуется с законами физики.

Поскольку мы представляли, что на теннисный мяч не действовали никакие силы, то он движется с постоянной скоростью. Рассмотрим теперь более общую ситуацию, включив силы. Согласно Ньютону влияние силы заключается в изменении скорости объекта: силы придают ускорения. Тогда представим, что после некоторого времени плавания в пространстве мяч захватывается гравитационным притяжением Юпитера, что заставляет его двигаться с возрастающей скоростью по нисходящей дуге, развернутой направо к поверхности Юпитера, как показано на Рис.6.1а и 6.1b. Если вы проигрываете пленку с этим движением в обратном направлении, теннисный мяч покажет движение по дуге, которая развернута вверх и налево от Юпитера, как на Рис. 6.1с. Здесь возникает новый вопрос: является ли движение, демонстрируемое пленкой, которая проигрывается в обратном направлении, – движение, обращенное во времени по отношению к движению, в действительности заснятому на пленку, – допустимым по классическим законам физики? Является ли это движение таким, которое может произойти в реальном мире? Во-первых, ответ "да" кажется очевидным: теннисные мячи могут двигаться по нисходящим дугам направо или по восходящим дугам налево или, коли на то пошло, по бесконечному количеству других траекторий. Тогда в чем трудность? Хотя ответ, несомненно, "да", наши рассуждения слишком поверхностны и упускают реальную суть вопроса.



***Рис 6.1****(а) Теннисный мяч, летящий от Венеры к Юпитеру, вместе с (b) окончанием полета. (с) Движение теннисного мяча, если его скорость обращена прямо перед его ударом о Юпитер.*

 Когда вы пускаете пленку в обратном направлении, вы видите теннисный мяч отскочившим от поверхности Юпитера, двигаясь вверх и налево в точности с той же скоростью (но в точности в противоположном направлении), с которой он падал на планету. Эта начальная часть пленки определенно согласуется с законами физики: мы можем представить, например, кого-то, кто запустил теннисный мяч с поверхности Юпитера с точно такой же скоростью. Существенный вопрос, будет ли и оставшаяся часть обратного движения также согласовываться с законами физики. Будет ли мяч, запущенный с этой начальной скоростью – и подвергающийся воздействию притягивающей вниз гравитации Юпитера – действительно двигаться вдоль траектории, изображенной на остатке прокручиваемой в обратном направлении пленки? Будет ли он в точности очерчивать его оригинальную нисходящую траекторию, но в обратном направлении?

Ответ на этот более усовершенствованный вопрос – "да". Чтобы избежать любой путаницы, расшифруем его детально. На Рис. 6.1а перед тем, как гравитация Юпитера оказала любое существенное влияние, мяч был направлен исключительно направо. Далее, на Рис. 6.1b мощная гравитационная сила захватила мяч и притянула его к центру планеты – притяжение, которое в большей степени направлено вниз, но, как вы можете видеть на рисунке, также, частично, и направо. Это значит, что когда мяч приблизился к поверхности Юпитера, его ориентированная направо скорость увеличилась слегка, но его ориентированная вниз скорость увеличилась сильно. Следовательно, в прокручиваемой назад пленке взлет мяча от поверхности Юпитера будет происходить в направлении слегка налево и, преимущественно, вверх, как показано на Рис. 6.1с. При этой стартовой скорости гравитация Юпитера будет оказывать ее максимальное влияние на скорость мяча, направленную вверх, делая ее все меньше и меньше, тогда как направленная налево скорость мяча тоже будет уменьшаться, но в меньшей степени. И с быстро уменьшающейся скоростью мяча, направленной вверх, его движение будет становиться преимущественно таким, при котором преобладает скорость, направленная налево, что вынудит мяч следовать по выгнутой наверх траектории по направлению налево. Вблизи окончания этой дуги гравитация истощит все направленное вверх движение, также как и добавочную направленную направо скорость, которую гравитация Юпитера добавила мячу во время его пути вниз, оставив движение мяча чисто в направлении налево в точности с той же скоростью, которую он имел в его первоначальном подходе.

Все это можно проделать количественно, но главное в том, что эта траектория в точности совпадает с обращенным начальным движением мяча. Просто изменив на противоположную скорость мяча, как на Рис. 6.1с, – отправив его в путь с той же скоростью, но в противоположном направлении, – можно заставить его пройти полностью свою исходную траекторию, но назад. Возвращая пленку назад в обсуждение, мы видим, что выгнутая вверх траектория, направленная налево, – траектория, которую мы просто сконструировали, основываясь на ньютоновских законах движения, – в точности совпадает с тем, что мы видели при прокручивании пленки назад. Так что движение мяча с обращением времени, как изображено на прокручиваемой назад пленке, согласуется с законами физики так же надежно, как и его движение в прямом времени. Движение, которое мы видели, прокручивая пленку в обратном направлении, есть движение, которое на самом деле может происходить в реальном мире.

Хотя тут имеется несколько тонкостей, которые я отношу к заключительным комментариям[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_2" \o ), это заключение является общим. Все известные и признанные законы, относящиеся к движению, – от уже обсужденной ньютоновской механики к электромагнитной теории Максвелла и к СТО и ОТО Эйнштейна (вспомним, что мы исключили квантовую механику до следующей главы) – заключают в себе симметрию по отношению к обращению времени: движение, которое может происходить в обычном направлении, соответствующем прямому ходу во времени, может так же прекрасно происходить и в обратном направлении. Поскольку терминология чуть-чуть запутанная, позвольте еще раз подчеркнуть, что мы не обращаем само время. Время действует так же, как и всегда. Вместо этого, наши выводы таковы, что *мы можем направить объект очерчивать его траекторию в обратном направлении путем простой процедуры обращения его скорости в любой точке вдоль его пути*. Эквивалентно, та же процедура – обращение скорости объекта в некоторой точке вдоль его пути заставит объект совершить движение, которое мы видели на прокручиваемой назад пленке.

Теннисные мячи и разбивающиеся яйца

Наблюдение за теннисным мячом, запущенным между Венерой и Юпитером – в том или другом направлении – не является особенно интересным. Но поскольку заключение, которого мы достигли, широко применимо, отправимся теперь в некоторое более интересное место: на вашу кухню. Положите яйцо на ваш кухонный стол, катните его в направлении края и позвольте ему упасть на пол и разбиться. Несомненно, имеется много движений в этой последовательности событий. Яйцо падает. Скорлупа растрескивается. Желток расплескивается тут и там. Доски пола сотрясаются. Формируются вихри в окружающем воздухе. Трение вызывает нагревание, влияющее на атомы и молекулы яйца, пола и воздуха, заставляя их дрожать немного более быстро. Но точно так же, как законы физики показывают нам, как мы можем отправить теннисный мяч очерчивать его собственный точный путь в обратном направлении, те же самые законы показывают, как мы можем заставить каждый кусочек яичной скорлупы, каждую каплю желтка, каждую секцию настила пола и каждый пузырек воздуха также проделать в точности его движение в обратном направлении. "Все", что нам необходимо сделать, это поменять направление скорости всех и каждой из составляющих процесса разбивания на обратное. Более точно, рассуждения, использованные в примере с теннисным мячом, означают, что если, гипотетически, мы были бы в состоянии одновременно поменять на обратную скорость каждого атома и молекулы, вовлеченных прямо или косвенно в процесс разбивания яйца, все движения при разбивании яйца будут происходить в обратном направлении.

Еще раз, точно как с теннисным мячом, если мы преуспеем в обращении всех этих скоростей, то, что мы увидим, будет похоже на прокручиваемую в обратном направлении пленку. Но, в отличие от теннисного мяча, обращение движения разбивающегося яйца будет чрезвычайно впечатляющим. Волна колеблющихся молекул воздуха и мельчайшие сотрясения пола соберутся в месте падения со всех частей кухни, заставив каждый кусочек скорлупы и каплю желтка направиться обратно к месту удара. Каждый ингредиент будет двигаться в точности с той же скоростью, которую он имел в исходном процессе разбивания яйца, но каждый будет теперь двигаться в противоположном направлении. Капли желтка будут лететь назад в шарик, точно так же как зубцы маленьких кусочков скорлупы, достигнувших окраины шарика, будут полностью выстроены для соединения вместе в гладкий яйцевидный контейнер. Колебания пола и воздуха будут точно состыкованы с движениями мириад соединяющихся капель желтка и кусочков скорлупы, чтобы дать заново сформированное яйцо, которое одним толчком подпрыгнет с пола в виде одного куска, взлетит на кухонный стол, мягко приземлится на его край с достаточным вращательным движением, чтобы откатиться на несколько дюймов и элегантно вернуться к началу. Это все будет происходить, если мы решим задачу тотального и точного обращения скоростей всего, что было задействовано.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_3" \o ) Так что, является ли событие простым, вроде полета по дуге теннисного мяча, или чем-то более сложным, вроде разбивания яйца, законы физики показывают, что то, что происходит в одном направлении времени, может, по крайней мере, в принципе, также происходить и в обратном направлении.

Принципы и практика

Истории о теннисном мяче и яйце дают более чем иллюстрацию симметрии по отношению к обращению времени в законах природы. Они также наводят на мысль, почему в действительном мире случая мы видим многие вещи происходящими одним способом и никогда не происходящими обратным способом. Отправить теннисный мяч повторить свой путь назад было не тяжело. Мы хватали его и неоднократно направляли его с той же самой скоростью, но в обратном направлении. Это так. Но заставить все хаотические остатки яйца воспроизвести их пути назад будет куда более тяжело. Мы должны захватить каждый кусочек разбитого яйца и одновременно направить каждый с той же скоростью, но в противоположном направлении. Ясно, что это находится за пределами того, что мы (или вся королевская конница и вся королевская рать) реально можем сделать.

Нашли ли мы ответ, который искали? Является ли причина того, почему яйца разбиваются, но не собираются воедино, даже если оба действия допускаются законами физики, вопросом того, что является, а что не является осуществимым на практике? Нет ли решения просто в том, что легко сделать яйцо разбитым – катнуть его по столу, – но экстраординарно сложно сделать его снова неразбитым?

Ну, если бы это был ответ, поверьте мне, я не стал бы возводить его в такую великую проблему. Спор простоты против сложности является существенной частью ответа, но полная история, в рамках которой все происходит, намного более тонкая и удивительная. Мы получим ее должным образом, но сначала мы должны сделать обсуждение этой секции чуть более точным. Это приводит нас к концепции *энтропии*.

Энтропия

На могильном камне на Центральном кладбище в Вене рядом с могилами Бетховена, Брамса, Шуберта и Штрауса выгравировано простое уравнение S = k log W, которое выражает математическую формулировку мощной концепции, известной как энтропия. Могильный камень несет на себе имя Людвига Больцмана, одного из наиболее проницательных физиков, работавших в течение последнего столетия. В 1906, с подорванным здоровьем и страдая от депрессии, Больцман совершил самоубийство во время отдыха со своей женой и дочерью с Италии. По иронии судьбы как раз несколькими месяцами позже эксперименты, начатые для подтверждения того, что идеи Больцмана, пылко отстаивая которые, он истощил свою жизнь, оказались успешными.

Понятие энтропии впервые было разработано во время промышленной революции учеными, интересовавшимися работой печей и паровых двигателей, что помогло разработать область термодинамики. После многих лет исследований основные идеи были резко пересмотрены, получив высшее воплощение в подходе Больцмана. Его версия энтропии, лаконично выраженная в уравнении на его надгробии, использует статистические обоснования для обеспечения связи между гигантским числом индивидуальных частей, составляющих физическую систему, и общими свойствами, которые система имеет.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_4" \o )

Чтобы почувствовать эти идеи, представим себе копию *Войны и мира*, разделенную на 693 двусторонних отдельных листа, которые подброшены высоко в воздух, а затем их свободное скопление собрано в аккуратную стопку.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_5" \o ) Когда вы проверите итоговый пакет страниц, в гигантской степени более вероятно, что страницы расположатся не по порядку, чем по порядку. Причина очевидна. Имеется много вариантов, в которых порядок страниц может быть перепутан, но только один вариант, при котором порядок правильный. Конечно, надлежащим образом страницы должны быть расположены в точности как 1,2; 3,4; 5,6; и так далее вплоть до 1385,1386. Любое другое расположение будет не по порядку. Простое, но существенное наблюдение заключается в том, что чем большим числом способов, которые все равноправны, нечто может произойти, тем более вероятно, что оно произойдет. А если нечто может произойти огромным числом способов, вроде страниц, приземлившихся в неправильном числовом порядке, в огромной степени более вероятно, что оно произойдет. Мы все интуитивно это знаем. Если вы покупаете лотерейный билет, имеется только один случай, в котором вы можете выиграть. Если вы купите миллион билетов, каждый со своим номером, то будет миллион случаев, в которых вы можете выиграть, так что ваши шансы разом разбогатеть будут в миллион раз выше.

Энтропия представляет собой понятие, которое делает эту идею точной путем подсчета количества способов, согласующихся с законами физики, в которых любая данная физическая ситуация может быть реализована. Высокая энтропия означает, что имеется много способов; низкая энтропия означает, что имеется несколько способов. Если страницы *Войны и мира* скомпоновались в правильном числовом порядке, это низкоэнтропийная конфигурация, поскольку имеется одно и только одно расположение, удовлетворяющее этому критерию. Если страницы находятся не в числовом порядке, это высокоэнтропийная ситуация, поскольку небольшой расчет показывает, что имеется огромное число, для записи которого потребовалось бы более 30 строк настоящего текста, – примерно 101878 – различных неупорядоченных расположений.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_6" \o ) Если вы подбросили страницы в воздух, а затем собрали их в аккуратную стопку, всегда ясно, что они будут взбиты ветром беспорядочно, поскольку такие конфигурации имеют чудовищно более высокую энтропию – имеется намного больше способов получить неупорядоченный результат, – чем исключительное расположение, в котором страницы находятся в правильном числовом порядке.

В принципе, вы можете использовать законы классической физики, чтобы точно определить, где приземлится каждая страница после того, как целая пачка была подброшена в воздух. Так же, опять в принципе, мы можем точно предсказать итоговое расположение страниц[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_7" \o ) и отсюда (в отличие от квантовой механики, которую мы игнорируем до следующей главы) будет казаться, что нет необходимости полагаться на вероятностные понятия, такие как какой результат является более или менее вероятным по сравнению с другим. Но статистические понятия являются как действенными, так и удобными. Если*Война и мир* была бы брошюрой, состоящей только из пары страниц, мы точно могли бы быть в состоянии успешно завершить необходимые вычисления, но это будет невозможно сделать для настоящей *Войны и Мира*.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_8" \o ) Следование за точным движением 693 гибких кусков бумаги, пока они подхватываются тихими воздушными потоками и соприкасаются, скользят и хлопают друг о друга, будет монументальной задачей, далеко лежащей за пределами возможностей даже самых мощных суперкомпьютеров.

Более того – и это является критически важным – получить точный ответ нельзя будет, даже если бы мы были способны. Когда вы исследуете окончательную стопку страниц, вы гораздо меньше интересуетесь точными деталями, какая страница где оказалась, чем главным вопросом, расположились ли страницы в правильном порядке. Если расположились, прекрасно. Вы сможете сесть и продолжить чтение про Анну Павловну и Николая Ильича Ростовых, как обычно. Но если вы обнаружили, что страницы не находятся в их правильном порядке, точные детали расположения страниц будут чем-то, что вас, вероятно, меньше всего будет заботить. Если вы увидели одно неупорядоченное расположение страниц, вы в большой степени видели их все. За исключением случаев, когда по некоторым странным причинам вы погрязли в мелочах, выясняя, каким страницам пришлось появиться здесь или там в стопке, вы едва ли заметите, если некоторое перемешанное впоследствии в неправильном порядке расположение страниц вы изначально задали. Начальная стопка будет выглядеть неупорядоченной и перемешанная впоследствии стопка будет также выглядеть неупорядоченной. Так что не только значительно легче провести статистическое обсуждение, но и ответ, который оно дает – упорядоченное против неупорядоченного, – более важен для нашего настоящего интереса, для вида вещей, на которые мы обычно обращаем внимание.

Этот сорт укрупненного подхода является центральным для статистической основы энтропийных рассуждений. Точно так же, как любой лотерейный билет имеет те же шансы на выигрыш, как и любой другой, после многих подбрасываний *Войны и мира* любое особое расположение страниц возникнет с точно той же вероятностью, что и любое другое. Что делает проведение статистических рассуждений эквивалентным нашему утверждению, что имеется два представляющих интерес класса конфигураций страниц: упорядоченные и неупорядоченные. Первый класс имеет одного члена (правильное расположение страниц 1,2; 3,4; и так далее), тогда как второй класс имеет гигантское число членов (любое другое возможное расположение страниц). Эти два класса представляют разумный набор для использования, поскольку, как сказано выше, они охватывают всеобъемлющую макроскопическую оценку, которую вы делаете, рассматривая любое данное расположение страниц.

Даже при этих условиях вы можете предложить сделать более тонкое различие между этими двумя классами, такое как расположения с несколькими выпадающими из правильного порядка страницами, расположения с неупорядоченными страницами только из первой главы и так далее. Фактически, иногда может быть полезным рассмотреть такие промежуточные классы. Однако, число возможных расположений страниц в каждом из этих новых подклассов все еще экстремально мало по сравнению с числом расположений в полном неупорядоченном классе. Например, полное число неупорядоченных расположений, включающих только страницы из первой части *Войны и мира*, составляет 10–178 от сотой доли полного числа неупорядоченных расположений, включающих все страницы. Так что, хотя при начальном подбрасывании не сшитой книги итоговое расположение страниц будет, вероятнее всего, частью одного из промежуточных, не полностью разупорядоченных классов, почти ясно, что если вы повторите процедуру подбрасывания много раз, порядок страниц в конечном счете будет проявлять не очевидный пример всего, чего угодно. Расположение страниц развивается в направлении к полностью неупорядоченному классу, поскольку имеется так много расположений страниц, которые удовлетворяют данному требованию.

Пример *Войны и мира* подчеркивает две существенные особенности энтропии. Первая, *энтропия есть мера количества беспорядка в физической системе*. Высокая энтропия означает, что много перестановок составляющих частей, мыслимых для системы, пройдут незамеченными, и это, с другой стороны, означает, что система сильно неупорядочена (когда страницы *Войны и мира* все перемешаны, любое дальнейшее их перепутывание будет едва ли заметно, поскольку просто оставляет страницы в перемешанном состоянии). Низкая энтропия означает, что только несколько перестановок пройдут незамеченными, и это, с другой стороны, означает, что система сильно упорядочена (когда страницы *Войны и мира* начинаются с их правильного расположения, вы легко можете отследить едва ли не любую перестановку). Вторая, в физических системах с многими составляющими частями (например, в книгах со многими страницами, подбрасываемых в воздух) имеется естественная эволюция по направлению к большему беспорядку, поскольку беспорядок может возникнуть в настолько большем количестве путей, чем порядок. На языке энтропии это указание на то, что физические системы имеют тенденцию развиваться по направлению к состояниям с более высокой энтропией.

Конечно, делая энтропию точной и универсальной, физическое определение не рассматривает подсчет числа перестановок страниц той или иной книги, которые оставляют ее выглядящей по-прежнему, или упорядоченной или неупорядоченной. Вместо этого физическое определение подсчитывает число перестановок фундаментальных составляющих – атомов, субатомных частиц и так далее – которое оставляет макроскопические, всеобъемлющие, крупномасштабные свойства данной физической системы неизменными. Как и в примере *Войны и мира*, низкая энтропия означает, что только несколько перестановок пройдут незамеченными, так что система высоко упорядочена, тогда как высокая энтропия означает, что много перестановок не будут замечены, что означает, что система сильно неупорядочена.\*

Для хорошего физического примера, причем такого, который можно быстро проверить руками, подумаем о бутылке колы, упоминавшейся ранее. Когда газ, подобный углекислому газу, изначально заключенному в бутылке, в конечном счете распространяется по комнате, имеется много перестановок отдельных молекул, которые не будут иметь заметного эффекта. Например, если вы машете своими руками, молекулы углекислого газа будут двигаться туда и обратно, быстро изменяя свои положения и скорости. Но в целом не будет никакого качественного влияния на их расположение в целом. Молекулы были распределены однородно до того, как вы взмахнули руками, и они останутся распределенными однородно после того, как вы это сделали. Конфигурация однородно распределенного газа нечувствительна к гигантскому числу перестановок молекулярных составляющих, так что находится в состоянии с высокой энтропией. Напротив, если газ распределен в меньшем пространстве, как это было в бутылке, или удерживается барьером в углу комнаты, он будет иметь существенно более низкую энтропию. Причина проста. Точно так же, как более тонкая книга имеет меньше расположений страниц, меньшее пространство обеспечивает меньше мест, где молекулы могут размещаться, а следовательно, допускает меньше перестановок молекул.

Но когда вы откручиваете крышку бутылки или удаляете барьер, вы открываете целую новую вселенную для молекул газа, и через столкновения и соударения они быстро рассеиваются, чтобы эту вселенную "исследовать". Почему? По тем же самым статистическим причинам, как и в случае страниц*Войны и мира*. Нет сомнений, что некоторые из соударений будут приводить несколько молекул газа точно внутрь исходного пузыря газа или подтолкнут несколько молекул, которые вернулись назад в пузырь, в сторону облака газа исходной плотности.

*(\*)"Энтропия есть еще один пример, в котором терминология усложняет идеи. Не расстраивайтесь, если вы опять себе напомнили, что низкая энтропия означает высокий порядок, а высокая энтропия означает низкий порядок (эквивалентно, высокий беспорядок). Я много раз так делал."*

 Но, поскольку объем комнаты превышает объем исходного облака газа, имеется граздо больше перестановок, приемлемых для молекул, если они рассеиваются из облака, чем для молекул, если они остаются в облаке. Тогда в среднем молекулы газа будут расплываться из исходного облака и медленно достигнут состояния, когда они однородно распределены по комнате. Так что относительно низкоэнтропйная исходная конфигурация, в которой весь газ собран в кучу в малой области, естественным образом эволюционирует в направлении относительно высокоэнтропийной конфигурации, в которой газ однородно распространен в большем пространстве. И однажды достигнув такой однородности, газ будет иметь тенденцию поддерживать это состояние высокой энтропии: столкновения и соударения все еще заставляют молекулы двигаться туда и сюда, вызывая замену одной перестановки на другую, но подавляющим образом превалируют такие перестановки, которые не влияют на макроскопические, всеобъемлющие свойства газа. Это и означает иметь высокую энтропию.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_9" \o )

В принципе, как и со страницами *Войны и мира*, мы можем использовать законы классической физики, чтобы точно определить, где в данный момент времени будет находиться каждая молекула углекислого газа. Но вследствие чудовищного числа молекул СО2 – около 1024 в бутылке колы – в действительности провести такие вычисления практически невозможно. И даже если каим-то образом мы были бы в состоянии сделать это, обладание списком из миллионов миллиардов миллиардов положений и скоростей частиц будет почти ничего не давать нам в смысле того, как молекулы распределены. Концентрация внимания на крупномасштабных статистических свойствах – рассеялся газ или собрался вместе, что означает, имеет он высокую или низкую энтропию – намного более информативна.

Энтропия, второй закон и стрела времени

Тенденция физической системы эволюционировать в направлении состояния с более высокой энтропией известна как второй закон термодинамики. (Первый закон есть привычный закон сохранения энергии). Как отмечено выше, основанием для закона является простое статистическое рассуждение: имеется больше способов для системы иметь более высокую энтропию, и "больше способов" означает, что более вероятным является то, что система будет эволюционировать в одну из этих высокоэнтропийных конфигураций. Хотя отметим, что это не есть закон в обычном смысле, поскольку, хотя такие случаи редки и маловероятны, нечто может уйти из состояния с высокой энтропией в состояние с низкой. Когда вы подбрасываете в воздух перепутанную пачку страниц, а затем собираете ее в аккуратную стопку, может произойти возврат в правильный числовой порядок. Вы не захотите заключить пари на большую сумму, что это произойдет, но это возможно. Возможно также, что столкновения и соударения просто приведут к тому,что весь рассеянный углекислый газ будет двигаться согласованно и втянется назад в вашу открытую бутылку колы. Не надо, затаив дыхание, ожидать и такого исхода тоже, но он может произойти.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_10" \o )

Большое число страниц Войны и мира и большое число молекул газа в комнате является тем, что делает разницу энтропий между неупорядоченными и упорядоченными расположениями настолько огромной и что приводит к ужасно малой вероятности низкоэнтропийных исходов того или иного процесса. Если вы еще и еще раз подбрасываете в воздух только две двусторонние страницы, вы найдете, что они опустятся в правильном порядке примерно в 12,5 процентов случаев. С тремя страницами эта величина упадет примерно до 2 процентов, с четырьмя страницами примерно до 0,3 процента, с пятью страницами примерно до 0,03 процента, с шестью страницами примерно до 0,002 процента, с десятью страницами до 0,000000027 процента, а с 693 страницами процент подбрасываний, которые будут приводить к правильному порядку, настолько мал, – он содержит так много нулей после десятичной точки, – что я убедил издателя не использовать полстраницы, чтобы записать его явно. Аналогично, если вы выпустили только две молекулы газа бок о бок в пустую бутылку из-под колы, вы найдете, что при комнатной температуре их хаотическое движение будет приводить их обеих назад друг к другу (на расстояние миллиметра друг от друга), в среднем, грубо каждые несколько секунд. Для группы из трех молекул вы будете ждать день, для четырех молекул вы будете ждать год, а для исходного плотного пузыря из миллиона миллиардов миллиардов молекул потребуется время, намного превышающее текущий возраст вселенной, чтобы их хаотическое, рассеивающее движение привело их назад вместе в маленький упорядоченный сгусток. С большей уверенностью, чем в смерти и налогах, мы можем считать, что системы с большим числом составляющих эволюционируют к беспорядку.

Хотя это может и не быть очевидным немедленно, мы здесь подошли к интригующему моменту. Второй закон термодинамики, кажется, дал нам стрелу времени, одну из вещей, которые появляются, когда физические системы имеют большое число составляющих. Если вы посмотрите пленку о двух молекулах углекислого газа, которые разместились вместе в малом объеме (с подсветкой траекторий, показывающей движения каждой из них), вам будет тяжело сказать, прокручивалась ли пленка в прямом или в обратном направлении. Две молекулы будут летать тем и другим путем, временами собираясь вместе, временами удаляясь, но они не будут представлять макроскопическое, всеобъемлющее поведение, различающее одно направление во времени от обратного. Однако, если вы увидите пленку, на которой 1024 молекул углекислого газа собрались вместе в малом объеме (в виде, скажем, маленького плотного облака молекул), вы легко определите, показывалась ли пленка в прямом или обратном направлении: подавляюще более вероятным является, что прямое направление времени то, в котором молекулы газа становятся более и более однородно распределенными, достигая все большей и большей энтропии. Если вместо этого пленка показывает однородный рассеянный газ молекул, стягивающихся вместе в тесную группу, вы немедленно осознаете, что смотрите пленку в обратном направлении.

Те же рассуждения годятся, по-существу, для всех вещей, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни – для вещей, которые имеют большое число составляющих: стрела прямой ориентации во времени указывает в направлении роста энтропии. Если вы смотрите пленку о стакане воды со льдом, поставленном на стойку, вы можете определить, какое направление является прямым во времени, отметив, что лед тает, – его молекулы Н2О распределяются по стакану, следовательно, достигая более высокой энтропии. Если вы смотрите пленку о разбивающемся яйце, вы можете определить, какое направление является прямым во времени, отметив, что составляющие яйца становятся все более и более разупорядоченными, – что яйцо разбивается скорее, чем собирается воедино, следовательно, также достигая более высокой энтропии.

Как вы можете видеть, концепция энтропии обеспечивает точную версию заключения "простота против сложности", которую мы нашли раньше. Для страниц *Войны и мира* легко выпасть из порядка, так как имеется так много неупорядоченных расположений. Для страниц тяжело попасть в совершенный порядок, поскольку сотни страниц должны будут двигаться точно правильным путем, чтобы упасть в уникальной последовательности, спланированной Толстым. Для яйца легко разбиться, так как имеется так много способов разбиться. Для яйца тяжело собраться воедино, поскольку огромное число разбрызгавшихся составляющих должно будет двигаться в совершенной координации, чтобы воспроизвести отдельный уникальный результат в виде неповрежденного яйца, покоящегося на столе. Для вещей с большим числом составляющих идти от низкой энтропии к высокой – от порядка к беспорядку – легко, так что это и происходит всегда. Двигаться от высокой энтропии к низкой – от беспорядка к порядку – тяжелее, так что это происходит, в лучшем случае, редко.

Отметим также, что эта энтропийная стрела не является полностью жесткой; здесь не заявляется, что это определение направления времени на 100 процентов "защищено от дурака". Напротив, подход достаточно гибкий, чтобы позволить тем или иным процессам случаться также и в обратном направлении. Поскольку второй закон провозглашает, что рост энтропии является только статистически вероятным, а не нерушимым фактом природы, он позволяет как редкую возможность, что страницы могут выпасть в совершенном числовом порядке, что молекулы газа могут собраться и влезть в бутылку, а яйца могут самовосстанавливаться. Используя математику энтропии, второй закон выражает в точности, как статистически невероятны такие события (вспомните гигантское число, втречавшееся шестью страницами раньше, – 101878 – показывающее, насколько более вероятно, что страницы *Войны и мира*лягут в беспорядке), но он подтверждает, что они могут происходить.

Это кажется похожим на убедительную историю. Статистические и вероятностные рассуждения дают нам второй закон термодинамики. В свою очередь, второй закон обеспечивает нас интуитивным различием между тем, что мы называем прошлым и тем, что мы называем будущим. Он дает нам практическое объяснение, почему вещи в повседневной жизни, вещи, которые обычно состоят из огромного числа составляющих, начинаются подобно этому, а заканчиваются подобно тому, в то время как мы никогда не видим их, начинающимися подобно тому, а заканчивающимися подобно этому. Но по прошествии многих лет – и благодаря важным вкладам физиков, подобных лорду Кельвину, Джозефу Лошмидту, Анри Пуанкаре, С.Х. Берберу, Эрнсту Цермело и Вильяму Гиббсу, – Людвиг Больцман пришел к пониманию, что полная история стрелы времени более удивительна. Больцман осознал, что хотя энтропия проясняет важные аспекты головоломки, она не отвечает на вопрос, почему прошлое и будущее кажутся такими различными. Вместо этого, энтропия переопределила вопрос важным образом, одним из тех, что приводят к неожиданным заключениям.

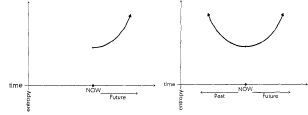
Энтропия: прошлое и будущее

Ранее мы ввели дилемму прошлого и будущего путем сравнения наших повседневных наблюдений со свойствами ньютоновских законов классической физики. Мы подчеркнули, что мы постоянно ощущаем очевидную направленность пути, по которому вещи развиваются во времени, но сами законы трактуют то, что мы называем прямым и обратным направлением во времени, на совершенно одинаковых основаниях. Так как в рамках законов физики нет стрелы, которая обозначает направление во времени, нет указания, требующего: "Используйте этот закон в данной темпоральной ориентации, но не в обратной", мы приходим к вопросу: Если законы, лежащие в основе опыта, трактуют обе темпоральные ориентации симметрично, почему сам опыт (ощущения) так односторонен во времени, всегда происходя в одном направлении, но никогда в обратном? Откуда возникает наблюдаемая и ощущаемая направленность времени?

В последней секции нам показалось, что был сделан прогресс через второй закон термодинамики, который явно выделяет будущее как направление, в котором энтропия возрастает. Но после дальнейших размышлений это оказывается не так просто. Отметим, что в нашем обсуждении энтропии и второго закона мы не преобразовывали никоим образом законы классической физики. Вместо этого, все, что мы сделали, это использовали законы в "крупномасштабных" статистических рамках: мы проигнорировали тонкие детали (точный порядок несоединенных страниц *Войны и мира*, точные положения и скорости составляющих яйца, точные положения и скорости молекул СО2 в бутылке колы), а, напротив, сконцентрировали наше внимание на макроскопических, всеобъемлющих свойствах (страницы упорядочены или нет, яйцо разбито или восстановлено, молекулы газа рассеяны или не рассеяны). Мы нашли, что когда физические системы существенно сложны (книги с большим числом страниц, хрупкие объекты, которые могут разбиться на много фрагментов, газ с большим числом молекул), имеется огромное отличие в энтропии между их упорядоченными и неупорядоченными конфигурациями. А это значит, что имеется огромная вероятность, что системы будут эволюционировать от более низкой к более высокой энтропи, что и является грубо утверждением второго закона термодинамики. Но ключевым фактом, на который надо обратить внимание, является то, что второй закон производен: он просто является следствием вероятностных рассуждений, примененных к ньютоновским законам движения.

Это приводит нас к простому, но поразительному выводу: поскольку ньютоновские законы физики не имеют встроенной темпоральной ориентации, все рассуждения, которые мы использовали для обоснования, что системы будут развиваться от более низкой к более высокой энтропии в направлении в будущее, работают одинаково хорошо, если их применить в направлении прошлого. Еще раз, так как лежащие в основе законы физики имеют симметрию по отношению к обращению времени, для них нет способа даже провести различие между тем, что мы называем прошлым, и тем, тем мы называем будущим. Точно так же, как нет указательного столба в глубокой темноте пустого пространства, который объявляет это направление вверх, а это направление вниз, нет ничего в законах классической физики, что называло бы это направление во времени будущим, а это направление во времени прошлым. Законы не предлагают темпоральной ориентации; это отличие, к которому они полностью нечувствительны. А поскольку законы движения несут ответственность за то, как изменяются вещи, – как в направлении, которое мы называем будущим, так и в направлении, которое мы называем прошлым, – статистические/вероятностные рассуждения, стоящие за вторым законом термодинамики, применимы в равной степени к обоим темпоральным направлениям. Следовательно, имеется не только подавляющая вероятность того, что энтропия физической системы будет больше в том направлении, что мы называем будущим, но имеется такая же подавляющая вероятность, что она будет больше в направлении, которое мы называем прошлым. Мы показали это на Рис. 6.2.

Это ключевой момент для всего, что последует дальше, но это также обманчиво просто. Общее противоречие в том, что если в соответствии со вторым законом термодинамики энтропия возрастает по направлению в будущее, тогда энтропия с необходимостью уменьшается по направлению в прошлое. Но тут и появляется тонкость. Второй закон действительно говорит, что если в любой данный момент, которым мы интересуемся, физическая система еще не достигла максимально возможной энтропии, экстраординарно вероятно, что физическая система будет впоследствии получать и раньше получала больше энтропии. Это содержание Рис. 6.2b. С законами, которые закрывают глаза на различие прошлого от будущего, такая симметрия времени неизбежна.



(а) (b)

***Рис 6.2****(а) Как это обычно описывается, второй закон термодинамики подразумевает, что энтропия возрастает по направлению в будущее от любого заданного момента.* (b) Поскольку известные законы природы рассматривают направления вперед и назад во времени идентично, второй закон в действительности подразумевает, что энтропия возрастает как в направлении будущего, так и в направлении прошлого от любого заданного момента. <Горизонтальные оси – *время*, вертикальные оси – *энтропия*; отмечен момент *настоящего* и направления налево (*прошлое*) и направо (*будущее*)>. Это существенный урок. Он говорит нам, что энтропийная стрела времени оказывается направленной в две стороны. От любого заданного момента стрела энтропии демонстрирует рост в направлении будущего и в направлении прошлого. А это делает явно затруднительным предлагать энтропию в качестве объяснения однонаправленной стрелы ощущаемого времени.

Подумаем о том, что двунаправленная энтропийная стрела подразумевает в конкретных случаях. Если сегодня теплый день и вы видите частично растаявший кубик льда в стакане воды, вы полностью уверены, что на полчаса позже кубик будет еще более растаявшим, поскольку чем больше он растаял, тем большей энтропией он обладает.[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_11" \o ) Но вы будете иметь точно такую же уверенность, что на полчаса раньше он был также более растаявший, поскольку точно такие же статистические рассуждения подразумевают, что энтропия должна возрастать по направлению в прошлое. И такое же заключение применимо к бесчисленному множеству других примеров, с которыми мы сталкиваемся каждый день. Ваше убеждение, что энтропия возрастает по направлению в будущее – от того, что частично рассеявшийся газ молекул рассеивается дальше, к тому, что частично перепутанный порядок страниц будет перепутываться еще больше, – должно соответствовать точно такой же уверенности, что энтропия была также выше и в прошлом.

Неприятная мысль в том, что половина из этих заключений кажется абсолютно ложной. Энтропийные рассуждения дают точные и осмысленные заключения, когда они применены в одном направлении времени, а именно в направлении того, что мы называем будущим, но дают очевидно ошибочные и кажущиеся нелепыми заключения, когда они применены в направлении того, что мы называем прошлым. Стаканы воды с частично растаявшими кубиками льда обычно не начинают изменяться как стаканы воды без кубиков льда, в которых молекулы воды собираются и смерзаются в кусочки льда, чтобы еще раз начать таять. Несвязанные страницы *Войны и мира* обычно не начинают перегруппировываться от полного числового беспорядка, чтобы через последовательность подбрасываний стать менее перепутанными и лишь затем начать снова перепутываться больше. И, возвращаясь на кухню, яйца, как правило, не начинают изменяться из разбитого состояния, затем собираясь в неповрежденное целое яйцо, чтобы разбиться несколько позже.

Или они это делают?

Вслед за математикой

Сотни лет научных исследований показали, что математика обеспечивает мощный и острый язык для анализа вселенной. В самом деле, история современной науки насыщена примерами, в которых математика делала предсказания, которые казались противоречащими как интуиции, так и ощущениям (что вселенная содержит черные дыры, что вселенная имеет антиматерию, что удаленные частицы могут быть запутанными и так далее), но которые в конце концов эксперименты и наблюдения смогли подтвердить. Такие разработки сами по себе оставили глубокий след в культуре теоретической физики. Физики пришли к осознанию, что математика, когда она используется обоснованным образом, является проверенной дорогой к истине.

Итак, когда математический анализ законов природы показал, что энтропия должна возрастать как по направлению в будущее, так и по направлению в прошлое от любого данного момента, физики не выбросили ее из головы. Вместо этого нечто, похожее на физическую клятву Гиппократа, побудило исследователей сохранить глубокий и здоровый скептицизм относительно обманчивой истинности человеческого опыта и с тем же скептическим отношением старательно проследовать за математикой и посмотреть, куда она приведет. Только тогда мы можем правильно оценить и интерпретировать любое остающееся рассогласование между физическими законами и здравым смыслом.

С этой целью представим, что сейчас 10:30 вечера и последние полчаса вы уставились на стакан воды со льдом (в баре тихая ночь), наблюдая, как кубики медленно тают, превращаясь в маленькие бесформенные комки. Вы абсолютно не сомневаетесь, что полчаса назад бармен положил в стакан полностью правильные кубики льда; вы не сомневаетесь, потому что вы доверяете своей памяти. И если в силу каких-то обстоятельств ваше убеждение относительно того, что произошло за последние полчаса будет поколеблено, вы можете спросить парня напротив, который также наблюдал, как тают кубики льда (в баре на самом деле тихая ночь), или вообще исследовать запись, взятую из обзорной видеокамеры бара, оба эти источника подтвердят, что ваша память в порядке. Если вы тогда спросите себя, что, как вы ожидаете, произойдет с кубиками льда в течение следующей половины часа, вы, вероятно, придете к заключению, что они будут продолжать таять. А если вы достигли достаточно хорошего знакомства с концепцией энтропии, вы объясните ваше предсказание, обратившись к подавляющей вероятности того, что энтропия будет возрастать от того, что вы видите прямо сейчас, в 10:30 вечера, по направлению в будущее. Все это вполне осмысленно и совпадает с нашей интуицией и ощущениями.

Но, как мы видели, такие энтропийные рассуждения – рассуждения, что, проще говоря, вещи более вероятно будут разупорядочиваться, поскольку имеется больше способов для разупорядочивания, рассуждения, которые проверяемо сильны для объяснений, как вещи разворачиваются по направлению к будущему, – объявляют, что энтропия точно так же вероятно будет больше и в прошлом. Это должно означать, что частично растаявшие кубики льда, которые вы видите в 10:30 вечера, были на самом деле еще более растаявшими в более ранние времена; это должно означать, что в 10:00 вечера они не начали с твердых кубиков льда, а, напротив, медленно собрались из воды с комнатной температурой на пути к 10:30 вечера, и так же верно они медленно растают до воды комнатной температуры на их пути к 11:00 вечера.

Нет сомнений, это заявление таинственно – или вообще вы назовете его сумасшедшим. Чтобы оно было правильным, не только молекулы Н2О в стакане воды при комнатной температуре должны спонтанно собраться в частично сформированные кубики льда, но и цифровым сигналам в камере наблюдения, а также нейронам в вашем мозге и в мозге парня напротив, всем им надо будет спонтанно выстроиться к 10:30, чтобы подтвердить, что имелось собрание полностью сформированных кубиков льда, которые растаяли, даже если этого никогда не было. И еще, это причудливо звучащее заключение появилось там, где добросовестное применение энтропийных рассуждений – тех же рассуждений, которые вы принимали без колебаний для объяснения, почему частично растаявший лед, который вы видели в 10:30 вечера продолжит таять до 11:00 вечера, – проведено симметричным во времени образом, требуемым законами физики. Эта неприятность с имеющимися фундаментальными законами движения, которые не имеют встроенного различия между прошлым и будущим, с законами, чья математика трактует будущее и прошлое от любого данного момента в точности одним и тем же способом.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_12" \o )

Остается надеяться, что мы скоро найдем выход из того странного положения, в которое нас завело равноправное использовение энтропийных рассуждений; я не пытаюсь убедить вас, что ваша память и записи содержат прошлое, которого никогда не было (оправдание для фанатов "*Матрицы*"). Но мы найдем его очень успешным для высокоточного разделения интуиции и математических законов. Итак, не отстаем от поезда.

Затруднительное положение

Ваша интуиция отказывает прошлому в высокой энтропии, поскольку, когда видно разворачивание событий в обычном прямом направлении во времени, может потребоваться спонтанное возрастание порядка: молекулы воды спонтанно замерзают до 0 градусов Цельсия и переходят в лед, рассудок спонтанно обзаводится воспоминаниями о вещах, которые не происходили, видеокамеры спонтанно производят образы вещей, которых никогда не было, и так далее, все это кажется экстраординарно маловероятным – предполагаемое объяснение прошлого, в котором даже Оливер Стоун\* будет осмеян. На этом этапе физические законы и математика энтропии полностью согласуются с вашей интуицией. Такая последовательность событий, которая была бы видна в прямом направлении времени с 10:00 вечера до 10:30 вечера, шла бы против сути второго закона термодинамики, – что привело бы к уменьшению энтропии, – а это, хотя и не невозможно, но очень маловероятно.

*(\*)"Оливер Стоун (р. 1946) – известный американский режиссер, сценарист и продюсер. Использует средства жанрового голливудского кинематографа для выражения авторской, личностной оценки современной истории ("Взвод", "Уолл-Стрит", "Убить президента", "Прирожденные убийцы"). Один из немногих кинодеятелей современности, который свои политические взгляды ставит во главу творчества. Результат получается одновременно очень политичный, откровенный и всегда скандальный. – (прим. перев.)"*

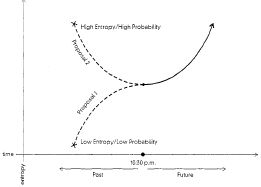
Напротив, ваша интуиция и ощущения говорят вам, что намного более вероятна такая последовательность событий, в которой кубики льда, которые были полностью сформированы в 10:00 вечера, частично растаяли в то, что вы видите в своем стакане прямо сейчас в 10:30 вечера. Но на этом этапе физические законы и математика энтропии только отчасти согласуются с вашими ожиданиями. Математика и интуиция сходятся в том, что если на самом деле в 10:00 вечера полностью сформировались кубики льда, тогда наиболее вероятная последовательность событий будет для них растаять до частей кубиков, которые вы видите в 10:30 вечера: результирующий рост энтропии лежит в русле как второго закона термодинамики, так и ощущений. Но где математика и интуиция расходятся, так это в том, что наша интуиция, в отличие от математики, не может дать или дает недостаточную оценку вероятности действительного полного формирования кубиков льда в 10:00 вечера, задаваемого одним наблюдением, которое мы принимаем как неоспоримое, как полностью надежное: что прямо сейчас в 10:30 вечера вы видите частично растаявшие кубики.

Это основной момент, так что позвольте мне объяснить. Главный урок второго закона термодинамики в том, что физические системы имеют подавляющую тенденцию находится в конфигурациях с высокой энтропией, поскольку имеется так много способов, которыми такие состояния могут реализоваться. И раз попав в такие высокоэнтропийные состояния, физические системы имеют подавляющую тенденцию оставаться в них. Высокая энтропия является естественным состоянием для пребывания в нем системы. Вы никогда не будете удивляться или чувствовать необходимость объяснения, почему любая физическая система находится в высокоэнтропийном состоянии. Такие состояния являются нормой. Наоборот, что нуждается в объяснении, так это почему любая данная физическая система находится в состоянии порядка, состоянии с низкой энтропией.

 Такие состояния ненормальны. Но они определенно могут случаться. Но с точки зрения энтропии такие упорядоченные состояния являются редкими отклонениями, которые взывают к объяснению. Так что один факт в нашем эпизоде, который мы принимаем как неоспоримо правильный, – ваше наблюдение в 10:30 вечера низкоэнтропийных частично сформированных кубиков льда, – фактически нуждается в объяснении.

С точки зрения вероятности абсурдно объяснять это низкоэнтропийное состояние призывая еще менее энтропийное состояние, еще менее вероятное состояние, при котором в 10:00 вечера все было еще более упорядочено, более полно сформированы кубики льда, что наблюдалось в более раннем, более упорядоченном окружении. Вместо этого подавляюще более вероятно, что вещи начинаются с обыкновенного, полностью нормального высокоэнтропийного состояния: стакан однородной жидкой воды абсолютно без какого бы то ни было льда. Тогда через маловероятную, но всегда-так-часто-ожидаемую статистическую флуктуацию стакан воды движется вопреки требованиям второго закона термодинамики и эволюционирует в состояние низкой энтропии, в котором появляются частично сформированные кубики льда. Эта эволюция, хотя и требует редких и необычных процессов, полностью избегает еще меньшей энтропии, еще менее вероятного, еще более редкого состояния, в котором кубики льда полностью сформированы. В любой момент между 10:00 вечера и 10:30 вечера эта странно выглядящая эволюция имеет более высокую энтропию, чем нормальный сценарий таяния льда, как вы можете видеть на Рис. 6.3, так что она реализует признанное наблюдение в 10:30 вечера способом, который более вероятен – намного более вероятен – чем сценарий, в котором тают полностью сформированные кубики льда.[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_13" \o ) В этом заключается затруднение.\*

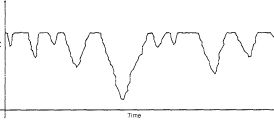
*(\*)"Вспомним, что двенадцатью страницами ранее мы показали гигантское различие между числом упорядоченных и разупорядоченных конфигураций для всего лишь 693 двусторонних листков бумаги. Теперь мы обсуждаем поведение грубо около 1024 молекул Н2О, так что различие между числом упорядоченных и разупорядоченных конфигураций будет настолько грандиозным, что захватывает дух. Более того, те же самые рассуждения остаются для всех других атомов и молекул внутри вас и внутри окружения (мозги, оханные камеры, молекулы воздуха и так далее). То есть в стандартном объяснении, в котором вы можете верить своей памяти, не только частично растаявшие кубики льда были в 10:00 вечера в более упорядоченном – менее вероятном – состоянии, но и все остальное: когда видеокамера записывает последовательность событий, это проявляется в общем росте энтропии (из-за нагревания и сопутствующих процессу записи помех); аналогично, когда мозг записывает память, хотя мы и слабо понимаем микроскопческие детали этого процесса, имеется итоговый рост энтропии (мозг может увеличивать порядок, но, как и с любыми производящими порядок процессами, если мы примем во внимание выделение тепла, будет итоговый рост энтропии). Так что если мы сравниваем полную энтропию бара между 10:00 вечера и 10:30 вечера в двух сценариях – один, в котором вы верите своей памяти, а другой, в котором вещи спонтанно упорядочиваются из начального неупорядоченного состояния, достигая соответствия с тем, что вы видите сейчас, в 10:30 вечера, – то получим чудовищную разницу энтропий. Последний сценарий на каждом его этапе имеет подавляющее большую энтропию, чем первый сценарий, так что с точки зрения вероятности последний сценарий в гигантской степени более вероятен."*



***Рис 6.3****Сравнение двух планов того, как кубики льда приходят к их частично растаявшему состоянию прямо сейчас в 10:30 вечера.*

 План 1 (нижняя кривая) следует вашей памяти о тающем льде, но требует относительно низкой энтропии в начальной точке в 10:00 вечера. План 2 (верхняя кривая) бросает вызов вашей памяти, описывая частично растаявший лед, который вы видите в 10:30 вечера, как собравшийся из стакана воды, но стартует из состояния высокой энтропии, из высоко вероятной конфигурации разупорядочения в 10:00 вечера. Каждый этап пути по направлению к 10:30 вечера согласно плану 2 включает состояния, которые более вероятны, чем аналогичные состояния плана 1, – поскольку, как вы можете видеть на графике, они имеют более высокую энтропию, – так что план 2 статистически более предпочтителен. Для Больцмана оставался маленький шаг, чтобы осознать, что целая вселенная может быть подвергнута такому же анализу. Когда вы прямо сейчас обозреваете вселенную, то, что вы видите, отражает великое дело биологической организации, химической структуры и физического упорядочения. Хотя вселенная должна быть полностью неупорядоченной смесью, этого нет. Почему так? Откуда происходит порядок? Ну, точно как с кубиком льда, с точки зрения вероятности экстремально маловероятно, что вселенная, которую мы видим, эволюционирует из еще более упорядоченного – еще менее вероятного – состояния в далеком прошлом, которое медленно развернулось до его текущей формы. Скорее, поскольку космос имеет так много составляющих, масштабы упорядоченного против неупорядоченного интенсивно увеличиваются. Итак, что правильно в баре, с лихвой правильно и для целой вселенной: намного более вероятно – настолько более, что захватывает дух, – что целая вселенная, которую мы видим, появилась как статистически редкая флуктуация из нормальной, обыкновенной, высокоэнтропийной, полностью неупорядоченной конфигурации.

Подумаем об этом таким образом: если вы подбрасываете горсть монет еще и еще раз, рано или поздно они все лягут орлом. Если вы обладаете почти бесконечным терпением, необходимым для подбрасывания снова и снова перепутанных страниц *Войны и мира* в воздух, рано или поздно они лягут в точном числовом порядке. Если вы ждете с вашей открытой бутылкой колы, рано или поздно хаотические столкновения молекул углекислого газа заставят их залезть назад в бутылку. И, для удовольствия Больцмана, если вселенная ожидает достаточно долго – вообще, близко к бесконечности, – ее обычное, высокоэнтропийное, высоковероятное, полностью разупорядоченное состояние будет через ее собственные столкновения, соударения и хаотические течения частиц и радиации рано или поздно просто собираться в конфигурацию, которую мы наблюдаем прямо сейчас. Наши тела и мозги должны были появиться полностью сформированными из хаоса – с запасом памяти, знаний и умений – даже если прошлое, которое все это отражает, никогда в действительности не наступало. Все, что мы знаем, все, что мы ценим, будет итогом ничего более, как редкой, но всегда-так-часто-ожидаемой статистической флуктуации, на мгновение возмутившей почти бесконечный беспорядок. Это схематически показано на Рис. 6.4.



***Рис 6.4****Схематический график полной энтропии вселенной от времени.*

График показывает вселенную, проводящую большую часть своего времени в состоянии полного разупорядочения – состоянии высокой энтропии, – и еще так редко ощущаемые флуктуации до состояний с различной степенью порядка, различных состояний с низкой энтропией. Чем больше энтропийный провал, тем менее вероятна флуктуация. Существенные провалы в энтропии, вроде той упорядоченности, которую мы видим в сегодняшней вселенной, экстремально маловероятны и будут случаться крайне редко.

Делая шаг назад

Когда я впервые столкнулся с этой идеей много лет назад, это был небольшой шок. Вплоть до этого момента я думал, что я довольно хорошо понимаю концепцию энтропии, но дело в том, что, следуя подходам учебников, которые я изучал, я всегда рассматривал следствия энтропии только для будущего. А, как мы только что видели, в то время как энтропия, примененная в направлении будущего, подкрепляет нашу интуицию и ощущения, энтропия, примененная в направлении прошлого, совершенно точно противоречит им. Это не было уж настолько плохо, как если бы вы внезапно узнали, что вас предал старый друг, но для меня это было весьма похоже.

Тем не менее, иногда хорошо не проводить судебное разбирательство слишком быстро, и очевидная неспособность энтропии соответствовать ожиданиям представляет как раз тот самый случай. Как вы, вероятно, думаете, идея, что все, с чем мы хорошо знакомы, внезапно возникает в существовании, настолько же соблазнительна, насколько и тяжело принять ее на веру. И это не "только" потому, что это объяснение вселенной оспоривает достоверность всего, что мы считаем реальным и важным. Оно также оставляет без ответа критические вопросы. Например, чем более упорядоченной вселенная является сегодня – чем больше впадина на Рис. 6.4 – тем более удивительным и невероятным является статистическое отклонение, которое требуется, чтобы привести ее к существованию. Так что, если вселенная могла бы срезать углы, делая сразу так, чтобы вещи более или менее выглядели похожими на то, что мы видим прямо сейчас, одновременно экономя на реальном количестве порядка, то вероятностные рассуждения приводили бы нас к уверенности, что она так и делает. Но когда мы исследуем вселенную, то кажется, что имеется большое количество потерянных альтернатив, поскольку имеется много вещей, которые более упорядочены, чем они должны были бы быть. Если Майкл Джексон никогда не записал бы *Триллер*, а миллионы копий этого альбома, сейчас распространенного по всему миру, все были бы частью аномальной флуктуации в направлении более низкой энтропии, отклонение было бы намного менее экстремальным, если бы были сформированы только миллион, или полмиллиона или только несколько альбомов. Если эволюция никогда не происходила и мы, люди, возникли здесь через аномальный прыжок в направлении более низкой энтропии, отклонение было бы намного менее экстремальным, если бы не существовало такой последовательной и эволюционно упорядоченной серии исторических свидетельств. Если Большой взрыв никогда не происходил и более чем 100 миллиардов галактик, которых мы видим сегодня, возникли как аномальный прыжок в сторону более низкой энтропии, отклонение было бы менее экстремальным, если бы было 50 миллиардов, или 5 000, или только несколько или только одна галактика. Итак, если идея, что наша вселенная является статистической флуктуацией – счастливой случайностью, – имеет хотя бы некоторую обоснованность, необходимо обратиться к вопросу, как и почему вселенная зашла так далеко и достигла состояния такой низкой энтропии.

Даже еще более остро, если вы в самом деле не можете доверять памяти и записям, тогда вы также не можете доверять и законам физики. Их применимость основывается на многочисленных экспериментах, чьи положительные результаты проверяются только теми же самыми памятью и записями. Так что все рассуждения, основанные на симметрии принятых законов физики относительно обращения времени должны быть полностью поставлены под вопрос, при этом подрывая наше понимание энтропии и оснований настоящей дискуссии в целом. Принимая заключение, что вселенная, которую мы знаем, есть редкая, но всеми-так-часто-ожидаемая статистическая флуктуация из конфигурации полного беспорядка, мы быстро попадем в затруднительное положение, в котором мы теряем всякое понимание, включая эту самую цепочку рассуждений, которая, в первую очередь, и привела нас к рассмотрению такого эксцентричного объяснения.\*

Итак, прекращая недоверие и усердно следуя законам физики и математики энтропии – концепциям, которые в совокупности говорят нам, что подавляюще более вероятно беспорядок будет возрастать как в будущее, так и в прошлое от любого заданного момента, – мы по шею погружаемся в зыбучий песок. И хотя это не может казаться приятным, по двум причинам это очень хорошая вещь. Во-первых, это показывает точно, почему недоверие к памяти и записям – нечто, над чем мы интуитивно насмехаемся, – не имеет смысла. Во-вторых, достигнув точки, где все наши аналитические построения оказались на грани коллапса, мы убедительно осознали, что мы должны были оставить нечто важное за пределами наших рассуждений.

Следовательно, чтобы избежать пучины объяснений, мы спросим себя: какие новые идеи или концепции помимо энтропии и симметрии законов природы относительно обращения времени нам нужны, чтобы вернуться к доверию к нашей памяти и нашим записям, – нашим ощущениям, что кубик льда при комнатной температуре тает, но не кристаллизуется, что сливки и кофе смешиваются, но не разделяются, что яйца разбиваются, но не восстанавливаются? Короче говоря, куда нас заведет, если мы пытаемся объяснить асимметричное разворачивание событий в пространстве-времени с энтропией, которая выше по направлению в наше будущее, но с энтропией, которая ниже по направлению в наше прошлое? Возможно ли это? Возможно. Но только если вещи имели весьма специфическое прошлое.[[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_14" \o )

*(\*)"Тесно связанный с этим момент заключается в том, что если мы должны убедиться, что мир, который мы видим прямо сейчас, только что образовался из полного беспорядка, то точно такие же рассуждения, – привлекаемые когда-нибудь позже, – потребуют от нас отказаться от наших текущих убеждений и, напротив, объяснить упорядоченный мир еще более ранней флуктуацией. Так что, на этом пути размышлений каждый следующим момент сводит на нет убеждения, содержащиеся в каждом предыдущем моменте, – очевидно невнятный способ объяснения космоса."*

Яйцо, курица и Большой взрыв

Чтобы увидеть, что это означает, выберем в качестве примера изначальное низкоэнтропйное полностью сформированное яйцо. Как такая низкоэнтропийная физическая система возникла? Ну, возвратив назад доверие к нашей памяти и записям, мы все знаем ответ. Что яйцо возникает из курицы. И что курица появляется из яйца, которое появляется из курицы, которая появляется из яйца, и так далее. Но, как наиболее явно было подчеркнуто английским математиком Роджером Пенроузом,[[15]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_15" \o ) эта история куриц и яиц на самом деле учит нас кое-чему глубокому и приводит к чему-то ясному.

Курица или, в этом смысле, любой живой организм есть физическая система с поразительно высокой упорядоченностью. Откуда возникла эта организация и как она поддерживается? Курица остается живой и, в особенности, остается живой достаточно долго, чтобы произвести яйца, питаясь и дыша. Пища и кислород обеспечивают ряд материалов, из которых живой организм извлекает требуемую ему энергию. Но имеется критическое свойство этой энергии, которое необходимо подчеркнуть, если вы в самом деле понимаете, что происходит. По ходу своей жизни курица, которая остается здоровой, принимает как раз примерно столько энергии в форме пищи, сколько она возвращает в окружающую среду, главным образом, в форме тепла и других отходов, генерируемых ее метаболическими процессами и ежедневной деятельностью. Если бы не было такого баланса между приходящей и уходящей энергией, курица становилась бы все более тяжелой.

Существенный момент, однако, в том, что все формы энергии не эквивалентны. Энергия, которую курица выдает наружу в окружающую среду в форме тепла в высшей степени неупорядочена – она чаще приводит к тому, что некоторые молекулы воздуха, тут и там толкущиеся вокруг, сталкиваются более интенсивно, чем в противном случае. Такая энергия содержит высокую энтропию – она распылена и перемешана с окружающей средой – и поэтому не может быть легко приспособлена для каких-либо полезных целей. Напротив, энергия, которую курица получает из ее пищи, имеет низкую энтропию и готова к использованию для важной деятельности по поддержанию жизни. Так курица, а фактически, всякая форма жизни является каналом для сбора низкоэнтропийной энергии и выдачи наружу высокоэнтропийной энергии.

Это осмысление сдвигает вопрос о том, откуда возникла низкая энтропия яйца, дальше на один шаг назад. Как получается, что источник энергии для курицы, пища, имеет столь низкую энтропию? Как мы объясним этот аномальный источник порядка? Если пища животного происхождения, мы приходим назад к исходному вопросу, как животные имеют такую низкую энтропию. Но если мы проследуем по пищевой цепочке, мы, в конечном счете, придем к животным (вроде меня), которые едят только растения. Как растения и производимые ими плоды и овощи поддерживают низкую энтропию? Через фотосинтез растения используют солнечный свет, чтобы разделить внешний углекислый газ на кислород, который возвращается назад в окружающую среду, и углерод, который растения используют для роста и цветения. Так мы можем проследить низкоэнтропийные источники энергии неживотного происхождения до Солнца.

Это передвигает вопрос объяснения низкой энтропии еще дальше на шаг назад: откуда взялось наше высокоупорядоченное Солнце? Солнце сформировалось около 5 миллиардов лет назад из первичного рассеянного облака газа, которое начало вращаться и сгущаться под воздействием взаимного гравитационного притяжения всех его составляющих частей. По мере того, как газовое облако становилось плотнее, гравитационное притяжение одной части к другой становилось сильнее, приводя облако в дальнейшем к схлопыванию в себя. И по мере того, как гравитация сильнее стискивала облако, оно разогревалось. В конечном счете, оно разогрелось достаточно, чтобы инициировались ядерные процессы, что сгенерировало достаточную уходящую вовне радиацию, чтобы помешать дальнейшему гравитационному сжатию газа. Родилась горячая, стабильная, ярко сияющая звезда.

Тогда откуда возникло рассеянное облако газа? Оно, вероятно, сформировалось из остатков старых звезд, которые достигли конца своей жизни, став сверхновыми, и исторгли свое содержимое в пространство. Откуда взялся рассеянный газ, отвечающий за появление этих ранних звезд? Мы верим, что газ сформировался как последствие Большого взрыва. Наши самые усовершенствованные теории возникновения вселенной – наши самые лучшие космологические теории – говорят нам, что в момент, когда вселенная была в возрасте пары минут, она была заполнена почти однородным горячим газом, состоящим грубо на 75 процентов из водорода, на 23 процента из гелия и из небольших количеств дейтерия и лития. Существенным моментом является то, что этот газ, заполняя вселенную, имел экстраординарно низкую энтропию. Большой взрыв дал старт вселенной в состоянии низкой энтропии, и это состояние явилось источником упорядоченности, которую мы видим в настоящее время. Иными словами, текущий порядок является космологическим реликтом. Теперь обсудим это важное объяснение немного более детально.

Энтропия и гравитация

Поскольку теория и наблюдения показывают, что в течение нескольких минут после Большого взрыва изначальный газ был однородно распределен по юной вселенной, вы можете подумать, обратившись к нашей ранней дискуссии о бутылке колы и ее молекулах углекислого газа, что изначальный газ был в высокоэнтропийном, неупорядоченном состоянии. Но это оказывается не верно. Наша ранняя дискуссия об энтропии, полностью игнорирующая гравитацию, делала здравую вещь, поскольку гравитация почти не играет роли в поведении минимальных количеств газа, выходящего из бутылки колы. И при этом предположении мы нашли, что однородно распределенный газ имеет высокую энтропию. Но когда имеет значение гравитация, история существенно отличается. Гравитация есть универсальная притягивающая сила; поэтому, если вы имеете достаточно большую массу газа, каждая область газа будет подталкиваться к каждой другой, и это заставит газ распасться на сгущения, что в некоторой степени подобно фрагментации воды на капельки на листе вощеной бумаги, вызванной поверхностным натяжением. Когда гравитация имеет значение, как это было в высокоплотной ранней вселенной, сваливание в кучу – а не однородность – является нормой; это и есть состояние, в направлении которого газ будет стремиться эволюционировать, как показано на Рис.6.5.

Даже если сгущения возникают более упорядоченными, чем исходный рассеянный газ – почти как игровая комната с игрушками, которые аккуратно разложены в сундуки и ящики, более упорядочена, чем комната, в которой игрушки однородно разбросаны по полу, – в расчете энтропии вам надо подсчитать вклады от всех источников. Для игровой комнаты уменьшение энтропии в процессе движения от дико разбросанных игрушек к игрушкам, которые все "упакованы" в сундуки и ящики, более чем компенсируется ростом энтропии от распадающегося жира и выделяемого тепла от родителей, которые потратили часы, чтобы все вычистить и привести в порядок. Аналогично, в первичном рассеянном газовом облаке вы найдете, что уменьшение энтропии при формировании упорядоченных сгущений более чем компенсируется за счет выделения тепла при сжатии газа и, в конце концов, за счет огромного количества тепла и света, высвобождающегося, когда начинают иметь место ядерные процессы.



***Рис 6.5****Для гигантских объемов газа, когда гравитация имеет значение, атомы и молекулы эволюционируют из однородной равномерно распределенной конфигурации в конфигурацию, включающую все большие и все более плотные сгущения.*

Это важный момент, который временами упускается из вида. Подавляющее стремление в направлении беспорядка не означает, что не могут формироваться организованные структуры вроде звезд и планет или организованные формы жизни вроде растений и животных. Могут. И, очевидно, формируются. Что определяет второй закон термодинамики, так это то, что при формировании порядка в целом происходит более чем компенсирующее генерирование беспорядка. Итог таблицы энтропийного баланса все еще находится в пассиве, даже если определенные составляющие становятся более упорядоченными. И из фундаментальных сил природы гравитация единственная, которая использует это свойство энтропии во всей полноте. Поскольку гравитация действует через громадные расстояния и является универсально притягивающей силой, она подстегивает формирование упорядоченных сгущений – звезд – которые испускают свет, который мы видим на чистом ночном небе, в полном согласии с итоговым балансом в пользу роста энтропии.

Чем более сжаты, плотны и массивны сгущения газа, тем больше общая энтропия. Черные дыры, наиболее экстремальная форма гравитационного сгущения и сжатия во вселенной, доводят это до предела. Гравитационное притяжение черной дыры настолько сильно, что ничто, даже свет, не может вырваться, что объясняет, почему черные дыры являются черными. Итак, в отличие от обычных звезд, черные дыры непреклонно удерживают всю энтропию, которую они произвели: ничто не может спастись от мощнейшего гравитационного захвата черной дыры.[[16]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_16" \o ) Фактически, как мы будем обсуждать в Главе 16, ничто во вселенной не содержит больше беспорядка – больше энтропии – чем черная дыра.\* Этому можно придать хороший интуитивный смысл: высокая энтропия означает, что огромное количество перестановок составляющих объекта проходят незамеченными. Поскольку мы не можем видеть внутренность черной дыры, для нас невозможно отследить любую перегруппировку ее составляющих, – какими бы ни были эти составляющие, – и отсюда черная дыра имеет максимальную энтропию. Когда гравитация доводит свою силу до предела, она становится самым эффективным генератором энтропии в известной вселенной.

*(\*)"Это значит, что черная дыра заданного размера содержит больше энтропии, чем все что угодно другое того же размера."*

Теперь мы подошли к месту, где рулетка окончательно остановилась. Исходным источником порядка, низкой энтропии должен быть сам Большой взрыв. В ее самые ранние моменты, вместо того, чтобы быть заполненной чудовищными контейнерами энтропии вроде черных дыр, как мы ожидали из вероятностного рассмотрения, по некоторым причинам рождающаяся вселенная была заполнена горячей, однородной, газовой смесью водорода и гелия. Хотя эта конфигурация имеет высокую энтропию, когда плотность настолько низка, что мы можем игнорировать гравитацию, ситуация иная, когда гравитация не может быть проигнорирована; тогда такой однородный газ имеет экстремально низкую энтропию. По сравнению с черными дырами, рассеянный почти однородный газ был в состоянии с экстраординарно низкой энтропией. С тех пор всегда, в соответствии со вторым законом термодинамики, общая энтропия вселенной постепенно становится выше и выше; общее итоговое количество беспорядка постепенно возрастает. После примерно миллиарда лет или около того гравитация заставила изначальный газ сгуститься, и сгущения в конце концов сформировали звезды, галактики и некоторые более легкие сгущения, которые стали планетами. По меньшей мере одна такая планета имеет рядом звезду, которая обеспечивает относительно низкоэнтропийный источник энергии, который позволяет низкоэнтропийным формам жизни развиваться, и среди таких форм жизни со временем возникла курица, которая отложила яйцо, которое нашло свой путь к вашему кухонному столу и, к вашему огорчению, это яйцо продолжило неотвратимую траекторию к состоянию с более высокой энтропией, скатившись со стола и разбившись об пол. Яйцо разбивается скорее, чем восстанавливается, поскольку это продолжение стремления вперед к более высокой энтропии, которое было инициировано состоянием с экстраординарно низкой энтропией, с которого началась вселенная. Потрясяющий порядок в начале – это то, с чего все стартовало, и мы с тех пор живем всегда через последовательное разворачивание в направлении более высокого беспорядка.

*В этом* ошеломляющая связь, которую мы выводили на протяжении целой главы. *Разбивающееся яйцо говорит нам нечто глубокое о Большом взрыве*. Оно говорит нам, что Большой взрыв дал начало экстраординарно упорядоченному нарождающемуся космосу.

Та же идея применима ко всем другим примерам. Причина, по которой подбрасываемые заново в воздух нескрепленные страницы *Войны и мира* приходят в состояние высшей энтропии, в том, что они исходно начинали в такой высоко упорядоченной низкоэнтропийной форме. Их начальная упорядоченная форма подготовила их к росту энтропии. И напротив, если страницы изначально были полностью вне числового порядка, подбрасывание их в воздух вряд ли внесет разницу, влияющую на энтропию. Так что еще раз возникает вопрос: как они становятся такими упорядоченными. Ну, Толстой написал их и представил в таком порядке, а печатник и переплетчик следовали его инструкциям. А высоко упорядоченные тело и ум Толстого и издателей книги, которые позволили им по очереди создать том такого высокого порядка, могут быть объяснены путем следования той же цепочке рассуждений, которую мы уже прошли для яйца, что еще раз приведет нас назад к Большому взрыву. Как насчет частично растаявших кубиков льда, которые вы видели в 10:30 вечера? Теперь, раз уж мы доверяем памяти и записям, вы вспомните, что еще перед 10:00 вечера бармен кинул сформированные кубики льда в ваш стакан. Он взял кубики льда из морозильника, который был разработан умелым инженером и изготовлен талантливым механиком, которые способны создавать нечто такого высокого порядка потому, что они сами являются высоко организованными формами жизни. И опять мы последовательно приводим их высокую организацию к высоко упорядоченному началу вселенной.

Необходимое добавление

Откровение, к которому мы пришли, заключается в том, что мы можем доверять нашей памяти о прошлом с более низкой, а не более высокой энтропией, только если Большой взрыв – процесс, событие или явление, которое привело вселенную к существованию, – дал старт вселенной в экстраординарно специфическом, высоко упорядоченном состоянии с низкой энтропией. Без этого важного добавления наши ранние рассуждения, что энтропия должна расти как в будущее, так и в прошлое от любого заданного момента, приводят нас к заключению, что весь порядок, который мы видим, возник из случайной флуктуации из обыкновенного неупорядоченного состояния высокой энтропии, к заключению, которое, как мы видели, подрывает сами рассуждения, на которых оно основано. Но включая в наш анализ маловероятную низкоэнтропийную начальную точку вселенной, мы теперь видим, что корректное заключение таково, что энтропия растет по направлению в будущее, поскольку вероятностные рассуждения полностью работают и не имеют противоречий в данном направлении; но энтропия не растет в прошлое, поскольку это использует возможность, входящую в конфликт с нашим новым условием, что вселенная начиналась в состоянии с низкой, а не высокой, энтропией.[[17]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_17" \o ) Так что условия рождения вселенной оказываются решающими для направления стрелы времени. *Будущее в самом деле есть направление роста энтропии. Стрела времени – факт, что вещи начинаются подобно этому и заканчиваются подобно тому, но никогда не начинаются подобно тому и не заканчиваются подобно этому, – начинает свой полет в высоко упорядоченном, низкоэнтропийном состоянии вселенной при ее зарождении*.[[18]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_18" \o )

Остающаяся загадка

То, что ранняя вселенная задает направление стреле времени, является чудесным и вызывающим удовлетворение заключением, но мы не все сделали. Остается огромная загадка. Как так получилось, что вселенная началась в такой высокоупорядоченной конфигурации, организовав вещи так, чтобы на протяжении миллиардов лет следовать порядку, когда все может медленно эволюционировать через равномерно менее упорядоченные конфигурации по направлению ко все более и более высокой энтропии? Не надо упускать из вида, насколько это поразительно. Как мы отмечали, с точки зрения вероятности намного более естественным было бы то, что частично растаявшие кубики льда, которые вы видели в 10:30 вечера, стали такими в результате статистической флуктуации, возникшей в стакане жидкой воды, чем что они начались с еще менее вероятного состояния полностью сформированных кубиков льда. А что верно для кубиков льда, то в несметное количество раз более верно для целой вселенной. Говоря на языке вероятности, в захватывающей дух степени более вероятно, что все, что мы сейчас видим во вселенной возникло из редкого, но всеми-так-часто-ожидаемого статистического отклонения от полного беспорядка, а не медленно эволюционировало из еще более маловероятной, неправдоподобно более упорядоченной, поразительно низкоэнтропийной стартовой точки, которую требует Большой взрыв.[[19]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_19" \o )

И еще, когда мы разбирались со случайностями и представляли, что все скачком стало существовать за счет статистической флуктуации, мы оказались в затруднительном положении: что, грубо говоря, тогда означают сами законы физики? Так мы склонились к сопротивлению случаю и пришли к низкоэнтропийному Большому взрыву как к объяснению стрелы времени. Теперь загадка в том, чтобы объяснить, как началась вселенная в такой маловероятной, высоко упорядоченной конфигурации. *Это* и есть вопрос, к которому привела стрела времени. Все это сводится к космологии.[[20]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_6_20" \o )

Мы будем заниматься детальным обсуждением космологии в Главах с 8 по 11, но сначала отметим, что наше обсуждение времени страдает серьезным дефектом: все, что мы говорили, основывалось исключительно на классической физике. Теперь рассмотрим, как квантовая механика влияет на понимание времени и наши поиски его стрелы.

**7 Время и кванты**

***ПРОНИКНОВЕНИЕ В ПРИРОДУ ВРЕМЕНИ ИЗ КВАНТОВОЙ ОБЛАСТИ***

**К**огда мы думаем о чем-то, подобном времени, о чем-то, внутри чего мы находимся, о чем-то, что полностью включено в наше повседневное существование, о чем-то настолько всепроникающем, то невозможно отключиться – даже на мгновение – от общепринятого языка, наши рассуждения формируются под определяющим влиянием наших ощущений. Эти повседневные ощущения являются классическими; с высокой степенью точности они соответствуют законам физики, установленными Ньютоном более чем три столетия назад. Но из всех открытий в физике за последние сто лет квантовая механика идет дальше и глубже самых потрясающих, поскольку она подрывает всю концептуальную схему классической физики.

Так что стоит расширить наши классические ощущения путем рассмотрения некоторых экспериментов, которые обнаруживают удивительные особенности того, как квантовые процессы разворачиваются во времени. В этом широком смысле мы продолжим далее обсуждение предыдущей главы и поинтересуемся, есть ли стрела времени в квантовомеханическом описании природы. Мы получим ответ, но такой, который все еще дискуссионен даже среди физиков. И он еще раз приведет нас назад, к истокам вселенной.

Прошлое в соответствии с квантовым подходом

Вероятность играла центральную роль в последней главе, но я пару раз акцентировал внимание на том, что она возникает только вследствие ее практического удобства и полезности информации, которую она предоставляет. Отслеживание точного движения 1024 молекул Н2О в стакане воды находится далеко за пределами наших вычислительных возможностей, и, даже если бы это было возможно, что мы стали бы делать с итоговой горой данных? Определить из списка, содержащего 1024 положений и скоростей, были ли кубики льда в стакане, будет геркулесовой задачей. Так что вместо этого мы обращаемся к вероятностным рассуждениям, которые вычислительно доступны и, более того, имеют дело с макроскопическими свойствами – порядок против беспорядка; например, лед против воды, – которыми мы обычно и интересуемся. Но в памяти держим, что при этом не подразумевается, что вероятность фундаментально вшита в ткань классической физики. В принципе, если бы мы точно знали, как вещи ведут себя в настоящий момент, – знали бы положения и скорости каждой отдельной частицы, составляющей вселенную, – классическая физика говорит, что мы могли бы использовать эту информацию для предсказания, как вещи будут себя вести в любой заданный момент в будущем или как они себя вели в любой заданный момент в прошлом. Будете вы на самом деле следовать за их развитием момент за моментом или нет, в соответствии с классической физикой вы можете говорить о прошлом и будущем, в принципе, с уверенностью, которая определяется деталями и точностью ваших наблюдений настоящего момента.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_1" \o )

Вероятность в настоящей главе также будет играть центральную роль. Но, поскольку вероятность является неизбежным элементом квантовой механики, это фундаментально изменяет наше представление о прошлом и будущем. Мы уже видели, что квантовая неопределенность не допускает одновременного знания точных положений и точных скоростей. Соответственно, мы также видели, что квантовая физика предсказывает только вероятности, что то или иное будущее будет реализовано. Мы уверены в этих вероятностях, нет сомнений, но, поскольку это все же вероятности, мы понимаем, что имеется неизбежный элемент случая, когда приходится предсказывать будущее.

Когда приходится описывать прошлое, также имеется критическое отличие между классической и квантовой физиками. В классической физике в связи с ее равноправным рассмотрением всех моментов времени события, приводящие к чему-нибудь, что мы наблюдаем, описываются с использованием в точности того же языка, с применением в точности тех же характерных свойств, которые мы используем для описания самого наблюдения. Если мы видим огненный метеор в ночном небе, мы говорим о его положении и его скорости; если мы реконструируем, как он там возник, мы также говорим об однозначной последовательности положений и скоростей, когда метеор несся через пространство к Земле. Хотя в квантовой физике, раз уж мы нечто наблюдаем, мы вводим особую область, в которой мы знаем что-нибудь со 100 процентной определенностью (игнорируя проблемы, связанные с точностью нашего оборудования, и подобные им). Но прошлое – под которым мы специально понимаем "ненаблюдаемое" прошлое, время перед тем, как мы, или кто-нибудь, или что-нибудь проводит данное наблюдение, – остается в обычной области квантовой неопределенности, в области вероятностей. Даже если мы измеряем положение электрона прямо здесь прямо сейчас, то моментом раньше все, что он имел, это вероятности быть здесь, или там или вообще вон там.

И, как мы видели, это не значит, что электрон (или, в том же смысле, любая частица) на самом деле находился только в одном из этих возможных положений, но мы просто не знаем, в каком.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_2" \o ) Скорее, есть основания полагать, что электрон был во всех положениях, поскольку каждая из вероятностей – каждая из возможных историй – вносит вклад в то, что мы в настоящий момент наблюдаем. Вспомним, мы, очевидно, видели это в эксперименте, описанном в Главе 4, в котором электроны принуждались пролетать через две щели. Классическая физика, которая полагается на всеми поддерживаемое убеждение, что события имеют однозначные обычные истории, будет утверждать, что каждый электрон, попавший на экран детектора, прошел либо через левую щель, либо через правую щель. Но этот вид прошлого собьет нас с пути: он предсказывает результаты, показанные на Рис. 4.3а, которые не согласуются с тем, что происходит на самом деле, как показано на Рис. 4.3b. Наблюдаемый интерференционный узор может быть объяснен только путем включения перекрывания между чем-то, что проходит через обе щели.

Квантовая физика обеспечивает именно такое объяснение, но при этом радикально меняет наши взгляды на прошлое – наши описания того, как отдельная вещь, которую мы наблюдаем, стала такой. В соответствии с квантовой механикой вероятностная волна каждого электрона проходит через обе щели, и, поскольку части волны, выходящие из каждой щели, смешиваются, итоговое распределение вероятности проявляется в интерференционной картине, и следовательно, положения падения электрона на экран распределяются так же.

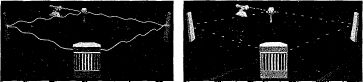
По сравнению с повседневным опытом, это описание прошлого электрона в терминах пересекающихся волн вероятности совершенно необычно. Но, отбросив на ветер осторожность, вы можете предложить рассмотреть это квантовомеханическое описание на один шаг дальше, что приводит к еще более причудливо звучащей возможности. Возможно, что каждый индивидуальный электрон сам в действительности путешествует через обе щели на своем пути к экрану, и итоговые данные возникают из интерференции между этими двумя классами историй. Есть соблазн думать о волнах, выходящих из двух щелей, как о представляющих две возможные истории для индивидуального электрона, – проходящего через левую щель или проходящего через правую щель, – и, поскольку обе волны вносят вклад в то, что мы наблюдаем на экране, квантовая механика, возможно, говорит нам, что обе потенциальные истории электрона также вносят вклад.

Удивительно, эта странная и чудесная идея – дитя разума нобелевского лауреата Ричарда Фейнмана, одного из самых оригинальных физиков двадцатого века, – обеспечивает совершенно жизнеспособный путь рассуждений о квантовой механике. Согласно Фейнману, если имеются альтернативные пути, по которым может быть достигнут заданный результат, – например, электрон попадает в точку на экране детектора, пролетев через левую щель, или попадает в ту же точку, но пролетев через правую щель, – тогда, в некотором смысле, все альтернативные истории происходят и происходят одновременно. Фейнман показал, что каждая такая история будет давать вклад в вероятность того, что их общий результат будет реализован, и, если эти вклады аккуратно сложить друг с другом, результат будет совпадать с полной вероятностью, предсказываемой квантовой механикой.

Фейнман назвал этот подход к квантовой механике *суммированием по историям* (или *суммированием по путям*); он показал, что вероятностная волна объединяет все возможные варианты прошлого, которые могли предшествовать данному наблюдению, и хорошо проиллюстрировал, что, чтобы преуспеть там, где классическая физика пасует, квантовая механика рассматривает значительно более широкие рамки истории.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_3" \o )

В страну Оз

Имеется вариация эксперимента с двумя щелями, в которой интерференция между альтернативными историями делается еще более явной, поскольку два пути к экрану детектора разделены более сильно. Немного проще описать эксперимент, используя фотоны вместо электронов, так что мы начинаем с фотонного источника – лазера – и стреляем им в направлении так называемого *лучевого разветвителя*. Этот прибор сделан из наполовину посеребренного зеркала, похожего на те, что используются для наблюдения (подглядывания), которое отражает половину падающего на него света, позволяя другой половине проходить насквозь. Начальный одиночный луч света, таким образом, разветвляется на два, левый луч и правый луч, аналогично тому, что происходит с лучом света, который сталкивается с двумя щелями в двухщелевом опыте. Используя подходящим образом расположенные полностью отражающие зеркала, как показано на Рис. 7.1, два луча возвращаются назад друг к другу и далее вниз к местоположению детектора. Рассматривая свет как волну, как в описании Максвелла, мы ожидаем – и, несомненно, находим – интерференционную картину на экране. Длина перемещения для всех путей, за исключением центральной точки на экране, немного отличается для левого и правого пути, так что пока левый луч может достичь гребня в заданной точке экрана детектора, правый луч может достичь гребня, впадины или некоторого промежуточного состояния. Детектор записывает объединенную интенсивность двух волн, и отсюда мы получаем характерную интерференционную картину.



(а) (b)

***Рис 7.1****(а) В эксперименте с лучевым разветвителем лазерный свет разделяется на два луча, которые путешествуют двумя отдельными путями к экрану детектора; (b) Интенсивность излучения лазера может быть снижена, так что он выстреливает индивидуальные фотоны; фотоны воздействуют на местоположения на экране, со временем выстраивая интерференционную картину.*

Отличие классики и квантов становится очевидным, если мы радикально понизим интенсивность лазера, так что он будет испускать отдельные фотоны, скажем, один фотон в несколько секунд. Когда отдельный фотон попадает в лучевой разветвитель, классическая интуиция говорит, что он либо пройдет насквозь, либо будет отражен. Классические рассуждения не позволяют даже намека на любой вид интерференции, поскольку тут нечему интерферировать: все, что мы имеем, это отдельные, индивидуальные, особые фотоны, проходящие от источника к детектору, один за одним, некоторые по левому пути, некоторые по правому. Но когда проводится экспримент, индивидуальные фотоны со временем рисуют почти как на Рис. 4.4, давая интерференционную картину, как на Рис. 7.1b. В соответствии с квантовой физикой причина в том, что каждый зарегистрированный детектором фотон может дойти до детектора или двигаясь по левому пути, или двигаясь по правому пути. Так что мы обязаны объединить эти две возможные истории при определении вероятности, что фотон попадет на экран в той или в другой выделенной точке. Когда левая и правая вероятностные волны для каждого индивидуального фотона сливаются таким образом, они дают волнистую вероятностную картину волновой интерференции. Так что, в отличие от Дороти (Элли), которая была сбита с толку, когда Пугало (Страшила) указал сразу налево и направо, показывая ей направление в страну Оз, данные могут быть объяснены полностью через представление, что каждый фотон двигается в направлении детектора сразу и левым и правым путями.

Предварительный выбор

Хотя мы описали смешивание возможных историй в ситуации только пары отдельных примеров, этот способ мышления о квантовой механике является общим. В то время как классическая физика описывает настоящее как имеющее единственное прошлое, вероятностные волны квантовой механики увеличивают арену истории: в формулировке Фейнмана наблюдаемое настоящее представляет смесь – особый вид усреднения – всех возможных прошлых, совместимых с тем, что мы сейчас наблюдаем.

В случае экспериментов с двумя щелями и с лучевым разветвителем для электрона или фотона имеются два пути, чтобы дойти от источника до экрана детектора, – идти налево или идти направо, – и только при комбинировании возможных историй мы приходим к объяснению того, что мы наблюдаем. Если барьер имеет три щели, мы должны принять во внимание три вида историй; с 300 щелями нам необходимо включить вклады целого множества результирующих возможных историй. Если мы представим, доведя это до предела, что прорезано гигантское количество щелей, – так много, что, фактически, барьер эффективно исчезает, – квантовая физика говорит, что каждый электрон тогда будет двигаться по любой возможной траектории на своем пути до выделенной точки на экране, и только объединяя вероятности, связанные с каждой такой историей, мы можем объяснить итоговые данные. Это может звучать странно. (Это и есть странно). Но такое причудливое рассмотрение прошедших времен объясняет данные на Рис. 4.4, на Рис. 7.1b и любой другой эксперимент, проводимый с микромиром.

Вы можете поинтересоваться, насколько буквально вы должны принимать описание через сумму по историям. Электрон, который попадает на экран детектора, действительно делает это путем прохождения вдоль всех возможных путей, или рецепт Фейнмана есть просто хитрая математическая выдумка, которая дает правильный ответ? Этот вопрос относится к ключевым вопросам для оценки правильной природы квантовой реальности, так что я хотел бы дать вам определенный ответ. Но я не могу. Физики часто находят эту картину предельно полезной для представления огромного скопления объединяемых историй; я использую эту картину в моих собственных исследованиях настолько часто, что она определенно ощущается реальной. Но это не то же самое, что сказать, что она реальна. Суть в том, что квантовые вычисления недвусмысленно называют нам вероятность, что электрон упадет в ту или иную точку экрана, и эти предсказания согласуются с данными опыта, пятнами на экране. Раз уж проверка теории и ee предсказательная полезность взаимосвязаны, история, о которой мы говорим, как именно электрон достигает данной точки на экране, мало уместна.

Но конечно, вы продолжаете настаивать, мы можем решить проблему, что же на самом деле происходит, путем изменения экспериментальных условий так, что мы можем теперь наблюдать также и предполагаемую размытую смесь возможных прошлых, вливающихся в наблюдаемое настоящее. Это хорошее предложение, но уже известно, что тут имеется препятствие. В Главе 4 мы изучили, что вероятностные волны непосредственно не наблюдаемы; а поскольку объединяющиеся истории Фейнмана есть ничто иное, как особый способ размышлений о вероятностных волнах, они тоже должны ускользать от прямых наблюдений. И они ускользают. Наблюдения не могут зацепить отдельные индивидуальные истории; скорее наблюдения отражают *средние* по всем возможным историям. Так что, если вы измените условия опыта, чтобы наблюдать электроны в полете, вы увидите, что каждый электрон проходит через ваш дополнительный детектор в том или ином месте; вы никогда не увидите размытые множественные истории. Когда вы используете квантовую механику, чтобы объяснить, *почему* вы видели электрон в том или ином месте, ответ будет включать усреднение по всем возможным историям, которые могут привести к этому промежуточному наблюдению. Но само наблюдение имеет доступ долько к историям, которые уже соединены. Наблюдая за электроном в полете, вы просто сдвигаете назад обозначение того, что вы считаете историей. Квантовая механика жестко рациональна: она объясняет, что вы видите, но не позволяет вам видеть объяснение.

Вы можете далее спросить: почему тогда классическая физика, – физика здравого смысла, – которая описывает движение в терминах единственных историй и траекторий, в целом применима ко вселенной? Почему она так хорошо работает в объяснениях и предсказаниях движения чего угодно, от бейсбольного мяча до планет и комет? Как тогда приходит неочевидность в каждодневной жизни странного пути, по которому прошлое, по-видимому, разворачивается в настоящее? Причина, коротко обсужденная в Главе 4 и которую мы вскоре подробно изучим с высокой точностью, в том, что бейсбольные мячи, планеты и кометы относительно велики, как минимум, по сравнению с частицами вроде электрона. А в квантовой механике чем больше что-то есть, тем более несимметричным становится усреднение: все возможные траектории дают вклад в движение бейсбольного мяча в полете, но обычный путь – один единственный путь, предсказываемый законами Ньютона, – дает вклад *намного* больше, чем все остальные пути вместе. Для больших объектов оказывается, что классические пути дают в гигантской степени доминирующий вклад в усредненный процесс, так что они и являются единственными, к которым мы привыкли. Но когда объекты малы, вроде электронов, кварков и фотонов, многие различные истории дают вклад ориентировочно одного порядка, и отсюда все они играют важную роль в усредненном процессе.

Наконец, вы можете спросить: Что такого особенного в акте наблюдения или измерения, что он может вынудить все возможные истории проявиться, соединиться вместе и дать отдельный результат? Как наш акт наблюдения как-то говорит частице, что пора подвести итог историям, усреднить их и зафиксировать определенный результат? Почему мы, люди, и сделанное нами обрудование имеем такую особую силу? Особая ли она? Или возможно, что акт человеческого наблюдения приспосабливается к более широким рамкам влияния внешней среды, что показывает, выражаясь квантовомеханическим языком, что мы в конце концов не такие уж особые? Мы будем обсуждать эти приводящие в тупик и спорные проблемы во второй половине этой главы, поскольку они не только являются стержнем для понимания природы квантовой реальности, но они обеспечивают важный каркас для размышлений о квантовой механике и стреле времени.

Вычисление квантовомеханических средних требует существенной технической подготовки. И полное понимание того, как, когда и где средние реализуются, требует концепций, над формулировками которых физики все еще тяжело работают. Но один ключевой урок может быть просто установлен: квантовая механика представляет собой первичную арену предварительного выбора: каждый возможный "выбор" чего-либо, который может быть сделан при прохождении объекта из этого места в то, включается в квантовомеханическую вероятность, связанную с тем или иным возможным итоговым результатом.

Классическая и квантовая физики трактуют прошлое весьма различным образом.

Отсеченная история

Это полностью противоречит нашему классическому воспитанию, представить один неделимый объект – один электрон или один фотон, – одновременно двигающийся вдоль более чем одного пути. Даже те из нас, кто имеет величайший самоконтроль, должны были долгое время сопротивляться соблазну бросить украдкой такой взгляд: когда электрон или фотон проходят через экран с двойной щелью или лучевой разветвитель, почему не бросить быстрый взгляд, чтобы увидеть, по какой траектории он *на самом деле* следует на своем пути к детектору? Почему не установить маленькие детекторы перед каждой щелью в эксперименте с двумя щелями, чтобы сказать вам, пролетает электрон через одно отверстие, через другое или через оба (в то же время оставляя электрону возможность проследовать в направлении главного детектора)? В эксперименте с лучевым разветвителем почему не поставить на каждом пути, ведущем от разветвителя, маленький детектор, который скажет, если фотон выбрал левый путь, правый путь или оба пути (опять таки, одновременно позволяя фотону сохранить движение к детектору)?

Ответ такой, что вы *можете* ввести эти дополнительные детекторы, но если вы это сделаете, вы найдете две вещи. Первое, каждый электрон и каждый фотон всегда будут найдены проходящими через один и только один из детекторов; так что вы можете определить, по какому пути каждый электрон или фотон следует, и вы найдете, что он всегда двигается по одному или другому пути и никогда по обоим. Второе, вы также найдете, что итоговые результаты, записанные главным детектором, изменились. Вместо того, чтобы получить интерференционную картину, как на Рис. 4.3b и 7.1b, вы получите результаты, ожидавшиеся из классической физики, как на Рис. 4.3а.

Путем введения новых элементов – новых детекторов – вы непредумышленно изменили эксперименты. И изменения таковы, что парадокс, который вы только что обнаружили, – что вы теперь знаете, какой путь выбрала каждая частица, так как тут может быть какая-либо интерференция с другим путем, который частица демонстративно не выбрала? – предотвращен. Причина следует немедленно из результатов последней секции. Ваше новое наблюдение выделило те истории, которые могли предшествовать всему, что бы ваше новое наблюдение ни обнаружило. И поскольку это наблюдение определило, какой путь выбрал фотон, *мы рассматриваем только те истории, которые выходят на этот путь, что приводит к уничтожению возможности интерференции*.

Нильс Бор предпочел обобщить такие вещи, используя свой *принцип дополнительности*. Каждый электрон, каждый фотон, все, что угодно, фактически, имеет как частицеподобные, так и волноподобные стороны. Это дополняющие друг друга свойства. Размышление только в рамках обычной частицы, – в которых частица движется вдоль одной единственной траектории, – неполно, поскольку оно отбрасывает волноподобные свойства, демонстрирующиеся интерференционными картинами.\* Размышление только в волновых рамках неполно, поскольку оно отбрасывает частицеподобные стороны, демонстрирующиеся измерениями, в которых обнаруживаются локализованные частицы, что может быть, например, записано в виде отдельной точки на экране. (См. Рис. 4.4). Полная картина требует, чтобы обе взаимодополняющие стороны были приняты во внимание. В любой данной ситуации вы можете вынудить одно свойство быть более заметным в силу вашего выбора взаимодействия. Если вы позволяете электронам проходить от источника к экрану ненаблюдаемыми, могут проявится их волноподобные качества, давая интерференцию. Но если вы наблюдаете электрон по дороге, вы знаете, какой путь он выбрал, тогда вы будете не в состоянии объяснить интерференцию. Реальность приходит на помощь. Ваше наблюдение удаляет ветви квантовой истории. Оно заставляет электрон вести себя подобно частице; поскольку частицы двигаются тем или иным путем, не формируется интерференционная картина, так что нечего и объяснять.

*(\*)"Даже если может показаться, что подход сумм по историям Фейнмана делает акцент на частицеподобной стороне, это просто специальная интерпретация вероятностной волны (поскольку она включает много историй отдельных частиц, каждая делает свой собственный вероятностный вклад), так что она подключает волноподобную сторону как дополняющую. Когда мы говорим о чем-то, ведущем себя как частица, мы всегда имеем в виду обычную частицу, которая движется вдоль одной и только одной траектории."*

Природа таинственная вещь. Она живет на краю. Но она старательно лавирует и уклоняется от фатальных ударов логических парадоксов.

Случайность истории

Эти эксперименты поразительны. Они обеспечивают простое, но мощное доказательство того, что наш мир управляется квантовыми законами, найденными физиками в двадцатом веке, а не классическими законами, найденными Ньютоном, Максвеллом и Эйнштейном, – законами, которые мы сегодня определяем как эффективные и успешные приближения для описания событий на достаточно больших масштабах. Мы уже видели, что квантовые законы бросают вызов обычным представлениям о том, что происходило в прошлом, – о ненаблюдаемых событиях, которые соответствуют тому, что мы видим в настоящее время. Некоторые простые вариации упомянутых экспериментов выводят этот вызов нашему интуитивному представлению о том, как вещи разворачиваются во времени, на еще больший, еще более удивительный уровень. Первая вариация называется экспериментом *с отложенным выбором* и была предложена в 1980 выдающимся физиком Джоном Уилером. Эксперимент неожиданно сталкивается со зловеще странно звучащим вопросом: Зависит ли прошлое от будущего? Отметим, что это не то же самое, как спросить, не можем ли мы вернуться назад и изменить прошлое (что мы обсудим в Главе 15). Напротив. Эксперимент Уилера, который был проведен и проанализирован в большом количестве деталей, вскрывает провокационную игру, взаимосвязь между событиями, которые мы представляем имевшими место в прошлом, даже в удаленном прошлом, и событиями, которые мы рассматриваем как происходящие прямо сейчас.

Чтобы почувствовать физику, представьте, что вы коллекционер произведений искусства и мистер Смитерс, руководитель нового Общества искусств и распространения красоты Спрингфилда, пришел взглянуть на различные произведения, которые вы выставили на продажу. Вы знаете, однако, что на самом деле его интерес заключается в *Дородном Монти*, картине в вашей коллекции, которую вы никогда не чувствовали вполне стоящей, но которая является одной из картин, что были завещаны вам вашим любимым дядюшкой Монти Бернсом, так что решение продать ее требует, в некоторой степени, эмоциональных усилий. После прихода мистера Смитерса, вы разговариваете о вашей коллекции, прошедших аукционах, текущем шоу в Метрополитен; на удивление, вы узнаете, что годы тому назад Смитерс был главным помощником вашего дядюшки. К концу разговора вы решаете, что вы хотите расстаться с*Дородным Монти*: имеется так много произведений, которые вы хотели бы иметь, и вы должны применить некоторое самоограничение, иначе ваша коллекция станет бесформенной. В мире коллекционирования произведений искусства вы всегда считали, что временами лучшее враг хорошего.

Когда вы размышляете об этом решении рестроспективно, кажется, что вы на самом деле уже решились на продажу до прихода мистера Смитерса. Хотя вы всегда имели определенную привязанность к *Дородному Монти*, вы долго осторожничали в собирании разрастающейся коллекции, а эротически-ядерный реализм позднего двадцатого века является устрашающей областью для любого даже самого закаленного коллекционера. Даже если вы помните, что перед приходом вашего посетителя вы думали, что вы не знаете, что делать, с вашей текущей точки зрения это кажется, как если бы вы на самом деле знали. Это не совсем то, что будущие события повлияли на прошлое, но ваша совместная встреча с мистером Смитерсом и ваше последующее выражение вашего желания продать картину иллюстрируют, освещают прошлое таким образом, который вызывает отдельные определенные мысли, кажущиеся со временем бесспорными. Это как если бы встреча и ваше выражение желания помогли вам согласиться с решением, которое уже было принято и только ожидало выведения на свет божий. Будущее помогло вам рассказать более полную историю о том, что произошло в прошлом.

Конечно, в этом примере будущие события влияют только на ваше восприятие или интерпретацию прошлого, так что события не являются ни головоломными, ни удивительными. Но эксперимент с отложенным выбором Уилера перемещает эту психологическую игру между будущим и прошлым в квантовую реальность, где указанная игра становится как определенной, так и поразительной. Мы начнем с эксперимента на Рис. 7.1а, модифицированного путем настройки лазера так, что он испускает отдельный фотон за один раз, как на Рис. 7.1b, а также путем присоединения нового детектора фотонов сразу за лучевым разветвителем. Если новый детектор выключен (см. Рис. 7.2b), мы возвращаемся к исходным настройкам эксперимента и фотоны создают интерференционную картину на фотографическом экране. Но если новый детектор включен (Рис. 7.2а), он указывает нам, каким путем движется каждый фотон: если он обнаруживает фотон, значит фотон выбрал этот путь, если он не обнаруживает фотон, значит фотон выбрал другой путь. Такая информация о "выборе пути", как уже говорилось, вынуждает фотон вести себя как частица, так что волноподобная интерференционная картина больше не создается.



(а) (b)

***Рис 7.2****(а) Включая детектор "выбора пути", мы портим интерференционную картину; (b) Когда новый детектор выключен, мы возвращаемся к ситуации Рис. 7.1 и интерференционная картина снова выстраивается.*

Теперь, следуя Уилеру, изменим ситуацию, переместив новый детектор фотонов далеко от разветвителя вдоль одного из двух путей. В принципе, путь может быть настолько длинным, насколько вы хотите, так что новый детектор может быть существенно удален от лучевого разветвителя. Еще раз, если этот новый детектор фотонов выключен, мы находимся в обычной ситуации и фотоны заполняют интерференционную картину на экране. Если он включен, он обеспечивает информацию "выбора пути" и поэтому предотвращает существование интерференционной картины.

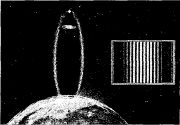
Новые странности возникают из того факта, что измерение "выбора пути" может быть произведено намного позже того, как фотон "решил" в лучевом разветвителе, будет ли он вести себя как волна и двигаться по обоим путям или он будет вести себя как частица и двигаться только по одному пути. Когда фотон проходит через лучевой разветвитель, он не может "знать", включен новый детектор или нет – в действительности эксперимент может быть так построен, что выключатель детектора может быть установлен в то или иное положение после того, как фотон прошел через разветвитель. Чтобы быть готовой к возможности, что детектор выключен, квантовая волна фотона, скорее всего, разделилась и движется по обоим путям, так что амальгама на втором рисунке может воспроизвести наблюдаемую интерференционную картину. Но если новый детектор был включен – или если он включается после того, как фотон полностью покинул разветвитель, – то кажется, что имеет место кризис идентичности фотона: пройдя через разветвитель, он уже зафиксировал свою волновую природу, двигаясь по обоим путям, но теперь, временами после осуществления этого выбора, он "осознает", что ему надо лицом к лицу подойти к необходимости стать частицей, которая путешествует по одному и только по одному пути.

Однако, каким-то образом фотон всегда делает это правильно. Когда бы детектор ни был включен – еще раз, даже если решение включить его отложено надолго после того, как данный фотон прошел через лучевой разветвитель, – фотон ведет себя полностью как частица. Он находится на одном и только на одном маршруте к экрану (если вы вставили детекторы фотонов на оба маршрута, каждый эмитированный лазером фотон будет обнаружен одним и только одним детектором, но никогда обоими); итоговые данные не показывают интерференционной картины. Когда бы детектор ни был выключен – еще раз, даже если это решение сделано после того, как каждый фотон прошел через разветвитель, – фотоны ведут себя полностью как волны, создавая замечательную интерференционную картину, показывая, что они путешествовали по обоим путям. Это похоже на то, как если бы фотоны приспосабливали свое поведение в прошлом в соответствии с будущим выбором того, включен ли новый детектор; это похоже на то, как если бы фотоны имели "предчувствие" экспериментальной ситуации, с которой они столкнутся дальше по пути, и вели себя соответственно. Это похоже на то, как если бы существующая и определенная история становилась бы явной и полностью установленной только после будущего, к которому она ведет.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_4" \o )

Это подобно вашим ощущениям от решения о продаже *Дородного Монти*. Перед встречей с мистером Смитерсом вы были в двусмысленном, нерешительном, размытом, смешанном состоянии, желая и продавать и не продавать картину. Но совместные разговоры о мире искусства и получение информации о влиянии Смитерса на вашего дядюшку сделали для вас более комфортной идею о продаже. Разговор привел к твердому решению, которое рестроспективно позволило истории решения выкристаллизоваться из первоначальной неопределенности. Ретроспективно чувствуется, как если бы решение на самом деле было принято всегда. Но если бы вы не пообщались так хорошо с мистером Смитерсом, если бы он не придал вам уверенности, что*Дородный Монти* будет в надежных руках, вы могли бы очень даже принять решение не продавать. А история прошлого, которую вы могли бы рассказать в этой ситуации, несомненно, могла бы содержать признание, что вы на самом деле очень давно решили не продавать картину, будучи глубоко уверенным, что вы всегда знали, что сентиментальные связи просто слишком сильны, чтобы пойти на это. Реальное прошлое, конечно, не изменилось ни на йоту. Однако отличающиеся ощущения теперь приводят вас к описанию отличающейся истории.

В области психологии переписывание или переинтерпретация прошлого является общим местом; наша история прошлого часто лишь информирует о наших переживаниях в настоящем. Но в области физики – на той арене, которую мы обычно рассматриваем как объективную и высеченную в камне, – будущая случайность истории несколько переворачивает мозги. Чтобы проделать переворачивание еще более тщательно, Уилер представил космическую версию эксперимента с отложенным выбором, в которой источником света является не лабораторный лазер, а мощный квазар в глубине пространства. Лучевой разветвитель представляет собой не лабораторный прибор, а находящуюся на пути света галактику, чье гравитационное притяжение может действовать подобно линзе, которая фокусирует проходящие фотоны и направляет их к Земле, как на Рис. 7.3. Хотя никто на данный момент не проделал указанный эксперимент, в принципе, если собрать достаточно фотонов от квазара, они должны заполнить интерференционную картину на долго экспонирующейся фотографической пластине, точно так же, как и в эксперименте с лабораторным лучевым разветвителем. Но если мы введем другой детектор фотонов прямо рядом с окончанием одного или другого маршрута, он обеспечит информацию "выбора пути" для фотонов, таким образом разрушая интерференционную картину.

Что поражает в этой версии, так это то, что с нашей точки зрения фотоны могли путешествовать многие миллиарды лет. Их решение двигаться одним путем вокруг галактики, как частица, или обоими путями, как волна, кажется, было принято задолго до того, как возник детектор, любой из нас или даже сама Земля. Однако, миллиарды лет спустя детектор был построен, установлен на одном из путей фотонов, достигающих Земли, и включен. И это недавнее действие каким-то образом обеспечивает, что рассматриваемые фотоны ведут себя как частицы. Это действует так, как если бы они путешествовали вдоль в точности одного или другого пути в их долгом рейсе к Земле. Но если, спустя несколько минут, мы выключим детектор, фотоны, которые впоследствии достигают фотографической пластинки, начинают выстраивать интерференционную картину, свидетельствуя о том, что миллиарды лет назад они путешествовали следом за своими призрачными партнерами, выбирая одновременно противоположные пути вокруг галактики.



***Рис 7.3****Свет от удаленного квазара, рассеянный и сфокусированный промежуточной галактикой, в принципе, будет давать интерференционную картину. Если добавочный детектор, который позволяет для каждого фотона провести определение его пути, включен, достигающие Земли фотоны не будут больше заполнять интерференционную картину.*

Так что же, наше включение или выключение детектора в двадцать первом столетии влияет на движение фотонов несколько миллиардов лет назад? Определенно нет. Квантовая механика не отрицает, что прошлое произошло и произошло окончательно. Недоразумение возникает просто потому, что концепция прошлого в соответствии с квантовой механикой отличается от концепции прошлого в соответствии с классической интуицией. Наше классическое воспитание долго заставляло нас говорить, что данный фотон это вот этот или вон тот. Но в квантовом мире, в нашем мире, это утверждение, примененное к реальным фотонам, оказывается слишком ограниченным. Как мы видели, в квантовой механике нормой является неопределенная, размытая, смешанная реальность, состоящая из многих нитей, которые кристаллизуются в более обычную, определенную реальность, только когда проведено подходящее наблюдение. Это не то, что фотон миллиарды лет назад решил пойти по одному пути вокруг галактики, или по другому пути или по обоим путям. Вместо этого на протяжении миллиардов лет он находился в квантовых стандартах – в смеси, гибриде возможностей.

Акт наблюдения связывает эту необычную квантовую реальность с повседневным классическим опытом. Наблюдения, которые мы проводим сегодня, вынуждают одну из нитей квантовой истории выделиться в нашем изложении прошлого. В этом смысле, хотя квантовая эволюция от прошлого к настоящему не подвергается влиянию чего-либо, что мы делаем сегодня, история, которую мы называем прошлым, может нести на себе следы сегодняшних действий. Если мы вставляем детекторы фотонов вдоль двух путей, по которым свет следует к экрану, тогда наш рассказ о прошлом будет включать описание того, какой путь выбрал каждый фотон; вставляя детекторы фотонов, мы обеспечиваем, что информация выбора пути является существенной и определенной частью нашей истории. Но если мы не вставляем детекторы фотонов, наше описание прошлого будет неизбежно другим. Без детекторов фотонов мы не можем сказать что-либо о том, каким путем следует фотон; без детекторов фотонов нюансы выбора пути фундаментально недоступны. Обе истории правомерны. Обе истории интересны. Они просто описывают разные ситуации.

Сегодняшние наблюдения могут, следовательно, помочь завершить историю, которую мы рассказываем о процессе, который начался вчера, или день назад или вообще миллиард лет назад. Сегодняшние наблюдения могут обрисовать разновидности деталей, которые мы можем и должны включить в сегодняшнее описание прошлого.

Разрушая прошлое

Важно отметить, что в этих экспериментах прошлое никоим образом не изменяется сегодняшними действиями и что никакая хитрая модификация экспериментов не достигнет этой скользкой цели. Тогда возникает вопрос: Если вы не можете изменить нечто, что уже произошло, можете ли вы сделать следующую лучшую вещь и разрушить его влияние на настоящее? В той или иной степени временами эта фантазия может быть реализована. Игрок в бейсбол, который, имея два аута в конце девятой подачи, не ловит рутинно летящий мяч, позволяет команде противника завершиться в один пробег, может удалить влияние этой ошибки впечатляющим ныряющим захватом подачи мяча при следующем ударе. И конечно, такой пример ни в малейшей степени не загадочен. Только когда событие в прошлом, кажется, определенно устраняется наступлением другого события в будущем (как пропущенный летящий мяч определенно устраняет прошлую безупречную игру), мы будем думать, что здесь что-то прорезалось, если мы все время говорили, что устраненное событие на самом деле произошло. *Квантовый ластик (стиратель)*, впервые предложенный в 1982 Марианом Скалли и Каем Дриилом, намекает на этот вид странностей в квантовой механике.

Простейшая версия эксперимента с квантовым ластиком делается с использованием двухщелевой конфигурации, модифицированной следующим образом. Маркирующий прибор располагается фронтально перед каждой щелью; он отмечает каждый проходящий фотон так, что когда фотон исследуется позже, вы можете сказать, через какую щель он прошел. Вопрос о том, как вы можете обеспечить маркировку фотона – как вы можете сделать эквивалент нананесения "L" на фотон, который проходит через левую щель и "R" на фотон, который проходит через правую щель, – хороший вопрос, но детали не особенно важны. Грубо, процесс осуществляется с использованием прибора, который позволяет фотону свободно пройти через щель, но заставляет его спиновую ось выстроиться в определенном направлении. Если приборы перед левой и правой щелями управляют спинами фотонов особым, но определенным образом, то более утонченный детекторный экран, который не только регистрирует точку в месте падения фотона, но также и содержит запись об ориентации спина фотона, будет показывать, через какую щель пролетел данный фотон на своем пути к детектору.

Когда проводится этот двухщелевой эксперимент с маркировкой, фотоны не выстраивают интерференционную картину, как на Рис. 7.4а. Теперь уже объяснение должно быть привычным: новый маркирующий прибор позволяет собрать информацию выбора пути, а информация выбора пути отбирает ту или иную историю; результаты показывают, что любой данный фотон проходит или через левую щель или через правую щель. А без комбинации левощелевых и правощелевых траекторий нет перекрытия вероятностных волн, так что не создается интерференционная картина.

Теперь идея Скалли и Дриила. Что если сразу после падения фотона на детекторный экран вы уничтожите возможность определения, через какую щель он прошел, путем разрушения отметки, зафиксированной маркирующим прибором? Без возможности, даже в принципе, выделить информацию выбора пути из детектируемого фотона, оба класса историй опять возвращаются в игру, заставляя снова появляться интерференционную картину. Отметим, что этот вид "отмены" прошлого в дальнейшем попадает в шокирующую категорию куда дальше, чем ныряющий захват бейсболиста в девятой подаче. Когда маркирующий прибор включен, мы представляем, что фотон послушно ведет себя как частица, проходя через левую щель или через правую щель. Если как-нибудь сразу после его падения на экран мы разрушим метку выбора пути, отмечающую его движение, то кажется слишком поздно позволять формироваться интерференционной картине. Для интерференции нам надо, чтобы фотон вел себя как волна. Он должен проходить через обе щели, так что он может перемешаться сам с собой на пути к детекторному экрану. Но наша исходная маркировка фотона, кажется, гарантирует, что он ведет себя как частица и путешествует через левую или через правую щель, предотвращая появление интерференционной картины.

C:\0\tkankosmosa_files\iaef81a697d C:\0\tkankosmosa_files\i8909baa4df

(а) (b)

***Рис 7.4****В эксперименте квантового ластика оборудование располагается фронтально перед двумя щелями, маркируя фотоны, так что последующее измерение может выявить, через какую щель прошел каждый фотон. В (а) мы видим, что эта информация выбора пути портит интерференционную картину. В (b) сразу фронтально перед детекторным экраном вводится прибор, который разрушает маркировку фотонов. Поскольку информация выбора пути уничтожается, снова возникает интерференционная картина.*

В эксперименте, проведенном Раймондом Чиао, Полом Квиатом и Эфраимом Стейнбергом, конфигурация была такой, как схематично показано на Рис. 7.4, с новым стирающим прибором, вставленным сразу во фронт перед детекторным экраном. Еще раз, детали не существенны, но коротко уточним, что стиратель работает, обеспечивая, что независимо от того, влетел ли фотон через левую или через правую щель, его спин оказывается выстроенным в одном и том же фиксированном направлении. Последующее изучение его спина, следовательно, не дает информации о том, через какую щель он прошел, так что метка выбора пути разрушена. Замечательно, что фотоны, обнаруженные на экране после этого разрушения, производят интерференционную картину. Когда ластик вставлен прямо во фронт детекторного экрана, он отменяет – он стирает влияние маркировки пути фотонов сзади, когда они достигали щелей. Как и в эксперименте с отложенным выбором, в принципе, такой вид разрушения мог появиться через миллиарды лет после влияния, которое он расстроил, фактически отменив прошлое, даже отменив древнее прошлое.

Как мы можем придать этому смысл? Ну, держим в уме, что результаты полностью согласуются с теоретическими предсказаниями квантовой механики. Скалли и Дриил предложили этот эксперимент, потому что их квантовомеханические вычисления убедили их, что он будет работать. И это произошло. Итак, как обычно с квантовой механикой, головоломка не противопоставляет теорию и эксперимент. Она противопоставляет теорию, согласующуюся с экспериментом, нашим интуитивным ощущениям времени и реальности. Чтобы удалить напряжение, отметим, что если вы поставили детекторы фотонов во фронт к каждой щели, показания детекторов будут восстанавливать с определенностью, прошел ли фотон через левую щель или через правую щель, и тогда не будет способа стереть такую определяющую информацию – тогда не будет способа получить обратно интерференционную картину. Но маркирующие приборы отличаются от этого, поскольку они обеспечивают только потенциальную возможность определения информации выбора пути – а потенциальные возможности являются просто разновидностями вещей, которые могут быть разрушены. Маркирующий прибор преобразует прохождение фотона таким образом, грубо говоря, что он все еще путешествует обоими путями, но левая часть его вероятностной волны размыта относительно правой, или правая часть его вероятностной волны размыта относительно левой. С другой стороны, упорядоченная последовательность пиков и впадин, которая обычно появляется от каждой щели – как на Рис. 4.2b – также размывается, так что интерференционная картина на детекторном экране не формируется. Хотя решающим явлением будет то, что обе волны, и левая и правая, все еще существуют. Стиратель действует, поскольку он расфокусирует волны. Подобно паре зеркал он компенсирует размытие, приводя обе волны назад в резкий фокус и позволяя им снова сложить интерференционную картину. Это так, как если бы после маркирующих приборов, выполнивших свою задачу, интерференционная картина исчезла из-под наблюдения, но терпеливо находилась бы в ожидании, пока кто-нибудь или что-нибудь не воскресил ее.

Это объяснение может сделать квантовый ластик немного менее поразительным, но тут имеется финал – ошеломляющая вариация эксперимента с квантовым ластиком, который еще больше бросает вызов привычным представлениям о пространстве и времени.

Формируя прошлое\*

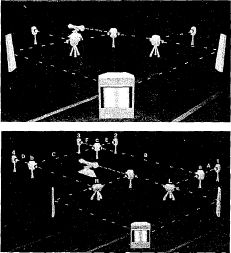
Этот эксперимент, *квантовый ластик с отложенным выбором*, также был предложен Скалли и Дриилом. Он начинается с эксперимента с лучевым разветвителем, показанным на Рис. 7.1, модифицированным путем введения двух так называемых понижающих преобразователей, по одному на каждый лучевой путь. Понижающий преобразователь это прибор, который получает один фотон на входе и производит два фотона на выходе, каждый с половиной энергии ("понижающее преобразование") от исходного. Один из двух фотонов (так называемый *сигнальный* фотон) направляется вдоль пути, по которому исходный фотон следовал кдетекторному экрану.

*(\*)"Если вы найдете эту секцию трудной, вы можете спокойно двигаться к следующей секции без потери последовательности изложения. Но я призываю вас попытаться пройти через нее, так как результаты в полном смысле слова изумительны."*

 Другой фотон, произведенный понижающим преобразователем (именуемый *вспомогательным* фотоном), посылается в совершенно другом направлении, как показано на Рис. 7.5а. В зависимости от того, на каком фотоне проводится эксперимент, мы можем определить, какой путь выбрал сигнальный фотон к экрану, путем наблюдения, какой понижающий преобразователь испустил вспомогательный фотон-партнер. И еще раз, возможность собрать информацию выбора пути о сигнальном фотоне – даже если она полностью косвенная, поскольку мы совсем не взаимодействуем ни с одним сигнальным фотоном – вызывает предотвращение появления интерференционной картины.

Теперь о самой причудливой части. Что если мы преобразуем эксперимент так, что сделаем невозможным определить, из какого понижающего преобразователя был испущен вспомогательный фотон? Что если, таким образом, мы разрушим информацию выбора пути, воплощенную во вспомогательном фотоне? Ну, кое-что поразительное произойдет: даже если мы ничего не делаем непосредственно с сигнальным фотоном, путем разрушения информации выбора пути, переносимой его вспомогательными партнерами, мы можем восстановить интерференционную картину из сигнальных фотонов. Позвольте мне показать вам, как это происходит, поскольку это на самом деле поразительно.

Посмотрим на Рис. 7.5b, который объединяет все существенные идеи. Но не пугайтесь. Он проще, чем кажется, и мы теперь пройдем через него поэтапно под руководством. Конфигурация на Рис. 7.5b отличается от конфигурации на Рис. 7.5а в отношении того, как мы детектируем вспомогательные фотоны после того, как они были эмитированы. На Рис. 7.5а мы детектировали их непосредственно, так что мы немедленно смогли определить, из какого понижающего преобразователя каждый произошел, – это значит, какой путь выбрал сигнальный фотон. В новом эксперименте каждый вспомогательный фотон был послан через лабиринт, чем поколебал нашу способность получить такую определенность. Например, представим, что вспомогательный фотон эмитирован из понижающего преобразователя, отмеченного "L". Вместо того, чтобы немедленно попасть в детектор (как на Рис. 7.5а), этот фотон послан на лучевой разветвитель (отмеченный "а"), так что имеет 50 процентов шансов быть направленным вдоль пути, отмеченного "А", и 50 процентов шансов быть направленным вдоль пути, отмеченнного "B". Если он направлен вдоль пути А, он влетит в детектор фотонов (отмеченный "1"), и его прибытие будет должным образом записано. Но если вспомогательный фотон направлен вдоль пути В, он вдобавок будет подвержен следующим штукам. Он будет направлен на другой лучевой разветвитель (отмеченный "с"), так что будет имееть 50 процентов шансов быть направленным вдоль пути Е к детектору, отмеченному "2", и 50 процентов шансов быть направленным вдоль пути "F" к детектору, отмеченному "3". Теперь – следите со мной, так как тут суть всего изложения – те же самые рассуждения, примененные к вспомогательному фотону, эмитированному из другого понижающего преобразователя, отмеченного "R", говорят нам, что если вспомогательный фотон направлен вдоль пути D, он будет записан детектором 4, но если он направлен вдоль пути С, он обнаружен или детектором 3, или детектором 2, в зависимости от пути, по которому он следовал после прохождения через лучевой разветвитель b.



(а) (b)

***Рис 7.5****(а) Эксперимент с лучевым разветвителем, дополненный понижающими преобразователями, не дает интерференционной картины, поскольку вспомогательные фотоны обеспечивают информацию выбора пути. (b) Если вспомогательные фотоны не детектируются непосредственно, а вместо этого посылаются через изображенный лабиринт, тогда интерференционная картина может быть выделена из результатов эксперимента.*

Вспомогательные фотоны, которые определяются детекторами 2 или 3, не дают информации выбора пути и, следовательно, их сигнальные фотоны заполняют интерференционную картину. <*Расположение обозначений вверху*: детектор 3, путь F, лучевой разветвитель c, путь E, детектор 2; *слева*: детектор 4, путь D, лучевой разветвитель b, путь C; *справа*: путь B, лучевой разветвитель a, путь A, детектор 1; *в середине*: понижающий преобразователь R, понижающий преобразователь L>.

Теперь рассмотрим, зачем мы добавили все эти усложнения. Отметим, что если вспомогательный фотон обнаружен детектором 1, мы знаем, что соответствующий сигнальный фотон выбрал левый путь, поскольку для вспомогательного фотона, который был эмитирован из понижающего преобразователя R, нет способа найти путь к этому детектору. Аналогично, если вспомогательный фотон обнаружен детектором 4, мы знаем, что его сигнальный фотон-партнер выбрал правый путь. Но если вспомогательный фотон увлечен в детектор 2, мы не имеем идей о том, какой путь выбрал его сигнальный фотон-партнер, поскольку тут равные шансы, что он эмитирован понижающим преобразователем L и следует пути В-Е или что он эмитирован понижающим преобразователем R и следует пути С-Е. Сходным образом, если вспомогательный фотон обнаружен детектором 3, он может быть эмитирован понижающим преобразователем L и путешествовать по пути В-F или понижающим преобразователем R и путешествовать по пути C-F. Так что *для сигнального фотона, чьи вспомогательные партнеры обнаружены детектором 1 или 4, мы имеем информацию выбора пути, но для тех, чьи вспомогательные партнеры обнаружены детектором 2 или 3, информация выбора пути разрушена*.

Означает ли стирание некоторой информации выбора пути – даже если мы ничего не делаем с сигнальными фотонами непосредственно – что интерференционные эффекты восстанавливаются? Это на самом деле происходит – но только для тех сигнальных фотонов, чьи вспомогательные партнеры попали в детектор 2 или детектор 3. То есть общая совокупность положений падения сигнальных фотонов на экран будет выглядеть подобно данным на Рис. 7.5а, *не показывая даже самого слабого намека на интерференционную картину*, что является характеристикой фотонов, которые путешествовали или одним, или другим путем. Но если мы сосредоточимся на подмножестве результирующих точек – например, от тех сигнальных фотонов, чьи вспомогательные фотоны влетели в детектор 2, – тогда это подмножество точек будет заполнять интерференционную картину! Эти сигнальные фотоны – чьи вспомогательные партнеры, так уж случилось, не обеспечили никакой информации выбора пути, – ведут себя, как если бы они путешествовали обоими путями! Если мы подключим оборудование так, что экран покажет красную точку для положения каждого сигнального фотона, чей вспомогательный фотон был обнаружен детектором 2, и зеленую точку для всех остальных, некоторые, у кого нарушено цветовосприятие, не будут видеть интерференционную картину, но остальные, тем не менее, будут видеть, что красные точки упорядочены в виде ярких и темных полос – интерференционной картины. То же самое останется правильным с детектором 3 на месте детектора 2. Но не будет такой интерференционной картины, если мы выделим сигнальные фотоны, чьи вспомогательные фотоны обнаружены детектором 1 или детектором 4, поскольку эти вспомогательные фотоны дают информацию выбора пути относительно своих партнеров.

Эти результаты – которые были подтверждены экспериментом[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_5" \o ) – великолепны: через присоединение понижающих преобразователей, которые потенциально могут обеспечить информацию выбора пути, мы теряем интерференционную картину, как на Рис. 7.5а. А без интерференции мы, естественно, заключали, что каждый фотон летел или вдоль одного пути или вдоль другого. Но теперь мы узнали, что это было опрометчивое заключение. Путем аккуратного удаления потенциальной информации выбора пути, переносимой некоторыми вспомогательными фотонами, мы можем добиться выделения из данных интерференционной картины, что свидетельствует, что некоторые фотоны на самом деле двигаются обоими путями.

Отметим также, возможно, самый яркий результат среди всех: три дополнительных лучевых разветвителя и четыре детектора вспомогательных фотонов могут располагаться на другой стороне лаборатории или даже на другой стороне вселенной, поскольку ничто в нашем обсуждении совершенно не зависело от того, будет ли получен данный вспомогательный фотон до или после того, как его сигнальный партнер попадет на экран. Тогда представим, что все эти приборы удалены на большое расстояние, скажем, на десять световых лет для определенности, и подумаем, что это за собой повлечет. Вы проводите эксперимент Рис. 7.5b сегодня, записывая – одно за другим – места падения гигантского числа сигнальных фотонов, и вы наблюдаете, что они не показывают и признаков интерференции. Если кто-нибудь попросит вас объяснить данные, у вас может возникнуть соблазн сказать, что из-за вспомогательных фотонов информация выбора пути имеет место, а значит каждый сигнальный фотон определенно летел вдоль левого или вдоль правого пути, уничтожая любую возможность интерференции. Но, как было видно выше, это будет опрометчивое заключение о происходящем; это будет совершенно необдуманное описание прошлого.

Вы видите десятью годами позднее, что четыре детектора фотонов получат – один за другим – вспомогательные фотоны. Если вы затем получаете информацию о том, какие вспомогательные фотоны попали, скажем, в детектор 2 (например, первый, седьмой, девятый, двенадцатый ... вспомогательные фотоны прибыли), и если вы тогда вернетесь к данным, которые вы собрали годами ранее и выделите соответствующие положения сигнальных фотонов на экране (например, первого, седьмого, девятого, двенадцатого ... сигнальных фотонов, которые прибыли), вы найдете, что выделенные данные заполняют интерференционную картину, что выявляет, что эти сигнальные фотоны должны описываться как проходившие через оба пути. В качестве альтернативы, если спустя 9 лет и 364 дня после того, как вы собрали данные по сигнальным фотонам, техник саботирует эксперимент путем удаления разветвителей а и b – гарантируя, что когда вспомогательные фотоны прибудут на следующий день, они все пойдут в детектор 1 или детектор 4, что сохранит всю информацию выбора пути, – тогда, когда вы получите эту информацию, вы сделаете заключение, что каждый сигнальный фотон двигался вдоль левого пути или вдоль правого пути, и интерференционная картина не может быть извлечена из данных по сигнальным фотонам. Так что, как убедительно проясняет это обсуждение, история, которую вы рассказываете, чтобы объяснить данные по сигнальным фотонам, существенно зависит от измерений, проведенных на десять лет позже, чем эти данные были собраны.

Позвольте мне еще раз подчеркнуть, что будущие измерения совершенно не изменяют чего-либо из вещей, которые имели место в вашем сегодняшнем эксперименте; будущие измерения никоим образом не изменяют данные, которые вы собрали сегодня. Но будущие измерения влияют на виды деталей, которые вы можете привлечь, когда в дальнейшем будете описывать то, что произошло сегодня. Перед тем, как вы получите результаты измерений вспомогательных фотонов, вы на самом деле совсем не можете сказать чего-либо об истории выбора пути любого данного сигнального фотона. Однако, раз уж вы получили результаты, вы заключаете, что сигнальные фотоны, чьи вспомогательные партнеры успешно использованы для определения информации выбора пути, могут быть описаны как путешествовавшие – годы назад – либо слева либо справа. Вы также придете к заключению, что сигнальные фотоны, чьи вспомогательные партнеры разрушили их информацию выбора пути, не могут быть описаны как определенно проходившие – годы назад – по одному или по другому пути (заключение, которое вы можете убедительно подтвердить с использованием вновь полученных данных по вспомогательным фотонам, чтобы выявить ранее скрытую интерференционную картину среди этого более позднего класса сигнальных фотонов). Мы, таким образом, видим, что будущее помогает сформировать историю, которую вы рассказываете о прошлом.

Эти эксперименты впечатляюще конфликтуют с нашими обычными представлениями о пространстве и времени. Нечто, что имеет место намного позже и очень далеко от чего-то другого, тем не менее существенно для нашего описания этого чего-то другого. По классическому счету – здравому смыслу – это просто сумасшествие. Конечно, тут важно, что классические оценки являются ложным видом оценок для использования в квантовой вселенной. Мы узнали из обсуждения Эйнштейна-Подольского-Розена, что квантовая физика нелокальна в пространстве. Если вы полностью усвоили этот урок – выдержав его, чтобы согласиться с его внутренней правильностью, – эти эксперименты, которые включают в себя разновидности запутывания через пространство и через время, могут не показаться совсем уж неземными. Но по стандартам повседневного опыта они таковыми определенно являются.

Квантовая механика и опыт

В течение нескольких дней после того, как я впервые узнал об этих экспериментах, я помню свое воодушевление. Я чувствовал, что мне дали мельком увидеть скрытую сторону реальности. Здравый смысл – земная, обыкновенная, повседневная деятельность – внезапно оказался частью классической шарады, скрывающей истинную природу нашего квантового мира. Мир повседневности внезапно оказался ничем иным, как вывернутым наизнанку магическим действием, внушившим своим зрителям веру в обычные, привычные концепции пространства и времени, в то время как удивительная истина квантовой реальности лежит, ускользая от взгляда, тщательно защищенная природой.

В последние годы физики потратили много усилий в попытках объяснить правила природы, – чтобы точно постичь, как фундаментальные законы квантовой физики преобразуются в классические законы, которые столь успешны при объяснении общепринятого опыта, – в сущности, чтобы постичь, как атомное и субатомное сбрасывает свою магическую причудливость, когда оно объединяется, чтобы сформировать макроскопические объекты. Исследования продолжаются, но многое уже изучено. Посмотрим на некоторые аспекты, особенно уместные в связи с вопросом о стреле времени, но теперь с точки зрения квантовой механики.

Классическая механика основывается на уравнениях, которые Ньютон открыл в поздние 1600е годы. Электромагнетизм основывается на уравнениях, которые Максвелл открыл в поздние 1800е годы. СТО основывается на уравнениях, которые открыл Эйнштейн в 1905, а ОТО основывается на уравнениях, которые он открыл в 1915. Что все эти уравнения имеют общего, и что является центральным в дилемме стрелы времени (как объясняется в предыдущей главе), так это их полностью симметричное рассмотрение прошлого и будущего. Нигде в любом из этих уравнений нет чего-либо, что различает время, направленное "вперед", от времени, направленного "назад". Прошлое и будущее рассматриваются на одинаковых основаниях.

Квантовая механика основывается на уравнении, которое Эрвин Шредингер открыл в 1926.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_6" \o ) Вам не нужно знать чего-либо об этом уравнении, кроме того факта, что оно принимает в качестве входных данных форму квантовомеханической вероятностной волны в один момент времени, как на Рис. 4.5, и позволяет определить, как вероятностная волна будет выглядеть в любой другой момент времени, более ранний или более поздний. Если вероятностная волна ассоциируется с частицей, такой как электрон, вы можете использовать ее для предсказания вероятности того, что в любое выделенное время эксперимент найдет электрон в любом выделенном месте. Подобно классическим законам Ньютона, Максвелла и Эйнштейна квантовый закон Шредингера включает в себя равноправное рассмотрение времени-будущего и времени-прошлого. "Фильм", показывающий вероятностную волну стартующей в таком виде и заканчивающей в этаком виде, может быть запущен в обратном направлении, – показывая вероятностную волну, стартующую в этаком виде, а заканчивающую в таком виде, – и нет способа сказать, что одна эволюция правильна, а другая ложна. Обе одинаково являются решениями уравнения Шредингера. Обе одинаково представляют осмысленные пути, по которым вещи могут эволюционировать.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_7" \o )

Конечно, "фильм", о котором идет речь полностью отличается от аналогов, использованных при анализе движения теннисного мяча или разбивающегося яйца в последней главе. Вероятностные волны не есть вещи, которые мы можем видеть непосредственно; не существует камеры, которая могла бы зафиксировать вероятностные волны на пленку. Вместо этого, мы можем описать вероятностные волны с использованием математических уравнений, и перед нашим мысленным взором мы можем представить простейшие из них, имеющие форму как на Рис. 4.5 и 4.6. Но единственный доступ, который мы имеем к самим вероятностным волнам, является косвенным, через процесс измерения. Это есть, как было обрисовано в Главе 4 и неоднократно было видно в рассмотренных выше экспериментах, стандартная формулировка квантовой механики, описывающая разворачивание явлений с использованием двух совершенно отличных этапов. На первом этапе вероятностная волна – или, на более точном полевом языке, *волновая функция* – объекта, такого как электрон, эволюционирует в соответствии с уравнением, открытым Шредингером. Это уравнение гаранирует, что форма волновой функции изменяется гладко и постепенно, почти как водяная волна изменяет свою форму, когда путешествует от одного берега озера к другому.\* В стандартном описании второго этапа мы осуществляем контакт с наблюдаемой реальностью путем измерения положения электрона, и когда мы так делаем, форма его волновой функции резко и прерывисто изменяется. Волновая функция электрона больше не похожа на более привычные примеры вроде водяных волн или волн звука: когда мы измеряем положение электрона, его волновая функция вздымается пиком или, как показано на Рис. 4.7, схлопывается, падая до величины 0 везде, где частица не найдена, и возрастая до 100 процентов вероятности в единственном положении, где частица найдена измерением.

Первый этап – эволюция волновой функции в соответствии с уравнением Шредингера – математически строгий, полностью недвусмысленный и полностью принятый физическим сообществом. Второй этап – коллапс волновой функции при измерении – наоборот, является чем-то, что на протяжении последних восьми десятков лет, в лучшем случае, держит физиков в тихом смущении, а в худшем провоцирует проблемы, загадки и потенциальные парадоксы, которые разрушают карьеры. Сложность, как отмечалось в Главе 4, в том, что в соответствии с уравнением Шреднигера волновые функции не коллапсируют. Коллапс волновой функции представляет собой добавление. Оно было введено после открытия Шреднгером своего уравнения в попытке оценить, что же экспериментаторы на самом деле видят. Хотя сырая, несколлапсированная волновая функция воплощает странную идею, что частица находится и тут и там, экспериментаторы никогда не видят этого. Они всегда находят частицу определенно в том или ином положении; они никогда не видят ее частично тут, а частично там; игла в их измерительных приборах никогда не зависает в нерешительности в некоторой призрачной смеси, отмечая и эту величину и также ту величину.

То же самое происходит, конечно, при наших собственных бессистемных наблюдениях окружающего нас мира. Мы никогда не наблюдаем, чтобы кресло было и тут, и там; мы никогда не наблюдаем Луну одновременно в одной части ночного неба, а также и в другой; мы никогда не видим кота, который одновременно и жив, и мертв. Понятие коллапса волновой функции присоединяется к нашему опыту путем постулирования, что акт измерения заставляет волновую функцию отказаться от квантовой неопределенности и ввести одну из множества потенциальных возможностей (частица здесь или частица там) в реальность.

