

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, подающиеся 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 покorenы завораживающим 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 инаугурационной 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 физикой гравитации.

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-

зкой теории струн. Эту новую геометрию называют *квантовой геометрией*.

В отличие от геометрии Римана, здесь нет точных геометрических рецептов, уже описанных в книгах по математике и пригодных для того, чтобы занимающиеся струнами физики могли взять их на вооружение и использовать в этой науке. Напротив, современные физики и математики погружены в исследования в теории струн, по крупицам собирая знания, которые лягут в основу новой области физики и математики. И хотя основная часть работы еще впереди, в ходе этих исследований уже было открыто много новых диктуемых теорией струн геометрических свойств пространства-времени, которые наверняка произвели бы впечатление и на самого Эйнштейна.

## Суть римановой геометрии

При прыжках на батуте его упругие волокна растягиваются под весом человеческого тела, и батут деформируется. Сильнее всего растяжение вблизи тела человека, а по мере приближения к краям батута растяжение менее заметно. Это наглядно видно, если на батут нанесено знакомое изображение (например, Мона Лиза). Если на батуте никто не стоит, изображение выглядит нормально, но если на батут встает человек, изображение искажается, в особенности непосредственно под человеком (см. рис. 10.1).



Рис. 10.1. Если на батуте с нанесенным изображением стоит человек, изображение сильнее всего искажается под весом тела человека

Этот пример иллюстрирует важнейший принцип описания искривленных поверхностей, принятый в математической формулировке Римана. На основе более ранних наблюдений Карла Фридриха Гаусса, Николая Лобачевского, Яноша Бойяи и других математиков, Риман показал, что детальный анализ *расстояний* между всеми точками на поверхности объекта или внутри него дает способ вычисления значения кривизны. Грубо говоря, чем больше (неоднородное) растяжение, тем сильнее отклонение от формулы для расстояний в плоском случае, и тем больше кривизна объекта. Например, батут сильнее всего растягивается под ногами человека, и поэтому расстояния между точками в этой области будут сильнее всего отличаться от расстояний в случае ненагруженного батута. Следовательно, кривизна батута здесь будет максимальной. Это интуитивно ясно из приведенного рисунка: именно в таких точках изображение на батуте искажено сильнее всего.

Эйнштейн использовал математические результаты Римана и дал им точную физическую интерпретацию. Как обсуждалось в главе 3, Эйнштейн показал, что гравитационное взаимодействие обусловлено кривизной пространства-времени. Рассмотрим эту интерпретацию более подробно. С математической точки зрения, кривизна пространства-времени, подобно кривизне батута, означает искажение расстояний между *точками*. С физической точки зрения, действие гравитационной силы на тело есть прямое следствие этого искажения расстояний. По мере того как размеры тел уменьшаются, физика и математика должны согласовываться все лучше и лучше, потому что абстрактное математическое понятие точки становится все ближе к физической реальности. Однако теория струн ограничивает точность, с которой геометрическая формулировка Римана может соответствовать физической природе гравитации, ибо накладывает ограничение на минимальный размер, который вы можете приписать физическому телу. Как только вы спускаетесь до размера струны, дальше дороги нет. В теории струн не существует традиционного понятия точечной частицы: в противном случае с помощью теории струн было бы

невозможно реализовать квантовую теорию гравитации. Это определенно свидетельствует о том, что риманова геометрия, в основе которой лежат вычисления расстояний между точками, на ультрамикроскопических масштабах модифицируется теорией струн.

Такое наблюдение несущественно для стандартных приложений общей теории относительности к изучению макросистем. Например, проводя исследования в области космологии, физики, не задумываясь, рассматривают огромные галактики в качестве точек, так как размер галактик пренебрежимо мал по сравнению с размером Вселенной. Этот грубый подход к формулировке римановой геометрии оказывается, тем не менее, исключительно точным — в области космологии успех общей теории относительности очевиден. Однако в ультрамикроскопической области в силу протяженных свойств струн риманова геометрия просто не является подходящим математическим формализмом. Как мы увидим ниже, она должна быть заменена квантовой геометрией теории струн, и эта замена приведет к возникновению поразительных и неожиданных новых эффектов.

## Космологическая сцена

Согласно космологической модели Большого взрыва вся Вселенная образовалась в результате необычайного космического взрыва, произошедшего около 15 миллиардов лет назад. Как впервые обнаружено Хабблом, даже сегодня продолжают разлетаться «осколки» этого взрыва, представляющие собой миллиарды галактик. Вселенная расширяется. Нам неизвестно, продолжится ли это расширение бесконечно, или в какой-то момент расширение замедлится, затем прекратится, сменится сжатием, и, наконец, вновь приведет к космическому взрыву. Астрономы и астрофизики пытаются изучить этот вопрос экспериментально, так как ответ зависит от величины, которую, в принципе, можно измерить, а именно от средней плотности материи во Вселенной.

Если средняя плотность материи превышает так называемую *критическую плотность*, равную примерно  $10^{-29}$  г/см<sup>3</sup> (около

5 атомов водорода на каждый кубический метр Вселенной), то Вселенная пропит всепроникающая гравитационная сила, которая остановит расширение и приведет к сжатию. Если средняя плотность материи меньше критической, то гравитационное притяжение будет слишком слабым, чтобы остановить расширение, и оно будет продолжаться вечно. (Основываясь на житейских наблюдениях, можно подумать, что средняя плотность Вселенной во много раз превышает критическое значение. Нужно, однако, иметь в виду, что материя, как и деньги, имеет тенденцию скапливаться в определенных местах. Использование средней плотности Земли, Солнечной системы или даже Млечного пути в качестве средней плотности Вселенной среди использования величины состояния Билла Гейтса для оценки среднего состояния простых смертных. Состояние большинства людей бледнеет по сравнению с состоянием Гейтса, и это приводит к значительному уменьшению среднего значения. Существование огромных и практически пустых пространств между галактиками ведет к колоссальному снижению средней плотности материи.)

Тщательно исследуя распределение галактик в пространстве, астрономы могут довольно точно предсказать среднюю плотность видимой материи во Вселенной. Она оказывается гораздо меньше критической, однако имеются серьезные основания полагать (как с теоретической, так и экспериментальной точки зрения), что Вселенная пронизана темной материей. Эта материя пронизана ядерном синтезе, происходящем в звездах, и поэтому не излучает свет. Следовательно, ее нельзя обнаружить с помощью телескопа. Никому еще не удавалось объяснить природу темной материи, не говоря о том, чтобы вычислить ее точное количество. А это означает, что будущее количество Вселенной, которая в настоящий момент расширяется, остается неизвестным.

Рассмотрим, например, что произойдет, если плотность материи превышает критическое значение, и однажды в далеком будущем Вселенная прекратится, после чего Вселенная начнет сжиматься. Все галактики сначала будут медленно приближаться друг к другу,



Аналогичные аргументы могли бы привести к заключению, что и ненамотанные струны имеют хоть и малую, но все же отличную от нуля массу. В определенном смысле это так, но квантово-механические поправки, рассмотренные в главе 6 (см. аналогия с телегрой *Верная цена*), могут в точности сократить этот массовый вклад. Напомним, что именно так и происходит, когда в спектре ненамотанной струны возникает фотон, гравитон, а также другие безмассовые частицы или частицы с очень малой массой. Намотанные струны в этом отношении отличаются от ненамотанных.)

Каким образом существование топологических конфигураций струн влияет на геометрические свойства измерения, вокруг которого наматывается струна? Ответ, который был дан в 1984 г. японскими физиками Кейджи Кикавой и Масами Ямаски, весьма примечателен и очень нетривиален.

Посмотрим, что происходит на последних катастрофических этапах Большого скачка вселенной Садового шланга. Когда радиус циклического измерения достигает планковской длины и, в духе общей теории относительности, продолжает стягиваться до меньших размеров, в этот момент, согласно теории струн, необходим радикальный пересмотр модели происходящего. В теории струн утверждается, что в случае, когда радиус циклического измерения становится меньше планковской длины и продолжает уменьшаться, все физические процессы во вселенной Садового шланга происходят идентично физическим процессам в случае, когда радиус циклического измерения больше планковской длины и увеличивается! Это означает, что когда радиус циклического измерения пытаются преодолеть рубеж планковской длины в сторону меньших размеров, эти попытки предотвращаются теорией струн, которая в этот момент меняет правила геометрии на противоположные. Теория струн говорит о том, что такую эволюцию можно переформулировать, т. е. переосмыслить, сказав, что когда циклическое измерение стягнется до планковской длины, затем оно начнет расширяться. Законы геометрии на малых расстояниях переписываются в теории струн таким образом, что то, что

ранее казалось полным космическим коллапсом, становится космическим *расширением*. Циклическое измерение может сжаться до планковской длины. Однако благодаря топологическим модам все попытки дальнейшего сжатия в действительности приводят к расширению. Рассмотрим, почему это происходит.

### Спектр состояний струны \*)

Возможность новых конфигураций намотанной струны означает, что у энергии струны во вселенной Садового шланга есть *два* источника: колебательное движение и намотка (топологический вклад). Согласно Калуде и Клейну, каждый тип энергии зависит от геометрии шланга, т. е. радиуса свернутой циклической компоненты, но эта зависимость имеет ярко выраженный «струнный» характер, так как точечные частицы не могут наматываться вокруг измерений. Поэтому попытаемся сначала определить точную зависимость топологических и колебательных вкладов в энергию струны от размера циклического измерения. Для этого удобно разделить колебательные движения струны на две категории: *однородные* и *обычные* колебания. Обычные колебания неоднородно рассматривались выше (например, колебания, иллюстрация которых приведена на рис. 6.2). Однородные колебания соответствуют еще более простому движению, а именно поступательному движению струны как целого, когда она скончалась из одного положения в другое без изменения формы. Все движения струны являются суперпозициями поступательных движений и осцилляций, т. е. суперпозициями однородных и обычных колебаний, однако сейчас нам удобнее рассматривать такое разделение движений струны. На самом деле обычные колебания играют второстепенную роль в наших рассуждениях, и поэтому их вклады будут учтены лишь после изложения сути наших доводов.

\*) Некоторые идеи этого и нескольких следующих разделов довольно нетривиальны, так что читателю не должно смущать то, что какие-то логические звенья в цепочке объяснений могут оказаться непонятными (особенно при первом чтении).

Отметим два существенных наблюдения. Во-первых, энергия однородных колебательных возбуждений струны *обратно* пропорциональна радиусу циклического измерения. Это является прямым следствием соотношения неопределенностей в квантовой механике. При меньших радиусах струна локализована в меньшем объеме, и поэтому энергия ее движения больше. Следовательно, при уменьшении радиуса циклического измерения энергия движения струны обязательно растет, что объясняет указанную обратно пропорциональную зависимость. Во-вторых, как выяснено в предыдущем разделе, топологические вклады в энергию *прямо* пропорциональны радиусу, а не обратно пропорциональны ему. Из этих двух наблюдений следует, что большие значения радиуса соответствуют большим значениям топологической энергии и малым значениям колебательной энергии, а малые значения радиуса соответствуют малым значениям топологической энергии и большим значениям колебательной энергии.

В итоге получается важнейший результат: всякому большому радиусу вселенной Садового шланга соответствует некий малый радиус, при котором топологические энергии струны, вычисленные для вселенной с большим радиусом, равны колебательным энергиям струны, вычисленным для вселенной с малым радиусом, а колебательные энергии струны, вычисленные для вселенной с малым радиусом, равны топологическим энергиям струны, вычисленным для вселенной с малым радиусом. Но поскольку физические свойства зависят лишь от *полной* энергии конфигурации струны, а не от того, как эта энергия распределена между колебательным и топологическим вкладом, *нет никакого физического различия* между этими геометрически различными состояниями вселенной Садового шланга. А поэтому, что может показаться достаточно странным, в теории струн нет никакой разницы между вселенной толстого Садового шланга и вселенной тонкого Садового шланга.

Все это можно назвать «космическим страхованием сделки», что, в определенной мере, аналогично действиям вкладчика небольшого капитала, столкнувшегося со сле-

дующей дилеммой. Предполагим, он узнал, что судьба акций одной компании (например, производщей тренажеры) неразрывно связана с судьбой акций другой компании (например, производящей сердечные клапаны для шунтирования). Допустим, что по завершении сегодняшних торгов акции каждой компании стоили по одному доллару, и из авторитетного источника известно, что если акции одной компании пойдут вверх, то акции другой компании упадут вниз, и наоборот. Кроме того, этот абсолютно надежный источник (деятельность которого, однако, может быть не очень-то законной) утверждает, что при завершении завтрашних торгов цены на акции этих двух компаний гарантированно будут обратно пропорциональны друг другу. Например, если одна акция будет стоить \$2, то другие —  $1/2$  (50 центов), а если одна будет стоить \$10, то другие —  $1/10$  (10 центов), и т. д. Однако какие именно акции пойдут вверх, а какие упадут в цене, источник сказать не может. Как поступить в такой ситуации?

Что же, вкладчик немедленно инвестирует все свои капиталы на биржевой рынок, распределяя их в равных долях между акциями двух компаний. Сделав несколько оценок, легко убедиться, что капитал не уменьшится вне зависимости от того, что произойдет на рынке завтра. В худшем случае капитал не изменится (если акции обеих компаний по завершении торгов будут стоить \$1), но любое изменение стоимости акций по своему изобилию энергии сможет привести к увеличению вклада. Например, если акции второй компании будут стоить \$4, а акции первой компании будут стоить  $1/4$  (25 центов), то их суммарная стоимость будет равна \$4,25 (за каждую пару акций) против \$2 накануне (за каждую пару акций) — зрелище чистой не торговли. Более того, с точки зрения чистой прибыли совершенно не важно, акции какой компании выросли в цене, а какой компании — упали. Если вкладчика волнуют только деньги, два различных исхода неразличимы в финансовом отношении.

Ситуация в теории струн аналогична в том смысле, что энергия струнных конфигураций есть сумма двух вкладов — колебательного и топологического, и эти вклады в полную энергию, вообще говоря, различ-

ны. Однако, как подробно обсуждается ниже, определенные пары разных геометрических состояний, соответствующие большой топологической/малой колебательной энергии и малой топологической/большой колебательной энергии, являются *физически* неразличимыми. И, в отличие от примера из области финансов, в котором при выборе между двумя видами акций могли бы играть роль соображения, отличные от соображений максимальной выгоды, здесь не существует совершенно никакого физического различия между двумя сценариями.

Как станет ясно далее, для более полной аналогии с теорией струн следует рассмотреть случай, когда начальное капиталовложение распределяется неравномерно между акциями двух компаний, например, покупается 1 000 акций первой компании и 3 000 акций второй компании. Теперь полная итоговая стоимость будет зависеть от того, какие акции упадут в цене, а какие вырастут. Например, если акции первой компании будут стоить \$10, а акции второй — 10 центов, то начальное капиталовложение \$4 000 вырастет до \$10 300. Если случится противоположное, т. е. акции первой компании будут стоить 10 центов, а акции второй — \$10, то капиталовложение вырастет до \$30 100, что значительно больше.

Однако обратная зависимость цен акций гарантирует следующую. Если другой вкладчик распределяет капиталовложения прямо противоположным образом, т. е. покупает 3 000 акций первой компании и 1 000 акций второй компании, то в результате он получит \$10 300 в случае роста акций второй компании (ту же сумму, которую получит первый вкладчик в случае роста акций первой компании) и \$30 100 в случае роста акций первой компании (снова ту же сумму, которую получит первый вкладчик в противном случае). Таким образом, с точки зрения полной стоимости акции обмен типов подвизавшихся и упавших в цене акций в точности компенсируется обменом числа акций каждой из двух компаний.

Привяк к сведению последнее наблюдение, снова обратимся к теории струн и рассмотрим возможные энергии струн на конкретном примере. Предположим, что радиус

циклического измерения вселенной Салового шланга в 10 раз больше планковской длины. Запишем это в виде формулы  $R = 10$ . Струна может быть намотана вокруг этого измерения один раз, два раза, три раза и т. д. Число оборотов струны вокруг циклического измерения называют *топологическим числом*<sup>4)</sup> струны. Энергия, обусловленная намоткой струны, определяется длиной намотанной струны и пропорциональна *произведению* радиуса на топологическое число. Кроме того, любая струна способна совершать колебательные движения. Интересующие нас сейчас энергии однородных колебаний обратно пропорциональны радиусу, т. е. пропорциональны произведению целочисленных множителей на *обратный* радиус  $1/R$ , равный, в данном случае, одной десятой планковской длины. Мы будем называть эти целочисленные множители *колебательными числами*<sup>2)</sup>.

Видно, что ситуация очень напоминает ситуацию на фондовой бирже. При этом топологические и колебательные числа являются непосредственными аналогами количеств купленных акций двух компаний, а  $R$  и  $1/R$  играют роль цен на акции каждой компании по завершении торгов. Вычислить полную энергию струны, зная колебательное число, топологическое число и радиус, так же просто, как вычислить стоимость капиталовложения, исходя из количества акций каждой компании и стоимости акций после завершения торгов. В табл. 10.1 приведен ряд результатов для полных энергий различных конфигураций струн в случае вселенной Салового шланга радиуса  $R = 10$ .

Полная таблица была бы бесконечно длинной, так как топологические и колебательные числа могут принимать произвольные целые значения, однако представленный фрагмент таблицы достаточен для обсуждения. Из таблицы видно, что она соответствует ситуации больших топологичес-

<sup>4)</sup> Английский термин *winding number* переводят по-разному: «число намоток», «индекс намотки», «топологический индекс», «топологическое число» и т. д. Мы будем переводить его как «топологическое число», подчеркивая связь с различными конфигурациями струн, которые нельзя получить одну из другой путем непрерывной деформации. — *Прим. перев.*

Таблица 10.1

Выборочные колебательные и топологические конфигурации струны, движущейся во Вселенной с радиусом  $R = 10$  (рис. 10.3). Колебательные вклады в энергию кратны  $1/10$ , а топологические вклады кратны 10. В результате получаются перечисленные значения полной энергии. Единичей измерения энергии является планковская энергия, т. е., например, 10,1 в правом столбце соответствует значению 10,1, умноженному на планковскую энергию

Колебательное число	Топологическое число	Полная энергия
1	1	$1/10 + 10 = 10,1$
1	2	$1/10 + 20 = 20,1$
1	3	$1/10 + 30 = 30,1$
1	4	$1/10 + 40 = 40,1$
2	1	$2/10 + 10 = 10,2$
2	2	$2/10 + 20 = 20,2$
2	3	$2/10 + 30 = 30,2$
2	4	$2/10 + 40 = 40,2$
3	1	$3/10 + 10 = 10,3$
3	2	$3/10 + 20 = 20,3$
3	3	$3/10 + 30 = 30,3$
3	4	$3/10 + 40 = 40,3$
4	1	$4/10 + 10 = 10,4$
4	2	$4/10 + 20 = 20,4$
4	3	$4/10 + 30 = 30,4$
4	4	$4/10 + 40 = 40,4$

ких вкладов и малых колебательных вкладов: топологические вклады кратны 10, а колебательные вклады кратны  $1/10$ .

Предположим теперь, что радиус циклического измерения сужается, скажем, с 10 до 9,2, затем до 7,1 и далее до 3,4, 2,2, 1,1, 0,7 и т. д. до 0,1 ( $1/10$ ), где, в нашем примере, процесс сужения прекращается. Для такой геометрической иной формы вселенной Салового шланга можно построить аналогичную таблицу энергий струн. В ней топологические вклады кратны  $1/10$ , а колебательные вклады кратны обратному значению, т. е. 10. Результаты сведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Аналогична табл. 10.1, но значение радиуса выбрано равным  $1/10$

Колебательное число	Топологическое число	Полная энергия
1	1	$10 + 1/10 = 10,1$
1	2	$10 + 2/10 = 10,2$
1	3	$10 + 3/10 = 10,3$
1	4	$10 + 4/10 = 10,4$
2	1	$20 + 1/10 = 20,1$
2	2	$20 + 2/10 = 20,2$
2	3	$20 + 3/10 = 20,3$
2	4	$20 + 4/10 = 20,4$
3	1	$30 + 1/10 = 30,1$
3	2	$30 + 2/10 = 30,2$
3	3	$30 + 3/10 = 30,3$
3	4	$30 + 4/10 = 30,4$
4	1	$40 + 1/10 = 40,1$
4	2	$40 + 2/10 = 40,2$
4	3	$40 + 3/10 = 40,3$
4	4	$40 + 4/10 = 40,4$

На первый взгляд может показаться, что таблицы совершенно различны. Но при более пристальном рассмотрении видно, что в столбцы полной энергии в обеих таблицах входят *одинаковые* элементы, хотя они и расположены в разном порядке. Чтобы и расположенные в разном порядке найти элемент табл. 10.2, соответствующий данному элементу табл. 10.1, нужно просто поменять местами топологическое и колебательное число. Иными словами, колебательные и топологические вклады взаимно дожны и топологические вклады взаимно дожны друг друга при изменении радиуса циклического измерения с 10 до  $1/10$ . По сути различия между этими двумя размерами *нет различия* между этими двумя размерами циклического измерения. Как обмен типов акций в точности компенсировался обменом акций в точности компенсировался обменом числа акций каждой из двух компаний, так замена радиуса 10 на  $1/10$  в точности компенсируется заменой топологических и компенсируется заменой топологических и компенсируется

лебательных чисел. Кроме того, значения начального радиуса  $R = 10$  и его обратного значения  $1/10$  выбраны в данном примере лишь для простоты, и результат будет тем же для любого радиуса<sup>3)</sup>.

Табл. 10.1 и 10.2 не полны по двум причинам. Во-первых, как указано выше, здесь выбраны лишь некоторые из бесконечного набора колебательных и топологических чисел, возможных для струны. Это, разумеется, не является серьезной проблемой — мы могли бы строить таблицу до тех пор, пока не иссякнет терпение, и убедиться бы, что указанное свойство продолжает оставаться справедливым. Во-вторых, кроме топологического вклада в энергию мы до сих пор учитывали лишь однородные колебания струны. Сейчас необходимо учесть и обычные колебания, так как они дают дополнительный вклад в полную энергию струны и, кроме того, определяют переносимый струной заряд. Здесь важно отметить, что исследования свидетельствуют о независимости этих вкладов от радиуса. Поэтому, даже если эти вклады были бы включены в табл. 10.1 и 10.2, таблицы все равно точно соответствовали бы друг другу, так как обычные колебательные вклады учитывались бы в каждой таблице совершенно одинаковым образом. Следовательно, можно заключить, что массы и заряды частиц во вселенной Садового шланга радиусом  $R$  идентичны массам и зарядам частиц во вселенной Садового шланга радиусом  $1/R$ . А так как именно эти массы и заряды управляют фундаментальными физическими законами, нет никакого физического различия между двумя геометрически различными вселенными. Результаты любого эксперимента в одной вселенной и соответствующего эксперимента в другой вселенной будут в точности совпадать.

## Спор двух профессоров

После превращения в двумерные существа Джордж и Грейс стали профессорами физики во вселенной Садового шланга. Они основали конкурирующие лаборатории, сотрудничающие каждой из которых вскоре заявили о том,

что им удалось определить размер циклического измерения. На удивление, при всей безупречной репутации каждой лаборатории в области высокоточных исследований, результаты оказались разными. Джордж уверен в том, что радиус (в единицах планковской длины) равен  $R = 10$ , а Грейс утверждает, что значение радиуса равно  $R = 1/10$ .

«Грейс, — говорит Джордж, — мои вычисления по теории струн показывают, что если радиус циклического измерения равен 10, то энергии наблюдаемых мной струн должны соответствовать табл. 10.1. Я провел масштабные эксперименты на новом ускорителе с энергиями порядка планковской, и результаты в точности подтвердили это предположение. Следовательно, я совершенно определенно заявляю, что радиус циклического измерения равен  $R = 10$ ». В свою очередь, Грейс приводит в защиту своего результата в точности те же доводы, но ее вывод состоит в том, что зарегистрированы значения энергий из табл. 10.2, и радиус, таким образом, равен  $R = 1/10$ .

Озаренная проблемсом интуиции Грейс демонстрирует Джорджу, что несмотря на разное расположение элементов эти таблицы тождественны. Джордж, который, как всем известно, воображает несколько меленнее Грейс, отвечает: «Но как такое возможно? Я знаю, что, согласно принципам квантовой теории и свойствам намотанных струн, различные значения радиуса должны приводить к разным возможным значениям энергий и зарядов струн. И если эти значения согласуются, то и значения радиуса также должны находиться в согласии».

Грейс, во всеоружии своего нового понимания физики струн, отвечает: «То, что Вы говорите, почти, но не полностью правильно. Да, обычно верно, что для двух различных радиусов получаются различные допустимые энергии. Однако в частном случае, когда два значения радиуса обратно пропорциональны друг другу, например, как 10 и  $1/10$ , допустимые энергии и заряды на самом деле одинаковы. Судите сами: то, что Вы назвали бы колебательной модой, я назвала бы топологической модой. Но природе безразлично, на каком языке мы говорим. Физические явления обусловлены свойствами фундамен-

тальных составляющих — массами (энергиями) частиц и переносимыми ими зарядами. Не имеет значения, равен ли радиус  $R$  или  $1/R$ : полный список значений свойств фундаментальных составляющих теории струн один и тот же».

В минуту прозрения Джордж отвечает: «Мне кажется, я понимаю. Хотя мое и Ваше детальное описание струн — их намотка на циклическое измерение или особенности их колебательного поведения — могут отличаться, полный список их физических характеристик одинаков. А так как физические свойства Вселенной зависят от свойств фундаментальных составляющих, нет ни различия между радиусами, которые обратно пропорциональны друг другу, ни способа определить это различие». Именно так.

## Три вопроса

Здесь читатель может спросить: «Будь я существом, живущим на Вселенной Садового шланга, я просто измерил бы длину окружности шланга рулеткой и однозначно определил бы радиус — без всяких „но“ и „если“. Так к чему вся эта чепуха о невозможности отличить два разных радиуса? Кроме того, разве теория струн не распространялась с масштабами меньше планковской длины — задем же эти примеры циклических измерений с радиусами в доли планковской длины? И, с радиусами в доли планковской длины, эти радиусы должны увеличиваться при расширении Вселенной. Если теория струн верна, картина физически эквивалентная ситуации, в которой привычные нам измерения имеют необообразимо малый радиус порядка  $1/R = 10^{61} = 10^{-61}$  в единицах планковской длины! Это — хорошо нам знакомое из школьного курса — хорошо нам знакомое из школьного курса — хорошо нам знакомое из школьного курса — хорошо нам знакомое из школьного курса».

Начнем с третьего вопроса; ответ на него поставит нас лицом к лицу с двумя первыми. Хотя обсуждение касалось вселенной Садового шланга, ограничение одним протяженным и одним циклическим пространственными измерениями было выбрано лишь для простоты. Если бы мы рассматривали три протяженных пространственных измерения и шесть циклических измерений — простейшее из всех многообразий Каллоби-Яу, — результат был бы в точности тем же самым. У каждой окружности есть радиус, и если его заменить обратным радиусом, получится физически идентичная вселенная.

Этот вывод можно даже продвинуть на один гигантский шаг вперед. В нашей Вселенной наблюдаемые три пространственных измерения, каждое из которых, согласно астрономическим наблюдениям, имеет протяженность порядка 15 миллиардов световых лет (световой год равен примерно 9,46 триллионам километров, так что это расстояние равно примерно 142 миллиардам триллионов километров). Как отмечалось в главе 8, у нас нет данных о том, что происходит за этими пределами. Мы не знаем, уходят ли эти измерения в бесконечность или замыкаются сами на себя, образуя огромные окружности — все это может иметь место за пределами чувствительности современных телескопов. Если справедливо последнее предположение, то путешествующий все время в одном направлении астронавт в конце концов обойдет вокруг Вселенной, как Магеллан вокруг Земли, и прилетит назад в исходную точку.

Следовательно, хорошо знакомые протяженные измерения могут тоже иметь форму окружностей, и поэтому они попадают под действие принципа физической неразличимости пространств с радиусами  $R$  и  $1/R$  теории струн. Приведем несколько грубых оценок. Если привычные нам измерения являются циклическими, то их радиусы должны быть, как говорилось выше, около 15 миллиардов световых лет, т. е. примерно  $R = 10^{61}$  в единицах планковской длины, и эти радиусы должны увеличиваться при расширении Вселенной. Если теория струн верна, картина физически эквивалентная ситуации, в которой привычные нам измерения имеют необообразимо малый радиус порядка  $1/R = 10^{61} = 10^{-61}$  в единицах планковской длины! Это — хорошо нам знакомое из школьного курса — хорошо нам знакомое из школьного курса — хорошо нам знакомое из школьного курса — хорошо нам знакомое из школьного курса».

И, более того, здесь сам собой перед нами встает второй вопрос. Считалось, что теория струн налагает запрет на зондирование Вселенной на масштабах, меньших планковской длины. Но если радиус  $R$  больше планковской длины, то  $1/R$  с необходимостью меньше нее. Так что же происходит на самом деле? Ответ, который также затрагивает первый из трех поставленных вопросов, выдвигает на первый план важные и нетривиальные свойства пространства и расстояния.

## Два взаимосвязанных понятия расстояния в теории струн

В нашем понимании мира расстояние является настолько фундаментальным понятием, что очень легко недооценить всю его глубину и тонкость. Вспоминаая поразительные изменения, которые претерпели понятия о времени и пространстве после открытия специальной и общей теории относительности, в свете новых результатов теории струн мы должны быть несколько более точными даже при определении расстояния. Наиболее осмысленными определениями в физике являются те, которые конструктивны, т. е. дают (по крайней мере, в принципе) способ для измерения того, что определяется. В конце концов, не важно, насколько абстрактным является понятие, — если в нашем распоряжении есть конструктивное определение, всегда можно свести смысл этого понятия к экспериментальной процедуре его измерения.

Как же дать конструктивное определение понятия расстояния? В рамках теории струн ответ на этот вопрос довольно неожиданный. В 1988 г. физики Роберт Бранденбергер и Кумрун Вафа из Гарвардского университета показали, что если пространственная форма измерения является циклической, в теории струн есть два различных, но связанных друг с другом конструктивных определения расстояния. Для каждого определения своя экспериментальная процедура измерения расстояния, и каждое определение, грубо говоря, основано на простом принципе измерения времени, за которое движущийся с постоянной фиксированной

скоростью зонд проходит данный отрезок. Различия двух процедур состоит в выборе этого зонда. В первом случае используются струны, не *наматанные* вокруг циклического измерения, а во втором — струны, которые *наматаны* вокруг него. Свойство протяженности фундаментального зонда объясняет существование двух естественных конструктивных определений расстояния в теории струн. В теории точечных частиц, где намотка не имеет места, возможно лишь одно такое определение.

Чем отличаются результаты двух процедур? Ответ, который дали Бранденбергер и Вафа, столь же поразителен, сколь и нетривиален. Основную идею можно проиллюстрировать с помощью соотношения неопределенностей. Нематотанные струны могут свободно двигаться в пространстве, и с их помощью можно измерить полную длину окружности, пропорциональную  $R$ . Согласно соотношению неопределенностей их энергии пропорциональны  $1/R$  (помним отмеченную в главе 6 обратную пропорциональность энергии зонда расстояниям, которые он способен измерять). С другой стороны, мы видели, что минимальная энергия наматанных струн пропорциональна  $R$ . Поэтому, согласно соотношению неопределенностей, если такие струны используются в качестве зондов, то эти зонды чувствительны к расстояниям порядка  $1/R$ . Из математической реализации этой идеи следует, что если для измерения радиуса циклического измерения пространства используются оба зонда, с помощью нематотанных струн будет измерено значение  $R$ , а с помощью наматанных — значение  $1/R$ , где, как и выше, все результаты измерений расстояний выражены в единицах планковской длины. Есть равные основания считать результат каждого из измерений радиусом окружности: теория струн демонстрирует, что для разных зондов, которые используются для измерения расстояния, мы можем получить разные ответы. На самом деле это справедливо для всех измерений длин и расстояний, а не только для определения размера циклического измерения. Результаты, полученные с помощью нематотанных и наматанных струн-

ных зондов, будут обратно пропорциональны друг другу<sup>4</sup>).

