

дем такую иллюстрацию: если мы увеличим атом до размеров Вселенной, то планковская длина станет равной высоте среднего дерева.

Итак, мы видим, что несовместимость общей теории относительности и квантовой механики проявляется только в очень глубоко запрятанном королевстве Вселенной. У читателя может возникнуть вопрос, стоит ли вообще беспокоиться по этому поводу. Мнение физического сообщества по этому вопросу отнюдь не является единым. Есть физики, которые признают существование проблемы, но предпочитают применять квантовую механику и общую теорию относительности для решения таких задач, в которых типичные расстояния намного превосходят планковскую длину. Есть, однако, и другие ученые, которые глубоко обеспокоены тем фактом, что два фундаментальных столпа, на которых держится здание современной физики, в своей основе принципиально несовместимы, и неважно, что эта несовместимость проявляется только на ультрамикроскопическом масштабе расстояний. Несовместимость, говорят они, указывает на существенный изъян в нашем

понимании физического мира. Это мнение основывается на недоказуемой, но глубоко прочувствованной точке зрения, согласно которой понимание Вселенной на ее самом глубоком и наиболее элементарном уровне может дать нам ее логически непротиворечивое описание, все детали которого будут находиться в гармоничном единстве. И уж точно большинство физиков, независимо от того, какое значение это противоречие имеет для их собственных исследований, согласятся с тем, что основа наших самых глубоких теоретических представлений о Вселенной не должна представлять собой математически противоречивое лоскутное одеяло, скроенное из двух мощных, но конфликтующих теорий.

Физики неоднократно предпринимали попытки модифицировать общую теорию относительности и квантовую механику, чтобы разрешить это противоречие, однако эти попытки, среди которых были очень дерзкие и остроумные, терпели провал за провалом.

Так продолжалось до создания теории суперструн<sup>8)</sup>.

С давних времен музыка является источником метафорических образов для тех, кто пытается разгадать тайны Вселенной. Начиная с «музыки сфер» древних пифагорейцев и до «гармонии мира», на протяжении столетий направляющих наши научные поиски, мы пытаемся понять песь природы в величественных хороводах небесных тел и неистовой пляске субатомных частиц. С открытием теории суперструн музыкальные метафоры приобрели удивительную реальность, поскольку согласно этой теории микромир заполнен крошечными струнами, звучание которых оркеструет эволюцию мироздания. Согласно теории суперструн ветры перемен дуют через золотую арфу Вселенной.

В противоположность этому стандартная модель представляет элементарные компоненты мироздания в виде точечных образований, лишенных какой-либо внутренней структуры. Несмотря на необыкновенную мощь (как мы уже упоминали, практически все предсказания стандартной модели о свойствах микромира подтвердились с точностью до одной миллиардной от одной миллиардной доли метра, что представляет собой предел разрешающей способности современной техники), стандартная модель не смогла стать полной или «окончательной теорией», поскольку она не включает гравитационного взаимодействия. Более того, все попытки включить гравитацию в квантово-механическую формулировку этой модели закончились неудачей из-за неистовых флуктуаций структуры пространства, проявляющихся на ультрамикроскопических расстояниях, т. е. на расстояниях, меньших планковской длины. Это неразрешенное противоречие явилось побудительным мотивом для поиска более глубокого понимания природы. В 1984 г. физик Майкл Грин, работавший в то время в колледже Королевы Марии, и Джон Шварц из Калифорнийского технологического института впервые представили убедительные доказательства того, что *теория суперструн* (или, кратко, *теория струн*) может дать такое понимание.

Теория струн предлагает оригинальное и глубокое изменение теоретического описания свойств Вселенной на ультрамикроскопическом уровне — изменение, которое, как постепенно осознают физики, модифицирует эйнштейновскую общую теорию относительности, делая ее полностью совместимой с законами квантовой механики. Согласно теории струн элементарные компоненты Вселенной не являются точечными частицами, а представляют собой крошечные одномерные волокна, подобные бесконечно тонким, непрерывно вибрирующим резино-

## Часть III

### КОСМИЧЕСКАЯ СИМФОНΙΑ

#### Глава 6

#### Только музыка, или Суть теории суперструн

вым дентам. Здесь важно не дать названию ввести нас в заблуждение. В отличие от обычных струн, состоящих из молекул и атомов, струны, о которых говорит теория струн, лежат глубоко в самом сердце материи. Теория струн утверждает, что именно они представляют собой ультрамикроскопические компоненты, из которых состоят частицы, образующие атомы. Струны, являющиеся объектом теории струн, столь малы — в среднем их размер сопоставим с планковской длиной, — что даже при изучении с помощью самого мощного оборудования они *выглядят* точечными.

Однако уже простая замена точечных частиц струнами в качестве фундаментальных компонентов мироздания ведет к далеко идущим последствиям. Первое и самое главное состоит в том, что теория струн, по-видимому, разрешает противоречие между общей теорией относительности и квантовой механикой. Как мы увидим ниже, пространственная протяженность струн является новым ключевым звеном, позволяющим создать единую гармоничную систему, объединяющую обе теории. Во-вторых, теория струн действительно представляет объединенную теорию, поскольку в ней все вещество и все взаимодействия обязаны своим происхождением одной фундаментальной величине — колеблющейся струне. Наконец, как будет показано более подробно в последующих главах, помимо этих блестящих достижений, теория струн еще раз радикально изменяет наши представления о пространстве-времени<sup>1)</sup>.

## Краткая история теории струн

В 1968 г. молодой физик-теоретик Габриэле Веницано корпел над осмыслением многочисленных экспериментально наблюдаемых характеристик сильного ядерного взаимодействия. Веницано, который в то время работал в ЦЕРНе, Европейской ускорительной лаборатории, находящейся в Женеве (Швейцария), трудился над этой проблемой в течение нескольких лет, пока однажды его не осенила блестящая догадка. К большому

своему удивлению он понял, что экзотическая математическая формула, придуменная примерно за двести лет до этого знаменитым швейцарским математиком Леонардом Эйлером в чисто математических целях — так называемая бета-функция Эйлера, — похоже, способна описать одним махом все многочисленные свойства частиц, участвующих в сильном ядерном взаимодействии. Подмеченное Веницано свойство давало мощное математическое описание многим особенностям сильного взаимодействия; оно вызвало шквал работ, в которых бета-функция и ее различные обобщения использовались для описания огромных массивов данных, накопленных при изучении столкновений частиц по всему миру. Однако в определенном смысле наблюдение Веницано было неполным. Подобно зазубренной наизусть формуле, используемой студентом, который не понимает ее смысла или значения, бета-функция Эйлера работала, но никто не понимал почему. Это была формула, которая требовала объяснения. Положение дел изменилось в 1970 г., когда Йохири Нилсен из Чикагского университета, Хольгер Нилсен из института Нильса Бора и Леонард Сасскинд из Станфордского университета смогли выявить физический смысл, скрывавшийся за формулой Эйлера. Эти физики показали, что при представлении элементарных частиц маленькими колеблющимися одномерными струнами сильное взаимодействие этих частиц в точности описывается с помощью функции Эйлера. Если отрезки струн являются достаточно малыми, рассуждали эти исследователи, они по-прежнему будут выглядеть как точечные частицы, и, следовательно, не будут противоречить результатам экспериментальных наблюдений.

Хотя эта теория была простой и интуитивно привлекательной, вскоре было показано, что описание сильного взаимодействия с помощью струн содержит изъяны. В начале 1970-х гг. специалисты по физике высоких энергий смогли глубже заглянуть в субатомный мир и показали, что ряд предсказаний модели, основанной на использовании струн, находится в прямом противоречии с результатами наблюдений. В то же время параллельно шло развитие квантово-

полевой теории — квантовой хромодинамики, — в которой использовалась точечная модель частиц. Успехи этой теории в описании сильного взаимодействия привели к отказу от теории струн.

Большинство специалистов по физике элементарных частиц полагали, что теория струн навсегда отправлена в мусорный ящик, однако ряд исследователей сохранили ей верность. Шварц, например, ошушал, что «математическая структура теории струн столь прекрасна и имеет столько поразительных свойств, что, несомненно, должна указывать на что-то более глубокое»<sup>2)</sup>. Одна из проблем, с которыми физики сталкивались в теории струн, состояла в том, что она, как казалось, предоставляла слишком богатый выбор, что сбивало с толку. Некоторые конфигурации колеблющихся струн в этой теории имели свойства, которые напоминали свойства глюонов, что давало основание действительно считать ее теорией сильного взаимодействия. Однако помимо этого в ней содержались *дополнительные* частицы-переносчики взаимодействия, не имевшие никакого отношения к экспериментальным проявлениям сильного взаимодействия. В 1974 г. Шварц и Джозель Шерк из французской Высшей технической школы сделали смелое предположение, которое превратило этот кажущийся недостаток в достоинство. Изучив странное море колебаний струн, напоминающие частицы-переносчики, они поняли, что эти свойства удивительно точно совпадают с предполагаемыми свойствами гипотетической частицы-переносчика гравитационного взаимодействия — гравитона. Хотя эти «мельчайшие частицы» гравитационного взаимодействия до сих пор так и не удалось обнаружить, теоретики могут уверенно предсказать некоторые фундаментальные свойства, которыми должны обладать эти частицы. Шерк и Шварц обнаружили, что эти характеристики в точности реализуются для некоторых мод колебаний. Основываясь на этом, они предположили, что первое пришествие теории струн закончилось неудачей из-за того, что физики чрезмерно сузили область ее применения. Шерк и Шварц объявили, что теория струн — это не просто теория сильного взаимодействия, это кван-

товая теория, которая, помимо всего прочего, *включает гравитацию*<sup>3)</sup>.

Физическое сообщество отреагировало на это предположение весьма сдержанно. В действительности, по воспоминаниям Шварца, «наша работа была проигнорирована всеми»<sup>4)</sup>. Пути прогресса уже были основательно захламлены многочисленными провалившимися попытками объединить гравитацию и квантовую механику. Теория струн потеряла неудачу в своей первоначальной попытке описать сильное взаимодействие, и многим казалось бессмысленным пытаться использовать ее для достижения еще более великих целей. Последующие, более детальные исследования конца 1970-х и начала 1980-х гг. показали, что между теорией струн и квантовой механикой возникают свои, хотя и меньшие по масштабам, противоречия. Создавалось впечатление, что гравитационная сила вновь смогла устоять перед попыткой теорией в ее описание мироздания на микроскопическом уровне.

Так было до 1984 г. В своей статье, сыгравшей поворотную роль и подожжившей более чем десятилетние интенсивные исследования, которые по большей части были проигнорированы или отвергнуты большинством физиков, Грин и Шварц установили, что незначительное противоречие с квантовой теорией, которым страдала теория струн, может быть разрешено. Более того, они показали, что полученная в результате теория обладает достаточной широтой, чтобы охватить все четыре вида взаимодействий и все виды материи. Вест об этом результате расшатали материю. Вест о том результате распространился по всему физическому сообществу: сотни специалистов по физике элементарных частиц прекратили работу над ментарных частиц прекратили работу над своими проектами, чтобы принять участие в штурме, который казался последней теоретической битвой в многовековом наступлении на глубочайшие основы мироздания.

Я начал работу в аспирантуре Оксфордского университета в октябре 1984 г. Хотя с моей стороны раскрывались перемены в области достижений квантовой теории поля, калибровочной теории и общей теории относительности, среди моих старших коллег-аспирантов было распространено скептическое убеждение, что большая часть от-

крытий физики элементарных частиц уже сделана. Была разработана стандартная модель, и замечательный успех, с которым она предсказывала результаты экспериментов, оставлял мало сомнений в том, что ее полное подтверждение является делом не слишком отдаленного будущего. Выход за ее пределы для включения гравитации и возможного объяснения экспериментальных данных, на которых базируется эта модель (т. е. 19 чисел, характеризующих массы элементарных частиц, их константы взаимодействия и относительную интенсивность взаимодействий, известных из результатов экспериментов, но не объясненных теоретически), казался такой непосильной задачей, что лишь самые бесстрашные исследователи отваживались принять этот вызов. Однако спустя всего шесть месяцев настроения радикально изменились. Весть об успехе Грина и Шварца, в конце концов, дошла даже до аспирантов первого года обучения, и на смену прежнему унынию пришло возбуждающее ощущение причастности к поворотному моменту в истории физики. Многие из нас засиживались глубоко за полночь, штудирова увесистые фолианты по теоретической физике и абстрактной математике, знание которых необходимо для понимания теории струн.

Период с 1984 по 1986 г. теперь известен как «первая революция в теории суперструн». В течение этого периода физиками всего мира было написано более тысячи статей по теории струн. Эти работы окончательно продемонстрировали, что многочисленные свойства стандартной модели, открытые в течение десятилетий кропотливых исследований, *естественным образом вытекают* из величественной системы теории струн. Как заметил Майкл Грин, «момент, когда вы знакомитесь с теорией струн и осознаете, что почти все основные достижения физики последнего столетия следуют — и следуют с такой элегантною — из столь простой отравной точки, ясно демонстрирует вам всю невероятную мощь этой теории»<sup>9</sup>. Более того, для многих из этих свойств, как мы увидим ниже, теория струн дает гораздо более полное и удовлетворительное описание, чем стандартная модель. Эти дости-

жения убедили многих физиков, что теория струн способна выполнить свои обещания и стать окончательной объединяющей теорией.

Однако на этом пути занимавшиеся теорией струн физики снова и снова наткнулись на серьезные препятствия. В теоретической физике часто приходится иметь дело с уравнениями, которые либо слишком сложны для понимания, либо слишком сложны для решения. Обычно в такой ситуации физики не пасуют и пытаются получить приближенное решение этих уравнений. Положение дел в теории струн намного сложнее. Даже сам *выход уравнений* оказался столь сложным, что до сих пор удалось получить лишь их приближенный вид. Таким образом, физики, работающие в теории струн, оказались в ситуации, когда им приходится искать приближенные решения приближенных уравнений. После нескольких лет поражающего воображение прогресса, достигнутого в течение первой революции теории суперструн, физики столкнулись с тем, что используемые приближенные уравнения оказались неспособными дать правильный ответ на ряд важных вопросов, тормозив тем самым дальнейшее развитие исследований. Не имея конкретных идей по выходу за рамки этих приближенных методов, многие физики, работающие в области теории струн, испытали растущее чувство разочарования и вернулись к своим прежним исследованиям. Для тех, кто остался, конец 1980-х и начало 1990-х гг. были периодом испытаний. Красота и потенциальная мощь теории струн манили исследователей подобно золотому сокровищу, надежно запрету в сейфе, видеть которое можно лишь через крошечный глазок, но ни у кого не было ключа, который выпустил бы эти дремлющие силы на свободу. Долгий период «засухи» время от времени прерывался важными открытиями, но всем было ясно, что требуются новые методы, которые позволили бы выйти за рамки уже известных приближенных решений.

Конеч заступо положил захватывающий дух доклад, сделанный Эдвардом Витеном в 1995 г. на конференции по теории струн в университете Южной Калифорнии — доклад, который ошеломил аудиторию, до

каза заполненную ведущими физиками мира. В нем он обнародовал план следующего этапа исследований, положив тем самым начало «второй революции в теории суперструн». Сейчас специалисты по теории струн энергично работают над новыми методами, которые обещают преодолеть ветренные препятствия. Трудности, которые лежат впереди, будут серьезным испытанием для ученых, работающих в этой области, но в результате свет в конце тоннеля, хотя еще и отдаленный, может стать видимым.

В этой и в нескольких последующих главах мы опишем открытия теории струн, явившиеся результатом первой революции и поздних исследований, выполненных до начала второй революции. Время от времени мы будем упоминать достижения, сделанные в ходе второй революции; подробно описание этих новейших достижений будет приведено в главах 12 и 13.

## Снова атомы в духе древних греков?

Как мы говорили в начале данной главы, и как показано на рис. 1.1, теория струн утверждает, что если бы мы могли исследовать точечные частицы, существование которых предполагает стандартная модель, с точностью, выходящей далеко за пределы наших современных возможностей, мы бы увидели, что каждая из этих частиц представляет собой крошечную колеблющуюся струну, имеющую форму петли.

По принятым, которые станут ясны в дальнейшем, длина типичной петли, образованной струной, близка к планковской длине, которая примерно в сто миллиардов миллиардов раз ( $10^{20}$ ) меньше размера атомного ядра. Неудивительно, что современные эксперименты не могут подтвердить струнную природу материи: размеры струн бесконечно малы даже в масштабе субатомных частиц. Для получения прямого подтверждения того, что струна не является точечной частицей, нам потребовался бы ускоритель, способный сталкивать частицы с энергией, в несколько миллионов миллиардов раз превышающей

максимальный уровень, достигнутый на сегодняшней день.

Вскоре мы опишем ошеломляющие выводы, следующие из замены точечных частиц струнами, но сначала давайте рассмотрим более фундаментальный вопрос: из чего состоят струны?

Есть два возможных ответа на этот вопрос. Во-первых, струны действительно являются фундаментальными объектами — они представляют собой «атомы», *неделимые компоненты* в самом истинном смысле этого понятия, предложенного древними греками. Как наименьшие составные части материи, они представляют собой конец пути — последнюю матрешку — в многочисленных слоях, образующих структуру микромира. С этой точки зрения, даже если струны имеют определенные пространственные размеры, вопрос об их составе лишен какого-либо смысла. Если струны состоят из каких-то более мелких компонентов, они не могут быть фундаментальными. Впрочем, из чего бы ни состояли струны, эти элементы немедленно займут место струн в притязании на роль наиболее фундаментальных компонентов мироздания. Используя нашу лингвистическую аналогию, можно сказать, что параграфы состоят из предложений, предложения — из слов, слова — из букв. А из чего состоит буква? С лингвистической точки зрения это конец пути. Буквы есть буквы — они представляют собой фундаментальные строительные блоки письменного языка; они не имеют внутренней структуры. Вопрос об их составе не имеет смысла. Аналогично струна представляет собой просто струну — поскольку нет ничего более фундаментального, нельзя описать ее более фундаментально, чем это струну как нечто, состоящее из каких-то других компонентов.

Это первый ответ. Второй ответ основывается на том простом факте, что сегодня мы не знаем, верна ли теория струн и является ли она окончательной теорией мироздания. Если теория струн неверна — то что же, мы можем забыть струны и начать умственный вопрос об их структуре. Хотя таковой вопрос существует, исследования, как проводившиеся с середины 1980-х гг., показывают, что ее вероятность крайне мала. Оз-

нако история определенно научила нас, что каждый раз, когда мы углубляем наше понимание Вселенной, мы находим все меньше компоненты микромира, составляющие более тонкий уровень организации материи. И так, еще одна возможность, в случае если теория струн не окажется окончательной теорией, состоит в том, что струны образуют еще один слой в луже мифа мироздания, слой, который становится видимым в масштабах планковской длины, но который не является последним слоем. В этом случае струны могут состоять из еще более мелких структур. Специалисты по теории струн осознают такую возможность и ведут теоретические исследования в этом направлении. На сегодняшний день эти исследования привели к некоторым интригующим догадкам о более глубоких уровнях структуры, но они еще не получили окончательного подтверждения. Только время и дальнейшие исследования дадут окончательный ответ на этот вопрос.

За исключением некоторых гипотез, рассматриваемых в главах 12 и 15, мы будем рассматривать струны в том смысле, который следует из первого ответа, т. е. будем считать их наиболее фундаментальными компонентами мироздания.

## Объединение через теорию струн

Помимо неспособности включить в себя гравитационное взаимодействие, стандартная модель обладает еще одним недостатком — она не дает описания устройства объектов, с которыми работает. Почему природа выбрала именно те частицы и взаимодействия, которые были описаны в предыдущих главах и перечислены в табл. 1.1 и 1.2? Почему 19 параметров, которые описывают количественные характеристики этих компонентов, имеют именно те значения, которые имеют? Ученым не удавалось отделиться от чувств, что количество и свойства этих объектов являются совершенно случайными. Скрывается ли за этими, на первый взгляд абсолютно произвольными компонентами, какой-то более глубокий смысл, или физиче-

ские свойства мироздания являются просто «игрой случая»?

Стандартная модель сама по себе не способна дать объяснения всем этим фактам, поскольку она принимает список частиц и их свойств как полученные экспериментально *аходные данные*. Как показатели фондового рынка не могут быть использованы для деления ценности портфеля акций, которым вы владеете, без входных данных о ваших начальных капиталовложениях, так и стандартная модель не может быть использована для получения предсказаний без входных данных, содержащих фундаментальные свойства частиц<sup>6)</sup>. После того как экспериментаторы проведут тщательное измерение этих данных, теоретики смогут использовать стандартную модель для подлающих проверку предсказаний, например, что произойдет, если столкнуть какие-то определенные частицы в ускорителе. Но стандартная модель в той же мере не способна объяснить фундаментальные свойства частиц, перечисленные в табл. 1.1 и 1.2, в какой среднее значение индекса Ду-Джонса не способно ответить на вопрос о начальных капиталовложениях, сделанных десять лет тому назад.

На самом деле, если эксперименты покажут, что в микромире существуют какие-то иные частицы или какие-то дополнительные взаимодействия, то в стандартной модели изменения могут быть легко учтены путем замены списка входных параметров. В этом смысле структура стандартной модели обладает слишком большой гибкостью, чтобы дать объяснение свойствам элементарных частиц: она охватывает целый диапазон различных возможностей.