*(\*)"Квантовая механика справедливо имеет репутацию чего-то гладкого и постепенного; однако, как мы явно увидим в последних главах, она обнаруживает турбулентный и дрожащий микрокосмос. Причиной этого дрожания является вероятностная природа волновой функции – даже если вещи могут существовать одним способом в один момент, имеется вероятность, что они будут существенно отличаться моментом позже, – а не всегда присутствующие дрожания, характеризующие саму волновую функцию."*

Загадка квантового измерения

Но как проведение измерения экспериментатором принуждает волновую функцию к коллапсу? Фактически, когда реально происходит коллапс волновой функции, и если он происходит, что реально происходит на микроскопическом уровне? Вызывают ли коллапс любое и всякое измерения? Когда происходит коллапс и как долго это длится? Поскольку в соответствии с уравнением Шредингера волновая функция не коллапсирует, какое уравнение описывает второй этап квантовой эволюции и как новое уравнение свергает шредингеровское, узурпируя его обычную нерушимую власть над квантовыми процессами? И, что важно для нашего текущего отношения со стрелой времени, в то время, как уравнение Шредингера, уравнение, которое управляет первым этапом, не делает различий между прямым и обратным направлением во времени, вводит ли уравнение для второго этапа фундаментальную асимметрию между временем до и временем после того, как измерение произведено? То есть вводит ли квантовая механика, включая ее сопряжение с повседневным миром через измерения и наблюдения, стрелу времени в основные законы физики? Как никак, мы обсудили ранее, как квантовая трактовка прошлого отличается от трактовки прошлого в классической физике и что мы подразумевали под прошлым перед тем, как отдельные измерения и наблюдения имели место. Так, делая измерения, воплощенные во втором этапе коллапса волновой функции, устанавливаем ли мы асимметрию между прошлым и будущим, между до и после того, как измерение проведено?

Эти вопросы упорно сопротивляются полному решению и они остаются спорными. Тем не менее, после десятилетий, предсказательную мощь квантовой теории тяжело скомпроментировать. Формулировка квантовой теории в виде этапа один/этапа два, даже если этап два остается таинственным, предсказывает вероятности измерений одного результата за другим. И эти предсказания подтверждены повторением заданных экспериментов снова и снова и проверкой частоты, с которой тот или иной результат найден. Фантастический экспериментальный успех этого подхода намного перевешивает дискомфорт от отсутствия точного описания того, что на самом деле происходит на втором этапе.

Но дискомфорт всегда рядом. И он означает не просто, что некоторые детали коллапса волновой функции не вполне выяснены. *Проблема квантового измерения*, как она называется, является предметом спора, что говорит о пределах и универсальности квантовой механики. Это просто увидеть. Подход с этапом один/этапом два вводит раскол между тем, что наблюдается (электрон, или протон или атом, например) и экспериментатором, который наблюдает. Перед тем, как экспериментатор появляется на сцене, волновая функция счастливо и плавно эволюционирует в соответствии с уравнением Шредингера. Но тогда, когда экспериментатор вмешивается с вещами для проведения измерения, правила игры неожиданно меняются. Уравнение Шредингера отбрасывается в сторону и наступает коллапс из второго этапа. И еще, раз уж нет разницы между атомами, протонами и электронами, которые составляют экспериментатора и оборудование, которое он или она использует, и атомами, протонами и электронами, которые он или она изучает, так почему же имеется разрыв в том, как квантовая механика трактует их? Если квантовая механика является универсальной теорией, которая применима без ограничений к чему угодно, наблюдаемое и наблюдатель должны рассматриваться в точности одинаковым образом.

Нильс Бор был не согласен. Он утверждал, что экспериментаторы и их оборудование отличаются от элементарных частиц. Даже если они сделаны из одинаковых частиц, они являются "большими" собраниями элементарных частиц и, следовательно, управляются законами классической физики. Где-то между мельчайшим миром индивидуальных атомов и субатомных частиц и привычным миром людей и их оборудования правила меняются, поскольку меняются размеры. Мотивировка объявления этого разделения ясна: малые частицы в соответствии с квантовой механикой могут быть локализованы в размытой смеси тут и там, тогда как мы не видим подобного поведения в большом, повседневном мире. Но где точно находится граница? И, что жизненно важно, как два набора правил согласуются, когда большой повседневный мир сталкивается с очень маленьким миром атомов, как в случае измерения? Бор настойчиво декларировал, что эти вопросы находятся за теми пределами, для которых они предназначены, вернее говоря, что они находятся вне границ, в которых он или кто-либо еще может дать ответ. И поскольку даже без обращения к ним теория дает поразительно точные предсказания, долгое время такие проблемы выпадали из списка важнейших вопросов, которые физики продвигали к решению.

Но, чтобы понять квантовую механику полностью, чтобы полностью определить, что она говорит о реальности, и чтобы установить, какую роль она может играть в установлении направления стрелы времени, мы должны прийти к пониманию проблемы квантового измерения.

В следующих двух секциях мы опишем некоторые из наиболее заметных и многообещающих попыток сделать это. Результат, к которому вы можете в любой момент перепрыгнуть вперед к последней секции, фокусируясь на квантовой механике и стреле времени, таков, что более хитроумная работа с проблемой квантового измерения дает существенный прогресс, но общепризнанное решение все еще оказывается вне нашей досягаемости. Многие рассматривают это как один из наиболее важных пробелов в нашей формулировке квантовых законов.

Реальность и проблема квантового измерения

На протяжении лет было много предложений для решения проблемы квантового измерения. Ирония заключается в том, что, хотя они влекли за собой отличающиеся концепции реальности, – некоторые радикально отличающиеся, – когда они подходили к предсказаниям того, что исследователь будет измерять почти в любом эксперименте, все они сходились во взглядах и каждое работало подобно заклинанию. Каждое предложение принимало вид одного и того же шоу, даже если, когда вы бросите взгляд за сцену, вы увидите, что их способы действия существенно отличаются.

Когда дело доходит до развлечений, вы обычно не хотите знать, что происходит за кулисами; вы полностью довольствуетесь тем, что обращаете все внимание исключительно на результат. Но когда речь идет о понимании вселенной, имеется ненасытное побуждение отдернуть все занавески, открыть все двери и полностью выявить глубинные внутренние механизмы реальности. Бор рассматривал это побуждение как безосновательное и вводящее в заблуждение. Для него реальность была представлением. Подобно монологу Сполдинга Грея\* неприукрашенные измерения экспериментатора являются целым шоу. Они не являются ничем другим. Согласно Бору там нет понятия "за сценой". Пытаться проанализировать, как, когда и почему квантовая волновая функция отбрасывает все возможности, кроме одной, и производит отдельное определенное число на измерительном приборе, ошибочная цель. Измеренное число само является всем, что заслуживает внимания.

Этот взгляд держался у власти в течение десятилетий. Однако, хотя его успокаивающее воздействие на ум боролось с квантовой теорией, он не смог помочь почувствовать, что фантастическая предсказательная сила квантовой механики означает, что имеется ответвление в скрытую реальность, которая лежит в основе механизмов вселенной. Он не смог помочь желанию идти дальше и понять, как квантовая механика связана со здравым смыслом – как она перекрывает пропасть между волновой функцией и наблюдением, и что за скрытая реальность лежит в основе наблюдений. Через годы многие исследователи приняли этот вызов; ниже приводятся некоторые предложения, которые они разработали.

*(\*)"Сполдинг Грей (р. 1941) – американский актер и сценарист, знаменитый своими моноспектаклями, считающимися образцом острого и едкого юмора". – (прим. перев.)"*

Один подход с историческими корнями, восходящими к Гейзенбергу, заключается в отказе от взгляда, что волновые функции есть объективные особенности квантовой реальности, и, вместо этого, в рассмотрении их только как воплощений того, чего мы знаем о реальности. Перед тем, как мы проводим эксперимент, мы не знаем, где находится электрон и, как предполагает этот взгляд, наше неведение относительно его расположения отражается электронной волновой функцией, описывая его как, возможно, находящегося в ряде различных положений. Однако, в момент, когда мы измеряем его положение, наше знание о его местоположении внезапно изменяется: теперь мы знаем его положение, в принципе, с абсолютной точностью. (По принципу неопределенности, если мы знаем его положение, мы неизбежно будем полностью в неведении относительно его скорости, но это не является предметом текущего обсуждения). Это резкое изменение наших знаний, в соответствии с данными взглядами, отражается в резком изменении в электронной волновой функции: она внезапно коллапсирует и принимает форму пика, как на Рис. 4.7, фиксируя наше точное знание положения электрона. В таком подходе, следовательно, резкий коллапс волновой функции совершенно не удивителен: он есть ничто иное, как резкое изменение в знании, которое мы все ощущаем, когда мы изучаем что-либо новое.

Второй подход, инициированный в 1957 году студентом Уилера Хью Эвереттом, отрицает, что волновая функция когда-либо коллапсирует. Вместо этого любой и каждый потенциальный результат, воплощенный в волновой функции, видит свет дня; однако, свет дня, который каждый видит, распространяется через его собственную отдельную вселенную. В этом подходе, *многомировой интерпретации*, понятие "вселенная" расширяется, чтобы включить бесчисленные "параллельные вселенные" – бесчисленные версии нашей вселенной, – так что все, что может произойти по предсказаниям квантовой механики, даже если его вероятность ничтожна, происходит, по меньшей мере, в одной копии. Если волновая функция говорит, что электрон может быть здесь, там и чересчур далеко, тогда в одной вселенной ваша копия найдет его здесь; в другой вселенной другая ваша копия найдет его там; а в третьей вселенной еще один вы найдет электрон чересчур далеко. Последовательность наблюдений, которую мы каждый делаем от одной секунды к следующей, таким образом отражает реальность, имеющую место только в одной части этой чудовищной, бесконечной сети вселенных, каждая из которых населена копиями вас и меня и любого другого, кто еще живет во вселенной, в которой определенное наблюдение дало определенный результат. В одной такой вселенной вы сейчас читаете эти слова, в другой вы прервались, чтобы полазить по Интернету, еще в другой вы с большим волнением дожидаетесь, когда поднимется занавес перед вашим дебютом на Бродвее. Это похоже на то, как если бы был не единственный блок пространства-времени, изображенный на Рис. 5.1, а бесконечное количество, среди которых каждый реализует один возможный путь сбытий. В многомировой интерпретации, следовательно, ни один потенциальный результат просто не остается потенциальным. Волновые функции не коллапсируют. Каждый потенциальный результат проявляется в одной из параллельных вселенных.\*

*(\*)"Стоит отметить, что при всей его экстравагантности результат Эверетта является следствием аккуратного решения уравнения Шредингера для объединенной системы, включающей как измеряемый микрообъект, так и экспериментатора с его приборами и памятью, причем без вводимого руками коллапса волновой функции. Решение никто не опроверг с момента его появления в 1957, но при этом многомировая интерпретация многими была воспринята как нечто, о чем не принято говорить в приличном физическом обществе. (Что, кстати, вынудило Эверетта оставить науку). Так Бор незадолго до своей смерти отказался обсуждать с Эвереттом его скандальный результат. Нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург на вопрос о подходе Эверетта сухо заметил: "Я в это не верю". – (прим. перев.)"*

Третье предложение, разработанное в 1950е Дэвидом Бомом, – тем самым физиком, с которым мы сталкивались в Главе 4, когда обсуждали парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена, – принимает совершенно другой подход.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_8" \o ) Бом утверждал, что частицы, такие как электроны, обладают определенными положениями и определенными скоростями, точно как в классической физике, и точно так, как на это надеялся Эйнштейн. Но, в соответствии с принципом неопределенности, эти свойства скрыты от рассмотрения; они являются примерами скрытых переменных, отмеченных в Главе 4. Вы не можете определить обе переменные одновременно. По Бому такая неопределенность представляет предел того, что мы можем знать, но ничего не предполагает о действительных атрибутах самих частиц. Его подход не разрушается от столкновения с результатом Белла, поскольку, как мы обсуждали выше в конце Главы 4, обладание определенными свойствами, запрещенными принципом неопределенности, не исключено; исключена только локальность, а подход Бома нелокален.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_9" \o ) Напротив, Бом представил, что волновая функция частицы является другим, отдельным элементом реальности, таким, который существует в дополнение к самой частице. Нет частиц или волн, как полагала философия дополнительности Бора; в соответствии с Бомом, есть частицы и волны. Более того, Бом постулировал, что волновая функция частицы взаимодействует с самой частицей – она "направлят" частицу или "помыкает" ей – таким образом, что определяет ее последовательное движение. В то время, как этот подход полностью согласуется с успешными предсказаниями стандартной квантовой механики, Бом нашел, что изменения волновой функции в одном месте могут немедленно подтолкнуть частицу в удаленном месте, что явно обнаруживает нелокальность его подхода. В эксперименте с двумя щелями, например, каждая частица двигается через одну щель или через другую, тогда как их волновые функции двигаются через обе щели и допускают интерференцию. Поскольку волновая функция управляет движением частицы, не будет уж очень удивительным, что уравнения показывают, что частица охотнее приземляется там, где величина волновой функции велика, и она неохотно приземляется там, где последняя мала, что объясняет данные на Рис. 4.4. В подходе Бома нет отдельного этапа коллапса волновой функции, поскольку, если вы измеряете положение частицы и находите ее здесь, это в самом деле место, возле которого она была моментом раньше, чем измерение имело место.

Четвертый подход, разработанный итальянскими физиками Джанкарло Жирарди, Альберто Римини и Туллио Вебером, предпринял смелые действия по модификации уравнения Шредингера неким хитрым способом, что приводит в почти любом эффекте к "обычной" эволюции волновой функции индивидуальной частицы, но имеет драматическое влияние на квантовую эволюцию, когда это применяется к "большим" повседневным объектам. Предложенная модификация полагает, что волновые функции в своей основе нестабильны; даже без вмешательства, которое предпринимает исследователь, рано или поздно каждая волновая функция коллапсирует по своему собственному желанию к пикообразной форме. Для индивидуальной частицы Жирарди, Римини и Вебер постулировали, что коллапс волновой функции происходит спонтанно и хаотично, возникая, в среднем, только раз за каждый миллиард лет или около того.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_10" \o ) Это настолько редко, что это вносит только очень слабое изменение в обычное квантовомеханическое описание индивидуальной частицы, и это хорошо, поскольку квантовая механика описывает микромир с беспрецедентной точностью. Но для больших объектов, таких как экспериментатор и его оборудование, которые имеют миллиарды и миллиарды частиц, частота будет настолько выше, что в мельчайшую долю любой заданной секунды постулированный спонтанный коллапс произойдет, по меньшей мере, с одной отдельной частицей, заставив ее волновую функцию схлопнуться. И, как утверждали Жирарди, Римини, Вебер и другие, запутанная природа всех индивидуальных волновых функций в большом объекте обеспечивает, что этот коллапс инициирует разновидность квантового эффекта домино, при котором волновые функции всех составляющих частиц тоже коллапсируют. Так как это происходит в короткую долю секунды, предлагаемая модификация обеспечивает, что большие объекты, по существу, всегда находятся в одной определенной конфигурации: показания измерительного оборудования всегда указывают на одну определенную величину; Луна всегда находится в одном определенном положении в небе; эксперименты внутри мозга всегда дают одно определенное ощущение; коты всегда или мертвы или живы.

Каждый из этих подходов, равно как и ряд других, которые мы не хотим обсуждать, имеет своих сторонников и противников. Подход "волновой функции как знания" ловко обходит проблему коллапса волновой функции путем отрицания какой-либо реальности волновых функций, сводя их вместо этого всего лишь к способам описания того, что мы знаем. Но почему, спросит противник, фундаментальная физика должна быть так тесно связана с человеческой осведомленностью? Если мы здесь не наблюдаем мир, волновые функции никогда не будут коллапсировать или вообще сама концепция волновой функции не будет существовать? Разве вселенная была совершенно другим местом до того, как на планете Земля развилось человеческое сознание? Что если вместо человеческих экспериментаторов наблюдателями являются только мыши, или муравьи, или амебы или компьютеры? Будет ли изменение в их "знании" адекватно ассоциироваться с коллапсом волновой функции?[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_11" \o )

Напротив, многомировая интерпретация избегает самого понятия коллапса волновой функции, поскольку в этом подходе волновые функции не схлопываются. Но ценой за это является чудовищное разрастание вселенных, это многие противники находят нетерпимо непомерным.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_12" \o ) Подход Бома также избегает коллапса волновой функции; но, утверждают его противники, допуская независимую реальность как частиц, так и волн, теория испытывает недостаток экономичности. Более того, справедливо утверждают противники, в формулировке Бома волновые функции могут оказывать влияние быстрее-чем-свет на частицы, которые они подталкивают. Сторонники замечают, что недовольство создателем в лучшем случае субъективно, и последнее согласуется с нелокальностью Белла, оказывающейся неизбежной, так что критика также не убедительна. Тем не менее, вообще то неоправданно, подход Бома никогда не становился модным.[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_13" \o ) Подход Жирарди-Римини-Вебера работает с коллапсом волновой функции непосредственно через изменения уравнений для включения нового спонтанного механизма схлопывания. Но, отмечают противники, тут все еще нет и намека на экспериментальное подтверждение, поддерживающее предложенную модификацию уравнения Шредингера.

Исследовательский поиск твердой и полностью прозрачной связи между формализмом квантовой механики и опытом повседневной жизни будет, несомненно, продолжаться в течение некоторого времени до готовности, и тяжело сказать, если это вообще будет иметь место, который из известных подходов в конечном счете добьется согласия большинства. Если бы физики сегодня проголосовали, я не думаю, что нашелся бы несомненный фаворит. К несчастью, экспериментальные данные могут оказать ограниченную помощь. Хотя предложение Жирарди-Римини-Вебера делает предсказания, которые могут в определенных ситуациях отличаться от стандартной квантовой механики с ее этапом один/этапом два, отклонения слишком малы, чтобы их можно было зафиксировать современной технологией. Ситуация с другими тремя предложениями еще хуже, поскольку они еще более решительно препятствуют экспериментальной верификации. Они полностью согласуются со стандартным подходом, так что каждое дает одинаковые предсказания для вещей, которые могут быть подвергнуты наблюдению и измерены. Они отличаются только в отношении того, что происходит за кулисами, если происходит. Что означает, они отличаются только в отношении того, что квантовая механика содержит в себе как лежащую в основе природу реальности.

Даже если проблема квантовых измерений остается нерешенной, на протяжении последних нескольких десятилетий в разработке находилась система взглядов, которая, хотя все еще неполная, имеет широко распространенную поддержку как перспективная составляющая любого жизнеспособного решения. Она называется *декогерентность*.

Декогерентность и квантовая реальность

Когда вы впервые сталкиваетесь с вероятностным аспектом квантовой механики, естественной реакцией является подумать, что это не более экзотично, чем вероятности, которые возникают при подбрасывании монетки или вращении рулетки. Но когда вы знакомитесь с квантовой интерференцией, вы осознете, что вероятность входит в квантовую механику намного более фундаментальным образом. В повседневных примерах различные результаты – орел против решки, красное против черного, один лотерейный номер против другого – объясняются вероятностями с пониманием, что тот или иной результат определенно произойдет и что каждый результат является конечным продуктом независимой, определенной истории. Когда монета подбрасывается, временами вращательное движение таково, что прямо с броска выходит орел, а временами таково, что прямо с броска выходит решка. Вероятностью 50 на 50 мы обозначаем, что каждый исход относится не просто к конечному результату – орел или решка – но также к истории, которая привела к каждому результату. Половина возможных способов, которыми вы можете подбросить монету, приведут к орлу, а половина к решке. Сами истории, однако, являются полностью разделенными, изолированными альтернативами. Нет смысла интересоваться, в каких различных движениях монеты альтернативы усиливают друг друга, а в каких гасят. Все они независимы.

Но в квантовой механике ситуация другая. Альтернативные пути, по которым электрон может следовать через две щели к детектору не есть отдельные, изолированные истории. Возможные истории смешиваются, чтобы произвести наблюдаемый результат. Некоторые пути усиливают друг друга, тогда как другие уничтожают друг друга. Такая квантовая интерференция между различными возможными историями отвечает за картину светлых и темных полос на детекторном экране. Так что вопиющее различие между квантовым и классическим представлением о вероятности заключается в том, что первое предрасполагает к интерференции, а последнее нет.

Декогерентность является широко распространенным явлением, которое формирует мост между квантовой физикой малого и классической физикой не столь уж малого через подавление квантовой интерференции – это значит, через резкое уменьшение основного различия между квантовыми и классическими вероятностями. Важность декогерентности была осознана давно, еще в ранние времена квантовой теории, но ее современное возрождение отсчитывается от плодотворной статьи немецкого физика Дитера Зея в 1970 году,[[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_14" \o ) и с тех пор разрабатывалось многими исследователями, включая Эрика Йоса, тоже из Германии, и Войцеха Цурека из Лос-Аламосской Национальной Лаборатории в Нью-Мексико.

Идея такова. Когда уравнение Шредингера применяется в простой ситуации, такой как отдельный изолированный фотон, проходящий через экран с двумя щелями, оно вызывает известную интерференционную картину. Но тут имеются две весьма специфических особенности лабораторного примера, которые не характеризуют события реального мира. Первая, вещи, с которым мы сталкиваемся в повседневной жизни, больше и более сложны, чем отдельный фотон. Вторая, вещи, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, не изолированы: они взаимодействуют с нами и с окружающей средой. Книга, находящаяся сейчас в ваших руках, подвергается контакту с человеком и, более общо, постоянно подергается ударам фотонов и молекул воздуха. Более того, поскольку сама книга сделана из многих молекул и атомов, эти постоянно дрожащие составляющие непрерывно отскакивают друг от друга. То же самое справедливо для стрелок измерительных приборов, для котов, для человеческих мозгов и просто для всего, с чем вы сталкиваетесь в повседневной жизни. На астрофизическом масштабе Земля, Луна, астероиды и другие планеты непрерывно бомбардируются фотонами от Солнца. Даже частичка пыли, плавающая в темноте внешнего пространства подвергается непрерывным толчкам от низкоэнергетических микроволновых фотонов, которые распространились по пространству через короткое время после Большого взрыва. Итак, чтобы понять, что квантовая механика говорит о событиях реального мира, – в противоположность чистым лабораторным экспериментам, – мы должны применить уравнение Шредингера к этим более сложным "грязным" ситуациям.

По существу, тем, что подчеркнул Зей и его работа вместе со многими другими, кто двигался следом, было показано нечто совершенно удивительное. Хотя фотоны и молекулы воздуха слишком малы, чтобы оказывать любой существенный эффект на движение большого объекта вроде книги или кота, они в состоянии сделать кое-что другое. Они непрерывно "подталкивают" волновую функцию большого объекта или, говоря на языке физики, они возмущают ее когерентность: они размазывают ее упорядоченную последовательность пиков, следующих за впадинами, следующими за пиками. Это критично, поскольку упорядоченность волновой функции является центральным свойством для генерирования интерференционных эффектов (см. Рис. 4.2). Итак, почти как добавление маркирующих приборов в эксперимент с двумя щелями размазывает результирующую волновую функцию и поэтому размывает интерференционные эффекты, постоянная бомбардировка объектов составляющими их окружающей среды также размывает возможность интерференционных явлений. С другой стороны, раз уж квантовая интерференция больше невозможна, вероятности, присущие квантовой механике, для всех практических целей точно подобны вероятностям, присущим подбрасываемой монете и вращающейся рулетке. Раз уж декогерентность окружающей среды размазывает волновую функцию, экзотическая природа квантовых вероятностей растворяется в более привычных вероятностях повседневной жизни.[[15]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_7_15" \o ) Это предполагает разрешение загадки квантового измерения, которое, если осуществится, будет поистине одной из лучших вещей, на которые мы можем надеяться. Я сначала опишу его в наиболее оптимистичном свете, а затем сделаю акцент на том, что все еще требует доработки.

Если волновая функция изолированного электрона показывает, что он имеет, скажем, 50 процентов шансов находиться здесь и 50 процентов шансов находиться там, мы должны интерпретировать эти вероятности, используя полностью отработанное предсказание квантовой механики. Поскольку обе альтернативы могут обнаружиться смешанными и генерировать интерференционную картину, мы должны думать и них как о реальных в равной степени. На неточном языке: имеется ощущение, что электрон находится в обоих положениях. Что случится теперь, если мы измерим положение электрона неизолированными лабораторными инструментами обычного размера? Ну, в соответствии с неопределенностью местонахождения электрона стрелка инструмента имеет 50 процентов шансов указать на эту величину и 50 процентов шансов указать на ту величину. Но вследствие декогерентности стрелка не будет находиться в призрачной смеси, указывая на обе величины; вследствие декогерентности мы можем интерпретировать эти вероятности в обычном, классическом, повседневном смысле. Точно как монета имеет 50 процентов шансов упасть орлом и 50 процентов шансов упасть решкой, но падает или орлом или решкой, стрелка прибора имеет 50 процентов шансов указать на эту величину и 50 процентов шансов указать на ту величину, но она определенно укажет на одну или на другую.

Сходные рассуждения применяются для всех других сложных неизолированных объектов. Если квантовые расчеты показывают, что кот, сидя в закрытом ящике, имеет 50 процентов шансов быть мертвым и 50 процентов шансов быть живым – поскольку имеется 50 процентов шансов, что электрон ударится в механизм мины-ловушки, который подвергнет кота действию ядовитого газа, – то декогерентность означает, что кот не будет пребывать в некотором абсурдном смешанном состоянии и жизни и смерти. Хотя десятилетия жарких дебатов обсуждали проблемы вроде: Что означает для кота быть одновременно мертвым и живым? Как акт открытия ящика и наблюдения кота заставит его выбрать определенное состояние, смерти или жизни? Декогерентность означает, что задолго до того, как вы откроете ящик, окружающая среда уже завершила милиарды наблюдений, что, почти совсем без затрат времени, заменило все мистические квантовые вероятности на их менее мистических классических двойников. Задолго до того, как вы посмотрели внутрь, окружающая среда заставила кота принять одно единственное, определенное состояние. Декогерентность побуждает многие странности квантовой механики "утечь" из больших объектов, поскольку, бит за битом, квантовые странности удаляются прочь многочисленными сталкивающимися частицами из окружающей среды.

Тяжело представить более удовлетворительное решение проблемы квантового измерения. Будучи более реалистичными и отказавшись от упрощающего предположения, которое игнорирует окружающую среду, – упрощение, которое было критически важно, чтобы осуществить прогресс во время ранних разработок теории поля, – мы найдем, что квантовая механика имеет встроенное решение. Человеческое сознание, человеческие экспериментаторы и человеческие наблюдения не играют больше специальной роли, поскольку они (мы!) будут просто элементами окружающей среды, подобными молекулам воздуха и фотонам, которые могут взаимодействовать с данной физической системой. Также больше не будет разрыва в виде этапа один/этапа два между эволюцией объектов и экспериментатором, который их измеряет. Все сущее – наблюдаемое и наблюдатель – находятся на одинаковом основании. Все сущее – наблюдаемое и наблюдатель – подчиняется в точности тем же самым квантовомеханическим законам, как установлено уравнением Шредингера. Акт измерения больше не является специальным; он просто является одним из особых примеров контакта с окружающей средой.

Это оно? Декогерентность разрешила проблему квантового измерения? Декогерентность несет ответственность за волновые функции, закрывая дверь всем, кроме одного, потенциальным исходам, к которым они могут привести? Некоторые так думают. Исследователи вроде Роберта Гриффитса из Карнеги Меллон, Роланда Омнеса из Орси, нобелевского лауреата Мюррея Гелл-Манна из института Санта-Фе, и Джима Хартли из Калифорнийского университета в Санта Барбаре сделали большой прогресс и утверждают, что они разработали декогерентность в полной системе (названной декогерентными историями), которая решает проблему измерения. Другие, вроде меня, заинтригованы, но еще полностью не убеждены. Вы видите, что сила декогерентности в том, что она успешно удаляет искусственный барьер, установленный Бором между большими и малыми физическими системами, делая все сущее подверженным одинаковым квантовомеханическим формулам. Это важный прогресс и, я думаю, Бор нашел бы его удовлетворительным. Хотя нерешенная проблема квантового измерения никогда не мешала способности физиков согласовывать теоретические расчеты с экспериментальными данными, она привела Бора и его коллег к озвучиванию квантовомеханической системы взглядов с некоторыми очевидно неуклюжими свойствами. Многие находят, что система взглядов, нуждающаяся в размытых словах о коллапсе волновой функции или нечетком определении "больших" систем, соответствующих области классической физики, лишена силы. В значительных пределах, приняв во внимание декогерентность, исследователи перевели эти смутные идеи в разряд необязательных.

Однако, ключевая проблема, которую я обошел в обсуждении выше, заключается в том, что даже если декогерентность подавляет квантовую интерференцию и отсюда убеждает причудливые квантовые вероятности быть похожими на их привычных классических двойников, *каждый потенциальный результат, воплощенный в волновой функции, все еще соперничает за реализацию*. Так что мы все еще остаемся в неведении, какой результат "победит" и куда "уйдут" другие возможности, когда это реально произойдет. Когда подбрасывается монета, классическая физика дает ответ на аналогичный вопрос. Она говорит, что если вы исследуете способ, которым монета отправлена вращаться, с адекватной точностью, вы можете, в принципе, предсказать, упадет она орлом или решкой. При тщательном изучении, таким образом, определяется в точности один результат из деталей, которые вы первоначально наблюдали. То же самое нельзя сказать о квантовой физике. Декогерентность позволяет квантовым вероятностям быть интерпретированными почти как классические, но не обеспечивает всех точных деталей, которые выбирают из множества возможных исходов один для реализации на самом деле. Почти в духе Бора некоторые физики верят, что поиски таких объяснений, как возникает отдельный определенный результат, вводят в заблуждение. Эти физики утверждают, что квантовая механика, дополненная, чтобы включить декогерентность, является жестко сформулированной теорией, чьи предсказания вычисляют поведение лабораторных измерительных приборов. И, в соответствии с этой точкой зрения, это и есть цель науки. Попытки отыскать объяснение, что реально происходит, попытки побороться за понимание, как возник отдельный исход опыта, попытки поохотиться за уровнем реальности вне показаний детектора и распечаток компьютера выдаются за неоправданную интеллектуальную жадность.

Многие другие, включая меня, имеют иной взгляд на вещи. Объяснение данных – это то, чем должна заниматься наука. Но многие физики верят, что наука также должна включать в себя теории, подтверждающие данные и, используя их, идти дальше к добыванию максимального проникновения в природу реальности. Я сильно подозреваю, что изложенный подход сделал большой шаг в направлении полного решения проблемы измерений.

Так что, хотя имеется широкое согласие, что индуцированная окружающей средой декогерентность является важнейшей частью структуры, перебрасывающей мост над пропастью между квантовым и классическим, и хотя многие надеются, что эти рассмотрения однажды приведут к полной и неоспоримой связи между этими двумя областями, далеко не каждый убежден, что мост уже полностью построен.

Квантовая механика и стрела времени

Так где же мы находимся с проблемой измерений и что она означает для стрелы времени? Грубо говоря, имеется два класса предложений для связи здравого смысла с квантовой реальностью. В первом классе (например, волновая функция как знание, многомирье, декогерентность) уравнение Шредингера является сутью и концом всей истории; предложения просто обеспечивают различные способы интерпретации того, что уравнение предлагает для физической реальности. Во втором классе (например, Бом, Жирарди-Римини-Вебер) уравнение Шредингера должно быть дополнено другими уравнениями (в случае Бома уравнением, которое показывает, как волновая функция подталкивает окружающие частицы) или должно быть модифицировано (в случае Жирарди-Римини-Вебера путем включения нового явного механизма коллапса). Ключевой вопрос для определения воздействия на стрелу времени заключается в том, вводят ли эти предложения фундаментальную асимметрию между одним и другим направлением во времени. Вспомним, что уравнение Шредингера, равно как и уравнения Ньютона, Максвелла и Эйнштейна, рассматривают прямое и обратное направления во времени на полностью одинаковых основаниях. Это не обеспечивает направления (стрелы) для темпоральной эволюции. Меняют ли этот факт какие-либо из изложенных предложений?

В первом классе предложений шредингеровская система взглядов совсем не модифицируется, так что темпоральная симметрия сохраняется. Во втором классе темпоральная симметрия может уцелеть, а может и не уцелеть в зависимости от деталей. Например, подход Бома, предложившего новое уравнение, трактует будущее время и прошлое время на равных основаниях, так что не вводит асимметрии. Однако предложение Жирарди-Римини-Вебера вводит механизм коллапса, который имеет выделенное направление во времени – "расколлапсирование" волновой функции, которая двигается из пикообразной формы к распределенной форме, не соответствует модифицированным уравнениям. Так что, в зависимости от предложения, квантовая механика вместе с разрешением загадки квантового измерения может или не может продолжать рассматривать каждое направление времени одинаково. Рассмотрим последствия каждой возможности.

Если симметрия времени сохраняется (как, я полагаю, и будет) все обоснования и все заключения последней главы могут быть проведены с минимальными изменениями и для квантовой области. Суть физики, которая инициировала наше обсуждение стрелы времени, заключалась в симметрии классической физики по отношению к обращению времени. В то время, как основной язык и система квантовой физики отличается от классической физики, – волновые функции вместо положений и скоростей; уравнение Шредингера вместо законов Ньютона, – симметрия по отношению к обращению времени всех квантовых уравнений обеспечивает, что трактовка стрелы времени будет неизменной. Энтропия в квантовом мире может быть определена почти также, как в классической физике при условии, что мы описываем частицы в терминах их волновых функций. И заключение, что энтропия должна всегда быть на подъеме, - возрастая как в направлении, которое мы называем будущим, так и в направлении, которое мы называем прошлым, – все еще будет держаться.

Так что мы приходим к той же головоломке, с которой мы столкнулись в Главе 6. Если мы принимаем наши наблюдения мира прямо сейчас как данные, как неопровержимые, и если энтропия должна возрастать как по направлению в будущее, так и по направлению в прошлое, как мы можем объяснить, что мир имеет вид, который он имеет, и как он будет последовательно разворачиваться во времени? И будут присутствовать те же две возможности: или все, что мы видим, неожиданно появилось в результате статистической флуктуации, наступление которой вы будете ожидать время от времени в вечной вселенной, которая растрачивает впустую подавляюще большую часть своего времени, будучи полностью разупорядоченной, или по некоторым причинам энтропия была поразительно низкой сразу после Большого взрыва и последние 14 миллиардов лет вещи медленно разворачивались и будут продолжать делать также и в будущем. Как и в Главе 6, чтобы избежать затруднений неверной памяти, записей и законов физики, мы сосредоточиваемся на второй альтернативе – низкоэнтропийном взрыве – и пытаемся объяснить, как и почему вещи начались в таком специальном состоянии.

Если, с другой стороны, симметрия времени потеряна, – если разрешение проблемы измерения, которое однажды станет общепризнанным, показывает фундаментально асимметричное рассмотрение будущего по отношению к прошлому в рамках квантовой механики, – это может очень хорошо обеспечить наиболее прямое объяснение стрелы времени. Может оказаться, например, что яйца разбиваются, но не соединяются обратно, потому что в отличие от того, что мы находили с использованием законов классической физики, существует решение полных квантовомеханических уравнений для разбивающегося яйца, а для собирающегося обратно нет. Обратный просмотр фильма о разбивающемся яйце тогда изобразит движение, которое не может произойти в реальном мире, что объясняет, почему мы никогда не видим его. И это должно быть так.

Возможно. Но даже если это, кажется, обеспечивает существенно иное объяснение стреле времени, в реальности оно может не быть настолько иным, как это кажется. Как мы подчеркивали в Главе 6, чтобы страницы *Войны и Мира* становились все более разупорядоченными, они должны сначала быть упорядоченными; для яйца чтобы стать неупорядоченным через разбивание, оно должно быть сначала упорядоченным, неиспорченным яйцом; для энтропии, чтобы возрастать по направлению в будущее, энтропия должна быть низкой в прошлом, так что вещи должны иметь потенциал, чтобы становиться неупорядоченными. Однако именно потому, что закон трактует прошлое и будущее различным образом, нет гарантии, что закон предписывает прошлому низкую энтропию. Закон может все еще подразумевать более высокую энтропию по направлению в прошлое (возможно, энтропия будет расти по направлению в прошлое и в будущее асимметрично), и даже возможно, что асимметричный во времени закон будет совсем неспособен сказать что-либо о прошлом. Последнее верно для предложения Жирарди-Римини-Вебера, одного из исключительных, асимметричных во времени предложений на рынке. Раз уж их механизм коллапса удался, нет способа отменить его – нет способа стартовать от коллапсировавшей волновой функции и эволюционировать к ее первоначальной распределенной форме. Детализированная форма волновой функции теряется в коллапсе, – она превращается в пик, – так что невозможно "восстановить", на что вещи были похожи в любой момент времени до того, как коллапс произошел.

Таким образом, даже если асимметричный во времени закон мог бы обеспечить частичное объяснение того, почему вещи разворачиваются в одном темпоральном порядке и никогда в обратном порядке, он должен был бы очень хорошо предусмотреть то же ключевое добавление, требуемое для симметричных во времени законов: объяснение того, почему энтропия была низкой в удаленном прошлом. Определенно, это верно для асимметричных во времени модификаций квантовой механики, которые были предложены до настоящего времени. Итак, исключая вариант, что возможные будущие открытия раскроют две особенности, которые одновременно я рассматриваю как маловероятные, – асимметричное во времени решение проблемы квантовых измерений, которое, дополнительно, гарантирует, что энтропия уменьшается по направлению в прошлое, – наши усилия объяснить стрелу времени привели нас еще раз назад к происхождению вселенной, теме следующей части книги.

Как прояснят эти главы, путь космологических рассмотрений идет через многие тайны к сердцу пространства, времени и материи. Так что в путешествии по направлению к современным космологическим взглядам на стрелу времени будет правильно не нестись через пейзаж, а скорее совершить обстоятельную прогулку через космическую историю.

**III Пространство-время и космология**

**8 О снежинках и пространстве-времени**

***СИММЕТРИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ КОСМОСА***

**Р**ичард Фейнман однажды сказал, что если ему надо было бы суммировать самое важное открытие современной науки в одном высказывании, он выбрал бы "Мир состоит из атомов". Когда мы осознаем, что так много в нашем понимании вселенной зависит от свойств и взаимодействий атомов, – от причин, по которым звезды светят, а небо голубое, до объяснения, почему вы чувствуете эту книгу в своих руках и видите эти слова своими глазами, – мы можем правильно оценить выбор Фейнмана для выделения квинтэссенции нашего научного наследия. Многие из сегодняшних ведущих ученых согласны, что если было бы предложено второе высказывание, они выбрали бы "Симметрия лежит в основе законов вселенной". На протяжении последних нескольких сотен лет в науке было много переворотов, но самые устойчивые открытия имеют общую характеристику: они определяют свойства естественного мира, которые остаются неизменными, даже когда он подвергается широкому ряду преобразований. Эти неизменяемые атрибуты отражают то, что физики называют симметриями, и они играют все более важную роль во многих крупных достижениях. Это обеспечивает достаточную очевидность, что симметрия – во всех ее таинственных и тонких проявлениях – проливает мощный свет на темноту, где истина ожидает открытия.

Фактически, мы увидим, что история вселенной является в значительной степени историей симметрии. Самые стержневые моменты в эволюции вселенной были те, в которых равновесие и порядок внезапно изменялись, создавая космические арены, качественно отличные от арен предшествующих эпох. Современная теория придерживается точки зрения, что вселенная прошла через несколько таких переходов на протяжении ее самых ранних моментов и что все, с чем мы когда-либо сталкиваемся, является материальным следом более ранней, более симметричной космической эпохи. Но имеется даже еще более великий смысл, метасмысл, в котором симметрия лежит в сердцевине эволюционирующего космоса. Само время тесно сплетено с симметрией. Как станет ясно, практический скрытый смысл времени как меры изменения, точно так же как само существование разновидности космического времени, которое позволяет нам осмысленно говорить о вещах вроде "возраста и эволюции вселенной как целого", чувствительно зависит от аспектов симметрии. И когда ученые исследуют эволюцию, бросая взгляд назад к истокам в поиске правильной природы пространства и времени, симметрия оказывается самым устойчивым правилом, обеспечивающим проникновение в суть и ответы, которые другим способом могли бы быть и вовсе не достигнуты.

Симметрия и законы физики

Симметрия имеется в изобилии. Возьмите в вашу руку биллиардный шар и закрутите его тем или иным образом – приведите его во вращение вокруг любой оси, – и он будет выглядеть в точности тем же. Поместите плоскую круглую обеденную тарелку на подставку и закрутите ее относительно ее центра: она выглядит полностью неизменившейся. Осторожно поймайте недавно сформированную снежинку и поверните ее так, что каждый кончик переместится в положение, которое ранее занимал его сосед, и вы с трудом отметите, что вы вообще что-либо сделали. Возьмите букву "А", поверните ее относительно вертикальной оси, проходящей через ее вершину, и вы получите совершенный образ оригинала.

Как проясняют эти примеры, симметрии объекта являются манипуляциями над ним, настоящими или воображаемыми, при которых его внешний вид может не подвергаться изменениям. Чем больше видов передвижений может перенести объект без заметного эффекта для своего облика, тем более симметричным он является. Идеальная сфера имеет высшую симметрию, поскольку любое вращение вокруг ее центра, – используя вертикальную ось, горизонтальную ось или, фактически, любую ось, – оставляет ее выглядящей в точности так же, как и раньше. Куб менее симметричен, поскольку только вращения на углы по 90 градусов относительно осей, которые проходят через центр его граней (или комбинации таких вращений), оставляют его выглядящим неизменным. Конечно, если кто-то осуществит любое другое вращение, такое как на Рис. 8.1с, вы, очевидно, все еще сможете распознать куб, но вы также сможете ясно увидеть, что кто-то вмешивался в положение куба. В отличие от этого, симметрии похожи на самого ловкого вора; они являются манипуляциями, которые не оставляют каких-бы то ни было улик.

C:\0\tkankosmosa_files\idf501a495e

-----------------

C:\0\tkankosmosa_files\ic73c771d30   
  
C:\0\tkankosmosa_files\i9df94e8b60

-----------------

C:\0\tkankosmosa_files\i5593df41ef

-----------------

C:\0\tkankosmosa_files\i8d7b3c08be

- -

(а) (b) (с)

***Рис 8.1****Если куб, как в (а), поворачивается на 90 градусов один или несколько раз относительно осей, проходящих через через любую из своих граней, он выглядит не изменившимся, как в (b). Но любые другие вращения могут быть отслежены, как в (с).*

Все это были примеры симметрий объектов в пространстве. Симметрии, лежащие в основе известных законов физики, тесно связаны с этими симметриями, но сконцентрируемся на более абстрактном вопросе: какие манипуляции – еще раз, реальные или воображаемые, – могут быть проделаны над вами или над окружающей средой, что они совершенно не будут влиять на законы, которые объясняют наблюдаемые вами физические явления? Отметим, что есть такие симметрии, в соответствии с которыми манипуляции не требуют оставлять ваши наблюдения неизменными. Вместо этого мы интересуемся, изменяются ли законы, управляющие такими наблюдениями, – законы, которые объясняют, что вы видели ранее и что вы видите после некоторых манипуляций. Поскольку это центральная идея, рассмотрим ее в действии на некоторых примерах.

Представьте себе, что вы олимпийский гимнаст и в течение последних четырех лет вы старательно тренировались в вашем гимнастическом центре в Коннектикуте. Через кажущиеся бесконечными повторения вы довели каждое движение в ваших различных упражнениях до совершенства – вы знаете точно, как сильно надо оттолкнуться от равновесной перекладины для выполнения воздушного соскока, как высоко надо подпрыгнуть в упражнении на ковре для выхода с с двойным оборотом, как быстро надо крутнуться на брусьях, чтобы запустить ваше тело в совершенный соскок с двойным кульбитом. На самом деле, вашему телу с рождения присуще следование законам Ньютона, поскольку это именно те законы, которые управляют движением вашего тела. Теперь, когда вы, наконец, представили ваши упражнения перед переполнившей залы публикой в Нью Йорке, месте проведения самих олимпийских соревнований, вы рассчитываете на выполнение тех же самых законов, поскольку вы планируете выполнить ваши упражнения в точности так, как вы практиковались. Все, что мы знаем о законах Ньютона, придает веры вашей стратегии. Законы Ньютона не являются особыми в том или ином месте. Они не работают одним образом в Коннектикуте, а другим образом в Нью Йорке. Скорее, мы верим, что эти законы работают в точности тем же образом вне зависимости от того, где вы находитесь. Даже если вы измените местоположение, законы, которые управляют движением вашего тела, останутся так же не изменившимися, как это было с внешним видом биллиардного шара, который привели во вращение.

Эта симметрия известна как *трансляционная симметрия* или *трансляционная инвариантность*. Она применима не только к законам Ньютона, но так же и к законам электромагнетизма Максвелла, к СТО и ОТО Эйнштейна, к квантовой механике и, на самом деле, к любому предложению в современной физике, которое кто-либо принимает всерьез.

Тем не менее, отметим одну важную вещь. Детали ваших наблюдений и ощущений могут и иногда будут изменяться от места к месту. Если вы выполните выши гимнастические упражнения на Луне, вы обнаружите, что путь вашего тела в ответ на одинаковую силу прыжка вверх от ваших ног будет сильно отличаться. Но мы полностью понимаем это частное отличие, и оно уже встроено в сами законы. Луна менее массивна, чем Земля, так что она оказывает меньшее гравитационное притяжение; в итоге ваше тело путешествует по отличающейся траектории. И этот факт – что гравитационное притяжение тела зависит от его массы – является составной частью ньютоновского закона гравитации (точно так же, как и более утонченной ОТО Эйнштейна). Разница между вашими земными и лунными ощущениями не означает, что закон гравитации изменился от места к месту. Вместо этого, она (разница) просто отражает различие в окружающей среде, с которым закон гравитации уже согласован. Так что, когда мы говорим, что известные законы физики одинаково хорошо применимы в Коннектикуте или в Нью Йорке, – или, надо добавить, на Луне, – это будет верно, но надо держать в уме, что вам может понадобиться учесть особые отличия в окружающей среде, от которых зависят законы. Тем не менее, и это ключевое заключение, объяснительная система взглядов, которую обеспечивают законы, совсем не изменяется при изменении местоположения. Изменение в местоположении не требует от физика вернуться к грифельной доске и вывести новые законы.

*Законы физики не действуют таким образом*. Мы можем представить вселенную, в которой физические законы менялись бы так же, как местные и национальные правительства; мы можем представить вселенную, в которой законы физики, с которыми мы обычно имеем дело, ничего не говорили бы нам о законах физики на Луне, в галактике Андромеды, в Крабовидной туманности или на другой стороне вселенной. Фактически, мы не знаем с абсолютной определенностью, что законы, которые работают здесь, являются теми же самыми, которые работают в дальних уголках космоса. Но мы знаем, что если законы каким-то образом изменяются вне наших мест, это должно быть совсем вне наших мест, так как все более точные астрономические наблюдения обеспечивают все более убедительные свидетельства в пользу того, что законы однородны в пространстве, как минимум, в пространстве, которое мы можем видеть. Это подчеркивает поразительную силу симметрии. Мы связаны с планетой Земля и ее окрестностями. И все же, благодаря трансляционной симметрии мы можем получить знания о фундаментальных законах, работающих во всей вселенной, не покидая дома, поскольку законы, которые мы открываем здесь, являются и там законами.

*Вращательная симметрия* или *вращательная инвариантность* является близкой родственницей трансляционной инвариантности. Она основывается на идее, что каждое пространственное направление рассматривается на одинаковом основании с любым другим. Вид с Земли определенно не приводит вас к такому заключению. Когда вы смотрите вверх, вы видите вещи, весьма отличающиеся от того, что вы видите, когда вы смотрите вниз. Но, еще раз, это отражает детали окружения; это не характеризует сами лежащие в основании законы. Если вы покинули Землю и плаваете в пустом пространстве, далеко от любых звезд, галактик или иных небесных тел, симметрия становится очевидной: там нет ничего, что выделило бы одно особое направление в черной пустоте от другого. Они все равноправны. Вы не смогли бы дать идею, как удаленной в пространстве лаборатории, в которой вы сидите, исследовать свойства материи или сил, которые должны быть ориентированы таким или сяким образом, поскольку основополагающие законы нечувствительны к такому выбору. Если однажды ночью некий шутник изменит установки лабораторных гироскопов, вынудив их повернуться на некоторое число градусов относительно некоторой особой оси, вы должны ожидать, что это не будет иметь каких-либо следствий для законов физики, изучаемых вашими экспериментами. Каждое измерение всегда будет полностью подтверждать это ожидание. Так что мы уверены, что законы, которые управляют проводимыми вами экспериментами и объясняют найденные вами результаты, нечувствительны как к тому, где вы находитесь, – это трансляционная симметрия, – так и к тому, как вы сориентировались в пространстве – это вращательная симметрия.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_1" \o )

Как мы обсуждали в Главе 3, Галилей и другие были хорошо осведомлены о другой симметрии, которую законы физики должны соблюдать. Если ваша удаленная в пространстве лаборатория движется с постоянной скоростью, – безотносительно, двигаетесь ли вы со скоростью 5 миль в час туда или 100 000 миль в час сюда, – движение абсолютно не должно влиять на законы, которые объясняют ваши наблюдения, поскольку вы так же правы, как и соседний парень в утверждении, что вы покоитесь, а движется что-то другое. Эйнштейн, как мы видели, расширил эту симметрию совершенно неожиданным образом, включив скорость света среди наблюдателей, которая не будет зависеть от вашего движения или от движения источника света. Это был ошеломляющий ход, поскольку мы обычно сбрасываем особенности скорости объекта в мусорное ведро деталей окружающей среды, полагая, что наблюдаемая в общем случае скорость зависит от движения наблюдателя. Но Эйнштейн, видя поток симметрии света через щели в фасаде ньютоновской природы, вознес скорость света на уровень несокрушимого закона природы, объявив ее независимой от движения, как вид биллиардного шара не зависит от поворотов.

ОТО, следующее великое открытие Эйнштейна, была сразу поставлена на этот путь к теориям с еще большей симметрией. Точно так, как вы можете думать об СТО как о теории, устанавливающей симметрию среди всех наблюдателей, двигающихся друг относительно друга с постоянной скоростью, вы можете думать об ОТО как о теории, идущей на шаг дальше и устанавливающей симметрию также и среди всех ускоренных систем отсчета. Это экстраординарно, поскольку, как мы подчеркивали, хотя вы не можете чувствовать движение с постоянной скоростью, вы можете чувствовать ускоренное движение. И кажется, что законы физики, описывающие ваши наблюдения, должны быть непременно другими, когда вы ускоряетесь, чтобы оценить добавочные силы, которые вы чувствуете. Это так в случае ньютоновского подхода; его законы, первое, что появляется во всех учебниках по физике для первого года обучения, должны быть модифицированы, если используется ускоренный наблюдатель. Но через принцип эквивалентности, обсужденный в Главе 3, Эйнштейн обнаружил, что силы, которые вы чувствуете при ускоренном движении, неотличимы от сил, которые вы чувствуете в гравитационном поле подходящей интенсивности (чем больше ускорение, тем больше гравитационное поле). Так что, в соответствии с эйнштейновской, более утонченной точкой зрения, законы физики не изменяются, когда вы ускоряетесь, до тех пор, пока вы включаете подходящее гравитационное поле в ваше описание окружения. ОТО рассматривает всех наблюдателей, даже тех, которые двигаются с произвольной непостоянной скоростью, одинаково, – они полностью симметричны, – поскольку каждый может утверждать, что он покоится при условии добавления особых сил, ощущаемых как влияние особых гравитационных полей. Отличия в наблюдениях между одним ускоренным наблюдателем и другим, следовательно, не являются больше удивительными и обеспечивают подтверждение изменения законов природы не больше, чем это делают отличия, которые вы найдете, когда выполните ваши гимнастические упражнения на Земле или на Луне.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_2" \o )

Эти примеры несколько проясняют, почему многие рассматривают, и я подозреваю, Фейнман был бы согласен, что обширные симметрии, лежащие в основании законов природы, представляют вслед за атомной гипотезой второе место в списке обобщений наших наиболее глубоких научных достижений. Но это еще не все. В течение последних нескольких десятилетий физики вознесли принципы симметрии на высочайшую ступень лестницы объяснений. Когда вы сталкиваетесь с предлагаемым законом природы, естественный вопрос, который должен быть задан, таков: Почему это закон? Почему СТО? Почему ОТО? Почему максвелловская теория электромагнетизма?

Почему теория Янга-Миллса сильных и слабых ядерных сил (которую мы коротко рассмотрим)? Один важный ответ таков, что эти теории делают предсказания, которые раз за разом подтверждаются точными экспериментами. Это, определенно, существенно для доверия, которое физики испытывают к теориям, но это оставляет за кадром нечто важное.

Физики также верят, что эти теории находятся на правильном пути, потому что в некотором трудно объяснимом смысле они ощущаются правильными, и идеи симметрии существенны в этом ощущении. Ощущается непосредственно, что во вселенной нет места, которое как-то специально выделено по сравнению с любым другим, так что физики доверяют утверждению, что трансляционаая симметрия должна быть среди симметрий законов природы. Ощущается непосредственно, что нет особого движения с постоянной скоростью, которое было бы как-то выделено по сравнению с любым другим, так что физики доверяют утверждению, что СТО, полностью охватывая симметрию между всеми наблюдателями, движущимися с постоянной скоростью, является существенной частью законов природы. Ощущается непосредственно, более того, что любая точка отсчета наблюдателя – безотносительно к возможному включению ускоренного движения – должна быть так же применима, как и любая другая, так что физики верят, что ОТО, простейшая теория, включающая эту симметрию, находится среди глубоких, истинных, управляющих природой законов. И, как мы скоро увидим, теории трех сил, кроме гравитации, – электромагнетизма, сильного и слабого ядерных взаимодействий, – основываются на других, в некоторой степени более абстрактных, но равно убедительных принципах симметрии. Так что симметрии природы являются не просто следствиями законов природы. С нашей современной точки зрения симметрии являются основаниями, с которых начинаются законы.

Симметрия и время

Кроме своей роли по формированию законов, управляющих силами природы, идеи симметрии существенны и для концепции самого времени. Никто пока не нашел ясное, фундаментальное определение времени, но, несомненно, часть роли времени в структуре космоса заключается в том, что оно является учетчиком изменения. Мы распознаем, что время пролетело, отмечая, что вещи теперь отличаются от того, какими они были ранее. Часовая стрелка на ваших часах указывает на другое число, солнце находится в другом положении на небе, страницы в вашем расплетенном экземпляре *Войны и мира* стали более разупорядоченными, углекислый газ, который вырвался из вашей бутылки колы, еще более разлетелся, – все это делает очевидным, что вещи изменились, и время есть то, что обеспечивает возможность, чтобы такие изменения осуществились. Перефразируя Джона Уилера, время есть способ природы сохранять все – то есть, все изменения – от внезапных происшествий.

Существование времени, таким образом, зависит от отсутствия особой симметрии: вещи во вселенной должны изменяться от момента к моменту для нас, даже чтобы определить понятие "от момента к моменту", что полностью соотносится с нашей интуитивной концепцией. Если имеется полная симметрия между тем, каковы вещи сейчас, и тем, каковы они тогда, если изменение от момента к моменту не более значительно, чем изменения в поворачивающемся биллардном шаре, время, как мы себе его обычно представляем, не будет существовать.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_3" \o ) Это не значит, что описание пространства-времени, схематически проиллюстрированное на Рис. 5.1, не будет существовать; будет. Но, поскольку все будет полностью однородно вдоль оси времени, не будет смысла, в котором вселенная эволюционирует или изменяется. Время будет абстрактным свойством такой арены реальности, – четвертым измерением в пространственно-временном континууме, – но, с другой стороны, оно будет нераспознаваемым.

Тем не менее, даже если существование времени соотносится с отсутствием одной особой симметрии, его применение на космических масштабах требует от вселенной быть предельно связанной с другой симметрией. Идея проста и отвечает на вопрос, который мог появиться у вас при прочтении Главы 3. Если теория относительности учит нас, что прохождение времени зависит от того, как быстро вы двигаетесь и от гравитационного поля, в котором вы оказались погруженным, то что должно означать, когда астрономы и физики говорят о целой вселенной, имеющей особый определенный возраст – возраст, который в наши дни оценивается около 14 миллиардов лет? Четырнадцать миллиардов лет в соответствии с чем? Четырнадцать миллиардов лет по каким часам? Придут ли живущие в удаленной туманности Головастика тоже к заключению, что вселенной 14 миллиардов лет, и, если так, что будет гарантировать, что их часы тикали синхронно с нашими? Ответ зависит от симметрии – симметрии в пространстве.

Если бы ваши глаза могли видеть свет, чья длина волны значительно длиннее, чем у оранжевого или красного света, вы были бы не только в состоянии видеть внутренности вашей микроволновой печки в момент ее включения, когда вы нажимаете кнопку старта, но вы также видели бы слабое и почти однородное зарево, распространенное через то, что другие из нас воспринимают как темное ночное небо. Более сорока лет назад ученые открыли, что вселенная наполнена микроволновым излучением, – светом с большой длиной волны, – которое является холодным остатком жарких условий сразу после Большого взрыва.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_4" \o ) Эта космическая микроволновая фоновая радиация совершенно безопасна. Раньше она была в огромной степени более горячая, но в ходе эволюции и расширения вселенной радиация равномерно снижала концентрацию и охлаждалась. Сегодня ее температура всего около 2,7 градуса выше абсолютного нуля, и ее самое большое проявление в качестве источника неприятностей заключается в ее вкладе в небольшую часть "снега", который вы видите на вашем телевизоре, когда вы отключили кабель и настроились на станцию, которая не вещает в эфир.

Но эти слабые радиопомехи дают астрономам то же, что кости тираннозавров дают палеонтологам: окно в ранние эпохи, которое является ключевым для реконструкции того, что происходило в удаленном прошлом. Существенное свойство радиации, обнаруженное точными спутниковыми измерениями на протяжении последнего десятилетия, это то, что она предельно однородна. Температура излучения в одной части неба отличается от температуры в другой части неба менее, чем на тысячную долю градуса. На земле такая симметрия сделала бы телевизионные каналы погоды неинтересными. Если в Джакарте 85 градусов (Фаренгейта), то вы бы немедленно знали, что температура между 84,999 градусов и 85,001 градусов держится в Аделаиде, Шанхае, Кливленде, Анкоридже и, коли на то пошло, где угодно еще. В отличие от этого, на космических масштабах неоднородность температуры излучения фантастически интересна, так как она обеспечивает два критически важных наблюдения.

Первое, она обеспечивает наблюдаемое доказательство того, что на своих ранних этапах вселенная не была заселена большими, слипшимися, высокоэнтропийными скоплениями материи, такими как черные дыры, поскольку такое неоднородное окружение должно было бы оставить неоднородный отпечаток на излучении. Вместо этого однородность температуры радиации подтверждает, что молодая вселенная была однородной; и, как мы видели в Главе 6, когда важна гравитация, – как это было в плотной ранней вселенной, – однородность означает низкую энтропию. Это хорошая вещь, поскольку наше обсуждение стрелы времени сильно зависело от вселенной, стартовавшей с низкой энтропией. Одной из наших целей в этой части книги является зайти в объяснении этого наблюдения так далеко, насколько мы сможем, – мы хотим понять, как могло возникнуть однородное, низкоэнтропийное, весьма невероятное окружение ранней вселенной. Это позволит нам сделать большой шаг к пониманию причин стрелы времени.

Второе, хотя вселенная эволюционировала после Большого взрыва, в среднем эволюция должна была быть почти одинаковой в разных местах космоса. Ввиду того, что температуры здесь, и в галактике Вихря, и в кометном скоплении, и где угодно еще согласуются с точностью до четвертого знака после запятой, физические условия в каждом регионе пространства должны эволюционировать после Большого взрыва существенно одинаковым образом. Это важный вывод, но вы должны правильно его интерпретировать. Быстрый взгляд на ночное небо определенно показывает разнообразный космос: планеты и звезды различных сортов разбросаны там и тут по пространству. Суть, однако, в том, что когда мы анализируем эволюцию целой вселенной, мы рассматриваем макроскопическую перспективу, которая усредняется по этим "мелкомасштабным" отклонениям, и крупномасштабные средние оказываются всегда полностью однородными. Подумайте о стакане воды. На масштабе молекул вода в высшей степени неоднородна: здесь имеется молекула Н2О, затем, после простора пустого пространства, другая молекула Н2О, и так далее. Но если мы усредним по мелкомасштабной молекулярной комковатости и исследуем воду на "больших", повседневных масштабах, мы можем увидеть невооруженным глазом, что вода в стакане выглядит совершенно однородной. Неоднородность, которую мы видим, когда пристально вглядываемся в небо, подобна микроскопическому виду на отдельную молекулу Н2О. Но, как и в случае стакана воды, когда вселенная изучается на достаточно больших масштабах, – масштабах порядка сотен миллионов световых лет, – она становится предельно однородной. Однородность излучения является, таким образом, "ископаемым" свидетельством однородности как законов физики, так и деталей окружающей среды везде в космосе.

Это заключение является великим следствием, поскольку однородность вселенной есть то, что позволяет нам определить концепцию времени, применимую для вселенной как целого. Если мы принимаем измерение изменений в качестве работающего определения истекшего времени, то однородность условий везде в пространстве является свидетельством однородности изменений везде в космосе, так что предполагает также и однородность прошедшего времени. Точно так же, как однородность земной геологической структуры позволяет геологу в Америке, и такому же в Африке, и другому в Азии прийти к согласию относительно возраста земной истории, однородность космической эволюции во всех местах пространства позволяет физику в галактике Млечного Пути, и такому же в галактике Андромеды, и другому в галактике Головастика прийти в целом к согласию по поводу возраста и истории вселенной. Конкретно, однородная эволюция вселенной означает, что часы здесь, часы в галактике Андромеды и часы в галактике Головастика будут, в среднем, отсчитывать время примерно одинаковым образом. Таким образом, однородность пространства обеспечивает универсальную синхронизацию.

Поскольку я далеко отставил важные детали (такие как расширение пространства, освещаемое в следующей секции), обсуждение выделяет ядро проблемы: время располагается на распутье симметрии. Если вселенная имеет абсолютную темпоральную симметрию, – если она полностью неизменна, – будет тяжело определить даже, что означает время. С другой стороны, если вселенная не имеет симметрии в пространстве, – если, например, фоновое излучение было бы совершенно бессистемным, имея дико отличающуюся температуру в разных областях, – время с космологической точки зрения имело бы мало смысла. Часы в разных местах отсчитывали бы время с разным темпом, так что, если бы вы спросили, на что были похожи вещи, когда вселенной было 3 миллиарда лет, ответ зависел бы от того, на чьи часы вы посмотрели, чтобы увидеть, что эти 3 миллиарда лет истекли. Определение времени было бы затруднено. К счастью, наша вселенная не имеет так много симметрии, чтобы сделать время бессмысленным, но имеет достаточно симметрии, чтобы мы могли избежать таких сложностей, позволяя нам говорить о ее полном возрасте и ее полной эволюции сквозь время.

Итак, теперь обратим наше внимание на эту эволюцию и рассмотрим историю вселенной.

Растягивая ткань

История вселенной выглядит огромным объектом, но в рамках грубого, эскизного наброска является неожиданно простой и зависит в большой части от одного существенного факта: *вселенная расширяется*. Поскольку это является центральным элементом в разворачивании космической истории и, несомненно, является одним из наиболее глубоких человеческих открытий, рассмотрим коротко, как мы узнали, что это так.

В 1929 Эдвин Хаббл, используя 100-дюймовый телескоп в обсерватории Маунт-Вильсон в Пасадене, Калифорния, нашел, что пара дюжин галактик, которые он смог детектировать, все удаляются прочь.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_5" \o ) Фактически Хаббл нашел, что чем более удаленной является галактика, тем быстрее ее удаление. Чтобы дать представление о масштабах, более уточненные версии оригинальных наблюдений Хаббла (которые изучали тысячи галактик, используя в числе оборудования пространственный (орбитальный) телескоп имени Хаббла) показывают, что галактики, которые удалены от нас на 100 миллионов световых лет, удаляются со скоростью около 5,5 миллиона миль в час, те же, до которых 200 миллионов световых лет, удаляются в два раза быстрее, около 11 миллионов миль в час, а те, до которых 300 миллионов световых лет, улетают в три раза быстрее, около 16,5 миллионов миль в час, и так далее. Открытие Хаббла было шокирующим, поскольку господствовавшие научные и философские убеждения состояли в том, что вселенная должна быть на своих самых больших масштабах статической, бесконечной, фиксированной и неизменной. Но Хаббл одним ударом вдребезги разбил этот взгляд. И в удивительном слиянии теории и эксперимента ОТО Эйнштейна оказалась способной обеспечить превосходное объяснение открытию Хаббла.

На самом деле, вы можете не думать, что подход к объяснению может быть слишком сложным. Тем не менее, если вы ходили по заводу и видели, сколько сортов материалов неистово вылетают во всех направлениях, вы, вероятно, думали, что там произошел взрыв. Но если вы пропутешествуете назад вдоль путей, которым следует стружка металла и глыбы бетона, вы найдете их всех объединяющимися в месте, которое, вероятно, могло бы поспорить за звание источника взрыва. По тем же самым причинам, поскольку вид с Земли, – как свидетельствуют хаббловские и последующие наблюдения, – показывает, что галактики разлетаются, вы можете подумать, что наше положение в пространстве было местом древнего взрыва, который однородно разбросал сырой материал звезд и галактик. Проблема с этой теорией, однако, в том, что она выделяет один регион в пространстве – наш регион – как уникальный, поскольку делает его местом рождения вселенной. Будь это так, это повлекло бы за собой глубоко сидящую асимметрию: физические условия в областях, удаленных от изначального взрыва, – удаленных от нас, – были бы сильно отличающимися от условий здесь. Поскольку в астрономических данных нет подтверждений такой асимметрии и, более того, поскольку мы с большим подозрением относимся к антропоцентрическим объяснениям, смешанным с докоперниковским мышлением, требуется более изощренная интерпретация открытия Хаббла, одна из тех, в которых наше положение не занимает некоторое особое место в космическом порядке.

ОТО обеспечивает такую интерпретацию. С ОТО Эйнштейн нашел, что пространство и время являются эластичными, а не неподвижными, растягиваемыми, а не жесткими; и он обеспечил уравнения, которые точно говорят нам, как пространство и время откликаются на присутствие материи и энергии. В 1920е годы русский математик и метеоролог Александр Фридман и бельгийский священник и астроном Жорж Леметр независимо проанализировали уравнения Эйнштейна, когда те применены ко всей вселенной, и оба нашли кое-что поразительное. Точно так же, как гравитационное притяжение Земли предполагает, что бейсбольный мяч, запущенный высоко над принимающим, должен либо направляться дальше вверх, либо направляться вниз, но, определенно, не может остановиться (исключая отдельный момент, когда он достигает своей высшей точки), Фридман и Леметр обнаружили, что гравитационное притяжение материи и излучения, распределенных по всему космосу, подразумевает, что ткань пространства должна или растягиваться или сжиматься, но что она не может пребывать с фиксированным размером. Фактически, это один из редких примеров, в которых метафора не только схватывает суть физики, но также и ее математическое содержание, поскольку, как оказалось, уравнения, управляющие высотой полета бейсбольного мяча над землей, почти идентичны уравнениям Эйнштейна, управляющим размером вселенной.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_6" \o )

Эластичность пространства в ОТО обеспечивает глубокий способ интерпретации открытия Хаббла. Вместо того, чтобы объяснять разбегающееся движение галактик космической версией взрыва на заводе, ОТО говорит, что в течение миллиардов лет пространство растягивается. И, раз уж оно разбухает, пространство растаскивает галактики друг от друга, почти как черные пятнышки на посыпанном маком пироге растаскиваются врозь, когда тесто поднимается в печи. Так что причина движения в разные стороны не во взрыве, который имел место внутри пространства. Вместо этого движение в разные стороны возникает из неослабевающего разбухания самого пространства.

Чтобы более полно ухватить эту ключевую идею, подумаем также о великолепно применимой для расширяющейся вселенной модели воздушного шара, которую физики часто используют (аналогия, которая может быть прослежена, как минимум, так же далеко назад, как веселый комикс, который вы можете увидеть в конечных комментариях[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_7" \o ), и который появился в заметке Датча в 1930 по итогам интервью с Виллемом де-Ситтером, ученым, который внес важный вклад в космологию). Эта аналогия уподобляет наше трехмерное пространство более легко визуализируемой двумерной поверхности сферического воздушного шара, как на Рис. 8.2а, который раздувается до все большего и большего размера. Галактики представляются многочисленными равномерно распространенными монетками (пенни с портретом Линкольна), приклеенными к поверхности шара. Отметим, что поскольку шар расширяется, все монетки удаляются друг от друга, обеспечивая простую аналогию тому, как расширяющееся пространство разносит в стороны все галактики.

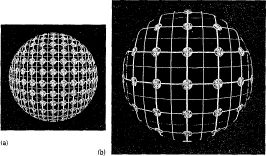
Важное свойство этой модели в том, что тут имеется полная симметрия среди монеток, поскольку вид, который наблюдает любой отдельный Линкольн, будет таким же, как и вид, который наблюдает любой другой Линкольн. Чтобы показать это, представьте, что вы сжимаетесь, ложась на монетку, и обозреваете все направления на поверхности шара (вспомним, что в этой аналогии поверхность шара представляет все пространство, так что смотреть вне поверхности шара не имеет смысла). Что вы будете наблюдать? Ну, вы увидите монетки, удаляющиеся от вас во всех направлениях, так как шар расширяется. А если вы ложитесь на другую монетку, что вы будете наблюдать? Симметрия гарантирует, что вы будете видеть те же самые вещи: монетки, разлетающиеся во всех направлениях. Этот ясный образ хорошо фиксирует наши убеждения, – при поддержке все более точных астрономических исследований, – что наблюдатель в любой из более чем 100 миллиардов галактик вселенной\*, пристально вглядывающийся в ее или его ночное небо через мощный телескоп, будет, в среднем, видеть образ, сходный с тем, что видим мы: окружающие галактики, удаляющиеся прочь во всех направлениях.

*(\*)"Имеются в виду, конечно, галактики наблюдаемой части вселенной. – (прим. перев.)"*

Итак, в отличие от взрыва на заводе внутри фиксированного, существующего заранее пространства, если движение в разные стороны возникает вследствие того, что само пространство растягивается, не нужна специальная точка, – ни специальная монетка, ни специальная галактика, – которая является центром расходящегося движения. Каждая точка – каждая монетка, каждая галактика – выступает полностью наравне с любой другой.

Вид из любого места кажется похожим на вид из центра взрыва: каждый Линкольн видит всех других Линкольнов удаляющимися прочь; наблюдатель, вроде нас, в любой галактике видит все другие галактики удаляющимися прочь. Но поскольку это верно для всех положений, не существует специального или уникального положения, которое было бы центром, из которого происходит расходящееся движение.

Более того, это объяснение не только качественно оценивает расходящееся движение галактик пространственно однородным способом, оно также объясняет количественные детали, найденные Хабблом и подтвержденные с большей точностью последующими наблюдениями. Как иллюстрируется на Рис. 8.2b, если воздушный шар разбухает в течение некоторого интервала времени, например, удваиваясь в размере, все пространственные расстояния будут также удвоены по величине: монетки, которые находились на расстоянии 1 дюйм, теперь будут на расстоянии 2 дюйма, монетки, которые находились на расстоянии 2 дюйма, теперь будут на расстоянии 4 дюйма, монетки, которые находились на расстоянии 3 дюйма, теперь будут на расстоянии 6 дюймов, и так далее. Так что в течение любого заданного временного интервала увеличение расстояний между двумя монетками пропорционально начальному расстоянию между ними.



***Рис 8.2****(а) Если равномерно распределенные монетки (1 пенни) приклеены к поверхности сферы, вид, который увидит каждый Линкольн, будет тем же самым, который увидит любой другой. Это согласуется с уверенностью, что вид из любой галактики во вселенной, в среднем, будет тем же самым, каким он будет из любой другой, (b) Если сфера расширяется, расстояния между всеми монетками увеличиваются. Более того, чем дальше монетки друг от друга разнесены на 8.2а, тем большее разделение они почувствуют из-за расширения в 8.2b.*

Это хорошо согласуется с измерениями, показывающими, что чем более удалена от данной точки отсчета галактика, тем быстрее она движется прочь от этой точки. Отметим, что ни одна монетка не была выделена как специальная, что также согласуется с нашей уверенностью, что во вселенной нет специальной галактики или центра расширения пространства.

 А поскольку большее увеличение расстояния за данный временной интервал означает большую скорость, монетки, которые удалены дальше друг от друга, разлетаются более быстро. В сущности, чем дальше находятся друг от друга две монетки, тем больше поверхности воздушного шара находится между ними и тем быстрее они разлетаются в стороны, когда шар раздувается. Применяя точно такие же рассуждения для объяснения пространства и содержащихся в нем галактик, мы получаем объяснение наблюдений Хаббла. Чем дальше находятся две галактики, тем больше пространства имеется между ними и тем быстрее они будут расталкиваться прочь одна от другой при раздувании пространства.

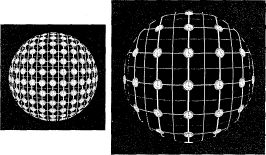
При объяснении наблюдаемого движения галактик через раздувание пространства, ОТО не только обеспечивает объяснение, что все местоположения в пространстве трактуются симметрично, но также одним сильным броском оцениваются все данные Хаббла. Этот вид объяснения является одним из настолько элегантных шагов за пределы ящика (в этом случае, шагом, который действительно использует "ящик" – то есть, пространство) для объяснения наблюдений с количественной точностью и хитрой симметрией, что физики описывают его как едва ли не слишком прекрасное, чтобы быть неправильным. По существу, в настоящее время имеется универсальное соглашение, что ткань пространства растягивается.

Время и расширяющаяся вселенная

Используя небольшую вариацию модели воздушного шара, мы можем теперь понять более точно, как симметрия в пространстве, даже если пространство расширяется, дает понятие времени, которое однородно применимо в любом месте космоса. Представив себе, что каждая монетка заменена на одинаковые часы, как на Рис. 8.3, мы знаем из теории относительности, что одинаковые часы отсчитывают время с различным темпом, если они подвергаются различным физическим воздействиям – различным движениям или различным гравитационным полям. Но простое, хотя ключевое наблюдение заключается в том, что полная симметрия среди всех Линкольнов на раздувающемся шаре переносится на полную симметрию среди всех часов. Все часы помещены в одинаковые физические условия, так что все тикают в точности с одинаковым темпом и фиксируют одинаковое количество прошедшего времени. Аналогично, в расширяющейся вселенной, в которой имеется высокая степень симметрии среди всех галактик, часы, которые двигаются вместе с той или иной галактикой, также должны тикать с одинаковым темпом и, отсюда, фиксировать одинаковое количество истекшего времени. Как может быть иначе? Каждые часы выступают наравне с любыми другими, находясь, в среднем, примерно в одинаковых физических условиях. Это опять показывает ошеломительную силу симметрии. Без каких-либо расчетов или детального анализа мы обнаружили, что однородность физического окружения, как это подтверждается однородностью микроволновой фоновой радиации и однородным распределением галактик в пространстве,[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_8" \o ) позволяет нам сделать заключение об однородности времени.

Хотя обоснование здесь проведено непосредственно, заключение может, тем не менее, сбить с толку. Поскольку галактики все разбегаются прочь по мере расширения пространства, часы, которые двигаются вместе с той или иной галактикой, также разбегаются прочь. И это не все, они двигаются друг относительно друга с гигантском диапазоне скоростей, определяемом гигантским диапазоном расстояний между ними. Не будет ли это движение вынуждать часы рассинхронизироваться, как нас учил Эйнштейн в СТО? По ряду причин ответ будет – нет; здесь приводим один особенно полезный способ подумать об этом.

Вспомним из Главы 3, что Эйнштейн открыл, что часы, которые двигаются через пространство различными способами, отсчитывают время с различными темпами (поскольку они переводят различные количества их движения через время в движение через пространство; вспомните аналогию с Бартом на его скейтборде, сначала двигающимся на север, а затем переводящим некоторое количество своего движения на северо-восток).



***Рис 8.3****Часы, которые двигаются вместе с галактиками, – чье движение, в среднем, возникает только из расширения пространства, – обеспечивают универсальный космический хронометраж. Они остаются синхронизированными, даже если они отделены друг от друга, поскольку они двигаются с пространством, но не через пространство.*

Но часы, которые мы сейчас обсуждаем, совсем не двигаются через пространство. Точно так же, как каждая монетка приклеена к одной точке воздушного шара и двигается относительно других монет только вследствие раздувания поверхности шара, каждая галактика занимает один регион в пространстве и, большей частью, двигается относительно других галактик только вследствие расширения пространства. А это означает, что по отношению к самому пространству все часы в действительности стационарны, так что они отсчитывают время идентично. Это именно те часы – часы, чье движение происходит только от расширения пространства, – которые обеспечивают синхронизированные космические часы, используемые для измерения возраста вселенной.

Отметим, конечно, что вы свободны взять ваши часы, прыгнуть на борт ракеты и пронестись через пространство таким образом и с такой громадной скоростью, что вы подвергнитесь существенному движению в дополнение к космическому течению от расширения пространства. Если вы это сделаете, ваши часы будут тикать с другим темпом и вы обнаружите другую продолжительность истекшего после Большого взрыва времени. Это совершенно допустимая точка зрения, но она полностью индивидуалистична: измеренное истекшее время тесно связано с историей вашего особого местоположения и состояния движения. Когда астрономы говорят о возрасте вселенной, тем не менее, они стремятся к чему-то универсальному, – они стремятся измерить то, что имеет одинаковое значение где угодно. Однородность изменений сквозь пространство обеспечивает способ это сделать.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_9" \o )

Фактически, однородность микроволнового фонового излучения обеспечивает готовый тест для того, действительно ли вы двигаетесь с космическим течением пространства. Вы видите, хотя микроволновое излучение однородно по пространству, если вы предпримете дополнительное движение вне того, которое связано с космическим течением пространственного расширения, вы не будете наблюдать излучение однородным. Точно так же, как гудок мчащегося автомобиля имеет большую высоту, когда автомобиль приближается, и меньшую высоту, когда автомобиль удаляется, если вы несетесь сквозь пространство на космическом корабле, пики и впадины микроволн, направленные во фронт вашего корабля будут падать с большей частотой, чем они же, двигающиеся в направлении кормы вашего корабля. Более высокая частота микроволн переводится в более высокую температуру, так что вы найдете, что излучение в направлении вашего полета будет чуть теплее, чем излучение, достигающее вас сзади. Когда это производится здесь на "космическом корабле" Земля, астрономы находят микроволновой фон немного теплее в одном направлении в пространстве и немного холоднее в противоположном направлении. Причина в том, что Земля не только движется вокруг Солнца, а Солнце движется вокруг галактического центра, но и вся галактика Млечный Путь имеет небольшую скорость в дополнение к космическому расширению, направленную к звездному скоплению Гидры. Только когда астрономы внесли поправки на влияние этих относительно слабых дополнительных движений на микроволны, мы получили, что излучение проявляет истинную однородность температуры между одной частью неба и другой. Это та однородность, та общая симметрия между одним положением и другим, которая позволяет нам осмысленно говорить о времени, когда мы описываем всю вселенную.

Тонкие особенности расширяющейся вселенной

Несколько тонких моментов в нашем объяснении космического расширения достойны выделения. Первое, вспомним, что в аналогии с воздушным шаром какую-либо роль играет только поверхность шара – поверхность, которая всего лишь двумерна (каждое положение может быть отмечено заданием двух чисел, аналогичных широте и долготе на Земле), тогда как пространство, которое мы видим, когда обозреваем окружение, имеет три измерения. Мы использовали эту модель с меньшим числом измерений, поскольку она сохраняет концепции, существенные для правильной, трехмерной ситуации, но намного легче поддается визуализации. Важно иметь это в виду, особенно если вы намеревались сказать, что в модели воздушного шара имеется особая точка: центральная точка внутри шара, удаляясь от которой двигается вся резиновая поверхность. Хотя это наблюдение верное, оно бессмысленное в аналогии с шаром, поскольку любая точка вне поверхности шара не имеет значения. Поверхность шара представляет все пространство; точки, которые не лежат на поверхности шара являются просто не относящимися к делу добавками модели и не соответствуют какому-либо положению во вселенной.\*

*(\*)"Выйти за пределы двумерной аналогии с поверхностью шара и получить сферическую трехмерную модель легко математически, но тяжело на картинке даже для профессиональных математиков и физиков. Вы можете попытаться подумать о твердом трехмерном шаре, похожем на шар для боулинга, но без дырок для пальцев. Однако, это неудовлетворительный образ. Мы хотим, чтобы все точки в модели рассматривались на одинаковом основании, поскольку мы верим, что каждое местоположение во вселенной (в среднем) в точности похоже на любое другое. Но шар для боулинга имеет все виды отличающихся точек: некоторые находятся на внешней поверхности, некоторые вложены во внутренность, одна находится прямо в центре. Напротив, точно так же, как двумерная поверхность воздушного шара окружает трехмерную сферическую область (содержащую воздух внутри шара), приемлемая сферическая трехмерная форма должна окружать четырехмерную сферическую область. Так что удовлетворительной формой является трехмерная сферическая поверхность в четырехмерном пространстве. Но если вы уже оставили ваши попытки представить это, сделайте то же самое, что делают все профессионалы: воспользуйтесь легко представимыми низкоразмерными аналогиями. Они содержат почти все существенные особенности. Чуть дальше мы рассмотрим трехмерное плоское пространство, в противоположность круглой форме сферы, и это плоское пространство можно представить."*

Второе, если скорость удаления становится все больше и больше для галактик, которые удалены все дальше и дальше от нас, не означает ли это, что галактики, которые достаточно удалены будут убегать от нас со скоростью большей, чем скорость света. Ответ ошеломляющий – определенно да. Однако тут нет конфликта с СТО. Почему? Ну, это тесно связано с причиной, по которой часы, разлетающиеся вследствие космического течения пространства, остаются синхронизированными. Как мы подчеркивали в Главе 3, Эйнштейн показал, что ничто не может двигаться через пространство быстрее, чем свет. Но галактики, в среднем, совсем еле-еле двигаются через пространство. Их движение едва ли не полностью связано с растягиванием самого пространства. И теория Эйнштейна не запрещает пространству расширяться таким образом, что две точки – две галактики – удаляются друг от друга со скоростью большей, чем скорость света. Его результат только ограничивает скорость, из которой удалена составляющая, связанная с пространственным расширением, скорость, превышающая ту, которая возникает из пространственного расширения. Наблюдения подтверждают, что для типичных галактик, несущихся вместе с космическим течением, такое превышение движения является минимальным и полностью остается в рамках СТО, даже если их движение относительно каждой другой галактики, возникая из раздувания самого пространства, может превышать скорость света.\*

*(\*)"В зависимости от того, ускоряется или замедляется темп расширения вселенной со временем, свет, испущенный такой галактикой, может вступить в битву, которая могла бы составить гордость Зенона: свет может лететь к нам со скоростью света, в то время как расширение пространства делает расстояние, которое свет еще должен пролететь, всегда больше, делая для света невозможным достижение нас когда-либо. Подробности в секции комментариев**[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_10" \o )."*

Третье, если пространство расширяется, не означает ли это, что в дополнение к тому, что галактики разлетаются друг от друга, раздувающееся пространство внутри каждой галактики будет двигать все ее звезды друг от друга, а раздувающееся пространство внутри каждой звезды, и внутри каждой планеты, и внутри вас, меня и чего угодно другого будет двигать все составляющие атомы друг от друга? Короче, не заставит ли раздувающееся пространство любую вещь, включая наши мерные линейки, увеличивать размеры и, таким образом, сделает невозможным распознать, что любое расширение на самом деле произошло? Ответ: нет. Подумайте еще раз о модели воздушного шара с монетками. Поскольку поверхность воздушного шара раздувается, все монетки двигаются в разные стороны, но сами монетки, несомненно, не расширяются. Конечно, если вы представите галактики маленькими кружочками, нарисованным на шаре черным маркером, тогда действительно, по мере увеличения размера шара маленькие кружочки будут также расти. Но монетки, а не зачерненные кружки, фиксируют, что реально происходит. Каждая монетка остается фиксированной по размеру, поскольку силы, удерживающие ее атомы цинка и меди вместе, намного больше, чем расталкивание расширяющегося шара, к которому монетка приклеена. Аналогично, ядерные силы, удерживая индивидуальные атомы как целое, и электромагнитные силы, удерживая ваши кости и кожу вместе, и гравитационные силы, удерживая планеты и звезды невредимыми и собирая их в галактики, более сильны, чем расталкивающее раздувание пространства, так что ни один из этих объектов не расширяется. Только на самых больших масштабах, на масштабах намного больше индивидуальной галактики раздувание пространства встречает мало сопротивления или не встречает совсем (гравитационное притяжение между сильно разделенными галактиками относительно мало вследствие включения больших расстояний), так что только на таких сверхгалактических масштабах раздувание пространства будет разносить объекты в стороны.

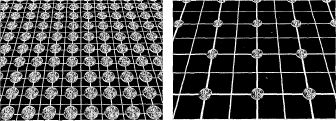
Космология, симметрия и форма пространства

Если кто-то разбудил вас среди ночи из глубокого сна и потребовал у вас рассказать ему о форме вселенной – общей форме пространства – вы, возможно, затруднитесь с ответом. Даже в вашем полусонном состоянии вы знаете, что Эйнштейн показал, что пространство должно быть разновидностью чего-то вроде игрушки Дурацкая замазка (Silly Putty), так что, в принципе, оно может иметь практически любую форму. Тогда как вы можете, возможно, ответить на вопрос вашего интервьюера? Мы живем на маленькой планете, вращающейся вокруг средней звезды на окраине галактики, которая всего лишь одна из сотен миллиардов, рассеянных по пространству, так как же вы можете надеяться знать хоть что-нибудь о форме всей вселенной? Ну, раз уж туман сна рассеялся, вы понемногу осознаете, что сила симметрии еще раз придет на выручку.

Если вы принимаете широко распространенное среди ученых мнение, что после усреднения на больших масштабах все местоположения и все направления во вселенной симметричны относительно друг друга, то вы на правильном пути к ответу на вопрос интервьюера. Причины в том, что почти все формы не удовлетворяют этому симметрийному требованию, поскольку одна часть или область формы фундаментально отличается от другой. Груша сильно выпукла у основания, но куда меньше у вершины; яйцо более плоское в середине, но более заостренное у своих концов. Эти формы, хотя и проявляют некоторую степень симметрии, не обладают полной симметрией. Исключив такие формы и ограничившись только теми, в которых каждый регион и направление похожи на любой другой, вы сможете фантастически ограничить возможности.

Мы уже сталкивались с одной формой, которая отвечает всем требованиям. Сферическая форма воздушного шара оказалась ключевой составляющей к установлению симметрии между Линкольнами на монетках на раздувающейся поверхности, также и трехмерная версия этой формы, так называемая 3-сфера, является одним из кандидатов на форму пространства. Но это не единственная форма, которая дает полную симметрию. Продолжая по причине более легкой визуализации двумерные модели, представим бесконечно широкий и бесконечно длинный резиновый лист – такой, который полностью неискривлен, – с равномерно распределенными монетками, наклееными на его поверхность. Если весь лист расширяется, то опять имеется полная пространственная симметрия и полное соответствие открытию Хаббла; каждый Линкольн видит, что каждый другой Линкольн удаляется со скоростью, пропорциональной расстоянию до него, как показано на Рис. 8.4. Поэтому трехмерная версия этой формы, подобная бесконечно протяженному кубу из прозрачной резины с галактиками, равномерно разбросанными по его внутренности, является другой возможной формой для пространства. (Если вы предпочитаете кулинарные аналогии, подумайте о бесконечно большой версии посыпанного маком пирога, упоминавшегося ранее, одной из форм, аналогичных кубу, но продолжающейся бесконечно и с рассыпанным маком, играющим роль галактик. Когда пирог печется, тесто расширяется, заставляя каждое маковое зерно удаляться от других). Эта форма называется плоским пространством, поскольку, в отличие от сферического примера, она не имеет кривизны (понятие "плоский", которое используют математики и физики, однако, отличается от разговорного понятия "расплющенного в блин"[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_11" \o )).

Одна чудесная мысль относительно как сферической, так и бесконечной плоской формы заключается в том, что вы можете бесконечно идти по ней и никогда не достигнете края или границы. Это привлекательно, поскольку позволяет нам избежать тяжелых вопросов: Что находится за краем пространства?

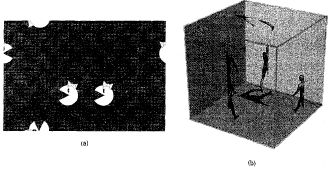


(а) (b)

***Рис 8.4****(а) Вид от любой монетки на бесконечном плоском листе является тем же самым, как и вид от любой другой монетки, (b) Чем дальше друг от друга удалены две монетки на Рис. 8.4а, тем больше будет увеличение расстояния между ними, когда плоскость расширяется.*

Что произойдет, если вы дойдете до границы пространства? Если пространство не имеет краев или границ, вопрос не имеет смысла. Но отметим, что две формы обеспечивают это дополнительное условие различным способом. Если вы идете прямо вперед в пространстве сферической формы, вы найдете, подобно Магеллану, что рано или поздно вы вернетесь в стартовую точку, никогда не столкнувшись с краем. В отличие от этого, если вы идете прямо вперед в бесконечном плоском пространстве, вы найдете, что подобно Энерджайзеру Банни, вы можете идти и идти, опять таки, никогда не столкнувшись с краем, но также никогда и не возвратившись в место, откуда вы начали путешествие. Хотя это может показаться фундаментальным отличием между геометрией искривленной и плоской формы, имеется простое изменение плоского пространства, которое поразительным образом похоже в этом смысле на сферу.

Чтобы проиллюстрировать это, подумаем об одной из тех видеоигр, в которых экран кажется имеющим края, но на самом деле их не имеет, поскольку вы не можете реально выпасть из экрана: если вы выдвигаетесь за правый край, вы снова появляетесь на левом; если вы выдвигаетесь за верхний край, вы снова появляетесь на нижнем. Экран "зациклен" путем идентификации верхнего края с нижним, а левого с правым, и, таким образом, форма плоская (неискривленная) и имеет конечный размер, но не имеет краев.



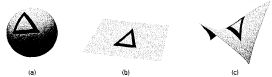
***Рис 8.5****(а) Экран видеоигры плоский (в смысле "неискривленный") и имеет конечный размер, но не содержит краев или границ, поскольку он "зациклен". Математически такая форма называется двумерным тором. (b) Трехмерная версия той же формы, называемая трехмерным тором, также плоская (в смысле неискривленная) и имеет конечный объем, а также не имеет краев или границ, поскольку зациклена. Если вы проходите через одну сторону, вы входите через противоположную сторону.*

Математически эта форма называется двумерным тором, она проиллюстрирована на Рис. 8.5а.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_12" \o ) Трехмерная версия этой формы – трехмерный тор – обеспечивает другую возможную форму для ткани космоса. Вы можете представить себе эту форму как гигантский куб, который зациклен вдоль всех трех осей: когда вы идете через потолок, вы снова появляетесь со дна, когда вы идете через заднюю стенку куба, вы снова плявляетесь на фронтальной, когда вы идете через левую сторону, вы снова появляетесь с правой, как показано на Рис. 8.5b. Такая форма плоская, – еще раз, в том смысле, что не искривленная, а не в том смысле, что подобная блину, – трехмерная, конечная по всем направлениям и все еще не имеющая краев и границ.

Помимо этих возможностей, все еще имеется другая форма, согласующаяся с объяснением открытия Хаббла через симметрично расширяющееся пространство. Хотя это тяжело изобразить в трех измерениях, как и в сферическом примере имеется хорошая двумерная модель: бесконечная версия картофельного чипса *Принглс*. Эта форма, часто обозначаемая как седловина, является разновидностью вселенной на сфере: в то время как сфера симметрично раздувается наружу, седловина симметрично сжимается внутрь, как показано на Рис. 8.6. Используя немного математической терминологии, скажем, что сфера имеет положительную кривизну (выдавливается наружу от плоскости), седловина имеет отрицательную кривизну (сжимается внутрь от плоскости), а плоское пространство, – как бесконечное, так и конечное, – не имеет кривизны (не выдавливается и не сжимается).\*

*(\*)"Точно так же, как экран видеоигры дает версию плоского пространства конечного размера, которая не имеет краев или границ, имеются версии седловой формы конечного размера, которые также не имеют краев или границ. Я не хочу обсуждать это далее, запомним лишь, что это подразумевает, что все три возможные кривизны (положительная, нулевая и отрицательная) могут быто реализованы в формах конечного размера без краев или границ. (Тогда, в принципе, космический Магеллан смог бы осуществить космическую версию своего путешествия во вселенной, чья кривизна задана любой из трех возможностей)."*

Исследователи доказали, что этот список – однородно положительная, отрицательная или нулевая – исчерпывает возможные виды кривизны для пространства, которое соответствует требованию симметрии между всеми положениями и всеми направлениями. И это по-настоящему великолепно. Мы говорим о форме всей вселенной, для которой имеется бесконечное число возможностей в чем-либо. Однако, призвав безмерную силу симметрии, исследователи оказались в состоянии резко уменьшить возможности. Так что, если вы позволяете симметрии руководить вашим ответом, и ваш полуночный интервьюер подарит вам целую горсть гипотез, вы будете в состоянии принять его вызов.[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_13" \o )



***Рис 8.6****Использование двумерной аналогии для пространств, где имеются три типа кривизны, которые полностью симметричны – то есть, кривизны, в которых вид из любой точки одинаков с видом из любой другой. Это (а) положительная кривизна, которая однородно раздувается вовне, как на сфере; (b) нулевая кривизна, которая совсем не раздувается, как на бесконечной плоскости или конечном экране видеоигры; (c) отрицательная кривизна, которая однородно сжимается внутрь, как на седловине.*

И все же вы можете удивиться, почему мы пришли к множеству возможных форм ткани пространства. Мы обитаем в одной вселенной, так почему мы не можем уточнить однозначную форму? Ну, только формы, которые мы перечислили, соответствуют нашей уверенности, что каждый наблюдатель, не зависимо от того, где во вселенной он находится, должен видеть на больших масштабах одинаковый космос. Но такое применение симметрии, хотя и высоко селективно, не может пройти весь путь и указать однозначный ответ. Для этого нам нужны уравнения Эйнштейна из ОТО.

В качестве входных данных уравнения Эйнштейна принимают количество материи и энергии во вселенной (предполагая опять из соображений симметрии, что они распределены однородно), а на выходе они дают кривизну пространства. Сложность в том, что на протяжении многих десятилетий астрономы не могли прийти к согласию, сколько материи и энергии на самом деле имеется. Если вся материя и энергия во вселенной была бы размазана однородно по пространству, и если после этого оказалось бы, что превышена так называемая *критическая плотность* около 10–23 грамм на каждый кубический метр\* – около пяти атомов водорода на кубический метр, – уравнения Эйнштейна дадут положительную кривизну пространства; если плотность будет меньше критической, уравнения проведут к отрицательной кривизне; если плотность будет в точности равна критической, уравнения будут говорить нам, что пространство не имеет глобальной кривизны. Поскольку эта проблема наблюдений была уже определенно решена, наиболее уточненные данные склоняются на сторону отсутствия кривизны – плоская форма. (Но вопрос о том, может ли Энерджайзер Банни всегда двигаться в одном направлении и пропасть в темноте или однажды он замкнет круг и обнаружит вас со спины, – продолжается ли пространство всегда или замыкается подобно видеоэкрану, – все еще полностью открыт).[[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_8_14" \o )

*(\*) "Сегодня материя во вселенной более распространена, чем радиация, так что критическую плотность удобно выражать в единицах, наиболее значимых для массы, – граммы на кубический метр. Отметим также, что хотя 10–23 грамм на кубический метр может не выглядит как очень много, в космосе очень много кубических метров пространства. Более того, возвратившись назад во времени, вы увидите, что чем меньше пространство, в котором размазана масса/энергия, тем более плотной становится вселенная."*

Даже так, даже без окончательного ответа на вопрос о форме космической ткани, что достаточно ясно, так это то, что симметрия является существенным понятием, позволяющим нам осмысливать пространство и время применительно к вселенной как к целому. Без привлечения мощи симметрии мы бы завязли на первом ухабе.

Космология и пространство-время

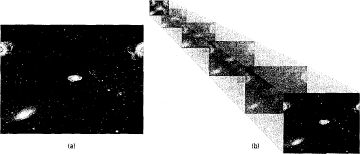
Теперь мы можем проиллюстрировать космическую историю через объединение концепции расширяющегося пространства и описания пространства-времени через батон хлеба из Главы 3. Вспомним, в представлении батона хлеба каждое сечение – даже если оно двумерное – представляет все трехмерное пространство в отдельный момент времени с точки зрения одного отдельного наблюдателя. Другие наблюдатели разрезают батон под другими углами, зависящими от деталей их относительного движения. В примерах, с которым мы сталкивались ранее, мы не принимали во внимание расширение пространства и, напротив, представляли, что ткань космоса фиксирована и неизменна во времени. Теперь мы можем уточнить те примеры, включив космологическую эволюцию.

Чтобы сделать это, рассмотрим точку зрения наблюдателей, которые покоятся по отношению к пространству – это значит, наблюдателей, чье движение возникает исключительно за счет космического расширения, точно так же как у приклеенных к воздушному шару монеток с Линкольнами. Еще раз, даже если они двигаются относительно других, имеется симметрия относительно всех таких наблюдателей – их часы согласованы – так что они разрезают батон пространства-времени в точности одинаковым образом. Только относительное движение в добавление к движению, происходящему из пространственного расширения, только относительное движение через пространство, в противоположность движению из-за раздувающегося пространства, будет приводить к рассинхронизации их часов и расположеню их сечений в пространственно-временном батоне под разными углами. Мы также нуждаемся в точном определении формы пространства, и для целей сравнения мы рассмотрим некоторые из обсужденных выше возможностей.

Простейший пример для описания – это плоская и конечная форма, форма видеоигры.

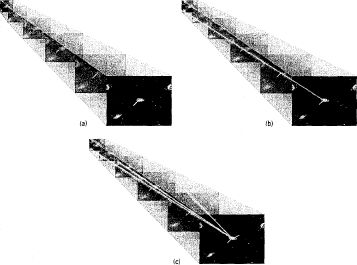
На Рис. 8.7а мы показываем одно сечение в такой вселенной, которое вы должны рассматривать как схематический образ, представляющий все пространство прямо сейчас. Для простоты представим, что наша галактика, Млечный Путь, находится в середине фигуры, но держим в памяти, что нет местоположения, которое любым образом было бы выделено по сравнению с любым другим. Даже края иллюзорны. Верхняя часть не есть место, где пространство заканчивается, поскольку вы можете пройти через нее и появиться снова внизу; аналогично, левая сторона не есть место, где пространство заканчивается, поскольку вы можете пересечь ее и появиться снова на правой стороне. Чтобы соответствовать астрономическим наблюдениям, каждая сторона должна распространяться, по меньшей мере, на 14 миллиардов световых лет (около 85 миллиардов триллионов миль) от своей центральной точки, но каждая может быть и намного больше.

Отметим, что прямо сейчас мы не можем буквально видеть звезды и галактики, относящиеся к данному сечению настоящего, поскольку, как мы обсуждали в Главе 5, для света, испущенного любым объектом прямо сейчас, требуется время, чтобы достичь нас. Напротив, свет, который мы видим, когда мы смотрим вверх в ясную темную ночь, испущен очень давно – миллионы и даже миллиарды лет назад – и только сейчас завершил долгий путь к Земле, попав в наш телескоп и позволив нам восхититься чудесами глубокого пространства. Поскольку пространство расширяется, эпохи назад, когда этот свет был испущен, вселенная была намного меньше. Мы иллюстрируем это на Рис. 8.7b, на котором мы отметили наше текущее сечение настоящего на правой стороне батона и включили последовательность сечений налево, которые изображают нашу вселенную во все более ранние моменты времени. Как вы можете видеть, как общий размер пространства, так и и расстояния между отдельными галактиками уменьшаются, когда мы рассматриваем вселенную во все более ранние моменты.



***Рис 8.7****(а) Схематическое представление изображения всего пространства прямо сейчас, в предположении, что пространство плоское и конечное по протяженности, т. е. имеющее форму экрана видеоигры. Отметим, что галактика вверху справа совпадает с галактикой вверху слева (зацикленность), (b) схематическое представление изображения всего пространства в его эволюции во времени, с несколькими временными сечениями, выделенными для ясности. Отметим, что полный размер пространства и расстояние между галактиками уменьшаются, когда мы смотрим все дальше назад во времени.*

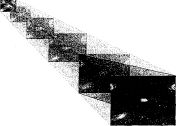
На Рис. 8.8 вы можете также видеть историю света, эмитированного удаленной галактикой, возможно, миллиард лет назад, когда он путешествует по направлению к нам сюда в Млечный Путь. На начальном сечении в Рис. 8.8а, свет сначала испускается, и через последовательные сечения вы можете видеть свет, становящийся все более и более близким, как раз пока вселенная становится больше и больше, и, наконец, вы можете видеть его достигнувшим нас на самом правом временном сечении. На Рис. 8.8b, соединяя местоположения на каждом сечении, через которые проходит фронт света во время своего путешествия, мы покажем путь света через пространство-время. Поскольку мы получаем свет со многих направлений, Рис 8.8с показывает пример траекторий через пространство и время, которые различные лучи света выбирают, чтобы достичь нас.



***Рис 8.8****(а) Свет, испущенный очень давно из удаленной галактики оказывается все ближе и ближе к Млечномй Пути, что показано на последовательных временных сечениях. (b) Когда мы, наконец, увидим удаленную галактику, мы смотрим на нее как через пространство, так и через время, поскольку свет, который мы видим, испущен очень давно. Выделен путь через пространство-время, который прошел свет. (c) Пути через пространство-время, выбираемые светом, эмитированным различными астрономическими телами, которые мы видим сегодня.*

Рисунки ярко показывают, как свет из пространства может быть использован как вместилище космического времени. Когда мы смотрим на галактику Андромеды, свет, который мы получаем, был испущен примерно 3 миллиона лет назад, так что мы видим Андромеду такой, какой она была в далеком прошлом. Когда мы смотрим на скопление Волосы Вероники (скопление галактик Кома), свет, который мы получаем, был испущен около 300 миллионов лет назад, и поэтому мы видим скопление Волосы Вероники таким, каким оно было в еще более ранние эпохи. Если прямо сейчас все звезды во всех галактиках этого скопления станут сверхновыми, мы будем все еще наблюдать невозмущенный образ скопления Волосы Вероники, и это будет так еще 300 миллионов лет; только тогда свету от взорвавшихся звезд хватит времени, тобы достичь нас. Аналогично, астроном в скоплении Кома, который на нашем текущем сечении настоящего направил сверхмощный телескоп по направлению к Земле, будет видеть изобилие папоротников, членистоногих и ранних рептилий; он не будет видеть Великую Китайскую Стену или Эйфелеву башню еще почти 300 миллионов лет. Конечно, этот астроном, хорошо разбирающийся в основах космологии, осознает, что он видит свет, эмитированный из давнего прошлого Земли, и, разбивая его собственный космический пространственно-временной батон, будет относить ранние земные бактерии к своей соответствующей эпохе, своему подходящему выбору темпорального сечения.

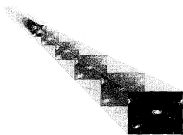
Все это предполагало, что как мы, так и астроном из скопления Волос Вероники, двигаемся только с космическим течением от пространственного расширения, поскольку это гарантирует, что его сечения пространственно-временного батона соответствуют нашим, – это гарантирует, что его списки настоящего согласуются с нашими.



***Рис 8.9****Временное сечение наблюдателя, обладающего существенным дополнительным движением по отношению к космическому потоку от расширения пространства.*

 Однако, если он нарушит шеренгу и двинется через пространство существенно в дополнение к космическому течению, его сечения будут наклонены по отношению к нашим, как на Рис. 8.9. В этом случае, как мы нашли вместе с Шеви в Главе 5, настоящее этого астронома будет соответствовать тому, что мы рассматриваем как будущее или как прошлое (в зависимости от того, направлено ли дополнительное движение к нам или от нас). Отметим, однако, что его сечения больше не будут пространственно однородны. Каждое наклоненное сечение на Рис. 8.9 пересекает вселенную в ряде различных эпох, так что сечения далеки от однородных. Это существенное усложнение описания космической истории, из-за которого физики и астрономы в целом не рассматривают такие точки зрения. Вместо этого они обычно рассматривают только точку зрения наблюдателей, которые двигаются только с космическим потоком, поскольку это дает сечения, которые однородны, – но, строго говоря, каждая точка зрения применима так же, как и любая другая.

Как мы видим дальше в левой стороне космического пространственно-временного батона вселенная становится все меньше и все плотнее. И точно так же, как велосипедная камера становится горячее и горячее, когда вы вдуваете в нее все больше и больше воздуха, вселенная становится все горячее и горячее по мере того, как материя и излучение сжимаются все более и более тесно за счет уменьшения пространства. Если мы обратимся назад к моменту всего лишь одной десятимиллионной доли секунды после начала, вселенная будет столь плотна и столь горяча, что обычная материя распадется на первичную плазму из составляющих элементарной природы. И если мы продолжим наше путешествие назад, прямо к моменту вблизи самого нуля времени – времени Большого взрыва – вся известная вселенная сожмется до размера, по сравнению с которым точка в конце этого предложения выглядит гигантской.



***Рис 8.10****Космическая история – пространственно-временной "батон" – для вселенной, которая плоская и имеет конечную пространственную протяженность. Нечеткость наверху обозначает недостаток наших знаний об областях вблизи начала вселенной.*

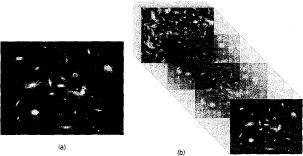
Плотности в такую раннюю эпоху были настолько велики, а условия настолько экстремальны, что самые усовершенствованные физические теории, которые мы сегодня имеем, не могут дать нам проникновение в происходящее. По причинам, которые будут становиться все более ясными, высокоуспешные законы физики, разработанные в двадцатом столетии, не действуют больше при таких напряженных условиях, оставляя нас без руководства в нашем походе к пониманию начала времен. Мы коротко увидим, что недавние исследования обеспечивают дающий надежду свет маяка, но до сих пор мы понимаем неполноту наших знаний о том, что происходило в начале при приближении к размытому пятнышку далеко слева на космическом пространственно-временном батоне, – нашей версии terra incognita на картах прошлого. С этим последним замечанием мы представляем Рис. 8.10, как примерную иллюстрацию космической истории.

Альтернативные формы

Пока мы предполагали, что пространство имеет форму, подобную экрану видеоигры, но ситуация имеет много тех же самых особенностей и для других возможностей. Например, если данные в конце концов покажут, что форма пространства сферическая, то тогда по мере того, как мы движемся все дальше назад во времени, размер сферы становится все меньше, вселенная становится все горячее и плотнее, и при нулевом времени мы столкнемся с некоторой разновидностью начала типа Большого взрыва. Изображение иллюстрации, аналогичной Рис. 8.10, проблематично, поскольку сферы не сопоставимы четко одна с другой (вы можете, например, представить "сферический батон", в котором каждое сечение является сферой, которая окружает предыдущую), но в стороне от графических трудностей физика почти совершенно та же. Случаи бесконечного плоского пространства и бесконечного седлообразного пространства также обладают многими одинаковыми особенностями вместе с двумя уже обсуждавшимися формами, но они отличаются в одном существенном смысле. Посмотрим на Рис. 8.11, на котором сечения представляют плоское пространство, которое бесконечно протяженно (конечно, мы можем показать только его часть). Когда вы наблюдаете все более ранние времена, пространство сжимается; галактики становятся все ближе и ближе друг к другу, чем дальше назад вы смотрите на Рис 8.11b. Однако общий размер пространства остается тем же самым. Почему? Ну, бесконечность забавная вещь. Если пространство бесконечно и вы сокращаете все расстояния на множитель два, размер пространства становится равным половине от бесконечности, что все еще равно бесконечности. Так что, хотя все вещи сближаются друг с другом и плотности становятся все выше, когда вы направляетесь все дальше назад во времени, общий размер вселенной остается бесконечным; вещи становятся более плотными везде на протяжении бесконечного пространства. Это дает весьма отличающийся образ Большого взрыва.

Обычно мы представляем вселенную, начинающуюся с точки, грубо как на Рис. 8.10, на котором нет внешнего пространства или времени. Тогда, при таком виде взрыва, пространство и время развертываются от их сжатой формы и расширяющаяся вселенная начинает полет. Но если вселенная пространственно бесконечна, уже имеется бесконечная пространственная протяженность в момент Большого взрыва. В этот начальный момент плотность энергии повышается и достигаются несравнимые ни с чем температуры, но эти экстремальные условия существуют везде, а не только в одной отдельной точке. В такой обстановке Большой взрыв не имел места в одной точке; напротив, Большой взрыв имел место везде на бесконечной протяженности. По сравнению с обычным точечным началом, это похоже на много Больших взрывов в каждой точке бесконечной пространственной протяженности. После Взрыва пространство раздувалось, но его общий размер не возрастал, поскольку нечто, уже бесконечное, не может стать еще больше. Что возрастало, так это расстояния между объектами вроде галактик (как только они сформировались), как вы можете видеть, посмотрев слева направо на Рис 8.11b. Наблюдатель вроде вас или меня, посмотрев наружу из одной галактики или из другой, увидит все окружающие галактики разбегающимися прочь, точно так же, как открыл Хаббл.

Имеем в виду, что этот пример бесконечного плоского пространства намного больше, чем чисто академический. Мы увидим, что имеются веские основания считать, что общая форма пространства не искривленная, а поскольку до сих пор нет оснований считать, что пространство имеет форму экрана видеоигры, плоская бесконечно большая пространственная форма является передовой областью споров для крупномасштабной структуры пространства-времени.



***Рис 8.11****(а) Схематическое изображение бесконечного пространства, населенного галактиками, (b) Пространство сокращается во все более ранние времена, – так что галактики становятся ближе и более плотно упакованными в ранние времена, – но общий размер бесконечного пространства остается бесконечным. Наше неведение относительно того, что происходило в самые ранние времена обозначено размытым пятном, но здесь пятно распространено по всей бесконечной пространственной протяженности.*

Космология и симметрия

Соображения симметрии явно были необходимыми в разработке современной космологической теории. Понятие времени, его применимость ко вселенной как целому, общая форма пространства и даже лежащая в основании схема ОТО – все они остаются на фундаменте симметрии. Даже в этих условиях, имеется еще и другой способ, в котором идеи симметрии наполняют эволюционирующий космос. В ходе его истории температура вселенной охватывала огромный диапазон от невыносимо горячих моментов сразу после Взрыва до нескольких градусов выше абсолютного нуля, которые мы находим сегодня, если вы поместите термометр в глубокое пространство. И, как я буду объяснять в следующей главе, вследствие критической взаимозависимости между теплом и симметрией то, что мы видим сегодня, является вероятным, но холодным остатком намного более богатой симметрии, которая формировала раннюю вселенную и предопределяла некоторые из самых привычных и существенных особенностей космоса.

**9 Испаряя ваккум**

***ТЕПЛОТА, ПУСТОТА И ОБЪЕДИНЕНИЕ***

**В** течение времени, составляющего около 95 процентов истории вселенной, космический корреспондент, интересующийся приблизительной, всеобъемлющей формой вселенной, сообщал бы более или менее одинаковый сюжет: вселенная продолжает расширяться. Материя продолжает рассеиваться вследствие расширения. Плотность вселенной продолжает уменьшаться. Температура продолжает падать. На самых больших масштабах вселенная сохраняет симметричный однородный вид. Но не всегда можно было так спокойно описывать космос. Самые ранние этапы требуют крайне беспокойных сообщений, поскольку в те начальные моменты вселенная испытывала быстрые изменения. И мы теперь знаем, что то, каким образом все тогда происходило, сыграло определяющую роль в том, что мы наблюдаем сегодня.

В этой главе мы сфокусируемся на критических моментах в первые доли секунды после Большого взрыва, когда, как мы верим, количество симметрии, заключенной во вселенной, неожиданно менялось, причем с каждым изменением запускались совершенно различные эпохи в космической истории. В то время как сейчас корреспондент может неспешно фиксировать в нескольких одинаковых строчках каждые несколько миллиардов лет, в те ранние моменты быстрых изменений симметрии его работа должна была быть заметно более напряженной, поскольку основная структура материи и сил, отвечающих за ее поведение, была полностью необычной. Причина связана с взаимной игрой между теплотой и симметрией и требует полного переосмысления того, что мы думаем о понятиях пустого пространства и пустоты. Как мы увидим, такое переосмысление не только существенно улучшает наше понимание вселенной в первые моменты, но так же и подводит нас на шаг ближе к осуществлению мечты, которая восходит к Ньютону, Максвеллу и, в особенности, к Эйнштейну, – мечты об объединении. Так же важно, что эти разработки открывают этап более современной космологической схемы, инфляционной космологии, подхода, который заявляет ответы на некоторые наиболее тяжелые вопросы и наиболее трудные загадки, по поводу которых стандартная модель Большого взрыва молчит.

Теплота и симметрия

Когда вещи становятся очень горячими или очень холодными, они иногда изменяются. И иногда изменения столь вопиющие, что вы даже не можете распознать вещь, с которой вы начинали. Вследствие горячих условий сразу после Взрыва и последовавшего быстрого падения температуры по мере расширения и охлаждения пространства, понимание последствий изменения температуры является ключевым в попытках разобраться с ранней историей вселенной. Но начнем проще. Начнем со льда.

Если вы нагреваете очень холодный кусочек льда, сначала ничего особого не происходит. Хотя его температура растет, его внешний вид остается почти совсем неизменным. Но если вы повысите его температуру любым способом до 0 градусов Цельсия и сохраните нагрев в прежнем положении, внезапно произойдет нечто драматическое. Твердый лед начнет таять и превратится в жидкую воду. Пусть привычность этой трансформации не лишает спектакль яркости. Без предыдущих опытов, включающих лед и воду, было бы проблематично осознать внутреннюю связь между ними. Одно является твердым телом каменной твердости, тогда как другое является вязкой жидкостью. Простые наблюдения не обнаруживают прямых признаков того, что их молекулярный состав, Н2О, идентичен. Если вы никогда до сих пор не видели лед или воду, и вам представили бак того и другого вещества, сначала вы, вероятно, подумаете, что они никак не связаны. И уже когда каждый пересекает границу 0 градусов Цельсия, вы становитесь свидетелем удивительной алхимии, когда каждое вещество превращается в другое.

Если вы продолжите нагревать жидкую воду, вы снова найдете, что пока ничего не будет происходить при равномерном росте температуры. Но когда вы достигнете 100 градусов Цельсия, произойдет другое резкое изменение: жидкая вода начнет кипеть и превратится в пар, горячий газ, который опять-таки не очевидно связан с жидкой водой или твердым льдом. Хотя, конечно, все три вещества имеют одинаковый молекулярный состав. Изменения от твердого к жидкому и от жидкого к газу известны как *фазовые переходы*. Многие вещества проходят через сходную последовательность изменений, если их температура изменяется в достаточно широком диапазоне.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_1" \o )

Симметрия играет центральную роль в фазовых переходах. Почти во всех случаях, если вы сравните подходящие измерения симметрии чего-либо до и после того, как это что-либо пройдет через фазовый переход, вы найдете существенное изменение. На молекулярных масштабах, например, лед имеет кристаллическую форму, в которой молекулы Н2О расположены в упорядоченной гексагональной решетке. Подобно симметриям ящика на Рис. 8.1, полный рисунок молекул льда остается неизменным только при определенных специальных преобразованиях, таких как вращения на угол 60 градусов относительно отдельных осей гексагонального расположения. Напротив, когда мы нагреем лед, кристаллическое расположение расплавится в беспорядочную однородную массу молекул, – жидкую воду, – которая остается неизменной при вращениях на любой угол относительно любой оси. Итак, путем нагревания льда и побуждения его перейти через фазовый переход твердое тело/жидкость, вы делаете его более симметричным. (Вспомним, что хотя вы можете интуитивно подумать, что нечто более упорядоченное, как лед, является и более симметричным, правильным является совершенно противоположное; нечто более симметрично, если оно может быть подвергнуто большему числу преобразований, таких как вращения, при которых его внешний облик остается неизменным).

Аналогично, если мы нагреваем жидкую воду и она переходит в газообразный пар, фазовый переход также приводит к росту симметрии. В массе воды индивидуальные молекулы Н2О, в среднем, упакованы так, что водородная сторона одной молекулы соседствует с кислородной стороной ее соседки. Если вы повернули ту или иную молекулу в массе воды, она будет заметно нарушать молекулярный узор. Но когда вода выкипает и переходит в пар, молекулы летают здесь и там свободно; тут нет больше никакого узора ориентаций молекул Н2О, и отсюда, когда вы поворачиваете молекулу или группу молекул, газ будет выглядеть тем же самым. Итак, точно так же как переход от льда к воде приводит к росту симметрии, переход от воды к пару приводит к тому же. Большинство (но не все[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_2" \o )) из веществ ведут себя сходным образом, испытывая повышение симметрии, когда они подвергаются переходу из твердой фазы в жидкую и из жидкой в газообразную.

Ситуация почти такая же, когда вы охлаждаете воду или почти любое другое вещество; все имеет место с точностью до наоборот. Например, когда вы охлаждаете газообразный пар, сначала ничего не происходит, но когда температура падает до 100 градусов Цельсия, внезапно начинается конденсация в жидкую воду; когда вы охлаждаете жидкую воду, ничего не будет происходить, пока вы не достигнете 0 градусов Цельсия, при которых внезапно начинается замерзание в твердый лед. И, следуя тем же рассуждениям относительно симметрии – но наоборот – мы заключаем, что оба из этих фазовых переходов сопровождаются снижением симметрии.\*

*(\*) "Даже если уменьшение симметрии означает, что некоторые преобразования проходят незамеченными, тепло, переданное окружению во время такой трансформации, гарантирует, что полная энтропия, – включая энтропию окружения, – все еще возрастает."*

Так много о льде, воде, паре и их симметриях. Как все это должно быть связано с космологией? Ну, в 1970е годы физики обнаружили, что не только объекты во вселенной могут испытывать фазовые переходы, но и космос как целое также может это делать. На протяжении последних 14 миллиардов лет вселенная неуклонно расширялась и становилась более разреженной. И точно так же, как при спускании велосипедной камеры она охлаждается, температура расширяющейся вселенной неуклонно падает. В течение большей части этого уменьшения температуры ничего особого не происходит. Но имеются основания быть уверенным, что когда вселенная переходила через особые критические температуры, – аналоги 100 градусов Цельсия для пара и 0 градусов Цельсия для воды, – она подвергалась радикальному изменению и испытывала резкое уменьшение симметрии. Многие физики уверены, что мы теперь живем в "конденсированной" или "замороженной" фазе вселенной, той, что крайне отличается от более ранних эпох. Космологические фазовые переходы не заключаются буквально в конденсации газа в жидкость или в замерзании жидкости в твердое тело, хотя имеется много качественно сходных свойств с этими более привычными примерами. Скорее, "вещество", которое конденсируется или замерзает, когда вселенная охлаждается до особой температуры, является полем – более точно, Хиггсовым полем. Посмотрим, что это означает.

Сила, материя и Хиггсовы поля

Поля обеспечивают каркас для большей части современной физики. Электромагнитное поле, обсуждавшееся в Главе 3, является, возможно, простейшим и наиболее широко оцененным из природных полей. Проводя жизнь среди радио и телевизионных передач, телефонных коммуникаций, солнечного тепла и света, мы все постоянно купаемся в море электромагнитных полей. Фотоны являются элементарными составляющими электромагнитных полей и могут рассматриваться как микроскопические переносчики электромагнитной силы. Когда вы что-нибудь видите, вы можете думать об этом в терминах волнового электромагнитного поля, входящего в ваш глаз и стимулирущего вашу сетчатку, или в терминах частиц-фотонов, входящих в ваш глаз и делающих то же самое. По этой причине фотон временами описывается как частица-переносчик электромагнитной силы.

Гравитационное поле также привычно, поскольку оно постоянно и единообразно удерживает нас и все остальное вокруг нас на земной поверхности. Как и с электромагнитными полями, мы все погружены в море гравитационных полей; Земля доминирует, но мы также чувствуем гравитационные поля Солнца, Луны и других планет. Точно так же, как фотоны являются частицами, которые составляют электромагнитное поле, физики уверены, что частицами, которые составляют гравитационное поле, являются гравитоны. Гравитоны все еще не открыты экспериментально, но это не удивительно. Гравитация является слабейшей из всех сил (например, обычный магнит, который вешается на холодильник, может поднять скрепку для бумаги, тем самым преодолев притяжение всей земной гравитации), так что вполне понятно, что экспериментаторы еще не уловили мельчайшие составляющие слабейшей силы. Однако, даже без экспериментального подтверждения большинство физиков уверено, что точно так же, как фотоны передают электромагнитную силу (они являются частицами-переносчиками электромагнитных сил), гравитоны передают гравитационную силу (они являются частицами-переносчиками сил тяготения). Когда вы роняете стакан, вы можете думать о происходящем в терминах гравитационного поля Земли, притягивающего стакан, или, используя более изощренное геометрическое описание Эйнштейна, вы можете думать об этом в терминах того, что стакан соскальзывает вдоль углубления в ткани пространства-времени, вызванного присутствием Земли, или, – если гравитоны на самом деле существуют, – вы можете также думать об этом в терминах испускания и поглощения гравитонов между Землей и стаканом, передающего гравитационное "сообщение", которое "приказывает" стакану падать к Земле.

Вне этих хорошо известных силовых полей имеются две другие силы природы, сильное ядерное взаимодействие и слабое ядерное взаимодействие, и они также оказывают свое влияние через поля. Ядерные силы менее привычны, чем электромагнетизм и гравитация, поскольку они действуют только на атомных и субатомных масштабах. Но даже при этом их влияние на повседневную жизнь через ядерные реакции, заставляющие Солнце светить, ядерные реакции при работе атомных реакторов, а также радиоактивный распад элементов вроде урана и плутония не менее важно. Поля сильного и слабого ядерного взаимодействия называются полями Янга-Миллса в честь Ч.Н. Янга и Роберта Миллса, которые разработали в 1950-е их теоретические обоснования. И точно так же, как электромагнитные поля составлены из фотонов, а поля тяготения, как мы верим, должны быть составлены из гравитонов, сильные и слабые поля также имеют частицы в качестве составляющих. Частицы сильного взаимодействия называются глюонами, а частицы слабого взаимодействия называются W- и Z-частицами. Существование этих частиц взаимодействия было подтверждено экспериментами на ускорителях, проведенными в Германии и Швейцарии в конце 1970х и начале 1980х.

Полевая основа также применима и к материи. Грубо говоря, вероятностные волны квантовой механики сами могут мыслиться как заполняющие пространство поля, которые обеспечивают вероятность, что та или иная частица материи находится в том или ином месте. Например, электрон может рассматриваться как частица, – одна из тех, что могут оставить точку на фосфорецирующем экране, как на Рис. 4.4, – но он может (и должен) также рассматриваться в терминах волнового поля, одного из тех, которые дают вклад в интерференционную картину на фосфоресцирующем экране, как на Рис. 4.3b.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_3" \o ) Фактически, хотя я не хочу здесь вдаваться в большие детали,[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_4" \o ) вероятностная волна электрона тесно связана с некоторым электронным полем – полем, которое во многих смыслах сходно с электромагнитным полем, но в котором электрон играет роль, аналогичную фотонам, будучи мельчайшей составляющей электронного поля. Такой же вид полевого описания сохраняет справедливость также и для всех других видов частиц материи.

Обсуждая вместе поля материи и поля сил (взаимодействий), вы можете подумать, что мы охватили все. Но имеется общее согласие, что изложение истории до сих пор не вполне завершено. Многие физики твердо уверены, что еще имеется третий тип полей, который никогда экспериментально не наблюдался, но который в течение последней пары десятилетий играл стержневую роль как в новейших космологических теориях, так и в физике элементарных частиц. Он называется полем Хиггса в честь шотландского физика Петера Хиггса.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_5" \o ) И если идеи из следующей секции правильны, вся вселенная пронизана океаном Хиггсовых полей, – холодным следом Большого взрыва, – который отвечает за многие свойства частиц, составляющих меня, вас и что угодно другое, с чем мы постоянно сталкиваемся.

Поля в охлаждающейся вселенной

Поля реагируют на температуру сильнее, чем обычная материя. Чем выше температура, тем более яростно будет волноваться вверх и вниз величина поля – подобно поверхности быстро закипающего котелка воды. При холодных температурных характеристиках глубокого пространства сегодня (2,7 градуса выше абсолютного нуля или, как обычно обозначают, 2,7 Кельвинов) или даже при более теплых температурах здесь на Земле, волнения полей ничтожны. Но температуры сразу после Большого взрыва были столь огромны, – через 10–43 секунды после Взрыва температура оценивается величиной около 1032Кельвинов, – что все поля неистово вздымались туда и сюда.

Раз вселенная расширяется и охлаждается, начальная гигантская плотность материи и излучения неуклонно падает, безбрежные просторы вселенной становятся все более пустыми, и волнения полей становятся все более ослабленными. Для большинства полей это означает, что их величина, в среднем, стремится к нулю. В некоторый момент величина отдельного поля может слабо подняться выше нуля (пик), а моментом позже она может слабо опуститься ниже нуля (впадина), но в среднем величина большинства полей приближается к нулю – величине, которую мы интуитивно ассоциируем с отсутствием чего-либо или с пустотой.

Именно тут появляется поле Хиггса. Исследователи пришли к пониманию, что есть множество полей, которые имели свойства, сходные с другими полями при обжигающе высоких температурах сразу после Большого взрыва: они дико флуктуировали вверх и вниз. Но исследователи уверены, что (точно так же, как пар конденсируется в жидкую воду, когда его температура существенно падает) когда температура вселенной существенно упала, Хиггсово поле сконденсировалось в особую ненулевую величину по всему пространству. Физики говорят об этом как о формировании ненулевой величины вакуумного среднего Хиггсова поля – но, чтобы упростить технический жаргон, я буду говорить об этом как о формировании Хиггсова океана.

Это похоже на то, что будет происходить, если вы бросите лягушку в горячую металлическую чашу, как показано на Рис. 9.1а, с кучей червей, лежащей в центре. Сначала лягушка будет прыгать так и сяк – высоко вверх, глубоко вниз, влево, вправо – в отчаянных попытках спасти свои лапы от ожога, и в среднем будет находиться так далеко от червей, что даже не будет знать, что они здесь есть. Но по мере остывания чаши лягушка будет успокаиваться, будет прыгать совсем через силу и, вместо этого, будет мягко скатываться в наиболее спокойное место на дне чаши. Там, приблизившись к центру чаши, она наконец встретится со своим ужином, как показано на Рис. 9.1b.

Но если чаша имеет иную форму, как на Рис. 9.1с, события будут раскручиваться иначе. Представьте опять, что чаша сначала очень горяча и что куча червей все еще лежит в центре чаши, но теперь он приподнят центральной выпуклостью. Если вы бросаете лягушку, она опять будет дико прыгать так и сяк, оставаясь в неведении относительно приза, возвышающегося на центральном плато. Теперь, когда чаша остынет, лягушка опять будет затихать, уменьшать свои прыжки, и сползет вниз по скользкому боку чаши. Но из-за новой формы лягушка никогда не достигнет центра чаши. Вместо этого она сползет в выемку чаши и останется на расстоянии от кучи червей, как показано на Рис. 9.1d.



----



(а) (b)

***Рис 9.1****(а) Лягушка, брошенная в горячую металлическую чашу, постоянно прыгает по ней, (b) когда чаша остывает, лягушка успокаивается, прыгает много меньше и скатывается вниз к середине чаши.*



----



(c) (d)

***Рис 9.1****(c) Как и в (а), но с горячей чашей иной формы, (d) как и в (b), но теперь, когда чаша остывает, лягушка сползает вниз в выемку, которая находится на некотором расстоянии от центра чаши (где сосредоточены черви).*

 Если мы представим, что расстояние между лягушкой и кучей червей представляет величину поля, – чем дальше лягушка от червей, тем больше величина поля, – а высота положения лягушки представляет энергию, содержащуюся в такой величине поля, – чем выше лягушка может быть в чаше, тем большую энергию содержит поле, – тогда эти примеры хорошо передают поведение полей, когда вселенная охлаждается. Когда вселенная горяча, поля дико прыгают от величины к величине, почти как лягушка прыгает с места на место в чаше. Когда вселенная охлаждается, поля "успокаиваются", прыгают менее часто и менее безумно и их величина сползает вниз к меньшей энергии.

Но здесь есть одно обстоятельство. Как и в примере с лягушкой, тут есть возможность двух качественно разных исходов. Если форма энергии поля – чаша, – это так называемая потенциальная энергия поля, – подобна Рис. 9.1а, величина поля во всем пространстве будет сползать всеми способами вниз к нулю, к центру чаши, точно так же, как лягушка любым путем сползает к куче червей. Однако, если потенциальная энергия выглядит подобно Рис. 9.1с, величина поля не будет любым путем достигать нуля, центра энергетической чаши. Вместо этого, точно так же, как лягушка сползет вниз в выемку, которая находится на ненулевом расстоянии от кучи червей, величина поля также сползет вниз в выемку, – ненулевое расстояние от центра чаши, – что означает, что поле будет иметь ненулевую величину.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_6" \o ) Последнее поведение является характеристикой Хиггсовых полей. Когда вселенная остывает, величина Хиггсова поля захватывается во впадине и никогда не становится нулевой. А поскольку то, что мы описываем, будет происходить однородно во всем пространстве, вселенная будет пропитана однородным и ненулевым Хиггсовым полем – Хиггсовым океаном.

Причина того, что это происходит, проливает свет на фундаментальную специфику Хиггсовых полей. Когда область пространства становится все холоднее и пустыннее, – когда материя и излучение становятся все более редкими, – энергия в области становится все более низкой. Доведя это до предела, вы знаете, что вы можете достигнуть пустейшей области пространства, когда вы понизите ее энергию настолько, насколько это возможно. Для обычных полей, наполняющих область пространства, их вклад в энергию наименьший, когда их величина любым путем сползет вниз к центру чаши, как на Рис. 9.1b; они имеют нулевую энергию, когда их величина равна нулю. Это имеет хороший интуитивный смысл, поскольку мы ассоциируем опустошение области пространства с выбором чего угодно, включая полевые величины, равным нулю.

Но для Хиггсова поля дела обстоят иначе. Точно так же, как лягушка может достичь центрального плато на Рис. 9.1с и сократить до нуля расстояние до кучи червей только если она имеет достаточно энергии, чтобы подпрыгнуть из окружающей плато выемки, Хиггсово поле может достичь центра чаши и стать нулевым по величине только если оно запасло достаточно энергии, чтобы преодолеть центральную выпуклость чаши. Если, напротив, лягушка имеет мало или совсем не имеет энергии, она сползет в выемку на Рис. 9.1d – на ненулевую дистанцию от кучи червей. Аналогично, Хиггсово поле с малой энергией или без энергии также сползет в выемку чаши – на ненулевую дистанцию от центра чаши – и отсюда оно будет иметь ненулевую величину.

Чтобы заставить поле Хиггса иметь нулевую величину, – величину, которая кажется наиболее близкой к тому, когда вы можете подойти к полному удалению полей из области пространства, величине, которая кажется наиболее близкой к тому, когда вы можете подойти к состоянию пустоты, – вы должны повысить его энергию и, с точки зрения энергии, область пространства будет не столь пуста, как она, возможно, могла бы быть. Даже если это звучит противоречиво, удаление Хиггсова поля, – то есть, уменьшение его величины до нуля, – равносильно добавлению энергии в область. В качестве грубой аналогии подумаем об одних из тех необычных уменьшающих помехи наушников, которые производят волны звука, чтобы прекратить волны, приходящие из окружающей среды, которые, в противном случае, будут посягать на ваши барабанные перепонки. Если наушники работают идеально, вы слышите тишину, когда они производят свой звук, но вы слышите рассеянный шум, если вы выключите их. Исследователи пришли к уверенности, что точно так же, как вы слышите меньше, когда наушники наполнены звуком, на производство которого они запрограммированы, так и холодное пустое пространство скрывает настолько мало энергии, насколько это возможно, – оно настолько пусто, насколько это может быть, – когда оно наполнено океаном Хиггсова поля.

Процесс получения Хиггсовым полем ненулевой величины во всем пространстве, – процесс формирования Хиггсова океана, – называется *спонтанным нарушением симметрии*\* и является одной из наиболее важных идей, появившихся в теоретической физике последних десятилетий двадцатого века. Давайте посмотрим, почему.

*(\*) "Терминология не особенно важна, но коротко укажем, откуда она происходит. Выемка на Рис. 9.1с и 9.1d имеет симметричную форму – она круговая – с каждой точкой, эквивалентной любой другой (каждая точка выемки обозначает величину Хиггсова поля с минимальной возможной энергией). Кроме того, когда величина Хиггсова поля сползает вниз в чашу, она располагается в одной особой точке в круговой выемке, таким образом "спонтанно" выбирает одно положение в выемке как специальное. Теперь все точки в выемке не являются больше одинаково равноправными, поскольку одна отмечена, так что поле Хиггса уничтожает или "нарушает" исходную симметрию между ними. Так что, совмещая все слова вместе, процесс, в котором поле Хиггса сползает к одной особой ненулевой величине в выемке, назван спонтанным нарушением симметрии. Далее в тексте мы опишем более заметные аспекты уменьшения симметрии, связанного с таким формированием океана Хиггса."**[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_7" \o )*

Океан Хиггса и происхождение массы

Если поле Хиггса имеет ненулевую величину, – если мы все погружены в океан Хиггсова поля, – то не должны ли мы его чувствовать или видеть или иным образом быть осведомлеными о нем неким образом? Безусловно. И современная физика утверждает, что мы это делаем. Возьмите вашу руку и покачайте ее вперед и назад. Вы можете почувствовать работу ваших мукулов, двигающих массу вашей руки влево, вправо и опять назад. Если вы держите шар для боулинга, ваши мускулы будут работать сильнее, поскольку, чтобы двигать более значительную массу, необходимо приложить большую силу. В этом смысле масса объекта представляет сопротивление попытке заставить его двигаться; более точно, масса представляет сопротивление объекта изменению его движения – ускорению – подобному тому, как сначала мы двигаемся влево, потом вправо, а потом влево опять. Но откуда происходит это сопротивление тому, чтобы быть ускоренным? Или, говоря физически, что дает объекту его инерцию?

