

## Часть V

### ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ В XXI ВЕКЕ

#### Глава 15

#### Перспективы

Пройдут века, и теория суперструн (или результат ее развития в рамках М-теории) преобразится настолько по сравнению с современной формулировкой, что станет неузнаваемой даже для ведущих современных исследователей. Возможно, в ходе поисков «теории всего» обнаружится, что теория струн — всего лишь один из множества необходимых шагов на пути к гораздо более величественной концепции космоса, которая оперирует понятиями, совершенно непохожими на те, с которыми мы до сих пор сталкивались. История науки учит тому, что каждый раз, когда все вокруг складывается в единую схему, природа обязательно прибегает для нас сюрпризы, которые требуют существенных, а иногда и радикальных изменений наших представлений об устройстве мира. Как и многие до нас, мы снова и снова самонадеянно убеждаем себя, что живем в тот самый период истории человечества, когда поиск фундаментальных законов Вселенной наконец-то близок к завершению. По словам Эдварда Витена, «разгадка теории струн кажется нам столь близкой, что в моменты оптимистического подъема мне представляется, как в один прекрасный день окончательная форма теории может просто свалиться с небес кому-то на голову. Скорее всего, однако, путь к этой теории — гораздо бо-

лее глубокой, чем любая из построенных до сих пор, — будет долгим, и когда-нибудь в XXI в., когда я буду уже слишком стар, чтобы придумать что-либо полезное по этому вопросу, молодые физики должны будут решать, нашли мы окончательную теорию или нет»<sup>1)</sup>.

Хотя мы все еще ощущаем последствия второй революции в теории суперструн и продолжаем брать на вооружение порожденные ею открытия, по мнению большинства теоретиков, потребуется третий или даже четвертый переворот такой же силы, чтобы высвободить все могущество теории струн и оценить ее роль как окончательной теории. Как мы видели, теория струн уже рисует новую замечательную картину того, как работает Вселенная, однако остаются значительные прелестия и слабые места, которые, без сомнения, станут объектом основного внимания теоретиков XXI в. Таким образом, в этой последней части книги мы не сможем закончить историю поиска человечеством наиболее глубоких законов Вселенной. Поиск продолжится. Вместо этого устремим наш взгляд в будущее теории струн и обсудим пять основных вопросов, с которыми струнные теоретики обязательно будут иметь дело в процессе поиска окончательной теории.

#### Что является фундаментальным принципом теории струн?

Один из универсальных уроков последнего столетия состоит в том, что известные законы физики находятся в соответствии с принципами симметрии. Специальная теория относительности основана на симметрии, описываемой принципом относительности, на симметрии между всеми системами отсчета, движущимися относительно друг друга с постоянной скоростью. Гравитационное взаимодействие, в соответствии с его описанием в общей теории относительности, основано на принципе эквивалентности, обобщающем принцип относительности на случай произвольным образом движущихся систем отсчета. Наконец, сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия основываются на более абстрактных принципах калибровочной симметрии.

Физики, как мы уже говорили, склонны придавать особое значение принципам симметрии, поднимая их на пьедестал объяснения мироустройства. С этой точки зрения гравитация *существует* для того, чтобы все возможные системы отсчета были равноправны — т. е. чтобы выполнялся принцип эквивалентности. Аналогично, негравитационные взаимодействия *существуют* для того, чтобы в природе соблюдалась соответствующее им калибровочные симметрии. Естественно, такой подход заменяет вопрос о существовании определенного типа взаимодействия вопросом о том, почему в природе действуют соответствующие принципы симметрии. Но это, определенно, и есть прогресс, особенно когда рассматриваемая симметрия оказывается исключительно естественной. Например, с какой стати система отсчета одного наблюдателя должна быть более предпочтительной, чем система другого? Напротив, с точки зрения фундаментальных законов вселенной кажется гораздо более естественным трактовать все системы отсчета одинаково; это и достигается принципом эквивалентности и введением понятия о гравитации в структуру космоса. Аналогичное рациональное зерно есть и в калибровочных

принципах, лежащих в основе трех негравитационных взаимодействий (хотя, как обсуждалось в главе 5, для полного понимания этого факта требуется владение определенным математическим аппаратом).

В теории струн мы сталкиваемся следующего уровня глубины при объяснении явлений, поскольку все описанные принципы симметрии, а также суперсимметрия возникают из структуры этой теории. В самом деле, если бы ход истории был иным и физики открыли бы теорию струн несколькими столетиями раньше, можно предположить, что все эти принципы симметрии были бы открыты при изучении теории струн. Однако не стоит забывать, что в то время как принцип эквивалентности дает нам понимание того, почему существует гравитация, а калибровочные симметрии дают понимание того, почему существуют негравитационные силы, в контексте теории струн эти симметрии есть лишь *следствие*. И хотя их значимость никоим образом не преуменьшается, они — всего лишь часть выводов, содержащихся в гораздо большей теоретической структуре.

Данное обсуждение со всей ясностью приводит к следующему вопросу: является ли сама теория струн необходимым следствием некоторого более широкого принципа, — возможно, но необязательно, принципа симметрии, — в том же самом смысле, в котором принцип эквивалентности с неизбежностью приводит к общей теории относительности, а калибровочные симметрии приводят к негравитационным взаимодействиям? К моменту написания данной книги ответ на этот вопрос никому не известен. Чтобы осознать его важность, достаточно представить Эйнштейна, пытающегося сформулировать общую теорию относительности без тех счастливых идей, которые посетили его в Бернском патентном бюро в 1907 г. и привели к принципу эквивалентности. Нельзя вли к принципу эквивалентности. Нельзя утверждать, что формулировка общей теории относительности была бы невозможна, рини относительности она стала бы чрезвычайной, однако определенной. Принцип эквивалентности затруднительно сажать, систематичности превосходит подходящий подход для анализа и мощный организующий подход для гравитационного взаимодействия. К критерия гравитационного теории относительности, описание общей теории относительности-

сти, которое мы дали в главе 3, существенным образом опирается на принцип эквивалентности, а роль последнего в полном математическом формализме теории еще более критична.