Теория струн имеет совершенно иной характер. Это теоретическое знание единой и жесткой конструкции. Все входные данные, которые ей необходимы, ограничиваются описываемым ниже единственным параметром, который устанавливает шкалу для проведения измерений. Теория струн способна объяснить все свойства микромира. Чтобы понять это, обратимся сперва к более привычным струнам скрипки. Каждая струна может совершать огромное (на самом деле бесконечное) число различных колебаний, известных под названием *резонансных*

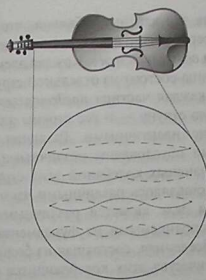


Рис. 6.1. У скрипичных струн существуют резонансные моды колебаний, на которых между концами струны укладывается целое число максимумов и минимумов

колебаний. Пример таких колебаний показан на рис. 6.1. Это колебания, у которых расстояние между максимумами и минимумами одинаково, и между закрепленными концами струны укладывается в точности целое число максимумов и минимумов. Человеческое ухо воспринимает резонансные колебания как различные музыкальные ноты. Схожие свойства имеют струны в теории струн. Они могут осуществлять резонансные колебания, в которых вдоль длины струн укладывается в точности целое число равномерно распределенных максимумов и минимумов. Некоторые примеры таких колебаний показаны на рис. 6.2. Основное утверждение теории струн таково. Точно так же, как различные моды резонансных колебаний скрипичных струн рождают различные музыкальные

ноты, различные моды колебаний фундаментальных струн порождают различные массы и константы взаимодействия. Поскольку это очень важное утверждение, давайте повторим его еще раз. Согласно теории струн свойства элементарных «частиц» — их массы и константы различных взаимодействий — в точности определяются резонансными модами колебаний, реализуемыми внутренними струнами этих частиц.

Легче всего понять эту ассоциацию для массы частицы. Энергия конкретной моды колебания струны зависит от ее амплитуды — максимального расстояния между максимумами и минимумами, и от длины волны — расстояния между двумя соседними пиками. Чем больше амплитуда и чем короче длина волны, тем больше энергия. Это совпадает с нашим интуитивным представлением — более интенсивные колебания несут больше энергии, менее интенсивные — меньше. Пара примеров показана на рис. 6.3. Такая картина, опять же, привычна для нас: если коснуться струны скрипки сильнее, звук будет более сильным. Согласно специальной теории относительно-сти энергия и масса представляют собой две стороны одной медали: чем больше энергия, тем больше масса и наоборот. Таким образом, в соответствии с теорией струн, масса элементарной частицы определяется *энергией* колебания внутренней струны этой частицы. Внутренние струны более тяжелых частиц совершают более интенсивные колебания, струны легких частиц колеблются менее интенсивно.

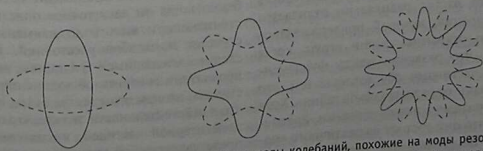


Рис. 6.2. Петли теории струн имеют резонансные моды колебаний, похожие на моды резонансных колебаний скрипичных струн. При этом вдоль длины струны укладывается в точности целое число максимумов и минимумов





казали начало бесконечной последовательности вариантов, характеризующих вероятности колебаний с увеличивающимся числом максимумов и минимумов. Не означает ли это существование бесконечной последовательности элементарных частей, что находилось бы в явном противоречии с современной ситуацией в экспериментальных исследованиях, показанной на табл. 1.1 и 1.2?

Ответом является «да». Если теории струн верна, каждой из бесконечного множества резонансных мод колебаний струн должна соответствовать элементарная частица. Здесь, однако, есть один важный момент. Высокое натяжение струн гарантирует, что за редким исключением эти моды колебаний соответствуют чрезвычайно тяжелым частицам (исключение составляют колебания с минимальной энергией, которые отличаются почти полным сокращением массы ввиду квантовых флуктуаций). Слово «тяжелый» здесь опять же означает «во много раз тяжелее планковской массы». Поскольку самые мощные из существующих ускорителей способны достичь энергий порядка тысячи масс протона, что составляет менее одной миллионной от одной миллиардной планковской энергии, возможность лабораторного изучения этих новых частиц, предсказываемых теорией струн, появится еще не скоро.

Существуют, однако, другие, менее прямые способы поиска таких частиц. Например, энергии при возникновении Вселенной были достаточно высокими, чтобы такие частицы появлялись в изобилии. Вообще говоря, вряд ли можно ожидать, что эти частицы дожили до наших дней, поскольку сверхтяжелые частицы обычно нестабильны и высвобождают свои огромные массы путем последовательного распада на все более легкие частицы, превращаясь, в конце концов, в обычные, относительно легкие частицы окружающего нас мира. Однако существует вероятность того, что такое сверхтяжелое состояние колебаний струны, являющееся реликтом эпохи Большого взрыва, могло дожить до наших дней. Открытие таких частиц, которое будет обсуждаться подробнее в главе 9, стало бы эпохальным событием.

## Гравитация и квантовая механика в теории струн

Единая схема, которую дает теория струн, очень привлекательна. Но истинную неограниченность придает ей возможность избавиться от вражды между гравитационным взаимодействием и квантовой механикой. Напомним, что проблема при объединении общей теории относительности и квантовой механики возникает, когда основное понятие первой из них — плавно искривленная геометрическая структура пространства и времени — сталкивается с главной особенностью второй, что все во Вселенной, включая структуру пространства и времени, испытывает квантовые флуктуации, интенсивность которых растет при уменьшении масштаба исследований. На субпланковском масштабе расстояний квантовые флуктуации становятся столь сильными, что приводят к разрушению понятия гладкого искривленного геометрического пространства, и это означает нарушение принципов общей теории относительности.

Теория струн смягчает неистовые квантовые флуктуации путем «размазывания» микроскопических характеристик пространства. На вопрос о том, что это значит в действительности и как это разрешает противоречие, есть два ответа: грубый и более точный. Мы поочередно рассмотрим каждый из них.

### Грубый ответ

Хотя это звучит довольно наивно, один из способов, которым мы можем изучить структуру какого-либо объекта, состоит в том, чтобы бросать в него другие предметы и наблюдать за тем, как они отражаются от него. В качестве примера укажем, что мы способны видеть предметы потому, что наши глаза собирают, а наш мозг расширяет информацию, которую несут фотоны, отражающиеся от объектов, на которые мы смотрим. На этом же принципе основаны ускорители частиц: в них частицы материи, например, электроны и протоны, сталкиваются между собой и с другими объектами; затем

специальные детекторы анализируют разлетающиеся осколки для получения информации, позволяющей определить структуру объектов, участвующих в столкновениях.

Общее правило при таких исследованиях состоит в том, что размер частиц, используемых для исследования, определяет нижний предел разрешающей способности измерительной установки. Чтобы лучше понять смысл этого важного утверждения, представим, что Слим и Джим решили приобщиться к культуре и записались в кружок по рисованию. По ходу занятий Джима начинают все более раздражать растущие художественные способности Слима, и он вызывает его на необычное состязание. Он предлагает, чтобы каждый взял косточку от персика, закрепил ее в тисках и изобразил наиболее точным образом. Необычность предложения Джима состоит в том, что ни ему, ни Слиму не разрешается смотреть на косточку. Вместо этого каждый из них может бросать в нее разные предметы (но не фотоны!), наблюдать за тем, как они отскакивают от косточки, и на этой основе определять размеры, форму и детали строения косточки (см. рис. 6.4). Тайком от Слима Джим заряжает его «стрельку» крупными шариками (как на рис. 6.4а), а свою — пятимиллиметровыми пластиковыми пулями (как на рис. 6.4б). Оба заводят свои орудия, и состязание начинается.

Лучше, что удалось изобразить Слиму, показано на рис. 6.4а. Наблюдая за траекторией отскакивающих шариков, он смог установить, что размер косточки мал, и что она имеет твердую поверхность. Но это все, что ему удалось узнать. Шарики были слишком велики, чтобы на них оказывали влияние более мелкие детали строения персиковой косточки. Когда Слим бросил взгляд на рисунок Джима (рис. 6.4б), он был поражен тем, что увидел. Однако быстрый взгляд на стрельку Джима позволил ему понять, в чем дело: небольшие пульки, используемые Джимом, были достаточно малы, чтобы на угол, под которым они отражались, оказывали влияние некоторые крупные детали строения косточки. Таким образом, выстрелив в косточку большим количеством пятимиллиметровых пулек и наблюдая за их

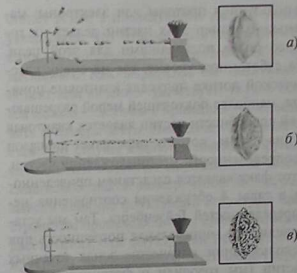


Рис. 6.4. Персиковая косточка закреплена в тисках. Для создания ее изображения используются только наблюдения за тем, как отскакивают предметы — «зонды», — брошенные в нее. Используя зонды все меньшего размера — шарик (а), пятимиллиметровые пульки (б), полумиллиметровые пульки (в), можно получать все более детальное изображение

траекториями после отскока, Джим смог нарисовать более подробный рисунок. Чтобы не проиграть, Слим взял свою стрельку, заполнил ее снарядами еще меньшего размера — полумиллиметровыми пулями, — мера — которые так малы, что на характер их отражения будут оказывать влияние мельчайшие морщинки на поверхности косточки. Наблюдая за отскоком этих пулек, он смог нарисовать рисунок, который принес ему победу (рис. 6.4в).

Урок, который можно извлечь из этого маленького состязания, ясен: размер частиц-зондов не может существенно превышать размер изучаемых физических особенностей; в противном случае разрешающая способность исследования окажется недостаточной для изучения интересующих нас структур.

Те же самые выводы относятся, конечно, и к случаю, когда мы захотим провести более глубокое исследование персиковой косточки: чтобы определить ее структуру на атомки, чтобы определить ее структуру на субатомном и субатомном уровне. Полумиллиметровые пульки не дадут никакой полезной информации по этому вопросу; они явно слишком велики, чтобы исследовать структуру на атомном уровне. Именно по этой причине в ускорителях в качестве зондов





проблемой только потому, что не поняли истинных правил игры: новые правила гласят, что существует предел тому, насколько глубоко можно исследовать Вселенную, — предел, определяющий, до какого уровня наше обычное понятие расстояния может примениться к ультрамикроскопической структуре мироздания. Становится понятно, что фатальные флуктуации структуры пространства возникают в наших теориях из-за несоословленности об этих пределах: теория с точечными частицами далеко выходит за рамки физической реальности.

Видя кажущуюся простоту этого решения, позволяющего разрешить конфликт, возникающий между общей теорией относительности и квантовой механикой, мы могли удивиться, почему прошло столько времени, пока ученые не осознали, что точечная модель частиц всего лишь идеализация, и что в реальном мире элементарные частицы имеют некоторые конечные размеры. Это второй момент, на который мы хотели бы обратить внимание. Уже давно некоторые из величайших умов теоретической физики, такие как Паули, Гейзенберг, Дирак и Фейнман, *предполагают*, что компоненты природы в действительности могут быть не точками, а маленькими, колеблющимися «капельками» или «ядрышками». Однако они, как и другие ученые, столкнулись с тем, что очень трудно построить теорию, фундаментальные компоненты которой не являются точечными частицами, и которая, в то же время, совместима с основополагающими физическими принципами, такими, как сохранение квантово-механической вероятности (согласно которому физические объекты не могут внезапно исчезать из Вселенной без всякого следа) и невозможность передачи информации со скоростью, превышающей скорость света. Снова и снова их исследования с разных точек зрения показывали, что отказ от парадигмы точечных частиц приводит к несобытию одного из этих принципов или их обоих. Поэтому в течение долгого времени казалось невозможным построить разумную квантовую теорию, основанную на чем либо ином, кроме точечных частиц. За двадцать с лишним лет глубоких исследований выяс-

нилась поистине впечатляющая особенность теории струн: при всей непривычности некоторых понятий теория струн обладает всеми свойствами, которые должна иметь каждая разумная физическая теория. И, более того, благодаря наличию мод колебаний, реализующих гравитон, теория струн представляет собой квантовую теорию, включающую гравитацию.

### Более точный ответ

Грубый ответ ухватывает сущность того, почему теория струн смогла добиться успеха там, где предшествующие теории, основанные на точечной модели частиц, потерпели неудачу. Поэтому без ущерба для понимания дальнейшего можно сразу перейти к следующему разделу. Однако, рассмотрев в главе 2 основные идеи специальной теории относительности, мы получили в свое распоряжение средства, позволяющие более точно описать, как теория струн борется с разрушительными квантовыми флуктуациями.

В более точном ответе мы будем использовать те же основные идеи, которые содержались в приближенном ответе, но выразим их непосредственно на языке струн. Мы увидим, как конечность размера струн «размывает» информацию, которую можно было бы получить при зондировании с использованием точечных частиц, и тем самым, к нашему счастью, снимает проблему поведения пространства на ультрамикроскопических расстояниях, ответственную за центральную дилемму современной физики.

Сначала рассмотрим, как происходило бы взаимодействие между точечными частицами, если бы они действительно существовали, и, соответственно, как можно было бы использовать их в качестве физических зондов. Наиболее важным является показанный на рис. 6.5 случай взаимодействия между частицами, движущимися по пересекающимся путям, приводящим к столкновению. Если бы эти частицы были бильярдными шарами, они могли бы столкнуться, после чего каждая из них начала бы двигаться по новой траектории. Квантовая теория



Рис. 6.5. Две частицы взаимодействуют: они «сталкиваются» между собой, и это приводит к изменению траектории каждой из них

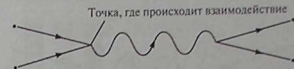


Рис. 6.6. В квантовой теории поля частица и ее античастица могут мгновенно аннигилировать с образованием фотона. Затем этот фотон порождает другую частицу и античастицу, которые движутся по расходящимся траекториям

поля с точечными частицами показывает, что то же самое происходит при столкновении элементарных частиц — они отскакивают друг от друга и продолжают свой путь по новым траекториям, — однако детали этого процесса отличаются.

Для большей определенности и простоты представим себе, что одна из двух частиц является электроном, а другая — ее античастицей, позитроном. При столкновении частицы и античастицы они аннигилируют с выделением энергии в чистом виде, фотонах<sup>9</sup>, чтобы отличить выходящую траекторию фотона от входящих траекторий электрона и позитрона, мы будем, следуя принятому в физике соглашению, изображать ее волнистой линией. Обычно фотон проходит небольшое расстояние, после чего высвобождает энергию, полученную от первоначальной электрон-позитронной пары, путем образования другой электрон-позитронной пары, показанной в правой части рис. 6.6. Эти две частицы испытывают электромагнитное взаимодействие и, в конце концов, разлетаются по расходящимся траекториям. Такая последовательность событий имеет определенное сходство с описанием бильярдных шаров.

Нас интересуют детали взаимодействия, в частности, точка, где начальные электрон и протон аннигилируют с образованием фотона. Как станет ясно далее, главным событием тот факт, что время и место этого события могут быть установлены однозначно и точно, как показано на рис. 6.6.

Как изменится описание, приведенное выше, если после тщательного исследования объектов, которые мы считали нулевыми точками, они окажутся одномерными струнами? Основной процесс взаимодействия будет тем же самым, но теперь движущиеся по пути к столкновению об-

ъекты представляют собой осциллирующие петли, показанные на рис. 6.7. Для определенных колебаний струны ее моды будут как раз соответствовать протону и электрону, движущимся курсом на столкновение, как показано на рис. 6.6. Истинный струнный характер становится очевидным только при исследовании в ультрамикроскопическом масштабе, выходящем далеко за пределы современных экспериментальных возможностей. Как и в случае с точечными частицами, две струны сталкиваются и аннигилируют, превращаясь во вспышку, которая представляет собой фотон и сама по себе является струной, колеблющейся в определенной моде. Таким образом, две исходные струны взаимодействуют между собой, сливаясь и образуя третью струну, как показано на рис. 6.7. Как и в случае точечных частиц, эта струна проходит некоторое расстояние, после чего выделяет энергию, полученную от двух исходных струн, разделив ее на две новые струны, которые продолжают движение. Опять же, со всех точек зрения, кроме той, которая относится к микроскопическим масштабам, это будет выглядеть идентично взаимодействию между точечными частицами на рис. 6.6.

Существует, однако, радикальное различие между этими двумя описаниями. Мы чье между этими двумя описаниями то подчеркнуть, что взаимодействие между точечными частицами происходит в однозначной идентифицируемой точке пространства и времени, в точке, с положением которой мы сейчас не обладаем. Как мы сейчас согласны все взаимодействие между струнами, увидим, для взаимодействия между струнами это неверно. Мы продемонстрируем это, как Джордж и Грейс, два наблюдателя, находящихся в относительно движении, могли бы описать это взаимодействие. Мы увидим, что они не придут к единому

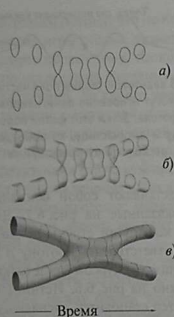


Рис. 6.7. а) Две струны, движущиеся курсом на столкновение, могут слиться и образовать третью струну, которая вслед за этим может разделиться на две струны, движущиеся по расходящимся траекториям. б) Тот же процесс, что и на рис. а), но более явно прослеживающий движение струн. в) «Замедленная киносъемка» двух взаимодействующих струн дает мировую поверхность

мнению по вопросу о том, где и когда две струны впервые пришли в соприкосновение.

Представим, что мы наблюдаем за взаимодействием двух струн с помощью фотокамеры, затвор которой остается открытым, и вся хронология процесса регистрируется на одном фрагменте пленки<sup>(10)</sup>. На рис. 6.7 в показан результат: его называют *мировой поверхностью*. Путем «разрезания» мировой поверхности на параллельные части (примерно так же, как мы разрезаем на куски батон хлеба) можно восстановить, момент за моментом, историю взаимодействия струн. Пример такого разрезания показан на рис. 6.8. В частности, на рис. 6.8 а мы показали Джорджа, пристально наблюдающего за двумя сближающимися частями, а также плоскость, которая вычленивает все события в пространстве, проходящие одновременно с его точки зрения. Как часто делалось в предыдущих главах, для наглядности мы отобразили на диаграмме одно пространственное измерение. На самом деле, конечно, существует трехмерный массив событий, которые происходили одновременно для любого наблю-

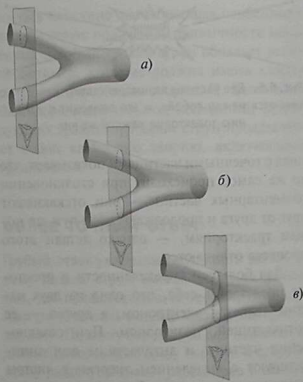


Рис. 6.8. Две исходные струны (с точки зрения Джорджа) в три последовательных момента времени. В моменты а) и б) струны сближаются, в момент в), с его точки зрения, они впервые соприкоснулись

дателя. На рис. 6.8 б и 6.8 в приведены два последовательных моментальных снимка — два последовательных «среза» мировой поверхности, — показывающих, как Джордж видит две струны, приближающиеся друг к другу. Особую важность имеет отмеченный на рис. 6.8 в момент, когда, с точки зрения Джорджа, две струны войдут в соприкосновение и сольются, образовав третью струну.

А теперь повторим все то же самое для Грейса. Как мы указывали в главе 2, относительно движение Джорджа и Грейса приведет к тому, что они не согласятся по вопросу о том, какие события являются одновременными. С точки зрения Грейса события в пространстве, являющиеся одновременными, лежат в другой плоскости, показанной на рис. 6.9. Иными словами, по мнению Грейса, для того чтобы момент за моментом восстановить процесс взаимодействия, мировая поверхность на рис. 6.7 а должна быть «нарезана» на куски под другим углом.

На рис. 6.9 б и 6.9 в мы снова показали последовательные моменты времени, но теперь уже с точки зрения Грейса, включая

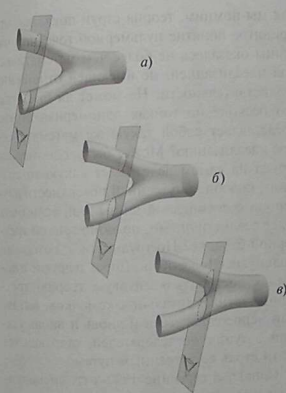


Рис. 6.9. Две исходные струны (с точки зрения Грейса) в три последовательных момента времени. В моменты а) и б) струны сближаются, в момент в), с ее точки зрения, они впервые соприкоснулись



Рис. 6.10. Мнения Джорджа и Грейса по вопросу о месте, в котором произошло взаимодействие, разойдутся

момента, когда две начальные струны по ее наблюдениям войдут в соприкосновение и образуют третью струну.

Сравнивая рис. 6.8 в и 6.9 в (результат показан на рис. 6.10), мы видим, что мнения Джорджа и Грейса разделяется относительно того, где и когда две исходные струны впервые соприкоснулись, т. е. где они взаимодействовали. Поскольку струна является протяженным объектом, это означает, что не существует однозначного места в пространстве или момента во времени, когда струны начали взаимодействовать — эти характеристики зависят от того, как движется наблюдатель.

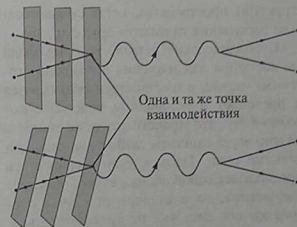


Рис. 6.11. Наблюдатели, находящиеся в относительном движении, придут к согласию о месте и времени взаимодействия между двумя частицами

Если применить те же самые рассуждения к взаимодействию точечных частиц, как показано на рис. 6.11, мы вновь приходим к выводам, которые уже получили ранее: существует определенная точка в пространстве и момент во времени, когда произошло взаимодействие частиц. Все взаимодействие точечных частиц происходит в одной определенной точке. Когда сила, связанная со взаимодействием, представляет собой гравитационную силу, т. е. когда частица, передающая взаимодействие, является гравитоном, а не фотоном, такая упаковка всей энергии взаимодействия в одну точку ведет к катастрофическим результатам, вроде упоминавшихся ранее бесконечных ответов. В противоположность этому струны «размазывают» место, в котором происходит взаимодействие. Поскольку разные наблюдатели регистрируют взаимодействие происходящим в разных точках левой части поверхности на рис. 6.10, это означает, что точка взаимодействия в действительности размазана по всей этой области. Это увеличивает область, в которой происходит взаимодействие, и в слуховой гравитационной силы такое размазывание существенно смягчает ультрамикроскопические свойства, настолько, что вычисления дают нормальные конечные результаты вместо получившихся ранее бесконечностей. Это более точная версия того размазывания, о котором шла речь в грубом ответе, в предыдущем разделе. Полчеркнем еще раз, это размазывание приводит к сглаживанию ультрамикроскопических флуктуаций

структуры пространства, когда субпланковские расстояния сливаются друг с другом.