Так почему же, если теория струн действительно описывает нашу Вселенную, мы до сих пор не сталкивались с различными понятиями расстояния в повседневной жизни или научных исследованиях? Всякий раз, говоря о расстояниях, мы опираемся на опыт, в котором есть место лишь для одного понятия расстояния и ни намека на другое понятие. Где мы упустили альтернативную возможность? Ответ в том, что при всей симметрии нашего подхода, для значений  $R$  (а, следовательно, и значений  $1/R$ ), сильно отличающихся от единицы (что опять означает единицу, умноженную на планковскую длину), одно из конструктивных определений крайне сложно реализовать экспериментально, в то время как второе реализуется весьма просто. По существу, мы всегда выбираем самый простой подход, не подозревая, что существует другая возможность.

Значительное различие в сложности реализации двух подходов обусловлено значительным различием масс используемых зондов, т. е. различием между высокоэнергетической топологической и низкоэнергетической колебательной модой (и наоборот), если радиус  $R$  (и  $1/R$ ) сильно отличается от планковской длины (когда  $R = 1$ ). При таких радиусах «высоким» энергиям соответствуют чрезвычайно большие массы зондов (в миллиарды миллиардов раз больше массы протона), а «низким» энергиям соответствуют исчезающе малые массы. Различие двух подходов при этом непропорционально велико, так как даже создать столь тяжелые струнные конфигурации в настоящее время технически невозможно. На практике можно реализовать лишь один из двух подходов, а именно тот, в котором используется более легкая струнная конфигурация. До сего момента именно на него неявно опирались все предыдущие рассуждения, связанные с понятием расстояния; именно он питает нашу интуицию, и, следовательно, хорошо с ней согласуется.

Игнорируя практическую сторону вопроса, можно сказать, что в описываемой теории струн Вселенной каждый вправе выбирать любой из двух подходов. Когда астро-

мы измеряют «размер Вселенной», они регистрируют фотоны, которые, путешествуя по Вселенной, волей случая попадают в их телескопы. Эти фотоны являются *легкими* струнными модами, и результат равен  $10^{61}$  планковских длин. Если три известных нам пространственных измерения действительно циклические, а теория струн верна, то астрономы, использующие совершенно другое (в данный момент не существующее) оборудование, в принципе могли бы измерять небеса тяжелыми модами *наматанных* струн. Они получили бы ответ, обратный этому огромному расстоянию. Именно в таком смысле можно считать, что Вселенная либо громадна (как мы обычно и считаем), либо крайне мала. Согласно информации, которую дают легкие моды струны, Вселенная громадна и расширяется, а согласно информации тяжелых мод — крайне мала и сжимается. В этом нет противоречия: просто используются два различных, но одинаково осмысленных определения расстояния. Из-за технических ограничений для нас гораздо привычнее первое определение, но и второе определение столь же законно.

Сейчас можно ответить на вопрос о двухметровых людях в крошечной вселенной. Когда мы измеряем человеческий рост, мы пользуемся легкими модами струны. Чтобы сравнить этот рост с размером Вселенной, измерения размера Вселенной нужно использовать ту же процедуру, что даст 15 миллиардов световых лет — значительно больше, чем два метра. Спрашивать же, как двухметровый человек поместится в «крошечную» Вселенную, так же бессмысленно, как спрашивать божий дар за яничийши. Если есть понятия расстояния — на основе легких и на основе тяжелых мод, — то нужно сравнивать результаты измерений, сделанных одним и тем же способом.

## Минимальный размер

Предыдущее обсуждение было лишь разминкой; теперь мы перейдем к главному. Если все время измерять расстояния «простым способом», т. е. использовать самые

легкие моды струны вместо самых тяжелых, полученные результаты *всегда* будут больше планковской длины. Чтобы это понять, посмотрим, что будет происходить при гипотетическом Большом сжатии всех трех пространственных измерений в предположении, что они являются циклическими. Для определенности примем, что в начале мысленного эксперимента легкими являются моды ненамотанных струн и измерения с их помощью показывают, что радиус Вселенной огромен, а Вселенная сжимается. По мере сжатия эти моды будут становиться тяжелее, а топологические моды легче. Когда радиус уменьшится до планковской длины, т. е.  $R$  станет равным 1, массы топологических и колебательных мод станут сравними. Два подхода к измерению расстояния окажутся одинаково сложными для осуществления, и, кроме того, оба они приведут к одинаковому результату, так как единица обратна самой себе.

По мере того как радиус будет продолжать уменьшаться, топологические моды станут легче, и, поскольку мы всегда выбираем «простой способ», именно они будут теперь использоваться для измерения расстояний. Так как этот метод измерения дает значения, *обратные* значениям в случае колебательных мод, радиус будет больше планковской длины, и этот радиус будет *возрастать*. Это простое следствие того, что при стягивании  $R$  (измеряемого с помощью ненамотанных струн) до 1 и дальнейшем сжатии, величина  $1/R$  (измеряемая с помощью намотанных струн) будет увеличиваться до 1 и продолжать расти. Следовательно, если всегда следить за тем, чтобы для измерений использовались легкие моды струны, т. е. чтобы всегда использовался «простой способ» измерения расстояний, то минимальным зарегистрированным значением будет планковская длина.

В частности, здесь удастся избежать Большого сжатия до нулевого размера: радиус Вселенной, измеряемый с помощью легких мод струн-зондов, всегда больше планковской длины. Вместо того чтобы переходить через значение планковской длины в сторону меньших размеров, радиус, измеряемый с помощью самых легких мод,

уменьшается до планковской длины и тут же начинает расти. Сжатие заменяется расширением.

Использование легких мод струны согласуется с традиционным понятием длины, которое существовало задолго до открытия теории струн. Именно *это* понятие расстояния ответственно, как обсуждалось в главе 5, за возникновение неразрешимых проблем с бурными квантовыми флуктуациями в случае, если масштабы, меньшие планковских, считаются физически значимыми. Здесь еще с одной точки зрения видно, что с помощью теории струн можно избежать ультрамикроскопических расстояний. В физической формулировке общей теории относительности и в соответствующей математической формулировке римановой геометрии есть только одно понятие расстояния, и оно может быть сколь угодно малым. В физической формулировке теории струн и в разрабатываемой для нее области математики — квантовой геометрии — есть два понятия расстояния. Их осмысленное использование дает понятие расстояния, которое согласуется как с нашей интуицией, так и с общей теорией относительности, если масштабы достаточно велики, но радикально отличается от последних, если эти масштабы становятся малыми. Одно из отличий состоит в том, что расстояния, меньшие планковской длины, недоступаеы.

Приведенные утверждения достаточно сложны, поэтому еще раз подчеркнем один из главных моментов. Если мы принципиально будем игнорировать различие между «простыми» и «трудными» подходами к измерению длины и будем, например, продолжать использовать моды ненамотанной струны при стягивании  $R$  за планковскую длину, то, казалось бы, мы действительно сможем измерить расстояния, меньшие планковской длины. Однако, как говорилось выше, слово «расстояния» в предыдущем предложении должно быть аккуратно определено, так как у этого слова два различных значения, и только одно из них соответствует нашему традиционному пониманию. А в данном случае, когда  $R$  становится меньше планковской длины, но мы продолжаем использовать ненамотанные струны (несмотря на то,

что они теперь тяжелее намотанных), мы используем «трудный» подход к измерению расстояний, и смысл понятия «расстояние» не соответствует общепотребительному значению этого слова. Эти рассуждения, однако, далеко выходят за рамки семантики или даже за рамки обсуждения удобства или практической применимости измерения. Даже если мы выберем нестандартное понятие расстояния, считая радиус меньшим, чем планковская длина, *законы физики*, как обсуждалось в предыдущих пунктах, будут идентичны законам физики во Вселенной, где этот радиус (в обычном понимании расстояния) будет больше планковской длины (об этом, например, свидетельствует точное соответствие табл. 10.1 и 10.2). А для нас важна именно физика, а не терминология.

На основе этих идей Бранденбергер, Вафа и другие физики предложили переписать законы космологии таким образом, чтобы в моделях Большого взрыва или возможного Большого сжатия фигурировала не Вселенная нулевого размера, а Вселенная, все размеры которой равны планковской длине. Безусловно, это весьма интересное предложение для устранения математических, физических и логических нестыковок в описании Вселенной, рождающейся из точки с бесконечной плотностью и схлопывающейся в эту точку. Конечно, сложно вообразить себе Вселенную, сжатую до крошечной песчинки планковского размера, но вообразить себе Вселенную, сжатую до нулевого размера — вот это уж действительно слышноразмерно — вот это уж действительно слышноразмерно — вот это уж действительно слышноразмерно. Вероятно, что более удобоваримую альтернативу стандартной модели Большого взрыва даст находящаяся сейчас в зачаточном состоянии струнная космология, которую мы обсудим в главе 14.

## Насколько общий этот вывод?

Что произойдет, если пространственные измерения не являются циклическими? Будем ли и в этом случае справедливы замечательные утверждения теории струн о минимальных пространственных размерах? Никто не знает точного ответа. Важнейшее свойство циклических измерений состоит в том, что

на них можно наматывать струны. Коль скоро на пространственные измерения можно наматывать струны, большинство выводов будут оставаться справедливыми вне зависимости от точного вида этих измерений. Но что будет, если, скажем, два измерения имеют вид сферы? Тогда нельзя заставить струны сохранять намотанную конфигурацию: они всегда могут «соскользнуть» подобно тому, как резинка может соскользнуть с мяча, на который она натянута. Накладывает ли теория струн ограничение на минимальный размер и в этом случае?

Судя по результатам многочисленных исследований, ответ зависит от того, сжимаются ли все пространственные измерения (как в примерах этой главы), или (с чем мы столкнемся в главах 11 и 13) коллапсирует отдельный «кусочек» пространства. Как считает большинство теоретиков, независимо от вида пространства *существует* минимальный предел сжатия всего пространственного измерения, и механизм возникновения этого предела во многом схож с механизмом этого цикла циклических измерений. Обоснование существования предела является важной задачей дальнейших исследований ввиду ее неядерного влияния на многие аспекты теории струн, включая следствия для космологии.

## Зеркальная симметрия

Создав общую теорию относительности, Эйнштейн связал физику тяготения с геометрией пространства-времени. На первый взгляд, теория струн укрепляет и расширяет связь между физикой и геометрией: свойства колеблющихся струн (например, массы и переносимые ими заряды) в значительной степени определяются свойствами свернутой компоненты пространства. Однако, как той теории струн, квантовая геометрия, мы только что видели, квантовая геометрия, связывающая геометрические и физические свойства теории струн, обладает рядом удивительных свойств. В общей теории относительности, как и в «традиционной» геометрии, окружность радиуса  $R$  отличается от окружности радиуса  $1/R$ , что кажется неочевидным и очевидным, а в теории струн эти







ками и физиками, но причина расхождения результатов так и не была установлена.

Примерно месяц спустя участники семинара в Беркли получили по электронной почте письмо, озаглавленное «Физика победила!». Эдлингеруд и Штремме нашли ошибку в своей компьютерной программе, и после ее исправления результат совпал с результатом группы Канделаса. С тех пор было проведено немало количественных проверок надежности расчетов в теории струн с помощью зеркальной симметрии. Теория струн с триумфом прошла все проверки. Еще позже, почти через десять лет после открытия физиками зеркальной симметрии, математики добились значительных успехов в выявлении математических принципов, лежащих в основе этой симметрии. Используя фундаментальные результаты математиков Максима Концевича, Юрия Манина, Ганга Тиана, Джуна Ли и Александра Гивенталья, Ю и его

коллеги Бонг Лиан и Кефенг Лиу нашли, в конце концов, строгое математическое доказательство для обоснования формул, используемых для подсчета числа сфер внутри пространств Калаби—Яу, разрешив проблемы, которые сотни лет оставались камнем преткновения для математиков.

Эти исследования не просто оказались успешными для конкретного случая, но и выявили ту роль, которую физика начала играть в современной математике. Довольно долгое время физики рылись в архивах математических журналов в поисках средств для построения и анализа моделей физического мира. Сейчас, с открытием теории струн, физика начинает выплывать свой долг и снабжать математиков новыми мощными подходами к неразрешенным проблемам. Теория струн не только предлагает единое описание физического мира, но и помогает установить глубокий и прочный союз с математикой.

## Глава 11

### Разрывая ткань пространства

Если непрерывно растягивать резиновую пленку, рано или поздно она порвется. Этот простой факт заставлял физиков годами обращаться к вопросу, возможно ли подобное по отношению к ткани пространства, создающего Вселенную. Может ли эта ткань разорваться, или такое входящее в заблуждение представление есть результат слишком буквального понимания аналогии с резиновой пленкой?

Общая теория относительности Эйнштейна отвечает на вопрос о возможном разрыве структуры пространства отрицательно<sup>1)</sup>. Уравнения общей теории относительности основаны на римановой геометрии, которая, как отмечалось в предыдущей главе, позволяет проанализировать искажения свойств расстояний между соседними точками пространства. Чтобы формулы для расстояний были осмысленными, в математическом формализме требуется «гладкость» самого пространства. Понятие «гладкости» имеет конкретный математический смысл, но общеупотребительное значение слова «гладкость» хорошо передает суть этого понятия: гладкий — значит без складок, без проколов, без отдельных «нагроможденных» друг на друга кусков, без разрывов. Если бы в структуре пространства существовали такие нерегулярности, уравнения общей теории относительности нарушались бы, оповещая о космической катастрофе того или иного рода: зловещая переплетка, которую наша Вселенная благоразумно избегает.

Впрочем, эта зловещая перспектива не отпугивала склонных фантазировать теоретиков, которые годами исследовали возможность квантово-механического обобщения классической теории Эйнштейна, допускающего существование проколов, разрывов и сляканий ткани пространства. Тот факт,

что по законам квантовой физики на малых расстояниях происходят неустойчивые флуктуации, позволяя предположить, что проколы и разрывы могут быть обычными явлениями в микроскопической структуре пространства. Понятие пространственно-временных *червоточин*<sup>4)</sup> (хорошо знакомое поклонникам фантастического сериала «Звездный путь») опирается на подобные предположения. Идея проста. Представим себе крупную корпорацию, управление которой находится на девяностом этаже одного из небоскребов. Исторически сложилось так, что отделение корпорации, с которым сотрудникам этого управления в последнее время все чаще приходится связываться, находится на девяностом этаже соседнего небоскреба. Так как переносить один из офисов в другое здание нецелесообразно, разумным решением было бы строительство моста, соединяющего две башни. Тогда сотрудники получили бы возможность переходить из офиса в офис, не спускаясь вниз и поднимаясь вверх на девяносто этажей.

Пространственно-временная червоточина играет схожую роль. Это мост или туннель, служащий укороченным маршрутом из одной области вселенной в другую. Пример червоточины в двумерной вселенной показан на рис. 11.1. Если управление «двумерной» корпорации находится вблизи нижней окружности рис. 11.1а, то в ее отделение окружности рис. 11.1а, то в ее отделение окружности можно попасть, лишь на верхней окружности можно попасть, лишь в другой. Но если ткань пространства может рваться с образованием проколов, изожет рваться с образованием проколов, изожет рваться на рис. 11.1б; если эти проколы браженных на рис. 11.1б; если эти проколы браженных на рис. 11.1б; если эти проколы браженных на рис. 11.1б, могут «срастись» краями, как на рис. 11.1в,

<sup>4)</sup> В русскоязычной литературе более распространенным является термин «кратовые норы». — Прим. ред.

то две ранее отдаленные области соединятся пространственным мостом. Это и есть червоточина. Нужно отметить, что хотя червоточина и мост между небоскребами имеют некоторое сходство, между ними есть и существенное различие. Мост между небоскребами пролетает по *существующему* пространству, т. е. по пространству между небоскребами. Червоточина, в отличие от этого, образует *новое* пространство, ибо изображенная на рис. 11.1 а двумерная искривленная поверхность — это *все*, что имелось. Область вне поверхности лишь артефакт неадекватной картинки, которая не может изобразить U-образную вселенную иначе как погруженной в наш трехмерный мир. Червоточина создает новое пространство и потому прокладывает новую пространственную территорию.

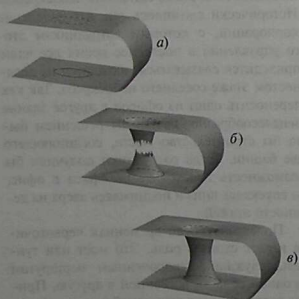


Рис. 11.1. а) «U-образная» вселенная, в которой достичь одного конца с другого можно лишь после длительного космического путешествия. б) Ткань пространства рвется, и два конца червоточины начинают вытягиваться. в) Два конца червоточины соединяются, образуя новый мост — «срезыя путь» между двумя концами вселенной

Существуют ли червоточины во Вселенной? Этого не знает никто. И если они действительно существуют, неясно, могут ли они быть только микроскопической формы, или перекрывать обширные области про-

странства, как в фантастических фильмах. Существование червоточин в реальном мире во многом определяется тем, возможен ли разрыв структуры пространства.

Другой яркий пример того, как ткань пространства может растягиваться до предела, дают черные дыры. На примере рис. 3.7 мы видели, что сильнейшее гравитационное поле черной дыры приводит к настолько сильной искривленности пространства, что оно *выглядит* проколотым в центре черной дыры. В отличие от червоточин, есть веские экспериментальные свидетельства в пользу существования черных дыр, и вопрос о том, что происходит в центре дыры, приобретает конкретный научный характер. В экстремальных условиях внутри черной дыры уравнения общей теории относительности становятся неприменимыми. По мнению некоторых физиков, в центре черной дыры действительно имеется прокол, но мы ограждены от этой космической «сингулярности» горизонтом событий, не позволяющим даже свету вырваться из гравитационной ловушки. Такие соображения привели Роджера Пенроуза из Оксфордского университета к «гипотезе космической цензуры», согласно которой подобные пространственные особенности возможны лишь в местах, тщательно скрытых от наших глаз пеленой горизонта событий. С другой стороны, до открытия теории струн некоторые физики считали, что корректное объединение квантовой теории и общей теории относительности «залатает» бросающиеся в глаза бреши в ткани пространства, склавив его квантовыми поправками.

С открытием теории струн, органично связывающей квантовую теорию с гравитацией, появилась твердая почва для исследования этих вопросов. На сегодняшний день они окончательно не решены, но в последние годы *были* решены тесно связанные с ними вопросы. В этой главе мы покажем, что в теории струн впервые явно демонстрируется возможность разрыва ткани пространства при определенных физических явлениях (в некоторых отношениях отличных от явлений пространственных червоточин и черных дыр).

## Волнующая возможность

В 1987 г. Шин-Тун Ю и его студент Ганг Тиан, работающий сейчас в Массачусетском технологическом институте, сделали интересное математическое наблюдение. Используя хорошо известный математический прием, они обнаружили, что один многообразия Калаби—Яу можно преобразовать в другое путем протыкания их поверхности и сшивания образовавшегося отверстия согласно строго определенной математической процедуре<sup>1)</sup>. Грубо говоря, они обнаружили, что внутри исходного пространства Калаби—Яу можно выделить двумерную сферу определенного вида (рис. 11.2). (Двумерная сфера аналогична поверхности надувного мяча, который, как и все знакомые нам объекты, трехмерен. Здесь, однако, мы говорим только о поверхности, не учитывая толщину материала, из которого сделан мяч, а также пространство внутри него. Точки на поверхности мяча определяются двумя числами, «широтой» и «долготой», аналогично тому, как определяются координаты на поверхности Земли. Вот почему *поверхность* мяча, как и поверхность упоминавшегося в предыду-

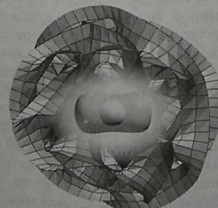


Рис. 11.2. В выделенной области внутри пространства Калаби—Яу находится сфера



Рис. 11.3. Сфера внутри пространства Калаби—Яу сжимается в точку, приводя к перетяжке в ткани пространства. На этом и следующих рисунках для простоты показана лишь часть всего пространства Калаби—Яу

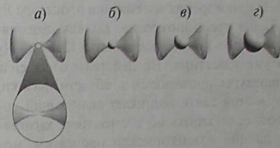


Рис. 11.4. При разрыве перетяжки пространства Калаби—Яу возникает сфера, которая сглаживает его поверхность. Исходная сфера рис. 11.3 оказывается «перестроенной»

щих главах Салового шланга, является двумерной.) Далее они рассмотрели стягивание сферы в одну точку; этот процесс показан на рис. 11.3. Как и все последующие рисунки этой главы, он упрощен с целью наглядности изображения наиболее важного «куска» пространства Калаби—Яу; но вы должны помнить, что такие преобразования происходят внутри несколько большего пространства Калаби—Яу, полобно изображенному на рис. 11.2. И, наконец, Тиан и Ю рассмотрели случай, когда в точке сжатия пространство Калаби—Яу слегка надрывается (рис. 11.4 а), раскрывается и перестраивается в другую шарообразную фигуру (рис. 11.4 б), которую затем снова можно раздут до нормального размера (рис. 11.4 в и 11.4 з).

Математики называют последовательность таких действий *флоп-перестройкой*<sup>2)</sup>. Все происходит так, как будто надувной мяч «выворачивается» наизнанку внутри другого пространства Калаби—Яу. Тиан, Ю и другие математики показали, что при определенных условиях новое многообразие Калаби—Яу (см. рис. 11.4 з), будет *топологически* *отличным* от исходного (рис. 11.3 а). То есть, *личным* в привычном языке, но существующем никакого способа деформировать исходное пространство Калаби—Яу, показанное на рис. 11.3 а, в конечное пространство Калаби—Яу, показанное на рис. 11.4 з, не разрывая на некотором промежуточном этапе структуры пространства Калаби—Яу.

<sup>1)</sup> В оригинале *flip-transition*. Некоторые термины, используемые автором в этой и следующих главах, не являются общепринятыми (и/или еще не имеют русского эквивалента); мы поладили к обсуждению вопросов, касающихся последних достижений в физике и математике. — *Прим. перс.*

С точки зрения математики процедура Яу и Тяна очень интересна, так как позволяет получить новые пространства Калаби—Яу из уже известных. Но действительная сила процедуры проявляется в области физики, где в этой связи возникает волнующий вопрос: если забыть об абстрактном характере данной математической процедуры, может ли в природе иметь место изображенная на рис. 11.3а — 11.4 последовательность превращений? Может ли происходить так, что вопреки предсказаниям теории Эйнштейна структура пространства способна *равняться и затем восстанавливаться* подобно тому, как описано выше?

## Зеркальная перспектива

На протяжении нескольких лет после 1987 г., когда Яу сделал свое наблюдение, он часто советовал мне поразмыслить о возможных физических приложениях флоп-перестроек. Я отнекивался. Мне казалось, что флоп-перестройки относятся только к абстрактной математике и не имеют никакого отношения к теории струн. Действительно, из главы 10, в которой было установлено существование минимального радиуса циклического измерения, можно сделать вывод, что в теории струн сфера на рис. 11.3 не может полностью стянуться к выколотой точке. Однако, как тоже отмечено в главе 10, если стягивается часть пространства (в данном случае — сферическая часть многообразия Калаби—Яу), а не все циклическое измерение, то аргументы, которые позволяют различать малые и большие радиусы, не применимы буквально. Тем не менее, возможность разрыва структуры пространства казалась маловероятной, даже при том, что запрещающие флоп-перестройку соображения не выдерживали серьезной критики.

Уже позже, в 1991 г., норвежский физик Энди Люткен и мой однокурсник по учебе в Окфорде, а ныне профессор университета Дьюка, Пол Аспинуолл, задались вопросом, который впоследствии оказался очень интересным. Если перестраивается пространственная структура компоненты Калаби—Яу нашей Вселенной, как это будет выглядеть

с точки зрения зеркального пространства Калаби—Яу? Чтобы понять, почему возник такой вопрос, нужно вспомнить, что физические свойства зеркальной пары пространств Калаби—Яу (если эти пространства используются в качестве дополнительных измерений) идентичны, но дополнены математических расчетов, необходимых для установления этих физических свойств, может сильно отличаться. Аспинуолл и Люткен предположили, что математически сложный переход между рис. 11.3 и 11.4 может описываться гораздо проще в терминах зеркальных пространств, и физический смысл этого перехода станет гораздо понятнее.

В момент проведения этих исследований еще не было достаточного понимания зеркальной симметрии, чтобы иметь возможность ответить на поставленный вопрос. И все же Аспинуолл и Люткен отметили, что в зеркальном описании нет ничего такого, что свидетельствовало бы об абсурдных физических последствиях разрывов пространства при флоп-перестройках. Примерно в то же время мы с Плессером, развивая найденную нами идею зеркальных пар многообразий Калаби—Яу (см. главу 10), не ожидали сами столкнуться с необходимостью анализа флоп-перестроек. Математика хорошо известен тот факт, что склеивание различных точек (подобное показанному на рис. 10.4), которое использовалось нами для построения зеркальных пар, приводит к геометрическим следствиям, идентичным перетягиванию и проколам на рис. 11.3 и 11.4. В соответствующей физической формулировке мы с Плессером, однако, не нашли явных противоречий. Более того, вдохновленные результатами Аспинуолла и Люткена (а также результатом их предыдущей совместной работы с Грэмом Россом), мы пришли к выводу, что математически перетягивание можно «отреставрировать» двумя различными способами. Один из них приводит к пространству Калаби—Яу, соответствующему рис. 11.3а, а другой — к пространству, соответствующему рис. 11.4г. Это показало нам, что переход от рис. 11.3а к рис. 11.4г действительно может иметь место в реальном мире.

Таким образом, к концу 1991 г. у некоторых физиков, занимающихся теорией струн, возникло ясное ощущение того, что ткань пространства *может* разрываться. Но ни у кого из них не было технических методов, которые позволили бы твердо установить или опровергнуть справедливость этой замечательной гипотезы.

## Медленный прогресс

В течение 1992 г. мы с Плессером время от времени возвращались к попыткам доказать, что структура пространства может подвергаться перестройкам с разрывами пространства. Наши расчеты частично подтверждали эту гипотезу в частных случаях, но строгого доказательства найти не удалось. Весной Плессер съездил с докладом в Принстонский институт перспективных исследований. Там он встретился с Виттеном и в частной беседе рассказал ему о наших попытках дать интерпретацию математической процедуры флоп-перестройки с разрывом пространства в рамках теории струн. После того, как Плессер изложил свои соображения, Виттен отвернулся от доски и некоторое время, возможно минуту или две, молча смотрел в окно своего кабинета. Затем он повернулся к Плессеру и сказал, что если наши идеи окажутся правильными, то «это будет впечатляюще». Такая реакция Виттена побудила нас работать с удвоенной энергией. Однако вскоре исследование застопорилось, и мы обратились к другим вопросам в теории струн.

Даже работая над другими задачами, я постоянно ловил себя на том, что возвращаюсь к мысли о возможности перестроек с разрывами пространства. Месяц от месяца во мне укреплялась уверенность, что они должны быть неотъемлемой частью теории струн. Из расчетов, сделанных ранее вместе с Плессером, а также из стимулирующих обсуждений с Дэвидом Моррисоном, математиком университета Дьюка, казалось, следовало, что возможность перестроек является естественным следствием зеркальной симметрии. Во время моего пребывания в Дьюке Моррисон и я, используя результаты гостившего в то же время в Дьюке Шелдона Ка-

па из Оклахомского университета, наметили стратегию обоснования появления флоп-перестроек в теории струн. Однако когда мы приступили к вычислениям, оказалось, что они крайне громоздки: даже с использованием самого быстрого в мире компьютера на расчеты ушла бы сотня лет. Мы провиделись вперед, но нам явно не хватало новой идеи, которая значительно повысила бы эффективность нашего вычислительного метода. Не подозревая об этом, Виктор Батьер, математик из университета города Эссен, дал нам такую идею в двух своих статьях, опубликованных весной и летом 1992 г.

Батьер очень интересовался зеркальной симметрией, особенно после успешного решения Канделасом и соавторами описанной в конце главы 10 задачи о подсчете числа сфер. Однако Батьер, будучи математиком, был сбит с толку приемами, которые мы с Плессером использовали для нахождения зеркальных пар пространств Калаби—Яу. Хотя в нашем подходе применялись известные теоретикам методы, Батьер позже признался мне, что наша статья произвела на него впечатление «черной магии». Это было следствием исторически сложившихся культурных различий между математикой и физикой, и по мере развития теории струн границ между наукой различия в языке, методах и стиле исследований становились все более явными. Физики были похожи на композиторов-авангардистов, стремящихся обойти устоявшиеся правила и расширить границы дозволенного при поиске решения задачи. Математики же больше похожи на классических композиторов, ше обычно скрывались рамками гораздо более жесткой схемы и с неохотой воспринимали переход к следующему шагу до тех пор, пока прелюдические шаги не были обоснованы по всей строгостью. У каждого подхода свои преимущества и недостатки, и каждый из них обладает своими уникальными возможностями для творческой музыки неиней. Так же, как современную музыку нельзя сравнивать с классической, эти подходы нельзя сравнивать, чтобы выиснуть, какой из них лучше — использовать механикой из них лучше — использовать механикой в значительной степени определяются вкусами и подготовкой.

Батърев решил перевести схему построения зеркальных многообразий на более понятный математический язык, и это ему удалось. Под впечатлением более ранней работы тайваньского математика Ши-Шир Роана, Батъреву удалось сформулировать последовательную математическую процедуру построения пар пространств Калаби—Яу, являющихся зеркальными близнецами друг друга. Его профессора сводится к нашей с Плессером, если применять ее для рассмотренных нами примеров, но приводит к более общей формулировке в терминах знакомых математикам понятий.

Оборотной стороной медали было то, что в работах Батърева использовались знания из неизвестных большинству физиков областей математики. Мне, например, удалось удивить суть его аргументов, но понимание многих важнейших моментов давалось с огромным трудом. Одно, тем не менее, было ясно: методы, описанные в его статье, при правильном их осознании и применении вполне могут дать второе дыхание исследованию флоп-перестроек с разрывом пространства.

К концу лета, находясь под впечатлением результатов этих работ, я решил вернуться к задаче о флоп-перестройках и сконцентрировать на ней все свое внимание. От Моррисона я узнал, что он собирается провести год в Институте перспективных исследований, а Аспинуолл, по моим сведениям, тоже будет там на стажировке. После нескольких телефонных звонков и переписки по электронной почте я договорился, что тоже проведу осень 1992 г. в этом институте.

## Рождение стратегии

Трудно вообразить себе лучшее место для многочасовой и напряженной исследовательской работы, чем Институт перспективных исследований. Этот институт, основанный в 1930 г., расположен среди слегка холмистых полей, примыкающих к миллическому лесу, и находится в нескольких милях от территории Принстонского университета. Говорят, здесь ничто не может отвлекать вас

от работы в Институте, потому что отвлекать просто нечему.