В настоящее время теоретики находятся в положении Эйнштейна, утратившего принцип эквивалентности. С момента прогнившего предположения Венещиано в 1968 г. теория собиралась по кускам, открытие за открытием, революция за революцией. Однако центральный организующий принцип, который охватывает эти открытия, а также другие свойства теории в рамках одного универсального и систематического подхода, который делает существование каждого ингредиента абсолютно неизбежным, все еще не найден. Открытие этого принципа было бы центральным событием в развитии теории струн, так как это, вероятно, раскрыло бы внутренние механизмы теории с недостающей ранее ясностью. Конечно, нет гарантии, что такой фундаментальный принцип существует, однако эволюция физики в течение последнего столетия дает теоретикам основания надеяться, что он все-таки есть. Так как мы рассматриваем следующую стадию развития теории струн, нахождение ее «принципа безальтернативности» — той базовой идеи, из которой вся теория появится с необходимостью, — имеет высший приоритет<sup>2</sup>).

## Что есть пространство и время на самом деле, и можем ли мы без них обойтись?

В предыдущих главах мы часто волюно использовали понятия пространства и пространства-времени. В главе 2 мы описали эйнштейновское понимание того, что пространство и время нерасторжимо перемешаны благодаря неожиданному факту, что движение объекта в пространстве влияет на его перемещение во времени. В главе 3 мы углубили наше понимание роли пространства-времени в описании космоса посредством общей теории относительности, которая показывает, что гравитационное взаимодей-

ствие между разными областями вызвано изменениями детальной структуры пространства-времени. Как обсуждалось в главах 4 и 5, необходимость учета сильных квантовых флуктуаций в микромире привела к необходимости построения новой теории — так была открыта теория струн. И, наконец, в последующих главах мы видели, что согласно теории струн Вселенная имеет больше измерений, чем мы наблюдаем в повседневной жизни: некоторые измерения свернуты в крошечные, но сложные многообразия, способные претерпевать чудесные превращения, в которых их ткань прокалывается, рвется и затем восстанавливает сама себя.

Мы попытались проиллюстрировать эти идеи на рис. 3.4, 3.6 и 8.10, представляя структуру пространства и пространства-времени в качестве куска материала, из которого шита Вселенная. Эти рисунки обладают хорошей наглядностью и регулярно используются самими физиками в качестве наглядных пособий в практической работе. Хотя иллюстрации такого рода и дают постепенное ощущение понимания, все же напрашивается вопрос: «Что мы реально имеем в виду, говоря о структуре Вселенной?».

Это глубокий вопрос, который в той или иной форме был предметом дебатов в течение сотен лет. Ньютон объявлял пространство и время вечными и неизменными ингредиентами в строении космоса, исходными структурами, лежащими за пределами вопросов и объяснений. В *Началах* Ньютон писал: «*Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью*. II. *Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным*.»<sup>3</sup>

Тотгидр Лейбниц и другие шумно спорили, провозглашая, что пространство и время — всего лишь регистрационные приборы для удобной записи соотношений между объектами и событиями во Вселенной. Положение объекта в пространстве и во времени имеет смысл только в сравнении с дру-

гим объектом. Пространство и время есть лишь словарь для разговора об этих соотношениях, ничего более. Несмотря на то, что точка зрения Ньютона, поддержанная его тремя экспериментально проверенными законами движения, господствовала в течение более двух сотен лет, концепция Лейбница, развитая австрийским физиком Эрнстом Махом, гораздо ближе к современной картине. Как мы видели, специальная и общая теория относительности Эйнштейна решительно устранили понятие абсолютного и универсального пространства и времени. Однако можно спросить, является ли геометрическая модель пространства-времени, играющая центральную роль в общей теории относительности и теории струн, всего лишь удобной формулировкой для описания пространственных и временных отношений между различными событиями, или необходимо считать, что мы на самом деле погружены во *что-то*, когда говорим о нашем нахождении внутри ткани пространства-времени?

Хотя мы вступаем на территорию догадок, теория струн действительно предлагает ответ на этот вопрос. Гравитон, мельчайший сгусток гравитационных сил, является одним из частных примеров колебаний струны. И так же, как порождающее видимый свет электромагнитное поле состоит из огромного количества фотонов, гравитационное поле состоит из огромного числа гравитонов, т. е. из огромного числа мод колебаний струн, соответствующих этим частицам. В свою очередь, гравитационные поля кодируются искривлениями ткани пространства-времени, и поэтому мы должны отождествить структуру пространства-времени с колоссальным числом струн, методично колеблющихся в этой моде. На языке теории поля такой огромный организованный массив вибрирующих аналогичным образом струн известен как *когерентное состояние* струн. Это довольно поэтический образ — струны как нити ткани пространства-времени, — но нужно заметить, что его строгая формулировка все еще не разработана до конца.

Тем не менее описание ткани пространства-времени в такой шитой из струн форме

на самом деле приводит к следующему вопросу. Обычный кусок ткани есть конечный продукт работы ткача, который аккуратно соединил вместе отдельные нити, являющиеся исходным материалом текстильных изделий. Поэтому можно спросить, не существует ли исходного материала для ткани пространства-времени, т. е. такой конфигурации струн космической структуры, в которой они еще не срослись в организуемую форму, узнаваемую нами в образе пространства-времени. Заметим, что не вполне корректно представлять это состояние как беспорядочную массу отдельных колеблющихся струн, которые затем должны слиться вместе в упорядоченное целое, поскольку наше обычное восприятие заранее использует понятия пространства и времени — пространства колеблющихся струн и текущего времени, благодаря которым мы можем наблюдать изменение конфигурации от одного момента к следующему. В исходном состоянии, когда создающие структуру пространства-времени струны еще не включились в упорядоченный, когерентный танец колебаний, *пространства и времени не существует*. Сам наш язык слишком груб, чтобы говорить о таких вещах: в нем нет слов, с помощью которых можно описать то, что происходило до появления. Можно, в каком-то смысле, представлять себе исходные несвязанные струны порода знакомое пространство-время лишь после того, как включатся в резонансные колебания определенного вида.