В Главах 2 и 3 мы сталкивались с различными предложениями Ньютона, Маха и Эйнштейна, выдвинутыми в качестве частичных ответов на этот вопрос. Эти ученые пытались установить стандарт покоя, по отношению к которому могли бы быть определены ускорения, подобные тем, которые возникают в эксперименте с вращающимся ведром. Для Ньютона стандартом было абсолютное пространство; для Маха это были удаленные звезды; а для Эйнштейна это было сначала абсолютное пространство-время (в СТО), а затем гравитационное поле (в ОТО). Но однажды очертив стандарт покоя и, в особенности, установив начало отсчета для определения ускорений, ни один из этих ученых не сделал следующий шаг к объяснению, почему объекты сопротивляются ускорению. То есть, никто из них не определил механизм, с помощью которого объект приобретает свою массу – свою инерцию – свойство, которое борется с ускорениями. С помощью поля Хиггса физики теперь предложили ответ.

Атомы, которые составляют вашу руку, и шар для боулинга, который вы можете поднять, все они сделаны из протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны, как обнаружили экспериментаторы в конце 1960-х, каждый составлен из трех более мелких частиц, известных как кварки. Так что, когда вы махаете своей рукой туда и сюда, вы на самом деле размахиваете туда и сюда всеми составляющими кварками и электронами, что подводит нас к существу дела. Океан Хиггса, в который, как заявляет современная теория, мы все погружены, взаимодействует с кварками и электронами: он мешает их ускорениям почти так же, как чан с патокой сопротивляется движению шарика для пинг-понга, который туда опущен. И это сопротивление, это торможение мельчайших составляющих дает вклад в то, что вы ощущаете как массу вашей руки и шара для боулига, которыми вы размахиваете, или как массу объекта, который вы бросаете, или как массу всего вашего тела, когда вы ускоряетесь в направлении к финишной линии на 100-метровой дистанции. Именно так мы чувствуем океан Хиггса. Силы, которые мы прикладываем тысячи раз в день, чтобы изменить скорость того или иного объекта, – чтобы придать ему ускорение, – являются силами, которые борются против сопротивления океана Хиггса.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_8" \o )

Аналогия с патокой хорошо ухватывает некоторые аспекты Хиггсова океана. Чтобы ускорить шарик для пинг-понга, опущенный в патоку, вам нужно толкать его более сильно, чем когда вы играете с ним на теннисном столе, – он будет сопротивляться вашим попыткам изменить его скорость более сильно, чем он делает это вне патоки, так что он ведет себя так, как будто погружение в патоку увеличило его массу. Аналогично, в результате своих взаимодействий с вездесущим океаном Хиггса элементарные частицы сопротивляются попыткам изменить их скорость – они приобретают массу. Однако, аналогия с патокой имеет три вводящих в заблуждение особенности, о которых вы должны быть осведомлены.

Парвая особенность, вы можете всегда влезть в патоку, вытащить шарик для пинг-понга и посмотреть, как уменьшится его сопротивление ускорению. Это не верно для частиц. Мы уверены, что в настоящее время океан Хиггса заполняет все пространство, так что нет способа удалить частицы из-под его влияния; все частицы имеют массы независимо от того, где они находятся. Вторая особенность, патока сопротивляется любому движению, тогда как Хиггсово поле сопротивляется только ускоренному движению. В отличие от того, как шарик для пинг-понга движется через патоку, частица, двигаясь через внешнее пространство с постоянной скоростью, не будет замедляться за счет "трения" с Хиггсовым океаном. Вместо этого ее движение будет продолжать оставаться неизменным. Только когда мы постараемся разогнать или затормозить частицу, Хиггсово поле проявит свое присутствие через силу, которую мы прикладываем. Третья особенность, когда это касается привычной материи, составленной из скоплений фундаментальных частиц, имеется другой важный источник массы. Кварки, составляющие протоны и нейтроны, удерживаются вместе сильным ядерным взаимодействием: глюоны (частицы-переносчики сильного взаимодействия) струятся между кварками, "склеивая" их вместе. Эксперименты показывают, что эти глюоны имеют высокую энергию, а поскольку соотношение Эйнштейна Е = mc2 говорит нам, что энергия (Е) проявляет себя как масса (m), мы получаем, что глюоны внутри протонов и нейтронов дают существенный вклад в общую массу этих частиц. Так что более точная картина заключается в представлении о патокоподобной силе сопротивления Хиггсова океана, как о дающей массу фундаментальным частицам, таким как электроны и кварки, но когда эти частицы объединяются в составные частицы вроде протонов, нейтронов и атомов, вступают в игру и другие (хорошо понятные) источники массы.

Физики полагают, что степень сопротивления Хиггсова океана ускорению частицы меняется в зависимости от особых разновидностей частиц. Это существенно, поскольку все известные виды фундаментальных частиц имеют различные массы. Например, в то время как протоны и нейтроны составлены из двух типов кварков (именуемых верхним и нижним кварками: протон состоит из двух верхних (up) и одного нижнего (down); а нейтрон из двух нижних и одного верхнего), за годы экпериментаторы, используя атомные столкновения, открыли четыре других вида кварков, чьи массы охватывают широкий диапазон от 0,0047 до 189 масс протона. Физики уверены, что объяснение разнообразия масс заключается в том, что различные виды частиц взаимодействуют с океаном Хиггса более или менее сильно. Если частица двигается плавно через океан Хиггса с малым взаимодействием или без такового, то сопротивление будет мало или будет отсутствовать и частица будет иметь малую массу или не будет иметь массы. И наоборот, если частица существенно взаимодействует с океаном Хиггса, она будет иметь более высокую массу. Самый тяжелый кварк (именуемый вершинный (top) кварк) с массой около 350 000 масс электрона взаимодействует с Хиггсовым океаном в 350 000 раз сильнее электрона; он намного труднее ускоряется через океан Хиггса, и в этом причина, что он имеет большую массу. Если мы сравним массу частицы с известностью личности, то океан Хиггса будет подобен папарацци: те, кто неизвестен, проходят через толпящихся фотографов с легкостью, но видные политики и кинозвезды проталкиваются к своей цели с большим трудом.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_9" \o )

Это дает прекрасную основу для размышлений о том, почему одна частица имеет массу, отличную от другой, но на сегодняшний день нет фундаментальных объяснений для точного способа, которым каждый из известных видов частиц взаимодействует с океаном Хиггса. В результате нет фундаментального объяснения, почему известные частицы имеют индивидуальные массы, которые обнаруживаются экспериментально. Однако, большинство физиков уверено, что если бы не было Хиггсова океана, все фундаментальные частицы были бы подобны фотону и совсем не имели бы массы. Фактически, как мы теперь видим, вещи могли бы быть такими в ранние моменты вселенной.

Объединение в охлаждающейся вселенной

В то время, как газообразный пар конденсируется в жидкую воду при 100 градусах Цельсия, а жидкая вода замерзает в твердый лед при 0 градусов Цельсия, теоретические изыскания показали, что Хиггсово поле конденсируется в ненулевую величину при миллионе миллиардов (1015) градусов. Это почти в 100 миллионов раз превышает температуру в центре Солнца, и это температура, до которой, как мы уверены, вселенная остыла примерно к одной сотой миллиардной (10–11) доле секунды после Большого взрыва. Предшествующие 10–11 секунды после Большого взрыва Хиггсово поле флуктуировало вверх и вниз, но имело нулевую среднюю величину; как и вода выше 100 градусов Цельсия, при таких температурах океан Хиггса не мог быть сформирован, поскольку было слишком жарко. Океан испарился бы немедленно. А без Хиггсова океана не было сопротивления ускоренному движению, которому подвергнуты частицы (папарацци исчезли), что подразумевает, что все известные частицы (электроны, up- и down-кварки и остальные) имели одинаковую массу: нуль.

Это наблюдение частично объясняет, почему формирование океана Хтггса описывается как космологический фазовый переход. В фазовых переходах от пара к воде и от воды ко льду происходят две существенные вещи. Имеется существенное качественное изменение во внешнем виде объекта, и фазовый переход сопровождается уменьшением симметрии. Мы видим те же две особенности при формировании Хиггсова океана. Первое, произошло существенное качественное изменение: виды частиц, которые были безмассовыми, внезапно приобрели ненулевые массы – массы, которые эти виды частиц имеют и сейчас. Второе, это изменение сопровождалось уменьшением симметрии: до формирования Хиггсова океана все частицы имели одинаковую – нулевую – массу, что является высокосимметричным состоянием дел. Если бы вы поменяли массу одного вида частиц на массу другого, никто бы не узнал, поскольку все массы были одинаковыми. Но после конденсации океана Хиггса массы частиц превратились в ненулевые – и не равные – величины, так что симметрия между массами была потеряна.

Фактически, уменьшение симметрии, возникнув из формирования океана Хиггса, является еще более всеобъемлющим. Выше 1015 градусов, когда Хиггсово поле еще не сконденсировалось, безмассовыми являются не только все виды фундаментальных частиц материи, то также, без тормозящего сопротивления от океана Хиггса, и все виды частиц сил. (Сегодня W и Z частицы – переносчики слабого ядерного взаимодействия – имеют массы около 86 и 97 масс протона). И, как впервые было открыто в 1960е Шелдоном Глэшоу, Стивеном Вайнбергом и Абдусом Саламом, безмассовость частиц всех сил сопровождалась другой, фантастически красивой симметрией.

В конце 1800х Максвелл осознал, что электричество и магнетизм, хотя они некогда воспринимались как две полностью различные силы, на самом деле являются различными аспектами одной и той же силы – электромагнитной силы (см. Главу 3). Его труд показал, что электричество и магнетизм дополняют друг друга; они представляют собой Инь и Янь более симметричного объединенного целого. Глэшоу, Салам и Вайнберг открыли следующую главу в этой истории объединения. Они осознали, что перед тем, как сформировался Хиггсов океан, не только все частицы сил имели одинаковую массу – нуль, – но и фотоны, и W- и Z- частицы были идентичны еще и в существенно другом смысле.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_10" \o ) Точно так же, как снежинка не меняется при отдельных поворотах, которые меняют местами положения ее лучей, физические процессы в отсутствие океана Хиггса не будут меняться при отдельных взаимозаменах частиц электромагнитных и слабых ядерных сил – при отдельных взаимных заменах фотонов и W- и Z- частиц. И также, как нечувствительность снежинки к поворотам отражает симметрию (вращательную симметрию), нечувствительность к взаимозаменам этих частиц также отражает симметрию, одну из тех, которая по техническим причинам называется калибровочной симметрией. Она имеет глубокие следствия. Поскольку эти частицы передают соответствующие им силы (взаимодействия), – они являются частицами-переносчиками их сил, – симметрия между ними означает, что была симметрия между силами. Следовательно, при достаточно высокой температуре, температуре, которая испарила бы сегодняшний заполненный Хиггсовым полем вакуум, нет различия между слабыми ядерными силами и электромагнитными силами. Достаточно высокая температура означает, что океан Хиггса испаряется; если это сделано, разница между слабыми и электромагнитными силами испаряется тоже.

Глэшоу, Вайнберг и Салам расширили открытие Максвелла столетней давности, показав, что электромагнитные и слабые ядерные силы на самом деле являются частью одной и той же силы. Они объединили описание этих двух сил в то, что сейчас называется электрослабой силой.

Симметрия между электромагнитными и слабыми силами не проявляется сегодня, поскольку по мере охлаждения вселенной сформировался Хиггсов океан и – это существенно – фотоны и W- и Z- частицы взаимодействуют с конденсированным Хиггсовым полем по-разному. Фотоны проносятся через океан Хиггса так же легко, как второсортный киноартист легко прошел бы сквозь папарацци, и, следовательно, остаются безмассовыми. Однако, W- и Z- частицы, как Билл Клинтон и Мадонна, с трудом прокладывают свой путь, приобретая массы в 86 и 97 масс протона, соответственно. (Замечание: Эта аналогия не соблюдает масштаб). Таким образом, электромагнитные и слабые ядерные силы становятся столь отличными в мире вокруг нас. Лежащая в основании симметрия между ними "нарушена" или скрыта Хиггсовым океаном.

Это действительно захватывающий дух результат. Две силы, которые выглядят совсем разными при сегодняшних температурах, – электромагнитная сила, отвечающая за свет, электричество и магнитное взаимодействие, и слабая ядерная сила, отвечающая за радиоактивный распад, – являются фундаментально частью одной и той же силы и становятся различными только вследствие ненулевого Хиггсова поля, скрывающего симметрию между ними. Таким образом, то, что мы обычно мыслим как пустое пространство, – вакуум, пустота, – играет центральную роль в проявлении вещей в мире такими, какие они есть. Только при испарении вакуума, при росте температуры достаточно высоко, чтобы Хиггсово поле испарилось, – то есть, приобрело нулевое среднее значение во всем пространстве, – может быть сделана видимой полная симметрия, лежащая в основании законов природы.

Когда Глэшоу, Вайнберг и Салам разработали эти идеи, W- и Z- частицы еще не были открыты экспериментально. Была сильная вера этих физиков в силу теории и красоту симметрии, что дало им уверенность идти вперед. Их отвага оказалась хорошо обоснованной. Через некоторое время W- и Z- частицы были открыты и электрослабая теория была подтверждена экспериментально. Глэшоу, Вайнберг и Салам разглядели за внешними явлениями, – всмотревшись сквозь скрывающий суть туман пустоты, – проявление глубокой и тонкой симметрии, охватывающей две из четырех сил природы. В 1979 им была присуждена Нобелевская премия за успешное объединение слабых ядерных сил и электромагнетизма.

Великое объединение

Когда я был студентом первого курса в колледже, я время от времени случайно натыкался на моего ведущего консультанта, физика Говарда Джорджи. Я никогда не имел, что сказать, но это почти не имело значения. Всегда было так, что Джорджи легко было спровоцировать поделиться чем-либо с интересующимся студентами. Как-то раз, в особенности, Джорджи был специально спровоцирован и он быстро воодушевленно говорил больше часа, заполняя меловую доску еще некоторое время после символами и уравнениями. На всем протяжении я с энтузиазмом кивал головой. Но, откровенно говоря, я почти не понимал ни слова. Годами позже я осознал, что Джорджи говорил мне о планах проверки открытия, которое он сделал, названного *великим объединением*.

Великое объединение обращается к вопросу, который естественным образом следует из успеха электрослабого объединения: если две силы природы являлись частью единого целого в ранней вселенной, может ли быть, что при еще более высоких температурах и в еще более ранние времена в истории вселенной различия между тремя или, возможно, всеми четырьмя силами аналогично могут испариться, создав даже еще большую симметрию? Это выдвигает интригующую возможность, что на самом деле может быть единственная фундаментальная сила природы, которая через серию космологических фазовых переходов кристаллизовалась в четыре кажущиеся различными силы, о которых мы в настоящее время знаем. В 1974 Джорджи и Глэшоу предложили на обсуждение первую теорию, чтобы пройти часть пути к этой цели полного единения. Их теория великого объединения вместе с более поздними наработками Джорджи, Хелен Куинн и Вайнберга, предполагала, что три из четырех сил – сильные, слабые и электромагнитные силы – являлись частью единой силы, когда температура превышала 10 миллардов миллиардов миллиардов (1028) градусов, – в несколько тысяч миллиардов миллиардов раз больше температуры в центре Солнца, – экстремальные условия, которые существовали через 10–35 секунды после Взрыва. Выше этой температуры, предположили указанные физики, фотоны, глюоны сильного взаимодействия, точно так же, как и W- и Z- частицы, могли свободно взаимозаменяться одни на другие – более сильная калибровочная симметрия, чем в электрослабой теории, – без каких-либо наблюдаемых последствий. Джорджи и Глэшоу, таким образом, предположили, что при этих высоких энергиях и температурах имеется полная симметрия между тремя видами частиц-переносчиков негравитационных сил, и потому имеется полная симметрия среди трех негравитационных сил.[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_9_11" \o )

Теория великого объединения Глэшоу и Джорджи продолжила разговор от том, что мы не видим эту симметрию в мире вокруг нас, – сильные ядерные силы, которые удерживают протоны и нейтроны тесно склеенными вместе в атомах, кажутся полностью отделенными от слабых или электромагнитных сил, – поскольку, когда температура упала ниже 1028 градусов, в игру вступил другой вид Хиггсова поля. Это Хиггсово поле называется Хиггсом великого объединения. (Всякий раз, когда названия могут привести к путанице, Хиггсово поле, содержащее электрослабое объединение, называют электрослабым Хиггсом). Сходно со случаем его электрослабого родственника Хиггс великого объединения дико флуктуирует выше 1028 градусов, но расчеты указывают на то, что он конденсируется в ненулевую величину, когда вселенная охлаждается ниже этой температуры. И, как и с электрослабым Хиггсом, когда этот Хиггсов океан великого объединения формировался, вселенная прошла через фазовый переход с сопровождающим его понижением симметрии. В этом случае, поскольку Хиггсов океан великого объединения оказывает отличающееся влияние на глюоны по сравнению с влиянием на другие частицы, сильное взаимодействие отщепилось от электрослабого взаимодействия, создав две различающиеся негравитационные силы там, где раньше была одна. Отделившись вторым и упав по температуре еще на миллиарды и миллиарды градусов, электрослабый Хиггс сконденсировался, заставив слабые и электромагнитные силы также расщепиться.

Пока красивая идея великого объединения (в отличие от электрослабого объединения) не подтверждена экспериментально. Тем не менее, оригинальное предположение Джорджи и Глэшоу предсказывает след, остаточное последствие ранней симметрии вселенной, который должен быть видим сегодня, который позволяет протонам даже при этих условиях часто превращаться в другие виды частиц (такие как антиэлектроны и частицы, известные как пионы). Но после лет старательных поисков такого распада протона в детально разработанных подземных экпериментах, – такой эксперимент Джорджи возбужденно описывал мне в его офисе годы назад, – ничего не было найдено; это исключает предположение Джорджи и Глэшоу. Однако, с тех пор физики разработали вариации этой оригинальной модели, которые еще не вычеркнуты такими экспериментами; однако, ни одна из этих альтернативных теорий не подтверждена.

Среди физиков достигнут консенсус, что великое объединение является одной из великих, но еще нереализованных идей в физике частиц. Поскольку объединение и космологические фазовые переходы оказались столь действенны для электромагнетизма и слабого ядерного взаимодействия, многие чувствуют, что требуется только время, чтобы другие силы также были собраны в рамках объединенной схемы. Как мы увидим в Главе 12, большие шаги в этом направлении были сделаны недавно с использованием другого подхода – теории суперструн – который впервые свел все силы, включая гравитацию, в объединенную теорию, хотя этот подход все еще, как об этом пишут, находится в процессе энергичной разработки. Но, тем не менее, что уже ясно даже в только что рассмотренной электрослабой теории, так это то, что вселенная, которую мы видим в настоящее время, проявляет следы сверкающей симметрии ранней вселенной.

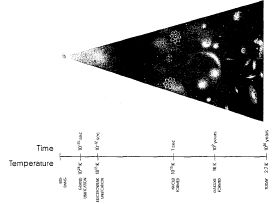
Возвращение эфира

Концепция нарушения симметрии и ее проявление через электрослабое поле Хиггса, несомненно, играют центральную роль в физике частиц и космологии. Но обсуждение может оставить вас в недоумении по следующему поводу: Если Хиггсов океан является невидимым нечто, которое заполняет то, что мы обычно понимаем под пустым пространством, не есть ли это просто другая инкарнация давно дискредитированного понятия эфира? Ответ: да и нет. Объяснение: да, конечно, в некотором смысле Хиггсов океан имеет привкус эфира. Подобно эфиру, конденсированное Хиггсово поле пропитывает пространство, окружает всех нас, проникает прямо через любой материал и, как неудаляемая особенность пустого пространства (исключая случай, когда мы заново нагреем вселенную выше 1015 градусов, что мы, естественно, не можем сделать), оно переопределяет нашу концепцию пустоты. Но, в отличие от исходного эфира, который был введен как невидимая среда для переноса световых волн примерно тем же образом, как воздух переносит волны звука, океан Хиггса ничего не делает с движением света; он не влияет никоим образом на скорость света, так что эксперименты на заре двадцатого века, которые вычеркнули эфир через изучение движения света, не затрагивают Хиггсов океан.

Более того, поскольку Хиггсов океан не влияет никаким образом на что-либо, движущееся с постоянной скоростью, он не выделяет ни одну наблюдательную систему отсчета как каким-либо образом выделенную, тогда как эфир делал это. Напротив, даже с Хиггсовым океаном все наблюдатели, движущиеся с постоянной скоростью, остаются на полностью одинаковом основании, а потому Хиггсов океан не конфликтует с СТО. Конечно, эти наблюдения не доказывают, что Хиггсов океан существует; вместо этого они показывают, что несмотря на определенное сходство с эфиром, Хиггсовы поля не конфликтуют с теорией или экспериментом.

Однако, если имеется океан Хиггсова поля, он должен давать другие следствия, которые будут экспериментально проверяемы в течение следующих нескольких лет. В качестве главного примера, точно так, как электромагнитные поля составлены фотонами, Хиггсовы поля составлены частицами, которые, не удивительно, названы частицами Хиггса. Теоретические расчеты показывают, что если имеется пронизанное Хиггсовым океаном пространство, частицы Хиггса дожны быть среди осколков от высокоэнергетических столкновений, которые будут иметь место в Большом Адронном Коллайдере, гигантском строящемся сейчас ускорителе в Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН) в Женеве, Швейцария, и запланированном к запуску в 2007. Грубо говоря, огромные по энергии столкновения лоб в лоб между протонами должны быть в состоянии выбить частицу Хиггса из Хиггсова океана примерно как мощные подводные взрывы могут выбить молекулы Н2О из Атлантики. В свое время эти эксперименты должны позволить нам определить, существует ли эта современная форма эфира или она последует путем своего более раннего воплощения. Это критический вопрос для решения, поскольку, как мы видели, конденсация Хиггсовских полей играет глубокую и стержневую роль в нашей текущей формулировке фундаментальной физики.

Если Хиггсов океан не найдется, это потребует глобального переосмысления теоретической схемы, которая разрабатывалась более тридцати лет. Но если он найдется, это событие будет триумфом теоретической физики: это подтвердит силу симметрии для точного оформления наших математических рассуждений, когда мы рискуем вторгаться в неизвестное. Помимо этого, подтверждение существования Хиггсова океана сделает еще две вещи. Первое, оно обеспечит прямое подтверждение древней эры, когда многие аспекты сегодняшней вселенной, которые проявляются как различные, были частью симметричного целого. Второе, оно установит, что наше интуитивное понятие пустого пространства, – конечного результата удаления всего, что мы можем, из области пространства, так что его энергия и температура уменьшатся настолько, насколько это возможно, – в течение длительного времени было наивным. Пустейшее пустое пространство не требует включения состояния абсолютной пустоты. Следовательно, без спиритического вызова мы можем неожиданно вплотную столкнуться с мыслями Генри Мора (Глава 2) в нашем научном квесте по изучению пространства и времени. Для Мора обычная концепция пустого пространства была бессмысленной, поскольку пространство всегда заполнено божественным духом. Для нас обычная концепция пустого пространства может быть аналогично эфемерной, поскольку пустое пространство, о котором мы осведомлены, может всегда быть заполнено океаном Хиггсова поля.



***Рис 9.2****Временная ось, схематически иллюстрирующая стандартную космологическую модель Большого взрыва.*

<*Снизу от оси последовательно отмечены ключевые события модели*: *Большой взрыв* (начало оси); *Великое объединение* (время 10–35 секунды, температура 1028 Кельвинов); *электрослабое объединение* (10–12 секунды, 1015 Кельвинов); *формирование ядер* (1 секунда, 1010 Кельвинов); *формирование галактик* (109 лет, 10 Кельвинов); *сегодня* (1010 лет, 2,7 Кельвина)>.

Энтропия и время

Ось времени на Рис. 9.2 содержит фазовые переходы, которые мы обсуждали в историческом контексте, и потому дает нам твердое понимание последовательности событий, через которые прошла вселенная от Большого взрыва до яйца на вашем кухонном столе. Но решающая информация все еще скрыта в размытом пятне. Вспомним, знание, как начались вещи, – порядок в стопке страниц *Войны и Мира*, спрессованные молекулы углекислого газа в вашей бутылке колы, состояние вселенной при Большом взрыве, – является существенным для понимания, как они эволюционируют. Энтропия может возрастать, только если задано пространство для ее роста. Энтропия может возрастать, только если она стартовала с низкой величины. Если страницы*Войны и Мира* начинаются с полного беспорядка, дальнейшие подбрасывания просто будут оставлять их в беспорядке; если вселенная началась в полностью разупорядоченном высокоэнтропийном состоянии, дальнейшая космическая эволюция будет просто сохранять этот беспорядок.

История, показанная на Рис. 9.2, очевидно, не является хроникой непрерывного неизменного разупорядочения. Даже если отдельные симметрии терялись при космических фазовых переходах, общая энтропия вселенной неуклонно возрастает. Следовательно, в начале вселенная должна была быть высоко упорядоченной. Этот факт позволяет нам связать направление "вперед" во времени с направлением возрастания энтропии, но нам все еще необходимо понять объяснение невероятно низкой энтропии – невероятно высокого состояния однородности – в только что рожденной вселенной. Это требует, чтобы мы пошли еще дальше назад, чем мы уже зашли, и попытались понять больше из того, что было в начале, – во время размытого пятна на Рис. 9.2, – задача, к которой мы сейчас приступаем.

**10 Разборка Взрыва на составляющие**

***ЧТО ВЗОРВАЛОСЬ ?***

**О**бщее неправильное представление заключается в том, что теория Большого взрыва обеспечивает теорию возникновения космоса. Это не так. Большой взрыв это теория, частично описанная в последних двух главах, которая намечает космическую эволюцию от долей секунды после чего-то, произошедшего, чтобы привести вселенную к существованию, но она *совсем ничего не говорит о самом времени нуль*. А поскольку в соответствии с теорией Большого взрыва сам Взрыв есть то, что предполагается произошедшим в начале, Большой взрыв не включает сам Взрыв. Он ничего не говорит нам о том, что взорвалось, почему взорвалось, как оно взорвалось или, откровенно говоря, взорвалось ли оно на самом деле вообще.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_1" \o ) Фактически, если вы на секунду задумаетесь о нем, вы обнаружите, что Большой взрыв предстает перед нами совершенно загадочным. При чудовищных плотностях материи и энергии, характеризующих ранние моменты вселенной, гравитация была доминирующей над всеми другими силой. Но гравитация притягивающая сила. Она подталкивает вещи объединяться. Так что могло бы, вероятно, соответствовать направленной наружу силе, которая подтолкнула вселенную к расширению? Может показаться, что некоторые виды мощных отталкивающих сил должны были играть критическую роль во время Взрыва, но какие из природных сил могли бы это быть?

Много десятилетий этот самый основной из всех космологических вопросов оставался без ответа. Затем в 1980е было возрождено старое наблюдение Эйнштейна в блистательной новой форме, дав развитие тому, что стало известно как инфляционная космология. И с этим открытием влияние на Взрыв, наконец, смогло быть отдано достойной силе: гравитации. Это удивительно, но физики обнаружили, что в правильном окружении гравитация может быть отталкивающей и в соответствии с теорией необходимые условия превалировали в течение самых ранних моментов космической истории. В течение временного интервала, для которого наносекунда могла бы показаться вечностью, ранняя вселенная обеспечивала арену, на которой гравитация проявляла свою отталкивательную сторону, с неумолимой свирепостью растаскивая каждый регион пространства от любого другого. Отталкивательное действие гравитации было столь мощным, что не только определило Взрыв, оно обнаружило большее – намного большее – чем кто бы то ни было мог ранее представить. В инфляционной схеме ранняя вселенная расширялась с ошеломительно гигантским коэффициентом по сравнению с тем, что предсказывалось стандартной теорией Большого взрыва, увеличив нашу космологическую перспективу до такой степени, что осознание последнего столетия, что наша галактика не более чем одна среди сотен миллиардов, было еще более принижено.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_2" \o )

В этой и следующей главе мы обсуждаем инфляционную космологию. Мы увидим, что она обеспечивает "последний рубеж" для стандартной модели Большого взрыва, предлагая важнейшие модификации к утверждениям стандартной теории о событиях, происходивших в течение самых ранних моментов вселенной. При этом инфляционная космология решает ключевые проблемы, которые находятся вне пределов досягяемости стандартной модели Большого взрыва, делает ряд предсказаний, которые были экспериментально проверены и в недалеком будущем продолжат экспериментально тестироваться, и, наверное, самое выдающееся, показывает, как квантовые процессы могут через космологическое расширение разгладить крошечные морщины на ткани пространства, оставляя видимый отпечаток в ночном небе. И, помимо этих успехов, инфляционная космология дает существенное проникновение в то, как ранняя вселенная могла получить свою чрезвычайно низкую энтропию, подводя нас ближе чем когда-либо к объяснению стрелы времени.

Эйнштейн и отталкивательная гравитация

После нанесения последних штрихов на ОТО в 1915 Эйнштейн применил свои новые уравнения к ряду проблем. Одной из них была давно стоявшая загадка, что уравнения Ньютона не могут оценить так называемую прецессию перигелия орбиты Меркурия – наблюдаемый факт, что Меркурий не прочерчивает каждый раз один и тот же путь, когда он обращается вокруг Солнца: вместо этого каждый завершенный оборот слабо сдвигается относительно предыдущего. Когда Эйнштейн переделал стандартные расчеты орбиты со своими новыми уравнениями, он точно вывел наблюдаемую прецессию перигелия, найденный им результат настолько потрясяющ, что заставил его сердце сильно биться.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_3" \o ) Эйнштейн также применил ОТО к вопросу, как круто траектория света, эмитированного удаленной звездой, будет изгибаться кривизной пространства-времени, когда она проходит мимо Солнца на своем пути к Земле. В 1919 две команды астрономов – одна ночевала в палатках на острове Принсипи у западного побережья Африки, другая в Бразилии – проверили это предсказание во время солнечного затмения путем сравнения звездного света, который почти задевал поверхность Солнца (эти световые лучи наиболее подвергались влиянию из-за наличия Солнца, и только во время затмения они могли быть видимыми), с фотографиями, сделанными, когда земное обращение по орбите поместило Землю между теми же звездами и Солнцем, фактически уничтожив гравитационное воздействие Солнца на траекторию звездного света. Сравнение обнаружило угол отклонения лучей, который еще раз подтвердил расчеты Эйнштейна. Когда пресса ухватила слухи о результатах, Эйнштейн в течение ночи стал всемирно известной звездой. С ОТО, честно говоря, Эйнштейн оказался при деньгах.

Тем не менее, несмотря на возрастающий успех ОТО, в течение лет после того, как он впервые применил свою теорию к наиболее огромной из всех проблем – к пониманию всей вселенной, – Эйнштейн абсолютно отказался принять ответ, который возник из математики. Перед работами Фридмана и Леметра, обсуждавшимися в Главе 8, Эйнштейн тоже осознал, что уравнения ОТО показывают, что вселенная не может быть статической; ткань пространства может растягиваться или она может сокращаться, но она не может сохранять фиксированный размер. Это наводило на мысль, что вселенная могла иметь определенное начало, когда ткань была максимально сжата, и может даже иметь определенный конец. Эйнштейн упрямо отказывался от этих следствий ОТО, поскольку он и некоторые другие "знали", что вселенная бесконечна и на самом большом из всех масштабов фиксированна и неизменна. Так что, несмотря на красоту и успешность ОТО, Эйнштейн открыл еще раз свою записную книжку и попытался внести модификацию в уравнения, которые бы позволили вселенной соответствовать доминирующему предубеждению. Это долго у него не получалось. В 1917 он добился цели путем введения нового члена в уравнения ОТО: *космологической постоянной*.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_4" \o )

Стратегию Эйнштейна по введению этой модификации нетрудно понять. Гравитационная сила между любыми двумя объектами, являются ли они бейсбольными мячами, планетами, звездами, кометами или чем хотите, является притягивающей, и в итоге гравитация постоянно действует так, чтобы сдвинуть объекты в направлении друг к другу. Гравитационное притяжение между Землей и танцором, прыгающим вверх, заставляет танцора замедлиться, достигнуть максимальной высоты, а затем направиться назад вниз. Если хореограф захотел бы статической конфигурации, в которой танцор повис бы в воздухе, то должна была бы быть отталкивающая сила между танцором и Землей, которая в точности уравновесила бы их гравитационное притяжение: статическая конфигурация может возникнуть только тогда, когда имеется совершенное взаимоуничтожение между притяжением и отталкиванием. Эйнштейн осознал, что в точности такие же рассуждения применимы ко всей вселенной. В точности на том же основании, что притяжение от гравитации действует тем слабее, чем выше танцор, оно также действует слабее с расширением пространства. И точно так же, как танцор не может достичь статики – он не может парить на фиксированной высоте – пространство не может "парить" с фиксированным всеобщим размером – без дополнительного наличия некоторого вида балансирующей отталкивательной силы. Эйнштейн ввел космологическую константу потому, что он нашел, что с этим новым членом, включенным в уравнения, гравитация может обеспечить именно такую отталкивательную силу.

Но какую физику представляет этот математический член? Что такое космологическая константа, из чего она сделана и как она управляется, действуя против обычной притягивательной гравитации и оказывая отталкивательное воздействие? Ну, современное прочтение работы Эйнштейна – той, что восходит к Леметру, – интерпретирует космологическую константу как экзотическую форму энергии, которая однородно и равномерно заполняет все пространство. Я говорю "экзотическую", поскольку анализ Эйнштейна не определяет, откуда эта энергия может произойти, как мы скоро увидим, математическое описание, которому она подчиняется, гарантирует, что она не может состоять из чего-либо привычного вроде протонов, нейтронов, электронов или фотонов. Физики сегодня привлекают фразы вроде "энергия самого пространства" или "темная энергия", когда обсуждают смысл эйнштейновской космологической константы, поскольку, если есть космологическая постоянная, пространство должно быть заполнено прозрачным, аморфным чем-то, что вы не можете видеть непосредственно; пространство, заполненное космологической константой будет все еще выглядеть темным. (Это соотносится со старым понятием эфира и с новым понятием Хиггсова поля, которое приобретает ненулевую величину во всем пространстве. Последнее сходство является более чем всего лишь случайным совпадением, поскольку имеется важная связь между космологической константой и Хиггсовыми полями, к которой мы скоро подойдем). Но даже без точного определения происхождения или идентификации космологической константы Эйнштейн оказался в состоянии выработать ее гравитационные следствия и ответ, который он нашел, оказался выдающимся.

Чтобы понять его, вам надо познакомиться с одной особенностью ОТО, которую мы сейчас обсудим. В ньютоновском подходе к гравитации сила притяжения между двумя объектами зависела только от двух вещей: их масс и расстояния между ними. Чем более массивны объекты и чем ближе они друг к другу, тем больше гравитационное притяжение, которое они оказывают друг на друга. Ситуация в ОТО почти такая же, исключая то, что уравнения Эйнштейна показывают, что ньютоновская концентрация только на массе была слишком ограниченной. В соответствии с ОТО не просто масса (и расстояние) объектов дает вклад в силу гравитационного поля. Энергия и давление также дают вклад. Это важно, поэтому потратим минуту, чтобы посмотреть, что это означает.

Представьте, что сейчас двадцать пятое столетие и вы были заключены в Замок Разумов, новейший эксперимент Департамента коррекции, предназначенный для попыток исправления преступников из "белых воротничков", основанного на их собственных способностях. Каждому осужденному дается загадка, и они могут возвратить свою свободу, только решив ее. Парень в соседней от вас камере разгадывает, почему повторные испытания на острове Джиллиан дали удивительный возврат в двадцать второе столетие и стали с тех пор наиболее популярным шоу, так что он, вероятно, будет называть Замок домом еще некоторое время. Ваша загадка проще. Вам даны два идентичных твердых золотых куба – они одинакового размера, и каждый сделан из точно одинакового количества золота. Ваша задача – найти способ сделать измерение весов кубов различным, когда они остаются на фиксированном, совершенно точном расстоянии от Земли, при одном условии: вам нельзя изменять количество материи в каждом кубе, так что их нельзя рубить, разбивать, паять, царапать и т.д. Если бы вы поставили эту загадку перед Ньютоном, он бы немедленно заявил, что она не имеет решения. В соответствии с законами Ньютона одинаковые количества золота переводятся в одинаковые массы. А поскольку каждый куб останется на том же самом фиксированном расстоянии, земное гравитационное притяжение их будет идентичным. Ньютон пришел бы к заключению, что два куба должны показывать одинаковый вес без всяких если, и, или но.

Однако, с вашими институтскими знаниями ОТО двадцать пятого века вы разглядите способ. ОТО показывает, что сила гравитационного притяжения между двумя объектами зависит не только от их масс (и расстояния между ними), но также любых и всех дополнительных вкладов в полную энергию каждого объекта. А мы ничего не говорили о температуре золотых кубов. Температура измеряет, как быстро в среднем атомы золота, из которых состоит каждый куб, двигаются туда и сюда – то есть, она измеряет, насколько энергичны атомы (она отражает их кинетическую энергию). Поэтому, вы осознаете, что если вы нагреете один куб, его атомы будут более энергичными, так что его вес будет на йоту больше, чем у более холодного куба.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_5" \o ) Этого факта Ньютон не знал (увеличение температуры на 10 градусов Цельсия приведет к увеличению веса куба из одного фунта золота примерно на миллионную от миллиардной доли фунта, так что эффект исчезающе мал), и с этим решением вы освободитесь из Замка.

Ну, почти. Поскольку ваше преступление было особенно тяжким, в последнюю минуту перед вашим освобождением коллегия приняла решение, что вы должны решить вторую загадку. Вам даны две одинаковые старые игрушки Джек-в-ящике. И ваша новая задача – найти способ сделать так, чтобы каждая имела различный вес. Но в этот раз вам не только запрещено изменять количество массы каждого объекта, вам также необходимо поддерживать оба объекта при точно одинаковой температуре. Еще раз, если эту загадку дать Ньютону, он немедленно бы сдался на жизнь в Замке. Поскольку игрушки имеют одинаковые массы, он бы пришел к выводу, что их веса идентичны, так что загадка неразрешима. Но еще раз, ваши знания ОТО дают спасение: у одной из игрушек вы сожмете упругого, тесно сдавленного Джека под закрытую крышку, в то время как в другой игрушке вы оставите Джека в его развернутом состоянии. Почему? Ну, сжатая пружина имеет больше энергии, чем не сжатая; вы затратили энергию, чтобы сдавить пружину и вы можете видеть подтверждение вашей работы, поскольку сжатая пружина оказывает давление, заставляя крышку игрушки слабо деформироваться наружу. И опять, в соответствии с Эйнштейном, любая дополнительная энергия затрагивает гравитацию, вызывая дополнительный вес. Таким образом, закрытый Джек-в-ящике со сжатой пружиной, оказывая давление наружу, весит чуточку больше, чем открытый Джек-в-ящике с его развернутой пружиной. Это то решение, которое могло бы спасти Ньютона, а вместе с ним и вас, наконец добившись возвращения свободы.

Решение второй загадки указывает на тонкое, но критически важное свойство ОТО, на котором мы сосредоточимся. В своей статье, представляющей ОТО, Эйнштейн математически показал, что гравитационная сила зависит не только от массы и не только от энергии (такой как тепло), но также и от любого давления, которое может быть оказано. И в этом заключается существенная физика, которая необходима нам, если мы хотим понять космологическую константу. И вот почему. Направленное наружу давление, подобное давлению, оказываемому сжатой пружиной, называется положительным давлением. Достаточно понятно, что положительное давление дает положительный вклад в гравитацию. Но, и это критический момент, имеются ситуации, в которых давление в области, в отличие от массы и полной энергии, может быть отрицательным, означая, что давление всасывает внутрь вместо того, чтобы выталкивать наружу. Хотя это может и не звучать особенно экзотично, отрицательное давление может привести кое к чему экстраординарному с точки зрения ОТО: *в то время как положительное давление дает вклад в обычную притягивательную гравитацию, отрицательное давление дает вклад в "отрицательную" гравитацию, то есть в отталкивательную гравитацию*![[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_6" \o )

С этим ошеломляющим открытием ОТО Эйнштейна пробивает брешь в более чем двухсотлетней уверенности, что гравитация является всегда притягивающей силой. Планеты, звезды и галактики, как правильно показал Ньютон, определенно оказывают гравитационное притяжение. Но когда давление становится важным (для обычной материи при повседневных условиях гравитационный вклад от давления пренебрежимо мал) и, в особенности, когда давление отрицательно (для обычной материи вроде протонов и электронов давление положительно, из чего следует, что космологическая константа не может быть составлена ни из чего привычного), имеется вклад в гравитацию, который бы шокировал Ньютона. *Он отталкивательный*.

Этот результат является центральным для большей части последующего изложения и легко может быть неправильно понят, поэтому позвольте мне подчеркнуть один существенный момент. Гравитация и давление являются двумя связанными, но отдельными понятиями в этой истории. Давления, или более точно, разности давлений, могут оказывать свои собственные негравитационные воздействия. Когда вы ныряете под воду, ваши барабанные перепонки могут чувствовать разницу давлений между водой, давящей на них снаружи, и воздухом, давящим на них изнутри. Все это верно. Но суть вопроса, о котором мы говорим сейчас, рассматривая давление и гравитацию, совершенно в другом. В соответствии с ОТО давление может косвенно оказывать другое воздействие, – оно может оказывать гравитационное воздействие, – поскольку давление дает вклад в гравитационное поле. Давление, подобно массе и энергии, является источником гравитации. И поразительно, если давление в области является отрицательным, оно дает вклад в гравитационное отталкивание для гравитационного поля, пронизывающего область, а не в гравитационное притяжение.

Это значит, что когда давление отрицательно, имеется соревнование между обычной притягивающей гравитацией, возникающей из обычной массы и энергии, и экзотической отталкивающей гравитацией, возникающей от отрицательного давления. Если отрицательное давление в области достаточно отрицательно, отталкивательная гравитация будет доминировать; гравитация будет расталкивать вещи в стороны сильнее, чем стягивать их вместе. Именно тут космологическая константа появляется на сцене. Космологический член, который Эйнштейн добавил в уравнения ОТО, должен означать, что пространство однородно заполнено энергией, но, что критично, уравнения показывают, что эта энергия имеет однородное отрицательное давление. И, что еще более важно, гравитационное отталкивание отрицательного давления космологической константы преодолевает гравитационное притяжение, происходящее от ее положительной энергии, так что отталкивательная гравитация побеждает в этом соревновании: космологическая константа оказывает*всюду отталкивательное гравитационное воздействие*.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_7" \o )

Для Эйнштейна это было точно то, что доктор прописал. Обычная материя и излучение, распределенные по вселенной, оказывают притягивающее гравитационное воздействие, вынуждая каждый регион пространства *притягиваться* к каждому другому. Новый космологический член, который он представлял как тоже однородно распределенный по вселенной, оказывает отталкивательное гравитационное воздействие, заставляя каждый регион пространства отталкиваться от каждого другого. При аккуратном выборе величины нового члена Эйнштейн нашел, что вновь открытая отталкивающая гравитационная сила должна точно уравновешивать обычное притягивающее гравитационное воздействие, что дает статическую вселенную.

Более того, поскольку новая отталкивающая гравитационная сила возникает из энергии и давления самого пространства, Эйнштейн нашел, что их сила кумулятивна; сила становится больше при больших пространственных расстояниях, поскольку чем больше вовлечено пространства, тем больше отталкивание наружу. На расстояниях порядка Земли или всей солнечной системы Эйнштейн показал, что новая отталкивательная гравитационная сила неизмеримо мала. Она становится важной только на существенно больших космологических расстояниях, тем самым сохраняя все успехи как Ньютоновской теории, так и его собственной ОТО, когда они применяются недалеко от дома. Короче говоря, Эйнштен нашел, что он может и получить свой пирог и съесть его тоже: он смог сохранить всю привлекательность, все экспериментально подтвержденные свойства ОТО, одновременно наслаждаясь вечной неподвижностью неизменного космоса, того, который ни расширяется, ни сокращается.

С этим результатом Эйнштейн, несомненно, вздохнул облегченно. Какую сердечную боль он мог бы получить, если бы десятилетие суровых исследований, которое он посвятил формулировке ОТО, привело бы в итоге к теории, которая была бы несовместима со статической вселенной, видимой каждому, кто пристально вглядывается в ночное небо. Но, как мы видели, дюжину лет спустя история проделала резкий поворот. В 1929 Хаббл показал, что точечные наблюдения за небом могут вводить в заблуждение. Его систематические наблюдения обнаружили, что вселенная не статична. Она расширяется. Если бы Эйнштейн доверял исходным уравнениям ОТО, он мог бы предсказать расширение вселенной более чем за десять лет до того, как оно было открыто путем наблюдений. Это определенно должно быть поставлено в ряд величайших открытий – это, может быть, самое великое открытие – всех времен. После изучения результата Хаббла Эйнштейн проклял тот день, когда он подумал о космологической константе, и тщательно уничтожил ее в уравнениях ОТО. Он ожидал, что все забудут этот вызывающий сожаление эпизод, и через несколько десятилетий все забыли.

В 1980е, однако, космологическая константа снова всплыла в ослепительной новой форме и указала путь к одному из наиболее драматичных переворотов в космологическом мышлении со времен, когда наш вид впервые этим мышлением заинтересовался.

О прыгающих лягушках и переохлаждении

Если вы поймали взглядом летящий вверх бейсбольный мяч, вы можете использовать закон тяготения Ньютона (или более утонченные уравнения Эйнштейна), чтобы описать его последовательную траекторию. И, если вы проведете требуемые вычисления, вы получите полное понимание того, как движется мяч. Но все еще без ответа останется вопрос: кто или что бросил мяч вверх в начальной точке? Как мяч приобрел начальное направленное вверх движение, чье последовательное разворачивание вы проследили математически? В этом примере небольшое дополнительное исследование в общем случае позволит найти ответ (конечно, за исключением стремления членов высшей лиги объяснить, что мяч просто получил толчок на пути столкновения с лобовым стеклом припаркованного Мерседеса). Но более тяжелая версия аналогичного вопроса стоит на пути основанного на ОТО объяснения расширения вселенной.

Уравнения ОТО, как исходно было показано Эйнштейном, датским физиком Виллемом де Ситтером и впоследствии Фридманом и Леметром, допускают расширяющуюся вселенную. Но, точно так же как уравнения Ньютона ничего не говорят нам о том, как мяч стартовал на своем пути вверх, уравнения Эйнштейна ничего не говорят нам о том, как началось расширение вселенной. Многие годы космологи говорили о начальном направленном наружу расширении пространства как о чем-то необъяснимом, данном, и просто разрабатывали отсюда уравнения далее вперед. Это то, что я имел в виду ранее, когда я говорил, что теория Большого взрыва молчит о самом Взрыве.

Так дела обстояли до пророческой ночи в декабре 1979, когда Алан Гут, преддокторский стипендиат физики, работавший в Стэнфордском Линейном Ускорительном Центре (сейчас он профессор Массачусетского технологического института), показал, что мы можем сделать лучше. Намного лучше. Хотя имелись неясные детали, которые сегодня, более чем через два десятилетия уже разрешены полностью, Гут сделал открытие, что окончательно все заполнившее космологическое безмолвие было следствием Большого взрыва со Взрывом, который был больше, чем кто-либо мог ожидать.

Гут не имел подготовки космолога. Его специальность была физика частиц, и в конце 1970х вместе с Генри Туи из Корнельского университета он изучал различные аспекты Хиггсовых полей в теориях великого объединения. Вспомним из обсуждения последней главы о спонтанном нарушении симметрии, что Хиггсово поле дает вклад в минимально возможную энергию, которая может быть в области пространства, когда величина поля выпадает к особому ненулевому значению (величина которого зависит от детальной формы чаши его потенциальной энергии). В ранней вселенной, когда температура была экстраординарно высока, мы обсуждали, как величина Хиггсова поля дико флуктуировала от одного значения к другому, как лягушка в горячей металлической чаше, чьи ноги опалялись, но когда вселенная остывала, Хиггсы скатились в чашу к величине, которая минимизировала их энергию.

Гут и Туи изучали причины, по которым Хиггсово поле может быть задержано на пути к достижению наименьшей энергетической конфигурации (к выемке в чаше на Рис.9.1с). Если мы применим аналогию с лягушкой к вопросу, который задавали Гут и Туи, он будет таким: что если так уж случится, что лягушка в одном из своих ранних прыжков, когда чаша начала охлаждаться, приземлится на центральном плато? И что если, когда чаша продолжит охлаждаться, лягушка зависнет на центральном плато (неторопливо поедая червей), вместо того, чтобы сползти вниз в выемку чаши? Или, в физических терминах, что если величина флуктуирующего Хиггсова поля приземлится на центральном плато энергетической чаши и останется там, когда вселенная продолжит охлаждаться? Если это произойдет, физики говорят, что Хиггсово поле будет переохлаждено, что означает, что даже если температура вселенной упадет до уровня, где вы ожидали бы, что величина Хиггсова поля приблизилась к низкоэнергетической впадине, она остается захваченной в высокоэнергетической конфигурации. (Это аналогично высокоочищенной воде, которая может быть переохлаждена ниже 0 градусов Цельсия, температуры, при которой вы ожидали, что она превратится в лед, и все еще останется жидкой, поскольку формирование льда требует малых примесей, вокруг которых может расти кристалл).

Гут и Туи заинтересовались этой возможностью, поскольку их расчеты наводили на мысль, что это может иметь отношение к проблеме (проблема магнитного монополя [[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_8" \o )), с которой исследователи столкнулись в ходе различных попыток великого объединения. Но Гут и Туи осознали, что тут может быть иное следствие и, ретроспективно, именно поэтому их работа оказалась стержневой. Они предположили, что энергия, связанная с переохлажденным Хиггсовым полем, – вспомним, что высота поля на чаше представляет его энергию, так что поле имеет нулевую энергию только если его величина лежит в выемке чаши, – может влиять на расширение вселенной. В начале декабря 1979 Гут проследовал за этим подозрением, и вот что он нашел.

Хиггсово поле, которое удержалось на плато, не только наполняет пространство энергией, но, что критически важно, Гут осознал, что оно дает вклад в однородное *отрицательное давление*. Фактически он нашел, что раз уж энергия и давление связаны, Хиггсово поле, которое удержалось на плато, имеет те же самые свойства, как и космологическая константа: оно пропитывает пространство энергией и отрицательным давлением, и в точности в тех пропорциях, как и у космологической константы. Так Гут открыл, что переохлажденное Хиггсово поле важным образом влияет на расширение пространства: подобно космологической константе оно оказывает отталкивательное гравитационное воздействие, которое подвигает пространство к расширению.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_9" \o )

В этот момент, поскольку вы уже свыклись с отрицательным давлением и оттталкивательной гравитацией, вы можете подумать: Ну хорошо, это прекрасно, что Гут нашел особый физический механизм для реализации идеи Эйнштейна о космологической константе, ну и что? Что это за великое дело? Концепция космологической константы давно уже отброшена. Ее введение в физику было ничем иным, как замешательством Эйнштейна. Почему переоткрытие чего-то, что дискредитировало себя более шести десятилетий назад, вызывает такое возбуждение?

Инфляция

А вот почему. Хотя переохлажденное Хиггсово поле обладает определенными свойствами космологической константы, Гут понял, что они не полностью идентичны. Напротив, имеются два ключевых различия – различия, которые делают различным все.



(а) (b)

***Рис 10.1****(а) Переохлажденное Хиггсово поле это поле, чья величина захвачена на высокоэнергетическом плато энергетической чаши, как лягушка на выпуклости, (b) Типичный случай, когда переохлажденное Хиггсово поле быстро найдет свой путь долой с плато и скатится к величине с меньшей энергией, как лягушка, спрыгнувшая с выпуклости.*

Первое, в то время как космологическая константа является константой, – она не меняется со временем, так что она обеспечивает постоянное, неизменное отталкивание наружу, – переохлажденное Хиггсово поле не обязано быть константой. Подумаем о лягушке, усевшейся на выпуклость на Рис. 10.1а. Она может болтаться там некоторое время, но рано или поздно хаотический прыжок тем или иным образом – прыжок, вызванный не тем, что чаша горячая (она уже остыла), а скорее тем, что лягушка неугомонная, – столкнет лягушку с выпуклости, после чего она сползет вниз к низшей точке чаши, как показано на Рис. 10.1b. Хиггсово поле может вести себя аналогично. Его величина по всему пространству может завязнуть на центральной выпуклости его энергетической чаши, в то время как температура упадет слишком низко, чтобы вызвать существенное термическое перемешивание. Но квантовые процессы внесут хаотические скачки в величину Хиггсова поля, и достаточно большой скачок сбросит его с плато, позволив его энергии и давлению релаксировать к нулю.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_10" \o ) Расчеты Гута показали, что в зависимости от точной формы выпуклости чаши этот скачок может произойти быстро, возможно, в течение такого же короткого времени, как 10–35 секунды. Впоследствии Андрей Линде, тогда работавший в Физическом институте Лебедева в Москве, и Пол Стейнхардт, тогда работавший со своим студентом Андреасом Альбрехтом в Университете Пенсильвании, открыли, что путь для релаксации Хиггсова поля к нулевой энергии и давлению во всем пространстве происходил даже более рационально и существенно более однородно (при этом разрешив некоторые технические проблемы, свойственные оригинальному предложению Гута[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_11" \o )). Они показали, что если чаша потенциальной энергии была более гладкая и более полого наклоненная, как на Рис. 10.2, квантовые прыжки могут не быть обязательными: величина Хиггсова поля быстро скатилась бы в выемку, что весьма похоже на мяч, скатывающийся с холма. Результат таков, что если Хиггсово поле действует подобно космологической константе, оно делает это только в течение короткого момента.



***Рис 10.2****Более гладкая и более полого спадающая выпуклость позволяет величине Хиггсова поля скатиться вниз в выемку нулевой энергии более легко и более однородно во всем пространстве.*

Второе отличие заключается в том, что, в то время как Эйнштейн осторожно и произвольно выбрал величину космологической константы, – количество энергии и отрицательное давление, которое она вносит в каждый объем пространства, – так что ее отталкивающая вовне сила должна была в точности компенсировать притягивающую вовнутрь силу, возникающую от обычной материи и излучения в космосе, Гут смог оценить вклад в энергию и отрицательное давление от Хиггсовых полей, которые они с Туи изучали. И ответ, который он нашел, был более чем в 10100 раз больше, чем выбранная Эйнштейном величина. Эта величина, очевидно, огромна, так что отталкивание вовне, обеспечиваемое отталкивательной гравитацией Хиггсова поля, монументально по сравнению с тем, что Эйнштейн исходно представлял с космологической константой.

Теперь, если мы объединим эти два наблюдения, – что Хиггсово поле будет находиться на плато в высокоэнергичном состоянии с отрицательным давлением только кратчайший момент, и что, пока оно находится на плато, генерируемое им отталкивание наружу будет гигантским, – то что мы получим? Ну, как осознал Гут, мы получим феноменальный короткоживущий направленный вовне взрыв. Другими словами, мы получим в точности то, чего избегает теория Большого взрыва: взрыв и при этом большой. Это то, почему открытие Гута так воодушевляет.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_12" \o )

Космологическая картина, возникающая из прорыва Гута, следовательно, такова. Давным давно, когда вселенная была чудовищно плотной, ее энергия передавалась Хиггсову полю, возвышавшемуся в своей чаше потенциальной энергии на далекой от низшей точки величине. Чтобы отделить это особое Хиггсово поле от других (таких как электрослабое Хиггсово поле, отвечающее за появление массы у обычных семейств частиц, или Хиггсово поле, которое появляется в теориях великого объединения[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_13" \o )), его обычно называют полем *инфлатона*.\*

*(\*) "Вы можете подумать, что я забыл поставить "i" в последнем слоге ("inflaton" вместо "inflation"), но это не так; физики часто дают полям имена, такие как фотон и глюон, которые оканчиваются на "он"."*

Вследствие своего отрицательного давления поле инфлатона генерировало гигантское гравитационное отталкивание, которое растаскивало каждый регион пространства прочь от любого другого; на языке Гута инфляция заставляла вселенную раздуваться. Отталкивание длилось всего около 10–35секунды, но оно было столь сильным, что даже за этот кратчайший момент вселенная раздулась в гигантское число раз. В зависимости от деталей точной формы потенциальной энергии инфляционного поля вселенная могла легко расшириться на фактор 1030, 1050 или 10100 или больше.

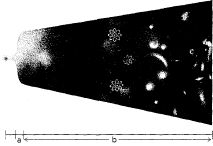
Эти числа потрясяют. Фактор расширения 1030 – консервативная оценка – подобен увеличению размера молекулы ДНК грубо до величины галактики Млечного Пути, и все это за временной интервал много короче, чем миллиардная миллиардной миллиардной доли от мигания глаза. Для сравнения, даже этот консервативный фактор расширения в миллиарды миллиардов раз больше расширения, которое могло бы возникнуть в соответствии со стандартной теорией Большого Взрыва за тот же самый временной интервал, и это превышает полный фактор расширения, который возник в целом за последующие 14 миллиардов лет! Во многих моделях инфляции, в которых рассчитанный фактор расширения намного больше, чем 1030, результирующая пространственная протяженность вселенной настолько велика, что регион, который мы, возможно, можем видеть даже в самые мощные телескопы, является мельчайшей долей целой вселенной. В соответствии с этими моделями свет, эмитированный из безбрежного большинства областей вселенной, еще не мог достигнуть нас, и большая часть его не появится еще очень долго после того, как Солнце и Земля исчезнут. Если весь космос уменьшить до размеров Земли, то часть, доступная нашим наблюдениям, будет намного меньше, чем песчинка.

Грубо через 10–35 после начала раздувания поле инфлатона нашло свой путь от плато с высокой энергией и его величина во всем пространстве соскользнула на дно чаши, выключив отталкивательное давление. А раз уж величина инфлатона скатилась вниз, она передала свою сдерживаемую энергию на производство обычных частиц материи и радиации, – подобно тому, как туманная дымка оседает на траву как утренняя роса, – которые однородно заполнили расширяющееся пространство.[[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_14" \o ) С этого момента история, по существу, становится такой же, как и в стандартной теории Большого взрыва: пространство продолжает расширяться и охлаждаться после раздувания, позволяя частицам материи слипаться в структуры вроде галактик, звезд и планет, которые медленно распространяются по вселенной, которую мы в настоящее время видим, как показано на Рис. 10.3.

Открытие Гута – окрещенное *инфляционной космологией* – вместе с важными усовершенствованиями, внесенными Линде, Альбрехтом и Стейнхардом, обеспечило объяснение того, что заставило пространство расширяться в первую очередь. Хиггсово поле, удерживаемое на величине выше своей нулевой энергии, может обеспечить выдавливание пространства вовне к раздуванию. Гут обеспечил Большой взрыв Взрывом.

Инфляционная структура

Открытие Гута было быстро провозглашено крупным достижением и стало доминирующим направлением космологических исследований. Но отметим две вещи. Первое, в стандартной модели Большого взрыва сам Взрыв, предположительно, произошел в момент времени нуль, в самом начале вселенной, так что он выглядит как акт творения. Но точно так же, как кусок динамита взрывается только когда он должным образом подожжен, в инфляционной космологии Взрыв произошел только тогда, когда условия сложились правильные, – когда имелось поле инфлатона, чья величина обеспечила энергию и отрицательное давление, которое явилось топливом отталкивательной гравитации для раздувания вовне, – и это не нуждается в сравнении с "творением" вселенной. По этой причине инфляционный взрыв лучше всего мыслить как событие, которое пережила предшествовавшая вселенная, но не обязательно как событие, которое создало вселенную. Мы отметили это на Рис. 10.3, сохранив некоторое размытое пятно от Рис. 9.2, обозначив наше продолжающееся неведение относительно фундаментального начала: более точно, если инфляционная космология верна, наше неведение относительно того, почему имелось поле инфлатона, почему чаша его потенциальной энергии имела правильную форму, чтобы произошла инфляция, почему имелось пространство и время, в рамках которых имело место все обсуждение, и, вспомнив более великую фразу Лейбница, почему есть что-то вместо ничего.



***Рис 10.3****(а) Инфляционная космология вводит быстрое гигантское раздувание пространственной протяженности в ранней истории вселенной, (b) После раздувания эволюция вселенной переходит в стандартную эволюцию, разработанную в модели Большого взрыва.*

Второе и связанное наблюдение таково, что инфляционная космология не является отдельной однозначной теорией. Скорее это космологическая система, выстроенная вокруг осознания, что гравитация может быть отталкивательной и, следовательно, может двигать раздувание пространства. Точные детали раздувания вовне – когда оно произошло, как долго оно длилось, сила направленного вовне давления, фактор, на который вселенная увеличилась во время раздувания, количество энергии, которую инфляция вложила в обычную материю, когда раздувание подошло к концу, и так далее – зависят от деталей, больше всего от размера и формы потенциальной энергии поля инфлатона, которые в настоящее время находятся вне наших способностей определить их только из теоретических рассмотрений. Так что многие годы физики изучали все виды возможностей – различные формы потенциальной энергии, различные количества полей инфлатона, которые работают в тандеме, и так далее – и определили, какие выборы дают теориям лучшее соответствие с астрономическими наблюдениями. Важной вещью является то, что имеются аспекты инфляционных космологических теорий, которые переступают пределы деталей и поэтому являются общими, по существу, для любой реализации. Само раздувание вовне, по определению, является одним из таких свойств, и потому любая инфляционная модель приходит ко Взрыву. Но имеются и другие свойства, присущие всем инфляционным моделям, которые живы, поскольку они решают важные проблемы, которые привели в тупик стандартную космологию Большого взрыва.

Инфляция и проблема горизонта

Одна из таких проблем называется проблемой горизонта и заключается в однородности микроволнового фонового излучения, о чем мы говорили раньше. Повторим, что температура микроволновой радиации, достигающей нас по одному направлению в пространстве, согласуется с температурой радиации, которая приходит по любому другому направлению с фантастической точностью (лучше, чем тысячная доля градуса). Этот наблюдательный факт является стержневым, поскольку он удостоверяет однородность всего пространства, что позволяет сделать гигантские упрощения в теоретических моделях космоса. В предыдущих главах мы использовали эту однородность, чтобы существенно снизить количество возможных форм пространства и чтобы обосновать однородное космическое время. Проблема появляется, когда мы пытаемся объяснить, как вселенная стала однородной. Как так получилось, что обширные удаленные рагионы вселенной так упорядочились, что стали иметь почти одинаковую температуру?

Если вы мысленно вернетесь к Главе 4, то одна из возможностей такова, что точно так же, как нелокальное квантовое запутывание может коррелировать спины двух широко разнесенных частиц, может быть, оно может коррелировать также и температуры двух широко разнесенных регионов пространства. Хотя это интересное предположение, потрясяющая ничтожность запутывания во всех наиболее контролируемых ситуациях, как обсуждается в конце этой главы, по существу это исключает. Ладно, возможно, имеется более простое объяснение. Может быть, давным давно, когда каждый регион пространства был ближе к каждому другому, их температуры выравнивались через их тесный контакт, почти как горячая кухня и холодная жилая комната приходят к одной и той же температуре, когда дверь между ними на время открыта. В стандартной теории Большого взрыва, однако, это объяснение также не годится. Приведем один из способов подумать об этом.

Представьте просмотр пленки, на которой изображен полный курс космической эволюции от начала до сегодняшнего дня. Остановите пленку на некотором произвольном моменте и спросите себя; могут ли два отдельных региона пространства, подобных кухне и жилой комнате, влиять на температуру друг друга? Могут ли они обмениваться светом и теплом? Ответ зависит от двух вещей: расстояния между регионами и количества времени, истекшего с момента Взрыва. Если расстояние между ними меньше, чем путь, который может проделать свет за время с момента Взрыва, тогда регионы могут повлиять друг на друга; в противном случае не могут. Теперь вы можете подумать, что все регионы наблюдаемой вселенной могли взаимодействовать друг с другом когда-то вблизи начала, поскольку чем дальше мы отматываем пленку назад, тем теснее становятся регионы и поэтому им легче провзаимодействовать. Но это рассуждение слишком поспешное; не принят во внимание тот факт, что не только регионы пространства были ближе друг к другу, но также и времени у них было меньше, чтобы совершить обмен.

Чтобы провести корректный анализ, представьте космическую пленку, прокручивающуюся в обратном направлении, в то время как вы сосредоточились на двух регионах пространства, находящихся в настоящее время на противоположных сторонах наблюдаемой вселенной, – регионах настолько удаленных, что они в настоящее время находятся вне сферы влияния друг друга. Если для уменьшения вдвое расстояния между ними мы отмотаем космическую пленку более чем наполовину назад по направлению к началу, тогда даже если регионы пространства были ближе друг к другу, коммуникации между ними были все еще невозможны: они были разделены наполовину по сравнению с сегодняшним положением, но и времени с момента Взрыва прошло тоже меньше, чем половина от сегодняшнего, так что свет смог бы пролететь только меньше половины нужного расстояния. Аналогично, если из этой точки на пленке мы переместимся более чем наполовину назад к началу, чтобы еще раз вдвое уменьшить расстояние между регионами, коммуникации между ними остаются еще более затрудненными. При таком виде космической эволюции, даже если регионы были ближе друг к другу в прошлом, становится более загадочным – не менее – что они каким-то образом смогли выровнять свои температуры. В зависимости от того, как далеко свет может пропутешествовать, регионы становятся все более отсеченными друг от друга по мере того, как мы исследуем их все дальше назад во времени.

Это в точности то, что происходит в стандартной теории Большого взрыва. В стандартной теории Большого взрыва гравитация действует только как притягивающая сила, так что с самого начала она действует, чтобы ослабить расширение пространства. Теперь, если что-либо ослабляется, ему потребуется больше времени, чтобы покрыть заданную дистанцию. Например, представьте, что Секретариат покинул старт стремительной иноходью и покрыл первую половину скаковой дистанции за две минуты, но, поскольку сегодня не его лучший день, он заметно сдал на второй половине и взял три дополнительные минуты до финиша. При просмотре пленки скачек в обратном порядке мы отмотали пленку более чем наполовину назад, чтобы увидеть, как Секретариат пересекает отметку половины дистанции (мы передвинулись по пятиминутной пленке всех скачек назад к двухминутной отметке). Аналогично, поскольку в стандартной теории Большого взрыва гравитация ослабляет расширение пространства, из любой точки на космической пленке нам нужно отмотать больше чем половину назад во времени, чтобы уполовинить расстояние между двумя регионами. И, как выше, это означает, что даже если области пространства были ближе друг к другу в более ранние времена, было более трудно – а не менее – для них оказать друг на друга влияние, и потому более загадочно, – а не менее – что они как-то достигли одинаковой температуры.

Физики определяют *космический горизонт* региона (или, для краткости, *горизонт*) как наболее удаленные окружающие регионы пространства, которые достаточно близки к данному региону, чтобы любая пара могла обменяться световыми сигналами за время, прошедшее с момента Взрыва. Имеется аналогия с самыми удаленными вещами, которые мы можем видеть на земной поверхности из любой отдельной точки отсчета.[[15]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_15" \o ) Тогда *проблема горизонта*заключается в загадке, присущей наблюдениям, что области, чьи горизонты всегда были разделены, – области, которые никогда не могли взаимодействовать, находиться в связи или любым способом оказывать влияние друг на друга, – каким-то образом имеют почти одинаковую температуру.

проблема горизонта не подразумевает, что стандартная модель Большого взрыва неверна, но она взывает к объяснению. Инфляционная космология его обеспечивает.

В инфляционной космологии имелось краткое мгновение, во время которого гравитация была отталкивательной, и это заставило пространство расширяться все быстрее и быстрее. Во время этой части космической пленки, вы могли бы отмотать пленку менее чем наполовину назад, чтобы вдвое уменьшить расстояние между регионами. Подумайте о скачках, в которых Секретариат покрыл первую половину дистанции за две минуты, а затем, поскольку это были бега его жизни, ускорился и промчался через вторую половину за одну минуту. Вы будете перематывать назад только трехминутную пленку к двухминутной отметке – менее, чем наполовину назад, – чтобы увидеть его пересекающим отметку половины дистанции. Аналогично, ускоряющийся темп разделения любых двух регионов пространства во время инфляционного расширения предполагает, что уменьшение вдвое расстояния между ними потребует отматывания космической пленки менее – *намного менее*, – чем наполовину назад к началу. Следовательно, если мы двигаемся дальше назад во времени, для любых двух регионов пространства становится легче оказать влияние друг на друга, поскольку, соответственно говоря, имеется больше времени для их взаимодействия. Расчеты показывают, что если фаза инфляционного расширения заставила пространство расшириться, как минимум, на фактор 1030 (число, которое легко достигается в отдельных реализациях инфляционного сценария), все области пространства, которые мы видим в настоящее время, – все регионы пространства, чьи температуры мы можем измерить, – были в состоянии взаимодействовать также легко, как смежная кухня и жилая комната, и потому естественно пришли к одинаковой температуре в ранние моменты вселенной.[[16]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_16" \o ) В двух словах, пространство расширяется достаточно медленно в самом начале, чтобы однородная температура могла широко установиться, а затем в ходе интенсивного взрыва все более быстрого расширения вселенная состыковала вялый старт и широкое разнесение близких регионов.

Таким образом инфляционная космология объяснила однородность микроволнового фонового излучения, заполняющего пространство, которая в ином случае загадочна.

Инфляция и проблема плоскостности

Вторая проблема, адресуемая инфляционной космологии, имеет дело с формой пространства. В Главе 8 мы установили критерии однородной пространственной симметрии и нашли три способа, которыми ткань пространства может изгибаться. Обращаясь к нашей двумерной визуализации, имеются возможности положительной кривизны (форма подобная поверхности шара), отрицательной кривизны (седловая форма) и нулевой кривизны (форма подобная бесконечной плоской поверхности стола или экрану видеоигры конечных размеров). С ранних дней ОТО физики осознавали, что полная материя и энергия в каждом объеме пространства – плотность материи/энергии – определяет кривизну пространства. Если плотность материи/энергии высока, пространство свернется в форму сферы; это значит, что будет положительная кривизна. Если плотность материи/энергии низка, пространство будет расширятся вовне как седло; это значит, будет отрицательная кривизна. Или, как отмечалось в последней главе, для очень специального количества плотности материи/энергии – критической плотности, равной массе около пяти атомов водорода (около 10–23 грамм) в каждом кубическом метре, – пространство будет лежать точно между этими двумя экстремумами и будет совершенно плоским; это значит, что кривизны не будет.

Теперь о загадке.

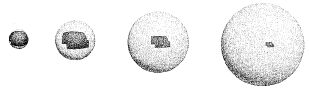
Уравнения ОТО, которые лежат в основе стандартной модели Большого взрыва, показывают, что если плотность материи/энергии в начале была в точности равна критической плотности, то она останется равной критической плотности, когда пространство расширяется.[[17]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_17" \o ) Но если плотность материи/энергии была хотя бы чуть-чуть больше или чуть-чуть меньше, чем критическая плотность, последующее расширение уведет ее очень и очень далеко от критической плотности. Чтобы прямо почувствовать числовые величины, отметим, что если через секунду после Большого Взрыва вселенная не дотягивала до критической плотности, имея 99,99 процента от нее, расчеты показывают, что сегодня ее плотность была бы в любом случае уведена вниз до величины 0,00000000001 от критической плотности. Эта разновидность ситуации подобна той, с которой столкнулся скалолаз, который прогуливается по тонкому как бритва уступу с крутым склоном с каждой стороны. Если его шаг направлен прямо по грани, он сможет пересечь уступ. Но даже малейший ошибочный шаг, сделанный чуть слишком влево или вправо, приведет к существенно иному исходу. (И с риском получить одну из слишком далеко идущих аналогий, это свойство стандартной модели Большого Взрыва также напоминает мне душевую много лет назад в студенческом общежитии колледжа: если вы сможете установить кран абсолютно точно, вы сможете получить комфортабельную температуру воды. Но если вы отклонитесь на йоту туда или сюда, вода будет или обжигающая или замораживающая. Некоторые студенты просто прекращали мыться совсем).

Десятилетия физики пытались измерить плотность материи/энергии во вселенной. В 1980е, хотя измерения были далеки от завершения, одна вещь стала определенной: плотность материи/энергии вселенной не является в тысячи и тысячи раз меньше или больше, чем критическая плотность; эквивалентно, пространство искривлено несущественно, или положительно или отрицательно. Это осознание бросило неудобный свет на стандартную модель Большого взрыва. Оно подразумевало, что для соответствия стандартного Большого взрыва наблюдениям некоторый механизм – один из тех, которые никто не может объяснить или идентифицировать, – должен был тонко настроить плотность материи/энергии ранней вселенной экстраординарно близко к критической плотности. Например, расчеты показывают, что через одну секунду после Большого взрыва плотность материи/энергии вселенной должна была находиться в пределах *миллионной от миллионой доли процента* от критической плотности; если бы материя/энергия отклонилась от критической величины на любое, большее этого мизерного ограничения значение, стандартная модель Большого взрыва предсказала бы плотность материи/энергии сегодня, которая чрезвычайно отличалась бы от того, что мы наблюдаем. Тогда в соответствии со стандартной моделью Большого взрыва, ранняя вселенная была бы сильно похожа на скалолаза, покачивающегося вдоль экстремально узкого склона. Малейшее отклонение в условиях миллиарды лет назад должно было бы привести к сегодняшней вселенной, сильно отличающейся от показанных астрономами измерений. Это известно как *проблема плоскостности*.

Хотя мы охватили существенные идеи, важно понять смысл, в котором проблема плоскостности является проблемой. Проблема плоскостности ни в каком смысле не показывает, что стандартная модель Большого взрыва не верна. Стойкий последователь прореагирует на проблему плоскостности пожиманием плечами и лаконичной репликой: "Это просто так, как это было тогда давно", приняв тонко настроенную плотность материи/энергии ранней вселенной, – которую стандартная модель Большого взрыва требует, чтобы дать предсказания, которые находятся в одном и том же диапазоне, что и наблюдения, – как необъяснимую данность. Но этот ответ вызовет отвращение у большинства физиков. Физики чувствуют, что теория чрезвычайно неестественна, если ее успехи зависят от экстремально точной настройки свойств, для которого вы не имеете фундаментального объяснения. Без предложения причин, почему плотность материи/энергии ранней вселенной должна была бы быть так тонко настроена на приемлемую величину, многие физики нашли стандартную модель Большого взрыва слишком придуманной. Так что проблема плоскостности высвечивает экстремальную чувствительность стандартной модели Большого взрыва к условиям в удаленном прошлом, о которых мы знаем очень мало; это показывает, как теория для своей работоспособности должна предполагать, какой была вселенная.

Напротив, физики испытывают потребность в теориях, чьи предсказания нечувствительны к неизвестным величинам, вроде того, каковы были вещи в далеком прошлом. Такие теории кажутся крепкими и естественными, поскольку их предсказания не зависят чувствительно от деталей, которые тяжело или даже вообще невозможно определить напрямую. Этот вид теории обеспечивается инфляционной космологией, и предлагаемое ей решение проблемы плоскостности иллюстрирует, почему это так.

Существенное наблюдение заключается в том, что, в то время как притягивающая гравитация увеличивает любое отклонение от критической плотности материи/энергии, отталкивающая гравитация инфляционной теории действует противоположно: она уменьшает любое отклонение от критической плотности. Чтобы почувствовать, почему это так, самое простое использовать тесную связь между плотностью материи/энергии вселенной и ее кривизной из геометрических соображений. В особенности отметим, что даже если форма ранней вселенной была существенно искривленной, после инфляционного расширения часть пространства, достаточно большая для включения в себя наблюдаемой сегодня вселенной, выглядит очень близко к плоской. Это свойство геометрии, о котором мы все осведомлены: поверхность баскетбольного мяча, очевидно, искривлена, но потребовалось много времени и мыслителей с нахальством, прежде чем каждый согласился, что поверхность Земли также искривлена. Причина в том, что при прочих равных условиях чем большие размеры имеет что-то, тем более постепенно оно искривляется и тем более плоским кажется кусок заданного размера на его поверхности. Если вы накинете штат Небраска на сферу только в несколько сотен миль в диаметре, как на Рис 10.4а, он будет выглядеть искривленным, но на земной поверхности, с чем согласны все жители Небраски, он выглядит плоским. Если вы расположите Небраску на сферу в миллиард раз больше Земли, она будет выглядеть еще более плоской. В инфляционной космологии пространство растягивается на такой колоссальный фактор, что наблюдаемая вселенная, та часть, которую мы можем видеть, является всего лишь малым кусочком в гигантском космосе. Так что, подобно Небраске, расположенной на гигантской сфере, как на Рис 10.4d, даже если вся вселенная искривлена, наблюдаемая вселенная будет очень близка к плоской.[[18]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_18" \o )



(а) (b) (c) (d)

***Рис 10.4****Форма фиксированного размера, такая как штат Небраска, кажется все более и более плоской, когда она располагается на все более и более больших сферах. В этой аналогии сфера представляет всю вселенную, тогда как Небраска представляет наблюдаемую вселенную – часть внутри нашего космического горизонта.*

Это похоже на противоположно ориентированные магниты, вставленные в ботинки скалолаза, если они достаточно сильные, и толщину склона, который он пересекает. Даже если его шаг пытается несколько отклониться от рубежа, сильное притяжение между магнитами обеспечивает, что его ноги останутся прямо на склоне. Аналогично, даже если ранняя вселенная отклонилась на значительную величину от критической плотности материи/энергии и потому была далека от плоской, инфляционное расширение обеспечит, что часть пространства, к которому мы имеем доступ, будет приведена к плоской форме, а плотность материи/энергии, к которой мы имеем доступ, будет приведена к критической величине.

Прогресс и предсказания

Проникновение инфляционной космологии в проблемы горизонта и плоскостности представляет потрясающий прогресс. Для космологической эволюции, чтобы получить однородную вселенную, чья плотность материи/энергии хотя бы отдаленно приближалась к тому, что мы сегодня наблюдаем, стандартная модель Большого взрыва требует точнейшей, необъяснимой, почти сверхъестественной настройки первоначальных условий. Эта настройка может быть допустима как заслуживающая доверия с точки зрения адвокатов стандартной модели Большого взрыва, но отсутствие объяснения делает теорию искусственной.

Напротив, безотносительно к детальным свойствам плотности материи/энергии ранней вселенной, инфляционная космологическая эволюция предсказывает, что часть вселенной, которую мы можем видеть, должна быть очень близка к плоской; это значит, она предсказывает, что плотность материи/энергии, которую мы наблюдаем, должна быть очень близка к 100 процентам от критической плотности.

Нечувствительность к детальным свойствам ранней вселенной является замечательным качеством инфляционной теории, поскольку она позволяет давать определенные предсказания независимо от нашей неосведомленности об условиях далекого прошлого. Но мы теперь можем спросить: Как эти предсказания соотносятся с детальными и точными наблюдениями? Поддерживают ли данные опыта предсказание инфляционной космологии, что мы должны наблюдать плоскую вселенную, содержащую в себе критическую плотность материи/энергии?

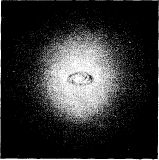
Долгие годы ответ, казалось, должен быть: "Не совсем". Многочисленные астрономические исследования тщательно измеряли количество материи/энергии, которое должно быть видно в космосе, и ответ получался около 5 процентов от критической плотности. Это далеко от гигантских или ничтожных плотностей, к которым естественно приводит стандартная модель Большого взрыва – без искусственной тонкой настройки, – и является тем, что я упоминал раньше, когда я говорил, что наблюдения устанавливают плотность материи/энергии вселенной, не отличающуюся в тысячи и тысячи раз от критической плотности в большую или меньшую сторону. Даже так 5 процентов не достигают цели в 100 процентов, что предсказывает инфляция. Но физики давно осознали, что должна быть проявлена осторожность в оценке данных. Астрономические исследования, говоря о 5 процентах, принимают во внимание только материю и энергию, которая излучает свет, и потому может быть видна в телескопы астрономов. И за десятилетия, даже перед открытием инфляционной космологии, было очевидно установлено, что вселенная имеет массивную темную часть.

Предсказание темноты

Во время ранних 1930х Фриц Цвикки, профессор астрономии Калифорнийского Технологического Института (в высшей степени язвительный ученый, чье понимание симметрии привело его к названию своих коллег сферическими ублюдками, поскольку, как он объяснял, они были ублюдками, с какой бы стороны вы на них ни посмотрели[[19]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_19" \o )), осознал, что удаленные галактики в скоплении в созвездии Волосы Вероники (скопление Кома), коллекции тысяч галактик на расстоянии около 370 миллионов световых лет от Земли, двигаются слишком быстро, чтобы их видимая материя собрала достаточную гравитационную силу, чтобы удержать их привязанными к группе. Вместо этого, его анализ показал, что многие из наиболее быстро двигающихся галактик должны очевидно выбрасываться из группы, подобно каплям воды, отброшенным вращающимся велосипедным колесом. Однако этого нет. Цвикки выдвинул гипотезу, что там может быть дополнительная материя, пропитывающая скопление, которая не излучает света, но добавляет дополнительное гравитационное притяжение, необходимое, чтобы удерживать группу вместе. Его расчеты показали, что если объяснение правильное, значительно большая часть массы группы должна содержаться в этом несветящемся материале. К 1936 подтвержденное свидетельство было найдено Синклером Смитом из обсерватории Маунт Вилсон, который изучил скопление галактик в созвездии Девы (скопление Вирго) и пришел к аналогичному заключению. Но поскольку наблюдения обоих ученых, точно так же, как многих других последующих, имели различные неопределенности, многие остались не убежденными, что имеется массивная невидимая материя, чье гравитационное притяжение удерживает группы галактик вместе.

На протяжении следующих тридцати лет наблюдаемые подтверждения несветящейся материи продолжали нарастать, но реально вопрос был решен работой астронома Веры Рубин из Института Карнеги в Вашингтоне вместе с Кентом Фордом и другими. Рубин и ее коллеги изучили движения звезд внутри большого числа вращающихся галактик и пришли к заключению, что если то, что мы видим, является тем, что есть на самом деле, то многие звезды галактик должны регулярно выбрасываться наружу. Их наблюдения окончательно показали, что видимая материя галактик нигде не может оказывать достаточно сильное гравитационное притяжение, чтобы удержать наиболее быстрые звезды от освобождения. Однако, их детальный анализ также показал, что звезды будут оставаться гравитационно привязанными, если галактики, где они обитают, погружены в гигантский шар несветящейся материи (как показано на Рис.10.5), чья общая масса намного превосходит массу видимого галактического материала. Итак, как на представлении, где обозначается присутствие одетого в темное мима, даже если видны только его руки в белых перчатках, летающие туда и сюда по неосвещенной сцене, астрономы пришли к выводу, что вселенная должна быть заполнена *темной материей* – материей, которая не слипается в звезды и потому не излучает свет, и которая при этом оказывает гравитационное притяжение, не становясь видимой. Светящиеся составляющие вселенной – звезды – проявляются как плавающие маяки в гигантском океане темной материи.[[20]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_20" \o )

Но если темная материя должна существовать, чтобы произвести наблюдаемые движения звезд и галактик, как понять, что это такое? До настоящего времени никто не знает. Идентификация темной материи остается важнейшей и неясной тайной, хотя астрономы и физики предложили большое число возможных составляющих от различных экзотических частиц до космической ванны из миниатюрных черных дыр. Но даже без определения ее состава, через внимательный анализ ее гравитационных эффектов астрономы смогли определить с существенной точностью, как много темной материи распределено по всей вселенной. И ответ, который они нашли, оценивается в 25 процентов от критической плотности.[[21]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_21" \o ) Так что вместе с 5 процентами, находящимися в видимой материи, темная материя приносит нам итог в 30 процентов от количества, предсказанного инфляционной космологией.



***Рис 10.5****Галактика, погруженная в шар темной материи (которая искусственно подсвечена, чтобы сделать ее видимой на рисунке).*

Ну, определенно, это прогресс, но в течение долгого времени ученые чесали свои затылки, удивляясь, как оценивать оставшиеся 70 процентов вселенной, которая, если инфляционная космология верна, вероятно, как говорят военные, находится в самовольной отлучке. И тогда в 1998 две группы астрономов пришли к одному и тому же шокирующему заключению, которое заставило нашу историю полностью замкнуть круг и еще раз проявило предвидение Альберта Эйнштейна.

Убегающая вселенная

Точно так же, как вы можете стремиться получить второе заключение специалиста для подтверждения медицинского диагноза, физики тоже стремятся получить вторые мнения, когда они приходят к данным или теориям, которые ведут к загадочным результатам. Из этих вторых заключений наиболее убедительными являются те, которые приходят к тем же заключениям с точки зрения, которая резко отличается от исходного анализа. Когда направления объяснений сходятся в одной точке из разных углов, это дает хороший шанс, что мы попали в научное яблочко. Тогда естественно, что с инфляционной космологией, которая строго поддерживает некоторые совсем причудливые вещи, – что 70 процентов массы/энергии вселенной еще должно быть измерено и идентифицировано, – физики стремились к независимому подтверждению. Давно было осознано, что таким трюком могли бы стать измерения параметра торможения.

Еще с момента после начального инфляционного раздувания обычная притягивающая гравитация замедляла расширение пространства. Темп, с которым происходит это замедление, называется параметром торможения. Точное измерение параметра могло бы обеспечить независимый взгляд на полное количество материи во вселенной: больше материи, дает ли она свет или нет, подразумевает большее гравитационное притяжение и потому более определенно ослабляет пространственное расширение.

Многие десятилетия астрономы пытались измерить торможение вселенной, но хотя это делается непосредственно в принципе, это сложная задача на практике. Когда мы наблюдаем удаленные массивные тела, вроде галактик или квазаров, мы видим их такими, какими они были в далеком прошлом: чем они дальше от нас, тем дальше назад во времени мы их наблюдаем. Так, если мы могли бы измерить, как быстро они удаляются от нас, мы получили бы измерение того, как быстро вселенная расширялась в удаленном прошлом. Более того, если мы могли бы провести такие измерения с астрономическими объектами, расположенными на разных расстояниях, мы смогли бы измерить темп расширения вселенной в разные моменты прошлого. Сравнивая эти темпы расширения, мы могли бы определить, как ослабляется расширение пространства во времени и отсюда определить параметр торможения.

Таким образом, для проведения этой стратегии для измерения параметра торможения требуются две вещи: способ измерения расстояния до данного астрономического объекта (так что мы знаем, как далеко назад во времени мы заглядываем) и способ определения скорости, с которой объект удаляется от нас (так что мы знаем темп пространственного расширения в этот момент прошлого). Последнюю составляющую получить проще. Точно так же, как вой сирены полицейского автомобиля падает к более низкому тону, когда он удаляется от вас, частота колебаний света, эмитированного астрономическим источником, также падает, когда объект удаляется. А поскольку свет испускается атомами вроде водорода, гелия или кислорода – атомами, которые входят в состав звезд, квазаров и галактик, – которые тщательно изучены при лабораторных условиях, точное определение скорости объекта может быть проделано через изучение того, как свет, который мы получаем, отличается от света, который мы видим в лаборатории.

Но первая составляющая, метод для точного определения, как далеко находится объект, причиняет астрономам головную боль. Чем дальше что-либо находится, тем более смутно вы его можете различить, но перевести это простое наблюдение в количественное измерение трудно. Чтобы установить дистанцию до объекта по его относительной яркости, вам нужно знать его внутреннюю яркость – насколько ярким бы он был прямо рядом с вами. А определить внутреннюю яркость объекта, удаленного на миллиарды световых лет, тяжело. Генеральная стратегия заключается в поиске видов массивных тел, которые по фундаментальным астрофизическим причинам всегда светят со стандартной заслуживающей доверия яркостью. Если пространство заполнено ярко светящимися 100-ваттными лампочками, хитрость бы удалась, поскольку мы могли бы легко определить расстояние до данной лампочки на основании того, насколько тусклой она выглядит (хотя это была бы сложная задача увидеть 100-ваттную лампочку на существенном удалении). Но, поскольку пространство так не оформлено, что могло бы сыграть роль лампочки стандартной яркости или, на астрономическом языке, что может сыграть роль *стандартной свечи*? В течение лет астрономы изучали различные возможности, но наиболее успешным кандидатом на сегодняшний день является особый класс взрывов сверхновых.

Когда звезды исчерпывают свое ядерное горючее, направленное наружу давление от ядерной реакции в ядре звезды уменьшается и звезда начинает схлопываться под своим собственнам весом. Ядро звезды рушится в себя, его температура быстро возрастает, что временами приводит к гигантскому взрыву, который сдувает внешние слои звезды в сверкающей демонстрации небесного фейерверка. Такой взрыв известен как сверхновая; на период в неделю отдельная взорвавшаяся звезда может сиять так же ярко, как миллиард солнц. Это в полном смысле слова поражает воображение: отдельная звезда сияет так же ярко, как вся галактика! Различные типы звезд – различных размеров, с разным относительным содержанием различных атомов и так далее – дают начало различным видам взрывов сверхновых, но много лет назад астрономы осознали, что определенные взрывы сверхновых всегда, оказывается, сияют с одинаковой внутренней яркостью. Это взрывы сверхновых *типа 1а*.

В типе сверхновых 1а белая карликовая звезда – звезда, которая исчерпала свои ресурсы ядерного топлива, но имеет недостаточную массу, чтобы зажечь взрыв сверхновой из себя самой, – всасывает поверхностный материал из находящейся рядом звезды-компаньона. Когда масса звезды-карлика достигает особой критической величины около 1,4 массы Солнца, она подвергается разгону ядерной реакции, что заставляет звезду стать сверхновой. Поскольку такие взрывы сверхновых происходят, когда карликовая звезда достигает одной и той же критической массы, характеристики взрыва, включая его полную внутреннюю яркость, почти совершенно одинаковы от эпизода к эпизоду. Более того, поскольку сверхновые, в отличие от 100-ваттных лампочек, фантастически мощны, они не только имеют стандартную надежную яркость, но вы также можете ясно видеть их через вселенную. Так что они первые кандидаты в стандартные свечи.[[22]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_22" \o )

В 1990е две группы астрономов, одна под руководством Саула Перлмуттера в Лоуренсовской Национальной Лаборатории в Беркли, а другая под руководством Брайана Шмидта в Австралийском Национальном Университете провели определение торможения, – а отсюда и полной массы/энергии – вселенной путем измерения скоростей удаления сверхновых типа 1а. Идентификация того, что сверхновая принадлежит к типу 1а, является явной и непосредственной, поскольку свет, генерируемый ее взрывом, следует характерной картине пирамидального роста, а затем пологого падения интенсивности. Но на самом деле поймать тип 1а сверхновой на месте преступления является не малым подвигом, поскольку они происходят только раз в несколько сотен лет в типичной галактике. Тем не менее благодаря инновационной технологии одновременного наблюдения тысяч галактик через широкополосные телескопы, команды смогди найти около четырех дюжин сверхновых типа 1а на раздичных расстояниях от Земли. После старательного определения расстояния и скоростей удаления каждой обе группы пришли к совершенно неожиданому заключению: всегда с момента, когда вселенной было около 7 миллиардов лет, темп ее расширения не тормозился. *Вместо этого темп расширения возрастал*.

Группы пришли к заключению, что расширение вселенной замедлялось первые 7 миллиардов лет после первичного раздувания вовне, почти как автомобиль тормозится, когда он приближается к пункту оплаты на автостраде. Это было, как и ожидалось. Но данные обнаружили, что подобно водителю, который нажимает на педаль газа после преодоления контрольного прохода в пункте оплаты, расширение вселенной с тех пор ускоряется. Темп расширения пространства через 7 миллиардов лет после Взрыва был меньше, чем темп расширения через 8 миллиардов лет после Взрыва, который был меньше, чем темп расширения через 9 миллиардов лет после Взрыва, и так далее, все из которых меньше, чем темп расширения сегодня. Ожидаемое торможение пространственного расширения переключилось на неожиданное ускорение.

Но как так может быть? Ну, ответ обеспечивает подтвержденное второе мнение относительно пропавших 70 процентов массы/энергии, которых физики разыскивали.

Пропавшие 70 процентов

Если вы обратитесь мысленно к 1917 и введению Эйнштейном космологической постоянной, вы получите достаточно информации, чтобы выдвинуть предположение, как это может быть, что вселенная ускоряется. Обычная материя и энергия дает начало обычной притягивающей гравитации, которая замедляет пространственное расширение. Но, поскольку вселенная расширяется и вещи все более отделены друг от друга, это космическое гравитационное притяжение, хотя и продолжает замедлять расширение, становится слабее. А это приводит нас к новому и неожиданному повороту. Если вселенная имела бы космологическую константу, – и если ее значение составляло бы точно нужную, небольшую величину, – то примерно до 7 миллиардов лет после Большого взрыва ее гравитационное отталкивание перекрывалось бы обычным гравитационным притяжением ординарной материи, давая общее замедление расширения в соответствии с данными опыта. Но затем, когда обычная материя рассеялась и ее гравитационное притяжение ослабло, отталкивательное воздействие космологической констансты (чья величина не изменяется, когда материя рассеивается) должно было постепенно взять верх, и *эра замедляющегося пространственного расширения должна была смениться эрой ускоренного расширения*.

В конце 1990х такие рассуждения и углубленный анализ данных был проведен обеими группами Перлмуттера и Шмидта, чтобы навести на мысль, что Эйнштейн не был неправ восемьдесят лет назад, когда он вводил космологическую постоянную в гравитационные уравнения. Вселенная, предположили обе группы, имеет космологическую постоянную.[[23]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_23" \o ) Ее величина не та, которую предлагал Эйнштейн, поскольку он гнался за статической вселенной, в которой гравитационное притяжение и отталкивание точно уравнивались бы, а эти исследователи нашли, что миллиарды лет отталкивание доминирует. Но несмотря на такие детали, что открытие групп Перлмуттера и Шмидта должно изучаться до достижения полной проверки правильности и завершающиеся исследования сейчас на полном ходу, Эйнштейн еще раз увидел сквозь фундаментальные свойства вселенной такое, которое опередило свое время более чем на восемьдесят лет, когда это свойство было подтверждено экспериментально.

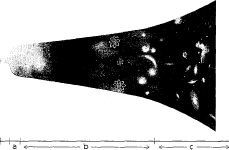
Скорость убегания сверхновых зависит от разницы между гравитационным притяжением обычной материи и гравитационным отталкиванием "темной энергии", заменяющей космологическую постоянную. Принимая количество материи, как видимой, так и темной, около 30 процентов от критической плотности, исследователи сверхновых пришли к заключению, что ускоренное расширение, которое они наблюдали, требует направленного вовне отталкивания космологической постоянной, чья темная энергия дает вклад в критическую плотность около 70 процентов.

Это *поразительное число*. Если это верно, тогда не только ординарная материя – протоны, нейтроны, электроны – составляют жалкие 5 процентов от массы/энергии вселенной, и не только некоторая, на сегодня неидентифицированная форма темной материи составляет, по меньшей мере, *в пять раз*больше этого количества, но также *львиную* долю массы/энергии во вселенной составляет полностью отличающаяся и еще более таинственная форма темной энергии, которая распределена по всему пространству. Если эти идеи верны, они драматически продолжают революцию Коперника: мы не только не являемся центром вселенной, но даже материя, из которой мы сделаны, подобна обломкам, плавающим в космическом океане. Если протоны, нейтроны и электроны были бы удалены из великого творения, полная масса/энергия вселенной почти не уменьшилась бы.

Но имеется вторая, равно важная причина, почему 70 процентов является замечательным числом. Космологическая константа, которая дает вклад 70 процентов в критическую плотность, будет вместе с 30 процентами, приходящимися на ординарную материю и темную материю, давать полную массу/энергию вселенной точно равную полным 100 процентам, предсказываемым инфляционной космологией! Так что направленное наружу оттталкивание, продемонстрированное данными по сверхновым, может быть объяснено именно тем правильным количеством темной энергии для оценки невидимых 70 процентов вселенной, что вызывало недоумение в инфляционной космологии. Измерения сверхновых и инфляционная космология изумительно дополняют друг друга. Они подтверждают друг друга. Каждое направление обеспечивает подтвержденное второе мнение для другого.[[24]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_10_24" \o )

Объединяя наблюдаемые результаты по сверхновым с теоретическими предсказаниями инфляции, мы, таким образом, достигаем следующего эскиза космической эволюции, обобщенного на Рис.10.6. Сначала энергия вселенной переносилась полем инфлатона, которое было возвышено от своего состояния минимальной энергии. Вследствие своего отрицательного давления поле инфлатона вызвало гигантский взрыв инфляционного расширения. Затем, примерно на 10–35 секунды позднее, когда поле инфлатона сползло вниз в своей чаше потенциальной энергии, взрыв расширения подошел к концу и инфлатон избавился от своей сдерживаемой энергии, отдав ее на производство ординарной материи и излучения. Много миллиардов лет эти привычные составляющие вселенной оказывали ординарное притягивательное гравитационное воздействие, которое замедляло пространственное расширение. Но когда вселенная выросла и истончилась, гравитационное поле уменьшилось. Около 7 миллиардов лет назад ординарное гравитационное притяжение стало достаточно слабым, чтобы гравитационное отталкивание космологической константы вселенной стало доминировать, и с тех пор темп пространственного расширения постоянно возрастает.

Примерно через 100 миллиардов лет от сегодняшнего дня все галактики, за исключением самых близких, будут угнаны раздувающимся пространством со скоростью больше световой, так что для нас будет невозможно увидеть их вне зависимости от мощности используемых телескопов. Если эти идеи верны, то в далеком будущем вселенная будет безбрежным, пустым и уединенным местом.



***Рис 10.6****Линия времени космической эволюции: (а) Инфляционный взрыв, (b) Эволюция по стандартной модели Большого взрыва, (c) Эра ускоренного расширения.*

Загадки и прогресс

С этими открытиями, таким образом, кажется, что кусочки космического паззла разложились по местам. Вопросы, остававшиеся без ответа в стандартной теории Большого взрыва, – Что разжигает раздувание пространства вовне? Почему температура микроволнового фонового излучения так однородна? Почему пространство кажется имеющим плоскую форму? – были переадресованы инфляционной теории. Даже при этих условиях тернистые проблемы относительно фундаментальных первооснов продолжали оставаться: Была ли эра перед инфляционным взрывом, и, если была, на что она была похожа? Что привело поле инфлатона, располагавшееся вне его низкоэнергетической конфигурации, к инициации инфляционного расширения? И самый новый из всех вопросов: почему вселенная, видимо, составлена из такой смеси компонентов – 5 процентов привычная материя, 25 процентов темная материя, 70 процентов темная энергия? Несмотря на безмерно радующий факт, что эта космическая рецептура согласуется с инфляционными предсказаниями, что вселенная должна иметь 100 процентов от критической плотности, и хотя это одновременно объясняет ускоренное расширение, найденное из исследований сверхновых, многие физики рассматривают эту смесь для винегрета как явно непривлекательную. Почему, спрашивают многие, состав вселенной оказался таким сложным? Почему имеется горстка рассогласованных ингредиентов в такой кажущейся хаотичной совокупности? Имеется ли некоторый осмысленный лежащий в основании план, который теоретические исследования еще должны обнаружить?

Никто не выдвинул никаких убедительных ответов на эти вопросы; они находятся среди неотложных научных пробем, двигая текущие космологические исследования, и они призваны напоминать нам о многих запутанных узлах, которые мы все еще должны распутать, прежде чем мы сможем утверждать, что имеется полное понимание рождения вселенной. Но, несмотря на еще остающиеся существенные проблемы, инфляция является далеко продвинутой космологической теорией переднего фронта. Несомненно, доверие физиков к инфляции основывается на достижениях, которые мы так долго обсуждали. Но убежденность в инфляционной космологии имеет корни, которые идут еще глубже. Как мы увидим в следующей главе, большое число других рассмотрений – происходящих как от наблюдательных, так и от теоретических открытий, – убедили многих физиков, кто работает в этой области, что инфляционная схема является самым важным и самым устойчивым вкладом нашего поколения в космологическую науку.

**11 Кванты в небе с алмазами**

***ИНФЛЯЦИЯ, КВАНТОВОЕ ДРОЖАНИЕ И СТРЕЛА ВРЕМЕНИ***

**О**ткрытие инфляционной схемы запустило новую эру в космологических исследованиях, и за прошедшее десятилетие были написаны многие тысячи статей по этой теме. Ученые рассмотрели буквально каждый уголок и щель в теории, которую вы, вероятно, уже можете представить. В то время как многие из этих работ фокусировались на деталях технического характера, другие шли дальше и показывали, как инфляция не только решает специфические космологические проблемы, недостижимые для стандартной модели Большого взрыва, но также обеспечивает мощные новые подходы к большому числу старых вопросов. Среди них имеются три разработки, – связанные с формированием компактных структур, вроде галактик; количеством энергии, требующимся для рождения вселенной, которую мы видим; и (что имеет первоочередную важность для нашей истории) происхождением стрелы времени, – на которых инфляция привела к значительному и, как говорят многие, впечатляющему прогрессу.

Давайте посмотрим.

Квантовое небесное письмо

Решение проблем горизонта и плоскостности, предложенное инфляционной космологией, было ее первым притязанием на славу, причем справедливым. Как мы видели, это было значительным успехом. Но за прошедшие с тех пор годы многие физики пришли к уверенности, что и другие достижения инфляционной теории разделили высшую позицию в списке самых важных вкладов в теорию.

Достойное похвалы достижение имеет отношение к проблеме, о которой до сего момента я не призывал вас задуматься: Как получается, что во вселенной есть галактики, звезды, планеты и другие массивные тела? В последних трех главах я просил вас сосредоточиться на астрономически больших масштабах – масштабах, на которых вселенная выглядит однородной, масштабах настолько больших, что целые галактики могли бы мыслиться как отдельные молекулы Н2О, в то время как сама вселенная является полным однородным стаканом воды. Но рано или поздно космология сталкивается с фактом, что когда вы изучаете космос на "более мелких" масштабах, вы открываете массивные структуры, такие как галактики. И здесь еще раз мы сталкиваемся лицом к лицу с загадкой.

Если вселенная на самом деле гладкая, однородная и одинаковая на больших масштабах – свойство, которое подтверждается наблюдением и которое лежит в сердце всего космологического анализа, – то откуда взялась мелкомасштабная комковатость? Непоколебимый адепт стандартной космологии Большого взрыва может еще раз отбросить этот вопрос, ссылаясь на в высшей степени благоприятные и непостижимо тонко настроенные условия в ранней вселенной: "Возле самого начала," – как мог бы сказать этот верующий, – "вещи были в общем и целом гладкими и однородными, но не *совершенно*однородными. Как условия сложились таким образом, я сказать не могу. Просто так тогда было. Со временем эти мелкие комковатости росли, поскольку комок имеет более значительное гравитационное притяжение, становясь плотнее, чем их окружение, и, следовательно, захватывая большую часть находящегося рядом материала, становились все больше. В конечном счете комки стали достаточно большими, чтобы сформировать звезды и галактики". Это была бы убедительная история, если бы не имелось два недостатка: полное отсутствие объяснения как полной начальной гомогенности, так и этих важных мелких неоднородностей. В этом моменте инфляционная космология обеспечивает радующий прогресс. Мы уже видели, что инфляция предлагает объяснение крупномасштабной однородности и, как мы сейчас узнаем, объяснительная мощь теории идет еще дальше. Замечательно, что в соответствии с инфляционной космологией начальная неоднородность, которая в конечном счете привела к формированию звезд и галактик, возникает из *квантовой механики*.

Эта внушительная идея возникает из взаимодействия между двумя кажущимися несопоставимыми областями физики: инфляционным расширением пространства и квантовым принципом неопределенности. Принцип неопределенности говорит нам, что всегда имеются компромиссы в том, насколько точно могут быть определены различные соответственные физические свойства в космосе. Наиболее привычный пример (см. Главу 4) заключается в следующем: чем более точно определено положение частицы, тем менее точно может быть определена ее скорость. Но принцип неопределенности также применим и к полям. По сути по тем же причинам, которые мы использовали в его применении к частицам, принцип неопределенности предполагает, что чем более точно определена величина поля в данном месте в пространстве, тем менее точно может быть определен темп изменения поля в этом месте. (Положение частицы и темп изменения ее положения – ее скорость – играют в квантовой механике роль, аналогичную величине поля и темпу изменения величины поля в данном месте в пространстве).

Я хочу обобщить принцип неопределенности, сказав, что, грубо говоря, квантовая механика делает вещи дрожащими и турбулентными. Если скорость частицы не может быть описана с абсолютной точностью, мы также не можем описать, где частица будет располагаться даже через долю секунды, поскольку скорость сейчас определяет положение потом. В известном смысле частица свободна иметь ту или эту скорость или, более точно, принять смесь многих скоростей, а потому она неистово скачет, бессистемно двигаясь по тому или иному пути. Для полей ситуация аналогичная. Если темп изменения поля не может быть определен с абсолютной точностью, тогда мы также не можем определить, какая величина поля будет в любом месте даже мгновением позже. В известном смысле поле колеблется вверх или вниз с той или иной скоростью или, более точно, оно принимает странную смесь многих различных темпов изменения, а потому его величина будет подвергаться бешеному, смазанному, хаотичному дрожанию.

В повседневной жизни мы напрямую не осведомлены о скачках как частиц, так и полей, поскольку они имеют место на субатомных масштабах. Но именно тут инфляция оказывает большое воздействие. Внезапный взрыв инфляционного расширения, растянул пространство на такой гигантский фактор, что то, что изначально относилось к микроскопическим размерам, вырастает до макроскопических. В качестве ключевого примера пионеры[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_11_1" \o ) инфляционной космологии обнаружили, что хаотические различия между квантовыми дрожаниями в данном месте пространства и в другом могли бы генерировать небольшие неоднородности в микроскопической реальности; вследствие беспорядочного квантового перемешивания количество энергии в одном месте могло бы на йоту отличаться от количества в другом. Тогда через последующее инфляционное раздувание пространства эти ничтожные вариации могли бы быть растянуты до масштабов, намного больших, чем квантовая область, давая малое количество комковатости, почти как тонкие волнистые линии, нарисованные на воздушном шаре фломастером, свободно растягиваются по поверхности шара, когда вы его надуваете. В этом, уверены физики, заключается происхождение комковатости, которую непоколебимые последователи стандартной модели Большого взрыва просто декларируют без оправдания, мол, "так тогда было". Через гигантское растягивание неизбежных квантовых флуктуаций инфляционная космология обеспечивает объяснение: инфляционное расширение растягивает мелкие неоднородные квантовые дрожания и свободно размазывает их по небу.

В течение нескольких миллиардов лет, прошедших с окончания краткой инфляционной фазы, эти мельчайшие комки продолжили расти через гравитационное слипание. Точно так же, как в картине стандартного Большого взрыва, комки имеют немного более сильное гравитационное притяжение, чем их окружение, так что они стягивают находящийся рядом материал, вырастая все больше. Со временем комки выросли достаточно большими, чтобы дать материю для формирования галактик и звезд, населяющих галактики. Определенно, имеется большое число детальных этапов на пути от маленького комка к галактике, и многие все еще требуют объяснения. Но в квантовом мире, который пережил инфляционное расширение, такая неоднородность могла быть растянута из микромира до намного больших масштабов, обеспечив семена для формирования больших астрофизических тел вроде галактик.

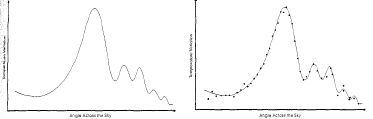
Это основная идея, так что можно свободно перепрыгнуть к следующей секции. Но для тех, кто интересуется, я хотел бы сделать обсуждение немного более точным. Повторим, что инфляционное расширение приходит к завершению, когда величина поля инфлатона сползает вниз своей чаши потенциальной энергии и поле теряет всю содержащуюся в нем энергию и отрицательное давление. Мы описывали это как происходящее однородно по всему пространству, – величина инфлатона здесь, там и везде переживала одну и ту же эволюцию, – как это на самом деле следует из управляющих уравнений. Однако, это строго верно, только если мы пренебрегаем эффектами квантовой механики. В среднем величина поля инфлатона на самом деле сползла ко дну чаши, как мы ожидали, думая о нем как о классическом объекте вроде твердого шарика, скатывающегося по наклонной плоскости. Но точно так же, как лягушка, сползая на дно чаши, может прыгать и трястись по пути, квантовая механика говорит нам, что поле инфлатона переживает трепетание и дрожание. На своем пути вниз величина поля может внезапно подпрыгивать на йоту вверх или дергаться на йоту вниз. А вследствие этого дрожания инфлатон достигает величины наименьшей энергии в разных местах в немного разные моменты. Это приводит к тому, что инфляционное расширение "отстреливается" в немного разные моменты в разных точках пространства, так что величина пространственного расширения в разных местах будет немного различаться, проводя к неоднородностям – ряби – сходным с теми, которые вы видите, когда изготовитель пиццы растягивает тесто немного больше в одном месте, чем в другом и создает маленькие изгибы. В настоящее время нормальная интуиция говорит, что дрожания, возникающие из квантовой механики, будут слишком малыми, чтобы быть значимыми на астрофизических масштабах. Но при инфляции пространство расширяется с таким колоссальным темпом, удваиваясь в размере каждые 10–37 секунды, что даже малейшее отличие в продолжительности инфляции в соседних точках приводит к существенной ряби. Фактически расчеты, предпринятые в специальных вариантах реализации инфляции, показывают, что неоднородности, производимые таким образом, имеют тенденцию становиться даже слишком большими; исследователи часто приводят в порядок детали в данной инфляционной модели (точную форму чаши потенциальной энергии поля инфлатона) для обеспечения, чтобы квантовые дрожания не предсказывали слишком комковатой вселенной. Итак, инфляционная космология дает готовый механизм для понимания, как маломасштабные неоднородности отвечают за возникающие комковатые структуры вроде звезд и галактик во вселенной, которая на самых больших масштабах выглядит строго однородной.

Согласно инфляционной теории более чем 100 миллиардов галактик, блистающих по всему видимому пространству как небесные бриллианты, являются ничем иным, как то, что квантовая механика явно написала на небе. Для меня это осознание является одним из величайших чудес современной научной эпохи.

Золотой век космологии

Впечатляющее доказательство, поддерживающее эти идеи, исходит от тщательных, основанных на спутниках наблюдениях температуры микроволнового фонового излучения. Я подчеркивал несколько раз, что температура излучения в одной части неба совпадает с температурой в другой части с высокой точностью. Но, что я сейчас хочу отметить, так это то, что в четвертом знаке после десятичной точки температура различных областей является разной. Точные измерения, впервые выполненные в 1992м на спутнике COBE (the Cosmic Background Explorer – исследователь космического фона) и совсем недавно на спутнике WMAP (the Wilkinson Microwave Anisotopy Probe – зонд микроволновой анизотропии им. Вилкинсона), определили, что в то время как в одной области пространства температура может быть 2,7249 Кельвина, в другой области она может быть 2,7250 Кельвина, а еще в другой 2, 7251 Кельвина.

Удивительной вещью является то, что эти экстраординарно малые температурные вариации следуют картине неба, которая может быть объяснена через наделение ее тем же механизмом, который был предложен для затравочного формирования галактик: квантовые флуктуации, растянутые за счет инфляции. Грубая идея состоит в том, что когда мельчайшие квантовые дрожания размазываются по пространству, они делают его ненамного горячее в одной области и ненамного холоднее в другой (фотоны, полученные из слегка более плотного региона тратят больше энергии, преодолевая чуть более сильное гравитационное поле, а потому их энергия и температура является слегка более низкой, чем у фотонов, полученных из менее плотного региона).



(а) (b)

***Рис 11.1****(а) Предсказание инфляционной космологией температурных вариаций микроволнового фонового излучения от одной точки на небе к другой, (b) Сравнение этого предсказания с основанными на спутниках наблюдениями.*

Физики провели точные вычисления, основанные на этом предположении, и сформировали предсказание того, как температура микроволнового излучения должна была бы меняться от места к месту на небе, как показано на Рис. 11.1а. (Детали не существенны, но горизонтальная ось связана с угловым расстоянием между двумя точками на небе, а вертикальная ось связана с их температурным различием). На Рис. 11.1b эти предсказания сравниваются со спутниковыми наблюдениями, представленными маленькими алмазами, и вы можете видеть, что имеется *экстраординарное совпадение*.

Я надеюсь, у вас перехватило дух от такого соответствия теории и наблюдения, потому что если нет, это означает, что я не смог передать всю удивительность результата. Потому, на всякий случай, позвольте мне повторно подчеркнуть, что отсюда следует: установленные на спутниках телескопы недавно измерили температуру микроволновых фотонов, которые путешествовали по направлению к нам беспрепятственно около 14 миллиардов лет. Они нашли, что фотоны, прибывающие из различных направлений в пространстве, имеют почти одинаковую температуру, отличающуюся не более чем на несколько десятитысячных градуса. Более того, наблюдения показали, что эти мельчайшие различия в температуре заполняют определенную картину на небе, демонстрируемую упорядоченной последовательностью алмазов на Рис. 11.1b. И, чудо из чудес, расчеты, проделанные сегодня на основании инфляционной схемы, могут объяснить картину этих ничтожных температурных вариаций – вариаций, установленных около 14 миллиардов лет назад, – и, чтобы увенчать сказанное, ключ для этого объяснения содержит в себе дрожания, возникающие из квантовой неопределенности. Класс!

Этот успех убедил многих физиков в состоятельности инфляционной теории. И, что одинаково важно, те и другие точные астрономические измерения, которые стали возможными только недавно, позволили космологии развиться от области, основанной на предположениях и догадках, до области, твердо основанной на наблюдениях, – наступило такое время, которое заставило многих работающих в этой области физиков назвать нашу эру золотым веком космологии.

Создание вселенной

С таким прогрессом у физиков возник мотив посмотреть, как далеко может зайти инфляционная космология. Может ли она, например, решить основную загадку, сконцентрированную в вопросе Лейбница, почему вообще имеется вселенная? Ну, по меньшей мере, с нашим сегодняшним уровнем понимания, такой вопрос требует слишком многого. Даже если космологическая теория проделала бы столбовую дорогу к этому вопросу, мы могли бы спросить, почему именно эта особая теория – ее допущения, составные части и уравнения – была значима, так что это просто сдвигает вопрос о первопричине дальше на один шаг назад. Если одна только логика как-то требуется вселенной, чтобы существовать и чтобы управляться уникальным набором законов с однозначными составными частями, тогда, возможно, мы имели бы убедительную историю. Но на сегодняшний день это ничто иное, как несбыточные мечты.

Связанный, но в некоторой степени менее амбициозный вопрос, который также задавался в разных видах в течение эпох, гласит: Откуда взялась вся масса/энергия, наполняющая вселенную? Хотя инфляционная космология полный ответ не обеспечивает, она отбрасывает на этот вопрос интригующий новый свет.

Чтобы понять, как это происходит, подумаем об огромном, но эластичном ящике, заполненном многими тысячами толпящихся детей, непрерывно бегающими и прыгающими. Представьте, что ящик полностью непроницаемый, так что ни тепло, ни энергия не могут улетучиться, но поскольку он эластичный, его стены могут двигаться наружу. Когда дети непрестанно врезаются в каждую из стен ящика, – сотни за раз, с еще большими сотнями, которые немедленно последуют, – ящик постоянно расширяется. Теперь вы можете ожидать, что поскольку стены непроницаемы, полная энергия, воплощенная в толпящихся детях, будет полностью оставаться внутри расширяющегося ящика. В конце концов, куда еще денется их энергия? Ну, хотя предположение обоснованное, оно не совсем верно. Есть еще одно место, куда может уходить энергия. Энергию, которую тратят дети каждое мгновение, они вбивают в стены, и большая часть этой энергии преобразуется в движение стен. Само расширение ящика поглощает, и поэтому резко уменьшает энергию детей.

Теперь представьте, что несколько проказников среди детей приняли решение изменить положение дел. Они зацепили огромное число резиновых лент между каждой из противоположных движущихся наружу стен ящика. Резиновые ленты оказывают направленное внутрь, отрицательное давление на стены ящика, которое действует в точности противоположно направленному наружу, происходящему от детей, положительному давлению; вместо того, чтобы переводить энергию в расширение ящика, отрицательное давление резиновых лент "отсасывает" энергию у расширения. Когда ящик расширяется, резиновые ленты растягиваются сильнее, что означает, что они заключают в себе возрастающее количество энергии.

Конечно, на самом деле мы интересуемся не расширяющимися ящиками, а расширяющейся вселенной. И наши теории говорят нам, что пространство заполнено не толпами детей и множеством резиновых лент, а, в зависимости от космологической эпохи, однородным океаном поля инфлатона или горячей баней обыкновенных частиц (электронов, фотонов, протонов и т. п.). Тем не менее, простое наблюдение позволяет нам подвести к космологии заключения, которые мы получили в случае ящика. Точно так же, как быстро движущиеся дети работают против направленных вовнутрь сил, оказываемых стенами ящика, когда тот расширяется, быстро движущиеся частицы в нашей вселенной работают против направленных вовнутрь сил, когда пространство расширяется: они работают против силы гравитации. Это наводит на мысль (которая математически подтверждается), что мы можем провести аналогию между вселенной и ящиком, заменив силу гравитации стенами ящика.

Так что, точно так же, как полная энергия, заключающаяся в детях, падает вследствие ее постоянного перекачивания в энергию стен, когда ящик расширяется, полная энергия, переносимая обыкновенными частицами материи и излучения падает вследствие ее постоянного перекачивания в гравитацию, когда вселенная расширяется. Более того, мы видим, что точно так же, как изготовленные проказниками резиновые ленты оказывают отрицательное давление внутри расширяющегося ящика, однородное поле инфлатона оказывает отрицательное давление внутри расширяющейся вселенной. Так что, точно так же, как полная энергия, собранная в резиновых лентах, возрастает при расширении ящика, поскольку она забирает энергию у стен ящика, полная энергия, заключенная в поле инфлатона возрастает, когда вселенная расширяется, поскольку оно извлекает энергию из гравитации.\*

*(\*) "Использованная тут аналогия с резиновыми лентами несовершенна. Направленное внутрь отрицательное давление оказывается резиновыми лентами, затрудняющими расширение ящика, тогда как отрицательное давление инфлатона двигает расширение пространства. Это важное различие иллюстрирует разъяснение, подчеркнутое на странице 286: в космологии нет такого, что однородное отрицательное давление двигает расширение (только разность давлений приводит к силам, так что однородное давление, как положительное, так и отрицательное, не производит силу). Скорее, давление, подобно массе, дает начало гравитационной силе. А отрицательное давление дает начало отрицательной гравитационной силе, которая двигает расширение. Это не повлияет на наши заключения."*

Обобщаем: *когда вселенная расширяется, материя и радиация теряют энергию в пользу гравитации, в то время как поле инфлатона извлекает энергию из гравитации*.\*

*(\*) "Когда вселенная расширяется, потеря энергии фотонами может непосредственно наблюдаться вследствие растягивания их длин волн, – они подвергаются красному смещению, – и чем больше длина волны фотона, тем меньшей энергией он обладает. Фотоны микроволнового фона подвергались такому красному смещению около 14 миллиардов лет, что объясняет их большие – микроволновые – длины волн и их низкую температуру. Материя подвергается сходной потере своей кинетической энергии (энергии движения частиц), но полная энергия, связанная в массе частиц (их энергия покоя – энергия, эквивалентная их массе, когда они покоятся) остается постоянной."*

Стержневая природа этих наблюдений становится ясной, когда мы попытаемся объяснить происхождение материи и радиации, которые составляют галактик, звезды и все другое, чем населен космос. В стандартной теории Большого взрыва масса/энергия, переносимая материей и излучением, постоянно уменьшается при расширении вселенной, так что масса/энергия в ранней вселенной намного превышала то, что мы видим сегодня. Таким образом, вместо предложения объяснения, откуда взялась вся масса/энергия, в настоящее время населяющая вселенную, стандартная модель Большого взрыва ведет бесконечную войну с противником, занявшим позицию на высоте: чем дальше назад заглядывает теория, тем больше потери массы/энергии она должна как-то объяснить.

Однако в инфляционной космологии верно почти противоположное. Повторим, что инфляционная теория утверждает, что материя и радиация были произведены в конце инфляционной фазы, когда поле инфлатона выделило удерживаемую им энергию, скатившись с возвышения в выемку в своей чаше потенциальной энергии. Следовательно, важный вопрос будет таков: точно так же, как инфляционная фаза была доведена до завершения, которое теория может оценить для поля инфлатона, содержащего громадное количество массы/энергии, есть ли все необходимое, чтобы выдать материю и радиацию в сегодняшней вселенной?

Ответ на этот вопрос таков, что инфляция может это сделать, даже совершенно не вспотев. Как уже объяснялось, поле инфлатона является гравитационным паразитом – оно поедает гравитацию, – так что полная энергия поля инфлатона возрастает, когда пространство расширяется. Более точно, математический анализ показывает, что плотность энергии поля инфлатона остается постоянной в течение инфляционной фазы быстрого расширения, подразумевая, что собранная в нем полная энергия растет прямо пропорционально объему заполненного им пространства. В предыдущей главе мы видели, что размер вселенной в ходе инфляции возрастает, как минимум, на фактор 1030, который означает, что объем вселенной возрастает на фактор, по меньшей мере, (1030)3 = 1090.

Соответственно, заключенная в поле инфлатона энергия возрастет на тот же самый гигантский фактор: когда инфляционная фаза подходит к концу, примерно через 10–35 секунды после ее начала, энергия поля инфлатона возрастает на фактор порядка 1090, если не больше. *Это означает, что при запуске инфляции полю инфлатона не нужно иметь много энергии, поскольку гигантское расширение, им порожденное, гигантским образом увеличит переносимую им энергию*. Простой расчет показывает, что мельчайший кусок пространства, порядка 10–26 сантиметра в поперечнике, заполненный однородным полем инфлатона – весом не более двадцати фунтов – в ходе последующего инфляционного расширения приобретает достаточно энергии, чтобы оценить ее как все, что мы видим во вселенной сегодня.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_11_2" \o )

Так что в полном контрасте со стандартной теорией Большого взрыва, в которой полная масса/энергия ранней вселенной была невыразимо гигантской, инфляционная космология через "вычерпывание" гравитации может произвести всю обыкновенную материю и излучение вселенной из мельчайшего двадцатифунтового куска заполненного инфлатоном пространства. Это ни в коем случае не отвечает на вопрос Лейбница о том, почему имеется нечто вместо ничего, поскольку нам еще необходимо объяснить, почему имелся инфлатон или даже пространство, которое он занимал. Но нечто, требущее объяснения, весит много меньше, чем моя собака Рокки, и это определенно совсем другая стартовая позиция, чем предусматривалось в стандартной модели Большого взрыва.\*

*(\*) "Некоторые исследователи, включая Алана Гута и Эдди Фархи, изучали, можно ли гипотетически создать новую вселенную в лаборатории путем синтезирования кусочка поля инфлатона. Абстрагируясь от факта, что мы все еще не имеем прямой экспериментальной проверки, что это за вещь такая поле инфлатона, отметим, что двадцать фунтов поля инфлатона должно было бы быть втиснуто в ничтожный объем пространства размером грубо около 10–26сантиметра, а потому плотность была бы гигантской – примерно в 1067 раз больше плотности атомных ядер – что находится за пределами того, что мы можем произвести сейчас или, вероятно, всегда."*

Инфляция, гладкость и стрела времени

Возможно, мой энтузиазм уже выдал мои пристрастия, но весь прогресс, который наука достигла в наше время, достижения в космологии наполняют меня величайшим трепетом и смирением. Мне кажется, что никогда не терялся тот ажиотаж, который я первоначально почувствовал годы назад, когда впервые изучал основы ОТО и осознал, что из нашего мельчайшего угла пространства-времени мы можем применить теорию Эйнштейна для изучения эволюции целого космоса. Теперь, несколько десятилетий спустя, технологический прогресс подвергает эти некогда абстрактные предположения, как вселенная вела себя в свои самые ранние моменты, наблюдательному тестированию, и теория *на самом деле работает*.

Повторим, однако, что помимо общей важности космологии для истории пространства и времени, Главы 6 и 7 направили нас на изучение истории ранней вселенной со специальной целью: поискать истоки стрелы времени. Вспомним из этих глав, что единственная убедительная схема, которую мы нашли для объяснения стрелы времени, заключалась в том, что ранняя вселенная имела экстремально высокий порядок, то есть экстремально низкую энтропию, что установило основу для будущего, в котором энтропия всегда увеличивается. Точно так же, как страницы *Войны и Мира* не могли бы обладать способностью все более беспорядочно перемешиваться, если бы они не были в некоторый момент аккуратно упорядоченными, так и вселенная тоже не могла бы обладать способностью все более разупорядочиваться – молоко разливаться, яйца разбиваться, люди стареть – без того, чтобы она имела высоко упорядоченную конфигурацию в начале. Загадка, с которой мы столкнулись, заключается в объяснении, как могла возникнуть эта высоко упорядоченная низкоэнтропийная стартовая точка.

Инфляционная космология предлагает солидный прогресс в этом вопросе, но позвольте мне сначала напомнить вам загадку более точно в случае, если некоторые существенные детали ускользнули от вашего внимания.

Имеется строгое доказательство и малые сомнения, что раньше в истории вселенной материя была распределена по всему пространству однородно. Обычно это может быть охарактеризовано высокоэнтропийной конфигурацией – подобно молекулам углекислого газа из бутылки колы, распространившимся однородно по всей комнате, – и потому может быть настолько банальным, что едва ли требует объяснения. Но когда действует гравитация, как это имеет место при рассмотрении целой вселенной, однородное распределение материи является редкой, низкоэнтропийной, высоко упорядоченной конфигурацией, поскольку гравитация подвигает материю к формированию комков. Аналогично, гладкая и однородная кривизна пространства также имеет очень низкую энтропию; она высоко упорядочена по сравнению с дико вспученной, неоднородной пространственной кривизной. (Точно так же, как для страниц *Войны и Мира* имеется много способов быть разупорядоченными, но только один способ быть упорядоченными, имеется много способов для пространства иметь разупорядоченную, неоднородную форму, но всего несколько способов, в которых оно может быть полностью упорядоченным, гладким и однородным). Так что мы остаемся с загадкой: Почему ранняя вселенная имела низкоэнтропийное (высоко упорядоченное) распределение материи вместо высокоэнтропийного (сильно разупорядоченного) комковатого распределения материи, такого как разнообразные скопления черных дыр? И почему кривизна пространства была гладкой, упорядоченной, однородной с экстремально высокой точностью, а не пронизанной различными гигантскими искажениями и сильными искривлениями, также подобными тем, которые генерируются черными дырами?

Как впервые детально обсудили Пол Дэвис и Дон Пейдж[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_11_3" \o ), инфляционная космология предлагает важный прорыв в решении этих проблем. Чтобы увидеть это, удержим в уме, что существенное допущение загадки заключается в том, что раз комки формируются тут и там, их более сильное гравитационное притяжение собирает все больше материала, заставляя их расти дальше; соответственно, раз рябь в пространстве формируется тут и там, ее большее гравитационное притяжение имеет тенденцию делать рябь еще более сильной, приводя к ухабистой, сильно неоднородной пространственной кривизне. Когда действует гравитация, обычно и обыкновенно высокоэнтропийные конфигурации являются комковатыми и ухабистыми.

Но отметим следующее: эти рассуждения относятся полностью к *притягивательной* природе обычной гравитации. Комки и ухабы растут потому, что они сильно притягивают соседний материал, добиваясь, чтобы такой материал присоединился к комку. В течение короткой инфляционной фазы, однако, гравитация была отталкивательной и это меняет все. Возьмем форму пространства. Гигантское направленное наружу воздействие отталкивательной гравитации приводит пространство к раздуванию так быстро, что начальные изгибы и деформации были плавно растянуты, почти как полностью надутый сморщенный воздушный шар растягивает свою складчатую поверхность.\* И, что еще существеннее, поскольку объем пространства возрастает на колоссальный фактор во время короткого инфляционного периода, плотность каждого комка материи полностью падает, почти как плотность рыб в вашем аквариуме понизится, если его объем неожиданно возрастет до размеров Олимпийского плавательного бассейна. Таким образом, хотя притягивательная гравитация заставляет комки материи и неровности пространства расти, отталкивательная гравитация действует противоположно: она заставляет их уменьшаться, приводя к все более гладкому, все более однородному результату.

*(\*) "Не надо смешивать следующее: Инфляционное растягивание квантовых дрожаний, обсуждавшееся в последней секции, все еще производит мелкие неизбежные неоднородности около 1 части из 100 000. Но эта мельчайшая неоднородность размещается на гладкой во всех других отношениях вселенной. Мы сейчас описываем, как возникает последняя – лежащая в основе гладкая однородность".*

Таким образом, к концу инфляционного взрыва размер вселенной вырастает фантастически, любая неоднородность в кривизне пространства растягивается и любые начальные комки чего угодно полностью растворяются до состояния несущественности. Более того, когда поле инфлатона сползает вниз на дно своей чаши потенциальной энергии, приводя взрыв инфляционного расширения к завершению, оно конвертирует удерживаемую энергию в почти однородное море частиц ординарной материи во всем пространстве (выравнивая все вплоть до мельчайших, но важнейших неоднородностей, происходящих от квантовых дрожаний). В целом все это звучит как большой прогресс. Результат, которого мы достигли с помощью инфляции, – гладкая, однородная пространственная протяженность, населенная почти однородным распределением материи, – это в точности то, что мы пытались объяснить. Это в точности низкоэнтропийная конфигурация, которая нам была нужна для объяснения стрелы времени.

Энтропия и инфляция

На самом деле, это существенный прогресс. Но две важных проблемы остаются.

Первое, мы, кажется, пришли к заключению, что инфляционный взрыв разглаживает вещи и отсюда снижает полную энтропию, олицетворяя физический механизм, – не только статистическую случайность, – который выглядит как нарушающий второй закон термодинамики. В этом случае или наше понимание второго закона или наши текущие рассуждения будут иметь ошибку. В действительности, однако, мы с этой проблемой не сталкиваемся, поскольку полная энтропия не уменьшилась в результате инфляции. Что реально произошло в ходе инфляционного взрыва, так это то, что полная энтропия возросла, но возросла *намного меньше, чем она могла бы быть*. Вы видите к концу инфляционного взрыва, что пространство гладко растянулось, так что гравитационный вклад в энтропию – энтропия, связанная с возможной неровной, неупорядоченной, неоднородной формой пространства, – был минимален. Однако, когда поле инфлатона сползло на дно своей чаши и избавилось от своей запасенной энергии, можно оценить количество произведенных частиц материи и излучения примерно в 1080. Такое огромное число частиц, как и книга с огромным числом страниц, заключает в себе огромное количество энтропии. Таким образом, даже если гравитационная энтропия снизилась, рост в энтропии от производства всех этих частиц более чем компенсирует такое снижение. Полная энтропия возросла, точно так, как мы ожидали от второго закона термодинамики.

Но, и это важный момент, инфляционный взрыв через разглаживание пространства и обеспечение однородного, низкоэнтропийного гравитационного поля создает огромный зазор между тем, каким был вклад гравитации в энтропию, и тем, каким он мог бы стать. Полная энтропия возросла во время инфляции, но на совершенно незначительную величину по сравнению с тем, насколько она могла возрасти. В этом смысле и понимается, что инфляция генерирует низкоэнтропийную вселенную: к концу инфляции энтропия возросла, но совсем не на тот фактор, на который возросла пространственная протяженность. Если энтропию связать со стоимостью собственности, он стала бы такой, как если бы Нью Йорк приобрел пустыню Сахара. Полная стоимость общей собственности возросла, но на мельчайшую величину по сравнению с полным ростом площади земли.

Все время с момента завершения инфляции гравитация пытается наверстать энтропийную разницу. Каждый комок – будь он галактикой, или звездой в галактике, или планетой, или черной дырой, – который гравитация последовательно выудила из однородности (комок, посеянный мельчайшими неоднородностями от квантовых дрожаний), имеет растущую энтропию и подводит гравитацию на один шаг ближе к реализации ее энтропийного потенциала. В этом смысле инфляция представляет собой механизм, который дает большую вселенную с относительно низкой гравитационной энтропией и, таким образом, устанавливает основу для последующих миллиардов лет гравитационного слипания, которое привело к тому, свидетелями чего мы сегодня являемся. Итак, инфляционная космология задает направление стреле времени путем создания прошлого с чрезвычайно низкой гравитационной энтропией; будущее является направлением, в котором эта энтропия возрастает.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_11_4" \o )

Вторая проблема становится очевидной, когда мы продолжим углублять путь, к которому стрела времени привела нас в Главе 6. От яйца к курице, которая его снесла, к куриному корму, к растительному миру, к солнечному теплу и свету, к изначальному однородно распределенному газу Большого взрыва мы следовали эволюции вселенной в прошлое, которое имело всегда больший порядок, на каждом этапе сдвигая загадку низкой энтропии на один шаг дальше назад во времени. Теперь мы еще осознали, что только самый ранний этап инфляционного расширения может естественно объяснить гладкие и однородные последствия Взрыва. Но как насчет самого инфлатона? Можем ли мы объяснить первое звено в той цепочке, которой мы следовали? Можем ли мы объяснить, почему условия, которые требовались перед инфляционным взрывом, полностью осуществились?

Это проблема высшей важности. Не имеет значения, как много загадок решила инфляционная космология в теории, если эра инфляционного расширения никогда не имела место, подход будет признан не имеющим отношения к делу. Более того, поскольку мы не можем пойти назад в раннюю вселенную и прямо определить, произошла ли инфляция, оценка того, сделали ли мы реальный прогресс в установлении направления стрелы времени, требует, чтобы мы определили *вероятность*, что условия, необходимые для инфляционного взрыва, были выполнены. Это значит, что физики раздражены из-за уверенности стандартной модели Большого взрыва в тонко настроенных однородных начальных условиях, которые, будучи мотивированы наблюдениями, необъяснимы теоретически. Кажется глубоко неудовлетворительным для низкоэнтропийного состояния ранней вселенной просто допустить его; кажется бессодержательным установить во вселенной стрелу времени без какого-либо объяснения. На первый взгляд инфляция предлагает прогресс, показывая, что то, что допускается в стандартной модели Большого взрыва вытекает из инфляционной эволюции. Но если инициирование инфляции требует еще других, более специальных, чрезвычайно низкоэнтропийных условий, мы оказались бы опять в самом начале. Мы просто поменяли бы специальные условия модели Большого взрыва на специальные условия, необходимые для поджигания инфляции, и загадка стрелы времени осталась бы точно такой же загадкой.

Что за условия необходимы для инфляции? Мы видели, что инфляция является неизбежным результатом посадки величины поля инфлатона на короткое время и в рамках маленькой области на высокоэнергетическое плато в его чаше потенциальной энергии. Наша задача, следовательно, свелась к определению, насколько вероятной в действительности является такая стартовая конфигурация. Если запуск инфляции обеспечивается легко, мы будем в великолепной форме. Но если достижение требуемых условий экстраординарно маловероятно, мы просто сдвинем вопрос стрелы времени дальше на один шаг назад – к поиску объяснения для низкоэнтропийной конфигурации поля инфлатона, которое скатывается шариком.

Я сначала опишу современные соображения по этой проблеме в наиболее оптимистичном свете, а затем вернусь к существенным элементам истории, которые остались туманными.