После отъезда из Германии в 1933 г. Эйнштейн обосновался в этом институте и прожил здесь до конца своей жизни. Не нужно напрягать воображение, чтобы представить его размышляющим о единой теории поля в безлюдной тишине и почти аскетической атмосфере окрестностей Института. В воздухе здесь витает дух наследия прошлых глубоких идей, и ощущение этого может быть или возбуждающим, или угнетающим, в зависимости от того, на какой промежуточной стадии находятся ваши исследования.

Как-то раз, вскоре после моего прибытия в Институт, мы с Аспинуоллом прогуливались по улице Нассау (главной торговой улице в Принстоне), рассуждая о том, где будем сегодня обедать. Вопрос не праздный, потому что Поль — большой любитель мясного, а я вегетарианец. В самый раздум обмена мнениями о стилях жизни он спросил, есть ли у меня идеи о том, какими новыми задачами стоило бы заняться. Я ответил, что есть, и подробно изложил свои соображения по поводу важности вопроса о том, возможны ли во Вселенной флоп-перестройки с разрывом пространства, если Вселенная действительно описывается теорией струн. Я также обрисовал ему стратегию своих действий и рассказал о недавно возникшей надежде на то, что работа Батърева может помочь восполнить недостающие проблемы в понимании. Я полагал, что проповедуя новообразованному, и Поль будет возбужден перспективой этого исследования. Но я ошибся. Сейчас, задним числом, я понимаю, что его сдержанность объяснялась добродушной и давно возникшей тягой к интеллектуальному соперничеству, в котором каждый из нас играет роль «адвоката дьявола» по отношению к идеям другого. Не прошло и нескольких дней, как он привнул ко мне, и мы оба с головой погрузились в изучение флоп-перестроек.

К тому времени приехал и Моррисон. Втроем мы собрались в институтском кафе, чтобы выработать план действий. Мы были единодушны в том, что главная задача состоит в ответе на вопрос, могут ли переходы от рис. 11.3 а к рис. 11.4 г иметь место в на-

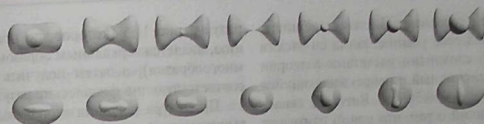


Рис. 11.5. Флоп-перестройка с разрывом пространства (верхний ряд) и соответствующая зеркальная формулировка (нижний ряд)

шей Вселенной. Однако решение этой задачи в лоб сулило непреодолимые препятствия, так как описывающие этот переход уравнения, особенно те из них, которые описывают разрыв пространства, крайне сложны. Вместо этого, мы решили переформулировать задачу в терминах зеркальных пространств, надеясь на то, что уравнения в этом случае будут более простыми. Идея схематически показана на рис. 11.5, где в верхнем ряду показана эволюция от рис. 11.3 а к рис. 11.4 г, а в нижнем — та же эволюция с точки зрения зеркальных многообразий Калаби—Яу. Уже тогда нам было ясно, что в зеркальной формулировке физика струн обладает хорошими свойствами и свободна от всякого рода катастроф. На рис. 11.5 видно, что в нижнем ряду не наблюдаются разрывов или проколов пространства. Однако самый сложный вопрос, к которому привело нас это наблюдение, заключался в том, не переходим ли мы через границы применимости зеркальной симметрии. И, несмотря на то, что верхние и нижние многообразия Калаби—Яу, изображенные в левой колонке на рис. 11.5, приводят к эквивалентным физическим результатам, верно ли, что на каждом шаге вправо, изображенном на рис. 11.5 (в процессе чего в середине обязательно встретятся фазы прокола-разрыва-восстановления) физические свойства исходной и зеркальной точки зрения идентичны?

Хотя у нас были достаточные основания считать, что важная связь между исходными и зеркальными многообразиями не нарушится в ходе преобразований, приводящих к разрыву пространства Калаби—Яу в верхней части рис. 11.5, мы понимали, что вопрос о том, останутся ли многообразия на рис. 11.5 зеркальными друг другу после разрыва, нетривиален. Это ключевой вопрос, так как если они останутся зеркальными, отсутствие ка-

тастрофы в зеркальной формулировке будет означать отсутствие катастрофы в исходной формулировке, и это станет доказательством того, что пространство в теории струн может разрываться. Мы поняли, что этот вопрос можно свести к вычислению. Нужно считать физические свойства Вселенной для верхнего многообразия Калаби—Яу после разрыва (например, используя правое верхнее пространство (правое нижнеположенное) пространства (правое нижнеположенное) пространства (рис. 11.5), а затем сравнить, будут ли эти свойства одинаковы.

Этим расчетом Аспинуолл, Моррисон и я занимались осенью 1992 г.

## Поздние вечера в последней обители Эйнштейна

Острый, как лезвие бритвы, ум Эдварда Виттена обленен в мягкие манеры, что часто приобретает насмешливый, почти иронический оттенок. Виттен общепризнанно считается наследником титула Эйнштейна в роли величайшего из живущих на Земле физиков. Некоторые даже считают его величайшим физиком всех времен. У Виттена неутомимая физикал к передовым исследованиям в физике, а его влияние на выбор направлений исследований в теории струн огромно.

Работоспособность Виттена стала легендарной. По словам его жены Кьяры Наппи, когда Виттен занимается физикой в том же институте, она записывает ситид на кухне, мысленно те, Виттен занимает достижения в теории анализируя передовые достижения в констру и лишь изредка возвращаясь к ноту для ручной и бумагой, чтобы проверить одну или две тонкие детали<sup>3)</sup>. Другую историю после десяти лет этого летомя рию рассказал стажер, которого как-то летом

разместил в соседнем с Виттеном кабинете. Он описывал свое уныние, когда он часами мучился со сложными расчетами в теории струн под ритмичный и непрекращающийся стук клавиш из кабинета Виттена, свидетельствующий о том, что прямо из головы Виттена в файлы на компьютере одна за другой струятся статьи, которые вскоре сыграют поворотную роль в науке.

Примерно через неделю после моего приезда, когда мы с Виттеном беседовали в институтском дворике, он справился о моих научных планах. Я рассказал ему о флорп-перестройках с разрывами пространства и о стратегии, которую мы в этой связи избрали. Услышав об этих идеях, Виттен крайне заинтересовался, но предупредил, что, по его мнению, расчеты будут чрезвычайно сложными. Он также отметил потенциально слабое звено в описанной стратегии, которое относилось к моей совместной работе с Ваффой и Уорнером, проделанной несколькими годами ранее. Вопрос, который поднял Виттен, имел лишь косвенное отношение к нашему подходу, но этот вопрос побудил его заняться задачей, которая, в конце концов, оказалась связанной с нашими задачами и дополнительной по отношению к ним.

Аспинуолл, Моррисон и я решили развить вычисления на два этапа. Естественное на первый взгляд разделение состояло в вычислениях сначала физических характеристик, соответствующих последнему многообразию Калаби—Яу в верхнем ряду рис. 11.5, а затем характеристик, соответствующих последнему многообразию в нижнем ряду рис. 11.5. Если зеркальность не нарушается в результате разрыва для верхнего ряда, то эти два многообразия *должны* приводить к одинаковым физическим следствиям, так же, как к одинаковым следствиям приводит анализ двух исходных многообразий. (В такой постановке задачи не требуется проведения крайне сложных вычислений для верхнего многообразия в момент его разрыва.) Оказалось, что вычисления физических характеристик для последнего из верхнего ряда многообразий Калаби—Яу достаточно просты. Главная сложность состояла в том, чтобы сначала определить точный вид последнего многообразия Калаби—Яу в нижнем

ряду на рис. 11.5 (которое, по предположению, является зеркальным образом верхнего многообразия), а затем получить для него соответствующие физические результаты.

Процедура решения второй задачи, т. е. вычисления физических характеристик последнего из многообразий Калаби—Яу в нижнем ряду, если известна его точная геометрическая форма, была разработана несколькими годами ранее Канделасом. Его подход, однако, подразумевал проведение длительных расчетов. Мы поняли, что для решения задачи в данном конкретном случае нужно написать хорошую компьютерную программу. Аспинуолл, — не только известный физик, но и крутой программист, — взял эту задачу на себя. Моррисон и я приступили к расчету первой задачи о нахождении точного вида пространства Калаби—Яу.

Мы чувствовали, что именно в этом месте работа Батырева может подкачать нам ряд важных моментов. Однако и на этот раз исторически сложившиеся культурные различия в подходах математиков и физиков, — в данном случае, Моррисона и меня, — стали тормозить продвижение вперед. Нам нужно было соединить мощь двух наук и найти *математический* вид нижних многообразий Калаби—Яу, которые соответствуют той же *физической* Вселенной, что и верхние многообразия, если флорп-перестройки с разрывами на самом деле имеют место в действительности. Но ни я, ни Моррисон не знали чужого языка достаточно хорошо для того, чтобы яено увидеть путь к достижению этой цели. Стало очевидным, что и мне, и ему нужно срочно пройти курс в области, экспертом в которой является другой из нас. Поэтому днем мы решили с максимальной отдачей пытаться двинуться вперед в наших расчетах, а по вечерам по очереди играть друг для друга роли преподавателя и студента: я буду в течение часа или двух читать лекции для Моррисона по интересующим нас физическим вопросам, а затем он в течение часа или двух будет читать мне лекции по соответствующим математическим вопросам. Эти лекции обычно заканчивались около 11 вечера.

Мы стали твердо соблюдать такой ежедневный режим. Продвижение было медлен-

но, но мы чувствовали, что все начинает понемногу вставать на свои места. Тем временем Виттен семимильными шагами двинулся к разрешению вопроса о слабом звене, которое он обнаружил ранее. В его работе предлагался новый мощный метод, связывающий физические результаты в теории струн с математическими аспектами пространств Калаби—Яу. Аспинуолл, Моррисон и я почти ежедневно участвовали в импровизированных дискуссиях с Виттеном, и он рассказывал нам о новых перспективах, которые открываются в его подходе. С каждой неделей становилось все яснее, что его работа, основанная на совершенно ином подходе, с неожиданной стороны приближается к вопросу о флорп-перестройках. Аспинуолл, Моррисон и я поняли, что если мы в ближайшее время не закончим наши вычисления, Виттен отправит всех нас в нокаут.

## О шести банках пива и работе по выходным

Ничто так благотворно не действует на мозг физика, как доза здорового соперничества. Аспинуолл, Моррисон и я вошли в азарт. Нужно отметить, что для Аспинуолла это означало одно, а для нас с Моррисоном совершенно другое. В характере Аспинуолла своеобразно сочетаются уточненность английского аристократа, во многом благодаря десяти годам студенчества и аспирантуры в Оксфорде, и озорное плутовство. Режим, в котором он работает, делает его одним из самых дисциплинированных физиков, которых я когда-либо знал. В то время как многие из нас засиживаются допоздна, Аспинуолл никогда не работает позже пяти часов вечера. В то время как многие из нас работают по выходным, Аспинуолл никогда этого не делает. Он чинно откланивается, потому что к этому моменту он успевает сделать все. Для него войти в азарт означает еще выше поднять планку эффективности своей работы.

Было начало декабря. Моррисон и я к тому времени обучали друг друга уже несколько месяцев, и это обучение начало себя оправдывать. Мы были очень близки к тому, чтобы

установить точный вид искомого пространства Калаби—Яу. Более того, Аспинуолл почти закончил писать свою компьютерную программу и ждал нашего результата, который должен был служить ее начальными данными. Ночью в четверг нам с Моррисоном, наконец, стало совершенно ясно, как можно определить вид искомого пространства Калаби—Яу. Это сводилось к некоторой процедуре, которая также требовала своей (довольно простой) компьютерной программы. К полудню пятницы мы написали и отладили программу, а к поздному вечеру у нас на руках был результат.

Но это была пятница, и уже перевалило за 5 пополудни. Аспинуолл ушел домой, и не вернется до понедельника. Мы оказались в ситуации полного бессилия без его компьютерной программы. Но ни Моррисон, ни я и в мыслях не могли представить, что придется ждать все выходные: мы стояли на пороге решения вопроса о разрывах структуры пространства мизрадания, мучившего нас столько времени, и бездействие было невыносимым. Мы позвонили Аспинуоллу домой и стали упрашивать его прийти олу дома и стать управителем его прийти в офис завтра утром. Сначала он решительно отказался. Но после долгого ворчания в трубку он все же согласился присоединиться к нам, если мы ему принесем блок из шести банок пива. Мы согласились.

## Момент истины

Как и планировалось, мы встретились в Институте в субботу утром. Яркое светило Солнцетопи и настроение у всех было шутливо-распущены, и настроение у всех было шутливо-распущено, и настроение у всех было шутливо-распущено, и настроение у всех было шутливо-распущено. Я был наполовину уверен, что слабленям. Я был наполовину уверен, что слабленям. Я был наполовину уверен, что слабленям. Я был наполовину уверен, что слабленям.

Мы же студились вокруг компьютера Моррисона, стоявшего в нашем кабинете. Аспинуолл объяснил Моррисону, как запустить программу и какой точный вид должно иметь вводимые в нее данные. Моррисон привел полученные ночью результаты к нужному виду, и теперь все было готово.

Расчет, который нужно было провести, грубо говоря, сводился к определению массы конкретной частицы, являющейся колебательной модой струны при ее движении во Вселенной, компоненту Калаби—Яу которой мы изучали всю осень. Мы надеялись, что в соответствии с выбранной нами стратегией масса окажется точно такой же, что и масса в случае многообразия Калаби—Яу, возникшего после флоп-перестройки с разрывом пространства. Последнюю массу вычислить было легко, и мы сделали это несколькими неделями раньше. Ответ оказался равным 3 в определенной системе единиц, которой мы пользовались. А так как сейчас проводился численный расчет на компьютере, то ожидаемый результат должен был быть близким к числу 3, что-то вроде 3,000001 или 2,999999; отличие от точного ответа объяснялось бы ошибками округления.

Моррисон сел за компьютер. Его палец завис над клавишей «Enter». Напряжения нарастало. Моррисон выдохнул «поехали» и запустил программу. Через пару секунд компьютер выдал ответ: 8,999999. Мы сердце упало. Неужели действительно флоп-перестройки с разрывом пространства нарушают зеркальную симметрию, а значит, вряд ли существуют в реальности? Но в следующее же мгновение мы сообразили, что здесь какая-то глупая ошибка. Если в массах частиц на двух многообразиях действительно есть отличие, почти невероятно, что компьютер выдал бы результат, столь близкий к целому числу. Если наши идеи неверны, то с тем же самым успехом компьютер мог бы выдать ответ, состоящий из совершенно случайных цифр. Мы получили неправильный ответ, но неправильность его была такого вида, из которого напрашивался вывод о том, что где-то мы допустили банальную ошибку. Аспинуолл и я подошли к доске, и моментально ошибка была найдена: мы забыли множить 3 в «простом» вычислении несколько недель назад, так что правильный результат должен был равняться 9. Поэтому ответ компьютера — это как раз то, на что мы надеялись.

Конечно, совпадение результата после того, как найдена ошибка, является лишь наполовину убедительным. Если известен же-

лаемый результат, очень легко найти способ его получить. Нам срочно требовался другой пример. Имея все необходимые программы, придумать его не представляло сложности. Мы вычислили массу еще одной частицы на верхнем многообразии Калаби—Яу, на этот раз с особой тщательностью, чтобы избежать еще одной ошибки. Ответом было число 12. Мы снова окружили компьютер и запустили программу. Через несколько секунд был получен ответ 11,999999. *Согласие.* Мы доказали, что предполагаемое зеркальное пространство является зеркальным пространством, и флоп-перестройки с разрывами пространства являются частью теории струн.

Я вскричал со стула и, опьяненный победой, сделал круг по комнате. Моррисон, сияя, сидел за компьютером. И только реакция Аспинуолла была нестандартной. «Здорово. Я и не сомневался, что все так и будет, — спокойным сказал Аспинуолл. — А где мое пиво?»

## Подход Виттена

В понедельник мы с победоносным видом направились к Виттено, чтобы сообщить ему о нашем успехе. Он был очень рад нашему результату. Оказалось, что он тоже только что нашел способ доказательства существования флоп-перестроек в теории струн. Его аргументация была совершенно иной и значительно проясняла понимание того, почему пространственные разрывы на микроскопических масштабах не приводят к катастрофическим последствиям.

Подход Виттена акцентирует различие между теорией точечных частиц и теорией струн в случае таких разрывов. Суть различия в том, что вблизи разрыва возможны два типа движения струны и только один тип движения точечной частицы. А именно, струна может двигаться, примыкая к разрыву, как и точечная частица, но, кроме того, она может опоясывать разрыв при движении, — что недоступно для точечной частицы, — как показано на рис. 11.6. В результате опоясывания области разрыва струна экранирует окружающую ее Вселенную

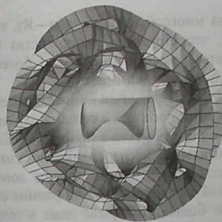


Рис. 11.6. Мировая поверхность, замечаемая струной, служит экраном, который гасит потенциально катастрофические эффекты при разрыве структуры пространства

от катастрофических последствий, которые имели бы место в противном случае. В теории струн все происходит так, как будто мировая поверхность струны (двумерная поверхность, которую замечает струна при ее движении в пространстве, см. главу 6) эффективно играет роль барьера, на котором все пагубные воздействия геометрического вырождения пространства в точности сокращаются.

Здесь читатель вправе задать вопрос. Что будет, если разрыв действительно произойдет, но близости не окажется струн, которые экранировали бы его? Насколько эффективную защиту от этой кластерной бомбы, взрывающейся в момент разрыва пространства, может дать бесконечно тонкая «броня» струны? Ответ на оба вопроса основан на важнейшем квантово-механическом эффекте, рассмотренном в главе 4. Там было показано, что в фейнмановской формулировке квантовой механики объект, будь то струна или частица, движется от одной точки к другой, «разведывая» все возможные траектории. Наблюдаемое в результате движение есть объединение *всех* возможностей, и отдельные вклады каждой возможной траектории в движение точно определяются формулами квантовой механики. Если структура пространства внезапно разорвется, то среди всех возможных траекторий движущихся струн окажутся и те, которые опоясывают место разрыва (см. рис. 11.6). И хотя кажется, что около разрыва может не оказаться

струн, в квантовой механике учитываются все возможные их траектории, и среди таких траекторий многие (в действительности, бесконечное число) будут опоясывать место разрыва. Виттен показал, что вклады именно этих траекторий сокращают эффект космической катастрофы, к которой привел бы разрыв пространства.

В январе 1993 г. Витен и мы втроем одновременно послали наши работы в электронный архив статей в Интернете, из которого статьи моментально становятся доступными во всем мире. В наших статьях, основанных на двух совершенно различных точках зрения, приводились первые примеры *переходов с изменением топологии* — такое название мы дали процедуре с разрывом пространства. Давний вопрос о том, могут ли происходить разрывы пространства, был разрешен теорией струн и подтверждался количественными расчетами.

## Следствия

Мы добились большого успеха в понимании того, как может происходить разрывы пространства без катастрофических физических последствий. Но что *на самом деле* происходит при таких разрывах? Какие следствия разрыва могут быть наблюдаемыми? Мы видели, что многие свойства окружающего нас мира зависят от конкретной структуры свернутых измерений. Поэтому естественно предположить, что радикальное изменение пространства Калаби—Яу при преобразование пространства показанном на рис. 11.5, будет иметь серьезные физические последствия. Однако на самом деле на двумерных иллюстрациях, которыми мы пользуемся для того, чтобы представить себе пространства, картина происходящего в действительности преобразования несколько усложнена. Если бы образование нескольких узлообразных структур удалось наглядно изобразить шестимерным геометрии, мы бы увидели, что структура пространства действительно рвется, но не ра пространства действительно больше похотак уж сильно. Поверхности больше похотак на изынные следы, оставляемые моллюжками на пальто, чем на результат резкого прищипывания в брюках, из которых вы давно выросли.



В нашей работе, как и в работе Виттена, показано, что физические характеристики (например, число семейств струнных мод и типы частиц каждого семейства) не изменяются в ходе этих процессов. То, что может действительно меняться при преобразованиях пространства Калаби—Яу, на промежуточном этапе которых происходит разрыв, это массы отдельных частиц, т. е. энергии возможных мод колебаний струны. В наших работах было показано, что эти массы будут непрерывно изменяться в ответ на изменение геометрического вида компоненты Калаби—Яу, причем некоторые будут увеличиваться, а некоторые — уменьшаться. Важно, однако, то, что при разрыве не возникнет катастрофических скачков или других резких изменений значений меняющихся масс. С точки зрения физики момент разрыва пространства ничем не примечателен.

Здесь возникают два вопроса. Во-первых, мы рассматривали разрывы структуры пространства в дополнительном шестимерном пространстве Калаби—Яу. Могут ли эти разрывы возникать в трех наблюдаемых нами измерениях Вселенной? Почти наверняка могут. Пространство есть пространство, независимо от того, является оно туго скрученным в многообразии Калаби—Яу или развернутым до всееских просторов, общирность которых мы понимаем, глядя лунной ночью на звездное небо. На самом деле, как мы видели, привычные нам пространственные измерения могут сами быть свернуты в гигантскую фигуру, замыкающуюся саму на себя в направлении другого конца Вселенной, и поэтому само деление измерений на свернутые и развернутые несколько искусственно. Хотя наш анализ, как и анализ Виттена, опирается на определенные математические

свойства многообразий Калаби—Яу, тот результат, что структура пространства может разрываться, несомненно, имеет более широкие рамки применимости.

Во-вторых, может ли разрыв с изменением топологии произойти сегодня или завтра? Мог ли он иметь место в прошлом? Да. Экспериментальные исследования показывают, что массы элементарных частиц довольно стабильны во времени. Но на ранних стадиях после Большого взрыва даже в теориях, отличных от теории струн, рассматриваются важные периоды, в течение которых массы элементарных частиц менялись. С точки зрения теории струн в эти периоды, несомненно, происходили переходы с изменением топологии, рассмотренные в этой главе. Говоря о временах более близких к настоящему моменту, наблюдаемая стабильность масс элементарных частиц означает, что если сейчас Вселенная находится на стадии перехода с изменением топологии, то он происходит настолько медленно, что влияние на массы элементарных частиц невозможно зарегистрировать на современных экспериментальных установках. Примечательно, что пока выполняется это условие, наша Вселенная может находиться в данный момент в кульминации пространственного разрыва. Если разрыв происходит достаточно медленно, мы даже не поймем, что он происходит. Это один из редких примеров в физике, когда отсутствие поразительного экспериментально наблюдаемого феномена есть повод для сильного возбуждения. Отсутствие наблюдаемых катастрофических последствий при таком экзотическом изменении геометрии демонстрирует, как далеко продвинулась теория струн по сравнению с ожиданиями Эйнштейна.

## Глава 12

### За рамками струн: в поисках М-теории

В долгих поисках единой теории Эйнштейн размышлял о том, «мог ли Бог сотворить мир другим, оставляет ли какую-то свободу требованию логической простоты»<sup>1)</sup>. Это замечание Эйнштейна предвосхищает точку зрения, которой сегодня придерживаются многие физики: если у нас есть окончательная теория природы, то одним из самых убедительных аргументов в пользу ее конкретной структуры является то, что теория не могла бы быть другой. Окончательная теория должна иметь тот вид, который она имеет, потому что она дает уникальную формулировку, в рамках которой можно объяснить Вселенную, не натываясь на внутренние или логические противоречия. В подобной теории должно постулироваться, что все вокруг устроено именно так потому, что оно *должно* быть устроено именно так. Любое сколь угодно малое расхождение приводит к теории, которая, подобно фразе «это предложение является ложным», содержит в себе сама своей собственной несостоятельности.

Установление такой неизбежности в структуре Вселенной потребует долгого пути и влчатую приведет нас к разрешению глубочайших вопросов мироздания. Эти вопросы подчеркивают загадку: кто или что сделал выбор среди бесчисленного числа вариантов? Неизбежность упреждает эти вопросы путем отстранения других возможностей. Неизбежность означает, что в действительности другого выбора нет. Неизбежность постулирует, что Вселенная не может быть иной. Как мы увидим в главе 14, нет причин, по которым Вселенная должна иметь такую жесткую конструкцию. Тем не менее, поиск этой жесткости законов природы лежит в основе программы объединения в современной физике.

К концу 1980-х гг. теория струн, по мнению физиков, хотя и приблизилась к построению единой картины Вселенной, но не

выдержала экзамен на «отлично». На то были две причины. Во-первых, как вскользь отмечено в главе 7, физики обнаружили, что существует *пять* различных вариантов теории струн. Напомним, что их называют теориями типа I, типа IIA, типа IIB, а также теориями гетеротических струн на основе групп  $O(32)$  (О-гетеротические струны) и  $E_8 \times E_8$  (Е-гетеротические струны). Многие основные свойства этих теорий совпадают: колебательные моды определяют возможные массы и заряды, общее число требуемых пространственных измерений равно 10, их сверхпространственных измерений равно 10, их свернутые измерения должны быть многообразиями Калаби—Яу и т. д. Мы не говорили об их различиях в предыдущих главах, однако, как выяснилось в конце 1980-х гг., эти теория действительно отличаются друг от друга. В примечаниях в конце книги можно прочитать о свойствах этих теорий, но здесь для нас важно то, что в них по-разному реализуются суперсимметрия и есть существенные различия между допустимыми колебательными модами<sup>2)</sup>. (Например, в теории струн типа I кроме обужаемых нами замкнутых струн имеются открытые струны.) Теоретики, занимавшиеся струнами, чувствовали себя неуверенно: хоть и впечатляет иметь такую серьезную кандидатуру на окончательную единую теорию, но если таких кандидат тур пять, непонятно, как распределить время на исследование каждой из них.

Вторая причина отклонения от неизбежности более тонкая. Чтобы понять ее в полной мере, нужно признать, что все физические теории состоят из двух частей. Первая часть — это набор основных идей теории, выраженных, как правило, в виде математических уравнений. Вторая часть состоит из решений этих уравнений. Вообще говоря, одни уравнения допускают только единственное решение, а другие — более одного

решения (возможно, много более). (Например, уравнение «2 умножить на некоторое число равно 10» имеет одно решение: 5. Однако уравнение «0 умножить на некоторое число равно 0» имеет бесконечно много решений, так как *любое* умноженное на 0 число дает 0.) Тем самым, даже если получается строго определенная теория со строго определенными уравнениями, искомая неизбежность еще под вопросом, ибо уравнения могут иметь множество различных решений. В конце 1980-х гг. казалось, что ситуация в теории струн обстоит именно так. Когда физики начинали исследовать уравнения любой из пяти теорий, выяснялось, что у этих уравнений *действительно* много решений, например много возможных способов свертывания дополнительных измерений, и каждое решение соответствует вселенной со своими свойствами. И хотя все эти вселенные возникали в качестве полнопрованных решений уравнений теории струн, большинство из них, казалось, не имеет никакого отношения к наблюдаемому нами миру.

Эти отклонения от неизбежности могли бы считаться досадным фундаментальным недостатком теории струн. Но исследования, начавшиеся в середине 1990-х гг., дали надежду на то, что этот недостаток есть просто следствие того, как физики теоретически подходят к анализу теории струн. В двух словах, дело в том, что уравнения теории струн настолько сложны, что никто даже не знает их точного вида. Физикам удалось найти лишь приближенный вид этих уравнений. Именно эти приближенные уравнения сильно отличаются для разных теорий струн. И именно они в любом из пяти подходов приводят к избытку решений, рогу избытка лишних вселенных.

С 1995 г. (начало второй революции в теории суперструн) растет число свидетельств в пользу того, что точные уравнения, вид которых до сих пор находится за пределами наших познаний, могут разрешить эти проблемы и, тем самым, придают теории струн статус неизбежности. К удивительно большому числу занимающихся теорией струн физиков уже доказано, что точные уравнения, когда их вид будет ясен, вскроют связь между всеми пятью теориями струн.

Как лучи морской звезды, все они являются частями одного организма, который в настоящее время пристально исследуется теоретиками. Физики уверены, что вместо пяти различных теорий должна существовать *одна*, объединяющая все пять в рамках общего теоретического формализма. Эта теория приведет к ясности, всегда возникающей при выявлении скрытых зависимостей между различными областями исследования, и даст новый мощный подход к пониманию структуры Вселенной в рамках теории струн.

Чтобы объяснить эти идеи, нам придется воспользоваться рядом самых сложных и самых современных результатов теории струн. Необходимо понять суть приближений, используемых в теории струн, а также пришедшие им ограничения. Нам нужно ближе познакомиться с искусными методами, известными под собирательным названием *дуальностей*, которые физики применяют для выхода за рамки некоторых приближений. Затем мы должны по шагам разобраться в каждом этапе аргументации, опирающейся на эти методы, и прийти к указанным выше замечательным выводам. Но не нужно пугаться: вся действительно сложная работа уже выполнена теоретиками, а нам остается лишь проиллюстрировать их результаты.

Тем не менее есть множество, казалось бы, не связанных элементов, которые нам придется исследовать и соединить воедино, поэтому в данной главе особенно просто не разглагольствовать за деревьями леса. Поэтому, если обсуждение в этой главе начнет казаться слишком запутанным и возникнет желание пропустить ее и перейти к черным дырам (глава 13) или космологии (глава 14), мы вам рекомендуем все-таки вернуться к следующему параграфу, где сведены вместе ключевые идеи второй революции в теории суперструн.

## Краткое изложение результатов второй революции в теории суперструн

Важнейший результат, полученный в ходе второй революции в теории суперструн, по-

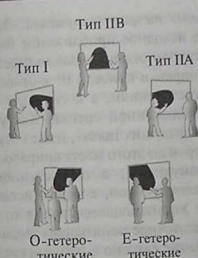


Рис. 12.1. Многие годы физики, работавшие с пятью теориями струн, думали, что они исследуют совершенно различные теории

казан на рис. 12.1 и 12.2. На рис. 12.1 изображена ситуация до того, как стало возможным (частично) выйти за рамки приближенных методов, традиционно используемых физиками для исследований в теории струн. Однако, как показано на рис. 12.2, в свете последних результатов видно, что подобно лучикам морской звезды все теории струн рассматриваются сейчас как части единого целого. (К концу этой главы, на самом деле, станет ясно, что даже и шестая теория — шестой лучик звезды — будет вписана в это объединение.) Это единый формализм по причинам, которые станут ясными в дальнейшем, условно назвали *M-теорией*. Рис. 12.2 иллюстрирует эпохальное достижение в поисках окончательной теории. Тропы исследований в теории струн, которые, казалось, велут в разные стороны, слились в одну широкую дорогу — единую и всеохватывающую теорию, которая вполне может оказаться искомой «теорией всего».

Хотя предстоит преодолеть еще много работы, две основные характеристики *M-теории* уже установлены физиками. Во-первых, *M-теория* рассматривает *однанадцать* измерений (десять пространственных и одно временное). Подобно тому, как Калуга внезапно обнаружил, что одно дополнительное пространственное измерение можно использовать для объединения гравитации с электромагнетизмом, теоретики осознали, что одно дополнительное пространственное измерение в теории струн (помимо оставшихся

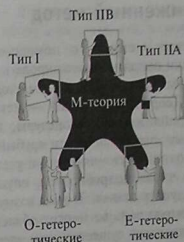


Рис. 12.2. Результаты, полученные в ходе второй революции в теории суперструн, показали, что все пять теорий в действительности являются частью единого формализма, условно названного *M-теорией*

девяти пространственных и одного временного, обсуждавшихся в предыдущих главах) позволяет осуществить более чем удовлетворительный синтез всех пяти вариантов теории струн. Кроме того, это дополнительное измерение возникает не из воздуха: теоретики обнаружили, что выводы о существовании одного временного и девяти пространственных измерений, сделанные в 1970-х и 1980-х гг., являются *приближенными*, а точные вычисления показывают, что одно пространственное измерение в те годы осталось незамеченным.