Представление такого бесструктурного исходного состояния, в котором нет понятий пространства и времени в обычном смысле, требует предельного напряжения ума у большинства людей (во всяком случае, у меня). Как в шутке Стивена Райта о фотографии, которую держим в руках, мы вынуждены бороться со столкновением парадигм, когда пытаемся представить себе Вселенную, которая *есть*, но в которой каким-то образом не используются понятия пространства и времени. Тем не менее, вероятно, что нам придется привыкнуть к таким понятиям и осознать их смысл еще до того, как мы

сможем полностью оценить теорию струн. Причина состоит в том, что современная формулировка теории струн заранее предполагает существование пространства и времени, в котором струны (и другие объекты М-теории) движутся и вибрируют. Это позволяет вывести физические свойства теории струн во Вселенной с одним временным измерением, определенным числом развернутых пространственных измерений (обычно равным трем) и определенным числом дополнительных измерений, которые свернуты в одну из конфигураций, допускаемых уравнениями движения теории. Такой вывод, однако, подобен оценке творческих способностей художницы, которую для этого заставляют раскрашивать детские «раскраски». Без сомнения, она внесет персональное своеобразие в отдельные фрагменты, но при столь жестких ограничениях на стиль живописи для нас откроется лишь доля ее таланта. Аналогично, так как триумфом теории струн было естественное объединение квантовой механики и гравитации и так как гравитация связана с формой пространства и времени, мы не должны ограничивать теорию, заставляя ее действовать в уже существующих рамках пространства-времени. Вместо этого, так же, как мы должны позволить нашей художнице работать с чистого листа, мы должны позволить теории струн *создавать* ее собственную пространственно-временную арену, начиная с конфигурации, в которой пространство и время отсутствуют.

Есть надежда на то, что в теории, описывающей ход эволюции Вселенной с этой начальной точки (возможно, в эпоху до Большого взрыва, если, конечно, можно использовать временные термины — в отсутствие других лингвистических конструкций), возникнет фон когерентных колебаний струн, порождающий стандартные понятия пространства и времени. В таком подходе, если его удастся реализовать, пространство, время и, соответственно, размерность не являлись бы определяющими элементами Вселенной. Они были бы лишь удобными понятиями, вытекающими из существования более фундаментального первичного состояния.

Последние исследования по М-теории, возглавляемые Стивеном Шенкером, Эвардом Виттеном, Томом Бэнксом, Вилли Фишлером, Леонардом Сасскиндом и многими другими, уже сейчас показывают, что некоторое представление о мире без пространства и времени может дать нечто, известное под названием *нуль-браны*. Этот объект, возможно, является наиболее фундаментальным в М-теории; на больших расстояниях он ведет себя подобно точечной частице, однако на малых расстояниях его свойства совершенно иные. Исследования показали, что на масштабах, меньших планковских, нуль-браны, как и струны, демонстрируют нам неадекватность общепринятых понятий пространства и времени, однако при этом они позволяют взглянуть сквозь крошечное окошко на новый необычный мир, который так существует. Исследования с этими нуль-бранами показывают, что обычная геометрия заменяется новым аппаратом, известным под названием *некоммутативная геометрия* — областью математики, основы которой были разработаны французским математиком Аланом Конном<sup>4)</sup>.

В этом геометрическом подходе общепринятые понятия пространства и расстояния между точками уступают свое место совершенно иному набору понятий. Физики показали, однако, что если мы будем работать с расстояниями, большими планковской длины, стандартное представление о пространстве-времени действительно восстанавливается. Возможно, подходу некоммутативной геометрии все же недостает существенных моментов для описания самого *изначального* состояния, однако в нем уже содержится намек на то, что должно входить в более полный формализм для исследования пространства и времени.

Нахождение корректного математического аппарата для формулировки теории струн без обращения к изначальным понятиям пространства и времени является одной из наиболее важных задач, с которыми сталкиваются теоретики. Разобравшись в том, как возникает пространство и время, мы могли бы сделать огромный шаг к ответу на ключевой вопрос, какая геометрическая структура возникает *на самом деле*.

## Приведет ли теория струн к переформулировке квантовой механики?

Вселенная подчиняется законам квантовой механики с фантастической точностью. Однако даже с учетом этого, при формулировке теорий за последние полвека физики следовали, конструктивно говоря, стратегии, в которой квантовой механике отводилось несколько *второстепенная роль*. При разработке теорий физики часто начинают исследование на чисто классическом языке, в котором игнорируются квантовые распределения вероятностей, волновые функции и т.д., на языке, который был бы понятен физикам времен Максвелла и даже времен Ньютона, и затем накладывают квантовые концепции на классические идеи. Это подход не является чем-то удивительным, так как он прямо отражает наше восприятие. На первый взгляд, *природой правят законы*, коренящиеся в классических представлениях, таких, как частица, имеющая определенное положение и определенную скорость в любой заданный момент времени. Только после детальных исследований микромиромы осознали, что должны модифицировать эти знакомые классические идеи. Процесс развития науки прошел эволюцию от классического подхода до подхода, модифицированного квантовыми результатами, что и по сей день находит свое отражение в том, как физики разрабатывают новые теории.

Это, естественно, касается и теории струн. Математический формализм, описывающий теорию струн, движется с уравницей, описывающих движение крошечного, бесконечно тонкого куска *классической* нити, которые, в принципе, мог написать еще Ньютон триста лет назад. Затем эти уравнения *квантуются*. Иными словами, в систематическом подходе, развитом физиками в течение более 50 лет, классические уравнения преобразуются в квантово-механические, куда естественным образом включены вероятности, неопределенность, квантовые флуктуации и т.д. Фактически, в главе 12 мы видели эту процедуру в действии: в определенных процессах (см. рис. 12.6) используются квантовые понятия (в данном случае,

мгновенное квантово-механическое рождение пар виртуальных струн), а число петель определяет точность, с которой учтены квантово-механические эффекты.