Субпланковские детали, которые были бы доступны для изучения с помощью точечных частиц, в теории струн смазываются и предстают в безобидном виде. Это подобно тому, что происходит, если смотреть на мир через слишком слабые или слишком сильные очки. Однако, если теория струн представляет собой окончательное описание мироздания, то в отличие от случая плохого зрения здесь уже не существует никаких «корректирующих линз», через которые смогли бы отчетливо проявиться предполагаемые субпланковские флуктуации. Несовместимости общей теории относительности и квантовой механики, проявляющиеся только в масштабе субпланковских расстояний, можно избежать во Вселенной, где есть нижний предел для расстояний, которые доступны для исследований или которые существуют в обычном смысле этого слова. Такова Вселенная, описываемая теорией струн: в ней законы макромира и микромира могут быть без ущерба объединены, после того как мы покончили с воображаемой катастрофой, возникающей на ультрамикроскопических расстояниях.

## Не только струны?

Струны имеют две важные особенности. В-первых, несмотря на конечность пространственных размеров, они могут быть непроводимо описаны в рамках квантовой механики. Во-вторых, среди резонансных мод колебаний имеется мода, свойства которой в точности совпадают со свойствами гравитона: тем самым гарантируется, что гравитационное взаимодействие представляет собой неотъемлемую часть этой теории. Однако,

как мы помним, теория струн показала, что принятое понятие нульмерной точечной частицы оказалось не более чем математической идеализацией, не имеющей отношения к действительности. Не может ли быть так, что бесконечно тонкая одномерная струна представляет собой такую же математическую идеализацию? Может быть, одномерная струна на самом деле имеет какую-то толщину, подобно внутренней поверхности двумерной велосипедной шины или, если быть более реалистичными, подобно тонкой трехмерной барашке? Но трудности, с которыми столкнулись Гейзенберг, Дирак и другие в попытках построить квантовую теорию трехмерных фундаментальных комочков, выглядели непреодолимыми и вновь и вновь ставили в тупик исследователей, старавшихся пойти столь естественным путем.

Однако в середине 1990-х гг. специалисты по теории струн, используя косвенные и довольно сложные рассуждения, несколько неожиданно установили, что подобные фундаментальные объекты действительно играют важную и нетривиальную роль в самой теории струн. Исследователи постепенно осознали, что теория струн содержит не только струны. Важнейшее наблюдение, играющее центральную роль во второй революции в теории суперструн, начатой Виттенем и его коллегами в 1995 г., состоит в том, что теория суперструн в действительности включает в себя компоненты различной размерности: элементы, похожие на двумерные фризбидиски, на трехмерные капли, и даже еще более экзотические конструкции. Эти новейшие достижения будут рассмотрены в главах 12 и 13. А пока будем следовать хронологии открытий и обсудим новые поразительные свойства Вселенной, состоящей не из нульмерных точечных частиц, а из одномерных струн.

## Глава 7

### «Супер» в суперструнах

Когда в ходе экспедиции Эддингтона 1919 г., организованной для проверки предсказаний Эйнштейна об отклонении света звезд Солнцем, был получен положительный результат, голландский физик Хендрик Лоренц известил об этом Эйнштейна телеграммой. Когда содержание телеграммы, подтверждающей общую теорию относительности, распространилось по всему миру, один студент задал Эйнштейну вопрос, о чем бы он подумал, если бы эксперимент Эддингтона не обнаружил предсказанного отклонения лучей света звезд. Эйнштейн ответил: «Мне было бы жаль Всевышнего, поскольку теория *верна*!». Конечно же, если бы эксперименты действительно не подтвердили предсказаний Эйнштейна, его теория была бы признана неверной, и общая теория относительности не стала бы одним из столпов, на которых покоится современная физика. На самом деле Эйнштейн имел в виду, что общая теория относительности описывает гравитацию с таким изяществом, используя такие простые и в то же время мощные идеи, что он не мог себе представить, как природа могла пройти мимо этой возможности. С точки зрения Эйнштейна общая теория относительности была слишком красивой, чтобы оказаться неверной.

Однако эстетические аргументы не решают научных споров. В конечном счете, истинность физических теорий проверяется тем, насколько успешно они объясняют бесстрастные и упрямые экспериментальные данные. Однако к этому последнему утверждению есть одна очень важная оговорка. Когда теория находится в стадии разработки, ее неполнота часто не позволяет детально установить все ее экспериментальные следствия. Тем не менее, физики должны определять свой выбор и указать направления, в которых будут развиваться исследования такой

незавершенной теории. Некоторые из этих решений диктуются внутренней логической непротиворечивостью; мы определенно требуем, чтобы любая разумная теория не содержала логически абсурдных положений. Другие решения обусловлены преимуществами одних теоретических конструкций над другими с точки зрения их следствий для экспериментальных исследований; обычно нас мало интересуют теории, содержание которых не имеет отношения ни к чему, с чем мы сталкиваемся в окружающем нас мире. Однако, несомненно, бывают случаи, когда решения, принимаемые физиками-теоретиками, основываются на эстетических соображениях, на ощущениях того, что красота и элегантность той или иной теории соответствует красоте и элегантности окружающего нас мира. Конечно, нет никаких гарантий, что такие соображения приведут нас к истине. Может быть, глубоко в своей основе структура мироздания менее элегантна, чем та, которую подсказывает наш опыт. Или, возможно, мы обнаружим, что современные эстетические критерии потребуют существенного пересмотра на эстетических в менее привычных условиях. Тем не менее, и особенно сегодня, когда мы вступаем в эру, где наши теории описывают такие сферы мироздания, которые все труднее поддаются экспериментальному изучению, физики будут рассчитывать на то, что подобные эстетические соображения помогут избежать эстетических направлений. До настоящего времени таких направлений не раз демонстрировал мне такой подход и предсказательную силу.

В физике, как и в искусстве, одну из ключевых ролей в эстетических принципах играет симметрия. Однако в отличие от искусства, в физике понятие симметрии имеет очень конкретный и точный смысл. На самом деле, акkuratно облекая это точное по-

нятие симметрии в математическую форму, в течение последних нескольких десятилетий физики смогли разработать теории, в которых частицы вещества и частицы, передающие взаимодействие, переплетены более тесно, чем это считалось возможным когда-либо ранее. Подобные теории, объединяющие не только существующие в природе взаимодействия, но и материальные компоненты, имеют максимально возможную степень симметрии. По этой причине такие теории получили название *суперсимметричных*. Как мы увидим ниже, теория суперструн является одновременно претчей и кульминацией суперсимметричных моделей.

## Характер физических законов

Вообразим себе Вселенную, в которой законы физики являются такими же недолговечными, как и течения в море, меняясь от года к году, день ото дня или даже от мгновения к мгновению. Можно утверждать наверняка, что если эти изменения не нарушат основных жизненных процессов, в таком мире вас некогда будет скучать. Простейшие действия превратятся в захватывающие приключения, поскольку случайные изменения законов природы не позволят вам или кому-либо еще использовать прошлый опыт для предсказания будущего.

Такая Вселенная была бы кошмаром для физика. Физики, как и большинство остальных людей, полагаются на стабильность мироздания: законы, которые истины сегодня, были истины вчера и останутся истинными завтра (даже если мы не настолько умны, чтобы понимать все эти законы). В конце концов, какой смысл следует вкладывать в слово «закон», если он может меняться столь незакономерно? Сказанное не означает, что Вселенная статична; Вселенная, несомненно, изменяется самым разнообразным образом от одного момента времени к другому. Скорее, это означает, что законы, управляющие подобной эволюцией, постоянны и неизменны. Возникает вопрос: действительно ли мы знаем, что это верно? На самом деле, не знаем. Однако наши успехи в описании многочисленных особенностей

устройства мироздания, начиная от первого момента после Большого взрыва и по сегодняшний день, дают уверенность в том, что если законы природы и изменяются, то они должны делать это очень медленно. Простейшее предположение, согласующееся с тем, что нам известно на сегодняшний день, состоит в том, что законы природы неизменны.

Теперь представим себе Вселенную, в разных частях которой свои законы физики, и эти законы, как местные обычаи, изменяются непредсказуемым образом от места к месту и отчаянно сопротивляются любому внешнему влиянию. Путешествие в таком мире, подобно приключениям Гулливера, заставит вас столкнуться с огромным разнообразием непредвиденных ситуаций. Однако с точки зрения физика это опять будет кошмаром. Очень трудно, например, примириться с фактом, что законы, которые действуют в одной стране — или даже в одном штате, — могут не действовать в другом. Но попробуйте представить, что произойдет, если таким же образом будут меняться законы *природы*. В таком мире эксперименты, проведенные в одном месте, не дадут никакой информации о физических законах, действующих в других местах. Физики должны будут снова и снова повторять свои эксперименты в разных местах, чтобы установить характер действующих там физических законов. К счастью, все, что мы знаем на сегодняшний день, говорит о том, что повсеместно действуют одни и те же законы физики. Эксперименты, проводимые по всему миру, могут быть объяснены на основе одних и тех же физических принципов. Более того, наша способность объяснить многочисленные астрофизические наблюдения, относящиеся к самым удаленным уголкам Вселенной, используя один и тот же неизменный набор физических принципов, заставляет нас верить в то, что *действительно* повсюду правят одни и те же физические законы. Поскольку мы никогда не бывали на противоположном краю Вселенной, мы не можем исключить возможность того, что где-то физика имеет совершенно иной характер, но все известные нам данные заставляют отвергнуть такой вариант.

Опять же, сказанное не означает, что Вселенная выглядит одинаково в разных местах. Космонавт, скачущий по Луне на «кузнечике» (палке с пружиной), способен пролежать массу вещей, которые невозможно себе представить на Земле. Но мы понимаем, что это различие связано с тем, что Луна имеет гораздо меньшую массу, чем Земля; это вовсе не означает, что закон гравитации изменяется от одного места к другому. Ньютоновский или, точнее, эйнштейновский закон гравитации является одинаковым и для Земли, и для Луны. Различия в опыте космонавтов связаны с изменением обстановки, а не с изменением физических законов.

Физики называют эти два свойства физических законов, а именно то, что они не зависят от того, когда или где мы их применяем, *симметриями* природы. Используя этот термин, физики имеют в виду, что природа трактует каждый момент во времени и каждую точку в пространстве идентично, симметрично, гарантируя, что будут действовать одни и те же фундаментальные законы. Подобно их действию в живописи и в музыке, такие виды симметрии вызывают глубокое удовлетворение: они подчеркивают порядок и согласие в функционировании мироздания. Элегантность, с которой богатые, сложные и разнообразные явления вытекают из простого набора универсальных законов, составляет немалую часть того, что имеют в виду физики, используя слово «прекрасный».

В нашем обсуждении, посвященном специальной и общей теории относительности, мы столкнулись и с другими видами симметрии в природе. Напомним, что принцип относительности, который лежит в основе специальной теории относительности, гласит, что законы физики будут одинаковыми для наблюдателей, движущихся равномерно относительно друг друга. Этот принцип представляет собой разновидность симметрии, поскольку он означает, что природа относится к наблюдателям совершенно одинаково, симметрично. Каждый такой наблюдатель имеет право считать, что он находится в состоянии покоя. Подчеркнем еще раз, что это не означает идентичности картины, ко-

торую будут видеть разные наблюдатели; как мы показали ранее, их наблюдения могут существенно расходиться. Дело не в этом. Подобно различиям в ощущениях энтузиастов прыжков на палках с пружиной на Земле и на Луне, различия в наблюдениях отражают особенности обстановки, в которой проводились наблюдения, ведь наблюдатель находился в относительном движении. Но то, что они наблюдали, управлялось одними и теми же законами.

Открыл принцип эквивалентности, основу общей теории относительности, Эйнштейн значительно расширил этот тип симметрии. Он показал, что законы физики в действительности идентичны для всех наблюдателей, даже для тех, которые находятся в состоянии сложного ускоренного движения. Напомним, что Эйнштейн придал этой идее законченный вид, осознав, что ускоряющийся наблюдатель имеет полное право считать, что он находится в состоянии покоя, утверждая, что сила, действующая на него, обусловлена гравитационным полем. После включения в данную систему гравитации все возможные точки зрения становятся абсолютно равноправными. Помимо несомненной эстетической привлекательности такой равноправной трактовки всех видов движения, эти принципы симметрии, как мы вина, эти принципы симметрии, как мы вина, играют ключевую роль в поразительных выводах о характере гравитации, к которым пришел Эйнштейн.

Есть ли еще принципы симметрии, имеющие дело с пространством, временем и движением, которым должны удовлетворять законы физики? Если вы сможете указать еще мыслите об этом, под каким углом вы проведете от того, под каким углом вы проведете свои наблюдения. Например, если вы хотите какой-то эксперимент и попытаетесь это решение повернуть вашу установку это решение повернуть вашу установку и повторить опыт, должны действовать те же самые законы. Этот принцип известен под названием *вращательной симметрии*, он означает, что законы физики трактуют все возможные *направления* как равноправные. Данный принцип симметрии имеет такое же значение, как и рассмотренные выше.

Существуют ли какие-либо еще принципы симметрии? Не пропустили ли мы какой-нибудь из них? Вы можете предложить калибровочные симметрии, связанные с негравитационными силами, обескуражившие в главе 5. Да, это несомненные симметрии в природе, но они являются более абстрактными по своему характеру; в данный момент мы хотим сконцентрировать наше внимание на тех видах симметрии, которые имеют непосредственное отношение к пространству, времени или движению. Если добавить это условие, по всей вероятности, вам не удастся предложить чего-либо нового. На самом деле в 1967 г. физики Сидни Коулмен и Джеффри Мандула сумели доказать, что никакие другие виды симметрии, связанные с пространством, временем или движением, не могут сочетаться с принципами симметрии, рассмотренными выше, и приводить к теории, имеющей какое-либо отношение к нашему миру.

Однако впоследствии более тщательное изучение этой теории, основанное на годгах ряда физиков, позволило обнаружить одну небольшую лазейку: результат Коулмена—Мандулы не охватывает симметрии, связанные с понятием, известным как *спин*.

## Спин

Элементарные частицы, например электрон, могут вращаться вокруг атомных ядер подобно тому, как Земля вращается вокруг Солнца. Однако может показаться, что в традиционной точечной модели электрона нет аналога вращению Земли вокруг своей оси. Когда объект вращается, точки, расположенные на оси вращения, подобно *центральной точке* фрисби-диска, остаются неподвижными. Но если какой-нибудь объект является действительно точечным, у него нет «других точек», которые не находились бы на оси вращения. В результате может показаться, что такого понятия, как вращение точечного объекта, попросту не существует. Много лет назад исследование этого вопроса привело к открытию еще одного поразительного квантового эффекта.

В 1925 г. голландские физики Джордж Уленбек и Сэмюэль Гудсмит осознали, что многие удивительные результаты, относящиеся к свойствам излучаемого и поглощаемого атомами света могут быть объяснены, если предположить, что электроны обладают некоторыми весьма специфическими *магнитными* свойствами. Примерно за сто лет до этого французский физик Андре-Мари Ампер показал, что магнетизм обязан своим происхождением движению электрических зарядов. Уленбек и Гудсмит исследовали этот факт и установили, что только один конкретный вид движения электрона может привести к появлению магнитных свойств, на которые указывали экспериментальные данные: это было *вращательное* движение — *спин* электрона. Вопреки канонам классической физики, Уленбек и Гудсмит провозгласили, что электрон, подобно Земле, может кружиться по орбите и *одновременно* вращаться вокруг собственной оси.

Считали ли Уленбек и Гудсмит, что электрон действительно вращается вокруг своей оси? И да, и нет. На самом деле их работа показала, что существует квантово-механическое понятие спина, которое в определенной степени напоминает вращение объекта вокруг собственной оси, но которое, по сути, представляет квантово-механическое явление. Это одно из тех свойств микромира, которое не имеет аналога в классической физике, а является экспериментально подтверждаемой квантовой особенностью. Представьте себе, например, вращающегося фигуриста. Когда он прижимает руки к телу, его вращение ускоряется, когда разводит руки в стороны — вращение замедляется. Однако рано или поздно, в зависимости от того, с какой энергией он начал свое вращение, его движение замедлится, а он остановится. Не так обстоят дела со спином, открытым Уленбеком и Гудсмитом. Согласно их работе и данным последующих исследований, каждый электрон во Вселенной всегда *вращается с постоянной и никогда не меняющейся скоростью*. Спин электрона не является промежуточным состоянием движения, которое мы наблюдаем в случае более привычных объектов, по тем или иным причинам пришедших во вращение. Напри-

тив, спин электрона является *внутренним*, присущим электрону свойством, похожим в этом отношении на массу или электрический заряд. Если бы электрон не вращался, он не был бы электроном.

Хотя первые работы были посвящены электронам, впоследствии физики показали, что понятие спина применимо ко всем частицам вещества, образующим три семейства из табл. 1.1. Это утверждение истинно вплоть до мельчайших деталей: *все* частицы вещества (а также их античастицы) имеют спин, равный спину электрона. На своем специальном языке физики говорят, что все частицы вещества имеют «спин  $1/2$ », где значение  $1/2$  представляет собой, грубо говоря, квантово-механическую меру скорости вращения частиц<sup>2)</sup>. Более того, физики показали, что частицы, передающие негравитационные взаимодействия, — фотоны, слабые калибровочные бозоны и глюоны — также обладают спином, который оказался в *два раза больше*, чем спин частиц вещества. Все эти частицы имеют «спин 1».

А как насчет гравитации? Еще до появления теории струн физики смогли установить, какой спин должен иметь гипотетический гравитон, чтобы он мог переносить гравитационное взаимодействие. Полученный ими ответ гласил: удвоенный спин фотонов, слабые калибровочных бозонов и глюонов — т.е. «спин 2».

В теории струн спин, так же как масса и константы других взаимодействий, связан с модой колебания струны. Как и в случае с точечными частицами, было бы не совсем правильно думать, что спин, который несет струна, возникает из-за того, что она действительно вращается в пространстве, однако эта картина дает хороший образ для представления. Кстати, теперь можно уточнить одно важное обстоятельство, с которым мы столкнулись ранее. В 1974 г. Шерк и Шварц провозгласили, что теория струн должна рассматриваться как квантовая теория, включающая гравитационное взаимодействие. Такой вывод стал возможен потому, что они обнаружили: в спектре колебаний струн обязательно должна присутствовать мода, которая соответствует *бессмассовой частице со спином 2*. Но именно эти характе-

ристики являются отличительными признаками гравитона. А где гравитон, там и гравитация.

Получив основные представления о спине, вернемся к той роли, которую он играет в качестве упомянутой в предыдущем разделе лазейки в обход теоремы Коулмена—Мандулы, касающейся возможных видов симметрии в природе.

## Суперсимметрия и суперпартнеры

Как мы уже подчеркивали, хотя понятие спина имеет поверхностное сходство с образом вращающегося волчка, оно имеет и значительные отличия, связанные с его квантовой природой. Открытие спина в 1925 г. показало, что имеется еще один вид вращательного движения, который попросту не существует в чисто классической Вселенной.

Это позволяет задать следующий вопрос: если обычное вращательное движение приводит к принципу симметрии, носимому названием инвариантности относительно вращений («физика рассматривает все возможные направления в пространстве как равноправные»), не ведет ли это более специфическое вращательное движение еще к одному принципу симметрии законов природы? Примерно к 1971 г. физики показали, что ответ на этот вопрос положительен. Хотя полное доказательство достаточно сложно, основная идея состоит в том, что если рассматривать спин с математической точки зрения, возможна ровно *одна дополнительная симметрия закона природы*. Она получила название *суперсимметрии*<sup>3)</sup>.

Суперсимметрия не может быть поставлена в соответствие простое и интуитивно понятное изменение точки зрения наблюдателя: сдвиги во времени, пространственном положении, угловой ориентации и скорости движения уже исчерпали эти возможности. Однако поскольку спин представляет собой «подобие вращательного движения, имеющее квантово-механическую природу», существование суперсимметрии связано с изменением точки зрения наблюдателя в «квантово-механическом расширении пространства и времени».

Квавички здесь очень важны, поскольку последняя фраза дает только общее представление о месте суперсимметрии в общей системе принципов симметрии природы<sup>4)</sup>. Однако понимание принципа суперсимметрии является довольно сложной задачей, и мы сконцентрируем внимание на его основных следствиях, на том, согласуются ли законы природы с этим принципом. Этот вопрос гораздо легче поддается объяснению.

В начале 1970-х гг. физики пришли к выводу, что если Вселенная является суперсимметричной, частицы природы должны входить в набор наблюдаемых частиц парами, при этом спин частиц, образующих пару, должен отличаться на  $1/2$ . Такие пары частиц — независимо от того, считаются ли они точечными (как в стандартной модели) или крошечными колеблющимися петлями — называются *суперпартнерами*. Поскольку частицы вещества имеют спин  $1/2$ , а некоторые из частиц, передающих взаимодействие — спин 1, суперсимметрия приводит к выводу о наличии пар, о партнерстве частиц вещества и частиц, передающих взаимодействие. Сам по себе этот вывод выглядит весьма привлекательно с точки зрения объединения частиц в одну теорию. Проблема кроется в деталях.

К середине 1970-х гг., когда физики искали способ, который позволил бы включить суперсимметрию в стандартную модель, они обнаружили, что *ни одна* из известных частиц, перечисленных в табл. 1.1 и 1.2, не может быть суперпартнером для другой. Как показал тщательный теоретический анализ, если Вселенная включает принцип суперсимметрии, то каждой известной частице должна соответствовать еще не открытая частица-суперпартнер, спин которой на половину меньше, чем спин ее известного партнера. Так, партнер электрона должен иметь спин 0; эта гипотетическая частица получила название *селектрона* (сокращение от термина суперсимметричный электрон). То же самое справедливо и для других частиц вещества. Например, имеющие спин 0 гипотетические суперпартнеры нейтрино и кварков получили название *снейтрино* и *скварков*. Аналогично частицы, передающие взаимодействие, должны иметь суперпартнеров

со спином  $1/2$ . Для фотонов это будут *фотино*, для глюонов — *глюино*, для W-бозонов и Z-бозонов — *вино* и *зино*.