Второе установленное свойство *M-теории* состоит в том, что она, кроме колеблющихся струн, включает и другие объекты: колеблющиеся *двумерные* мембраны и *трехмерные* капли (последние называют 3-бранами), а также и многие другие составляющие. Это свойство, как и одиннадцатое измерение, возникает вследствие отказа от принципов, использовавшихся до середины 1990-х гг. Если не считать этих и ряда других результатов, полученных в последние годы, *M-теория* остается мистической (этим объясняется ее название). Физики всего мира с большим энтузиазмом работают над тем, чтобы добиться полного понимания *M-теории*, и эта задача вполне может стать центральной проблемой физики XXI в.

## Приближенный метод

Ограничения методов, с помощью которых физики пытались анализировать теорию струн, связаны с использованием *теории возмущений*. Теория возмущений — меткое название приближенной процедуры, в которой сначала пытаются найти грубый ответ, а затем поэтапно уточняют его с учетом все большего числа подробностей, опущенных на предыдущих этапах. Теория возмущений играет важную роль во многих областях науки; она являлась существенным элементом в понимании теории струн, и, как мы сейчас покажем, прочно входит в круг житейских явлений.

Предположим, что в один прекрасный день машина вашего знакомого начинает барахлить, и он обращается в мастерскую, чтобы ее проверить. Осмотрев машину, механик говорит, что дело плохо. Нужен новый блок двигателя, и обычно ремонт в таких случаях обходится примерно в \$900 (включая стоимость деталей). Это примерная оценка, а более точная стоимость выяснится в ходе ремонта. Проходит несколько дней, и, проведя дополнительные проверки, механик сообщает более точную стоимость \$950. Он объясняет, что необходим еще и новый регулятор: это увеличит общую стоимость ремонта примерно на \$50. Наконец, когда машина отремонтирована, вашему знакомому выставляются счет на \$987,93. В мастерской объясняют, что в него входят \$950 за блок двигателя и регулятор, \$27 за ремень вентилятора, \$10 за кабель аккумулятора и \$0,93 за изолированный болт. Примерная первоначальная стоимость \$900 уточнялась с учетом все более мелких деталей. На языке физики эти детали рассматриваются как *возмущения* исходной оценки.

При правильном использовании теории возмущений первоначальная оценка будет достаточно близка к окончательному ответу, и после учета мелких подробностей, опущенных в исходной оценке, поправка будет невелика. Но иногда при оплате счета выясняется, что конечная сумма ужасающе расходится с начальной оценкой. И хотя в этот момент в голову, возможно, приходят совсем другие слова, в математике это называется *непри-*

*менимостью теории возмущений*. Это означает, что исходное приближение было плохим прогнозом окончательного ответа, потому что поправки привели не к относительно малым отклонениям, а к сильным изменениям приближенной оценки. Как указывалось в предыдущих главах, наше обсуждение теории струн до этого места опиралось на теорию возмущений, в определенном смысле аналогичную той, которую использовал механик. Упомянувшееся время от времени «недостаточное понимание» теории струн так или иначе связано с применением этого приближенного метода. Чтобы лучше понять смысл последнего утверждения, рассмотрим теорию возмущений в контексте, менее абстрактном, чем в теории струн, но все же более близком к этой теории, чем пример с механиком.

## Классический пример теории возмущений

Классический пример использования теории возмущений дает изучение движения Земли в Солнечной системе. На таких больших пространственных масштабах можно учитывать только гравитационное взаимодействие, однако, если не делать дополнительных приближений, возникающие уравнения будут крайне сложны. Вспомним, что и по Ньютону, и по Эйнштейну все тела оказывают гравитационное воздействие на все другие тела, так что попытка точной формулировки сразу приводит к математически неразрешимой задаче о «гравитационном перетягивании каната» Землей, Солнцем, другими планетами и, если по-честному, всеми другими небесными телами. Как нетрудно сообразить, определить точное движение Земли с учетом всех влияний невозможно. На самом деле, уже в случае трех небесных тел уравнения становятся настолько сложными, что никто не сумел полностью решить их<sup>3</sup>.

Тем не менее в рамках теории возмущений можно предсказать движение Земли в Солнечной системе с высочайшей точностью. Огромная масса Солнца по сравнению с массами всех других тел Солнечной системы, как и близость Солнца к Зем-

ле по сравнению с расстояниями от Земли до других звезд, свидетельствуют о том, что Солнце оказывает доминирующее воздействие на движение Земли. Таким образом, в первом приближении можно учитывать только гравитационное воздействие Солнца. Для многих приложений этого вполне достаточно. Если окажется необходимым, можно уточнить это приближение, последовательно учитывая гравитационное воздействие следующих по степени влияния тел, например, Луны или тех планет, которые в данный момент проходят ближе всего к Земле. По мере того как паутина гравитационных взаимодействий будет становиться более запутанной, вычисления могут стать сложными, но это не должно затенять смысл философии теории возмущений: гравитационное взаимодействие между Землей и Солнцем дает нам приближенное понимание движения Земли, а совокупность остальных гравитационных взаимодействий последовательно учитывается все уменьшающимися поправками.

В этом примере подход в рамках теории возмущений применим, так как существует доминирующее физическое воздействие, допускающее сравнительно простое теоретическое описание. Это не всегда так. Например, если нужно рассчитать движение трех сравнимых по массе звезд, вращающихся в тройной системе одна вокруг другой, нельзя указать взаимодействие каких звезд будет доминирующим. Поэтому нельзя дать грубую оценку, к которой затем можно было бы делать малые поправки, обусловленные другими эффектами. Если попытаться использовать теорию возмущений и выбрать для грубой оценки, например, взаимодействие между двумя звездами, быстро выяснится, что подход неприменим. Вычисленные «поправки» за счет влияния третьей звезды будут не малыми, а столь же существенными, что и первое грубое приближение. Ситуация знакомая: движения трех человек, танцующих танец «хора» мало напоминают движения пары, танцующей танго. Большие поправки означают, что исходное приближение было выстрелом мимо цели, а вся схема была карточным домиком. Важно понимать, что дело не просто в учете большой поправки третьей звезды. Здесь действует эффект

домино: большая поправка сильно влияет на движение двух звезд, что, в свою очередь, сильно влияет на движение третьей звезды, которое опять-таки влияет на движение двух звезд, и т. д. Все нити гравитационной паутины одинаково важны, и должны рассматриваться одновременно. Единственным спасением в таких случаях часто бывает метод грубой силы — компьютерное моделирование совместного движения.

Этот пример демонстрирует, насколько при использовании теории возмущений важно определить, является ли предполагаемое первое приближение *действительно* приближением, и, если оно им является, сколько и каких более точных деталей следует учитывать для достижения требуемой точности. Как мы сейчас обсудим, эти вопросы особенно важны при применении теории возмущений к изучению физических процессов в микромире.

## Использование теории возмущений в теории струн

Физические процессы в теории струн порождаются фундаментальными взаимодействиями между колеблющимися струнами. Как обсуждалось в главе 6<sup>4</sup>, в эти взаимодействия входят распады и слияния струнных петель, подобные тем, которые изображены на рис. 6.7 и продублированы в строку читателя на рис. 12.3. Занимаясь струнами теоретики показали, как схематическому изображению на рис. 12.3 поставить в соответствие точную математическую формулу, описывающую влияние каждой из сталкивающихся струн на движение другой. (Эта формула имеет разный вид в пяти теориях струн, но мы на время будем пренебрегать такими тонкостями.) Если бы не было квантовой теории, на этой формуле и заканчивалось бы изучение взаимодействий струн. Но в силу соотношения неопределенностей возникает микроскопический хаос, в котором происходит непрерывное рождение пар

<sup>4</sup> Читатели, пропустившие раздел «Более точный ответ» в главе 6, рекомендуются прочитать его начало.



Рис. 12.3. Струны взаимодействуют, соединяясь и разделяясь

струна/антиструна (двух струн с противоположными колебательными модами) за счет одолженной у Вселенной энергии, и быстрая аннигиляция этих пар, в результате которой одолженная энергия возвращается Вселенной. Такие пары струн, рожденные из квантового хаоса, живущие за счет одолженной энергии и, следовательно, обязанные быстро слиться в одну петлю, называют *парами виртуальных струн*. И хотя их жизнь короточна, присутствие этих дополнительных пар виртуальных струн влияет на детальную структуру взаимодействия.

Схематически этот процесс изображен на рис. 12.4. Две исходные струны сливаются вместе в точке *a*, образуя единую петлю. Некоторое время эта петля движется, но в точке *b* квантовые флуктуации приводят к рождению виртуальной пары струн, которая далее аннигилирует в точке *в*, и в результате снова получается одна петля. Наконец, в точке *г* эта струна отдает энергию, распавшись на пару струн, которые разлетаются в разных направлениях. Из-за наличия одной петли в центре рис. 12.4 физики называют это «однопетлевым» процессом. Как и для взаимодействия, изображенного на рис. 12.3, для этой диаграммы можно выписать точную математическую формулу, в которой учитывается влияние рождения пары виртуальных струн на движение двух исходных.

Однако это еще не все: краткосрочные извержения виртуальных струн вследствие квантовых флуктуаций могут произойти любое число раз, что приведет к рождению последовательных виртуальных пар. При этом получаются диаграммы с большим количеством петель, как показано на рис. 12.5. Каждая диаграмма дает простой и удобный способ описания соответствующего физического процесса. Налетающие струны слива-



Рис. 12.4. Квантовый хаос приводит к рождению пары струна/антиструна (б) и ее уничтожению (в), что усложняет взаимодействие

ются, квантовый хаос вызывает раздвоение получившейся петли на виртуальную пару, струны этой пары движутся, затем аннигилируют с образованием одной петли, которая далее снова распадается на виртуальную пару и т. д. Как и для других диаграмм, для каждой из этих процессов есть математические формулы, в которых учитывается влияние на движение исходной пары струн<sup>4</sup>).

Боле того, аналогично примеру с механиком, определив конечную стоимость ремонта сложением его исходной оценки \$900 с последующими поправками \$50, \$27, \$10 и \$0,93, и аналогично уточнению описания движения Земли при добавлении к влиянию Солнца меньшего влияния Луны и других планет, теоретики показали, что взаимодействие двух струн можно вычислить путем сложения математических выражений для диаграмм без петель (без пар виртуальных струн), с одной петлей (одной парой виртуальных струн), с двумя петлями (двумя парами виртуальных струн) и т. д., как показано на рис. 12.6.

В точном расчете требуется сложить математические выражения для всех этих диа-

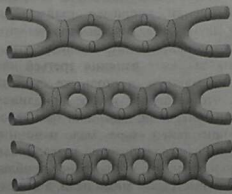


Рис. 12.5. Квантовый хаос может привести к рождению и уничтожению длинных последовательностей пар струна/антиструна

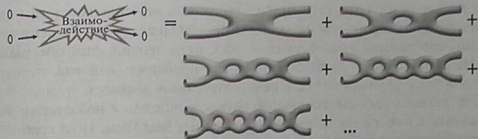


Рис. 12.6. Суммарное воздействие одной струны, налетающей на другую, есть результат сложения воздействий, включающих диаграммы с увеличивающимся числом петель

грамм с растущим числом петель. Но так как диаграмм бесконечно много, а соответствующие математические вычисления с ростом числа петель усложняются, эта задача неразрешима. И здесь занимающиеся струнами теоретики берут на вооружение теорию возмущений, предполагая, что разумная грубая оценка дается процессом без петель, а диаграммы с петлями дают поправки, значения которых уменьшаются по мере увеличения числа петель.

В действительности, почти все, что мы знаем о теории струн, включая большую часть сведений из предыдущих глав, было открыто физиками при проведении подробных и тщательных вычислений по теории возмущений. Но чтобы удостовериться в точности полученных результатов, необходимо выяснить, являются ли грубые приближения, в которых учитывается только несколько первых диаграмм рис. 12.6, а все остальные диаграммы опущены, действительно хорошим приближением.

### Приближает ли к ответу приближение?

Нельзя сказать заранее. Хотя математические формулы, соответствующие диаграммам, значительно усложняются при увеличении числа петель, теоретикам удалось установить одно очень важное свойство. Подобно тому, как вероятность разрыва каната на две части при сильном растяжении и раскачивании определяется его прочностью, вероятность распада струны с образованием виртуальной пары при квантовых флуктуациях также определяется некоторым параметром. Этот параметр называют *константой связи*

струны (как мы вскоре увидим, в каждой из пяти теорий струн своя константа связи). Это название довольно наглядно: значение константы связи струны определяет, насколько сильно квантовые колебания трех струн (исходной струны и двух виртуальных струн, на которые она распадается) зависят друг от друга, т. е. насколько сильно три струны *связаны* между собой. Вычисления показывают, что при больших значениях константы связи струны вероятность того, что квантовые флуктуации приведут к распаду струны (и ее последующему воссоединению), становится больше, а при малых значениях константы связи вероятность такого краткосрочного образования виртуальных струн мала.

Немного ниже мы обсудим вопрос об определении константы связи струны в каждой из пяти теорий, однако сначала необходимо уточнить, что означают слова «большая» и «малая» применительно к константе связи. Оказывается, что с точки зрения математического формализма теории струн границей между областями «больших» и «малых» констант связи является число 1. Это означает, что при константах связи, меньших 1, молчаливое вырывание большого числа пар виртуальных струн становится крайне маловероятным. Однако если константа связи больше или равна 1, то краткосрочное появление на сцене таких виртуальных пар становится весьма вероятным и увеличивается с увеличением константы связи струны<sup>5</sup>. В итоге, при константах связи струны, меньших 1, вклады диаграмм с петлями при увеличении числа петель уменьшаются. Это как личинки числа петель подхода с использованием теории возмущений: уменьшение званием теории возмущений: уменьшение вкладов говорит о том, что мы получим

достаточно точные результаты, если будем пренебрегать всеми вкладками, кроме вкладов диаграмм, содержащих лишь несколько петель. Но если константа связи струны больше 1, то по мере увеличения числа петель старшие петлевые вклады становятся все более важными. Как и в случае тройной системы звезд, теории возмущений здесь неприменима. И первое приближение, которое дают диаграммы без петель, приближением не является. (Все это в равной мере относится к каждой из пяти теорий струн, так как применимость приближенного подхода к использованию теории возмущений к любой заданной теории определяется значением константы связи.)

Поэтому возникает еще один важнейший вопрос: чему же равно значение константы связи (точнее, чему равны значения констант связи струны в каждой из пяти теорий струн)? *Найти ответ до сих пор никому не удалось.* Этот вопрос является одним из главных нерешенных вопросов в теории струн. Можно с уверенностью утверждать, что выводы, полученные в рамках теории возмущений, справедливы лишь в случае, если константа связи струны меньше единицы. Кроме того, точное значение константы связи струны непосредственно влияет на массы и заряды частиц, соответствующих ее различным колебательным модам. Таким образом, значение константы связи струны определяет большинство физических свойств теории. Сейчас мы подробно обсудим причины того, почему на вопрос о значении константы связи во всех пяти теориях струн до сих пор нет ответа.

## Уравнения теории струн

Как и для определения взаимодействия между струнами, для поиска фундаментальных уравнений теории струн может использоваться теория возмущений. На самом деле, эти уравнения определяют то, как струны взаимодействуют между собой, и, наоборот, способ взаимодействия струн определяет уравнения теории.

В каждой из пяти теорий струн существует уравнение, с помощью которого можно

вычислить значение константы связи в этой теории. Однако к настоящему времени для всех пяти теорий физикам удалось найти лишь приближенный вид этого уравнения, полученный в рамках теории возмущений путем вычисления небольшого числа определенных диаграмм. И во всех пяти теориях приближенный вид уравнения говорит лишь о том, что если умножить значение константы связи на ноль, должен получиться ноль. Результат крайне удручающий, так как любое число при умножении на ноль дает ноль, и уравнению удовлетворяет любое значение константы связи струны. Поэтому во всех пяти теориях приближенные уравнения для определения константы связи не дают никакой информации о ее значении.

Кроме того, в каждой из пяти теорий струн должно существовать уравнение, с помощью которого в принципе можно определить точный вид как протяженных, так и свернутых пространственно-временных измерений. Известный на данный момент приближенный вид этого уравнения приводит к гораздо более жестким ограничениям, чем вид уравнения для константы связи, но доступимых решений все равно оказывается очень много. Например, допустимы решения с четырьмя протяженными и шестью свернутыми измерениями Калаби—Яу, но даже этим широким классом решений все они не исчерпываются: возможны и другие разбиения числа измерений на протяженные и свернутые<sup>61</sup>.

Что означают эти результаты? Возможны три ситуации. В первом, наилучшем случае даже при наличии уравнений для определения константы связи струны, а также уравнений для определения размерностей и точного вида пространства-времени (этим не может похвастаться ни одна теория), до сих пор не найденные точные уравнения могут допускать широкий спектр решений, что значительно ослабляет их предсказательную силу. Если это так, это будет крахом гипотезы о том, что теория струн способна *объяснить* свойства природы без необходимости экспериментального определения этих свойств и более или менее произвольной подгонки теории под эти свойства. Мы вернемся к анализу этого случая в главе 15. Во втором слу-

чае избыточная свобода выбора при решении приближенных уравнений теории струн может говорить об изъянах в нашей аргументации. Мы пытаемся использовать методы теории возмущений для определения значения самой константы связи струны. Но, как обсуждалось выше, методы теории возмущений имеют смысл лишь в случае, если константа связи меньше 1, и поэтому возможно, что при таких расчетах делается неоправданное предположение о самом результате, а именно, что этот результат будет меньше 1. Наша неудача вполне может объясняться неправильностью исходной предпосылки: в любой из пяти теорий струн константа связи может быть больше 1. Наконец, в третьем случае нежелательный произвол в решениях может быть просто следствием того, что мы используем приближенные, а не точные уравнения. Например, даже если константа связи в данной теории струн меньше 1, уравнения теории могут быть чувствительны к вкладам *всех* диаграмм. То есть учет небольших поправок, соответствующих всем многопетлевым диаграммам, может быть важным для сведения приближенного уравнения, допускающего множество решений, к точному уравнению с ограниченным числом решений.

К началу 1990-х гг. анализ двух последних возможностей убедил большинство теоретиков в том, что повсеместное использование теории возмущений является помехой на пути прогресса. По мнению подавляющего большинства ученых, следующее серьезное продвижение возможно лишь при использовании подхода, не скwanного приближенными методами и, следовательно, далеко выходящего за рамки теории возмущений. Еще в 1994 г. разработка такого подхода казалась несбыточной мечтой. Однако иногда и такие мечты сбываются.

## Дуальность

Сотни занимающихся теорией струн теоретиков из многих стран мира ежегодно съезжаются на конференцию, посвященную обсуждению полученных за «отчетный» год результатов и оценке перспектив возможных направлений исследования. В зависимости

от достигнутого в данном году прогресса обычно легко предугадать степень интереса и энтузиазм его участников. В середине 1980-х гг., в апогее первой революции в теории суперструн, на семинарах царил безграничная эйфория. Физиков охватила надежда на то, что скоро у них появится полное понимание теории струн, и она предстанет пред ними в качестве окончательной теории Вселенной. Сегодня это кажется наивным. Как выяснилось в следующие годы, для понимания многих глубоких и нетривиальных аспектов теории струн требуются длительные и напряженные исследования. После того как далеко не все сразу становилось на свои места, необоснованная первоначальная эйфория сменилась мертвым сезоном, а многие исследователи впали в уныние. Конференции по струнам, проводившиеся в конце 1980-х гг., отражали скрытое разочарование: физики представляли интересные результаты, но в атмосфере конференции не чувствовалось влечения. Некоторые даже предлагали отменить ежегодную конференцию. Однако в начале 1990-х годов ситуация стала исправляться. После ряда значительных прорывов (некоторые из них обсуждены в предыдущих главах) теория струн вновь стала набирать свою силу, и у многих исследователей опять появился энтузиазм и оптимизм. Тем не менее, трудно было предположить то, что произойдет на конференции по струнам, состоявшейся в марте 1995 г. в университете Южной Калифорнии.

Когда подошло время заявленного выступления Эдварда Виттена, он поднялся на кафедру и сделал доклад, который вызвал вторую революцию в теории суперструн. Вдохновленный результатами более ранних работ Даффа, Халла и Таунсенда, а также замечательными идеями Шварца, Ашока Сена и других теоретиков, Виттен объявил о новой стратегии выхода за рамки теории возмущений в теории струн. Главным элементом этой стратегии было понятие *дуальности*.

Физики используют это понятие для описания теоретических моделей, которые кажутся различными, но приводят к идентичным физическим следствиям. Есть «тривиальные» примеры дуальности, в которых совершенно одинаковые теории могут казаться



Суперсимметрия принадлежит к более абстрактным типам симметрии, который связывает физические свойства элементарных объектов с различными спинами. Эксперимент дает лишь косвенные намеки на то, что в микромире реализуется такой механизм симметрии, но по описанным выше причинам физики твердо убеждены, что он действительно реализуется. Естественно, этот механизм является несомненной частью теории струн. В 1990-е гг. после пионерской работы Натана Зайберга из Института перспективных исследований физики осознали, что суперсимметрия дает мощный инструмент, используя который можно косвенным методом ответить на ряд очень сложных и важных вопросов.

Одно то, что теория обладает суперсимметрией, позволяет даже без понимания всех тонкостей теории накладывать существенные ограничения на ее допустимые свойства. Приведем пример из лингвистики. Пусть известно, что в некоторой последовательности букв буква «у» встречается ровно три раза, и задача состоит в том, чтобы угадать эту последовательность. Не имея дополнительной информации, невозможно найти однозначное решение: подойдет любая последовательность с тремя буквами «у», например *uyuyuyuyuyduyuyedy* и т. п. Но теперь допустим, что нам последовательно дают две подсказки: во-первых, ответ должен быть существующим английским словом, и, во-вторых, это слово должно содержать минимальное количество букв. Бесконечное количество первоначальных вариантов сокращается этими двумя подсказками сразу до одного кратчайшего английского слова с тремя «у»: *сузуку* (сизигия).

Суперсимметрия также дает подсказки, позволяющие конкретизировать ситуацию в теории, которым свойственны такие принципы симметрии. Чтобы понять это, представьте, что вы столкнулись с физической задачей, аналогичной только что описанной задаче из лингвистики. Внутри черного ящика находится нечто неопознанное с определенным зарядом. Заряд может быть электрическим, магнитным, или иметь иную природу; для определенности примем, что этот заряд равен трем единицам электрического

заряда. Без дополнительной информации определить содержимое ящика невозможно. В нем могут находиться три частицы с зарядом 1, подобные позитронам или протонам, или четыре частицы с зарядом 1 и одна частица с зарядом  $-1$  (например, электрон), или девять частиц с зарядом  $1/3$  (например,  $u$ -кварки) плюс любое число незаряженных частиц (например, фотонов) и т. д. Подходит любая комбинация частиц с суммарным зарядом 3. Как и в лингвистической задаче, где единственным условием было наличие трех букв «у», число возможных вариантов содержимого черного ящика бесконечно.

Но теперь, как и в примере из лингвистики, предположим, что нам даны еще две подсказки: во-первых, теория, описывающая мир (а, следовательно, и содержимое черного ящика) является суперсимметричной, и, во-вторых, содержимое черного ящика должно иметь *минимальную массу*. Пользуясь результатами работ Е. Богомольного, Маноджа Прасада и Чарльза Сомерфилда, физики показали, что такая жесткая структура формализма (формализм суперсимметрии — аналог английского языка) и «условие минимальности» (минимальность массы с данным электрическим зарядом — аналог минимальной длины слова с данным числом букв «у») приводят к тому, что скрытое содержание определяется *однозначно*. То есть требование минимальности массы содержимого черного ящика при условии, что заряд внутри него будет равен заданному, позволяет однозначно определить это содержимое. Состояния с данным значением заряда, в которых суммарная масса частиц минимальна, называются *БПС-состояниями* в честь трех открывших эти состояния ученых<sup>8</sup>).

Важность БПС-состояний состоит в том, что их свойства однозначно, легко и точно определяются без привлечения теории возмущений. Это справедливо вне зависимости от значения константы связи. Даже если константа связи струны велика, и, следовательно, подход с использованием теории возмущений неприменим, все равно можно вычислить точные параметры БПС-состояний. Эти параметры часто называются *неperturbативными* массами и зарядами, так как их значения вычислены вне рамок приближен-

ного подхода по теории возмущений. Поэтому для читателя, владеющего английским языком, *BPS* можно расшифровать и как *beyond perturbative states* — состояния вне рамок теории возмущений.

БПС-свойства описывают лишь малую долю всех физических явлений в конкретной теории струн при больших константах связи, но эти состояния позволяют четко прояснить некоторые характеристики теории в области сильной связи. При выходе константы связи струны за рамки применимости теории возмущений, привязка к БПС-состояниям позволяет расширить границы нашего понимания теории. Как и знание лишь нескольких выборочных слов в иностранном языке, эти состояния могут нам помочь продвинуться довольно далеко.

## Дуальность в теории струн

Следуя Виттену, начнем с анализа одной из пяти теорий, например теории струн типа I, и предположим, что все ее девять пространственных измерений являются плоскими и несвернутыми. Такое предположение, разумеется, совершенно нереалистично, оно делает анализ проще; случай свернутых измерений будет рассмотрен немного ниже. Примем сначала, что константа связи струны много меньше 1. В этом случае справедливы методы теории возмущений, и многие конкретные характеристики теории могут быть (и были) изучены довольно точно. Если мы будем увеличивать константу связи, но следить, чтобы она оставалась гораздо меньше 1, методы теории возмущений будут оставаться справедливыми. Однако конкретные характеристики теории несколько изменятся. Например, численные параметры расщепления двух струн станут немного иными, так как изображенные на рис. 12.6 диаграммы с петлями при увеличении константы связи дадут большие вклады. Несмотря на эти изменения численных параметров, физическое содержание теории останется неизменным, если величина константы связи соответствует области применимости теории возмущений.

Когда значение константы связи струны типа I превратит единицу, методы теории возмущений станут неприменимыми, так что мы сфокусируем наше внимание на ограниченном наборе масс и зарядов БПС-состояний, которые мы еще будем в состоянии понять. Согласно гипотезе Виттена, подтвержденной затем в совместной работе с Джо Польчински из университета Санта Барбары, *свойства теории струн типа I в области сильной связи в точности совпадут с известными свойствами теории O-гетеротической струны со слабой связью*. Иными словами, если константа связи в теории струн типа I велика, конкретные массы и заряды, которые мы умеем вычислять, в точности совпадут с массами и зарядами в теории O-гетеротической струны с малой константой связи. Это явно указывает на то, что две теории струн, которые, полюбю воле и ляду, сначала казались совершенно разными, в действительности дуальны друг другу. При этом получается убедительный довод в пользу того, что физические процессы в теории струн типа I для больших констант связи *идентичны* физическим процессам в теории O-гетеротической струны для малых констант связи. Схожие соображения наталкивают на мысль, что справедливо и обратное. Физические процессы в теории струн типа I для малых констант связи идентичны физическим процессам в теории O-гетеротической струны для больших констант связи<sup>9</sup>. Несмотря на то, что при анализе приближенными методами теории возмущений две теории струн кажутся не связанными, при изменении константы связи происходит переход одной из них в другую, подобный взаимным превращениям воды и льда.

Этот существенно новый результат — возможность описания физических свойств одной теории в области сильной связи в рамках другой теории в области слабой связи — называется *дуальностью сильной и слабой связи*. Как и рассмотренные выше примеры дуальности, эта дуальность показывает, что две теории, эти дуальности не являются разными. Точнее, они дают разные описания одной и той же лежащей в их основе теории. В отличие от «тривиальной» дуальности английские и китайские языки, дуальность силь-

ной и слабой связи дает мощный инструмент исследования теорий. Если константа связи в одной из двух теорий мала, можно анализировать физические свойства с помощью хорошо известных примесей теории возмущений. Однако если константа связи велика, и теория возмущений неприменима, можно перейти к дуальной теории и вернуться к методам теории возмущений. Переход позволяет использовать количественные методы применительно к ситуациям, анализ которых, как казалось ранее, выходит за рамки наших возможностей.

Строгое доказательство того, что физические процессы в теории струн типа I для малых констант связи идентичны физическим процессам в теории О-гетеротической струны для больших констант связи и обратно, является очень сложной и до сих пор не решенной задачей. Одна из двух предположительно дуальных теорий не может быть исследована по теории возмущений, так как ее константа связи слишком велика. Это не позволяет провести прямой расчет многих физических характеристик теории. И именно этим объясняется мощный потенциал предполагаемой дуальности: если гипотеза дуальности верна, она дает новый инструмент исследования теории в области сильной связи. Нужно лишь использовать теорию возмущений для дуальной теории в области слабой связи.

Даже если нельзя доказать, что две теории дуальны, полное согласие результатов, которые можно получить строго, является неоспоримым свидетельством в пользу гипотезы дуальности сильной и слабой связи теории типа I и теории О-гетеротической струны. Эта гипотеза проходила проверку с использованием все более изощренных вычислительных методов, и неизменно находила свое подтверждение. Большинство теоретиков, занимающихся струнами, убеждены в справедливости гипотезы дуальности.

Тем же самым методом можно изучить свойства других теорий струн, например, типа IIB. Согласно первоначальному предположению Халла и Таунсенда, которое затем было подтверждено исследованиями ряда физиков, в этой теории происходит нечто столь же необычное. При увеличении кон-

станты связи те физические свойства, которые еще можно определить, начинают совпадать со свойствами той же теории струн типа IIB в области слабой связи. Другими словами, теория струн типа IIB является *самодуальной*<sup>(10)</sup>. Тщательный анализ показывает, что теория струн типа IIB с константой связи, большей 1, совершенно идентична той же теории струн с константой связи, обратной начальной (и, следовательно, меньшей 1). Ситуация аналогична рассмотренному выше стягиванию циклического измерения до планковской длины: если уменьшать значение константы связи в теории типа IIB до значения, меньшего 1, то вследствие самодуальности мы приходим к эквивалентной теории типа IIB с константой связи, большей 1.

## Предварительные итоги

Итак, посмотрим, где мы находимся. К середине 1980-х гг. физики построили пять теорий суперструн. При исследовании приближенными методами теории возмущений свойства пяти теорий казались различными. Однако эти приближенные методы применимы лишь тогда, когда константа связи струны меньше 1. Ожидалось, что константу связи в каждой теории можно будет вычислить точно, но из вида приближенных уравнений для констант стало ясно, что такое вычисление в настоящее время невозможно. Поэтому физики направили свои усилия на изучение всех пяти теорий в допустимых диапазонах соответствующих констант связи, как для констант, меньших 1, так и больших 1, т. е. при слабой и при сильной связи. Однако попытки определить свойства любой из этих теорий в области сильной связи на основе традиционных методов теории возмущений оказались тщетными.