Стратегия, в которой сначала используется классическое теоретическое описание, а затем включаются квантово-механические эффекты, в течение многих лет являлась в высшей степени плодотворной. В частности, именно она лежит в основе стандартной модели физики частиц. Однако возможно и, судя по последним результатам, вероятно, что подобный метод слишком консервативен для обращения с теориями такого высокого полета, как теория струн и М-теория. Причина состоит в том, что роль струны мы осознали, что Вселенной управляют квантово-механические принципы, наши теории должны являться квантово-механическими с самого начала. Ранее нам успешно удавалось менять классическую точку зрения на квантовую, поскольку мы зондировали Вселенную недостаточно глубоко, чтобы этот грубый подход нас подводил. Однако, учитывая глубину теории струн/М-теории, мы вполне можем поойти к последней черте этой проверенной на практике стратегии.

Особые основания для этого возникают при пересмотре некоторых результатов второй революции в теории суперструн (подытоженных на рис. 12.11). Как мы обсуждали в главе 12, дуальности, лежащие в основе пяти струнных теорий, говорят о том, что фиктивные процессы, происходящие в одной формулировке теории струн, могут быть переформулированы на языке любой из остальных. На первый взгляд, это переформулирование формулировка имеет мало общего с исходным описанием, но в этом и состоит сила дуальности: дуальность позволяет описывать один и тот же физический процесс несколькими способами, которые совершенно различны и удивительны. Эти результаты нетривиальны и удивительны. Эти результаты не вошли в упоминания об их них, однако мы еще не упомянули об их следствии, которое, возможно, важнее всего.

Процесс в одной из пяти теорий струн, который *сильно* зависит от квантовых эффектов (например, включающий струнные взаимодействия, которые не могли бы произойти в мире, управляемом классическими, и зойти в мире, управляемом классическими, а не квантовыми законами), преобразова-

ниями дуальности может быть часто сведен к процессу, *слабо* зависящему от квантовых эффектов с точки зрения других теорий струн (например, к процессу, характеристиками которого уточняются с учетом квантовых поправок, но качественная форма которого напоминает то, что могло происходить в чисто классическом мире). Это означает, что квантовая механика тесно переплетается с симметриями дуальности, лежащими в основе теории струн/М-теории: они являются *неотъемлемыми квантово-механическими симметриями*, так как одно из дуальных описаний сильно зависит от квантового рассмотрения. Из этого с необходимостью следует, что полная формулировка теории струн/М-теории, которая в основе своей включает обнаруженные симметрии дуальности, не может начинаться с классического рассмотрения, а затем подвергаться квантованию, как в обычном подходе. Если начинать с классической формулировки, то симметрии дуальности неизбежно будут упущены, так как они имеют место только в случае, если квантовые эффекты принимаются во внимание. Вместо этого оказывается, что полная формулировка теории струн/М-теории должна разрушить традиционный подход и дать жизнь полновесной квантово-механической теории.

В настоящее время никто не знает, как реализовать такой подход. Однако в качестве следующего крутого поворота в нашем понимании многие теоретики предпочитают реформулировать то, как квантовые принципы встраиваются в наше теоретическое описание Вселенной. Например, как сказал Курман Вада: «Я думаю, что переформулировка квантовой механики, которая разрешит многие из ее загадок, уже очень близка. Я думаю, многие разделяют точку зрения, что недавно обнаруженные дуальности указывают на новое, более геометрическое описание квантовой механики, в котором пространство, время и квантовые свойства будут неразрывно связаны друг с другом»<sup>5</sup>).

Или, согласно Эдварду Виттену, «я верю, что логический статус квантовой механики скоро изменится, и это будет похоже на то, как изменился логический статус гравитации, когда Эйнштейн открыл принцип

эквивалентности. В случае квантовой механики такой процесс далек от завершения, однако я думаю, что люди когда-нибудь будут рассматривать нашу эпоху как период начала этой науки»<sup>6</sup>).

С разумным оптимизмом можно предположить, что переформулировка принципов квантовой механики в рамках теории струн может привести к более мощному формализму, который позволит понять, как рождалась Вселенная и почему есть такие сущности, как пространство и время — к формализму, который продвинет нас на шаг вперед к ответу на вопрос Лейбница: почему есть «что-то», а не «ничто».

## Можно ли теорию струн проверить экспериментально?

Среди многих свойств теории струн, которые мы обсудили в предыдущих главах, возможно, особенно важны три нижеследующих. Во-первых, гравитация и квантовая механика являются неотъемлемыми принципами устройства Вселенной, и поэтому любой проект единой теории обязан включать и то, и другое. В теории струн это реализуется. Во-вторых, исследования на протяжении последнего столетия показали, что существуют и другие ключевые идеи, — многие из которых были проверены экспериментально, — являющиеся центральными для нашего понимания Вселенной. Среди этих идей мы упомянем спин, существование поколений частиц материи и частиц-переносчиков взаимодействия, калибровочную симметрию, принцип эквивалентности, нарушение симметрии и суперсимметрию. Все эти идеи естественным образом вытекают из теории струн. В-третьих, в отличие от более общепринятых теорий, таких, как стандартная модель с ее 19 свободными параметрами, которые могут подгоняться для обеспечения согласия с экспериментом, в теории струн свободных параметров нет. В принципе, ее выводы должны быть совершенно определенными — они должны обеспечить однозначную проверку того, верна теория или нет.

На пути от этого общего теоретизирования к практическому воплощению есть

много препятствий. В главе 9 мы описали некоторые технические преграды, которые и сегодня стоят перед нами, например, определение вида добавочных измерений. В главах 12 и 13 мы рассмотрели эти и другие препятствия в более широком контексте необходимости точного понимания теории струн, которое, как мы видели, естественным образом приводит нас к М-теории. Без сомнения, для достижения полного понимания теории струн/М-теории потребуется очень много работы и столь же много изобретательности.