Таким образом, при более внимательном изучении суперсимметрии оказалась чрезвычайно нежизнеспособным понятием: она требовала большого количества дополнительных частиц, дублировавших список фундаментальных компонентов. Поскольку ни одна из частиц-суперпартнеров не была обнаружена, вы можете довольствоваться приведенным в главе 1 замечанием Раби по поводу открытия мюона, немного усилив его звучание: «Никто не заказывал суперсимметрию», и, без долгих рассуждений, откажитесь от этого принципа симметрии. Существуют, однако, три причины, по которым многие физики твердо убеждены, что такой скоропалительный отказ от суперсимметрии был бы преждевременным. Обсудим эти причины.

### Доводы в пользу суперсимметрии — до появления теории струн

Во-первых, с чисто эстетических позиций, физики не могли примириться с тем, что природа реализовала почти все, но не все математически возможные виды симметрии. Конечно, нельзя исключать возможность того, что симметрия реализуется не полностью, но это было бы так обидно. Это было бы похоже на то, как если бы Бах, написав многоголосные переплетающиеся партии, встроившие в гениальную картину музыкальной симметрии, забыл про финал, составляющий ее по своим местам.

Во-вторых, даже в стандартной модели, в теории, которая игнорирует гравитацию, многочисленные технические трудности, связанные с квантовыми эффектами, безболезненно разрешаются при использовании суперсимметрии. Основная проблема состоит в том, что каждый отдельный вид частицы вносит свой собственный вклад в микроскопический квантовый хаос. Исследуя глубины этого хаоса, физики обнаружили, что некоторые процессы, связанные со взаимодействием частиц, можно описать не противоречивым образом *только* при очень

точной настройке параметров стандартной модели, с точностью, превышающей  $10^{-15}$ , для нейтрализации наиболее разрушительных квантовых эффектов. Для сравнения: такая точность необходима для того, чтобы пуля, выпущенная из воображаемого сверхмощного ружья, попала в цель на Луне с отклонением, не превышающим размеры амбы. Хотя стандартная модель допускает регулировку параметров с такой точностью, многие физики испытывают сильное недоверие к теории, которая устроена настолько деликатно, что разваливается, если параметр, от которого она зависит, изменится на единицу в пятнадцатом разряде после запятой<sup>5)</sup>.

Суперсимметрия радикальным образом меняет эту ситуацию, поскольку *бозоны* — частицы, имеющие целочисленный спин (получившие свое название в честь индийского физика Сатъянандры Бозе), и *фермионы* — частицы, спин которых равен половине целого (нечетного) числа (названные в честь итальянского физика Энрико Ферми), имеют тенденцию вносить такие вклады в квантовый хаос, которые взаимно сокращаются. Вклады как будто находятся на противоположных концах коромысла: когда вклад бозонов в квантовые флуктуации положительен, вклад фермионов отрицателен, и наоборот. Поскольку суперсимметрия гарантирует, что бозоны и фермионы существуют парами, происходит изначальное сокращение, которое существенно уменьшает самые интенсивные квантовые флуктуации. В результате непротиворечивость *суперсимметричной стандартной модели*, в которую включены все частицы-суперпартнеры, перестает зависеть от позорительно тонкой регулировки значений параметров обычной стандартной модели. Хотя этот момент кажется сугубо техническим, он делает суперсимметрию очень привлекательной в глазах многих специалистов по физике элементарных частиц.

Третье косвенное доказательство в пользу суперсимметрии связано с понятием *великого объединения*. Одно из самых загадочных свойств четырех фундаментальных взаимодействий природы состоит в огромных различиях интенсивности этих взаимодействий. Интенсивность электромагнитных сил не превышает одного процента от интенсив-

ности сильного взаимодействия. Слабое взаимодействие примерно в тысячу раз слабее электромагнитного, а интенсивность гравитационных сил слабее еще в несколько сотен миллионов миллиардов миллиардов миллиардов ( $10^{-35}$ ) раз. Следяя удостоенной Нобелевской премии пионерской работе Глэшоу, Салама и Вайнберга, установившей глубокую связь между электромагнитным и слабым взаимодействием (см. главу 5), Глэшоу и его коллега по Гарвардскому университету Говард Джорджи предположили, что подобную связь можно протянуть и к сильному взаимодействию. Их работа, предлагавшая «великое объединение» трех из четырех взаимодействий, имела одно существенное отличие от электрослабой теории. Электромагнитное и слабое взаимодействия выкристаллизовались из более симметричного состояния, когда температура Вселенной упала примерно до миллиона миллиардов градусов выше абсолютного нуля ( $10^{16}$  К). Джорджи и Глэшоу показали, что объединение с сильным взаимодействием становится очевидным только при температуре, которая еще в десять триллионов раз выше, примерно при десяти миллиардах миллиардов миллиардов миллиардов градусов выше абсолютного нуля (при  $10^{28}$  К). С точки зрения энергии это примерно в миллион миллиардов раз больше массы протона, или примерно на четыре порядка больше планковской массы. Джорджи и Глэшоу дерзко направили теоретическую физику в область энергий, на много порядков превышающих те, с которыми исследователи отваживались иметь дело раньше.

Следующая работа, выполненная Джорджи, Хелен Куинн и Вайнбергом в 1974 г. в Гарварде, с еще большей очевидностью показала возможность объединения негравитационных взаимодействий в рамках теории великого объединения. Поскольку их вклад продолжает играть важную роль в объединении взаимодействий и исследовании сущности взаимодействий природы, потратим немного времени на то, чтобы объяснить его более подробно.

Мы знаем, что электромагнитное притяжение между двумя противоположно заряженными частицами и гравитационное притяжение между двумя массивными телами

увеличивается при уменьшении расстояния между объектами. Это простое и хорошо известные факты из классической физики. Сюрпризы начинаются, когда мы исследуем влияние квантовой физики на интенсивность взаимодействий. Почему вообще квантовая механика оказывает какое-либо влияние на эти явления? Ответ опять же связан с квантовыми флуктуациями. Когда мы исследуем электрическое поле электрона, на самом деле мы исследуем его сквозь «туман» электрон-позитронных пар, непрерывно рождающихся и аннигилирующих в окружающей его области пространства. Некоторое время назад физики осознали, что этот кипящий туман микроскопических флуктуаций маскирует истинную напряженность поля, создаваемого электроном, подобно тому, как туман в природе ослабляет луч маяка. По мере того, как мы приближаемся к электрону, мы проникаем все глубже в обволакивающий его туман, состоящий из частиц и античастиц, и поэтому такой туман будет оказывать меньшее влияние на наши наблюдения. Из этого следует, что по мере приближения к электрону напряженность создаваемого им электрического поля будет *возрастать*.

Физики отличают это возрастание напряженности при приближении к электрону, связанное с квантовыми эффектами, от *собственной* напряженности электромагнитного взаимодействия, возрастающей с уменьшением расстояния. Таким образом, напряженность возрастает не просто потому, что мы приближаемся к электрону, но также вследствие того, что становится видимым собственное электрическое поле электрона. Хотя мы рассматривали электрон, на самом деле эти выводы применимы к любым частицам, несущим электрический заряд. Их можно суммировать утверждением, что квантовые эффекты *ведут к росту* электромагнитных сил при уменьшении расстояния.

А что можно сказать о других взаимодействиях, описываемых стандартной моделью? Как изменяется их интенсивность с изменением расстояния? В 1973 г. Гросс и Фрэнк Вильчек из Принстона и независимо от них Дэвид Политцер из Гарварда исследовали этот вопрос и получили удивительный ре-

зультат. Квантовое облако, состоящее из рождающихся и аннигилирующих частиц, *увеличивает* интенсивность сильного и слабого взаимодействия. Это означает, что когда мы исследуем эти взаимодействия на более близких расстояниях, мы проникаем глубже в кипящее облако квантовых флуктуаций, и, следовательно, увеличение интенсивности ощущается менее заметно. Таким образом, интенсивность этих видов взаимодействий *уменьшается* при уменьшении расстояния, на котором мы их исследуем.

Джорджи, Куинн и Вайнберг использовали эти идеи и довели их до замечательного финала. Они показали, что если аккуратно учесть влияние всех этих квантовых флуктуаций, то мы увидим, что интенсивности всех трех негравитационных взаимодействий станут *сближаться*. Хотя интенсивности этих трех видов взаимодействий очень сильно различаются на масштабах расстояний, доступных современной технике, согласно выводам Джорджи, Куинн и Вайнберга, это различие связано с различным влиянием, которое оказывает на них «туман» квантовых флуктуаций. Их расчеты показали, что если проникнуть сквозь этот туман и исследовать взаимодействия не в обычных для нас масштабах, а на расстояниях, составляющих примерно одну сотую от миллиардной миллиардной миллиардной ( $10^{-28}$ ) доли сантиметра (приблизительно в десять тысяч раз превышающем планковскую длину), интенсивности всех трех негравитационных взаимодействий окажутся одинаковыми.

Высокие энергии, которые следуются на таких малых расстояниях, значительно превышают те, с которыми мы обычно имеем дело, однако такие энергии были характерными для бурной и раскаленной Вселенной в момент, когда ее возраст составлял примерно одну тысячную от одной триллионной триллионной триллионной ( $10^{-39}$ ) доли секунды, а ее температура, как упоминалось выше — около  $10^{28}$  К. Эти теоретические работы показали, что примерно так же, как набор самых различных ингредиентов — кусков металла, дерева, горных пород, минералов и т. п. — сливается в единое целое и образует однородную, гомогенную плазму при нагреве до достаточно высокой темпе-

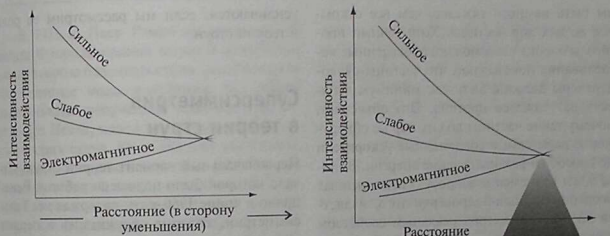


Рис. 7.1. Интенсивность трех негравитационных взаимодействий при уменьшении расстояния или (что эквивалентно) при увеличении энергии

ратуры, сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия при такой огромной температуре сливаются в одно величественное взаимодействие. Схематически это показано на рис. 7.1<sup>6</sup>.

Хотя у нас нет устройств, с помощью которых можно было бы производить измерения на столь малых расстояниях или воспроизводить столь высокие температуры, за время, прошедшее с 1974 г., экспериментаторам удалось существенно уточнить значения интенсивности трех негравитационных взаимодействий в обычных условиях. Эти данные, являющиеся начальными точками на трех кривых изменения интенсивности взаимодействий, показанных на рис. 7.1, представляют собой исходные данные для квантово-механических расчетов, выполненных Джорджи, Куинн и Вайнбергом. В 1991 г. Уго Амальди из ЦЕРНа, Вим де Боер и Герман Фюрстену из университета Карлсруэ в Германии пересчитали результаты Джорджи, Куинн и Вайнберга с использованием новых экспериментальных данных и продемонстрировали два замечательных факта. Во-первых, интенсивность трех негравитационных взаимодействий *почти* (но не абсолютно) *одинакова* в масштабе малых расстояний (соответственно, высоких энергий и высоких температур), как показано на рис. 7.2. Во-вторых, это незначительное, но несомненное различие в интенсивности *исчезает* при включении суперсимметрии. Причина состоит в том, что новые частицы-

Рис. 7.2. Уточнение расчета интенсивностей взаимодействий показало, что без суперсимметрии они очень близки, но не совпадают

суперпартнеры, существования которых требовал суперсимметрия, дают дополнительные квантовые флуктуации достаточной величины, чтобы интенсивности взаимодействий стали одинаковыми.

Для большинства физиков чрезвычайно трудно поверить в то, что природа могла выбрать взаимодействия таким образом, чтобы на микроскопическом уровне они были *почти*, но не в точности равны. Это все равно, как если бы вы собирали головоломку и увидели, что последний фрагмент имеет неподходящую форму, которая позволила бы ему го не ту форму, которая позволила бы ему занять последнее оставшееся свободным местом. Суперсимметрия искусно изменяет форму этого фрагмента, и все части головоломки встанут на свои места.

Другой аспект этих последних достижений связан с тем, что они дают возможный ответ на вопрос, почему до сих пор не открыта ни одна частица-суперпартнер. Расчеты, подтверждающие равенство интенсивности взаимодействий, а также ряд других исследований, выполненных физиками, показали, что частицы-суперпартнеры должны

ны быть намного тяжелее, чем все открытые до сих пор частицы. Хотя точный прогноз дать пока невозможно, проведенные исследования показывают, что частицы-суперпартнеры должны быть как минимум в тысячу раз тяжелее протона. Это объясняет, почему такие частицы до сих пор не обнаружены: даже самые современные ускорители не способны развивать такие энергии. В главе 9 мы вернемся к вопросу о перспективах экспериментальной проверки того, является ли суперсимметрия реальным свойством нашего мира.

Конечно, приведенные доводы в пользу того, чтобы принять суперсимметрию или, по крайней мере, не отвергать такой возможности, не являются неопровержимыми. Мы описали, как суперсимметрия придает нашим теориям наиболее симметричный вид, но вы можете возразить, что мироздание, возможно, вовсе не стремится принять наиболее симметричную форму, достижимую с математической точки зрения. Мы обратили ваше внимание на важный технический момент, состоящий в том, что суперсимметрия избавляет нас от необходимости детальной подгонки параметров стандартной модели для преодоления ряда тонких проблем в квантовой теории, но вы можете возразить, что истинная теория, описывающая явления природы, вполне может балансировать на тонкой грани между непротиворечивостью и саморазрушением. Мы показали, что на ничтожно малых расстояниях суперсимметрия изменяет интенсивность трех негравитационных взаимодействий в точности так, чтобы они могли слиться в одно великое объединенное взаимодействие, но вы, опять же, можете возразить, что в устройстве мироздания нет ничего, что диктовало бы необходимость совпадения интенсивности этих взаимодействий на микроскопическом масштабе. Наконец, вы можете предположить, что частицы-суперпартнеры до сих пор не обнаружены просто потому, что наша Вселенная не является суперсимметричной и, следовательно, частицы-суперпартнеры не существуют.

Никто не может опровергнуть ни одно из этих возражений. Однако доводы, говорящие в пользу суперсимметрии, необычайно

усиливаются, если мы рассмотрим ее роль в теории струн.

## Суперсимметрия в теории струн

Первоначальный вариант теории струн, начало которой было положено работой Венециано в конце 1960-х гг., содержал все виды симметрии, которые обсуждались в первых пунктах этой главы, но не включал суперсимметрию (которая в то время еще не была открыта). Эта первая теория, базировавшаяся на концепции струн, называлась *теорией бозонных струн*. Слово *бозонная* указывает на то, что все моды колебаний бозонной струны обладали целочисленным спином: в этой теории не было фермионных мод, т. е. мод, спин которых отличался бы от целого числа на полторы единицы. Это приводило к двум проблемам.

Во-первых, если назначением теории струн было описание всех взаимодействий и всех видов материи, она должна была каким-то образом включать фермионные моды колебаний, поскольку все известные частицы вещества имеют спин  $1/2$ . Вторая, гораздо более серьезная проблема была связана с существованием в теории бозонных струн еще одной моды колебаний, масса которой (или, точнее, квадрат массы) была *отрицательной*, — так называемого *таххиона*. Возможность того, что в дополнение к более привычным частицам с положительными массами наш мир может содержать тахионы, изучалась физиками еще до появления теории струн, однако их работы показали, что создать непротиворечивую теорию, включающую тахионы, чрезвычайно трудно, если вообще возможно. Аналогичным образом физики испробовали самые фантастические способы, пытаясь придать смысл экзотической идее тахионной моды в контексте теории струн, но все попытки оказались безуспешными. Эти две проблемы показали, что хотя теория бозонных струн была весьма интересна, в ней определено не хватало каких-то существенных элементов.

В 1971 г. Пьер Рамон из университета Флорида принял вызов и модифицировал теорию бозонных струн, включив в нее фермионные моды колебаний. Его работа и результаты, полученные позднее Шварцем и Андре Невсе, положили начало новой версии теории струн. Ко всеобщему удивлению, в эту новую теорию бозонные и фермионные моды колебаний входили парами. Для каждой бозонной моды существовала соответствующая фермионная, и наоборот. К 1977 г. работы Фердинандо Люцци из университета Турина, а также работы Шерка и Дэвида Олива из Имперского колледжа, показали истинный смысл этого группирования в пары. Новая теория струн включала суперсимметрию, и то, что бозонные и фермионные моды колебания входили парами, было отражением высокой степени симметрии этой теории. В этот момент родилась суперсимметричная теория струн — теория суперструн. Работы Люцци, Шерка и Олива дали еще один очень важный результат: они показали, что вызывавшая беспокойство тахионная мода колебаний бозонных струн не свойственна суперструнам. Части конструкции теории струн постепенно вставали на свои места.

Однако изначально основное влияние работы Рамона, Невсе и Шварца оказали не на теорию струн. К 1973 г. физики Джулиус Весс и Бруно Zumino осознали, что суперсимметрия — новый вид симметрии, появившийся при изменении формулировки теории струн, — применима и к теории, основанной на точечной модели частиц. Они быстро предприняли важные шаги в направлении включения суперсимметрии в систему квантовой теории поля, основанной на точечной модели частиц. А поскольку в это время квантовая теория поля была основным объектом исследования специалистов по физике элементарных частиц (при этом теории струн все более прочно занимала место на переднем крае исследования), за достижениями Весса и Zumino последовало огромное количество исследований в области, которая получила название *суперсимметричной квантовой теории поля*. Суперсимметричная стандартная модель, которую мы обсуждали в предыдущем разделе,

была одним из главных теоретических достижений в этом направлении. Таким образом, благодаря зигзагам на пути развития теории струн, в большом долгу перед ней оказалась даже теория, основанная на точечной модели частиц.

С возрождением теории суперструн в середине 1980-х гг. суперсимметрия вновь вернулась в лоно, где она была впервые открыта. И в этом контексте свидетельства в пользу суперсимметрии выходят далеко за пределы того, о чем говорилось в предыдущем разделе. Теория струн представляет собой единственный известный нам способ объединения общей теории относительности и квантовой механики. При этом только суперсимметричная версия теории струн позволяет избежать фатальной тахионной проблемы и содержит фермионные моды колебаний, соответствующие частицам вещества, соответствующие окружающий нас мир. Таким образом, суперсимметрия идет рука об руку с теорией струн и тем, что она дает для квантовой теории гравитации и для решения грандиозной задачи великого объединения всех видов взаимодействия и всех частей материи. Физики полагают, что если теория струн верна, то верна и идея суперсимметрии.

Однако до середины 1990-х гг. в суперсимметричной теории струн была одна весьма серьезная проблема.

## Суперпроблема изобилия

Если кто-нибудь скажет вам, что он разгадал тайну судьбы Амелии Эрхарт<sup>\*)</sup>, наверное, сначала вы отнесетесь к его словам скептически, но если он предоставит вам подлинные, а не копии, серьезные свидетельства, вы, скорее всего, услышите этого человека до конца и, кто знает, может быть, он даже убедит вас. Но что вы подумаете, если спустя мгновение он сообщит вам, что

<sup>\*)</sup> Амелия Эрхарт (Amelia Earhart) — первая американка, совершившая в одиночку перелет через Атлантический океан. В 1935 г. совершила рекордный океанский перелет с Гавайских островов в Калифорнию. Пропала без вести в районе Новой Гвинии при попытке совершить первый перелет вокруг света. — *Прим. перев.*



у него есть еще одно объяснение? Вы терпеливо слушаете и, к своему удивлению, обнаруживаете, что альтернативное объяснение столь же хорошо документировано и продумано, как и первое. После завершения рассказа о новом объяснении вам будет представлено третье, четвертое и даже пятое объяснения, и каждое из них будет отличаться от предыдущих, но будет столь же хорошо подкреплено доказательствами. Нет никаких сомнений, что к концу вашей беседы вы будете чувствовать себя не ближе к решению загадки судьбы Амелии Эрхарт, чем вы были вначале. В области фундаментальных объяснений слово «больше» определено означает «меньше».

К 1985 г. теория струн, несмотря на заслуженное восхищение, которое она вызывала, начала звучать подобно чересчур рыанному эксперту по судьбе Амелии Эрхарт. Причина состояла в том, что к 1985 г. физики осознали, что суперсимметрия, являющаяся центральным звеном теории струн, на самом деле может быть включена в нее не одним, а пятью различными способами. Каждый метод приводил к образованию пар бозонных и фермионных мод колебания, но детали такой группировки, а также многочисленные другие свойства получившихся теорий, существенно различались. Хотя названия, которые получили эти теории, не имеют большой важности, потрудимся запомнить, что это были: *теория струн типа I, теория струн типа IIA, теория струн типа IIB, теория гетеротических струн O(32)* (произносится «о тридцать два»), а также *теория гетеротических струн E<sub>8</sub> × E<sub>8</sub>* (произносится «е восемь на е восемь»). Все особенности теории струн, которые мы обсуждали до сих пор, справедливы для каждой из этих теорий, они различаются только в более тонких деталях.

Иметь пять различных версий того, что считалось теорией всего, т. е. возможной конечной объединяющей теорией, было слишком много для специалистов по теории струн. Как существовать только одно правдивое объяснение того, что случилось с Амелией Эрхарт (независимо от того, узнаем ли мы

его когда-нибудь), так и наиболее глубокое, фундаментальное понимание устройства мироздания, согласно нашим представлениям, может быть только одним. Мы живем в одной Вселенной и ожидаем существование только одного объяснения.

Одно из решений этой проблемы может быть следующим. Хотя у нас есть пять различных теорий суперструн, четыре лишних можно отбросить с помощью экспериментальных исследований, и в результате останется одна, истинная формулировка. Но даже если это удалось бы сделать, у нас все равно остался бы самый важный вопрос — откуда возникли другие теории. Немного перефразируя Виттена: «Если одна из пяти теорий описывает нашу Вселенную, то кто живет в четырех остальных?»<sup>7)</sup> Мечта физика состоит в том, чтобы его поиск окончательных ответов привел к одному, уникальному, совершенно неизбежному выводу. В идеале окончательная теория, будь то теория струн или что-то иное, должна быть такой, какова она есть, просто потому, что другого способа не существует. Если бы мы открыли, что существует только одна логически непротиворечивая теория, объединяющая основные компоненты общей теории относительности и квантовой механики, многие почувствовали бы, что достигнуто глубочайшее понимание того, почему мироздание имеет те свойства, которые оно имеет. Короче говоря, наступили бы райские времена единой теории<sup>8)</sup>.