В настоящее время физики научились рассчитывать определенные характеристики каждой теории струн в области сильной связи, используя мощный формализм суперсимметрии. Ко всеобщему изумлению всех теоретиков, свойства теории О-гетеротических струн в области сильной связи оказались идентичными свойствам теории струн типа I

в области слабой связи, и наоборот. Более того, свойства теории струн типа IIB в области сильной связи оказались идентичными свойствам той же теории в области слабой связи. Эти неожиданные открытия побуждают нас, следуя Виттену, перейти к анализу двух оставшихся теорий струн, струн типа IIA и E-гетеротической струны, и выяснить, как эти теории вписываются в общую картину. И здесь нас ожидают еще более удивительные неожиданности. Для того чтобы подготовиться к ним, необходимо совершить краткий исторический экскурс.

## Супергравитация

В конце 1970-х – начале 1980-х гг., до всплеска бурного интереса к теории струн, многие физики-теоретики пытались объединить квантовую теорию, гравитацию и другие взаимодействия в формализме единой теории поля для точечных частиц. Они надеялись, что прелательства, возникающие при попытках объединить теорию точечных частиц, включающие квантовую механику и гравитацию, будут устранены при исследовании теории с высокой степенью симметрии. В 1967 г. сотрудники Нью-Йоркского университета Стони Брук Дэниел Фридман, Серджо Феррари и Питер ван Ньувенгейзен обнаружили, что наиболее многообещающими являются теории на основе суперсимметрии, так как в них сокращения многих квантовых флуктуаций бозонов и фермионов помогают умиротворить хаос на микрокосмических масштабах. В своей работе эти ученые дали название *супергравитация* суперсимметричным квантовым теориям, которые разрабатывались с целью включить общую теорию относительности в единый формализм. Попытки разработать такие теории не увенчались успехом. Тем не менее, как отмечено в главе 8, урок, предвосхитивший развитие теории струн, не прошел даром.

Урок, смысл которого, вероятно, стал более ясен после работы сотрудников Парижской высшей технической школы Юджина Креммера, Бернара Джулли и Шерка (1978 г.) состоял в том, что успешнее остальных оказались попытки построить теорию супергравитации не в четырех, а в большем числе

измерений. А именно, наиболее перспективными оказались варианты теорий в десяти или одиннадцати измерениях, при этом число одиннадцать оказалось максимально возможным числом измерений<sup>(11)</sup>. Связь с четырьмя наблюдаемыми измерениями в этих теориях также обеспечивалась путем использования формализма Калуцы—Клейна: лишние измерения сворачивались. В десятимерных теориях, как и в теории струн, сворачивались шесть измерений, а в 11-мерной теории сворачивались семь измерений.

Когда в 1984 г. теория струн увлекла многих физиков, виды на будущее у теории супергравитации для точечных частиц резко ухудшились. Как уже неоднократно подчеркивалось, при точности, доступной сегодня и в обозримом будущем, струны *выглядят*, как точечные частицы. Это неформальное замечание можно сформулировать и в строгой форме: при изучении низкоэнергетических процессов в теории струн, т. е. процессов, в которых энергии недостаточно велики для того, чтобы прощупать протяженную ультрамикроскопическую структуру струны, можно аппроксимировать струну бесструктурной точечной частицей в формализме квантовой теории поля. Для процессов на малых расстояниях или процессов при больших энергиях такое приближение не подходит, так как мы знаем, что протяженность струны является важнейшим свойством, позволяющим разрешить конфликт между общей теорией относительности и квантовой теорией, которые теории точечных частиц разрешить не в состоянии. Однако при достаточно больших расстояниях или на достаточно больших энергиях эти проблемы не возникают, и такое приближение часто делается для удобства вычислений.

Примечательно, что квантовой теорией поля, дающей наилучшее приближение теории струн в указанном смысле, является десятимерная теория супергравитации. Особые свойства этой теории, обнаруженные в 1970-х и 1980-х гг., теперь находят свое объяснение: они являются низкоэнергетическими отголосками свойств теории струн. Исследователи, изучавшие десятимерную супергравитацию, обнаружили лишь вершину



огромного айсберга конструкции теории суперструн. В действительности оказывается, что существуют четыре различных теории десятимерной супергравитации, и эти теории отличаются в деталях конкретной реализации суперсимметрии. Три из них являются низкоэнергетическими приближениями струн типа IIA, типа IIB и E-гетеротических струн точечными частями. Четвертая теория является низкоэнергетическим пределом как струн типа I, так и O-гетеротических струн; в ретроспективе, этот факт был первым указанием на близость двух последних теорий.

Схема выглядит безупречной, вот только 11-мерная супергравитация осталась не у дел. В теории струн, которая формулируется в десяти измерениях, кажется, нет места для 11-мерной теории. На протяжении нескольких лет большинство физиков за редким исключением рассматривали 11-мерную супергравитацию в качестве математического курса, не имеющего никакого отношения к физике теории струн<sup>12)</sup>.

## Проблемы M-теории

Сегодня точка зрения радикально изменилась. На конференции «Струны-95» Виттен сделал следующее утверждение: если взять теорию струн типа IIA с константой связи, много меньшей 1, и увеличивать константу связи до значения, много больше 1, то физические свойства, которые мы еще способны анализировать (по существу, свойства насыщенных БПС-состояний), в низкоэнергетическом пределе будут соответствовать свойствам 11-мерной супергравитации.

Когда Виттен объявил о своем открытии, все присутствовавшие в аудитории потеряли дар речи, а позже весь об этом открытии громом пронеслась по всем институтам, где занимаются теорией струн. Почти для всех специалистов в этой области результат был полной неожиданностью. Первая реакция читателя этой книги, возможно, тоже будет напоминать реакцию большинства экспертов: *какое отношение может иметь*

*теория, характерная для одиннадцати измерений, к другой теории в десяти измерениях?*

Ответ несет в себе глубокий смысл. Чтобы понять его, нужно описать результат Виттена более точно. На самом деле, сначала проще обратиться к другому тесно связанному с этим результатом, полученному чуть позже Виттеном и стажером Принстонского университета Петром Хофавой для теории E-гетеротической струны. Для этой теории в области сильной связи ими также было найдено описание в терминах 11-мерной теории; это поясняется на рис. 12.7. Слева на этом рисунке схематически показана теория E-гетеротической струны с константой связи, много меньшей 1. Эта область константы связи рассматривалась в предыдущих главах и изучалась теоретиками на протяжении более десяти лет. При переходе вправо на рис. 12.7 значение константы связи постепенно увеличивается. До 1995 г. теоретикам было известно, что при этом вклады петлевых диаграмм (см. рис. 12.6) будут становиться все более важными, и при дальнейшем увеличении константы связи весь формализм теории возмущений перестает быть справедливым. Но никто не мог даже вообразить того, что при увеличении константы связи проявится новое измерение! На рис. 12.7 это измерение соответствует вертикали. Нужно помнить, что двумерная сетка на рисунке, с которого мы начали обсуждение, представляет все девять пространственных измерений E-гетеротической струны. Новое измерение по вертикали будет *десятым* пространственным, так что вместе с временным измерением в сумме получается одиннадцать пространственно-временных измерений.

Кроме того, на рис. 12.7 иллюстрируется важнейшее следствие существования этого нового измерения. Структура E-гетеротической струны меняется по мере роста этого измерения. При увеличении константы связи из одномерной петли она растягивается в ленту, а затем — в деформированный цилиндр! Другими словами, E-гетеротическая струна становится *двумерной мембраной*, ширина которой (протяженность по вертикали на рис. 12.7) определяется значением константы связи. Более десятилетия теоретики всегда использовали методы теории возму-



Рис. 12.7. При увеличении константы связи E-гетеротической струны появляется новое измерение, и сама струна вытягивается, принимая вид цилиндрической мембраны

щений, основанные на предположении малости константы связи. Как показал Виттен, в этом предположении фундаментальные объекты микромира выглядят и ведут себя подобно струнам, даже если у них имеется скрытое второе пространственное измерение. Если отказаться от предположения о малости константы связи и рассмотреть физические характеристики E-гетеротической струны при больших константах связи, второе измерение станет явным.

Это утверждение не обесценивает ни одного из выводов предыдущих глав, но побуждает рассмотреть их в рамках нового формализма. Возникает, например, вопрос, как можно состыковать новые результаты с тем, что в теории струн требуются одно временное и девять пространственных измерений? Что же, как обсуждалось в главе 8, это ограничение возникает при расчете числа различных направлений, в которых может колебаться струна, и число измерений выбирается так, чтобы квантомеханические вероятности гарантированно имели осмысленные значения. Новое измерение не является измерением, в котором может колебаться E-гетеротическая струна, так как оно зафиксировано в самой структуре «струны». Кроме того, в формализме теории возмущений, который использовался физиками для вывода ограничения на число пространственно-временных измерений, предполагалась, что константа связи E-гетеротической струны мала. И хотя это было осознано гораздо позднее, в таком предположении нежно используются два взаимосогласованных приближения: малая ширина мембраны на рис. 12.7, при которой она выглядит, как струна, и малый размер однодлинного измерения, не влияющий на вид уравнений теории возмущений. В рамках этой приближенной схемы мы вынуждены представлять себе Вселенную десятимерной и заполненной одномерными струнами. Те-

перь мы видим, что она 11-мерная и заполнена двумерными мембранами.

По техническим причинам, впервые Виттен столкнулся с одиннадцатым измерением при исследовании сильной связи струны типа IIA, для которой ситуация вполне аналогична. Как и в случае E-гетеротической струны, размер однодлинного измерения в струне, размер однодлинного измерения в струне типа IIA определяется значением ее константы связи. При увеличении этого значения новое измерение расширяется. По мере расширения, однако, струна типа IIA превращается в «велосипедную камеру» (см. рис. 12.8), а не в ленту, как в случае E-гетеротической струны. И снова, согласно Виттеному, традиционные представления физиков о струнах типа IIA как об одномерных объектах, имеющих длину, но не имеющих толщины, есть следствие использования ими формализма теории возмущений, в котором константа связи струны предполагается малой. Если законы природы требуют, чтобы константа связи действительно была малой, то это приближение оправдано. Однако результаты Виттена и других физиков, полученные в ходе второй революции в теории суперструн, убедительно свидетельствуют о том, что «струны» типа IIA и E-гетеротические «струны» имеют фундаментальную структуру двумерных мембран, живущих в 11-мерной вселенной.



Рис. 12.8. По мере увеличения константы связи струны типа IIA струны расширяются, превращаясь из одномерных петель в двумерные объекты, похожие на велосипедную камеру

Но что представляет собой 11-мерная теория? Согласно Виттену и другим исследователям, при низких (по сравнению с планковской) энергиях она аппроксимируется почти забытой всеми 11-мерной квантово-полевой теорией супергравитации. А как же тогда описать эту теорию при высоких энергиях? Сейчас этот вопрос тщательно исследуется. Как показано на рис. 12.7 и 12.8, в такой 11-мерной теории существуют двумерные протяженные объекты — двумерные мембраны. Как мы вскоре увидим, важную роль играют и протяженные объекты других размерностей. Однако об этой 11-мерной теории *ничего не известно*, кроме набора разнородных фактов. Являются ли мембраны ее фундаментальными объектами? Каковы ее определяющие свойства? Благодаря каким ее свойствам она может быть связана со знакомой нам физикой? Если соответствующие константы связи малы, то лучшие ответы, которые можно дать сейчас, уже описаны в предыдущих главах, так как при малых константах связи мы возвращаемся обратно к теории струн. Но для больших констант связи в настоящее время ответов не знает никто.

Для этой 11-мерной теории, что бы она собой ни представляла, Виттен придумал рабочее название: *М-теория*. Все расшифровывают это название по-разному. Вот примеры: мистическая теория, материнская теория («мать всех теорий»), мембранная теория (так как мембраны в любом случае играют в ней роль), матричная теория (после недавних работ Тома Бэнкса из университета Ратгерса, Вилли Фишлера из Техасского университета в Остине, Стивена Шенкера из университета Ратгерса, Саксендла и других, предложивших новую интерпретацию теории). Однако и без точной расшифровки названия или знания ее свойств уже сейчас ясно, что М-теория дает основу для объединения всех пяти теорий струн.

## М-теория и паутина взаимосвязей

Есть старая притча о трех слепцах и слоне. Первый слепец ощущает бивень слона и говорит, что чувствует что-то гладкое

и твердое. Второй держится за ногу и описывает что-то шероховатое и мускулистое. Третий слепец держит слона за хвост и говорит о чем-то гибком и хилом. Слыша описания других слепцов, каждый из них думает, что держится за другое животное. Много лет физики были столь же слепы и думали, что разные теории струн *действительно* являются разными. Но теперь, благодаря второй революции в теории суперструн, наступило прозрение, и они поняли, что все пять теорий струн являются частями тела одного огромного «слона» — М-теории.

В этой главе мы обсудили, как изменилось наше понимание теории струн при выходе за рамки теории возмущений, невольно использовавшейся в предыдущих главах. На рис. 12.9 подведен итог тем взаимосвязям, которые обсуждались до этого момента. Стрелками на этом рисунке обозначены дуальные теории. Видно, что мы имеем паутину взаимосвязей, но она соткана еще не полностью. Включая дуальности из главы 10, можно довести дело до конца.

Вспомним о дуальности, возникающей при замене радиуса циклического измерения  $R$  на радиус  $1/R$ . Выше мы слегка сгладили один аспект этой дуальности, но теперь его нужно рассмотреть подробнее. В главе 10 обсуждались свойства струн во вселенной с одним циклическим измерением; при этом не указывалось конкретно, с какой из пяти теорий струн мы работаем. Как утверждать, взаимная замена колебательных мод струны на топологические позволяет переформулировать описание (в рамках теории струн) вселенной с циклическим измерением радиуса  $1/R$  в терминах вселенной с циклическим измерением радиуса  $R$ . Факт, который был нами опущен, состоит в том, что теории струн типов IА и IВ, а также теории E- и O-гетеротических струн в действительности не переходят сами в себя, а меняются местами при замене радиусов. Поэтому применительно к этим теориям точная формулировка дуальности при замене радиусов такова: законы физики в теории струн типа IА во вселенной с циклическим измерением радиуса  $R$  идентичны законам физики в теории струн IВ во вселенной с циклическим измерением радиуса  $1/R$ . Аналогич-

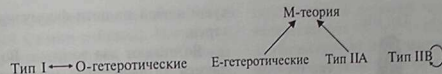


Рис. 12.9. Стрелки обозначают отношения дуальности для теорий

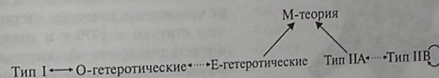


Рис. 12.10. С учетом дуальностей, включающих геометрию пространства-времени (как в главе 10) все пять теорий вместе с М-теорией связываются единой паутиной дуальностей

ное утверждение справедливо для теорий E- и O-гетеротических струн. На выводах главы 10 такая формулировка не отражалась, но в данном обсуждении она играет важную роль.

Дело в том, что с учетом дуальности при замене радиусов в теориях струн типов IА и IВ, а также с учетом той же дуальности для теорий O- и E-гетеротических струн можно построить до конца паутину взаимосвязей, как показано на рис. 12.10 пунктирными линиями. Видно, что все пять теорий, а также М-теория, дуальны друг другу. Все они скреплены в единую теоретическую конструкцию и дают пять разных подходов для описания одной и той же физики, лежащей в основе этой формулировки. Для различных приложений может быть более удобным язык той или иной теории. Например, с теорией O-гетеротических струн в случае слабой связи работать гораздо удобнее, чем с теорией струн типа I в случае сильной связи. Тем не менее эти теории описывают одни и те же физические явления.

## Общая панорама

Теперь становится более понятными рис. 12.1 и 12.2, приведенные в начале этой главы для иллюстрации важнейших черт теории. Как видно из рис. 12.1, до 1995 г., в отсутствие каких-либо сведений о дуальности, было пять не связанных между собой физиков. Над каждой из них работало много физиков, но без привлечения аргументов о дуальных свойствах эти теории казались различными.

У каждой теории был свой набор характеристик: своя константа связи, геометрическая структура, радиусы свернутых измерений и т. д. Физики напеялись (и продолжали петься) на то, что фундаментальные свойства должны определяться в рамках самой теории. Однако, не имея возможности приблизить их при помощи известных приближенных уравнений, теоретики, естественно, начали исследовать физические свойства во всех возможных диапазонах. Это показано на рис. 12.1, где каждая точка затуманенной области соответствует конкретному выбору константы связи и геометрии свернутых измерений. Без учета дуальности при этом все равно оставалось пять несвязанных (набор) теорий.

Но сейчас, когда рассмотрены выше дуальности учены, при изменении констант связи и геометрии можно переходить от одной теории к другой, если при этом включить в анализ и объединяющую их центральную область — М-теорию (рис. 12.2). И хотя наши познания в области М-теории охватывают лишь часть ее структуры, приведенные косвенные соображения, приведенные косвенные соображения, дают веские аргументы в пользу того, что М-теория является основой объединения пяти на первый взгляд различных теорий струн. Более того, выясняется, что М-теория тесно связана с шестой теорией — 11-мерной супергравитацией. Это отражено на рис. 12.11, более точном варианте рис. 12.11, несмотря на то, что сегодня фундаментальные идеи и уравнения М-теории еще мало исследованы, они объединяют все формулировки теорий струн. Могушественная М-теория ука-



Рис. 12.11. С учетом дуальностей все пять теорий струн, 11-мерная супергравитация и M-теория сливаются вместе в единую схему

зала физикам дорогу к новой и гораздо более глубокой единой формулировке.

## Сюрприз в M-теории: демократия в протяжении

Когда на территории одного из пяти полуостровов на теоретической карте рис. 12.11 константа связи струны мала, фундаментальный объект в этой теории выглядит как одномерная струна. Сейчас, однако, у нас появилась новая точка зрения. Если начать двигаться из области E-гетеротических струн или струн типа IIA, увеличивая значения соответствующих констант связи, то постепенно мы сместимся к центру карты рис. 12.11, и объекты, казавшиеся одномерными струнами, начнут вытягиваться, превращаясь в двумерные мембраны. Более того, в результате более сложной последовательности преобразований дуальности, включающих как изменения констант связи струн, так и изменения вида свернутых измерений, можно беспрепятственно перейти из любой точки на рис. 12.11 к любой другой ее точке. А так как двумерные мембраны, которые мы открыли, рассматривая E-гетеротические струны и струны типа IIA, нам будут сопутствовать при переходе к любой из трех других формулировок, мы приходим к выводу, что двумерные мембраны на самом деле при-

сущи любой из пяти формулировок теорий струн.

Возникают два вопроса. Во-первых, являются ли двумерные мембраны подиндо фундаментальными объектами теории струн? Во-вторых, если вспомнить о смелом прыжке от нульмерных точечных частиц к одномерным струнам в 1970-х и начале 1980-х гг. и учесть только что обсужденные результаты о существовании двумерных мембран в теории струн, возможно ли, что в теории присутствуют объекты старших размерностей? На момент написания этой книги точные ответы еще не известны, но ситуация, похоже, следующая.

Чтобы разобраться в каждой из формулировок теории струн, не прибегая к теории возмущений, теоретики во многом опирались на принципы суперсимметрии. В частности, характеристики БПС-состояний, массы и заряды частиц в этих состояниях, однозначно определяются суперсимметрией, и это позволило понять некоторые свойства теории в области сильной связи без необходимости проведения прямых вычислений невообразимой сложности. На самом деле, благодаря пионерским работам Хоравица и Строминджера, а также последующей замечательной работе Полинчински, о БПС-состояниях мы знаем даже больше. В частности, нам не только известны их заряды и массы, но и имеется ясное представление о том, как эти состояния выглядят. И последнее, возможно, самое удивительное. Некоторые из БПС-состояний — одномерные струны. Другие представляют собой двумерные мембраны. Пока все действующие лица знакомы. И вот — сюрприз: некоторые состояния *трехмерны, четырехмерны, ...* На самом деле диапазон возможных пространственных размерностей включает все значения до *десяти* включительно. Теория струн или теория, которую сейчас называют M-теорией (какое бы окончательное название ей ни дали), в действительности содержит протяженные объекты целого ряда пространственных измерений. Протяженные трехмерные объекты физики назвали 3-бранами, протяженные четырехмерные — 4-бранами, и так далее до 9-бран (в общем случае для протяженного объекта, имеющего  $p$  пространствен-

ных измерений, физики придумали не очень благозвучный термин  $p$ -брана). Иногда, используя эту терминологию, струны называют 1-бранами, а мембраны — 2-бранами. Тот факт, что все эти протяженные объекты являются равноправными объектами теории, побудил Пола Таунсенда провозгласить «демократию бран».

Несмотря на «демократию бран», струны, т.е. протяженные одномерные объекты, все-таки уникальны по следующей причине. Физики показали, что массы протяженных объектов любой размерности, кроме одномерных струн, *обратно* пропорциональны значению соответствующей константы связи струны, если мы работаем в рамках любой из пяти теорий струн на рис. 12.11. Это означает, что в пределе слабой связи во всех пяти формулировках все объекты, кроме струн, будут иметь огромные массы, на порядки превышающие планковскую. Поэтому из формулы  $E = mc^2$  следует, что для их рождения потребуются огромные энергии, и они будут оказывать ничтожное влияние на законы физики (но не на все, как будет показано в следующей главе). Однако если двигаться вглубь от полуостровов областей на рис. 12.11, то браны старших размерностей станут легче, и будут играть все более важную роль<sup>(4)</sup>.

Таким образом, следует представлять себе такое картину: в центральной области на рис. 12.11 фундаментальными объектами теории являются не только струны и мембраны, а «браны» различных размерностей, и все они более или менее равноправны. Сейчас у нас нет ясного понимания многих свойств этой богатой теории. Одно мы знаем твердо: при движении от центральной области в сторону любого из полуостровов только струны или свернутые мембраны в отличие струн (рис. 12.7 и 12.8) оказываются достаточно легкими, чтобы сохраниться и привести к известной нам физике — частям из табл. 1.1 и четырем типам взаимодействий. Подход теории возмущений, который физики использовали почти два десятилетия, был недостаточно гибок для того, чтобы выявить существование протяженных объектов огромной массы и других размерностей. Центральным объектом анализа были струны, и теория получила далеко не де-

мократическое название теории струн. Отметим еще раз, что в этих областях рис. 12.11 для большинства исследований можно с полным основанием пренебречь всеми объектами, кроме струн. По существу, в предыдущих главах этой книги мы так и поступали. Однако сейчас мы видим, что теория оказалась в действительности богаче, чем кто-либо ранее предполагал.

## Помогает ли это в неразрешенных вопросах теории струн?

И да, и нет. Нам удалось достичь более глубокого понимания, освободившись от некоторых выводов, которые, как стало ясно теперь, были следствиями использования теории возмущений, а не истинных принципов теории струн. Однако в настоящее время методы, позволяющие работать вне рамок теории возмущений, весьма ограничены. Открытие замечательной системы дуальных связей позволяет глубже постичь теорию струн, но многие вопросы остаются неразрешенными. Например, мы еще не знаем, как выйти за рамки приближенных уравнений для определения значения константы связи струны. Как обсуждалось выше, эти уравнения слишком грубые, чтобы из них можно было извлечь хоть какую-то полезную информацию. Нет у нас и существенного продвижений по вопросам о том, почему протяженные пространственных измерений именно три или каким должен быть точный вид многообразия для свернутых измерений. Для ответа на эти вопросы нужны более отточенные инструменты исследований вне рамок теории возмущений, чем те, которыми мы сегодня обладаем.

То, что действительно появилось, — это гораздо более глубокое понимание диапозона теории струн. До открытия, итог которого подведен на рис. 12.11, поведение каждой теории струн в области сильной связи было полной загадкой. Как на средневековых картах, царство сильной связи было фантомным пятном, на которое, сооразно бытази картографа, наносились изображения

драконов и морских чудовищ. Но сейчас мы видим, что хотя путешествие в это царство может завести нас в неизведанные просторы М-теории, в конце концов мы снова выйдем в курортную зону слабой связи, где говорят на дуальном языке другой теории струн, ранее считавшейся совершенно непохожей.

Дуальность и М-теория объединяют пять теорий струн, подталкивая к важному выводу. Может оказаться и так, что нас больше не поджидают удивительные открытия, сравнимые с описанными выше. Как только картограф обозначил все точки на глобусе Земли, глобус готов, и география исчерпана. Это не означает, что разведка местности в Антарктиде или на необитаемых островах в Микронезии лишены всякой научной или культурной ценности. Это означает лишь, что век географических открытий подошел к концу. И свидетельством тому — отсутствие белых пятен на карте. «Теоретическая карта» на рис. 12.11 имеет для теоретиков, занимающихся струнами, такое же значение. Она покрывает все сферы теории, в которые можно попасть, отправляясь из области любой из пяти формулировок струн. И хотя нам далеко до полного понимания неизведанной М-теории, на карте нет белых

пятен. Как и картограф, теоретик может теперь со сдержанным оптимизмом заявить, что весь спектр логически обоснованных теорий, вбирающих в себя все важные открытия прошлого века — специальную и общую теории относительности, квантовую механику, калибровочные теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, суперсимметрию, дополнительные измерения Калуцы и Клейна, — уже нанесен на карту рис. 12.11.

Задача струнного теоретика (возможно, его уже нужно называть М-теоретиком) — показать, что *некая* точка на теоретической карте рис. 12.11 действительно описывает нашу Вселенную. Чтобы осуществить это, нужно найти исчерпывающие и точные уравнения, решения которых позволили бы поймать эту неуловимую точку на карте, а затем добиться понимания соответствующих физических явлений, достаточного для сравнения с экспериментом. По словам Витена, «понимание того, чем в действительности является М-теория, т. е. какую физику она несет в себе, повлияет на наше понимание природы не менее сильно, чем любое из главных научных потрясений прошлого»<sup>15</sup>. В этом суть программы построения объединенной теории в XXI в.

## Глава 13

### Черные дыры с точки зрения теории струн и М-теории

Противоречия между общей теорией относительности и квантовой теорией, существовавшие до эры теории струн, были оскорблением наших врожденных эстетических представлений о том, что законы природы должны складываться в безупречно стройную и целостную систему. Но суть этих противоречий не сводилась к вопиющему несоответствию абстрактных принципов. Существовавшие в момент Большого взрыва и существующие сейчас внутри черных дыр экстремальные физические условия *нельзя* объяснить без помощи квантовой формулировки гравитационного взаимодействия. С появлением теории струн появилась и надежда устранить глубокий антагонизм между квантовой теорией и гравитацией. В этой и следующей главах мы опишем, насколько далеко удалось продвинуться физикам в понимании черных дыр и проблемы происхождения Вселенной.

#### Черные дыры и элементарные частицы

С первого взгляда трудно себе представить два более разобщенных понятия, чем черные дыры и элементарные частицы. Обычно мы представляем себе черные дыры самыми непредставимыми из небесных тел, а элементарные частицы — самыми незаметными частицами материи. Однако исследования конца 1960-х и начала 1970-х гг., включая работы Деметриоса Христодулу, Вернера Израэля, Ричарда Прайса, Брендона Картера, Роя Керра, Дэвида Робинсона, Хокинга и Пенроуза, показали, что, возможно, черные дыры и элементарные частицы не так уж и различны,

как это может показаться. Эти физики обнаружили весьма веские свидетельства в пользу того, что Джон Уилер суммировал фразой: «У черных дыр нет волос». Уилер имел в виду, что за вычетом небольшого числа отличительных особенностей все черные дыры выглядят одинаково. Какие же это отличительные особенности? Первая, конечно, это масса черной дыры. А остальные? Исследования показали, что ими являются электрический заряд и некоторые другие возможные заряды, а также ее скорость вращения. И это все. Любые две черные дыры с одинаковыми массами, зарядами и спинами совершенно идентичны. У черных дыр нет модных «причесок», т. е. других присущих им свойств, по которым одну из них можно было бы отличить от другой. Для физика этот факт — удары в набат. Вспомним, что именно эти удары в набат — массой, зарядом и спином свойствами — массой, зарядом и спином — отличаются друг от друга элементарные частицы. Схожесть определяющих характеристик неоднократно приводила некоторых физиков к мысли о том, что черные дыры, в действительности, могут быть гигантскими элементарными частицами.

Действительно, в теории Эйнштейна не существует ограничений на минимальную массу черной дыры. Согласно теории относительности, если сжать кусок вещества любой массы до достаточно малых размеров, то он превратится в черную дыру (чем меньше масса, тем сильнее его нужно славлять). Можно придумать мысленный эксперимент, в котором берутся сгустки материи все меньшей массы, эти сгустки сжимаются до черепных дыр все меньших размеров и свойства таких черных дыр сравниваются со свойствами элементарных частиц. Из утверждения Уилера об отсутствии волос можно следя-

даться вывод о том, что образованные таким способом черные дыры будут очень похожи на элементарные частицы. И те и другие выглядят как мельчайшие сгустки материи, полностью характеризующиеся массой, зарядом и спинами.

Однако есть небольшая загвоздка. Черные дыры во Вселенной, массы которых во много раз больше массы Солнца, так велики и тяжелы, что для описания их свойств не нужна квантовая механика, и вполне достаточно уравнений общей теории относительности. (Здесь обсуждается общая структура черной дыры, а не область сингулярности внутри нее. Ввиду крошечных размеров этой области, здесь, несомненно, потребуются квантово-механическое описание.) Но размеры черных дыр уменьшаются по мере уменьшения их масс в нашем мысленном эксперименте, и в какой-то момент квантовая механика *начинает* играть роль. Это происходит, когда масса черной дыры становится порядка планковской. (С точки зрения физики элементарных частиц планковская масса велика и равна примерно  $10^{19}$  массы протона, но с точки зрения физики черных дыр эта масса крайне мала.) Поэтому физики, рассуждавшие о возможном близком родстве между элементарными частицами и черными дырами, сразу же наткнулись на несовместимость квантовой теории с теорией относительности, лежащей в основе описания черных дыр. В прошлом эта несовместимость парализовала продвижение теоретиков в таком захватывающе интересном направлении.

## Позволяет ли теория струн продвигаться вперед?

Да. Совершенно неожиданный и весьма утонченный подход к изучению черных дыр в рамках теории струн начинает давать первые теоретические обоснования взаимосвязи между черными дырами и элементарными частицами. Дорога к установлению этой взаимосвязи не всегда прямая, но она проходит по просторам ярких открытий в теории струн, и путешествие по ней не будет скучным.

В качестве отправной точки рассмотрим похоже совсем несвязанный вопрос, который теоретики долбили со всех сторон с конца 1980-х гг. Математикам и физикам было давно известно, что при свертывании шести пространственных измерений в многообразии Калаби—Яу существует два типа сфер, вложенных в структуру пространства. Сферы первого типа двумерны и похожи на поверхность надувного мяча. Они играли большую роль в обсуждении флоп-перестроек с разрывом пространства в главе 11. Другие сферы представить сложнее, но они встречаются столь же часто. Это *трехмерные* сферы, подобные поверхностям надувных мячей, в которые играют на песчаных океанских пляжах во вселенной с *четырьмя* протяженными пространственными измерениями. Обычный же надувной мяч, естественно, является трехмерным, и только его *поверхность*, как и поверхность Салового шланга, имеет два измерения. Любую точку на этой поверхности можно задать с помощью двух координат, например широты и долготы. Но сейчас мы хотим представить себе еще одно измерение, так что мяч окажется четырехмерным, а его поверхность — трехмерной. А так как представить это визуально почти невозможно, мы, как правило, будем прибегать к наглядной аналогии в случае меньшего числа измерений. Однако, как мы сейчас увидим, одна черта трехмерной природы сферических поверхностей имеет важнейшее значение.