На каждом этапе исследований в теории струн физики искали и будут продолжать искать экспериментально наблюдаемые следствия теории. Мы не должны терять из виду и более отдаленные возможности для поиска подтверждений теории струн, обсужденные в главе 9. В будущем, по мере углубления нашего понимания, без сомнения будут открыты другие эффекты или свойства теории струн, и они подскажут нам новые пути для косвенного экспериментального подтверждения. Важно отметить, что главной вековой для теории струн могло бы стать подтверждение суперсимметрии после открытия частиц-суперпартнеров, рассмотренных в главе 9. Напомним, что суперсимметрия была открыта в процессе теоретического исследования теории струн, и что это — центральная часть теории. Ее экспериментальное обнаружение могло бы стать убедительным, хотя и косвенным, подтверждением теории струн. Более того, открытие частиц-суперпартнеров могло бы стимулировать новые исследования: важность подтверждения суперсимметрии не исчерпывается лишь выяснением ответа на вопрос о том, имеет ли она отношение к нашему миру. Значения масс и зарядов частиц-суперпартнеров покажут, каким конкретным образом суперсимметрия реализуется в законах природы. И у теоретиков, занимающихся струнами, будет шанс проверить, допускает ли эта реализация законченную формулировку и объяснение в рамках теории струн. Конечно, с еще большим оптимизмом можно надеяться, что в течение следующих десяти лет, перед тем, как заработает Большой адронный ускоритель в Женеве, прогресс в по-

нимании теории струн будет достаточным для того, чтобы сделать детальные предсказания о суперпартнерах до их ожидаемого открытия. Подтверждение таких предсказаний стало бы моментом фундаментальной важности в истории науки.

## Существуют ли пределы познания?

Объяснение всего — даже в ограниченном смысле понимания всех сторон взаимодействия и элементарных составляющих Вселенной — есть одна из величайших задач, с которыми когда-либо сталкивалась наука. И теория струн впервые дает нам достаточно глубокий подход для решения этой задачи. Но сможем ли мы когда-нибудь понять все, на что способна теория, и, например, вычислить массы кварков или константу связи электромагнитного взаимодействия, от точных значений которых так много зависит во Вселенной? Как говорилось выше, на пути к цели стоят многочисленные теоретические преграды: сегодня важнее всего построить законченную формулировку теории струн/М-теории, не опирающуюся на теорию возмущений.

Но может ли случиться так, что даже при полном понимании теории струн/М-теории в рамках новой и более прозрачной формулировки квантовой механики мы окажемся неспособными ответить на вопрос о вычислении масс частиц и констант взаимодействия? Возможно ли, что вместо теоретических вычислений нам опловет придется прибегнуть к экспериментальным измерениям для определения этих значений? И, более того, может ли так статься, что причиной этому будет не то, что требуется еще более глубокая теория, а то, что объяснений этим наблюдаемым свойствам реального мира *не существует*?

На все эти вопросы можно сразу ответить «да». Как в свое время сказал Эйнштейн: «Наиболее необыкновенное во Вселенной — это то, что она объяснима»<sup>7</sup>).

Удвоенные нашей способностью понимания Вселенной в целом люди улетучиваются в век быстрого и впечатляющего прогресса.

Возможно, однако, что существует предел познания. И существование этого предела мы будем вынуждены признать после того, как достигнем самого глубокого уровня понимания, который может предложить наука, а некоторые черты Вселенной все же останутся необъясненными. Может быть, нам придется принять, что определенные черты Вселенной таковы, каковы они есть, лишь вследствие стечения обстоятельств, случая или божественного предопределения. Успех научного подхода в прошлом дал нам смелость думать, что, обладая достаточным количеством времени и прилагая достаточные усилия, мы сможем раскрыть загадки природы. Однако столкновение с абсолютным пределом научных объяснений, а не с техническим препятствием или с текучими границами человеческого понимания, которые постепенно расширяются, будет шоком, к которому опыт прошлого не может нас подготовить.

Несмотря на то, что эта проблема непосредственно относится к поискам окончательной теории, разрешить ее мы все еще не в силах; на самом деле, проблема предела научного познания (в приведенном выше широком смысле), возможно, не будет разрешена никогда. Мы видели, например, что даже для гипотезы мульти-вселенной, ограничивающей, на первый взгляд, возможность научного познания, существуют столь же гипотетические теории, в которых возможность познания восстанавливается (по крайней мере, в принципе).

Один из основных вопросов, возникающих при таком анализе — вопрос о роли космологии в установлении проявлений единой теории. Как мы обсуждали, суперструнная космология — это молодая наука, даже по стандартам молодой теории струн. Она, без сомнения, будет объектом пристального внимания исследователей в течение ближайших лет и, вероятно, станет одной из наиболее быстро развивающихся областей теории. По мере того, как мы продолжаем получать новые сведения о свойствах теории струн/М-теории, наша способность оценивать космологические проявления этой впечатляющей попытки построения единой теории станет даже сильнее. Возможно, конеч-

но, что такие исследования однажды убедят нас в том, что предел научному познанию действительно существует. Но возможно и обратное: что они возымеют о новой эре, в которой фундаментальное объяснение Вселенной будет, наконец, найдено.

## Достичь звезд

Хотя технологические ограничения привязывают нас к Земле и ее ближайшим спутникам в Солнечной системе, способность мыслить и экспериментировать позволила нам прощупать дальние зоны внутреннего и внешнего космического пространства. За последние сто лет коллективными усилиями многих физиков были раскрыты некоторые из самых глубочайших тайн природы. И эти добытые драгоценные крупицы познания расширили границы мира, который мы считали известным, но великолепие которого мы не могли себе и близко вообразить. Один из критериев глубины физической теории — это степень, в которой она изменяет наше мировоззрение в отношении тех понятий, которые до этого считались неизменяемыми. В соответствии с этим критерием, квантовая механика и теория относительности находятся за гранью самых безумных ожиданий. Волновые функции, вероятности, квантовое тунелирование, беспорядочные флуктуации вакуумной энергии, перемешивание пространства и времени, относительность одновременности, искривление пространства, черные дыры, Большой взрыв. Кто мог предположить, что интуитивный, механистический, раз и навсегда заведенный мир Ньютона окажется жалким частным случаем, и что существует целый мир, лежащий прямо за порогом мира обычных вещей?