Как мы увидим в главе 12, последние исследования в теории суперструн позволили сделать гигантский шаг в направлении этой единой утопии, показав, что пять различных теорий в действительности представляют собой пять различных способов описания *одной и той же объединяющей теории*. Теория суперструн имеет единое генеалогическое древо.

Все, похоже, постепенно становится на свои места. Однако, как мы увидим в следующей главе, объединение в рамках теории струн требует еще одного, более радикального отказа от наших обычных представлений.

## Глава 8

### Измерений больше, чем видит глаз

Эйнштейн в своей специальной и общей теории относительности разрешил два основных противоречия физики последнего столетия. Хотя проблемы, послужившие побудительным мотивом его работ, вовсе не предвещали такого результата, каждое из этих решений полностью трансформировало наше понимание пространства и времени. Теория струн разрешила третий главный конфликт в физике прошлого века, причем таким способом, который, наверное, восхитил бы даже Эйнштейна, и потребовала очередного коренного пересмотра наших понятий пространства и времени. Сотрясение основ современной физики было столь сильным, что не устояли даже наши представления о числе измерений во Вселенной, казавшиеся совершенно незыблемыми и, тем не менее, подвергшиеся радикальному и убедительному изменению.

### Иллюзия привычного

Наша интуиция питается жизненным опытом. Но этим роль опыта не ограничивается: он формирует опорный каркас, в рамках которого мы анализируем и интерпретируем полученную из окружающего мира информацию. Например, вряд ли вы будете сомневаться, что Маугли, воспитанный стаей диких волков, будет интерпретировать окружающую действительность совсем иначе, чем мы. Даже менее сильные различия, например, в различиях между людьми, воспитанными в существенно разных культурных традициях, подчеркивают ту роль, которую играет жизненный опыт в восприятии мира.

Однако есть явления, воздействие которых испытывают все. И часто именно убеждения и ожидания, основанные на таком

универсальном опыте, труднее всего поддаются определению и пересмотру. Простой, но глубокий пример состоит в следующем. Закрыв эту книгу и встав со стула, вы можете двигаться в трех независимых направлениях — т. е. в трех независимых пространственных измерениях. Каким бы путем вы не последовали, — независимо от того, насколько сложным он будет, — результат может быть описан как комбинация перемещений в трех направлениях: «влево-вправо», «вперед-назад» и «вверх-вниз». Каждый раз, когда вы делаете очередной шаг, вы неявно делаете три независимых выбора, определяющих ваше движение в этих трех измерениях.

Эквивалентное утверждение, с которым мы столкнулись, рассматривая специальную теорию относительности, заключается в том, что любая точка Вселенной может быть однозначно определена тремя параметрами, указывающими ее положение в этих трех пространственных измерениях. Например, как вы можете описать адрес в городе, указав стрит<sup>9)</sup> (положение в измерении «влево-вправо»), авеню (положение в измерении «вперед-назад») и этаж (положение в измерении «вверх-вниз»). Работы Эйнштейна показали нам, что время может рассматриваться как еще одно измерение (измерение «будущее-прошлое»), что увеличивает общее число измерений до четырех (три пространственных и одно временное). Вы определяете события во Вселенной, указывая, где и когда они произошли.

Эта особенность Вселенной кажется столь фундаментальной и естественной, что

<sup>7)</sup> Во многих американских городах улицы образуют прямоугольную сеть. Улицы, идущие в одном направлении, называются «стрит», в другом (перпендикулярном) — «авеню». Классическим примером такой формы — «авеню» — является центральная часть Нью-Йорка. — Прим. перев.

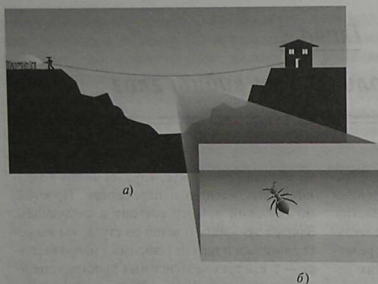


Рис. 8.1. а) Садовый шланг со значительного расстояния выглядит одномерным объектом. б) При увеличении становится видимым второе измерение — то, которое имеет форму окружности, охватывающей ось шланга

обычно даже не упоминается. Тем не менее, в 1919 г. малоизвестный польский математик Теодор Калуца из Кенигсбергского университета дерзнул бросить вызов очевидному — он предположил, что в действительности Вселенная может иметь не три измерения, число измерений может быть больше. Иногда предположения, звучащие бессмысленно, таковыми и являются. Иногда они потрясают основы физики. Хотя потребовалось некоторое время на то, чтобы предположение Калуцы получило общее признание, оно привело к революции в формулировке физических законов. Отзвуки этого прорыва человеческого прозрения мы слышим до сих пор.

## Идея Калуцы и уточнение Клейна

Предположение о том, что наша Вселенная может иметь более трех пространственных измерений, может показаться бессмысленным, экзотичным или мистическим. Однако в действительности оно является вполне реальным и тщательно обоснованным. Убедиться в этом будет проще, если на время оставить в покое Вселенную и рассмотреть более привычный объект, например длинный и тонкий Садовый шланг.

Представим, что несколько сотен метров Садового шланга протянуто поперек каньона, и мы наблюдаем его с расстояния, скажем, в километре, как показано на рис. 8.1 а.

С такого расстояния хорошо видна горизонтальная протяженность длинного развернутого шланга, однако, если только вы не обладаете орлиным зрением, вам будет трудно оценить его *обхват*. Наблюдая шланг с такого большого расстояния, вы можете подумать, что если бы на шланге жил муравей, у него было бы только *одно* измерение для прогулок: влево-вправо вдоль шланга. Если бы вас попросили указать, где это муравей находится в какой-то момент времени, вам достаточно было бы указать *только одно* число: расстояние от муравья до левого (или правого) конца шланга. Основная идея этих рассуждений состоит в том, что расстояния в километр длинный кусок Садового шланга выглядят одномерным объектом.

На самом деле известно, что у шланга есть обхват. Вам, быть может, трудно разглядеть это с расстояния в километре, но если вы вооружитесь биноклем, он увеличит изображение шланга, и вы сможете увидеть это обхват непосредственно, как показано на рис. 8.1 б. Рассматривая увеличенное изображение, вы увидите, что у маленького муравья, живущего на шланге, на самом деле есть *два* независимых направления для прогулок. Одно из них, как вы уже заметили, проходит влево-вправо по длине шланга, а второе — это измерение «по часовой стрелке — против часовой стрелки», расположенное по окружности шланга. Теперь вы понимаете, что для того, чтобы сказать, где ваш крошечный муравей находится в заданный момент, вы должны указать *два* чи-

сла: положение муравья вдоль длины шланга и его положение на окружности. Это отражает тот факт, что поверхность Садового шланга является двумерной<sup>1)</sup>.

Эти два измерения явно различаются. Направление вдоль шланга является длинным, протяженным, и хорошо видимым. Направление, опоясывающее шланг, является коротким, «свернутым» и трудноразличимым. Для того чтобы узнать о существовании циклического измерения, приходится исследовать шланг с существенно большим разрешением.

Этот пример подчеркивает неочевидную и важную особенность пространственных измерений: они могут быть двух видов. Они могут быть просторными, протяженными и, вследствие этого, доступными непосредственному наблюдению, но они также могут быть маленькими, скрученными и гораздо менее поддающимися обнаружению. Конечно, в нашем примере не пришлось тратить слишком много усилий на то, чтобы обнаружить «свернутое» измерение, опоясывающее ось шланга. Вам было достаточно воспользоваться биноклем. Однако если вам придется иметь дело с очень тонким Садовым шлангом, имеющим обхват волоса или капилляра, обнаружить свернутое измерение будет не так-то просто.

В статье, которую Калуца отправил Эйнштейну в 1919 г., он высказал удивительное предположение. Калуца утверждал, что пространственная структура Вселенной может содержать больше измерений, чем три известных нам из жизненного опыта. Как мы вскоре увидим, мотивом для столь радикальной гипотезы было то, что она позволяла построить элегантный и мощный аппарат, объединяющий общую теорию относительности Эйнштейна и теорию электромагнитного поля Максвелла в единую и однородную концептуальную систему. Но как это предположение может согласовываться с тем очевидным фактом, что мы видим в точности три пространственных измерения?

Ответ, который в неявной форме содержится в работе Калуцы, и который позднее был выражен в явном виде и уточнен шведским математиком Оскаром Клейном в 1926 г., состоит в том, что *структура*

пространства нашей Вселенной может содержать как протяженные, так и свернутые измерения. Это значит, что в нашей Вселенной есть измерения, которые являются просторными, протяженными и легко доступными для наблюдения, подобно длине Садового шланга. Однако, подобно циклическому измерению того же шланга, Вселенная может содержать и дополнительные пространственные измерения, которые туго скручены в ничтожно малой области — столь малой, что она не может быть обнаружена даже с помощью самого современного экспериментального оборудования.

Чтобы получить более ясное представление о сути этого замечательного предложения, вернемся на минуту к примеру с Садовым шлангом. Представим себе, что на шланге черной краской нарисовано с малым шагом большое количество охватывающих его окружностей. Издалека шланг по-прежнему выглядит тонкой одномерной линией. Но, взглянув на него в бинокль, вы обнаружите свернутое измерение; после окраски найти его будет еще легче, чем раньше. Оно будет выглядеть так, как показано на рис. 8.2. Ясно видно, что поверхность шланга является двумерной, с одним крупным и протяженным измерением, а другим небольшим и имеющим форму окружности. Калуца и Клейн предположили, что аналогичную структуру имеет и наша Вселенная.

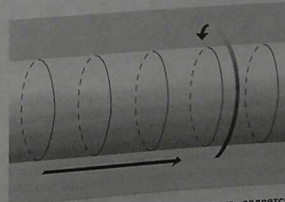


Рис. 8.2. Поверхность Садового шланга является двумерной. Одно измерение (идущее вдоль горизонтальной оси шланга), отмеченное прямой стрелкой, является длинным и протяженным. Другое измерение (окружность шланга), отмеченное круговой стрелкой, является маленьким и свернутым

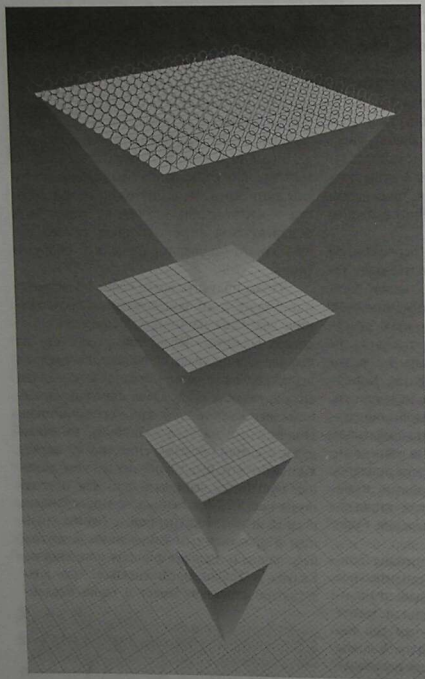


Рис. 8.3. Как и на рис. 8.1, каждый последующий уровень представляет значительное увеличение пространственной структуры, показанной на предыдущем уровне. Видно, что наша Вселенная может иметь дополнительные измерения (как это показано на четвертом уровне увеличения), коль скоро они свернуты в столь малые пространственные образования, что не поддаются прямому наблюдению

ная, только в ней имеется три обычных, протяженных измерения и одно маленькое, циклическое; таким образом, общее число пространственных измерений равно четырем. Нарисовать предмет в пространстве с таким числом измерений непросто, поэтому для большей наглядности мы ограничились случаем двух протяженных и одного маленького циклического измерения. Мы изобразили это на рис. 8.3, где структура пространства последовательно увеличивается примерно так же, как в случае поверхности Садового шланга.

Самое нижнее изображение на рисунке показывает видимую структуру пространства — обычный окружающий нас мир в привычном масштабе расстояний, например, в метрах. Эти расстояния представлены самой редкой сеткой. На последующих изображениях структура пространства показана со все большим увеличением: мы фокусируем взгляд на все меньших областях, которые последовательно увеличиваем, чтобы сделать их видимыми. Сначала при переходе к меньшим расстояниям не происходит ничего особенного; на первых трех уровнях

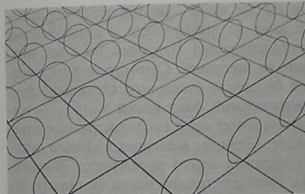


Рис. 8.4. Линии сетки соответствуют обычным протяженным измерениям; кружками показаны новые малюсенькие свернутые измерения. Подобно круговым петелькам, образующим ворс ковра, эти кружки существуют в каждой точке протяженных измерений, однако чтобы не загромождать рисунок, мы нарисовали их только в узлах сетки

увеличения пространство сохраняет основные особенности своей структуры. Однако, по мере того как мы продолжаем наше путешествие вглубь микромира, на четвертом уровне увеличения на рис. 8.3 появляется новое, свернутое циклическое измерение, напоминающее круговые петли на ковре плотной вязки. Калуца и Клейн предположили, что дополнительное циклическое измерение существует в каждой точке пространства, определяемого протяженным измерениями, точно так же, как круговой ободок существует в каждой точке вдоль оси развернутого горизонтального шланга. (Для большей наглядности мы изобразили циклические измерения только в точках, равномерно расположенных на протяженных измерениях.) На рис. 8.4 крупным планом показана микроструктура пространства, какой ее видели Калуца и Клейн.

Несмотря на очевидное сходство с Садовым шлангом, есть и несколько важных различий. Вселенная имеет три протяженных пространственных измерения (мы показали только два из них) по сравнению с одним таким измерением у Садового шланга. Однако еще важнее то, что на этом рисунке мы показали пространственную структуру самой Вселенной, а не просто объекта (такого как Садовый шланг), который существует *внутри* Вселенной. Но основная идея остается неизменной: если дополнительные, свернутые циклические измерения нашей Вселен-

ной, подобные круговым ободкам на Садовом шланге, являются чрезвычайно малыми, их гораздо труднее обнаружить, чем явно наблюдаемые протяженные измерения. На самом деле, если размер этих измерений достаточно мал, их невозможно обнаружить даже с помощью самых мощных инструментов. Что очень важно, циклическое измерение представляет собой не просто какое-то воздушное внутри привычных протяженных измерений, как может показаться при взгляде на рисунок. Напротив, циклическое измерение представляет собой *новое* измерение, которое существует в каждой точке пространства обычных измерений, наряду с измерениями вверх-вниз, влево-вправо и вперед-назад, которые также существуют в каждой точке. Это новое и независимое направление, в котором мог бы двигаться муравей, если бы он был достаточно мал. Чтобы определить пространственное положение такого микроскопического муравья, нам потребуются указать, где он находится в обычных пространственных измерениях (представленных сеткой), а также где он расположен на циклическом измерении. Для представления информации о расположении в пространстве потребуется четыре числа; если добавить время, пространственно-временная информация потребует пяти параметров, но один больше, чем мы привыкли думать.

Итак, мы пришли к довольно удивительным выводам. Хотя мы наблюдаем только три протяженных пространственных измерения, рассуждения Калуцы и Клейна показывают, что это не исключает существования дополнительных, свернутых измерений, по крайней мере, если они достаточно малы. Вселенная вполне может иметь больше измерений, чем доступно нашему глазу.

Насколько малы должны быть эти измерения? Современная техника может обнаружить объекты, размер которых составляет одну миллиардную от одной миллиардной доли метра. Если дополнительное измерение долу метра. Если дополнительное измерение долу метра. Если дополнительное измерение долу метра, обнаружить его невозможно. В 1926 г. Клейн объединил первоначальное предположение Калуцы с некоторыми идеями бурно развивавшейся квантовой механики. Его расчеты показали, что дополни-

тельное циклическое измерение по размерам сопоставимо с планковской длиной, что выходит далеко за рамки современных возможностей экспериментального изучения. С этого времени физики стали называть гипотезу о существовании дополнительных крошечных пространственных измерений *теорией Калуцы—Клейна*<sup>4</sup>.

### Взад и вперед по Садовому шлангу

Наглядный пример Садового шланга и иллюстрации, приведенные на рис. 8.3, призваны прояснить то, почему наша Вселенная может иметь дополнительные пространственные измерения. Но даже специалисты, ведущим исследования в этой области, трудно наглядно представить Вселенную, имеющую более трех пространственных измерений. По этой причине физики, следуя примеру Эдвина Эббота<sup>5</sup>, опубликовавшего в 1884 г. увлекательную книгу *Флатляндия*<sup>6</sup>, ставшую классикой популярного жанра, часто стремятся развить свои интуитивные представления о дополнительных измерениях, пытаясь представить, на что была бы похожа жизнь в воображаемой вселенной, имеющей меньше число измерений, живя в которой мы постепенно осознаем, что она имеет больше измерений, чем прямо доступно нашему наблюдению. Попробуем вообразить двумерную вселенную, по форме напоминающую Садовый шланг. При этом мы должны отказаться рассматривать шланг с точки зрения «внешнего» наблюдателя как объект нашей Вселенной. Мы должны переместиться из нашего мира во вселенную Садового шланга, в которой поверхность очень длинного Садового шланга (вы можете считать его бесконечно длинным) являет собой все пространство этой вселенной. Представьте себе, что вы крошечный муравей, живущий своей жизнью на этой поверхности.

Перейдем к еще более экстремальной точке зрения. Представим, что длина циклического измерения во вселенной Садового шланга очень мала, настолько мала, что

ни вы, ни ваши собратия-обитатели шланга даже не подозреваете о существовании этого измерения. Напротив, вы и все живущие во вселенной Садового шланга считаете бесспорно очевидным следующий фундаментальный факт вашей жизни — вселенная имеет одно пространственное измерение. (Если бы вселенная Садового шланга породила своего муравьиного Эйнштейна, обитатели шланга могли бы сказать, что их вселенная имеет одно пространственное и одно временное измерение.) В действительности этот факт кажется им настолько самоочевидным, что обитатели шланга называют место, где они проживают, *Линляндией*<sup>7</sup>, подчеркивая тем самым, что оно имеет одно пространственное измерение.

Жизнь в Линляндии сильно отличается от той, в которой мы привыкли. Например, знакомые нам тела просто не могут поместиться в Линляндию. Сколько бы усилий вы ни прилагали, пытаетесь изменить форму тела, вам ничего не удастся сделать с тем очевидным фактом, что у вас есть длина, ширина и высота, т. е. пространственная протяженность в трех измерениях. В Линляндии нет места для таких экстравагантных конструкций. Хотя ваш мысленный образ Линляндии может быть по-прежнему связан с длинным, похожим на нить объектом, существующим в нашем пространстве, помните, что вы должны думать о Линляндии как о *вселенной* — это и есть вселенная. Как обитатель Линляндии вы должны помещаться в ней. Попробуйте представить себе это. Даже если у вас будет тело муравья, вы не поместитесь в вашу вселенную. Вы должны сплющить ваше муравьиное тело, чтобы оно выглядело подобно телу червяка, а затем сдавливать его еще и еще, пока у него совсем не останется толщины. Чтобы жить в Линляндии, вы должны быть существом, у которого есть *только* длина.

Теперь представьте, что у вас есть по глазу на каждой стороне вашего тела. В отличие от глаз человека, которые могут вращаться в глазницах, чтобы иметь обзор в трех измерениях, ваши глаза, глаза линляндца, на-

всегда зафиксированы в одном положении, каждый из них направлен вдоль единственного измерения. Это *не является* анатомическим ограничением вашего нового тела. Нет, вы и все другие линляндцы понимаете, что поскольку в Линляндии только одно измерение, здесь просто нет другого направления, в котором могли бы смотреть ваши глаза. Вперед и назад — вот и все направления, которые существуют в Линляндии.

Мы можем попытаться дальше развивать наши представления о воображаемой жизни в Линляндии, но быстро осознаем, что она не слишком богата. Например, если по соседству с вами есть другой линляндец, представьте себе, как он будет выглядеть: вы увидите один его глаз, тот, который обращен к вам, но в отличие от глаза человека он будет выглядеть просто точкой. Глаза в Линляндии не имеют никаких индивидуальных особенностей и не выражают эмоций — для всего этого здесь просто нет места. Более того, вы навсегда обречены видеть этот точечный глаз вашего соседа. Если вы захотите обойти его и исследовать ту часть Линляндии, которая лежит по другую сторону от его тела, вы будете очень разочарованы. *Вы не сможете обойти его.* Он полностью «загораживает дорогу», и в Линляндии нет места, чтобы обойти его. Последовательность расселения линляндцев после того, как они разместились по Линляндии, фиксирована и не может измениться. Такая вот тоска.

Несколько тысяч лет после пришествия бога в Линляндию, линляндец по имени Калуца К. Лин всматривал некоторую надежду в сердца подавленных обитателей Линляндии. По божественному вдохновению или в полной тоске от многолетнего созерцания точечного глаза своего соседа он предположил, что Линляндия, в конце концов, может быть выше и не одномерной. Что, если, — теоретизировал он, — Линляндия на самом деле является двумерной, со вторым очень маленьким циклическим измерением, которое до сих пор не было открыто из-за его крошечного пространственного размера? Он продолжал рисовать картину совершенно новой жизни, которая начнется, если только удастся увеличить в размере это свернутое измерение — возможность, кото-

рую нельзя было отрицать согласно недавним работам его коллеги Линштейна. Калуца К. Лин описал вселенную, которая поразила вас и ваших сотовавших и наполнила ваши сердца надеждой — вселенную, в которой линляндцы могут свободно обходить один другого, используя второе измерение: они перестанут быть рабами пространства. Ей поняли, что Калуца К. Лин описывает жизнь в «чутьолщенной» вселенной Садового шланга.