Изучая уравнения теории струн, физики осознали возможность и даже высокую вероятность того, что в процессе эволюции во времени эти трехмерные сферы могут стягиваться, коллапсировать до исчезающе малых размеров. Но что произойдет, задался вопросом физики, если и структура пространства будет стягиваться аналогичным образом? Не приведет ли такое сжатие пространства к какому-нибудь катастрофическим эффектам? Подобный вопрос уже ставился и был решен нами в главе 11, но там рассматривался только коллапс двумерных сфер, а сейчас наше внимание сосредоточено на изучении трехмерных сфер. (Так же, как и в главе 11, поскольку стягивается лишь часть многообразия Калаби—Яу, а не все пространство, то аргументы главы 10, по-

звolyющие отождествить малые и большие радиусы, неприменимы.) И вот в чем состоит качественное отличие, связанное с изменением числа измерений<sup>1)</sup>. Как описывалось в главе 11, важнейшим свойством движущихся струн является их способность экранировать двумерные сферы. Иными словами, двумерная мировая поверхность струны может целиком окружить двумерную сферу, как показано на рис. 11.6. Этого оказывается достаточно для защиты от катастрофических последствий, возможных при коллапсе двумерной сферы. Но сейчас мы рассматриваем другой тип сфер в пространстве Калаби—Яу, и у этих сфер слишком много измерений, чтобы движущаяся струна могла их окружить. Если понимание последнего утверждения вызывает у читателя сложности, можно без проблем рассмотреть аналогию с числом размерностей на единицу меньше. Трехмерные сферы можно представить себе в виде двумерных поверхностей надувного мяча, если при этом одномерные струны рассматривать в качестве нульмерных точечных частиц. Ясно, что нульмерная точечная частица не сможет окружить двумерную сферу, поэтому одномерная струна не сможет опоясать трехмерную сферу.

Похожие рассуждения привели теоретиков к выводу, что при коллапсе трехмерной сферы внутри пространства Калаби—Яу (который вполне допускается приближенными уравнениями, если вообще не является явным явлением в теории струн) возможны катастрофические последствия. Действительно, из известных к середине 1990-х гг. приближенных уравнений теории струн, казалось бы, следовало, что если такой коллапс случится, Вселенной придет конец: некоторые расходимости, которые сокращаются в теории струн, в случае подобного перетягивания структуры пространства перестанут сокращаться. Несколько лет физикам приходилось мириться с этим неприятным, хотя и не окончательно установленным фактом. Но в 1995 г. Эндрю Строминджер показал, что подобные предказания неверны, и конец света еще далек.

Строминджер, следуя более ранней потрясающей работе Виттена и Зайберга, описывая на то, что теория струн в свете новых

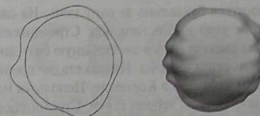


Рис. 13.1. Струна может обернуть одномерный свернутый элемент пространства, а двумерной мембраной можно обернуть двумерный объект

открытий, сделанных во время второй революции в теории суперструн, не есть лишь теория одномерных струн. Он рассуждал так. Одномерная струна, т. е. 1-брана на новом языке теоретиков, может полностью окружить одномерный пространственный объект, например изображенную на рис. 13.1 окружность. (Отметим различие с рис. 11.6, где одномерная движущаяся во времени струна опоясывала двумерную сферу. Рис. 13.1 можно рассматривать в качестве мгновенной фотографии.) Аналогично, на рис. 13.1 видно, что двумерная мембрана, т. е. 2-брана, может обернуть и полностью покрыть собой двумерную сферу, подобно тому, как полиэтиленовая пленка плотно обертывает поверхность апельсина. По аналогии Строминджер предположил, что открытые недавно трехмерные объекты теории струн, т. е. 3-браны, могут окутывать и полностью покрывать собой трехмерные сферы, хотя это и сложно представить себе наглядно. Ясно ощутив эту аналогию и выполнив простые стандартные расчеты, Строминджер показал, что 3-брана является как на заказ скроенным экраном, в точности компенсирующим потенциальное катастрофические последствия возможного коллапса трехмерной сферы, которых так боялся физики.

Это был прекрасный и важный результат. Но вся его сила открылась лишь некоторое время спустя.

## Убедленно разрывая ткань пространства

У физики есть одна захватывающая особенность: уровень понимания этой науки может

измениться буквально за одну ночь. На следующее утро после того, как Строминджер послал свою статью в электронную базу данных, я скачал ее из Интернета и прочел в своем кабинете в Корнелле. Используя новые достижения теории струн, Строминджер одним махом разрешил считавшийся одним из самых запутанных вопросов о свертывании лишней измерений в пространстве Калаби—Яу. Но после того как я разобрался в статье, мне пришлось в голову, что он, возможно, раскрыл лишь половину того, что могло стоять за этой проблемой.

В описанной в главе 11 более ранней работе о флор-перестройках с разрывом пространства мы исследовали двухватный процесс, в котором двумерная сфера стягивается в точку, приводя к разрыву структуры пространства, а затем раздувается по другим законам, приводя к восстановлению этой структуры. В своей статье Строминджер исследовал, что происходит при сжатии в точку трехмерной сферы, он показал, что благодаря открытым недавно протяженным объектам в теории струн физические свойства остаются хорошо определенными. И на этом его работа заканчивалась. Но нельзя ли исследовать второй этап, включающий, как и ранее, разрыв пространства и его последующее восстановление путем раздутия сферы?

Во время весеннего семестра 1995 г. у меня в Корнелле гостил Дейв Моррисон, и в тот день мы встретились, чтобы обсудить статью Строминджера. Через пару часов нам в общих чертах уже было понятно, что представляет собой второй этап. Вспомнив как Канделас, Грин и Тристан Хюбш (в то время работавший в Техасском университете в Остине) использовали некоторые результаты конца 1980-х гг., полученные математиком Гербом Клемменсом из университета штата Юта, Робертом Фриломандом из Колумбийского университета и Майлсом Рейдом из университета в Уорнике, мы поняли, что при коллапсе трехмерной сферы возможен разрыв пространства Калаби—Яу и его последующее восстановление при повторном раздутии сферы. Но здесь нас ожидал сюрприз. Коллапсирующая сфера имела три измерения, а раздувающаяся — всего лишь два. Сложно описать, как это выглядит, но можно

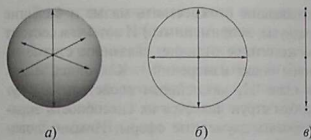


Рис. 13.2. Сферы разных размерностей, допускающих наглядное изображение: а) двумерная, б) одномерная, в) нульмерная

предлюстрировать идею, пользуясь аналогией с меньшим числом измерений. Вместо того чтобы пытаться представить коллапс трехмерной сферы и ее замещение двумерной сферой, представим себе коллапс одномерной сферы и ее замещение нульмерной.

Прежде всего, что такое одномерная или нульмерная сфера? Будем рассуждать по аналогии. Двумерная сфера — это совокупность точек трехмерного пространства, расположенных на одинаковых расстояниях от выбранного центра, как показано на рис. 13.2а. По аналогии с этим, одномерная сфера есть совокупность точек двумерного пространства (например, поверхности этой страницы), расположенных на одинаковых расстояниях от выбранного центра. Как показано на рис. 13.2б, это просто окружность. Наконец, согласно той же аналогии нульмерная сфера есть совокупность точек одномерного пространства (прямой линии), расположенных на одинаковых расстояниях от общего центра. Таким образом, аналогия с меньшим числом измерений, упоминавшаяся в предыдущем параграфе, приводит к окружности (одномерной сфере), которая стягивается, затем происходит разрыв пространства, и окружность замещается нульмерной сферой (двумя точками). На рис. 13.3 иллюстрируется конкретная реализация этой абстрактной идеи.

Предположим, что сначала имеется поверхность тора (баранки), в которую вложена одномерная сфера (окружность) — она выделена на рис. 13.3. Теперь представим, что с течением времени эта окружность стягивается, и структура пространства рвется. Можно восстановить пространство, позволив ему разорваться лишь на мгновение и заменив



Рис. 13.3. Окружность в обхвате баранки (тора) коллапсирует в точку. Поверхность рвется, и образуются два прокола. В них «вклеивается» нульмерная сфера (две точки), которая замещает исходную одномерную сферу (окружность) и восстанавливает порванную поверхность. При этом становится возможным преобразование в фигуру совершенно иной формы — надувной мяч

сжатую одномерную сферу (стянутую окружность) нульмерной сферой — двумя точками, затыкающими отверстия в верхней и нижней части образовавшейся после разрыва фигуры. Как показано на рис. 13.3, в результате получится фигура, похожая на кривой банан, которую затем можно постепенно и глагоко (без разрывов пространства) продеформировать в поверхность надувного мяча. В итоге мы видим, что при коллапсе одномерной сферы и замещении ее нульмерной топология исходного тора, т. е. его фундаментальная форма, радикально изменяется. В контексте свернутых пространственных измерений эволюция с разрывом пространства, изображенная на рис. 13.3, привела бы вселенную, показанную на рис. 8.8, к виду на рис. 8.7.

И хотя все это лишь аналогия с меньшим числом измерений, здесь улавливаются основные идеи нашей с Моррисоном гипотезы о втором этапе, продолжающем исследование Строминджера. Нам казалось, что после коллапса трехмерной сферы внутри пространства Калаби—Яу пространство должно разорваться, а затем само собой восстановиться путем отращивания двумерной сферы, приводя к гораздо более серьезным изменениям топологии, чем те, которые Виттен и мы обнаружили в наших предыдущих работах (см. главу 11). При этом одно многообразие Калаби—Яу может, по существу, превратиться в сферу на рис. 13.3), но физические характеристики будут по-прежнему хорошо определены. Хотя картина начала вырисовываться, мы знали, что потребуется проработать некоторые важные моменты до того, как можно будет заявить о том, что на нашем втором этапе не возникают сингулярности, т. е. пагубные и непримлемые для физики последствия. В тот вечер мы оба отравились

домой в приподнятом настроении, ощущая близость нового важного результата.

## Шквал электронной почты

На следующее утро я получил по электронной почте письмо от Строминджера, спрашивавшего о моей реакции на его статью. Он упоминал, что эта статья «должна быть как то связана с Вашей работой вместе с Аспиномоллом и Моррисоном». Как выяснилось, он тоже исследовал возможную связь с эффектом изменения топологии. Я немедленно написал ему, очертив грубую схему, к которой мы с Моррисоном пришли накануне. Его ответ показал, что он возбужден не меньше, чем мы с Моррисоном после вчерашней встречи.

На протяжении следующих нескольких дней между нами троем циркулировал непрерывный поток электронной почты: мы лихорадочно пытались строго на цифрах обосновать идею о радикальном изменении топологии при разрыве пространства. Медленно, но верно, все вставало на свои места. К следующей среде, через неделю после того, как Строминджер опубликовал свой результат в Интернете, у нас был набросок совместной статьи, в котором описывалось новое поразительное преобразование структуры пространства после коллапса трехмерной сферы.

На следующий день у Строминджера был запланирован доклад на семинаре в Гарварде, и рано утром он вылетел из Санта-Барбары. Мы договорились, что Моррисон и я будем оттачивать последние детали нашей статьи к вечеру пошлем ее в электронный архив. К 23:45 я проверил и перепроверил все наши 23:45 я проверил и отправился в корпус этому я отослал статью и отправился в корпус физики. Пока мы с Моррисоном шли к машине (я собирался подбросить его до дома,

который он снял до конца семестра), наш разговор перешел в спор, в котором мы сами для себя играли роль критиков, изо всех сил пытающихся доказать, что наши результаты неверны. Пока мы вырвали со стоек и выезжали с территории университета, мы поняли, что при всей силе и убедительности нашей аргументации, оно не является совершенно пуленепробиваемой. Никто из нас не сомневался, что работа безосновочна, но нам пришлось признать, что сила наших доводов и отдельные выбранные нами словесные формулировки в некоторых местах статьи могут дать повод для яростных споров, завуалировав важность полученных результатов. Мы сошлись на том, что при подготовке статьи следует придерживаться более скромной позиции и снизить напор наших доводов: это позволило бы физикам самим оценить достоинства статьи, не втягиваясь в возможные дискуссии по поводу того, в какой форме наши результаты представлены.

По дороге Моррисон напомнил мне, что по правилам электронного архива мы можем редактировать статью до двух ночи, после чего она будет выложена для общего доступа. Я немедленно повернул машину, и мы помчался обратно в корпус физики. Мы забрали первоначальный вариант статьи и стали думать о том, как смягчить ее стиль. К счастью, все было довольно просто. Замена нескольких слов в особо ответственных параграфах сгладила резкие углы нашей аргументации без ущерба для содержания работы. Через час мы отослали статью снова и договорились не упоминать о ней всю дорогу до дома Моррисона.

Еще до полуночи следующего дня стало ясно, что реакция на статью весьма активная. Среди многих ответов по электронной почте было и письмо Плессера. В нем содержалась наивысшая похвала, которой один физик может удостоить другого: «Как жаль, что эта мысль пришла в голову не мне!». Несмотря на наши опасения предыдущей ночи, нам удалось убедить сообщество физиков в том, что структура пространства может подвергаться не только открытым ранее измеренным разрывам (см. главу 11), но и гораздо более сильным, изображенным на рис. 13.3.

## Снова о черных дырах и элементарных частицах

Есть ли у всего этого какая-нибудь связь с черными дырами и элементарными частицами? Таких связей множество. Чтобы это понять, нужно залезть тем же вопросом, что и в главе 11. К каким наблюдаемым следствиям приведут такие разрывы структуры пространства? Для флорп-перестроек, обсуждавшихся выше, неожиданно оказывается, что нет практически никаких наблюдаемых последствий. В случае *конифолдных переходов* — такое название мы дали недавно переходам с сильным разрывом пространства, — как и ранее, не происходит никакой физической катастрофы (она случилась бы в традиционной теории относительности), но здесь имеется больше ярко выраженных наблюдаемых последствий.

Наблюдаемые последствия основаны на двух связанных идеях. Рассмотрим их по очереди. Во-первых, как обсуждалось выше, суть исходной работы Строминджера состояла в открытии того, что трехмерная сфера внутри пространства Калаби—Яу может коллпировать без возникновения катастрофы, так как обертывающая ее 3-брана служит надежным защитным экраном. Но как выглядит эта конструкция с обертнутой поверхностью 3-браной? Ответ дает более ранняя работа Хоровица и Строминджера, в которой показано, что для существ типа нас с вами, органов чувств которых прямо доступны лишь три развернутых пространственных измерения, «оборачивающиеся» вокруг трехмерной сферы 3-браны престанут в виде гравитационного поля средины полю черной дыры<sup>2</sup>). Этот факт не очевиден, и становится ясно только после тщательного изучения описывающих браны уравнений. Здесь, как и выше, сложно изобразить многомерную конфигурацию на двумерном рисунке, но примерное представление по аналогии с двумерными сферами можно получить из рис. 13.4. Видно, что двумерная мембрана может обертнуться вокруг двумерной сферы (которая сама покоится внутри пространства Калаби—Яу, находящегося в некоторой точке пространства развернутых измерений).

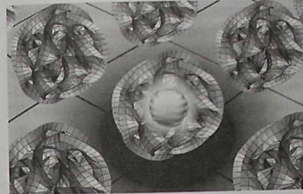


Рис. 13.4. Когда брана обертывает сферу, покоящуюся в свернутых измерениях, она выглядит как черная дыра в обычных пространственных измерениях

Некто, наблюдающий эту точку сквозь развернутые измерения, почувствует брану по ее массе и заряду, и, как показали Хоровиц и Строминджер, судя по этим характеристикам, сможет сделать вывод, что перед ним черная дыра. Кроме того, в основополагающей работе 1995 г. Строминджер показал, что масса 3-браны, т. е. масса черной дыры, пропорциональна объему трехмерной сферы, которую она обертывает. Чем больше объем сферы, тем больше должна быть обертывающая ее 3-брана, и тем больше ее масса. Аналогично, чем меньше объем сферы, тем меньше масса обертывающей ее 3-браны. По мере сжатия сферы обертывающая ее 3-брана, которая выглядит, как черная дыра, становится легче. В момент, когда трехмерная сфера стягивается в точку, соответствующая черная дыра (собирается с духом!) становится безмассовой. На первый взгляд, это совершенно непостижимо (что это еще за *безмассовая* черная дыра?), но чуть ниже мы свежем этот загадочный феномен со знакомой физикой струн.

Во-вторых, напомним, что, как обсуждалось в главе 9, число отверстий многообразия Калаби—Яу определяет число низкоэнергетических (а, следовательно, имеющих малую массу) колебательных мод струны, которыми могут описываться перечисленные в табл. 1.1 частицы, а также типы взаимодействий. Но так как при конифолдных переходах с разрывом пространства число отверстий меняется (например, как на рис. 13.3, где отверстие тора исчезло в процессе разрыва/восстановления), можно ожидать и изме-

нения числа колебательных мод малой массы. Действительно, после того, как Моррисон, Строминджер и я тщательно изучили этот вопрос, мы обнаружили, что при замещении сжимающейся трехмерной сферы в свернутых измерениях Калаби—Яу двумерной сферой число безмассовых колебательных мод струны возрастает ровно на единицу. (Пример, приведенный на рис. 13.3, где баранка превращается в мяч, может создать ложную иллюзию, что число отверстий, а, следовательно, и число мод, уменьшается. На самом деле, это артефакт маломерной аналогии.)

Чтобы связать идею, описанную в двух предыдущих параграфах, представим себе последовательность снимков пространства Калаби—Яу при постепенном уменьшении размера некоторой сдвинутой внутри трехмерной сферы. Из первой идеи следует, что масса 3-браны, обертывающей трехмерную сферу и кажущейся нам черной дырой, будет уменьшаться и станет равной нулю в момент коллапса. Теперь, пользуясь второй идеей, мы можем ответить на поставленный выше вопрос о том, что означает обращение массы в ноль. Согласно нашей работе, новая безмассовая колебательная мода струны, возникающая при конифолдном переходе с разрывом пространства, на *микроскопических масштабах описывает безмассовую частицу, в которую превращается черная дыра*. Вывод такой: при эволюции многообразия Калаби—Яу, сопровождающейся конифолдным переходом с разрывом пространства, изначально ненулевая масса черной дыры уменьшается до нуля, после чего черная дыра превращается в безмассовую частицу (подобную фотону), которая на языке теории струн описывается определенной колебательной модой струны. Таким образом, в теории струн впервые удается установить прямую, точную и количественно непроверяемую связь между черными дырами и элементарными частицами.

## «Таяние» черных дыр

Найдена связь между черными дырами и элементарными частицами по своей природе близка классу явлений, которые мы

наблюдаем в повседневной жизни, и которые в физике называют фазовыми переходами. Простой пример фазового перехода упоминался в предыдущей главе: вода может существовать в твердом состоянии (лед), в жидком состоянии (жидкая вода) или в газообразном состоянии (пар). Эти состояния называют фазами воды, а превращения из одного состояния в другое — *фазовыми переходами*. Моррисон, Строминджер и я показали, что между фазовыми переходами и конifoldными переходами многообразий Калаби—Яу существует тесная математическая и физическая связь. Так же, как не видевшее жидкой воды или твердого льда существо не поймет, что перед ним две фазы одного вещества, физики ранее не понимали, что изучавшие ими черные дыры и элементарные частицы являются двумя фазами одной струнной материи. Подобно тому, как температура определяет фазу, в которой при нормальном давлении находится вода, топологический вид дополнительных измерений Калаби—Яу определяет то, в каком облике предстанут перед нами определенные физические конфигурации в теории струн: как черные дыры или как элементарные частицы. В первой фазе — исходное многообразие Калаби—Яу (для определенности, аналог льда) — будет обнаружено присутствие черных дыр. Во второй фазе — другое многообразие Калаби—Яу (аналог воды) — черные дыры подверглись фазовому переходу, «растаяли», и перешли в фундаментальные колебательные моды струны. Разрыв пространства при конifoldных переходах переводит многообразие Калаби—Яу из одной фазы в другую. Так что черные дыры и элементарные частицы, как вода и лед, являются двумя сторонами одной монеты. Мы видим, что черные дыры хорошо вписываются в формализм теории струн.

Для кардинальных переходов с разрывом пространства и для переходов от одной из пяти формулировок теории струн к другой (см. главу 12) умышленно использовалась одна и та же аналогия с водой, так как эти переходы тесно связаны. Вспомним (см. рис. 12.11), что пять теорий струн дуальны друг другу и, следовательно, объединены под эгидой охватывающей их единой теории.

Но сохранится ли возможность непрерывного перехода от одного описания к другому, т. е. возможность попасть в любую точку карты рис. 12.11 из любой другой, и после того, как мы будем свертывать лишние измерения в разные многообразия Калаби—Яу? До открытия переходов с кардинальным изменением топологии ожидаемый ответ был отрицательным, так как до этого открытия не было известно, как деформировать одно многообразие Калаби—Яу в другое. Однако сейчас мы видим, что ответ положительный. Путем физически допустимых конifoldных переходов с разрывом пространства можно непрерывно преобразовать любое заданное многообразие Калаби—Яу в любое другое. Все струнные модели, полученные изменениями константы связи и геометрии пространства Калаби—Яу, будут разными фазами единой теории. Целостность схемы рис. 12.11 сохранится даже после свертывания всех дополнительных измерений.

## Энтропия черной дыры

Многие годы самые лучшие специалисты в области теоретической физики рассуждали о возможности процессов с разрывом пространства и о связи между черными дырами и элементарными частицами. Хотя ранее такие рассуждения могли казаться научной фантастикой, открытие теории струн, в результате которого стало возможным объединение общей теории относительности и квантовой теории, позволило уверенно выдвинуть эти вопросы на передний край современной науки. Успехи теории струн вдохновляют на исследование вопроса о том, не могут ли и другие таинственные свойства Вселенной, десятилетиями не поддававшиеся решению, уступить натиску всемогущей теории струн? Важнейшим из этих свойств является *энтропия черной дыры*. Именно в области изучения энтропии черной дыры теория струн наиболее выразительно продемонстрировала свою гибкость и дала возможность разрешить важнейшую проблему, поставленную еще четверть века назад.

Энтропия — это мера беспорядка или хаотичности. Например, если рабочее ме-

сто завалено открытыми книгами, недочитанными статьями, старыми газетами и еще не попишными в мусорное ведро рекламными проспектами, то степень его беспорядка велика, и оно имеет *высокую энтропию*. И наоборот, если статьи рассортированы по темам в разные папки, газеты аккуратно разложены по номерам, книги расставлены по алфавиту, а все ручки и карандаши стоят в своих подставках, то рабочее место находится в хорошем порядке, и имеет *низкую энтропию*. Этот пример иллюстрирует суть понятия энтропии, однако ученые дали ей строгое количественное определение, позволяющее описывать энтропию тел с помощью численных значений. Чем больше численное значение, тем больше энтропия, и наоборот. Хотя подробности вычислений не очень просты, это число, грубо говоря, равно числу всевозможных перегруппировок элементов данной физической системы, при которых ее общий вид не изменяется. Если рабочее место прибрано, то почти всякая перестановка — изменение порядка газет, книг, статей, или перемещение ручки из держателя на стол — приведет к нарушению порядка. С другой стороны, если на рабочем месте беспорядок, то при множестве вариантов перекладывания газет, статей и т. д. беспорядок так и останется беспорядком, и общий вид рабочего места не изменится. Поэтому в последнем случае энтропия велика.

Конечно, примеру перегруппировки предметов на рабочем месте с его нечетким определением того, какие именно перегруппировки «не изменяют общий вид», не достает научной точности. На самом деле, в строгом определении энтропии рассматриваются микроскопические квантово-механические параметры, описывающие элементарные физические составные части системы, и для этих параметров вычисляется число возможных перегруппировок, при которых итоговые макроскопические параметры (например, энергия или температура) не изменяются. Детали несущественны, если понятен факт, что квантово-механическая энтропия является строгим понятием, позволяющим точно измерять общий беспорядок в физических системах.

В 1970 г. Якоб Бекенштейн, в то время учившийся в аспирантуре Принстонского университета у Джона Уилера, сделал смелое предположение. Он выдвинул замечательную идею о том, что черные дыры обладают энтропией, которая очень велика. Бекенштейн опирался на общепризнанное и хорошо проверенное *второе начало термодинамики*, согласно которому энтропия системы постоянно растет. Все движется в направлении еще большего беспорядка. Даже если физик сделает, наконец, уборку своего рабочего места, уменьшив энтропию, полная энтропия, в которую входит энтропия самого физика и энтропия воздуха в комнате, увеличится. Действительно, на уборку рабочего места уходит энергия, и эта энергия вырабатывается внутри тела физика при расщеплении молекул в упорядоченных жировых складках тела, перехода в мускульную силу. Кроме того, при уборке его тело отдает теплоту, и окружающие молекулы воздуха увеличивают скорость, приводя к увеличению беспорядка. Если учесть все подобные эффекты, они с лихвой компенсируют уменьшение энтропии рабочего места, так что полная энтропия возрастет.

Но что произойдет, рассуждал далее Бекенштейн, если сделать уборку рабочего места вблизи горизонта событий черной дыры и откачать насосом все разогнанные молекулы, образовавшиеся во время уборки, в бездонный омут черной дыры? Можно поступить еще более радикально: откачать вместе воздух, все содержимое рабочего стола вместе со столом, да и самого бедного физика, оставив пустую, зато идеально прибранную комнату. Так как очевидно, что энтропия в комнате уменьшится, Бекенштейн пришел к выводу, что второе начало термодинамики не будет нарушено лишь в случае, если и у черной дыры тоже есть энтропия, а энтропия постоянно растет по мере засасывания в черную дыру материи, компенсируя наблюдаемое уменьшение энтропии снаружи черной дыры.

На самом деле Бекенштейн для усиления своей аргументации удалось даже привлечь знаменитый результат Стивена Хокинга, который показал, что площадь горизонта событий черной дыры, т. е. площадь по-





## Ваш выход, теория струн!

Но так было до конца 1996 г., пока Строминджер и Вафа, опираясь на более ранние результаты Сасскина и Сена, не написали работу «Микроскопическая природа энтропии Бекенштейна и Хокинга», появившаяся в электронном архиве статей по физике. В этой работе Строминджер и Вафа удалось использовать теорию струн для нахождения микроскопических компонентов определенного класса черных дыр, а также для точного вычисления вкладов этих компонентов в энтропию. Работа была основана на применении нового метода, частично выходящего за рамки теории возмущений, которую использовали в 1980-х и в начале 1990-х гг. Результат работы в точности совпал с предсказаниями Бекенштейна и Хокинга и наносил последние штрихи на картину, начатую более двадцати лет назад.

Строминджер и Вафа сосредоточили внимание на так называемых *экстремальных* черных дырах. Такие черные дыры наделены зарядом (можно считать его электрическим зарядом) и, кроме того, имеют наименьшую возможную массу, совместимую с этим зарядом. Как видно из приведенного определения, подобные черные дыры тесно связаны с рассмотренными в главе 12 БПС-состояниями. И Строминджер с Вафой выжили из этой связи все, что могли. Они проделомонстрировали, что можно построить (теоретически, разумеется) экстремальные черные дыры, если выбрать конкретный набор БПС-бран (определенных размерности), а затем связать эти браны, действуя по точной математической схеме. Строминджер и Вафа показали, что подобно тому, как можно построить (еще раз, теоретически!) атом, если взять набор кварков и электронов, а затем точно сгруппировать их в протоны и нейтроны с вращающимися по орбитам электронами, некоторые из недавно обнаруженных компонентов теории струн можно слепить вместе и получить определенные черные дыры.

В реальном мире образование черных дыр является только одним из возможных вариантов гибели звезд. После того, как за миллиарды лет ядерного синтеза звезда сжигает весь запас ядерного топлива, она

оказывается неспособной далее компенсировать сжимающую громадную силу гравитации направленным наружу давлением. Для широкого класса условий это приводит к катастрофическому взрыву огромной массы звезды: под действием собственной силы тяжести она коллапсирует, образуя черную дыру. Реальным процессам образования черных дыр Строминджер и Вафа противопоставили «конструктивный» подход. Они изменили точку зрения на образование черных дыр, показав, что их можно конструировать (в воображении теоретика) по строгому набору правил — путем кропотливой, неспешной и дотошной сборки в один механизм точного набора бран, открытых во время второй революции в теории суперструн.

Сила этого подхода сразу стала очевидной. Имея в руках все рычаги управления микроскопической конструкцией черной дыры, Строминджер и Вафа смогли легко вычислить число перестановок микроскопических компонентов черной дыры, при которых общие наблюдаемые характеристики, например масса и заряд, остаются неизменными. После этого они сравнили полученное число с площадью горизонта событий черной дыры — энтропией, предсказанной Бекенштейном и Хокингом. При этом обнаружилось идеальное согласие. По крайней мере, для класса экстремальных черных дыр Строминджер и Вафа удалось найти приложение теории струн для анализа микроскопических компонентов и точного вычисления соответствующей энтропии. Проблема, стоявшая перед физиками в течение четверти века, была решена<sup>6)</sup>.

Для многих теоретиков это открытие было важным и убедительным аргументом в поддержку теории струн. Наше понимание теории струн до сих пор остается слишком грубым для прямого и точного сравнения с экспериментальными результатами, например, с результатами измерений масс кварка и электрона. Но сейчас видно, что теория струн дает первое фундаментальное обоснование давно открытого свойства черных дыр, невозможности объяснения которого многие годы тормозила исследования физиков, работавших с традиционными теориями. И это свойство черных дыр тесно связано с пред-

сказанием Хокинга об их излучении, которое, в принципе, может быть проверено экспериментально. Последнее, разумеется, означает, что сначала нужно точно зарегистрировать на небе черную дыру, а затем сконструировать оборудование, достаточно чувствительное для регистрации ее излучения. Если бы черные дыры были не такими черными, то сделать это можно было бы уже сегодня. Несмотря на то, что экспериментальная программа еще не увенчалась успехом, полученный результат говорит о том, что пропасть между теорией струн и реальностью можно преодолеть. Даже Шелдон Глаشو, убежденный противник теории струн в 1980-е гг., недавно признался, что «когда струнные сборки в один механизм черных дырах, речь идет едва ли не о наблюдаемых явлениях, и это впечатляет»<sup>7)</sup>.

## Нераскрытые тайны черных дыр

Даже после этого впечатляющего прогресса остаются две важнейшие проблемы, связанные с черными дырами. Первая связана с тем, что понятие черной дыры изменяет наши представления о детерминизме. В начале XIX в. французский математик Пьер Симон Лаплас огласил строгие и далеко идущие последствия для нашей Вселенной, вытекающие из законов Ньютона: «Знание, которое в данный момент способно было бы узреть все силы, движущие природой, как и их обстоятельства у истоков сего движения, будь знание это к тому же столь велико, что все данные можно было бы подвергнуть анализу, охватило бы одной формулой и движения величайших тел во Вселенной, и движения величайших атомов. Для знания такого ничто не было бы несным, и будущее, равно как и прошлое, открылось бы его взору»<sup>8)</sup>.

Другими словами, если в некоторый момент известны положения и скорости всех частиц во Вселенной, с помощью законов Ньютона можно определить (по крайней мере, в принципе) их положения и скорости для любого момента времени в прошлом или в будущем. С этой точки зрения все

без исключения события, будь то образование Солнца, распятие Христа или все наши тепловыделения в этом мире, строго вытекают из точных значений координат и скоростей частиц Вселенной в момент после Большого взрыва. В этой жесткой, не допускающей отклонений модели эволюции Вселенной встает множество запутанных философских проблем, связанных с вопросом о свободе выбора, но их актуальность сильно снизилась после открытия квантовой механики. Как обещало суждалось, соотношение детерминизма Гейзенберга подрывает детерминизм Лапласа, так как в принципе нельзя узнать точные положения и скорости элементов Вселенной. На смену классическому пришло описание в терминах волновых функций, в котором можно рассуждать лишь о вероятностях того, что данная частица находится в том или ином месте, либо имеет ту или иную скорость.