Но даже эти потрясающие основы открытия — лишь элементы всеобъемлющей схемы. С твердой верой, что законы большого и малого должны сливаться вместе в согласованное целое, физики упорно охотятся за ускользающей единой теорией. Поиск не завершен, но благодаря теории суперструн, обобщенной до М-теории, возникла, в конце концов, убедительная схема для объединения квантовой теории, об-

щей теории относительности, а также теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Изменения наших взглядов на мир, порожденные этими достижениями, фундаментальны: мы представляем себе струнные петли и вибрирующие капли, которые увлекут все элементы мироздания в танец колеблющихся мод, педантично исполняемый во Вселенной с многочисленными скрытыми измерениями, способными претерпевать экстремальные изгибы, при которых структура пространства-времени рвется и затем снова себя восстанавливает. Кто мог подумать, что слияние гравитации и квантовой механики в единую теорию материи и взаимодействий приведет к такой революции в нашем понимании устройства Вселенной?

Без сомнения, поиск законченного и удобного вычислительного формализма теории суперструн сулит еще более грандиозные сюрпризы. Уже сейчас в исследованиях по М-теории мы увидели скрывающуюся за планковской длиной новую область Вселенной, в которой, возможно, нет понятия пространства и времени. И вот противоположная крайность: мы видели, что наша Вселенная может оказаться всего лишь одним из неисчислимых пузырей пены на поверхности широкого и турбулентного космического океана мульти-вселенной. Эти рассуждения сейчас кажутся невероятными, но они могут предрешать следующий скачок в нашем понимании Вселенной.

И в то время как наши взоры обращены в будущее в предвкушении грядущих чудес, мы можем отключиться назад и изумиться проделанному пути. Поиск фундаментальных законов Вселенной — это определенно человеческая драма, которая укрепила разум и обогатила дух людей. Вот яркое описание Эйнштейна его собственного поиска смысла гравитации: «Годы беспоконного поиска во тьме с огромной жадной результата, чередованием уверенности и опустошения, и, наконец, прорывом к свету»<sup>8)</sup>. Без сомнения, эта фраза — свидетельство человеческой борьбы. Мы все, каждый по-своему, искали истины, и мы все жаждем ответа на вопрос, зачем мы в этом мире. Взбираясь вместе на гору познания, физики следующих поколений крепко стоят на плечах предыдущих, смело устремляясь к вершине. Удается ли кому-нибудь из наших потомков получить полную картину и увидеть обширный и эфемерную Вселенную во всей ее ослепительной красе? Мы не можем этого предсказать. По мере того как каждое новое поколение взбирается немного выше, мы понимаем изречение Якоба Бронновски: «В каждом веке есть поворотный момент, новый способ видения и признания согласованности мира»<sup>9)</sup>. И так как наше поколение уже восхитилось новым видением Вселенной — нашим новым способом признания согласованности мира, мы выполнили часть задачи, построив свою ступеньку на лестнице, ведущей человека к звездам.

## Примечания

### Глава 1

1. Таблица справа — расширенный вариант табл. 1.1. В нее входят массы и константы взаимодействия элементарных частиц всех трех семейств. Кварк каждого типа может обладать тремя значениями сильного заряда, которые названы (довольно причудливо) цветами. Приведенные значения константы слабого взаимодействия представляют собой, строго говоря, «третью компоненту» слабого изоспина. (Мы не привели «правосторонние» компоненты частиц — они отличаются отсутствием заряда слабого взаимодействия.)
2. Помимо показанных на рис. 1.1 петель (*замкнутых струн*), могут также существовать струны со свободными концами (так называемые *открытые струны*). Чтобы упростить изложение, в большей части книги мы ограничимся замкнутыми струнами, хотя практически все, о чем мы будем говорить, справедливо для струн обоих типов.
3. Из письма Альберта Эйнштейна к другу. Написано в 1942 г., цитируется по книге: Tony Hey, Patrick Walters, *Einstein's Mirror*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997.
4. Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon, 1992, p. 52. (Рус. пер.: Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: УРСС, 2004.)
5. Интервью с Эдвардом Виттенем, 11 мая 1998 г.

### Глава 2

1. Присутствие массивных тел, подобных нашей Земле, усложняет картину за счет добавления гравитационных сил. Поскольку мы сфокусируем свое внимание на движении в горизонтальном, а не в вертикальном направлении, можно игнорировать присутствие Земли. В следующей главе мы подробно рассмотрим гравитацию.
2. Если выражаться более точно,  $300\,000\text{ км/с}$  — это скорость света в вакууме. Когда свет распространяется в какой-либо среде, например в воздухе или стекле, его скорость уменьшается, подобно тому, как камень, брошенный со скалы, замедляет свое движение, войдя в воду. Поскольку замедление скорости света в среде по отношению к его скорости в вакууме не оказывает никакого влияния на рассматриваемые нами релятивистские эффекты, мы будем его в дальнейшем игнорировать.
3. Для читателей, любящих математику, заметим, что эти наблюдения могут быть выражены в количественной форме. Например, если движущиеся световые часы имеют скорость  $v$ , а фотон совершает свое движение «туда и обратно» за  $t$  секунд

(по показаниям неподвижных часов), то за время, которое потребуется фотону, чтобы вернуться к нижнему зеркалу, световые часы пройдут расстояние  $vt$ . Используя теорему Пифагора, можно рассчитать длину пути по диагонали на рис. 2.3.

Она составит  $\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$ , где  $h$  представляет собой расстояние между зеркалами световых часов (равное 15 см). Суммарная длина двух диагональных отрезков будет равна  $2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$ . Поскольку скорость света является константой, которая обычно обозначается  $c$ , фотону потребуется  $2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}/c$  секунд на то, чтобы пройти оба диагональных отрезка. Таким образом, у нас есть уравнение  $t = 2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}/c$ , из которого

мы можем найти значение  $t = 2h/\sqrt{c^2 - v^2}$ . Чтобы избежать недоразумений, обозначим это значение как  $t_{\text{выж}}$  =  $2h/\sqrt{c^2 - v^2}$ , индекс у  $t$  в этом выражении указывает на то, что мы измеряем продолжительность одного цикла для движущихся часов. С другой стороны, время цикла для неподвижных часов  $t_{\text{непож}}$  можно рассчитать по формуле  $t_{\text{непож}} = 2h/c$ . Используя несложные алгебраические преобразования, получим выражение  $t_{\text{выж}} = t_{\text{непож}}/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , которое непосредственно свидетельствует о том, что продолжительность цикла движущихся часов больше, чем у неподвижных. Это означает, что для промежутка времени между двумя выбранными событиями движущиеся часы совершат меньше число тиков, чем неподвижные, т. е. для движущегося наблюдателя пройдет меньше времени.