Возвращение Больцмана

Как отмечалось в предыдущей главе, инфляционный взрыв является лучшей мыслью о том, как развивались события в заранее существующей вселенной, а не мыслью о создании самой вселенной. Хотя мы не имеем неоспоримого понимания о том, на что вселенная была похожа в течение самой предынфляционной эры, посмотрим, как далеко мы можем зайти, если предположим, что вещи были в строго ординарном, высокоэнтропийном состоянии. В особенности, давайте представим, что изначальное предынфляционное пространство было пронизано деформациями и изгибами и что поле инфлатона также было сильно разупорядочено, его величина прыгала туда и сюда подобно лягушке в горячей металлической чаше.

Теперь, точно так же, как вы можете ожидать, что если вы упорно играете в честно действующий игровой автомат, раньше или позже хаотически крутящиеся колеса лягут на три алмаза, мы ожидаем, что раньше или позже случайные флуктуации в этой высокоэнергетической турбулентной арене изначальной вселенной заставят величину поля инфлатона выпрыгнуть в правильную однородную величину в некотором малом кусочке пространства, инициировав направленный вовне взрыв инфляционного расширения. Как объяснялось в предыдущей секции, расчеты показывают, что куску пространства необходимо быть исключительно маленьким – порядка 10–26 сантиметра в поперечнике – для результирующего космологического расширения (инфляционного расширения, сменяемого расширением стандартной модели Большого взрыва), чтобы он был растянут до величины больше, чем вселенная, которую мы видим сегодня. Таким образом, вместо допущения или простого декларирования, что условия в ранней вселенной были такими, чтобы инфляционное расширение имело место, в таком способе размышлений необходимые условия появляются из фактов ультрамикроскопических флуктуаций, весом не более двадцати фунтов, возникающих внутри ординарного обыкновенного окружения с беспорядком.

Более того, точно так же, как игровой автомат будет также генерировать широкое разнообразие невыигрышных результатов, в других регионах изначального пространства будут происходить также и другие виды флуктуаций инфлатона. В большинстве случаев флуктуации не будут давать правильную величину или будут существенно неоднородными для возникновения инфляционного расширения. (Даже в области, которая не более 10–26сантиметра в поперечнике, величина поля может дико изменяться). Но все, что для нас имеет значение, так это то, что был один кусочек, который выдал пространственно гладкий инфляционный взрыв, который обеспечил первое звено в низкоэнтропийной цепочке, в конце концов приведшей к нашему привычному космосу. Поскольку мы видим только нашу большую вселенную, нам нужно, чтобы космический игровой автомат выплатил выигрыш только раз.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_11_5" \o )

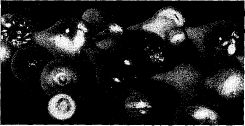
Поскольку мы привели вселенную назад к статистической флуктуации из первичного хаоса, это объяснение стрелы времени соединяется определенным образом с оригинальным предположением Больцмана. Вспомним из Главы 6, что Больцман предположил, что все, что мы сейчас видим, возникло из редкой, но так часто ожидаемой флуктуации из полного беспорядка. Проблема с исходной формулировкой Больцмана, однако, заключалась в том, что невозможно было объяснить, почему случайная флуктуация оказалась так далеко за бортом хаоса и произвела вселенную в гигантской степени более упорядоченную, чем это было необходимо, чтобы даже поддержать жизнь, как мы ее знаем. Почему такая обширная вселенная имеет миллиарды и миллиарды галактик, каждая из которых имеет миллиарды и миллиарды звезд, когда она могла бы иметь решительно ограниченный уголок, имея, скажем, всего несколько галактик или даже одну единственную?

Со статистической точки зрения намного более скромная флуктуация, которая произвела бы некоторый порядок, но не такой значительный, как мы сейчас видим, была бы намного более вероятной. Более того, поскольку средняя энтропия возрастает, рассуждения Больцмана показывают, что было бы еще намного более вероятным, что все, что мы сегодня видим, просто появилось сию минуту как редкий статистический выброс к низкой энтропии. Повторим аргумент: чем дальше назад произошла флуктуация, тем более низкой энтропии она должна была бы достигнуть (энтропия начинает расти после любого падения к низкой энтропии, как на Рис. 6.4, так если флуктуация произошла вчера, одна должна была упасть к вчерашней низкой энтропии, а если она произошла миллиард лет назад, она должна была упасть именно к низкой энтропии той эры). Поэтому чем дальше назад во времени, тем более драматической и невероятной должна быть требуемая флуктуация. Но если мы принимаем это заключение, мы не можем доверять своей памяти, записям или даже законам физики, которые лежат в основе самой дискуссии – полностью неприемлемая позиция.

Потрясающее преимущество инфляционного возрождения идеи Больцмана заключаются в том, что малая флуктуация сразу – скромный прыжок к подходящим условиям в *мельчайшем* кусочке пространства – неизбежно дает гигантскую и упорядоченную вселенную, которую мы осознаем. Раз уж инфляционное расширение началось, маленький кусочек будет неумолимо растянут до масштабов, по меньшей мере таких же больших, как вселенная, которую мы в настоящее время видим, а потому нет загадки в том, почему вселенная не ограничилась уголком; нет загадки, почему вселенная столь обширна и населена огромным числом галактик. От начала своего действия инфляция дала вселенной поразительные условия сделки. Прыжок к низкой энтропии внутри мельчайшего кусочка пространства был использован для инфляционного расширения в широчайшие пределы космоса. И, что самое важное, инфляционное растяжение не просто дает произвольную старую большую вселенную. Оно дает нашу большую вселенную – инфляция объясняет форму пространства, она объясняет крупномасштабную однородность, и она даже объясняет "мелкомасштабные" неоднородности, такие как галактики, и температурные вариации фонового излучения. Инфляция упаковывает все богатство объяснительной и предсказательной мощи в отдельную малую флуктуацию к низкой энтропии.

Итак, Больцман был почти прав. Все, что мы видим, могло произойти от случайной флуктуации от высоко разупорядоченного состояния первичного хаоса. В этом объяснении его идеи, однако, мы можем верить нашим записям и мы можем верить нашей памяти: флуктуация не произошла прямо сейчас. Прошлое реально происходило. Наши записи записали вещи, которые имели место. Инфляционное расширение увеличивает микроскопическую крупинку порядка в ранней вселенной, – оно "заводит" вселенную на гигантское расширение с минимальной гравитационной энтропией, – так что 14 миллиардов лет последующего раскручивания, последующего собирания в галактики, звезды, планеты, не представляет загадки.

Фактически этот подход говорит нам даже немного больше. Точно так же, как возможно сорвать куш на нескольких игровых автоматах в подвале казино Белладжио (Лас-Вегас), в изначальном состоянии высокой энтропии и полного хаоса нет причин, по которым необходимые для инфляционного расширения условия могли бы появиться только в отдельном пространственном кусочке. Напротив, как предположил Андрей Линде, там могли бы быть многие кусочки, разбросанные тут и там, которые подверглись разглаживающему пространство инфляционному расширению. Если это было так, наша вселенная становится лишь одной среди многих вселенных, прораставших – и, вероятно, продолжающих прорастать, – когда случайные флуктуации делают условия подходящими для инфляционного взрыва, как проиллюстрировано на Рис.11.2. Так как другие вселенные, вероятно, всегда будут отделены от нашей, тяжело себе представить, как мы когда-либо сможем установить, является ли эта картина "мультивселенной" правильной. Однако, как концептуальная схема, она является как богатой, так и привлекательной. Среди других вещей она предлагает возможный сдвиг в нашем понимании космологии: В Главе 10 я описал инфляцию как "передовой рубеж" стандартной теории Большого взрыва, в котором Взрыв идентифицировался с мимолетным быстрым расширением. Но если мы думаем об инфляционном прорастании каждой новой вселенной на Рис 11.2 как о ее собственном Взрыве, тогда сама инфляция лучше всего выглядит как всеобъемлющая космологическая структура, в рамках которой эволюции вроде Большого взрыва происходят пузырь за пузырем. Таким образом, вместо того, чтобы включить инфляцию в стандартную теорию Большого взрыва, в этом подходе стандартный Большой взрыв включается в инфляцию.



***Рис 11.2****Инфляция может возникать постоянно, выращивая новые вселенные из старых.*

Инфляция и яйцо

Так почему яйцо расплескивается, но не собирается назад? Откуда происходит стрела времени, которую мы все ощущаем? В этом предложенный подход нас поддерживает. Через случайные, но каждым так часто ожидаемые флуктуации из обыкновенного изначального состояния с высокой энтропией мельчайшие кусочки пространства весом двадцать фунтов достигают условий, которые приводят к короткому взрыву инфляционного расширения. Жуткое, направленное наружу раздувание приводит к растянутому и экстремально гладкому пространству гигантских размеров, и, когда взрыв подходит к концу, поле инфлатона освобождается от своей гигантским образом увеличившейся энергии, заполняя пространство почти однородно материей и излучением. Когда инфляционная отталкивательная гравитация уменьшается, обычная притягивательная гравитация становится доминирующей. И, как мы видели, притягивательная гравитация использует микроскопические неоднородности, вызванные квантовыми дрожаниями, чтобы заставить материю собираться в комки, формируя галактики и звезды и, в конечном счете, приводя к образованию Солнца, Земли и остальной Солнечной системы, а также других структур в нашей наблюдаемой вселенной. (Как обсуждалось, примерно через 7 миллиардов лет после Большого Взрыва отталкивательная гравитация еще раз стала доминирующей, но это существенно только на самых больших космических масштабах и не сказывается непосредственно на более мелких сущностях вроде индивидуальных галактик или нашей Солнечной системы, где по-прежнему царствует ординарная притягивающая гравитация). Солнечная относительно низкоэнтропийная энергия используется низкоэнтропийными растительными и животными формами жизни на Земле, чтобы производить еще более низкоэнтропийные формы жизни, медленно увеличивая полную энтропию через тепло и отходы. В конечном счете эта цепочка произвела курицу, которая произвела яйцо – и мы знаем конец истории: яйцо скатилось с вашего кухонного стола и расплескалось по полу как часть неотвратимого движения вселенной к более высокой энтропии. Такова низкоэнтропийная, высоко упорядоченная, однородно гладкая природа пространственной ткани, произведенной инфляционным растягиванием, что является аналогом обладания всеми страницами *Войны и Мира* в их правильном числовом расположении; это тот ранее установленный порядок, – отсутствие больших неровностей и деформаций или чудовищных черных дыр, – который заряжает вселенную на постепенную эволюцию к высокой энтропии и потому обеспечивает стрелу времени, которую мы ощущаем. На нашем сегодняшнем уровне понимания это наиболее полное объяснение стрелы времени, которое может быть дано.

Ложка дегтя в бочке меда?

Для меня эта история инфляционной космологии и стрелы времени является любимой. Из дикой и энергичной реальности изначального хаоса возникла ультрамикроскопическая флуктуация однородного поля инфлатона весом намного меньше, чем лимит ручной клади. Это инициировало инфляционное расширение, которое задало направление стреле времени, а остальное и есть история.

Но, говоря об этой истории, мы делаем стержневое допущение, которое все еще не подтверждено. Чтобы определить величину вероятности того, что инфляция могла начаться, мы определили характеристики предынфляционной реальности, без которых инфляционное расширение не обязано возникнуть. Особая реальность, которую мы себе представляли, – дикая, хаотическая, энергичная – звучит разумно, но выражение этого интуитивного описания с математической точностью оказывается затруднительным. Более того, это только гипотеза. Основым моментом является то, что мы не знаем, какие условия были предпочтительны в предлагаемой предынфляционной реальности, в размытом пятне на Рис. 10.3, а без этой информации мы не в состоянии сделать убедительную оценку вероятности инициации инфляции; любое вычисление вероятности чувствительно зависит от сделанных нами допущений.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_11_6" \o )

С этой дырой в нашем понимании самое осмысленное обобщение заключается в том, что инфляция предлагает мощную объяснительную схему, которая связывает вместе кажущиеся несопоставимыми проблемы – проблему горизонта, проблему плоскостности, проблему первоначальной структуры, проблему низкой энтропии ранней вселенной – и предлагает отдельное решение, которое адресуется ко всем этим проблемам. Это кажется правильным. Но, чтобы перейти на следующий этап, нам нужна теория, которая может справиться с экстремальными характеристиками условий размытого пятна, – экстремальными по теплу и колоссальной плотности, – тогда мы сохраним шанс получения острого, однозначного проникновения в самые ранние моменты космоса.

Как мы узнаем в следующей главе, это требует теории, которая может преодолеть, возможно, величайшую преграду теоретической физики, которая стоит перед нами на протяжении последних восьмидесяти лет: фундаментальную трещину между ОТО и квантовой механикой. Многие исследователи уверены, что относительно новый подход, именуемый *теорией суперструн*, может достигнуть этого, но если теория суперструн верна, ткань космоса оказывается намного более странной, чем кто-либо когда-либо себе представлял.

**IV Первоисточники и объединение**

**12 Мир на струне**

***ТКАНЬ В СООТВЕТСТВИИ С ТЕОРИЕЙ СТРУН***

**П**редставьте вселенную, в которой чтобы понять что-либо, вам необходимо понять все. Вселенная, в которой чтобы сказать что-нибудь о том, почему планета вращается вокруг звезды, о том, почему бейсбольный мяч летит по определенной траектории, о том, как работает магнит или батарея, о том, как действует свет или гравитация, – вселенная, в которой, чтобы сказать что-нибудь о чем-нибудь, – вам было бы необходимо открыть самые фундаментальные законы и определить, как они действуют на тончайшие составляющие материи. К счастью, такая вселенная не является нашей вселенной.

Если бы это было, тяжело было бы представить, как наука вообще могла бы двигать любой прогресс. В течение столетий причина, по которой мы были в состоянии осуществлять движение вперед, была в том, что мы могли работать по частям; мы были в состоянии распутывать тайны шаг за шагом, с каждым новым открытием продвигаясь на йоту глубже, чем раньше. Ньютону не нужно было знать про атомы, чтобы сделать великий шаг в понимании движения и гравитации. Максвеллу не нужно было знать про электроны и другие заряженные частицы, чтобы разработать мощную теорию электромагнетизма. Эйнштейну не нужно было обращаться к изначальному воплощению пространства и времени, чтобы сформулировать теорию о том, как они искривляются с помощью гравитационных сил. Вместо этого, каждый из этих открывателей, точно так же, как многие другие, которые подвели основу под нашу современную концепцию космоса, действовали в рамках ограниченного контекста, который без смущения оставлял без ответа массу основополагающих вопросов. Каждое открытие было в состоянии внести свой собственный кусочек в головоломку, даже если никто не знал, – и мы все еще не знаем, – какая великая синтезированная картина заключает в себе все кусочки головоломки.

Тесно связанное с этим наблюдение заключается в том, что хотя сегодня наука резко отличается от науки даже пятьдесят лет назад, было бы неоправданным упрощением обобщать научный прогресс в терминах новых теорий, низвергнувших своих предшественниц. Более корректное описание заключается в том, что каждая новая теория усовершенствует свою предшественницу, обеспечивая более точную и более далеко простирающуюся схему. Ньютоновская теория гравитации была заменена ОТО Эйнштейна, но было бы наивным говорить, что ньютоновская теория не верна.

В области объектов, которые нигде не двигаются почти так же быстро, как свет, и нигде не производят гравитационных полей, почти таких же сильных, как у черных дыр, теория Ньютона фантастически точна. Это еще не говорит о том, что теория Эйнштейна является второстепенным вариантом ньютоновской; в ходе усовершенствования ньютоновского подхода к гравитации Эйнштейн выработал целую новую концептуальную схему, одну из тех, что радикально изменяет наши представления о пространстве и времени. Но сила ньютоновского открытия в рамках области, для которой оно предназначено (движение планет, типичные земные движения и так далее), неоспорима.

Мы представляем каждую новую теорию, как подводящую нас ближе к трудной цели достижения истины, но имеется ли конечная теория, – теория, которая не может быть дальше уточнена, поскольку она полностью раскрывает работу вселенной на самом глубоком возможном уровне, – на этот вопрос никто не может ответить. Даже при этих условиях картина, вырисовывающаяся в течение последних трехсот лет открытий, дает дразнящие свидетельства, что такая теория может быть разработана. Вообще говоря, каждый новый прорыв собирает широкий спектр физических явлений под несколькими теоретическими зонтиками. Открытия Ньютона показали, что силы, управляющие планетарным движением, являются теми же силами, которые управляют движением падающих объектов здесь на Земле. Открытия Максвелла показали, что электричество и магнетизм являются двумя сторонами одной монеты. Открытия Эйнштейна показали, что пространство и время так же неразделимы, как прикосновение и золото Мидаса. Открытия поколения физиков в начале двадцатого века установили, что мириады загадок микрофизики могут быть точно объяснены с использованием квантовой механики. Относительно недавние открытия Глэшоу, Салама и Вайнберга показали, что электромагнетизм и слабое ядерное взаимодействие являются двумя проявлениями единого взаимодействия – электрослабого взаимодействия, – и имеются даже пробные, косвенные доказательства, что сильное ядерное взаимодействие может быть присоединено к электрослабому в еще более великом синтезе.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_1" \o ) Собирая все это вместе, мы видим картину, которая движется от сложности к простоте, картину, которая движется от разделения к единству. Направления объяснений кажутся сходящимися в мощную схему, которую еще предстоит открыть и которая объединит все силы природы и всю материю в рамках одной теории, способной описать все физические явления.

Альберт Эйнштейн, который более трех десятилетий пытался объединить электромагнетизм и ОТО в одну теорию, справедливо ассоциируется с началом современных поисков единой теории. Долгий период в течение этих десятилетий он был единственным исследователем такой единой теории, и его страстный, хотя и одинокий поход отделил его от главного потока физического сообщества. Однако, в течение последних двадцати лет произошло драматическое возрождение похода к единой теории; одинокая мечта Эйнштейна стала движущей силой для целого поколения физиков. Но из-за открытий, произошедших со времен Эйнштейна, сместился фокус. Даже если мы еще не имеем успешной теории, объединяющей сильное ядерное и электрослабое возаимодействие, все эти три вида сил (электромагнитные, слабые, сильные) описываются на одном едином языке, основанном на квантовой механике. Но ОТО, наша наиболее совершенная теория четвертой силы, стоит в стороне от этой схемы. ОТО является классической теорией: она не включает никакие вероятностные концепции квантовой теории. Главная цель современной программы унификации заключается, следовательно, в объединении ОТО и квантовой механики и в описании всех четырех сил в рамках одной и той же квантовомеханической схемы. Это оказалось одной из самых трудных проблем, с которыми когда-либо сталкивалась теоретическая физика.

Давайте посмотрим, почему.

Квантовые дрожания и пустое пространство

Если мне надо выделить одно наиболее памятное свойство квантовой механики, я выбираю принцип неопределенности. Вероятности и волновые функции определенно обеспечивают радикально новую схему, но именно принцип неопределенности заключает в себе разрыв с классической физикой. Вспомним, что в семнадцатом и восемнадцатом веках ученые были уверены, что полное описание физической реальности заключается в спецификации положений и скоростей каждой составляющей материи, заполняющей космос. А с появлением концепции поля в девятнадцатом веке и ее последующим применением к электромагнитным и гравитационным силам этот взгляд был дополнен включением величины каждого поля – то есть, напряженности каждого поля, – и темпа изменения величины каждого поля в каждом месте пространства. Но к 1930м принцип неопределенности демонтировал эту концепцию реальности, показав, что вы никогда не можете знать сразу положение и скорость частицы; вы никогда не можете знать сразу величину поля в данном месте пространства и то, как быстро величина поля изменяется. Квантовая неопределенность запрещает это.

Как мы обсуждали в последней главе, эта квантовая неопределенность обеспечивает, что микромир является турбулентной и дрожащей областью. Ранее мы обращали внимание на индуцированные неопределенностью квантовые дрожания поля инфлатона, но квантовая неопределенность применима ко всем полям. Электромагнитное поле, поля сильного и слабого ядерных взаимодействий и гравитационное поле все подвергаются бешеным квантовым скачкам-дрожаниям на микроскопическом масштабе. Фактически, эти дрожания полей существуют даже в пространстве, которое вы обычно воспринимаете как пустое, в пространстве, которое кажется не содержащим ни материи, ни полей. Это идея критической важности, но если вы не сталкивались с ней ранее, она, естественно, будет загадочной. Если регион пространства ничего не содержит – если это вакуум – то не означает ли это, что там нечему дрожать? Ну, мы уже изучили, что концепция пустоты тонкая. Просто подумайте об океане Хиггса, который, как утверждает современная теория, пронизывает пустое пространство. Квантовые дрожания я теперь обозначаю как служащие только для того, чтобы сделать понятие "ничто" еще более тонким. Вот, что я имею в виду.

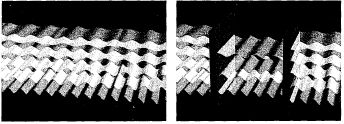
В предквантовой (и пред-Хиггсовой) физике мы объявляли регион пространства полностью пустым, если он не содержал частиц и величина каждого поля была однородно нулевой.\*

*(\*) "Для простоты изложения мы будем рассматривать только поля, которые достигают своей наименьшей энергии, когда их величина равна нулю. Обсуждение других полей – полей Хиггса – идентично, за исключением того, что поля флуктуируют вокруг ненулевой величины поля с минимальной энергией. Если вы хотите сказать, что регион пространства пуст, только если там не присутствует материя и все поля отсутствуют, а не только имеют величину нуль, смотрите секцию комментариев.**[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_2" \o )"*

Теперь подумаем об этом классическом определении пустоты в свете квантового принципа неопределенности. Если поле имело и сохраняло исчезающе малую величину, мы будем знать его величину – нуль – а также темп изменения его величины – тоже нуль. Но в соответствии с принципом неопределенности невозможно, чтобы оба эти свойства были определены. Вместо этого, если поле имеет определенную величину в некоторый момент, нуль в нашем случае, принцип неопределенности говорит нам, что темп его изменения полностью случаен. А случайный темп изменения означает, что в следующие моменты величина поля будет хаотически дергаться вверх и вниз, даже в месте, которое мы обычно полагаем полностью пустым пространством. Так что интуитивное понятие пустоты как места, в котором все поля имеют и сохраняют нулевую величину, несовместимо с квантовой механикой. *Величина поля может скакать вокруг величины нуль, но она не может быть однородно равной нулю во всей области более чем на мгновение*.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_3" \o ) *На техническом языке физики говорят, что поля подвержены вакуумным флуктуациям*.

Хаотичная природа флуктуаций вакуумного поля подразумевает, что во всех регионах, за исключением самых микроскопических, имеется так же много скачков "вверх", как и "вниз", а потому они усредняются к нулю, почти как мраморная поверхность выглядит совершенно гладкой для невооруженного глаза, даже если электронный микроскоп обнаруживает, что она зазубренная на микроскопических масштабах. Тем не менее, даже если мы не можем увидеть это непосредственно, более чем полстолетия назад реальность дрожаний квантового поля даже в пустом пространстве была окончательно установлена через простое, но глубокое открытие.

В 1948 датский физик Хендрик Казимир вычислил, как вакуумные флуктуации электромагнитного поля могут быть экспериментально обнаружены. Квантовая теория говорит, что дрожания электромагнитного поля в пустом пространстве будут иметь различную форму, как проиллюстрировано на Рис. 12.1а. Прозрение Казимира заключалось в осознании того, что, разместив две обычные металлические пластины в пустой в иных отношениях области, как на Рис. 12b, можно индуцировать тонкую модификацию этих вакуумных дрожаний поля. А именно, квантовые уравнения показывают, что в области между пластинами не будет нескольких флуктуаций (допустимы только те флуктуации электромагнитного поля, чьи величины исчезают в местоположении каждой пластины). Казимир проанализировал следствия такого ограничения в дрожаниях поля и нашел нечто экстраординарное.



(а) (b)

***Рис 12.1****(а) Вакуумные флуктуации электромагнитного поля, (b) Вакуумные флуктуации между двумя металлическими пластинами и они же вне пластин.*

 Почти как уменьшение количества воздуха в области создает дисбаланс давлений (например, на большой высоте вы можете почувствовать разрежение воздуха, оказывающее меньшее давление вне ваших ушных раковин), уменьшение квантовых дрожаний поля между пластинами также дает дисбаланс давления: квантовые дрожания поля между пластинами становятся чуть-чуть слабее, чем вне пластин, и этот дисбаланс *двигает пластины друг к другу*.

Подумайте о том, насколько это совершенно странно. Вы помещаете две пластины, обыкновенные, не заряженные металлические пластины в пустую область пространства, одну лицом к другой. Когда их масса мала, гравитационное притяжение между ними настолько мало, что может быть полностью проигнорировано. Поскольку нет ничего другого вокруг, вы действительно придете к заключению, что пластины останутся неподвижными. Но расчеты Казимира предсказали, что произойдет не это. Он пришел к заключению, что пластины будут мягко вынуждаться призрачной хваткой квантовых вакуумных флуктуаций к движению в направлении друг друга.

Когда Казимир впервые анонсировал этот теоретический результат, достаточно чувствительное оборудование для проверки его предсказания не существовало. Однако в течение около десяти лет другой датский физик Маркус Спаарней оказался в состоянии инициировать первые рудиментарные проверки сил Казимира, и с тех пор были проведены все более точные эксперименты. Например, в 1997 году Стив Ламоро, тогда работавший в Университете Вашингтона, подтвердил предсказания Казимира с точностью 5 процентов.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_4" \o ) (Для пластин, размером грубо с игральные карты и расположенных на расстоянии одной десятитысячной сантиметра друг от друга, сила между ними оказалась примерно равной весу отдельной капли росы; это показывает, как сложно измерение силы Казимира). Теперь мало кто сомневается, что интуитивное понятие пустого пространства как статической, спокойной, бедной событиями арены совершенно не имеет оснований. Из-за квантовой неопределенности пустое пространство переполнено квантовой активностью.

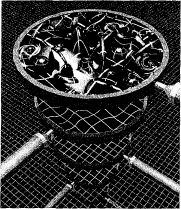
Это заставило ученых большую часть двадцатого века полностью разрабатывать математику для описания такой квантовой активности как электромагнитных, так и сильных и слабых ядерных сил. Усилия даром не пропали: расчеты с использованием этой математической схемы согласуются с экспериментальными изысканиями с беспримерной точностью (например, расчеты влияния вакуумных флуктуаций на магнитные свойства электронов согласуются с экспериментальными результатами до одной части на миллиард).[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_5" \o )

Однако, несмотря на все эти успехи, много десятилетий физики осознавали, что квантовые дрожания провоцируют внутри законов физики неудовлетворительность.

Дрожания и их неудовлетворительность[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_6" \o )

До настоящего времени мы обсуждали только квантовые дрожания полей, которые существуют внутри пространства. А как насчет квантовых дрожаний самого пространства? Хотя это может звучать загадочно, на самом деле это просто другой пример дрожаний квантовых полей – пример, однако, содержащий особую трудность. В ОТО Эйнштейн установил, что гравитационная сила может быть описана как деформация и искривление ткани пространства; он показал, что гравитационные поля проявляются через форму геометрии пространства (или, более общо, пространства-времени). Теперь, точно подобно любому другому полю, гравитационное поле подвергается квантовым дрожаниям: принцип неопределенности подразумевает, что на мельчайших масштабах расстояний гравитационное поле флуктуирует вверх и вниз. А поскольку гравитационное поле есть синоним формы пространства, такие квантовые дрожания означают, что форма пространства хаотично флуктуирует. Еще раз, как и со всеми примерами квантовой неопределенности, на масштабах наших повседневных расстояний дрожания слишком малы, чтобы ощущаться непосредственно, и окружающая среда выглядит гладкой, безмятежной и предсказуемой. Но чем меньше масштаб наблюдения, тем больше неопределенность и тем больше становится буйство квантовых флуктуаций.

Это проиллюстрировано на Рис.12.2, на котором мы последовательно увеличиваем ткань пространства, чтобы обнаружить его структуру при все более мелких расстояниях. Самый большой уровень внизу на рисунке показывает квантовые возмущения пространства на привычных масштабах и, как вы можете видеть, тут нечего смотреть, – неровности ненаблюдаемо малы, так что пространство выглядит невозмутимым и плоским. Но когда мы проникаем дальше, последовательно увеличивая область, мы видим, что неровности пространства становятся все более неистовыми. На высшем уровне на рисунке, который показывает ткань пространства на масштабах, меньших планковской длины – миллионной миллиардной миллардной миллиардной доли (10–33) сантиметра – пространство становится бурлящим, кипящим котлом бешеных флуктуаций. Как проясняет иллюстрация, обычные понятия лево/право, назад/вперед и вверх/вниз становится так перепутанными ультрамикроскопической суетой, что они теряют всякий смысл. Даже обычное понятие до/после, которое мы иллюстрировали последовательными сечениями пространственно-временного батона, делается бессмысленным квантовыми флуктуациями на временных масштабах короче планковского времени, около десяти миллионных триллионных триллионных триллионных доли (10–43) секунды (которое грубо равно времени, необходимому свету, чтобы пролететь планковскую длину). Подобно размытой фотографии, дикие колебания на Рис. 12.2 делают невозможным однозначно отделить один временной срез от другого, когда интервал времени между ними становится короче планковского времени. Итог такой, что на масштабах короче, чем планковские расстояние и продолжительность, квантовая неопределенность делает ткань космоса настолько перекрученной и искаженной, что обычные концепции пространства и времени больше не применимы.



***Рис 12.2****Последовательное увеличение пространства обнаруживает, что ниже планковской длины пространство становится неузнаваемо бурным вследствие квантовых дрожаний. (Здесь представлены воображаемые увеличительные стекла, каждое из которых увеличивает между 10 и 100 миллионами раз).*

Хотя и экзотический в деталях, приблизительный урок, проиллюстрированный Рис. 12.2, суть один из тех, с которым мы уже знакомы: концепции и заключения, существенные на одном масштабе, могут быть не применимыми на всех масштабах. Это ключевой принцип в физике, и один из тех, с которыми мы постоянно встречаемся, хотя и в куда более прозаическом контексте. Возьмем стакан воды. Описание воды как гладкой, однородной жидкости и полезно, и применимо на повседневных масштабах, но это является приближением, которое разрушается, если мы изучаем воду с субмикроскопической точностью. На мелком масштабе гладкий образ уступает место полностью другой системе далеко разделенных молекул и атомов. Аналогично, Рис. 12.2 показывает, что концепция Эйнштейна гладких, мягко искривленных геометрических пространства и времени, хотя и сильна и точна для описания вселенной на больших масштабах, рушится, если мы анализируем вселенную на экстремально коротких пространственных и временных масштабах. Физики уверены, что, как и с водой, гладкое изображение пространства и времени является приближением, которое уступает место другой, более фундаментальной схеме, когда они рассматриваются на ультрамикроскопических масштабах. Что это за схема, – что составляет "молекулы" и "атомы" пространства и времени, – этот вопрос рассматривается в настоящее время с большой энергией. Он еще должен быть разрешен.

Даже при этих условиях, что вполне ясно из Рис. 12.2, на мельчайших масштабах гладкий характер пространства и времени, представляемый ОТО, вступает в борьбу с неистовым, дрожащим характером квантовой механики. Основной принцип ОТО Эйнштейна, что пространство и время образуют мягко искривленную геометрическую форму, спотыкается об основной принцип квантовой механики, принцип неопределенности, который подразумевает дикую, буйную, турбулентную окружающую среду на мельчайших масштабах. Ужасный конфликт между центральными идеями ОТО и квантовой механики сделал объединение двух теорий одной из самых трудных проблем, с которыми физики сталкивались в течение последних восьмидесяти лет.

Это имеет значение?

На практике несовместимость между ОТО и квантовой механикой возникла весьма специфическим образом. Если вы используете объединенные уравнения ОТО и квантовой механики, они почти всегда приводят к одному ответу: бесконечности. И в этом проблема. Это бессмыслица. Экспериментаторы никогда не измеряют бесконечное количество чего-либо. Часы никогда не вращаются до бесконечности. Линейки никогда не протягиваются до бесконечности. Калькуляторы никогда не регистрируют бесконечность. Почти всегда бесконечный ответ является бессмысленным. Все это говорит нам, что уравнения ОТО и квантовой механики при их соединении становятся ненормальными.

Отметим, что это совершенно не похоже на напряженность между СТО и квантовой механикой, которая возникала в нашем обсуждении квантовой нелокальности в Главе 4. Там мы нашли, что согласование принципов СТО (в особенности, симметрии между всеми наблюдателями, движущимися с постоянной скоростью) с поведением запутанных частиц требует более полного понимания проблемы квантовых измерений, чем до сих пор было достигнуто (смотрите секцию "Запутанность и СТО: противоположный взгляд" в Главе 4, стр 117–120). Но эта не решенная полностью проблема не приводит к математической несостоятельности или к уравнениям, которые дают бессмысленные ответы. Наоборот, объединенные уравнения СТО и квантовой механики используются, чтобы делать наиболее точно подтвержденные в истории науки предсказания. Тихое напряжение между СТО и квантовой механикой указывает на область, где требуются дальнейшие теоретические изыскания, но оно едва ли влияет на их объединенную предсказательную силу. Не так с взрывоопасным союзом между ОТО и квантовой механикой, в котором вся предсказательная сила потеряна.

Тем не менее, вы все еще можете спросить, имеет ли реальное значение несовместимость между ОТО и квантовой механикой. Безусловно, объединенные уравнения могут приводить к нонсенсу, но когда вообще вам реально может понадобиться использовать их вместе? Годы астрономических наблюдений показали, что ОТО описывает макромир звезд, галактик и даже целого расширяющегося космоса с впечатляющей точностью; десятилетия экспериментов подтвердили, что квантовая механика делает то же самое для микромира молекул, атомов и субатомных частиц. Поскольку каждая теория чудесно работает в своей собственной области, зачем беспокоиться об их объединении? Почему не удерживать их разделенными? Почему не использовать ОТО для вещей, которые большие и массивные, квантовую механику для вещей, которые мелкие и легкие, и прославлять впечатляющие достижения человечества в успешном понимании такого широкого диапазона физических явлений?

На самом деле, это как раз то, что большинство физиков и делали с первых десятилетий двадцатого века, и никто не отрицает, что это, несомненно, был плодотворный подход. Прогресс науки, сделанный в этой несоединенной системе, впечатляет. Тем не менее, есть несколько причин, почему антагонизм между ОТО и квантовой механикой должен быть сглажен. Таких причин две.

Первое, по-хорошему, тяжело поверить, что глубочайшее понимание вселенной заключается в неясном союзе между двумя мощными теоретическими схемами, которые взаимно несовместимы. Это ничто иное, как если бы вселенная оборудовалась линией на песке, разделяющей вещи, которые правильно описываются квантовой механикой, от вещей, которые правильно описываются ОТО. Разделение вселенной на две обособленные реальности кажется как искусственным, так и грубым. Для многих очевидно, что должна существовать более глубокая, объединенная истина, которая перекрывает расщелину между ОТО и квантовой механикой и которая может быть применена ко всему. Мы имеем одну вселенную и, следовательно, многие полностью уверены, что мы должны иметь одну теорию.

Второе, хотя большинство вещей являются или большими и тяжелыми, или маленькими и легкими, и, следовательно, в практическом смысле могут быть описаны с использованием ОТО или квантовой механики, это не верно для всех вещей. Черные дыры обеспечивают хороший пример. В соответствии с ОТО вся материя, составляющая черную дыру, сдавлена вместе в отдельной мельчайшей точке в центре черной дыры.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_7" \o ) Это делает центр черной дыры как чудовищно массивным, так и немыслимо маленьким, а потому он попадает на обе стороны предлагаемого разделения: нам надо использовать ОТО, так как большая масса создает мощное гравитационное поле, и нам также надо использовать квантовую механику, так как вся масса стиснута в мельчайший размер. Но в комбинации уравнения разрушаются, так что никто не смог определить, что происходит прямо в центре черной дыры.

Это хороший пример, но если вы на самом деле скептик, вы можете еще поинтересоваться, является ли он чем-то, что должно заставлять кого угодно не спать ночью. Поскольку мы не можем заглянуть внутрь черной дыры, пока мы туда не прыгнем, и, более того, если мы туда прыгнем, мы не сможем сообщить о наших наблюдениях назад во внешний мир, наше неполное понимание внутренней области черной дыры может не произвести на вас впечатления, как не особенно беспокоящее. Для физиков, однако, существование области, в которой известные законы физики отказывают, – не важно, насколько эзотерической, скрытой эта область может казаться, – поднимает вверх красные флаги. Если известные законы физики разрушаются при некоторых обстоятельствах, это ясный сигнал, что мы не достигли глубочайшего возможного понимания. После всего сказанного, вселенная работает, поскольку мы можем сказать, что вселенная не разрушается. Корректная теория вселенной должна, уж по меньшей мере, удовлетворять такому же стандарту.

Итак, это, конечно, кажется обоснованным. Но без дополнительных усилий полная нетерпимость конфликта между ОТО и квантовой механикой обнаруживается только через другой пример. Посмотрим назад на Рис. 10.6. Как вы можете видеть, мы проделали великий прогресс в соединении в одно целое непротиворечивой и предсказательной истории космической эволюции, но картина осталась неполной из-за размытого пятна вблизи зарождения вселенной. А внутри мутного тумана тех ранних моментов лежит прорыв в самые соблазнительные тайны: причину и фундаментальную природу пространства и времени. Так что нам мешает проникнуть в туман? Упрек возлагается прямо на конфликт между ОТО и квантовой механикой. Антагонизм между законами большого и законами малого является причиной размытого пятна, остающегося неясным, и мы все еще не имеем взгляда на то, что происходило в самом начале вселенной.

Чтобы понять, почему, представьте, как в Главе 10, прокрутку пленки с расширяющимся космосом в обратном направлении, обратившись назад по направлению к Большому взрыву. При прокрутке в обратном направлении все, что сейчас уносится в стороны, будет сходиться вместе, и когда мы прокручиваем пленку еще дальше назад, вселенная становится все меньше, горячее и плотнее. Когда мы приблизимся к самому моменту времени нуль, вся наблюдаемая вселенная сожмется до размеров Солнца, затем спрессуется до размеров Земли, затем сдавится до размеров шара для боулинга, горошины, песчинки – вселенная сокращается до все меньшего и меньшего по мере того, как пленка перематывается по направлению к начальным кадрам. Тогда в этом обратном фильме наступит момент, когда вся известная вселенная будет иметь размер, близкий к планковской длине, – миллионной миллиардной миллиардной миллиардной сантиметра, – при которой ОТО и квантовая механика находятся в непримиримой оппозиции. В этот момент вся масса и энергия, соответствующая рождению наблюдаемой вселенной содержится в кусочке, который меньше чем в сто миллиардов миллиардов раз размера отдельного атома.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_8" \o )

Таким образом, точно так же, как в случае центра черной дыры, ранняя вселенная попадает на обе стороны водораздела: гигантская плотность ранней вселенной требует использования ОТО. Мельчайшие размеры ранней вселенной требуют использования квантовой механики. Но еще раз, в такой комбинации законы отказываются работать. Проектор "зажевывает" космическую пленку, она воспламеняется и мы не можем получить доступ к ранним моментам вселенной. Вследствие конфликта между ОТО и квантовой механикой мы остаемся неосведомленными о том, что происходило в начале, и возвращаемся к изображению размытого пятна на Рис. 10.6.

Если мы когда-нибудь надеемся понять истоки вселенной – один из глубочайших вопросов во всей науке, – конфликт между ОТО и квантовой механикой должен быть разрешен. Мы должны урегулировать разницу между законами большого и законами малого и соединить их в отдельную гармоничную теорию.

Невероятная дорога к решению\*

*(\*) "Остаток этой главы излагает открытие теории суперструн и обсуждает существенные идеи теории относительно унификации структуры пространства-времени. Читавшие Элегантную Вселенную (особенно Главы с 6 по 8) будут знакомы почти со всем материалом и могут чувствовать себя свободными пропустить эту главу и двигаться к следующей."*

Как показали работы Ньютона и Эйнштейна, научные прорывы временами рождаются отдельными учеными, сомневающимися гениями, чисто и просто. Но это редкость. Намного более часто великие прорывы представляют коллективные усилия многих ученых, каждый из которых, основываясь на достижениях других, доводит их до завершения, чего ни один индивидуал не смог бы достичь в изоляции. Один ученый может внести идею, которая заставит коллег задуматься, что приведет к наблюдениям, что обнаружит неожиданную взаимосвязь, что инспирирует важное продвижение вперед, что запустит новый цикл открытия. Свободные знания, технические приспособления, гибкость мышления, открытость непредвиденных связей, погружение в свободный поток идей по всему миру, тяжелая работа и существенное везение являются критическими частями научного открытия. В последнее время вообще не было крупного прорыва, который бы лучше проиллюстрировал это, чем разработка теории суперструн.

Теория суперструн представляет собой подход, который, как уверены многие ученые, соединяет ОТО и квантовую механику. И, как мы увидим, есть основания надеяться даже на большее. Хотя все еще очень много работы предстоит, теория суперструн может успешно представлять собой полностью унифицированную теорию всех сил и всей материи, теорию, которая осуществляет мечту Эйнштейна, и даже больше – теорию, как верю я и многие другие, которая освещает начало пути, который однажды приведет нас к самым глубоким законам вселенной. Правда, однако, теория суперструн не замышлялась как оригинальный способ достичь этих благородных и долгосрочных целей. Напротив, история теории суперструн полна случайных открытий, фальш-стартов, упущенных возможностей и почти разрушенных карьер. Это также, в точном смысле, история открытия правильного решения для ошибочной проблемы.

В 1968 Габриэле Венециано, молодой стипендиат-исследователь после защиты, работая в ЦЕРНе, был одним из многих физиков, пытавшихся понять сильное ядерное взаимодействие через изучение результатов высокоэнергетических столкновений частиц, производимых в атомных ускорителях по всему миру. После меяцев анализа образцов и упорядочения данных Венециано осознал удивительную и неожиданную связь с малоизвестной областью математики. Он обнаружил, что формула, открытая две сотни лет назад знаменитым швейцарским математиком Леонардом Эйлером (бета-функция Эйлера), кажется, точно соответствует данным по сильным ядерным взаимодействиям. Хотя это не звучало уж очень необычно, – физики-теоретики все время имеют дело с загадочными формулами, – это был замечательный случай, когда многие мили телега прокатилась впереди лошади. Более часто, чем нет, физики сначала проявляют интуицию, строят воображаемую картину, ясно понимая физические принципы, лежащие в основе всего, что они изучают, и только затем ищут уравнения, необходимые, чтобы обосновать свою интуицию в строгой математике. Венециано, напротив, перепрыгнул прямо к уравнению; его великолепие заключалось в распознавании необычных картин в данных и установлении неожиданной связи с формулой, разработанной столетиями ранее из чисто математического интереса.

Но хотя Венециано имел формулу в руках, он не имел объяснения, почему она работает. Ему не хватало физической картины, почему бета-функция Эйлера может быть существенна для частиц, влияющих друг на друга через сильное ядерное взаимодействие. Через два года ситуация полностью изменилась. В 1970 статьи Леонарда Сасскайнда из Стэнфорда, Холгера Нильсена из Института Нильса Бора и Йоихиро Намбу из Университета Чикаго обнаружили физические обоснования открытия Венециано. Эти физики показали, что если сильное взаимодействие между двумя частицами происходит вследствие мельчайшей, экстремально тонкой, почти подобной резиновой ленте нити, которая соединяет частицы, тогда квантовые процессы, которые сосредоточенно обдумывали Венециано и другие, будут математически описываться с использованием формулы Эйлера. Маленькие эластичные нити были окрещены струнами и с этого момента, правильно поставив лошадь перед телегой, теория струн официально родилась.

Но придержите шампанское. Для вовлеченных в эти исследования было удовольствием понять физические первоистоки прозрения Венециано, поскольку они наводили на мысль, что физики находились на пути к разоблачению сильного ядерного взаимодействия. До тех пор открытие не приветствовалось всеобщим энтузиазмом; далеко не так. Очень далеко. Фактически, статья Сасскайнда была возвращена журналом, в который он ее послал, с комментарием, что работа почти не представляет интереса, эту оценку Сасскайнд вспоминал так: "Я был ошеломлен, я был выбит из моего кресла, я был погружен в депрессию, так что пошел домой и напился".[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_9" \o ) В конечном счете его статья и все другие работы, которые объявляли струнную концепцию, были опубликованы, но это произошло незадолго до того, как теория претерпела две еще более опустошительные неудачи. Более внимательное изучение более уточненных данных по сильному ядерному взаимодействию, собранных в течение ранних 1970х, показало, что струнное приближение не годится для точного описания новых результатов. Более того, новое предложение, названное *квантовой хромодинамикой*, которое имело крепкие корни в традиционных составляющих вроде частиц и полей, – а совсем не струн, – оказалось в состоянии убедительно описать все данные. Итак, около 1974 теория струн получила один-два нокаутирующих удара. Или так это казалось.

Джон Шварц был одним из самых первых струнных энтузиастов. Однажды он сказал мне, что на старте он имел хорошие ощущения, что теория глубока и важна. Шварц потратил много лет, анализируя различные математические аспекты; среди других вещей это привело к открытию теории суперструн – как мы увидим, важному уточнению исходного струнного плана. Но с восхождением квантовой хромодинамики и крахом струнной схемы для описания сильного взаимодействия оправдания для продолжения работы по теории струн начали рассеиваться. Тем не менее, имелось одно особое рассогласование между теорией струн и сильным ядерным взаимодействием, которое не давало покоя Шварцу, и он счел, что он все равно должен двигаться вперед. Квантовомеханические уравнения теории струн предсказали, что особая, весьма необычная частица должна была в изобилии рождаться при высокоэнергетических столкновениях, имеющих место в атомных распадах. Частица должна была иметь нулевую массу, как фотон, но струнная теория предсказывала, что она должна была иметь спин 2, что, грубо говоря, означает, что она вращается в два раза быстрее фотона. Никто из экспериментаторов никогда не находил такую частицу, так что она оказалась среди ложных предсказаний, сделанных теорией струн.

Шварц и его соратник Джоэл Шерк были оздачены этой отсутствующей частицей, пока они не сделали величественный скачок к совершенно другой проблеме. Хотя никто не смог объединить ОТО и квантовую механику, физики определили некоторые свойства, которые должны возникать в любом таком успешном союзе. И, как отмечено в Главе 9, одно из свойств, которые они нашли, заключалось в том, что точно так же, как электромагнитные силы микроскопически переносятся фотонами, гравитационные силы должны микроскопически переноситься другим классом частиц, гравитонами (самым элементарным, квантовым пучком гравитации). Хотя гравитоны еще предстоит найти экспериментально, все согласны с теоретическим анализом, что гравитоны должны иметь два свойства: они должны быть безмассовыми и иметь спин 2. Для Шварца и Шерка это был громкий удар в колокол, – это были в точности те же свойства неконтролируемой частицы, предсказанной теорией струн, – и это заставило их предпринять смелый шаг, один из тех, которые привели отверженную теорию струн к яркому успеху.

Они предположили, что теория струн не должна мыслиться как квантовомеханическая теория сильных ядерных взаимодействий. Они доказывали, что даже если теория была открыта в попытке понять сильные взаимодействия, на самом деле она является решением другой проблемы. На самом деле она является первой квантовомеханической теорией гравитационного взаимодействия. Они заявили, что безмассовая частица со спином 2, предсказанная теорией струн, была гравитоном, и что уравнения теории струн с необходимостью включают квантовомеханическое описание гравитации.

Шварц и Шерк опубликовали свои предположения в 1974 и ожидали бурной реакции от физического сообщества. Вместо этого их труд был проигнорирован. Ретроспективно не трудно понять, почему. Некоторым казалось, что концепция струн стала теорией в поиске приложения.

После того, как попытки использовать теорию струн для объяснения сильных ядерных взаимодействий провалились, казалось, что ее сторонники не смогли признать поражения и, вместо этого, из кожи вон лезли, определяя поиски уместности теории где-то в другом месте. Топлива в этот огонь убеждений добавилось, когда стало ясно, что Шварцу и Шерку понадобилось радикально изменить размер струн в своей теории, чтобы силы, переносимые кандидатом в гравитоны, стали привычной, известной силой гравитации. Поскольку гравитация экстремально слабая сила\* и поскольку оказалось, что чем длиннее струна, тем сильнее переносимое взаимодействие, Шварц и Шерк нашли, что струны должны быть экстремально малы, чтобы переносить настолько незначительную силу, как гравитация; они должны быть порядка планковской длины, в сотню миллиардов миллиардов миллиардов раз меньше, чем сначала представлялось. Настолько малы, как отмечали сомневающиеся, криво усмехаясь, что нет оборудования, которое могло бы увидеть их, что означает, что теория не может быть проверена экспериментально.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_10" \o )

*(\*) "Вспомним, как отмечалось в Главе 9, даже слабый магнит может пересилить притяжение всей земной гравитации и притянуть вверх скрепку для бумаги. Численно это значит, что гравитационная сила составляет примерно 10–42 от величины электромагнитных сил."*

Напротив, 1970е стали очевидцами одного успеха за другим у более обычных, не основанных на струнах теорий, формулируемых с точки зрения частиц или полей. Теоретики и экспериментаторы одинаково полностью направляли свои головы и руки в конкретные идеи этих теорий для исследования и предсказаний для проверки. Зачем обращаться к спекулятивной теории струн, когда имется так много возбуждающей работы внутри хорошо зарекомендовавшей себя на практике схемы? Во многом из-за такого настроения, хотя физики и знали на периферии своих мыслей, что проблема соединения гравитации и квантовой механики остается нерешенной с использованием обычных методов, это не была проблема, которая овладела вниманием. Почти каждый допускал, что это важная проблема и однажды к ней надо обратиться, но с богатством работы, все еще остающейся с негравитационными силами, проблема квантования гравитации отодвигалась для обжига лишь на заднюю конфорку. И, наконец, в середине поздних 1970х теория струн была далека от того, чтобы полностью работать. Обладание кандидатом на гравитон было успехом, но все еще требовало внимания большое число концептуальных и технических проблем. Казалось вполне правдоподобным, что теория не сможет преодолеть одну или больше из этих проблем, так что работа в теории струн означала заметный риск. В течение нескольких лет теория могла умереть.

Шварц остался непоколебимым. Он был уверен, что открытие в теории струн первого правдоподобного подхода к описанию гравитации на языке квантовой механики является крупным прорывом. Если никто не хотел слушать, прекрасно. Он будет нажимать на разработку теории, так что когда люди будут готовы уделить внимание, теория струн будет продвинута намного дальше. Его решение оказалось пророческим.

В конце 1970х – начале 1980х Шварц, объединвшись с Майклом Грином, тогда работавшим в Лондонском Колледже Королевы Марии, предпринял работу над некоторыми техническим препятствиями, сопровождавшими теорию струн. Первой среди них была проблема аномалий. Детали не существенны, но, грубо говоря, аномалия является фатальным квантовым эффектом, который влечет за собой гибель теории через намеки на то, что она нарушает некоторые священные принципы, вроде сохранения энергии. Чтобы быть жизнеспособной, теория должна быть свободной от всех аномалий. Первоначальные исследования обнаружили, что теория струн страдает от нашествия аномалий, что было одной из главных технических причин, по которым перестал проявляться энтузиазм. Аномалии сигнализировали, что хотя теория струн кажется обеспечивающей квантовую теорию гравитации, поскольку она содержит гравитоны, более пристальную проверку теория не выдерживает из-за своей собственной тонкой математической противоречивости.

Шварц обнаружил, однако, что ситуация не является совсем тупиковой. Имелся шанс – и он был немалый – что полный расчет покажет, что различные квантовые вклады в аномалии, беспокоящие торию струн, если их объединиь корректно, уничтожают друг друга. Вместе с Грином Шварц предпринял тяжелую работу по расчету этих аномалий и к лету 1984 был вознагражден двумя удачами в куче мусора. Одной дождливой ночью, во время поздней работы в Физическом Центре Аспена в Колорадо, они завершили одно из наиболее важных полевых вычислений – расчет, показывающий, что все потенциальные аномалии, способом, который кажется едва ли не сверхъестественным, были уничтожены друг другом. Они обнаружили, что теория струн свободна от аномалий и потому не допускает математических несовместимостей. Теория струн, как они убедительно продемонстрировали, оказалась квантовомеханически жизнеспособной.

На этот раз физики прислушались. Это была середина 1980х и климат в физике ощутимо изменился. Многие из существенных свойств трех негравитационных сил были проработаны таоретически и подтверждены экспериментально. Хотя важные детали оставались неразрешенными, – а некоторые все еще не разрешены, – сообщество было готово энергично взяться за следующую большую проблему: соединение ОТО и квантовой механики. Тогда из малоизвестного угла физики Грин и Шварц неожиданно вырвались на сцену с определенным, математически последовательным и эстетически привлекательным предложением о том, что надо делать. Едва ли не в течение ночи число исследователей, работавших в теории струн возросло с двух человек до тысяч. Первая струнная революция была на полном ходу.

Первая революция

Я поступил в аспирантуру в Оксфордском университете в конце 1984 и в течение нескольких месяцев коридоры гудели от разговоров о революции в физике. Поскольку Интернету еще предстояло получить широкое распространение, доминирующим каналом быстрого обмена информацией были слухи, и каждый день приносил слова о новых прорывах. Исследователи повсюду высказывали свое мнение, так что атмосфера была заряжена, в известном смысле, новым со времен первых дней квантовой механики, и шли серьезные разговоры, что конец теоретической физики находится в пределах достижимого.

Теория струн была новой почти для каждого, так что в эти ранние дни ее детали не были общеизвестны. Нам особенно повезло в Оксфорде: Майкл Грин в то время посетил его с лекциями по теории струн, так что многие из нас получили близкое знакомство с основными идеями теории и существенными утверждениями. Это были впечатляющие утверждения. В двух словах, вот, что говорила теория:

Возьмите любой кусок материи – блок льда, каменную глыбу, железную плиту – и представьте его разделенным пополам, затем один из кусков еще пополам и так далее; представьте материал, постоянно делящийся на все более мелкие куски. Примерно 2 500 лет назад древние греки сформулировали проблему определения тончайшей, нерассекаемой, неделимой составляющей, которая являлась бы конечным продуктом такой процедуры. В наше время мы узнали, что рано или поздно вы придете к атомам, но атомы не являются ответом на вопрос греков, поскольку они могут быть рассечены на более тонкие составляющие. Атомы могут быть расщеплены. Мы узнали, что они состоят из электронов, которые роятся вокруг центральных ядер, которые составлены из еще более мелких частиц – протонов и нейтронов. А в конце 1960х эксперименты на Стэнфордском Линейном Ускорителе открыли, что даже сами нейтроны и протоны построены из более фундаментальных составляющих: каждый протон и каждый нейтрон состоит из трех частиц, известных как кварки, как было отмечено в Главе 9 и как проиллюстрировано на Рис. 12.3а.

Обычная теория, поддерживаемая современнейшими экспериментами, изображала электроны и кварки как точки без какой-либо пространственной протяженности; с этой точки зрения, следовательно, они отмечают конец линии – последнюю куклу природной матрешки, найденную в микроскопическом строении материи. Именно здесь появляется теория струн.



(а) (b)

***Рис 12.3****(а) Обычная теория основана на электронах и кварках как базовых составляющих материи, (b) Теория струн предполагает, что каждая частица на самом деле является вибрирующей струной.*

 Теория струн спорит с обычной картиной, предполагая, что электроны и кварки не являются частицами с нулевой протяженностью. Вместо этого, обычная модель частицы-как-точки в соответствии с теорией струн является приближением более утонченного изображения, в котором каждая частица на самом деле является мельчайшей вибрирующей нитью энергии, названной струной, как вы можете видеть на Рис. 12.3b. Эти нити вибрирующей энергии представляются не имеющими толщины, только длину, так что струны являются одномерными сущностями. Кроме того, поскольку струны столь малы, в несколько сотен миллиардов миллиардов раз меньше отдельного атомного ядра (10–33 сантиметра), они кажутся точками даже тогда, когда исследуются на наших самых совершенных атомных ускорителях.

Поскольку наше понимание теории струн далеко от полного, никто не знает с уверенностью, заканчивается ли здесь история, – полагая, что теория корректна, являются ли струны по-настоящему последней куклой в русской матрешке или они сами могут быть составлены из еще более тонких ингредиентов. Мы вернемся к этой проблеме, но пока мы следуем историческому развитию предмета и представим, что струны в самом деле показывают, где рулетка останавливается; мы представим, что струны являются наиболее элементарными кирпичиками во вселенной.

Теория струн и объединение

Такова теория струн вкратце, но чтобы передать мощь нового подхода, я должен описать немного более полно обычную физику частиц. За последние сто лет физики прокалывали, избивали и распыляли материю в поиске элементарных составляющих вселенной. На самом деле они нашли, что почти во всем, с чем кто-либо когда-либо сталкивался, фундаментальными ингредиентами являются электроны и кварки, напомним только, – более точно, как в Главе 9, электроны и два вида кварков, верхний (up) и нижний (down), которые отличаются массой и электрическим зарядом. Но эксперименты также обнаружили, что вселенная имеет другие, более экзотические семейства частиц, которые не появляются в обычной материи. В дополнение к up-кварку и down-кварку эксперименты идентифицировали четыре других семейства кварков (очарованные (charm) кварки, странные (strange) кварки, кварки дна (вottom) и кварки вершины (top)) и два других семейства частиц, которые очень сильно похожи на электроны, только тяжелее (мюоны и тау-частицы). Возможно, что эти частицы изобиловали сразу после Большого Взрыва, но сегодня они производятся только как недолговечные обломки от высокоэнергетических столкновений между более привычными семействами частиц. Наконец, экспериментаторы также открыли три семейства призрачных частиц, называемых нейтрино (электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино), которые могут проходить через триллионы миль свинца так же легко, как мы проходим через воздух. Эти частицы – электрон и два его более тяжелых родственника, шесть видов кварков и три вида нейтрино – составляют ответ сегодняшнего специалиста по физике частиц на вопрос древних греков о строении материи.[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_11" \o )

Длинный список для видов частиц может быть организован в три "семьи" или "поколения" частиц, как показано в Таблице 12.1. Каждое поколение имеет два кварка, одно из нейтрино и одну из электроноподобных частиц; разница между соответствующими частицами в каждом поколении заключается в том, что их массы возрастают в каждом последующем поколении. Разделение на поколения определенно наводит на мысль о лежащей в основании системе, но вал частиц может легко закружить вашу голову (или, хуже того, сделать ваши глаза стеклянными). Однако держитесь крепко, поскольку одно из самых прекрасных свойств теории струн заключается в том, что она обеспечивает способ для приручения этой кажущейся сложности.

В соответствии с теорией струн имеется только один фундаментальный ингредиент – струна – и богатство семейств частиц просто отражает различные способы (моды) колебаний, которые струна может выполнять. Это прямо похоже на то, что происходит с более привычными струнами вроде скрипичных или виолончельных. Виолончельная струна может колебаться множеством различных способов, и мы слышим каждый способ как различные звуки. Струны в теории струн ведут себя аналогично: они также могут колебаться различными способами. Но вместо получения различных музыкальных тонов, различные способы колебаний в теории струн соответствуют различным видам частиц. Ключевое понимание заключается в том, что детальные способы колебаний, выполняемые струной, производят специфическую массу, специфические электрический заряд, специфический спин и так далее – то есть, специфический список свойств, который различает один вид частицы от другого.

|  |
| --- |
| **Частица Масса Частица Масса Частица Масса** |
| Поколение 1 Электрон 0,00054 Мюон 0,11 Тау 1,9 |
| Поколение 2 Электроннное нейтрино < 10-9Мюонное нейтрино < 10-4 Тау-нейтрино < 10-3 |
| Поколение 3 Up-кварк 0,0047 Charm-кварк 1,6 Top-кварк 189 Down-кварк 0,0074 Strange-кварк 0,16 Bottom-кварк 5,2 |
|  |

***Таблица 12.1****Три поколения (семьи) фундаментальных частиц и их массы (в единицах масс протона). Известно, что величины масс нейтрино не равны нулю, но их точные величины пока ускользали от экспериментального определения.*

Колебание струны одним особым способом может иметь свойства электрона, в то время как струна, колеблющаяся другим способом, может иметь свойства up-кварка, down-кварка или любого другого семейства частиц из Таблицы 12.1. Это не значит, что "электронная струна" составляет электрон, или up-кварковая струна составляет up-кварк, или down-кварковая струна составляет down-кварк. Вместо этого единственный вид струны может отвечать за великое множество частиц, поскольку струна может выполнять великое множество способов колебаний.

Как вы можете видеть, это представляет потенциально гигантский шаг в направлении унификации. Если теория струн верна, кружащий голову и делающий стеклянными глаза список частиц в Таблице 12.1 представляется колебательным репертуаром единственного базового ингредиента. Метафорически, различные ноты, которые могут быть сыграны на единственном виде струн могут отвечать за все различные частицы, которые были обнаружены. На ультрамикроскопическом уровне вселенная будет сродни симфонии струн, чьи вибрации дают существование материи.

Это восхитительно элегантная система для объяснения частиц в Таблице 12.1, но кроме того, предложенные теорией струн унификации идут еще дальше. В Главе 9 и в нашем обсуждении выше мы рассмотрели, как силы природы переносятся на квантовом уровне другими частицами, частицами-переносчиками, которые собраны в Таблице 12.2. Теория струн отвечает за частицы-переносчики точно так же, как она отвечает за частицы материи. А именно, каждая частица-переносчик является струной, которая проявляет специфический способ колебаний. Фотон является вибрацией струны одним особым способом, глюон есть колебание струны другим способом. И, что имеет первоочередную важность, что показали Шварц и Шерк в 1974, имеется особая колебательная мода, которая имеет все свойства гравитона, так что гравитационная сила включается в квантовомеханическую схему теории струн. Таким образом, не только частицы материи возникают из вибрирующих струн, но так же и частицы-переносчики – даже частица-переносчик гравитации.

|  |
| --- |
| **Взаимодействие (сила) Частица-переносчик Масса** |
| Сильное Глюон 0 |
| Электромагнитное Фотон 0 |
| Слабое W; Z 86; 97 |
| Гравитационное Гравитон 0 |

***Таблица 12.2****Четыре силы (взаимодействия) природы вместе со связанными с ними частицами и их массами в единицах массы протона. (В действительности имеется две W-частицы – одна с зарядом +1 и одна с зарядом –1 – которые имеют одинаковую массу; для простоты мы пренебрегаем этими деталями и отмечаем каждую как W-частицу).*

Итак, помимо обеспечения первого успешного подхода к соединению гравитации и квантовой механики, теория струн обнаруживает свою мощь, обеспечив единое описание для всей материи и всех взаимодействий. Это то утверждение, которое выбило тысячи физиков из их кресел в середине 1980х; со временем они поднялись и отряхнули с себя пыль, многие поменяли убеждения.

Почему теория струн работает?

Перед разработкой теории струн путь научного прогресса был усыпан неудачными попытками соединить гравитацию и квантовую механику. Так что такое с теорией струн, что позволило ей так сильно преуспеть? Мы описали, как Шварц и Шерк осознали, в значительной степени неожиданно для себя, что один особый способ колебаний струны имеет точно такие правильные свойства, чтобы быть гравитоном, и, как они затем заключили, что теория струн обеспечивает готовую схему для соединения двух теорий. Исторически в самом деле так и было, сила и перспективность теории струн были случайно осознаны, но как объяснение, почему струнный подход преуспевает там, где все другие попытки пасуют, оно оставляет желать лучшего. Рис. 12.2 суммирует конфликт между ОТО и квантовой механикой – на ультракоротких пространственных (и временных) масштабах буйство квантовой неопределенности становится настолько интенсивным, что гладкая геометрическая модель пространства-времени, лежащая в основе ОТО, разрушается – так что вопрос в следующем: Как теория струн решает проблему? Как теория струн нормализует бурные флуктуации пространства-времени на ультрамикроскопических расстояниях?

Главное новое свойство струнной теории в том, что ее основной ингредиент не точечная частица, – точка не имеет размера – а, вместо этого, объект, который имеет пространственную протяженность. Эта разница является ключевой для успеха теории струн в соединении гравитации и квантовой механики.

Дикое буйство, показанное на Рис. 12.2, возникает из применения принципа неопределенности к гравитационному полю; на все меньших и меньших масштабах принцип неопределенности подразумевает, что флуктуации в гравитационном поле будут все больше и больше. На таких экстремально малых масштабах расстояний, однако, мы должны описывать гравитационное поле в терминах его фундаментальных составляющих, гравитонов, почти как на молекулярных масштабах мы должны описывать воду в терминах молекул Н2О. На этом языке буйные неровности гравитационного поля должны мыслиться как большие количества гравитонов, дико прыгающих с места на место, как частицы грязи и пыли, пойманные свирепым торнадо. Теперь, если бы гравитоны были точечными частицами (как всегда представлялось ранее, приводя к краху попыток соединения ОТО и квантовой механики), Рис. 12.2 будет в точности отражать их коллективное поведение: чем короче масштаб расстояний, тем больше перемешивание. Но теория струн меняет это заключение.

В теории струн каждый гравитон есть вибрация струны – чего-то, что не является точкой, а, вместо этого, имеет грубо планковскую длину (10–33сантиметра) в размере.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_12" \o ) А поскольку гравитоны являются мельчайшими, наиболее элементарными составляющими гравитационного поля, не имеет смысла говорить о поведении гравитационных полей на масштабах меньше планковской длины. Точно так же, как разрешение вашего телевизионного экрана ограничено размером индивидуальных пикселов или зерен, разрешение гравитационного поля в теории струн ограничено размером гравитонов. Таким образом, ненулевой размер гравитонов (и чего-угодно-другого) в теории струн устанавливает предел, грубо масштаба планковской длины, до которого точно гравитационное поле может быть разложено.

Это существенное осознание. Неконтролируемые квантовые флуктуации, проиллюстрированные на Рис. 12.2, возникают только тогда, когда мы рассматриваем квантовую неопределенность на достаточно коротких масштабах длин – масштабах короче планковской длины. В теории, основанной на точечных частицах нулевого размера, такое применение принципа неопределенности оправдано и, как мы видели на рисунке, это приводит нас к диким землям за пределами достижимости ОТО Эйнштейна. Теория, основанная на струнах, однако, включает встроенную защиту от отказов. В теории струн струны являются мельчайшим ингредиентом, так что наше путешествие в ультрамикроскопическую область приходит к концу, когда мы достигаем длины Планка – размера самой струны. На Рис. 12.2 планковский масштаб представлен вторым сверху уровнем; как вы можете видеть, на таких масштабах все спокойно; волнообразные движения в ткани пространства вследствие гравитационного поля все еще подчиняются квантовым дрожаниям. Но дрожания достаточно мягкие, чтобы избежать непоправимого конфликта с ОТО. Точная математическая основа ОТО должна быть модифицирована, чтобы включить эти квантовые волнообразные движения, но это может быть сделано и математика остается осмысленной.

Таким образом, введя ограничения, на сколь малые расстояния мы можем зайти, теория струн вводит ограничения, насколько сильны становятся дрожания гравитационного поля, – и предел оказывается достаточно разумным, чтобы избежать катастрофического конфликта между квантовой механикой и ОТО. Таким образом, теория струн подавляет антагонизм между двумя схемами и оказывается способной впервые соединить их.

Космическая ткань в области малого

Что это значит для ультрамикроскопической природы пространства и пространства-времени в более общем смысле? С одной стороны, это сильно бросает вызов обычному понятию, что ткань пространства и времени непрерывна, – что вы можете всегда разделить расстояние между здесь и там или продолжительность между теперь и тогда пополам и снова пополам, бесконечно деля пространство и время на все более малые доли. Вместо этого, когда вы подходите к планковской длине (длине струны) и планковскому времени (времени, которое требуется свету, чтобы пролететь длину струны) и пытаетесь разделить пространство и время более тонко, вы находите, что это невозможно. Концепция "уменьшения" перестает иметь смысл как только вы достигаете размера наименьшей составляющей космоса. Для точечных частиц нулевой длины это не приводит к ограничению, но поскольку струны имеют размер, для них приводит. Если теория струн верна, обычные концепции пространства и времени, система, в рамках которой имеет место весь наш повседневный опыт, просто неприменимы на масштабах меньше планковского масштаба – масштабах самих струн.

Что касается концепции, которая должна прийти на смену, по ней все еще нет консенсуса. Одна возможность, которая согласуется с изложенным выше объяснением о том, как теория струн запутывает квантовую механику и ОТО, заключается в том, что ткань пространства на планковском масштабе похожа на решетку или сетку, в которой "пространство" между линиями сетки находится вне границ физической реальности. Точно так же, как микроскопический муравей, гуляя по обычному кусочку ткани, будет перепрыгивать с нити на нить, возможно, что движение через пространство на ультрамикроскопических масштабах аналогично требует дискретных прыжков с одной "нити" пространства на другую. Время тоже может иметь зернистую структуру с индивидуальными моментами, тесно упакованными друг к другу, но не сливающимися в бесшовный континуум. При таком образе мыслей концепции все более маленьких пространственных и временных интервалов резко заканчиваются на планковском масштабе. Точно так же, как нет такой вещи, как американская монетка величиной меньше пенни, если ультрамикроскопическое пространство-время имеет сетчатую структуру, то нет такой вещи, как расстояние короче планковской длины или продолжительность короче планковского времени.

Другая возможность заключается в том, что пространство и время не теряют внезапно смысл на экстремально малых масштабах, а вместо этого постепенно модифицируются в иные, более фундаментальные концепции. Сокращение меньше чем до планковского масштаба будет запрещено не потому, что вы вторгаетесь в фундаментальную сетку, а потому, что концепции пространства и времени продолжаются в виде понятий, для которых "сокращение меньше" столь же бессмысленно, как вопрос, не является ли число девять счастливым. Это значит, что мы можем представить себе, что в то время, как привычное макроскопическое пространство и время постепенно трансформируется в их непривычные ультрамикроскопические двойники, многие из их обычных свойств – таких как длина и продолжительность – становятся неприменимыми или бессмысленными. Точно так же, как вы можете разумно изучать температуру и вязкость жидкой воды – концепции, которые применимы к макроскопическим свойствам жидкости, – но когда вы спускаетесь на уровень индивидуальных молекул Н2О, эти концепции теряют смысл, так же, возможно, хотя вы можете разделить область пространства и продолжительность времени пополам и еще раз пополам на повседневном масштабе, когда вы проходите планковский масштаб, происходит трансформация, которая переводит такое деление в бессмысленное.

Многие струнные теоретики, включая меня, сильно подозревают, что что-нибудь в духе указанных возможностей на самом деле происходит, но чтобы идти дальше, мы нуждаемся в описании более фундаментальных концепций, в которые трансформируются пространство и время.\* На сегодняшний день этот вопрос остается без ответа, но передовые исследования (описываемые в последней главе) предлагают некоторые возможности с далеко идущими последствиями.

*(\*)"Я могу заметить, что последователи другого подхода по соединению ОТО и квантовой механики, петлевой квантовой гравитации, которая будет коротко обсуждена в Главе 16, принимают точку зрения, которая недалека от упомянутого выше предположения, – что пространство-время имеет дискретную структуру на мельчайших масштабах".*

Деликатные вопросы

Из описаний, которые я давал до настоящего времени, может показаться загадочным, что некоторые физики сопротивляются очарованию теории струн. Наконец-то, есть теория, которая дает надежду на осуществление мечты Эйнштейна и даже больше; теория, которая может успокоить враждебность между квантовой механикой и ОТО; теория с возможностью объединения всей материи и всех сил через описание всего в терминах вибрирующих струн; теория, которая предлагает ультрамикроскопическую область, в которой привычное пространство и время могут быть так же старомодны и изящны, как телефон с дисковым набором; короче говоря, теория, которая обещает дать нам понимание вселенной на совершенно новом уровне. Но не стоит забывать, что никто никогда не видел струну и, исключая некоторые радикальные идеи, обсуждаемые в следующей главе, вероятно, что даже если теория струн верна, никто никогда и не увидит. Струны столь малы, что прямое наблюдение равносильно чтению текста на этой странице с расстояния 100 световых лет: это требует силы разрешения примерно в миллиард миллиардов раз точнее, чем позволяют наши текущие технологии. Некоторые ученые громогласно утверждают, что теория, настолько удаленная от прямой эмпирической проверки, лежит в области философии или теологии, но не физики.

Я нахожу это взгляд недальновидным или, уж по крайней мере, преждевременным. Хотя мы никогда не сможем получить технологию, способную увидеть струны непосредственно, история науки переполнена теориями, которые были проверены экспериментально косвенным образом.[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_13" \o ) Теория струн не скромна. Ее цель и обещания велики. И это возбуждающе и весьма похвально, поскольку если теория претендует на то, чтобы быть теорией нашей вселенной, она должна быть равна реальному миру не только в приблизительном наброске, обсуждавшемся до настоящего времени, но так же и в мельчайших деталях. Как мы теперь будем обсуждать, там и лежат потенциальные проверочные тесты.

В течение 1960х и 1970х занимающиеся частицами физики сделали огромный шаг в понимании квантовой структуры материи и негравитационных сил, которые управляют ее поведением. Схема, к которой они в конце концов пришли через экспериментальные результаты и теоретическое осмысление, называется *стандартной моделью* физики частиц и основывается на квантовой механике, в которой частицы материи в Таблице 12.1 и частицы взаимодействий в Таблице 12.2 (исключая гравитон, поскольку стандартная модель не включает гравитацию, и включая частицу Хиггса, которая не обозначена в таблицах) все рассматриваются как точечные частицы. Стандартная модель способна объяснять, по существу, все данные, получаемые на атомных ускорителях всего мира, и в течение лет ее изобретатели заслуженно прославлялись с высшими почестями. Даже при этих условиях стандартная модель имеет существенные ограничения. Мы уже обсуждали, как она и все другие подходы, предшествовавшие теории струн, потерпели неудачу с объединением гравитации и квантовой механики. Но имеются также и другие недостатки.

Стандартная модель не может объяснить, *почему* взаимодействия переносятся точным списком частиц в Таблице 12.2 и *почему* материя составлена точным списком частиц в Таблице 12.1. Почему имеются три поколения частиц материи и почему каждое поколение содержит те частицы, которые содержит? Почему не два поколения или просто одно? Почему электрон имеет в три раза больший заряд, чем down-кварк? Почему мюон весит в 23,4 раза больше, чем up-кварк, и почему top-кварк весит в 350 000 раз больше электрона? Почему вселенная сконструирована этим рядом кажущихся хаотичными чисел? Стандартная модель принимает частицы из Таблиц 12.1 и 12.2 (еще раз, исключая гравитон) как входные данные, а затем делает впечатляюще точные предсказания о том, как частицы будут взаимодействовать и влиять друг на друга. Но стандартная модель не может объяснить входные данные – частицы и их свойства, – не больше, чем ваш калькулятор может объяснить числа, которые вы вводили в последний раз, когда пользовались им.

Загадочность свойств этих частиц не есть академический вопрос, почему та или иная скрытая деталь произошла тем или иным образом. На протяжении последнего столетия ученые осознали, что вселенная имеет привычные свойства повседневного опыта только потому, что частицы в Таблицах 12.1 и 12.2 имеют точно те свойства, которые имеют. Даже довольно малые изменения масс или электрических зарядов некоторых частиц могли бы, например, сделать их неспособными вовлекаться в ядерные процессы, которые питают звезды. А без звезд вселенная была бы совершенно иным местом. Таким образом, детальные свойства элементарных частиц вплетаются в то, что многие рассматривают как глубочайший вопрос всей науки: *Почему элементарные частицы имеют точно правильные свойства, чтобы позволить происходить ядерным процессам, светить звездам, формироваться планетам вокруг звезд и, по меньшей мере, на одной такой планете существовать жизни*?

Стандартная модель не может предложить никакого проникновения в этот вопрос, поскольку свойства частиц являются частью требуемых ей входных данных. Теория не сдвинется с пыхтением вперед и не начнет производить результаты, пока свойства частиц не будут определены. Но теория струн в этом отличается. В теории струн свойства частиц определяются способами колебаний струны, так что теория содержит перспективы объяснения.

Свойства частиц в теории струн

Чтобы понять новую объяснительную схему теории струн, нам нужно лучше почувствовать, как вибрации струн производят свойства частиц, так что рассмотрим простейшее свойство частицы, ее массу.

Из Е = mc2 мы знаем, что масса и энергия взаимозаменяемы; как доллар и евро, они являются конвертируемыми валютами (но в отличие от денежных валют, они имеют фиксированный курс обмена, заданный скоростью света, умноженной на себя, c2). Наше выживание зависит от уравнения Эйнштейна, поскольку поддерживающие жизнь солнечное тепло и свет генерируются путем "конвертации" 4,3 миллиона тонн материи в энергию каждую секунду; однажды ядерные реакторы на Земле могут превзойти Солнце, безопасно заставляя работать уравнение Эйнштейна, чтобы обеспечить человечество практически безлимитными поставками энергии.

В этом примере энергия производится из массы. Но уравнение Эйнштейна прекрасно работает и в обратном направлении – в направлении, в котором масса производится из энергии, – и это то направление, в котором теория струн использует уравнение Эйнштейна. Масса частицы в теории струн есть ничто иное, как энергия ее вибрирующей струны. Например, объяснение, которое теория струн предлагает для того, почему одна частица тяжелее, чем другая, таково, что струна, составляющая более тяжелую частицу, колеблется быстрее и более бурно, чем струна, составляющая более легкую частицу. Более быстрые и бурные колебания означают более высокую энергию, а более высокая энергия переводится через уравнение Эйнштейна в большую массу. И наоборот, чем более легкая частица, тем более слабым и менее неистовым является соответствующее колебание струны; безмассовая частица вроде фотона или гравитона соответствует струне, выполняющей наиболее тихий и мягкий способ колебаний, какой может быть.\* [[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_14" \o )

*(\*) "Связь с массой, возникающей из Хиггсова океана, будет обсуждена позже в этой главе".*

Другие свойства частицы, такие как ее электрический заряд и ее спин, кодируются через более тонкие свойства колебаний струны. По сравнению с массой эти свойства труднее описать нематематически, но они следуют той же самой основной идее: способ колебаний является "отпечатком пальцев" частицы; все свойства, которые мы используем, чтобы различать одну частицу от другой, определяются способом колебаний соответствующей частице струны.

В ранние 1970е, когда физики анализировали способы колебаний, возникающие в первой инкарнации струнной теории – теории бозонных струн, – чтобы определить виды свойств частиц, предсказываемые теорией, они налетели на корягу. Каждый способ колебаний в теории бозонных струн имел целочисленное значение спина: спин-0, спин-1, спин-2 и так далее. Это была проблема, поскольку, хотя частицы-переносчики имеют значения спина такого сорта, частицы материи (вроде электронов и кварков) нет. Они имеют дробное значение спина, спин-1/2. В 1971 Пьер Рамон из Университета Флориды изложил средство от этого недостатка; тотчас же он нашел способ модифицировать уравнения теории бозонных струн, чтобы допустить также и способы колебаний с полуцелым спином.

Фактически, при ближайшем рассмотрении исследование Рамона вместе с результатами Шварца и его соратника Андре Невё и более поздними достижениями Фердинандо Глоцци, Джоэля Шерка и Дэвида Олива открыли совершенный баланс – новую симметрию – между способами колебаний с различными спинами в модифицированной теории струн. Эти исследователи нашли, что новые способы колебаний возникают парами, чья величина спина отличается на половину единицы. Для каждого способа колебаний со спином-1/2 имеется ассоциированный способ колебаний со спином-0. Для каждого способа колебаний со спином-1 имеется ассоциированный способ колебаний со спином-1/2 и так далее. Связь между целыми и полуцелыми величинами назвали *суперсимметрией*, и с этими результатами родилась теория суперсимметричных струн или *теория суперструн*. Около десяти лет позже, когда Шварц и Грин показали, что все потенциальные аномалии, которые угрожали теории струн, уничтожили друг друга, они на самом деле работали в системе теории суперструн, так что революцию, воспламененную их статьей, более правильно называть первой суперструнной революцией. (Для последующего мы часто будем ссылаться на струны и на теорию струн, но это только для краткости; мы всегда имеем в виду суперструны и теорию суперструн).

На этом основании мы теперь можем установить, что будет означать для теории струн выйти за пределы эскизных свойств и объяснить вселенную в деталях. Это сводится к следующему: среди способов колебаний, которые струны могут показывать, должны быть способы, чьи свойства согласуются с соответствующими свойствами известных частиц. Теория содержит моды колебаний с полуцелым спином, но она должна включать моды с полуцелым спином, которые точно подходят к известным частицам материи, как обобщено в Таблице 12.1. Теория содержит моды колебаний со спином-1, но она должна включать моды колебаний со спином-1, которые точно подходят к известным частицам-переносчикам, как обобщено в Таблице 12.2. Наконец, если эксперименты на самом деле откроют частицы со спином-0, такие, как предсказаны для Хиггсовых полей, теория струн должна обеспечить моды колебаний, которые *точно* подходят к свойствам и этих частиц тоже. Короче говоря, чтобы теория струн была жизнеспособной, ее моды колебаний должны давать и объяснять частицы стандартной модели.

Здесь большие возможности для теории струн. Если теория струн верна, то имеется объяснение для свойств частиц, которые экспериментаторы измерили, и оно находится в резонансном способе колебаний, который струна может исполнить. Если свойства этих способов колебаний подходят к свойствам частиц из Таблиц 12.1 и 12.2, я думаю, что в достоверности теории струн убедятся даже несгибаемые скептики, вне зависимости от того, видел ли кто-нибудь непосредственно протяженную структуру самих струн или нет. И помимо установления ее самой как долгожданной единой теории, с таким соответствием между теорией и экспериментальными данными теория струн обеспечит первое фундаментальное объяснение, почему вселенная такова, какова она есть.

Так как теория струн проходит этот решающий тест?

Слишком много колебаний

Ну, на первый взгляд, теория струн прогорает. Для начала, тут имеется бесконечное число различных способов (мод) колебаний струны с первыми несколькими из бесконечной серии, схематически изображенными на Рис. 12.4. Однако Таблицы 12.1 и 12.2 содержат только конечный список частиц, так что с самого начала мы, оказывается, имеем обширное несоответствие между теорией струн и реальным миром. Более того, когда мы анализируем математически возможные энергии – и, следовательно, массы – этих колебательных мод, мы приходим к другому существенному рассогласованию между теорией и наблюдениями. Массы допустимых мод колебаний струны не похожи на экспериментально измеренные массы частиц, выписанные в Таблицах 12.1 и 12.2. Нетрудно увидеть, почему.

С ранних дней теории струн исследователи осознали, что жесткость струны обратно пропорциональна ее длине (квадрату ее длины, более точно): в то время, как длинные струны легко согнуть, чем короче струна, тем более жесткой она становится. В 1974, когда Шварц и Шерк предложили уменьшить размер струн так, чтобы они стали включать гравитационную силу правильной величины, они, следовательно, предложили также увеличить натяжение струн, – по-всякому, это привело к натяжению около тысячи триллионов триллионов триллионов (1039) тонн, что примерно в 1041 раз больше натяжения средней фортепианной струны. Теперь, если вы представите изгиб мельчайшей, экстремально жесткой струны в одном из все более вычурных способов колебаний на Рис. 12.4, вы осознаете, что чем больше пиков и впадин имеется, тем больше энергии вы должны затратить.



***Рис 12.4****Первые несколько примеров способов (мод) колебаний струны.*

 И наоборот, раз уж струна вибрирует в такой причудливой моде, она содержит гигантское количество энергии. Таким образом, все способы колебаний струны, кроме простейших, являются высокоэнергетическими, а потому через Е = mc2 соответствуют частицам с гигантскими массами.

И, говоря гигантские, я действительно имею в виду гигантские. Расчеты показывают, что массы колебаний струны следуют сериями, аналогичными музыкальным гармоникам: они все являются кратными фундаментальной массе, массе Планка, почти как высшие тона все являются кратными повторениями фундаментальной частоты или тона. По стандартам физики частиц планковская масса колоссальна – около десяти миллиардов миллиардов (1019) масс протона, грубо порядка массы пылинки или бактерии. Так что возможные массы колебаний струны есть 0 масс Планка, 1 масса Планка, 2 массы Планка, 3 массы Планка и так далее, что показывает, что все массы, кроме 0-массы колебаний струны, чудовищно велики.[[15]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_15" \o )

Как вы можете видеть, некоторые частицы в Таблицах 12.1 и 12.2 на самом деле являются безмассовыми, но большая часть нет. А ненулевые массы в таблицах находятся дальше от планковской массы, чем султан Брунея от нуждающегося в кредите. Таким образом, мы ясно видим, что массы известных частиц не соответствуют образцам, выработанным теорией струн. Значит ли это, что теория струн вычеркивается? Вы можете так подумать, но это не так. Наличие бесконечного списка мод колебаний, чьи массы становятся все более удаленными от масс известных частиц, является вызовом, который теория должна преодолеть. Годы исследований открыли подающие надежды стратегии, как это сделать.

Для начала заметим, что эксперименты с известными семействами частиц научили нас, что тяжелые частицы имеют тенденцию быть нестабильными; обычно тяжелые частицы быстро разваливаются на поток частиц малой массы, в конце концов генерируя легчайшие и наиболее привычные семейства в Таблицах 12.1 и 12.2.

(Например, top-кварк распадается примерно за 10–24 секунды). Мы ожидаем, что этот урок сохранит справедливость и для "сверхтяжелых" мод колебаний струны, и это объяснит, почему, даже если они массово производились в горячей ранней вселенной, почти никто не уцелел до сегодняшнего дня. Даже если теория струн верна, нашим единственным шансом увидеть сверхтяжелый способ колебаний будет произвести его самим через высокоэнергетические столкновения в ускорителях частиц. Однако, так как сегодняшние ускорители могут достигнуть только энергий, эквивалентных грубо 1000 масс протона, они слишком маломощные, чтобы возбудить любой из самых спокойных способов колебаний теории струн. Таким образом, предсказание теории струн о башне частиц с массами, начинающимися от величины, в несколько миллионов миллиардов раз большей, чем достижимо для сегодняшней технологии, не находится в конфликте с наблюдениями.

Это объяснение также делает ясным, что контакт между теорией струн и физикой частиц будет касаться только самых низкоэнергетических – безмассовых – колебаний струны, поскольку другие находятся далеко за пределами того, что мы можем достигнуть с сегодняшней технологией. Но как быть с фактом, что большинство частиц в Таблицах 12.1 и 12.2 не являются безмассовыми? Это важная проблема, но менее неприятная, чем сначала она может выглядеть. Поскольку планковская масса гигантская, даже наиболее известные массивные частицы, top-кварки, весят всего только 10–17 от планковской массы. Так для электрона его вес составляет около 10–23 от планковской массы. Так что в первом приближении, – применимом с точностью лучше, чем одна часть на 1017, – все частицы в Таблицах 12.1 и 12.2 имеют массы равные нулю планковских масс (почти как самый богатый землянин, в первом приближении, равен нулю в единицах султана Брунея), точно как "предсказано" теорией струн. Нашей целью является улучшить это приближение и показать, что теория струн объясняет мелкие отклонения от нуля планковских масс, характеризующие частицы в Таблицах 12.1 и 12.2. Просто безмассовые способы колебаний не так сильно отклоняются от данных опыта, как вы могли сначала подумать.

Это ободряет, но детальное исследование обнаруживает дальнейшие проблемы. Используя уравнения теории суперструн, физики составили список каждого безмассового способа колебаний струны. Одна из записей является гравитоном со спином-2, и это большой успех, который дал ход целой теме; это обеспечивает, что гравитация является частью квантовой теории струн. Но расчеты также показывают, что имеется много больше безмассовых способов колебаний со спином-1, чем имеется частиц в Таблице 12.2, и имеется много больше безмассовых способов колебаний с полуцелым спином, чем имеется частиц в Таблице 12.1. Более того, список способов колебаний с полуцелым спином не показывает признаков повторяющегося группирования, подобного структуре поколений Таблицы 12.1. Значит, при менее поверхностной проверке кажется все более трудным увидеть, как колебания струн будут вставать в один ряд с известными семействами частиц.

Таким образом, к середине 1980х, в то время как существовали основания пребывать в возбуждении по поводу теории суперструн, также существовали и причины для скепсиса. Несомненно, теория суперструн представила солидный шаг к унификации. Обеспечив первый последовательный подход к соединению гравитации и квантовой механики, она сделала для физики то же, что сделал Роджер Баннистер в 1954 для бега на милю, "выбежав" из четырех минут: он показал, что кажущееся невозможным возможно. Теория суперструн определенно установила, что мы можем прорваться через кажущийся непроходимым барьер, разделяющий два столпа физики двадцатого столетия.

Однако, в попытках идти дальше и показать, что теория суперструн может объяснить детальные свойства материи и сил природы, физики столкнулись с трудностями. Это привело скептиков к заявлению, что теория суперструн, несмотря на весь ее потенциал для унификации, была просто математической структурой без прямого отношения к физической вселенной.

Даже с только что обсужденными проблемами во главе списка недостатков теории суперструн, составленного скептиками, была особенность, которую мне пора ввести. Теория суперструн на самом деле обеспечивает успешное соединение гравитации и квантовой механики, единственное, которое свободно от математической непоследовательности, которая была бедствием всех предыдущих попыток. Однако, хотя это может звучать странно, в первые годы после ее открытия физики нашли, что уравнения теории суперструн не имеют этих завидных свойств, если вселенная имеет три пространственных измерения. Вместо этого, уравнения теории струн математически состоятельны, только если вселенная имеет девять пространственных измерений, или, включая временное измерение, они работают только во вселенной с десятью пространственно-временными измерениями!

В сравнении с этим странно звучащим утверждением сложности в установлении детального соответствия между способами колебаний струн и известными семействами частиц кажутся второстепенной проблемой. Теория суперструн требует существования шести измерений пространства, которых никто никогда не видел. Это не деликатный вопрос - *это* проблема.

Или они есть?

Теоретические открытия, сделанные в течение первых десятилетий двадцатого века, задолго до выхода теории струн на сцену, намекали, что дополнительные измерения совсем не обязаны быть проблемой. И с доработками конца двадцатого века физики показали, что эти дополнительные измерения способны перекинуть мост через пропасть между способами колебаний струнной теории и элементарными частицами, открытыми экспериментаторами.

Это одна из самых впечатляющих теоретических разработок; посмотрим, как она работает.

Объединение в высших измерениях

В 1919 Эйнштейн получил статью, которую легко можно было выбросить как бред больного. Она была написана малоизвестным немецким математиком по имени Теодор Калуца и в нескольких коротких страницах закладывала подход к объединению двух сил, известных в то время, гравитации и электромагнетизма. Чтобы достигнуть этой цели, Калуца предложил радикально отступить кое от чего настолько основополагающего, настолько полностью считающегося доказанным, что это казалось вне вопросов. Он предположил, что вселенная не имеет три пространственных измерения. Вместо этого, Калуца попросил Эйнштейна и остальное физическое сообщество принять во внимание возможность, что вселенная имеет четыре пространственных измерения, так что вместе со временем она имеет пять пространственно-временных измерений.

Первое, что это вообще означает? Ну, когда мы говорим, что имеется три пространственных измерения, мы имеем в виду, что имеется три независимых направления или оси, вдоль которых вы можете двигаться. Из вашего текущего положения вы можете описать их как влево/вправо, назад/вперед и вверх/вниз; во вселенной с тремя пространственными измерениями любое движение, которое вы предпринимаете, является некоторой комбинацией движений в этих трех направлениях. Эквивалентно, во вселенной с тремя пространственными измерениями вам нужно три блока информации, чтобы определить положение. В городе, например, вам нужна улица, где стоит здание, пересекающая ее улица и номер этажа, чтобы определить, где у вас вечеринка. А если вы хотите показать людям, до какого момента еда еще горячая, вам также надо определить четвертый блок данных: время. Это то, что мы имеем в виду, полагая пространство-время четырехмерным.

Калуца предположил, что в дополнение к осям влево/вправо, назад/вперед и вверх/вниз *вселенная на самом деле имеет еще одно пространственное измерение, которое по некоторым причинам никто никогда не видел*. Если точно, это означает, что имеется другое независимое направление, в котором вещи могут двигаться, а следовательно, что нам нужно задать четыре блока информации, чтобы определить точное положение в пространстве, и всего пять блоков информации, если мы также определяем время.

Ладно; это то, что предлагала полученная Эйнштейном в апреле 1919 статья.

Вопрос, почему Эйнштейн ее не выбросил? Мы не видим другое пространственное измерение – мы никогда не находили себя бесцельно плутающими, поскольку улица, пересекающая ее улица и номер этажа почему-то недостаточны, чтобы определить адрес, – так почему стоит рассматривать такую ненормальную идею? Ну, вот почему. Калуца обнаружил, что уравнения ОТО Эйнштейна могут быть легко и красиво математически расширены на вселенную, которая имеет на одно пространственное измерение больше. Калуца предпринял это расширение и нашел достаточно естественно, что версия ОТО с большим числом измерений не только включает оригинальные уравнения гравитации Эйнштейна, но вследствие лишнего пространственного измерения также и дополнительные уравнения. Когда Калуца изучил эти дополнительные уравнения, он открыл нечто экстраординарное: дополнительные уравнения были ничем иным, как уравнениями, которые Максвелл открыл в девятнадцатом веке для описания электромагнитного поля! Представив вселенную с одним новым пространственным измерением, Калуца предложил решение того, что Эйнштейн рассматривал как одну из самых важных проблем всей физики. *Калуца нашел схему, которая объединила оригинальные уравнения ОТО Эйнштейна с оригинальными уравнениями электромагнетизма Максвелла*. Именно поэтому Эйнштейн не выбросил прочь статью Калуцы.

Интуитивно вы можете думать о предложении Калуцы следующим образом. В ОТО Эйнштейн пробудил пространство и время. Поскольку они гнутся и растягиваются, Эйнштейн осознал, что он нашел геометрическое воплощение гравитационной силы. Статья Калуцы наводила на мысль, что геометрическое богатство пространства и времени еще больше. В то время, как Эйнштейн обнаружил, что гравитационные поля могут быть описаны как деформации и рябь в обычных трех пространственных и одном временном измерении, Калуца обнаружил, что во вселенной с дополнительным пространственным измерением будут дополнительные деформации и рябь. И эти деформации и рябь, как показал его анализ, будут в точности годиться для описания электромагнитных полей. В руках Калуцы собственный геометрический подход Эйнштейна ко вселенной продемонстрировал достаточную силу, чтобы объединить гравитацию и электромагнетизм.

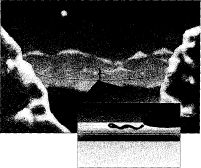
Конечно, там все еще была проблема. Хотя математически все разработано, не было – и все еще нет – подтверждения пространственного измерения вне трех, о которых мы все знаем. Так что же, открытие Калуцы было всего лишь курьезом или оно как-то значимо для нашей вселенной? Калуца сильно верил в теорию – он, например, учился плавать путем изучения учебника по плаванию, а затем лишь путем ныряния в море, – но идея о невидимом пространственном измерении, неважно, насколько неотразима теория, все же звучит скандально. Затем в 1926 шведский физик Оскар Кляйн ввел в идею Калуцы новый поворот, который намекает, где дополнительные измерения могут быть скрыты.

Скрытые измерения

Чтобы понять идею Кляйна, представим муравья Филиппа Пети, гуляющего по длинному покрытому резиной туго натянутому канату, растянутому между горами Эверест и Лхоцзе. Разглядываемый с расстояния многих миль, как на Рис. 12.5, канат выглядит как одномерный объект вроде линии – объект, который имеет протяженность только вдоль своей длины. Если мы различили, что маленький червяк ползет вдоль каната навстречу Филиппу, мы дико кричим ему, поскольку он должен будет остановиться впереди за шаг от Филиппа, чтобы избежать беды. Конечно, после мгновенного размышления мы все осознаем, что имеется больше поверхности каната, чем измерение влево/вправо, которое мы можем непосредственно воспринимать. Хотя ее трудно различить невооруженным глазом с большого расстояния, поверхность каната имеет второе измерение: измерение по и против часовой стрелки, измерение, которое "завернуто" вокруг каната. С помощью скромного телескопа это циклическое измерение становится видимым, и мы видим, что червяк может двигаться не только по длинному, развернутому измерению влево/вправо, но также и по короткому, "скрученному" направлению по/против часовой стрелки. Так что в каждой точке каната червяк имеет два независимых направления, по которым он может двигаться (это то, что мы имеем в виду, когда мы говорим, что поверхность каната двумерна\*), так что он может безопасно отстраниться от пути Филиппа, или отползая от него вперед, как мы первоначально представляли, или отползая вокруг маленького циклического измерения и пропуская Филиппа мимо.

*(\*) "Если вы посчитаете все направления влево, вправо, по часовой стрелке и против часовой стрелки отдельно, вы придете к заключению, что червяк может двигаться в четырех измерениях. Но когда мы говорим о "независимых" измерениях, мы всегда группируем те из них, которые лежат вдоль одинаковых геометрических осей – вроде влево и вправо, а также по часовой стрелке и против часовой стрелки".*

Канат иллюстрирует, что измерения – независимые направления, в которых что-либо может двигаться, – выступают в двух качественно различающихся вариантах. Они могут быть большими и легко видимыми, как размерность поверхности каната влево/вправо, или они могут быть маленькими и более трудно различимыми, как размерность по/против часовой стрелки, которая закручена вокруг поверхности каната. В этом примере не является большой проблемой увидеть малый циклический пояс на поверхности каната. Все, что нам нужно было, это подходящий увеличительный инструмент. Но, как вы можете представить, чем меньше скрученное измерение, тем более трудно его будет обнаружить. На расстоянии нескольких миль сложность для обнаружения циклического измерения поверхности каната одна; она будет в некоторой степени другая для обнаружения циклического измерения чего-либо столь же тонкого, как зубная нить или узкое нервное волокно.



***Рис 12.5****На удалении туго натянутый канат или провод выглядит одномерным, хотя в достаточно сильный телескоп его второе, скрученное измерение становится видимым.*

Вклад Кляйна заключался в указании, что то, что справедливо для объекта внутри вселенной, может быть справедливо и для ткани самой вселенной. А именно, точно так, как поверхность каната имеет как большое, так и маленькое измерение, так же может быть и у ткани пространства. Может быть, что три известных всем нам измерения – влево/вправо, назад/вперед, вверх/вниз – подобны горизонтальному протяжению каната, большим измерениям, легко видимой их разновидности. Но точно так же, как поверхность каната имеет дополнительное, маленькое, скрученное, циклическое измерение, может быть, что ткань пространства также имеет маленькое, скрученное, циклическое измерение, настолько малое, что никто не имеет достаточно мощного увеличительного оборудования, чтобы обнаружить его существование. Вследствие его ничтожного размера, утверждал Кляйн, это измерение будет скрытым.

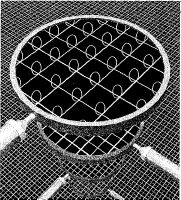
Насколько мало малое? Ну, включив определенные свойства квантовой механики в оригинальное предположение Калуцы, математический анализ Кляйна открыл, что радиус дополнительного циклического пространственного измерения, вероятно, будет порядка планковской длины[[16]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_16" \o ), что определенно слишком мало для экспериментальной доступности (самое совершенное современное оборудование не может разрешить что-либо меньшее, чем тысячная часть размера атомных ядер, не достигая планковской длины более чем на фактор в миллион миллиардов). Однако, для воображаемого червяка планковского размера это мельчайшее скрученное циклическое измерение обеспечит новое направление, в котором он может странствовать точно так же свободно, как обычный червяк преодолевает циклическое измерение каната на Рис. 12.5. Конечно, точно так же, как обычный червяк находит, что там не так много места для исследований в направлении по часовой стрелке, прежде чем он окажется в своей стартовой точке, червяк планковской длины, ползущий вдоль скрученного измерения пространства, также будет постоянно возвращаться назад в свою стартовую точку. Но, оставив в стороне длину предпринятого им путешествия, скрученное измерение будет обеспечивать направление, в котором маленький червяк может двигаться так же легко, как он это делает в трех привычных развернутых измерениях.

Чтобы почувствовать интуитивный смысл того, на что это похоже, отметим, что то, на что мы ссылались как на скрученное измерение каната, – направление по/против часовой стрелки, – существует в каждой точке вдоль его протяженного измерения. Земной червяк может ползти вдоль циклического обода каната в любой точке вдоль его протяженной длины, так что поверхность каната может быть описана как имеющая одно длинное измерение с маленьким, циклическим измерением, прикрепленным к каждой точке, как на Рис. 12.6. Этот образ полезно иметь в уме, поскольку он также применим к предложению Кляйна для скрытого дополнительного пространственного измерения Калуцы.

Чтобы увидеть это, изучим еще раз ткань пространства путем последовательного показа его структуры на все меньших масштабах длины, как на Рис. 12.7. При первых нескольких уровнях увеличения ничего нового не обнаруживается: ткань пространства все еще выглядит трехмерной (что, как обычно, мы схематически представляем на печатной странице в виде двумерной сетки). Однако, когда мы опустимся до планковского масштаба, высшего уровня увеличения на рисунке, Кляйн внушает, что становится видимым новое скрученное измерение.



***Рис 12.6****Поверхность натянутого каната имеет одно длинное измерение с циклическим измерением, присоединенным в каждой точке.*



***Рис 12.7****Предложение Калуцы-Кляйна заключается в том, что на очень малых масштабах пространство имеет дополнительное циклическое измерение, присоединенное к каждой привычной точке. Точно так же, как циклическое измерение каната существует в каждой точке вдоль его большого, протяженного измерения, циклическое измерение в этом предложении существует в каждой точке в привычных трех протяженных измерениях повседневной жизни.*

На Рис. 12.7 мы проиллюстрировали это, дорисовав дополнительное циклическое измерение только в некоторых точках вдоль протяженных измерений (поскольку рисование кругов в каждой точке затемнит рисунок), и вы можете немедленно увидеть сходство с канатом на Рис. 12.6. В предложении Кляйна, следовательно, пространство должно представляться как имеющее три развернутых измерения (из которых мы показали на рисунке только два) с добавленным циклическим измерением, присоединенным к каждой точке. Отметим, что дополнительное измерение не есть выпуклость или петля внутри обычных трех пространственных измерений, как изобразительные ограничения рисунка могут заставить вас подумать. Вместо этого, дополнительное измерение есть новое измерение, полностью отличное от трех, нам известных, которое существует в каждой точке в нашем ординарном трехмерном пространстве, но столь мало, что ускользает от обнаружения даже самыми изощренными нашими инструментами.

С этой модификацией оригинальной идеи Калуцы Кляйн обеспечил ответ на то, как вселенная может иметь более, чем три пространственных измерения повседневного опыта, что дополнительное измерение остается скрытым; схема с тех пор стала известна как теория Калуцы-Кляйна. А поскольку дополнительное измерение пространства было все, что Калуце требовалось, чтобы соединить ОТО и электромагнетизм, теория Калуцы-Кляйна может показаться именно тем, что искал Эйнштейн. В самом деле, Эйнштейн и многие другие стали совершенно одержимы унификацией через новое, скрытое пространственное измерение и был предприняты решительные усилия, чтобы увидеть, будет ли этот подход работать в полных деталях. Но незадолго до этого теория Калуцы-Кляйна столкнулась со своими собственными проблемами. Вероятно, самая яркая из всех заключалась в том, что попытки включить электрон в картину с дополнительным измерением продемонстрировали свою неприменимость.[[17]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_17" \o ) Эйнштейн продолжил барахтаться в схеме Калуцы-Кляйна, по меньшей мере, до начала 1940х, но начальные перспективы подхода так и не материализовались, и интерес постепенно вымер.

Однако, через несколько десятилетий теория Калуцы-Кляйна совершила впечатляющее возвращение.

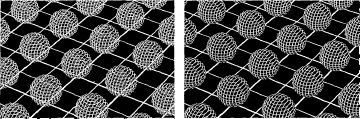
Теория струн и скрытые размерности

В добавление к трудностям, с которыми теория Калуцы-Кляйна столкнулась при попытке описать микромир, была и другая причина для ученых сомневаться в этом подходе. Многие находили как произвольным, так и экстравагантным постулировать скрытую пространственную размерность. Это не то, как если бы Калуца пришел к идее нового пространственного измерения на основании жесткой цепочки дедуктивных рассуждений. Вместо этого он высосал идею из пальца, а после анализа ее последствий открылись неожиданные связи между ОТО и электромагнетизмом. Таким образом, хотя это было само по себе великое открытие, оно страдало недостатком ощущения неизбежности. Если бы вы спросили Калуцу и Кляйна, почему вселенная имеет пять пространственно-временных измерений, а не четыре, или шесть, или семь, или 7 000, коли на то пошло, они не смогли бы дать ответ, более убедительный, чем "Почему нет?"

Более чем через три десятилетия ситуация изменилась радикально. Теория струн является первым подходом для соединения ОТО и квантовой механики; более того, она имеет потенциал к объединению нашего понимания всех сил и всей материи. Но квантовомеханические уравнения теории струн не работают в четырех пространственно-временных измерениях, ни в пяти, шести, семи или 7 000. Вместо этого по причинам, обсуждающимся ниже в секции "Физика струн и дополнительные измерения", уравнения теории струн работают только в десяти пространственно-временных измерениях – девяти пространственных плюс время. Теория струн требует больше измерений.

*Это фундаментально новый вид результата, с которым никогда раньше не сталкивались в истории физики*. До струн ни одна теория совсем ничего не говорила о числе пространственных измерений во вселенной. Каждая теория от Ньютона к Максвеллу и к Эйнштейну полагала, что вселенная имеет три пространственных измерения, почти как мы все полагаем, что Солнце взойдет завтра. Калуца и Кляйн предложили поставить это под вопрос, подбросив мысль, что имеется четыре пространственных измерения, но это означало только другое допущение – отличающееся допущение, однако все равно допущение. Теперь же впервые теория струн обеспечила уравнения, которые предсказали число пространственных измерений. Вычисление – не допущение, не гипотеза, не внушенная догадка – определило число пространственных измерений в соответствии с теорией струн, и удивительной вещью оказалось, что вычисленное число равно не трем, а девяти. Теория струн неотвратимо привела нас ко вселенной с шестью дополнительным пространственными измерениями и потому обеспечила убедительную, готовую среду для оплаты счетов по идеям Калуцы и Кляйна.

Оригинальное предложение Калуцы и Кляйна предполагает только одно скрытое измерение, но оно легко обобщается на два, три или даже шесть дополнительных измерений, требуемых теорией струн. Например, на Рис. 12.8а мы заменили дополнительное циклическое измерение одномерной формы из Рис. 12.7 на поверхность сферы, двумерную форму (повторим из обсуждения в Главе 8, что поверхность сферы является двумерной, поскольку вам нужны два блока информации – вроде широты и долготы на земной поверхности, – чтобы определить положение).



(а) (b)

***Рис 12.8****Смыкание вселенной с тремя обычными измерениями, представленными сеткой, и (а) двух скрученных измерений в форме пустых сфер, и (b) трех скрученных измерений в форме твердых шаров.*

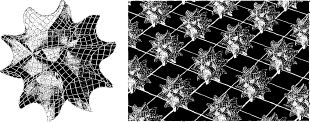
Как и с кругом, вы должны представлять сферу прикрепленной к каждой точке обычных измерений, даже если на Рис. 12.8а, чтобы оставить рисунок ясным, мы нарисовали только те сферы, которые лежат на пересечениях линий сетки. Во вселенной такого сорта вам всего понадобится пять блоков информации, чтобы определить положение в пространстве: три блока, чтобы определить ваше положение в больших измерениях (улица, пересекающая улица, номер этажа) и два блока, чтобы определить ваше положение на сфере (широта, долгота), прикрепленной к этой точке. Безусловно, если радиус сферы мал – в миллиарды раз меньше, чем атом, – последние два блока информации почти не будут иметь значения для относительно больших объектов вроде нас самих. Тем не менее, дополнительная размерность является интегральной частью ультрамикроскопического строения пространственной ткани. Ультрамикроскопическому червяку понадобятся все пять блоков информации и, если мы включим время, ему потребуется шесть блоков информации, чтобы указать, где будет вечеринка и в какое время.

Продвинемся еще на одно измерение дальше. На Рис. 12.8а мы рассмотреди только поверхность сфер. Представьте теперь, что, как на Рис.12.8b, ткань пространства включает также и внутренность сфер, – наш маленький планковского размера червяк может закопаться в сферу, как обычный червяк делает с яблоком, и свободно двигаться через ее внутренности. Чтобы определить положение червяка, теперь требуется шесть блоков информации: три, чтобы определить его положение в обычных протяженных пространственных измерениях, и еще три, чтобы определить его положение в шаре, прикрепленном к данной точке (широта, долгота, глубина проникновения). Вместе со временем, следовательно, это есть пример вселенной с семью пространственно-временными измерениями.

Теперь перепрыгнем дальше. Хотя это невозможно нарисовать, представьте, что в каждой точке в трех протяженных измерениях повседневной жизни вселенная имеет не одно дополнительное измерение как на Рис. 12.7, не два дополнительных измерения, как на Рис.12.8а, не три дополнительных измерения, как на Рис.12.8b, но шесть дополнительных пространственных измерений. Я, конечно, не могу визуализировать это, и я никогда не встречал никого, кто бы смог. Но его смысл ясен. Чтобы определить пространственное положение червяка планковского размера в такой вселенной, требуется девять блоков информации: три, чтобы определить его положение в обычных протяженных измерениях, и еще шесть, чтобы определить его положение в скрученных измерениях, прикрепленных к этой точке. Когда время также принимается во внимание, это оказывается вселенной с десятимерным пространством-временем, как требуется уравнениями теории струн. Если дополнительные шесть измерений скручены в достаточно малые образования, они легко ускользнут от обнаружения.

Форма скрытых размерностей

Уравнения теории струн на самом деле определяют больше, чем просто число пространственных размерностей. Они также определяют виды форм, которые дополнительные размерности могут принимать.[[18]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_18" \o ) На предыдущих рисунках мы сосредоточились на простейших формах – круги, полые сферы, твердые шары, – но уравнения теории струн выбирают существенно более широкий класс шестимерных форм, известных как формы или многообразия или пространства Калаби-Яу. Эти пространства названы в честь двух математиков, Эугенио Калаби и Шинь-Тунь Яу, которые математически открыли их задолго до того, как стала очевидной их применимость к теории струн; грубая иллюстрация одного примера дана на Рис. 12.9а. Надо иметь в виду, что на этом рисунке двумерное изображение иллюстрирует шестимерный объект, и это приводит к большому числу существенных искажений. Даже при этих условиях рисунок дает грубое представление о том, на что похожи указанные формы. Если особая форма Калаби-Яу из Рис. 12.9а составляет дополнительные шесть измерений теории струн, пространство на ультрамикроскомическом масштабе будет иметь вид, иллюстрируемый на Рис.12.9b. Поскольку форма Калаби-Яу будет прилагаться к каждой точке в обычных трех измерениях, вы, и я и кто угодно другой прямо сейчас будет окружен и наполнен этими маленькими формами. Без преувеличения, если вы переходите из одного места в другое, ваше тело будет двигаться через все девять измерений, быстро и одно за другим проходя через целые формы, в среднем делая кажущимся, как будто вы не двигаетесь через дополнительные шесть измерений совсем.



(а) (b)

***Рис 12.9****(а), Один из примеров форм или пространств Калаби-Яу, (b) Сильно увеличенный участок пространства с дополнительными измерениями в форме мельчайших пространств Калаби-Яу.*

Если эти идеи верны, ультрамикроскопическая ткань космоса украшена богатейшей текстурой.

Физика струн и дополнительные измерения

Красота ОТО в том, что физика гравитации контролируется геометрией пространства. С дополнительными пространственными измерениями, предлагаемыми теорией струн, вы, очевидно, догадались, что мощь геометрии для определения физики должна значительно возрасти. И это происходит. Увидим это сначала, рассмотрев вопрос, который я до сих пор обходил стороной. Почему теория струн требует десяти пространственно-временных измерений? Это вопрос, на который трудно ответить нематематически, но я все-таки могу объяснить достаточно, чтобы проиллюстрировать, как он сводится к взаимодействию геометрии и физики.

Представьте струну, которая может колебаться только на двумерной поверхности плоского стола. Струна будет в состоянии осуществлять разнообразные способы колебаний, но только такие, которые включают движения в направлениях вправо/влево и вперед/назад на поверхности стола. Если теперь струне позволить колебаться в третьем направлении, двигаясь в направлении вверх/вниз, покидая поверхность стола, становятся достижимыми дополнительные способы колебаний. Теперь, хотя это тяжело нарисовать более чем в трех измерениях, это заключение – большее количество измерений означает большее количество способов (мод) колебаний – является общим. Если струна может колебаться в четвертом пространственном измерении, она может выполнить больше видов колебаний, чем она могла только в трех измерениях; если струна может колебаться в пятом пространственном измерении, она может проявить больше способов колебаний, чем это было только в четырех измерениях; и так далее. Это важный вывод, поскольку в теории струн имеется уравнение, которое требует, чтобы число независимых способов колебаний удовлетворяло очень точному ограничению. Если ограничение нарушается, математика теории струн разваливается и ее уравнения становятся бессмысленными. Во вселенной с тремя пространственными измерениями число способов колебаний слишком мало и ограничение не выполняется; с четырьмя пространственными измерениями число способов колебаний все еще слишком мало; для пяти, шести, семи или восьми измерение оно все еще слишком мало; но для девяти пространственных измерений ограничение на число способов колебаний выполняется в точности. Именно так теория струн определяет число пространственных измерений.\* [[19]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_19" \o )

*(\*)"Позвольте мне подготовить вас к одному существенному результату, с которым мы столкнемся в следующей главе. Струнные теоретики десятки лет знали, что уравнения, которые они обычно используют для математического анализа теории струн являются приблизительными (точные уравнения оказывается на практике тяжело идентифицировать и понять). Однако, большинство думает, что приблизительные уравнения были достаточно точны для определения требуемого числа дополнительных измерений. Совсем недавно (и к шоку большинства физиков, работающих в этой области) некоторые струнные теоретики показали, что приближенные уравнения теряют одно измерение; сейчас признано, что теория требует семь дополнительных измерений. Как мы увидим, это не компроментирует материал, обсужденный в этой главе, но показывает, что он годится для более широкой, фактически более унифицированной схемы.**[[20]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_12_20" \o )"*

Хотя это хорошо иллюстрирует взаимодействие геометрии и физики, их объединение в рамках теории струн идет еще дальше и, фактически, обеспечивает способ обращения с критической проблемой, с которой мы сталкивались ранее. Повторим, что в попытках установить детальную связь между модами колебаний струны и известными семействами частиц физики потерпели крах. Они нашли, что имеется слишком много безмассовых способов колебаний струны и, более того, детальные свойства способов колебаний не соотносятся со свойствами известных частиц материи и сил. Но, о чем я не упоминал ранее, поскольку мы еще не обсуждали идею дополнительных измерений, хотя такие вычисления принимали в расчет число дополнительных измерений (отчасти объясняя, почему было найдено так много способов колебаний струн), они не принимали в расчет малого размера и сложной формы дополнительных измерений, – они предполагали, что все пространственные измерения плоские и полностью развернутые, – а это приводит к существенным отличиям.

Струны столь малы, что даже когда дополнительные шесть измерений свернуты в пространство Калаби-Яу, струны все еще колеблются в этих направлениях. По двум причинам это экстремально важно. Первое, это обеспечивает, что струны всегда колеблются во всех девяти пространственных измерениях, и потому ограничение на число способов колебаний продолжает выполняться, даже когда дополнительные измерения тесно скручены. Второе, точно так же, как способы колебаний потока воздуха, продуваемого через трубу, подвергаются воздействию искривлений и поворотов музыкального инструмента, способы колебаний струн подвергаются воздействию искривлений и поворотов в геометрии дополнительных шести измерений. Если вы изменили форму трубы, сделав путь прохождения воздуха более узким или сделав раструб длиннее, способы колебаний воздуха, а следовательно, звук инструмента изменится. Аналогично, если форма и размер дополнительных измерений модифицировались, это также существенно повлияет на точные свойства каждого возможного способа колебаний струны. А поскольку способ колебаний струн определяет ее массу и заряд, это значит, что дополнительные измерения играют стержневую роль в определении свойств частиц.

Это ключевое заключение. *Точный размер и форма дополнительных измерений оказывают чрезвычайное воздействие на способы (моды) колебаний струн, а значит на свойства частиц*. Поскольку базовая структура вселенной – от формирования галактик и звезд до существования жизни, как мы ее знаем, – чувствительно зависит от свойств частиц, код космоса может быть хорошо записан в геометрии пространства Калаби-Яу.

Мы видели один пример пространства Калаби-Яу на Рис. 12.9, но имеются, по меньшей мере, сотни тысяч других возможностей. Тогда вопрос заключается в том, какую форму Калаби-Яу, если это имеет место, образует часть пространственно-временной ткани, связанная с дополнительными измерениями. Это один из наиболее важных вопросов, стоящих перед теорией струн, поскольку только с определенным выбором формы Калаби-Яу детально определяются свойства колебательных мод струны. На сегодняшний день вопрос остается без ответа. Причина в том, что текущее понимание уравнений теории струн не обеспечивает проникновение в задачу, как выбрать одну форму из многих; с точки зрения известных уравнений каждое пространство Калаби-Яу так же пригодно, как и любое другое. Уравнения даже не определяют размера дополнительных измерений. Поскольку мы не видим дополнительных измерений, они должны быть малы, но вопрос о том, насколько точно малы, остается открытым.

Это фатальный порок теории? Возможно. Но я так не думаю. Как мы будем обсуждать более полно в следующей главе, точные уравнения теории струн ускользали от теоретиков в течение многих лет, так что многие труды использовали приблизительные уравнения. Это позволило взглянуть на огромное число свойств теории струн, но в определенных вопросах, – включая точный размер и форму дополнительных измерений, – приблизительные уравнения терпят нудачу. Поскольку мы продолжаем обострять наш математический анализ и усовершенствовать эти приблизительные уравнения, определение формы дополнительных измерений является первой – и, на мой взгляд, достижимой – целью. До сих пор эта цель остается за пределами достигнутого.

Тем не менее, мы все еще можем спросить, будет ли какой-нибудь выбор формы Калаби-Яу давать моды колебаний струны, которые полностью аппроксимируют известные частицы. И здесь ответ вполне радующий.

Хотя мы далеки от полного исследования каждой возможности, были найдены примеры форм Калаби-Яу, которые приводят к способам колебаний струн в грубом согласии с Таблицами 12.1 и 12.2. Например, в середине 1980х Филип Канделас, Гарри Горовиц, Эндрю Строминджер и Эдвард Виттен (ко физиков, которые осознали применимость пространств Калаби-Яу к теории струн) открыли, что каждая дырка, – термин, используемый в точно определенном математическом смысле, – содержащаяся в пространстве Калаби-Яу, приводит к семейству низкоэнергетических колебательных мод струны. Пространство Калаби-Яу с тремя дырками, следовательно, будет обеспечивать объяснение для повторяющейся структуры семейств элементарных частиц в Таблице 12.1. На самом деле, число таких "трехдырочных" пространств Калаби-Яу было найдено. Более того, среди этих приоритетных пространств Калаби-Яу есть такие, которые также дают точно правильное число частиц-переносчиков, а так же точно правильные электрические заряды и свойства ядерных сил большинства частиц в Таблицах 12.1 и 12.2.

Это чрезвычайно воодушевляющий результат; он никоим образом не подразумевался. В соединении ОТО и квантовой механики могущество теории струн достигло одной цели только чтобы найти, что к ней никак невозможно подойти отдельно от не менее важной цели объяснения свойств известных частиц материи и сил. Исследователи не сдаются, добиваясь блестящих результатов в теории, возможности которой казались неутешительными. Идти дальше и рассчитать точные массы частиц является значительно более манящим. Как мы обсуждали, частицы в Таблицах 12.1 и 12.2 имеют массы, которые отличаются от колебаний струны низшей энергии – нуля планковских масс – менее чем на одну часть на миллион миллиардов. Расчеты таких бесконечно малых отклонений требуют уровня точности, лежащего за пределами того, что мы можем предъявить с нашим сегодняшним пониманием уравнений теории струн.

В действительности, я подозреваю, как делают многие другие струнные теоретики, что малые массы в Таблицах 12.1 и 12.2 возникают в теории струн почти так же, как и в стандартной модели. Повторим из Главы 9, что в стандартной модели Хиггсово поле имеет ненулевую величину во всем пространстве и масса частицы зависит от того, насколько большую тормозящую силу она испытывает, когда она пробирается сквозь океан Хиггса. Аналогичный сценарий, вероятно, разворачивается и в струнной теории. Если гигантское собрание струн колеблется точно правильно скоординированным способом во всем пространстве, они могут обеспечивать однородный фон , который во всех смыслах и итогах будет неотличим от Хиггсова океана. Колебания струн, которые сначала давали нулевую массу, будут тогда обзаводиться малой ненулевой массой через тормозящую силу, которую они испытывают, когда они двигаются и колеблются сквозь струнную версию Хиггсова океана. Отметим, однако, что в стандартной модели тормозящая сила, испытываемая данной частицей, – а потому снабжающая ее массой, – определяется экспериментальными измерениями и является внешним параметром теории. В версии теории струн тормозящая сила – а потому массы способов колебаний – будет происходить из взаимодействий между струнами (поскольку Хиггсов океан будет сделан струнами) и должна быть вычислима. Теория струн, по крайней мере, в принципе, позволяет определить все свойства частиц из самой теории.

Никто этого не завершил, но, как подчеркивалось, теория струн все еще требует очень много работы. Со временем исследователи надеются полностью реализовать громадный потенциал этого подхода к объединению. Мотивация велика, поскольку велика потенциальная награда. При тяжелой работе и существенной удаче теория струн может однажды объяснить фундаментальные свойства частиц и затем объяснить, почему вселенная такова, какова она есть.

Ткань космоса в соответствии с теорией струн

Даже если многое в теории струн все еще лежит вне границ нашего понимания, она уже проявила впечатляющие новые перспективы. Самое поразительное, в преодолении разлома между ОТО и квантовой механикой теория струн обнаружила, что ткань космоса может иметь намного больше измерений, чем мы непосредственно ощущаем, – измерений, которые могут быть ключом к разрешению некоторых самых глубоких тайн вселенной. Более того, теория подразумевает, что привычные понятия пространства и времени, как мы их до сих пор понимали, могут быть не более чем приближениями к более фундаментальным концепциям, которые все еще дожидаются нашего открытия.

В начальные моменты вселенной эти свойства пространственно-временной ткани, которые сегодня доступны только математически, должны были проявляться. Очень рано, когда три привычных пространственных измерения также были малы, вероятно, различие между тем, что мы теперь называем большими измерениями и скрученными измерениями теории струн, было мало или совсем отсутствовало. Их текущее различие в размерах будет следствием космологической эволюции, которая способом, который мы еще не понимаем, могла бы выделить три пространственных измерения как специальные и представить только их для 14 миллиардов лет расширения, обсуждавшегося в предыдущих главах. Заглянув назад во времени еще дальше, увидим, что вся наблюдаемая вселенная будет сокращена к субпланковской области, так что то, что мы характеризовали как размытое пятно (на Рис. 10.6), теперь мы можем идентифицировать как область, где привычное пространство и время еще появляются из более фундаментальных сущностей, – какие бы они ни были, – что текущие исследования и стараются постичь.

Дальнейший прогресс в понимании изначальной вселенной, а потому в определении истоков пространства, времени и стрелы времени, требует существенного усовершенствования теоретического инструментария, который мы используем для понимания теории струн, – цель, которая не слишком давно казалась еще очень удаленной. Как мы теперь увидим, с разработкой М-теории прогресс превзошел многие даже самые оптимистические предсказания.

**13 Вселенная на бране**

***РАЗМЫШЛЕНИЯ О ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ В М-ТЕОРИИ***

**Т**еория струн имеет одну из самых извилистых историй среди всех научных прорывов. Даже сегодня, более чем через три десятилетия после ее первоначального озвучивания большинство струнных профессионалов верит, что мы все еще не имеем полного ответа на элементарный вопрос: Что есть теория струн? Мы знаем много о струнной теории. Мы знаем ее основные особенности, мы знаем ее ключевые достижения, мы знаем перспективы, которые она содержит, и мы знаем сложности, стоящие перед ней; мы также можем использовать уравнения теории струн, чтобы проделать детальные вычисления того, как струны должны вести себя и взаимодействовать в широком диапазоне условий. Но большинство исследователей чувствует, что наша сегодняшняя формулировка теории струн все еще нуждается в некой разновидности центральных принципов, которые мы нашли в основании других главных достижений. СТО имеет постоянство скорости света. ОТО имеет принцип эквивалентности. Квантовая механика имеет принцип неопределенности. Струнные теоретики продолжают нащупывать аналогичный принцип, который мог бы ухватить суть теории в целом.

По большей части этот дефицит существует, поскольку теория струн разрабатывается по кускам вместо того, чтобы появляться из основного всеобъемлющего видения. Цель теории струн – унификация всех сил и всей материи в квантовомеханических рамках – величественнее не бывает, но эволюция теории была, очевидно, фрагментирована. После ее открытия, связанного со счастливым случаем более чем три десятилетия назад, теория струн была на скорую руку собрана воедино, когда одна группа теоретиков открывала ключевые свойства из изучения уравнений теории, в то время как другая группа обнаруживала критические следствия из исследования этих уравнений.

Струнные теоретики могли быть уподоблены примитивным дикарям, раскапывающим скрытый под почвой космический корабль, о который они споткнулись. Через починку на скорую руку и верчение деталей в руках дикарь может отчасти установить аспекты действия космического корабля, и это будет вызывать чувство, что все клавиши и переключатели работают вместе скоординированным и унифицированным образом. Аналогичные чувства преобладают среди струнных теоретиков. Результаты, найденные на протяжении многих лет исследований, подгонялись и сходились. Это насаждало среди исследователей растущую уверенность, что струнная теория замыкается в одну мощную, согласованную схему, – которую еще предстоит раскопать полностью, но которая, в конечном счете, проявит внутренню работу природы с непревзойденной ясностью и полнотой.

С недавних пор ничто не проиллюстрирует это лучше, чем открытие, вызвавшее вторую суперструнную революцию – революцию, которая, помимо других вещей, выявляет другое скрытое измерение, вплетенное в пространственную ткань, открывает новые возможности для экспериментальных проверок теории струн, утверждает, что наша вселенная может быть отделена от других, обнаруживает, что черные дыры могут быть созданы следующим поколением высокоэнергетических ускорителей, и приводит к новой космологической теории, в которой время и его стрела могут крутиться снова и снова подобно элегантной дуге колец Сатурна.

Вторая суперструнная революция

Имеется неудобная деталь относительно теории струн, которую мне пора раскрыть, но которую читатели моей предыдущей книги, *Элегантной вселенной*, могут вспомнить. В течение последних трех десятилетий были разработаны не одна, а целых пять отдельных версий теории струн. Поскольку их названия несущественны, назовем их теориями типа I, типа IIА, типа IIВ, О-гетеротической и Е-гетеротической. Все они разделяют существенные особенности, введенные в последней главе, – все основные составляющие переплетены с энергией колебаний струн – и, как показали расчеты в 1970е и 1980е годы, каждая теория требует шести дополнительных измерений; но, когда они анализируются детально, появляются существенные отличия. Например, теория типа I включает колеблющиеся струнные петли, обсуждавшиеся в последней главе, так называемые замкнутые струны, но, в отличие от других теорий струн, она также содержит открытые струны, колеблющиеся обрывки струн, которые имеют два свободных конца. Более того, расчеты показывают, что список мод колебаний струн и способ, которым каждая колебательная мода взаимодействует и влияет на другие, отличаются от одной формулировки к другой.

Самые оптимистичные из струнных теоретиков воображали, что эти отличия должны будут служить для удаления четырех из пяти версий, когда однажды детальное сравнение с экспериментальными данными будет проведено. Но, откровенно говоря, простое существование пяти теорий струн было источником внутреннего дискомфорта. Мечта об унификации является одной из тех, которые приводят ученых к единой теории вселенной. Если исследование установит, что только одна теоретическая система может охватить как квантовую механику, так и ОТО, теоретики достигнут унификационной нирваны. Они будут иметь полную уверенность в применимости данной системы даже в отсутствие прямого экспериментального подтверждения. Как-никак изобилие экспериментальной поддержки как квантовой механики, так и ОТО уже существует, и кажется ясным как день, что законы, управляющие вселенной, должны быть взаимно совместимыми. Если отдельная теория является уникальной, математически непротиворечивой аркой, стягивающей два экспериментально подтвержденных столпа физики двадцатого столетия, это будет обеспечивать убедительное, хотя и не прямое подтверждение неизбежности этой теории.

Но тот факт, что имеются пять версий теории струн, внешне сходных, хотя отличающихся в деталях, должно, по-видимому, означать, что теория струн провалила тест на уникальность. Даже если оптимисты однажды оправдаются и только одна из пяти струнных теорий будет подтверждена экспериментально, мы все еще будем раздосадованы ноющим вопросом, почему имеются другие четыре непротиворечивые формулировки. Должны ли четыре другие теории быть просто математическими курьезами? Будут ли они иметь какое-либо значение для физического мира? Может быть, их существование является вершиной теоретического айсберга, на котором хитрые ученые смогут впоследствии показать, что на самом деле имеется пять других версий, или шесть, или семь, или вообще бесконечное количество отдельных математических вариаций на тему струн?

В течение поздних 1980х и начала 1990х для многих физиков, горячо добивавшихся понимания той или иной теории струн, загадка пяти версий не была повседневной проблемой. Напротив, это был один из тех спокойных вопросов, к которому каждый предполагал обратиться в удаленном будущем, когда понимание каждой индивидуальной теории струн станет существенно более утонченным.

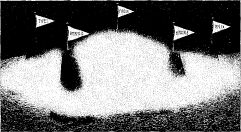
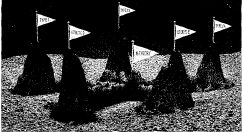
Но весной 1995 почти без предупреждения эти скромные надежды были значительно превышены. На основе работ многих струнных теоретиков (включая Криса Халла, Пола Таунсенда, Эшока Сена, Майкла Даффа, Джона Шварца и мноих других) Эдвард Виттен, – который в течение двух десятилетий был самым известным струнным теоретиком мира, – открыл скрытое единство, которое связывало все пять теорий струн вместе. Виттен показал, что вместо того, чтобы быть обособленными, пять теорий на самом деле являются просто пятью различными способами математического анализа одной теории. Почти как переводы книги на пять различных языков могут показаться для моноязычного читателя пятью отдельными текстами, пять струнных формулировок оказывались различными только потому, что Виттен еще не написал словаря для перевода между ними. Но, раз обнаружившись, словарь обеспечил убедительную демонстрацию, что – подобно одному главному тексту, из которого были сделаны пять переводов, – единая главная теория объединяет все пять струнных формулировок. Унифицирующая главная теория была пробно названа М-теория, М является дразнящим обозначением, значение которого – Главная (Master)? Величественная (Majestic)? Материнская? Магическая? Мистическая? Исходная (Matrix)? – ожидает результата энергичного общемирового исследовательского усилия, которое сейчас предпринимается, чтобы завершить новое видение, высвеченное мощным прозрением Виттена.

Это революционное открытие было радующим скачком вперед. Теория струн, как продемонстрировал Виттен в одной из самых удачных статей на эту тему (и в важной последующей работе с Петром Хоравой), является единой теорией. Струнным теоретикам больше не надо было при квалификации их кандидата на единую теорию Эйнштейна подыскивать слова, чтобы добавить с легким оттенком смущения, что предлагаемая унифицирующая схема не имеет единственности, поскольку она выступает в пяти различных версиях. Напротив, как оказалось, самые далеко идущие предложения для объединенной теории сами являются субъектом унификации более высокого уровня. Через работу Виттена единственность, воплощенная каждой индивидуальной теорией струн, была распространена на всю струнную схему.

Рис. 13.1 в общих чертах описывает статус пяти струнных теорий перед и после открытия Виттена и представляет хороший обобщенный образ, чтобы держать его в памяти. Он иллюстрирует, что М-теория сама по себе не является новым приближением, но что, разгоняя облака, она обещает более уточненную и полную формулировку физических законов, чем любая из индивидуальных теорий струн в состоянии обеспечить. М-теория связывает вместе и включает в себя в равной степени все пять теорий струн, показывая, что каждая из них является частью более великого теоретического обобщения.

Сила перевода

Хотя Рис. 13.1 схематически передает существенное содержание открытия Виттена, оно, выраженное таким образом, может поразить вас не более, чем бейсбольная расстановка. До прорыва Виттена исследователи думали, что имеются пять отдельных версий теории струн; после его прорыва они так не думают. Но если вы никогда не знали, что имелось пять предположительно различных теорий струн, почему вы должны интересоваться, что самый хитроумный из всех струнных теоретиков показал, что они в конце концов не различаются? Иными словами, почему открытие Виттена революционно в противоположность более скромному достижению, корректирующему предыдущие ошибочные концепции?

(а) (b)

***Рис 13.1****(а) Схематическое изображение пяти струнных теорий перед 1995 годом, (b) Схематическое изображение мета-унификации, показанной М-теорией.*

Вот почему. В течение последних нескольких десятилетий струнным теоретикам то и дело препятствовали математические проблемы. Поскольку точные уравнения, описывающие любую одну из пяти струнных теорий оказывались столь сложными для их выделения и анализа, теоретики больше основывались в своих исследованиях на приближенных уравнениях, с которыми намного легче работать. Хотя имеются хорошие основания быть уверенным, что приближенные уравнения должны во многих обстоятельствах давать ответы, близкие к ответам, которые были бы даны точными уравнениями, приближения – вроде переводов с языка на язык – всегда что-то упускают. По этой причине определенные ключевые проблемы оказались вне пределов математической досягаемости приближенных уравнений, существенно мешая прогрессу.

При неточностях, неотъемлемых от текстуальных переводов, читатели имеют пару немедленных средств исправления. Лучший способ, если лингвистические уровни читателей превышают требуемый, проконсультироваться с оригинальным манускриптом. В данный момент аналог этого способа неприменим для струнных теоретиков. Благодаря логичности словаря, разработанного Виттеном и другими, мы имеем сильное подтверждение, что все пять струнных теорий являются различными описаниями одной главной теории, М-теории, но исследователям еще предстоит разработать полное понимание этой теоретической связи. Мы узнали многое об М-теории в последние несколько лет, но нам все еще далеко идти, прежде чем кто-нибудь сможет обоснованно заявить, что имеется совершенное или полное понимание. В теории струн это подобно тому, как если бы мы имели пять переводов с главного текста, который-еще-предстоит-открыть.

Другое средство, способное помочь, хорошо известное читателям переводов, которые или не имеют оригинала (как в теории струн) или, в более общем случае, не понимают языка, на котором он написан, заключается в обращении к нескольким переводам главного текста на языки, с которыми они знакомы. Отрывки, для которых переводы согласуются, дают уверенность; отрывки, для которых они отличаются, свидетельствуют о возможных неточностях или высвечивают различные интерпретации. Именно этот подход Виттен сделал применимым своим открытием, что пять теорий струн являются различными переводами одной и той же лежащей в основании теории. Фактически, его открытие обеспечило экстремально мощную версию этой линии атаки, которая может быть лучше понята через хрупкую аналогию с переводами.