Однако низвержение аргументов Лапласа не было полным крахом концепции детерминизма. Волновые функции, описывающие вероятности в квантовой механике, изменяются во времени по совершенно определенным математическим правилам, таким, как уравнение Шредингера (или его более точные релятивистские обобщения, например уравнение Дирака и уравнение Клейна—Гордона). Это говорит о том, что классический детерминизм Лапласа заменяется *квантовым детерминизмом*. Зная волновые функции фундаментальных объектов Вселенной в определенный момент времени, «достаточно обширный разум» может определить волновые функции в любой предшествующий или последующий момент. Квантовый детерминизм утверждает, что *вероятность* определенного события в выбранный момент времени в будущем полностью *определяется* знанием волновых функций в любой предшествующий момент. Вероятностная картина квантовой механики существенная картина детерминизма Лапласа, замешая но смягчает детерминизм Лапласа, замешая неизбежность исходов их возможностей, однако последняя полностью определяется в обобщенном формализме квантовой теории.

В 1976 г. Хокинг объявил, что даже этот смягченный вариант детерминизма нарушается из-за существования черных дыр.

Эти вычисления, как и вычисления энтропии, были невероятно сложными, но главная мысль легко уловима. Если какой-нибудь объект попадает в черную дыру, туда же отправляется и его волновая функция. Но это означает, что наш «достаточно обширный разум», пытающийся определить волновые функции для будущих моментов, будет фатально сбит с толку черной дырой. Чтобы полностью предсказать то, что будет завтра, сегодня нам нужно знать все волновые функции. И если некоторые из них сгинули в омуте черной дыры, то содержащаяся в них информация потеряна.

На первый взгляд это осложнение, вызванное существованием черных дыр, может показаться несущественным. Все, что скрылось за горизонтом событий черной дыры, отрезано от остального мира — так не прошло ли вообще забыть об объектах, которых угораздило туда попасть? Кроме того, рассуждая философски, разве нельзя представить себе, что информация, которую переносили попавшие в дыру объекты, не потеряна для Вселенной, а просто скрыта в области пространства, которую мы, разумные существа, решили избежать любой ценой? До открытия Хокингом того, что черные дыры не совсем черные, ответ на эти вопросы был бы положительным. Но результат Хокинга об излучении черных дыр все меняет. Излучение переносит энергию, и поэтому при излучении черной дыры ее масса медленно уменьшается — дыра медленно испаряется. При этом расстояние от центра дыры до горизонта событий постепенно сокращается, и когда завеса отступает, прежде отрезанные от мира области снова оказываются на сцене космического бытия. Вот тут-то мы со своими философскими доводами и наступаем на грабли: восстановится ли информация, которую переносили проглоченные дырой объекты и которая, как мы представляли, хранится внутри черной дыры, после того, как черная дыра испарится? Без этой информации квантовой детерминизм будет нарушен, так что последний вопрос приобретает глубокий смысл: не могут ли черные дыры вносить еще больший элемент случайности в эволюцию Вселенной?

В момент, когда писалась эта глава, у физиков не было единодушного мнения по данному вопросу. Многие годы Хокинг настойчиво утверждал, что информация не восстанавливается: черные дыры разрушают ее, «вводя новый уровень неопределенности в физику, усугубляющий общеизвестную неопределенность в квантовой теории»<sup>9)</sup>. Хокинг и Кип Торн из Калифорнийского технологического института даже поспорили с Джоном Прескилом из того же института о том, что произойдет с информацией, захваченной черной дырой. Хокинг и Торн ставили на то, что информация будет потеряна, а Прескилл — на то, что информация восстановится при излучении и уменьшении черной дыры. Угадывайте, на что они спорили? На саму информацию: «Проигравший(е) обязуется приобрести для победителя(ей) энциклопедию на выбор победителя(ей)».

И хотя спор все еще не разрешен, недавно Хокинг признал, что в свете обсуждающегося нового понимания черных дыр в теории струн может существовать способ восстановления информации<sup>10)</sup>. Идея состоит в том, что для типов черных дыр, изученных Строминджером и Вафой (а также многими физиками, вовлеченными в подобные исследования их статей), информацию можно хранить в компонентных бранах, а затем извлекать из них. По выражению Строминджера, этот результат «возбудил у некоторых теоретиков желание заявить о победе, о том, что при испарении черных дыр информация восстанавливается. По-моему, этот вывод является преждевременным, и предостой сделать еще немало, чтобы определить, правильный ли или нет»<sup>11)</sup>. Так же считает и Вафа, заявляя, что он «в этом вопросе агностик: здесь все еще возможен любой исход»<sup>12)</sup>. Ответ на поставленный вопрос является главной задачей текущих исследований. Приведем слова Хокинга: «Большинство физиков хотят верить, что информация не теряется, так как в этом случае мир будет надежным и предсказуемым. Но я считаю, что если принимать эйнштейновскую теорию относительности всерьез, придется допустить, что пространство-время может само связываться в узлы, принося к потере информации в их складках. Определение того, может ли ин-

формация теряться на самом деле, является одним из важнейших вопросов современной теоретической физики»<sup>13)</sup>.

Вторая нераскрытая тайна черных дыр связана с природой пространства-времени в центре черной дыры<sup>14)</sup>. Прямо применяя формулы общей теории относительности, которыми пользовался Шварцшильд еще в 1916 г., можно показать, что огромные масса и энергия, сосредоточенные в черной дыре, приводят к возникновению разрушительных разрывов ткани пространства-времени, в результате которых оно должно будет закручиваться в конфигурацию с бесконечной кривизной, образуя прокол пространства-времени. Один из выводов, которые сделали физики из существования таких сингулярностей, состоял в том, что вся материя, пересекающая горизонт событий черной дыры, будет безвозвратно затянута к центру черной дыры, и с этого момента материя перестанет существовать — внутри черной дыры исчезнет само время. Другие физики, долгое время исследовавшие черные дыры с помощью уравнений Эйнштейна, открыли не укладывающуюся в голову возможность того, что черная дыра может быть окном в другую вселенную, связанную с нашей лишь в центре черной дыры. Грубо говоря, там, где останавливаются стрелки часов нашей Вселенной, начинается отсчет времени вселенной, которая прикреплена к нашей.

Некоторые из слействий этой поразительной перспективы будут рассмотрены в следующей главе, здесь же хочется отметить один важный момент. Нужно вспомнить главный вывод: в экстраординарных ситуациях, возникающих при чрезвычайно высоких

плотностях ввиду огромных масс и малых размеров, классическая теория Эйнштейна становится неприменимой, и для описания таких ситуаций необходимо использовать квантовое обобщение. Здесь напрашивается вопрос о том, может ли для анализа сингулярностей в центре черной дыры оказаться полезной теория струн? Этот вопрос в настоящее время интенсивно исследуется, но из-за возникающих проблемы потери информации он все еще не решен. Теория струн ловко расправляется с множеством сингулярностей других типов, возникающих, например, при разрывах пространства, которые обсуждались в главе 11 и в начале этой главы<sup>15)</sup>. Но если обнаружен один тип сингулярности, это не значит, что все остальные будут иметь тот же характер. Структура пространства может рваться, прокалываться и раздвигаться многими разными способами. Теория струн дала нам глубокое понимание одних типов сингулярностей, но другие, среди которых и сингулярности черной дыры, до сих пор не поддаются теоретическому описанию. Тем не менее, с учетом последних грандиозных достижений в разработке методов, не опирающихся на теорию возмущений, не успешных применений этих методов к другим задачам теории черных дыр, у теоретиков гим задачам больше надежды на то, что разгадка тайн происходивших в глубине черной дыры явлений уже не за горами.

## Глава 14

### Размышления о космологии

На протяжении многих веков истории человечества люди стремились постичь тайну происхождения Вселенной. Возможно, это единственный вопрос, для которого не существует ни культурных, ни временных границ, вхолаживающий фантазии наших первобытных предков и побуждающий современных ученых заниматься космологией. В его основе — жажда всех людей понять, почему существует Вселенная, как она приняла свой современный облик, какие принципы движут ее эволюцией. Поразительно, что сегодня человечество вступило в ту стадию развития, на которой начинает вырисовываться схема, в рамках которой на некоторые вопросы можно будет дать научный ответ.

Согласно общепринятой сегодня теории, в первые моменты эволюции Вселенная находилась в экстремальных условиях огромных энергий, температур и плотностей. Сейчас ясно, что для описания таких условий требуется и общая теория относительности, и квантовая теория, поэтому проблема возникновения Вселенной является хорошим полигоном для применения идей теории суперструн. Вскоре мы рассмотрим эти новые применения, но сначала обсудим космологическую теорию, существовавшую до открытия теории струн, так называемую *стандартную космологическую модель*.

#### Стандартная космологическая модель

Современная теория сотворения мира возникла примерно через пятнадцать лет после создания Эйнштейном общей теории относительности. Хотя сам Эйнштейн отказался посмотреть правде в глаза и признать, что из его теории следует невозможность существования вечной и статической Вселенной,

за него это сделал Александр Фридман. Как обсуждалось в главе 3, Фридман нашел так называемое решение Большого взрыва для уравнений Эйнштейна, т. е. решение, в котором Вселенная развивается из начального состояния бесконечного сжатия и в настоящий момент находится в стадии расширения после этого исходного взрыва. Эйнштейн был так уверен в невозможности подобных меняющихся во времени решений его уравнений, что даже опубликовал короткую статью о якобы найденной им грубой ошибке в работе Фридмана. Однако примерно через восемь месяцев Фридману все же удалось убедить Эйнштейна в том, что в действительности никакой ошибки не было; Эйнштейн публично, но кратко, снял свои возражения. Очевидно, однако, что Эйнштейн не считал результаты Фридмана имеющими какое-либо отношение к нашей Вселенной. Однако пять лет спустя кропотливые наблюдения Хаббла за несколькими десятками галактик, проводившиеся с помощью стационарного телескопа в обсерватории Маунт Вильсон, показали, что Вселенная действительно расширяется. Работа Фридмана, переписанная в более систематическом и удобном виде Говардом Робертсоном и Артуром Уокером, до сих пор является основой современной космологии.

Подробное современная теория космической эволюции выглядит так. Около 15 миллиардов лет назад Вселенная изверглась в результате мощного сингулярного взрыва, разлетавшего в стороны все пространство и материю. (Можно не искать точку, в которой произошел Большой взрыв: она там, где вы находитесь сейчас, и где находится все остальное — изначально все различаемые нами отдельные точки пространства находились в *одном* месте.) Вычисления температуры, которая была у Вселенной лишь спустя

10<sup>-43</sup> с после Большого взрыва (так называемое *планковское время*), приводят к значению порядка 10<sup>32</sup> К, что примерно в 10<sup>25</sup> раз выше температуры в недрах Солнца. С течением времени Вселенная расширялась и охлаждалась, и в ходе этого процесса в первоначально однородной и горячей первичной космической плазме стали возникать вихри и скопления. Через 10<sup>-6</sup> с после Большого взрыва Вселенная достаточно охладилась (примерно до 10<sup>13</sup> К, что в миллион раз больше температуры внутри Солнца) для того, чтобы из групп трех кварков стало возможно образование протонов и нейтронов. Примерно через сотую долю секунды условия стали такими, что в охлаждающейся плазме элементарных частиц уже могли формироваться ядра некоторых легких элементов периодической таблицы. В течение следующих трех минут, пока кипящая Вселенная охлаждалась примерно до 10<sup>9</sup> К, основная доля образовавшихся ядер приключилась в ядра водорода и гелия и включала небольшую добавку дейтерия («тяжелого» водорода) и лития. Этот интервал времени получил название периода *первичного нуклеосинтеза*.

Затем в течение нескольких сотен тысяч лет было мало событий, кроме дальнейшего расширения и охлаждения. Но в конце этого этапа, когда температура упала до нескольких тысяч градусов, летавшие до этого с бешеной скоростью электроны замедлились до скорости, позволяющей атомным ядрам (в основном, ядрам водорода и гелия) захватывать их, образуя электрически нейтральные атомы. Это явилось поворотным моментом: начиная с него Вселенная, в общем и целом, становится прозрачной. До эры захвата электронов она была заполнена плотной плазмой электрически заряженных частиц, одни из которых (например, ядра) несли положительный заряд, а другие (например, электроны) — отрицательный. Фотоны, взаимодействующие лишь с заряженными частицами, испытывали постоянные пинки и толчки со стороны кипящих заряженных частиц и не могли пролететь достаточно далеко, не будучи отклоненными или поглощенными этими частицами. Из-за таких препятствий свободному движению фотонов, Вселенная предстала бы перед на-

блюдателем совершенно непрозрачной, подобной густому утреннему туману или снежной буре. Но когда отрицательно заряженные электроны были рассеяны по орбитам вокруг положительно заряженных ядер и образовались электрически нейтральные атомы, препятствия исчезли и густой туман рассеялся. С этого момента фотоны от Большого взрыва стали свободно путешествовать по Вселенной, и постепенно она полностью стала доступной взору.

Примерно миллиард лет спустя, когда Вселенная достаточно успокоилась после неистового начала, из сжатых гравитацией комков первичных элементов стали формироваться галактики, звезды, а затем и планеты. Сегодня, через 15 миллиардов лет после Большого взрыва, мы можем восхититься как величием космоса, так и нашей способностью построить разумную и экспериментально проверяемую теорию происхождения космоса.

Но до какой степени можно *действительно* доверять теории Большого взрыва?

#### Проверка модели Большого взрыва

Изучая Вселенную с помощью мощнейших телескопов, астрономы могут видеть свет, испущенный галактиками и квазарами через несколько миллиардов лет после Большого взрыва. Это позволяет им проверить предсказания теории Большого взрыва о расширении Вселенной вплоть до столь ранних этапов ее эволюции, и результаты всех проверок оказываются положительными. Что-либо проверить теорию для еще более ранних этапов, физики и астрономы вынуждены пользоваться менее прямыми методами. Один из наиболее тонких подходов опирается на понятие *реликтового космического излучения*.

Если читателю приходилось когда-нибудь ощущать только что накачанную до предела велосипедную шину, он знает, что предельно кажется теплой. Часть энергии, затраченная на накачку колеса насосом, улетела в теплоту, и температура шины увеличилась. Это есть следствие общего принципа:

для широкого класса условий при сжатии тел происходит их нагревание. И наоборот, если не препятствовать расширению, произойдет охлаждение. На этих принципах устроены кондиционеры и холодильники, в которых вещества типа фреона периодически подвергаются сжатию и расширению (сопровождающимся парообразованием и конденсацией), направляя поток теплоты в нужную сторону. Хотя речь идет о простых явлениях земной физики, оказывается, что они обладают глубоким смыслом в космосе как целом.

Выше говорилось о том, что после объединения электронов и ядер в атомы фотоны могут беспрепятственно путешествовать во Вселенной. Это означает, что Вселенная заполнена «газом» фотонов, движущихся во всевозможных направлениях и равномерно распределенных в космическом пространстве. Когда Вселенная расширяется, газ свободно летящих фотонов расширяется вместе с ней, так как Вселенная, по существу, является резервуаром для этого газа. Подобно тому, как температуры более привычных для нас газов (например, воздуха в колесе) понижаются при расширении, температура этого фотонного газа тоже падает при расширении Вселенной. Уже давно, после работ Георгия Гамова и его студентов Ральфа Алфера и Роберта Хермана в 1950-е гг., а также Роберта Дикке и Джима Пиббла в середине 1960-х гг., физики поняли, что современная Вселенная должна быть наполнена почти однородным составом из первичных фотонов, охладившимся до нескольких градусов выше абсолютного нуля за 15 миллиардов лет космического расширения<sup>11</sup>. В 1965 г. Арно Пензиас и Роберт Вильсон из Лаборатории им. Белла в штате Нью-Джерси случайно сделали одно из важнейших открытий нашей эпохи. Работая с антенной, предназначенной для спутниковой связи, они зарегистрировали послесвечение Большого взрыва! Позднее и теория, и эксперимент были усовершенствованы, и эти исследования завершили измерениями, полученными с помощью спутника COBE (Cosmic Background Explorer, «аэрод космического фона») агентства NASA в 1990-е гг. На основе полученных данных физики и астрономы точно установили, что Вселенная действительно заполнена микро-

волновым излучением с температурой примерно на 2,7 К выше абсолютного нуля (если бы наши глаза были чувствительны к микроволнам, мы увидели бы рассеянное свечение вокруг нас), что в точности совпадает с предсказаниями теории Большого взрыва. Более точно, в каждой кубической метре Вселенной (включая тот объем, который вы сейчас занимаете) находится около 400 миллионов фотонов, образующих огромное космическое море микроволнового излучения — эхо сотворения. Часть «снега» на экране телевизора, когда вы переключаетесь на канал, на котором закончилось вещание, объясняется именно этим туманным откликом Большого взрыва. Согласие между теорией и экспериментом служит подтверждением космологической картины Большого взрыва до момента времени, когда фотоны начали свободное движение по Вселенной, т. е. примерно до нескольких сотен тысяч лет после Большого взрыва.

Можно ли в наших исследованиях теории Большого взрыва продвинуться еще дальше вглубь времен? Можно. Используя законы обычной ядерной физики и термодинамики, можно сделать определенные предсказания об относительном проценте легких элементов, образованных во время первичного нуклеосинтеза, т. е. в период примерно от сотых долей секунды до нескольких минут после Большого взрыва. Например, теория говорит о том, что Вселенная примерно на 23% должна состоять из гелия. Измерения содержания гелия в звездах и туманностях действительно подтверждают это предсказание. Возможно, еще более впечатляющим является подтверждение предсказания о содержании дейтерия, так как его мало, но ошутимое присутствие в космосе не может объясняться никакими другими астрофизическими явлениями, кроме Большого взрыва. Подтверждение этих предсказаний, а также более позднее подтверждение предсказания содержания лития физиком об успешной проверке гипотез о физике ранней Вселенной вплоть до момента первичного синтеза.

Все это настолько впечатляет, что хочется возгордиться успехами. Все данные, которыми мы располагаем, подтверждают космоло-

гическую теорию, описывающую эволюцию Вселенной от сотых долей секунды после Большого взрыва до настоящего времени, отделенного от начала интервалом времени в 15 миллиардов лет. Однако не следует забывать о том, что новорожденная Вселенная развивалась с феноменальной скоростью. Мелчайшие доли секунды, *гораздо* меньшие сотых долей, суть космические эпохи, в течение которых формировались кажущиеся нам неизменными свойства окружающего мира. Поэтому физики продолжили движение вперед, пытаются объяснить, что происходило во Вселенной в еще более ранние моменты. Так как при движении вспять во времени Вселенная становится все горячее, меньше и плотнее, все очевиднее потребности в квантовом описании материи и взаимодействиях. Как мы видели с других точек зрения в предыдущих главах, квантовая теория поля точечных частиц справедлива лишь тогда, когда средние энергии частиц не превышают планковскую энергию. Сточки зрения космологии этот предел соответствует моменту, когда вся окружающая нас Вселенная была сжата до размера мельчайшего зерна планковского размера, а плотность была так высока, что сложно подыскать подходящую метафору, которая проиллюстрировала бы эту ситуацию: плотность Вселенной в эти моменты времени была просто *колоссальной*. При таких энергиях и плотностях гравитация и квантовая теория уже не могут рассматриваться как две различных сущности, каковыми они являлись в квантовой теории поля точечных частиц. Вместо этого — и в этом состоит смысл содержания данной книги — анализ должен базироваться на теории струн. На временной шкале такта энергии и плотности соответствуют точкам, удаленным от Большого взрыва менее чем на планковское время  $10^{-43}$  с, следовательно, эта сверхранняя эпоха является космологической ареной теории струн.

Мы начнем экскурсию в эту эпоху с обсуждения предсказаний стандартной космологической модели о Вселенной в моменты времени, меньшие сотых долей секунды, но больше планковского времени.

## От планковских времен до сотых долей секунды после Большого взрыва

Вспомним из главы 7 (обратите особое внимание на рис. 7.1), что в раскаленной среде ранней Вселенной три негравитационных взаимодействия оказываются связанными воедино. Расчеты зависимости силы этих взаимодействий от энергии и температуры показывают, что до моментов примерно через  $10^{-35}$  с после Большого взрыва сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия были одним «великим объединенным» взаимодействием. В этом состоянии Вселенная была гораздо более симметричной, чем сейчас. Подобно тому, как при плавке нескольких предметов из различных металлов получается однородная расплавленная смесь, при огромных температурах и энергиях ранней Вселенной все наблюдаемые различия между этими взаимодействиями пропадали. Но по мере того как Вселенная расширялась и охлаждалась, такая симметрия, как следует из формализма квантовой теории поля, разрушалась довольно резкими скачками и, в конце концов, привела к знакомой нам сравнительно асимметричной форме.

Трудно понять физический смысл этого понижения или *нарушения симметрии*, как его называют физики. Когда в резервуаре равномерно распределены молекулы  $H_2O$ , вода выглядит одинаково вне зависимости от того, под каким углом на нее смотреть. Рассмотрим, однако, что происходит при уменьшении температуры. Сначала все выглядит как обычно. На микроскопических масштабах уменьшается средняя скорость молекул воды — только и всего. Однако при понижении температуры до  $0^\circ$  С внезапно происходит радикальные перемены. Жидкая вода замерзает и превращается в лед. Как об этом заговорит в предыдущей главе, это простой пример фазового перехода. Но сейчас для пример фазового перехода, это простой пример фазового перехода. Но сейчас для пример фазового перехода, это простой пример фазового перехода. Но сейчас для пример фазового перехода, это простой пример фазового перехода.

обладает кристаллической структурой, т. е. если исследовать лед с должной точностью, он, как и любой кристалл, будет выглядеть по-разному при наблюдении под разными углами. Фазовый переход приводит к явному уменьшению вращательной симметрии.

И хотя мы рассмотрели лишь один знаковый пример, это утверждение справедливо в более общем случае: при понижении температуры во многих физических системах происходит фазовый переход, который обычно сопровождается уменьшением или «нарушением» некоторых исходных симметрий системы. В действительности система может испытывать последовательность фазовых переходов при изменении температуры в достаточно широких пределах. Простейшим примером снова служит вода. При температурах выше  $100^\circ\text{C}$  она представляет собой газ (пар). В этом состоянии у системы даже больше симметрий, чем в жидком, так как в этом случае молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  не связаны вместе в одну плотную жидкую упаковку, а предоставлены сами себе. Все они равноправны и носятся по всему резервуару, не образуя скопления или групп, по которым молекулы можно было бы различать исходя из близости к соседям. При высоких температурах господствует полная демократия и симметрия. При понижении температуры за  $100$ -градусную отметку, естественно, начинают формироваться капли, и симметрия уменьшается. Дальнейшее понижение температуры не приводит к серьезным последствиям, пока не перебеждена нулевая отметка, и в этот момент происходит фазовый переход из жидкости в лед, который также сопровождается резким уменьшением симметрии.

По мнению физиков, в моменты между планковским временем и сотыми долями секунды после Большого взрыва Вселенная вела себя аналогичным образом, испытывая, по крайней мере, два подобных фазовых перехода. При температурах выше  $10^{28}\text{ K}$  все три негравитационные взаимодействия кажутся единым взаимодействием. Ситуация максимально симметрична. (В конце главы обсуждается как с помощью теории струн можно включить в этот высокотемпературный союз гравитационное взаимодействие.) Однако при понижении темпе-

ратуры ниже черты  $10^{28}\text{ K}$  во Вселенной происходит фазовый переход, при котором три силы природы кристаллизуются по-разному в разные типы взаимодействий. Их относительные величины и детали того, как они воздействуют на материю, начинают различаться. Очевидная при высоких температурах симметрия этих взаимодействий разрушается при охлаждении Вселенной. Однако, как показали Вайнберг, Салам и Глшоу (см. главу 5), пропадает не вся высокотемпературная симметрия: между слабыми и электромагнитными взаимодействиями сохраняется глубокая связь. По мере дальнейшего понижения температуры ничего необычного не происходит до отметки  $10^{15}\text{ K}$  (в  $100$  миллионов раз больше температуры Солнца), когда во Вселенной происходит еще один переход, разделяющий электромагнитные и слабые взаимодействия. Они тоже обособляются, разрушая более симметричный союз, и различие между ними растет с понижением температуры Вселенной. Этими двумя фазовыми переходами определяется наличие трех разных типов негравитационного взаимодействия, хотя приведенный обзор истории Вселенной говорит об их близком родстве.

## Космологическая загадка

Распространенная космология пост-планковской эры дает элегантный, самосогласованный и пригодный для вычислений формализм, позволяющий понять структуру, которую имела Вселенная через малые доли секунды после Большого взрыва и вплоть до нашего времени. Но, как это обычно бывает с удачными теориями, новые результаты приводят ко все более обстоятельному вопросу. Оказывается, что некоторые из этих вопросов, не умаляя важности представленного стандартного космологического сценария, все же высвечивают ряд нелепостей, вызывающих необходимость создания более глубокой теории. Остановимся на одной из них, так называемой *проблеме горизонта*, являющейся одним из важнейших вопросов современной космологии.

Скрупулезные исследования реликтового излучения показывают, что с точностью

до тысячи долей процента температура излучения одинакова для всех точек неба, на которые направлена измерительная антенна. Если немного задуматься над этим фактом, он может показаться странным. С какой стати температуры различных точек Вселенной, разделенных огромными расстояниями, должны совпадать так точно? Направившись естественно на первый взгляд разрешение парадокса: не важно, что эти точки находятся сегодня в диаметрально противоположных областях неба, подобно разлученным близнецам, они (как и все остальные точки) находились очень близко друг к другу в первые моменты после Большого взрыва. И так как все области образовались из общей начальной точки, совсем не удивительно, что у них одни и те же физические характеристики, в частности их температура.

В стандартной космологии Большого взрыва это объяснение не годится. И вот почему. Тарелка горячего супа постепенно охлаждается до комнатной температуры, так как она соприкасается с более холодным воздухом. Но если суп находится в термосе, он, разумеется, останется горячим гораздо дольше, так как его контакт с окружающей средой намного слабее. Это говорит о том, что выравнивание температур двух тел происходит при длительном и беспрепятственном контакте. Поэтому для проверенных того, что ныне далеко удаленные области должны иметь одинаковые температуры из-за их исходного контакта, нужно оценить интенсивность обмена между ними на ранней стадии эволюции Вселенной. Здесь тоже можно сначала предположить, что из-за непосредственной близости в начальные моменты контакт между областями был даже еще сильнее. Однако пространственная близость — это только полдела. Вторая половина — это длительность контакта.

Чтобы лучше разобраться в этой ситуации, представим себе, что мы смотрим фильм, в котором запечатлено космическое расширение, но пленку крутят в обратную сторону, и мы возвращаемся в прошлое к моменту Большого взрыва. Так как скорость передачи любого сигнала или любых характеристик ограничена скоростью света, обмен тепловой энергией между материей в двух

областях пространства, приводящий к выравниванию температур, может происходить лишь тогда, когда расстояние между областями в данный момент меньше, чем расстояние, которое мог бы пройти свет с момента Большого взрыва. И теперь, прокручивая назад пленку, мы видим, что существует соревнование между расстоянием, которым разделены две области, и временем, на которое нужно повернуть назад часы, чтобы эти области оказались объединенными вместе. Например, если для разделения областей на  $300\,000\text{ км}$  мы должны отмотать пленку до момента времени, меньшего одной секунды после Большого взрыва, то, несмотря на близость областей в тот момент, у них не будет возможности для контакта, ибо свету нужна целая секунда, чтобы пройти это расстояние<sup>2</sup>. Если расстояние гораздо меньше, например  $300\text{ км}$ , но для этого пленку нужно промотать до момента времени, меньшего тысячной доли секунды после Большого взрыва, вывол тот же: эти области не могут влиять друг на друга, так как свет не сможет преодолеть эти  $300\text{ км}$  менее чем за тысячную долю секунды. И так далее: если расстояние до момента, требуется промотать пленку равно  $30\text{ см}$ , не требуется промотать пленку до момента, меньшего миллиардной доли секунды, влияние снова невозможно. Присекунды, влияние из-за непосредственной мер демонстрирует, что в непосредственной близости двух точек в первые моменты после Большого взрыва не обязательно следует то, что между ними, как между супом и воздухом, возможен тепловой контакт, необходимый для выравнивания температур.

Физики обнаружили, что та же проблема возникает и в модели Большого взрыва. Детальные расчеты показывают, что для областей пространства, разделенных сейчас огромными расстояниями, не было возможности обмена тепловой энергией в ранние моменты времени, которым объяснялось бы равенство их температур сейчас. А так как слово *горизонт* относится к кругу видимых объектов, образно говоря, к точкам, куда может дойти свет, физики назвали неизбежно однородность температур в космических просторах «парадоксом горизонта». Он не означает, что стандартная космологическая модель неверна. Но однородность физической модели неверна. Но однородность температур говорит о том, что в описании

космологии не достает какой-то важной детали. В 1979 г. физик Алан Гут, работающий сейчас в Массачусетском технологическом институте, дописал недостающую главу.

## Инфляция

Причина возникновения парадокса горизонта заключается в том, что для сближения двух удаленных областей Вселенной приходится прокручивать пленку фильма о космической эволюции назад во времени. Так далеко назад, что для передачи какого-либо физического воздействия времени остается слишком мало. И проблема возникает из-за того, что при обратной прокрутке к моменту Большого взрыва Вселенная сжимается недостаточно быстро.

Конечно, это лишь грубая идея, так что имеет смысл рассмотреть вопрос чуть подробнее. Эффект, вызывающий парадокс горизонта, подобен замедлению брошенного вверх мяча: под действием гравитационного притяжения скорость расширения Вселенной *уменьшается*. Из этого, в частности, следует, что для сокращения расстояния между двумя точками влосе необходимо прокрутить пленку не к середине отрезка от начала фильма, а еще ближе к началу. В свою очередь, чтобы уменьшить половину пространственное разделение, придется более чем половиной разделить время с момента Большого взрыва. Чем меньше времени прошло с момента Большого взрыва, тем *меньше* возможности для передачи воздействия между двумя областями, несмотря на то, что эти области будут ближе друг к другу.

Теперь несложно дать объяснение парадокса горизонта, предложенное Гутом. Он нашел другое решение уравнений Эйнштейна, в котором ранняя Вселенная проходит очень короткий этап чрезвычайно быстрого расширения, внезапно раздуваясь по *экспоненциальному* закону. В отличие от примера с мячом, замедляющимся при движении вверх, при экспоненциальном законе скорость расширения *увеличивается*. Если теперь прокручивать назад нашу пленку, то ускоренное расширение станет замедленным

сжатием. Поэтому для сокращения расстояния влосе (в период экспоненциальной эры) понадобится прокрутить пленку меньше, чем до середины отрезка с начала фильма, на самом деле гораздо меньше. Меньшая обратная прокрутка означает, что у двух областей будет больше времени на тепловой контакт и у них, как у супа и воздуха, будет достаточно времени, чтобы выровнять температуру.