4. Если опыт с ускорителем частиц, понинный узкому кругу специалистов, не выглядит для вас очень убедительным, приведем еще один пример. В октябре 1971 г. Дж. С. Хэйлс, работавший в то время в Институте Военно-морской лаборатории США проводил эксперимент, в ходе которого девятые атомные часы провели около 40 часов на борту самолетов, совершавших коммерческие авиарейсы. После того, как был учтен ряд тонких эффектов, связанных с действием гравитации (которая будет обсуждаться в следующей теории относительности), расчеты с использованием специальной теории относительности показали, что показания движущихся часов должны были быть меньше показаний неподвижных часов на несколько сотен миллиардных долей секунды. Именно такие данные мы и получили Хэйлс и Киттинг; для движущихся часов время *фактически замедляет ход*.
5. Хотя на рис. 2.4 правильно изображено сжатие тела в направлении движения, этот рисунок не дает представления о том, что мы в действительности

Частица	Масса*	Электрический заряд*	Заряд слабого взаимодействия	Заряд сильного взаимодействия
Семейство 1				
Электрон	0,00054	-1	-1/2	0
Электронное нейтрино	$< 10^{-8}$	0	1/2	0
u-кварк	0,0047	2/3	1/2	красный, зеленый, синий
d-кварк	0,0074	-1/3	-1/2	красный, зеленый, синий
Семейство 2				
Мюон	0,11	-1	-1/2	0
Мюонное нейтрино	$< 0,0003$	0	1/2	0
s-кварк	1,6	2/3	1/2	красный, зеленый, синий
b-кварк	0,16	-1/3	-1/2	красный, зеленый, синий
Семейство 3				
Тау-частица	1,9	-1	-1/2	0
Тау-нейтрино	$< 0,033$	0	1/2	0
t-кварк	189,0	2/3	1/2	красный, зеленый, синий
b-кварк	5,2	-1/3	-1/2	красный, зеленый, синий

\* В единицах массы протона.

\*\* В единицах заряда протона.

увидим, если мимо нас пролетит тело, движущееся со световой скоростью (при условии, что наш глаз или фотографическое оборудование, которое мы используем, имеют достаточную разрешающую способность, чтобы вообще хоть что-то увидеть). Чтобы увидеть что-то, глаз или камера должны получить свет, отраженный от поверхности тела. Однако, поскольку отраженный свет приходит от разных участков тела, тот свет, который мы будем видеть в каждый момент времени, будет проходить по путям различной длины. Результатом явится рябятящаяся иллюзия — тело будет выглядеть сжатывшимся по длине и повернутым.

6. Для читателей, имеющих математическую подготовку, заметим, что по 4-вектору положения в пространстве-времени  $x = (ct, x_1, x_2, x_3) = (ct, \vec{x})$  можно построить 4-вектор скорости

$$u = \frac{dx}{d\tau}$$

где  $\tau$  — собственное время, определяемое соотношением

$$d\tau^2 = dt^2 - c^{-2}(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2).$$

Тогда «скорость в пространстве-времени» будет представлять собой величину 4-вектора  $u$ .

$$\sqrt{\frac{c^2 dt^2 - d\vec{x}^2}{(dt^2 - c^{-2} d\vec{x}^2)^2}}$$

которая равна скорости света  $c$ . Теперь уравнение

$$c^2 \left(\frac{dt}{d\tau}\right)^2 - \left(\frac{d\vec{x}}{d\tau}\right)^2 = c^2,$$

можно переписать в форме

$$c^2 \left(\frac{d\tau}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d\vec{x}}{dt}\right)^2 = c^2.$$

Это показывает, что увеличение скорости тела в пространстве  $\sqrt{(d\vec{x}/dt)^2}$  должно сопровождаться уменьшением величины  $d\tau/dt$ , которая предсказывает собой скорость объекта во времени (экспрессив, с которой идут его собственные часы  $d\tau$  по отношению к скорости наших неподвижных часов  $dt$ ).

## Глава 3

1. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*, trans. A. Motte and Florian Cajori. Berkeley: University of California Press, 1962, v.1, p. 634. (В рус. пер. см.: письмо Ньютона архиепископу Бентли от 25 февраля 1693 г. // Письма Ньютона и Ньютоны. М.: ВИЕТ, 1993, № 1, с. 33–45.)
2. Если говорить точнее, Эйнштейн осознал, что принцип эквивалентности сохраняется до тех пор, пока наблюдения ограничены достаточно малой областью пространства, т. е. до тех пор, пока ваще «клетка» достаточно мала. Причина этого состоит в следующем. Иттенсивность (и направление) гравитационных полей могут измениться от точки к точке. Однако мы считаем, что купе в целом ускоряется как единое тело и, следовательно, это ускорение имитирует действие однородного гравитационного поля. Чем меньше будет купе, тем меньше пространство, в котором гравитационное поле может измениться и, следовательно, тем более применим принцип эквивалентности. Разность между однородным гравитационным полем, имитируемым ускорением, и возможно неоднородным «реальным» гравитационным полем, созданным совокупностью массивных тел, носит название «привинного» гравитационного поля (по-скольку им объясняется влияние тяготения Луны на приливы на Земле). Подозгаывая данное пренебрежение, можно сказать, что уменьшая размер купе, можно сделать приливные гравитационные поля менее заметными и добиться того, что ускоренное движение и «реальное» гравитационное поле будут неразличимы.
3. Цитируется по книге: Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*. New York: Viking, 1997, p. 315.
4. John Stachel, Einstein and the Rigidly Rotating Disk. Опубликованно в *General Relativity and Gravitation*, ed. A. Held. New York: Plenum, 1980, p. 14.
5. Анализ аттракциона *Верхом на торнадо* или «жесткого вращающегося диска», как он называется на более профессиональном языке, может привести к недоразумениям. Так, например, в то сей день нет общего согласия по ряду деталей этого примера. В тексте мы следовали духу анализа, выполненного самим Эйнштейном: в примечании мы, оставаясь на той же точке зрения, постараемся пояснить некоторые особенности, которые могут привести к недоразумениям. Во-первых, может показаться непонятным, почему длина окружности колеса не испытывает лоренцевского сокращения в той же мере, что и линейная: в этом случае результаты, полученные Слимом, совпадали бы с первоначальными. Здесь следует иметь в виду, что мы все время считали, что колесо непрерывно вращается и *диск*ода не рассматривают его в состоянии покоя. Таким образом, с точки зрения неподвижных наблюдателей, единственное различие между измерениями длины окружности и измерениями длины Слима будет состоять в том, что линейка Слима испытала лоренцевское сокращение, колесо вращалось и во время наших измерений, и тогда, когда мы