В действительности, если циклическое измерение разрастется, «раздуть» Линляндию до вселенной Садового шланга, ваша жизнь изменится очень сильно. Возьмем, например, ваше тело. Поскольку вы линляндец, все, что находится между вашими глазами, составляет ваше тело. Следовательно, ваши глаза играют такую же роль для вашего линейного тела, как кожа для обычного человеческого тела: они образуют барьер между вашим телом и окружающим его миром. Врач в Линляндии может получить доступ к внутренностям вашего линейного тела только проколов их поверхность, — другими словами, «хирургическое вмешательство» в Линляндию осуществляется через глаза.

А теперь представим, что произойдет, если Линляндия действительно имеет секретное, скрытое измерение типа предположенного Калуцей К. Лином, и это измерение развернется до размера, позволяющего непосредственному наблюдению. Теперь другой линляндец может видеть ваше тело под углом и, следовательно, непосредственно не сможет увидеть его внутренности, как показано на рис. 8.5. Используя это второе измерение, врачи смогут оперировать ваше тело, получая доступ непосредственно к вашему лбу, получая доступ непосредственно к вашему сердцу, несомненно, у линляндцев разовьются покровы, подобный кожному, защищающему, но только у них будут такие телстий вновь открывшиеся внутренности их тел от контакта с внешним миром. Более того, они несомненно эволюционируют в существ, у которых не только длину, но и ширину: они станут плоскими существами, которыми станут двумерной вселенной Садового шланга, как показано на рис. 8.6. Если циклическое измерение станет очень большим, это кое измерение начнет очень походить двумерная вселенная начнет очень походить

<sup>4</sup> В оригинале *Flatland*, от англ. *flat* — плоский. — Прим. перев.

<sup>7</sup> В оригинале *Lineland*, от англ. *line* — линия. — Прим. перев.

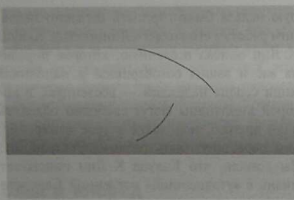


Рис. 8.5. Когда Линляндия расширится до размеров вселенной Садового шланга, один линляндец сможет заплывать внутрь тела другого

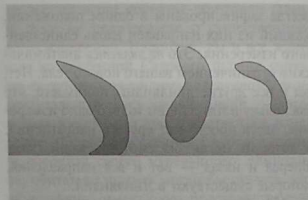


Рис. 8.6. Плоские двумерные существа, живущие во вселенной Садового шланга

на Флатляндия Эббота — воображаемый двумерный мир, который Эббот наделил богатой культурой и даже кастовой системой, основанной на геометрической форме тел обитателей. Если в Линляндии трудно представить себе *что-либо* интересное — там просто нет места для этого, — то жизнь на Садовом шланге переполнена возможностями. Эволюция от одного к двум наблюдаемым протяженным пространственным измерениям очень радикальна.

А теперь как рефрен: почему на этом надо остановиться? Двумерная вселенная сама может иметь свернутое измерение и, следовательно, втайне от нас быть трехмерной. Мы можем проиллюстрировать это рис. 8.4, представив, что существует только два протяженных пространственных измерения (хотя при первом описании этого рисунка мы считали, что плоская сетка представляет три протяженных измерения). Если циклическое измерение развернется, двумерные существа увидят, что они оказались в совершенно ином мире, в котором движения не ограничены направлениями влево-вправо и вперед-назад. Теперь эти существа могут двигаться и в третьем измерении — в направлении «вверх-вниз» вдоль круга. На самом деле, если третье измерение станет достаточно большим, это будет *наша* трехмерная Вселенная. В настоящее время мы не знаем, простираются ли наши пространственные измерения до бесконечности, или они замыкаются на гигантскую окружность, недоступную в самые мощные телескопы. Если циклическое измерение на рис. 8.4 станет до-

статочно большим — миллиарды световых лет в поперечнике — этот рисунок вполне может быть изображением нашего мира.

И снова рефрен: почему на этом надо остановиться? Это приведет нас к представлениям Калуцы и Клейна: наша трехмерная Вселенная может иметь свернутое, четвертое пространственное измерение, о котором никто не подозревал. Если эта поразительная возможность или ее обобщение на случай многих свернутых измерений (мы вскоре рассмотрим его) истинны, и если эти свернутые измерения раскроются до макроскопического размера, то, как показывают приведенные выше примеры с меньшим числом измерений, жизнь в том виде, в котором мы ее знаем, изменится очень сильно.

Удивительно, однако, что даже если дополнительные измерения всегда будут оставаться в свернутом состоянии и будут малы, сам факт их существования ведет к глубоким последствиям.

## Объединение в высших измерениях

Хотя высказанное Калуцей в 1919 г. предположение о том, что наша Вселенная может иметь недоступные нам непосредственно пространственные измерения, замечательно само по себе, его популярность связана с иными обстоятельствами. Эйнштейн сформулировал общую теорию относительности для привычного случая Вселенной с тремя пространственными и одним временным

измерением. Однако математический формализм его теории можно непосредственно обобщить и выписать аналогичные уравнения для Вселенной с дополнительными пространственными измерениями. Калуца выполнил математический анализ и в явном виде выписал новые уравнения при «умеренном» предположении об одном дополнительном пространственном измерении.

Он обнаружил, что в этой пересмотренной формулировке уравнения, относящиеся к трем обычным измерениям, по существу совпадают с уравнениями Эйнштейна. Но благодаря тому, что он включил дополнительное пространственное измерение, Калуца, как и следовало ожидать, получил новые уравнения в дополнение к тем, которые первоначально вывел Эйнштейн. Изучив эти дополнительные уравнения, связанные с новым измерением, Калуца обнаружил нечто удивительное. Оказалось, что дополнительные уравнения представляют собой не что иное, как полученные Максвеллом в 1860-х гг. уравнения, описывающие электромагнитное взаимодействие! Добавив еще одно пространственное измерение, Калуца объединил теорию гравитации Эйнштейна с максвелловской теорией электромагнитного поля.

До появления гипотезы Калуцы гравитация и электромагнетизм рассматривались как два отдельных вида взаимодействия; ничто не указывало на то, что между ними может существовать какая-либо связь. Однако, дерзнув предположить, что наша Вселенная имеет дополнительное пространственное измерение, Калуца обнаружил, что в действительности они глубоко связаны. Его теория утверждает, что и гравитация, и магнетизм связаны с волнами в структуре пространства. Гравитация переносится волнами, распространяющимися в нашем обычном трехмерном пространстве, тогда как электромагнетизм переносится волнами, использующими новое, свернутое измерение.

Калуца послал свою статью Эйнштейну. Вначале Эйнштейн ей очень заинтересовался. 21 апреля 1919 г. он написал Калуце ответное письмо, в котором говорил, что подобно объединению может быть достигнуто «с помощью пятимерного [четыре простран-

ственных измерения и одно временное] цилиндрического мира». Он также писал, что «на первый взгляд ваша идея нравится мне необычайно»<sup>4</sup>. Однако спустя неделю Эйнштейн написал Калуце еще одно письмо, которое содержало изрядную долю скептицизма: «Я внимательно прочитал вашу статью и нахожу ее очень интересной. Я не вижу ничего, что позволило бы отрицать такую возможность. С другой стороны, я должен признать, что приведенные аргументы не выглядят достаточно убедительными»<sup>5</sup>. Спустя более чем два года, 14 октября 1921 г., когда у Эйнштейна было достаточно времени, чтобы более полно усвоить новаторский подход, предложенный Калуцей, он снова пишет ему: «Я еще раз обдумал совет воздержаться от публикации вашей идеи об объединении гравитации и электромагнетизма, который я дал вам два года назад... Если вы хотите, я бы мог представить вашу статью в академии»<sup>6</sup>. Так, с запозданием, Калуца получил одобрение мастера.

Хотя идея была прекрасной, последующий детальный анализ гипотезы Калуцы, дополненной Клейном, показал, что она находится в серьезном противоречии с экспериментальными данными. Простейшие попытки включить в теорию электрон приводили к предказанию отношения его массы к заряду, которое существенно отличалось от измеренных значений. Поскольку не было видно способов разрешить эту проблему, многие физики потеряли интерес к идее Калуцы. Эйнштейн и ряд других ученых продолжали исследовать возможности использования дополнительных измерений, но тем не менее это направление вскоре оказалось на периферии теоретической физики.

В действительности, идея Калуцы много опередела свое время. 1920-е гг. ознаменовались началом бурного роста теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению основных законов микромира. Теоретики были поглощены разработками теории квантовой механики и квантовой теории поля. Экспериментаторы были заняты детальным изучением свойств атомов и поиском новых элементарных компонентов мироздания. Теория направляла эксперимент, а эксперимент подправлял теорию —

так продолжалось около полувекa, и в конечном счете, это привело к разработке стандартной модели. Неудивительно, что в это бурное и продуктивное время предположения по поводу дополнительных измерений были на обочине исследований. В эпоху, когда физики открывали мощные методы квантовой механики, дававшие предсказания, которые могли быть проверены экспериментально, изучение возможности того, что Вселенная может иметь совершенно иные свойства на расстояниях, которые слишком малы, чтобы их можно было исследовать даже с помощью самой современной техники, вызывало мало интереса.

Но рано или поздно, из мasha выходит весь пар. К концу 1960-х — началу 1970-х гг. были разработаны теоретические основы стандартной модели. К концу 1970-х — началу 1980-х гг. многие ее предсказания получили экспериментальное подтверждение, и большинство специалистов по физике элементарных частиц пришли к выводу, что подтверждение оставшейся части этой теории является только вопросом времени. Хотя некоторые важные детали оставались невыясненными, многие думали, что на основные вопросы, касающиеся сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, ответы уже получены.

Пришло время вернуться к величайшей проблеме: неразрешенному противоречию между общей теорией относительности и квантовой механикой. Успех в формулировке квантовых теорий трех взаимодействий, существующих в природе, вдохновил физиков на попытку разработать такую же теорию для гравитации. После того, как многочисленные гипотезы потерпели крах, сообщество физиков стало более восприимчивым к более радикальным подходам. Теория Калуцы — Клейна, оставленная умирать медленной смертью в конце 1920-х гг., была вновь воскрешена.

### Современное состояние теории Калуцы — Клейна

За шесть десятилетий, прошедших с момента первого появления гипотезы Калуцы,

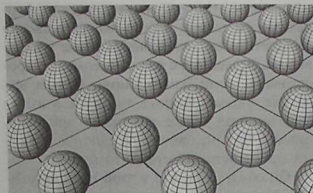


Рис. 8.7. Два дополнительных измерения, свернутые в сферу

понимание физики значительно изменилось и углубилось. Квантовая механика была полностью сформулирована и получила экспериментальное подтверждение. Были открыты и, в значительной степени, объяснены сильное и слабое взаимодействия, которые в 1920-е гг. еще не были известны. Многие физики стали считать, что первоначальное предположение Калуцы потерпело неудачу из-за того, что он не знал об этих других взаимодействиях и был поэтому слишком консервативен в пересмотре структуры пространства. Дополнительные взаимодействия требуют дополнительных измерений. Было показано, что хотя одно новое циклическое измерение и способно решить задачу объединения общей теории относительности и электромагнетизма, оно является недостаточным.

К середине 1970-х гг. развернулись интенсивные исследования, нацеленные на разработку теорий высших размерностей со многими свернутыми измерениями. На рис. 8.7 показан пример с двумя дополнительными измерениями, свернутыми в форму мяча, т. е. сферу. Как и в случае с одним циклическим измерением, эти дополнительные измерения присутствуют в каждой точке пространства, описываемого нашими обычными протяженными измерениями. (Для наглядности мы, опять же, изобразили только пример, где сферические измерения показаны в узлах регулярной сети, построенной для протяженных измерений.) Помимо предложения о другом числе дополнительных измерений, можно представить себе иные формы этих измерений. Например, на рис. 8.8



Рис. 8.8. Два дополнительных измерения, свернутые в баранку (тор)

мы показали возможный вариант, в котором так же имеются два дополнительных измерения, имеющие теперь форму баранки, т. е. тора. Хотя это и выходит за пределы наших изобразительных возможностей, можно представить себе более сложные ситуации, в которых имеется три, четыре, пять и вообще произвольное число дополнительных пространственных измерений, свернутых в самые экзотические формы. Поскольку до сих пор не было получено экспериментального подтверждения существования всех этих измерений, существенным по-прежнему остается требование, чтобы их пространственный размер был меньше, чем самый малый масштаб длин, доступный современной технике.

Наиболее многообещающими из всех теорий с высшими размерностями были те, которые включали и суперсимметрию. Физики надеялись, что частичное сокращение наиболее интенсивных квантовых флуктуаций, связанное с парами частиц-суперпартнеров, поможет смягчить противоречие между гравитацией и квантовой механикой. Для теорий, содержащих гравитацию, дополнительные измерения и суперсимметрию, они предложили название *многомерная супергравитация*.

Как и в случае с оригинальной гипотезой Калуцы, различные варианты многомерной супергравитации выглядят, на первый взгляд, многообещающе. Новые уравнения, появляющиеся в результате добавления новых измерений, поразительно напоминают уравнения, используемые для описания электромагнетизма, а также сильного и сла-

бого взаимодействий. Однако более внимательный анализ показывает, что старые загадки никуда не исчезли. Еще более важно то, что катастрофические квантовые флуктуации пространства, возникающие на малых расстояниях, хотя и ослабляются суперсимметрией, но недостаточно для того, чтобы теория стала непротиворечивой. Физики также убедились, что трудно разработать единую, непротиворечивую теорию с высшими размерностями, объединяющую все свойства взаимодействий и материи<sup>1)</sup>.

Постепенно становилось ясно, что хотя отдельные части объединенной теории начинают занимать свои места, однако ключевое знание, способное связать их в единое целое способом, не превосещающим квантовую механику, все еще отсутствовало. В 1984 г. это недостающее звено — теория струн — ярко вышло на сцену и заняло на ней центральное место.

### Дополнительные измерения и теория струн

К этому моменту вы должны были убедиться, что наша Вселенная *может* иметь дополнительные свернутые пространственные измерения; естественно, пока они остаются достаточно малы, никто не сможет доказать, что они не существуют. И все же доказать, что они не существуют, дополнительные измерения могут показаться просто трюком. Наша неспособность исследовать расстояния, меньшие одной миллиардной от одной миллиардной доли метра, допускает существование не только сверхмалых измерений, но и различных других фантастических возможностей, даже существование микроскопических цивилизаций, населенных крошечными зелеными человечками. Хотя первое выглядит гораздо более рационально, чем последнее, постулируя любое из этих невероятных и, в настоящее время, непроверяемых и, на вид, абсолютно невозможных может выглядеть одинаково произвольным.

Таким было положение дел до появления теории струн. Эта теория разрешает центральное противоречие современной физики — несовместимость квантовой механи-

ки и общей теории относительности и унифицирует наше понимание всех фундаментальных компонент вещества и взаимодействий, существующих в природе. В дополнение к этим достижениям выясняется, что теория струн *требует*, чтобы Вселенная имела дополнительные измерения.

Вот почему это так. Один из главных выводов квантовой механики состоит в том, что наша предсказательная способность принципиально ограничена утверждениями, что такой-то результат имеет такую-то вероятность. Хотя Эйнштейн испытывал неприязнь к современному пониманию квантовой теории (и вы можете согласиться с ним), факт остается фактом. Давайте принимать его таким, каков он есть. Как всем известно, значения вероятности всегда находятся между 0 и 1, или, если пользоваться процентами, между 0 и 100%. Как установили физики, первым признаком того, что квантовая механика перестает работать, является возникновение в расчетах «вероятностей», которые *выходят* за эти пределы. Например, как мы упоминали выше, признаком серьезного противоречия между общей теорией относительности и квантовой механикой в модели с точечными частицами являются бесконечные значения вероятностей, получаемые при расчетах. Как уже обсуждалось, теория струн позволяет избавиться от этих бесконечностей. Однако мы еще не сказали, что осталась другая, более тонкая проблема. На начальном этапе развития теории струн физики обнаружили, что некоторые вычисления приводят к появлению отрицательных вероятностей, также находящихся вне области допустимых значений. Таким образом, на первый взгляд, теория струн утонула в своем собственном квантово-механическом болоте.

С непоколебимым упорством физики искали и нашли причину появления этих неприемлемых результатов. Начнем объяснение с простого наблюдения. Если мы положим струну на двумерную поверхность (такую, как поверхность стола или Садового шланга), то число независимых направлений, в которых может колебаться струна, уменьшится до *двух*: влево-вправо и вперед-назад вдоль поверхности. Любая мода колебаний, ограниченная такой поверхностью,

будет представлять собой комбинацию колебаний в этих двух направлениях. Одно временно это означает, что струна во Флатландии, во вселенной Садового шланга или в любой другой двумерной вселенной тоже сможет колебаться только в этих двух независимых пространственных направлениях. Однако если мы уберем струну с поверхности, то число независимых направлений колебаний увеличится до трех, поскольку струна теперь сможет колебаться и в направлении вверх-вниз. Это означает, что во вселенной с тремя пространственными измерениями струна также может колебаться в трех независимых направлениях. Дальнейшее развитие этой идеи труднее поддается представлению, но общая схема сохраняется: во вселенных с большим числом пространственных измерений будет больше независимых направлений, в которых могут совершаться колебания.

Мы уделили такое внимание этому факту, относящемуся к колебаниям струн, потому что физики обнаружили: вычисления, дающие бессмысленные результаты, очень чувствительны к числу независимых направлений, в которых может колебаться струна. Отрицательные вероятности возникают из-за *несоответствия* между требованиями теории и тем, что, как кажется, диктует реальность: расчеты показали, что если бы струны могли колебаться в *девяти* независимых пространственных направлениях, все отрицательные вероятности исчезли бы. Ну что ж, это большая победа теории, но нам то какое дело до этого? Если теория струн призвана описать наш мир с тремя пространственными измерениями, у нас по-прежнему остаются проблемы.

Но остаются ли? Вспоминая об идее болельчим полувекковой давности, мы видим, что Калуца и Клейн оставили нам лазейку. Поскольку струны так малы, они могут колебаться не только в больших, протяженных измерениях, но и в крошечных свернутых. Таким образом, мы можем удовлетворить требованию о девяти пространственных измерениях, предельному к *нашей* Вселенной теорией струн, предположив в духе Калуцы и Клейна, что в дополнение к трем привычным, протяженным пространственным

измерениям Вселенная имеет шесть свернутых. В результате теория струн, которая была на грани исключения из мира физической реальности, будет спасена. Более того, вместо постулирования существования дополнительных измерений, как делали Калуца, Клейн и их последователи, теория струн *требует* их. Для того чтобы теория струн стала непротиворечивой, Вселенная должна иметь девять пространственных измерений и одно временное — итого всего десять. Таким образом, идея Калуцы, прозвучавшая в 1919 г., торжественно и убедительно вышла на сцену.

## Некоторые вопросы

Однако сразу же возникает ряд вопросов. Впервые, почему теория струн требует именно девяти пространственных измерений для того, чтобы избежать бессмысленных значений вероятности? Это тот вопрос, на который, вероятно, труднее всего ответить без привлечения математического формализма теории струн. Прямой расчет с использованием аппарата теории струн приводит к этому результату, но никто не может дать интуитивного, не загроможденного техническими деталями объяснения, почему так происходит. Эрнест Резерфорд однажды сказал, что в действительности, если вы не можете объяснить результат на простом, не отягощенном специальными терминами языке, это значит, что вы не понимаете его по-настоящему. Слова Резерфорда не говорят, что ваш результат неверен, они говорят, что вы не полностью понимаете его происхождение, значение или следствия. Наверное, это справедливо по отношению к дополнительным измерениям в теории струн. (Воспользуемся возможностью упомянуть в скобках о центральном положении второй революции в теории суперструн, которую мы будем обсуждать в главе 12. Расчеты, лежащие в основе заключения о том, что имеется десять пространственно-временных измерений — девять пространственных и одно временное, оказались *приближенными*. В середине 1990-х гг. Виттен, основываясь на своих догадках и на более ранних работах Майкла

Даффа из Техасского университета, а также Криса Халла и Пола Таунсенда из Кембриджского университета того, что в приближенных расчетах на самом деле было *пропущено* одно пространственное измерение. Теория струн, как он показал к большому удивлению большинства специалистов, работающих в этой области, на самом деле требует *десяти* пространственных измерений и одного временного, — т. е. в сумме *одинадцати* измерений. Вплоть до главы 12 мы будем игнорировать этот важный результат, поскольку он не имеет прямого отношения к вопросам, которые мы собираемся рассматривать.)

Во-вторых, если уравнения теории струн (или, точнее, приближенные уравнения, которые мы будем обсуждать до главы 12) показывают, что Вселенная имеет девять пространственных измерений и одно временное, почему три пространственных измерения (и одно временное) являются развернутыми, а все остальные — маленькими и свернутыми? Почему *все* они не являются развернутыми, или почему не они не являются свернутыми, почему не они не являются какой-то другой промежуточной вариант? В настоящее время никто не знает ответа на этот вопрос. Если теория струн верна, рано или поздно мы узнаем ответ, но пока наше понимание этой теории не позволяет его получить. Сказанное не значит, что никто не отваживался ответить на этот вопрос, кто не отваживался ответить на этот вопрос. Например, встав на точку зрения космологов, можно предположить, что вначале все измерения находились в туго свернутом состоянии, а затем, в ходе Большого взрыва, три пространственных измерения и одно ва, три пространственных измерения и одно временное развернулись до своего современного состояния, тогда как остальные пространственные измерения остались маленькими. Предварительные соображения о том, почему развернулось только три пространственных измерения, будут рассмотрены в главах 14, но, честно говоря, они пока находятся в стадии разработки. Ниже мы будем предпологать, что все пространственные измерения, кроме трех, находятся в свернутом состоянии, в соответствии с тем, что мы наблюдаем в окружающем мире. Одна из основных

задач современного этапа исследований состоит в том, чтобы показать, что это предположение следует из самой теории.