После открытия Гута и последовавших важных усовершенствований Андрея Линде, работающего ныне в Стенфордском университете<sup>\*)</sup>, Пола Стейнхарда и Андреаса Альбрехта, работавших в то время в университете штата Пенсильвания, а также многих других физиков, стандартная космологическая модель была переформулирована в *инфляционную* космологическую модель. Этот подход внес поправки в стандартную модель, изменяющие ее поведение на крайне малом временном отрезке примерно от  $10^{-36}$  до  $10^{-34}$  с после Большого взрыва. В рамках новой модели Вселенная подверглась колоссальному расширению минимум в  $10^{30}$  раз, а не в сотню раз, как в стандартной схеме. За этот мизерный отрезок времени после Большого взрыва размер Вселенной увеличился больше, чем за все последующие 15 миллиардов лет. До начала такого расширения материя, разделенная сейчас огромными пространствами, была гораздо ближе, чем это предсказывает стандартная космологическая модель, так что температура легко могла сравняться. Затем, в ходе молниеносной космологической инфляции по Гуту и в ходе последовавшего обычного расширения согласно стандартной модели области пространства, где находилась эта материя, могли разойтись на громадные наблюдаемые нами сейчас расстояния. Таким образом, модификация стандартной космологической модели на очень коротком отрезке времени, приводящая, однако, к очень серьезным последствиям, позволяет разрешить парадокс горизонта (а также ряд других важных проблем, которые здесь не описаны). Новая теория получила широкое признание теоретиков, занимающихся космологией<sup>\*)</sup>.

<sup>\*)</sup> В то время Андрей Линде работал в Физическом институте АН СССР. — Прим. ред.



Рис. 14.1. Временная шкала эволюции и ключевые моменты в истории Вселенной

Итак, согласно современной теории, эволюция Вселенной на временном интервале от момента сразу за планковским временем до настоящего времени выглядит так, как показано на рис. 14.1.

## Космология и теория суперструн

Нам осталось выяснить, что происходит на коротком отрезке времени от момента Большого взрыва до планковского времени на рис. 14.1. Если непосредственно применять уравнения общей теории относительности к этой области, они будут свидетельствовать о том, что по мере приближения к моменту Большого взрыва Вселенная продолжает сжиматься, а ее температура и плотность продолжают увеличиваться. В нулевой момент времени размер Вселенной становится равным нулю, а температура и плотность обращаются в бесконечность, и это явный признак того, что данная теоретическая модель Вселенной, прочно базирующаяся на классическом описании гравитации в общей теории относительности, теряет всякий смысл.

Природа настойчиво указывает, что при таких условиях мы должны объединить общую теорию относительности с квантовой теорией, другими словами, использовать теорию струн. В настоящее время космологические исследования в рамках теории струн

находятся на раннем этапе развития. Методы теории возмущений могут, в лучшем случае, дать самое смутное представление о происходящем, так как анализ экстремальных энергий, температур и плотностей требует большей точности. И хотя в ходе второй революции в теории суперструн были предложены методы, позволяющие обойти теорию возмущений, пройдет некоторое время до того, как эти методы будут достаточно развиты, и их можно будет применять к расчетам космологических эффектов. Однако, чем космологические эффекты, в последние десятилетия физики уже сделали первые шаги к пониманию струнной космологии. Вот что они обнаружили.

Оказывается, есть три важнейших пункта, в которых теория струн модифицирует стандартную космологическую модель. Во-первых, в духе современных исследований, все более проясняющих ситуацию, из теории следует, что Вселенная должна иметь струн настолько допустимый размер. Этот вынужденно оказывает огромное влияние на наше понимание структуры Вселенной в сам момент Большого взрыва, для которого в стандартной модели получается нулевой размер Вселенной. Во-вторых, понятие дуальности Вселенной и больших радиусов (в его тесной связи с существованием минимального размера) в теории струн, как мы вскоре увидим, крайне важно и в космологии. И, наконец, число пространственно-временных измерений в теории струн больше четырех, поэто-

му космология должна описывать эволюцию всех этих измерений. Обсудим эти три пункта более подробно.

## В начале был комок планковских размеров

В конце 1980-х гг. Роберт Бранденбергер и Куртун Вафа сделали первые важные шаги к пониманию того, как изменениям в следствиях из стандартной космологической модели приведет использование теории струн. Они пришли к двум важным выводам. Во-первых, по мере движения назад к моменту Большого взрыва температура продолжает расти до момента, когда размеры Вселенной по всем направлениям сравняются с планковской длиной. Но в этот момент температура достигнет максимума и начнет *уменьшаться*. На интуитивном уровне нетрудно понять причину этого явления. Предположим для простоты (следуя Бранденбергеру и Вафе), что все пространственные измерения Вселенной циклические. При движении назад во времени радиус каждой окружности сокращается, а температура Вселенной увеличивается. Но из теории струн мы знаем, что сокращение радиусов сначала до и затем ниже значений планковской длины физические эквивалентно уменьшению радиусов до планковской длины, сменяющемуся затем их последующим увеличением. А так как температура при расширении Вселенной падает, то безрезультатные попытки сжать Вселенную до размеров, меньших планковской длины, приведут к прекращению роста температуры и ее дальнейшему снижению. Подробные вычисления Бранденбергера и Вафы подтверждают, что так оно и происходит на самом деле.

В результате Бранденбергер и Вафа пришли к следующей космологической картине: сначала все пространственные измерения в теории струн плотно свернуты до мнимальных размеров, грубо говоря, до планковской длины. Температура и энергия высоки, но не бесконечны: парадоксы начальной точки нулевого размера в теории струн решены. В начальный момент существования Вселенной все пространственные измерения теории

струн совершенно равноправны и полностью симметричны: все они свернуты в многомерный комок планковских размеров. Далее, согласно Бранденбергеру и Вафе, Вселенная проходит первую стадию понижения симметрии, когда в планковском момент времени три пространственных измерения отбираются для последующего расширения, а остальные сохраняют исходный планковский размер. Затем эти три измерения отожествляются с измерениями в сценарии инфляционной космологии и в процессе эволюции, изображенной на рис. 14.1, принимают наблюдаемую ныне форму.

## Почему три?

Здесь сразу же возникает вопрос: в чем причина того, что при понижении симметрии для расширения отбираются ровно три пространственных измерения? Иными словами, кроме имеющегося экспериментального факта, что лишь три пространственных измерения расширились до наблюдаемого огромного размера, есть ли в теории струн фундаментальный принцип, объясняющий почему не расширилось никакое другое число измерений (четыре, пять, шесть и т.д.) или даже, что более симметрично, все пространство? Бранденбергер и Вафа предложили возможное объяснение. Вспомним, что дуальность больших и малых радиусов в теории струн основана на том, что если измерение является циклическим, на него может наматываться струна. Бранденбергер и Вафа осознали, что такие намотанные струны могут сдерживать расширение измерений, на которые они намотаны, подобно резиновым лентам, обернутым вокруг велосипедной камеры. С первого взгляда может показаться, что в результате все измерения будут скованы, так как струны могут наматываться, и наматываются, на любое из них. Но тут есть лазейка: если намотанная струна вдруг встретит своего анти-струнного партнера (грубо говоря, струну, намотанную в другом направлении), обе струны моментально аннигилируют и образуют *ненамотанную* струну. Если этот процесс будет достаточно активным, то

будет уничтожено достаточно много «резинчатых лент», и измерения смогут расширяться. Бранденбергер и Вафа предположили, что снижение сдерживающего действия намотанных струн может иметь место лишь в случае трех пространственных измерений. И вот почему.

Представим себе две частицы, которые катаются по одномерной линии, полой пространственному измерению Лилландии. За исключением случая, когда их скорости равны, рано или поздно одна из частей догонит другую, и они столкнутся. Заметим, однако, что если те же точечные частицы будут двигаться по двумерной поверхности, весьма вероятно, что столкновение никогда не произойдет. Второе пространственное измерение открывает окно в новый мир траекторий каждой частицы, и большинство траекторий двух миров не пересекаются в одной и той же точке в один момент времени. В трех, четырех или большем числе измерений становится все менее вероятно, что частицы когда-либо столкнутся. Бранденбергер и Вафа поняли, что аналогичное утверждение справедливо, если заменить точечные частицы струнными петлями, намотанными вокруг пространственных измерений. И хотя их вывод гораздо сложнее представить себе наглядно, но в *трех* (или менее) циклических пространственных измерениях две намотанные струны, скорее всего, столкнутся, как две точечные частицы в одном измерении. Но в четырех и в большем числе измерений вероятность столкновения двух намотанных струн уменьшится, как и в случае частиц в двух и большем числе измерений<sup>3)</sup>.

Вырисовывается следующая картина. В первый момент существования Вселенной в неразберихе высоких, но конечных температур все циклические измерения пытаются расширяться. Намотанные струны их сдерживают в границах исходных планковских размеров. Однако рано или поздно случайная температурная флуктуация приведет к тому, что три из этих измерений станут больше других и, согласно нашему обсуждению, вероятность столкновения намотанных вокруг этих измерений струн резко увеличится. Примерно в половине этих столкновений будут участвовать пары стру-

на/антиструна, и такие пары аннигилируют, значительно ослабляя сдерживающую силу и позволяя этим трем измерениям расширяться все больше. А чем больше они расширяются, тем менее вероятно, что их обогатят другие струны, так как для этого от струн будет требоваться все больше энергии. Таким образом, расширение подстегивается само собой, и при увеличении размеров становится все меньше препятствий к дальнейшему расширению. Теперь мы можем представить, что эти три пространственных измерения будут эволюционировать по описанному выше сценарию и достигнут размеров наблюдаемой Вселенной.

## Космология и вид пространств Калаби—Яу

Для простоты Бранденбергер и Вафа считали все пространственные измерения циклическими. Это допущение оправдано. Как отмечалось в главе 8, если циклические измерения достаточно велики и замыкаются на себя за границами современных возможностей наблюдения, циклический вид совместим с видом наблюдаемой нами Вселенной. Но для измерений, размер которых остается малым, более реалистичный исход заключается в их свертывании в более сложное пространство Калаби—Яу. Ключевой воном пространством Калаби—Яу, в какое именно прос, безусловно, в том, в какое именно пространство. Каким образом осуществлять выбор конкретного пространства? Никто не удалось пока что на это ответить. Однако, объединяя результаты об изменении топологии, описанные в предыдущей главе, с подобными космологическими прозрениями, можно предложить схему ответа на данный вопрос. Мы знаем, что многообразия Калаби—Яу можно связать друг с другом посредством конифероидных переходов с разрывом пространства. Можно представить себе, вом пространства. Можно представить себе, что в моменты хаоса и огромных температур после Большого взрыва свернутые комтур после Большого взрыва свернутые комтуры пространства Калаби—Яу остаются понатыканы пространствами канарьянскими, но не участвуют в безумном канарьянском стремительных превращениях, принимая облик различных пространств Калаби—Яу



в процессе беспрестанных разрывов и восстановления ткани пространства. По мере того как Вселенная охлаждается, а три измерения становятся все больше, переходы от одного пространства Калаби—Яу к другому происходят реже и дополнительные измерения в конце концов улавливаются в определенное многообразие Калаби—Яу, предположительно ответственное за физические свойства наблюдаемого нами мира. Дело чести для физиков — подробно описать эволюцию компонентов Калаби—Яу нашего пространства, чтобы современный ее вид можно было вывести из теоретических принципов. Мы видим, что с учетом новых результатов о возможности непрерывного преобразования пространств Калаби—Яу друг в друга выбор одного многообразия Калаби—Яу из множества других может, на самом деле, быть сведен к задаче из космологии<sup>5)</sup>.

### До начала?

Так как точные уравнения теории струн неизвестны, Бранденбергер и Вафе пришлось делать немало допущений и приближений в своих космологических исследованиях. Недавно Вафа сказал: «В нашей работе показано, что теория струн позволяет по-новому подойти к давним проблемам стандартного подхода в космологии. Мы видим, например, что в теории струн можно искоренить само понятие исходной сингулярности. Однако на современном уровне понимания теории струн выполнить абсолютно надежный расчет для таких экстремальных условий очень сложно, и наша работа дает лишь первое представление о струнной космологии, очень далеком от окончательного понимания»<sup>6)</sup>.

После этой работы физики непрерывно продвигаются вперед к пониманию струнной космологии. В числе тех, кто идет в главе этих исследований — Габриэле Венициано и его коллега Маурицио Гасперини из Туринского университета. Эти ученые представили свой, очень красивый, вариант струнной космологии, который в ряде мест соприкасается с описанным выше сценарием, но в других местах принципиально отличается от него. Как Бранденбергер и Вафа, для исключения бесконечной температуры и плотности

энергии, которые возникают в стандартной и инфляционной модели, они опирались на существование минимальной длины в теории струн. Однако вместо вывода о том, что в силу этого вместо Вселенная рождается из комка планковских размеров, Гасперини и Венициано предположили, что существовала *доисторическая* Вселенная, родившаяся задолго до момента, который мы называем нулевой точкой, и зачавшая этот космический эмбрион планковских размеров.

Исходное состояние Вселенной в таком сценарии и в модели Большого взрыва очень сильно различаются. Согласно Гасперини и Венициано, Вселенная не являлась раскаленным и плотно скрученным клубком измерений, а была холодной и имела *бесконечную* протяженность. Затем, как следует из уравнений теории струн, во Вселенную вторглась нестабильность, и все ее точки стали, как и в эпоху инфляции по Гуту, стремительно разбегаться в стороны. Гасперини и Венициано показали, что из-за этого пространство становилось все более искривленным и в результате произошел резкий скачок температуры и плотности энергии<sup>7)</sup>. Прошло немного времени, и трехмерная область миллиметровых размеров *внутри* этих бескрайних просторов преобразилась в раскаленное и плотное пятно, тождественное пятну, которое образуется при инфляционном расширении по Гуту. Затем все пошло по стандартному сценарию космологии Большого взрыва, и расширяющееся пятно превратилось в наблюдаемую Вселенную. И так как в эпоху до Большого взрыва происходило свое инфляционное расширение, решение парадокса горизонта, предложенное Гутом, оказывается автоматически встроеном в этот космологический сценарий. По выражению Венициано, «теория струн преподносит нам, как на блюдечке, вариант инфляционной космологии»<sup>8)</sup>.

Изучение струнной космологии быстро становится областью активных и продуктивных исследований. Например, сценарий эволюции до Большого взрыва уже не раз был поводом горячих, но плодотворных споров, а его место в будущей космологической формулировке, к которой мы, в конце концов, придем в рамках теории струн, далеко

не очевидно. Однако нет сомнений, что эта космологическая формулировка будет твердо опираться на понимание физиками результатов, открытых во время второй революции суперструн. Например, сейчас еще не ясны космологические следствия существования многомерных мембран, или то, как изменятся рассмотренные законы космологии, если окажется, что значения констант связи в теории струн соответствуют центральным областям рис. 12.11, а не одному из полуостровов на этой карте. Иными словами, как изменит наше понимание первых моментов существования Вселенной анализ законченной М-теории? Эти важнейшие вопросы сейчас интенсивно исследуются. И уже появился один важный результат.

### М-теория и слияние всех сил природы

На рис. 7.1 показано, что все три гравитационные взаимодействия сливаются воедино, если температура Вселенной достаточно велика. Как можно вписать в эту картину гравитационное взаимодействие? До открытия М-теории теоретикам удалось показать, что для простейших выборов компоненты Калаби—Яу гравитационное взаимодействие почти, но не полностью, сливается с тремя другими (рис. 14.2). Теоретики обнаружили, что несогласование можно устранить, слегка «подогнав» выбранное многообразие Калаби—Яу и выполнив серию математических трюков, но подобные тонкие настройки задним числом всегда вызывают у физиков ощущение дискомфорта. Так как сейчас никто не способен точно предсказать вид измерений Калаби—Яу, полагаются на решения проблем, столь чувствительные к детальному описанию этих измерений, довольно рискованно.

Однако Виттен показал, что результаты второй революции в теории суперструн приволят к более надежному решению. Исследова то, как меняются силы взаимодействий в областях, где константа связи струны может быть большой, Виттен обнаружил, что крикую гравитационного взаимодействия можно

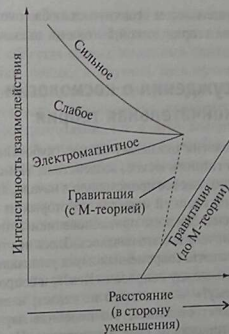


Рис. 14.2. В М-теории все четыре типа взаимодействий объединяются естественным образом

слегка изменить без какой-либо особой подгонки пространства Калаби—Яу, и она соединится с кривыми других взаимодействий, как показано на рис. 14.2. И хотя очень редко делают окончательные выводы, этот факт может быть признаком того, что единства в космологическом описании достичь проще, если работать в более общем формализме М-теории.

Результаты, рассмотренные в этом и предыдущих пунктах, являются первыми проблемными шагами к пониманию космологических следствий теории струн и М-теории. Физики ожидают новых глубоких результатов в недалеком будущем, когда будут усилены и применены к решению космологических проблем методы теории струн/М-теории, не опирающиеся на теорию возмущений.

Но так как сегодня эти методы недостаточно эффективны для того, чтобы с их помощью можно было понять космологию на основе теории струн, стоит обсудить некоторые общие соображения о возможной роли космологии в поисках окончательной теории. Нужно предупредить читателя, что некоторые из этих соображений имеют ботенкоптический характер, чем те, что лее гипотетически выше, однако эти соображения позволяют поставить вопросы, с которыми

в будущем может столкнуться любая окончательная теория, какой бы она ни оказалась.

## Рассуждения о космологии и окончательная теория

Космология оказывает на нас глубочайшее, почти гипнотическое, воздействие. Понимание того, как все происходило в начале, является, по крайней мере для некоторых из нас, наиболее близким прикосновением к тайне того, почему все это началось. Здесь не утверждается, что современная наука устанавливает связь между вопросом «Как?», и вопросом «Почему?» — она этого не делает, и вполне может оказаться, что подобная научная связь никогда не будет установлена. Но космология держит свое слово и постепенно ведет нас к наиболее полному пониманию арены действия «почему» — к пониманию рождения Вселенной. И это, по крайней мере, позволяет нам развивать научный подход, в рамках которого такие вопросы могут ставиться. Иногда глубокая осведомленность в вопросе — лучшая замена отсутствующего ответа.

В процессе поисков окончательной теории эти высокочастотные фразы уступают место более конкретным соображениям. Наше сегодняшнее видение Вселенной, безусловно, зависит от фундаментальных законов физики, но может зависеть и от факторов космической эволюции (т. е. от того, что находится слева на рис. 14.1), и, вообще говоря, может лежать за рамками обоснования даже самой фундаментальной теории, описывающей то, что находится на этом рисунке на самом правом крае.

В этом несложно убедиться. Рассмотрим, например, что происходит при бросании мяча. Его движение будет определяться законами гравитации, но, пользуясь лишь этими законами, нельзя предсказать, где упадет мяч. Нам также нужно знать величину и направление его скорости в момент броска. Иначе говоря, мы должны знать *начальные условия*. Во Вселенной также возможны аналогичные исторические взаимосвязи: то, почему звезда образовалась в одном месте, а планета в другом, определяется сложной цепью событий.

По крайней мере, в принципе, эту цепь можно раскрутить назад во времени, и объяснить определенным событием при рождении Вселенной. Возможно, однако, что и более фундаментальные свойства Вселенной, например фундаментальные свойства частиц материи или частиц, передающих взаимодействия, могут прямо зависеть от эволюции, которая, в свою очередь, зависит от начальных условий во Вселенной.

В самом деле, мы уже упоминали об одном возможном воплощении этой идеи в теории струн. В процессе эволюции ранней Вселенной дополнительные измерения могли трансформироваться от одного вида к другому и в конце концов, когда температура достаточно спала, приняв вид одного конкретного пространства Калаби—Яу. Но, как и в случае брошенного мяча, результат многочисленных изменений пространств Калаби—Яу может зависеть и от конкретных условий в начале этого процесса. А так как вид окончательного многообразия Калаби—Яу влияет на массы частиц и свойства взаимодействий, то космологическая эволюция и состояние в момент рождения Вселенной сильно влияют на наблюдаемые сегодня физические явления.

Мы не знаем, какими были начальные условия во Вселенной. У нас даже нет идеи, понятий и языка, которые нужно использовать для их описания. По нашему мнению, безумные начальные условия с бесконечной энергией, плотностью и температурой в стандартной и инфляционной моделях есть признак того, что эти модели неверны и дают неправильное описание действительно существовавших начальных условий. Теория струн позволяет улучшить описание, доказывая, что такие экстремальные условия можно обойти. Однако ни у кого так и нет ответа на вопрос, как все начиналось на самом деле. Недостаточность наших знаний распространяется даже на более грубый уровень: мы не знаем, можно ли вообще ставить вопрос об определении начальных условий, или будет ли этот вопрос всегда лежать за рамками любой теории, и задавать его столь же бессмысленно, сколь бессмысленно пытаться с помощью теории относительности пролить свет на то, с какой силой

бросил мяч. Некоторые физики, такие как Хокинг и Джеймс Харлт из Калифорнийского университета, предпринимали отчаянные попытки направить вопрос о начальных космологических условиях в русло теоретической физики, но все эти попытки заканчивались плачевно. В настоящее время наш уровень понимания космологии в контексте теории струн/М-теории слишком примитивен для того, чтобы определить, достоин ли кандидат на «теорию всего» своего высококого предназначения, и определяются ли в его рамках начальные космологические условия, которые могут быть возведены затем в ранг физических законов. Это — главная тема будущих исследований.

Однако, даже безотносительно от проблемы начальных условий и их влияния на последующие зигзаги космической эволюции, в последнее время высказываются спекулятивные предположения о том, что существуют и другие потенциальные ограничения на способность объяснения мира любой окончательной теорией. Неизвестно, верны эти предположения или нет; на современном уровне развития науки это, разумеется, не важно. Однако сам факт провоцирует умозрительные доводы о том, что в любой окончательной теории могут возникнуть серьезные препятствия.

Идея основана на следующей возможности. Представим себе, что то, что мы называем нашей Вселенной, есть лишь крошечная часть гораздо более широких космологических просторов, один из бесчисленного множества островов грандиозного космологического архипелага вселенных. Конечно, такое предположение может показаться искусственным (и оказаться, в конце концов, неверным), но существует конкретный механизм, который приводит к такой ситуации. Этот механизм был предложен Андреем Линде, обнаружившим, что рассмотренный выше резкий и кардинальный взрыв с инфляционным расширением мог быть неоднократным. Напротив, согласно Линде, условия для возникновения инфляционного расширения могли создаваться многократно в рассеянных по пространству изолированных областях, каждая из которых затем проходила свою стадию расширения и форми-

ровала свою вселенную. И в каждой из этих вселенных процесс продолжается: в удаленных областях старых вселенных появляются ростки новых, и паутина расширяющихся вселенных продолжает разрастаться до бесконечности. Терминология становится немного громоздкой, но в духе вейний моды, дадим этому существенно обобщенному понятию естественное название *мульти-вселенная*<sup>3)</sup>, а компоненты мульти-вселенной будем называть вселенными.

Важно отметить, что из утверждения главы 7 о единстве и согласованности законов физики во всей нашей Вселенной не следует то, что на эти законы будут влиять законы физики в других вселенных, коль скоро эти вселенные отделены от нашей или, по крайней мере, находятся так далеко, что свет из этих вселенных еще не дошел до нас. Поэтому можно допустить, что физика в разных вселенных разная. В некоторых вселенных различия могут быть небольшими. Например, масса электрона или константа связи сильных взаимодействий могут отличаться на тысячные доли процента. В других вселенных могут быть более существенные различия. Например, *u*-кварк может весить различно, например, чем *u*-кварк в нашей Вселенной, в 10 раз больше, чем *u*-кварк в нашей Вселенной, а электромагнитное взаимодействие может быть в 10 раз сильнее, чем у нас, со всеми вытекающими последствиями для жизни звезд и для свойств окружающего мира, рассмотренных в главе 1. Наконец, могут быть несущественные, различно отличающиеся наборы элементарных частиц и взаимодействий может быть совершенно иным; число протяженных измерений может даже быть равно нулю или единице, а для других — восемь, девяти или даже десяти. Если дать волю фантазии, даже самые законы могут быть совершенно разными в разных вселенных. Число возможных вселенных бесконечно.

Но в этом-то и дело. Если представить все это огромное количество вселенных, а в большинстве из них нет благоприятных условий для жизни, по крайней

<sup>3)</sup> В оригинале *multiverse* (в противовес *universe*). — Прим. ред.

мере в нашем ее понимании. Для вселенных с существенно иными характеристиками это ясно: если бы наша Вселенная действительно выглядела, как вселенная Салового шланга, жизнь на ней, в нашем понимании, была бы невозможной. Однако даже очень слабые различия с нашим физическим миром повлияли бы на процесс образования звезд и, например, на их способность служить космическими фабриками по производству сложных жизненно-важных атомов (таких, как углерод или кислород), которые разлетаются по всей Вселенной в результате взрывов сверхновых. Если, учитывая высокую чувствительность жизни к деталям физической конструкции, задаться теперь вопросом о том, почему взаимодействия и частицы в природе именно такие, какими мы их наблюдаем, то напрашивается следующий возможный ответ. На просторах мульти-вселенной они могут сильно отличаться, так что физические свойства в других вселенных *могут быть и являться* другими. Уникальность наблюдаемых нами свойств как раз в том, что в этих условиях возможно возникновение жизни. А жизнь, точнее жизнь разумных существ, есть необходимая предпосылка самого вопроса о том, почему свойства нашей Вселенной именно такие. Или, выражаясь яснее, они такие, потому что если бы они были другими, некому было бы задавать этот вопрос. Подобно тому, как удивление игрока, выигравшего в смертельную русскую рулетку с ничтожным шансом выжить, ослабевает с осознанием того, что в случае проигрыша некому было бы удивляться, принятие гипотезы мульти-вселенной снижает потребность получить объяснение, почему наша Вселенная выглядит так, а не иначе.

Эта аргументация является одним из вариантов идеи, давно известной под названием *антропного принципа*. Так, как она излагается, эта позиция диаметрально расходится с грезами о единой и жесткой теории с абсолютной предсказательной силой, в которой все выглядит так потому, что по-другому во Вселенной быть не может. Вместо того, чтобы быть воплощением поэтической красоты, где все идеально связано друг с другом с неизменным изяществом, мульти-вселенная и антропный принцип приво-

дят к чудовищному переизбытку вселенных с неутолимой жаждой к изменениям. Установить справедливости гипотезы о мульти-вселенной будет крайне сложно, если вообще возможно. Даже если другие вселенные и существуют, вполне возможно, что мы никогда не вступим с ними в контакт. Однако безграничное расширение просторов «снаружи» в концепции мульти-вселенной, созвучное с выводом Хаббла о том, что Млечный путь есть лишь одна из многих галактик, по крайней мере, предостерегает нас, не слишком ли многого мы ожидаем от окончательной теории?

Мы должны требовать, чтобы окончательная теория давала непротиворечивое квантово-механическое описание всех взаимодействий и всей материи. Мы должны требовать, чтобы окончательная теория привела к неоспоримой космологической модели для нашей Вселенной. Однако если картина мульти-вселенной верна (а это еще большой вопрос), то требовать от окончательной теории еще и объяснения детальных свойств природы (например, масс и зарядов частиц) *может означать* требовать слишком многого.

Необходимо подчеркнуть, что даже если принять гипотезу о мульти-вселенной, вывод о том, что это снижает предсказательную силу теории далеко не бесспорен. Причина, если объяснить ее на пальцах, состоит в следующем. Если дать волю фантазии и взять на вооружение гипотезу мульти-вселенной, следует также напрячь воображение и рассмотреть способы, как можно обуздать столь явный произвол, присущий этой гипотезе. Размышляя в консервативном духе, мы можем предположить (считая верной картину мульти-вселенной), что было бы возможным расширить окончательную теорию до ее максимальных границ, и тогда «расширенная окончательная теория» сможет точно ответить на вопросы, как и почему значения фундаментальных параметров разбросаны именно так во всех составляющих вселенных.

И одним из умеренных способов будет предположение о возможности обобщения окончательной теории на все вселенные, в котором «обобщенная окончательная те-

ория» сможет точно ответить на вопросы о значениях фундаментальных параметров во всех составляющих вселенных.

Более радикальный способ следует из предположения Ли Смолина из университета штата Пенсильвания. Под впечатлением схожести условий в момент Большого взрыва и в центре черных дыр, которые характеризуются колоссальной плотностью сжатой материи, он предположил, что черная дыра есть семя новой вселенной, рождающейся в муках Большого взрыва, но навски спрятанной от нас за горизонтом событий черной дыры. Тем самым, предложив другой механизм образования мульти-вселенной, Смолин внес и новый элемент — космический вариант генетической мутации, — устраняющий теоретические ограничения антропного принципа<sup>9)</sup>. Допустим, рассуждает он, что свойства дочерней вселенной, распутившейся из почки черной дыры, близки, но не тождественны свойствам породившей ее вселенной. Так как черные дыры образуются из потухших звезд, а интенсивность образования звезд определяется точными значениями масс и зарядов, то плодovitость конкретной вселенной сильно зависит от этих параметров. Следовательно, небольшие изменения параметров в дочерних вселенных приведут к появлению отпрысков, еще более приспособленных к производству черных дыр, число дочерних вселенных в которых будет еще больше<sup>10)</sup>. За многие поколения вселенные будут настолько оптимизированы к производству черных дыр, что заполнят мульти-вселенную. Таким образом, Смолин предложил динамический механизм, в котором параметры следующих поколений вселенных будут все ближе к значениям, оптимальным для образования черных дыр.

Даже в контексте мульти-вселенной этот подход приводит к новому способу объяснения характеристик материи и взаимодействий. Если теория Смолина верна, и если наша Вселенная является типичным элементом зрелой мульти-вселенной (конечно, оба эти «если» можно оспорить с многих точек зрения), то наблюдаемые нами характеристики частиц и взаимодействий должны

быть оптимизированы для воспроизводства черных дыр. Иными словами, любое отклонение от этих параметров должно уменьшить эффективность образования черных дыр. Физики начали исследовать это утверждение, но в настоящее время они не пришли к согласию по этому вопросу. Однако даже если предположение Смолина окажется неверным, оно показывает, что окончательная теория может принять еще один облик. С первого взгляда, этой теории может не хватать строгой определенности. Может оказаться, что она будет описывать огромное царство вселенных, большинство из которых не имеет отношения к нашей. Более того, можно предположить, что это более вселенных действительно реализуется физически и образует мульти-вселенную — не то, на первый взгляд, навсегда ограничивающее нашу предсказательную силу. Однако данное обсуждение иллюстрирует, что окончательное объяснение все же возможно, если нам удастся не только найти окончательные законы, но и установить их влияние на космологическую эволюцию в непредсказуемо широких масштабах.

Изучение космологических следствий из теории струн/М-теории будет, несомненно, главной темой исследований в XXI в. Не обходя ускорителями, способными разогнать частицы до энергий порядка планковской, мы будем вынуждены постоянно опираться на данные экспериментов «космологического ускорителя» Большого взрыва — на то, что разбросано этим взрывом по всей Вселенной. И если мы будем настойчивы, и нам будет сопутствовать удача, в конце концов нам удастся ответить на вопросы о том, что происходило при рождении Вселенной, или точнее сказать предстает перед нами на Земле, который предстает перед нами на Земле и на небе. Конечно, от области, где залезть туда физике фундаментальных проблем, рывты разлетки пропасть неизведанного. Однако развитие квантовой теории гравитации в рамках теории суперструн усиливает уверенность в том, что современный теоретический аппарат поможет преодолеть эту практический аппарат поможет преодолеть эту практическую, и после многих лет напряженной работы, найти ответы на глубочайшие из когда-либо ставившихся вопросов.