Представим себе главный манускрипт, начиненный таким гигантским диапазоном каламбуров, рифм и поразительных, чувствительных к культуре шуток, что полный текст не может быть изящно выражен ни на одном из пяти данных языков, на которые он переведен. Некоторые отрывки могут быть переведены на суахили с легкостью, тогда как другие части могут оказаться совершенно непостижимыми на этом языке. Большее проникновение в некоторые из этих последних частей может появиться из перевода на эскимосский язык; в некоторых других разделах этот перевод может быть полностью темным для понимания. Санскрит может ухватить сущность некоторых из этих мудреных отрывков, но для других, особенно трудных разделов все пять переводов могут оставить вас ошеломленными, и только главный текст будет вразумительным. Это более близко к ситуации с пятью теориями струн. Теоретики нашли, что для определенных вопросов одна из пяти теорий может дать прозрачное описание физических следствий, тогда как описания, данные остальными четырьмя, будут слишком сложны математически, чтобы быть пригодными. И в этом заключается сила открытия Виттена. Перед его прорывом исследователи струнной теории, которые сталкивались с неподатливо сложными уравнениями, вязли. Но труд Виттена показал, что каждое такое уравнение допускает еще четыре математических перевода – четыре математических формулировки – и иногда на один из переформулированных вопросов оказывается намного проще дать ответ. Итак, словарь переводов между пятью теориями может иногда обеспечить возможность перевода невозможно сложных уравнений в относительно простые.

Это не "защита от дурака". Точно так же, как все пять переводов определенного отрывка в главный текст могут быть одинаково неполными, иногда математические описания, даваемые всеми пятью теориями струн, являются одинаково непонятными. В таких случаях, точно так же, как нам бывает нужно проконсультироваться с самим оригинальным текстом, нам, чтобы продвинуться, может понадобиться полное осмысление неуловимой М-теории. Даже при этих условиях в большом количестве обстоятельств открытие Виттена обеспечивает мощный новый инструментарий для анализа теории струн.

Поэтому, точно так же, как каждый перевод сложного текста служит важной конечной цели, каждая струнная формулировка делает то же. Объединяя взгляды, возникающие с точки зрения каждой, мы оказываемся в состоянии ответить на вопросы и обнаружить свойства, которые находятся полностью за пределами достижимого для каждой отдельной струнной формулировки. Открытие Виттена, таким образом, дало теоретикам в пять раз большую огневую мощь для продвижения линии фронта теории струн. Поэтому, в значительной части, оно пробудило революцию.

Одиннадцать измерений

Итак, с нашей вновь обретенной силой для анализа теории струн, какие достижения появились? Их было много. Я сосредоточусь на тех, которые имеют самое большое влияние на историю пространства и времени.

В качестве первостепенной важности, работа Виттена обнаружила, что приблизительные уравнения теории струн, использовавшиеся в 1970е и 1980е годы для заключения, что вселенная должна иметь девять пространственных измерений, ошиблись в правильном их числе. Анализ показал, что точный ответ заключается в том, что в соответствии с М-теорией вселенная имеет десять пространственных измерений, что означает одиннадцать пространственно-временных измерений. Почти как Калуца нашел, что вселенная с пятью пространственно-временными измерениями обеспечивает схему для унификации электромагнетизма и гравитации, и почти как струнные теоретики нашли, что вселенная с десятью пространственно-временными измерениями обеспечивает схему для унификации квантовой механики и ОТО, Виттен нашел, что вселенная с одиннадцатью пространственно-временными измерениями обеспечивает схему для унификации всех струнных теорий. Подобно пяти деревням, которые выглядят при взгляде с уровня земли полностью разделенными, но, когда мы смотрим с вершины горы, – задействовав дополнительное вертикальное измерение, – они выглядят связанными сетью путей и дорог; дополнительное пространственное измерение, появляющееся из анализа Виттена, было решающим для нахождения им связей между всеми пятью теориями струн.

Хотя открытие Виттена, несомненно, является историческим примером достижения объединения через большее количество измерений, когда он анонсировал результат на ежегодной международной конференции по струнной теории в 1995, он потряс основы всего научного направления. Исследователи, включая меня, долго и тяжело думали о применимости приближенных уравнений, и каждый был уверен, что анализ сказал последнее слово относительно числа измерений. Но Виттен обнаружил нечто потрясающее.

Он показал, что все предыдущие попытки анализа делали математическое упрощение, эквивалентное предположению, что до того времени нераспознанное десятое пространственное измерение будет экстремально мало, намного меньше, чем все остальные. Настолько мало, что, фактически, приближенные уравнения теории струн, которые использовали все исследователи, теряют разрешающую силу для обнаружения даже математических намеков на существование этого измерения. Что и привело каждого к заключению, что теория струн имеет только девять пространственных измерений. Но с новым открытием унифицирующей схемы М-теории Виттен оказался в состоянии выйти за пределы приближенных уравнений, исследовать проблему более точно и продемонстрировать, что одно пространственное измерение всегда не замечалось. Таким образом, Виттен показал, что пять десятимерных схем, которые разрабатывались струнными теоретиками более чем десять лет, на самом деле были пятью приблизительными описаниями единственной лежащей в основе одиннадцатимерной теории.

Вы можете поинтересоваться, не сводит ли на нет это неожиданное осознание предыдущие работы в струнной теории. В общем и целом нет. Вновь найденное десятое пространственное измерение добавляет непредвиденные особенности в теорию, но если теория струн/М-теория верна и десятое пространственное измерение оказывается много меньшим, чем все остальные, – как в течение долгого времени неосознанно предполагалось, – предыдущие работы останутся правомерными. Однако, поскольку известные уравнения все еще не в состоянии точно выразить размеры или формы дополнительных измерений, струнные теоретики потратили много усилий, исследуя в течение последних нескольких лет новые возможности не-столь-уж-малого десятого пространственного измерения. Среди других вещей широкомасштабные результаты этих исследований ставят схематическую иллюстрацию унифицирующей силы М-теории, Рис. 13.1, на твердое математическое основание.

Я подозреваю, что дополнение с десяти до одиннадцати измерений – безотносительно к его огромной важности в математической структуре теории струн/М-теории – существенно не изменит картины теории, сложившейся перед вашим умственным взором. Для всех, включая знатоков, попытка представить семь скрученных измерений является упражнением, которое в значительной степени такое же, как попытаться представить шесть.

Второе и тесно связанное открытие из второй суперструнной революции изменяет базовую интуитивную картину струнной теории. Коллективное прозрение большого числа исследователей – Виттена, Даффа, Халла, Таунсенда и многих других – установило, что струнная теория является не только теорией струн.

Браны

Естественный вопрос, который мог появиться у вас в последней главе, таков: Почему струны? Почему одномерные составляющие столь особые? В примирении квантовой механики и ОТО мы нашли, что решающим является то, что струны не есть точки, что они имеют ненулевой размер. Но это требование может быть удовлетворено и двумерными составляющими в форме, подобной миниатюрным дискам или летающим тарелкам, или трехмерными каплеобразными составляющими в форме, подобной бейсбольному мячу или куску глины. Или, поскольку теория имеет такое изобилие пространственных измерений, мы можем даже представить капли с еще большим количеством размерностей. Почему эти составляющие не играют никакой роли в наших фундаментальных теориях?

В 1980х и ранних 1990х большинство струнных теоретиков имели то, что казалось убедительным ответом. Они утверждали, что имелись попытки сформулировать фундаментальную теорию материи, основанную на каплеобразных составляющих, причем среди других этим занимались такие иконы физики двадцатого столетия, как Вернер Гейзенберг и Поль Дирак. Но их труд, точно так же, как многие последующие исследования, показал, что экстремально трудно разработать теорию, основываясь на мельчайших каплях, которые удовлетворяют наиболее базовым физическим требованиям, – например, обеспечению того, что все квантовомеханические вероятности лежат между 0 и 1 (не могут иметь смысла отрицательные вероятности или вероятности больше единицы), и запрету обмена информацией быстрее света. Для точечных частиц полвека исследований, начатых в 1920е, показали, что эти условия могут быть удовлетворены (пока гравитация игнорировалась). А к 1980м более чем десятилетнее исследование Шварца, Шерка, Грина и других установило, к удивлению большинства исследователей, что условия могут также удовлетворяться для одномерных составляющих, струн (с необходимо включенной гравитацией). Но казалось невозможным перейти к фундаментальным составляющим с двумя или более пространственными измерениями. Причина, коротко говоря, в том, что число симметрий, соблюдаемых уравнениями, достигает сильного максимума для одномерных объектов (струн) и круто падает дальше. Симметрии здесь более абстрактны, чем те, что обсуждались в Главе 8 (они связаны с тем, как уравнения изменяются, если мы во время изучения движения струны или составляющей более высокой размерности будем увеличивать или уменьшать масштаб, неожиданно и произвольно меняя разрешение наших наблюдений). Эти трансформации оказываются критическими для формулирования физически осмысленного набора уравнений, и вне струн кажется, что требуемое богатство симметрий отсутствует.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_1" \o )

Таким образом, это был второй шок для большинства струнных теоретиков, когда статья Виттена и лавина последующих результатов[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_2" \o ) привели к осознанию, что теория струн и схема М-теории, частью которой она сегодня является, содержат иные ингредиенты, кроме струн. Анализ показал, что имеются двумерные объекты, названные достаточно естественно мембранами (другое возможное значение буквы "М" в М-теории) или – в соответствии с систематическим наименованием их более высокоразмерных родственниц – 2-бранами. Имеются объекты с тремя пространственными измерениями, названные 3-бранами. И, хотя все более трудно визуализировать это, анализ показывает, что имеются также объекты с р пространственными измерениями, где р может быть целым числом, меньшим 10, известные – без ограничения обозначений – как *р-браны*. Таким образом струны являются только одним из ингредиентов в струнной теории, а не единственной составляющей.

Эти другие ингредиенты избегали ранее теоретического исследования почти по тем же причинам, как и десятое пространственное измерение: приближенные струнные уравнения оказывались слишком грубыми, чтобы обнаружить их. В теоретическом контексте, который струнные теоретики исследовали математически, оказалось, что все р-браны существенно тяжелее, чем струны. А чем более массивным что-либо является, тем больше энергии требуется, чтобы произвести его. Но ограничения приближенных струнных уравнений – ограничения, встроенные в уравнения и хорошо известные всем струнным теоретикам, – таковы, что они становятся менее и менее точными, когда описываемые сущности и процессы включают в себя все больше и больше энергии. При экстремальных энергиях, существенных для р-бран, приближенные уравнения теряют точность, чтобы выявить браны, скрывающиеся в тени, и именно поэтому десятилетия все проходили мимо их существования в математических понятиях. Но с различными переформулировками и новыми подходами, обеспечиваемыми унифицированной схемой М-теории, исследователи смогли обойти стороной некоторые из предыдущих технических преград, и тогда в полном математическом рассмотрении они нашли целое богатство высокоразмерных составляющих.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_3" \o )

Открытие того, что в струнной теории имеются другие составляющие, помимо струн, не делает недействительным или ненужным более ранние труды, как и открытие десятого пространственного измерения. Исследование показало, что если высокоразмерные браны являются намного более массивными, чем струны, – как бессознательно предполагалось в предыдущих исследованиях, – они имеют минимальное влияние на широкий диапазон теоретических вычислений. Но точно так же, как десятое пространственное измерение может не быть много меньше всех остальных, высокоразмерные браны могут не быть намного более тяжелыми. Имеется большое число обстоятельств, еще гипотетических, в которых масса высокоразмерной браны может быть на одном уровне с самой низкой массой колебательной моды струны, и в этом случае брана будет оказывать существенное влияние на итоговую физику. Например, моя собственная работа с Эндрю Строминджером и Дэвидом Моррисоном показала, что брана может оборачиваться вокруг сферической части формы Калаби-Яу, весьма похоже на то, как пластик вакуумной упаковки оборачивается вокруг грейпфрута; если эта часть пространства должна сжиматься, обернутая брана также будет сжиматься, вызывая снижение ее массы. Это снижение массы, как мы смогли показать, позволяет части пространства полностью сколлапсировать и открыть дыру – само пространство может рваться на части – в то время как обернутая брана обеспечивает, что при этом не будет катастрофических физических последствий. Я обсуждал эту разработку детально в *Элегантной Вселенной* и коротко вернусь к ней, когда мы будем обсуждать путешествия во времени в Главе 15, так что я не хочу заниматься дальнейшими деталями здесь. Но этот фрагмент проясняет, как высокоразмерные браны могут оказывать существенное влияние на физику теории струн.

Для нашей текущей области сосредоточения, однако, имеется другой глубокий способ, которым браны влияют на вид вселенной в соответствии с теорией струн/М-теорией. Огромное протяжение космоса – полнота пространства-времени, о котором мы осведомлены, – само может быть ничем иным, как гигантской браной. Наш мир может быть *миром на бране*.

Миры на бране

Проверка теории струн является проблематичной, поскольку струны ультрамалы. Но вспомним физику, которая определяет размер струны. Частица-переносчик гравитации – гравитон – находится среди колебательных мод струны с низшей энергией, и величина гравитационной силы, ей соответствующая, пропорциональна длине струны. Поскольку гравитация настолько слабая сила, длина струны должна быть мельчайшей; расчеты показывают, что она должна быть в пределах ста длин Планка или около того, чтобы гравитонная мода колебаний струны соответствовала гравитационной силе наблюдаемой величины.

Давая это объяснение, мы видим, что струны с высокой энергией не ограничиваются требованием малости, поскольку больше нет прямой связи с гравитоном (гравитон является модой колебаний *низшей* энергии, нулевой массы). Фактически, чем больше и больше энергии закачивается в струну, на первых порах она будет колебаться более и более неистово. Но после определенной точки добавочная энергия будет иметь иной эффект: она будет заставлять длину струны увеличиваться, и нет предела, до какой длины она может вырасти. Закачав в струну достаточно энергии, вы могли бы даже вырастить ее до макроскопического размера. С сегодняшней технологией мы никак не можем приблизиться к достижению этого, но возможно, что в обжигающе горячем, экстремально энергичном состоянии после Большого взрыва длинные струны производились. Если некоторые умудрились уцелеть до наших дней, они могли бы очень хорошо растянуться и быть явно видимыми через небо. Хотя вероятность этого невелика, возможно даже, что такие длинные струны могли бы остаться мельчайшими, но оставить детектируемый отпечаток на данных, которые мы получаем из пространства, возможно позволив теории струн однажды подтвердиться путем астрономических наблюдений.

Высокоразмерные р-браны также не обязаны быть мельчайшими, а поскольку они имеют больше измерений, чем струны, открываются качественно новые возможности. Когда мы рисуем длинную – возможно, бесконечно длинную – струну, мы воображаем длинный одномерный объект, который существует внутри трех больших пространственных измерений нашей повседневной жизни. Силовая линия растягивается так далеко, как глаза могут увидеть, обеспечивая обоснованный образ. Аналогично, если мы рисуем большую – возможно, бесконечно большую – 2-брану, мы воображаем большую двумерную поверхность, которая существует внутри трех больших пространственных измерений повседневного опыта. Я не знаю реалистичной аналогии, но нелепо гигантский движущийся киноэкран, экстремально тонкий, но высокий и широкий настолько, насколько глаза могут увидеть, предлагает визуальный образ, чтобы понять это. Когда мы подходим к большой 3-бране, однако, мы обнаруживаем себя в качественно новой ситуации. 3-брана имеет три измерения, так что, если она велика – возможно, бесконечно велика, – она заполнит все три большие пространственные измерения. Тогда как 1-брана и 2-брана, подобные силовой линии и киноэкрану, являются объектами, которые существуют внутри трех больших пространственных измерений, большая 3-брана будет занимать все пространство, о котором мы осведомлены.

Это поднимает интригующую возможность. Может быть, мы прямо сейчас живем внутри 3-браны? Подобно Белоснежке, чей мир существует внутри двумерного киноэкрана – 2-браны, – который сам находится внутри высокоразмерной вселенной (три пространственных измерения кинотеатра), может быть все, что мы знаем, существует внутри трехмерного экрана – 3-браны, – который сам располагается внутри высокоразмерной вселенной теории струн/М-теории? Может ли быть, что то, что Ньютон, Лейбниц, Мах и Эйнштейн называли трехмерным пространством, на самом деле является особой трехмерной сущностью в теории струн/М-теории? Или, на более релятивистском языке, может ли быть, что четырехмерное пространство-время, разработанное Минковским и Эйнштейном, на самом деле является следом 3-браны, когда она эволюционирует через время? Короче говоря, может ли вселенная, которую мы знаем, быть браной?[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_4" \o )

Возможность, что мы живем внутри 3-браны – так называемый *сценарий мира на бране* – является самым последним поворотом в истории теории струн/М-теории. Как мы увидим, он обеспечивает качественно новый путь размышлений о теории струн/М-теории, с многочисленнымии далеко идущими разветвлениями. Существенной физикой является, что браны скорее подобны космическим застежками-липучками: в особых случаях, которые мы сейчас обсудим, они являются очень клейкими.

Клейкие браны и вибрирующие струны

Одной из мотиваций для введения термина "М-теория" является то, что мы теперь осознали, что "струнная теория" освещает только одну из многих составляющих теории. Теоретические исследования одномерных струн, обнаруженных за десятки лет до более точного анализа, открыли высокоразмерные браны, так что "теория струн" есть в некотором смысле исторический артефакт. Но даже если М-теория проявляет демократию, в которой представлены протяженные объекты различных размерностей, струны все еще играют центральную роль в нашей сегодняшней формулировке теории. С одной стороны, это совершенно ясно. Когда все высокоразмерные р-браны намного тяжелее струн, они могут быть игнорированы, как исследователи неосознанно делали с 1970х. Но имеется другая, более общая сторона, с которой струны являются первыми среди равных.

В 1995, вскоре после того, как Виттен анонсировал свой прорыв, Джо Полчински из Университета Калифорнии в Санта-Барбаре задумался. Годами раньше в статье, которую он написал с Робертом Лаем и Джин Дай, Полчински открыл интересную, хотя в некоторой степени неясную особенность теории струн. Мотивировка и обоснования Полчински были до некоторой степени техническими, и детали несущественны для нашего обсуждения, но его результат существенен. Он нашел, что в определенных ситуациях конечные точки открытых струн – вспомним, что это сегменты струн с двумя свободными концами, – не могут двигаться полностью свободно. Вместо этого, точно так же, как бусина на проволоке свободна двигаться, но должна следовать контуру проволоки, и точно так же, как пинбольный шарик свободен двигаться, но должен следовать контуру поверхности пинбольного стола, конечные точки открытой струны будут свободны в своем движении, но будут ограничены особыми формами или контурами в пространстве. В то время, как струна все еще будет свободна для колебаний, Полчински и его соратники показали, что ее конечные точки будут "прилипшими" или "пойманными" внутри определенных областей.

В некоторых ситуациях область может быть одномерной, в этом случае концы струны будут подобны двум бусинам, скользящим по проволоке, а сама струна будет подобна шнуру, соединяющему их. В других ситуациях область может быть двумерной, в этом случае концы струны будут очень похожи на два пинбольных шарика, связанных шнуром, катающихся вдоль пинбольного стола. Еще в других ситуациях область может иметь три, четыре или любое другое количество пространственных измерений, меньшее десяти. Эти результаты, как было показано Полчински, а также Петром Хофавой и Майклом Грином, помогли разрешить давно стоящую загадку в сравнении открытых и замкнутых струн, но в течение лет работа привлекала ограниченное внимание.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_5" \o ) В октябре 1995, когда Полчински завершил обдумывать эти более ранние достижения в свете новых открытий Виттена, все изменилось.

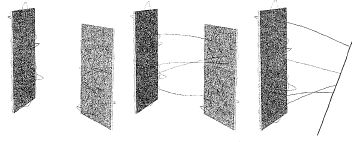
Вопрос, который статья Полчински оставила без полного ответа, мог возникнуть у вас во время чтения последнего параграфа. Если концы открытых струн приклеены внутри особых регионов пространства, что именно их там удерживает приклеенными? Проволоки и пинбольные столы имеют реальное существование, независимое от бусин или шариков, движение которых вдоль себя они ограничивают. А что можно сказать о регионах пространства, которыми ограничены концы открытых струн? Они заполнены некоторыми независимыми и фундаментальными ингредиентами струнной теории, такими, что бдительно зажимают концы открытых струн? Перед 1995, когда струнная теория мыслилась только как теория струн, не просматривалось ни одного кандидата на эту работу. Но после прорыва Виттена и инспирированного им стремительного потока результатов ответ стал для Полчински очевиден: если концы открытых струн ограничены в движении внутри некоторого р-мерного региона пространства, тогда этот регион пространства должен быть занят р-браной.\*

*(\*) "Более точное наименование для этих клейких сущностей есть р-браны Дирихле или, для краткости, D-р-браны. Мы будем придерживаться более короткого названия р-брана".*

Его расчеты показали, что вновь открытые р-браны имеют в точности правильные свойства, чтобы быть объектами, которые оказывают неразрушимый захват концов открытой струны, ограничивая их в движении внутри р-мерного региона пространства, который р-браны заполняют.

Чтобы лучше понять, что это означает, посмотрите на Рис. 13.2. На (а) мы видим пару 2-бран с множеством открытых струн, движущихся вокруг и вибрирующих, все концы которых ограничены в движении вдоль их соответствующей браны. Хотя это все более тяжело нарисовать, ситуация с более высокоразмерными бранами идентична. Концы открытых струн могут двигаться свободно по и внутри р-браны, но они не могут покинуть саму брану. Когда мы подходим к возможности движения вне браны, браны являются самыми липкими вещами, какие можно вообразить. Возможно также для одного конца открытой струны быть прилепленным к одной р-бране, а для ее другого конца быть приклеенным к другой р-бране, которая может иметь ту же размерность, что и первая (Рис. 13.2b), или не иметь (Рис. 13.2c).

Вместе с открытием связи между различными теориями струн Виттеном статья Полчински обеспечила дополнительный манифест для второй суперструнной революции. В то время, как некоторые из величайших умов теоретической физики двадцатого века пытались сформулировать теорию, содержащую фундаментальные ингредиенты с большим количеством измерений, чем точки (нуль измерений) или струны (одно измерение), и потерпели в этом неудачу, результаты Виттена и Полчински вместе с важными достижениями многих ведущих сегодняшних исследователей, открыли путь к прогрессу. Эти физики не только установили, что теория струн/М-теория содержит высокоразмерные ингредиенты, но результат Полчински, в особенности, обеспечил методику для теоретического анализа их детальных физических свойств (если они окажутся существующими). Свойства браны, обосновывал Полчински, в широких пределах фиксируются свойствами вибрирующих открытых струн, чьи концы она содержит. Точно так же, как вы можете многое узнать о ковре, проводя рукой по его поверхности – обрывкам волокон, чьи концы прикреплены к обратной стороне ковра, – многие качества браны могут быть определены через изучение струн, чьи концы она захватывает.



(а) (b) (c)

***Рис 13.2****(а) Открытые струны с концами, прикрепленными к двумерной бране или 2-бране, (b) Струны, протянутые от одной 2-браны к другой, (с) Струны, протянутые от 2-браны к 1-бране.*

Это был первостепенный результат. Он показал, что десятилетия исследований, которые произвели острые математические методы для исследования одномерных объектов – струн, – могут быть использованы для изучения высокоразмерных объектов, р-бран. Удивительно при этом, что Полчински обнаружил, что анализ многомерных объектов был сведен в высокой степени к совершенно привычному, хотя все еще гипотетическому анализу струн. В этом смысле струны и являются особыми среди равных. Если вы поняли поведение струн, вы далеко продвинулись в направлении понимания поведения р-бран.

С этими результатами теперь вернемся к сценарию мира на бране – возможности, что мы все проживаем наши жизни внутри 3-браны.

Наша вселенная как брана

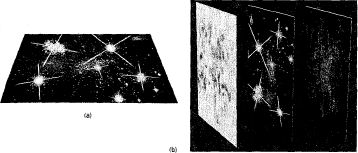
Если мы живем внутри 3-браны, – если наше четырехмерное пространство-время является ничем иным, как историческим развитием 3-браны через время, – тогда на древний вопрос о том, является ли пространство-время чем-то, будет брошен новый сверкающий свет. Привычное четырехмерное пространство-время будет появляться из реальной физической сущности в теории струн/М-теории, 3-браны, а не из некоторой смутной или абстрактной идеи. В этом подходе реальность нашего четырехмерного пространства-времени будет на одном уровне с реальностью электрона или кварка. (Конечно, вы можете все еще спросить, является ли само большее пространство-время, внутри которого существуют струны и браны – одиннадцать измерений теории струн/М-теории – сущностью; однако реальность пространственно-временной арены, которую мы непосредственно ощущаем, будет, очевидно, выполнена). Но если вселенная, которую мы знаем как реальную, является 3-браной, не будет ли даже взгляд мельком показывать, что мы погружены в нечто – во внутреннюю часть 3-браны?

Ну, мы уже изучали вещи, внутрь которых, как полагает современная физика, мы можем быть погружены, – Хиггсов океан; пространство, заполненое темной энергией; мириады квантовополевых флуктуаций, – никакие из которых сами явно не доступны без посторонней помощи человеческому восприятию. Так что не должно быть шоком узнать, что теория струн/М-теория добавляет другого кандидата в список невидимых вещей, которые могут заполнять "пустое" пространство. Но не будем опрометчивыми. Для каждой из предыдущих возможностей мы понимали ее влияние на физику и, как мы могли установить, что это в самом деле существует. Конечно, для двух из трех – темной энергии и квантовых флуктуаций – мы видели, что строгое доказательство в пользу их существования уже получено; доказательство для Хиггсова поля разыскивается на сегодняшних и будущих ускорителях. А какова соответствующая ситуация для жизни внутри 3-браны? Если сценарий мира на бране корректен, почему мы не видим 3-браны и как мы можем установить, что она существует?

Ответ проясняет, что физические следствия теории струн/М-теории в контексте мира на бране радикально отличаются от более ранних, свободных от бран (или, как временами их с любовью называют, безбранных) сценариев. Рассмотрим в качестве важного примера движение света – движение фотонов. В теории струн фотон, как вы теперь знаете, является особым способом колебаний струны. Но математические исследования показали, что в сценарии мира на бране только колебания открытых струн, а не замкнутых, производят фотоны, и это приводит к большим отличиям. Концы открытой струны ограничены в своем движении внутри 3-браны, но во всем остальном полностью свободны. Это приводит к тому, что фотоны (открытые струны, выполняющие фотонную моду (способ) колебаний) будут путешествовать без каких-либо ограничений или помех сквозь 3-брану. И что это будет делать брану полностью прозрачной – полностью невидимой, – таким образом не давая нам увидеть, что мы погружены в нее.

Столь же важным является то, что поскольку концы открытой струны не могут покинуть брану, они не в состоянии двигаться во внешних измерениях. Точно так же, как проволока ограничивает ее бусины и пинбольный стол ограничивает его шарики, наша липкая 3-брана будет разрешать фотонам двигаться только внутри наших трех пространственных измерений. Поскольку фотоны являются частицами-переносчиками электромагнетизма, это проявляется в том, что электромагнитное взаимодействие – свет – будет удерживаться внутри наших трех измерений, как проиллюстрировано (в двух измерениях, как мы можем нарисовать это) на Рис. 13.3.

Это сильное утверждение с важными последствиями. Ранее мы требовали, чтобы дополнительные измерения теории струн/М-теории были туго скручены. Основанием для этого, очевидно, было то, что мы не можем видеть дополнительные измерения, так что они должны быть как-то скрыты. И один из способов скрыть их заключается в том, чтобы сделать их меньше, чем мы или наше оборудование можем обнаружить. Но теперь пересмотрим эту проблему в сценарии мира на бране. Как мы обнаруживаем вещи? Ну, когда мы используем наши глаза, мы используем электромагнитное взаимодействие; когда мы используем мощные инструменты вроде электронного микроскопа, мы также используем электромагнитные силы; когда мы используем атомные столкновения, одними из сил, которые мы используем, чтобы изучить ультрамалое, опять являются электромагнитные силы. Но если электромагнитные силы удерживаются на нашей 3-бране, в наших трех пространственных измерениях, невозможно как-то проверить дополнительные измерения безотносительно к их размеру. Фотоны не могут покинуть наши измерения, войти в дополнительные измерения, а затем пропутешествовать назад к нашим глазам или оборудованию, позволяя нам обнаружить дополнительные измерения, даже если они столь же велики, как привычные пространственные измерения.



***Рис 13.3****(а) В сценарии мира на бране фотоны являются открытыми струнами с концами, удерживающимися внутри браны, так что они – свет – не могут покинуть саму брану, (b) Наш мир на бране, может быть, плавает в огромном просторе дополнительных измерений, которые остаются невидимыми для нас, поскольку свет, который мы видим, не может покинуть нашу брану. Возможно, существуют и иные миры на бранах, плавающие поблизости.*

Итак, если мы живем на 3-бране, имеется альтернативное объяснение, почему мы не воспринимаем дополнительные измерения. Нет необходимости, чтобы дополнительные измерения были экстремально малыми. Они могут быть большими. Мы не можем видеть их вследствие способа, которым мы видим. Мы видим с использованием электромагнитных сил, которые не в состоянии достичь любого измерения вне трех, о которых мы знаем. Подобно муравью, гуляющему вдоль листа водяной лилии, полностью ничего не знающему о глубокой воде, лежащей прямо под видимой поверхностью, мы можем плавать в великом, обширном, многомерном пространстве, как на Рис. 13.3b, но электромагнитные силы – вечно удерживаемые внутри наших измерений – будут не в состоянии обнаружить это.

Хорошо, вы можете сказать, но электромагнитные силы являются только одними из природных четырех сил. Что относительно трех других? Могут они зондировать дополнительные измерения, таким образом позволяя нам обнаружить их существование? Для сильных и слабых ядерных сил ответ, опять, нет. В сценарии мира на бране расчеты показывают, что частицы-переносчики этих сил – глюоны и W- и Z-частицы – также возникают из колебательных мод открытых струн, так что они точно так же захвачены браной, как и фотоны, и процессы, содежащие сильное и слабое ядерные взаимодействия, точно так же слепы к внешним измерениям. То же самое имеет место для частиц материи. Электроны, кварки и все другие виды частиц также возникают из колебаний открытых струн с захваченными на бране концами. Таким образом, в сценарии мира на бране вы, и я и кто угодно всегда видим все постоянно заключенным внутри нашей 3-браны. Учитывая время, все удерживается внутри нашего четырехмерного среза пространства-времени.

Ну, почти все. Для сил гравитации ситуация отличается. Математический анализ сценария мира на бране показал, что гравитоны возникают из колебательных мод замкнутых струн, почти как они это делали в обсуждавшихся ранее безбранных сценариях. А замкнутые струны – струны без конечных точек – не захватываются бранами. Они свободны как покинуть брану, так и странствовать по ней или сквозь нее. Так что, если мы живем на бране, мы не отрезаны полностью от дополнительных измерений. Через гравитационное взаимодействие мы могли бы влиять и подвергаться влиянию дополнительных измерений. Гравитация в таком сценарии будет обеспечивать единственный способ для взаимодействия за пределами наших трех пространственных измерений. Как велики могут быть дополнительные измерения перед тем, как мы станем осведомлены о них через гравитационное взаимодействие? Это интересный и критический вопрос, так что попробуем рассмотреть его.

Гравитация и большие внешние измерения

В далеком 1687, когда Ньютон предложил свой универсальный закон гравитации, он, естественно, сделал строгое утверждение о количестве пространственных измерений. Ньютон не говорил просто, что сила притяжения между двумя объектами становится слабее, когда расстояние между ними становится больше. Он предложил формулу, закон обратного квадрата, которая точно описывает, как будет уменьшаться гравитационное притяжение, когда два объекта разделяются. В соответствии с этой формулой, если вы удваиваете дистанцию между двумя объектами, их гравитационное притяжение упадет в четыре раза (то есть в 22 раз); если вы утроите расстояние, оно упадет в девять раз (то есть в 32 раз); если вы увеличите расстояние в четыре раза, оно упадет в 16 раз (то есть в 42 раз); и в общем случае гравитационная сила падает пропорционально квадрату расстояния между объектами. Как стало достаточно очевидно за последние несколько сотен лет, эта формула работает.

Но почему сила зависит от квадрата расстояния? Почему сила не падает пропорционально кубу расстояния (так что, если бы вы удвоили дистанцию, сила бы уменьшилась на фактор 8) или четвертой степени (так что, если бы вы удвоили дистанцию, сила бы уменьшилась на фактор 16), или вообще, даже более просто, почему гравитационная сила между двумя объектами не падает прямо пропорционально расстоянию (так что, если бы вы удвоили дистанцию, сила бы уменьшилась на фактор 2)? Ответ прямо связан с числом измерений пространства.

Один из способов увидеть это таков: подумать о том, какое количество гравитонов эмитируется и поглощается двумя объектами в зависимости от расстояния, или подумать о том, как кривизна пространства времени, которую ощущает каждый объект, уменьшается с ростом расстояния между ними. Но поступим проще, с использованием более старого подхода, который быстро и интуитивно понятно приведет нас к правильному ответу. Нарисуем Рис. 13.4а, который схематически иллюстрирует гравитационное поле, производимое массивным объектом, – скажем, Солнцем, – почти как на Рис. 3.1 схематически иллюстрировалось магнитное поле, производимое бруском магнита. Тогда как линии магнитного поля изгибались вокруг магнита от его северного полюса к его южному полюсу, отметим, что линии гравитационного поля испускаются радиально наружу во всех направлениях и просто уходят. Сила гравитационного притяжения, которое будет ощущать другой объект, – представим его орбитальным спутником, – на данном расстоянии пропорциональна плотности линий поля в данной точке. Чем больше линий поля пройдет сквозь спутник, как на Рис. 13.4b, тем большему гравитационному притяжению он подвергнется.

Теперь мы можем объяснить оригинальный закон обратного квадрата Ньютона. Воображаемая сфера с центром в Солнце и проходящая через местоположение спутника, как на Рис. 13.4с, имеет площадь поверхности, которая – подобно площади поверхности любой сферы в трехмерном пространстве – пропорциональна квадрату ее радиуса, что в этом случае есть квадрат расстояния между Солнцем и спутником. Это значит, что плотность линий поля, проходящих через сферу, – полное число линий поля, деленное на площадь сферы, – уменьшается как квадрат расстояния между Солнцем и спутником.



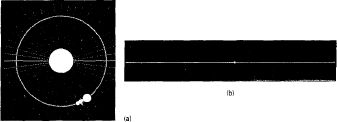
(а) (b) (c)

***Рис 13.4****(а) Гравитационная сила, оказываемая Солнцем на объект, такой как спутник, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Причина в том, что линии гравитационного поля Солнца распространяются одинаково во всех направлениях, как в (b), и потому имеют плотность на расстоянии d, которая обратно пропорциональна площади воображаемой сферы радиуса d, – схематично изображенной на (с), – площади, которая на основании геометрии оказывается пропорциональной d2.*

Если вы удвоите расстояние, то же самое число линий поля теперь будет однородно распределено по сфере со в четыре раза большей площадью, а потому гравитационное притяжение на этом расстоянии будет меньше в четыре раза. Закон обратного квадрата Ньютона для гравитации является, таким образом, отражением геометрического свойства сферы в трехмерном пространстве.

В отличие от этого, если вселенная имела бы два или даже просто одно пространственное измерение, как бы изменилась формула Ньютона? Ну, на Рис 13.5а показана двумерная версия Солнца и его орбитального спутника. Как вы можете видеть, при любом данном расстоянии линии гравитационного поля Солнца однородно распределены по окружности, аналогу сферы с измерениями на одно меньше. Поскольку длина окружности пропорциональна ее радиусу (а не квадрату ее радиуса), если вы удвоите расстояние между солнцем и спутником, плотность линий поля уменьшится на фактор 2 (а не 4) , так что сила гравитационного притяжения спутника солнцем упадет только в 2 раза (а не в 4). Если вселенная имеет только два пространственных измерения, тогда гравитационное притяжение будет обратно пропорционально расстоянию, а не квадрату расстояния.

Если вселенная имеет только одно измерение, как на Рис. 13.5b, закон притяжения будет еще проще. Линии гравитационного поляне не имеют пространства, чтобы рассеиваться, так что сила гравитации не будет уменьшаться с расстоянием. Если вы удвоите расстояние между Солнцем и спутником (предполагая, что аналоги таких объектов могут существовать в такой вселенной), одно и то же число линий поля будет пересекать спутник, а потому сила гравитационного воздействия между ними не будет изменяться совсем.

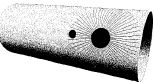
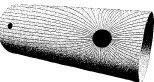


***Рис 13.5****(а) Во вселенной только с двумя пространственными измерениями гравитационная сила падает пропорционально расстоянию, поскольку линии гравитационного поля распределяются по окружности, чья длина пропорциональна ее радиусу, (b) Во вселенной с одним пространственным измерением линии гравитационного поля не имеют пространства, чтобы распределяться, так что гравитационная сила постоянна независимо от расстояния.*

Хотя это невозможно нарисовать, примеры, проиллюстрированные на Рис. 13.4 и 13.5, непосредственно распространяются на вселенную с четырьмя, или пятью, или шестью или любым числом пространственных измерений. Чем больше пространственных измерений имеется, тем больше пространства имеют гравитационные силовые линии, чтобы рассеяться. А чем больше они рассеиваются, тем более чувствительно сила притяжения падает с увеличением расстояния. В четырех пространственных измерениях закон Ньютона будет законом обратного куба (удвоение расстояния приводит к падению силы в 8 раз); в пяти пространственных измерениях это будет закон обратной четвертой степени (удвоение расстояния приводит к падению силы в 16 раз); в шести измерениях это будет закон обратной пятой степени (удвоение расстояния приводит к падению силы в 32 раза); и так далее для все более многомерных вселенных.

Вы можете подумать, что успех закона обратного квадрата Ньютона в объяснении огромного количества данных – от движения планет до траекторий комет – подтверждает, что мы живем во вселенной с точно тремя пространственными измерениями. Но это заключение будет поспешным. Мы знаем, что закон обратного квадрата работает на астрономических масштабах,[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_6" \o ) и мы знаем, что он работает на земных масштабах, и что это хорошо стыкуется с фактом, что на таких масштабах мы видим три пространственных измерения. Но знаем ли мы, что он работает на малых расстояниях? Как далеко в микрокосмосе проверен гравитационный закон обратного квадрата? Как оказывается, экспериментаторы подтвердили его только примерно до одной десятой миллиметра; если два объекта разделены расстоянием в одну десятую миллиметра, данные подтверждают, что сила их гравитационного притяжения следует предсказанию закона обратных квадратов. Но пока оказалось большой технической проблемой протестировать закон обратного квадрата на более мелких масштабах (квантовые эффекты и слабость гравитации усложняют эксперименты). Это критическая проблема, поскольку отклонение от закона обратного квадрата будет убедительным сигналом о дополнительных размерностях.

Чтобы увидеть это явно, поработаем с низкоразмерным игрушечным примером, который мы легко можем нарисовать и проанализировать. Представим, что мы живем во вселенной с одним пространственным измерением – или так мы думаем, поскольку только одно пространственное измерение является видимым и, более того, столетия экспериментов показали, что сила гравитации не меняется с расстоянием между объектами. Но также представим, что во все эти годы экспериментов мы были в состоянии протестировать закон гравитации только до расстояний около одной десятой миллиметра. Для более коротких дистанций, чем эта, никто не имеет никаких данных. Теперь представим далее никому не известное, но подозреваемое горсткой физиков-теоретиков, что вселенная на самом деле имеет второе скрученное пространственное измерение, делая ее форму подобной поверхности каната муравья Филиппа Пети, как на Рис. 12.5. Как это может повлиять на будущий, более утонченный гравитационный тест? Мы можем вывести ответ, рассмаривая Рис. 13.6. Когда два мельчайших объекта находятся достаточно близко друг к другу – более близко, чем длина скрученного измерения, – двумерный характер пространства немедленно становится явным, поскольку на таких масштабах линии гравитационного поля будут иметь место, чтобы рассеяться (рис. 13.6а). Вместо того, чтобы быть независимыми от расстояния, силы гравитации будут изменяться обратно пропорционально расстоянию между объектами, которые находятся достаточно близко друг от друга.

(а) (b)

***Рис 13.6****(а) Когда объекты достаточно близки, гравитационное притяжение изменяется так, как это происходит в двух пространственных измерениях. (b) Когда объекты удалены, гравитационное притяжение ведет себя, как это и должно быть в одном пространственном измерении, – оно постоянно.*

Таким образом, если бы вы были экспериментатором в этой вселенной и вы разработали бы изысканно точный метод измерения гравитационного притяжения, это было бы то, что вы нашли. Когда два объекта экстремально сближаются, ближе, чем размер скрученного измерения, их гравитационное притяжение уменьшается пропорционально расстоянию между ними, точно так же, как вы могли бы ожидать для вселенной с двумя пространственными измерениями. Но тогда, когда объекты удалены друг от друга на расстояние, много большее длины скрученной размерности, вещи изменятся. За пределами указанной дистанции линии гравитационного поля больше не смогут рассеиваться. Они будут расходиться точно так же, как они это могли делать во втором скрученном измерении, – они будут насыщать это измерение, – так что с этого расстояния и дальше гравитационные силы больше не будут уменьшаться, как показано на Рис. 13.6b. Вы можете сравнить это насыщение с прокладкой водопроводных труб в старом доме. Если кто-нибудь открывает кран на кухне, когда вы только что намылили шампунем свои волосы, давление воды падает, поскольку вода распределяется между двумя выходными отверстиями. Давление еще больше уменьшится, когда кто-нибудь откроет кран в прачечной, поскольку вода распределиться еще больше. Но как только все краны в доме открыты, давление останется постоянным. Хотя это может не обеспечить релаксацию и ощущение высокого давления воды, которое вы предвкушали, давление в душе не будет падать больше никогда, поскольку вода полностью распределена между всеми "внешними" выходными отверстиями. Аналогично, как только гравитационное поле полностью рассеется сквозь внешнее скрученное измерение, оно больше не будет уменьшаться при дальнейшем увеличении расстояния.

Из ваших данных вы можете вывести две вещи. Первое, из факта, что гравитационная сила уменьшается пропорционально расстоянию, когда объекты очень близки, вы обнаружите, что вселенная имеет два пространственных измерения, а не одно. Второе, из перехода к постоянной гравитационной силе – результату, известному из столетий предыдущих экспериментов, – вы сделаете заключение, что одно из этих измерений скручено с размером, примерно равным расстоянию, при котором имеет место смена закона поведения гравитации. И с этим результатом вы опрокинете столетия, если не тысячелетия веры во что-то настолько основополагающее, как размерность пространства, которое казалось почти вне обсуждения.

Хотя я изложил эту историю для низкоразмерной вселенной для простоты визуализации, наша ситуация будет почти такой же. Сотни лет эксперименты подтверждали, что гравитация меняется обратно квадрату расстояния, давая строгое доказательство, что мы имеем три пространственных измерения. Но до 1998 года ни один эксперимент еще не проверил силу гравитации на расстояниях, меньших миллиметра (сегодня, как отмечалось, это доведено до одной десятой миллиметра). Это привело Саваса Димопоулоса из Стэнфорда, Нима Аркани-Хамеда, в настоящее время работающего в Гарварде, и Гиа Двали из Нью-Йоркского Университета к предположению, что в сценарии мира на бране дополнительные размерности могли бы быть величиной порядка миллиметра и все еще не были бы обнаружены. Это радикальное предположение инсприровало большое число экспериментальных групп к началу исследования гравитации на субмиллиметровых расстояниях в надежде найти отклонения от закона обратного квадрата; до сегодняшнего дня ничего не было найдено, хотя точность повысилась до одной десятой миллиметра. Таким образом, даже при сегодняшних самых продвинутых экпериментах по гравитации, *если мы живем внутри 3-браны, дополнительные измерения могут быть так же велики, как десятая доля миллиметра, и мы все еще не можем узнать о них*.

Это одно из наиболее замечательных постижений последних десяти лет. Используя три негравитационные силы мы можем прозондировать расстояния до примерно миллиардной миллиардной (10–18) метра, и никто не нашел никакого подтверждения дополнительным размерностям. Но в сценарии мира на бране негравитационные силы и не могут ничем помочь в поиске дополнительных размерностей, поскольку они удерживаются на самой бране. Только гравитация может помочь проникнуть в природу дополнительных размерностей, и на сегодняшний день дополнительные измерения могут быть так же толсты, как человеческий волос, и все еще быть полностью невидимыми для наших самых изощренных инструментов. Прямо сейчас, прямо рядом с вами, прямо рядом со мной и прямо рядом с любым другим могут быть другие пространственные измерения – измерения за пределами влево/вправо, назад/вперед и вверх/вниз, измерения, которые скручены, но все еще достаточно велики, чтобы поглотить что-нибудь столь же толстое, как эта страница, – которые остаются вне нашей способности их воспринимать.\*

*(\*) "Имеется даже предложение от Лизы Рэндалл из Гарварда и Рамана Судрума из Института Джона Гопкинса, в котором гравитация тоже может быть захвачена, но не клейкой браной, а дополнительными измерениями, которые искривляются точно нужным образом, смягчая ограничения на их размер еще больше."*

Большие дополнительные размерности и большие струны

Через захват трех из четырех сил сценарий мира на бране существенно смягчает экспериментальные ограничения на то, как велики могут быть дополнительные размерности, но дополнительные размерности не являются единственными вещами, которые этот подход позволяет сделать больше. Продолжая открытия Виттена, Джо Ликкена, Константина Бахаса и других, Игнатиос Антониадис вместе с Аркани-Хамедом, Димопоулосом и Двали обнаружили, что в сценарии мира на бране даже невозбужденные, низкоэнергетические струны могут быть намного больше, чем раньше думалось. Фактически, два масштаба – размер дополнительных измерений и размер струн – тесно связаны.

Вспомним из предыдущей главы, что базовый размер струны определяется требованием, что ее гравитационная колебательная мода соответствует гравитационной силе наблюдаемой величины. Слабость гравитации переносится в то, что струна должна быть очень короткой, порядка длины Планка (10–33 сантиметра). Но это заключение сильно зависит от размера дополнительных измерений. Причина в том, что в теории струн/М-теории величина гравитационной силы, которую мы наблюдаем в наших трех протяженных измерениях представляет взаимодействие между двумя факторами. Один фактор является внутренней, фундаментальной величиной гравитационной силы. Второй фактор есть размер дополнительных измерений. Чем больше дополнительные измерения, тем больше гравитации может рассеиваться в них и тем слабее будет проявляться ее сила в привычных измерениях. Точно так же, как большие трубы дают более слабое давление воды, поскольку они предоставляют ей больше пространства, чтобы распределиться, так большие дополнительные размерности дают более слабую гравитацию, поскольку они дают гравитации больше пространства, чтобы рассеяться.

Оригинальные расчеты, которые определяли длину струны, предполагали, что внешние измерения столь малы, порядка планковской длины, что гравитация не может рассеиваться в них совсем. При этом предположении гравитация проявляется слабой, поскольку она слаба. Но теперь, если мы работаем в сценарии мира на бране и позволяем дополнительным измерениям быть намного больше, чем это рассматривалось раньше, наблюдаемое бессилие гравитации больше не означает, что она внутренне слаба. Напротив, гравитация может быть относительно мощной силой, которая становится слабой только вследствие относительно больших дополнительных измерений, подобных большим трубам, обескровливающим ее внутреннюю силу. Следуя этой линии аргументации, если гравитация намного сильнее, чем когда-то думали, струны тоже могут быть намного длиннее, чем когда-то думали.

Что касается сегодняшнего дня, вопрос о точной длине не имеет однозначного определенного ответа. С вновь найденной свободой вариаций как размера струн, так и размера внешних измерений в значительно более широком диапазоне, чем воображалось раньше, появляется большое число возможностей. Димопоулос и его соратники утверждали, что существующие экспериментальные результаты, как из физики частиц, так и из астрофизики, показывают, что невозбужденные струны не могут быть больше, чем примерно миллиардная миллиардной доли метра (10–18 метра). Будучи меньше повседневных стандартов, эта величина примерно в сто миллионов миллиардов (1017) раз больше длины Планка – *примерно в сто миллионов миллиардов раз больше, чем думали раньше*. Как мы сейчас увидим, это достаточно много, чтобы признаки струн могли быть обнаружены следующим поколением ускорителей частиц.

Теория струн стоит перед лицом эксперимента?

Возможность, что мы живем внутри большой 3-браны, конечно, является только этим: возможностью. И в рамках сценария мира на бране возможность, что дополнительные размерности могут быть намного больше, чем когда-то думалось, – и связанная с этим возможность, что струны могут также быть намного больше, чем когда-то думалось, – также являются только этим: возможностями. Но они являются крайне возбуждающими возможностями. Верно и то, что даже если сценарий мира на бране верен, дополнительные размерности и размер струн могут все равно быть планковскими. Но возможность в рамках теории струн/М-теории для струн и дополнительных размерностей быть много больше – просто быть за пределами достижимости сегодняшней технологии – фантастична. Она означает, что имеется, по меньшей мере, шанс, что в течение нескольких следующих лет теория струн/М-теория соприкоснется с наблюдаемой физикой и станет экспериментальной наукой.

Насколько велик этот шанс? Я не знаю и никто другой не знает. Моя интуиция говорит мне, что это маловероятно, но моя интуиция сформировалась полутора десятилетиями работы в рамках обычной схемы струн планковской длины и внешних измерений планковской длины. Возможно, мои инстинкты устарели. К счастью, вопрос будет решаться без малейшей связи с чьей-либо интуицией. Если струны велики или если некоторые из дополнительных размерностей велики, последствия для наступающих экспериментов будут впечатляющими.

В следующей главе мы рассмотрим различные эксперименты, которые проверят среди других вещей возможность сравнительно больших струн и больших дополнительных измерений, так что здесь я только возбуждаю ваш аппетит. Если струны так же велики, как милиардная миллиардной доли (10–18) метра, частицы, соответствующие высшим гармоническим колебаниям на Рис. 12.4, не будут иметь чрезмерные массы, превышающие массу Планка, как в стандартном сценарии. Напротив, их массы будут только от тысячи до нескольких тысяч масс протона, а это достаточно мало, чтобы быть достижимым на Большом Адронном Коллайдере (Large Hadron Collider – LHC), в настоящее время строящемся в ЦЕРНе. Если эти колебания струн могут быть возбуждены через высокоэнергетические столкновения, детекторы ускорителя будут сиять как хрустальный шар на елке в новогоднюю ночь. Будет произведена целая толпа никогда раньше не виданных частиц, и их массы будут относиться одна к другой почти как различные гармоники, связанные с виолончелью. Проявление струнной теории будет отпечатано в данных столь цветисто, что поразило бы Джона Хичкока\*. Исследователи будут не в состоянии пропустить его даже без своих очков.

*(\*)"Британский проектировщик и инвестор, работающий в стиле hi-tech, совладелец всемирно известного брэнда YOO в области архитектурного дизайна. – (прим. перев.)"*

Более того, в сценарии мира на бране высокоэнергетические столкновения могут даже произвести – осознайте это – миниатюрные черные дыры. Хотя мы обычно думаем о черных дырах как о чудовищных структурах далеко в глубоком пространстве, известно со времен первых дней ОТО, что если вы втисните достаточно материи в горсть вашей руки, вы создадите миниатюрную черную дыру. Этого не происходило потому, что ни одна хватка – и ни один механический прибор – даже отдаленно не имеет мощи, чтобы проявить достаточную силу сжатия. Напротив, единственный признанный механизм для производства черной дыры содержит гравитационное сжатие экстраординарно массивной звезды, преодолевшей направленное наружу давление, обычно оказываемое процессами звездной ядерной реакции, что заставляет звезду коллапсировать внутрь себя. Но если внутренняя сила гравитации на малых масштабах намного больше, чем мы думали раньше, мелкие черные дыры могут производится при существенно меньших силах сжатия, чем мы были уверены раньше. Расчеты показывают, что Большой Адронный Коллайдер (LHC) может иметь почти достаточно сдавливающей мощи, чтобы создать рог изобилия микроскопических черных дыр через высокоэнергетические столкновения между протонами.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_7" \o ) Подумайте о том, насколько это будет поразительно. LHC может оказаться фабрикой по производству черных дыр! Эти черные дыры должны быть столь малы и сохраняться столь короткое время, что они не смогут представлять для нас ни малейшей опасности (годами раньше Стивен Хокинг показал, что все черные дыры испаряются посредством квантовых процессов – большие очень медленно, малые очень быстро), но их производство обеспечит подтверждение некоторых наиболее экзотических идей из когда-либо рассмотренных.

Космология мира на бране

Первейшая цель сегодняшних исследований, одна из тех, что горячо преследуются учеными всего мира (включая меня), заключается в формулировании понимания космологии, которое включает новые открытия теории струн/М-теории. Причина ясна: космология не только связана с глобальными, захватывающими дух вопросами, и мы не только подошли к осознанию, что аспекты привычного опыта – такие как стрела времени – связаны с условиями при рождении вселенной, но космология также обеспечивает теоретиков тем же, чем Нью-Йорк обеспечил Синатру: испытанием настоящей цены мастерства. Если теория может сделать это в экстремальных условиях, характеризующих ранние моменты вселенной, она сможет сделать это везде.

Что касается сегодняшнего дня, космология в соответствии с теорией струн/М-теорией находится в стадии разработки исследователями, ориентированными в двух главных направлениях. Первый и более обычный подход представляет, что точно так же, как инфляция обеспечивает недолгую, но основательную начальную часть стандартной теории Большого взрыва, теория струн/М-теория обеспечивает еще более раннюю и, возможно, еще более основательную начальную часть для инфляции. Представляется, что теория струн/М-теория будет прояснять размытое пятно, которое мы использовали для обозначения нашего неведения относительно самых ранних моментов вселенной, а затем космологическая драма будет разворачиваться в соответствии с необыкновенно успешным сценарием инфляционной теории, который мы подробно излагали в предыдущих главах.

Хотя имелся прогресс в специфических деталях, требуемых таким подходом (таких как попытки понять, почему только три пространственных измерения вселенной подверглись расширению, точно так же, как разработка математических методов, которые могут обеспечить подходящий анализ области без пространства и без времени, которая могла предшествовать инфляции), момент для крика "Эврика!" еще не наступил. Интуитивно понятно, что в то время, как инфляционная космология представляет наблюдаемую вселенную становящейся все более маленькой в совсем ранние времена, – и потому становящейся все более горячей, плотной и энергичной, – теория струн/М-теория обуздывает это буйное (на физическим языке, "сингулярное") поведение путем введения минимального размера (как в нашей дискуссии на стр. 350–351), ниже которого становятся существенными новые и менее сингулярные физические величины. Это обоснование лежит в сердце успешного соединения ОТО и квантовой механики теорией струн/М-теорией, и у меня сильное ощущение, что мы скоро определим, как применить такое же обоснование в контексте космологии. Но, что касается сегодняшнего дня, размытое пятно все еще выглядит размытым, и можно только гадать, когда будет достигнута ясность.

Второй подход использует сценарий мира на бране и в его самом радикальном воплощении постулирует полностью новую космологическую схему. Далеко от ясности, выдержит ли этот подход детальную математическую проверку, но он обеспечивает хороший пример того, как прорывы в фундаментальной теории могут проложить новые рельсы через хорошо истоптанную территорию. Предложение называется *циклическая модель*.

Циклическая космология

С точки зрения времени обычный опыт ставит нас перед лицом двух типов явлений: тем, что имеет ясно очерченное начало, середину и конец (эта книга, бейсбольная игра, человеческая жизнь), и тем, что циклично, случаясь снова и снова (изменение времен года, восход и закат Солнца, бракосочетания Ларри Кинга\*). Конечно, при ближайшей проверке мы узнаем, что циклические явления также имеют начало и конец, поскольку циклы, как правило, не продолжаются вечно. Солнце восходит и заходит – что означает, Земля вращается вокруг своей оси во время обращения по орбите вокруг Солнца, – каждый день примерно 5 миллиардов лет. Но перед этим Солнце и Солнечная система еще формировались. А однажды, примерно через 5 миллиардов лет от сегодняшнего дня, Солнце превратится в красного гиганта, поглотив внутренние планеты, включая Землю, и тогда больше не будет даже понятия восхода и заката Солнца, по меньшей мере, не здесь.

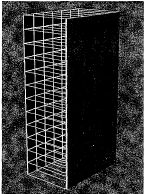
*(\*)"Известный телеведущий американской компании CNN, специализирующийся на интервью. – (прим. перев.)"*

Но это современные научные представления. Для древних циклические явления казались вечно циклическими. И для большинства циклические явления, движущиеся своим курсом и неизменно возвращающиеся снова к началу, являются основополагающими явлениями. Циклы дней и времен года задают ритм работы и жизни, так что не удивительно, что старейшие из записанных космологий воображают разворачивание мира как циклический процесс. Вместо того, чтобы постулировать начало, середину и конец, циклическая космология представляет, что мир изменяется сквозь время почти как Луна изменяется по фазам: после того, как она пройдет через полную последовательность, условия созревают для того, чтобы снова стартовать и начать очередной цикл.

С момента открытия ОТО было предложено много циклических космологических моделей; наиболее известная была разработана в 1930е Ричардом Толменом из Калифорнийского Технологического Института. Толмен предположил, что наблюдаемое расширение вселенной может замедлиться, однажды остановиться, и затем последует период сжатия, при котором вселенная будет все меньше. Но вместо достижения феерического финала, в котором она схлопнется и придет к концу, Толмен предположил, что вселенная может испытать отскок: пространство может сократиться до некоторого малого размера, а затем откатиться, начав новый цикл расширения, который опять сменится сжатием. Вселенная вечно повторяет этот цикл – расширение, сжатие, отскок, снова расширение, – что позволяет элегантно избежать нелегкой проблемы начала, – в таком сценарии сама проблема начала неприменима, поскольку вселенная всегда была и всегда будет.

Но Толмен обнаружил, вглядываясь назад во времени из сегодняшнего дня, что циклы могут повторяться в течение промежутка времени, но не безгранично. Причина в том, что в течение каждого цикла второй закон термодинамики диктует, что энтропия в среднем будет возрастать.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_8" \o ) А в соответствии с ОТО количество энтропии в начале каждого нового цикла определяет, как долго этот цикл будет длиться. Больше энтропии означает более длинный период расширения, прежде чем движение наружу будет подавлено до остановки и власть перейдет к движению внутрь. Каждый последующий цикл будет, следовательно, длиться намного дольше, чем его предшественник; эквивалентно, более ранние циклы будут короче и короче. Когда постоянное укорачивание циклов анализируем математически, это подразумевает, что они не могут простираться бесконечно далеко в прошлое. Даже в циклической схеме Толмена вселенная будет иметь начало.

Предложение Толмена включало сферическую вселенную, которая, как мы видели, противоречит наблюдениям. Но радикально новое воплощение циклической космологии, содержащее в себе плоскую вселенную, недавно было разработано в рамках теории струн/М-теории. Идея пришла от Пола Стейнхардта и его коллеги Нейла Турока из Кембриджского Университета (с сильным использованием результатов, полученных ими вместе с Бартом Оврутом, Натаном Зейбергом и Джастином Хоури) и предложила новый механизм движения космической эволюции.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_9" \o ) Излагая коротко, они предположили, что мы живем на 3-бране, которая яростно сталкивается каждые несколько триллионов лет с другой соседней параллельной 3-браной. И "взрыв" от столкновения инициирует каждый новый космологический цикл.

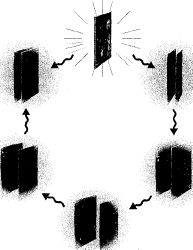


***Рис 13.7****Две 3-браны, разделенные коротким интервалом.*

Базовая схема предложения проиллюстрирована на Рис. 13.7 и была выдвинута несколько лет назад Хофавой и Виттеном в некосмологическом контексте. Хофава и Виттен пытались дополнить предложенное Виттеном объединение всех пяти струнных теорий и нашли, что если одно из семи дополнительных измерений в М-теории имеет очень простую форму – не круг, как на Рис. 12.7, а маленький сегмент прямой линии, как на Рис. 13.7, – и ограничивается так называемыми бранами конца мира, связанными подобно книжным обложкам, тогда может быть сделана прямая связь между Е-гетеротической струнной теорией и всеми остальными. Детали того, как они протянули эту связь, и не очевидны и не существенны (если вы интересуетесь, посмотрите, например,*Элегантную Вселенную*, Главу 12); что имеет значение, так это то, что это является стартовой точкой для естественного возникновения самой теории. Стейнхардт и Турок привлекли ее для своего космологического плана.

А именно, Стейнхардт и Турок представили, что каждая брана на Рис. 13.7 имеет три пространственных измерения, а разлинованный сегмент между ними обеспечивает четвертое пространственное измерение. Оставшиеся шесть пространственных измерений скручены в пространство Калаби-Яу (не показанное на рисунке), которое имеет правильную форму для струнных колебательных мод, чтобы получить известные семейства частиц.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_10" \o ) Вселенная, о которой мы непосредственно осведомлены, соответствует одной из этих 3-бран; если вы хотите, вы можете думать о второй 3-бране как о другой вселенной, чьи обитатели, если они имеют место, также будут осведомлены только о своих трех пространственных измерениях, если предположить, что их экспериментальная технология и экспертиза не сильно превосходят нашу. Тогда в этой схеме другая 3-брана – другая вселенная – находится прямо рядом. Она парит не более, чем на расстоянии доли миллиметра (расстояние вдоль четвертого пространственного измерения, как на Рис. 13.7), но поскольку наша 3-брана столь липкая, а гравитация, которую мы ощущаем, столь слабая, мы не имеем прямого подтверждения существования второй браны, так же, как ее гипотетические обитатели не имеют подтверждения нашего существования.

Но в соответствии с циклической космологической моделью Стейнхардта и Турока Рис. 13.7 не есть то, что всегда было или что всегда будет. Напротив, в их подходе две 3-браны притягиваются друг к другу, – почти как если бы они были соединены маленькими резиновыми лентами, – и это предполагает, что каждая управляет космологической эволюцией другой: браны вовлечены в бесконечный цикл столкновений, отскоков и снова столкновений, вечно восстанавливая их протяженные трехмерные миры. Чтобы увидеть, как это происходит, посмотрим на Рис. 13.8, который иллюстрирует один полный цикл шаг за шагом.



(0)

(5) (1)

(4) (2)

(3)

***Рис 13.8****Различные этапы в циклической космологической модели мира на бране.*

На Этапе 1 две 3-браны просто несутся по направлению друг к другу и врезаются друг в друга, а затем отскакивают. Жуткая энергия столкновения запасается в существенном количестве высокотемпературной радиации и материи в каждой из отскочивших 3-бран, и – в этом ключ – Стейнхардт и Турок утверждают, что *детальные свойства этой материи и радиации имеют совокупность параметров, почти идентичную той, что генерируется в инфляционной модели*. Хотя на этот счет еще имеются некоторые разногласия, Стейнхардт и Турок, следовательно, заявляют, что столкновение между двумя 3-бранами приводит к физическим условиям, экстремально близким к тем, которые они имели моментом позже взрыва инфляционного расширения в более обычном подходе, обсуждавшемся в Главе 10. Тогда не удивительно, что для гипотетического наблюдателя внутри нашей 3-браны следующие несколько этапов в циклической космологической модели, по существу, те же самые, как и в стандартном подходе, как показано на Рис. 9.2 (где этот рисунок теперь интерпретируется как эскиз эволюции одной из 3-бран). А именно, когда наша 3-брана отскакивает после столкновения, она расширяется и охлаждается, а космические структуры вроде звезд и галактик понемногу срастаются из первичной плазмы, как вы можете видеть на Этапе 2. Далее, вдохновленные недавними наблюдениями сверхновых, обсуждавшимися в Главе 10, Стейнхардт и Турок дополнили свою модель, так что примерно через 7 миллиардов лет в цикле – Этап 3 – энергия обычной материи и радиации стала существенно рассеянной за счет расширения браны, так что компонента темной энергии получила верховную власть и через свое отрицательное давление запустила эру ускоренного расширения. (Это требует произвольной тонкой настройки деталей, но позволяет модели соответствовать наблюдениям, а это, как утверждают поборники циклической модели, хорошо мотивировано). Примерно 7 миллиардами лет позже мы, люди, находим себя здесь на Земле, по меньшей мере в данном цикле, испытывая начальные этапы фазы ускорения. Затем, грубо в течение следующего триллиона лет ничего особенно нового не происходит, исключая то, что наша 3-брана продолжает ускоренное расширение. Это достаточно долго для нашего трехмерного пространства, чтобы растянуться на такой колоссальный фактор, что материя и радиация рассеиваются почти полностью, приводя мир на бране к состоянию, когда он выглядит почти полностью пустым и полностью однородным: Этап 4.

К этому моменту наша 3-брана завершила свой отскок от начального столкновения и начала снова приближаться ко второй 3-бране. Когда мы подходим все ближе и ближе к следующему столкновению, квантовые дрожания струн, закрепленных на нашей бране, заполняют ее однородный вакуум мельчайшей рябью, Этап 5. Пока мы продолжаем увеличивать скорость, рябь продолжает расти; затем в катаклизме столкновения мы вляпываемся во вторую 3-брану, отскакиваем, и цикл повторяется снова. Квантовая рябь накладывает малую неоднородность на радиацию и материю, произведенную во время столкновения, и, почти как в инфляционном сценарии, эти отклонения от совершенной однородности вырастают в комки, которые в конечном счете генерируют звезды и галактики.

Это главные этапы циклической модели (также известной у сочувствующих как Большой шлепок). Ее предпосылка – сталкивающиеся миры на бранах – очень отличается от успешной инфляционной теории, но, тем не менее, имеется существенная точка контакта между двумя подходами. То, что обе полагаются на квантовые возбуждения для генерирования начальной неоднородности, является одним из существенных сходств. Фактически Стейнхардт и Турок утверждают, что уравнения, управляющие квантовой рябью в циклической модели почти идентичны таким уравнениям в инфляционной картине, так что результирующая неоднородность, предсказанная двумя теориями, почти так же идентична.[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_11" \o ) Более того, поскольку в циклической модели нет инфляционного взрыва, в ней есть триллионолетний период (начало Этапа 3) спокойного ускоренного расширения. Но это на самом деле только вопрос поспешности против терпения; что инфляционная модель достигает за миг, циклическая модель достигает за сравнительную вечность. Поскольку столкновение в циклической модели не является началом вселенной, имеется роскошь медленного решения космологических проблем (вроде проблем плоскостности и горизонта) за последний триллион лет каждого предыдущего цикла. Эоны спокойного, но постоянно ускоряющегося расширения в конце каждого цикла растягивают нашу 3-брану аккуратно и плоско и, исключая мелкие, но важные квантовые флуктуации, делают ее совершенно однородной. Итак, длинный финальный этап каждого цикла, сменяющийся шлепком в начале следующего цикла, дает окружение, очень похожее на то, что генерируется коротким всплеском расширения в инфляционном подходе.

Краткая оценка

При их существующих уровнях разработки как инфляционная, так и циклическая модели обеспечивают содержательные космологические схемы, но ни одна из них не предлагает завершенной теории. Незнание превалирующих условий во время самых ранних моментов вселенной заставляет поборников инфляционной космологии просто предполагать, без теоретического обоснования, что условия, требующиеся для инициации инфляции, возникли. Если это так, теория решает большое количество космологических головоломок и запускает стрелу времени. Но такие успехи, во-первых, зависят от того, происходит ли инфляция. Что еще больше, инфляционная космология не встраивается прямо в теорию струн, а раз так, она пока что не является частью непротиворечивого слияния квантовой механики и ОТО.

Циклическая модель имеет свою собственную долю дефектов. Как и в модели Толмена, рассмотрение возрастания энтропии (а также квантовой механики[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_13_12" \o )) гарантирует, что циклы циклической модели не могут происходить всегда. Напротив, циклы начинаются в некоторое определенное время в прошлом, так что, как и с инфляцией, мы нуждаемся в объяснении того, как стартовал первый цикл. Если это сделано, тогда теория, также подобно инфляционной, разрешает ключевые космологические проблемы и задает направление стреле времени из низкоэнтропийного шлепка в направлении через ряд последовательных этапов, как на Рис. 13.8. Но, как полагают в настоящее время, циклическая модель не предлагает объяснения, как или почему вселенная находится в необходимой конфигурации Рис. 13.8. Почему, например, шесть измерений свернулись в особую форму Калаби-Яу, тогда как одно из дополнительных измерений послушно приняло форму пространственного сегмента, разделяющего две 3-браны? Как так получилось, что две 3-браны конца мира выстроились настолько совершенно и притягиваются друг к другу с точно правильной силой, чтобы этапы на Рис. 13.8 происходили так, как мы описали? И критическую важность имеет вопрос, что на самом деле происходит, когда две 3-браны сталкиваются в циклической модели Взрыва?

С этим последним вопросом есть надежда, что шлепок циклической модели менее проблематичен, чем сингулярность, с которой мы сталкиваемся в момент времени нуль в инфляционной космологии. Вместо того, чтобы все пространство было бесконечно сжато, в циклическом подходе только одно измерение между бранами сдавливается; сами браны испытывают общее расширение во время каждого цикла, а не сжатие. А это, как утверждают Стейнхардт, Турок и их соратники, подразумевает конечные температуры и конечные плотности на самих бранах. Но это очень шаткое заключение, поскольку до сих пор никто не был в состоянии предложить лучшие уравнения и обрисовать, что должно будет происходить, когда браны схлопываются вместе. Фактически, до сих пор завершенный анализ, направленный к шлепку бран, имеет ту же проблему, которая беспокоит инфляционную теорию в момент нуль: математика терпит неудачу. Таким образом, космология все еще нуждается в строгом разрешении ее сингулярного старта – будь это на самом деле старт вселенной или старт нашего текущего цикла.

Самое убедительное свойство циклической модели заключается в способе, которым она присоединяет темную энергию и наблюдаемое ускоренное расширение. В 1998, когда было открыто, что вселенная повержена ускоренному расширению, это было совершенным сюрпризом для большинства физиков и астрономов. Хотя это могло быть инкорпорировано в инфляционную космологическую картину путем предположения, что вселенная содержит точно правильное количество темной энергии, ускоренное расширение казалось подобным нескладному дополнению. Напротив, в циклической модели роль темной энергии естественная и стержневая. Триллионолетний период постепенного, но постоянно ускоряющегося расширения является решающим для вытирания грифельной доски начисто, для растворения наблюдаемой вселенной почти до полной пустоты, и для восстановления условий для подготовки нового цикла. С этой точки зрения как инфляционная модель, так и циклическая модель зависят от ускоренного расширения – инфляционная модель вблизи ее начала, а циклическая модель в конце каждого своего цикла, – но только последняя имеет прямое наблюдательное подтверждение. (Вспомним, что циклический подход построен так, что мы просто ввели триллионолетнюю фазу ускоренного расширения, а такое расширение было недавно обнаружено). Это лишь мгновение в башне циклической модели, но это также означает, что если вдруг прекращение ускоренного расширения подтвердиться будущими наблюдениями, инфляционная модель сможет это пережить (хотя загадка исчезновения 70 процентов энергетического бюджета вселенной вновь всплывет), а циклическая модель не сможет.

Новые взгляды на пространство-время

Сценарий мира на бране и циклическая космологическая модель, им порожденная, оба в высшей степени умозрительны. Я обсуждал их здесь не столько потому, что я определенно чувствую, что они корректны, сколько потому, что я хотел проиллюстрировать поразительные новые пути для размышления о пространстве, в котором мы обитаем, и испытываемой им эволюции, которые были инспирированы теорией струн/М-теорией. Если мы живем внутри 3-браны, столетней давности вопрос относительно материальности трехмерного пространства получит самый определенный ответ: пространство будет браной, а потому определенно будет чем-то. Это может также не быть чем-то особенно специальным, так как могут быть многие другие браны, разных размерностей, плавающие внутри многомерных просторов теории струн/М-теории. И если космологическая эволюция на нашей 3-бране подвергается повторяющимся столкновениям с соседней браной, время, как мы его знаем, будет отмерять только один из многих циклов вселенной, с одним Большим взрывом, следующим за другим, а затем следующим.

Для меня это взгляд, как возбуждает, так и приводит к смирению. Может иметься намного больше пространства и времени, чем мы предчувствовали; если они есть, то, что мы рассматриваем как "все сущее", может быть только малой составляющей намного более богатой реальности.

**V Реальность и воображение**

**14 Вверх в небеса и вниз на Землю**

***ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПРОСТРАНСТВОМ И ВРЕМЕНЕМ***

**М**ы прошли долгий путь со времен Эмпедокла из Агригенто, объяснявшего вселенную с использованием земли, воздуха, огня и воды. И большая часть прогресса, которого мы достигли от Ньютона через революционные открытия двадцатого столетия, была впечатляюще подтверждена экспериментальной проверкой детальных и точных теоретических предсказаний. Но с середины 1980х мы стали жертвой своего собственного успеха. С непрекращающимся побуждением отодвинуть пределы понимания все дальше наши теории вошли в области вне достижимости нашей сегодняшней технологии.

Тем не менее, с использованием старания и удачи многие идеи переднего фронта будут проверены в течение нескольких следующих десятилетий. Как мы будем обсуждать в этой главе, планируемые или идущие полным ходом эксперименты имеют потенциал больше прояснить вопросы о существовании дополнительных измерений, составе темной материи и темной энергии, происхождении массы и Хиггсовом океане, аспектах космологии ранней вселенной, существенности суперсимметрии и, возможно, достоверности самой теории струн. Итак, со значительной долей удачи некоторые умозрительные и инновационные идеи относительно объединения, природы пространства и времени и нашего космического происхождения могут в конце концов быть проверены.

Эйнштейн в захвате

В десятилетних попытках сформулировать ОТО Эйнштейн черпал вдохновение из многих источников. Самыми важными из всех были достижения в математике искривленных поверхностей, разработанные в девятнадцатом веке математическими светилами, включая Карла Фридриха Гаусса, Яноша Больяи, Николая Лобачевского и Георга Бернхарда Римана. Как мы обсуждали в Главе 3, Эйнштейн также был вдохновлен идеями Эрнста Маха. Вспомним, что Мах защищал реляционистскую концепцию пространства: в соответствии с ней пространство обеспечивает язык для определения положения объекта относительно других, но само оно не является независимой сущностью. Сначала Эйнштейн был чемпионом энтузиазма относительно точки зрения Маха, поскольку она была самой относительной, насколько может быть теория, поддерживающая относительность. Но когда Эйнштейн понял ОТО глубже, он осознал, что она не может полностью включить в себя идеи Маха. В соответствии с ОТО вода в Ньютоновском ведре, вращающемся в пустой во всех других отношениях вселенной, будет принимать искривленную форму, и это противоречит чистой реляционистской точке зрения Маха, поскольку она подразумевает абсолютное понятие ускорения. Даже в этих условиях ОТО включила в себя некоторые аспекты точки зрения Маха, и в течение следующих нескольких лет обсуждаемый ниже эксперимент более чем на 500 миллионов долларов, который был в разработке около сорока лет, будет проверять одну из самых известных особенностей идей Маха.

Изучаемая физика была известна с 1918, когда австрийские исследователи Джозеф Ленц и Ханс Тирринг использовали ОТО, чтобы показать, что точно так же, как массивный объект деформирует пространство и время, – как шар для боулинга, покоящийся на батуте, – так вращающийся объект увлекает пространство (и время) вокруг себя, как вращающийся камень, погруженный в ведро сиропа. Этот эффект известен как *системное увлечение (захват)* и подразумевает, например, что астероид, свободно падающий в направлении быстро вращающейся нейтронной звезды или черной дыры будет пойман в воронку вращающегося пространства и будет закручиваться вокруг, когда он путешествует в направлении вниз. Эффект называется системным увлечением, поскольку с точки зрения астероида – из его системы отсчета – он совсем не будет никуда закручиваться. Напротив, он падает прямо вниз вдоль пространственной решетки, но поскольку пространство кружится (как на Рис. 14.1), решетка будет изгибаться, так что понятие "прямо вниз" будет отличаться от того, что вы ожидали, основываясь на удаленной, незакрученной системе отсчета.



***Рис 14.1****Массивный вращающийся объект увлекает пространство – свободно падающую систему – вокруг себя.*

Чтобы увидеть связь с Махом, подумаем о версии системного увлечения, в которой массивный вращающийся объект есть огромная пустотелая сфера. Расчеты, инициированные в 1912 Эйнштейном (даже до завершения им ОТО), которые были существенно расширены в 1965 Дитером Бриллом и Джефри Коэном и окончательно завершены в 1985 немецкими физиками Пфистером и К. Брауном, показали, что пространство внутри полой сферы будет увлекаться вращательным движением и выстроится в воронкоподобный волчок.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_1" \o ) Если стационарное ведро, наполненное водой, – стационарное с точки зрения удаленного положения – будет помещено внутрь вращающейся сферы, расчеты показывают, что вращающееся пространство окажет силовое воздействие на стационарную воду, заставляя ее подниматься по стенкам ведра и принимать искривленную форму.

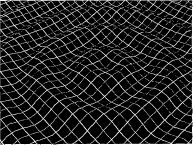
Этот результат безмерно порадовал бы Маха. Хотя он не мог иметь подобное описание в терминах "вращающегося пространства", – поскольку эта фраза описывает пространство-время как нечто, – он нашел бы его экстремально удовлетворяющим тому, что относительное вращательное движение между сферой и ведром вызывает изменения в форме воды. Фактически, для капсулы, которая содержит достаточно массы (в количестве на одном уровне с массой, содержащейся во всей вселенной), расчеты показывают, что не имеет никакого значения, считаете ли вы, что полая сфера вращается вокруг ведра или ведро вращается внутри полой сферы. Точно так же, как Мах отстаивал, что имеет значение только относительное движение между ними двумя. А поскольку расчеты, на которые я сослался, не используют ничего, кроме ОТО, это является явным примером несомненных маховских свойств теории Эйнштейна. (Тем не менее, в то время как стандартная аргументация Маха требовала, чтобы вода оставалась плоской, если ведро вращалось в бесконечной, пустой вселенной, ОТО с этим не согласна. Результаты Пфистера и Брауна показали, что достаточно массивная вращающаяся сфера в состоянии полностью блокировать обычное воздействие пространства, которое лежит вне самой сферы).

В 1960 Леонард Шифф из Стэнфордского Университета и Джордж Пью из Департамента обороны США независимо предположили, что предсказание ОТО системного увлечения может быть экспериментально проверено с использованием вращательного движения Земли. Шифф и Пью обнаружили, что в соответствии с ньютоновской физикой вращающийся гироскоп – вращающееся колесо, которое прикреплено к оси, – плавающий по орбите высоко над земной поверхностью, должен быть ориентирован в фиксированном и неизменном направлении. Но в соответствии с ОТО его ось должна чрезвычайно слабо вращаться вследствие увлечения пространства Землей. Поскольку масса Земли незначительна по сравнению с гипотетической полой сферой, использованной в приведенных выше вычислениях Пфистера и Брауна, степень системного увлечения, вызванного вращением Земли, будет ничтожной. Детальные расчеты показали, что если ось волчка гироскопа сначала направлена на выбранную контрольную звезду, годом позже слабо кружащееся пространство сдвинет направление его оси примерно на стотысячную долю градуса. Это угол, на который сдвигается секундная стрелка часов грубо за две миллионных доли секунды, так что обнаружение его представляет большую научную, технологическую и инженерную проблему.

Сорока годами разработок и примерно сотней докторских диссертаций позже ко Стэнфорда, руководимая Фрэнсисом Эвериттом и финансируемая НАСА, была готова запустить эксперимент. В течение следующих нескольких лет их спутник (Gravity Probe B – Гравитационный зонд В), плавающий в пространстве на высоте 400 миль и снабженный четырьмя самыми стабильными из когда либо построенных гироскопов, будет пытаться измерить системное увлечение, вызванное земным вращением. Если эксперимент будет успешным, это будет одно из самых точных из когда-либо достигнутых подтверждений ОТО, и это обеспечит первое прямое доказательство эффекта Маха.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_2" \o ) Не менее возбуждающей является возможность, что эксперимент обнаружит отклонения от предсказаний ОТО. Такая малая трещина в фундаменте ОТО может означать только, что мы нуждаемся в увеличении экспериментальных взглядов на до сих пор скрытые свойства пространства-времени.

Поимка волны

Существенным уроком ОТО является то, что масса и энергия вызывают деформацию ткани пространства; мы проиллюстрировали это на Рис. 3.10, показав искривленное окружение вокруг Солнца. Однако, имеется ограничение на такого рода рисунки, заключающееся в том, что они не годятся для иллюстрации, как пространственные деформации и искривления эволюционируют, когда масса и энергия двигаются или некоторым образом изменяют свою конфигурацию.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_3" \o ) ОТО предсказывает, что точно так же, как батут предполагает фиксированную, искривленную форму, если вы стоите совершенно спокойно, но перемещается, когда вы прыгаете вверх и вниз, пространство предполагает фиксированную искривленную форму, если материя полностью спокойна, как предложено на Рис. 3.10, но, когда материя двигается взад и вперед, возникает волнистая рябь на его ткани. Эйнштейн пришел к этому результату между 1916 и 1918, когда он использовал вновь полученные уравнения ОТО, чтобы показать, что, – почти как электрические заряды, двигающиеся вверх и вниз в радиопередающей антенне, производят электромагнитные волны (это то, как производятся радио и телевизионные волны), – движение материи есть способ и причина (как взрыв сверхновой) для производства гравитационных волн. А поскольку гравитация есть кривизна, гравитационная волна есть волна кривизны. Точно так же, как бросание булыжника в пруд генерирует распространяющиеся наружу водяные волны, вращающаяся по спирали материя генерирует расходящуюся во все стороны пространственную рябь; в соответствии с ОТО взрывы удаленных сверхновых подобны космическим булыжникам, брошенным в пространственно-временной пруд, как показано на Рис. 14.2. Рисунок освещает важную отличительную особенность гравитационной волны: в отличие от электромагнитной волны, волны звука или водяной волны – волн, которые путешествуют по пространству, – гравитационные волны путешествуют внутри пространства. Они представляют собой путешествующие искажения в геометрии самого пространства.



***Рис 14.2****Гравитационные волны являются рябью в ткани пространства-времени.*

Хотя гравитационные волны являются теперь общепринятым предсказанием ОТО, на многие годы этот предмет погряз в замешательстве и разногласиях, по меньшей мере, в части, следующей приверженности философии Маха. Если ОТО полностью включает в себя идеи Маха, тогда "геометрия пространства" будет просто общепринятым языком для выражения положения и движения одного массивного объекта по отношению к другим. Пустое пространство при таком образе мыслей будет пустым понятием, так как можно осмысленно говорить об искажении пустого пространства? Многие физики пытались доказать, что предложенные волны в пространстве означают ошибочное истолкование математики ОТО. Но при должном подходе теоретический анализ сводился к корректному заключению: гравитационные волны реальны и пространство может колебаться.

С каждым проходящим пиком и впадиной искаженная гравитационной волной геометрия будет растягивать пространство – и все в нем находящееся – в одном направлении, а затем сжимать пространство – и все в нем находящееся – в перпендикулярном направлении, как в чрезвычайно преувеличенном виде изображено на Рис. 14.3. В принципе, вы можете обнаружить прохождение гравитационной волны, периодически измеряя расстояния между различными положениями, и найти, что отношение между этими расстояниями каждое мгновение изменяется.

На практике никто не смог сделать этого, так что никто непосредственно не обнаружил гравитационную волну. (Однако, имеются убедительные косвенные доказательства для существования гравитационных волн[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_4" \o )). Трудность в том, что возмущающее воздействие проходящей гравитационной волны обычно очень мало. Атомная бомба, взорванная на атолле Тринити 16 июля 1945, содержала энергию, эквивалентную 20 000 тонн тринитротолуола и была столь яркой, что свидетели, удаленные на мили, носили защиту для глаз, чтобы избежать серьезного повреждения зрения от сгенерированной ей электромагнитной волны.



***Рис 14.3****Проходящая гравитационная волна растягивает объект сначала одним, а потом другим образом. (В этом представлении масштаб искажения типичной гравитационной волны чудовищно преувеличен).*

Однако, даже если бы вы стояли прямо под стофутовой стальной башней, на которую была поднята бомба, гравитационные волны, произведенные ее взрывом, смогли бы растянуть ваше тело тем или иным образом только на ничтожную долю атомного диаметра. Настолько сравнительно слабы гравитационные возмущения, и это дает слабое представление о технологических проблемах, связанных с их обнаружением. (Поскольку гравитационные волны также могут мыслиться как гигантское число гравитонов, путешествующих скоординированным образом, – точно так же, как электромагнитная волна есть объединение гигантского количества скоординированных фотонов, – это также дает намек на то, насколько тяжело обнаружить отдельный гравитон).

Конечно, нам не особенно интересно детектировать гравитационные волны, произведенные ядерным оружием, но ситуация с астофизическими источниками не намного легче. Чем ближе и более массивен астрофизический источник и чем более энергичному и неистовому движению он подвержен, тем более сильные гравитационные волны мы можем получить. Но даже если звезда на расстоянии 10 000 световых лет становится сверхновой, результирующая гравитационная волна, достигающая Земли, будет растягивать метровой длины палку только на миллионную миллиардной доли сантиметра, лишь на сотни размеров атомных ядер. Так что, за исключением некоторого в высшей степени неожиданного астрофизического явления, в полном смысле слова с параметрами катаклизма, которое произойдет относительно близко, обнаружение гравитационных волн потребует аппаратуры, способной откликаться на фантастически малые изменения длины.

Ученые, которые спроектировали и построили Обсерваторию Гравитационных Волн на Лазерном Интерферометре (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory* – LIGO) (запущенную совместно Калифорнийским Технологическим Институтом и Массачусетским Технологическим Институтом и финансируемую Национальным Фондом Науки), ответили на вызов. LIGO является впечатляющей установкой, а ожидаемая чувствительность поразительна. Она состоит из двух полых труб, каждая четырехкилометровой длины и чуть более метра ширины, которые расположены в виде гигантской буквы L. Лазерный свет, одновременно запущенный в вакуумный тоннель внутри каждой трубы и отраженный назад сильно отполированными зеркалами, используется для измерения относительной длины каждой трубы с фантастической точностью. Идея в том, что когда гравитационная волна проходит мимо, она будет растягивать одну трубу относительно другой, и если растяжение достаточно велико, ученые будут в состоянии обнаружить его.

Трубы длинные, поскольку растяжение и сжатие, совершаемое гравитационной волной, складывается по длине объекта. Если гравитационная волна растянула что-либо четырехметровой длины, скажем, на 10–20 метра, она растянет нечто четырехкилометровой длины на 10–17 метра. Так что, чем длиннее наблюдаемый размах, тем легче обнаружить изменения его длины. Чтобы извлечь выгоду из этого, экспериментаторы LIGO на самом деле направляют лазерные лучи отражаться туда и сюда между зеркалами на противоположных концах каждой трубы более чем сто раз за каждый пробег, повышая отслеживаемое расстояние в оба конца примерно до 800 километров на луч. С такими хитрыми уловками и инженерным мастерством LIGO должна быть в состоянии обнаружить любое изменение в длинах труб, которое меньше толщины человеческого волоса в триллион раз – в сто миллионов размеров атома.

Да, на самом деле имеются два таких L-образных прибора. Один в Ливингстоне, Луизиана, а другой примерно на расстоянии 2 000 миль в Хэнфорде, Вашингтон. Если гравитационная волна от некоторого удаленного астрофизического катаклизма докатится до Земли, она повлияет идентично на каждый детектор, так что любая волна, захваченная одним экспериментом, также хорошо проявится и в другом. Это важная проверка состоятельности, поскольку при всех предосторожностях, которые были предприняты, чтобы защитить детекторы, возмущения повседневной жизни (громыхание проходящего грузовика, скрежет пилы, толчок от падающего дерева и так далее) могут быть приняты за гравитационные волны. Требование соответствия между удаленными детекторами обеспечивает исключение таких ложных проявлений.

Исследователи также аккуратно рассчитали частоты гравитационных волн – число пиков и впадин, которые должны проходить через их детектор каждую секунду, – которые, как они ожидают, производятся широким спектром астрофизических явлений, включая взрывы сверхновых, вращательное движение несферических нейтронных звезд, столкновения между черными дырами. Без этой информации экспериментаторы искали бы иголку в стоге сена; с ней они могут сфокусировать детекторы на четко определенные области частот, представляющих физический интерес. Любопытно, что расчеты показывают, что некоторые частоты гравитационных волн должны быть в диапазоне нескольких тысяч циклов в секунду; если бы это были волны звука, они были бы прямо в области слышимости человеческого уха. Сливающиеся нейтронные звезды должны звучать подобно чириканью с быстро возрастающей высотой звука, тогда как пара сталкивающихся черных дыр будут подражать трели воробья, который получил резкий удар по клетке. Такова напоминающая джунгли какофония гравитационных волн, колеблющихся сквозь ткань пространства-времени, и если все пойдет по плану, LIGO будет первым инструментом для настройки на нее.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_5" \o )

Что делает все это столь возбуждающим, так это то, что гравитационные волны максимизируют выгоды от двух главных свойств гравитации: ее слабости и ее вездесущности. Среди всех четырех сил гравитация взаимодействует с материей наиболее слабо. Это приводит к тому, что гравитационные волны могут проходить через материал, который непроницаем для света, давая доступ к астрофизическим областям, ранее скрытым. Более того, поскольку все подвержено действию гравитации (в то время как, например, электромагнитные силы влияют только на объекты, несущие электрический заряд), все имеет способность генерировать гравитационные волны, а потому производить наблюдаемые характерные черты. Поэтому LIGO отмечает существенный поворотный пункт на нашем пути исследования космоса. Было время, когда все, что мы могли сделать, это поднять наши глаза и пристально вглядеться в небо. В семнадцатом столетии Ганс Липпершей и Галилео Галилей изменили это; с помощью телескопа великий вид космоса вошел в человеческий кругозор. Но со временем мы осознали, что видимый свет представляет узкую область электромагнитных волн. В двадцатом столетии с помощью телескопов на инфракрасном, радио, ренгеновском и гамма-излучении космос открылся нам заново, обнаружив чудеса, не видимые на длинах волн света, который воспринимают наши глаза. Теперь, в двадцать первом веке мы открываем небеса еще раз. С LIGO и следующими за ним усовершенствованиями\* мы будем видеть космос совершенно новым способом. Вместо того, чтобы использовать электромагнитные волны, мы будем использовать гравитационные волны; вместо того, чтобы использовать электромагнитные силы, мы будем использовать гравитационные силы.

*(\*) "Одним из таких приборов является Пространственная Антенна на Лазерном Интерферометре (Laser Interferometer Spase Antenna – LISA), расположенная в пространстве версия LIGO, включающая в себя многочисленные космические корабли, разделенные миллионами километров, играющие роль четырехкилометровых труб LIGO. LIGO также будет работать сообща с VIRGO, французско-итальянским детектором гравитационных волн, расположенным за пределами города Пиза."*

Чтобы оценить, насколько эта новая технология может быть революционной, представим мир, в котором неземные ученые только сейчас открыли, как обнаруживать электромагнитные волны – свет – и размышляют о том, насколько их взгляд на вселенную тотчас же основательно изменится. Мы находимся на грани нашего первого обнаружения гравитационных волн, так что вполне можем быть в сходной позиции. Тысячелетиями мы всматривались в космос; теперь, как будто впервые в человеческой истории, мы будем слушать его.

Охота за дополнительными размерностями

До 1996 большинство теоретических моделей, которые включали в себя дополнительные размерности, представляли, что их пространственная протяженность грубо соответствует планковской (10–33 сантиметра). Так как это на семнадцать порядков величины меньше, чем любое разрешение, которое можно получить, используя применяющееся в настоящее время оборудование, без открытия сверхъестественной новой технологии планковская физика будет оставаться вне экспериментальной досягаемости.

Но если дополнительные внешние размерности являются "большими", что означает больше, чем сотая миллиардной миллиардной (10–20) метра, примерно миллионная часть размера атомных ядер, тогда есть надежда.

Как мы обсуждали в Главе 13, если любое из дополнительных измерений "очень большое" – в пределах нескольких порядков от величины миллиметра – точность измерений силы гравитации должна обнаружить их существование. Такие эксперименты несколько лет идут на полном ходу и техника быстро усовершенствуется. До сих пор не было найдено отклонений от закона обратного квадрата, характеризующего три пространственных измерения, так что исследователи активно продолжили работу в направлении меньших расстояний. Положительный сигнал был бы, чтобы не сказать больше, потрясением оснований физики. Он обеспечил бы убедительное доказательство дополнительных размерностей, доступных только для гравитации, что дало бы сильную обстоятельную поддержку сценарию мира на бране в теории струн/М-теории.

Если дополнительные измерения большие, но не очень большие, маловероятно, что точность гравитационных экпериментов обнаружит их, но другие непрямые подходы остаются применимыми. Например, мы отмечали ранее, что большие дополнительные измерения будут подразумевать, что внутренняя сила гравитации больше, чем ранее думалось. Наблюдаемая слабость гравитации может быть атрибутом ее утечки в дополнительные измерения, а не ее фундаментальной слабости; на масштабах коротких расстояний, прежде чем такая утечка возникает, гравитация может быть сильной. Среди других проявлений это означает, что создание мельчайших черных дыр будет требовать намного меньшей массы и энергии, чем это нужно во вселенной, в которой гравитация в действительности намного слабее. В Главе 13 мы обсуждали возможность, что такие микроскопические черные дыры могут производится при высокоэнергетических протон-протонных столкновениях на Большом Адронном Коллайдере (LHC), ускорителе частиц, в настоящее время конструируемом в Женеве, Швейцария, и планируемом к готовности в 2007. Это захватывающая перспектива. Но имеется другая соблазнительная возможность, которая была озвучена Альфредом Шапере из Университета Кентукки и Джонатаном Фенгом из Университета Калифорнии в Ирвине. Эти исследователи заметили, что космические лучи – элементарные частицы, которые текут через пространство и постоянно бомбардируют нашу атмосферу, – могут также инициировать производство микроскопических черных дыр.

Частицы космических лучей были открыты в 1912 австрийским ученым Виктором Гессом; более чем девятью десятилетиями позже они все еще представляют много загадок. Каждую секунду космическое излучение вторгается в атмосферу и инициирует каскад миллиардов частиц, дождем падающих вниз, которые проходят сквозь ваше и мое тело; некоторые из них обнаруживаются различными специальными инструментами по всему миру. Но никто полностью не уверен, какие виды частиц составляют запечатленные космические лучи (хотя имеется растущий консенсус, что это протоны), и, несмотря на факт, что некоторые из этих высокоэнергетических частиц наверняка приходят от взрывов сверхновых, никто не имеет идеи, откуда происходит самое высокоэнергетическое космическое излучение. Например, 15 октября 1991 детектор космических лучей Летающий глаз (*Fly's Eye*) в пустыне Юта измерил след частицы через небо с энергией, эквивалентной 30 миллиардам масс протона. Это почти такая же большая энергия в отдельной субатомной частице, как в ударе по мячу бейсболиста Мариано Риверы, и примерно в 100 миллионов раз превышает энергии частиц, которые будут производиться в LHC.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_6" \o )Загадочная вещь, что не известно астрофизического процесса, который мог бы произвести частицы с такой высокой энергией; экспериментаторы собирают больше данных с помощью более чувствительных детекторов в надежде решить загадку.

Шапере и Фенга происхождение сверхэнергичных частиц космических лучей заботило во вторую очередь. Они осознали, что безотносительно к тому, откуда взялись такие частицы, если гравитация на микроскопическом масштабе намного сильнее, чем некогда считалось, самые высокоэнергетические частицы космических лучей могут иметь вполне достаточно энергии, чтобы создать мельчайшие черные дыры, когда эти частицы яростно вторгаются в верхнюю атмосферу.

Как и с их производством в атомных ускорителях, такие мельчайшие черные дыры не будут представлять абсолютно никакой опасности для экспериментаторов или мира в целом. После их создания они быстро распадутся, послав вовне каскад других, более обыкновенных частиц. Фактически, микроскопические черные дыры будут настолько короткоживущими, что экспериментаторы не смогут найти их непосредственно; напротив, они будут искать доказательство черных дыр через детальные исследования результирующих частиц, дождем падающих на их детекторы. Самый чувствительный из детекторов космических лучей мира, обсерватория Пьера Аугера, – вместе с наблюдающей областью размером порядка Род Айленда, – строится в настоящее время в обширной вытянутой местности в западной Аргентине. Шапере и Фенг оценивают, что если все внешние размерности имеют величину порядка 10–14 метра, тогда после года сбора данных детектор Аугера увидит характеристические обломки частиц от примерно дюжины мельчайших черных дыр, произведенных в верхней атмосфере. Если такие отметки черных дыр не будут найдены, эксперимент даст заключение, что внешние размерности еще меньше. Поиск остатков черных дыр, произведенных столкновениями космических лучей, определенно является рискованной ставкой, но успех открыл бы первое экспериментальное окно к дополнительным размерностям, черным дырам, теории струн и квантовой гравитации.

Вне производства черных дыр имеется другой, основанный на ускорителях путь, на котором исследователи могут искать внешние размерности в течение следующих десяти лет. Идея заключается в усложненном варианте трактовки "пространства-между-диванными-подушками" для потерянной монеты, выпавшей из вашего кармана.

Центральный принцип физики есть сохранение энергии. Энергия может проявлять себя в различных формах – кинетическая энергия движения мяча, когда он улетает от бейсбольной биты, гравитационная потенциальная энергия, когда мяч взлетел вверх, энергия звука и тепла, когда мяч падает на грунт и возбуждает все виды колебательного движения, энергия массы, которая замкнута внутри самого мяча, и так далее, – но когда все носители энергии оценены, количество, с которым вы закончите всегда равно количеству, с которым вы начали.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_7" \o ) На сегодняшний день нет эксперимента, нарушающего этот закон совершенного энергетического баланса.

Но в зависимости от точного размера гипотетических внешних измерений эксперименты с высокими энергиями, которые будут проводиться с вновь усовершенствованным оборудованием в Фермилабе и на Большом Адронном Коллайдере (LHC) могут обнаружить процессы, которые покажут нарушение сохранения энергии: энергия в конце столкновения может быть меньше, чем энергия в начале. Причина в том, что, почти похоже на потерянные монетки, энергия (уносимая гравитонами) может просачиваться в трещину – мельчайшее дополнительное пространство, – обеспеченную дополнительными измерениями и потому нечаянно упущенную при вычислениях оцениваемой энергии. Возможность такого "сигнала потери энергии" обеспечивает еще один способ для установления, что ткань космоса намного сложнее, чем мы можем видеть непосредственно.

Несомненно, когда речь заходит о дополнительных размерностях, я предубежден. Я работал над аспектами дополнительных размерностей более пятнадцати лет, так что они занимают особое место в моем сердце. Но, с этой верой, как описателю, мне тяжело представить открытие, которое было бы более завораживающим, чем находка доказательства измерений за пределами трех, к которым мы все привыкли. По моему мнению, в настоящее время нет другого серьезного предположения, чье подтверждение так основательно потрясет основы физики и так полно установит, что мы должны быть готовы к вопросам, относящимся к кажущимся самоочевидными элементам реальности.

Хиггс, суперсимметрия и теория струн

Помимо научных попыток поиска неизвестного и шансов нахождения доказательства дополнительных размерностей, имеется пара специфических мотивов для недавнего обновления ускорителя в Фермилабе и для строительства мамонта – Большого Адронного Коллайдера. Один заключается в поиске частиц Хиггса. Как мы обсуждали в Главе 9, неуловимые частицы Хиггса должны быть мельчайшими составляющими поля Хиггса – поля, которое по предположениям физиков формирует Хиггсов океан и через это придает массу другим фундаментальным семействам частиц. Сегодняшние теоретические и экспериментальные изыскания предполагают, что Хиггс должен иметь массу в диапазоне от ста до тысячи масс протона. Если нижний предел этого диапазона окажется правильным, то Фермилаб имеет достаточно хорошие шансы открытия частицы Хиггса в ближайшем будущем. И определенно, если Фермилаб потерпит неудачу и если оценка диапазона масс, тем не менее, точна, Большой Адронный Коллайдер должен произвести частицы Хиггса в изобилии к концу десятилетия. Обнаружение частиц Хиггса будет важнейшей вехой, так как оно подтвердит существование семейств полей, которые теоретическая практика физиков и космологов вызвала к жизни десятилетия назад без какого-либо экспериментального доказательства.

Другая главная цель как Фермилаба, так и Большого Адронного Коллайдера заключается в обнаружении доказательства суперсимметрии. Повторим из Главы 12, что суперсимметричные пары частиц, чьи спины отличаются на половинку единицы, являются идеей, которая исходно появилась из исследований теории струн в начале 1970х. Если супперсимметрия имеет место в реальном мире, то для каждого из известных видов частиц со спином-1/2 должны существовать виды-партнеры со спином-0; для каждого из известных видов частиц со спином-1 должны существовать виды-партнеры со спином-1/2. Например, для электрона со спином-1/2 должна существовать частица со спином-0, называемая суперсимметричным электроном или, для краткости, сэлектроном; для кварков со спином-1/2 должны существовать суперсимметричные кварки со спином-0 или скварки; для нейтрино со спином-1/2 должны существовать снейтрино со спином-0; для глюонов, фотонов и W- и Z-частиц со спином-1 должны существовать глюино, фотино и вино и зино со спином-1/2. (Да, физики вошли в раж).

Никто никогда не детектировал любой из этих обозначенных двойников, а объяснение в том (физики надеются, скрестив пальцы), что суперсимметричные частицы тяжелее, чем их известные дубликаты. Теоретические рассмотрения наводят на мысль, что суперсимметричные частицы должны быть в тысячи раз тяжелее протона, и в этом случае их отсутствие в экспериментальных данных не должно быть удивительным: существующие атомные ускорители не имеют адекватной мощи, чтобы произвести их. В пришедшем десятилетии это изменится. Уже заново обновленный ускоритель в Фермилабе имеет шанс открыть некоторые суперсимметричные частицы. И, как и с Хиггсом, если Фермилаб не сможет найти доказательств суперсимметрии и если ожидаемый диапазон масс суперсимметричных частиц достаточно корректен, Большой Адронный Коллайдер должен произвести их с легкостью.

Подтверждение суперсимметрии будет самым важным достижением в физике элементарных частиц более чем за два десятилетия. Оно установит следующий этап в нашем понимании физики частиц за пределами успешной стандартной модели и обеспечит обстоятельное доказательство того, что теория струн следует правильному пути. Но заметим, что это не подтвердит саму теорию струн. Даже если суперсимметрия была открыта в ходе разработки теории струн, физики с тех пор давно осознают, что суперсимметрия более общий принцип, который может быть легко включен в традиционные подходы с точечными частицами. Подтверждение суперсимметрии должно установить необходимый элемент струнной схемы и должно задать следующие исследования, но оно не является "дымящимся пистолетом" теории струн.

С другой стороны, если сценарий мира на бране корректен, грядущие эксперименты на ускорителях имеют потенциал подтверждения теории струн. Как отмечалось коротко в Главе 13, если внешние измерения в сценарии мира на бране окажутся больше 10–16 сантиметра, то не только гравитация должна быть внутренне сильнее, чем мы ранее думали, но струны также должны быть существенно больше. Поскольку более длинные струны менее жесткие, они требуют меньше энергии, чтобы колебаться. В то время как в общепринятой струнной схеме колебательные моды струны должны иметь энергии, которые более чем в миллион миллиардов раз выходят за пределы досягаемости наших экспериментов, в сценарии мира на бране энергии колебательных мод струны могут быть также малы, как тысячи протонных масс. При таком раскладе высокоэнергетические столкновения в Большом Адронном Коллайдере будут близки к хорошо посланному мячу для гольфа, который рикошетирует внутри пианино; столкновения будут иметь достаточно энергии, чтобы возбудить многие "октавы" колебательных мод струны. Эксперименты будут обнаруживать богатство новых, никогда ранее не виданных частиц, – что означает, новых, никогда ранее не виданных колебательных мод струны, – чьи энергии будут соответствовать гармоническим резонансам струнной теории.

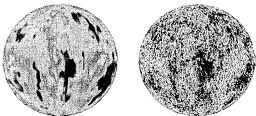
Свойства этих частиц и взаимосвязи между ними будут безошибочно показывать, что все они являются частью одной и той же космической партитуры, что все они суть различные, но связанные ноты, что все они являются особыми колебательными модами одного вида объектов – струн. В обозримом будущем это наиболее вероятный сценарий для прямого подтверждения теории струн.

Космические истоки

Как мы говорили в предыдущих главах, космическое микроволновое фоновое излучение играет доминирующую роль в космологических исследованиях с момента его открытия в середине 1960х. Причина ясна: на ранних этапах вселенной пространство было заполнено смесью электрически заряженных частиц – электронов и протонов, – которые с помощью электромагнитного взаимодействия непрерывно испускали и поглощали фотоны сюда и туда. Но всего через 300 000 лет после Взрыва вселенная охладилась достаточно, чтобы электроны и протоны соединились в электрически нейтральные атомы, – и дальше с этого момента радиация путешествует сквозь пространство большей частью беспрепятственно, обеспечив четкую мгновенную фотографию ранней вселенной. Имеется грубо 400 миллионов этих первичных фотонов космического микроволнового излучения, нетронутых реликтов ранней вселенной, рассеянных в каждом кубическом метре пространства.

Начальные измерения микроволновой фоновой радиации определили, что ее температура в высшей степени однородна, но, как мы обсуждали в Главе 11, более пристальная проверка, впервые выполненная в 1992 Зондом Космического Фона (*Cosmic Background Explorer* – COBE) и с тех пор усовершенствованная большим числом наблюдений, нашла доказательство малых температурных вариаций, как показано на Рис 14.4а. Данные отмечены серым со светлыми и темными пятнами, показывающими температурные вариации примерно в несколько десятитысячных градуса. Неровности рисунка показывают мелкие, но неопровержимо реальные неровности температуры радиации по небу.

Хотя это впечатляющее открытие само по себе, эксперимент COBE также обозначил фундаментальное изменение в характере космологических исследований. До COBE космологические данные были грубыми. Напротив, космологическая теория считалась жизнеспособной, если она могла соответствовать приблизительным особенностям астрономических наблюдений. Теоретики могли предлагать схему за схемой лишь с минимальным анализом соответствия наблюдательным ограничениям. Тогда просто не было достаточного количества наблюдательных ограничений, а те, которые существовали, не были особенно точными. Но COBE инициировал новую эру, в которой стандарты ощутимо ужесточились. Теперь имеется растущий ком точных данных, с которыми теория должна успешно справляться, даже чтобы быть просто рассмотренной. В 2001 был запущен спутниковый Зонд Микроволновой Анизотропии имени Вилкинсона (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* – WMAP), совместный венчурный проект НАСА и Принстонского Университета, чтобы измерять микроволновое фоновое излучение с примерно в сорок раз большим разрешением и чувствительностью, чем у COBE.



(а) (b)

***Рис 14.4****(а) Данные по космической микроволновой фоновой радиации, собранные спутником COBE. Радиация свободно путешествовала сквозь пространство с момента примерно 300 000 лет после Большого взрыва, так что эта картина представляет мельчайшие температурные вариации, существовавшие во вселенной около 14 миллиардов лет назад. (b) Усовершенствованные данные, собранные спутником WMAP.*

Сравнивая начальные результаты WMAP, Рис. 14.4b, с результатами COBE, Рис.14.4а, вы можете немедленно увидеть, насколько более точную и более детальную картину смог обеспечить WMAP. Другой спутник, Планк (*Plank*), который разрабатывается Европейским Космическим Агентством, планируется к запуску в 2007 и, если все пойдет по плану, будет лучше WMAP по разрешению во много раз.

Наплыв точных данных просеивал поле космологических предположений, среди которых инфляционная модель является, несомненно, ведущим игроком. Но, как мы отмечали в Главе 10, инфляционная космология не однозначная теория. Теоретики предложили много различных вариаций (стоит просто перечислить несколько: старая инфляция, новая инфляция, теплая инфляция, гибридная инфляция, гиперинфляция, вспомогательная инфляция, вечная инфляция, расширенная инфляция, хаотическая инфляция, двойная инфляция, маломасштабная инфляция, гипернатуральная инфляция), каждая из которых содержит признак короткого взрыва и быстрого расширения, но все отличаются в деталях (в числе полей и форме их потенциальной энергии, в том, какие поля усаживаются на энергетическое плато, и так далее). Эти различия выдают слабо отличающиеся предсказания для свойств микроволновой фоновой радиации (разные поля с разными энергиями имеют слабо различающиеся квантовые флуктуации). Сравнение с данными WMAP и Plank должно быть способным отсеять многие предложения, существенно уточнив наше понимание.

Фактически, данные могут сузить поле предположений еще дальше. Хотя квантовые флуктуации, растянутые инфляционным расширением, обеспечивают убедительное объяснение наблюдаемым вариациям температуры, эта модель имеет соперника. Циклическая космологическая модель Стейнхардта и Турока, описанная в Главе 13, предлагает альтернативный взгляд. Когда две 3-браны циклической модели медленно направляются друг к другу, квантовые флуктуации будут подвергать воздействию различные части бран в слабо различающихся степенях. Когда браны в конце концов сталкиваются, грубо триллионом лет позже, различные области на бранах будут контактировать в слабо отличающиеся моменты, до некоторой степени как два куска шершавой наждачной бумаги, схлопнувшиеся друг с другом. Мельчайшие отклонения от совершенно однородного столкновения дадут мельчайшие отклонения от совершенно однородной эволюции на каждой бране. Поскольку одна из этих бран предполагается нашим трехмерным пространством, отклонения от однородности являются отклонениями, которые мы должны быть в состоянии обнаружить. Стейнхардт, Турок и их соратники доказывали, что неоднородности генерируют отклонения температуры такой же формы, как это появляется из инфляционной схемы, а потому с сегодняшними данными циклическая модель предлагает эквивалентно жизнеспособное объяснение наблюдениям.

Однако, более уточненные данные, которые будут собраны в течение следующих десяти лет, могут найти различие между двумя подходами. В инфляционной схеме не только квантовые флуктуации поля инфлатона растягиваются взрывом экспоненциального расширения, но и мельчайшая квантовая рябь в пространственной ткани также генерируется при интенсивном внешнем растягивании. Поскольку рябь в пространстве является ничем иным, как гравитационными волнами (как в нашей недавней дискуссии про LIGO), инфляционная схема предсказывает, что гравитационные волны производились в ранние моменты вселенной.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_8" \o ) Их часто называют изначальные гравитационные волны, чтобы отличить их от волн, которые генерируются более недавними интенсивными астрофизическими событиями. В циклической модели, в отличие от этого, отклонения от совершенной однородности строятся медленно, в течение почти непостижимого промежутка времени, пока браны тратят триллион лет, медленно направляясь к их следующему шлепку. Отсутствие резких и энергичных изменений в геометрии бран и в геометрии пространства означает, что пространственная рябь не генерируется, так что циклическая модель предсказывает отсутствие изначальных гравитационных волн. Таким образом, если изначальные гравитационные волны удастся обнаружить, это будет еще одним триумфом инфляционной схемы и определенно исключит циклический подход.

Маловероятно, что LIGO будет достаточно чувствительным, чтобы обнаружить предсказанные инфляцией гравитационные волны, но возможно, что они будут наблюдаться косвенно или с помощью Plank, или с помощью другого спутникового эксперимента, названного экспериментом по Поляризации Космического Микроволнового Фона (*Cosmic Microwave Background Polarization* – CMBPol), который сейчас планируется. Plank и CMBPol, в особенности, не будут сфокусированы исключительно на температурных вариациях микроволнового фонового излучения, но также будут измерять поляризацию, направления среднего спина обнаруженных микроволновых фотонов. Через цепочку аргументов, слишком запутанных, чтобы их раскрывать здесь, это приводит к тому, что гравитационные волны от Взрыва должны оставить особый отпечаток на поляризации микроволнового фонового излучения, возможно отпечаток достаточно большой, чтобы быть измеренным.

Так что в течение десятилетия мы можем быстро получить ответ на вопрос, был ли Взрыв на самом деле шлепком, и является ли вселенная, о которой мы осведомлены, на самом деле 3-браной. В золотую эру космологии некоторые из самых диких идей могут быть на самом деле проверяемы.

Темная материя, темная энергия и будущее вселенной

В Главе 10 мы ознакомились со строгим теоретическим и экспериментальным доказательством, установившим, что не более чем 5 процентов массы вселенной происходит от составляющих, найденных в привычной материи, – протонов и нейтронов (электроны оцениваются менее, чем в 0,05 процента от массы обычной материи), – тогда как 25 процентов происходит от темной материи и 70 процентов от темной энергии. Но здесь все еще есть существенная неопределенность относительно идентификации всей этой темной мешанины. Естественная гипотеза заключается в том, что темная материя также составлена протонами и нейтронами, теми, которые как-то избежали совместного слипания в форме эмитирующих свет звезд. Но другие теоретические рассмотрения делают эту гипотезу очень маловероятной. Через детальные наблюдения астрономы имеют ясное знание о среднем относительном распространении легких элементов – водорода, гелия, дейтерия и лития, – которые рассеяны по всему космосу. До высокой степени точности соответствие их распространения теоретическим расчетам процессов приводит к уверенности, что эти ядра были синтезированы в течение первых нескольких минут вселенной. Это согласие является одним из величайших успехов современной теоретической космологии. Однако, эти расчеты предполагают, что объем темной материи не составлен из протонов и нейтронов; если на космологических масштабах протоны и нейтроны были бы доминирующими составляющими, существующий космический рецепт был бы отброшен и расчеты выдали бы результаты, которые исключаются наблюдениями.

Итак, если не протоны и нейтроны, то что составляет темную материю?

До сегодняшнего дня никто не знает, но нет недостатка в предположениях. Имена кандидатов пробегают диапазон от аксионов до зино, и любой, нашедший ответ, несомненно, будет оплачивать визит в Стокгольм. То, что никто еще не обнаружил частиц темной материи, устанавливает существенные ограничения на любое предположение. Причина в том, что темная материя не только расположена в удаленном пространстве; она распределена по всей вселенной, так что должна также доносится до нас здесь, на Земле. В соответствии со многими предположениями прямо сейчас миллиарды частиц темной материи простреливают ваше тело каждую секунду, так что жизнеспособными кандидатами являются только такие частицы, которые могли бы проникать через объемную материю не оставляя существенных следов.

Нейтрино являются одной из возможностей. Расчеты оценивают их реликтовое распространение со времен их производства в Большом взрыве в примерно 55 миллионов на кубический метр пространства, так что, если окажется, что один из трех видов нейтрино весит около одной сотой от миллионной (10–8) доли массы протона, они смогут заместить темную материю. Хотя недавние эксперименты дали сторогое доказательство, что нейтрино имеют массу, в соответствии с сегодняшними данными они слишком легкие, чтобы выполнить роль темной материи; они не дотягивают до нужной отметки на фактор более чем сто.

Другое перспективное предложение привлекает суперсимметричные частицы, особенно фотино, зино и хиггсино (партнеров фотона, Z-частицы и Хиггса). Это наиболее сдержанные суперсимметричные частицы, – они могут невежливо проходить через всю Землю без малейшего влияния на их движение, – а потому могут легко избежать детектирования.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_9" \o ) Из расчетов, как много таких частиц могло бы быть произведено в Большом взрыве и сохраниться до сегодняшнего дня, физики оценивают, что они должны иметь массу порядка от 100 до 1 000 масс протона, чтобы заместить темную материю. Это интригующее число, поскольку различные изыскания моделей суперсимметричных частиц, точно так же, как теории суперструн, приходят к тому же диапазону масс для этих частиц без какой-либо связи с темной материей и космологией. Это должно быть загадочное и полностью необъяснимое совпадение, если, конечно, темная материя на самом деле состоит из суперсимметричных частиц. Так что поиски суперсимметричных частиц на сегодняшних и приходящих к ним на смену ускорителях могут также выглядеть как поиски самых вероятных кандидатов на темную материю.

Более прямые поиски частиц темной материи, текущих сквозь Землю, также будут на полном ходу через некоторое время, хотя это экстремально трудные эксперименты. Из миллиона или около того частиц темной материи, которые должны проходить через область размером с квартал города каждую секунду, не более одной частицы в день должно оставить какое-либо доказательство в специально разработанном оборудовании, которое многие экспериментаторы выстроили, чтобы обнаружить их. На сегодняшний день подтвержденных обнаружений частиц темной материи не достигнуто.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_14_10" \o ) Поскольку приз все еще очень высоко в воздухе, исследователи продвигаются вперед со все большей интенсивностью. Имеется некоторая возможность, что в течение нескольких следующих лет задача идентификации темной материи будет решена.

Окончательное подтверждение, что темная материя существует, и прямое определение ее состава будет большим достижением. Впервые в истории мы сможем узнать нечто, что является одновременно полностью фундаментальным и необычайно неуловимым: строение значительной части материального содержимого вселенной.

Тем не менее, как мы говорили в Главе 10, недавние данные строго указывают, что даже при идентификации темной материи все еще имеется существенный кусок требуемых ухищрений в объяснении эксперимента: наблюдения сверхновых, которые дают доказательство расталкивающей космологической константы, составляющей до 70 процентов полной энергии во вселенной. Как самое захватывающее и неожиданное открытие последнего десятилетия, доказательство космологической константы – энергии, которая наполняет пространство, – требует убедительного завершающего подтверждения. Большое число подходов планируется или уже осуществляется.

Эксперименты по микроволновому фону и здесь играют важную роль. Размер пятен на Рис. 14.4 – где, еще раз, каждое пятно есть область однородной температуры, – освещает общую форму пространственной ткани. Если пространство имеет форму вроде сферы, как на Рис 8.6а, раздувание вовне будет приводить к тому, что пятна будут несколько больше, чем они есть на Рис.14.4b; если пространство имеет форму вроде седла, как на Рис.8.6с, сжатие вовнутрь будет приводит пятна к небольшому уменьшению; и если пространство плоское, как на Рис. 8.6b, размер пятен будет промежуточным. Точные измерения, начатые COBE и с тех пор улучшенные WMAP, жестко подтверждают предположение, что пространство плоское. Эта вещь не только является теоретическим ожиданием, следующим из инфляционных моделей, но оно также абсолютно согласуется с результатами исследования сверхновых. Как мы видели, пространственно плоская вселенная требует полной плотности массы/энергии, равной критической плотности. С обычной и темной материей, дающими вклад около 30 процентов, и темной энергией, дающей вклад около 70 процентов, все впечатляюще сходится вместе.

Более прямое подтверждение результатов по сверхновым является целью Зонда Сверхновых/Ускорения (*SuperNova/Acceleration Probe* – SNAP). Предложенный учеными из Лоуренсовской Лаборатории в Беркли, SNAP должен быть спутниковым орбитальным телескопом со способностью измерять в двадцать раз больше сверхновых, изучаемых путем наблюдений с земной поверхности. SNAP не только должен быть в состоянии подтвердить более ранние результаты, что 70 процентов вселенной есть темная энергия, но он также должен более точно определить природу темной энергии.

Обратите внимание, хотя я описывал темную энергию как версию эйнштейновской космологической постоянной, – постоянной, неизменной энергии, которая подталкивает пространство к расширению, – имеется и тесно связанная альтернативная возможность. Вспомним из нашего обсуждения инфляционной космологии (и прыгающей лягушки), что поле, чья величина возвышается над его низшей энергетической конфигурацией, может вести себя подобно космологической константе, двигая ускоренное расширение пространства, но оно будет действовать только короткое время. Рано или поздно поле займет свое место на дне своей чаши потенциальной энергии, и давление наружу исчезнет. В инфляционной космологии это происходит за мельчайшую долю секунды. Но путем введения нового поля и аккуратного выбора формы его потенциальной энергии физики нашли способ для ускоренного расширения, который будет намного более мягким в своем расталкивающем давлении, но намного более долгим, – для поля, которое должно двигать сравнительно слабо и равномерно ускоряющуюся фазу пространственного расширения, которое длится не долю секунды, а миллиарды лет, пока поле медленно скатывается к величине минимальной энергии. Это открывает возможность, что прямо сейчас мы можем воспринимать экстремально мягкую версию инфляционного взрыва, который, как мы уверены, происходил на протяжении ранних моментов вселенной.

Разница между "обычной" космологической константой и последней возможностью, известной как *квинтэссенция*, имеет минимальное значение сегодня, но влечет чрезвычайные последствия в удаленном будущем вселенной. Космологическая константа есть константа – она обеспечивает бесконечное ускоренное расширение, так что вселенная будет расширяться все более быстро и становится все более разреженной, разбавленной и пустой. Но квинтэссенция обеспечивает ускоренное расширение, которое в некоторой точке сойдет на нет, подразумевая удаленное будущее менее суровым и пустынным, чем это следует из ускоренного расширения, которое вечно. Через измерения изменений в ускорении пространства за большие промежутки времени (через наблюдение сверхновых на различных расстояниях, а потому в различные моменты времени в прошлом), SNAP может быть в состоянии сделать выбор между двумя возможностями. Через определение, является ли темная энергия по-настоящему космологической константой, SNAP даст возможность проникнуть в удаленную судьбу вселенной.

Пространство, время и теория

Путешествие к открытию природы пространства и времени было долгим и наполненным многими сюрпризами; нет сомнений, оно все еще находится в своей ранней стадии. Последние несколько веков мы видели, как прорывы один за другим радикально переворачивают наши концепции пространства и времени, и снова их изменяют. Теоретические и экспериментальные предложения, которые мы осветили в этой книге, представляют лепку этих идей нашим поколением, и, вероятно, будут составлять большую часть нашего научного наследия. В Главе 16 мы будем обсуждать некоторые из наиболее свежих и умозрительных достижений в попытке бросить свет на то, какими могут быть следующие этапы путешествия. Но сначала, в Главе 15, мы порассуждаем в другом направлении.

Хотя это не является шаблонной комбинацией для научного открытия, история показывает, что глубокое понимание часто является первым шагом в направлении технологического контроля. Понимание электромагнитной силы в 1800е в конце концов привело к телеграфу, радио и телевидению. С этим знанием, в соединении с последующим пониманием квантовой механики, мы смогли разработать компьютеры, лазеры и электронные приспособления, слишком многочисленные, чтобы упоминать их. Понимание ядерных сил привело к опасному созданию самого мощного оружия, которое когда либо знал мир, и к разработке технологий, которые однажды смогут удовлетворить все энергетические потребности мира с помощью всего лишь бочки соленой воды. Смогут ли наши все углубляющиеся представления о пространстве и времени быть первым шагом к аналогичным примерам открытий и технологических разработок? Будем ли мы однажды хозяевами пространства и времени и будем ли мы делать вещи, которые сейчас являются только частью научной фантастики?

Никто не знает. Но посмотрим, как далеко мы можем зайти и что за этим может последовать.

**15 Телепортаторы и машины времени**

***ПУТЕШЕСТВИЕ СКВОЗЬ ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ***

**В**озможно, я просто испытывал недостаток фантазии давно в 1960е, но что на самом деле поразило меня, как невероятное, был компьютер на борту Энтерпрайза из сериала "*Звездный путь*". Моя восприимчивость времен начальной школы выдавала поэтическое разрешение на деформирующий пространство двигатель и на вселенную, населенную инопланетянами, говорящими на беглом английском. Но машина, которая могла – по запросу – немедленно показать картинку любого исторического персонажа, который когда-либо жил, дать техническую спецификацию для любой части оборудования, когда либо построенного, или обеспечить доступ к любой книге, когда-либо написанной? Это напрягало мои способности до отвергающего недоверия. В поздние 1960е этому ребенку было ясно, что никогда не может быть найден способ собрать, сохранить и подготовить доступ к такому богатству информации. Но, однако, менее чем через полстолетия я могу сидеть здесь на своей кухне с ноутбуком, беспроводным интернет-соединением и вызываемым голосом программным обеспечением и играть роль капитана Кирка, листая обширные хранилища знаний, – от основополагающих до легкомысленных, – не пошевелив и пальцем. Верно, скорость и эффективность компьютеров, изображенных в мире Звездного Пути двадцать третьего столетия, все еще вызывает зависть, но легко предугадать, что когда наступит та эра, наша технология превзойдет представленные ожидания.

Этот пример лишь один из многих, которые сделались штампом способностей научной фантастики предсказывать будущее. Но что может быть более манящим из всей массы приборов, чем те, в которых что-либо помещается в камеру, поворачивается переключатель и оно транспортируется в далекое место или иное время? Возможно ли, что мы однажды будем освобождены от скудного пространственного простора и временной эпохи, к которым мы были так долго привязаны, и узнаем самые удаленные сферы пространства и времени? Или это отличие между научной фантастикой и реальностью останется навсегда? Уже узнав о моей детской неспособности предвидеть информационную революцию, вы можете проверить мою способность предсказать будущие технологические прорывы. Итак, вместо того, чтобы рассуждать о вероятности того, что может быть, в этой главе я буду описывать, как далеко мы на самом деле зашли, как в теории, так и в практике, в направлении осуществления телепортаторов и машин времени, и что надо будет получить, чтобы идти дальше и добиться контроля над пространством и временем.

Телепортация в квантовом мире

В общепринятых описаниях научной фантастики телепортатор (или на сленге Звездного Пути, транспортер) сканирует объект, чтобы определить его детальное строение, и посылает информацию в удаленное место, где объект воссоздается. "Дематериализуется" ли сам объект, а его атомы и молекулы посылаются вдаль с шаблоном для обратной сборки их вместе, или используются атомы и молекулы, расположенные в точке приема, для выстраивания точной копии объекта, варьируется от одного фантастического воплощения к другому. Как мы увидим, научный подход к телепортации, разработанный в последнее десятилетие, ближе по духу к последней категории, и это вызывает два существенных вопроса. Первый является стандартной, но тяжелой философской головоломкой: Когда, если вообще когда-либо, точная копия должна быть идентифицирована, названа, рассмотрена или воспринята, как если бы она была оригиналом? Второй вопрос, является ли возможным, хотя бы в принципе, проверить объект и определить его строение с полной точностью, так, чтобы мы могли составить совершенный шаблон, по которому объект будет восстановлен?

Во вселенной, управляемой законами классической физики, ответ на второй вопрос должен быть – да. В принципе, атрибуты каждой частицы, составляющей объект, – идентичность, положение, скорость каждой частицы и так далее, – могут быть измерены с полной точностью, переданы в удаленное место и использованы как инструктивное руководство для воссоздания объекта. Сделать это для объекта, состоящего более чем из просто горстки элементарных частиц, должно быть до смешного за пределами досягаемости, но в классической вселенной преградой будет сложность, но не физика.

Во вселенной, управляемой законами квантовой физики – нашей вселенной – ситуация намного более тонкая. Мы узнали, что акт измерения выделяет один из мириадов потенциальных атрибутов объекта, чтобы избавиться от квантового тумана и получить определенную величину. Когда мы наблюдаем частицу, например, определенные свойства, которые мы видим, не отражают в общем случае туманную квантовую смесь атрибутов, которую она имеет в момент перед тем, как мы бросили взгляд.[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_1" \o ) Таким образом, если мы хотим скопировать объект, мы встанем перед лицом квантовой ловушки. Чтобы скопировать, мы должны произвести наблюдение, так мы узнаем, что копировать. Но акт наблюдения вызывает изменения, так что, если мы копируем то, что мы видим, мы не копируем то, что было перед тем, как мы посмотрели. Это наводит на мысль, что телепортация в квантовой вселенной недостижима не просто вследствие практических ограничений, возникающих из сложности, а вследствие фундаментальных ограничений, присущих квантовой физике. Тем не менее, как мы увидим в следующей секции, в начале 1990х международная ко физиков нашла оригинальный способ обойти это заключение.

Что касается первого вопроса, безотносительно к взаимоотношениям между копией и оригиналом, квантовая физика дает ответ, который и точный, и ободряющий. В соответствии с квантовой механикой каждый электрон во вселенной идентичен любому другому, так как все они имеют точно одинаковую массу, точно одинаковый электрический заряд, точно одинаковые свойства слабого и сильного ядерных взаимодействий и точно одинаковый полный спин. Более того, наше хорошо проверенное квантовомеханическое описание говорит, что этим исчерпываются атрибуты, которые электрон может иметь; электроны все одинаковы по отношению к своим свойствам, и больше не имеется свойств для рассмотрения. В том же смысле каждый up-кварк такой же, как и любой другой up-кварк, каждый down-кварк такой же, как и любой другой down-кварк, каждый фотон такой же, как и любой другой фотон, и так далее для всех других видов частиц. Как было обнаружено квантовыми практиками много десятилетий назад, частицы могут рассматриваться как самые мелкие из возможных пакетов поля (например, фотоны являются мельчайшими пакетами электромагнитного поля), и квантовые физики показали, что такие мельчайшие составляющие одного и того же поля всегда идентичны. (Или, в схеме теории струн, частицы одного вида имеют одинаковые свойства, поскольку они являются одинаковыми колебаниями единственного вида струн).

Что может отличаться у двух частиц одного вида, так это вероятности, что они находятся в различных положениях, вероятности, что их спины направлены в особых направлениях, и вероятности, что они имеют особые скорости и энергии. Или, как более лаконично говорят физики, две частицы могут иметь различные квантовые состояния. Но если две частицы одного вида находятся в одинаковом квантовом состоянии, – исключая, возможно, то, что одна частица имеет высокую вероятность быть здесь, а другая частица имеет высокую вероятность быть вон там, – законы квантовой механики гарантируют, что они неразличимы, не только на практике, но и в принципе. Они совершенные близнецы. Если кто-то поменяет положения частиц (более точно, поменяет вероятности того, что две частицы находятся в любом данном положении), то не будет никакого способа отличить это.

Таким образом, если мы представим, что в начале частица находится здесь,\* и как-то поместим другую частицу того же вида в точно таком же квантовом состоянии (с той же вероятностью ориентации спина, энергией и так далее) в некоторое удаленное место, итоговая частица будет неотличима от оригинальной, и процесс будет в точности тем, что называется квантовой телепортацией. Конечно, если оригинальная частица сохраняется в процессе нетронутой, вы можете захотеть назвать процесс квантовым клонированием или, возможно, квантовым факсимильным копированием. Но, как мы увидим, научная реализация этих идей не защищает оригинальную частицу, – она неизбежно модифицируется во время процесса телепортации, – так что мы не столкнемся с этой таксономической дилеммой.

*(\*) "Поскольку телепортация начинается с чего-то, находящегося здесь, и пытается сделать так, чтобы оно появилось в удаленном месте, в этой секции я часто буду говорить, как если бы частицы имели определенные положения. Чтобы быть более точным, я всегда должен говорить "начиная с частицы, которая имеет высокую вероятность находиться здесь" или "начиная с частицы, которая имеет 99 процентов шансов находиться здесь" с аналогичным языком, используемым, когда частица телепортирована, но для целей краткости я использую неточный язык."*

Более настоятельная вещь, и одна из тех, которые философы пристально рассматривали в различных формах, заключается в том, будет ли то, что верно для индивидуальной частицы, верным для агломерата частиц. Если вы можете телепортировать из одного положения в другое каждую отдельную частицу, которая составляет ваш *ДеЛорен* (марка суперавтомобиля, известного, в частности, по фильму "*Назад в будущее*"), обеспечив, что квантовое состояние каждой, включая взаимоотношения со всеми другими, будет воспроизведено со 100% правильностью, будете ли вы успешны в телепортации автомобиля? Хотя мы не имеем эмпирических доказательств, которые могли бы направлять нас, теоретические доводы в поддержку того, что автомобиль телепортируется, сильны. Атомное и молекулярное расположение определяет, как объект выглядит и ощущается, звучит и пахнет, и даже каков на вкус, так что результирующий автомобиль должен быть идентичен оригинальному ДеЛорену – выпуклости, щели, скрипучая левая дверь-крыло, запах плесени от семейной собаки, все целиком – и автомобиль должен резко брать с места и реагировать на ножную педаль газа в точности так же, как это делал оригинал. Вопрос о том, является ли автомобиль на самом деле оригиналом или, вместо этого, точным дубликатом, не беспокоит. Если вы попросите Соединенные Квантовые Транспортные Линии погрузить ваш автомобиль на корабль и отправить из Нью-Йорка в Лондон, но они без вашего ведома телепортируют его описанные способом, вы никогда не узнаете отличия, – даже в принципе.

Но что если транспортная компания сделает то же самое с вашим котом или, пресытившись самолетной гастрономией, что если вы решитесь на телепортацию для вашего собственного трансатлантического путешествия? Будет ли кот или персона, которая вышла из приемной камеры, той же самой, которая вступила в телепортатор? Что касается меня, я так и думаю. Еще раз, поскольку мы не имеем существенных данных, лучшее, что я или кто-либо может сделать, это рассуждать. Но, по моему образу мыслей, живое существо, чьи составляющие атомы и молекулы находятся точно в том же квантовом состоянии, как и мои, есть я. Даже если "оригинал" меня все еще существует после того, как было сделано "копирование", я (мы) буду говорить без колебаний, что каждый есть я. Мы имели бы одинаковое мнение – буквально – в утверждении, что никто не будет иметь приоритета перед другим. Мысли, воспоминания, эмоции и рассудительность имеют физическую основу в свойствах атомов и молекул человеческого тела; идентичные квантовые состояния этих элементарных составляющих влекут за собой идентичное самосознание. Со временем наши жизненные опыты приведут нас к дифференциации, но я действительно верю, что впредь будет два меня, а не оригинал, который был бы как-то "настоящим" мной, и копия, которая как-то не была бы.

Фактически, я сознательно немного неточен. Наше физическое строение все время проходит через огромное количество трансформаций – некоторых незначительных, некоторых радикальных, – но мы остаемся той же самой персоной. От американского производителя мороженого Haagen-Dazs, который наводнил кровоток жиром и сахаром, до технологии магниторезонансного сканирования (MRI), которая для составления трехмерных карт опухолей и метастазов переворачивает спиновые оси различных атомных ядер в мозгу, до сердечных трансплантантов и липосакции, до триллионов атомов в среднем человеческом теле, которые заменяются каждую миллионную долю секунды, мы подвержены постоянным изменениям, однако наша персональная идентичность остается не затронутой. Так что, даже если телепортируемый не будет обладать моим физическим состоянием с совершенной точностью, он все равно будет полностью неотличим от меня. В моей книге он все равно будет мной.

Конечно, если вы верите, что в жизни, и, особенно, в сознательной жизни, имеется что-то большее, чем ее физическое строение, ваши стандарты для успешной телепортации будут более строгими, чем мои. Эта сложная проблема – до какой степени наша персональная идентичность связана с нашей физической? – дебатируется годы в различных видах и остается без ответа, который бы удовлетворил каждого. В то время как я верю, что идентичность целиком находится в физической области, другие не согласны, и никто не может предъявить окончательный ответ.

Но, безотносительно к вашей точке зрения на гипотетический вопрос о телепортации живого, ученые сейчас установили, что благодаря чудесам квантовой механики индивидуальные частицы могут быть – *и были – телепортированы*.