В-третьих, если требуется несколько дополнительных измерений, не может ли быть так, что наряду с пространственными будут и дополнительные *временные* измерения? Если вы поразмышляете об этом с минуту, то почувствуете, что это поистине странная возможность. У нас есть внутреннее интуитивное представление о том, как выглядят вселенная, имеющая несколько пространственных измерений, поскольку мы живем в мире, в котором постоянно сталкиваемся с несколькими, а именно с тремя измерениями. Но как выглядят вселенная, в которой есть несколько времен? Будет ли одно из них совпадать с тем, к которому мы привыкли, а другие будут чем-то «иными»?

Ситуация становится еще более загадочной, если вы подумаете о свернутых временных измерениях. Например, если крошечный муравей перемещается вдоль дополнительно-го пространственного измерения, свернутого наподобие круга, то, завершив очередной круг, он будет снова и снова оказываться в одном и том же месте. В этом мало удивительного, поскольку мы привыкли, что можем, если захотим, возвращаться в одно и то же место в пространстве столько раз, сколько нам нужно. Но если свернутое измерение является временным, перемещение вдоль него будет означать, что спустя какой-то промежуток мы будем оказываться в *предыдущем моменте времени*. Это, конечно, далеко выходит за пределы нашего повседневного опыта. Время в привычном для нас понимании — это измерение, в котором мы можем двигаться только в одном направлении с абсолютной неизбежностью. Мы никогда не можем вернуться во *в* мгновение, которое уже прошло. Конечно, свернутые временные измерения могут иметь характеристики, отличающиеся от тех, которые свойственны нашему обычному времени, распространяющемуся из прошлого, с момента рождения Вселенной, к настоящему периоду. Однако в противоположность дополнительным пространственным измерениям, эти новые и доселе неизвестные временные измерения, очевидно, могут потребовать более значи-

тельной перестройки нашей интуиции. Некоторые теоретики исследуют возможность включения в теорию струн дополнительных временных измерений, но на сегодняшний день ситуация еще далека от определенности. В нашем обсуждении теории струн мы будем придерживаться более «традиционного» подхода, в котором все свернутые измерения являются пространственными. Тем не менее, в будущем интригующая возможность новых временных измерений вполне может сыграть свою роль.

### Физические следствия дополнительных измерений

Годы исследования, отчет которых идет с первой статьи Калуцы, показали, что хотя размеры всех дополнительных измерений, предлагаемых физиками, должны быть слишком малы, чтобы мы могли наблюдать их непосредственно или с помощью имеющегося оборудования, эти измерения оказывают важное косвенное влияние на наблюдаемые физические явления. В теории струн эта связь между свойствами пространства на микроскопическом уровне и наблюдаемыми физическими явлениями видна особенно отчетливо.

Чтобы понять это, вспомним, что массы и заряды частиц определяются возможными модами резонансных колебаний струн. Представьте себе крошечную струну, которая движется и колеблется, и вы поймете, что моды резонансных колебаний подвержены влиянию со стороны окружающего пространства. Подумайте, например, о морских волнах. На бескрайних просторах океана отдельная изолированная волна может иметь любую форму и двигаться в любом направлении. Это очень похоже на колебания струны, движущейся по развернутому протяженному пространственным измерениям. Как указывалось в главе 6, такая струна в любой момент времени может колебаться в любом из протяженных измерений. Но узкая морская волна проходит через более узкий участок, на форму волны будут влиять, например, глубина моря, расположение и форма скал, форма канала, по которому движется

вода и т. п. Можно также представить себе органный орган или валторну. Звук, который может воспроизводить каждый из этих инструментов, непосредственно зависит от резонансной моды колебаний воздуха, проходящего через них, а эта мода определяется формой и размерами каналов в инструменте, через которые движется поток воздуха. Свернутые пространственные измерения оказывают аналогичное влияние на возможные моды резонансных колебаний струны. Поскольку крошечные струны колеблются во всех пространственных измерениях, форма, в которую свернуты эти дополнительные пространственные измерения, а также форма их взаимного переплетения, сильно влияют и строго ограничивают возможные моды резонансных колебаний. Эти моды, в значительной степени определяемые геометрией дополнительных измерений, формируют набор свойств возможных частиц, наблюдаемых в привычных протяженных измерениях. Это означает, что *геометрия дополнительных измерений определяет фундаментальные физические свойства, такие как массы частиц и заряды, которые мы наблюдаем в нашем обычном трехмерном пространстве.*

Это столь глубокий и важный момент, что мы повторим его еще раз. Согласно теории струн Вселенная состоит из крошечных струн. Моды резонансных колебаний этих струн определяют, на уровне микромира, массы и константы взаимодействия элементарных частиц. Теория струн также требует существования дополнительных измерений, которые должны быть свернуты до очень маленького размера, чтобы не было противоречия с тем фактом, что исследователям до сих пор не удалось их обнаружить. Но крошечные струны могут двигаться в крошечных пространствах. Когда струна перемещается, осциллируя по ходу своего движения, геометрическая форма дополнительных измерений играет решающую роль, определяя моды резонансных колебаний. Поскольку моды резонансных колебаний струн проявляются в виде масс и зарядов элементарных частиц, мы имеем право утверждать, что эти фундаментальные свойства Вселенной в значительной степени определяются размерами и формой дополнительных измерений. Это

результат представляет собой одно из наиболее глубоких следствий теории струн.

Поскольку дополнительные измерения оказывают столь глубокое влияние на фундаментальные физические свойства Вселенной, мы должны с неослабевающей энергией исследовать, как выглядят эти свернутые измерения.

### Как выглядят свернутые измерения?

Дополнительные пространственные измерения теории струн не могут быть свернуты произвольным образом: уравнивая, следующие из теории струн, существенно ограничивает геометрическую форму, которую они могут принимать. В 1984 г. Филипп Канделас из университета штата Техас в г. Остине, Гари Горович и Эндрю Строминджер из университета штата Калифорния в г. Санта-Барбара, а также Эдвард Виттен показали, что этим условиям удовлетворяет один конкретный класс шестимерных геометрических объектов. Они носят название *пространств Калаби—Яу* (или *многообразий Калаби—Яу*<sup>\*)</sup>, в честь двух математиков, Эудженио Калаби из университета штата Пенсильвания и Шин-Туна Яу из Гарвардского университета, исследования которых в близкой области, исследования которых до появления теории струн, сыграли центральную роль в понимании этих пространств. Хотя математическое описание пространств Калаби—Яу является довольно сложным и изощренным, мы сможем получить представление о том, как они выглядят, взглянув на рисунки<sup>3)</sup>.

Пример пространства Калаби—Яу показан на рис. 8.9<sup>4)</sup>. Когда вы будете рассматривать этот рисунок, вы должны помнить, что ему присущи некоторые ограничения. Мы попытались представить шестимерное пространство на двумерном листе бумаги, пространство это довольно существенно неизбежно привело к довольно существенным искажениям. Тем не менее, рисунок передает основные черты внешнего вида пространств Калаби—Яу<sup>10)</sup>. На рис. 8.9

<sup>\*)</sup> В оригинале *Calabi—Yau shapes*. — *Прим. перек.*



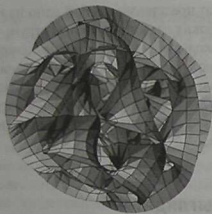


Рис. 8.9. Пример пространства Калаби—Яу

иллюстрируется всего лишь один из многих десятков тысяч возможных видов пространств Калаби—Яу, которые удовлетворяют строгим требованиям к дополнительным измерениям, вытекающим из теории струн. Хотя принадлежат к клубу, в который входят десятки тысяч членов, нельзя считать исключительной особенностью, вы можете сравнить это число с бесконечным числом форм, которые возможны с чисто математической точки зрения; в этом смысле пространства Калаби—Яу действительно являются достаточно редкими.

Чтобы получить общую картину, вы должны теперь мысленно заменить каждую из сфер, показанных на рис. 8.7 и представляющих два свернутых измерения, пространством Калаби—Яу. Иначе говоря, как показано на рис. 8.10, в каждой точке нашего привычного трехмерного пространства согласно теории струн имеется шесть доселе неизвестных измерений, тесно свернутых в одну из этих довольно причудливых форм. Эти измерения представляют собой неотъемлемую и всезудущую часть структуры пространства, они присутствуют повсюду. Например, если вы опишете рукой широкую дугу, ваша рука



Рис. 8.10. Согласно теории струн Вселенная имеет дополнительные измерения, свернутые в пространство Калаби—Яу

будет двигаться не только в трех развернутых измерениях, но и в этих свернутых. Конечно, поскольку эти свернутые измерения столь малы, ваша рука в своем движении пересечет их бесчисленное количество раз, снова и снова возвращаясь к исходной точке. Размеры этих измерений настолько малы, что в них не слышно много места для перемещения таких огромных объектов, как ваша рука, и все они «размазываются» закончив движение руки, вы остаетесь в полном неведении о путешествии, которое она совершила сквозь свернутые измерения Калаби—Яу.

Это поразительная особенность теории струн. Но если у вас практический ум, вы обязаны вернуться к обсуждению существенных и конкретных вопросов. Теперь, когда мы лучше понимаем, как выглядят дополнительные измерения, мы можем задать вопрос, какие физические свойства обязаны своим происхождением струнам, колеблющимся в этих измерениях, и как сравнить эти свойства с результатами экспериментальных наблюдений? В викирине под названием «теория струн» это вопрос на миллион долларов.

## Глава 9

### Дымящаяся ружье: экспериментальные свидетельства

Ничто не доставило бы специалисту по теории струн большего удовольствия, чем возможность гордо предъявить миру подробный список предсказаний, поддающихся экспериментальной проверке. Действительно, не существует способа убедиться, что та или иная теория действительно описывает наш мир, не подвергнув ее предсказания экспериментальной проверке. И неважно, какие восхитительные картины рисует теория струн — если она не описывает с хорошей точностью нашу Вселенную, она имеет не больше отношения к делу, чем навороченная компьютерная игра *Драконы и темницы*.

Эдвард Виттен с гордостью объявил, что теория струн уже сделала впечатляющее и подтвержденное экспериментально предсказание: «Теория струн обладает замечательным свойством: она *предсказывает* гравитацию»<sup>1)</sup>. Этим Виттен хотел сказать, что Ньютон и Эйнштейн разработали свои теории гравитации, так как наблюдения ясно показывали им, что гравитация существует и поэтому требует точного и непротиворечивого объяснения. Напротив, даже если бы физики, занимающиеся изучением теории струн, совершенно ничего не знали об общей теории относительности, они неизбежно пришли бы к ней в рамках теории струн. Благодаря существованию моды колебаний, соответствующей безмассовому гравитону со спином 2, гравитация является неотъемлемым элементом этой теории. Как сказал Виттен: «Тот факт, что гравитация является следствием теории струн, является величайшим теоретическим достижением в истории»<sup>2)</sup>. Признавая, что «предсказание» правильное было бы называть «послесказанием», так как физики дали теоретическое описание гравитации до появле-

ния теории струн, Виттен подчеркивает, что это просто историческая случайность. Как-нибудь другая высокоразвитая цивилизация во Вселенной, фантазирует Виттен, вполне могла бы сначала открыть теорию струн, а уже после, в качестве ошеломляющего следствия, — теорию гравитации.

Однако, поскольку историю науки на нашей планете уже не перепишешь, многие считают сделанное числом предсказание гравитации неудачей экспериментального подтверждения теории струн. Большинство физиков в гораздо большей степени было бы удовлетворено одним из двух: либо чтобы теория струн дала обычное предсказание, поддающееся экспериментальной проверке, либо чтобы она дала истолкование каким-либо физическим свойствам (таким, как масса электрона или существование трех семейств элементарных частиц), для которых в настоящее время не существует объяснения. В этой главе мы рассмотрим, насколько далеко ученые, работающие в области теории струн, продвинулись в этом направлении.

Ирония судьбы состоит в том, что хотя потенциально теория струн обещает стать по предсказательной силе *наиболее* мощной из всех теорий, с которыми когда-либо имели дело ученые, способной объяснить найденные фундаментальные свойства природы, физики до сих пор не могут делать предсказания с точностью, достаточной для сопоставления с экспериментальными данными. Представьте себе ребенка, который получил Новый год игрушку, о которой давно мечтал, но не может ее включить, потому что в инструкции не хватает нескольких страниц. Так и современные физики, владея тем, что вполне может оказаться святым Граалем

современной науки, не могут воспользоваться всей мощью этого средства, пока не *напишут* полное «руководство пользователя». Тем не менее, мы увидим в этой главе, что при небольшом везении одно центральное свойство теории струн может получить экспериментальное подтверждение уже в ближайшем десятилетии. А при большей удаче косвенные подтверждения могут быть получены в любой момент.

## Перекрестный огонь критики

Истинна ли теория струн? Мы не знаем этого. Если вы разделяете веру в то, что законы физики не должны делиться на законы, управляющие макромиром, и законы, диктующие правила для микромира, а также верите, что мы не должны останавливаться, пока у нас не будет теории с неограниченной областью применимости, тогда теория струн — ваша единственная надежда. Конечно, вы можете возразить, что такое утверждение свидетельствует скорее о недостатке воображения у физиков, чем о какой-то уникальности теории струн. Возможно. Вы можете также сказать, что подобно человеку, который ищет потерянные ключи под уличным фонарем, физики столпились вокруг теории струн просто потому, что по какому-то капризу в развитии науки в этом направлении упал самый луч прозрения. Может быть. В конце концов, если вы по натуре консерватор или любите спор ради спора, вы даже можете сказать, что физики напрасно тратят время на теорию, которая постулирует новые свойства природы в масштабе, в несколько сот миллионов миллиардов раз меньшем того, который доступен экспериментальному исследованию.

Если бы вы высказали эти упреки в середине 1980-х гг., когда возник первый всплеск интереса к теории струн, вы оказались бы в одной компании со многими самыми именитыми физиками того времени. Например, нобелевский лауреат Шелдон Глаشو, работавший в Гарвардском университете, вместе с другим физиком Полом Винепаргом, в то

время также сотрудником Гарварда, публично обвинили теорию струн в невозможности экспериментальной проверки: «Вместо традиционного соревнования теории и эксперимента, специалисты по теории суперструн заняты поисками внутренней гармонии там, где критерием истинности являются элегантность, уникальность и красота. Само существование теории держится на магических совпадениях, чудесных сокращениях и связях между казахскими несвязанными (и, возможно, еще и не открытыми) областями математики. Достаточно ли этих свойств, чтобы поверить в реальность суперструн? Могут ли математика и эстетика заменить и превзойти обычный эксперимент?»<sup>3)</sup>

В другом своем выступлении Глаشو продолжил эту тему, сказав, что «...теория струн столь амбициозна, что она может быть либо целиком истина, либо целиком ложна. Единственная проблема состоит в том, что ее математика настолько нова и сложна, что не известно, сколько десятилетий потребуются на ее окончательную разработку»<sup>4)</sup>. Он даже задавался вопросом, должны ли специалисты по теории струн «получать зарплату от физических факультетов, и позволено ли им совращать умы впечатлительных студентов», предупреждая, что теория струн подрывает основы науки, во многом так, как это делала теология в средние века<sup>5)</sup>.

Ричард Фейнман незалого до своей смерти дал ясно понять, что он не верит в то, что теория струн является единственным средством для решения проблем, в частности, катастрофических бесконечностей, препятствующих гармоничному объединению гравитации и квантовой механики: «По моим ощущениям — хотя я могу и ошибаться — существует не один способ решения этой задачи. Я не думаю, что есть только один способ, которым мы можем избавиться от бесконечностей. Тот факт, что теория позволяет избавиться от бесконечностей, не является для меня достаточным основанием, чтобы поверить в ее уникальность»<sup>6)</sup>.

И Говард Джорджи, знаменитый коллега и сотрудник Глашу по Гарварду, в конце 1980-х гг. также был среди громких критиков теории струн: «Если мы позволим увлечь себя сладкоговорным сиренам,

вешающим об „окончательном“ объединении на расстояниях столь малых, что наши друзья-экспериментаторы не смогут помочь нам, мы попадем в беду, поскольку лишимся ключевого процесса оттачивания ошибочных идей, который выгодно отличает физику от многих других менее интересных видов человеческой деятельности»<sup>7)</sup>.

Как и во многих других делах большой важности, на каждого скептика приходился энтузиаст. Виттен говорил, что когда он познакомился с тем, как теория струн объединяет гравитацию и квантовую механику, это стало «величайшим интеллектуальным потрясением» в его жизни<sup>8)</sup>. Курмун Вафа, ведущий специалист по теории струн из Гарвардского университета, утверждал, что «теория струн, несомненно, дает глубочайшее понимание мироздания, которого мы когда-либо достигали»<sup>9)</sup>. А нобелевский лауреат Мюррей Гелл-Манн сказал, что теория струн — «фантастическая вещь», и что он полагает, что один из вариантов этой теории однажды станет теорией всего мироздания<sup>10)</sup>.

Итак, как вы могли видеть, дебаты подогревались отчасти физикой, а отчасти философскими рассуждениями о том, какой должна быть физика. «Традиционалисты» ждали, чтобы теоретические работы имели тесную связь с экспериментальными наблюдениями, в духе успешной научной деятельности в течение нескольких последних столетий. Другие считали, что нам по силам взяться за проблемы, экспериментальное изучение которых находится за пределами современных технических возможностей. Несмотря на различия в философских подходах, волна критики теории струн за последние десятилетия существенно пошла на убыль. Глашу связывает это с двумя моментами. Во-первых, он заметил, что в середине 1980-х гг. «специалисты по теории струн с энтузиазмом и бьющим через край оптимизмом объявляли, что они вот-вот ответят на все вопросы физики. Сейчас, когда они стали более благоразумными, многие мои критические замечания середины 1980-х гг. потеряли свою актуальность»<sup>11)</sup>.

Во-вторых, он также указал, что «мы, исследователи, работы которых не связа-

ны с теорией струн, не добились сколькихнибудь существенного прогресса за последние десятилетия. Поэтому аргумент, что теория струн является единственным игроком на этом поле, имеет под собой очень серьезное основание. Есть вопросы, на которые в рамках традиционной квантовой теории поля нельзя получить ответы. Это должно быть ясно. Ответы на них могут дать кто-то другой, и единственный „другой“, которого я знаю — это теория струн»<sup>12)</sup>.

Джорджи вспоминал свои высказывания середины 1980-х гг. примерно в том же духе: «В разные времена на начальных этапах своего развития теория струн получала завышенные оценки. В последующие годы я обнаружил, что некоторые идеи теории струн ведут к интересным выводам, которые оказались полезны в моих собственных исследованиях. Теперь я с большей радостью наблюдаю, как люди посвящают свое время исследованию в теории струн, поскольку вижу, что она способна дать нечто полезное»<sup>13)</sup>.

Теоретик Дэвид Гросс, входивший в число лидеров как в традиционной физике, так и в теории струн, красноречиво подтопнул ситуацию: «Обычно, когда мы карабкались на гору природы, прокладываям пути занимались экспериментаторы. Мы, ленивые теоретики, плелись где-то сзади. Времени от времени они сбрасывали вниз экспериментальный камень, который рикошетил от наших голов. Со временем мы находили объяснение и могли продолжать наш путь, который нам перекрыли экспериментаторы. Когда-то наши друзья, мы объясняли им, Дюнав наших друзей, мы объясняли им, с чем они столкнулись, и как они туда попали. Нам ведь старый и легкий (по крайней мере, для теоретиков) способ восхождения на гору. Нам всем хотелось бы, чтобы эти люди, должны возглавить колонну. Это будет гораздо более одинокий путь»<sup>14)</sup>.

Теоретики, занимающиеся струнами, не хотят совершать одиночное восхождение на высокие вершины природы; они предпочитают делить трудности и радости почти бы с коллегами-экспериментаторами. Со своими коллегами-экспериментаторами. Сегодняшняя ситуация вызвана отставанием теоретических канатов и крючков для последнего



почему электрон и другие частицы имеют те массы, которые они имеют. Однако эти вопросы также требуют знания того, какой вид имеют дополнительные измерения, свернутые в пространства Калаби—Яу.

Сказанное выше дало некоторое представление о том, каким образом теория струн может однажды объяснить приведенные в табл. 1.1 свойства частиц вещества. Физики, работающие в теории струн, верят, что таким же образом смогут однажды объяснить и свойства перечисленных в табл. 1.2 частиц, переносящих фундаментальные взаимодействия. Когда струны закручиваются и вибрируют в развернутых и свернутых измерениях, небольшая часть их обширного спектра колебаний представлена модами, соответствующими спину 1 или 2. Эти моды являются кандидатами на роль фундаментальных взаимодействий. Независимо от конфигурации пространства Калаби—Яу, всегда имеется одна безмассовая мода колебаний, имеющая спин 2; мы идентифицируем эту моду как гравитон. Однако точный список частиц-переносчиков взаимодействия, имеющих спин 1, — их число, интенсивность взаимодействия, которое они передают, их калибровочные симметрии очень сильно зависят от геометрической формы свернутых измерений. Таким образом, повторим, мы пришли к пониманию того, что теория струн дает схему, объясняющую существующий набор частиц, переносящих взаимодействие, т. е. объясняющую свойства фундаментальных взаимодействий. Однако, не зная точно, в каком многообразии Калаби—Яу свернуты дополнительные измерения, мы не можем сделать определенных предсказаний или «послесказаний» (выходящих за рамки замечания Витена о «послесказании» гравитации).

Почему мы не можем установить, какое из многообразий Калаби—Яу является «правильным»? Большинство теоретиков относит это к неадекватности теоретических инструментов, используемых в теории струн. В главе 12 мы покажем более подробно, что математический аппарат теории струн столь сложен, что физики способны выполнить только приближенные вычисления в рамках формализма, известного под названием *теории возмущений*. В этой приближенной схе-

ме все возможные многообразия Калаби—Яу выглядят равноправными; ни одно из них не выделяется уравнениями. Поскольку физические следствия теории струн существенно зависят от точной формы свернутых измерений, не имея возможности выбрать единственное пространство Калаби—Яу из многих возможных, нельзя сделать определенных заключений, поддающихся экспериментальной проверке. Современные исследования нацелены на разработку теоретических методов, выходящих за рамки приближенного подхода, в надежде, что помимо других выгод это выделит единственное многообразие Калаби—Яу для дополнительных измерений. В главе 13 мы рассмотрим прогресс, достигнутый в этом направлении.