Посмотрим, каким образом.

Квантовое запутывание и квантовая телепортация

В 1997 группа физиков под руководством Антона Зейлингера, тогда работавшего в Университете Инсбрука, и другая группа под руководством А. Франческо Де Мартини из Университета Рима, каждая в отдельности[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_2" \o ) провели первую успешную телепортацию отдельного фотона. В обоих экспериментах начальный фотон в особом квантовом состоянии был телепортирован на короткую дистанцию через лабораторию, но имеются все основания ожидать, что процедура будет аналогично работать на любой дистанции. Каждая группа использовала технику, основанную на теоретическом результате, сообщенном в 1993 командой физиков – Чарльзом Беннетом из Ватсоновского Исследовательского Центра IBM; Жилем Брассаром, Клодом Крепо и Ричардом Джозой из Университета Монреаля; израильским физиком Ашером Пересом и Вильямом Вуттерсом из Вильямсовского Колледжа, – которые полагались на квантовое запутывание (Глава 4).

Вспомним, что две запутанные частицы, скажем два фотона, имеют странное и тесное взаимодействие. В то время как каждая имеет только определенную вероятность крутиться (иметь определенный спин) тем или иным образом, и в то время как каждая, будучи измеренной, кажется "выбирает" хаотически между различными возможностями, какой бы "выбор" ни сделала одна, другая немедленно делает то же самое, безотносительно к их пространственному разделению. В Главе 4 мы объясняли, что не имеется способа, чтобы использовать запутанные частицы для передачи сообщения от одного места к другому быстрее скорости света. Если непрерывный ряд запутанных фотонов будет измерен в каждом из сильно удаленных мест, данные, собранные в обоих детекторах будут хаотической последовательностью результатов (с общей частотой появления того или иного направления спина, соответствующей вероятностной волне частиц). Запутывание становится очевидным только при сравнении двух списков результатов, и оказывается, как ни удивительно, что они идентичны. Но это сравнение требует некоторого вида ординарной, более медленной, чем скорость света, коммуникации. А поскольку до сравнения не может быть обнаружено никаких следов запутывания, не может быть послан сигнал, более быстрый, чем скорость света.

Тем не менее, даже если запутывание не может быть использовано для сверхсветовых коммуникаций, кое-что может помочь почувствовать, что дальнодействующие корреляции между частицами являются столь причудливыми, что они применимы для кое-чего экстраординарного. В 1993 Беннет и его соратники открыли одну такую возможность. Они показали, что квантовое запутывание может быть использовано для квантовой телепортации. Вы не можете послать сообщение со скоростью больше световой, но если вы будете устраивать более медленную, чем свет, телепортацию частицы отсюда туда, запутывание будет билетом.

Обоснование, стоящее за таким заключением, хотя и математически честное, является хитроумным и изобретательным. Здесь приводятся особенности его проведения. Представим, что я хочу телепортировать отдельный фотон, который я называю Фотоном А, из моего дома в Нью-Йорке к моему другу Николасу в Лондон. Для простоты рассмотрим, как я телепортирую точное квантовое состояние спина фотона – это значит, как я обеспечиваю, что Николас получит фотон, чья вероятность определенного значения спина тем или иным образом будет идентична Фотону А.

Я не могу непосредственно измерить спин Фотона А, позвонить Николасу, чтобы он провел манипуляции с фотоном на его стороне, так что его спин соответствовал бы моему наблюдению; результат, который я получаю, будет подвержен влиянию наблюдения, которое я провожу, так что правильное состояние Фотона А перед моим наблюдением не будет отражено. Так что я могу сделать? Ну, согласно Беннету и его коллегам, первый этап заключается в том, чтобы гарантировать, что Николас и я, каждый имеем по одному из двух дополнительных фотонов, назовем их Фотоны В и С, которые запутаны. Как мы станем обладателями этих фотонов, не особенно важно. Только допустим, что Николас и я убеждены, что даже если мы находимся по разные стороны Атлантики, если я измеряю спин Фотона В относительно заданной оси и он делает то же самое для Фотона С, мы найдем в точности одинаковый результат.

Следующий этап, в соответствии с Беннетом и сотрудниками, не связан с прямым измерением Фотона А – фотона, который я надеюсь телепортировать, – поскольку это приведет к слишком резкому вмешательству. Вместо этого я должен измерить общее свойство Фотона А и запутанного Фотона В. Например, квантовая теория позволяет мне измерить, имеют ли Фотоны А и В одинаковый спин относительно вертикальной оси без измерения их индивидуальных спинов. Аналогично, квантовая теория позволяет мне измерить, имеют ли Фотоны А и В одинаковый спин относительно горизонтальной оси без измерения их индивидуальных спинов. В результате такого объединенного измерения я не узнаю спина Фотона А, но я узнаю, как спин Фотона А связан со спином Фотона В. И это важная информация.

Удаленный фотон С запутан с фотоном В, так что если я знаю, как Фотон А связан с Фотоном В, я могу вывести, как Фотон А связан с Фотоном С. Если я теперь сообщу по телефону эту информацию Николасу, передав ему, как состояние спина Фотона А связано с состоянием спина Фотона С, он сможет определить, что надо сделать с Фотоном С, чтобы его квантовое состояние стало соответствовать состоянию Фотона А. Как только он проведет необходимые манипуляции, квантовое состояние фотона, находящегося в его владении, будет идентичным состоянию Фотона А, а это все, что нам необходимо, чтобы объявить, что Фотон А был успешно телепортирован. В простейшем случае, например, если мое измерение обнаруживает, что спин Фотона В идентичен спину Фотона А, мы придем к заключению, что спин Фотона С также идентичен спину Фотона А и без дальнейших хлопот телепортация будет завершена. Фотон С будет в том же самом квантовом состоянии, как и Фотон А, как и хотелось.

Ну, почти. Имеется грубая идея, но для объяснения квантовой телепортации в виде управляемых этапов, я до настоящего момента оставлял без внимания абсолютно ключевой элемент истории, который я сейчас восполню. Когда я провожу совместное измерение Фотонов А и В, я на самом деле узнаю, как спин Фотона А связан со спином Фотона В. Но, как и во всех наблюдениях, само измерение влияет на фотоны. Следовательно, я не узнаю, как спин Фотона А был связан со спином Фотона В до измерения. Вместо этого я узнаю, как они связаны после того, как состояния обоих фотонов были нарушены актом измерения. Так что, с первого взгляда, мы, кажется, стоим перед лицом той же самой квантовой преграды для копирования Фотона А, которую я описал выше: перед неизбежным нарушением состояния, вызванным процессом измерения. Именно здесь Фотон С приходит на помощь. Поскольку Фотоны В и С запутаны, нарушение, которое я вызвал у Фотона В в Нью-Йорке, будет также отражено в состоянии Фотона С в Лондоне. Это удивительная природа квантового запутывания, как мы детально обдумывали в Главе 4. Фактически, Беннет и его соратники показали математически, что через запутывание с Фотоном В нарушение, вызванное моим измерением, отпечатывается на удаленном Фотоне С.

И это фантастически интересно. Через мое измерение мы можем узнать, как спин Фотона А связан со спином Фотона В, но с раздражающей проблемой, что состояния обоих фотонов нарушились моим вмешательством. Через запутывание, однако, Фотон С связывается с моим измерением, – даже если он удален на тысячи миль, – и это позволяет нам обособить влияние нарушения и отсюда получить доступ к информации, обычно теряющейся в процессе измерения. Если я теперь позвоню Николасу с результатом моего измерения, он будет знать, как спины Фотонов А и В связаны после нарушения, и через Фотон С он получит доступ к влиянию самого нарушения. Это позволяет Николасу использовать Фотон С, чтобы, грубо говоря, вычесть нарушение, вызванное моим измерением, и таким образом, обойти препятствие к дублированию Фотона А. Фактически, как детально показали Беннет и сотрудники, через, по большей части, простые манипуляции со спином Фотона С (основанные на моем телефонном звонке, информирующем Николаса, каково состояние спина Фотона А относительно состояния спина Фотона В), Николас обеспечит, что Фотон С, каким бы ни был его спин, в точности скопирует квантовое состояние Фотона А перед моим измерением. Более того, хотя спин только одна из характеристик фотона, другие свойства квантового состояния Фотона А (такие как вероятность, что он имеет ту или иную энергию) могут быть воспроизведены аналогично. Таким образом, используя эту процедуру, мы можем телепортировать Фотон А из Нью-Йорка в Лондон.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_3" \o )

Как вы можете видеть, квантовая телепортация содержит два этапа, каждый из которых передает решающую и взаимно дополняющую информацию. Первый, мы предпринимаем совместное измерение на фотоне, который мы хотим телепортировать, вместе с одним из членов запутанной пары фотонов. Нарушение, связанное с измерением, отпечатывается на удаленном партнере из запутанной пары через причуды квантовой нелокальности. Этим заканчивается Этап 1, очевидно, квантовая часть процесса телепортации. На Этапе 2 результат самого измерения передается в удаленное место приема более стандартным способом (телефон, факс, электронная почта ...), что может быть названо классической частью процесса телепортации. В комбинации Этап 1 и Этап 2 позволяют воспроизвести точное квантовое состояние фотона, который мы хотим телепортировать, путем прямой операции (такой как поворот на определенный угол относительно особой оси) на удаленном члене запутанной пары.

Отметим также пару ключевых свойств квантовой телепортации. Поскольку оригинальное квантовое состояние Фотона А было нарушено моим измерением, Фотон С в Лондоне теперь является единственным в этом оригинальном состоянии. Нет двух копий оригинального Фотона А, так что вместо того, чтобы называть это квантовым факсом, на самом деле более точно называть это квантовой телепортацией.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_4" \o ) Более того, даже если мы телепортируем фотон А из Нью-Йорка в Лондон, – даже если фотон в Лондоне станет неотличим от исходного фотона, который мы имели в Нью-Йорке, – мы не узнаем квантового состояния Фотона А. Фотон в Лондоне имеет точно такую же вероятность ориентации спина в том или ином направлении, какую Фотон А имел перед моим вмешательством, но мы не знаем, что это была за вероятность. Фактически, в этом фокус, лежащий в основе квантовой телепортации. Нарушение, вызванное измерением, не дает нам определить квантовое состояние Фотона А, но в описанном подходе мы не нуждаемся в знании точного квантового состояния фотона, чтобы телепортировать его. Мы нуждаемся в знании только одного аспекта его квантового состояния – что мы и узнали из совместного измерения с Фотоном В.

Квантовое запутывание с удаленным Фотоном С дополняет остальное.

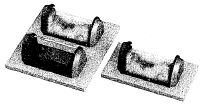
Осуществление этой стратегии квантовой телепортации было немалым подвигом. В ранние 1990е создание запутанной пары фотонов было стандартной процедурой, но проведение совместного измерения двух фотонов (совместного измерения на Фотонах А и В, описанное выше, технически называющееся измерением состояния Белла) никогда не удавалось. Достижение обеих групп Зейлингера и Де Мартини было в изобретении хитроумной экспериментальной техники для совместного измерения и в осуществлении его в лаборатории.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_5" \o ) К 1997 они достигли этой цели, став первыми группами, добившимися телепортации отдельной частицы.

Практическая телепортация

Поскольку вы, и я, и ДеЛорен и все другое состоит из многих частиц, естественный следующий шаг заключается в том, чтобы представить применение квантовой телепортации к таким большим коллективам частиц, позволив нам "излучить" макроскопический объект из одного места в другое. Но прыжок от телепортации одной частицы к телепортации макроскопического собрания частиц ставит в тупик и находится чрезвычайно далеко за пределами того, что исследователи могут сегодня совершить и что многие лидеры в этой области представляют достижимым даже в отдаленном будущем. Но на потеху, как фантастически мечтает Зейлингер, мы можем представить, как однажды достичь этого.

Представим, что я хочу телепортировать ДеЛорен из Нью-Йорка в Лондон. Вместо того, чтобы обеспечить Николаса и меня, каждого одним участником запутанной пары фотонов (что нам было нужно для телепортации отдельного фотона), каждый из нас должен иметь камеру с частицами, содержащую достаточно фотонов, нейтронов, электронов и так далее, чтобы построить ДеЛорен, причем все частицы в моей камере должны быть квантово запутаны со всеми ими в камере Николаса (см. Рис. 15.1). Мне также нужен прибор, который измеряет совместные свойства всех частиц, составляющих мой ДеЛорен, с теми частицами, которые собраны в моей камере (аналог измерения совместных свойств Фотонов А и В). Через запутывание частиц в моей камере влияние совместных измерений, которые я провожу в Нью-Йорке, будет отпечатано на частицах камеры Николаса в Лондоне (аналоге состояния Фотона С, отражающего совместное измерение А и В). Если я звоню Николасу и сообщаю результаты моих измерений (это будет дорогостоящий звонок, так как я передам Николасу около 1030 результатов), эти данные будут инструктировать его о том, как манипулировать частицами в его камере (почти как мой более ранний телефонный звонок проинструктировал его, как манипулировать Фотоном С). Когда он закончит, каждая частица в его камере будет в точности в том квантовом состоянии, как и каждая соответствующая частица в ДеЛорене (до того, как он подвергся любым измерениям), так что, как и в нашем предыдущем обсуждении, Николас теперь будет иметь ДеЛорен.\* Его телепортация из Нью-Йорка в Лондон будет завершена.

*(\*) "Для коллектива частиц – в отличие от индивидуальной частицы – квантовое состояние также кодирует взаимоотношения каждой частицы в коллективе с каждой другой. Так что для точно воспроизведенного квантового состояния частиц, составляющих ДеЛорен, мы подразумеваем, что все они находятся в том же отношении к каждой другой, как и в оригинале; единственное отличие, которое они проявляют, это что их общее положение будет сдвинуто из Нью-Йорка в Лондон."*



***Рис 15.1****Фантастический подход к телепортации воображает наличие двух удаленных друг от друга камер с квантово запутанными частицами и предполагает проведение подходящих совместных измерений частиц, составляющих объект, который должен быть телепортирован, с частицами в одной из камер. Результат этого измерения должен затем обеспечить необходимую информацию, чтобы произвести действия с частицами во второй камере для воспроизведения объекта и завершения телепортации.*

Заметим, однако, что на сегодняшний день каждый этап в этой макроскопической версии квантовой телепортации фантастичен. Объект, подобный ДеЛорену, имеет в избытке миллиарды миллиардов миллиардов частиц. Хотя экспериментаторы развлекаются с оборудованием, запутывающим более одной пары частиц, они экстремально далеки от достижения количества, соответствующего макроскопическим сущностям.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_6" \o ) Установка двух камер запутанных частиц, таким образом, находится до смешного далеко за пределами сегодняшней досягаемости. Более того, совместное измерение двух фотонов было само по себе тяжелым и впечатляющим подвигом. Распространение его на совместное измерение миллиардов и миллиардов частиц является на сегодняшний день невообразимым.

С нашей сегодняшней точки зрения, непредвзятая оценка должна привести к заключению, что телепортация макроскопического объекта, по крайней мере способом, на сегодняшний день примененным для отдельной частицы, удалена от нас на эпохи – если не на вечность.

Но, поскольку единственной неизменной вещью в науке и технологии является превосходство голосов "против" от массы предсказателей над голосами "за" энтузиастов, я просто отмечу очевидное: телепортация макроскопических тел выглядит маловероятно. Хотя, кто знает? Сорок лет назад компьютер Энтерпрайза тоже выглядел достаточно маловероятным.[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_7" \o )

Загадки путешествия во времени

Не отрицается, что жизнь была бы другой, если телепортация макроскопических объектов была бы столь же легкой, как вызов FedEx (крупнейшего мирового перевозчика разнообразных грузов) или запрыгивание в вагон метро. Несбыточные или невозможные путешествия стали бы достижимыми, а концепция путешествия через пространство была бы революционизирована до такой степени, при которой скачок в удобстве и практичности ознаменовал бы фундаментальный сдвиг в мировоззрении.

Даже при этих условиях влияние телепортации на наше восприятие вселенной бледнеет в сравнении с потрясением, которое могло бы быть произведено достижением путешествий через время по желанию. Каждый знает, что при достаточном усилии и желании мы можем, по крайней мере, в принципе, переместиться отсюда туда. Хотя имеются технологические ограничения на наши путешествия через пространство, внутри них границы наших путешествий регулируется нашим выбором и прихотью. Но перемещаться от сейчас в тогда? Наши ощущения подавляюще свидетельствуют, что это возможно, по большей части, одним путем: мы должны дожидаться этого – секунда должна следовать за секундой, когда тик за тиком "сейчас" методично движется к "тогда". И это предполагает, что "тогда" это позже, чем "сейчас". Если "тогда" предшествует "сейчас", ощущения диктуют, что такого пути нет совсем; путешествие в прошлое кажется невозможной альтернативой. В отличие от путешествий через пространство, путешествия через время кажутся чем угодно, кроме вопроса выбора и прихоти. Когда речь идет о времени, нас тащит вдоль одного направления, нравится нам это или нет.

Если бы мы были в состоянии плавать во времени так же легко, как мы плаваем в пространстве, наше мировоззрение не только изменилось бы, оно подверглось бы самому драматическому сдвигу в истории нашего вида. В свете такого несомненного потрясения, я часто поражался тому, как несколько людей осознали, что теоретические основы для одного вида путешествий во времени – путешествия во времени в будущее – имели место с ранних годов последнего столетия.

Когда Эйнштейн открыл природу пространства-времени СТО, он оформил программу для быстрого продвижения в будущее. Если вы хотите увидеть, что случится с планетой Земля через 1 000 или 10 000 или 10 миллионов лет в будущем, законы эйнштейновской физики говорят вам, как этого достичь. Вы строите транспортное средство, чья скорость может достичь, скажем 99,9999999996 процента от скорости света. На полной мощности вы направляетесь наружу в глубокое пространство на день, или десять дней, или на немногим более двадцати семи лет в соответствии с часами на вашем корабле, затем резко поворачиваете назад и направляетесь к Земле, опять на полной мощности. К вашему возвращению по земному времени истечет 1 000, или 10 000, или 10 миллионов лет. Это является необсуждаемым и экспериментально проверенным предсказанием СТО; это пример замедления времени при повышении скорости, описанный в Главе 3.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_8" \o ) Конечно, поскольку корабли с такой скоростью находятся за пределами того, что мы можем построить, никто не проверил это предсказание буквально. Но, как мы обсуждали ранее, исследователи подтвердили предсказанное замедление времени на коммерческом авиалайнере, путешествующем с малой долей скорости света, точно так же, как на элементарных частицах вроде мюонов, носящихся через ускорители с очень близкой к световой скоростью (стационарный мюон рападается на другие частицы примерно в течение двух миллионных долей секунды, но чем быстрее он движется, тем медленее тикают его внутренние часы, и тем дольше мюон остается целым). Имеются все основания быть уверенным и нет никаких оснований не верить, что СТО точна и ее стратегия достижения будущего будет работать, как предсказано. Технология, а не физика, удерживает каждого из нас привязанным к этой эпохе.\*

*(\*)"Хрупкость человеческого тела является другим практическим ограничением: ускорение, требуемое для достижения таких высоких скоростей в разумный промежуток времени находится далеко за пределами того, что тело может выдержать. Отметим также, что замедление времени дает, в принципе, стратегию, для достижения удаленных мест в пространстве. Если ракета покидает Землю и направляется к галактике Андромеды, двигаясь со скоростью в 99,999999999999999999 процентов от скорости света, нам придется ждать около 6 миллионов лет до ее возвращения. Но при такой скорости время на ракете замедлится относительно земного времени столь драматично, что при возвращении астронавт будет старше только на восемь часов (оставляя в стороне тот факт, что он или она не сможет пережить ускорения, чтобы достичь такой скорости, развернуться и, наконец, остановиться)."*

Более тяжелая проблема, однако, возникает, когда мы думаем о другом виде путешествия во времени, путешествии в прошлое. Нет сомнений, вы знакомы с некоторыми из них. Например, имеется стандартный сценарий, в котором вы отправляетесь в прошлое и предотвращаете ваше собственное рождение. Во многих фантастических описаниях это достигается с применением насилия; однако любое менее радикальное, но столь же эффективное воздействие – такое как предотвращение встречи ваших родителей – может быть проделано так же легко. Парадокс ясен: если вы никогда не рождались, как вы могли появиться и, в особенности, как вы могли отправиться в прошлое и предотвратить встречу ваших родителей? Для путешествия в прошлое и удержания ваших родителей в отдалении друг от друга вы должны были родиться; но если вы родились, отправились в прошлое и удержали ваших родителей в отдалении, вы не смогли бы родиться. Мы неосторожно попали в логический тупик.

Сходный парадокс, предложенный философом из Оксфорда Майклом Дамметтом и модифицированный его коллегой Дэвидом Дойчем, дразнил разум слегка отличающимся, возможно, даже более сбивающим с толку образом. Вот одна из версий. Представим, что я построил машину времени и преместился на десять лет в будущее. После короткого ланча в Tofu-4-U (сеть, которая обошла МакДоналдс после того, как великая пандемия коровьего бешенства придавила публичное увлечение чизбургерами) я нашел ближайшее интернет-кафе и смог посмотреть онлайн, какие достижения были сделаны в теории струн. И получил роскошный сюрприз. Я прочитал, что все открытые задачи в теории струн были решены. Теория была полностью разработана и успешно использована для объяснения всех известных свойств частиц. Неопровержимые доказательства для дополнительных размерностей были найдены, и предсказания теории о свойствах суперсимметричных партнеров частиц – их массах, электрических зарядах и так далее – были уже в точности подтверждены Большим Адронным Коллайдером. Больше не осталось никаких сомнений: теория струн является единой теорией вселенной.

Когда я немного глубже посмотрел, кто ответственен за такие великие достижения, я был удивлен куда больше. Прорывную статью написала годом раньше никто иной как Рита Грин. Моя мать. Я был шокирован. Это не означает неуважение: моя мать замечательная личность, но она не ученый, не может понять, почему кое-кто становится ученым и, например, прочитала только несколько страниц *Элегантной вселенной* перед тем, как закрыть книгу, сказав, что от нее разболелась голова. Так как же она могла написать ключевую статью по теории струн? Ну, я прочитал ее статью онлайн, был поражен простыми, однако глубоко проницательными обоснованиями и увидел в конце, что она благодарит меня за несколько лет интенсивных инструкций по математике и физике после семинара Тони Роббинса\*, склонившего ее к преодолению своих опасений и нашедшего внутри нее физика. Черт, думаю я. Она просто записалась на этот семинар, когда я отправился в мое путешествие в будущее. Мне лучше направиться назад в мое собственное время, чтобы начать инструкции.

*(\*)"Известный в США отец-основатель индустрии "живого кучинга" (оно же нейролингвистическое программирование, оно же мотивационный тренинг) – лекционных курсов, призванных вскрыть внутренний потенциал слушателей, помочь им преодолеть страхи и в итоге добиться успеха вне зависимости от области деятельности. – (прим. перев.)"*

Итак, я возвращаюсь во времени, чтобы преподавать моей матери теорию струн. Но дело движется плохо. Проходит год. Затем второй. И хотя она сильно старается, она все еще не постигает теории. Я начинаю волноваться. Мы стоим перед теорией вторую пару лет, но прогресс минимален. Теперь я на самом деле разволновался. Больше не остается времени перед тем, как предполагается, что появится ее статья. Как она может написать ее? Наконец, я принимаю большое решение. Когда я читал ее статью в будущем, она произвела на меня такое впечатление, что я запомнил ее слово в слово. Так что вместо того, чтобы заставить мою мать совершить открытие самостоятельно, – что выгядит все менее и менее вероятным, – я скажу ей, что ей написать, удостоверившись, что она включит в текст в точности все, что я запомнил, читая ее статью. Она опубликует статью, что немедленно вызовет мировой пожар в физике. Все, о чем я прочитал во время моего пребывания в будущем, произойдет.

Теперь имеется головоломная проблема. Кто должен был подсказать переворачивающую основы статью моей матери? Определенно не я. Я изучил результаты, прочитав их в ее статье. Однако, как моя мать могла получить результат, когда она написала только то, что я ей сказал? Конечно, проблема здесь на самом деле не только в подсказке, – проблема в том, откуда взялось новое знание, новое прозрение и новое понимание, представленное в статье моей матери. На кого я могу указать и сказать: "Этот человек или этот компьютер явился источником новых результатов"? У меня озарения не было, не было его и у моей матери, это не касалось никого другого, и мы не использовали компьютер. Тем не менее, как-то все эти замечательные результаты оказались в ее статье. Очевидно, в мире, который позволяет путешествие как в будущее, так и в прошлое, знания могут материализоваться из разреженного воздуха. Хотя это не совсем уж так парадоксально, как предотвращение вашего собственного рождения, это безусловно странно.

Что мы можем сделать с таким парадоксом и странностью? Должны ли мы заключить, что раз уж путешествия во времени в будущее допускаются законами физики, любая попытка вернуться в прошлое должна провалиться? Некоторые определенно думают так. Но, как мы сейчас увидим, имеются пути в обход сложной проблемы, на которую мы натолкнулись. Это не означает, что путешествия в прошлое возможны, – это отдельная проблема, которую мы коротко рассмотрим, – но это показывает, что путешествия назад во времени не могут быть просто исключены обращением к загадке, которую мы только что обсудили.

Пересмотр загадки

Повторим, что в Главе 5 мы обсуждали течение времени с точки зрения классической физики и натолкнулись на образ, который существенно отличается от нашей интуитивной картины. Аккуратные размышления привели нас к представлению о пространстве-времени как о блоке льда, в котором каждый момент навсегда заморожен на месте, в противоположность привычному образу времени как реки, несущей нас вперед от одного момента к следующему. Эти замороженные моменты группируются в разные виды настоящего – в события, которые происходят в одно и то же время, – разным образом у наблюдателей, находящихся в разных состояниях движения. И чтобы обобщить эту гибкость разрезания блока пространства-времени на различные понятия "сейчас", мы также использовали эквивалентную аналогию, в которой пространство-время выглядит как батон хлеба, который может быть разрезан под разными углами.

Но, независимо от аналогии, урок Главы 5 в том, что моменты – события, составляющие пространственно-временной батон, – просто есть. Они вечные. Каждый момент – каждое событие или происшествие – существует, точно так же, как каждая точка в пространстве существует. Моменты не приходят на мгновение к жизни, когда освещаются "пятном света" от присутствия наблюдателя; этот образ хорошо согласуется с нашей интуицией, но не выдерживает логического анализа. Вместо разового освещения моменты освещаются всегда. Моменты не изменяются. Моменты есть. Быть освещенным является просто одним из многих неизменных свойств, которые составляют момент. Это особенно очевидно из показательной, хотя и воображаемой точки зрения Рис. 5.1, на котором показаны все события, составляющие историю вселенной; они все здесь, статические и неизменные. Различные наблюдатели не согласятся с тем, какие события происходя одновременно, – они делают временной разрез пространственно-временного батона под разными углами, – но полный батон и его составляющие события буквально универсальны.

Квантовая механика предлагает определенные модификации к такому классическому взгляду на время. Например, мы видели в Главе 12, что на экстремально коротких расстояниях пространство и пространство-время становятся неизбежно волнистыми и ухабистыми. Но (Глава 7) полная оценка квантовой механики и времени требует разрешения проблемы квантовомеханического измерения. Одно из предложений, как это сделать, многомировая интерпретация, особенно уместна для переписывания парадоксов, возникающих от путешествий во времени, и мы обсудим ее в следующей секции. Но в этой секции давайте останемся на классической почве и подведем описание пространства-времени в виде блока льда/батона хлеба к рассмотрению этой загадки.

Возьмем парадоксальный пример вашего возвращения назад во времени и предотвращения встречи ваших родителей. Интуитивно мы все знаем, что это должно означать. Перед вашим путешествием во времени в прошлое ваши родители встретились, – скажем, когда пробила полночь 31 декабря 1965\*, на новогодней вечеринке, – и в свое время ваша мать родила вас. Затем много лет спустя вы решили отправиться в прошлое, – назад в 31 декабря 1965, – и оказавшись там, вы изменяете вещи; в особенности, вы удерживаете ваших родителей на расстоянии друг от друга, предотвращая ваше собственное зачатие и рождение. Но теперь столкнем это интуитивное описание с более полным рассмотрением описания времени в виде пространственно-временного батона.

*(\*)"Конечно, я на самом деле должен сказать 1 января 1966, но не будем об этом беспокоиться."*

По своей сути, интуитивное описание теряет смысл, поскольку оно предполагает, что моменты могут быть изменены. Интуитивная картина воображает бой часов в полночь 31 декабря 1965 (используя стандартную земную шкалу времени), как "изначально" бывший момент встречи ваших родителей, но воображает дальше, что ваше вмешательство "впоследствии" изменяет вещи так, что с боем часов в полночь 31 декабря 1965 между вашими родителями оказались мили, если не континенты. Проблема с этим изложением событий, однако, в том, что моменты не изменяются; как мы видели, они просто есть. Пространственно-временной батон существует фиксированно и неизменно. Не имеет смысла для моментов быть "изначально" в одной ситуации, а "впоследствии" быть в другой ситуации.

Если вы переместились во времени в декабрь 1965, тогда вы были там, вы всегда были там, вы всегда будете там, вы никогда не будете в другом месте. 31 декабря 1965 не происходило дважды с вашим отсутствием в дебюте, но с присутствием "на бис". С точки зрения вечности на Рис. 5.1 вы существуете – статично и неизменно – в разных местах пространственно-временного батона. Если сегодня вы запустили вашу машину времени, чтобы она послала вас в 11:50 вечера 31 декабря 1965, тогда этот последний момент будет среди положений в пространственно-временном батоне, в которых вы можете быть найдены. Но ваше присутствие на праздновании Нового 1965 года будет вечным и не подлежащим изменению свойством пространства-времени.

Это рассмотрение все еще приводит нас к странным заключениям, но оно позволяет избежать парадокса. Например, вы появились в пространственно-временном батоне в 11:50 вечера 31 декабря 1965, но перед этим моментом там не было записи о вашем существовании. Это странно, но не парадоксально. Если некий парень увидел ваше появление в 11:50 вечера и спросил вас с испугом в глазах, откуда вы взялись, вы можете невозмутимо ответить: "Из будущего". В этом сценарии, по крайней мере, до настоящего времени, мы не попадали в логический тупик. Конечно, вещи получатся более интересными, если вы затем попытаетесь выполнить вашу миссию и удержать ваших родителей от встречи. Что произойдет? Ну, тщательно придерживаясь точки зрения "пространственно-временного" блока, мы неизбежно придем к заключению, что вы не сможете добиться успеха. Не важно, что вы сделаете на этом зловещем новогоднем празднике, вы потерпите неудачу. Удержать ваших родителей на расстоянии друг от друга, – в то время как это кажется находящимся в пределах достижимых для вас вещей, – на самом деле означает логическую белиберду. Ваши родители встретились с боем часов в полночь. Вы были там. И вы "всегда" были там. Каждый момент просто есть; он не изменяется. Применение концепции изменения к моменту имеет почти такой же смысл, как применение психоанализа к камню. Ваши родители встретились с боем часов в полночь 31 декабря 1965 и ничто не может изменить этого, поскольку их встреча является непреложным, неизменным событием, вечно занимающим свое пятнышко в пространстве-времени.

Фактически, теперь, когда вы думаете об этом, вы вспоминаете, что однажды в вашем детстве, когда вы спросили своего отца, на что было похоже предложение вашей матери, он сказал вам, что он никогда не планировал предложить ей руку. Он просто встретил вашу мать перед тем, как задать главный вопрос. Но примерно за десять минут до полуночи на новогодней вечеринке он был так напуган, увидев возникновение человека из ничего, – человека, который заявил, что он из будущего, – что когда он встретился с вашей матерью, он решил сделать ей предложение прямо на месте.

Смысл в том, что полный и неизменный набор событий в пространстве-времени с необходимостью подгоняет их друг к другу в гармоничное самосогласованное целое. Вселенная создает смысл. Если вы путешествуете назад во времени в 31 декабря 1965, вы на самом деле выполняете ваше собственное предназначение. В пространственно-временном батоне там имелся некто, присутствующий в 11:50 вечера 31 декабря 1965, кто не был там в более раннее время. С воображаемой внешней точки зрения на Рис. 5.1, вы были бы в состоянии увидеть это непосредственно; вы также смогли бы неопровержимо увидеть, что эта персона есть вы в вашем текущем возрасте. Для этих событий, произошедших десятилетия назад, чтобы сохранить смысл, вы должны отправиться назад во времени в 1965. Более того, с нашей сторонней точки зрения мы можем увидеть вашего отца, задающего вам вопрос точно после 11:50 вечера 31 декабря 1965, выглядящего испуганным, убегающего и встречающего вашу мать в полночь; немногим далее вдоль батона вы можете увидеть бракосочетание ваших родителей, ваше рождение, ваше дальнейшее детство и, еще позже, ваше вступление в машину времени. Если путешествия во времени были бы возможны, мы уже не смогли бы объяснять события в одно время исключительно в терминах событий в более ранние времена (с любой заданной точки зрения); но полная совокупность событий с необходимостью составляла бы осмысленную, логически последовательную, непротиворечивую историю.

Как подчеркивалось в последней секции, это не означает при любом напряжении воображения, что путешествия во времени в прошлое возможны. Но это строго показывает, что обозначенные парадоксы, такие как предотвращение вашего собственного рождения, сами возникли из логических ошибок. Если вы путешествуете во времени в прошлое, вы можете изменить его не более, чем вы можете изменить число π. Если вы путешествуете в прошлое, вы есть, были и всегда будете частью прошлого, той самой частью, которая привела вас к путешествию туда.

С внешней точки зрения на Рис. 5.1 это объяснение как убедительно, так и логически последовательно. Обследуя всю полноту событий в пространственно-временном батоне, мы видим, что она сцеплена с жесткой структурой космического кроссворда. Однако, с вашей точки зрения на 31 декабря 1965, вещи все еще загадочны. Я утверждал выше, что даже если вы могли бы попытаться удержать ваших родителей от встречи, в классическом подходе вы не добились бы успеха в этой задаче. Вы можете видеть, как они встречаются. Вы можете даже помочь их встрече, возможно, нечаянно, как я коротко изложил. Вы могли бы отправляться назад во времени неоднократно, так что там присутствовало бы много вас, каждый с намерением предотвратить союз ваших родителей. Но, чтобы успешно предотвратить встречу ваших родителей, должно было бы измениться нечто, в отношении чего концепция изменения бессмысленна.

Но даже после осмысления этих абстрактных наблюдений, мы можем попытаться спросить: Что остановит вас от достижения цели? Если вы стоите на вечеринке в 11:50 вечера и видите вашу юную мать, что остановит вас от того, чтобы увезти ее? Или, если вы видите вашего юного отца, что остановит вас от того, чтобы – о, ужасно даже просто сказать это, – застрелить его? Разве вы не имеете свободы воли? Это именно то место, где с некоторыми допущениями может вступить в игру квантовая механика.

Свобода воли, многомирье и путешествие во времени

Свобода воли коварная проблема даже в отсутствие усложняющего фактора путешествия во времени. Законы классической физики детерминистичны. Как мы говорили ранее, если вы знаете точно, каковы вещи сейчас (положения и скорости каждой частицы во вселенной), законы классической физики скажут вам точно, каковы вещи были или будут в любой выбранный вами момент. Уравнения не зависят от предполагаемой свободы человеческой воли. Некоторые понимают, что это означает, что в классической вселенной свобода воли должна быть иллюзией. Вы сделаны из собрания частиц, так что, если законы классической физики должны были определять все относительно ваших частиц в любой момент, – где они были, как они двигались и так далее, – ваша сознательная способность определять ваши собственные действия оказывается полностью подорванной. Это рассуждение убеждает меня, но те, кто верит, что мы являемся чем-то большим, чем сумма наших частиц, могут не согласиться.

В любом случае применимость таких наблюдений ограничена, поскольку наша вселенная является квантовой, а не классической. В квантовой физике, физике реального мира, имеется схожесть с такой классической точкой зрения; имеются также потенциально главнейшие различия. Как вы читали в Главе 7, если вы знаете квантовую волновую функцию прямо сейчас для каждой частицы во вселенной, уравнение Шредингера подскажет вам, какой волновая функция была или будет в любой другой выбранный вами момент времени. Эта часть квантовой физики полностью детерминистична, точно так же, как и в классической физике. Однако, акт наблюдения усложняет квантовомеханическую историю и, как мы видели, все еще подогревает дебаты вокруг проблемы квантового измерения до крайних пределов. Если физики однажды придут к заключению, что уравнение Шредингера это все, что есть в квантовой механике, тогда квантовая физика в целом будет во всех отношениях так же детерминистична, как и классическая физика. Как и с классическим детерминизмом, некоторые могут сказать, что это означает, что свобода воли есть иллюзия; другие так не скажут. Но если мы в настоящее время потеряли часть квантовой истории, – если переход от вероятностей к определенным результатам требует чего-то вне стандартной квантовомеханической схемы, – тогда, как минимум, возможно, что свобода воли может найти конкретное воплощение в физических законах. Мы можем однажды найти, что, как рассуждают некоторые физики, акт сознательного наблюдения является существенным элементом квантовой механики, будучи катализатором выделения одного результата из квантового тумана.[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_9" \o ) Персонально мне это кажется экстремально маловероятным, но я не знаю пути, как избежать этого.

Результат тот, что статус свободы воли и ее роль внутри фундаментальных физических законов остаются неясными. Так что рассмотрим обе возможности, когда свобода воли есть нечто иллюзорное и когда свобода воли есть нечто реальное.

Если свобода воли иллюзия, и если путешествия во времени в прошлое возможны, тогда ваша неспособность предотвратить встречу ваших родителей не является загадкой. Хотя вы чувствуете так, как если бы вы имели контроль над вашими действиями, законы физики на самом деле дергают за ниточки. Когда вы идете, чтобы похитить вашу мать или застрелить вашего отца, законы физики оказываются на пути. Машина времени высадит вас в неправильной точке города, и вы прибудете после встречи ваших родителей; или вы попытаетесь нажать курок и пистолет выдаст осечку; или вы нажмете курок, но промажете мимо цели и вместо вашего отца умрет только его соперник на руку вашей матери, освободив путь для их союза; или, возможно, когда вы остановите машину времени, вы больше не захотите предотвращать встречу ваших родителей. Безотносительно к вашим намерениям, когда вы войдете в машину времени, ваши действия, когда вы выйдете, будут частью согласованного пространственно-временного сопротивления. Законы физики побьют все попытки противоречить логике. Все, что вы делаете, приспособится к ней совершенно. Это всегда было и всегда будет. Вы не сможете изменить неизменяемое.

Если свобода воли не иллюзия, и если путешествия во времени в прошлое возможны, квантовая физика дает альтернативные предположения для того, что может случиться, и это заметно отличается от формулировок, базирующихся на классической физике. Одна особенно убедительная схема, защищаемая Дойчем, использует многомировую интерпретацию квантовой механики. Вспомним из Главы 7, что в многомировой схеме каждый потенциальный исход, содержащийся в квантовой волновой функции, – проекция спина частицы такая или этакая, другая частица здесь или там, – реализуется в своей собственной, отдельной параллельной вселенной. Вселенная, о которой мы осведомлены в каждый данный момент времени, является лишь одной из бесконечного числа других, в которых каждая возможная эволюция, допустимая квантовой физикой, отдельно реализуется. В этой схеме попытка предположить, что свобода, которую мы чувствуем, чтобы сделать тот или этот выбор, отражает нашу возможность попасть в следующий момент в ту или иную параллельную вселенную. Конечно, поскольку через параллельные вселенные рассыпано бесконечно много копий вас и меня, концепции персональной идентичности и свободы воли нуждаются в интерпретации в этом расширенном контексте.

Поскольку есть путешествие во времени и потенциальные парадоксы, многомировая интерпретация предлагает новое решение. Когда вы перемещаетесь в 11:50 вечера в 31 декабря 1965, выхватываете ваше оружие, нацеливаете его на вашего отца и нажимаете курок, пистолет срабатывает и вы добиваетесь запланированной цели. Но поскольку это не то, что произошло во вселенной, из которой вы отправились в свою одиссею во времени, ваше путешествие должно произойти не только во времени, оно также должно произойти из одной параллельной вселенной в другую. Параллельная вселенная, в которой вы теперь находитесь, будет той, в которой ваши родители никогда не встретятся – вселенная, в которой нас убеждает многомировая интерпретация, находится не здесь (поскольку каждая возможная вселенная, совместимая с законами квантовой физики, находится не здесь). Так что в этом подходе мы не сталкиваемся с логическим парадоксом, поскольку имеются различные версии данного момента, каждый из который расположен в отдельной параллельной вселенной; в многомировой интерпретации как будто имеется бесконечно много пространственно-временных батонов, а не только один. В начальной вселенной ваши родители встретились 31 декабря 1965, вы родились, вы выросли, вы накопили неприязнь к своему отцу, вы заинтересовались путешествиями во времени, и вы отправились в такое путешествие в 31 декабря 1965. Во вселенной, в которой вы оказались, ваш отец был убит перед встречей с вашей матерью 31 декабря 1965 убийцей, утверждавшим, что он его сын из будущего. Ваш аналог никогда не рождался в этой вселенной, и это правильно, поскольку вы, который нажал на курок, имел родителей. Просто это то, что произошло в жизни в другой параллельной вселенной. Поверит ли кто-нибудь в этой вселенной в вашу историю или, вместо этого, вы будете выглядеть сумасшедшим, я не могу сказать. Но что ясно, так это то, что в каждой вселенной – в той, которую вы покинули, и в той, куда вы прибыли, – мы избегаем противоречащих самим себе обстоятельств.

Более того, даже в этом расширенном контексте ваша экспедиция во времени не изменила прошлого. Во вселенной, которую вы достигли, выше присутствие в 11:50 вечера 31 декабря 1965 не изменило этот момент: в этой вселенной вы присутствовали и всегда будете присутствовать в этот момент. Еще раз, в многомировой интерпретации каждая физически состоятельная последовательность событий происходит в одной из параллельных вселенных. Вселенная, которую вы достигли является одной из тех, в которых акты убийства, которые вы избрали, были реализованы. Ваше присутствие 31 декабря 1965 и все увечья, которые вы нанесли, являются частью не подлежащей изменению ткани реальности данной вселенной.

Многомировая интерпретация предлагает аналогичное разрешение для проблемы знаний, кажущихся материализовавшимися из ниоткуда, как в сценарии с написанной моей матерью решающей статьей по теории струн. В соответствии с многомировой интерпретацией в одной из мириадов параллельных вселенных моя мать быстро достигла уровня эксперта в теории струн и все, что я прочитал в ее статье, основано на ее собственных открытиях. Когда я предпринял мою экскурсию в будущее, моя машина времени доставила меня в такую вселенную. Результаты, которые я прочитал в статье моей матери, когда я был там, на самом деле были открыты аналогом моей матери в этом мире. Затем, когда я вернулся назад во времени, я попал в другую параллельную вселенную, одну из тех, где моя мать с трудом понимает физику. После многолетних попыток обучить ее, я сдался и, в конце концов, сказал ей, что написать в статье. Но в этом сценарии нет головоломки, связанной с тем, кто ответственен за прорыв. Открывателем является аналог моей матери во вселенной, в которой она гений в физике. Все, что произошло в результате моих различных путешествий во времени, так это то, что ее открытие было передано аналогу ее самой в другой параллельной вселенной. Предположение, что вы нашли параллельную вселенную, легче принять на веру, чем открытия без автора, – спорное утверждение, но оно обеспечивает менее непостижимое объяснение взаимосвязи знания и путешествия во времени.

Ни одно из предположений, которые мы обсуждали в этой или в предыдущих секциях, не является необходимым решением загадок и парадоксов путешествия во времени. Напротив, эти предположения нужны, чтобы показать, что загадки и парадоксы не исключают путешествия в прошлое, поскольку на нашем сегодняшнем уровне понимания физика обеспечивает возможный путь, чтобы обойти проблемы. Но неудача попытки вычеркнуть что-нибудь далеко не является доказательством его возможности. Так что мы теперь зададим главный вопрос:

Возможно ли путешествие во времени в прошлое?

Наиболее здравомыслящие физики ответят нет. Я скажу нет. Но, в отличие от определенного "нет", которое вы получите, если спросите, позволяет ли СТО массивным объектам ускориться до скорости света, а затем превзойти ее, или позволяет ли теория Максвелла частице с единичным электрическим зарядом распасться на частицы с двойным электрическим зарядом, это "нет" ограниченное.

Факт, что никто не показал, что законы физики абсолютно исключают направленное в прошлое путешествие во времени. Напротив, некоторые физики даже выложили гипотетические инструкции, как цивилизация с неограниченным технологическим ресурсом, оперируя полностью в пределах известных законов физики, может продвинуться к построению машины времени (когда мы говорим о машине времени, мы всегда имеем в виду нечто, что в состоянии перемещаться как в будущее, так и в прошлое). Предложения не имеют ничего общего с крутящейся штуковиной, описанной Гербертом Уэллсом, или ДеЛореном, усовершенствованным Доком Брауном в фильме "*Назад в будущее*". И все конструктивные элементы доводятся почти вплоть до ограничений известной физики, приводя многих исследователей к подозрению, что с последующими усовершенствованиями в нашем понимании законов природы существующие и будущие предложения для машин времени будут считаться за пределами того, что физически возможно. Но на сегодняшний день это подозрение основывается на хороших ощущениях и убедительной очевидности, но не на твердом доказательстве.

Сам Эйнштейн во время десятилетия интенсивных исследований, приведших к публикации ОТО, обдумывал вопрос о путешествии в прошлое.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_10" \o )Откровенно говоря, было бы странно, если бы он этого не делал. Поскольку его радикальная переработка пространства и времени отбросила долго признававшиеся догмы, всегда существовал вопрос, насколько далеко этот переворот зайдет. Какие свойства, если это имеет место, привычного, повседневного, интуитивного времени уцелеют? Эйнштейн почти никогда не писал о проблеме путешествия во времени, поскольку, по его собственной оценке, он никогда не получал тут ощутимых результатов. Но за десятилетия, следующие за появлением его статьи по ОТО, медленно, но верно другие физики достигли прогресса.

Среди самых ранних статей по ОТО, имевших отношение к машинам времени, были написанные в 1937 шотландским физиком B. ван Стокумом[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_11" \o ) и в 1949 коллегой Эйнштейна по Институту Перспективных Исследований Куртом Годелем. Ван Стокум изучал гипотетическую задачу в ОТО, в которой очень плотный и бесконечно длинный цилиндр приводится во вращательное движение относительно его (бесконечно) длинной оси. Хотя бесконечный цилиндр физически нереалистичен, анализ ван Стокума привел к интересному открытию. Как мы видели в Главе 14, массивные вращающиеся объекты утаскивают за собой пространство в воронкоподобный "водоворот". В этом случае "водоворот" столь существенен, что, как показывает математический анализ, не только пространство, но также и время будет захватываться воронкой. Грубо говоря, вращение поворачивает направление времени в свою сторону, так что циклическое вращение вокруг цилиндра приведет вас в прошлое. Если ваш ракетный корабль делает круг вокруг цилиндра, вы можете вернуться в вашу стартовую точку в пространстве до того, как вы отправились в свое путешествие. Определенно, никто не может построить бесконечно длинный вращающийся цилиндр, но эта работа была одним из первых указаний, что ОТО может не препятствовать путешествию во времени в прошлое.

Статья Годеля также изучала ситуацию, содержащую вращательное движение. Но вместо того, чтобы сфокусироваться на объекте, вращающемся внутри пространства, Годель изучил, что произойдет, если все пространство приведено во вращательное движение. Мах посчитал бы это бессмысленным. Если целая вселенная вращается, тогда нет ничего, по отношению к чему это обозначенное вращение происходит. Мах заключил бы, что вращающаяся вселенная и стационарная вселенная есть одно и то же. Но это представляет собой другой пример, в котором ОТО отказывается от полного совпадения с реляционистской концепцией пространства Маха. В соответствии с ОТО имеет смысл говорить о вращении целой вселенной, и с этой возможностью появляются простые наблюдаемые последствия. Например, если вы выстрелите лазерным лучом во вращающейся вселенной, ОТО показывает, что он будет путешествовать вдоль спиральной траектории, а не прямой линии (отчасти похожий путь вы увидели бы, отслеживая медленно движущуюся пулю, если вы выстрелили из игрушечного пистолета вверх, в то время как вы едете на карусели). Удивительным свойством анализа Годеля было обнаружение, что если ваш ракетный корабль следовал бы подходящей траектории во вращающейся вселенной, вы также смогли бы вернуться на ваше исходное место в пространстве до того времени, когда вы отбыли. Вращающаяся вселенная, таким образом, сама будет являться машиной времени.

Эйнштейн поздравил Годеля за его открытие, но предположил, что дальнейшие исследования могут показать, что решения уравнений ОТО, позволяющие путешествие в прошлое, не сойдутся с другими существенными физическими требованиями, делая их не более, чем математическими курьезами. По следам решения Годеля все более точные наблюдения минимизировали прямое значение его работы, установив, что наша вселенная не вращается. Но ван Стокум и Годель выпустили джинна из бутылки; в течение пары десятилетий было найдено еще больше решений уравнений Эйнштейна, позволяющих путешествие во времени в прошлое.

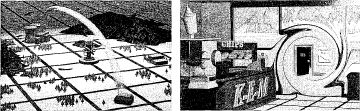
В последние десятилетия интерес к построению гипотетической машины времени был возобновлен. В 1970 Фрэнк Типлер заново проанализировал и обновил решение ван Стокума, а в 1991 Ричард Готт из Принстонского университета открыл другой метод построения машины времени с использованием так называемых космических струн (гипотетических бесконечно длинных нитеобразных остатков фазовых переходов в ранней вселенной). Все это были важные вклады в вопрос, но предложение, которое проще всего описать с использованием концепций, которые мы разрабатывали в предыдущих главах, было найдено Кипом Томе и его студентами в Калифорнийском Технологическом Институте. Они использовали *червоточины* (они же *кротовые норы*).

Проект машины времени на червоточине

Я сначала изложу основную стратегию конструирования машины времени на червоточине, предложенную Томе, а в следующей секции обсужу трудности, которые встанут перед любым подрядчиком Томе, который может наняться для выполнения его плана.

Червоточина является гипотетическим туннелем сквозь пространство. Более привычный вид туннеля, подобный тому, что просверлен через склон горы, обеспечивает короткий путь от одного места к другому. Червоточины выполняют аналогичную функцию, но они отличаются от обычных туннелей в одном важном аспекте. Тогда как обычные туннели обеспечивают новый путь через существующее пространство, – гора и пространство, которое она занимает, существуют перед конструированием туннеля, – червоточина обеспечивает туннель от одной точки пространства до другой вдоль новой, ранее не существовавшей трубы пространства. Когда вы удаляете туннель сквозь гору, пространство, которое он занимал, все еще будет существовать. Когда вы удаляете червоточину, пространство, которое она занимала, исчезнет.

Рис. 15.2а иллюстрирует червоточину, соединяющую универмаг "Квик-Е-Март" и Спрингфилдскую атомную электростанцию, но рисунок вводит в заблуждение, поскольку червоточина выглядит как протянувшаяся через воздушное пространство Спрингфилда. Более точно, червоточина должна мыслиться как новая область пространства, которая стыкуется с обычным, привычным пространством только в ее концах – ее входных отверстиях. Если во время прогулки по Спрингфилду вы просматриваете небеса в поиске червоточины, вы ее не увидите. Единственный способ увидеть червоточину будет забежать в "Квик-Е-Март", где вы найдете ее начало в обычном пространстве – одно входное отверстие червоточины. Посмотрев через начало, вы увидите внутренность атомной электростанции в местоположении второго входного отверстия, как на Рис. 15.2b. Другое, вводящее в заблуждение свойство Рис. 15.2а, то, что червоточина не выглядит как короткий путь. Мы можем зафиксировать это путем модификации рисунка, как на Рис. 15.3. Как вы можете видеть, обычный путь от атомной электростанции до "Квик-Е-Марта" в самом деле длиннее, чем новый пространственный проход через червоточину. Искривления на Рис. 15.3 отражают трудности в рисовании геометрии ОТО на странице, но рисунок дает интуитивное представление о новой связи, которую обеспечивает червоточина.



(а) (b)

***Рис 15.2****(а) Червоточина, протянутая от Квик-Е-Марта к атомной электростанции. (b) Вид через червоточину, открывающийся от входного отверстия в Квик-Е-Марте ко входному отверстию в атомной электростанции.*

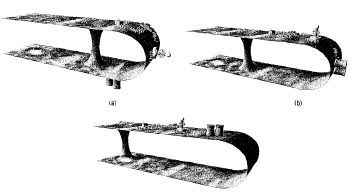


***Рис 15.3****Геометрия, которая более ясно показывает, что червоточина является коротким путем. (Входное отверстие червоточины на самом деле внутри Квик-Е-Марта и атомной электростанции, хотя это тяжело показать в таком представлении).*

Никто не знает, существуют ли червоточины, но много десятилетий назад физики установили, что они допускаются математикой ОТО, так что являются честной игрой в теоретическом исследовании. В 1950е Джон Уилер с сотрудниками был среди первых исследователей по изучению червоточин, и он открыл многое из их фундаментальных математических свойств. Более недавно, однако, Томе и его соратники обнаружили полное богатство свойств червоточин путем осознания, что они не только могут обеспечивать короткие пути через пространство, они могут также обеспечивать короткие пути сквозь время.

Идея такова. Представим, что Барт и Лиза стоят на противоположных концах Спригфилдсовской червоточины, – Барт на электростанции, Лиза в "Квик-Е-Марте", – лениво переговариваясь друг с другом о том, что подарить Гомеру к его дню рождения, когда Барт принимает решение предпринять короткую трансгалактическую экскурсию (чтобы принести Гомеру немного любимых им андромедянских рыбных палочек). Лиза не любительница поездок, но, так как она всегда хотела посмотреть на Андромеду, она уговаривает Барта перенастроить его входное отверстие червоточины на его корабль и взять его с собой, так что она сможет видеть, что происходит. Вы можете подумать, что это значит, что Барт будет растягивать червоточину до большей длины, в то время как будет продолжаться его путешествие, но это предполагало бы, что червоточина соединяет "Квик-Е-Март" и корабль Барта через обычное пространство. Это не так. И, как проиллюстрировано на Рис. 15.4, благодаря чудесам геометрии ОТО длина червоточины может оставаться фиксированной во время всего вояжа. Это ключевой момент. Даже если ракета Барта достигнет Андромеды, его удаление от Лизы через червоточину не изменится. Этим проясняется роль червоточины как короткого пути сквозь пространство.

Для определенности скажем, что Барт ограничивается 99,999999999999999999 процентами от скорости света и путешествует четыре часа, направляясь к Андромеде, все это время продолжая общаться с Лизой через червоточину, точно так же, как они это делали перед полетом. Когда корабль достигает Андромеды, Лиза просит Барта замолчать, чтобы она смогла рассмотреть вид без помех. Она раздражена его настойчивым желанием быстро своровать бутерброды с рыбными палочками, улететь и отправиться назад в Спрингфилд, но соглашается поддерживать связь до возвращения. Четырьмя часами и несколькими дюжинами раундов в крестики-нолики позже Барт благополучно опускает свой корабль на лужайке Спрингфилдсовского университета.



*(с)****Рис 15.4****(а) Червоточина, соединяющая Квик-Е-Март и атомную электростанцию, (b) Нижнее отверстие червоточины перенесено (из атомной электростанции) во внешнее пространство (на пространственный корабль, здесь не показанный), (с) Отверстие червоточины достигает галактики Андромеда; другое отверстие все еще находится в Квик-Е-Марте. Длина червоточины неизменна на протяжении всего путешествия.*

Однако, когда он выглядывает в окно корабля, он слегка приходит в шок. Здания выглядят полностью другими, а информационное табло, плавающее высоко над роллербольным стадионом, выдает дату около 6 миллионов лет после его отбытия. "Круто!?!", говорит он сам себе, но моментом позже все становится ясно. СТО, которую он вспоминает из задушевной беседы, которую он недавно имел с Неудачником Бобом (еще один персонаж сериала о Симпсонах, злейший враг Барта), гарантирует, что чем быстрее вы движетесь, тем медленнее тикают ваши часы. Если вы отправляетесь в пространство с высокой скоростью, а затем возвращаетесь, то на борту вашего корабля может пройти только несколько часов, тогда как тысячи или миллионы лет, если не больше, протекут в соответствии с часами у кого-то стационарного. Короткий расчет подтверждает Барту, что при скорости, с которой он путешествовал, восемь часов, истекших на корабле, означают 6 миллионов лет, прошедших на Земле. Данные на информационном табло верны; Барт осознает, что он оказался далеко в земном будущем.

"...Барт! Алло, Барт!" – кричит Лиза из червоточины. – "Ты меня слышишь? Не переношу его. Я хочу ненадолго пойти домой пообедать". Барт смотрит в его входное отверстие червоточины и говорит Лизе, что он уже приземлился на лужайке Спрингфилдсовского университета. Поглядев более внимательно через червоточину, Лиза видит, что Барт говорит правду, но взглянув от "Квик-Е-Марта" в направлении Спрингфилдсовского университета, она не видит его корабля на лужайке. "Я ничего не понимаю", – говорит она.

"На самом деле это имеет точный смысл," – заносчиво отвечает Барт. – "Я приземлился у Спрингфилдсовского университета, но на 6 миллионов лет в будущем. Ты не можешь видеть меня, глядя из окна "Квик-Е-Марта", поскольку ты смотришь на правильное место, но ты не смотришь в правильное время. Ты смотришь на 6 миллионов лет раньше".

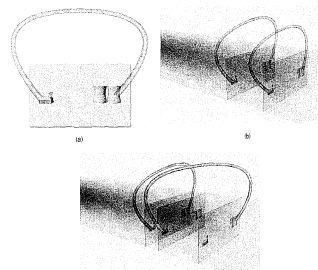
"О, ладно, это эффект СТО расширения времени," – соглашается Лиза. – "Круто. Но все равно, я хочу пойти домой пообедать, так что пролезай через червоточину, поскольку мы проголодались". "О"кей", – говорит Барт, проползая через червоточину. Он покупает пончик у Апу (хозяина супермаркета "Квик-Е-Март"), и они с Лизой направляются к дому.

Отметим, что хотя прохождение Барта через червоточину заняло у него момент, оно переместило его на 6 миллионов лет назад во времени. Он, и его корабль и входное отверстие червоточины приземлились в далеком будущем Земли. Если бы он осмотрелся, поговорил с людьми и ознакомился с новостями, все бы подтвердило этот факт. И еще, когда он прошел через червоточину и объединился с Лизой, он переместился назад в настоящее. То же самое было бы верно для любого другого, кто смог бы последовать за Бартом через входное отверстие червоточины: он также переместился бы на 6 миллионов лет назад во времени. Аналогично, любой, кто пролез бы через входное отверстие червоточины в "Квик-Е-Марте" и вылез бы из входного отверстия, оставленного Бартом в его корабле, переместился бы на 6 миллионов лет в будущее. Важный момент, что Барт не просто взял одно из входных отверстий червоточины в путешествие через пространство. Его путешествие также переместило входное отверстие червоточины через время. *Путешествие Барта привело его и входное отверстие червоточины в будущее Земли. Короче, Барт преобразовал туннель сквозь пространство в туннель сквозь время; он переделал червоточину в машину времени*.

Грубый способ визуализировать, что произошло, изображен на Рис. 15.5. На Рис. 15.5а мы видим червоточину, соединяющую одно пространственное место с другим, причем конфигурация червоточины нарисована так, чтобы подчеркнуть, что она лежит вне обычного пространства. На Рис. 15.5b мы показали эволюцию этой червоточины во времени, предполагая, что оба ее входных отверстия остаются стационарными. (Временные сечения те же самые, что и у стационарного наблюдателя). На Рис. 15.5с мы показали, что произойдет, когда одно из входных отверстий червоточины будет погружено в пространственный корабль и отправлено в путешествие по замкнутому маршруту. Время для движущегося входного отверстия, так же как время для движущихся часов, замедляется, так что движущееся входное отверстие перемещается в будущее. (Если один час истекает по движущимся часам, но тысяча лет проходит по стационарным часам, движущиеся часы будут перепрыгивать в будущее стационарных часов). Таким образом, вместо стационарного соединения входного отверстия червоточины через туннель червоточины с другим входным отверстием на том же самом временном сечении, она соединяет с входным отверстием на будущем временном сечении, как показано на Рис. 15.5с. Безотносительно к тому, как входные концы червоточины движутся дальше, разница во времени между ними остается фиксированной. В любой момент, если вы войдете в одно входное отверстие и выйдете из другого, вы станете путешественником во времени.

Построение машины времени на червоточине

Один план простроения машины времени теперь понятен. Этап 1: находим или создаем червоточину, достаточно широкую, чтобы в нее прошли вы или любой, кого вы хотите послать сквозь время. Этап 2: устанавливаем временное различие между входными отверстиями червоточины – скажем, путем движения одного отверстия относительно другого. Вот и все. В принципе.



*(с)****Рис 15.5****(а) Червоточина, созданная в некоторый момент времени, соединяет одно место в пространстве с другим, (b). Если входное отверстие червоточины не движется относительно другого входного отверстия, они "перемещаются" сквозь время в одном и том же темпе, так что туннель соединяет две области в одно и то же время, (с) Если одно входное отверстие червоточины отправляется в путешествие по замкнутому маршруту (не показано), для этого входного отверстия протечет меньше времени, а потому туннель будет соединять две области пространства в различные моменты времени. Червоточина станет машиной времени.*

Как насчет практики? Ну, как я упоминал в начале, никто не знает, даже существуют ли червоточины. Некоторые физики предполагали, что мельчайшие червоточины могут быть в изобилии в мельчайшей структуре пространственной ткани, постоянно воспроизводясь квантовыми флуктуациями гравитационного поля. Если так, пробема будет в увеличении их до макроскопического размера. Предложения, как это могло бы быть сделано, делались, но они находятся просто за пределами теоретических полетов фантазии. Другие физики воображали создание больших червоточин как инженерный проект по прикладной ОТО. Мы знаем, что пространство реагирует на распределение материи и энергии, так что при достаточном контроле над материей и энергией мы могли бы заставить область пространства породить червоточину. Этот подход представляет дополнительные трудности, поскольку точно так же, как мы должны проделать дырку в склоне горы, чтобы создать входное отверстие туннеля, мы должны проделать дырку в ткани пространства, чтобы создать входное отверстие червоточины.[[12]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_12" \o ) Никто не знает, позволяются ли такие дырки в пространстве законами физики. Работа, к которой я имел отношение в теории струн (см. страницу 386), показала, что определенные виды пространственных дыр возможны, но до настоящего момента мы не имеем идей, могут ли эти разрезы быть пригодными для создания червоточин. Подводя черту, видим, что преднамеренное овладение макроскопическими червоточинами является фантазией, которая, в лучшем случае, предполагает очень долгий путь до реализации.

Более того, даже если мы как-то умудримся получить в наши руки макроскопическую червоточину, мы ничего не сможем сделать; мы все еще будем стоять перед парой существенных препятствий. Первое, в 1960х Уилер и Роберт Фуллер показали с использованием уравнений ОТО, что червоточины нестабильны. Их стенки имеют тенденцию схлопываться внутрь за долю секунды, что уничтожает из пригодность как средства путешествия. Однако, совсем недавно физики (включая Томе и Морриса, а также Мэтта Виссера) нашли, что есть потенциальный путь, обходящий проблему коллапса. Если червоточина не пуста, а напротив, содержит материал, – так называемую экзотическую материю, – которая может оказать расталкивающее давление на ее стенки, тогда может быть возможным удержать червоточину открытой и стабильной. Хотя это и похоже по своему эффекту на космологическую константу, экзотическая материя будет генерировать расталкивающую вовне отрицательную гравитацию посредством имеющейся у нее отрицательной энергии (а не просто отрицательного давления, характеризующего космологическую константу[[13]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_13" \o )). При в высшей степени специальных условиях квантовая механика допускает отрицательную энергию,[[14]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_14" \o ) но монументальной проблемой будет сгенерировать достаточно экзотической материи, чтобы удержать макроскопическую червоточину открытой. (Например, Виссер рассчитал, что количество отрицательной энергии, необходимой для поддержания открытой червоточины в метр шириной грубо равно величине полной энергии, производимой Солнцем примерно за 10 миллионов лет.[[15]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_15_15" \o ))

Второе, даже если мы каким-то образом найдем или создадим макроскопическую червоточину, и даже если мы как-то будем в состоянии удержать ее стенки от немедленного схлопывания, и даже если мы сможем индуцировать разницу времен между входными отверстиями червоточины (скажем, через круговой полет одного из входных отверстий с высокой скоростью), останется другая сложность овладевания машиной времени. Большое число физиков, включая Стивена Хокинга, подняли вопрос о возможности того, что вакуумные флуктуации – дрожания, возникающие из-за квантовой неопределенности, испытываемые всеми полями даже в пустом пространстве, обсужденные в Главе 12, - могут разрушить червоточину точно так же, как это может сказаться на положении, где окажется машина времени. Причина в том, что уже в момент, когда путешествие во времени через червоточину станет возможным, может вступить в игру разрушительный механизм обратной связи, чем-то похожий на визгливый шум, генерируемый, когда уровни микрофона и говорящего в звуковой системе не урегулированы должным образом. Вакуумные флуктуации из будущего могут проникнуть через червоточину в прошлое, где они затем могут распространиться через обычное пространство и время в будущее, войти в червоточину и пропутешествовать назад в прошлое снова, создавая бесконечный цикл через червоточину и наполняя ее все возрастающей энергией. Вероятно, такое интенсивное возрастание энергии разрушит червоточину. Теоретические расчеты подтверждают, что это реальная возможность, но необходимые расчеты находятся на пределе нашего текущего понимания ОТО – и квантовой механики в искривленном пространстве-времени, – так что пока здесь нет убедительного доказательства.

Проблемы с построением машины времени на червоточине, очевидно, безмерны. Но конечное слово не может быть произнесено до того, как будет усовершенствовано дальше наше умение в обращении с квантовой механикой и ОТО, возможно, через достижения в теории суперструн. Хотя на интуитивном уровне физики в целом согласны, что путешествия во времени в прошлое невозможны, на сегодняшний день вопрос еще предстоит полностью закрыть.

Космический туризм

Размышляя о путешествиях во времени, Хокинг обратил внимание на интересный момент. Почему, спрашивает он, если путешествия во времени возможны, мы не затоплены визитерами из будущего? Ну, вы можете ответить, может быть, мы и затоплены. И вы можете пойти дальше и сказать, что мы столько раз сажали путешественников во времени в закрытые (и охраняемые) места, что большинство из остальных не осмеливается идентифицировать себя. Конечно, Хокинг наполовину шутит, я делаю также, но он поднимает серьезный вопрос. Если вы верите, как и я, что нас никто не посещал из будущего, не эквивалентно ли это уверенности, что путешествия во времени невозможны? Конечно, если люди преуспели в построении машин времени в будущем, некоторые историки подпрыгнут от возможности получить грант на изучение, непосредственно и персонально, построения первой атомной бомбы, или первого путешествия на Луну, или первых шагов в реальном телевидении. Так что, если мы верим, что никто из будущего нас не посещал, возможно, мы неявно говорим, что мы верим, что никакая машина времени никогда не будет построена.

На самом деле, однако, это не обязательное заключение. Машины времени, которые до сих пор были предложены, не позволяют путешествовать в более раннее время, чем была простроена сама первая машина времени. Для машины времени на червоточине это легко увидеть, изучив Рис. 15.5. Хотя имеется разница во времени между входными отверстиями червоточины, и хотя эта разница позволяет путешествовать вперед и назад во времени, вы не сможете достичь времени перед моментом, когда разница была установлена. Сама червоточина не существует далеко слева на пространственно-временном батоне, так что нет способа, которым вы бы смогли использовать ее в этой области. Так что если первая машина времени построена, скажем, через 10 000 лет от сегодняшнего дня, этот момент, несомненно, будет привлекать множество туристов во времени, но все предыдущие моменты, вроде нашего, останутся недоступными.

Я нахожу забавным и неотразимым, что наше текущее понимание законов природы не только предлагает, как избежать кажущихся парадоксов путешествия во времени, но также предлагает средства для того, как путешествие во времени может на самом деле быть совершено. Хотелось бы не ошибиться: я числю себя среди здравомыслящих физиков, которые интуитивно чувствуют, что однажды мы исключим путешествия во времени в прошлое. Но до получения убедительного доказательства этого, я думаю, что обоснованно и приемлемо держать разум открытым. В самом крайнем случае, исследователи, сосредоточенные на этих проблемах, в значительной степени углубляют наше понимание пространства и времени в экстремальных условиях. В самом лучшем случае, они, возможно, делают первые критические шаги в направлении приобщения нас к пространственно-временному супершоссе. В конце концов, каждый момент, который проходит без достижения нами успеха в построении машины времени, является моментом, который навсегда останется вне нашей досягаемости и вне досягаемости всех, кто идет следом.

**16 Будущее в намеках**

***ПАНОРАМА ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ***

**Ф**изики тратят большую часть своей жизни в состоянии крушения надежд. Это профессиональный риск. Отличиться в физике означает испытывать сомнения во время прохождения извилистой дороги к ясности. Мучительный дискомфорт от препятствий есть то, что заставляет обычных во всех иных отношениях мужчин и женщин идти на экстраординарные подвиги находчивости и творчества; почти никто не задумывается о подобных диссонирующих деталях, заботясь о гармоничном разрешении проблем. Но по дороге к объяснению – во время поиска новых схем для обращения к стоящим вопросам – теоретики должны осмотрительно шагать через джунгли неясностей, руководствуясь в большей степени интуицией, намеками, путеводными нитями и расчетами. И, поскольку большинство исследователей имеет тенденцию скрывать свои следы, открытия часто обладают внешне меньшими признаками тяжелого пути, чем было на самом деле. Но не будем упускать из виду факт, что ничто не дается легко. Природа не раскрывает свои секреты без труда.

В этой книге мы посмотрели в нескольких главах на историю попыток нашего биологического вида понять пространство и время. И хотя мы сталкивались с некоторыми глубокими и поразительными открытиями, нам еще предстоит достигнуть момента окончательного крика "Эврика!", когда все сложности прекратятся и распространится полная ясность. Мы, более определенно, все еще бродим по джунглям. Так что дальше? Какова следующая глава в пространственно-временной истории? Конечно, никто не знает с уверенностью. Но в последние годы множество путеводных нитей появилось на свет, и хотя их еще предстоит интегрировать в гармоничную картину, многие физики верят, что они подсказывают следующее большое потрясение в нашем понимании космоса. В свое время пространство и время, как сейчас полагают, могут быть распознаны как всего лишь указания на более тонкие, более глубокие и более фундаментальные принципы, лежащие в основе физической реальности. В последней главе настоящего обзора давайте рассмотрим некоторые из этих нитей рассуждений и уловим отблеск того, куда мы, может быть, направимся в наших продолжающихся поисках понимания ткани космоса.

Являются ли пространство и время фундаментальными концепциями?

Немецкий философ Иммануил Кант говорил, что будет не просто тяжело покончить с пространством и временем во время размышлений о вселенной и ее описания, это будет совершенно невозможно. Откровенно говоря, я могу увидеть, из чего исходил Кант. Всякий раз, когда я сажусь, закрываю мои глаза и пытаюсь думать о вещах, пока каким-то образом они не обрисованы как занимающие пространство или переживающие прохождение времени, я терплю неудачу. Путь короток. Пространство через состояние или время через изменение всегда умудряются просочиться. Иронически говоря, ближе всего я подхожу к избавлению моих мыслей от прямой ассоциации с пространством-временем, когда я погружаюсь в математические вычисления (что часто приходится делать с пространством-временем!), поскольку природа таких упражнений, кажется, годится для поглощения моих мыслей, хотя бы только на минуту, в абстрактном окружении, которое кажется свободным от пространства и времени. Но сами мысли и тело, в котором они располагаются, все равно являются очень большой частью привычного пространства и времени. По-настоящему избавиться от пространства и времени так же нелегко, как ускользнуть от вашей тени.

Тем не менее, многие из сегодняшних ведущих физиков подозревают, что пространство и время, хотя и всюду проникающие, могут не быть по-настоящему фундаментальными. Точно так же, как тяжесть артиллерийского ядра происходит из коллективных свойств его молекул, и точно так же, как запах розы происходит из коллективных свойств ее молекул, и точно так же, как стремительность гепарда происходит от коллективных свойств его молекул, нервов и тканей, так и свойства пространства и времени – наш объект внимания на протяжении большей части этой книги – могут также происходить из коллективного поведения некоторых других, более фундаментальных составляющих, которые нам еще предстоит идентифицировать.

Физики иногда суммируют эту возможность, говоря, что пространство-время может быть иллюзией – стимулирующим описанием, но таким, чей смысл требует подходящей интерпретации. Тем не менее, если вас толкнет летящее артиллерийское ядро, или вы вдохнете манящий аромат розы, или вы заметите стремительного гепарда, вы не станете отрицать их существование просто потому, что каждый состоит из мелких, более основных сущностей. Напротив, я думаю, что большинство из нас согласится, что эти агломерации материи существуют и, более того, что они должны изучаться путем иследования того, как их обычные характеристики происходят из их атомных составляющих. Но, поскольку они составные, почему бы нам не попытаться построить теорию вселенной, основывающуюся на ядрах, розах или гепардах. Аналогично, если пространство и время оказываются составными сущностями, это не значит, что их привычное проявление от ньютонова ведра до эйнштейновской гравитации иллюзорно; нет сомнений, что пространство и время сохранят свои всеобъемлющие позиции в ощущаемой реальности безотносительно к будущим доработкам в нашем понимании. Напротив, составное пространство-время будет означать, что еще более элементарное описание вселенной – то, которое без пространства и без времени, – еще должно быть открыто. Иллюзия тогда будет чем-то нашего собственного изготовления: ложной уверенностью, что глубочайшее понимание космоса должно возможно более остро акцентировать внимание на пространстве и времени. Точно так же, как тяжесть артиллерийского ядра, запах розы и скорость гепарда исчезают, когла мы исследуем материю на атомном и субатомном уровне, пространство и время могут аналогично раствориться, когда они изучаются в самой фундаментальной формулировке законов природы.

То, что пространство-время может отсутствовать среди фундаментальных космических составляющих, может поразить вас как нечто неестественное. И вы вполне можете быть правы. Но слухи о надвигающемся удалении пространства-времени из глубоких физических законов не родились из дурацкого теоретизирования. Напротив, эта идея строго поддерживается большим числом хорошо обоснованных исследований. Давайте бросим взгляд на некоторые из самых выдающихся.

Квантовое усреднение

В Главе 12 мы обсуждали, как ткань пространства, почти подобно всему остальному в нашей квантовой вселенной, подвергается скачкам квантовой неопределенности. Это те флуктуации, вспомните, которые являются проклятием теорий точечных частиц, мешая им обеспечить осмысленную квантовую теорию гравитации. Заменяя точечные частицы петлями и отрезками линий, теория струн рассеивает флуктуации, – существенно уменьшая их величину, – и тем самым обеспечивает успешное объединение квантовой механики и ОТО. Тем не менее, уменьшенные флуктуации пространства-времени определено все еще существуют (как проиллюстрировано на предпоследнем уровне увеличения на Рис. 12.2), и вместе с ними мы можем найти путеводную нить в отношении судьбы пространства-времени.

Первое, мы узнали, что обычное пространство и время, которое заполняет наше внимание и поддерживает наши уравнения, возникает из разновидности процесса усреднения. Подумайте о фрагментированном изображении, которое вы видите, когда ваше лицо находится в нескольких дюймах от телевизионного экрана. Это изображение сильно отличается от того, что вы видите с более комфортного расстояния, поскольку тогда вы не можете больше различать отдельные фрагменты-пиксели, ваши глаза объединяют их в среднее, которое выглядит гладким. Но заметим, что пиксели производят привычное непрерывное изображение только благодаря процессу усреднения. В похожем стиле микроскопическая структура пространства-времени пронизана хаотическими неровностями, но мы непосредственно не осознаем их, поскольку мы не имеем возможности разрешать пространство-время на таком мельчайшем масштабе. Вместо этого наши глаза и даже наше самое мощное оборудование объединяют неровности в среднее, почти подобно тому, что происходит с телевизионными пикселями. Поскольку неровности хаотичны, как правило, имеется столько же неровностей "вверх" в малой области, сколько и "вниз", так что при усреднении они сводятся на нет, давая спокойное пространство-время. Но, как и в телевизионной аналогии, появление гладкой и спокойной формы пространства-времени происходит только вследствие процесса усреднения.

Квантовое усреднение обеспечивает утилитарную интерпретацию утверждения, что привычное пространство-время может быть иллюзорным. Усреднения применимы для многих целей, но они намеренно не обеспечивают четкую картину лежащих в основании деталей. Хотя средняя семья в США имеет 2,2 ребенка, вы будете в затруднении, когда я попрошу вас посетить такую семью. И хотя средняя национальная цена галлона молока составляет $2,783, маловероятно, что вы найдете магазин, продающий его точно по этой цене. Так и привычное пространство, само являясь результатом процесса усреднения, может не описывать детали чего-то, что мы хотим называть фундаментальным. Пространство и время могут быть только приблизительными, коллективными концепциями, в высшей степени пригодными для анализа вселенной на всех масштабах, кроме ультрамикроскопических, однако столь же иллюзорными, как и семья с 2,2 детьми.

Второе и связанное наблюдение в том, что возрастающая интенсивность квантовых дрожаний, которая появляется при уменьшении масштабов, наводит на мысль, что понятие возможности деления расстояний или продолжительностей на все более мелкие единицы, вероятно, заканчивается в районе длины Планка (10–33 сантиметра) и времени Планка (10–43 секунды). Мы сталкивались с этой идеей в Главе 12, где мы подчеркнули, что, хотя это понятие полностью противоречит нашим обычным ощущениям пространства и времени, не является особенно удивительным, что свойство, пригодное в повседневной жизни, не сохраняется, когда мы вторгаемся в микрообласть. А поскольку произвольная делимость пространства и времени есть одно из их самых привычных повседневных свойств, неприменимость этой концепции на ультрамалых масштабах дает другой намек, что имеется нечто другое, скрывающееся в микроглубинах, – нечто, что может быть названо скелетным основанием пространства-времени, – сущность, на которую намекает привычное понятие пространства-времени. Мы ожидаем, что эта нижняя составная часть, эта самая простейшая ткань пространства-времени не допускает рассечения на еще более малые кусочки вследствие интенсивных флуктуаций, с которыми мы в конце концов столкнемся, а потому это совершенно не похоже на крупномасштабное пространство-время, которое мы непосредственно воспринимаем. Следовательно, кажется вероятным, что фундаментальные составляющие пространства-времени, какими бы они ни были, существенно трансформированы процессом усреднения, при помощи которого они дают пространство-время повседневного опыта. Таким образом, поиски привычного пространства-времени в глубочайших законах природы могут быть похожи на попытки принять отдельную ноту Девятой симфонии Бетховена за единственную ноту или отдельный мазок кистью в одном из нарисованных стогов сена Моне за единственный мазок кистью. Подобно этим шедеврам человеческой выразительности природное пространство-время в целом может быть настолько отлично от чего частей, что ничего, похожего на него, на самом фундаментальном уровне не существует.

Геометрия в переводе

Другое наблюдение, которое некоторые физики называют *геометрической дуальностью*, также наводит на мысль, что пространство-время может не быть фундаментальным, но намекает на это с совершенно другой точки зрения. Это описание немного более специально, чем квантовое усреднение, так что свободно переходите на поверхностное ознакомление, если в любом месте эта секция покажется слишком тяжелой. Но, поскольку многие исследователи рассматривают этот материал среди самых символических особенностей струнной теории, стоит попытаться понять сущность идей.

В Главе 13 мы говорили, как пять предположительно отдельных струнных теорий на самом деле оказались различными переводами одной и той же теории. Среди других вещей мы подчеркнули, что это мощное открытие, поскольку при переводе в высшей степени трудные вопросы иногда становятся намного проще для ответа. Но имеется свойство словаря для переводов, объединяющего пять теорий, которое я до сих пор не отмечал. Точно так же, как степень трудности вопроса может быть радикально изменена путем перевода из одной струнной формулировки к другой, также может вести себя описание геометрической формы пространства-времени. Ниже излагается, что я имею в виду.

Поскольку теория струн требует более, чем три пространственных измерения и одно временное измерение повседневного опыта, нам пришлось в Главах 12 и 13 поднять вопрос о том, где могут быть скрыты дополнительные измерения. Ответ, который мы нашли, в том, что они могут быть скручены до размера, который до сегодняшнего дня избегал обнаружения, поскольку он меньше, чем мы в состоянии прозондировать экспериментально. Мы также нашли, что физика в наших привычных больших измерениях зависит от точного размера и формы дополнительных измерений, поскольку их геометрические свойства влияют на способы (моды) колебаний, которые струны могут выполнять. Хорошо. Теперь о части, которую я упустил.

Словарь, который переводит вопросы, сформулированные в одной струнной теории, в непохожие вопросы, сформулированные в другой струнной теории,*также переводит геометрию дополнительных измерений в первой теории в непохожую геометрию дополнительных измерений во второй теории*. Если, например, вы изучаете физические следствия, скажем, струнной теории типа IIА с дополнительными измерениями, скрученными в особые размер и форму, тогда любое заключение, которое вы можете получить, по крайней мере, в принципе, будет выводиться путем рассмотрения вопросов, должным образом переведенных, скажем, в струнную теорию типа IIB. Но словарь для проведения перевода требует, чтобы дополнительные измерения в струнной теории типа IIB были скручены в точную геометрическую форму, которая зависит – и в общем случае отличается – от формы, заданной теорией типа IIA. Короче, данная теория струн со скрученными измерениями в одной геометрической форме эквивалентна – является переводом – другой теории струн со скрученными измерениями в отличающейся геометрической форме.

И различия в пространственно-временной геометрии не должны быть несущественными. Например, если одно из дополнительных измерений, скажем, в теории струн типа IIA должно быть скручено в окружность, как на Рис. 12.7, словарь перевода показывает, что это абсолютно эквивалентно теории струн типа IIB с одним из ее дополнительных измерений, также скрученным в окружность, но с радиусом, обратно пропорциональным оригиналу. Если одна окружность маленькая, другая будет большой и наоборот – и, кроме того, нет абсолютно никакого способа различить две геометрии. (Выражая длины в единицах планковской длины, если одна окружность имеет радиус R, математический словарь показывает, что другая окружность имеет радиус 1/R). Вы можете подумать, что вы могли бы легко и немедленно найти различия между большой и малой размерностями, но в теории струн это не всегда так. Все наблюдения происходят из взаимодействия струн, и эти две теории, типа IIA с большим циклическим измерением и типа IIB с маленьким циклическим измерением, являются просто различными переводами – различными способами выражения – одной и той же физики. Каждое наблюдение, которое вы описываете в рамках одной струнной теории имеет альтернативное и эквивалентно жизнеспособное описание в рамках другой струнной теории, даже если язык каждой теории и интерпретация, которую она дает, могут различаться. (Это возможно, поскольку имеются две качественно отличающиеся конфигурации для струн, движущихся по циклическому измерению: та, в которой струна обернута вокруг циклического измерения как резиновая лента вокруг жестяного бидона, и та, в которой струна находится на части окружности, но не обернута вокруг нее. Первая имеет энергии, пропорциональные радиусу окружности [чем больше радиус, тем сильнее растянуты обернутые струны, и потому тем больше энергии они в себе заключают], тогда как последняя имеет энергии, которые обратно пропорциональны радиусу [чем меньше радиус, тем более ограничены струны, и потому тем более энергично они двигаются вследствие квантовой неопределенности]. Отметим, что если мы заменим оригинальную окружность на окружность с обратным радиусом, одновременно также поменяв местами "обернутые" и "необернутые" струны, физические энергии – и, оказывается, физика в более общем смысле – останутся не затронутыми. Это в точности то, что требует словарный перевод от теории типа IIA к теории типа IIB, и почему две кажущиеся различными геометрии – большое и малое циклическое измерение – могут быть эквивалентны).

Аналогичная идея также сохраняется, когда циклические измерения заменяются более сложными формами (пространствами, многообразиями) Калаби-Яу, введенными в Главе 12. Заданная теория струн с дополнительными измерениями, скрученными в особое пространство Калаби-Яу, может быть переведена с помощью словаря в другую теорию струн с дополнительными измерениями, скрученными в другое пространство Калаби-Яу (то, которое называется зеркальным или дуальным к оригиналу). В этих случаях отличаются не только размеры пространств Калаби-Яу, но так же и их формы, включая число и разнообразие их дырок. Но переводный словарь обеспечивает, что они отличаются в точно правильном смысле, так что даже если дополнительные измерения имеют отличающиеся размеры и формы, физика, следующая из каждой теории, абсолютно идентична. (Имеются два типа дырок в данном пространстве Калаби-Яу, но оказывается, что способы (моды) колебаний струны – а потому физические следствия – чувствительны только к разнице между числом дырок каждого типа. Так что если пространство Калаби-Яу имеет, скажем, две дырки первого вида и пять дырок второго, тогда как другое пространство Калаби-Яу имеет пять дырок первого вида и две дырки второго, тогда даже если они отличаются как геометрические формы, они могут давать начало идентичной физике\*).

*(\*) "Для подробностей о геометрической дуальности, включающей как окружности, так и пространства Калаби-Яу, смотрите Элегантную Вселенную, Главу 10."*

Тогда, с другой точки зрения, это поддерживает подозрение, что пространство не является основополагающей концепцией. Некто, описывая вселенную с использованием одной из пяти струнных теорий, будет утверждать, что пространство, включая дополнительные размерности, имеет особые размер и форму, в то время как некто другой, используя одну из других струнных теорий, будет утверждать, что пространство, включая дополнительные измерения, имеет отличающиеся размер и форму. Поскольку два наблюдателя будут просто использовать альтернативные математические описания одной и той же физической вселенной, это не тот случай, когда один будет прав, а другой неправ. Они оба будут правы, даже если их заключения относительно пространства – его размера и формы – будут отличаться. Отметим также, что это не то же, что они будут рассекать пространство-время различным, одинаково пригодным способом, как в СТО. Эти два наблюдателя не смогут прийти к согласию по поводу общей структуры самого пространства-времени. И в этом главный момент. Если пространство-время на самом деле фундаментально, большинство физиков ожидает, что кто угодно безотносительно от точки зрения – безотносительно к используемому языку или теории – согласится с его геометрическими свойствами. Но факт, что, по меньшей мере, в рамках теории струн это не обязательно имеет место, указывает, что пространство-время может быть вторичным феноменом.

Таким образом, мы подошли к вопросу: если путеводные нити, описанные в последних двух секциях, ориентируют нас в правильном направлении, и привычное пространство-время является только крупномасштабным проявлением некоторой фундаментальной сущности, то что это за сущность и каковы ее существенные свойства? На сегодняшний день никто не знает. Но в поисках ответа исследователи нашли некоторые дальнейшие путеводные нити, и наиболее важная среди них приходит из размышлений о черных дырах.

Откуда энтропия у черных дыр?

Черные дыры имеют самое непроницаемое бесстрастное лицо во вселенной. Снаружи они выглядят поистине настолько просто, насколько вы можете осознать. Тремя отличительными свойствами черной дыры являются ее масса (которая определяет, насколько она велика, – расстояние от ее центра до ее горизонта событий, окружающей ее поверхности невозвращения), ее электрический заряд и насколько быстро она вращается. Это все. Больше нет деталей, которые могут быть собраны из тщательного исследования внешнего вида, который черная дыра представляет космосу. Физики характеризуют это через высказывание: "Черная дыра не имеет волос", имея в виду, что отсутствуют все виды детализированных свойств, которые позволили бы выделить индивидуальность. Если вы видели одну черную дыру с данной массой, зарядом и скоростью вращения (даже если вы изучаете их косвенно, через их влияние на окружающий газ и звезды, поскольку черные дыры черны), вы точно видели их все.

Тем не менее, за их холодным спокойствием черные дыры скрывают величайшие резервуары хаоса, которые когда-либо знала вселенная. Среди всех физических систем заданного размера с любым возможным составом черные дыры содержат максимально возможную энтропию. Вспомним из Главы 6, что один грубый путь раздумий об этом следует непосредственно из определения энтропии как меры числа перестановок внутренних составляющих объекта, которые не влияют на его внешний облик. Если применить это к черным дырам, то даже если мы не можем сказать, что на самом деле представляют собой их составляющие, – поскольку мы не знаем, что происходит, когда материя проваливается в центр черной дыры, – мы можем сказать с уверенностью, что перестановки этих составляющих будут влиять на массу, заряд или вращение черной дыры не больше, чем перестановки страниц *Войны и Мира* будут влиять на вес книги. А поскольку масса, заряд и вращение полностью определяют лицо, которое черная дыра показывает внешнему миру, все такие манипуляции пройдут незамеченными, и мы можем сказать, что черная дыра имеет максимальную энтропию.

Более того, при этих условиях вы можете представить превышение энтропии черной дыры над всеми остальными объектами следующим простым образом. Постройте полую сферу того же размера, как и данная черная дыра и заполните ее газом (водород, гелий, углекислый газ, что угодно), которому вы позволите распространиться по внутренности сферы. Чем больше газа вы накачаете, тем больше будет энтропия, поскольку большее число составляющих означает большее количество возможных перестановок. Вы можете тогда предположить, что если вы продолжаете качать и качать, энтропия газа будет неизменно возрастать и в конечном счете превысит энтропию данной черной дыры. Это хитрая стратегия, но ОТО показывает, что она проваливается. Чем больше газа вы накачали, тем более массивным становится содержимое сферы. И перед тем, как вы достигнете энтропии черной дыры равного размера, нарастающая масса внутри сферы достигнет критической величины, которая заставит сферу и ее содержимое стать черной дырой. Нет никакого пути обойти это. Черная дыра имеет монополию на максимальный беспорядок.

Что если вы попытаетесь еще больше повысить энтропию в пространстве внутри самой черной дыры, постоянно закачивая все больше газа? Энтропия на самом деле продолжит возрастать, но вы измените правила игры. По мере втягивания материи через ненасытный горизонт событий черной дыры, не только возрастает энтропия черной дыры, но также и увеличивается ее размер. Размер черной дыры пропорционален ее массе, так что когда вы свалите больше материи в дыру, она станет тяжелее и больше. Таким образом, раз уж вы максимизировали энтропию в области пространства путем создания черной дыры, любые попытки дальше повысить энтропию *в этой области* будут неудачными. Область просто не может содержать больше беспорядка. Она насытилась энтропией. Чтобы вы ни делали, закачиваете ли вы газ или бросаете внутрь Хаммер, вы обязательно заставите черную дыру расти, и потому занимать больший пространственный регион. Таким образом, количество энтропии, содержащееся в черной дыре, не только говорит нам о фундаментальном свойстве черной дыры, но также говорит нам о чем-то фундаментальном про само пространство: максимальная энтропия, которая может быть втиснута в область пространства, – любую область пространства, везде и всегда, – равна энтропии, содержащейся в черной дыре, чей размер равен рассматриваемой области.

Итак, как много энтропии содержит черная дыра заданного размера? В этом месте вещи становятся интересными. Рассуждая интуитивно, начнем с чего-то, что более легко визуализировать, вроде воздуха в пластиковом контейнере. Если вы объедините два таких контейнера, удвоится общий объем и число молекул воздуха, так что вы можете предположить, что вы удвоили энтропию. Детальные расчеты подтверждают[[1]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_1" \o ) это заключение и показывают, что при прочих равных (при неизменной температуре, плотности и так далее) энтропия привычной физической системы пропорциональна ее объему. Естественное следующее предположение заключается в том, что такое же заключение будет также применимо к менее привычным вещам вроде черных дыр, приводя нас к ожиданию, что энтропия черной дыры также пропорциональна ее объему.

Но в 1970х Джэкоб Бекенштейн и Стивен Хокинг открыли, что это не верно. Их математический анализ показал, что энтропия черной дыры не пропорциональна ее объему, а вместо этого пропорциональна площади ее горизонта событий, - грубо говоря, площади ее поверхности. Это совершенно другой ответ. Когда вы удвоите радиус черной дыры, ее объем возрастет на фактор 8 (23), тогда как площадь ее поверхности возрастет только на фактор 4 (22); когда вы увеличите радиус черной дыры в сто раз, ее объем возрастет на фактор миллион (1003), тогда как площадь ее поверхности возрастет только на фактор 10 000 (1002). Большие черные дыры имеют намного "больше" объема, чем площади поверхности.[[2]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_2" \o )Таким образом, даже если черные дыры имеют величайшую энтропию среди всех вещей заданного размера, Бекенштейн и Хокинг показали, что количество энтропии, которую они содержат, меньше, чем то, что мы наивно предполагали.

То, что энтропия пропорциональна площади поверхности, является не просто любопытным отличием между черными дырами и пластиковым контейнером, на которое мы можем обратить внимание и быстро идти дальше. Мы видели, что черные дыры устанавливают предел количеству энтропии, которая, даже в принципе, может быть втиснута в область пространства: возьмем черную дыру, чей размер точно равен размеру рассматриваемой области, вычислим, сколько энтропии имеет черная дыра, и это будет абсолютным пределом количества энтропии, которое область пространства может содержать. Поскольку эта энтропия, как показала работа Бекенштейна и Хокинга, пропорциональна площади поверхности черной дыры, – которая равна площади поверхности области, поскольку мы выбрали их имеющими одинаковый размер, – мы заключаем, что максимальная энтропия, которую может содержать любая заданная область пространства, пропорциональна площади поверхности области.[[3]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_3" \o )

Противоречие между этим заключением и тем, что мы нашли из размышлений о воздухе, заключенном в пластиковом контейнере (когда мы нашли, что количество энтропии пропорционально объему контейнера, а не площади его поверхности), легко ликвидировать: поскольку мы предполагали, что воздух в контейнере распределен равномерно, рассуждения о контейнере игнорируют гравитацию; вспомним, когда действует гравитация, вещи слипаются. Пренебрежение гравитацией оправдано, когда малы плотности, но когда вы рассматриваете большую энтропию, плотности велики, гравитация действует, и рассуждения о пластиковых контейнерах больше не применимы. Вместо этого, такие экстремальные условия требуют основанных на гравитации расчетов Бекенштейна и Хокинга с заключением, что максимальный энтропийный потенциал области пространства пропорционален ее площади, а не ее объему.

Ну ладно, но почему мы должны беспокоиться? Имеются две причины.

Первая, ограничение энтропии дает еще одну подсказку, что ультрамикроскопическое пространство имеет атомистическую структуру. Подробно, Бекенштейн и Хокинг нашли, что если вы представите нарисованный на горизонте событий образец шахматной доски с каждым квадратом, равным длине Планка на длину Планка (так что такой "планковский квадрат" имеет площадь около 10–66 квадратного сантиметра), тогда энтропия черной дыры равна числу таких квадратов, которые можно расположить на ее поверхности.[[4]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_4" \o ) Тяжело не заметить заключение, на которое сильно намекает этот результат: каждый планковский квадрат есть минимальная, фундаментальная единица пространства, и каждый несет минимальную, отдельную единицу энтропии. Это наводит на мысль, что нет ничего, даже в принципе, что могло бы иметь место внутри планковского квадрата, поскольку любая такая активность поддерживает беспорядок, а потому планковский квадрат мог бы иметь больше, чем одну единицу энтропии, найденную Бекенштейном и Хокингом. Итак, еще раз, с совершенно другой точки зрения мы пришли к понятию простейшей пространственной сущности.[[5]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_5" \o )

Вторая, для физика верхний предел энтропии, которая может существовать в области пространства, является критической, едва ли не священной величиной. Чтобы понять, почему, представьте, что вы работаете на поведенческого психиатра и ваша работа заключается в поддержании детальной, момент за моментом записи взаимодействий внутри группы чрезвычайно активных маленьких детей. Каждое утро вы молитесь, чтобы дневная группа хорошо себя вела, поскольку чем больший бедлам создают дети, тем тяжелее ваша работа. Причина интуитивно понятна, но стоит высказать ее явно: чем более разупорядочены дети, тем больше вещей вы должны удержать во внимании. Вселенная представляется физику примерно с такой же проблемой. Фундаментальная физическая теория предназначена для описания всего, что происходит – или могло бы происходить, даже в принципе, – в данной области пространства. И, как и с детьми, чем больше беспорядка область может содержать, – даже в принципе, – тем больше вещей теория должна быть способна отслеживать. Таким образом, максимум энтропии, которую может содержать область, обеспечивает простой, но острый лакмусовый тест: физики ожидают, что в полном смысле слова фундаментальная теория есть та, которая в полной мере подходит к максимуму энтропии в любой данной пространственной области. Теория должна быть столь тесно настроена на природу, что ее максимальная способность отслеживать беспорядок должна быть в точности равна максимальному беспорядку, который область, возможно, может содержать, не больше и не меньше.

Дело в том, что если заключение на основе пластиковых контейнеров имеет неограниченную применимость, фундаментальная теория должна была бы иметь способность объяснять объемное значение беспорядка в любой области. Но поскольку это рассуждение неверно, когда включена гравитация, – и поскольку фундаментальная теория должна включать гравитацию, – мы узнаем, что фундаментальная теория должна быть в состоянии объяснять только поверхностное значение беспорядка в любой области. А, как мы показали на паре численных примеров несколькими абзацами выше, чем больше область, тем более малым становится последнее по сравнению с первым.

Таким образом, результат Бекенштейна и Хокинга говорит нам, что теория, которая включает гравитацию, в некотором смысле проще, чем теория, которая не включает. Имеется меньше "степеней свободы" – меньше вещей, которые могут изменяться и потому давать вклад в беспорядок, – которые теория должна описывать. Это интересный результат сам по себе, но если мы проследуем по той же линии рассуждений на один шаг дальше, окажется, что он говорит нам нечто чрезвычайно странное. Если максимум энтропии в любой заданной области пространства пропорционален площади поверхности области, а не ее объему, то, вероятно, правильные, фундаментальные степени свободы – отличительные признаки, которые имеют потенциал давать вклад в этот беспорядок, – на самом деле располагаются на поверхности области, а не в ее объеме. Это значит, может быть, реальные физические процессы вселенной имеют место на тонкой удаленной поверхности, которая окружает нас, и все, что мы видим и ощущаем, есть просто проекция этих процессов. Это значит, может быть, вселенная является до некоторой степени похожей на голограмму.

Это необычная идея, но как мы сейчас обсудим, она имеет недавно полученную существенную поддержку.

Является ли вселенная голограммой?

Голограмма представляет собой кусок вытравленного пластика, который при освещении подходящим лазерным светом проецирует трехмерную картинку.[[6]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_6" \o ) В начале 1990х датский Нобелевский лауреат Герард т"Хоофт и Леонард Сасскайнд, тот самый физик, который вместе с другими придумал теорию струн, предположили, что сама вселенная может действовать аналогичным голограмме способом. Они выдвинули изумительную идею, что приходящие и уходящие процессы, которые мы наблюдаем в трех измерениях повседневной жизни, могут сами быть голографическими проекциями физических процессов, имеющих место на удаленной двумерной поверхности. В их новом и своеобразно озвученном взгляде мы и все, что мы делаем или видим, может быть сродни голографическим картинкам. В то время как Платон воображал повседневные ощущения как обнаружение не более чем тени реальности, голографические принципы соглашаются, но переворачивают метафору на голову. Тени – вещи, которые расплющиваются и потому живут на поверхности с меньшим числом измерений, – реальны, тогда как то, что кажется более богато структурированной, более многомерной сущностью (мы, мир вокруг нас) является исчезающей проекцией теней.\*

*(\*) "Если вы не склонны переписывать Платона, сценарий мира на бране дает версию голографии, в которой тени возвращаются на присущее им место. Представьте, что мы живем на 3-бране, которая окружает область с четырьмя пространственными измерениями (почти как двумерная кожица яблока окружает трехмерную внутренность яблока). Голографический принцип в таком раскладе будет говорить, что трехмерные ощущения будут тенями четырехмерной физики, имеющей место в области, которую окружает наша брана."*

Еще раз, хотя это и фантастически странная идея, и одна из тех, чья роль в окончательном понимании пространства-времени далека от ясности, так называемый голографический принцип т"Хоофта и Сасскайнда хорошо мотивирован. Как мы обсуждали в последней секции, максимальная энтропия, которую может содержать область пространства, соотносится с площадью ее поверхности, но не с объемом ее внутренности. Естественно предположить тогда, что наиболее фундаментальные составляющие вселенной, ее самые базовые степени свободы – сущности, которые переносят энтропию вселенной почти как страницы *Войны и Мира* переносят ее энтропию, – могут располагаться на граничной поверхности, а не внутри вселенной. То, что мы ощущаем в "толще" вселенной – в объеме, как физики это часто называют, – может определяться тем, что имеет место на граничной поверхности, почти как то, что мы видим на голографической проекции, определяется информацией, закодированной на граничном кусочке пластика. Законы физики могут действовать как вселенский лазер, освещая реальные процессы космоса – процессы, имеющие место на тонкой, удаленной поверхности, – и генерируя голографическую иллюзию повседневной жизни.

Мы еще не понимаем, как этот голографический принцип может быть осуществлен в реальном мире. Одна проблема заключается в том, что в общепринятых описаниях вселенная представляется такой, что в ней вы или вечно уходите прочь, или, если нет, возвращаетесь назад, как на сфере или на экране видеоигры (как в Главе 8), а потому она может не иметь каких-либо краев или границ. Поэтому где будет находиться предполагаемая "граничная голографическая поверхность"? Более того, физические процессы определенно кажутся находящимися под нашим контролем, прямо здесь, в глубине внутренностей вселенной. Не кажется, что что-то на трудно локализуемой границе как-то вызывает последствия относительно того, что происходит здесь, в объеме. Предполагает ли голографический принцип, что то, что ощущается контролируемым и независимым, является иллюзорным? Или лучше думать о голографии как о четко сформулированной разновидности дуальности, в которой на основании вкуса – не физики – каждый может выбрать привычное описание, в котором фундаментальные законы действуют здесь в объеме (и которое выстраивается интуицией и ощущениями), или непривычное описание, в котором фундаментальные законы имеют место на некоторой разновидности границы вселенной, причем каждая точка зрения одинаково пригодна? Это важнейшие вопросы, которые остаются спорными.

Но в 1997, основываясь на более ранних достижениях многих струнных теоретиков, аргентинский физик Хуан Малдасена совершил прорыв, который впечатляюще продвинул вперед размышления на эти темы. Его открытие не имеет прямого отношения к вопросу о роли голографии в нашей реальной вселенной, но в иногда свойственной физике манере он нашел гипотетический контекст – гипотетическую вселенную, – в которой абстрактные мечтания о голографии могут быть сделаны с использованием математики как конкретными, так и точными. По техническим причинам Малдасена изучал гипотетическую вселенную с четырьмя большими пространственными измерениями и одним временным измерением, которая имеет постоянную отрицательную кривизну – более многомерная версия картофельного чипса, Рис. 8.6с. Стандартный математический анализ обнаружил, что это пятимерное пространство-время имеет границу,[[7]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_7" \o ) которая, как и все границы, имеет на одно измерение меньше, чем пространство, которое она ограничивает: три пространственных измерения и одно временное. (Как всегда, многомерные пространства тяжело вообразить, так что, если вы хотите ментальную картину, подумайте о бидоне томатного супа – трехмерный жидкий суп есть аналог пятимерного пространства-времени, тогда как двумерная поверхность бидона есть аналог четырехмерного пространства-времени. После включения дополнительных скрученных измерений, как требуется теорией струн, Малдасена убедительно доказал, что физика, очевидцем которой является наблюдатель, живущий внутри этой вселенной (наблюдатель в "супе") может быть полностью описана в терминах физики, имеющей место на границе вселенной (физики на поверхности бидона).

Хотя это не реалистично, эта работа обеспечила первый конкретный и поддающийся математической обработке пример, в котором голографический принцип был явно реализован.[[8]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_8" \o ) Сделав так, он пролил больше света на понятие голографии в применении к целой вселенной. Например, в работе Малдасены описание объема и описание границы находятся на абсолютно одинаковом основании. Одно не является первичным, а другое вторичным. Почти в том же духе, как связь между пятью теориями струн, теории объема и границы являются переводами друг друга. Необычное свойство этого особого перевода, однако, в том, что объемная теория имеет больше измерений, чем эквивалентная теория, формулируемая на границе. Более того, хотя объемная теория включает гравитацию (поскольку Малдасена формулировал ее с использованием теории струн), расчеты показывают, что теория на границе не включает. Тем не менее, любой заданный вопрос или вычисление, сделанные в одной из теорий, могут быть переведены в эквивалентный вопрос или вычисление в другой. Хотя некто, не знакомый со словарем, может подумать, что соответствующие вопросы и вычисления не имеют абсолютно ничего общего друг с другом (например, поскольку теория на границе не включает гравитацию, вопросы, содержащие гравитацию в объемной теории, переводятся в совсем иначе звучащие, не содержащие гравитацию вопросы в теории на границе), некто, хорошо владеющий обоими языками, – эксперт в обеих теориях – распознает их взаимосвязь и осознает, что ответы на соответствующие вопросы и результаты соответствующих вычислений должны быть согласованы. На самом деле, каждый расчет, сделанный до сегодняшнего дня, а их было много, поддерживает это утверждение.

Детали всего этого требуют напряжения сил, чтобы полностью понять их, но не затеняют главного момента. Результат Малдасены ошеломителен. Он нашел конкретное, хотя и гипотетическое воплощение голографии в рамках теории струн. Он показал, что особая квантовая теория без гравитации является переводом – и не отличима от – другой квантовой теории, которая включает гравитацию, но формулируется с использованием еще одного пространственного измерения. Энергичные исследовательские программы сейчас выполняются, чтобы определить, как эти результаты могут быть применены к более реалистичной вселенной, нашей вселенной, но прогресс слаб, так как анализ обременен техническими трудностями. (Выбор Малдасены особого гипотетического примера был сделан вследствие того, что он относительно легко поддается математическому анализу; с более реалистичными примерами намного тяжелее работать). Тем не менее, мы теперь знаем, что теория струн, по меньшей мере в определенных контекстах, способна поддержать концепцию голографии. И, как и в случае с геометрическими переводами, описанными ранее, это обеспечивает еще один намек на то, что пространство-время не фундаментально. При переводе одной формулировки теории к другой, эквивалентной форме не только может измениться размер и форма пространства-времени, но так же и число пространственных измерений.

Больше и больше эти путеводные нити-подсказки указывают на заключение, что вид пространства-времени является лишь деталью украшения, которая изменяется от одной формулировки физической теории к следующей, вместо того, чтобы быть фундаментальным элементом реальности. Почти как число букв, слогов и гласных в слове "кот" отличается от того же числа в слове "gato", его испанском переводе, вид пространства-времени – его форма, его размер и даже число его измерений – также изменяются при переводе. Для любого заданного наблюдателя, который использует одну теорию для размышлений о вселенной, пространство-время может казаться реальным и не допускающим исключений. Но допустим, что наблюдатель изменяет формулировку теории, которую он или она использовал или использовала, на эквивалентную переведенную версию, при этом прежняя, казавшаяся реальной и не допускающей исключений, с необходимостью сильно изменяется. Таким образом, если эти идеи верны, – и я должен подчеркнуть, что они еще должны быть строго доказаны, даже если теоретики накопят огромное количество поддерживающих свидетельств, – они сильно поставят под вопрос превосходство пространства и времени.

Из всех обсуждавшихся здесь намеков я выбрал голографический принцип как тот, который наиболее вероятен, чтобы играть доминирующую роль в будущих исследованиях. Он возникает из основного свойства черных дыр – их энтропии, – понимание которой, с чем согласны многие физики, покоится на твердом теоретическом основании. Даже если детали наших теорий должны будут измениться, мы ожидаем, что любое осмысленное описание гравитации будет допускать черные дыры, а потому ограничения энтропии, ведущие в данном обсуждении, будут продолжать существовать и голография будет применяться. То, что теория струн естественным образом включает голографический принцип, – по меньшей мере, в некоторых примерах согласно математическому анализу, – является другим сильным куском доказательства, означающего обоснованность принципов. Я ожидаю, что безотносительно к тому, куда нас может завести поиск основ пространства и времени, безотносительно к модификациям теории струн/М-теории, которые могут поджидать нас за поворотом, голография будет продолжать оставаться ведущей концепцией.

Составляющие пространства-времени

На протяжении этой книги мы периодически намекали на ультрамикроскопические составляющие пространства-времени, но хотя мы привели косвенные аргументы их существования, мы еще должны сказать что-нибудь о том, чем на самом деле могут быть эти составляющие. И по хорошей причине. Мы на самом деле не имеем идеи, что они собой представляют. Или, возможно, я должен сказать, когда речь идет об идентификации простейших ингредиентов пространства-времени, мы не имеем идей о том, в чем мы на самом деле уверены. Это великая прореха в наших представлениях, но имеет смысл посмотреть на проблему в ее историческом контексте.

Если бы вы опросили ученых конца девятнадцатого века по поводу их взглядов на элементарные составляющие материи, вы бы не нашли универсального согласия. Всего лишь столетие назад атомная гипотеза была спорной; имелись хорошо известные ученые, – один из них Эрнст Мах, – которые полагали ее не верной. Более того, всегда со времен получения атомной гипотезой широкого признания в начале двадцатого века ученые постоянно дополняли обеспечивающую ее картину тем, во что верилось как во все более элементарные ингредиенты (например, сначала протоны и нейтроны, затем кварки). Теория струн является самым последним шагом по этому пути, но, поскольку она еще должна быть подтверждена эксприментально (и, даже если это произошло бы, это не могло бы помешать существованию еще более утонченной теории, ожидающей разработки), мы должны откровенно признать, что поиски составляющих основного материала природы продолжаются.

Включение пространства и времени в современный научный контекст восходит к Ньютону в 1600е, но серьезные размышления относительно их микроскопического строения потребовали открытий в двадцатом столетии ОТО и квантовой механики. Таким образом, на исторической шкале времени мы, на самом деле, только еще начали анализировать пространство-время, так что отсутствие определенных предположений об их "атомах" – самых элементарных составляющих пространства-времени – не является черной меткой на теме. Далеко от этого. То, что мы получили, так же как то, что мы имеем, – что мы обнаружили множество свойств пространства и времени чрезвычайно далеко от повседневного опыта, – свидетельствует о прогрессе, непостижимом столетие назад. Поиск самых фундаментальных ингредиентов природы, или материи, или пространства-времени является огромной проблемой, которая, вероятно, займет у нас некоторое время до ее разрешения.

Для пространства-времени имеются два многобещающих направления поисков элементарных составляющих. Одно предложение вытекает из теории струн, а другое из теории, известной как *петлевая квантовая гравитация*.

Предложение теории струн, в зависимости от того, насколько напряженно вы о нем думали, представляется или интуитивно привлекательным, или совершенно непостижимым. Поскольку мы говорим о "ткани" пространства-времени, предложение заключается в том, что, может быть, пространство-время сшито из струн точно так же, как рубашка сшита из нитей. Это означает, почти как подходящим образом объединенное вместе большое количество нитей производит ткань рубашки, может быть, подходящим образом объединенное вместе большое количество струн производит то, что мы обычно называем тканью пространства-времени. Материя, вроде вас и меня, тогда будет означать дополнительные агломерации вибрирующих струн, – как звонкая музыка, играющая поверх приглушенного шума, или искусно сделанный узор, вышитый на ровном куске материала, – движущихся внутри среды сшитых вместе струн пространства-времени.

Я нахожу это заманчивым и убедительным предложением, но на данный момент никто не превратил эти слова в точное математическое построение. Насколько я могу судить, препятствия к тому, чтобы сделать это, далеко не мелкие. Например, если ваша рубашка полностью распускается, вы остаетесь с кучей нитей – в результате, в зависимости от обстоятельств, вы можете найти это смущающим или вызывающим раздражение, хотя, вероятно, не сильно удивительным. Но совершенно изматывает разум (мой разум, по меньшей мере) размышление об аналогичной ситуации со струнами – нитями пространства-времени в этом предложении. Что мы должны понимать под "кучей" струн, которые выпутались из ткани пространства-времени, или, вероятно, более правильно, еще даже не объединились вместе, чтобы произвести ткань пространства-времени? Может существовать соблазн думать о них, почти как мы это делаем о нитях рубашки, – как о сыром материале, который нужно сплести вместе, – но это замалчивает абсолютно необходимую тонкость. Мы рисуем струны как колеблющиеся в пространстве и через время, но вне ткани пространства-времени, которую создают сами струны через их упорядоченное объединение, нет ни пространства, ни времени. В этом предложении концепции пространства и времени теряют смысл до того, как бесчисленные струны не сплетутся вместе, чтобы произвести их.

Таким образом, чтобы придать смысл этому предложению, нам нужна схема для описания струн, которая не предполагает с самого начала, что они колеблются в заранее существовавшем пространстве-времени. Нам нужна формулировка теории струн полностью без пространства и без времени, в которой пространство-время возникает из коллективного поведения струн.

Хотя имелся прогресс в направлении этой цели, никто еще не подошел к такой формулировке теории струн без пространства и без времени – к тому, что физики называют *независимой от фона* формулировкой (термин возникает из общего понятия пространства-времени как заднего плана, фона по отношению к имеющим место физическим явлениям). Вместо этого, по существу, все подходы воображают струны как движущиеся и колеблющиеся сквозь пространство-время, которое вводится в теорию "руками"; пространство-время не возникает из теории, как это будет по представлениям физиков в независимой от фона схеме, а добавляется в теорию теоретиком. Многие исследователи рассматривают разработку независимой от фона формулировки как единственную величайшую нерешенную проблему, стоящую перед теорией струн. Она не только должна дать ответ на вопрос происхождения пространства-времени, но независимая от фона схема должна, вероятно, стать инструментом в решении главной загвоздки, с которой мы столкнулись в конце Главы 12, – неспособности текущей теории выбрать геометрическую форму дополнительных измерений. Раз уж ее математический формализм отцепляется от любого особого пространства-времени, появляется основание полагать, что теория струн будет способна исследовать все возможности и, вероятно, рассудить, какая среди них годится.

Другая трудность, стоящая перед предложением рассматривать струны как нити пространства-времени, в том, как мы изучили в Главе 13, что теория струн имеет и другие ингредиенты, кроме струн. Какую роль эти другие компоненты должны играть в фундаментальной структуре пространства-времени? Этот вопрос вводится в особенно острой форме сценарием мира на бране. Если трехмерное пространство, которое мы ощущаем, является 3-браной, является ли сама брана неделимой на части или она сделана из объединения других ингредиентов теории? Например, сделаны ли браны из струн или как струны, так и браны являются элементарными? Или мы должны рассматривать еще и другую возможность, что браны и струны могут быть сделаны из некоторых еще более тонких ингредиентов? Эти вопросы стоят на переднем фронте исследований сегодняшнего дня, но, поскольку эта последняя глава посвящена подсказкам и путеводным нитям, позвольте мне отметить один важный результат, который привлек большое внимание.

Ранее мы говорили о различных бранах, имеющихся в теории струн/М-теории: 1-браны, 2-браны, 3-браны, 4-браны и так далее. Хотя я не акцентировал на этом внимание раньше, в теории имеются также *0-браны* – ингредиенты, которые не имеют пространственного протяжения, почти как точечные частицы. Это может показаться противоречащим самому духу теории струн/М-теории, которая удаляется от схемы с точечными частицами в попытке приручения диких шероховатостей квантовой гравитации. Однако, 0-браны, точно так же, как их более многомерные родственницы на Рис. 13.2, появляются с присоединенными струнами, буквально, а потому их взаимодействия управляются струнами. Тогда не удивительно, что 0-браны ведут себя совершенно не похоже на общепринятые точечные частицы, и, что самое важное, они полностью принимают участие в рассеивании и уменьшении ультрамикроскопических дрожаний пространства-времени; 0-браны не вводят заново фатальный порок, беспокоящий схемы с точечными частицами, которые пытаются соединить квантовую механику и ОТО.

Фактически, Том Бэнкс из Ратгерсовского Университета и Вилли Фишлер из Университета Техаса в Остине вместе с Леонардом Сасскайндом и Стивеном Шенкером, оба ныне из Стэнфорда, сформулировали версию теории струн/М-теории, в которой 0-браны являются фундаментальными ингредиентами, которые могут быть объединены, чтобы сгенерировать струны и другие, более высокоразмерные браны. Это предложение, известное как Матричная теория – еще одно возможное значение для "М" в "М-теории" – вызвало лавину последующих исследований, но связанная с ней тяжелая математика до сих пор не давала ученым привести этот подход к завершенному виду. Тем не менее, расчеты, которые физики смогли провести в этой схеме, кажется, поддерживают это предложение. Если Матричная теория верна, это может означать, что все сущее – струны, браны и, возможно, даже сами пространство и время – составлены из подходящим образом собранных 0-бран. Это волнующий план и исследователи проявляют осторожный оптимизм, надеясь, что прогресс в течение следующих нескольких лет прольет больше света на его обоснованность.

До сих пор мы рассматривали путь, которым следуют струнные теоретики в поисках составляющих пространства-времени, но, как я отмечал, имеется второй путь, происходящий от главного соперника теории струн, *петлевой квантовой гравитации*. Петлевая квантовая гравитация берет начало с середины 1980х и является другим многообещающим предложением по соединению ОТО и квантовой механики. Я не хочу пытаться дать детальное описание (если вам интересно, обратите внимание на превосходную книгу Ли Смолина *Tree Roads to Quantum Gravity* (Три дороги к квантовой гравитации, см. Советы для дальнейшего чтения)), а вместо этого отмечу несколько ключевых моментов, которые особенно показательны для нашего текущего обсуждения.

Как теория струн, так и петлевая квантовая гравитация утверждают, что достигли давно стоящей цели обеспечения квантовой теории гравитации, но они делают это совершенно разными способами. Теория струн выросла из успешной традиции физики частиц, которая десятилетиями искала элементарные составляющие материи; для самых ранних струнных исследователей гравитация была отдаленным, в лучшем случае, вторичным интересом. В отличие от этого, петлевая квантовая гравитация выросла из традиции, тесно основывающейся на ОТО; для большинства последователей этого подхода гравитация всегда была главным объектом внимания. Сравнение в одну фразу будет таково, что струнные теоретики стартовали от малого (квантовая теория) и двигались к охвату большого (гравитация), тогда как приверженцы петлевой квантовой гравитации стартовали от большого (гравитация) и двигались к охвату малого (квантовая теория).[[9]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_9" \o ) Фактически, как мы говорили в Главе 12, теория струн изначально была разработана как квантовая теория сильного ядерного взаимодействия, действующего внутри атомных ядер; и только позже было по счастливому случаю осознано, что теория на самом деле включает гравитацию. Петлевая квантовая гравитация, с другой стороны, взяла ОТО Эйнштейна как отправную точку и стремилась включить в себя квантовую механику.

Этот старт с противоположных концов спектра отразился в путях, которыми две теории разрабатывались до сих пор. В некоторой степени главные достижения каждой оказывались неудачами другой. Например, теория струн соединила все силы и всю материю, включая гравитацию (полное объединение, которое ускользает от петлевого подхода), путем описания всего на языке колеблющихся струн. Частица гравитации, гравитон, является лишь одной особой модой колебаний струны, а потому теория естественным образом описывает, как эти простейшие пучки гравитации двигаются и квантовомеханически взаимодействуют. Однако, как только что отмечалось, главная неудача сегодняшних формулировок теории струн в том, что они заранее предполагают фоновое пространство-время, внутри которого струны двигаются и колеблются. В отличие от этого, главное достижение петлевой квантовой гравитации – впечатляющее достижение – заключается в том, что она не предполагает фонового пространства-времени. Петлевая квантовая гравитация является независимой от фона схемой. Однако, удаление обычного пространства и времени, точно так же, как привычных и успешных свойств ОТО, когда она применяется к большим масштабам расстояний (что легче сделать в сегодняшних формулировках теории струн), из этой экстраординарно непривычной стартовой точки без пространства и без времени является далеко не тривиальной проблемой, которую исследователи все еще пытаются решить. Более того, по сравнению с теорией струн, петлевая квантовая гравитация достигла намного меньшего прогресса в понимании динамики гравитонов. Одна гармонизирующая возможность заключается в том, что струнные энтузиасты и приверженцы петлевой квантовой гравитации на самом деле конструируют одну и ту же теорию, но из чрезвычайно различных стартовых точек. То, что каждая теория содержит петли, – в теории струн это петли струн; в петлевой квантовой гравитации их тяжелее описать нематематически, но, грубо говоря, они представляют собой элементарные петли пространства, – наводит на мысль, что тут может быть некоторая связь. Эта возможность еще больше поддерживается фактом, что на нескольких проблемах, доступных обеим теориям, таких как энтропия черных дыр, две теории полностью согласуются.[[10]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_10" \o ) И по вопросу о составляющих пространства-времени обе теории предполагают, что имеется некоторая разновидность атомистической структуры. Мы уже видели подсказки-намеки в направлении этого заключения, которые появляются из теории струн; аналогичные намеки из петлевой квантовой гравитации убедительны и даже более явны. Петлевые исследователи показали, что многочисленные петли в петлевой квантовой гравитации могут переплетаться, слегка подобно тонким петлям шерсти, ввязанным в свитер, и производить структуры, которые на больших масштабах кажутся почти соответствующими областям пространства-времени. Самое убедительное из всего, петлевые исследователи рассчитали допустимые площади таких поверхностей пространства.

И точно так же, как вы можете иметь один электрон, или два электрона или 202 электрона, но вы не можете иметь 1,6 электрона или любое иное дробное число, расчеты показывают, что поверхности могут иметь площади, которые составляют один квадрат длины Планка, или два квадрата длины Планка или 202 квадрата длины Планка, но никакие дроби невозможны. Еще раз, это сильная теоретическая подсказка, что пространство, как и электроны, начинается с дискретных неделимых кусков.[[11]](http://lib.rus.ec/b/148780/read" \l "note_16_11" \o )

Если бы я решился погадать на будущие разработки, я представил бы, что независимые от фона техники, разработанные сообществом петлевой квантовой гравитации, будут адаптированы к теории струн, вымостив путь для струнной формулировки, которая не зависит от фона. А это явится искрой, я подозреваю, которая воспламенит третью суперструнную революцию, в которой, я оптимистичен, многие из остающихся глубоких тайн будут решены. Такие разработки, вероятно, также замкнут полный круг долгой истории пространства-времени. В предыдущих главах мы следовали за маятником мнений, когда он качался между реляционистской и абсолютистской позициями по поводу пространства, времени и пространства-времени. Мы спрашивали: Является ли пространство чем-то или нет? Является ли пространство-время чем-то или нет? И в течение нескольких столетий размышлений, мы сталкивались с различными взглядами. Я верю, что экспериментально подтвержденный, независимый от фона союз между ОТО и квантовой механикой даст благодарное решение этой проблемы. Благодаря преимуществу независимости от фона ингредиенты теории могут состоять в некоторых отношениях с такими же другими, но в отсутствие пространства-времени, которое вставлялось в теорию извне, там не будет фоновой арены, в которую они сами были вставлены. Только относительные взаимосвязи будут иметь значение, решение почти в духе реляционистов вроде Лейбница и Маха. Когда ингредиенты теории, – будь это струны, браны, петли или что-то другое, открытое в ходе будущих исследований, – объединяются, чтобы произвести привычное, крупномасштабное пространство-время (или наше реальное пространство-время, или гипотетические примеры, пригодные для мысленных экспериментов), оно будет "чем-то" заново открытым, почти как в нашем раннем обсуждении ОТО: в во всех других отношениях пустом, плоском, бесконечном пространстве-времени (один из подходящих гипотетических примеров) вода в ньютоновском вращающемся ведре будет принимать изогнутую форму. Существенным моментом будет то, что различие между пространством-временем и более ощутимыми материальными сущностями почти совершенно испарится, так как все они будут возникать из подходящих совокупностей более базовых ингредиентов в теории, которая будет фундаментально относительной, без пространства и без времени. Если так и окажется, Лейбниц, Ньютон, Мах и Эйнштейн все смогли бы заявить права на часть победы.

Внутреннее и внешнее пространство

Рассуждения о будущем науки являются занимательным и конструктивным упражнением. Они помещают наше сегодняшнее дело в более широкий контекст и подчеркивают всеобъемлющие цели, в направлении которых мы медленно и осознанно трудимся. Но когда такие рассуждения применяются к будущему самого пространства-времени, они приобретают почти мистическое качество: мы рассматриваем судьбу тех самых вещей, которые господствуют в нашем ощущении реальности. Еще раз, вопрос не в том, что безотносительно к будущим открытиям пространство и время будут продолжать формировать наше индивидуальное восприятие; пространство и время, пока движется повседневная жизнь, будут стоять рядом. Что будет продолжать изменяться и, вероятно, изменяться радикально, так это наше понимание обеспечивающей их системы, – что означает, арены эмпирической реальности. После столетий размышлений мы все еще можем дать только словесное описание пространства и времени, как самого привычного из странного. Они беззастенчиво идут своим путем через наши жизни, но ловко скрывают свою фундаментальную структуру за теми же самыми ощущениями, которые они полностью формируют и на которые влияют.

На протяжении последней сотни лет мы стали близко знакомы с некоторыми ранее скрытыми свойствами пространства и времени благодаря двум теориям относительности Эйнштейна и благодаря квантовой механике. Замедление времени, относительность одновременности, альтернативные сечения пространства-времени, вероятностная природа реальности, дальнодействующее квантовое запутывание не были в списке вещей, которые даже лучшие из физиков мира девятнадцатого века могли бы ожидать найти прямо за углом. А они, однако, там были, что подтвердили как экспериментальные результаты, так и теоретические объяснения.

В нашу эпоху мы подошли к нашему собственному великолепию неожиданных идей: темная материя и темная энергия, которые оказались, несомненно, доминирующими составляющими вселенной. Гравитационные волны – рябь на ткани пространства-времени, – которые были предсказаны ОТО Эйнштейна и однажды позволят нам бросить взгляд дальше назад во времени, чем когда-либо ранее. Океан Хиггса, который пронизывает все пространство и который, если это подтвердится, поможет нам понять, как частицы приобретают массу. Инфляционное расширение, которое может объяснить форму космоса, решить загадку, почему он так однороден на больших масштабах, и установить направление стрелы времени. Теория струн, которая постулирует петли и обрывки энергии вместо точечных частиц и предлагает смелую версию мечты Эйнштейна, в которой все частицы и все силы объединены в единственную теорию. Дополнительные пространственные измерения, возникающие из математики теории струн, и, возможно, обнаруживаемые экспериментами на ускорителях в течение следующего десятилетия. Мир на бране, в котором наши три пространственные измерения могут быть лишь одной вселенной среди многих, плавающих в многомерном пространстве-времени. И, возможно, даже новое пространство-время, в котором сама ткань пространства и времени составлена более фундаментальными беспространственными и безвременными сущностями.

В течение следующего десятилетия все более мощные ускорители обеспечат почти необходимый экспериментальный вклад, и многие физики уверены, что данные, собранные из высокоэнергетических столкновений, которые планируются, подтвердят большое число стержневых физических построений. Я разделяю этот энтузиазм и страстно ожидаю результатов. До тех пор, пока наши теории не соприкоснулись с наблюдаемыми, проверяемыми явлениями, они остаются в подвешенном неопределенном состоянии – они остаются многообещающими коллекциями идей, которые могут иметь или могут не иметь отношения к реальному миру. Новые ускорители существенно продвинут вперед уменьшение зазора между теорией и экспериментом и, мы, физики, надеемся, введут многие из этих идей в область признанной науки.

Но имеется другой подход, который, будучи более чем смелым предположением, наполняет меня несравненным удивлением. В Главе 11 мы обсуждали, как эффекты мельчайших квантовых скачков могут быть заметны на любом ясном ночном небе, поскольку они были чудовищно растянуты космическим расширением, приведя в итоге к сгущениям, давшим начало формированию звезд и галактик. (Повторим аналогию с мельчайшими черточками, нарисованными на воздушном шаре, которые растягиваются по его поверхности, когда шар раздувается). Это осознание наглядно дает доступ к квантовой физике через астрономические наблюдения. Вероятно, это может быть продвинуто даже дальше. Возможно, космическое расширение может растянуть отпечатки даже самых мелкомасштабных процессов или свойств – физики струн или, возможно, квантовой гравитации, или атомистической структуры самого ультрамикроскопического пространства-времени – и распространить их влияние, в некотором тонком, но наблюдаемом смысле, через небеса. Это означает, может быть, что вселенная уже расписана микроскопическими волокнами ткани космоса и явно раскрывает их через небо, и все, что нам нужно, это научиться, как распознавать картинку.

Оценка самых современных предложений для глубоких физических законов может в будущем потребовать, чтобы дикая мощь ускорителей частиц была в состоянии воссоздать неистовые условия, невиданные с моментов после Большого взрыва. Но для меня не будет ни достижения более поэтичного, ни итога более привлекательного, ни унификации более полной, чем подтвердить для нас наши теории ультрамалого – наши теории об ультрамикроскопической структуре пространства, времени и материи – просто через нацеливание наших самых мощных телескопов в небо и через безмолвный пристальный взгляд на звезды.

**Толковый словарь**

**Абсолютизм:** Точка зрения, считающая, что пространство абсолютно.

**Абсолютное пространство:** Ньютоновский взгляд на пространство; воображаемое пространство как неизменное и независимое от его содержимого.

**Абсолютное пространство-время:** Взгляд на пространство, возникающий из СТО; воображаемое пространство через полноту времени, с любой системы отсчета, как неизменное и независимое от его содержимого.

**Большого взрыва теория/стандартная теория Большого взрыва:** Теория, описывающая горячую, расширяющуюся вселенную от момента после ее рождения.

**Большой хруст:** Один из возможных концов вселенной, аналог обращенного Большого взрыва, в котором пространство коллапсирует само в себя.

**Вакуум:** Наибольшая пустота, в которой может быть регион; состояние с низшей энергией.

**Вакуумные флуктуации поля:** См. *Квантовые флуктуации*.

**Великое объединение:** Теория, пытающаяся объединить сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия.

**Величина вакуумного среднего Хиггсова поля:** Ситуация, в которой Хиггсово поле приобретает ненулевую величину в пустом пространстве; Хиггсов океан.

**Вероятностная волна:** Волна в квантовой механике, которая кодирует вероятность, что частица будет найдена в данном положении.

**Волновая функция:** См. *Вероятностная волна*.

**Вращательная инвариантность, вращательная симметрия:** Характеристика физической системы или теоретического закона, при которой они не изменяются при вращении.

**Временное сечение:** Все пространство в данный момент времени; отдельное сечение пространственно-временного блока или батона.

**Второй закон термодинамики:** Закон, который гласит, что, в среднем, энтропия физической системы имеет тенденцию возрастать от любого заданного момента.

**Глюоны:** Переносчики сильного ядерного взаимодействия.

**Горизонт событий:** Воображаемая сфера, окружающая черную дыру, отделяющая точки невозврата; все, пересекшее горизонт событий, не может спастись от гравитации черной дыры.

**Гравитоны:** Гипотетические частицы-переносчики гравитационного взаимодействия.

**Единая теория:** Теория, которая описывает все силы и всю материю в единой теоретической структуре.

**Замкнутые струны:** Нити энергии в теории струн в форме петель.

**Запутывание, квантовое запутывание:** Квантовый феномен, в котором пространственно разделенные частицы имею коррелированные свойства.

**Инерция:** Свойство объекта сопротивляться ускорению.

**Интерференция:** Явление, в котором перекрывающиеся волны создают характерную картину; в квантовой механике включает в себя объединение вместе кажущихся особыми альтернатив.

**Инфляционная космология:** Космологическая теория, включающая короткий, но гигантский взрыв пространственного расширения в ранней вселенной.

**Информация выбора пути:** Квантовомеханическая информация, очерчивающая путь, который частица выбирает, двигаясь от источника к детектору.

**Казимира cила:** Квантовомеханическая сила, основанная на дисбалансе вакуумных флуктуаций поля.

**Калуцы-Кляйна теория:** Теория вселенной, содержащая более чем три пространственных измерения.

**Квантовая механика:** Теория, разработанная в 1920е и 1930е для описания области атомов и субатомных частиц.

**Квантовая хромодинамика:** Квантовомеханическая теория сильного ядерного взаимодействия.

**Квантовые флуктуации, квантовые дрожания, квантовые скачки:** Неизбежные быстрые изменения величины поля на малых масштабах, возникающие из квантовой неопределенности.

**Кварки:** Элементарные частицы, подверженные сильному ядерному взаимодействию; имеется шесть разновидностей (верхний (up), нижний (down), странный (strange), очарованный (charm), вершинный (top), донный (bottom)).

**Кельвин:** Шкала, по которой температура отсчитывается от абсолютного нуля (минимально возможной температуры, около –273№ по шкале Цельсия).

**Классическая физика:** Как использовалось в этой книге, физические законы Ньютона и Максвелла. В более общем смысле часто используется для ссылок на все неквантовые законы физики, включая СТО и ОТО.

**Коллапс вероятностной волны, коллапс волновой функции:** Гипотетический процесс, в котором вероятностная волна (волновая функция) переходит из распределенной к пикообразной форме.

**Копенгагенская интерпретация:** Интерпретация квантовой механики, которая воображает, что большие объекты подвержены действию классических законов, а малые объекты подвержены действию квантовых законов.

**Космический горизонт, горизонт:** Положения в пространстве, за пределами которых свет не может иметь времени, чтобы достичь нас за период с начала вселенной.

**Космическая микроволновая фоновая радиация:** Остаточная электромагнитная радиация (фотоны) из ранней вселенной, которая пронизывает пространство.

**Космологическая константа:** Гипотетическая энергия и давление, однородно заполняющая пространство; происхождение и состав не известны.

**Космология:** Изучение происхождения и эволюции вселенной.

**Критическая плотность:** Величина плотности массы/энергии, требуемая, чтобы пространство было плоским, около 10–23 грамма на кубический метр.

**Независимость от фона:** Свойство физической теории, в которой пространство и время возникают из более фундаментальной концепции, вместо того, чтобы быть введенными аксиоматически.

**Маха принцип:** Принцип, в соответствии с которым любое движение является относительным и стандарт покоя обеспечивается средним распределением массы во вселенной.

**Микроволновая фоновая радиация:** См. *Космическая микроволновая фоновая радиация*.

**Многомировая интерпретация:** Интерпретация квантовой механики, в которой все возможности, содержащиеся в вероятностной волне, реализуются в отдельных вселенных.

**М-теория:** В настоящее время незавершенная теория объединения всех пяти версий теории струн, полностью квантовомеханическая теория всех сил и всей материи.

**Наблюдаемая вселенная:** Часть вселенной внутри нашего космического горизонта; часть вселенной, достаточно близкая, чтобы испущенные ею свет мог достичь нас до сегодняшнего дня; часть вселенной, которую мы можем видеть.

**Неопределенности принцип:** Свойство квантовой механики, при котором имеется фундаментальное ограничение на то, насколько точно определенные взаимодополняющие физические свойства могут быть измерены или определены.

**Открытые струны:** Нити энергии в струнной теории в форме обрывков.

**Отрицательная кривизна:** Форма пространства, содержащего плотность меньше критической; седлообразная форма.

**Общая теория относительности (ОТО):** Теория гравитации Эйнштейна, привлекающая кривизну пространства и времени.

**Планка время:** Время (10–43 секунды), которое требуется свету, чтобы пролететь *Планка длину*; интервал времени, ниже которого общепринятое понятие времени теряет применимость.

**Планка длина:** Расстояние (10–33 сантиметра), ниже которого проявляется конфликт между квантовой механикой и ОТО; размер, ниже которого общепринятое понятие пространства теряет применимость.

**Планка масса:** Масса (10–5 грамма, масса частички пыли, десять миллиардов миллиардов масс протона), типичная масса колеблющейся струны.

**Плоское пространство:** Возможная форма пространства вселенной, не имеющая кривизны.

**Поле:** "Дымка" или "эссенция", пронизывающая пространство, может передавать взаимодействие или описывать присутствие/движение частиц. Математически содержит число или комбинацию чисел в каждой точке пространства, обозначающих величину поля.

**Поле инфлатона:** Поле, чья энергия и отрицательное давление вызывает инфляционное расширение.

**Потенциальная энергия:** Энергия, запасенная в поле или объекте.

**Проблема горизонта:** Затруднение космологической теории в объяснении, как области пространства, находящиеся друг от друга за пределами космического горизонта, имеют почти идентичные свойства.

**Проблема квантового измерения:** проблема объяснения, как мириады возможностей, закодированные в вероятностной волне, дают путь для одного результата в процессе измерения.

**Проблема плоскостности:** Затруднение космологической теории в объяснении наблюдаемой плоскостности пространства.

**Пространство-время:** Единство пространства и времени, впервые озвученное СТО.

**Реляционизм:** Точка зрения, заключающаяся в том, что все движения относительны и пространство не абсолютно.

**Светоносный эфир:** См. *Эфир*.

**Сильное ядерное взаимодействие:** Силы природы, которые влияют на кварки; удерживает кварки вместе внутри протонов или нейтронов.

**Симметрия:** Преобразование физической системы, которое оставляет проявление системы неизменным (например, вращение совершенной сферы относительно ее центра оставляет сферу неизменной); преобразование физической системы, которое не влияет на законы, описывающие систему.

**Симметрия относительно обращения времени:** Свойство принятых законов природы, при котором законы не делают различия между одним и другим направлением времени. От любого заданного момента законы трактуют прошлое и будущее совершенно одинаковым образом.

**Скорость:** Скорость и направление движения объекта.

**Слабое ядерное взаимодействие:** Сила природы, действующая на субатомных масштабах и отвечающая за явления, подобные радиоактивному распаду.

**Специальная теория относительности (СТО):** Теория Эйнштейна, в которой пространство и время не являются индивидуальными абсолютами, а, вместо этого, зависят от относительного движения индивидуальных наблюдателей.

**Спин:** Квантовомеханическое свойство элементарных частиц, в котором, в некотором смысле подобно волчку, они испытывают вращательное движение (имеют внутренний угловой момент).

**Спонтанное нарушение симметрии:** Формальное название Хиггсова океана; процесс, при котором ранее проявлявшаяся симметрия скрывается или портится.

**Стандартная модель:** Квантовомеханическая теория, состоящая из квантовой хромодинамики и электрослабой теории; описывает всю материю и силы, за исключением гравитации. Основывается на концепции точечных частиц.

**Стандартные свечи:** Объекты с известной внутренней яркостью, которые удобны для измерений астрономических расстояний.

**Стрела времени:** Направление, в котором кажется ориентированным время, – от прошлого в будущее.

**Струн теория:** Теория, основывающаяся на одномерных колеблющихся нитях энергии (см. *Суперструн теория*), но которая не обязательно включает суперсимметрию. Иногда используется как сокращение теории суперструн.

**Суперсимметрия:** Симметрия, в которой законы не изменяются, когда частицы с целочисленным спином (частицы сил) взаимозаменяются на частицы с полуцелым спином (частицы материи).

**Суперструн теория:** Теория, в которой фундаментальные ингредиенты являются одномерными петлями (замкнутые струны) или обрывками (открытые струны) колеблющейся энергии, которая объединяет ОТО и квантовую механику; включает суперсимметрию.

**Сценарий мира на бране:** Возможность в рамках теории струн/М-теории, что наши привычные три пространственных измерения являются 3-браной.

**Темная материя:** Материя, заполняющая пространство, оказывая гравитационное воздействие, но не испускающая света.

**Темная энергия:** Гипотетическая энергия и давление, однородно заполняющая пространство; более общее понятие, чем космологическая константа, поскольку ее энергия/давление может изменяться со временем.

**Трансляционная инвариантность, трансляционная симметрия:** Свойство принятых законов природы, при котором законы применимы в любом месте пространства.

**Ускорение:** Движение, которое содержит изменение в скорости и/или направлении.

**Ускоритель, атомный разрушитель:** Исследовательское устройство физики частиц, которое сталкивает частицы друг с другом на большой скорости.

**Фазовый переход:** Качественное изменение физической системы, когда ее температура меняется в достаточно широком диапазоне.

**Фотон:** Частица-переносчик электромагнитного взаимодействия; мельчайший "пучок" света.

**Хиггсов океан:** Сокращение, специфическое для данной книги, для величины вакуумного среднего Хиггсова поля.

**Хиггсово поле:** См. *Электрослабое Хиггсово поле*.

**Частица-переносчик:** Мельчайший "пакет" или "пучок" силы, с помощью которого осуществляется обмен силовым воздействием.

**Частицы Хиггса:** Мельчайшие квантовые составляющие Хиггсова поля.

**Чаша потенциальной энергии:** Форма, описывающая энергию, содержащуюся в поле при данной величине поля; формальное название потенциальной энергии поля.

**Черная дыра:** Объект, чье безмерное гравитационное поле захватывает все, даже свет, который остается внутри (внутри горизонта событий черной дыры).

**Электромагнитная сила:** Одна из четырех природных сил; действует на частицы, которые имеют электрический заряд или магнитные свойства.

**Электромагнитное поле:** Поле, которое оказывает электромагнитную силу.

**Электронное поле:** Поле, для которого электрон является мельчайшим количеством или составляющей.

**Электрослабая теория:** Теория, объединяющая электромагнитные и слабые ядерные силы в электрослабые силы.

**Электрослабое Хиггсово поле:** Поле, которое имеет ненулевую величину в холодном, пустом пространстве, дает начало массам фундаментальных частиц.

**Энергетическая чаша:** См. *Чаша потенциальной энергии*.

**Энтропия:** Мера беспорядка физической системы, число перегруппировок фундаментальных составляющих системы, которые оставляют ее макроскопические общие проявления неизменными.

**Эфир, светоносный эфир:** Гипотетическая субстанция, заполняющая пространство, которая обеспечивает среду для распространения света; отвергнута.

**D-браны, p-браны Дирихле:** p-браны, которые "клейкие"; p-браны, к которым прикреплены концы открытых струн.

**p-брана:** Ингредиент теории струн/М-теории с p пространственными измерениями. См. также *D-браны*.

**W и Z частицы:** Частицы-переносчики слабого ядерного взаимодействия.

**Советы для дальнейшего чтения**

Общая и специальная литература о пространстве и времени обширна. Приведенные ниже ссылки в большей степени предназначены для массового читателя, но некоторые требуют более углубленной подготовки, они оказались полезными для меня и являются хорошим стартом для читателя, который хочет дальше рассмотреть исследования, затронутые в этой книге.

Albert, David. *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1994.

------- *Time and Chance*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000.

Alexander, H. G. *The Leibniz-Clarke Correspondence*. Manchester, Eng.; Manchester University Press, 1956.

Barbour, Julian. *The End of Time*. Oxford: Oxford University Press, 2000.

------- and Herbert Pfister. *Mach's Principle*. Boston: Birkhauser, 1995,

Barrow, John. *The Book of Nothing*. New York: Pantheon, 2000.

Bartusiak, Marcia. *Einstein's Unfinished Symphony*. Washington, D.C.; Joseph Henry Press, 2000.

Bell, John. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993.

Blanchard, Ph., and D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O Stamateseu. *Decoherence: Theoretical, Experimental and Conceptual Problems*. Berlin: Springer, 2000.

Callender, Craig, and Nick Hugget. *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 2001.

Cole, K. C. *The Hole in the Universe*. New York: Harcourt, 2001.

Crease, Robert, and Charles Mann. *The Second Creation*. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996.

Davies, Paul. *About Time*. New York: Simon & Schuster, 1995.

------- *How to Build a Time Machine*. New York: Allen Lane, 2001.

------- *Space and Time in the Modern Universe*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1977,

D'Espagnat, Bernard. *Veiled Reality*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.

Deutsch, David. *The Fabric of Reality*. New York: Allen Lane, 1997.

Ferns, Timothy. *Coming of Age in the Milky Way*. New York: Anchor, 1989.

------- *The Whole Shebang*. New York: Simon & Schuster, 1997.

Feynman, Richard. *QED*. Princeton: Princeton University-Press, 1985.

Folsing, Albrecht. *Albert Einstein*. New York: Viking, 1997.

Gell-Mann, Murray. *The Quark and the jaguar*. New York: W. H. Freeman, 1994.

Gleick, James. *Isaac Newton*. New York: Pantheon, 2003.

Gott, J. Richard. *Time Travel in Einstein's Universe*. Boston: Houghton Mifflin, 2001.

Guth, Alan. *The Inflationary Universe*. Reading, Mass.: Perseus, 1997.

Greene, Brian. *The Elegant Universe*. New York: Vintage, 2000.

------- *Элегантная вселенная*. Москва: УРСС, 2004 (1-е изд.,), 2005 (2-е изд.).

Gribbin, John. *Schrodinger's Kittens and the Search for Reality*. Boston: Little, Brown, 1995,

Hall, A. Rupert. *Isaac Newton*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992.

Halliwell,}. J., J. Perez-Mercader, and W, H. Zurek. *Physical Origins of Time Asymmetry*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1994.

Hawking, Stephen. *The Universe in a Nutshell*. New York: Bantam, 2001.

------- and Roger Penrose. *The Nature of Space and Time*. Princeton: Princeton University Press, 1996.

------- Kip Thorne, Igor Novikov, Timothy Ferns, and Alan Lightman. *The Future of Spacetime*. New York: Norton, 2002.

Jammer, Max. *Concepts of Space*. New York: Dover, 1993.

Johnson, George. *A Shortcut Through Time*. New York: Knopf, 2003.

Kaku, Michio. *Hyperspace*, New York: Oxford University Press, 1994.

Kirschner, Robert. *The Extravagant Universe*. Princeton: Princeton University Press, 2002.

Krauss, Lawrence. *Quintessence*. New York: Perseus, 2000.

Lindley, David. *Boltzmann's Atom*. New York: Free Press, 2001.

------- *Where Does the Weirdness Go?* New York: Basic Books, 1996.

Mach, Ernst. *The Science of Mechanics*. La Salle, 111.: Open Court, 1989,

Maudlin, Tim. *Quantum Non-locality and Relativity*. Maiden, Mass.: Blackwell, 2002.

Mermin, N. David. *Boojums All the Way Through*. New York: Cambridge University Press, 1990.

Overbye, Dennis. *Lonely Hearts of the Cosmos*. New York: HarperCollins, 1991.

Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord*. Oxford: Oxford University Press, 1982.

Penrose, Roger. *The Emperor's New Mind*. New York: Oxford University1 Press, 1989.

Price, Huw. *Time's Arrow and Archimedes' Point*. New York: Oxford University Press, 1996.

Rees, Martin. *Before the Beginning*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997.

------- *Just Six Numbers*. New York: Basic Books, 2001.

Reichenbach, Hans. *The Direction of Time*. Mineola, N.Y.: Dover, 1956.

------- *The Philosophy of Space and Time*. New York: Dover, 1958.

Savitt, Steven. *Time's Arrows Today*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 2000.

Schrodinger, Erwin. *What Is Life?* Cambridge, Eng.: Canto, 2000.

Siegfried, Tom. *The Bit and the Pendulum*. New York: John Wiley, 2000.

Sklar, Lawrence. *Space, Time, and Spacetime*. Berkeley: University of California Press, 1977.

Smolin, Lee. *Three Roads to Quantum Gravity*. New York: Basic Books, 2001.

Stenger, Victor. *Timeless Reality*. Amherst, N.Y.; Prometheus Books, 2000.

Thorne, Kip. *Black Holes and Time Warps*. New York: W. W. Norton, 1994.

von Weizsacker, Carl Fnednch. *The Unity of Nature*. New York: Farrar, Straus, and Giroux, 1980.

Weinberg, Steven. *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon, 1992.

------- *The First Three Minutes*. New York: Basic Books, 1993.

Wilczek, Frank, and Betsy Devine. *Longing for the Harmonies*. New York: Norton, 1988.

Zeh, H. D. *The Physical Basis of the Direction of Time*. Berlin: Springer, 2001.

**Предметный и именной указатель**

Номера страниц, указанные *курсивом*, дают ссылки на иллюстрации и таблицы. Значком "n" (notes) у номера страницы помечены ссылки на комментарии.

А Б В Г Д Ж З И К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Э Я

Абсолютное время, 8, 45-7, 51, 72, 77

Концепция настоящего и А.В., 133, 138

Описание Ньютоном А.В., 45-6

Опровержение А.В. Эйнштейном, 9-10, 46-7, 59

Абсолютное пространство, 8, 27-9, 39, 45, 50-1, 72, 73, 77, 261

Возражения Маха к А.П., 33-8

Определение Ньютоном А.П., 28-9, 31

Опровержение А.П. Эйнштейном, 9-10, 46-7, 50-1, 59

Полностью пустое пространство и А.П., 34-7

Ранние рассуждения о пространстве в сравнении с А.П., 29-31

Светоносный эфир и А.П., 43, 50-1

Современная концепция и А.П., 133, 138

Ускоренное движение против движения с постоянной скоростью и А.П., 32-3

Абсолютное пространство-время, 51-61, 67, 132

Ведро с вращающейся водой и А.П.В., 59-61

Метафора с батоном хлеба и А.П.В., 58-9, *59*

Метафора с перекидной книжкой и А.П.В., 53-8, *54*, *57*, 68

Метафора с сетью стрит/авеню и А.П.В., 51-2, *52*, 53, 54, 56, 58, 59-60, *60*

Относительность одновременности и А.П.В., 55-8

Альбрехт, Андреас (Albrecht, Andreas), 283, 285, 521n

Андромеда, галактика, 246, 449n

Аномалии, 343

Античастицы, 528n

Антониадис, Игнатиос (Antoniadis, Ignatios), 401

Аристотель (Aristotle), 29, 43, 78

Аркани-Хамед, Нима (Arkani-Hamed, Nima), 400, 401

Асимметричные во времени явления, 510n-511n

Аспект, Алан (Aspect, Alain), 113, 115, 117-23, 502n, 512n

Астероиды, 416

Астрономические наблюдения, 493

Параметр торможения и А.Н., 297-301

Сверхновые в роли стандартных свечей в А.Н., 298-9

Атомная бомба , 420-1

Атомы, 17, 219, 261, 262, 267, 344, 429, 486, 515n, 528n

Бэнкс, Том (Banks, Tom), 488-9

Бахас, Константин (Bachas, Constantin), 400-1

Бекенштейн, Джекоб (Bekenstein, Jacob), 479-81, 536n

Белл, Джон (Bell, John), 84, 206, 512n, 513n

ЭПР парадокс и Джон Белл, 103-4, 106-11, 112-13, 115n, 120, 121, 502n

Беннет, Чарльз (Bennett, Charles), 442-6

Бесконечное плоское пространство, *239*, 239-40, 241, 243, 248-50, *249*

Бесконечность, 335

Пространство и Б., 248-50, *249*

Близнецов парадокс, 533n-534n

Бог, смысл пространства и Б., 29, 30

Большой адронный Коллайдер (*Large Hadron Collider* – LHC), 269, 402-3, 424-8

Большой взрыв, Взрыв, 17, 20, 122, 168, 247-8, 251-303, 387

Б.В. в одной точке или повсюду, 249

Б.В. и раскол между ОТО и квантовой механикой, 337-8

Б.В. как источник порядка, который мы в настоящее время видим, 171, 173-5

Бесконечное пространство и Б.В., 248-9, *249*

Взаимосвязь Б.В. с инфляционной моделью, 320-1

Взрыв на старте Б.В., 272-303, 519n-526n

Горизонта проблема и Б.В., 287-90, 522n-523n

Использование термина Б.В., 272, 519n

Космическое микроволновое фоновое излучение и Б.В., 226-8, 287-90, 429-32, *430*, 515n

Линия времени Б.В., *270*, 270-1

Первая доля секунды после Б.В., 251-71

Плоскостности проблема и Б.В., 290-4

Происхождение массы после Б.В., 260-3

Сингулярное начало и Б.В., 272, 285-6, 322-3, 337-8, 374-5, 404, 411

Стрела времени и Б.В., 13-14, 15, 143, 171-6, 227, 273

Температура сразу после Б.В., 257, 263-4

Хиггсовы поля и Б.В., 254, 256-68, 280-6

Электрослабое объединение и Б.В., 264-6, 513n-519n

Энтропия и Б.В., 171-6, 215, 227, 270-1, 273, 314-22, 511n

См. Также *Инфляционная космология*

Большой хруст, 511n

Бозонных струн теория, 354-5

Бойяи, Янош (Bolyai, Janos), 416

Больцман, Людвиг (Boltzmann, Ludwig), 13, 151, 159, 166-7, 319-20, 507n-508n

Бом, Дэвид (Bohm, David), 105-6, 206, 208, 213-14, 501n, 502n, 512n-514n

Бор, Нильс (Bohr, Niels), 21, 89, 94, 95, 99

Принцип дополнительности Бора, 185, 206

Проблема квантового измерения и Бор, 203, 204, 212, 213

Борн, Макс (Born, Max), 88-9

Браны , 384-6, 529n-530n

См. также *p-браны*

p-браны, 385-6, 387, 388

Конечные точки открытых струн и p-браны, 389-91, *390*

Поведение p-бран, аналогия со струнами, 391

Упущенное десятое пространственное измерение и p-браны, 529n-530n

3-браны, 385

Сценарий мира на бране и 3-браны, 386-412; см. также *Сценарий мира на бране*

2-браны, см. *Мембраны*

0-браны, 488-9

Брассар, Жиль (Brassard, Gilles), 442-6

Браун, К. (Braun, K.), 417, 418

Брилль, Дитер (Brill, Dieter), 417

де Бройль, Принц Луи (de Broglie, Prince Louis), 512n, 513n-514n

Будущее:

Б. в классической физике против квантовой физики, 178

Б. в повседневном опыте, 128-9

Визитеры из Б., 468-9

Влияние событий в Б. на прошлое, 186-91, 198-9

Память о прошлом против Б.., 144, 510n

Путешествие во времени в Б., 448-9, 450-1, 459, 463-5

Симметрия относительно обращения времени и Б., 145-50

Стрела времени и Б., 144

Энтропия и Б., 159-62

Быстрота, см. *Скорость*

Вайнберг, Стивен (Weinberg, Steven), 264-6, 267, 328

Вакуумные флуктуации, *331*, 331-2, 468, 534n

Вакуумы, Хиггсовы поля и В., 260

Вафа, Кумрун (Vafa, Cumrun), 536n

Вебер, Туллио (Weber, Tullio), 206-7, 208, 214

Ведро с вращающейся водой, 37, 74-5, 103

Анализ Ньютона В.В.В., 26-8, 31, 32

Аргументы Маха и В.В.В., 33-4, 59, 72-3, 74, 416, 417-18, 497n

Описание эксперимента Ньютона с В.В.В., 23, 24

ОТО и В.В.В., 72-4, 416

СТО и В.В.В., 50-1, 59-61, 62, 132, 497n

Венециано, Габриэле (Veneziano, Gabriele), 339-40

Великого объединения теория, 266-8, 328, 329, 519n, 520n, 526n

Вероятностные волны (волновые функции), 88-95, *89*, 201

Акт измерения и В.В., 94-5

Барьер скорости света и В.В., 503n

Борьба Эйнштейна с В.В., 93-5

В.В. в большом объекте, 207

В.В. для многочастичных систем, 500n-50ln

В.В. как воплощение того, что мы знаем о реальности, 205, 207, 213

В.В. как заполняющие пространство поля, 256

В.В. как отдельный элемент взаимодействия с самой частицей, 206, 208, 214, 512n

В.В. не наблюдаема непосредственно, 182-3

В.В., распространенная по всему пространству, 90, 92-3

Декогерентность и В.В., 209-13, 514n

Интерференционная картина электронов и В.В., 86-8, *87*, *88*, 91-2, 94; см. также *Двухщелевой эксперимент*

Коллапс В.В., 118-20, *119*, 201-16, 438-9, 503n, 513n; см. также *Коллапс волновой функции*; *Проблема квантового измерения*

Многомировой подход и В.В., 205-6, 207-8, 213, 452, 456-8, 513n

Неопределенность и В.В., 98, *98*

Отсутствие консенсуса относительно выражения В.В., 91

Повседневный опыт и В.В., 92-3

Подход сумм по историям и В.В., 179-84, 185n

Скрытые переменные и В.В., 206

Уравнение Шредингера и В.В., 200-1, 202, 203, 206-7, 208, 213-14, 445-56

Экспериментальное подтверждение В.В., 89-90

Эксперимент с квантовым ластиком и В.В., 192-4, *193*

Вероятностные или статистические рассуждения:

В.С.Р. как неизбежный элемент квантовой механики, 11, 79, 88-95, 178-9, 208-9, 512n

Квантовая интерференция и В.С.Р., 209

Практическое удобство В.С.Р. в класической физике, 177-8

Энтропия и В.С.Р., 153-6, 158-60, 176, 507n-508n, 511n

Верхние (up) кварки, 262, 346, *347*, 353, 518n

Вершинные (top) кварки, 263, 346, *347*, 353, 358

Вильсон, Роберт (Wilson, Robert), 515n

Виссер, Мэтт (Visser, Matt), 467

Виттен, Эдвард (Witten, Edward), 373, 378-84, 384, 385, 389, 390, 400-1, 406-7

Мета-объединение теорий струн и В., 373-378.

Число пространственных размерностей и В., 382-4

Влияние окружения, 222

Декогерентность и В.О., 210-13, 514n

Вода, 42-3, 84-5, 86, 87, 89

Вода, переходы между льдом или паром и В., 252-4, 263, 264

Водород, 171, 173-4, 432

Водяные волны, 42-3, 84-5, 86, 87, 89

*Война и Мир*, энтропия и перегруппировка страниц *Войны и Мира*, 152-60, 162, 167, 174, 215, 508n

Волновые функции, см. *Вероятностные волны*

Волны:

Гравитационные В., *419*, 419-23, *420*, 431-2, 531n, 532n

Движение В., 84-6, *85*, *86*

Интерференционные картины и В., 85-8, *85-8*, 91-2

Кажущееся координированное движение В., 87

Пики (гребни) и впадины В., 84, 98

Система отсчета для движения В., 42-3

Электромагнитные В., свет как электромагнитная В., 42, 44-5

Волны звука, 42-3

Волосы Вероники скопление (Coma), 246, 294-5

Вращательная симметрия или вращательная инвариантность, 223, 253, 514n

Вращение:

Путешествие во времени и В., 459-60

Системное увлечение и В., 416-18, *417*, 531n

Эксперимент с ведром и В., см. *Ведро с вращающейся водой*

Временные сечения, см. *Пространство-время, метафора батона хлеба для П.В.*

Время, 127-216

Абсолютное В., см. *Абсолютное время*

Асимметрии во В., 506n

В. в квантовом контексте, 177-216

В. в контексте классической физики, 129-76, 178

В. в расширяющейся вселенной, 233-6, 234

В. как мера изменения, 141, 220, 225-6, 228, 515n

Деформации В., 69n, 531n

Дополнительные размерности В., 529n

Замедление В. с возрастанием скорости, 47-50, 448-9, 533n-534n

Запутывание через В., 199

Метафора кинопроектора для В., 128, 131, 139-41

Однородность В. во вселенной, 226-36, *234*

Однородность истекшего В., 228

Остановка В. при скорости света, 49, 496n-497n

Открытые вопросы о В., 127, 129

Относительность В., 9-10, 46-50, 128, 230-1; см. также *Общая теория относительности (ОТО)*; *Специальная теория относительности (СТО)*

Перепутывание В. с пространством, 39; см. также *Пространство-время*

Повседневное восприятие В., 127-9, 139-42, 177

Сечения В. в перекидных книжках, 53-8, *54*, *57*, 68

Стрела В., см. *Стрела времени*

Симметрия и В., 220, 225-9

Теория струн и В., 350-1, 374

Течение В., 128-42

Циклические явления и В., 404-5

См. также *Будущее*; *Настоящего концепция*; *Прошлое*; *Пространство-время*

Вселенная:

Взгляды Эйнштейна на статическую В., 274-5, 279

В. как голограмма, 481-5

В. как статистически редкая флуктуация из нормальной, высокоэнтропийной конфигурации, 166-9, *167*, 175, 273

Возраст В., 226, 229, 235

Вращающаяся В. как машина времени, 460

Использование термина "наблюдаемая" В., 527n

Космологическая константа В., 274-9, 281-5, 299-301, 409, 434-5, 519n, 520n, 523n, 526n-527n

Космологические фазовые переходы во В., 254, 257-60, 263-8

Метафора часового механизма для В., 78-9

Мешанина ингредиентов во В., 300-1, 302, 432

Мифы творения и В., 78

Однородность В. на протяжении времени, 226-36, 234

Однородность температуры во В., 287-90

Вселенная (продолжение):

Параллельные вселенные и В., 205-6, 207-8, 456-8

Полная энтропия во времени во В., 167, *167*

Положение В. в пространстве, 30

Плотность массы/энергии во В., 242-3, 290-4, 434, 523n

Происхождение В., см. *Большой взрыв*; *Циклическая космология*; *Инфляционная космология*

Происхождение массы/энергии во В., 260-3, 310-13, 524n

Примерная иллюстрация истории В., 243-8, *244-7*, 301, 302

Размер В., 285, 511n

Расширение В., см. *Расширение вселенной*

Темная материя во В., 294-6, *296*, 300, 301, 432-4, 530n, 532n

Температура В., 250, 251, 252, 254, 280-1, 287-90

Торможения параметр В., 297-301

Форма В., см. *Форма вселенной*

Формирование слипшихся (комковатых) структур во В., 305-8

Второй закон термодинамики, 156-9, 164-5

Баланс энтропии и В.З.Т., 173

Симметрия по отношению к обращению времени и В.З.Т., 159-69, *161*, 175

Вуду, 80, 499n

Вуферс, Вильям (Woofers, William), 442-6

Выбора пути информация, *187*, 187-9

Квантового ластика эксперимент и В.П.И., 192-4, *193*

Квантового ластика эксперимент с отложенным выбором и В.П.И., 194-9, *196*

Космическая версия В.П.И., 189-91, *190*

Габор, Деннис (Gabor, Dennis), 535n

Газ:

Гравитация и Г., *172*, 172-4

Изначальный Г., 171-4

Углекислый Г. в бутылке колы, 143-4, 155-7, 160, 167, 172, 509n

Галактики, 168, 174

Г. в космической версии эксперимента с отложенным выбором, 189-91, *190*

Гравитационные поля Г., 278

Расширение вселенной и Г., 229-36, *232*, *234*, 237, 248, 249, *249*, 515n

Темная материя в Г., 294-6, *296*

Формирование Г., 305-8

Галилео Галилей (Galileo Galilei), 7, 24, 25, 223, 423

Гаусс, Карл Фридрих (Gauss, Carl Friedrich), 68, 416

Гейзенберг, Вернер (Heisenberg, Werner), 89, 204, 384, 512n

Принцип неопределенности и Г., 95-8, 100

Гелий, 171, 173-4, 432

Гелл-Манн, Мюррей (Gell-Mann, Murray), 212

Геометрическая дуальность, 474-7

Гермер, Лестер (Germer, Lester), 86-7

Гизин, Николас (Gisin, Nicolas), 115

Гипотеза прошлого, 511n

Глиоцци, Фердинандо (Gliozzi, Ferdinando), 355

Глэшоу, Шелдон (Glashow, Sheldon), 264-8, 328, 519n

Глюоны, 256, 262, 347, 394

Теория великого объединения и Г., 267

Годель, Курт (Godel, Kurt), 459, 460

Голографический принцип, 481-5

Голография, 535n-536n

Горизонта проблема, 287-90, 522n-523n

Горовиц, Гэри (Horowitz, Gary), 373

Готт, Ричард (Gott, Richard), 460

Гравитационная масса, 518n

Гравитационные волны, *419*, 419-23, *420*, 531n

Астрофизические исследования и Г.В., 422-3

Изначальные Г.В., 431-2, 532n

Обнаружение Г.В., 420-2

Гравитационные поля, 64, 255

Квантовые скачки в Г.П., 333-5, *334*, 349-50, 466

Обратного квадрата закон и Г.П., 394-400, *396*, *397*

Гравитационный Зонд В, спутник (*Gravity Probe B satellite*), 418

Гравитация, 8, 9, 222, 238, 348, 361, 422, 481, 530n

Г. как отталкивательная сила во время Взрыва, 272-86, 289, 301, 315

Горизонта проблема и Г., 288-90, 522n-523n

Деформации и искривления в ткани пространства-времени и Г., 68-72, 73-4, 95, 333, 419-23, *420*

Дополнительные пространственные измерения и Г., 394, 398-400, 424, 425, 428

Игнорирование Г. в СТО, 62-3, 64, 74

Избавление от ощущений, связанных с Г., 65-6, 67-8

Измерение Г. на очень малых масштабах, 399-400, 424

Космологическая константа и Г., 274-5, 278-9, 281-5, 299-301, 519n, 520n

Квантовомеханическое описание Г., 341-3, 348-50, 358-9, 489-91; см. также *Суперструн теория*

Массы/энергии плотность и Г., 292-3

Обратное движение и Г., 146-9

ОТО и Г., 62-74, 261, 275-6, 327, 328, 333; см. также *Общая теория относительности (ОТО)*

Отрицательное давление и Г., 277-8, 281-2

Петлевая квантовая гравитация и Г., 489-91

Подход Ньютона к Г., 63-4, 67, 68, 71, 72, 275, 276, 277, 278, 279, 327, 328, 394-400, *396*, 519n

Полевые уравнения Эйнштейна и Г., 70-2, 498n

Притягивательная Г., расширение вселенной и Г., 230, 288-9

Происхождение массы/энергии и Г., 310-13, 524n

Пространство-время, деформированное Г., 69-72, 73-4

Рассуждения Маха и Г., 38

Скорость передачи Г., 63-4, 72

Слипание материи в ранней вселенной и Г., *172*, 172-4, 307, 314-15, 316-17, 525n

Струн теория и Г., 268, 341-3, 348-50, 384-5, 386-7, 394-400, 401

Сценарий мира на бране и Г., 394-400, 424

Темная материя и Г., 294-6

Торможения параметр и Г., 297-301

Формирование Солнца и Г., 171

Черные дыры и Г., 173, 424, 425, 516n

Энтропия и Г., 171-4, 227, 314-17, 524n-525n

Эквивалентность ускорения и Г., 64-8, 69, 224, 376, 518n

Гравитоны, 255, 421

Игнорирование Г. в стандартной модели физики частиц, 352-3

Обратного квадрата закон и Г., 395

Струн теория и Г., 341-3, 348, 349, 354, 358, 386-7, 394, 401, 490

Грин, Майкл (Green, Michael), 343-4, 384-5, 389

Гриффитс, Роберт (Griffiths, Robert), 212

Гроссманн, Марсель (Grossmann, Marcel), 64

Гут, Алан (Guth, Alan), 280-5, 313n, 520n, 521n, 522n

Давление:

Гравитационная сила и Д., 276-9, 519n-520n

Отрицательное Д., переохлажденное Хиггсово поле и Д., 280-6

Даи, Джин (Dai, Jin), 388

Даммет, Майкл (Dummett, Michael), 450

Дафф, Майкл (Duff, Michael), 378, 384

Двали, Гиа (Dvali, Gia), 400, 401

Движение:

Д. в свободном падении как эталон отсчета для ускорения, 66, 67-8, 73-4, 498n

Д. с постоянной скоростью, см. *Движение с постоянной скоростью*

Д. через пространство при преобладании космического течения, 237, 246, 247

Законы Д. Ньютона, 7-8, 10, 31, 146, 160, 183, 221-2, 224, 273, 280, 327, 328, 514n-515n

Обращение Д., 146-50, 507n

Относительность и Д., 24-9, 31-76; см. также *Общая теория относительности (ОТО)*; *Специальная теория относительности (СТО)*

Симметрия и Д., 223-4, 225

Ускоренное Д., см. *Ускорение*

Движение с постоянной скоростью, 24, 25

Абсолютное пространство и Д.П.С., 32, 33

Д.П.С. как предмет СТО, 51, 65

Симметрия среди всех систем отсчета и Д.П.С., 223-4, 225

Хиггсов океан и Д.П.С., 262, 269

Двумерный тор (конечная плоская форма или форма экрана видеоигры), *240*, 240-1, 434, 517n

Сечения пространственно-временного батона и Д.Т., 243-8, *244-7*

Двухщелевой эксперимент, 206

Декогерентность и Д.Щ.Э., 209-13

Добавление дополнительных детекторов в Д.Щ.Э., 184-5

Интерференционные картины, получаемые в Д.Щ.Э., 86-8, *87*, *88*, 91-2, 94

Обычное движение волны и Д.Щ.Э., 84-6, *85*, *86*

Подход сумм по историям и Д.Щ.Э., 179-80, 182

Понятие вероятности и Д.Щ.Э., 88-92

Эксперимент с квантовым ластиком и Д.Щ.Э., 192-4, *193*

ДеВитт, Брюс (DeWitt, Bryce), 527n

Девы скопление (Virgo), 295

Дейтерий, 171, 432

Декарт, Рене (Descartes, Rene), 7, 25

Декогерентность, 208-13, 514n

Декогерентные истории, 212

Де Мартини, А. Франческо (De Martini, A. Francesco), 442, 446

Детектор Космических Лучей Летающее Око (*Fly's Eye cosmic ray detector*), 425

Джоза, Ричард (Josza, Richard), 442-6

Джорджи, Говард (Georgi, Howard), 266-8, 518n

Джос, Эрих (Joos, Erich), 209

Димопоулос, Савас (Dimopoulos, Savas), 400, 401

Дирак, Поль (Dirac, Paul), 89, 384

Дойч, Дэвид (Deutsch, David), 450, 456

Донные (bottom) кварки, 346, *347*

Дополнительности принцип, 185, 206, 512n

Дриил, Каи (Driihl, Kai), 192-3

Дэвиссон, Клинтон (Davisson, Clinton), 86-7

Жирарди, Джанкарло (Ghirardi, Giancarlo), 206-7, 208, 214

Зайберг, Натан (Seiberg, Nathan), 406

Запутывание, 11-12, 80-4, 105-23, 199, 335, 500n

Коллапс волновой функции и З., 118-20, 207

Метафора титановых ящиков и З., 81-3, 107-10, 111

Однородная температура во вселенной и З., 287

СТО и З., 115-20, 502n

Телепортация и З., 442-8, *447*

Экспериментальное доказательство З., 113, 115, 118-19, 502n-503n

ЭПР парадокс и З., 11, 100-2, 105-15, 50ln-502n

См. также *Нелокальность*

550 к оглавлению

Звезды, 19, 171, 173, 174, 261

Гравитационные поля З., 278

Нейтронные З., 422, 531n

Свет от З., отклоняемый кривизной пространства-времени, 273-4

Формирование З., 305-8

Ядерные процессы в З., 353

См. также *Сверхновые*

Звука волны, 42-3

Зей, Дитер (Zeh, Dieter), 209, 210

Зейлингер, Антон (Zeilinger, Anton), 442, 446

Земля, 25, 235, 405

Гравитационное поле З., 255, 274

Магнитное поле З., 40, 41

Системное увлечение, вызванное вращением З., 418

Зино, 427, 433, 532n

Зонд Космического Фона (*Cosmic Background Explorer* – COBE), 429-30, 430, 434

Зонд Микроволновой Анизотропии Вилкинсона (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* – WMAP), 429-30, *430*, 434

Зонд Сверхновых/Ускорения (*SuperNova/Acceleration Probe* – SNAP), 434-5

Зрение, 254-5, 496n

З. и взаимодействие с измеряемым объектом, 96-7

Сценарий мира на бране и З., 393-4

Изменение, время как мера И., 141, 220, 225-6, 228, 515n

Измерение, см. *Наблюдение или измерение*

Инерциальная масса, 518n

Инерциальные наблюдатели, 514n-515n

Инерция, Хиггсов океан и происхождение И., 261-2

Интерференция, 85-8, 256

Введение дополнительных детекторов и И., 184-5

Вероятностные волны и И., 88-92, 209

Выбора пути информация и И., *187*, 187-91, *190*

Голография и И., 535n

Декогерентность и И., 209-13, 514n

И. электронов в двухщелевом эксперименте, 86-8, *87*, *88*, 91-2, 94

Кажущееся координированное движение волны и И., 87

Обычное движение волны и И., 84-6, *85*, *86*

Подход сумм по историям и И., 179-81, *181*

Эксперимент квантового ластика и И., 192-4, *193*

Эксперимент квантового ластика с отложенным выбором и И., 194-9, *196*

Инфлатона поле, 281-6, 302, 321, 521n-522n

Квантовые скачки и И.П., 307-8, 431

Механизм переохлаждения и И.П., 281

Начальный комок И.П., 313, 524n

Отталкивательная гравитация и И.П., 281-6, 301

Происхождение массы/энергии и И.П., 310-13, 524n

Пузырьковое зародышеобразование и И.П., 521n

Стрела времени и И.П., 315-22

Условия для инфляции и И.П., 317-21, 525n

Инфляционная космология, 14-15, 252, 272-323, 404, 410, 519n-526n

Акт творения и И.К., 285-6, 318

Горизонта проблема и И.К., 287-90, 522n-523n

Измерение массы/энергии в космосе и И.К., 294-301

Измерения сверхновых и И.К., 298-9, 300, 301, 434-5

Изначальные гравитационные волны и И.К., 431-2, 532n

И.К. как схема вместо отдельной, единственной теории, 286-7, 430

Картина эволюции космоса, вытекающая из И.К., 284-5, 286, 301, 302, 321-2

551 к оглавлению

Инфляционная космология (продолжение):

Квантовые флуктуации и И.К., 305-10, 525n

Начальный комок поля инфлатона и И.К., 313, 524n

Открытые вопросы в И.К., 302-3

Отталкивательная гравитация и И.К., 272-86, 289

Оценка фактора расширения в И.К., 284-5

Плоскостности проблема и И.К., 290-4

Предынфляционная область и И.К., 322-3

Происхождение массы/энергии и И.К., 310-13, 524n

Прорастание новых вселенных из старых и И.К., 320-1, *321*

Прорыв Гута и И.К., 280-5, 520n, 521n, 522n

Размер начального комка и И.К., 313, 524n

Стрела времени и И.К., 314-22, 525n-526n

Темная материя и И.К., 294-6, *296*, 300, 301, 411

Температурные вариации космического микроволнового фонового излучения и И.К., 308-10, *309*, 430-1

Торможения параметр и И.К., 297-301

Условия инфляционного взрыва и И.К., 317-21, 411, 525n

Формирование слипшихся структур и И.К., 305-8

Хаотическая модель и И.К., 552n

Циклическая модель мира на бране и И.К., 408-10, 530n

Энтропия и И.К., 314-22

Калаби, Эугенио (Calabi, Eugenio), 369

Калибровочная симметрия, 265, 267

Калуца, Теодор (Kaluza, Theodor), 360-1, 367

Калуцы-Кляйна теория, 360-6, *365*, 367

Камю, Альбер (Camus, Albert), 3-5, 19, 20-1

Канделас, Филип (Candelas, Philip), 373

Кант, Иммануил (Kant, Immanuel), 471

Карнап, Рудольф (Carnap, Rudolf), 141

Казимир, Хендрик (Casimir, Hendrik), 331-2

Казимира сила, 332, 526n, 534n

Квазары в космической версии эксперимента с отложенным выбором, 189-91, *190*

Квантовая механика, 10-12, 75-123, 486, 500n-503n

Вероятность как фундаментальный аспект К.М., 11, 79, 88-95, 178-9, 208-9, 512n

Время в контексте К.М., 177-216

Гравитация, описанная в терминах К.М., 341-3, 348-50, 358-9, 489-91; см. также *Суперструн теория*

Единство волны и частицы и К.М., 90

Запутывание и К.М., 11-12, 80-4, 105-23, 500n; см. также *Запутывание*

История научного прогресса и К.М., 328-9

Концептуальная схема классической физики, подорванная К.М., 177, 329-30

Концепция декогерентности и К.М., 208-13, 514n

Наблюдение или измерение как интегральный элемент К.М., 94-5, 456, 534n

Нелокальность и К.М., 11-12, 80-4, 114-15, 120-3, 500n-503n; см. также *Нелокальность*

Неопределенность и К.М., 95-123, 305-10, 329-35, 376; см. также *Неопределенности принцип*

Неотъемлемое "дрожание" микромира и К.М., 201n, 305-10, 329-35, 334, 349-50, 472-4, 525n, 526n, 528n

Повседневный опыт и К.М., 92-3, 97, 199-216

Подход суммирования по историям в К.М., 179-84, 185n

Попытки связать опыт классической физики с К.М., 199-216

Прошлое и будущее в классической физике против К.М., 178-9, 181-2, 190

Размер объекта и К.М., 183, 203, 207, 210

Раскол между ОТО и К.М., 15, 16-17, 18, 323, 329, 333-8, 348-50, 527n

Симметрия по отношению к обращению времени в К.М., 200

552 к оглавлению

Квантовая механика (продолжение):

Соединение ОТО и К.М., 489-91; см. также *Суперструн теория*

Соотношение между скоростями и положениями частицы и К.М., 100-2

Сопротивление Эйнштейна против К.М., 11, 80, 83-4, 93-5, 99-102, 500n

Стрела времени и К.М., 200-16

Телепортация и К.М., 437-48, *447*, 532n-533n

Трения между СТО и К.М., 335-6

Формирование звезд и галактик и К.М., 305-8

Экспериментальная проверка К.М., 11, 84, 89-90, 93, 113, 115, 118-19, 182, 186, 202, 332, 500n

ЭПР парадокс и К.М., 11, 99-115, 120-2, 199, 206, 50ln-502n

Квантовая хромодинамика, 340

Квантовое усреднение, 472-4

Квантовые состояния, идентичные частицы и К.С., 439-40

Квантовый ластик (стиратель), эксперимент, 192-4, *193*

К.Л. с отложенным выбором, 194-9, *196*

Кварки, 17, 355

Взаимодействие Хиггсова океана с К., 261-3

Разновидности К., 346, *347*

Стандартная модель и К., 344-6, *345*, *347*

Теория струн и К., 345, *345*, 346-7, 394

Квиат, Пол (Kwiat, Paul), 193

Квинтэссенция, 435

Кельвин, лорд (Kelvin, Lord), 9, 10

Кинетическая энергия, 276, 312n, 519n

Китинг, Ричард (Keating, Richard), 50

Классическая физика, 7-10, 23-79, 199

Вероятностные рассуждения как практическое удобство в К.Ф., 177-8

Время в контексте К.Ф., 129-76, 178

Детерминистическая точка зрения в К.Ф., 78-9, 91, 178, 212-13, 329-30, 511n-512n

Концептуальная схема К.Ф., подорванная квантовой механикой, 177, 329-30

Попытки связать опыт К.Ф. с квантовой физикой, 199-216

Прошлое и будущее в квантовой механике против К.Ф., 178-9, 181-2, 190

Размер объекта и К.Ф., 183, 203, 207, 210

Симметрия по отношению к обращению времени в К.Ф., 145-50, 200

Усреднение по всем возможным историям и К.Ф., 183

Клаузер, Джон (Clauser, John), 113

Кляйн, Оскар (Klein, Oskar), 361-6, 367

Коллапс волновой функции (коллапс вероятностной волны), 118-20, *119*, 201-16, 5l3n

Барьер скорости света и К.В.Ф., 503n

Модификация Жирарди-Римини-Вебера и К.В.Ф., 206-7, 208, 214, 215

Повседневный опыт и К.В.Ф., 201-2

Система отсчета и К.В.Ф., 120

Уравнение Шредингера и К.В.Ф., 201, 202, 203

См. также *Проблема квантового измерения*

Комптон, Артур (Compton, Arthur), 501n

Компьютеры, 437

Стрела времени и К., 511n

Конечное плоское пространство, см. *Двумерный тор*

Конформная симметрия, 529n

Корреляции нелокальные, 500n

См. также *Запутывание*; *Нелокальность*

Космическая микроволновая фоновая радиация, 14, 15, 226-8, 515n

Горизонта проблема и К.М.Ф.Р., 287-90, 522n-523n

Малые вариации температуры в К.М.Ф.Р., 308-10, *309*, 429-32, *430*

Однородность К.М.Ф.Р., 227-8, 234, 235-6, 287-90

Поляризация К.М.Ф.Р., 432

Точное измерение К.М.Ф.Р., 429-32, *430*, 434

Форма вселенной и К.М.Ф.Р., 434

Космические лучи, 424-5, 531n-532n

553 к оглавлению

Космические струны, 460

Космического горизонта проблема, 287-90, 522n-523n

Космологическая стрела времени, 510n, 511n

Космологическая константа, 274-9, 299-301, 519n, 520n

Гравитационные последствия К.К., 275, 278-9

Детали происхождения или идентификации, отсутствующие для К.К., 275, 278

Наблюдения сверхновых и К.К., 300, 301, 409, 434-5, 523n, 526n-527n

Переохлажденное Хиггсово поле и К.К., 275, 281-5, 520n, 523n

Представление Эйнштейна о статической вселенной и К.К., 274-5, 279

Установление величины К.К., 283-4, 300-1, 526n-527n

Космологические фазовые переходы, 254

Великого объединения теория и К.Ф.П., 266-8

Формирование Хиггсова океана и К.Ф.П., 257-60, 263-6, 267

Космология, 12-15, 171, 218-323

Линия времени К., *270*, 270-1

Инфляционная К., см. стандарты инфляционной космологии для жизнеспособности теорий в К., 429

Приблизительный обзор К., 243-8, *244-7*

Симметрия и К., 219-50

Суперструн теория и К., 20, 403-12, *406*, *408*; см. также *Сценарий мира на бране*; *Циклическая космология*

Сценарий мира на бране и К., 403-12, *406*, *408*; см. также *Сценарий мира на бране*; *Циклическая космология*

См. также *Большой взрыв*; *Вселенная*

Коэн, Джеффри (Cohen, Jeffrey), 417

Красное смещение, 312n, 515n

Крепо, Клод (Crepeau, Claude), 442-6

Кривизна:

Мера К., 516n-517n

Три типа К., 241, 242, 511n

Эйнштейна уравнения и К., 242-3

См. также *Форма вселенной*

Криогенный Поиск Темной Материи (*Cryogenic Dark Matter Search* - CDMS), 532n

Критическая плотность, кривизна пространства и К.П., 242-3, 290-4, 434, 523n

Куинн, Хелен (Quinn, Helen), 267

Курицы и яйца история, энтропия и К.Я.И., 170-1, 174

"*К электродинамике движущихся тел*" (Эйнштейн), 44

Ламоро, Стив (Lamoreaux, Steve), 332, 526n

Лед, переход между водой и Л., 252, 253-4, 263, 264

Лейбниц, Готтфрид Вильгельм фон (Leibniz, Gottfried Wilhelm von), 6, 61, 62, 286, 310, 313

Смысл пространства и Л., 30, 31, 32, 37, 103

Лейг, Роберт (Leigh, Robert), 388

Леметр, Жорж (Lemattre, Georges), 230, 274, 275, 280

Ленин, Владимир (Lenin, Vladimir), 36

Ленсе, Джозеф (Lense, Joseph), 416

Ликкен, Джо (Lykken, Joe), 400-1

Линде, Андрей (Linde, Andrei), 283, 285, 320, 520n, 521n-522n, 524n, 525n

Липпершей, Ганс (Lippershey, Hans), 423

Литий, 171, 432

Лобачевский, Николай (Lobachevsky, Nikolai), 416

Локальность:

Квантовая нелокальность и Л., 11-12, 80-4, 114-15, 120-3, 500n-503n

Л. в классической физике, 79-80, 120-2

См. также *Запутывание*; *Нелокальность*

Лоренц-инвариантная схема, 502n

554 к оглавлению

Луна, 222, 405, 531n

Гравитационное притяжение Л., 63-4

Лучевой разветвитель, эксперимент:

Информация выбора пути и Л.Р., *187*, 187-91, *190*

Космическая версия эксперимента с Л.Р., 189-91, *190*

Разновидности Л.Р., 184-5, *187*, 187-9

Сумм по историям подход и Л.Р., 180-1, *181*, 182

Эксперимент с квантовым ластиком с отложенным выбором и Л.Р., 194-9, *196*

Магнетизм, 40, 264, 265, 395

См. также *Электромагнитное взаимодействие*

Магнитного монополя проблема, 281, 520n

Магнитные поля, 40-1, *41*, 64

Взаимосвязь между электрическими полями и М.П., 40, 41-2, 496n

Майкельсон Альберт (Michelson, Albert), 9, 43-4, 496n

Максвелл, Джеймс Клерк (Maxwell, James Clerk), 9, 10, 64, 180, 186

Взаимосвязь между электрическими полями и магнитными полями и М., 40, 41-2, 200, 264, 265, 327, 328, 361, 496n

Взаимосвязь между электромагнитными силами и светом и М., 42

Объединение и М., 252, 264, 265

Симметрия по отношению к обращению времени и М., 200, 214

Скорость света и М., 42-3, 44-5

Малдасена, Хуан (Maldacena, Juan), 483-5, 536n

Масса:

Величина М. начального комка, 313, 524n

Взаимозаменяемость энергии и М., 262, 354, 519n

Гравитационное взаимодействие и М., 275-7

Деформации и искривления в пространстве-времени и М., 418-20

Концепция М., 518n

М. частиц, 347, 354, 356-8, 373-4, 402-3, 528n

Происхождение М., 260-3, 310-13, 524n

Хиггсов океан и М., 260-3, 518n

Энергия, заключенная в поле инфлатона и М., 311-13, 524n

Масса/энергия:

Измерение М.Э. в космосе, 294-301

Плотность М.Э., кривизна пространства и М.Э., 242-3, 290-4, 434, 523n

Уравнение Эйнштейна для М.Э., 242-3

Масштаб, 334-5

Большой М., расширение релятивистских эффектов до большого М., 134-9

Декогерентность и М., 210-13, 514n

Квантовые скачки (дрожания) и М., 307-8, 333-5, *334*, 349-50, 473-4

Коллапс волновой функции и М., 207

М. и раскол между ОТО и квантовой механикой, 336-8

Область классической физики против квантовой физики и М., 183, 203, 207, 210

Обратного квадрата закон и М., 397-400

Сложность примирения квантовой механики с повседневным опытом и М., 92-3

Струн теория и М., 348-50

Математика как испытанный путь к истине, 162

Материя:

М. в пространстве, ускорение и М., 34-8

Смысл пространства и М., 29, 30

Темная М., см. *Темная материя*

Экзотическая М., 467, 534n

Матричная механика, 512n

Матричная теория, 489

555 к оглавлению

Мах, Эрнст, 33-8, 43, 51, 61, *62*, 261, 420, 460, 486

Ведро с вращающейся водой и М., 33-4, 59, 72-3, 74, 416, 417-18, 497n

Использование Эйнштейном идей М., 33, 38, 62, 72-4, 416, 499n

Системное увлечение и М., 416-18, *417*

Мембраны (2-браны), 385, 387, 390, *390*

Меркурий, орбита М., 273

Местоположение, трансляционная симметрия и М., 221-3, 225, 514n

Метафора дизайна улиц/аллей и пространство-время, 51-2, *52*, 53, 54, 56, 58, 59-60, *60*

Микроволновая фоновая радиация, см. *Космическая микроволновая фоновая радиация*

Миллс, Роберт (Mills, Robert), 255

Минковский, Герман (Minkowski, Hermann), 53, 497n, 505n-506n

*Миф о сизифе* (Камю), 3-5, 20-1

Млечный Путь, 235, 244

Многомировой подход, 205-6, 207-8, 213, 513n

Путешествие во времени и М.П., 452, 456-8

Модель воздушного шара, см. *Расширяющаяся вселенная, модель воздушного шара для Р.В.*

Молекулы, 17

Монополи, 281, 520n

Мор, Генри (More, Henry), 29, 43

Морли, Эдвард (Morley, Edward), 43-4, 496n

Моррисон, Дэвид (Morrison, David), 386

М-теория, 18, 20, 378-412

Аналогия лингвистического перевода для М., 381-2

Браны, добавленные к струнам в М., 384-6, 529n-530n

Геометрическая дуальность и М., 474-7

Дополнительные пространственные размерности и М., 18-19, 382-4, 391, 392-400

Космология и М., 403-12, *406*, *408*; см. также *Циклическая космология*

Объединение пяти индивидуальных теорий струн в М., 378-82, *380*

0-браны и М., 488-9

См. также *Сценарий мира на бране*

Мюонное нейтрино, 346, *347*

Мюоны, 346, *347*, 353

Наблюдение или измерение:

Взаимодействие с измеряемым объектом и Н.И., 96-7, 98, 100

Декогерентность и Н.И., 208-13, 514n

Добавление дополнительных детекторов и Н.И., 184-5, *187*, 187-91, *190*

Запутывание и Н.И., 82-4, 100-2, 115-23, 500n, 50ln-502n

История прошлого, находящаяся под влиянием Н.И., 191

Квантовая неопределенность и Н.И., 95-123; см. также *Неопределенности принцип*

Квантовая телепортация и Н.И., 438-9, 443-8, *447*

Коллапс волновой функции и Н.И., 118-20, *119*, 201-16

Н.И. в классической физике против квантовой физики, 178-9

Н.И. как интегральный элемент квантовой механики, 94-5, 456, 534n

Проблема квантового измерения и Н.И., 183-4, 201-16, 455-6

Прошлое, определяемое как время перед Н.И., 178-9, 202

Симметрии и Н.И., 221, 222

Среднее по всем возможным историям отражается через Н.И., 183-4

Стирающее воздействие прошлого и Н.И., 191-9

Стрела времени и Н.И., 202-16

Установление лимита скорости в СТО и Н.И., 116-17, 118

Эксперимент с отложенным выбором и Н.И., 186-9, *187*, *190*

Намбу, Йоихиро (Nambu, Yoichiro), 340

556 к оглавлению

Настоящего концепция, 131-9

Время, необходимое чтобы получить свет, и Н.К., 133, 137

Изменение и Н.К., 141

Индивидуумы на возрастающем расстоянии друг от друга в пространстве и Н.К., 134-9, *135*, *136*, 504n-505n

Н.К. в ньютоновском абсолютном пространстве и времени, 133, 138

Осознанное ощущение Н.К., 128-9, 139-42

Отсутствие физического механизма для Н.К., 131-2

Релятивистские эффекты и Н.К., 132, 133-9

Стоп-кадр ментального образа Н.К., 132-3, 138-9

Настоящее, см. *Настоящего концепция*

Невесомость, 66

Невозможности квантового клонирования теорема, 533n

Невье, Андре (Neveu, Andre), 355

Независимоть от фона, 487-8, 490, 491

Нейтрино, 346, *347*, 433

Нейтронные звезды, 422, 531n

Нейтроны, 17, 90, 267, 300-1, 432

Происхождение массы Н., 261-3

Составляющие Н., см. *Кварки*

Нелокальность, 11-12, 80-4, 114-15, 120-3, 199, 335, 500n-503n

Подход Бома и Н., 121-2, 206, 514n

Экспериментальная проверка Н., 113, 115, 118-19, 502n-503n

ЭПР парадокс и Н., 11, 100-2, 105-15, 501n-502n

См. также *Запутывание*

Ненулевое вакуумное среднее Хиггсова поля, см. *Хиггсов океан*

Неопределенности принцип, 95-123, 376, 438-9

Будущее и Н.П., 178

Вариации температуры космического микроволнового фонового излучения и Н.П., 308-10, *309*

Вероятностные волны и Н.П., 98, *98*

Взаимодействие с измеряемым объектом и Н.П., 96-7, 98, 100

Вопрос реальности и Н.П., 99-103

Гравитационное поле и Н.П., 333-5, *334*, 349-50

Коллапс волновой функции и Н.П., 205, 206

Неровности пространства и Н.П., 333-5, *334*, 349-50

Ничто и Н.П., 330-2

Н.П. и минимальное количество неопределенности в любой ситуации, 97-8

Отказ от классической физики и Н.П., 329-30

Повседневный опыт и Н.П., 97

Поля и Н.П., 306, 329-30, 333, 468, 520n -521n, 526n

Присущие микромиру скачки (дрожания) и Н.П., 305-10, 329-35, *334*, 349-50, 472-4, 526n, 528n

Прошлое и Н.П., 178-9

Скрытые переменные и Н.П., 106, 112, 121, 206, 500n, 514n

Спин и Н.П., 104-6, 110-11, 501n

Три и более свойства и Н.П., 104-6

Формирование слипшихся структур и Н.П., 305-8

Формулировка Н.П. Гейзенберга, 95-8

ЭПР парадокс и Н.П., 99-115; см. также *ЭПР парадокс*

Нижние (down) кварки, 262, 346, *347*, 353

Нильсен, Хольгер (Nielsen, Holger), 340

Ничто, 76, 251

Квантовые дрожания и Н., 330-2

Классическое понятие Н., 330

Невидимые вещи, которые могут заполнять пустое пространство и Н., 391-2

Смысл движения и ускорения в Н., 34-7

Хиггсов океан и Н., 260, 268, 269-70, 330

557 к оглавлению

Нулевая кривизна, 241, *242*, 242-3, 290

Ньютон Исаак (Newton, Isaac), 6, 7-10, 21, 24, 25-9, 32, 48, 61, 62, 75, 103, 177, 186, 200, 214, 252, 338, 486

Абсолютное время и Н., 8, 9-10, 45-6, 51, 59, 72, 133, 138

Абсолютное пространство и Н., 8, 9-10, 27-9, 31, 39, 43, 45, 46-7, 50-1, 59, 72, 133, 138, 261

Взгляд Н. на пространство и время как на раздельные сущности, 48

Вызов Маха по отношению к Н., 33-8

Гравитация и Н., 63-4, 67, 68, 71, 72, 275, 276, 277, 278, 279, 327, 328, 394-400, *396*, 519n

Детерминистическая точка зрения Н., 78-9, 91

Законы движения и Н., 7-8, 10, 31, 146, 160, 183, 221-2, 224, 273, 280, 327, 328, 514n-515n

Обратного квадрата закон и Н., 394-400, 396

Различные точки отсчета и Н., 32

Теория частиц света и Н., 85-6

Эксперимент Н. с ведром, см. *Ведро с вращающейся водой*

Обратного квадрата закон, 394-400

Количество размерностей и О.К.З., 394-7, *396*, 424

Микрокосмос и О.К.З., 397-400

Обсерватория Гравитационных Волн на Лазерном Интерферометре (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory* – LIGO), 421-3, 431

Обсерватория Пьера Аугера (*Pierre Auger Observatory*), 425

Общая теория относительности (ОТО), 9-10, 14, 62-76, 200, 230-1, 261, 376, 416-23, 486, 498n-499n

Аргументы Маха и ОТО, 72-4, 416-18, 420, 499n

Ведро с вращающейся водой и ОТО, 72-4, 416

Гравитационные волны и ОТО, *419*, 419-23, 531n

Детерминистическая точка зрения ОТО, 78-9

Деформация пространства-времени и ОТО, 68-72, 73-4, 95

Дополнительные пространственные измерения и ОТО, 361, 370

История научного прогресса и ОТО, 327, 328, 329, 515n

Космологическая постоянная и ОТО, 274-9, 519n, 520n

Космология и ОТО, 72

Кривизна пространства и ОТО, 242-3, 290-1

Математическая схема для гравитации, обеспечиваемая ОТО, 70-2

Отталкивательная гравитация и ОТО, 274-9, 519n-520n

Петлевая квантовая гравитация и ОТО, 489-91, 536n

Повседневный опыт и ОТО, 77, 78, 128

Путешествие во времени и ОТО, 459-68

Раскол между квантовой механикой и ОТО, 15, 16-17, 18, 323, 329, 333-8, 348-50, 527n

Расширение вселенной и ОТО, 229-33, 280, 515n

Системное увлечение и ОТО, 416-18, 531n

Свободное падение как эталон отсчета в ОТО, 66, 67-8, 73-4, 498n

Сохранение энергии и ОТО, 532n

Соединение электромагнитного взаимодействия и ОТО, 329, 361, 366

Соединение квантовой механики и ОТО, 489-91; см. также *Суперструн теория*

Симметрия, лежащая в основании законов физики и ОТО, 224, 225, 250

Уравнения ОТО, 15, 70-2, 242, 273-4, 278-9, 335, 336, 361, 498n, 519n

Ускоренное движение как предмет ОТО, 51

Факторы, дающие вклад в силу гравитационного поля в ОТО, 275-6

Циклические космологические модели и ОТО, 405-6

Эквивалентность гравитации и ускорения в ОТО, 64-8, 69, 224, 376, 518n

Объединение, 15-19, 252, 281, 327-75

Дополнительные пространственные размерности и О., 359-72, 528n-529n

Заинтересованность Эйнштейна в О., 15-16, 18, 252, 329, 361, 366

История научного прогресса и О., 327-9

О. и раскол между ОТО и квантовой механикой, 15, 16-17, 18, 323, 329, 333-8, 348-50

Петлевая квантовая гравитация и О., 486, 489-91

558 к оглавлению

Объединение (продолжение):

Подрыв классической реальности принципом неопределенности и О., 329-35

Теория великого объединения и О., 266-8, 328, 329, 519n, 526n

Электрослабые силы и О., 264-6, 267, 268, 328, 329, 518n-519n

См. также *М-теория*; *Суперструн теория*

Оврут, Берт (Ovrut, Burt), 406

Одновременность, относительность О., 55-8

Олив, Дэвид (Olive, David), 355

Омнес, Роланд (Omnes, Roland), 212

Открытые струны:

Конечные точки (концы) О.С., 389-91, *390*

Отложенный выбор, эксперимент, 186-9, *187*

Космическая версия эксперимента О.В., 189-91, *190*

Относительность, 9-10, 12, 39-76, 496n-499n

О. одновременности, 55-8

О. перед Эйнштейном, 24-9, 31-8

Эффекты О., расширение эффектов О. до больших масштабов, 134-9

См. также *Общая теория относительности (ОТО)*, *Специальная теория относительности (СТО)*

Отрицательная кривизна, 241, *242*, 242-3, 290

Отрицательное давление, 277-8, 520n

Переохлажденное поле Хиггса и О.Д., 280-6

Очарованные (charm) кварки, 346, *347*

Память:

П. о прошлом против будущего, 144, 510n

Течение ощущений от одного момента к другому и П., 139-40, 505n

Энтропийные рассуждения и уверенность в П., 162-4, 165n, 169, 175

Параллельные вселенные, 205-6, 207-8, 456-8

Пар, переход между водой и П., 252, 253, 263, 264

Паули, Вольфганг (Pauli, Wolfgang), 103, 106, 517n

Пензиас, Айно (Penzias, Aino), 515n

Пенроуз, Роджер (Penrose, Roger), 13, 170

Перекидные книжки, пространственно-временные сечения и П.К., 53-8, *54*, *57*, 68

Переохлаждение, 281

Перес, Ашер (Peres, Asher), 442-6

Перлмуттер, Саул (Perlmutter, Saul), 299, 300

Петлевая квантовая гравитация, 351n, 486, 489-91, 527n, 536n

Пионы, 267

Пища как низкоэнтропийный источник энергии, 170-1

Планеты, 19, 173, 174

Гравитационные поля П., 255, 278

Формирование П., 305

Планк, Макс (Planck, Max), 78

Планка время:

Квантовые флуктуации на масштабах времен меньше, чем П.В., 333-4, 473-4

Концепция времени на масштабах меньше, чем П.В., 350-1, 374

Планка длина, 491, 528n

Дополнительные пространственные измерения и П.Д., 363-5, 401-2, 423-4, 528n

Квантовые флуктуации на масштабах длин меньше, чем П.Д., 333, 334, 349-50, 473-4

Концепция пространства на масштабах меньше, чем П.Д., 350-1, 374

Планка масса, свойства частиц в теории струн и П.М., 357, 358, 402, 528n

Планка квадрат, 480

Планк, спутник (*Planck satellite*), 430, 431

Платон (Plato), 29, 482

559 к оглавлению

Плоское пространство:

Бесконечное П.П., *239*, 239-40, 241, 243, 248-50, *249*

Конечное П.П., см. *Двумерный тор*

Критическая плотность и П.П., 290-4, 434, 523n

Циклическая космология и П.П., *406*, 406-12, *408*

Плоскостности проблема, 290-4

Повседневный опыт:

П.О. и попытки связать опыт классической физики с квантовой механикой, 199-216

Попытки объяснения П.О. как цель физики, 12-13

Подольский Борис (Podolsky, Boris), ЭПР парадокс и П., 99-115, см. также *ЭПР парадокс*

Подход суммирования по историям, 179-84, 185n

Проблема квантового измерения и П.С.И., 183-4

Размер объекта и П.С.И., 183

Эксперимент с лучевым разветвителем и П.С.И., 180-1, *181*, 182

Положительная кривизна, 241, *242*, 242-3, 290

Положительное давление, 277

Поля и полевая теория, 40-2, 64, 254-6, 517n-518n, 526n

Вакуумные флуктуации и П.Т., *331*, 331-2, 468, 534n

Квантовая неопределенность и П.Т., 306, 329-30, 333, 468, 520n-521n, 526n

Релятивистская квантовая теория поля и П.Т., 500n-50ln, 502n

Температура и П.Т., 256-9

См. также специальные виды полей

Поля материи, 256, 517n

Понижающие преобразователи, 194

Пончик (бублик), форма тора и П., 517n

Полшински Джо (Polchinski, Joe), 388-91

Поляризация, 432

Принцип исключения, 517n

"*Принципы математики*" (Ньютон), 8, 45-6, 64

"*Принципы философии*" (Декарт), 25

Причина и следствие, пространственно-временные сечения и П.С., 497n-498n

Проблема квантового измерения, 119-20, 183-4, 201-16, 335, 455-6, 502n, 512n-514n

Декогерентность и П.К.И., 208-13, 514n

Многомировой подход и П.К.И., 205-6, 207-8, 213, 452, 456-8, 513n

Модификация Жирарди-Римини-Вебера уравнения Шредингера и П.К.И., 206-7, 208, 214, 215

Повседневный опыт и П.К.И., 202-3

Подход Бома к П.К.И., 206, 208, 213-14, 512n-514n

Подход волновой функции как знания и П.К.И., 205, 207, 213

Размер объекта и П.К.И., 203, 207, 210

Стрела времени и П.К.И., 203-4, 213-16

См. также *Шредингера уравнение*

Происхождение вселенной, см. *Большой взрыв*; *Инфляционная космология*; *Циклическая космология*

Пространства Калаби-Яу, *369*, 369-70, 371-3, 386

Геометрическая дуальность и П.К.Я., 476

Циклическая космология и П.К.Я., 407, 410

Пространственная Антенна на Лазерном Интерферометре (*Laser Interferometer Space Antenna* – LISA), 423n

Пространственно-временные диаграммы, 504n-505n

Пространственный Телескоп Хаббла (*Hubble Space Telescope*), 229

Пространство, 23-123

Абсолютное П., см. *Абсолютное пространство*

Бесконечность и П., 248-50, *249*

Верхняя граница энропии, которая может существовать в области П., 477-81

Вращательная симметрия и ориентация в П., 223, 514n

Гравитация, связанная с размерностями П., 394-7, *396*, *397*

Дополнительные измерения П., 18-19, 359-74, *365*, *367*, *369*, 382-4, 391, 392-400, 423-6, 428, 475, 528n-529n

560 к оглавлению

Пространство (продолжение):

Значение слова П., 29-30

Измерение П., 45

Квантовые скачки и П., 307-8, 333-5, *334*, 349-50, 472-4

Концепция локальности и П., 79-84; см. также *Локальность*, *Нелокальность*

Концепция П. Маха, 33-8, 416-18, 420, 460

Концепция П. Ньютона, см. *Абсолютное пространство*

Края или границы П., 239-41, 243

Отсутствие в П. выделенного направления, 129

П. в классической физике против квантовой механики, 79-80

П., заполненное духовной субстанцией, 29, 43

П., заполненное океаном Хиггса, 260-3

Перепутывание времени и П., 39; см. также *Пространство-время*

П. на масштабах меньше масштаба Планка, 350-1, 374

Положение вселенной в П., 30

Пустое П., см. Ничто

Путешествие сквозь П., 437-48; см. также *Телепортация*

Разрывы в П., 467

Релятивистское П., 9-10, 24-9, 46-50, 230-1; см. также *Общая теория относительности (ОТО)*, *Специальная теория относительности (СТО)*

Реляционистская позиция и П., 30-1, 37

Сводка взглядов на природу П., *62*

Складки в П., 307-8, 315

Трансляционная симметрия и положение в П., 221-3, 225, 514n

Форма П., см. *Форма вселенной*

Пространство-время:

Абсолютное П.В., см. *Абсолютное пространство-время*

Геометрическая дуальность и П.В., 474-7

Голографический принцип и П.В., 481-5

Гравитационные волны и П.В., *419*, 419-23

Движение со скоростью света и П.В., 58, 497n

Деформации и искривления в ткани П.В., 68-72, 73-4, 95, 333, 418-20, 419, 531n

Дополнительные измерения П.В., требуемые теорией струн, 18-19, 359, 366-8, 370-4, 382-4, 391, 392-400, 423-6, 475, 528n-529n

Интуитивное понятие "движения" через П.В., 505n-506n

Квантовое усреднение и П.В., 472-4

Концепция настоящего и П.В., 131-9, *135*, *136*, 504n-505n

Космологическая эволюция и П.В., 243-8, *244-7*

Метафора батона хлеба для П.В., 58-9, *59*, 68, 133-4

Метафора дизайна улиц/аллей и П.В., 51-2, *52*, *53*, 54, 56, 58, 59-60, *60*

Метафора перекидной книжки и П.В., 53-8, *54*, *57*, 68

Относительность одновременности и П.В., 55-8

П.В. в отсутствие материи или энергии, 69, *70*, 74

П.В. в ультрамикроскопической области теории струн, 350-1, 374

П.В. как все пространство на протяжении всего времени, *130*, 130-2, 138-9, *139*, 226

П.В. как иллюзия против фундаментальной концепции, 471-85

П.В. на больших расстояниях в пространстве, 134-9, *135*, *136*, 504n-505n

П.В., рассматриваемое Эйнштейном как нечто сущее, 39, 75, 499n

П.В. с "внешней" точки зрения, *130*, 130-1, 144

Причина и следствие и П.В., 497n-498n

Путешествие во времени и П.В., 451-5

Рассуждения о будущем П.В., 470-93

Сводка взглядов на природу П.В., *62*

Сечения батона и П.В., см. *Пространство-время, метафора батона хлеба для П.В.*

Составляющие П.В., 485-91

Сценарий мира на бране и П.В., 386-412

Траектории через П.В., 60-1, *61*, 69, 497n

Ускорение и П.В., 68-9, 70

Цельность блока П.В., 58-9

561 к оглавлению

Пространство-время (продолжение):

Четырехмерная кривизна П.В., 517n

Четырехмерность П.В., 360

Протоны, 17, 90, 267, 278, 300-1, 425, 429, 432

Происхождение массы, 261-3

Распад П., 267-8

Составляющие П., см. *Кварки*

Прошлое:

Воздействия будущих событий на П., 186-91, 198-9

Память о П., 144, 510n

П. в квантовом контексте, 177-99

П. в классической физике против квантовой физики, 178-9, 181-2, 190

Повседневный опыт и П., 128-9

Подход суммирования по историям и П., 179-84, 185n

П., определяемое как время перед наблюдением или измерением, 178-9, 202

Путешествие во времени в П., 449-60

Симметрия по отношению к обращению времени и П., 145-50

Стирание воздействия П., 191-9

Стрела времени и П., 144

Энтропия и П., 159-62

Психологическая стрела времени, 510n, 511n

Пфистер, Герберт (Pfister, Herbert), 417, 418

Пузырьковое зародышеобразование, 521n

Пульсары, 531n

Путешествие во времени, 437-8, 448-69

Возможность П.В., 458-60, 469

Кажущиеся парадоксы П.В., 449-60, 469

Многомировой подход и П.В., 452, 456-8

Описание времени в пространственно-временном батоне и П.В., 451-5

Свобода воли и П.В., 455-7

СТО и П.В., 448-9, 463-5, 533n-534n

Червоточины и П.В., 460-8, *461*, *463*, *466*, 469, 534n

Пью, Жорж (Pugh, Goerge), 418

Радиация, 9, 78

Происхождение массы/энергии и Р., 310-13

См. также *Космическая микроволновая фоновая радиация*

Радиоактивный распад, 255, 265

Рамон, Пьер (Ramond, Pierre), 355

Размер, см. *Масштаб*

Расширение вселенной, 251, 254, 510n, 511n, 515n-516n, 524n

Движение с превосходящей свет скоростью и Р.В., 237

Обнаружение Р.В. Хабблом, 229-33, 279

Описание пространственно временного блока Р.В., 243-5, *244*

ОТО и Р.В., 229-33, 515n

Параметр торможения и Р.В., 297-301

Притягивательная гравитация и Р.В., 230, 288-9

Сила, отвечающая за Р.В., 272-87, 302

Симметрия и Р.В., 229-38

СТО и Р.В., 234, 235, 237

Ускоренное расширение и Р.В., 411-12, 435

Фактор расширения и Р.В., 284-5

Часы, движущиеся через пространство, и Р.В., 233-6, *234*, 516n

См. также *Инфляционная космология*

562 к оглавлению

Расширяющаяся вселенная, модель воздушного шара для Р.В., 238-9, 516n

Время и Р.В., 233-6, *234*

Двумерность Р.В., 236

Неизменность размера объекта в Р.В., 237-8

Симметрия и Р.В., 231-3, *232*

Трехмерная версия Р.В., 236n, 239

Реальность:

Воображаемый образ стоп-кадра "прямо сейчас" как Р., 132-3, 138-9

Все события в пространстве-времени, очерчиваемые Р., 138-9

Единая Р., 15-19; см. также *М-теория*; *Объединение*; *Суперструн теория*

Квантовая Р., 10-12; см. также *Квантовая механика*

Классическая Р., 7-9, 329-30; см. также *Классическая физика*

Космологическая Р., 12-14; см. также *Большой взрыв*; *Инфляционная космология*

Научный прогресс и Р., 3-5

Релятивистская Р., 9-10, 133-9; см. также *Общая теория относительности (ОТО)*; *Специальная теория относительности (СТО)*; *Сценарий мира на бране*;*Циклическая космология*

Человеческий опыт как вводящий в заблуждение в Р., 5, 19

Релятивистская квантовая теория поля, 500n-50ln, 502n

Реляционистская позиция, 30-1, 37, 72-4, 75

Риман, Георг Бернхардт (Riemann, Georg Bernhard), 68, 416

Римини, Альберто (Rimini, Alberto), 206-7, 208, 214

Розен, Натан (Rosen, Nathan), ЭПР парадокс и Р., 99-115, см. также *ЭПР парадокс*

Рубин, Вера (Rubin, Vera), 295

Рэндалл, Лиза (Randall, Lisa), 400n

Салам, Абдус (Salam, Abdus), 264-6, 328

Сасскайнд, Леонард (Susskind, Leonard), 340, 482, 488-9

Сато, Катсушико (Sato, Katsuhiko), 520n

Сверхновые, 171, 425

Гравитационные волны и С., 419, 421, 422

Космологическая константа и С., 300, 301, 409, 434-5, 523n, 526n-527n

Роль стандартных свечей, играемая С., 298-9

Свет, 9, 40, 265, 496n

Волновое движение и С., 84, *85*, 85-6, *86*

Корпускулярные свойства С., 85-6, 90

Отражение С. от измеряемого объекта, 96-7

Путешествие С. во вселенной с ускоренным расширением, 237, 516n

С. как электромагнитная волна, 42, 44-5

Скорость С., см. *Скорость света*

Сценарий мира на бране и С., 392-4, *393*

Требуемое время на достижение Земли из пространства и С., 244, *245*, 245-6

Частицы С., см. *Фотоны*

Эфир и С., 43-5, 50, 268

Светоносный эфир, см. *Эфир*

Свобода воли, путешествия во времени и С.В., 455-7

Свободная энергия, 509n

Свободное падение, 66, 67-8, 73-4, 498n

Седло как возможная форма вселенной, 241, 248, 434

Сен, Ашоке (Sen, Ashoke), 378

Силовые поля, 40-2, 254-6, 517n, 526n

См. также *Поля и полевая теория*

Сильное ядерное взаимодействие, 225, 255-6, 262, 332, 348

Бета-функция Эйлера и С.Я.В., 339-40

Теория великого объединения и С.Я.В., 266-8, 328, 329, 519n, 526n

Теория струн и С.Я.В., 339-42, 394

Частицы С.Я.В., см. *Глюоны*

Симметрия, 219-50

Взаимодействие между теплотой и С., 250, 251-4

Вращательная С., 223, 253, 514n

Время и С., 220, 225-9

563 к оглавлению

Симметрия (продолжение):

Движение и С., 223-4, 225

Калибровочная С., 265, 267

Расширение вселенной и С., 229-38

С. в первую долю секунды после Большого взрыва, 251

С., лежащая в основании известных законов физики, 221-5, 250

С. объектов в пространстве, 220-1, *221*

Спонтанное нарушение симметрии и С., 260

Трансляционная С., 221-3, 225, 514n

Теория великого объединения и С., 266-8, 328, 329, 519n, 526n

Уменьшение в С., возникающее при формировании Хиггсова океана, 264-6, 269

Фазовые переходы и С., 253-4, 264

Форма вселенной и С., 238-43, 248-50, 528n-529n

Фундаментальные составляющие и С., 385, 529n

Электрослабые силы и С., 264-6, 267, 268, 328, 329, 518n-519n

См. также *Симметрия по отношению к обращению времени*

Симметрия по отношению к обращению времени, 145-50, 200, 495n

Математическое выражение С.О.В., 506n-507n

Межпланетное движение теннисного мяча и С.О.В., 146-9, *147*

Проблема простоты против сложности и С.О.В., 150-1, 158

Расплескивающееся яйцо и С.О.В., 149-50, 507n

С.О.В. в противоположность повседневному опыту, 145-6, 150

Энтропия и С.О.В., 159-69, *161*, 175, 214-16

Системное увлечение, 416-18, *417*, 531n

де Ситтер, Виллем (de Sitter, Willem), 231, 280

Скалли, Мариан (Scully, Marian), 192-3

Складки в пространстве, 307-8, 315

Скорость:

Измерение С., 45

Обращение С., 146-50, *147*

Относительность и С., 24-9, 31-8, 44-50

См. также *Движение с постоянной скоростью*; *Скорость света*; *Ускорение*

Скорость звука, 43

Скорость света:

Движение быстрее С.С., 237

Измерение С.С., 43-4, 46, 496n

Объединенное движение через пространство и время и С.С., 49-50

Остановка времени при С.С., 49, 496n-497n

Постоянство С.С., 45, 47

Пространственно-временные сечения и С.С., 58, 497n

Светоносный эфир и С.С., 43-5, 50

Система отсчета для С.С., 42-5

Скорость передачи гравитации и С.С., 63-4, 72

С.С. как самая быстрая, с которой что-либо может путешествовать, 49-50, 63, 116-18, 502n, 503n

СТО и С.С., 45-50, 63, 116-18, 223-4, 237, 376, 496n-497n, 502n, 503n

Уравнения Максвелла для С.С., 42-3, 44-5

Скрытые переменные, 106, 112, 121, 206, 500n, 514n

Слабое ядерное взаимодействие (слабые ядерные силы), 225, 255-6, 332, 348, 394, 495n, 507n

Симметрия между электромагнитным взаимодействием и С.Я.В., 264-6, 267, 268, 328, 329, 518n-519n

Теория великого объединения и С.Я.В., 266-8, 328, 329, 519n, 526n

Частицы С.Я.В., см. *Частицы W и Z*

Смит, Синклер (Smith, Sinclair), 295

Солнце, 171, 235, 405

Гравитационное поле С., 255

Деформация пространства-времени от С., 69, 71

Отклонение звездного света и С., 273-4

564 к оглавлению

Сольвеевская конференция, 93-5

ван Стокум В. Д. (van Stockum, W.J.), 459-60

Спаарней, Маркус (Spaarnay, Marcus), 332

Специальная теория относительности (СТО), 9-10, 44-63, *62*, 75, 200, 376, 496n-498n

Абсолютное пространство-время в СТО, 51-61, 67

Абсолютное пространство, отвергнутое СТО, 46-7, 50-1

Барьер скорости света и СТО, 49-50, 63, 116-18, 502n, 503n

Ведро с вращающейся водой и СТО, 50-1, 59-61, 62, 132, 497n

Движение с постоянной скоростью как предмет СТО, 51, 65

Детерминистическая точка зрения СТО, 78-9

Запутывание и СТО, 115-20, 502n

Игнорирование гравитации в СТО, 62-3, 64, 74

Концепция настоящего и СТО, 132, 133-9, 504n-505n

Лоренц-инвариантная система взглядов и СТО, 502n

Метафора батона хлеба для пространства-времени и СТО, 58-9, *59*, 68

Объединенное движение через пространство и время и СТО, 49-50

Относительность пространства и времени, устанавливаемая в СТО, 44-50

Парадокс близнецов и СТО, 533n-534n

Повседневный опыт и СТО, 47, 77, 78

Пространственно-временные диаграммы и СТО, 504n-505n

Путешествие во времени в будущее и СТО, 448-9, 463-5, 533n-534n

Разница интуитивного ощущения времени и СТО, 128, 130-2

Расширение вселенной и СТО, 234, 235, 237

Симметрия, лежащая в основании законов физики, и СТО, 223-4, 225

Траектории через пространство-время и СТО, 60-1, *61*

Трения между квантовой механикой и СТО, 335-6

Хиггсов океан и СТО, 269

Часы, движущиеся через пространство, и СТО, 50, 55, 234, 235

Спин, 354-5

Квантовое запутывание и С., 104-13, 115-23, 501n, 502n-503n

Открытие Белла и С., 104-5, 106-11, 112-13

Спонтанное нарушение симметрии, 260

Старобинский, Алексей (Starobinsky, Alexei), 520n

Стейнберг, Эфраим (Steinberg, Aephraim), 193

Стейнхардт, Пол (Steinhardt, Paul), 283, 285, 431, 521n

Странные (strange) кварки, 346, *347*

Стрела времени, 12, 143-76, 410, 495n, 506n, 510n-511n

Большой взрыв и С.В., 13-14, 15, 143, 171-6, 227, 273

Второй закон термодинамики и С.В., 156-9

Инфляционная космология и С.В., 273, 314-22, 525n-526n

Квантовая механика и С.В., 200-16

Коллапс волновой функции и С.В., 202-16

Отсутствие физического объяснения для С.В., 144-5, 160

Повседневные ощущения С.В., 13, 128-9, 143-4, 158-9

Проблема квантового измерения и С.В., 203-4, 213-16

Симметрия по отношению к обращению времени и С.В., 145-50, 159-69

Строминджер, Эндрю (Strominger, Andrew), 373, 386, 536n

Струн теория, см. *Суперструн теория*

Сундрум, Раман (Sundrum, Raman), 400n

Суперсимметричные частицы, 427-8, 433

Суперсимметрия, 355

Обнаружение доказательств С., 427-8

Суперструн теория, 17-19, 268, 323, 338-412, 472, 486

Аномалии и С.Т., 343, 355

Браны, добавляемые к струнам в С.Т., 384-6

Геометрическая дуальность и С.Т., 474-7

Голографический принцип и С.Т., 483-5

565 к оглавлению

Суперструн теория (продолжение):

Длина струны и С.Т., 356-7, 386-8, 400-2, 428, 528n

Дополнительные измерения пространства-времени, требуемые С.Т., 18-19, 359, 366-8, 370-4, 382-4, 391, 392-400, 423-6, 475, 528n-529n

Калаби-Яу пространства и С.Т., *369*, 369-70, 371-3, 386, 476

Калуцы-Кляйна теория и С.Т., 360-6, *365*, 367

Квантовомеханическое описание гравитации и С.Т., 341-3, 348-50, 358-9, 489-90

Колебательные моды и С.Т., 346-7, 354-60, *357*, 370-3, 386-7, 394, 428, 528n

Космология и С.Т., 20, 403-12, *406*, *408*; см. также *Циклическая космология*

Конечные точки открытых струн и С.Т., 388-91, *390*, 392, 394

Концепции пространства и времени и С.Т., 350-1, 374

Мета-объединение С.Т., 378-82, *380*; см. также *М-теория*

Независимые от фона формулировки С.Т., 487-8, 491

Открытие С.Т., 338-44

Отсутствие центрального принципа в С.Т., 376-7

Петлевая квантовая гравитация и С.Т., 489-91, 536n

Приблизительные уравнения в С.Т., 371n, 372, 380-4, 385-6

Подтверждение суперсимметрии и С.Т., 427-8

Происхождение названия С.Т., 355

Прямое наблюдение струн и С.Т., 352

Пять отдельный версий С.Т., 377-9, 380, 474-7

Свойства частиц и С.Т., 17-18, 345, 346-8, 353-60, 371-4, 394, 402-3, 427-8, 528n

Составляющие пространства и С.Т., 486-9

С.Т. и раскол между ОТО и квантовой механикой, 348-50

Существенные утверждения С.Т., 344-5

Сценарий мира на бране и С.Т., 386-412; см. также *Сценарий мира на бране*

Т-дуальность и С.Т., 530n

Фундаментальные составляющие С.Т., 344-8, 384-6, 388-91, 529n-530n

Частицы-переносчики и С.Т., 347-8, *348*

Экспериментальные данные и С.Т., 356-9, 371, 378, 402-3, 423-8, 433, 527n-528n

0-браны и С.Т., 488-9

Сфера:

Симметрия С., 220

С. как форма вселенной, 238-9, 241, 248, 406, 434

Сценарий мира на бране, 386-412, 482n, 488

Дополнительные пространственные измерения и С.М.Б., 392-4, 398-400, 428

Концы открытых струн и С.М.Б., 388-91, *390*, 392, 394

Космология и С.М.Б., 403-12, *406*, *408*; см. также *Циклическая космология*

Размер дополнительных измерений и С.М.Б., 394-400, 401, 402

Размер струн и С.М.Б., 400-2

Фотоны и С.М.Б., 392-4, *393*

Экспериментальная проверка С.М.Б., 402-3, 424, 428

0-браны и С.М.Б., 488-9

Тау-нейтрино, 346, *347*

Таунсенд, Пол (Townsend, Paul), 378, 384

Тау-частицы, 346, *347*

Тахионы, 502n

Таяние кубиков льда в стакане воды, 144

Практическое удобство вероятностных рассуждений и таяние кубика льда, 177-8

Энтропия и таяние кубика льда, 158, 161-6, *166*, 169, 174-5, 176, 509n, 510n

Т-дуальность, 530

Тейлор, Джозеф (Taylor, Joseph), 531n

Телепортация, 437-48, 532n-533n

Запутывание и Т., 442-8, *447*

Коллапс волновой функции и Т., 438-9

Соотношение между копией и оригиналом и Т., 438, 439-41, 445

Т. большого собрания частиц, 440-1, 446-8, *447*

Темная энергия, 432, 434-5, 530n

Использование термина Т.Э., 275, 523n-524n

Состав вселенной и Т.Э., 300-1

Циклическая космология и Т.Э., 411-12

См. также *Космологическая константа*

Темная материя, 294-6, *296*, 300, 301, 530n

Поиски Т.М., 432-4, 532n

Температура:

Вариации в Т. космического микроволнового фонового излучения, 308-10, *309*, 429-32, *430*

Горизонта проблема и Т., 287-90, 522n-523n

Кинетическая энергия и Т., 276, 277

Однородность Т. по пространству, 287-90

Отклик поля на Т., 256-9

Т. вселенной, 250, 251, 252, 254, 280-1, 287-90

См. также *Теплота*

Теплота:

Взаимозависимость между симметрией и Т., 250, 251-4

Вычисления энтропии и Т., 170, 172-3, 254n

Гравитационная сила и Т., 276, 277

Фазовые переходы и Т., 252-4

Термодинамическая стрела времени и Т., 510n, 511n

См. также *Температура*

Термодинамическая стрела времени, 510n, 511n

Термодинамика, 151

См. также *Энтропия*; *Второй закон термодинамики*

Тиринг, Ханс (Thirring, Hans), 416

Типлер, Франк (Tipler, Frank), 460

Толмен, Ричард (Tolman, Richard), 405-6

Томе, Кип (Thome, Kip), 460, 461, 462, 467

Томпсон, Рэндалл (Thompson, Randall), 113

Торможения параметр, 297-301

Траектории, 183, 531n

Движение через деформированное пространство и искривленные Т., 69

Обращение движения и Т., 146-9

Т. через пространство-время, 60-1, *61*, 497n

Трансляционная симметрия или трансляционная инвариантность, 221-3, 225, 514n

Трехмерная сфера (3-сфера), 236n, 239

Трехмерный тор, 240, 241, 517n

Туе, Генри (Tye, Henry), 280, 281, 284, 520n

Турок , Нейл (Turok, Neil), 406-12, 431

Уилер, Джон (Wheeler, John), 186, 187-9, 226, 462, 467, 534n

Уилера-ДеВитта уравнение, 527n

Ускорение, 146, 261, 416

Абсолютное пространство-время как система отсчета для У., 51-61, 75, 132

Абсолютное пространство как система отсчета для У., 27-8, 31, 32-8, 75

Движение в свободном падении и У., 66, 67-8, 73-4, 498n

Материя в пространстве и У., 34-8

Метафора с пространственно-временным батоном и У., 68-9, *70*

Ощущения У., 25, 28, 33-7, 65

Рассуждения Маха и У., 33-8

Симметрия среди всех точек отсчета и У., 224, 225

Траектория через пространство-время и У., 60-l, *61*, 497n

Хиггсов океан и сопротивление У., 261-3, 518n

Эквивалентность гравитации и У., 64-8, 69, 224, 376, 518n

Ускорители, 19, 269, 339, 340, 352-3, 358, 402-3, 424-8, 433, 493, 532n

Ускорители частиц, см. *Ускорители*

Фазовая информация, голография и Ф.И., 535n-536n

Фазовые переходы:

Космологические Ф.П., см. *Космологические фазовые переходы*

Симметрия и Ф.П., 253-4

Ф.П. воды, 252-4, 263, 264

Фазовое пространство, 508n-509n

Фарадей, Майкл (Faraday, Michael), 40-1, 64

Фархи, Эдди (Farhi, Eddie), 313n

Фейнман, Ричард (Feynman, Richard), 21, 219, 224

Подход суммирования по историям и Ф., 179-84, 185n

Фенг, Джонатан (Feng, Jonathan), 424, 425

Фермилаб (Национальная ускорительная лаборатория им. Ферми, Батавия, Иллинойс), 426, 427-8

Фишлер, Вилли (Fischler, Willy), 488-9

Форд, Кент (Ford, Kent), 295

Форма вселенной, 14, 15, 314-15, 434

Бесконечное плоское пространство и Ф.В., *239*, 239-40, 241, 243, 248-50, *249*

Двумерный тор (конечное плоское пространство или форма экрана видеоигры ) и Ф.В., *240*, 240-1, 243-8, 244-7, 434, 517n

Мера кривизны и Ф.В., 5l6n-5l7n

Однородная кривизна и Ф.В., 314-15

ОТО и Ф.В., 242-3, 290-1

Плоскостности проблема и Ф.В., 290-4

Плотность массы/энергии и Ф.В., 242-3, 290-4, 434, 523n

Седло и Ф.В., 241, 248, 434

Симметрия и Ф.В., 238-43, 248-50, 528n-529n

Сфера и Ф.В., 238-9, 241, 248, 406, 434

Три типа кривизны и Ф.В., 241, 242, 517n

Уравнения Эйнштейна для кривизны и Ф.В., 242-3

Циклическая космология и Ф.В., *406*, 406-12, *408*

Форма экрана видеоигры, см. *Двумерный тор*

Фотино, 427, 433, 532n

Фотоны, 347, 354, 433, 518n

"Вневременная" (или "без времени") точка зрения Ф., 497n

Декогерентность и Ф., 209-10

Информация выбора пути и Ф., *187*, 187-91, *190*

Квантовое запутывание и Ф., 113, 115-19, 122-3

Корпускулярные и волновые свойства Ф., 90, 501n

Красное смещение Ф., 312n

Микроволновые Ф., поляризация микроволновых Ф., 432

Микроволновые Ф., температурные вариации микроволновых Ф., 308-10, 429

Подход сумм по историям и Ф., 180-1, *181*, 182

Симметрия между W и Z частицами и Ф., 265-6, 518n-519n

Сценарий мира на бране и Ф., 392-4, *393*

Телепортация Ф., 442-6

Теория великого объединения и Ф., 267

Ф. как частицы без массы, 263, 265

Фотоэлектрический эффект и Ф., 501n

Эксперимент с квантовым ластиком и Ф., 192-4, *193*

Эксперимент с квантовым ластиком с отложенным выбором и Ф., 194-9, *196*

Эксперименты с лучевыми разветвителями с Ф., 180-1, *181*, 182, 184-5, *187*, 187-91, *190*, 194-9, *196*

Электромагнитные поля и Ф., 254-5

Фотосинтез, 171

Фотоэлектрический эффект, 501n

Фрай, Эвард (Fry, Edward), 113

Фридман, Александр (Friedmann, Alexander), 230, 274, 280

Фридман, Стюарт (Freedman, Stuart), 113

Фуллер, Роберт (Fuller, Robert), 467

Хаббл, Эдвин (Hubble, Edwin), обнаружение расширения вселенной Хабблом, 229-33, 279

Халл, Крис (Hull, Chris), 378, 384

Халсе, Руссел (Hulse, Russell), 531n

Хаотическая инфляция, 522n

Хартли, Джим (Hartle, Jim), 212

Хафеле, Джозеф (Hafele, Joseph), 50

Хесс ,Виктор (Hess, Victor), 424

Хиггс, Петер (Higgs, Peter), 256

Хиггса частицы, 269, 352, 355-6, 427, 433

Хиггсино, 433, 532n

Хиггсов океан (величина ненулевого вакуумного среднего Хиггсова поля), 257-66, 391-2

Метафора патоки для Х.О., 261, 262

Ничто и Х.О., 260, 268, 269-70, 330

Понятие эфира и Х.О., 268-9

Происхождение массы и Х.О., 260-3, 518n

Свойства частиц в теории струн и Х.О., 373-4

Уменьшение симметрии, возникающее из Х.О., 264-6, 269

Формирование Х.О., 257-60, 263-6, 267

Экспериментальное подтверждение Х.О., 269

Хиггсовы поля, 254, 256-68, 330n, 518n, 526n

Аналогия с лягушкой для Х.П., 257-9, *258*, 281, 282-3

Великое объединение и Х.П., 266-8, 522n

Космологическая константа и Х.П., 275, 281-4, 520n

Преобразования энергии и Х.П., 257-60, *258*, 280-6, 52ln-522n

Расширение вселенной и Х.П., 280-6

Спонтанное нарушение симметрии и Х.П., 260

Х.П., конденсированное к ненулевой величине, 257-60, 263-6, 267, 280-1, 282-3, 518n

Электрослабое Х.П., 264-6, 267, 522n

См. также *Инфлатона поле*

Хокинг, Стивен (Hawking, Stephen), 403, 468, 479-81, 536n

т"Хоофт, Герард (Hooft, Gerard t'), 482

Хорава, Петр (Horava, Petr), 389, 406-7

Хоури, Джастин (Khoury, Justin), 406

Цвикки, Фриц (Zwicky, Fritz), 294-5

Центр Европейских Ядерных Исследований (*Centre Europeene pour la Recherche Nuclaire* – CERN), 269, 402-3

Циклическая космология, 404-12, *406*, *408*, 530n-531n

Время нуль и Ц.К., 410, 411

Инфляционная модель и Ц.К, 408-10, 530n

Краткая оценка Ц.К., 410-12

Стейнхарда и Турока модель для Ц.К., *406*, 406-12, *408*

Температурные вариации в космическом микроволновом фоновом излучении и Ц.К., 431

Толмена модель Ц.К., 405-6

Ускоренное расширение и Ц.К., 411-12

Цурек, Войцех (Zurek, Wojciech), 209

Частицы:

Античастицы и Ч., 528n

Безмассовость Ч. перед формированием Хиггсова океана, 264-5

Волноподобные и корпускулярные аспекты Ч., 185, 188-91, 192-3, 512n

Частицы (продолжение):

Запутывание Ч., 80-4, 105-23; см. также *Запутывание*

Корпускулярно-волновое единство и Ч., 90

Массы Ч., *147*, 354, 356-8, 373-4, 402-3, 528n

Пионы, 267

Происхождение масс Ч., 261-3

Разновидности Ч., 346, 347, 353

Семейства Ч., 346, *347*, 353, 359, 373

Спин Ч., см. *Спин*

Стандартная модель Ч., 344-6, *345*, *347*, 352-3, 384

Суперсимметрия Ч., 427-8, 433

Теория великого объединения и Ч., 266-8, 519n

Теория поля и Ч., 256, 518n

Теория струн и Ч., 17-18, 345, 346-8, 353-60, 371-4, 394, 402-3, 427-8, 528n

Ч. в космических лучах, 424-5, 531n-532n

Ч.-переносчики, 347-8, *348*, 355

Ч., "сопровождаемые" вероятностными волнами, 206, 208, 214, 512n

Ч. той же разновидности, идентичность свойств Ч., 439-40

Электрический заряд Ч., 354

Ядерные процессы и Ч., 353

См. также *Гравитоны*; *Протоны*; *Кварки*; *Фотоны*; *Электроны*; *Частицы W и Z*

Частицы-переносчики, 347-8, *348*, 355

Частицы W и Z, 256, *347*, 394, 433

Масса W и Z частиц, 264, 265

Симметрия между фотонами и W и Z частицами, 265-6, 518n-519n

Теория великого объединения и W и Z частицы, 267

Экспериментальное открытие W и Z частиц, 266

Часы, двигающиеся через пространство:

Расширение вселенной и Ч.Д.П., 233-6, *234*, 516n

СТО и Ч.Д.П., 50, 55, 234, 235

Червоточины, 460-8, *461*, *463*, *466*, 469, 534n

Черные дыры, 17, 19, 227, 422, 528n

Гравитационное притяжение Ч.Д., 173, 424, 425, 516n

Микроскопические Ч.Д., 403, 424-5

Пространство-время, деформированное Ч.Д., 516n

Сценарий мира на бране и Ч.Д., 403

Ч.Д. и раскол между ОТО и квантовой механикой, 337, 338, 527n

Энтропия и Ч.Д., 173, 477-81, 490, 510n, 525n, 536n

Чиао, Раймонд (Chiao, Raymond), 193

Чибисов, Геннадий (Chibisov, Gennady), 520n

Шапере, Альфред (Shapere, Alfred), 424, 425

Шварц, Джон (Schwarz, John), 340-4, 347-8, 355, 356, 378, 384-5

Шенкер, Стивен (Shenker, Stephen), 488-9

Шерк, Джоэль (Scherk, Joel), 341-2, 347-8, 355, 356, 384-5

Шифф, Леонард (Schiff, Leonard), 418

Шмидт, Брайан (Schmidt, Brian), 299, 300

Шредингер, Эрвин (Schrodinger, Erwin), 88, 200

Шредингера уравнение, 200-1, 202, 203, 213-14, 455-6, 512n

Декогерентность и Ш.У., 209-10

Жирарди-Римини-Вебера модификация Ш.У., 206-7, 208, 214, 215

Разворачивание явлений в два особых этапа и Ш.У., 200-1

Шредингеровский кот, 211

Эверетт, Хью (Everett, Hugh), 205

Эверитт, Френсис (Everitt, Francis), 418

Эволюция, 77, 168

Эддингтон, сэр Артур (Eddington, Sir Arthur), 13

Эйлер, Леонард (Euler, Leonhard), 339

Эйлера бета-функция, 339-40

Эйнштейн, Альберт (Einstein, Albert), 6, 9-10, 12, 14, 19, 21, 39-40, 44-76, 62, 78, 186, 200, 214, 234, 255, 261, 338, 496n-497n, 501n

Аргументы Маха и Э., 33, 38, 62, 72-4, 416-18, 499n

Движение с превышением скорости света и Э., 237

Детерминистическая точка зрения Э., 78-9, 120-1

Интуитивное ощущение течения времени и Э., 130, 132, 139, 141

Космологическая константа и Э., 274-9, 281-4, 299-301, 519n, 520n, 526n

Кривизна пространства и Э., 242-3

Настоящего проблема и Э., 141

Общая теория относительности Э., 62-76, 273-4, 327, 328; см. также *Общая теория относительности (ОТО)*

Объединение как цель Э., 15-16, 18, 252, 329, 361, 366

Отталкивательная гравитация и Э., 272, 274-9, 519n-520n

Представления Э. о статической вселенной, 274-5, 279

Пространственные расзмерности и Э., 360-1

Путешествия во времени и Э., 448-9, 459, 460

Расширение вселенной и Э., 229-33, 280, 515n

Симметрия, лежащая в основании законов физики и Э., 223-4

Смысл пространства и Э., 29, 38

Соотношение энергии-массы и Э., 162, 354, 519n

Сопротивление квантовой механике со стороны Э., 11, 80, 83-4, 93-5, 99-102, 500n

Специальная теория относительности Э., 44-63; см. также *Специальная теория относительности (СТО)*

Уравнения Э., 15, 70-2, 230, 242-3, 354, 361, 498n, 515n, 517n, 519n

ЭПР парадокс и Э., 99-115; см. также *ЭПР парадокс*

Эйнштейна полевые уравнения, 70-2, 498n

Эквивалентности принцип, 67, 69, 224, 376, 518n

Экзотическая материя, 467, 534n

Эксперимент по Поляризации Космического Микроволнового Фона (*Cosmic Microwave Background Polarization experiment* – CMBPol), 432

Эксперимент по Темной Материи (*Dark Matter Experiment* – DAMA), 532n

Электричество, 40, 264, 265

См. также *Электромагнитное взаимодействие*

Электрические поля, взаимная связь между магнитными полями и Э.П., 40, 41-2, 496n

Электромагнитная стрела времени, 510n-511n

Электромагнитное взаимодействие, 9, 41-2, 200, 225, 238, 327, 328, 332, *348*, 429, 496n

Великого объединения теория и Э.М.В., 266-8, 328, 329, 519n, 526n

Объединение ОТО и Э.М.В., 329, 361, 366

Симметрия между слабым взаимодействием и Э.М.В., 264-6, 267, 268, 328, 329, 518n-519n

Сценарий мира на бране и Э.М.В., 392-4

Электромагнитные волны, свет как Э.М.В., 42, 44-5

Электромагнитные поля, 40, 41-2, 254-5, 361, 496n, 518n, 526n

Вакуумные флуктуации Э.М.П., *331*, 331-2, 534n

Электронное нейтрино, 346, *347*

Электронное поле, 256

Электроны, 17, 278, 300-1, 353, 355, 366, 429, 432, 518n

Вероятностные волны Э., 88-95, *89*

Взаимодействие с Э. во время измерения, 97

Взаимодействие Хиггсова океана с Э., 261-3

Волновые свойства Э., 86-8, *87*, *88*

Гипотеза размазанной сущности Э., 88

Интерференционная картина, производимая Э., 86-8, *87*, *88*, 91-2, 94, 179-80, 182, 184-5, см. также *Двухщелевой эксперимент*

Подход сумм по историям и Э., 179-80, 182

Полевая схема и Э., 256

Электроны (продолжение):

Происхождение массы Э., 261-3

Спин Э., 104

Стандартная модель и Э., 344-6, *345*, *347*

Теория струн и Э., 345, *345*, 346-7, 394

Фотоэлектрический эффект и Э., 501n

Электрослабая сила, 264-6, 267, 268, 328, 329, 518n-519n

Электрослабое Хиггсово поле, 264-6, 267, 522n

Энергия:

Взаимозаменяемость массы и Э., 262, 354, 519n

Гравитационное взаимодействие и Э., 276-7, 279

Деформации и искривления в пространстве-времени и Э., 418-20

Инфлатона поле (переохлажденное Хиггсово поле) и Э., 280-6, 521n-522n, 524n

Колебательные моды струны и Э., 354, 356-7, 385, 386-7, 528n

Космологическая константа и Э., 275, 278-9

Кривизна пространства и Э., 242-3

Ненулевая величина Хиггсова поля и Э., 259-60

Происхождение Э., 310-13

Размер начального кусочка Э., 313, 524n

Сохранение Э., 426, 532n

Существование жизни и Э., 170-1

См. также *Масса/энергия*

Энтропия, 151-76, 507n-510n, 534n-535n

Большой взрыв и Э., 171-6, 215, 227, 270-1, 273, 314-22, 511n

Вероятностный подход и Э., 153-6, 158-60, 176, 507n-508n, 511n

Вклады от всех источников в расчет Э., 172-3, 509n

Возможность будущих ограничений и Э., 510n

Второй закон термодинамики и Э., 154-5, 156-9, 164-5

Выделение тепла и Э., 170, 172-3, 254n

Высокая Э. против низкой, 152, 154, 155

Гравитация и Э., 171-4, 227, 314-17, 524n-525n

Инфляционная космология и Э., 314-22

Конфигурация вселенной и Э., 166-9, *167*, 175

Курицы и яйца история и Э., 170-1, 174

Низкая Э. как отклонение от нормы, 164-5

Определение Э., 154, 508n

Перегруппировки молекул и Э., 155-6, 508n-509n

Перегруппировки страниц *Войны и Мира* и Э., 152-60, 162, 167, 174, 215, 508n

Расплескивание яйца и Э., 158, 159-60, 162, 174, 215

Симметрия по отношению к обращению времени и Э., 159-69, *161*, 175, 214-16

Таяние кубиков льда в стакане воды и Э., 158, 161-6, *166*, 169, 174-5, 176, 509n, 510n

Углекислый газ в бутылке колы и Э., 155-7, 160, 167, 509n

Циклическая космология и Э., 405-6, 410, 530n

Черные дыры и Э., 173, 477-81, 490, 510n, 525n, 536n

Э. вселенной в течение времени, 167, *167*

ЭПР парадокс (парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена), 11, 99-115, 120-2, 199, 206, 50ln-502n

Метафора титановых ящиков и ЭПР, 107-10, 111

Неполное описание реальности как проблема в ЭПР, 99-103, 112

Открытие Белла и ЭПР, 103-4, 106-11, 112-13, 115n

Ошибочные аргументы в ЭПР, 113-14

Скрытые переменные и ЭПР, 106, 112, 121

Спин частицы и ЭПР, 104-13

Три и более свойства и ЭПР, 104-6

Усовершенствование аргументов Бома и ЭПР, 105-6, 121-2

Экспериментальные данные и ЭПР, 113, 115, 118-19, 502n-503n

Эрстед, Ганс (Oersted, Hans), 41

Эфир, 43-5, 50-1, 76, 268-9, 275

Ядерные силы, 238

См. также *Сильное ядерное взаимодействие*; *Слабое ядерное взаимодействие*

Яйца и курицы история, энтропия и Я.К.И., 170-1, 174

Яйца расплескивание, 143, 144

Обратное движение Я.Р., 145-6, 149-50, 507n

Энтропия и Я.Р., 158, 159-60, 162, 174, 215

Янг, С.Н. (Yang, C.N.), 255

Янга-Миллса поля, 255-6

Яу, Шинь-Тунь (Yau, Shing-Tung), 369

**Комментарии**

**Глава 1**

1. Лорд Кельвин цитировался физиком Альбертом Майкельсоном во время его обращения в 1894 при открытии Лаборатории Райерсона в Чикагском Университете (см. D.Kleppner, *Physics Today*, November 1998).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r1))

2. Lord Kelvin, "Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light," *Phil. Mag.* Ii – 6th series, 1 (1901).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r2))

3. A.Einstein, N.Rosen, and B.Podolsky, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r3))

4. Sir Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1928).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r4))

5. Как описывается более подробно в комментарии 2 к Главе 6, это преувеличение, поскольку имеются примеры, содержащие относительно малоизвестные частицы (такие как К-мезоны и В-мезоны), которые показывают, что так называемые слабые ядерные силы не ведут себя по отношению к прошлому и будущему полностью симметрично. Однако, на мой взгляд и на взгляд многих других, кто думал об этом, поскольку эти частицы не играют существенной роли в определении свойств материальных объектов повседневной жизни, маловероятно, что они могут быть важны для объяснения головоломки стрелы времени (хотя, я спешу добавить, никто не знает этого с уверенностью). Таким образом, хотя формально это преувеличение, я предполагаю повсюду, что ошибка, которую мы делаем, объявляя, что законы трактуют прошлое и будущее на равном основании, минимальна, – по крайней мере, постольку, поскольку это касается объяснения загадки стрелы времени.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r5))

6. Timothy Ferns, C*oming of Age in the Milky Way* (New York: Anchor, 1989).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r6))

**Глава 2**

1. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton"s Mathmatical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*, trans. A.Motte and Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1934), vol. 1, p.10.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r7))

2. Там же, с. 6.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r8))

3. Там же.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r9))

4. Там же, с. 12.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r10))

5. Albert Einstein, в предисловии к книге Max Jammer, *Concepts of Space: The Histories of Theories of Space in Physics* (New York: Dover, 1993).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r11))

6. A. Rupert Hall, *Isaac Newton, Adventurer in Thought* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992), p. 27.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r12))

7. Там же.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r13))

8. H. G. Alexander, ed., *The Leibniz–Clarke Correspondence* (Manchester: Manchester University Press, 1956).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r14))

9. Я сосредоточиваюсь на Лейбнице как представителе тех, кто возражал против наделения пространства самостоятельным существованием, независимым от населяющих его объектов, но многие другие также активно защищали этот взгляд, среди них Кристиан Гюйгенс и Бишоп Беркли.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r15))

10. См., например, Max Jammer, *Concepts of Space*, p. 116.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r16))

11. В.И.Ленин, *Материализм и эмпириокритицизм: критические заметки об одной реакционной философии* (Москва: Издательство Звено, 1909).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r17))

**Глава 3**

1. Для математически подготовленных читателей эти уравнения есть

div ***E*** = ρ/ε0, div ***В*** = 0, rot ***E*** + ∂***В***/∂t = 0, rot ***В*** – ε0μ0∂***E***/∂t = μ0***J***,

где ***Е***, ***В***, ρ, ***J***, ε0, μ0 обозначают электрическое поле, магнитное поле, плотность электрического заряда, плотность электрического тока, диэлектрическую проницаемость пустого пространства и магнитную проницаемость пустого пространства, соответственно. Как вы можете видеть, уравнения Максвелла связывают темпы изменения электромагнитных полей с присутствием электрических зарядов и токов. Нетрудно показать, что эти уравнения подразумевают скорость электромагнитных волн, равную (ε0μ0)–1/2, которая, будучи вычисленной, является, фактически, скоростью света.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r18))

2. Имеется некоторое расхождение во мнениях о той роли, которую эти эксперименты играли в разработке специальной теории относительности Эйнштейном. В его биографии Эйнштейна, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), pp. 115-19, Абрахам Пайс утверждал, используя собственное заявление Эйнштейна из его более поздних лет, что Эйнштейн был осведомлен о результате Майкельсона–Морли. Альбрехт Фëлсинг в *Albert Einstein: A Biography* (New York: Viking, 1997), pp. 217-20, также утверждал, что Эйнштейн знал о результате Майкельсона–Морли, точно так же, как о более ранних нулевых результатах опытов по поискам доказательств эфира, таких как работа Армана Физо. Но Фëлсинг и многие другие историки науки также утверждали, что такие эксперименты играли, в лучшем случае, вторичную роль в размышлениях Эйнштейна. Эйнштейн в первую очередь руководствовался рассмотрением математической симметрии, простотой и сверхъестественной физической интуицией.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r19))

3. Чтобы для нас что-нибудь было видно, свет должен попасть в наши глаза; аналогично, чтобы мы увидели свет, сам свет должен проделать тот же путь. Так что, когда я говорю, что Барт видит свет, который удаляется, это стенография. Я представляю, что Барт имеет небольшую армию помощников, которые все движутся со скоростью Барта, но размещены на различных расстояниях вдоль пути, которому следуют Барт и луч света. Эти помощники подсказывают Барту, как далеко вперед улетел свет и время, за которое свет достиг такого удаленного положения. Тогда на основании указанной информации Барт может рассчитать, как быстро свет улетает прочь от него.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r20))

4. Имеется множество элементарных математических выводов результатов Эйнштейна по поводу пространства и времени, вытекающих из специальной теории относительности. Если вы интересуетесь, вы можете, например, посмотреть на Главу 2 *Элегантной Вселенной* (вместе с математическими деталями, данными в заключительных комментариях к этой главе). Более формальный, но предельно понятный вывод имеется в книге Эдвина Тейлора и Джона Арчибальда Уилера, *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity* (New York, W. H. Freeman & Co., 1992).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r21))

5. Остановка времени при скорости света является интересным понятием, но важно не вкладывать в него слишком много смысла. СТО показывает, что ни один материальный объект никогда не сможет достичь скорости света: чем быстрее движется материальный объект, тем тяжелее подтолкнуть его к дальнейшему увеличению скорости. Чтобы подтолкнуть объект к скорости света, мы должны придать ему, по существу, бесконечно большой толчок, а это как раз то, что мы никогда не сможем сделать. Таким образом, точка зрения "безвременного" фотона ограничена безмассовыми объектами (примером которых фотон и является), так что "безвременье" всегда находится за пределами того, что все семейства частиц, за исключением нескольких типов, могут когда-либо достичь. Хотя это интересное и плодотворное упражнение, представить, как вселенная выглядела бы, когда мы двигались бы со скоростью света, в конце концов нам нужно сосредоточиться на точках зрения, которые могут иметь место для материальных объектов, таких как мы сами, если мы хотим обрисовать выводы о том, как СТО влияет на нашу ощущаемую концепцию времени.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r22))

6. См. Abraham Pais, *Subtle Is the Lord*, pp. 113-14.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r23))

7. Чтобы быть более точным, мы определим, что вода вращается, если она принимает вогнутую форму, и не вращается, если нет. С точки зрения Маха в пустой вселенной нет концепции вращения, так что поверхность воды всегда будет плоской (или, чтобы избежать проблем отсутствия гравитационного притягивания воды, мы можем сказать, что натяжение каната, протянутого между двумя камнями, всегда будет слабым). Здесь утверждается, что, напротив, в СТО имеется понятие вращения даже в пустой вселенной, так что поверхность воды должна быть вогнутой (и натяжение каната, протянутого между камнями, должно быть сильным). В этом смысле СТО нарушает идеи Маха.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r24))

8. Albrecht Fölsing, *Albert Einstein* (New York: Viking Piess, 1997), pp. 208-10.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r25))

9. Читатель, склонный к математике, отметит, что если мы выбираем такие единицы, что скорость света принимает форму одной единицы пространства за одну единицу времени (вроде одного светового года за год или одной световой секунды за секунду, где световой год составляет примерно 6 триллионов миль, а световая секунда примерно 186 000 миль), то свет двигается через пространство-время по лучу, наклоненному под 45 градусов (поскольку такие диагональные линии являются теми, которые покрывают одну единицу пространства в одну единицу времени, две единицы пространства за две единицы времени, и так далее). Поскольку ничто не может превысить скорость света, любой материальный объект должен покрывать меньшее расстояние в пространстве за данный интервал времени, чем луч света, а потому траектория, по которой указанный объект следует через пространство-время, должна составлять угол с центральной линией диаграммы (линией, проходящей через центр батона от корки до корки), который всегда меньше, чем 45 градусов. Более того, Эйнштейн показал, что временные сечения для наблюдателя, двигающегося со скоростью v, – все пространство в один момент такого же, как у наблюдателя, времени, – подчиняются уравнению (в предположении одного пространственного измерения для простоты) tдвигающ = γ(tстационарн – (v/c2)xстационарн), где γ = (1 – v2/c2)–1/2, а *с* есть скорость света. В единицах, где *с* = 1, мы замечаем, что v < 1, а потому временное сечение для двигающегося наблюдателя – геометрическое место точек, для которых tдвигающ принимает фиксированное значение, – получается из формулы (tстационарн– vxстационарн) = const. Такие временные сечения наклонены по отношению к стационарному временному сечению (геометрическому месту точек из формулы tстационарн = const), а поскольку v < 1, угол между ними менее 45 градусов.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r26))

10. Для склонного к математике читателя может быть сделано утверждение, что геодезические пространства-времени Минковского – пути между двумя заданными точками с экстремальной пространственно-временной длиной – являются геометрическими сущностями, которые не зависят от любого специального выбора координат или системы отсчета. Они являются внутренними, абсолютными геометрическими свойствами пространства-времени. Явно используя стандартную метрику Минковского, (времениподобные) геодезические являются прямыми линиями (чей угол по отношению к оси времени меньше, чем 45 градусов, поскольку вовлеченная скорость меньше скорости света).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r27))

11. Имеется еще кое-что важное, с которым также согласятся все наблюдатели, безотносительно к их движению. Оно подразумевалось в том, что мы описывали, но стоит установить его явно. Если одно событие является причиной другого (я кинул булыжник, заставив окно разбиться), все наблюдатели согласятся, что причина происходит *перед* следствием (все наблюдатели согласятся, что я кинул булыжник *до того*, как окно разбилось). Для склонного к математике читателя на самом деле нетрудно увидеть это, используя наше схематическое описание пространства-времени. Если событие А является причиной события В, тогда линия, проведенная от А к В пересекает каждое из временных сечений (временных сечений наблюдателя в покое по отношению к А) под углом, который *больше* 45 градусов (угол между пространственными осями – осями, которые лежат на любом заданном временном сечении – и линией между А и В больше 45 градусов). Например, если А и В имеют место в одном и том же месте в пространстве (резиновая лента, обернутая вокруг моего пальца [А] вызывает побеление пальца [В]), тогда линия, соединяющая А и В, составляет угол 90 градусов относительно временных сечений. Если А и В имеют место в различных местах пространства, что бы ни путешествовало от А к В, чтобы оказать влияние (мой булыжник, путешествующий от места броска к окну), оно делает это с меньшей, чем у света, скоростью, которая означает угол, отличающийся от 90 градусов (угла, когда скорость перемещения не привлекалась) меньше, чем на 45 градусов, – то есть угол по отношению к временным сечениям (пространственным осям) больше, чем 45 градусов. (Вспомним из комментария 9 к этой главе, что скорость света устанавливает предел и его движение происходит по 45-градусным линиям). Теперь, как и в комментарии 9, другие временные сечения, связанные с наблюдателем в движении, наклонены относительно сечений наблюдателя в покое, но углы всегда меньше 45 градусов (поскольку относительное движение между двумя материальными наблюдателями всегда меньше скорости света). А поскольку угол, сопоставляющийся с причинно-связанными событиями всегда *больше*, чем 45 градусов, временные сечения наблюдателя, который с необходимостью движется со скоростью меньше световой, не могут сначала пройти через следствие, а затем позже через причину. Для всех наблюдателей причина будет предшествовать следствию.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r28))

12. Замечание, что причины предшествуют следствию (см. предыдущий комментарий), должно будет среди других вещей стать проблемным, если воздействие сможет перемещаться быстрее скорости света.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r29))

13. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton"s Mathmatical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*, trans. A.Motte and Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962), vol. 1, p.634.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r30))

14. Поскольку гравитационное притяжение Земли отличается от одного местоположения к другому, пространственно протяженный, свободно падающий наблюдатель сможет еще обнаружить остаточное гравитационное воздействие. А именно, если наблюдатель во время падения отпускает два бейсбольных мяча, – один из его вытянутой в сторону правой руки, а другой из его левой, – каждый будет падать вдоль пути по направлению к центру Земли. Так что с точки зрения наблюдателя он будет падать прямо вниз к центру Земли, тогда как отпущенный из его правой руки мяч будет двигаться вниз и слегка влево, а отпущенный из его левой руки мяч будет двигаться вниз и слегка вправо. Через тщательные измерения, следовательно, наблюдатель увидит, что расстояние между двумя бейсбольными мячами медленно уменьшается; они двигаются по направлению друг к другу. Однако, ключевым для этого эффекта является то, что мячи были отпущены в слегка различных точках пространства, так что пути их свободного падения к центру Земли всегда слабо различаются. Таким образом, более точное выражение утверждения Эйнштейна заключается в том, что чем меньше пространственная протяженность объекта, тем более полно он может уничтожить гравитацию, перейдя в свободное падение. Будучи важным принципиальным моментом, это уточнение может быть благополучно проигнорировано в ходе обсуждения.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r31))

15. Для более детального, хотя и на обобщенном уровне, объяснения деформации пространства и времени в соответствии с ОТО, см., например, Главу 2*Элегантной Вселенной*.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r32))

16. Для математически подготовленного читателя уравнения Эйнштейна есть Gμν = (8πG/*c*4)Tμν, где левая сторона описывает кривизну пространства-времени, используя тензор Эйнштейна, а правая сторона описывает распределение материи и энергии во вселенной, используя тензор энергии-импульса.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r33))

17. Charles Misner, Kip Thorne, and John Archibald Wheeler, *Gravitation* (San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1973), pp. 544-45.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r34))

18. В 1954 Эйнштейн писал коллеге: "Собственно говоря, больше совсем не нужно говорить о принципе Маха" (как цитируется в Abraham Pais, *Subtle Is the Lord*, pp. 228).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r35))

19. Как отмечалось ранее, последующие поколения приписывали следующие идеи Маху, даже если его собственные записи не описывают вещи явно в этом духе.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r36))

20. Одна оговорка здесь заключается в том, что объекты, которые настолько удалены, что не имеется достаточно времени с начала вселенной, чтобы свет от них – или гравитационное воздействие – даже достигли нас, не влияют на гравитацию, которую мы ощущаем.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r37))

21. Читатель-эксперт заметит, что это утверждение, формально говоря, слишком сильное, поскольку имеются нетривиальные (что означает, пространство-не-Минковского) решения пустого пространства для ОТО. Здесь я упростил, используя факт, что СТО может мыслиться как специальный случай ОТО, в котором гравитация игнорируется.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r38))

22. Для баланса позвольте мне заметить, что имеются физики и философы, которые не согласны с этим заключением. Даже если Эйнштейн отказался от принципа Маха в течение последних тридцати лет, этим он бросил вызов своей собственной жизни. Продвигались различные версии и интерпретации идей Маха и, например, некоторые физики предполагали, что ОТО фундаментально включает в себя идеи Маха; это точно, что некоторые особые формы, которые может иметь пространство-время, – такие как бесконечное плоское пространство-время в пустой вселенной, – не реализуются. Возможно, они предполагали, что любое пространство-время, которое отдаленно реалистично – населено звездами и галактиками, и так далее – удовлетворяет принципу Маха. Другие предлагали переформулировку принципа Маха, в которой проблема больше не в том, как объекты, такие как связанные струной камни или наполненное водой ведро, ведут себя в пустой во всех иных отношениях вселенной, а скорее, как различные временные сечения – различные трехмерные пространственные геометрии – соотносятся друг с другом через время. Информационная ссылка на современные размышления по поводу этих идей такова:*Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, Julian Barbour and Herbert Pfister, eds. (Berlin: Birkhauser, 1995), где собрана коллекция эссе по данной теме. Как интересное отступление, эта ссылка содержит опрос примерно сорока физиков и философов по поводу их взгляда на принцип Маха. Большинство (90 процентов) согласны, что ОТО не полностью совпадает с идеями Маха. Другое превосходное и предельно интересное обсуждение этих идей с точки зрения, которая явно поддерживает Маха, и на уровне, доступном широкому читателю, есть книга Julian Barbour, *The End of Time: The Next Revolution in Physics* (Oxford: Oxford University Press, 1999).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r39))

23. Склонный к математике читатель может счесть познавательным, что Эйнштейн верил, что пространство-время не имеет независимого от его метрики существования (метрика – математическое понятие, которое дает соотношения между расстояниями в пространстве-времени), так что, если удалить все, – включая метрику, – пространство-время не будет больше представлять собой нечто. Но говоря "пространство-время", я всегда имел его в виду как многообразие вместе с метрикой, которая является решением уравнений Эйнштейна, так что заключение, которого мы достигли, на математическом языке звучит так: метрическое пространство-время представляет собой нечто.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r40))

24. Max Jammer, *Concepts of Space*, p. xvii.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r41))

**Глава 4**

1. Более точно это является средневековой концепцией с историческими корнями, восходящими к Аристотелю.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r42))

2. Как мы будем обсуждать в книге позже, имеются ситуации (такие как Большой взрыв и черные дыры), которые все еще представляют много загадочного, по меньшей мере, в части, возникающей из-за экстремально малого размера или гигантских плотностей, которые заставляют даже более утонченную теорию Эйнштейна терпеть неудачу. Так что приведенное здесь утверждение применимо для всех обстоятельств, кроме экстремальных, в которых сами известные законы становятся сомнительными.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r43))

3. Первые читатели этого текста, которые, неожиданно, оказались частично сведущими в культе Вуду, проинформировали меня, что кое-что представляется переходящим от места к месту, чтобы проявиться в идях последователей Вуду, а именно – дух. Так что мой пример Вуду как причудливого нелокального процесса может, в зависимости от вашего отношения к Вуду, быть неадекватным. Тем не менее, идея ясна.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r44))

4. Чтобы избежать путаницы, позвольте мне еще раз подчеркнуть вывод, что когда я говорю "Вселенная не является локальной" или "нечто, что мы делаем здесь, может переплетаться с чем-то там", я не имею в виду возможность оказать мгновенное намеренное влияние на что-то удаленное. Вместо этого, как будет ясно, эффект, на который я ссылаюсь, проявляется как корреляции между событиями, – обычно в форме корреляций между результатами измерений, – имеющими место в удаленных местах (местах, для которых не может быть достаточно времени, чтобы даже свет успел пропутешествовать от одного к другому). Таким образом, я ссылаюсь на то, что физики называют *нелокальными корреляциями*. На первый взгляд, такие корреляции не могут поразить вас как особенно удивительные. Если кто-то посылает вам ящик, содержащий одну из пары перчаток, и посылает вторую из той же пары вашему другу за тысячи миль от вас, будет иметься корреляция между соответствием перчаток рукам, которое каждый из вас увидит, открыв ваш соответствующий ящик: если вы видите левую, ваш друг увидит правую; если вы видите правую, ваш друг увидит левую. И понятно, в этих корреляциях совсем нет ничего удивительного. Но, как мы постепенно будем описывать, корреляции, видимые в квантовом мире, кажутся имеющими существенно иной характер. Это как если бы вы имели пару "квантовых перчаток", в которых каждая перчатка может быть или левой или правой и фиксирует определенное соответствие той или иной руке только когда над ней проведено подходящее наблюдение или измерение. Таинственность возникает потому, что хотя каждая перчатка кажется при наблюдении выбирающей свое соответствие руке хаотически, перчатки работают в тандеме, даже если они далеко разнесены: если одна выбирается левой, другая выберется правой и наоборот.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r45))

5. Квантовая механика делает предсказания о микромире, которые фантастически хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями. На этот счет имеется универсальное согласие. Тем не менее, поскольку детальные свойства квантовой механики, как обсуждается в этой главе, существенно отличаются от особенностей повседневного опыта, и, соответственно, поскольку имеются различные математические формулировки теории (и различные формулировки того, как теория преодолевает зазор между микромиром явлений и макромиром измеряемых результатов), нет консенсуса насчет того, как интерпретировать различные особенности теории (и различные загадочные данные, которые теория, тем не менее, в состоянии объяснить математически), включая проблему нелокальности. В этой главе я выбрал отдельную точку зрения, которую я нахожу самой убедительной, основываясь на современных теоретических представлениях и экспериментальных результатах. Но я делаю акцент здесь, что не всякий согласится с этим взглядом, и в последующем комментарии после более полного объяснения этой точки зрения я коротко отмечу некоторые из других точек зрения и обозначу, где вы можете почитать о них более подробно. Позвольте мне также обратить внимание, как мы будем обсуждать дальше, что эксперименты противоречат вере Эйнштейна, что данные могут быть объяснены исключительно на основе частиц, всегда имеющих определенные, хотя и скрытые, свойства без какого-либо использования или упоминания нелокального запутывания. Однако, неудача этой точки зрения только отвергает локальную вселенную. Она не отбрасывает возможности, что частицы имеют такие определенные скрытые свойства.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r46))

6. Для склонного к математике читателя позвольте мне отметить один потенциально вводящий в заблуждение аспект этого описания. Для многочастичных систем вероятностная волна (волновая функция в стандартной терминологии), по существу, имеет ту же интерпретацию, которая только что была описана, но определяется как функция на конфигурационном пространстве частиц (для отдельной частицы конфигурационное пространство изоморфно реальному пространству, но для системы N частиц оно имеет 3N измерений). Это важно иметь в виду, когда мы обдумываем вопрос, является ли волновая функция реальной физической сущностью или просто математическим приемом, поскольку если она занимает первую позицию, необходимо будет принять реальность конфигурационного пространства тоже – интересная вариация тем Глав 2 и 3. Поля в релятивистской квантовой теории поля могут быть определены в обычных четырех пространственно-временных измерениях повседневного опыта, но там тоже имеется некоторая менее широко используемая формулировка, которая требует обобщенные волновые функции – так называемые волновые функционалы, определяемые на еще более абстрактном пространстве, пространстве полей.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r47))

7. Эксперименты, на которые я тут ссылаюсь, это эксперименты по фотоэлектрическому эффекту, в которых свет падает на различные металлы, заставляя электроны вылетать из поверхности металла. Экспериментаторы нашли, что чем больше интенсивность света, тем большее количество электронов эмитируется. Более того, эксперименты обнаружили, что энергия каждого испущенного электрона определяется цветом – частотой – света. Это, как доказал Эйнштейн, легко понять, если луч света составлен из частиц, поскольку большая интенсивность света переводится в большее количество частиц света (фотонов) в луче – а чем больше имеется фотонов, тем с большим числом электронов они столкнутся, а потому большее число электронов вылетит из поверхности металла. Более того, частота света определяет энергию каждого фотона, а потому и энергию каждого испущенного электрона, что точно подтверждается данными опыта. Корпускулярные свойства фотонов, наконец, были подтверждены Артуром Комптоном в 1923 в экспериментах, включающих упругое рассеяние фотонов и электронов.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r48))

8. Institut International de Physique Solvay, *Rapport et discussions du 5-e Conseil* (Paris, 1928), pp. 253ff.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r49))

9. Irene Born, trans., *The Born-Einstein Letters* (New York: Walker, 1971), p. 223.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r50))

10. Henry Stapp, *Nuovo Cimento* 40B (1977), 191-204.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r51))

11. Дэвид Бом находится среди самых творческих умов, которые работали в квантовой механике на протяжении двадцатого века. Он родился в Пенсильвании в 1917 и был студентом Роберта Оппенгеймера в Беркли. Во время преподавания в Принстонском Университете он был вызван в Комитет по расследованию антиамериканской деятельности, но отказался давать показания на слушании дела. Вместо этого, он покинул США, стал профессором Университета Сан-Паоло в Бразилии, затем в Технионе в Израиле и, наконец, в Колледже Беркбека в Университете Лондона. Он жил в Лондоне до своей смерти в 1992.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r52))

12. Определенно, если вы достаточно долго ждете, то, что вы делаете с одной частицей, может, в принципе, повлиять на другую: одна частица может послать сигнал, предупреждающий другую, что первая подверглась измерению, и этот сигнал может повлиять на принимающую частицу. Однако, поскольку ни один сигнал не может двигаться быстрее скорости света, этот вид влияния не является мгновенным. Ключевой момент в настоящей дискуссии тот, что в тот самый момент, когда мы измеряем спин одной частицы относительно выбранной оси, мы узнаем спин другой частицы относительно этой оси. Так что любой вид "стандартного" обмена информацией между частицами – световой или досветовой обмен – не имеет значения.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r53))

13. В этой и следующей секции выжимка из открытия Белла, которую я использую, является "инсценировкой", инспирированной превосходными статьями Дэвида Мермина "Quantum Mysteries for Anyone," *Journal of Philosophy* 78, (1981), pp. 397-408; "Can You Help Your Team Tonight by Watching on TV?," in*Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*, James T. Cushing and Ernan McMullin, eds. (University' of Notre Dame Press, 1989); "Spooky Action at a Distance: Mysteries of the Quantum Theory," in *The Great Ideas Today* (Encyclopaedia Britannica, Inc., 1988), которые все собраны в книге N. David Mermin, *Boojums All the Way Through* (Cambridge, Eng.; Cambridge University Press, 1990). Для любого, кто интересуется рассмотрением этих идей в более формальном варианте, нет лучшего способа, чем начать с собственных статей Белла, многие из которых собраны в книге J. S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r54))

14. В то время как предположение локальности является ключевым для аргументов Эйнштейна, Подольского и Розена, исследователи пытались найти ошибки в других элементах их рассуждения в попытке избежать заключения, что вселенная допускает нелокальные свойства. Например, иногда утверждают, что все, что требуют данные, это что мы отказываемся от так называемого реализма – идеи, что все объекты обладают свойствами, которые измеряются, независимо от процесса измерения. В этом контексте, однако, такое утверждение попадает пальцем в небо. Если рассуждения ЭПР были бы подтверждены экспериментом, не было бы ничего удивительного в дальнодействующих корреляциях квантовой механики; они были бы не более удивительны, чем классические дальнодействующие корреляции, такие как то, что нахождение вашей левой перчатки здесь подразумевает, что ее пара там будет правой перчаткой. Но такие рассуждения были опровергнуты результатами Белла/Аспекта. Теперь, если в ответ на опровержение ЭПР мы отвергнем реализм, – как мы это делаем в стандартной квантовой механике, – это никак не уменьшит ошеломительную загадочность дальнодействующих корреляций между далеко разнесенными друг от друга *случайными* процессами; когда мы отказываемся от реализма, перчатки, как в комментарии 4, становятся "квантовыми перчатками". Отказ от реализма любым способом не делает наблюдаемые нелокальные корреляции хоть сколь-нибудь менее эксцентричными. Верно то, что если в свете результатов ЭПР, Белла и Аспекта мы попытаемся сохранить реализм, – например, как в теории Бома, обсуждающейся позже в главе, – разновидность нелокальности, которую нам потребуется согласовать с данными опыта, окажется более сильной, включая нелокальность взаимодействий, а не только нелокальность корреляций. Многие физики воздерживаются от такого выбора и, таким образом, отказываются от реализма.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r55))

15. См., например, Murray Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar* (New York: Freeman, 1994), and Huw Price, *Time's Arrow and Archimedes' Point* (Oxford: Oxford University Press, 1996).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r56))

16. СТО запрещает всему, что движется медленее скорости света, пересекать барьер скорости света. Но если что-нибудь уже движется быстрее скорости света, это СТО не отвергает беспощадно. Гипотетические частицы такого сорта называются тахионами. Большинство физиков уверены, что тахионы не существуют, но другие рады поработать вхолостую с возможностью их существования. До сих пор, однако, в значительной степени потому, что странные свойства таких более-быстрых-чем-свет частиц находятся в соответствии с уравнениями СТО, никто не нашел никакого практического применения для них - даже говоря гипотетически. В современных исследованиях теория, в которой возникают тахионы, как правило, выглядит как страдающая от нестабильности.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r57))

17. Склонный к математике читатель должен отметить, что в своей сути СТО утверждает, что законы физики должны быть Лоренц-инвариантны, что означает, инвариантны относительно *SO(3,1)* координатных преобразований пространства Минковского. Отсюда возникает заключение, что квантовая механика будет согласована с СТО, если она может быть сформулирована полностью Лоренц-инвариантным образом. Сейчас релятивистская квантовая механика и релятивистская квантовая теория поля продвинулись далеко в направлении этой цели, но все еще нет полного согласия в отношении того, могут ли они обратиться к квантовой проблеме измерения полностью Лоренц-инвариантным образом. В релятивистской квантовой теории поля, например, можно прямо рассчитать полностью Лоренц-инвариантным образом амплитуды вероятности и вероятность исхода различных экспериментов. Но стандартное рассмотрение спотыкается также при описании способа, при котором тот или иной особый исход возникает из широкого диапазона квантовых возможностей, – то есть, что происходит в процессе измерения. Это особенно важная проблема для запутывания как явления, которое зависит от того, что делает экспериментатор, – акта измерения одного из свойств запутанной частицы. Для более детального обсуждения см. Tim Maudlin, *Quantum Non-locality and Relativity* (Oxford: Blackwell, 2002).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r58))

18. Для склонного к математике читателя приводим квантовомеханический расчет, который дает предсказания в соответствии с этими экспериментами. Предположим, что оси, вдоль которых детектор измеряет спин, суть вертикальная и две наклоненные под 120 градусов по и против часовой стрелки от вертикали (подобно полудню, четырем часам и восьми часам на двух циферблатах часов, одинаковых для каждого детектора, который стоит лицом к лицу с каждым циферблатом), и рассмотрим для определенности два электрона, появляющиеся спина к спине и направляющиеся к этим детекторам в так называемом синглетном состоянии. Поскольку это состояние, в котором полный спин равен нулю, гарантируется, что если один электрон найден в состоянии спин вверх, другой будет найден в состоянии спин вниз относительно заданной оси, и наоборот. (Вспомним, что для упрощения текста я описывал корреляции между электронами как обеспечивающие, что если один имеет спин вверх, такой же будет и другой, и если один имеет спин вниз, второй тоже; на самом деле корреляции таковы, что при них спины ориентируются в противоположных направлениях. Чтобы установить связь с основным текстом, вы всегда должны представлять, что два детектора калиброваны противоположно, так что в ситуации, когда один показывает спин вверх, второй будет показывать спин вниз). Стандартный результат из элементарной квантовой механики показывает, что если угол между осями, вдоль которых наши два детектора измеряют спины электронов, есть θ, тогда вероятность, что будет измерена противоположная величина спина, равна cos2(θ/2). Таким образом, если оси детекторов выстроены одинаково (θ = 0), они определенно измерят противоположные величины спинов (аналог детекторов в главном тексте, всегда измеряющих одинаковую величину, когда детекторы настроены на одно и то же направление), а если они настроены на направления +120° или –120°, вероятность измерения противоположных спинов есть cos2(+120° или –120°) = 1/4. Теперь, если оси детекторов выбраны хаотично, 1/3 от времени они будут направлены в одном направлении, а 2/3 не будут. Таким образом, после всех прогонов эксперимента мы ожидаем найти противоположные спины в (1/3)(1) + (2/3)(1/4) = 1/2 от времени, как и подтверждают данные.