## Перебирая возможности

Вы можете и так поставить вопрос: пусть неизвестно, какое из пространств Калаби—Яу выбирает теория струн, но позволяет ли *какой-нибудь* выбор получить физические характеристики, которые согласуются с наблюдениями? Другими словами, если мы рассчитаем физические характеристики, которые дает каждое возможное многообразие Калаби—Яу, и соберем их в один гигантский каталог, сможем ли мы найти среди них то, которое соответствует действительности? Это важный вопрос, однако есть две серьезные причины, по которым на него нельзя дать исчерпывающего ответа.

Разумно было бы начать исследование, ограничившись только теми пространствами Калаби—Яу, которые дают три семейства частиц. Это значительно сокращает список возможных вариантов. Однако обратите внимание: мы можем деформировать тор с ручками из одной формы во множество других — на самом деле, в бесконечное множество — без изменения числа отверстий. На рис. 9.2 мы показали одну такую деформацию формы, приведенной в нижней части рис. 9.1. Аналогично можно взять пространство Калаби—Яу с тремя отверстиями и плавно изменить его форму без изменения числа отверстий, опять же через бесконечное число промежуточных форм. (Когда выше

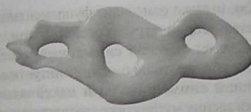


Рис. 9.2. Мы можем различными способами изменить форму тора с ручками, не меняя количества отверстий в нем; здесь показан один из таких способов

мы говорили о десятках тысяч многообразий Калаби—Яу, мы уже сгруппировали все те многообразия, которые могут быть преобразованы друг в друга путем таких плавных деформаций, и учитывали такие группы как одно пространство Калаби—Яу.) Проблема состоит в том, что физические свойства колебаний струн, а также соответствующие им массы и константы взаимодействий, очень сильно зависят от подобных детальных изменений вида многообразия, а у нас, опять же, нет критериев для того, чтобы отдать одной из этих конкретных возможностей предпочтение перед другими. И неважно, сколько аспирантов усадят за эту работу профессора физики, невозможно перебрать все альтернативы, соответствующие бесконечному списку различных пространств.

Осознание этого побудило специалистов по теории струн исследовать физику, порождаемую выборкой из возможных многообразий Калаби—Яу. Но даже в этом случае ситуация остается непростой. Приближенные уравнения, используемые учеными в настоящее время, имеют недостаточную мощность для того, чтобы получить полную и точную физическую картину, которую дает выбранное многообразие Калаби—Яу. Эти уравнения позволяют значительно продвинуться вперед в отношении приблизительной оценки свойств колеблющейся струны, которые, как мы надеемся, будут соответствовать наблюдаемым частицам. Но точные и определенные физические вопросы, подобные тому, какова масса электрона или интенсивность слабого взаимодействия, требуют уравнений, точность которых намного превосходит ту, которую дают современные приближенные схемы. Помните главу 6 и пример с *Верной ценой*, где говорилось,

что «естественным» мерилом энергии в теории струн является планковская энергия, и только благодаря необычайно точному механизму сокращений теория струн способна дать моды колебаний, массы которых близки к массам известных частиц вещества и частиц, переносящих взаимодействие. Искусственные сокращения требуют точных расчетов, поскольку даже большие погрешности могут оказать большое влияние на результат. Как мы увидим в главе 12, в середине 1990-х гг. физики смогли добиться значительного прогресса в выходе за рамки современных приближенных уравнений, хотя сделать предстоит еще немало.

Итак, где же мы находимся? Да, мы столкнулись с проблемой отсутствия фундаментального критерия выбора конкретного многообразия Калаби—Яу. Да, у нас нет теоретических средств, необходимых для вывода наблюдаемых характеристик, соответствующих такому выбору. Но мы можем спросить, а есть ли в каталоге пространств Калаби—Яу какие-либо элементы, которые дают картину мира, в основном согласующуюся с наблюдениями? Ответ на этот вопрос звучит достаточно обнадеживающе. Хотя большинство элементов каталога дают картину, которая существенно отличается от нашего мира (в ней, помимо всего прочего, другое число семейств элементарных частиц, а также иные типы и константы фундаментальных взаимодействий), небольшое число многообразий дает физическую картину, которая на качественном уровне *близка* к наблюдаемой в реальности. Таким образом, существуют примеры пространств Калаби—Яу, приводящие для частиц стандартной модели, подходящим для частиц стандартной модели, если выбрать эти пространства в качестве свернутых измерений, существование которых требуется в теории струн. И, что имевшись требуется, существование теории струн успешно встраивает гравитационное взаимодействие в квантово-механическую схему.

Для современного уровня понимания это лучше, на что мы могли рассчитывать. Если многие многообразия Калаби—Яу давали примерное совпадение с экспериментальными данными, связь между конкретными выбором и наблюдаемой физической кар-

тиной была бы менее убедительной. Когда предъявляемым требованиям соответствуют многие варианты, ни один из них нельзя выделить даже с привлечением экспериментальных данных. С другой стороны, если бы ни одно многообразие Калаби—Яу не давало ничего даже отдаленно похожего на наблюдаемую физическую картину, мы могли бы сказать, что теория струн, конечно, прекрасная теоретическая структура, но она, по-видимому, не имеет отношения к нашему миру. То, что даже при наших весьма скромных современных способностях определения детальных физических следствий удалось найти небольшое число пригодных пространств Калаби—Яу, является чрезвычайно обнадеживающим фактом.

Объяснение свойств элементарных частиц и частиц-переносчиков фундаментальных взаимодействий было бы одним из великих, если не величайшим научным достижением. Тем не менее, у вас может возникнуть вопрос, существуют ли предсказания теории струн, в противоположность «послесказаниям», которые физики-экспериментаторы могут попытаться подтвердить уже сегодня или хотя бы в обозримом будущем. Такие предсказания есть.

## Суперчастицы

Препятствия на пути теоретических исследований, которые не позволяют в настоящее время использовать теорию струн для получения детальных предсказаний, вынуждают нас к поиску не конкретных, а общих свойств Вселенной, состоящей из струн. В этом контексте слово «общие» указывает на характеристики, которые являются столь фундаментальными, что они мало чувствительны к тонким свойствам теории, которые в настоящее время недоступны для теоретического анализа или вообще не зависят от них. К таким характеристикам можно относиться с доверием, даже если мы не достигли полного понимания всей теории. В последующих главах мы обратимся к другим примерам, а сейчас сконцентрируем внимание на суперсимметрии.

Как мы уже отмечали, фундаментальное свойство теории струн состоит в том, что она обладает высокой симметрией, объединяя в себе не только наши интуитивные принципы симметрии, но и максимальное, с точки зрения математики, расширение этих принципов — суперсимметрию. Как говорилось в главе 7, это означает, что моды колебаний струны реализуются парами суперпартнеров, спин которых отличается на  $1/2$ . Если теория струн верна, то некоторые из колебаний струн будут соответствовать известным частицам. Парность, связанная с суперсимметрией, позволяет теории струн сделать предсказание, что у каждой известной частицы имеется суперпартнер. Мы можем определить константы взаимодействия, которые должна иметь каждая из этих суперчастиц, однако в настоящее время не способны предсказать их массы. Но даже несмотря на это, предсказание существования суперпартнеров является общей особенностью теории струн; это свойство теории струн является истинным независимо от тех характеристик, которые пока не разработаны окончательно.

До настоящего времени никому не удавалось наблюдать суперпартнеров элементарных частиц. Это может означать, что они не существуют, и теория струн неверна. Однако по мнению многих специалистов по физике элементарных частиц это связано с тем, что суперпартнеры являются очень тяжелыми и поэтому не могут быть обнаружены на тех экспериментальных установках, которыми мы располагаем сегодня. В настоящее время физики сооружают гигантский ускоритель вблизи г. Женева в Швейцарии, получивший название Большого адронного коллайдера<sup>1)</sup>. Есть надежда, что мощность этой установки будет достаточна для открытия частиц-суперпартнеров. Ускоритель должен вступить в действие к 2010 г., и вскоре после этого суперсимметрия может получить экспериментальное подтверждение. Как сказал Шварц: «До открытия суперсимметрии

<sup>1)</sup> В оригинале *Large Hadron Collider*. Коллайдер — ускоритель на встречных пучках, а адроны — частицы, участвующие в сильном взаимодействии. — Прим. перев.

осталось ждать не так уж долго. И когда это случится, это будет волнующее событие<sup>17)</sup>.

Есть, однако, два момента, о которых следует помнить. Даже если частицы-суперпартнеры будут обнаружены, один этот факт недостаточен для того, чтобы утверждать истинность теории струн. Как мы видели выше, хотя суперсимметрия была открыта в ходе работ над теорией струн, она может быть успешно включена в теорию, основанную на точечной модели частиц и, следовательно, не является уникальным признаком теории струн. И наоборот, если даже частицы-суперпартнеры не будут обнаружены с помощью Большого адронного коллайдера, один этот факт еще не позволяет отрицать теорию струн, поскольку она может быть связана с тем, что суперпартнеры слишком тяжелы, чтобы их можно было обнаружить на такой установке.

Тем не менее, если частицы-суперпартнеры будут обнаружены, несомненно, это будет сильно и вдохновляющее свидетельство в пользу теории струн.

## Частицы с дробным электрическим зарядом

Другое возможное экспериментальное подтверждение теории струн, связанное с электрическим зарядом, является не столь фундаментальным, как существование суперпартнеров, но столь же удивительным. Ассортимент значений электрического заряда, который могут нести частицы в стандартной модели, очень ограничен: кварки и антикварки могут иметь (в единицах заряда электрона) положительный и отрицательный заряд, равный  $1/3$  и  $2/3$ , а остальные частицы —  $0$ ,  $+1$  и  $-1$ . Комбинации этих зарядов образуют все известное вещество Вселенной. Однако теории струн допускает существование мод резонансных колебаний, которым соответствуют частицы с существованием иным электрическим зарядом. Например, электрический заряд частиц может принимать ряд экзотических дробных значений, таких как  $1/5$ ,  $1/11$ ,  $1/13$  или  $1/3$ . Эти необычные заряды могут возникать в том случае, когда

свернутые измерения обладают определенным геометрическим свойством — наличием таких отверстий, что намотанные вокруг них струны могут распутаться, только сделав определенное число витков<sup>18)</sup>. Детали этого явления не столь важны, заметим только, что число оборотов, которое должна сделать струна, чтобы распутаться, появляется в допустимых модах колебаний в знаменателе дробного значения электрического заряда.

Одни многообразия Калаби—Яу обладают этим геометрическим свойством, другие — нет, поэтому возможность дробных электрических зарядов не является такой фундаментальной, как существование частиц-суперпартнеров. С другой стороны, в это время как предсказание суперпартнеров не является эксклюзивной особенностью теории струн, десятилетия экспериментальных исследований не дали никакого повода ожидать, что столь экзотические электрические заряды могут существовать в какой-либо теории, основанной на точечной модели частиц. Конечно, их можно ввести в такие теории принудительно, но они там будут выглядеть так же уместно, как слон в посудной лавке. Возможность их объяснения из простых геометрических свойств, которые могут иметь дополнительные измерения, делает эти необычные электрические заряды естественными экспериментальным признаком теории струн.

Как и в случае с суперпартнерами, частиц с таким экзотическим электрическим зарядом пока никому не удалось наблюдать, а современный уровень развития теории струн не позволяет сделать определенные выводы о массе, которую могут иметь эти частицы, если в силу свойств дополнительных измерений они действительно существуют. Объяснение того, что они до сих пор не открыты, опять же состоит в том, что если они существуют, их массы находятся за пределами современных технических возможностей обнаружения. Весьма вероятно, что они степ обнаружены. Если буди близки к планковской массе. Но если буди эксперименты смогут обнаружить такие экзотические электрические заряды, это будет очень сильное свидетельство в пользу теории струн.

## Некоторые более отдаленные перспективы

Существуют и другие способы, которыми могут быть получены свидетельства истинности теории струн. Например, Виттен указал на то, что в один прекрасный день астрономы могут обнаружить в данных, которые они собирают, наблюдая за Вселенной, прямое свидетельство, оставленное теорией струн. Как указывалось в главе 6, обычно размер струн близок к планковской длине, однако струны, несущие большую энергию, могут вырасти до гораздо больших размеров. Энергия Большого взрыва могла быть достаточно высокой для образования небольшого числа крупных, макроскопических струн, которые в ходе расширения Вселенной могли вырасти до астрономических масштабов. Можно ожидать, что в наше время или когда-нибудь в будущем подобная струна пройдет по ночному небосводу, оказав несомненное и наблюдаемое влияние, которое будет зарегистрировано астрономами (например, небольшое смещение в температуре реликтового космического излучения, см. главу 14). Как однажды сказал Виттен: «Хотя это выглядит фантастично, но я бы предпочел именно такой сценарий подтверждения истинности теории струн — нельзя вообразить более волнующего способа решения вопроса, чем увидеть струну в телескоп»<sup>19</sup>.

Был предложен ряд других экспериментальных проверок теории струн на более близких к Земле расстояниях. Вот пять примеров. Во-первых, в табл. 1.1 мы отметили, что неизвестно, являются ли нейтрино очень легкими, или их масса в точности равна нулю. Согласно стандартной модели они являются безмассовыми, но это утверждение не имеет какого-либо глубокого обоснования. Теория струн могла бы принять этот вызов и дать истолкование известным фактам, касающимся нейтрино, и данным, которые могут быть получены в будущем. Особенно интересным было бы, если эксперименты, в конечном счете, показали, что нейтрино имеет небольшую, но ненулевую

массу<sup>20</sup>). Во-вторых, имеются некоторые гипотетические процессы, которые запрещены стандартной моделью, но которые допустимы теорией струн. Среди них возможный распад протона (не переживайте по этому поводу, если это и происходит, то очень медленно), а также возможные превращения и распады некоторых комбинаций кварков, которые нарушают некоторые давно установленные свойства квантовой теории поля, основанной на точечной модели частиц<sup>20</sup>. Эти процессы особенно интересны тем, что их отсутствие в классической теории делает их индикаторами физических явлений, которые не могут быть учтены без использования новых теоретических принципов. Любый из этих процессов, если его удастся наблюдать, даст благодатную почву для объяснения с помощью теории струн. В-третьих, для некоторых пространств Калаби—Яу существуют моды резонансных колебаний, соответствующие новым взаимодействиям, поля которых отличаются небольшой интенсивностью и большим дальним действием. Если будут обнаружены признаки существования этих новых взаимодействий, они могут быть истолкованы как отражение новых физических явлений, как предсказываемых теорией струн. В-четвертых, как будет показано в следующей главе, астрономы собрали достаточно свидетельств в пользу того, что наша галактика и, возможно, вся Вселенная в целом, погружены в океан *темного вещества*, природу которого еще предстоит установить. Имея много возможных мод резонансных колебаний, теория струн предлагает ряд кандидатов на роль темного вещества; а для вынесения окончательного вердикта необходимо дождаться результатов будущих экспериментальных исследований, которые должны детально определить характеристики темного вещества.

И, наконец, пятый возможный способ связать теорию струн с экспериментальными данными включает космологическую постоянную. Мы обсуждали ее в главе 3: она представляет собой дополнительный член, который был временно добавлен Эйнштейном

<sup>19</sup> В 2002 г. экспериментально установлено, что нейтрино обладает (очень малой) массой. — *Прим. ред.*

к его первоначальным уравнениям общей теории относительности, чтобы обеспечить стационарность Вселенной. Хотя в дальнейшем открытие расширения Вселенной побудило Эйнштейна вернуть уравнениям их первоначальный вид, за прошедшее с тех пор время физики осознали, что не существует объяснения, *почему* космологическая постоянная должна быть равна нулю. В действительности, космологическая постоянная может интерпретироваться как суммарная энергия, содержащаяся в пустоте космического пространства, поэтому ее значение может быть рассчитано теоретически и измерено экспериментально. Однако расчеты и измерения, выполненные до сегодняшнего дня, демонстрируют колоссальное расхождение. Наблюдения показывают, что космологическая постоянная либо равна нулю (как, в конечном счете, полагал Эйнштейн), либо очень мала. Расчеты указывают, что квантовые флуктуации в вакууме дают ненулевое значение космологической постоянной, которое на 120 порядков (единица со 120 нулями) больше, чем значение, допускаемое экспериментальными данными! Это бросает вызов теоретикам и дает им замечательную возможность подтвердить свою правоту. Смогут ли они, используя методы своей теории, устранить это расхождение и объяснить, почему космологическая постоянная равна нулю? Или, если экспериментальные данные, в конечном счете, покажут, что космологическая постоянная имеет небольшое, но ненулевое значение, сможет ли теория струн объяснить этот факт? Если ученые, работающие над теорией струн, смогут ответить на этот вызов (то они пока не сделали), это даст убедительные свидетельства в поддержку данной теории.

## Оценка ситуации

История физики содержит немало примеров идей, которые в момент своего появления казались совершенно не поддающимися проверке, но впоследствии получили полное экспериментальное подтверждение в результате разработки методов, появление которых трудно было предвидеть. Тремя примерами таких выдающихся идей, которые

в настоящее время общеприняты, но которые в момент своего появления казались скорее научно-фантастическими, чем научными, являются: идея о том, что вещество состоит из атомов; гипотеза Паули о существовании частиц-призраков — нейтрино и гипотеза о том, что небеса усеяны нейтронными звездами и черными дырами.

Мотивы, которые привели к созданию теории струн, были не менее стимулирующими, чем в случае любой из трех идей, упомянутых выше, — в действительности, теория струн приветствовалась как наиболее важное и восхитительное достижение со времен появления квантовой механики. Это сравнение особенно уместно, поскольку история квантовой механики учит нас, что революции в физике легко могут затянуться на многие десятилетия, которые должны пройти, прежде чем новая теория достигнет зрелости. Между тем, если сравнивать современными специалистами по теории струн с физиками, которые были заняты разработкой квантовой механики, то у последних было большое преимущество: даже в незаконченной формулировке квантовая механика имела непосредственный контакт с экспериментальными данными. Несмотря на это, потребовалось около 30 лет на разработку логической структуры квантовой механики и еще примерно 20 лет на ее объединение со специальной теорией относительности. Мы заняты объединением квантовой механики и общей теории относительности, что представляет собой гораздо более сложную задачу, к тому же взаимодействие с экспериментом здесь очень затруднено. В отличие от тех, кто работал над квантовой механикой, от тех, кто работает сегодня занимается разработкой теории струн, лишены яркого света природы, который дает детальные экспериментальные исследования и который направлял бы их шаг за шагом вперед.

Это означает, что наше поколение физиков и, возможно, несколько следующих займут свою жизнь исследованиями и разработками в области теории струн, не имея совершенно никакой обратной связи с экспериментом. Немалое число физиков, работающих по всему миру над энергичными исследованиями в области теории струн, знают, что

они идут на риск: усилия всей их жизни могут не принести окончательного подтверждения теории. Не вызывает сомнений, что прогресс в теоретических исследованиях будет оставаться значительным, но будет ли он достаточен для того, чтобы преодолеть существующие препятствия и сделать решающие, поддающиеся экспериментальной проверке предсказания? Помогут ли косвенные проверки, которые мы обсуждали выше, найти настоящее «дымящееся ружье» для теории струн? Эти вопросы очень важны для всех, кто занимается исследованиям в области теории струн, но дать на них ответ не может никто. Только время способно ответить на них. Чарующая простота теории струн, способ, которым она разрешает противоречие между гравитацией и квантовой механикой, ее способность объединить все компо-

ненты мироздания и потенциально неограниченная предсказательная мощь — все это рождает вдохновение, оправдывающее риск.

Эти высокие рассуждения постепенно находят все более основательное подкрепление благодаря способности теории струн открывать новые поразительные физические характеристики Вселенной, основанной на понятии струны, которые, в свою очередь, вскрывают тонкую и глубокую логику мироздания. Выражаясь языком, которым мы пользовались в этой главе, многие из этих характеристик являются общими принципами, которые станут фундаментальными свойствами построенной из струн Вселенной независимо от неизвестных сегодня деталей. Самые удивительные из них окажут глубокое влияние на наше постоянно развивающееся понимание пространства и времени.

## Часть IV

### ТЕОРИЯ СТРУН И СТРУКТУРА ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

#### Глава 10

#### Квантовая геометрия

Примерно за десятилетие Эйнштейн в одиночку сокрушил многовековые устои теории Ньютона, представив миру совершенно новую и значительно более глубокую теорию гравитации. И эксперты, и неспециалисты были покорены заворающим изяществом и фундаментальной новизной формулировки общей теории относительности Эйнштейна. Не следует, однако, забывать о благоприятных исторических обстоятельствах, в значительной мере способствовавших успеху исследований Эйнштейна. Главное из них состоит в том, что Эйнштейну были известны математические результаты, полученные в XIX в. Георгом Бернгардом Риманом. Эти результаты давали возможность описания искривленных пространств произвольной размерности в рамках строгого геометрического аппарата. В знаменитой интуитивной лекции 1854 г. в Геттингенском университете Риман перешел через Рубикон мышления в рамках плоского евклидова пространства и проложил дорогу к единообразному математическому описанию геометрии всех типов искривленных пространств. Именно пионерские идеи Римана позволили математикам дать количественное описание искривленных пространств, подобных тем, которые иллюстриро-

вались на рис. 3.4 и 3.6. Гениальность Эйнштейна состояла в осознании того, что эти математические идеи были идеально приспособлены для выражения его новых взглядов на гравитационное взаимодействие. Он смело заявил о том, что математические понятия римановой геометрии безупречно согласуются с физической гравитацией.

Но сейчас, почти век спустя после научного подвига Эйнштейна, теория струн дает нам квантово-механическое описание гравитации, требующее пересмотра общей теории относительности на длинах порядка планковской. А так как в основе общей теории относительности лежит понятие римановой геометрии, то и само это понятие должно быть модифицировано для соответствия новой физике, возникающей на малых расстояниях в теории струн. И если в общей теории относительности постулируется, что свойства искривленного пространства Вселенной описываются геометрией Римана, то в теории струн утверждается, что данный постулат справедлив лишь в случае, когда структура Вселенной рассматривается на достаточно больших масштабах. На длинах порядка планковской должна вступать в игру новая геометрия, согласующаяся с новой фи-