Вы можете найти это странным, что предположение о локальности дает более высокую корреляцию спинов (больше 50 процентов), чем когда мы находим ее стандартной квантовой механикой (точно 50 процентов); вы могли подумать, что дальнодействующее запутывание квантовой механики должно давать большую корреляцию. Фактически, оно и дает. Способ подумать об этом таков: при только 50 процентах корреляции всех измерений квантовая механика дает 100 процентов корреляций для измерений, в которых оси левого и правого детекторов выбраны ориентированными в одном и том же направлении. В локальной вселенной Эйнштейна, Подольского и Розена более чем 55 процентов корреляций по всем измерениям требуются, чтобы обеспечить 100 процентное согласие, когда оси выбраны одинаково. Грубо говоря, тогда, в локальной вселенной, 50 процентов корреляций по всем измерениям будут влечь за собой меньше, чем 100 процентов корреляций, когда оси выбраны одинаково, – то есть, меньше корреляций, чем то, что мы нашли в нашей нелокальной квантовой вселенной.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r59))

19. Вы можете подумать, что мгновенный коллапс с самого начала нарушил предел скорости, установленный светом и, следовательно, обеспечил конфликт с СТО. И если вероятностные волны были бы на самом деле подобны волнам воды, вы имели бы неопровержимую позицию на этот счет. Тогда то, что величина вероятностной волны вдруг упала бы до нуля на гигантском протяжении, было бы намного более шокирующим, чем если бы вся вода Тихого океана мгновенно прекратила двигаться и стала бы совершенно плоской. Но, утверждают практики квантовой механики, вероятностная волна не похожа на волны воды. Вероятностная волна, хотя она и описывает материю, сама не является материальной вещью. И, продолжают такие практики, барьер скорости света применим только к материальным объектам, вещам, чье движение может быть непосредственно увидено, почувствовано, детектировано. Если вероятностная волна электрона падает до нуля в галактике Андромеда, физик из Андромеды будет просто не способен со 100 процентной определенностью обнаружить этот электрон. Ничто из Андромедских наблюдений не показывает внезапное изменение в вероятностной волне, связанной с успешным детектированием, скажем, электрона в Нью-Йорке. Пока сам электрон не пропутешествует от одного места до другого с большей, чем у света скоростью, конфликта с СТО не будет. И, как вы можете видеть, все, что произошло, это то, что электрон был найден находящимся в Нью-Йорке, а не где-нибудь в другом месте. Его скорость никогда даже не обсуждалась. Так что, хотя мгновенный коллапс вероятности является схемой, которая вызывает загадки и проблемы (более полно обсуждено в Главе 7), нет необходимости предполагать конфликт с СТО.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r60))

20. Для обсуждения некоторых из этих предложений, см. Tim Maudlin, *Quantum Non-locality and Relativity*.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r61))

**Глава 5**

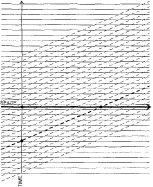
1. Для склонного к математике читателя из уравнения tдвижущ = γ(tстационарн – (v/с2)xстационарн), обсужденного в комментарии 9 к Главе 3, мы находим, что список настоящего Шеви в данный момент будет содержать события, которые наблюдатели на Земле будут полагать прошедшими на (v/с2)xЗемл ранее, где хЗемл есть расстояние от Шеви до Земли. Это предполагает, что Шеви движется прочь от Земли. Для движения в направлении Земли v имеет противоположный знак, так что связанные с Землей наблюдатели будут полагать, что такие события произойдут на (v/с2)xЗемл позднее. Выбирая v = 10 миль в час и хЗемл = 1010 световых лет, находим, что (v/с2)xЗемл составит около 150 лет.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r62))

2. Это число – и аналогичное число, данное параграфом далее при описании движения Шеви в направлении Земли, – было применимо во время публикации книги. Но поскольку время здесь на Земле течет, они будут становиться несколько неточными.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r63))

3. Склонный к математике читатель должен заметить, что метафора сечения пространственно-временного батона под разными углами представляет собой обычную концепцию *пространственно-временных диаграмм*, изучаемых в курсе СТО. На пространственно-временных диаграммах все трехмерное пространство в данный момент времени с точки зрения наблюдателя, который считается стационарным, обозначается горизонтальной линией (или на более продвинутых диаграммах горизонтальной плоскостью), тогда как время обозначается вертикальной осью. (В нашем рисунке каждое "сечение хлеба" – плоскость – представляет все пространство в один момент времени, тогда как ось, идущая через середину батона, от корки до корки есть временная ось). Пространственно-временная диаграмма обеспечивает наглядный способ иллюстрации точек, из которых составлен список настоящего ваш и Шеви.



Бледные сплошные линии совпадают с временными сечениями (сечениями настоящего) для наблюдателей, покоящихся по отношению к Земле (для простоты мы представляем, что Земля не вращается и не подвержена никаким ускорениям, поскольку это ненужное усложнение картины), а бледные пунктирные линии совпадают с временными сечениями наблюдателей, двигающихся прочь от Земли, скажем, со скоростью 9,3 мили в час. Когда Шеви покоится относительно Земли, первые представляют его сечения настоящего (и поскольку вы покоитесь на Земле в ходе истории, эти бледные сплошные линии всегда представляют ваши сечения настоящего), а самая темная сплошная линия показывает сечение настоящего, содержащее вас (левая темная точка) на Земле двадцать первого века, и его (правая темная точка), когда вы оба еще сидите и читаете. Когда Шеви отправляется прочь от Земли, пунктирные линии представляют его сечения настоящего, а самая темная из пунктирных линий показывает сечение настоящего, содержащее Шеви (который только что встал и отправился гулять) и Джона Уилкса Бута (нижняя левая темная точка). Отметим также, что одно из последующих пунктирных временных сечений будет содержать прогулку Шеви (если он все еще идет!) и вас на Земле двадцать первого века, сидящего и все еще читающего. Поэтому единственный момент для вас будет появляться в двух списках настоящего Шеви – одном списке, существенном до, и одном списке, существенном после того, как он оправился гулять. Это показывает еще и другой путь, в котором простое интуитивное понятие настоящего, – когда оно воображается применимым через пространство, – трансформируется в СТО в концепцию с сильно необычными свойствами. Более того, эти списки настоящего *не обозначают причинность*: стандартная причинность (комментарий 11 к Главе 3) остается полностью в силе, список настоящего Шеви прыгает из-за того, что он сам перепрыгнул из одной системы отсчета к другой. Но любой наблюдатель, – используя единственный хорошо определенный выбор пространственно-временных координат, – согласится с любым другим в отношении того, какие события на что могут влиять.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r64))

4. Подготовленный читатель распознает, что я предполагаю, что пространство-время является пространством-временем Минковского. Аналогичные аргументы в других геометриях не обязательно будут давать полное пространство-время.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r65))

5. *Albert Einstein and Michele Besso: Correspondence* 1903–1955, P, Speziali, ed. (Paris: Hermann, 1972).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r66))

6. Обсуждение здесь призвано придать качественный смысл тому, как переживания прямо *сейчас* вместе с памятью, которую вы имеете прямо *сейчас*, формируют основу ваших ощущений жизни, в которой вы пережили эту память. Но если, например, ваш мозг и тело были каким-то образом приведены в точно то же состояние, в котором они находятся прямо сейчас, вы должны будете иметь то же самое ощущение прожитой жизни, которое подтверждает ваша память (предполагая, как я это делаю, что основа всех ощущений может быть найдена в физическом состоянии мозга и тела), даже если эти переживания никогда на самом деле не происходили, а были искусственно впечатаны в состояние вашего мозга. Одно упрощение в обсуждении заключается в предположении, что мы можем чувствовать или переживать вещи, которые происходят в отдельный момент, тогда как, на самом деле, течение времени требует от мозга распознавать и интерпретировать все, что бы он на входе ни получал. Хотя это верно, это не имеет особого значения для излагаемой мной точки зрения; это интересное, но совсем не относящееся к делу усложнение, возникающее из анализа времени способом, прямо связанным с человеческими ощущениями. Как мы обсуждали ранее, человеческие примеры помогают делать нашу дискуссию более обоснованной и интуитивной, но это требует от нас отделять те аспекты дискуссии, которые более интересны с биологической, в противоположность физической, точки зрения.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r67))

7. Вы можете удивиться, как обсуждение в этой главе соотносится с нашим описанием в Главе 3 объектов, "двигающихся" через пространство-время со скоростью света. Для склонного к математике читателя грубый ответ будет таким, что история объекта представляется кривой в пространстве-времени – путем через пространственно-временной батон, который высвечивает каждое место, которое занимал объект в момент, когда он был там (почти как мы видим на Рис. 5.1). Интуитивное обозначение "движения" через пространство-время тогда может быть выражено на языке "без течения", путем простого обозначения этого пути (в противоположность представлению, что путь проходится на ваших глазах). "Скорость", связанная с этим путем, тогда измеряется величиной, насколько длинный этот путь (от одной выбранной точки до другой), деленной на промежуток времени, записанный по часам, переносимым кем-то или чем-то между двумя выбранными точками пути. Это, еще раз, концепция, которая не содержит какого-либо течения времени: вы просто смотрите на то, что говорят интересующие вас часы в двух представляющих интерес точках. Оказывается, скорость, найденная таким образом, для *любого* движения равна скорости света. Склонный к математике читатель обнаружит причину этого немедленно. Метрика в пространстве-времени Минковского есть *ds2 = c2dt2 – dx2* (где *dx2* есть евклидова длина *dx12 + dx22 + dx32*), тогда как время, текущее по часам ("собственное" время), задается *dτ2 = ds2/c2*. Так что, очевидно, скорость через пространство-время так же определяется математически выражением *ds/dτ*, которое равно *с*.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r68))

8. S. Rudolf Carnap, "Autobiography," in *The Philosophy of Rudolf Carnap*, P.A. Schilpp, ed. (Chicago: Library of Living Philosophers, 1963), p. 37.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r69))

**Глава 6**

1. Отметим, что асимметрия, о которой идет речь – стрела времени – возникает из порядка, в котором события имеют место *во времени*. Вы могли бы также удивиться асимметрии в самом времени – например, как мы увидим в дальнейших главах, в соответствии с некоторыми космологическими теориями время могло иметь начало, но оно может не иметь конца. Имеются и другие понятия темпоральной асимметрии, но наше обсуждение здесь сосредоточивается на первом. Даже в этом случае до конца главы мы придем к заключению, что темпоральная асимметрия вещей во времени зависит от специальных условий в ранней истории вселенной, а потому связывает стрелу времени с аспектами космологии.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r70))

2. Для склонного к математике читателя позвольте мне более точно отметить, что означает симметрия по отношению к обращению времени, и указать на одно интригующее исключение, чье значение для обсуждаемых нами в этой главе проблем еще предстоит полностью осознать. Простейшее определение симметрии по отношению к обращению времени есть утверждение, что набор законов физики симметричен по отношению к обращению времени, если задано любое решение уравнений, скажем, *S(t)*, тогда *S(–t)* тоже будет решением этих уравнений. Например, в ньютоновской механике с силами, которые зависят от положений частиц, если *x(t) = (x1(t), x2(t), ..., x3n(t))* есть положения n частиц в трех пространственных измерениях, то тот факт, что *x(t)* является решением *d2x(t)/dt2 = F(x(t))*, подразумевает, что *x(–t)* также является решением уравнений Ньютона *d2x(–t)/dt2 = F(x(–t))*. Отметим, что *x(–t)* представляет движение частиц, которые проходят через те же самые положения, как и *x(t)*, но в обратном порядке с противоположными скоростями.

В более общем смысле набор физических законов обеспечивает нас алгоритмом эволюции начального состояния физической системы в момент времени *t0*к состоянию в некоторый другой момент времени *t + t0*. Конкретно, этот алгоритм может быть рассмотрен как отображение *U(t)*, которое действует на начальное состояние *S(t0)* и производит *S(t + t0)*, что означает *S(t + t0) = U(t)S(t0)*. Мы говорим, что законы, приводящие к *U(t)*, являются симметричными во времени, если имеется отображение ***T***, удовлетворяющее соотношению *U(–t) =****T****–1U(t)****T***. На обычном языке это уравнение говорит, что при помощи подходящих манипуляций над состоянием физической системы в один момент (достигаемых с помощью ***T***), эволюция на время *t* вперед во времени в соответствии с законами теории (выражаемой через *U(t)*) становится эквивалентной эволюции системы на *t* единиц времени назад во времени (обозначаемой *U(–t)*). Например, если мы определи состояние системы частиц в один момент через их положения и скорости, тогда ***T*** будет оставлять все положения частиц фиксированными и менять на противоположные все скорости. Эволюция такой конфигурации частиц вперед во времени на промежуток *t*эквивалентна эволюции оригинальной конфигурации частиц назад во времени на промежуток *t*. (Фактор ***T****–1*отменяет обращение скоростей так, что в конце не только положения частиц совпадают с теми, которые они имели *t* единиц времени назад, но таковы будут и их скорости).

Для определенного набора законов оператор ***T*** более сложен, чем в случае ньютоновской механики. Например, если мы изучаем движение заряженных частиц в присутствии электромагнитного поля, обращение скоростей частиц будет не адекватно уравнениям, которые дадут эволюцию, в которой частицы заново проходят свои шаги. Вместо этого направление магнитного поля также должно быть обращено. (Это требуется, чтобы член **v** x ***B*** в уравнении для силы Лоренца остался неизменным). Таким образом, в этом случае операция ***T*** выполняет все эти преобразования. Тот факт, что мы проделываем больше, чем просто обращаем все скорости частиц, никак не влияет на обсуждение, которое следует дальше в тексте. Все, что имеет значение, это то, что движение частицы в одном направлении точно так же согласуется с законами физики, как и движение частицы в обратном направлении. То, что мы обращаем любые магнитные поля, которым случилось присутствовать, чтобы выполнить это, не имеет особого значения.

Ситуация становится более тонкой в случае слабых ядерных взаимодействий. Слабые взаимодействия описываются особой квантовой теорией поля (коротко обсужденной в Главе 9), и общая теорема показывает, что теории квантовых полей (при условии, что они локальны, унитарны и Лоренц-инвариантны, – что только и представляет интерес) всегда симметричны относительно *объединенных* операций сопряжения заряда *С* (которая заменяет частицы на их античастицы), четности *P* (которая переворачивает положения относительно исходных) и чистой операции обращения времени *T* (которая заменяет *t* на *–t*). Так что мы должны переопределить операцию ***T***, заменив ее на операцию *СРТ*, но если ***Т***-инвариантность безусловно требует, чтобы была введена операция *СР*, тогда ***Т*** больше не может быть просто интерпретирована как обратное прохождение частицами их шагов (поскольку, например, сама идентификация частиц будет изменена таким ***Т*** – частицы будут заменены на их античастицы, – а потому обратного прохождения оригинальными частицами их шагов быть не может). Как оказывается, имеются некоторые экзотические экспериментальные случаи, в которых мы попадаем в эту ситуацию. Имеются определенные виды частиц (К-мезоны, В-мезоны), чья манера поведения *СРТ*-инвариантна, но не инвариантна относительно одной операции обращения времени *T*. Это было установлено косвенно в 1964 Джеймсом Кронином, Валом Фитчем и их сотрудниками (за что Кронин и Фитч получили в 1980 Нобелевскую премию) через показ, что К-мезоны нарушают *СР*-симметрию (подразумевая, что они должны нарушать *Т*-симметрию, чтобы не нарушать *СРТ*-симметрию). Более недавно нарушение *Т*-симметрии было непосредственно установлено в эксперименте *CPLEAR* в ЦЕРНе и в эксперименте *KTEV* в Фермилабе. Грубо говоря, эти эксперименты показали, что если вы представили фильм с записью процессов, содержащих эти мезоны, вы будете в состоянии определить, проецируется ли этот фильм в правильном прямом направлении времени, или в обратном. Другими словами, эти особые частицы могут различать прошлое и будущее. Что остается неясным, однако, имеет ли это какое-нибудь отношение к стреле времени, которую мы ощущаем в повседневном контексте. Как-никак, это экзотические частицы, которые могут быть произведены на короткие моменты в высокоэнергетических столкновениях, но они не составляют привычные материальные объекты. Для многих физиков, включая меня, кажется маловероятным, что необратимость времени, проявляемая этими частицами, играет роль в ответе на загадку стрелы времени, так что мы не будем дальше обсуждать этот исключительный пример. Но правда в том, что никто не знает этого с уверенностью.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r72))

3. Я иногда нахожу, что имеется сильное нежелание согласиться с теоретическим утверждением, что кусочки яичной скорлупы могли бы на самом деле собраться назад вместе в изначальное, неиспорченное яйцо. Но симметрия законов физики по отношению к обращению времени, как было с большой подробностью рассмотрено в предыдущем комментарии, подразумевает, что это то, что могло бы случиться. На микроскопическом уровне разбивание яйца есть физический процесс, затрагивающий различные молекулы, из которых состоит скорлупа. Разбивание возникает и скорлупа растрескивается, поскольку группы молекул подвергаются силам, чтобы отделить их от компактного существования в яйце. Если эти движения молекул имели бы место в обратном направлении, молекулы бы объединились назад вместе, соединив скорлупу в первоначальную форму.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r73))

4. Чтобы удержать суть современного способа размышлений об этих идеях, я пропустил некоторую очень интересную историю. Собственные раздумья Больцмана по поводу энтропии проходили через существенные усовершенствования в течение 1870х и 1880х, во время которых полезными были взаимодействия и обмены информацией с такими физиками, как Джеймс Клерк Максвелл, лорд Кельвин, Джозеф Лошмидт, Джозайя Уиллард Гиббс, Анри Пуанкаре, С.Х. Бербери и Эрнест Цермело. Фактически, Больцман сначала думал, что он сможет доказать, что энтропия всегда и абсолютно будет не уменьшаться для изолированной физической системы, а не что просто очень маловероятно получить такое уменьшение энтропии. Но возражения, выдвинутые этими и другими физиками, постепенно привели Больцмана к выделению статистического/вероятностного подхода к этой теме, одного из тех, которые все еще используются сегодня.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r74))

5. Я представляю, что все мы используем издание *Войны и Мира* из Библиотеки Современной Классики (*Modern Library Classics*) в переводе на английский Констанции Гарнетт, содержащем 1 386 страниц текста.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r75))

6. Склонный к математике читатель должен заметить, что поскольку числа могут стать столь велики, энтропия на самом деле определяется как логарифм числа возможных перестановок, деталь, которая нас тут не касается. Однако, как принципиальный момент, это важно, поскольку очень удобно для энтропии быть так называемой *экстенсивной* величиной, что означает, что если вы объедините две системы вместе, энтропия их союза есть сумма их индивидуальных энтропий. Это остается правильным только для логарифмической формы энтропии, так как число перестановок в такой ситуации задается произведением индивидуальных перестановок, так что логарифм числа перестановок является аддитивным.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r76))

7. Поскольку мы можем, *в принципе*, предсказать, где приземлится каждая страница, вы можете озаботиться, что имеется дополнительный элемент, который определяет расположение страниц: как вы соберете страницы вместе в аккуратную пачку. Это не имеет отношения к обсуждаемой физике, но в случае, если вас это беспокоит, представьте, что вы согласились, что вы будете подбирать страницы одну за одной, начиная с той, которая к вам ближе всего, затем подберете ближайшую за этой страницу и так далее. (И, например, вы можете согласиться измерять расстояния от ближайшего угла страницы, о которой идет речь).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r77))

8. Надежда преуспеть в расчете движения даже нескольких страниц с точностью, требуемой для предсказания их (страниц) упорядочения (после применения некоторого алгоритма складывания их в кучу, такого как в предыдущем комментарии), на самом деле *экстремально* оптимистична. В зависимости от гибкости и веса бумаги такой сравнительно "простой" расчет может еще быть за пределами сегодняшних вычислительных возможностей.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r78))

9. Вы можете обеспокоиться, что имеется фундаментальное отличие между определением понятия энтропия для расположений страниц и определения его для коллективов молекул. Так расположения страниц дискретны – вы можете пересчитать их одно за одним, так что, хотя полное число возможностей может быть большим, оно конечно. В противоположность этому, движение и положение даже отдельной молекулы непрерывно – вы не можете пересчитать их одно за одним, так что тут (по крайней мере, в соответствии с классической физикой) имеется бесконечное число возможностей. Так как можно точно провести оценку молекулярных перестановок? Ну, короткий ответ состоит в том, что это хороший вопрос, но один из тех, на которые найдены полные ответы, – так что, если этого достаточно, чтобы успокоить вашу тревогу, свободно пропускайте следующий текст. Более длинный ответ требует немного математики, так что без знания основ это может быть тяжело проследить полностью. Физики описывают классическую многочастичную систему, привлекая*фазовое пространство*, 6N-мерное пространство (где N есть число частиц), в котором каждая точка обозначает все положения и скорости частиц (каждое такое положение требует три числа, что относится и к каждой скорости, в итоге получаем 6N-мерность фазового пространства). Существенный момент тот, что фазовое пространство может быть разбито на такие области, что все точки данной области соответствуют перестановкам скоростей и координат молекул, которые имеют одинаковые в общем и целом макроскопические свойства и вид. Если конфигурация молекул изменилась от одной точки в данной области фазового пространства к другой точке той же области, макроскопические оценки найдут эти две конфигурации неразличимыми. Теперь, вместо того, чтобы пересчитывать число точек в данном регионе – самая прямая аналогия подсчета числа различных перестановок страниц, но которая, несомненно, приведет к бесконечному ответу, – физики определяют энтропию в терминах *объема* каждой области в фазовом пространстве. Больший объем означает больше точек, а потому больше энтропия. А объем области, даже области в многомерном пространстве, есть нечто, чему можно дать строгое математическое определение. (Математически необходимо выбрать нечто, именуемое мерой, и, для склонного к математике читателя, я замечу, что мы обычно выбираем меру, которая однородна по всем микросостояниям, совместимым с данным макросостоянием, – что означает, каждая микроскопическая конфигурация, связанная с данным выбором макроскопических свойств, предполагается равновероятной).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r79))

10. Особенно, мы знаем один путь, на котором это *должно* произойти: если несколькими днями ранее молекулы СО2 первоначально были в бутылке, тогда мы знаем из нашего обсуждения выше, что если прямо сейчас вы одновременно замените на противоположные скорости всех и каждой молекулы СО2, также каждой молекулы или атома, которые любым образом взаимодействовали с молекулами СО2, и подождете те же несколько дней, молекулы *соберутся* все назад вместе в бутылку. Но это обращение скорости не та вещь, которую можно исполнить на практике, не считая того, что это, возможно, произойдет по их собственному согласию. Я должен заметить, что было доказано математически, что если вы ждете достаточно долго, молекулы СО2 по своей собственной воле *все найдут свой путь назад в бутылку*. Результат, доказанный в 1800е французским математиком Жозе Лиувиллем, можно использовать для установления того, что известно как реккурентная теорема Пуанкаре. Эта теорема показывает, что если вы достаточно долго ждете, система с конечной энергией и ограниченная конечным пространственным объемом (вроде молекул СО2 в закрытом помещении) *будет возвращаться в состояние, произвольно близкое к ее начальному состоянию* (в нашем случае все молекулы СО2 расположились в бутылке колы). Загвоздка в том, как долго вам придется ждать, чтобы это случилось. Для систем с любым, даже малым числом составляющих теорема показывает, что вы, как правило, будете ждать намного дольше возраста вселенной, пока составляющие по своему собственному согласию перегруппируются в их начальную конфигурацию. Тем не менее, с принципиальной точки зрения, соблазнительно отметить, что любая пространственно ограниченная физическая система при бесконечном терпении и долговечности будет возвращаться к своей начальной конфигурации.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r80))

11. Вы можете удивиться тогда, почему вода всегда превращается в лед, поскольку это приводит к тому, что молекулы Н2О становятся более упорядоченными, что означает, достигшими меньшей, а не высокой энтропии. Ну, грубый ответ в том, что когда жидкая вода превращается в твердый лед, она отдает энергию в окружающую среду (в противоположность тому, что происходит когда лед тает, когда он берет энергию из окружения), а это повышает энтропию окружающей среды. При достаточно низких температурах окружения, это значит, ниже 0 градусов Цельсия, возрастание в окружающей энтропии превосходит уменьшение энтропии воды, так что замерзание становится интересным с точки зрения энтропии. Поэтому холодной зимой формируется лед. Аналогично, когда кубики льда формируются в морозильнике вашего холодильника, их энтропия уменьшается, но сам холодильник накачивает тепло в окружающую среду, и если это принять во внимание, получим полное нетто-возрастание энтропии. Более точный ответ для склонного к математике читателя заключается в том, что спонтанные явления того сорта, который мы обсуждаем, управляются тем, что известно как *свободная энергия*. Интуитивно свободная энергия есть та часть энергии системы, которая может быть использована для совершения работы. Математически свободная энергия *F* определяется соотношением *F = U – TS*, где *U* обозначает полную энергию, *T* обозначает температуру, а *S* обозначает энтропию. Система будет подвержена спонтанному изменению, если это приведет к уменьшению ее свободной энергии. При низких температурах падение в *U*, связанное с жидкой водой, переведенной в твердый лед, перевешивает уменьшение в *S* (перевешивает возрастание в *–TS*), поэтому переход будет происходить.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r81))

12. По поводу более ранней дискуссии о том, как прямое применение энтропийных рассуждений приведет нас к заключению, что память и исторические записи не являются заслуживающими доверия оценками прошлого, см. C. F von Weizsäсker in *The Unity of Nature* (New York: Farrar, Straus, and Giroux, 1980), 138-46, (первоначально опубликовано в *Annalen der Physik* 36 (1939)). По поводу превосходной недавней дискуссии см. David Albert in *Time and Chance*(Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r82))

13. Фактически, поскольку законы физики не видят отличий между направлениями вперед и назад во времени, объяснение полностью сформированных кубиков льда получасом раньше, в 10:00 вечера, будет *точно* столь же абсурдным, – говоря на языке энтропии, – как и предсказание, что на полчаса позже, в 11 вечера маленькие кусочки льда вырастут в полностью сформированные кубики льда. Напротив, объяснение наличия жидкой воды в 10:00 вечера, которая медленно формирует маленькие кусочки льда к 10:30 вечера является *точно* столь же осмысленным, как и предсказание, что в 11:00 вечера маленькие кусочки льда растают в жидкую воду, что является привычным и полностью ожидаемым. Это последнее объяснение с точки зрения наблюдения в 10:30 вечера является совершенно симметричным во времени и, более того, согласуется с последующими наблюдениями.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r83))

14. Особенно внимательный читатель может подумать, что я был предубежден в дискуссии с фразой "специфическое прошлое", поскольку это вводит темпоральную асимметрию. Что я имел в виду на более точном языке, так это то, что нам нужны специальные условия, чтобы преобладал (по меньшей мере) один из концов темпорального измерения. Как станет ясно, специальные условия означают граничное условие низкой энтропии и я буду называть "прошлым" направление, в котором это условие удовлетворяется.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r84))

15. Идея, что стрела времени требует низкоэнтропийного прошлого имеет долгую историю, восходя к Больцману и другим; она обсуждалась в некоторых деталях в книге Hans Reichenbach, *The Direction of Time* (Mineola, N.Y.: Dover Publications, 1984), и отстаивалась особенно интересным количественным способом в книге Roger Penrose, *The Emperor's New Mind* (New York: Oxford University Press, 1989), pp. 317-18.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r85))

16. Вспомним, что наше обсуждение в этой главе не принимает во внимание квантовую механику. Как показал Стивен Хокинг в 1970е, когда рассматриваются квантовые эффекты, черные дыры позволяют некоторому количеству радиации просачиваться наружу, но это не влияет на их статус самых высокоэнтропийных объектов в косомосе.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r86))

17. Естественный вопрос, откуда мы знаем, что не имеются некоторые будущие ограничения, которые также имеют влияние на энтропию. Основной момент в том, что мы не знаем, и некоторые физики даже предлагали эксперименты, чтобы обнаружить возможное влияние, которое такие будущие ограничения могут оказывать на вещи, которые мы можем наблюдать сегодня. Интересная статья, обсуждающая возможность будущих и прошлых ограничений на энтропию, Murray Gell-Mann and James Hartle, "Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology," in *Physical Origins of Time Asymmetry*, J.J. Halliwell, J. Perez-Mercader, W.H. Zurek, eds. (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1996), а также другие статьи в частях 4 и 5 этого сборника.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r87))

18. На протяжении этой главы мы говорили о стреле времени, ссылаясь на очевидные факты, что имеется асимметрия вдоль оси времени (оси времени любого наблюдателя) пространства-времени: гигантское разнообразие последовательностей событий выстраивается в одном порядке вдоль оси времени, но обратное упорядочение таких событий появляется редко, если вообще появляется. На протяжении лет физики и философы выделяли эти последовательности событий в подкатегории, чьи темпоральные асимметрии могут, в принципе, быть подвергнуты логически независимому объяснению. Например, тепло перетекает от горячих объектов к более холодным, но не от холодных объектов к горячим; электромагнитные волны испускаются вовне из источников вроде звезд и электрических лампочек, но, кажется, никогда не собираются внутрь таких источников; вселенная выглядит однородно расширяющейся, но не сходящейся; и мы помним прошлое, но не будущее (это называется, соответственно, термодинамической, электромагнитной, космологической и психологической стрелой времени). Все эти явления асимметричны во времени, но они могут, в принципе, приобрести свою временную асимметрию из совершенно различных физических принципов. Мой взгляд, который многие разделяют (но другие нет), что, исключая, возможно, космологическую стрелу времени, эти явления темпоральной асимметрии фундаментально не отличаются и, в конце концов, поддаются одинаковому объяснению, – которое мы описываем в этой главе.

Например, почему электромагнитная радиация путешествует в виде расширяющихся вовне волн, но не в виде сходящихся внутрь волн, даже если оба вида волн являются совершенно прекрасными решениями уравнений электромагнетизма Максвелла? Ну, потому, что наша вселенная имеет низкоэнтропийные, когерентные, упорядоченные источники таких расходящихся волн – звезды и электрические лампочки, чтобы назвать парочку, – и существование этих упорядоченных источников происходит из даже еще более упорядоченного окружения в отправной точке вселенной, как обсуждается в главном тексте. Психологическая стрела времени тяжелее для обращения, поскольку тут очень много от микропсихических основ человеческого мышления, которые нам еще предстоит понять. Но большой прогресс был сделан в понимании стрелы времени, когда она подходит к компьютерам – предприятие, завершение и затем производство записей вычислений является основой вычислительной последовательности, чьи энтропийные свойства хорошо поняты (как исследовано Чарлзом Беннетом, Рольфом Ландауером и другими) и подходят прямо ко второму закону термодинамики. Таким образом, если человеческое мышление может быть связано с процессами вычисления, может быть применено сходное термодинамическое объяснение. Отметим также, что асимметрия, связанная с тем фактом, что вселенная расширяется, а не стягивается, связана со стрелой времени, которую мы исследовали, но логически отличается от нее. Если расширение вселенной замедлится, остановится, а затем повернет к сжатию, стрела времени все еще будет смотреть в том же направлении. Физические процессы (разбивание яиц, старение людей и так далее) все еще будут происходить в обычном направлении, даже если расширение вселенной сменится сжатием.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r88))

19. Для склонного к математике читателя отметим, что, когда мы делаем такой вид вероятностного утверждения, мы предполагаем особую меру вероятности: такую, которая однородна относительно всех микросостояний, совместимых с тем, что мы видим прямо сейчас. Имеются, конечно, другие меры, которые мы могли бы привлечь. Например, Дэвид Альберт (David Albert in *Time and Chance*) отстаивает использование вероятностной меры, которая однородна по всем микросостояниям, совместимым с тем, что мы видим сейчас, и с тем, что он называет *гипотезой прошлого* – очевидным фактом, что вселенная началась с низкоэнтропийного состояния. Используя эту меру, мы удаляем из рассмотрения все истории, кроме тех, которые совместимы с низкоэнтропийным прошлым, подтверждаемым нашей памятью, записями и космологическими теориями. При таком способе мышления нет вероятностных загадок по поводу вселенной с низкой энтропией; она начала этот путь, по предположению, с вероятностью 1. Имеется все еще та же гигантская головоломка, *почему* она начала таким образом, даже если это и не озвучивается в вероятностном контексте.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r89))

20. Вы можете попытаться утверждать, что известная вселенная имела очень рано низкую энтропию просто потому, что она была намного меньше по размеру, чем сегодня, а потому – подобно книге с несколькими страницами – допускала немного меньше перестановок своих составляющих. Но для нее самой это фокус не проходит. Даже малая вселенная может иметь гигантскую энтропию. Например, одна из возможных (хотя маловероятных) судеб для нашей вселенной заключается в том, что текущее расширение однажды остановится, повернется, и вселенная станет сжиматься, закончив в так называемом Большом хрусте. Расчеты показывают, что даже если размер вселенной будет уменьшаться во время фазы сжатия, энтропия будет продолжать расти, что демонстрирует, что малый размер не гарантирует малой энтропии. В Главе 11, однако, мы увидим, что малый начальный размер вселенной играет роль в нашем сегодняшнем, лучшем объяснении низкоэнтропийного начала.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r90))

**Глава 7**

1. Хорошо известно, что уравнения классической физики не могут быть решены точно, если вы изучаете движение трех или более взаимодействующих тел. Так что, даже в классической физике любые реальные предсказания о движении большого набора частиц будут с неизбежностью приблизительными. Суть, однако, в том, что тут не имеется фундаментального предела, насколько точно может быть это приближение. Если бы мир управлялся классической физикой, тогда с помощью все более мощных компьютеров и все более точных начальных данных относительно положений и скоростей мы могли бы подобраться все ближе к точному ответу.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r91))

2. В конце Главы 4 отмечено, что результат Белла, Аспекта и других не отменяет возможности, что частицы всегда имеют определенные положения и скорости, даже если мы никогда не можем определить такие свойства одновременно. Более того, версия квантовой механики Бома явно реализовывает такую возможность. Таким образом, хотя широко распространенное мнение, что электрон не имеет положения до измерения, является стандартной особенностью общепринятого подхода к квантовой механике, строго говоря, это слишком сильно для общего утверждения. Однако, имеем в виду, что в подходе Бома, как мы будем обсуждать далее в этой главе, частицы "сопровождаются" вероятностными волнами; это означает, теория Бома всегда привлекает частицы *и* волны, тогда как стандартный подход воображает дополнительность, которая грубо может быть обобщена как частицы *или* волны. Таким образом, заключение, на которое мы указываем, – что квантовомеханическое описание прошлого будет совершенно неполным, если мы говорили исключительно о частицах, двигавшихся от одной точки в пространстве в каждый определенный момент во времени (что мы должны были делать в классической физике), – тем не менее, верно. В общепринятом подходе к квантовой механике мы также должны включить изобилие других положений, которые частица могла бы занимать в любой данный момент, тогда как в подходе Бома мы должны также включить "пробную" волну, объект, который также распределяется по изобилию других положений. (Подготовленный читатель должен заметить, что пробная волна есть та же волновая функция общепринятой квантовой механики, хотя ее воплощение в теории Бома несколько отличается). Чтобы избежать бесконечных оговорок, последующую дискуссию будем проводить с точки зрения общепринятой квантовой механики (более широко используемого подхода), оставив ссылки на Бома и другие подходы до последней части главы.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r92))

3. Для математического, но и в высшей степени педагогического рассмотрения см. R. P. Feynman and A. R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals* (Burr Ridge, 111.; McGraw-Hill Higher Education, 1965).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r93))

4. Вы можете попытаться привлечь дискуссию Главы 3, в которой мы изучили, что при скорости света время останавливается, чтобы доказать, что с точки зрения фотона все моменты времени есть один и тот же момент, так что фотон "знает", как установлен выключатель детектора, когда он проходет через лучевой разветвитель. Однако, эти эксперименты могут быть проведены и с другими видами частиц, такими как электроны, которые двигаются медленнее света, а результаты останутся неизменными. Таким образом, эта точка зрения не освещает существенной физики.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r94))

5. Экспериментальные настройки, а также реально подтвержденные экспериментальные результаты, обсуждались исходя из Y. Kim, R. Yu, S. Kulik, Y. Shih, M. Scully, *Phys. Rev. Lett*, vol. 84, no. 1, pp. 1-5.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r95))

6. Квантовая механика также может базироваться на эквивалентном уравнении, представленном в другой форме (известной как матричная механика) Вернером Гейзенбергом в 1925. Для склонного к математике читателя уравнение Шредингера есть: *НΨ(x,t) = ihdΨ(x,t)/dt*, где *Н* обозначает гамильтониан, *Ψ*обозначает волновую функцию, а *h* есть постоянная Планка.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r96))

7. Подготовленный читатель отметит, что я пропустил тут одно тонкое место. А именно, мы должны были взять комплексно сопряженную волновую функцию частицы, чтоб обеспечить, что она решает обращенную во времени версию уравнения Шредингера. Это означает, что описанный в комментарии 2 к Главе 6 оператор *Т* действует на волновую функцию *Ψ(x,t)* и отображает ее в *Ψ\*(x,–t)*. Это не имеет существенного влияния на обсуждение в тексте.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r97))

8. Бом на самом деле заново открыл и разработал дальше подход, который восходит к принцу Луи де Бройлю, так что этот подход иногда называют подходом де Бройля-Бома.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r98))

9. Для склонного к математике читателя заметим, что подход Бома локален в *конфигурационном* пространстве, но определенно *нелокален* в реальном пространстве. Изменения волновой функции в одном месте в реальном пространстве немедленно оказывают влияние на частицы, расположенные в других, удаленных местах.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r99))

10. Для исключительно ясного обсуждения подхода Жирарди-Римини-Вебера и его применения к пониманию квантового запутывания см. J. S. Bell, "Are There Quantum Jumps?" in *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r100))

11. Некоторые физики рассматривают вопросы из этого списка как не относящиеся к делу и являющиеся продуктом ранней путаницы в отношении квантовой механики. Волновая функция, утверждает эта точка зрения, является просто теоретическим средством, чтобы делать (вероятностные) предсказания, и не должна соответствовать никакой, кроме математической, реальности (точка зрения, которую иногда называют подходом "Заткнись и вычисляй", поскольку он поощряет использовать квантовую механику и волновые функции, чтобы делать предсказания, не задумываясь сильно о том, что на самом деле означают и делают волновые функции). Вариант этой темы утверждает, что волновые функции никогда на самом деле не коллапсируют, но что взаимодействия с окружающей средой делают *кажущимся* такой коллапс. (Мы коротко обсудим версию такого подхода). Я симпатизирую этим идеям и, фактически, строго верю, что рано или поздно мы будем обходиться без услуг понятия коллапса волновой функции. Но я не нахожу первый подход удовлетворительным, так же я не готов отказаться от понимания, что происходит в мире, когда мы "не смотрим", а второй подход – поскольку, на мой взгляд, это правильное направление, – требует дальнейших математических разработок. Основной момент в том, что измерение вызывает нечто, что *есть*, или*похоже на* или *маскируется под* коллапс волновой функции. Или через лучшее понимание влияния окружения, или через некоторые другие подходы, которые еще должны быть предложены, этот явный эффект требует рассмотрения, а не просто выбрасывания из головы.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r101))

12. Имеются другие спорные проблемы, связанные с многомировой интерпретацией, которые уходят дальше ее очевидной экстравагантности. Например, имеются технические проблемы определения понятия вероятности в контексте, который содержит бесконечное число копий каждого из наблюдателей, чьи измерения, как предполагается, подвержены этим вероятностям. Если данный наблюдатель на самом деле является одной из многих копий, в каком смысле мы можем сказать, что он или она имеет особую вероятность измерить этот или тот результат? Кто на самом деле есть "он" или "она"? Каждая копия наблюдателя будет измерять – с вероятностью 1 – любой результат, какой бы ни был получен для особой копии вселенной, в которой он или она находится, так что полная вероятностная схема требует (и требовала, и продолжает требовать) осторожной проверки в многомировой схеме. Более того, более техническое замечание, склонный к математике читатель осознает, что в зависимости от того, насколько точно определяются многие миры, может потребоваться выбор преимущественного собственного базиса. Но как должен быть выбран этот собственный базис? Была масса дискуссий и еще больше статей по этим вопросам, но на сегодняшний день нет универсально принятой резолюции. Коротко обсужденный подход, базирующийся на декогеренции, частично проясняет эти проблемы и предлагает особый взгляд на проблему выбора собственного базиса.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r102))

13. Подход Бома или де Бройля-Бома никогда не получал широкого внимания. Возможно, одна из причин этого, как обратил внимание Джон Белл в своей статье "The Impossible Pilot Wave," в сборнике *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, что ни де Бройль, ни Бом особенно не испытывали нежных чувств к тому, что сами разработали. Но еще раз, как указал Белл, подход де Бройля-Бома намного превзошел неопределенность и субъективность большинства стандартных подходов. Если нет других причин, даже если подход неправильный, стоит знать, что частицы могут иметь определенные положения и определенные скорости во все времена (но вне нашей способности их измерить, даже в принципе) и все еще полностью соответствовать предсказаниям стандартной квантовой механики – неопределенность и все остальное. Другой аргумент против подхода Бома тот, что нелокальность в этой схеме более "суровая", чем в стандартной квантовой механике. При этом она означает, что подход Бома имел нелокальные взаимодействия (между волновой функцией и частицей) как центральный элемент теории с самого начала, тогда как в квантовой механике нелокальность более глубоко скрыта и появляется только через нелокальные корреляции между далеко разнесенными измерениями. Но, как доказывали сторонники этого подхода, раз уж нечто скрыто, оно от этого не станет меньше присутствовать и, более того, так как стандартный подход находится в неопределенности относительно проблемы квантового измерения, – самое место, где нелокальнось проявляется, – однажды, когда проблема будет полностью решена, нелокальность в итоге может и не быть столь скрытой. Другие доказывали, что имеются препятствия, чтобы сделать релятивистскую версию подхода Бома, хотя прогресс на этом фронте так же был сделан (см., например, John Bell, *Beables for Quantum Field Theory* в отмеченном выше сборнике). Так что определенно стоит держать этот альтернативный подход в уме, хотя бы только как контраст против опрометчивых заключений о том, что квантовая механика неизбежно в себя включает. Для склонного к математике читателя прекрасное рассмотрение теории Бома и проблем квантового запутывания можно найти в книге Tim Maudlin, *Quantum Non-locality and Relativity* (Maiden, Mass.: Blackwell, 2002).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r103))

14. Для детального, хотя и формального обсуждения стрелы времени в целом и роли декогерентности в частности, см. H. D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time* (Heidelberg: Springer, 2001).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r104))

15. Именно чтобы дать вам ощущение, как быстро наступает декогерентность – как быстро влияние окружающей среды подавляет квантовую интерференцию и при этом приводит квантовые вероятности к привычным классическим, – приведем несколько примеров. Числа приблизительны, но смысл, который они передают, ясен. Волновая функция частички пыли, плавающей в вашей жилой комнате и бомбардируемой дрожаниями молекул воздуха, будет декогерентной через примерно миллиардную от миллиардной от миллиардной от миллиардной (10–36) доли секунды. Если частичка пыли содержится в совершенной вакуумной камере и подвергается только взаимодействиям с солнечным светом, ее волновая функция будет декогерентной чуть медленее, чем за тысячную от миллиардной от миллиардной (10–21) доли секунды. И если частичка пыли плавает в темнейших глубинах пустого пространства и подвергается только взаимодействиям с реликтовыми микроволновыми фотонами от Большого взрыва, ее волновая функция будет декогерентной примерно за миллионную долю секунды. Эти числа экстремально малы, что показывает, что декогерентизация для чего-то даже столь мельчайшего, как частица пыли, происходит очень быстро. Для более крупных объектов декогерентизация происходит еще быстрее. Потому не удивительно, что даже если наша вселенная квантовая, мир вокруг нас выглядит так, как он выглядит. (См., например, E. Joos, "Elements of Environmental Decoherence," in *Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems*, Ph. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O. Stamatescu, eds. [Berlin: Springer, 2000]).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r105))

**Глава 8**

1. Чтобы быть более точным, симметрия между законами в Коннектикуте и законами в Нью-Йорке использует *как* трансляционную симметрию, *так и*вращательную симметрию. Когда вы выступаете в Нью-Йорке, вы не только изменили свое положение из Коннектикута, но, более чем вероятно, вы предприняли ваше выступление в некотором ином направлении (запад вместо севера, возможно), чем во время подготовки.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r106))

2. Законы движения Ньютона обычно описываются как применимые для "инерциальных наблюдателей", но если более пристально посмотреть, как такие наблюдатели определяются, получается циклическая ситуация: инерциальные наблюдатели это те наблюдатели, для которых действуют законы Ньютона. Хороший способ подумать о том, что на самом деле происходит, тот, что законы Ньютона притягивают наше внимание к большому и особенно удобному классу наблюдателей: к тем, чье описание движения полностью и количественно подходит под ньютоновскую схему. По определению это и есть инерциальные наблюдатели. На практике инерциальные наблюдатели это те, на кого не действуют силы любого вида, – это означает, наблюдатели, которые не испытывают ускорения. ОТО Эйнштейна, в отличие от этого, применима ко всем наблюдателям, не зависимо от состояния их движения.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r107))

3. Если бы мы жили в эпоху, во время которой *все* изменения были бы остановлены, мы бы не ощущали течения времени (все функции тела и мозга должны были бы быть также заморожены). Но означало бы это, что пространственно-временной блок на Рис. 5.1 подошел к концу, или, напротив, он продолжался бы без изменений вдоль оси времени, – что означает, должно ли время было бы подойти к концу или должно было бы еще существовать в некотором формальном, обобщенном смысле, – гипотетический вопрос, который как тяжел для ответа, так и в значительной степени не имеет отношения ко всему, что мы можем измерять или переживать. Заметим, что эта гипотетическая ситуация отличается от состояния максимального беспорядка, в котором энтропия не может больше расти, но микроскопические изменения вроде движения туда-сюда молекул газа все еще имеют место.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r108))

4. Космическое микроволновое излучение было открыто в 1964 учеными Лаборатории Белл Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном во время тестирования большой антенны, предназначенной для связи со спутниками. Фоновый шум, с которым столкнулись Пензиас и Вильсон, оказалось невозможно удалить (даже после того, как они выбросили птичий помет – "белый шум" – из внутренностей антенны), и с ключевыми прозрениями Роберта Дике из Принстона и его студентов Петера Ролла и Дэвида Вилинсона вместе с Джимом Пиблсом в конце концов было осознано, что антенна улавливала микроволновую радиацию, которую произвел Большой взрыв. (Важная работа в космологии, которая установила платформу для этого открытия, была проведена ранее Георгием Гамовым, Ральфом Алфером и Робертом ). Как мы обсуждаем далее в последующих главах, фоновая радиация дает нам подлинную картину вселенной, когда ей было около 300 000 лет. Это было, когда электрически заряженные частицы вроде электронов и протонов, которые нарушали движение лучей света, объединились для формирования электрически нейтральных атомов, которые в общем и целом позволили свету путешествовать свободно. С тех самых пор такой древний свет, – произведенный на ранних этапах вселенной, – беспрепятственно путешествовал и сегодня заполнил все пространство микроволновыми фотонами.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r109))

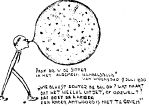
5. Физическое явление, затронутое здесь, как обсуждается в Главе 11, известно как *красное смещение*. Обычные атомы, такие как водород и кислород, эмитируют свет с длинами волн, которые хорошо классифицированы лабораторными экспериментами. Когда такие вещества входят в состав галактик, которые уносятся прочь, испущенный ими свет удлиняется, почти как сирена полицейского автомобиля, который уносится прочь, также удлиняется, проводя к падению высоты звука. Поскольку красный свет это свет с самой большой длиной волны, который может быть виден невооруженным глазом, это растяжение света называется эффектом красного смещения. Величина красного смещения растет с ростом скорости убегания, а потому, измеряя достигнутые длины волн и сравнивая их с лабораторными результатами, можно определить скорость удаленного объекта. (На самом деле это один вид красного смещения, такой же как эффект Допплера. Красное смещение может быть также вызвано гравитацией: фотоны удлиняются, когда выкарабкиваются из гравитационного поля).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r110))

6. Более точно, склонный к математике читатель отметит, что частица массы *m*, находящаяся на поверхности шара радиуса *R* и плотности массы ρ, ощущает ускорение *d2R/dt2*, равное (4π/3)R3Gρ/R2, так что *(1/R)d2R/dt2 = (4π/3)Gρ*. Если мы формально идентифицируем *R* с радиусом вселенной, а *ρ* с плотностью массы вселенной, это будет уравнение Эйнштейна для эволюции размера вселенной (в предположении отсутствия давления).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r111))

7. См. P.J.E. Peebles, P*rinciples of Physical Cosmology* (Princeton: Princeton University Press, 1993), p. 81.



Надпись гласит: "Но кто на самом деле надул этот шар? Что привело к тому, что вселенная расширяется или раздувается? Эту работу сделала Лямбда! Другой ответ не может быть дан" (Перевод Конраада Шалма). Лямбда обозначает нечто, известное как космологическая константа, идея, с которой мы столкнемся в Главе 10.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r112))

8. Чтобы избежать путаницы, позвольте мне заметить, что недостатком модели с монеткой является то, что каждая монетка по существу идентична любой другой, тогда как это определенно не верно для галактик. Но суть в том, что на самых больших масштабах – масштабах порядка 100 миллионов световых лет – индивидуальные отличия между галактиками, как все уверены, усредняются, так что, когда мы анализируем гигантские объемы пространства, общие свойства каждого такого объема предельно похожи на свойства любого другого такого объема.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r113))

9. Вы могли бы путешествовать прямо по внешнему краю черной дыры и оставаться там, включив двигатели, чтобы избежать затягивания в нее. Сильное гравитационное поле черной дыры проявляется как интенсивная деформация пространства-времени, что приводит к тому, что ваши часы будут тикать намного медленнее, чем они это делали бы в более обычном положении в галактике (как в относительно пустом пространственном просторе). Еще раз, продолжительность времени, измеренная по вашим часам, совершенно правомерна. Но, как и при замедлении времени при высокой скорости, это полностью индивидуальная точка зрения. Когда мы анализируем свойства вселенной как целого, более удобно иметь более широко применимое и согласованное понятие истекшего времени, и это обеспечивается часами, которые двигаются вместе с космическим течением пространственного расширения и которые подвержены намного более спокойному, намного более усредненному гравитационному полю.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r114))

10. Склонный к математике читатель заметит, что свет путешествует вдоль нулевых геодезических пространственно-временной метрики, которые для определенности мы можем выбрать равными *ds2 = dt2 – a2(t)(dx2)*, где *dx2 = dx12 + dx22 + dx32*, а *xi* есть сопутствующие координаты. Выбирая *ds2 = 0*, что соответствует нулевым геодезическим, мы можем записать *∫tt0 (dt/a(t))* для полного сопутствующего расстояния, которое свет, испущенный в момент *t*, может пройти до момента *t0*. Если мы умножим это на величину масштабного фактора *a(t0)* в момент *t0*, мы рассчитаем физическое расстояние, которое прошел свет за этот временной интервал. Этот алгоритм может быть широко использован, чтобы рассчитать, как далеко свет может улететь за данный временной интервал, обнаруживая, являются ли две точки в пространстве, например, причинно связанными. Как вы можете видеть, для ускоренного расширения даже для достаточно большого *t0* интеграл ограничен, показывая, что свет никогда не достигнет достаточно удаленного сопутствующего положения. Таким образом, во вселенной с ускоренным расширением имеются места, с которыми мы никогда не сможем связаться, и наоборот, области, которые никогда не смогут связаться с нами. О таких областях говорят как о находящихся за пределами нашего космического горизонта.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r115))

11. Для анализа геометрической формы математики и физики используют количественный подход к кривизне, разработанный в девятнадцатом столетии, который сегодня является частью математической области знаний, известной как дифференциальная геометрия. Один неформальный способ размышления об измерении кривизны заключается в изучении треугольников, нарисованных на или внутри изучаемой области. Если сумма углов треугольника равна 180 градусов, как это будет, когда он нарисован на плоской столешнице, мы говорим, что область плоская. Но если сумма углов больше или меньше 180 градусов, как это будет, когда треугольник нарисован на поверхности сферы (направленное наружу выдувание сферы из плоскости заставит сумму углов превысить 180 градусов) или на поверхности седла (вдавливание седловой поверхности внутрь из плоскости заставит сумму углов быть меньше 180 градусов), мы говорим, что поверхность кривая. Это показано на Рис. 8.6.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r116))

12. Если вы склеили противоположные вертикальные края тора-экрана вместе (что есть основания сделать, поскольку они отождествлены – когда вы проходите через один край, вы немедленно возникаете на другом, – вы получите цилиндр. И затем, если вы сделали то же самое с верхним и нижним краями (которые теперь будут иметь форму окружностей), вы получите форму пончика (бублика). Таким образом, пончик есть другой способ размышления о торе или представления тора. Одно усложнение этого представления заключается в том, что пончик больше не выглядит плоским! Однако, это на самом деле так. Используя понятие кривизны, данное в предыдущем комментарии, вы найдете, что все треугольники, нарисованные на поверхности пончика имеют углы, чья сумма равна 180 градусов. Факт, что пончик выглядит кривым, является ложным изображением того, как мы вставили двумерную поверхность в наш трехмерный мир. По этой причине в текущем контексте более удобно использовать явно неискривленные представления двух- и трехмерных торов, как это обсуждается в тексте.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r117))

13. Отметим, что мы потеряли в различении концепций формы и кривизны. Имеются три типа кривизны для полностью симметричного пространства: положительная, нулевая и отрицательная. Но две поверхности могут иметь одинаковую кривизну и все же не быть идентичными, простейшим примером является плоский видеоэкран и плоская бесконечная столешница. Таким образом, симметрия позволяет нам свести кривизну пространства к трем возможностям, но имеются в некотором смысле больше чем три формы пространства (отличающиеся тем, что математики называют глобальными свойствами), которые проявляют эти три кривизны.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r118))

14. До настоящего момента мы сосредоточивались исключительно на кривизне трехмерного пространства – кривизне пространственных сечений в пространственно-временном батоне. Однако, хотя это тяжело изобразить, во всех трех случаях пространственной кривизны (положительной, нулевой, отрицательной) все четырехмерное пространство-время искривлено со степенью кривизны, становящейся все больше, когда мы исследуем вселенную все ближе к Большому взрыву. Фактически, вблизи момента Большого взрыва четырехмерная кривизна пространства-времени возрастает настолько, что уравнения Эйнштейна отказывают. Мы обсудим это далее в последующих главах.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r119))

**Глава 9**

1. Если вы повысите температуру еще больше, вы найдете четвертое состояние материи, известное как *плазма*, в котором атомы разрушены на их составляющие частицы.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r120))

2. Имеются любопытные субстанции, такие как соли Рошелле, которые становятся менее симметричными при высоких температурах, и более симметричными при низких температурах – противоположно тому, что мы, как правило, ожидаем.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r121))

3. Одно различие между полями сил и материи выражено в *принципе исключения* Вольфганга Паули. Этот принцип показывает, что в то время как огромное количество частиц сил (вроде фотонов) могут объединяться, чтобы произвести поля, доступные доквантовому физику, такому как Максвелл, поля, которые вы видите всякий раз, когда вы заходите в темную комнату и включаете свет, частицам материи в общем случае законы квантовой физики запрещают такое кооперирование согласованным, организованным образом. (Более точно, две частицы одного и того же вида, такие как два электрона, не могут занять одинаковое состояние, тогда как для фотонов такого ограничения нет. Таким образом, поля материи в общем случае не имеют макроскопического, классического проявления).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r122))

4. В схеме квантовой теории поля каждая известная частица выглядит как возбуждение лежащего в основании поля, связанного с семейством, членом которого частица является. Фотоны есть возбуждения фотонного поля – что означает, электромагнитного поля; up-кварк является возбуждением up-кваркового поля; электрон есть возбуждение электронного поля, и так далее. Таким образом, вся материя и все силы описываются не едином квантовомеханическом языке. Ключевая проблема, что очень тяжело оказалось описать на этом языке все квантовые свойства гравитации, проблема, которую мы будем обсуждать в Главе 12.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r123))

5. Хотя поле Хиггса названо в честь Петера Хиггса, жизненно важную роль в его введении в физику и его теоретической разработке сыграло большое число других физиков, среди других – Томас Киббле, Филип Андерсон, Р. Браут и Франко Энглерт.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r124))

6. Имейте в виду, что *величина* поля задается расстоянием от центра его чаши, так что даже если поле имеет нулевую *энергию*, когда его величина находится во впадине чаши (поскольку высота над впадиной обозначает энергию поля), его величина не равна нулю.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r125))

7. В описании в тексте величина Хиггсова поля задана его расстоянием от центра чаши, так что вы можете удивиться, сколько точек на круговой впадине чаши, – которые находятся на таком же расстоянии от центра чаши, – дают любую, но *одинаковую* величину Хиггсова поля. Ответ, для склонного к математике читателя, в том, что различные точки во впадине представляют величины Хиггсова поля с одним и тем же значением, но с различными фазами (величина Хиггсова поля является комплексным числом).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r126))

8. В принципе, имеется две концепции массы, которые водятся в физике. Одна концепция описана в тексте: масса есть свойство объекта, которое сопротивляется ускорению. Иногда это понятие массы называют *инертной* массой. Вторая концепция массы имеет отношение к гравитации: масса как такое свойство объекта, которое определяет, насколько сильно он будет притягиваться гравитационным полем выбранной величины (такой как земная). Иногда это понятие массы называется *гравитационной* массой. На первый взгляд, Хиггсово поле имеет отношение только к пониманию инертной массы. Однако принцип эквивалентности ОТО декларирует, что силы, ощущаемые от ускоренного движения и от гравитационного поля неразличимы – они эквивалентны. А это означает эквивалентность между концепциями инертной и гравитационной массы. Таким образом, Хиггсово поле имеет отношение к обоим видам массы, которые мы упомянули, поскольку, согласно Эйнштейну, они одинаковы.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r127))

9. Я благодарю Рафаэля Каспера за указание, что это описание является вариацией призовой метафоры профессора Дэвида Миллера, предъявленной в ответ на требование Британского министра науки Вильяма Вальдеграве Британскому физическому обществу в 1993 объяснить, почему деньги налогоплательщиков должны быть использованы на поиски частицы Хиггса.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r128))

10. Склонный к математике читатель должен отметить, что фотоны, и W, и Z бозоны описываются в электрослабой теории как лежащие в присоединенном представлении группы *SU(2)* x *U(1)*, а потому обмениваются под действием преобразований этой группы. Более того, уравнения электрослабой теории обладают полной симметрией относительно преобразований этой группы, что является в этом смысле тем, что мы описываем частицы сил как взаимосвязанные. Более точно, в электрослабой теории фотон является особой смесью калибровочного бозона, проявляющего *U(1)* симметрию, и*U(1)* подгруппы *SU(2)*; таким образом, он тесно связан со слабым калибровочным бозоном. Однако, вследствие структуры произведения групп симметрии четыре бозона (на самом деле два W-бозона с противоположными электрическими зарядами) не полностью смешиваются под ее действием. Тогда в этом смысле слабое и электромагнитное взаимодействия являются частью единой математической схемы, но такой, которая не столь полно унифицирована, как могло бы быть. Если включить сильные взаимодействия, группа пополнится путем включения *SU(3)* фактора – "цвета" *SU(3)* – и эта группа, имея три независимых фактора, *SU(3)* х *SU(2)* x *U(1)*, только подчеркивает дальше отсутствие полного единства. Такова часть мотивировки великого объединения, обсужденного в следующей секции: великое объединение обращается к единственной, полупростой группе (Ли), – группе с единственным фактором, – которая описывает силы на больших масштабах энергии.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r129))

11. Склонный к математике читатель должен заметить, что великая теория объединения Джорджи и Глэшоу базировалась на группе *SU(5)*, которая включала *SU(3)*, группу ассоциирующуюся с сильным ядерным взаимодействием, а также *SU(2)* x *U(1)*, группу, ассоциирующуюся с электрослабым взаимодействием. В дальнейшем физики изучали следствия других потенциальных групп великого объединения, таких как *SO(10)* и *Е6*.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r130))

**Глава 10**

1. Как мы видим, взрыв Большого взрыва не был взрывом, который имел место в одной точке существовавшего ранее пространственного простора, и поэтому мы также не ищем, *где* он взорвался. Шутливое описание неполноценности Большого взрыва, которое мы использовали, следует Алану Гуту; см., например, его книгу *The Inflationary Universe* (Reading, Eng.; Perseus Books, 1997), p. xiii.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r131))

2. Термин Большой взрыв иногда используется для обозначения события, которое само произошло в момент времени нуль, приведя вселенную к существованию. Но поскольку, как мы будем обсуждать в следующей главе, уравнения ОТО не действуют в момент нуль, никто не имеет никакого понятия, чем на самом деле было это событие. Этот пробел мы имеем в виду, когда говорим, что теория Большого взрыва не включает в себя Большой взрыв. В этой главе мы ограничимся областями, в которых уравнения не отказывают. Инфляционная космология использует такие хорошо себя ведущие уравнения, чтобы обнаружить короткое взрывное разрастание пространства, которое мы обычно относим к взрыву в теории Большого взрыва. Определенно, однако, что этот подход оставляет без ответа вопрос о том, что происходило в начальный момент времени создания вселенной – если там на самом деле был такой момент.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r132))

3. Abraham Pais, *Subtle Is the Lord* (Oxford: Oxford University Press, 1982), p. 253.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r133))

4. Для склонного к математике читателя: Энштейн заменил оригинальное уравнение *Gμν = (8πG/c4)Tμν* на *Gμν + Λgμν = (8πG/c4)Tμν*, где *Λ* есть число, обозначающее величину космологической постоянной.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r134))

5. Когда я обращаюсь к массе объекта в этом контексте, я ссылаюсь на сумму полных масс его отдельных составляющих. Если, скажем, куб состоит из 1 000 атомов золота, я ссылаюсь на 1 000 масс одного такого атома. Это определение согласуется с точкой зрения Ньютона. Законы Ньютона говорят, что такой куб будет иметь массу в 1 000 раз больше массы отдельного атома золота, и что он будет весить в 1 000 раз больше, чем отдельный атом золота. В соответствии с Эйнштейном, однако, вес куба также зависит от кинетической энергии атомов (так же, как и всех других вкладов в энергию куба). Это следует из *E = mc2*: большая энергия (*Е*), безотносительно к источнику, транслируется в большую массу (*m*). Таким образом, эквивалентный способ выражения сути в том, что поскольку Ньютон не знал о *E = mc2*, его закон гравитации использует определение массы, которое не учитывает различные вклады в энергию, такие как энергия, связанная с движением.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r135))

6. Обсуждение здесь намекает на лежащую в основе физику, но не ухватывает ее полностью. Давление, оказываемое сжатой пружиной, влияет на полную энергию ящика и, как обсуждалось в предыдущем параграфе, в соответствии с ОТО, к делу имеет отношение полная энергия. Однако, момент, который я здесь объясняю, заключается в том, что само давление – не только через вклад, который оно вносит в полную энергию, – генерирует гравитацию, почти как это делают масса и энергия. В соответствии с ОТО давление гравитирует. Также заметим, что отталкивательная гравитация, на которую мы ссылаемся, является *внутренним* гравитационным полем, ощущаемым внутри области пространства, заполненного чем-то, что имеет отрицательное давление вместо положительного. В такой ситуации отрицательное давление будет давать вклад в отталкивательное гравитационное поле, действующее*внутри* области.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r136))

7. Математически космологическая константа представляется числом, обычно обозначаемым *Λ* (см. комментарий 4). Эйнштейн нашел, что его уравнения имеют полный смысл безотносительно к тому, выбрана ли *Λ* положительным или отрицательным числом. Обсуждение в тексте сосредоточено на особенно интересном для современной космологии (и современных наблюдений, как будет обсуждаться) случае, в котором *Λ* положительна, поскольку это приводит к появлению отрицательного давления и отталкивательной гравитации. Отрицательная величина *Λ* дает обычную притягивательную гравитацию. Отметим еще, что поскольку давление, оказываемое космологической постоянной, однородно, это давление не будет оказывать непосредственно какую-либо силу: только разности давлений, подобно тому, что чувствуют ваши уши, когда вы под водой, приводят к силе давления. Вместо этого сила, оказываемая космологической константой, есть чисто гравитационная сила.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r137))

8. Обычные магниты всегда имеют как северный, так и южный полюса. В отличие от этого, теории великого объединения предполагают, что могут иметься частицы, которые подобны чистому северному или чистому южному магнитным полюсам. Такие частицы называются монополями и они могли бы иметь большое влияние на стандартную космологию Большого взрыва. Они никогда не наблюдались.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r138))

9. Гут и Туе обнаружили, что переохлажденное Хиггсово поле будет действовать как космологическая константа, открытие, которое было сделано ранее Мартинусом Вельтманом и другими. Фактически, Туе говорил мне, что был ограниченный лимит страниц в *Physical Review Letters*, журнале, в который они с Гутом послали свою статью, и они не уместили в заключительные утверждения ничего о том, что их модель должна вызывать период экспоненциального расширения. Но Туе также заметил, что это было достижение Гута в осознании важности космологических последствий периода экспоненциального расширения (что будет обсуждаться позже в этой и следующей главе), и, следовательно, в помещении инфляции во фронт и в центр космологической карты.

Во временами извилистой истории открытия русский физик Алексей Старобинский нашел несколькими годами ранее другой способ генерирования того, что мы сейчас называем инфляционным расширением, работа была описана в статье, которая не была широко известна среди западных ученых. Однако, Старобинский не подчеркнул, что период такого быстрого расширения мог бы решить ключевые космологические проблемы (такие как проблемы горизонта и плоскостности, что будет коротко обсуждено), что объясняет частично, почему его работа не вызвала отклика энтузиазма, который получил Гут. В 1981 японский физик Катсушико Сато также разработала версию инфляционной космологии, а даже раньше (в 1978) русские физики Геннадий Чибисов и Андрей Линде случайно обнаружили идею инфляции, но они нашли, – когда исследовали детально, – что она допускает разновидность важной проблемы (обсуждающейся в комментарии 11), и потому не стали публиковать свой труд.

Склонный к математике читатель должен заметить, что нетрудно увидеть, как возникает ускоренное расширение. Одно из уравнений Эйнштейна есть*(d2a/dt2)/a = –4πG/3(ρ+3p)*, где *а*, *ρ* и *p* есть масштабный фактор вселенной (ее "размер"), плотность энергии и плотность давления, соответственно. Заметим, что если правая сторона этого уравнения положительна, масштабный фактор будет расти с возрастающим темпом: темп роста вселенной будет ускоряться со временем. Для Хиггсова поля, восседающего на плато, его плотность давления оказывается равной отрицательной величине его плотности энергии (то же самое справедливо для космологической константы), так что правая сторона в самом деле положительна.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r139))

10. Физика, лежащая в основании этих квантовых скачков, есть принцип неопределенности, затронутый в Главе 4. Я буду явно обсуждать применение квантовой неопределенности к полям в Главах 11 и 12, но, чтобы предварить этот материал, коротко отмечу следующее. Величина поля в данной точке пространства и темп изменения величины поля в этой точке играют ту же роль для полей, как положение и скорость (импульс) играют роль для частицы. Таким образом, точно так же, как мы не можем когда-либо знать сразу определенное положение и определенную скорость частицы, поле не может иметь определенную величину и определенный темп изменения этой величины в любой данной точке пространства. Чем более определена величина поля в данный момент, тем более неопределен темп изменения этой величины – это означает, тем более вероятно, что величина поля изменится моментом позже. А такое изменение, индуцированное квантовой неопределенностью, это то, что я имел в виду, когда ссылался на квантовые скачки величины поля.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r140))

11. Вклад Линде и Альбрехта со Стейнхардом абсолютно решающий, поскольку оригинальная модель Гута – сейчас называемая *старой инфляцией* – страдала фатальным пороком. Вспомним, что переохлажденное Хиггсово поле (или в терминологии, которую мы вводим, поле *инфлатона*) имеет величину, которая восседает на выпуклости его энергетической чаши *однородно* во всем пространстве. Так что, когда я описывал, как быстро переохлажденное поле инфлатона могло бы спрыгнуть к низшей величине энергии, вы могли бы спросить, будет ли этот квантово-индуцированный прыжок происходить везде в пространстве в одно и то же время. А ответ такой, что не будет. Вместо этого, как утверждал Гут, релаксация поля инфлатона к нулевой величине энергии имеет место через процесс, названный пузырьковым зародышеобразованием: инфлатон падает к своей нулевой величине энергии в одной точке пространства, и тут пробуждается распространяющийся вовне пузырек,чьи стенки двигаются со скоростью света, в котором инфлатон падает к нулевой величине энергии с прохождением через стенку пузырька. Гут вообразил, что много таких пузырьков с хаотически расположенными центрами в конце концов соберутся воедино, чтобы дать вселенную с нулевой энергией поля инфлатона везде. Проблема, однако, как Гут сам осознал, в том, что окружающее пузырьки пространство все еще заполнено полем инфлатона с ненулевой энергией, так что такие области будут продолжать подвергаться быстрому инфляционному расширению, растаскивая пузырьки друг от друга. Поэтому тут нет гарантии, что растущие пузырьки найдут друг друга и соединятся в большой, однородный пространственный простор. Более того, Гут утверждал, что энергия поля инфлатона не теряется, когда оно релаксирует к нулевой энергии, а конвертируется в обычные частицы материи и радиации, населяющие вселенную. Чтобы довести модель до соответствия с наблюдениями, однако, эта конверсия должна была бы давать *однородное* распределение материи и энергии по всему пространству. В механизме, который предложил Гут, эта конверсия должна была бы происходить через столкновения стенок пузырьков, но расчеты – проведенные Гутом и Эриком Вайнбергом из Колумбийского университета, а также Стивеном Хокингом, Ианом Моссом и Джоном Стюардом из Кембриджского Университета – обнаружили, что итоговое распределение материи и энергии было бы *не* однородным. Таким образом, оригинальная инфляционная модель Гута привела к существенным проблемам в деталях.

Прозрение Линде и Альбрехта со Стейнхардом – теперь называемое *новой инфляцией* – урегулировало эти досадные проблемы. Через замену формы чаши потенциальной энергии на ту, что на Рис. 10.2, эти исследователи обнаружили, что инфлатон мог бы релаксировать к своей нулевой величине энергии "скатываясь" с энергетического холма во впадину, постепенный и изящный процесс, который не требует квантовых прыжков, как предлагалось первоначально. И, как показали их расчеты, это слегка более постепенное скатывание с холма успешно пролонгирует инфляционное раздувание пространства, так что один отдельный пузырек легко вырастает достаточно большим, чтобы заключить в себе целую наблюдаемую вселенную. Таким образом, в этом подходе не требуется беспокоиться об объединении пузырьков. Что имеет равную важность, вместо конверсии энергии поля инфлатона в обычные частицы и радиацию при столкновениях пузырьков в новом подходе инфлатон постепенно завершает эту конверсию энергии однородно через все пространство через процесс подобный трению: когда поле скатывается с энергетического холма – однородно по пространству – оно передает свою энергию зацепляясь (взаимодействуя с) за более привычные поля частиц и излучения. Новая инфляция, таким образом, сохраняет все успехи подхода Гута, но оказывается способной уладить существенные проблемы, с которыми тот столкнулся.

Примерно через год после важного прогресса, предложенного новой инфляцией, Андрей Линде совершил другой прорыв. Чтобы новая инфляция успешно возникла, должно одновременно встать на свои места большое количество ключевых элементов: чаша потенциальной энергии должна иметь правильную форму, величина поля инфлатона должна начинаться с высокого положения в чаше (и, слегка более формально, сама величина поля инфлатона должна быть однородна в достаточно большой пространственной области). Наряду с тем, что для вселенной возможно достижение таких условий, Линде нашел способ генерации инфляционного взрыва при более простом, намного менее изощренном наборе условий. Линде осознал, что даже при простой чаше потенциальной энергии, такой как на Рис. 9.1а, и даже без точного расположения начальной величины поля инфлатона инфляция все еще может легко иметь место. Идея такова. Представьте, что в очень ранней вселенной вещи были "хаотическими" – например, представьте, что имелось поле инфлатона, чья величина хаотически скакала от одной величины к другой. В некоторых местах в пространстве его величина могла быть малой, в других местах его величина была средней, а еще в других местах в пространстве его величина могла быть высокой. Теперь, в местах, где величина поля была малой или средней ничего особенно достойного внимания не происходило. Но Линде осознал, что нечто фантастически интересное могло бы иметь место в областях, где полю инфлатона случилось достичь высокой величины (даже если область была мельчайшей, не более 10–33 сантиметра в поперечнике). Когда величина поля инфлатона высока, – когда она находится в вышине энергетической чаши на Рис. 9.1а, – устанавливается разновидность космического трения: величина поля пытается скатиться с холма к более низкой потенциальной энергии, но ее высокая величина дает вклад в тормозящую силу сопротивления, так что она скатывается очень медленно. Таким образом, величина поля инфлатона должна была быть возле постоянной величины и (почти как инфлатон на вершине холма потенциальной энергии в новой инфляции) должна была давать вклад в почти постоянную энергию и почти постоянное отрицательное давление. А нам теперь очень привычно, что это условия, требуемые чтобы двигать взрыв инфляционного расширения. Таким образом, не привлекая особо специальной энергетической чаши и не устанавливая поле инфлатона в специальную конфигурацию, хаотическое окружение ранней вселенной могло бы легко вызвать инфляционное расширение. Не удивительно, Линде назвал этот подход *хаотической инфляцией*. Многие физики рассматривают его как наиболее убедительное осуществление инфляционной парадигмы.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r141))

12. Те, кто близко знаком с историей предмета, осознают, что возбуждение по поводу открытия Гута было сгенерировано его решениями ключевых космологических проблем, таких как проблемы горизонта и плоскостности, как мы коротко описываем.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r142))

13. Вы можете поинтересоваться, может ли электрослабое Хиггсово поле или Хиггсово поле великого объединения выполнять двойную службу – играть роль, которую мы описали в Главе 9, а также одновременно двигать инфляционное расширение в более ранние времена, до формирования Хиггсова океана. Модели этого сорта предлагались, но они обычно подвержены техническим проблемам. Более убедительные реализации инфляционного расширения привлекают новое Хиггсово поле, чтобы играть роль инфлатона.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r143))

14. См. комментарий 11 к этой главе.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r144))

15. Например, вы можете подумать о нашем горизонте как о гигантской воображаемой сфере с нами в центре, которая отделяет те вещи, с которыми мы могли бы связаться (вещи внутри сферы) от вещей, с которыми мы не смогли бы связаться (вещи вне сферы) за время, прошедшее с Большого взрыва. Сегодня радиус нашей "сферы горизонта" грубо составляет 14 миллиардов световых лет; очень рано в истории вселенной ее (сферы) радиус был намного меньше, поскольку имелось меньше времени для света, чтобы перелететь. См. также комментарий 10 к Главе 8.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r145))

16. Поскольку в этом сущность того, как инфляционная космология решает проблему горизонта, чтобы избежать путаницы, позвольте мне выделить ключевой элемент решения. Если однажды ночью вы с вашим другом стоите на большом поле и с удовольствием обмениваетесь световыми сигналами, включая и выключая электрические фонарики, заметим, что не имеет значения, как быстро вы при этом двигаетесь и бегаете друг от друга, вы *всегда*будете в состоянии потом обменяться световыми сигналами. Почему? Ну, чтобы избежать получения света, которым ваш друг освещает ваш путь, или чтобы ваш друг мог избежать получения света, который вы посылаете на его путь, вам надо убегать друг от друга быстрее скорости света, а это невозможно. Так как это возможно для областей пространства, которые были в состоянии обмениваться световыми сигналами в ранней истории вселенной (а потому, например, могли выровнять свои температуры), сейчас оказаться вне области возможного коммуникационного обмена друг с другом? Как проясняет пример с фонариками, должно быть, чтобы они уносились прочь быстрее, чем скорость света. И в самом деле, колоссальное расталкивание отрицательной гравитации во время инфляционной фазы *двигало* каждый регион пространства прочь от любого другого намного быстрее скорости света. Еще раз, это не предполагает противоречия с СТО, поскольку предел скорости, установленный светом, относится к движению через пространство, а не к движению от разбухания самого пространства. Так что новое и важное свойство инфляционной космологии в том, что она содержит короткий период, в котором имеется сверхсветовое расширение пространства.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r146))

17. Заметим, что численная величина критической плотности уменьшается, когда вселенная расширяется. Но суть в том, что если реальная плотность массы/энергии вселенной равна критической плотности в один момент времени, она будет уменьшаться в точности тем же образом и сохранит равенство критичекой плотности во все времена.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r147))

18. Склонный к математике читатель должен заметить, что во время инфляционной фазы размер нашего космического горизонта оставался фиксированным, в то время как пространство чудовищно раздувалось (как можно легко увидеть, выбрав экспоненциальную форму масштабного фактора в комментарии 10 к Главе 8). Именно в этом смысле наша наблюдаемая вселенная в инфляционной схеме является мельчайшим кусочком гигантского космоса.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r148))

19. R. Preston, *First Light* (New York: Random House Trade Paperbacks, 1996), p. 118.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r149))

20. Превосходный отчет на общем уровне о темной материи см. L. Krauss, *Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Universe* (New York: Basic Books, 2000).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r150))

21. Подготовленный читатель распознает, что я не провожу отличия между разными проблемами темной материи, которые появляются на разных масштабах наблюдения (галактики, космос), поскольку мой интерес здесь связан только с вкладом темной материи в плотность космической массы.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r151))

22. На самом деле имеются некоторые разногласия в отношении того, в этом ли механизм, стоящий за всеми типами сверхновых (я благодарю Д. Спергеля, обратившего мое внимание на это), но однородность этих событий – которая и нужна нам для обсуждения – находится на прочном наблюдательном основании.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r152))

23. Интересно заметить, что годами ранее результатов по сверхновым провидческие работы Джима Пиблза из Принстона, а также Лоуренса Краусса из Университета Case Western, Кливленд, Майкла Тернера из Университета Чикаго и Гэри Стейгмана из Огайо предположили, что вселенная может иметь малую ненулевую космологическую константу. В то время большинство физиков не приняли это предположение слишком серьезно, но теперь с данными по сверхновым отношение существенно поменялось. Также заметим, что ранее в главе мы говорили, что расталкивание от космологической константы может быть выражено Хиггсовым полем, которое подобно лягушке на плато, возвышается над своей конфигурацией с минимальной энергией. Так что, поскольку космологическая константа хорошо подходит к данным, более точно исследователи сверхновых заключили, что пространство должно быть заполнено чем-то*подобным* космологической константе, которое генерирует направленное вовне расталкивание. (Имеются пути, в которых Хиггсово поле могло бы сгенерировать долгодействующее расталкивание, в противоположность короткому взрыву в ранние моменты инфляционной космологии. Мы обсудим это в Главе 14, когда будем рассматривать вопрос о том, на самом ли деле данные требуют космологической константы, или всем требованиям могут отвечать некоторые другие сущности со сходными гравитационными последствиями). Исследователи часто используют термин "темная энергия" как обобщающую фразу для ингредиента вселенной, который невидим для глаз, но заставляет любой регион пространства отталкиваться от любого другого, вместо того, чтобы притягиваться.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r153))

24. Темная энергия является наиболее широко принятым объяснением наблюдаемого ускоренного расширения, но выдвигались и другие теории. Например, некоторые предположили, что данные могут быть объяснены, если сила гравитации отличается от обычной силы, предсказанной ньютоновской и эйнштейновской физиками, когда рассматриваемый масштаб расстояний становится экстремально большим – космологического размера. Другие еще не убедились, что данные показывают космическое ускорение, и ожидают проведения более точных измерений. Важно держать в уме эти альтернативные идеи, особенно когда будущие наблюдения должны дать результат, который профильтрует текущие объяснения. Но в настоящее время имеется широкий консенсус, что теоретические объяснения, описанные в главном тексте, самые убедительные.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r154))

**Глава 11**

1. Среди лидеров в ранние 1980е в определении того, как квантовые флуктуации должны давать неоднородности, были Стивен Хокинг, Алексей Старобинский, Алан Гут, Со-Юнг Пи, Джеймс Бардин, Пол Стейнхардт, Майкл Тернер, Вячеслав Михайлов и Геннадий Чибисов.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r155))

2. Даже после обсуждения в основном тексте вы все еще можете быть озадачены в отношении того, как мельчайшее количество массы/энергии в кусочке инфлатона могло дать гигантское количество массы/энергии, составляющее наблюдаемую вселенную. Как вы можете взвинтить массу/энергию до величины больше, чем та, с чего вы начали? Ну, как объяснялось в основном тексте, поле инфлатона в силу своего отрицательного давления "извлекало" энергию из гравитации. Это означает, что когда энергия в поле инфлатона возрастает, энергия в гравитационном поле уменьшается. Специальное свойство гравитационного поля, известное с дней Ньютона, что его энергия может становиться произвольно отрицательной. Таким образом, гравитация подобна банку, который готов дать взаймы неограниченное количество денег, – гравитация заключает в себе, по существу, безлимитный ресурс энергии, которую извлекает поле инфлатона во время расширения пространства.

Особая масса и размер начального кусочка однородного поля инфлатона зависит от деталей изучаемой модели инфляционной космологии (больше всего от точных деталей чаши потенциальной энергии поля инфлатона). В тексте я представил, что начальная плотность энергии поля инфлатона была около 1082 грамм на кубический сантиметр, так что объем (10–26 сантиметра)3 = 10–78 кубических сантиметров должен был иметь полную массу около 10 килограммов, т.е. около 20 фунтов. Эти величины типичны для четко определенного класса инфляционных моделей, но означают только то, что они дают вам грубое представление о величинах, с которыми приходится иметь дело. Чтобы дать представление о диапазоне возможностей, позвольте мне заметить, что в хаотических моделях инфляции Андрея Линде (см. комментарий 11 к Главе 10) наша наблюдаемая вселенная должна была появится из начального кусочка даже меньшего размера, 10–33 сантиметра в поперечнике (так называемая длина Планка), чья плотность энергии была даже выше, около 1094грамм на кубический сантиметр, что в совокупности дает более низкую полную массу около 10–5 грамма (так называемая масса Планка). В этой реализации инфляции начальный кусочек должен был весить примерно так же, как частичка пыли.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r156))

3. См. Paul Davies, "Inflation and Time Asymmetry in the Universe," in *Nature*, vol. 301, p. 398; Don Page, "Inflation Does Not Explain Time .Asymmetry," in *Nature*, vol. 304, p. 39; and Paul Davies, "Inflation in the Universe and Time Asymmetry," in *Nature*, vol. 312, p. 524

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r157))

4. Чтобы объяснить этот существенный момент, принято разделять энтропию на часть, связанную с пространством-временем и гравитацией, и остающуюся часть, связанную со всем остальным, поскольку это интуитивно ухватывает ключевые идеи. Однако, я должен заметить, что оказывается трудным дать математически строгую разработку, в которой гравитационный вклад в энтропию аккуратно идентифицирован, выделен и оценен. Тем не менее, это не нарушает качественные заключения, которых мы достигли. В случае, если вы найдете это проблематичным, заметим, что вся дискуссия может быть перефразирована почти совершенно без ссылки на гравитационную энтропию. Как мы подчеркивали в Главе 6, когда существенна обычная притягивательная гравитация, материя слипается в комки. В процессе этого материя конвертирует гравитационную потенциальную энергию в кинетическую энергию, которая затем частично конвертируется в радиацию и излучается из самого комка. Это означает последовательность событий с возрастанием энтропии (большие средние скорости частиц повышают относящийся к делу объем фазового пространства; производство радиации через взаимодействия повышает общее число частиц – то и другое повышает общую энтропию). Таким образом, то, на что мы ссылались в тексте как на*гравитационную энтропию*, может быть перефразировано как *энтропия материи, генерируемая гравитационными силами*. Когда мы говорим, что гравитационная энтропия мала, мы имеем в виду, что гравитационные силы имеют потенциал, чтобы сгенерировать значительные количества энтропии через слипание материи. Реализуя такой энтропийный потенциал, комки материи создают неоднородное, негомогенное гравитационное поле – деформации и рябь в пространстве-времени, – которое в тексте я описывал как имеющее более высокую энтропию. Но, как ясно из этого обсуждения, на самом деле оно может мыслиться как будто слипшаяся материя (и произведенная в процессе радиация) имеет более высокую энтропию (чем когда она однородно рассеяна). Это хорошо, поскольку подготовленный читатель заметит, что если мы рассматриваем классический гравитационный фон (классическое пространство-время) как когерентное состояние гравитонов, это, по существу, единственное состояние, а потому имеет низкую энтропию. Определение энтропии возможно только при подходящем грубом гранулировании. Однако, как подчеркивает этот комментарий, это не особенно необходимо. С другой стороны, если комок материи достаточен, чтобы создать черную дыру, тогда становится применимым неоспоримое определение энтропии: площадь горизонта событий черной дыры (как объясняется далее в Главе 16) является мерой энтропии черной дыры. И эта энтропия может быть однозначно названа гравитационной энтропией.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r158))

5. Точно так же, как возможно как разбивание яйца, так и собирание заново кусочков скорлупы разбитого яйца в первоначальное яйцо, для квантово-индуцированных флуктуаций возможно как вырастание в большие неоднородности (как мы описывали), так и для достаточно коррелированных неоднородностей возможна работа в тандеме, чтобы подавить такой рост. Таким образом, инфляционный вклад в разрешение стрелы времени также требует достаточно некоррелированных начальных квантовых флуктуаций. Еще раз, если мы думаем в манере Больцмана, среди всех флуктуаций, дающих подходящие условия для инфляции, раньше или позже будут встречены все эти условия, позволяющие начаться известной нам вселенной.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r159))

6. Имеются некоторые физики, которые утверждают, что ситуация лучше, чем описано. Например, Андрей Линде доказывает, что в хаотической инфляции (см. комментарий 11 к Главе 10) наблюдаемая вселенная появляется из кусочка планковского размера, содержащего однородное поле инфлатона с плотностью энергии планковского масштаба. При определенных предположениях Линде далее утверждает, что энтропия *однородного* поля инфлатона в таком мельчайшем кусочке грубо равна энтропии любой другой конфигурации поля инфлатона, а потому условия, необходимые для достижения инфляции, не были специальными. Энтропия кусочка планковского размера была мала, но наравне с возможной энтропией, которую кусочек планковского размера *мог бы* иметь. Последующий инфляционный взрыв затем создал в один миг гигантскую вселенную с намного более высокой энтропией, – но с такой, которая благодаря гладкости и однородности распределения материи была также чудовищно далека от энтропии, которую она могла бы иметь. Стрела времени указывает в направлении, в котором этот энтропийный недостаток будет уменьшаться.

Хотя я неравнодушен к этому оптимистичному взгляду, до тех пор, пока мы не получим лучшего постижения физики, из которой предположительно возникает инфляция, следует проявлять осторожность. Например, подготовленный читатель отметит, что этот подход одобряет, но не подтверждает предположения по поводу высокоэнергетических (транспланковских) мод поля инфлатона – мод, которые могут влиять на результат инфляции и играть ключевую роль в формировании структуры вселенной.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r160))

**Глава 12**

1. Подробное доказательство, которое я имею в виду здесь, основывается на факте, что силы всех трех негравитационных взаимодействий зависят от энергии и температуры окружающей среды, в которой эти силы действуют. При низких энергиях и температурах, таких как в нашем повседневном окружении, силы всех трех взаимодействий различаются. Но имеются непрямые теоретические и экспериментальные подтверждения, что при очень высоких температурах, которые возникали в самые ранние моменты вселенной, величины всех трех сил сходятся, указывая, хотя и косвенно, что сами все три силы могут быть объединены на фундаментальном уровне и выглядят различными только при низких энергиях и температурах. Для более детального обсуждения см., например, *Элегантная вселенная*, Глава 7.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r161))

2. Раз мы знаем, что поле, подобное любому из известных силовых полей, является ингредиентом в структуре космоса, тогда мы знаем, что оно существует везде – оно вплетено в ткань космоса. Невозможно удалить поле, почти как невозможно удалить само пространство. Ближе всего, следовательно, мы можем подойти к уничтожению присутствия поля, это иметь его на величине, которая минимизирует его энергию. Для силовых полей вроде электромагнитного эта величина равна нулю, как обсуждается в тексте. Для полей вроде инфлатона или Хиггсова поля стандартной модели (которое для простоты мы тут не рассматриваем), эта величина может быть некоторым ненулевым числом, что зависит от точной формы потенциальной энергии поля, как мы обсуждали в Главах 9 и 10. Как отмечено в тексте, чтобы сохранить целевую направленность обсуждения, мы обсуждаем явно только квантовые флуктуации полей, чье состояние минимальной энергии достигается, когда величина поля равна нулю, хотя флуктуации, связанные с полями Хиггса или инфлатона не требуют изменений в наших заключениях.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r162))

3. На самом деле, склонный к математике читатель должен отметить, что принцип неопределенности диктует, что флуктуации энергии обратно пропорциональны временному разрешению наших измерений, так что чем точнее разрешение времени, с которым мы исследуем энергию поля, тем более широко поле будет волноваться.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r163))

4. В этом эксперименте Ламоро измерил силу Казимира на модифицированной установке, содержащей притяжение между сферическими линзами и кварцевой пластиной. Более недавно Джианни Каруньо, Роберто Онофио и их сотрудники в университете Падовы предприняли более сложный эксперимент, включающий оригинальную схему Казимира из двух параллельных пластин. (Удержание пластин совершенно параллельно является в самом деле экспериментальной проблемой). До сегодняшнего дня они подтвердили предсказания Казимира на уровне 15 процентов.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r164))

5. Ретроспективно эти достижения также показывают, что если бы Эйнштейн не ввел космологическую константу в 1917, квантовые физики должны были бы ввести собственную версию ее несколькими десятилетиями позже. Как вы вспомните, космологическая константа была энергией, которая, как воображал Эйнштейн, заполняет все пространство, но что является ее причиной, он – и поборники космологической константы сегодняшних дней – оставил не определенным. Теперь мы осознаем, что квантовая физика заполняет пустое пространство скачущими полями, и, как мы непосредственно видим через открытие Казимира, результирующее микроскопическое безумие полей наполняет пространство энергией. Фактически, главная стоящая перед теоретической физикой, это показать, что совокупный вклад всех скачков полей дает полную энергию пустого пространства – полную космологическую константу, – которая находится внутри наблюдаемых пределов, в настоящее время определяемых по наблюдениям сверхновых, обсужденным в Главе 10. До сегодняшнего дня никто не смог сделать этого; провести анализ точно оказалось вне досягаемости современных теоретических методов, а приближенные вычисления получают ответы *дико* превосходящие то, что позволяют наблюдения, сильно указывая на то, что приближения недалеко ушли. Многие объявляют величину космологической константы (равна ли она нулю, как еще думают, или мала и отлична от нуля, как предполагается инфляцией и данными по сверхновым) как одну из самых важных открытых проблем в теоретической физике.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r165))

6. В этой секции я описываю один способ рассмотрения конфликта между ОТО и квантовой механикой. Но я должен заметить в связи с нашей темой поиска правильной природы пространства и времени, что и другие несколько менее осязаемые, но потенциально важные головоломки возникают из попыток соединения ОТО и квантовой механики. Одна из особенно мучительных возникает, когда прямое применение процедуры трансформации классической негравитационной теории (вроде электродинамики Максвелла) в квантовую теорию распространяется на классическую ОТО (как показано Брюсом ДеВиттом в том, что сейчас называется уравнением Уилера-ДеВитта). В центральном уравнении, которое при этом возникает, оказывается, что не появляется переменная времени. Так что вместо того, чтобы получить явное математическое воплощение времени, – как в случае любой другой фундаментальной теории, – в этом подходе квантования гравитации темпоральная эволюция должна отслеживаться физическим свойством вселенной (таким как ее плотность), которое, мы ожидаем, должно изменяться регулярным образом. На данный момент никто не знает, если эта процедура квантования гравитации подходит (хотя большой прогресс недавно был достигнут в ответвлении этого формализма, именуемом *петлевой квантовой гравитацией*, см. Главу 16), то не ясно, скрывается ли отсутствие явной переменной времени в неких глубинах (время как производная концепция?) или нет. В этой главе мы сосредоточимся на другом подходе к соединению ОТО и квантовой механики, *теории суперструн*.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r166))

7. Отчасти неправильно говорить о "центре" черной дыры как если бы он был местом в пространстве. Причина, грубо говоря, в том, что когда нечто пересекает горизонт событий черной дыры – ее внешний край, – роли пространства и времени меняются местами. Фактически, точно так же, как вы не можете сопротивляться переходу от одной секунды к другой во времени, так вы не можете сопротивляться затягиванию в "центр" черной дыры, раз уж вы пересекли горизонт событий. Оказывается, что эта аналогия между направленностью вперед во времени и направленностью к центру черной дыры строго обоснована математическим описанием черных дыр. Таким образом, вместо того, чтобы думать о центре черной дыры как о положении в пространстве, лучше думать о нем как о положении во времени. Более того, поскольку вы не можете уйти от центра черной дыры, вы могли бы попытаться подумать о нем как о положении в пространстве-времени, где время приходит к концу. Это, может быть, и правильно. Но поскольку стандартные уравнения ОТО отказывают при таких экстремально малых размерах и гигантских плотностях массы, наша способность делать определенные утверждения такого сорта компроментируется. Ясно, это подразумевает, что если бы мы имели уравнения, которые не разваливались бы в глубине черной дыры, мы смогли бы получить важные результаты по поводу природы времени. Это одна из целей теории суперструн.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r167))

8. Как и в предыдущих главах под "наблюдаемой вселенной" я подразумеваю часть вселенной, с которой мы могли бы, по меньшей мере, в принципе, иметь сообщение в течение времени с момента Большого взрыва. Во вселенной, которая бесконечна в пространственном протяжении, как обсуждалось в Главе 8, все пространство *не* сжимается в точку в момент Взрыва. Определенно, все в наблюдаемой части вселенной будет сжиматься во все меньшее пространство, когда мы направляемся назад к началу, но, хотя это тяжело нарисовать, имеются вещи – бесконечно далеко удаленные – которые всегда будут оставаться отделенными от нас, даже когда плотность материи и энергии возрастает все выше.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r168))

9. Леонард Сасскайнд в "Элегантной вселенной", NOVA, трехчасовые серии Государственной службы радиовещания (PBS), впервые вышло в эфир 28 октября и 4 ноября 2003 (запись можно посмотреть здесь: http://www.pbs.org/wgbh/nova/transcripts/3012\_elegant.html ).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r169))

10. На самом деле сложность проведения экспериментального тестирования для теории суперструн представляет собой ключевое препятствие, одно из тех, что существенно затрудняет подтверждение теории. Однако, как мы увидим в последних главах, в этом направлении был сделан немалый прогресс; струнные теоретики сильно надеются, что планируемые ускорители и эксперименты в открытом космосе обеспечат, по меньшей мере, подробные подтверждения в поддержку теории, а при удаче, может быть, даже больше.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r170))

11. Хотя я не касался этого явно в тексте, замечу, что каждая известная частица имеет *античастицу* – частицу с той же массой, но с противоположным силовым зарядом (вроде противоположного знака электрического заряда). Античастица электрона есть позитрон; античастица up-кварка есть, не удивительно, анти-up-кварк и так далее.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r171))

12. Как мы увидим в Главе 13, недавние работы по теории струн наводят на мысль, что струны могут быть намного больше планковской длины, и это дает множество критических последствий, – включая возможность сделать теорию экспериментально проверяемой.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r172))

13. Существование атомов сначала доказывалось косвенными путями (как объяснение особых пропорций, в которых различные химические вещества могут соединяться, а позже через броуновское движение); существование первых черных дыр было подтверждено (к удовлетворению многих физиков) через наблюдение их влияния на газ, который падает на них с расположенных рядом звезд, а не через "наблюдение" их непосредственно.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r173))

14. Поскольку даже тихо колеблющаяся струна имеет *некоторое* количество энергии, вы можете поинтересоваться, как это возможно для колебательной моды струны давать безмассовую частицу. Ответ, еще раз, дается квантовой неопределенностью. Не имеет значения, насколько спокойна струна, квантовая неопределенность означает, что она имеет минимальное количество дрожаний и скачков. И через чудеса квантовой механики эти индуцированные неопределенностью скачки имеют *отрицательную* энергию. Когда это объединяется с положительной энергией от самых мягких из обычных колебаний струны, полная масса/энергия равна нулю.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r174))

15. Для склонного к математике читателя наиболее точное утверждение в том, что *квадраты* масс колебательных мод струны задаются целыми количествами квадратов планковской массы. Еще более точно (и в соответствии с недавними разработками, затронутыми в Главе 13) квадраты этих масс являются целыми количествами *струнных масштабов* (которые пропорциональны обратному квадрату длины струны). В общепринятой формулировке теории струн струнный масштаб и планковская масса связаны, почему я и применил упрощение в главном тексте и ввел только планковскую массу. Однако, в Главе 13 мы рассмотрим ситуации, в которых струнный масштаб может отличаться от планковской массы.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r175))

16. Не слишком трудно понять в грубых терминах, как планковская длина вкралась в анализ Кляйна. ОТО и квантовая механика привлекают три фундаментальных константы природы: *с* (скорость света), *G* (базовая константа гравитационного взаимодействия) и *h* (постоянная Планка, описывающая размер квантовых эффектов). Эти три константы могут быть объединены, чтобы произвести величину с размерностью длины: *(hG/c3)1/2*, которая, по определению, является планковской длиной. После подстановки численных значений трех констант находим планковскую длину около 1,616 х 10–33сантиметра. Таким образом, исключая случай безразмерного множителя с величиной, существенно отличающейся от того, что я должен получить из теории, – нечто, что не часто происходит в простой, хорошо сформулированной физической теории, – мы ожидаем, что планковская длина будет характеристикой размера длины, такой как длина свернутого пространственного измерения. Тем не менее, заметим, что это не исключает возможности, что размерности могут быть больше планковской длины, и в Главе 13 мы увидим интересную недавнюю работу, которая энергично исследовала эту возможность.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r176))

17. Присоединение частицы с электрическим зарядом и с относительно маленькой массой оказывается труднопредодолимой проблемой.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r177))

18. Заметим, что требование однородной симметрии, которое мы использовали в Главе 8, чтобы сузить количество форм вселенной, мотивируется астрономическими наблюдениями (такими как наблюдения микроволнового фонового излучения) внутри трех больших измерений. Эти симметрийные ограничения не влияют на форму возможных шести мельчайших дополнительных измерений.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r178))

19. Вы можете поинтересоваться, возможны ли не только дополнительные пространственные измерения, но также и дополнительные временные измерения. Исследователи (такие как Ицхак Барс из Университета Южной Калифорнии) исследовали эту возможность и показали, что, по меньшей мере, возможно сформулировать теорию со вторым временным измерением, которая кажется физически обоснованной. Но является ли это второе временное измерение реальным на пару с обычным временным измерением, или это только математический трюк, никогда полностью не устанавливалось; общее ощущение скорее в пользу второго, чем первого. По контрасту с этим, прямое прочтение теории струн говорит, что дополнительные пространственные измерения являются во всех отношениях столь же реальными, как и три, которые мы знаем.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r179))

20. Эксперты по струнной теории (и те, кто прочитал *Элегантную вселенную*, Глава 12) распознают, что более точное утверждение заключается в том, что определенные формулировки теории струн (обсужденные в Главе 13 этой книги) допускают пределы, содержащие одиннадцать пространственно-временных измерений. Все еще обсуждается, не лучше ли думать о теории струн как о теории, фундаментально действующей в одиннадцати пространственно-временных измерениях, или одиннадцатимерная формулировка должна рассматриваться как особый предел (например, когда константа струнного взаимодействия выбирается большой в формулировке типа IIА) наряду с другими пределами. Так как это различие почти не оказывает воздействия на наше обсуждение на общем уровне, я выбрал первую точку зрения, в значительной степени из-за лингвистической простоты случая, когда имеется фиксированное и неизменное число измерений.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r180))

**Глава 13**

1. Для склонного к математике читателя: я здесь ссылаюсь на *конформную* симметрию – симметрию относительно произвольных сохраняющих углы преобразований объема в пространстве-времени, заметаемого предлагаемыми фундаментальными составляющими. Струны заметают двумерные пространственно-временные поверхности, и уравнения теории струн инвариантны относительно двумерной конформной группы, которая является*бесконечномерной* группой симметрии. Напротив, при других числах пространственных измерений, связанных с объектами, которые сами не являются одномерными, конформная группа является конечномерной.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r181))

2. Многие физики внесли существенный вклад в эти разработки, как предложив основополагающие работы, так и через последующие исследования: Майкл Дафф, Пол Хове, Такео Инарм, Келли Стелле, Эрик Бергшоефф, Эргин Жегин, Пол Таунсенд, Крис Халл, Крис Поп, Джон Шварц, Ашоке Сен, Эндрю Строминджер, Кертис Каллан, Джо Полчински, Петр Хофава, Дж.Дай, Роберт Лейг, Николаи и Бернард деВит среди других.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r182))

3. Фактически, как объяснено в Главе 12 *Элегантной вселенной*, имеется даже более тесная связь между обозреваемыми десятью пространственными измерениями и р-бранами. Когда вы увеличиваете размер десятого пространственного измерения в, скажем, формализме типа IIА, одномерные струны растягиваются в двумерные мембраны, подобные внутренности трубы. Если вы предполагаете десятое измерение очень малым, как это всегда неявно делалось перед этими открытиями, внутрености трубы выглядят и ведут себя подобно струнам. Как и в случае струн, вопрос о том, являются ли эти вновь найденные браны неделимыми или, наоборот, они сделаны из еще более тонких составляющих, остается без ответа. Исследователи открыли возможность, что на ингредиентах, до настоящего времени идентифицированных в теории струн/М-теории, поиски элементарных составляющих вселенной не завершаются. Однако также возможно, что указанные ингредиенты этими элементарными составляющими и являются. Поскольку многое из последующего нечувствительно к этой проблеме, мы выбираем простейшую точку зрения и представляем, что все ингредиенты – струны и браны различных размерностей – являются фундаментальными. А как быть с более ранними аргументами, которые указывали на то, что фундаментальный многомерный объект не мог бы быть встроен в физически осмысленную схему? Ну, эти аргументы сами произросли в другой приблизительной квантовомеханической схеме – той, которая стандартна и полностью протестирована, но которая, как и всякая аппроксимация, имеет ограничения. Хотя исследователи еще вырисовывают все тонкости, связанные с присоединением многомерных объектов к квантовой теории, эти ингредиенты встраиваются так совершенно и согласованно внутрь всех пяти струнных формулировок, что почти каждый верит, что пугающие нарушения базовых и сакральных физических принципов отсутствуют.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r183))

4. Фактически, мы могли бы жить даже на более многомерной бране (4-бране, 5-бране, ...), три измерения которой заполняют обычное пространство и другие измерения которой заполняют некоторые малые, дополнительные размерности, требуемые теорией.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r184))

5. Склонный к математике читатель должен заметить, что за долгие годы теория струн выяснила, что замкнутые струны имеют отношения к тому, что называют *Т-дуальностью* (как объясняется дальше в Главе 16, а также в Главе 10 *Элегантной вселенной*). По существу, Т-дуальность есть утверждение, что если дополнительное измерение имеет форму окружности, теория струн полностью нечувствительна к тому, имеет ли окружность радиус R или 1/R. Причина в том, что струны могут двигаться вокруг окружности ("импульсные моды") и/или наматываться вокруг окружности ("намотанные моды"), и физики осознали, что при замене R на 1/R роли этих двух мод просто меняются местами, оставляя общие физические свойства теории неизменными. Существенным в этой аргументации является то, что струны представляют собой замкнутые петли, поскольку если они открытые, не имеется топологически стабильного понятия их наматывания вокруг циклического измерения. Так что, на первый взгляд, кажется, что открытые и замкнутые струны ведут себя полностью различно при Т-дуальности. При более тесном изучении и при использовании граничных условий Дирихле для открытых струн ("D" в D-бранах) Полчински, Дай, Лейг, а также Хофава, Грин и другие исследователи разрешили эту загадку.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r185))

6. Предложения, которые пытались обойти введение темной материи или темной энергии допускали, что даже принятое поведение гравитации на больших масштабах может отличаться от того, что думали Ньютон и Эйнштейн, и, таким образом, пытались оценить гравитационные эффекты, не совместимые только с материалом, который мы можем видеть. Пока еще эти предложения в высшей степени умозрительны и имеют минимальную поддержку как у экспериментаторов, так и у теоретиков.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r186))

7. Эту идею ввели физики С. Гиддингс, С. Томас, С. Димопоулос и Г. Ландсберг.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r187))

8. Отметим, что фаза сжатия такой отскочившей вселенной не то же самое, что фаза расширения, бегущая в обратном направлении. Физические процессы, такие как разбрызгивание яиц и таяние свечей, будут происходить в обычном "прямом" направлении времени во время расширения и должны будут продолжатся так же во время последующей фазы сжатия. Поэтому энтропия должна будет возрастать во время обеих фаз.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r188))

9. Подготовленный читатель должен заметить, что циклическая модель может быть выражена на языке четырехмерной эффективной теории поля на одной из 3-бран, и в этой форме она разделяет многие свойства более привычных инфляционных моделей, движимых скалярным полем. Когда я говорю "радикально новый механизм", я ссылаюсь на концептуальное описание в терминах сталкивающихся бран, с которыми и само которое есть поразительно новый путь размышления о космологии.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r189))

10. Не запутайтесь в подсчете измерений. Две 3-браны вместе с пространственным интервалом между ними имеют четыре измерения. Время дает пятое. Что оставляет шесть остальных для пространства Калаби-Яу.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r190))

11. Важное исключение, отмеченное в конце этой главы и обсуждаемое дальше в деталях в Главе 14, имеет дело с неоднородностями в гравитационном поле, так называемыми изначальными гравитационными волнами. Инфляционная космология и циклическая модель отличаются в этом отношении, что дает один из путей, на котором есть шанс, что они могут быть экпериментально отличены.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r191))

12. Квантовая механика гарантирует, что всегда имеется ненулевая вероятность, что случайная флуктуация разрушит циклический процесс (например, одна брана повернется относительно другой), заставив модель застопориться. Даже если вероятность мизерна, рано или поздно событие непременно произойдет, а потому циклы не могут продолжаться бесконечно.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r192))

**Глава 14**

1. A. Einstein, *"Vierteljahrschrift fur gerichtliche Medizin und offentliches Sanitatswesen"* 44 37 (1912). D. Brill and J. Cohen, *Phys. Rev.* vol. 143, no. 4, 1011 (1966); H. Pfister and K. Braun, *Class. Quantum Grav.* 2, 909 (1985).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r193))

2. За четыре десятилетия от первоначального предложения Шиффа и Пью были предприняты другие тесты схемы увлечения. Эти эксперименты (проведенные среди других Бруно Бертотти, Игнацио Киуфолини и Петером Бендером, а также И.И.Шапиро, Р.Д. Ризенбергом, Дж.Ф.Чандлером и Р.В. Бэбкоком) изучали движение Луны, а также спутников, вращающихся вокруг Земли, и нашли строгое доказательство эффектов увлечения. Преимущество Гравитационного Зонда B (*Gravity' Probe B*) в том, что это первый полностью контролируемый эксперимент, один из тех, которые находятся под полным контролем экспериментаторов, что должно дать самое точное и самое прямое доказательство схемы увлечения.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r194))

3. Хотя приведенные рисунки эффективны в том, что дают почувствовать открытие Эйнштейна, другое ограничение стандартных представлений деформированного пространства в том, что они не иллюстрируют деформацию времени. Это важно потому, что ОТО показывает, что для обычного объекта вроде Солнца, в противоположность чему-нибудь экстремальному вроде черной дыры, деформация времени (чем ближе вы к Солнцу, тем медленнее будут идти ваши часы) намного более выражена, чем деформация пространства. Затруднительно изобразить деформацию времени графически, но труднее передать, как деформированное время дает вклад в искривление пространственных траекторий, таких как земная эллиптическая орбита вокруг Солнца, именно поэтому Рис. 3.10 (и другие рисунки среди любых попыток визуализировать ОТО, которых я только видел) сориентирован исключительно на деформированном пространстве. Но полезно иметь в виду, что в большом количестве известных астрофизических окружающих явлений деформация времени доминирует.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r195))

4. В 1974 Руссел Халс и Джозеф Тейлор открыли двойную систему пульсаров – два пульсара (быстро вращающейся нейтронной звезды), обращающихся друг вокруг друга. Поскольку пульсары двигаются очень быстро и очень близко друг к другу, ОТО Эйнштейна предсказывает, что они будут испускать большое количество гравитационного излучения. Хотя в самом деле проблематично детектировать это излучение непосредственно, ОТО показывает, что излучение должно проявлять себя косвенно через другие вещи: энергия, эмитированная через излучение, должна вызывать постепенное снижение периода обращения двух пульсаров по орбите. Пульсары наблюдаются непрерывно с момента их открытия и на самом деле их орбитальный период уменьшается – и способом, который согласуется с предсказаниями ОТО с точностью, примерно, на одну часть из тысячи. Таким образом, даже без прямого детектирования эмитированной гравитационной радиации это обеспечивает строгое доказательство ее существования. За это открытие Халсу и Тейлору присудили Нобелевскую премию по физике за 1993.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r196))

5. Однако см. комментарий 4 выше.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r197))

6. С точки зрения энергетики, следовательно, космические лучи обеспечивают естественно возникший ускоритель, который намного более мощный, чем любой из тех, что мы имеем или будем создавать в обозримом будущем. Препятствие в том, что, хотя частицы космических лучей могут иметь экстремально высокие энергии, мы не можем контролировать, что во что влепилось, – когда это происходит от столкновений космических лучей, мы являемся пассивными наблюдателями. Более того, число частиц космических лучей с данной энергией быстро падает, когда уровень энергии повышается. Хотя около 10 миллиардов частиц космических лучей с энергией, эквивалентной массе протона (примерно одна тысячная от планируемой мощности Большого Адронного Коллайдера), падает на каждый квадратный километр поверхности Земли каждую секунду (и несколько полностью проходят через ее тело также каждую секунду), только одна из самых энергичных частиц (около 100 миллиардов масс протона) упадет на данный квадратный километр земной поверхности каждое *столетие*. Наконец, ускоритель может сталкивать частицы вместе, двигая их быстро в противоположных направлениях, тем самым повышая энергию центра масс. В отличие от этого, частицы космических лучей сталкиваются с относительно медленно двигающимися частицами в атмосфере. Тем не менее, эти препятствия не непреодолимы. В течение многих десятилетий экспериментаторы действительно много узнали из изучения данных по более обильным низкоэнергетическим космическим лучам, и, чтобы работать с малочисленными высокоэнергетическими столкновениями, экспериментаторы построили гигантский массив детекторов, чтобы захватить так много частиц, как это возможно.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r198))

7. Подготовленный читатель обнаружит, что сохранение энергии в теории с динамическим пространством-временем это тонкая проблема. Определенно, тензор напряжений от всех источников для уравнений Эйнштейна ковариантно сохраняется. Но это не обязательно переносится на глобальный закон сохранения для энергии. И по хорошей причине. Тензор напряжений не учитывает гравитационной энергии – общеизвестно трудного понятия в ОТО. На достаточно коротких дистанциях и временных масштабах – таких, которые возникают в экспериментах на ускорителях, – локальное сохранение энергии применимо, но утверждения относительно глобального сохранения должны делаться с большей осторожностью.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r199))

8. Это верно для простейших инфляционных моделей. Исследователи нашли, что более усложненные реализации инфляции могут подавлять производство гравитационных волн.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r200))

9. Жизнеспособный кандидат на темную материю должен быть стабильной или очень долгоживущей частицей – которая не распадается на другие частицы. Ожидается, что это верно для легчайших из суперсимметричных партнеров частиц, а потому более точное утверждение, что легчайшие из зино, хиггсино или фотино являются подходящими кандидатами на темную материю.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r201))

10. Не так давно объединенная итальяно-китайская исследовательская группа, известная как Эксперимент по Темной Материи (*Dark Matter Experiment* – DAMA), отработавшая в Лаборатории Гран Сассо в Италии, сделала воодушевляющее сообщение, что они достигли первого прямого детектирования темной материи. До сегодняшнего дня, однако, ни одна другая группа не смогла проверить их утверждение. Фактически, другой эксперимент, Криогенный Поиск Темной Материи (*Cryogenic Dark Matter Search* – CDMS), базирующийся в Стэнфорде и объединяющий исследователей из США и России, накопил данные, которые, как многие уверены, отбросят результаты DAMA с высокой степенью достоверности. В дополнение к этим поискам темной материи идут и многие другие. Чтобы прочитать о некоторых из них, посмотрите здесь: http://hepwww.rl.ac.uk/ukdmc/dark\_matter/other\_searches.html.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r202))

**Глава 15**

1. Это утверждение игнорирует подходы со скрытыми переменными, такие как подход Бома. Но даже в таких подходах мы хотим телепортировать квантовое состояние объекта (его волновую функцию), так что только измерение положения или скорости могло бы отличаться.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r203))

2. Исследовательская группа Зейлингера также включала Дика Баумистера, Джан-Ви Пана, Клауса Маттле, Манфреда Эйби и Харалда Вернфуртера, а группа Де Мартини включала С. Джиакомини, Г. Милани, Ф. Сциаррино и Е. Ломбарди.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r204))

3. Для читателя, который в некоторой степени привычен к формализму квантовой механики, здесь приводятся основные этапы в квантовой телепортации. Представьте, что начальное состояние фотона, который я имею в Нью-Йорке, задано |Ψ>1 = α|0> + β|1>, где |0> и |1> есть два состояния поляризации фотона, и мы допускаем определенные, нормализованные, но произвольные величины коэффициентов. Моя цель заключается в передаче Николасу достаточной информации, чтобы он мог произвести фотон в Лондоне в точно том же квантовом состоянии. Чтобы сделать это, Николас и я сначала обзаводимся парой запутанных фотонов в состоянии, скажем, |Ψ>23 = (l/√2)|0203> – (l/√2)|1213> Начальное состояние трехфотонной системы, таким образом, есть |Ψ>123 = (α/√2)[2] + (β/√2)[3]. Когда я провожу измерение состояния Белла над фотонами 1 и 2, я проектирую эту часть системы на одно из четырех состояний: |Φ>± = (1/√2)[4] и |Ω>± = (1/√2)[5]. Теперь, если мы перевыразим начальное состояние, используя этот базис собственных состояний для частиц 1 и 2, мы найдем: |Ψ>123 = ½[6]. Таким образом, после проведения моего измерения я "сколлапсирую" систему в одно из этих четырех слагаемых. Когда я передам Николасу (традиционным образом), какое слагаемое я нашел, он узнает, что надо сделать с фотоном 3, чтобы воспроизвести оригинальное состояние фотона 1. Например, если я нахожу, что мое измерение дает состояние |Φ>–, тогда Николас ничего не должен делать с фотоном 3, поскольку, как раньше, он уже находится в оригинальном состоянии фотона 1. Если я найду любой другой результат, Николас проделает подходящее вращение (определяемое, как вы можете видеть, тем, какой результат я найду), чтобы перевести фотон 3 в желаемое состояние.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r205))

4. Фактически, склонный к математике читатель заметит, что не трудно доказать так называемую теорему об отсутствии квантового клонирования. Представьте, что мы имеем унитарный оператор клонирования *U*, который берет любое данное состояние на входе и производит две его копии на выходе (*U*отображает |α> –> |α>|α> для любого исходного состояния |α>). Заметим, что *U*, действуя на состояние, подобное (|α> + |β>), дает (|α>|α> + |β>|β>), которое не есть двойная копия оригинального состояния (|α> + |β>)(|α> + |β>), а потому не существует такого оператора *U*, чтобы преуспеть в квантовом клонировании. (Это впервые было показано Вутерсом и Зуреком в начале 1980х).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r206))

5. Многие исследователи включали в разработку как теорию, так и экспериментальное осуществление квантовой телепортации. В добавление к таким, обсужденным в тексте работам, чтобы назвать несколько, важную часть в римских экспериментах сыграл труд Санду Попеску во время его работы в Кембриджском Университете, а группа Джеффри Кимбла в Калифирнийском Технологическом Институте впервые провела телепортацию непрерывных свойств квантового состояния.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r207))

6. По поводу экстремально интересного прогресса в запутанных многочастичных системах см., например, B. Julsgaard, A. Kozhekin, and E. S. Polzik, "Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects," *Nature* 413 (Sept. 2001), 400-403.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r208))

7. Одна из самых воодушевляющих и активных областей исследований, использующих квантовое запутывание и квантовую телепортацию, есть поле*квантовых компьютеров*. По поводу недавней презентации квантовых компьютеров на общем уровне см. Tom Siegfried, *The Bit and the Pendulum* (New York: John Wiley, 2000), и George Johnson, *A Shortcut Through Time* (New York: Knopf, 2003).\*

*(\*) "Стоит отметить также и такое направление практического использования квантовой телепортации, развивающееся с середины 1980х, как****квантовая криптография****. Идея, грубо, в использовании телепортируемого квантового состояния в качестве криптографического ключа, открывающего доступ к зашифрованной информации, которая передается по обычным каналам связи. Такой ключ, как квантовый объект, не может быть перехвачен или скопирован без его разрушения, в отличие от обычных алгоритмических ключей. – (прим. перев.)"*

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r209))

8. Один аспект замедления времени при возрастании скорости, который мы не обсуждали в Главе 3, но который будет играть роль в этой главе, это так называемый *парадокс близнецов*. Проблема проста по постановке: если вы и я двигаемся относительно друг друга с постоянной скоростью, я буду думать, что ваши часы идут медленнее, чем мои. Но поскольку вы так же уверены, как и я, что вы остаетесь в покое, вы будете думать, что движущимися часами являются мои часы, а потому именно они идут медленно. То, что каждый из нас думает, что другие часы идут медленнее, может показаться парадоксальным, но на самом деле парадокса нет. При постоянной скорости наши часы будут продолжать расходиться все дальше, а потому не позволят прямое, лицо к лицу сравнение, чтобы определить, какие "на самом деле" идут медленнее. А все другие косвенные сравнения (например, мы сравниваем времена на наших часах по телефонному звонку) возникают с некоторым прошедшим временем при некотором пространственном разделении, что с необходимостью вводит в игру усложнения понятий "сейчас" для различающихся наблюдателей, как в Главах 3 и 5. Я не хочу проходить через эти усложнения здесь, но когда эти усложнения СТО вставлены в анализ, противоречия между каждым из нас, декларирующим, что другие часы идут медленнее, исчезают (см., например, E. Taylor and J. A. Wheeler, *Spacetime Physics* для полного, формального, но элементарного обсуждения). Пусть, например, вы затормозились, остановились, развернулись и направились назад ко мне, так что мы можем сравнить наши часы лицом к лицу, устранив усложнения разных понятий настоящего. При нашей встрече чьи часы будут опережать, а чьи отставать? Это и есть так называемый парадокс близнецов: если вы и я близнецы, то, когда мы снова встретимся, будем ли мы одинакового возраста или один из на будет выглядеть старше? Ответ такой, что мои часы опередят ваши, – если мы близнецы, я буду выглядеть старше. Имеется много способов объяснить, почему, но простейший сводится к замечанию, что когда вы изменяете свою скорость и ощущаете ускорение, симметрия между нашими точками зрения теряется, – вы определенно можете утверждать, что *вы* двигались (поскольку, например, вы*чувствовали это* – или, используя обсуждение Главы 3, в отличие от меня, ваше путешествие через пространство-время происходило не по прямой линии), а потому ваши часы шли медленнее, чем мои. Для вас истекло меньше времени, чем для меня.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r210))

9. Джон Уилер, среди других, предположил, возможную центральную роль наблюдателей в квантовой вселенной, что объединено в один его знаменитый афоризм: "Ни одно элементарное явление не становится явлением, пока оно не стало наблюдаемым явлением". Вы можете более подробно прочитать о захватывающей жизни Уилера в физике в книге Джона Арчибальда Уилера и Кеннета Форда Geons, *Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: Norton, 1998). Роджер Пенроуз также изучал связь между квантовой физикой и сознанием в его книгах *The Emperor's New Mind*, а также в *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (Oxford: Oxford University Press, 1994).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r211))

10. См., например, "Reply to Criticisms" in *Albert Einstein*, vol. 7 of *The Library of Living Philosophers*, P. A. Schilpp, ed. (New York: MJF Books, 2001).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r212))

11. W. J. van Stockum, *Proc. R. Soc. Edin*. A 57 (1937), 135.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r213))

12. Подготовленный читатель распознает, что я упрощаю. В 1966 Роберт Герох, который был студентом Джона Уилера, показал, что, по меньшей мере, возможно в принципе сконструировать червоточину без разрыва пространства. Но в отличие от более интуитивного, расчленяющего пространство подхода для построения червоточин, в которых простое существование червоточины не влечет за собой путешествия во времени, в подходе Героха сама фаза конструирования с необходимостью требует, чтобы время стало настолько искажено, что свободно можно было бы путешествовать вперед и назад во времени (но не дальше назад, чем само начало конструирования).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r214))

13. Грубо говоря, если вы проходите через область, содержащую такую экзотическую материю со скоростью, близкой к скорости света, и собираете средние от всех ваших измерений обнаруженной вами плотности энергии, ответ, который вы найдете, будет отрицательным. Физики говорят, что такая экзотическая материя нарушает так называемое усредненное условие малой энергии.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r215))

14. Простейшая реализация экзотической материи приходит из вакуумных флуктуаций электромагнитного поля между параллельными пластинами в эксперименте Казимира, обсужденном в Главе 12. Расчеты показывают, что уменьшение в квантовых флуктуациях между пластинами по отношению к пустому пространству влечет за собой отрицательную среднюю плотность энергии (а также отрицательное давление).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r216))

15. Для поучительного, хотя и формального обзора червоточин см. Matt Visser, *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (New York: American Institute of Physics Press, 1996).

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r217))

**Глава 16**

1. Для склонного к математике читателя вспомним из комментария 6 к Главе 6, что энтропия определяется как логарифм числа перестановок (или состояний), и это важно, чтобы получить правильный ответ в этом примере. Когда вы объединяете два пластиковых контейнера вместе, различные состояния молекул воздуха могут быть описаны при заданном состоянии молекул воздуха в первом контейнере, а затем при заданном состоянии молекул воздуха во втором. Таким образом, перестановки в объединенных контейнерах есть квадрат числа перестановок в каждом в отдельности. После взятия логарифма это говорит нам, что энтропия удваивается.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r218))

2. Вы заметите, что на самом деле мало смысла сравнивать объем с площадью, поскольку они имеют разные единицы. Что я на самом деле имел в виду здесь, как обозначено текстом, так это то, что темп, с которым объем растет с радиусом намного больше, чем темп, с которым растет площадь. Таким образом, поскольку энтропия пропорциональна площади поверхности, а не объему, она растет более медленно с увеличением размера региона, чем это было бы, будь она пропорциональна объему.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r219))

3. Хотя это ухватывает дух ограничения энтропии, подготовленный читатель распознает, что я упрощаю. Более точное ограничение, как предложено Рафаэлем Боуссо, состоит в том, что течение энтропии через нулевую гиперповерхность (с везде неположительным фокальным параметром) ограничено числом *А*/4, где *А* есть площадь пространственноподобного сечения нулевой гиперповерхности ("тонкого листа").

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r220))

4. Более точно энтропия черной дыры есть площадь ее горизонта событий, выраженная в планковских единицах, деленная на 4 и умноженная на константу Больцмана.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r221))

5. Склонный к математике читатель может вспомнить из комментариев к Главе 8, что имеется другое определение горизонта – космического горизонта – который есть разделяющая поверхность между теми вещами, с которыми наблюдатель может или не может находиться в причинном контакте. Такие горизонты, есть уверенность, поддерживают энтропию, также пропорциональную их площади поверхности.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r222))

6. В 1971 родившийся в Венгрии физик Деннис Габор был удостоен Нобелевской премии за открытие нечто, названного *голографией*. Сначала имея целью усовершенствовать разрешающую силу электронного микроскопа, Габор работал в 1940е над поиском путей удержания большей части информации, закодированной в световых волнах, которые отражаются от объекта. Например, камера записывает интенсивность таких волн света; места, где интенсивность высока, дают более светлые области фотографии, а места, где интенсивность низка являются темными. Габор и многие другие обнаружили, однако, что интенсивность является только частью информации, которую несет световая волна. Мы видели это, например, на Рис. 4.3b: в то время как интерференционная картина подвергается влиянию интенсивности (амплитуды) света (волны с большей амплитудой дают всюду более яркую картину), сама картина возникает вследствие перекрывания волн, происходящих от каждой щели и достигших своего пика, своей впадины и различных промежуточных высот волны в различных местах вдоль экрана детектора. Последняя информация называется *фазовой информацией*: говорят, что две световых волны в данной точке находятся *в фазе*, если они усиливают друг друга (обе достигают пика или впадины в одно и то же время), и *не в фазе*, если они друг друга гасят (одна достигает пика тогда, когда вторая достигает впадины), и в более общем случае, они имеют промежуточные фазовые соотношения между указанными двумя экстремумами в точках, где они частично усиливаются или частично гасятся. Интерференционная картина, таким образом, записывает фазовую информацию интерферирующих световых волн.

Габор разработал способ записи на специально подготовленной пленке как интенсивности, так и фазовой информации света, отразившегося от объекта. Переводя на современный язык, его подход очень похож на экспериментальные установки на Рис. 7.1, за исключением того, что один из двух лазерных лучей отражается от искомого объекта на своем пути к экрану детектора. Если экран снабжен пленкой, содержащей подходящую фотографическую эмульсию, он запишет интерференционную картину – в форме мгновенных, вытравленных линий на поверхности пленки – между освобожденным лучом и лучом, который отразился от объекта. Интерференционная картина будет кодировать как интенсивность отраженного света, так и фазовые соотношения между двумя световыми лучами. Последствия прозрения Габора для науки были существенными, позволяя сделать множество усовершенствований в широком диапазоне измерительных технологий. Но для широкой публики самое заметное влияние оказало художественное и коммерческое применение голограмм.

Обычные фотографии выглядят плоскими, поскольку они записали только интенсивность света. Чтобы получть глубину, вам нужна фазовая информация. Причина в том, что когда световая волна путешествует, она колеблется от пика к впадине и снова к пику, так что фазовая информация – или, более точно, фазовые различия между лучами света, отразившимися от близких частей объекта, – кодирует различия в том, как далеко световой луч путешествовал. Например, если вы смотрите прямо на кота, его глаза чуть дальше удалены, чем его нос, и эта разница в глубине кодируется в разности фаз между лучами света, отражающимися от каждой части кошачьей морды. Посветив лазером через голограмму, мы оказываемся в состоянии воспользоваться фазовой информацией голографической записи, и следовательно, добавить глубины в образ. Мы все видели результаты: ошеломительные трехмерные проекции, генерируемые из двумерных кусочков пластика. Отметьте, однако, что ваши глаза не используют фазовую информацию, чтобы видеть глубину. Вместо этого ваши глаза используют параллакс: слабое отличие в углах, под которыми свет из данного источника добирается до вашего левого глаза и вашего правого глаза, чтобы донести информацию, которую ваш мозг декодирует в расстояние до точки источника. Именно поэтому, например, если вы потеряете зрение в одном глазе (или просто оставите его закрытым на время), вы потеряете восприятие глубины.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r223))

7. Для склонного к математике читателя утверждение здесь таково, что лучи света или, в более общем случае, безмассовые частицы могут путешествовать из любой точки внутри пространства анти-деСиттера до пространственной бесконечности и назад за конечное время.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r224))

8. Для склонного к математике читателя: Малдасена работал в пространстве *AdS5 x S4* с граничной теорией, возникающей из границы *AdS5*.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r225))

9. Это утверждение в большей степени социологическое, чем физическое. Теория струн выросла из традиции квантовой физики частиц, тогда как петлевая квантовая гравитация выросла из традиции ОТО. Однако, важно отметить, что на сегодняшний день только теория струн смогла установить контакт с успешными предсказаниями ОТО, поскольку только теория струн убедительно переходит в ОТО на больших масштабах расстояний. В петлевой квантовой гравитации ОТО хорошо понимаема в квантовой области, но перекинуть мост через пропасть к крупномасштабным явлениям оказалось трудно.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r226))

10. Более точно, как обсуждалось далее в Главе 13 *Элегантной вселенной*, мы знаем, сколько энтропии содержат черные дыры, с момента выхода работы Бекенштейна и Хокинга в 1970х. Однако, подход, который эти исследователи использовали, был в значительной степени косвенным и никогда не идентифицировался с микроскопическими перестановками, – как в Главе 6, – что могло бы дать найденную ими энтропию. В середине 1990х эта щель была заполнена двумя струнными теоретиками Эндрю Строминджером и Кумруном Вафой, которые остроумно нашли связь между черными дырами и определенными конфигурациямии бран в теории струн/М-теории. Грубо, они смогли установить, что определенные специальные черные дыры допускают точно такое же число перестановок их основных составляющих (какими бы эти ингредиенты ни были), как и особые, специальные комбинации бран. Когда они рассчитали количество перестановок таких бран (и взяли логарифм), найденный ими ответ оказался равен площади соответствующей черной дыры в планковских единицах, деленной на 4, – точно такой же ответ для энтропии черной дыры, который был найден годами ранее. В петлевой квантовой гравитации исследователи также смогли показать, что энтропия черной дыры пропорциональна площади ее поверхности, но получить точный ответ (площадь поверхности в планковских единицах, деленная на 4) оказалось намного проблематичнее. Если особый параметр, известный как параметр Иммирци, выбирается подходящим образом, тогда на самом деле точное выражение для энтропии черной дыры получается из математики петлевой квантовой гравитации, но до сих пор нет универсально принятого фундаментального объяснения в рамках самой теории, что устанавливает точное значение этого параметра.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r227))

11. На протяжении главы я опустил количественно важные, но концептуально не существенные численные параметры.

([обратно](http://lib.rus.ec/b/148780/read#r228))

**Оглавление**

 [Оглавление](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t1)

 [Предисловие](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t2)

 [I Арена реальности](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t3)

   [1 Дороги к реальности](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t4)

   [2 Вселенная и ведро](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t5)

   [3 Относительность и абсолют](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t6)

   [4 Запутанное пространство](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t7)

 [II Время и опыт](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t8)

   [5 Замороженная река](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t9)

   [6 Случайность и направленность](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t10)

   [7 Время и кванты](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t11)

 [III Пространство-время и космология](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t12)

   [8 О снежинках и пространстве-времени](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t13)

   [9 Испаряя ваккум](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t14)

   [10 Разборка Взрыва на составляющие](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t15)

   [11 Кванты в небе с алмазами](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t16)

 [IV Первоисточники и объединение](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t17)

   [12 Мир на струне](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t18)

   [13 Вселенная на бране](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t19)

 [V Реальность и воображение](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t20)

   [14 Вверх в небеса и вниз на Землю](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t21)

   [15 Телепортаторы и машины времени](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t22)

   [16 Будущее в намеках](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t23)

 [Толковый словарь](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t24)

 [Советы для дальнейшего чтения](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t25)

 [Предметный и именной указатель](http://lib.rus.ec/b/148780/read#t26).