наблюдали за измерениями Слима. Видя, что линейка Слима испытала сокращение, мы понимали, что ему придется приложить ее большее число раз, чтобы пройти по всей длине окружности и, следовательно, он получит большее значение, чем мы. Лоренцевское сокращение окружности колеса можно установить, только сравнив результаты измерений на покоящемся и вращающемся колесе, однако такого сравнение нас не интересовало. Во-вторых, хотя нам и не требовалось анализировать аттракцион в состоянии покоя, у нас может остаться вопрос, а что случится с колесом, когда оно замедлит свое движение и остановится? Может показаться, что в этом случае следует учитывать изменение длины окружности при изменении скорости вращения, вызванное сокращением Лоренца. Но как можно согласовать это с неизменным радиусом? Это тонкая проблема, решение которой опирается на тот факт, что в реальном мире не существует абсолютно жестких тел. Тела могут растягиваться и изгибаться в ответ на испытываемое ими растяжение или сжатие. Если этого не произойдет, то, как указал Эйнштейн, диск, изготовленный путем охлаждения вращающейся ступицы, может разрушиться при изменении скорости вращения. Более подробно история с жестким вращающимся диском описана в работе Стабеля<sup>4)</sup>.

6. Искусственный читатель поймет, что в примере с аттракционом *Верхом на торнадо*, т. е. в случае равномерно вращающейся системы отсчета, искривленные траекторные пространственные сечения, на которых мы сконцентрировали наше внимание, объединяются в четырехмерное пространство-время с нулевой кривизной.
7. Цитата Гедрика Минковского взята из работы: Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*. New York: Viking, 1997, p. 189.
8. Интервью с Джоном Уилером, 27 января 1998 г.
9. Точность существующих атомных часов достаточно для того, чтобы обнаружить столь малые и даже еще меньше искривления времени. Например, в 1976 г. Робер Вессо и Мартин Левин из Смитсоновской астрофизической обсерватории Гарвардского университета совместно со своими коллегами из Национального управления по аэронавтике и космическим исследованиям США (NASA) установили на ракете и Scott D. стартовавшей с о. Уоллоу в штате Вирджиния, атомные часы, точность которых составляет одну триллионную долю секунды в час. Они наделись радиометростанцией, которая могла достигнуть достаточной высоты (в результате чего уменьшилось влияние гравитационного притяжения Земли), идентичные часы, расположенные на Земле (которые будут в полной мере подвергаться действию земного тяготения) будут идти медленнее. Благодаря дисперсионному обмену микроволновыми сигналами исследователи смогли продемонстрировать показания двух атомных часов и установить, что действительно, на достигнутой ракете максимальной высоте 10 000 км установившие на ней атомные часы отстали на 4 микросекунды доли секунды часа, оставшись на Земле. Расско-

жение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов составило менее 0,01 %.

10. В середине XIX в. французский ученый Урбен Жан-Жозеф Леверье установил, что орбита планеты Меркурий немного отклоняется от орбиты, по которой она должна вращаться вокруг Солнца в соответствии с ньютоновским законом всемирного тяготения. В течение более чем полвека предлагались самые разные объяснения так называемой аномальной прецессии перигелия (на обычном языке, в крайних точках своей орбиты Меркурий оказывался не в том месте, в котором он должен был находиться согласно теории Ньютона). В качестве возможных причин рассматривалось гравитационное влияние неизвестной планеты или пояса астероидов, влияние неизвестного спутника, возмущения межзвездной пыли, сплюснутость Солнца, однако ни одно из этих объяснений не получило общего признания. В 1915 г. Эйнштейн рассчитал прецессию перигелия Меркурия с помощью уравнений только что открытой им общей теории относительности. Он получил результат, который по его собственному свидетельству заставил его сердце уязвимо биться: значение, полученное с помощью общей теории относительности, в точности совпадало с экспериментальными данными. Этот успех, несомненно, был одним из важных пунктов, заставивших Эйнштейна поверить в свою теорию, но большинство других исследователей ожидало предсказания новых явлений, а не объяснения уже известных аномалий. Более подробно эта история описана в книге: Abraham Pais. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. New York: Oxford University Press, 1982. (Рус. пер.: Паис А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, Физматлит, 1989.)
  11. Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation*. New Brunswick, N. J.: Rutgers University Press, 1996, p. 39.
  12. К большому удивлению ученых, неважно тщательные исследования скорости расширения Вселенной показали, что в нее может давать вклад очень небольшая, но ненулевая космологическая постоянная.
- ## Глава 4
1. Richard Feynman, *The Character of Physical Law*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1965, p. 129. (Рус. пер.: Фейнман Р. Характер физических законов. М.: Мир, 1968.)
  2. Хотя работа Планка разрешила загадку бесконечной энергии, по всей видимости, не эта загадка была непосредственной причиной, побудившей его к этому исследованию. Планк пытался решить эту, очень близкую проблему, связавшую с экспериментальными данными, описывающими распределение энергии в духеке (или, если быть более точным, в «черном теле») по длинам волн. Дополнительные сведения по истории этой работы интересующий читатель может найти в книге Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quan-*

tum Discontinuity, 1894–1912. Oxford, Eng.: Clarendon, 1978.

3. Более точно, Планк показал, что волны, минимальная энергия которых превышает их ожидаемый средний термодинамический вклад (согласно термодинамике девятнадцатого века), подпадают по экспоненциальному закону. Степень подпадения резко увеличивается с увеличением частоты.
4. Постоянная Планка равна  $1,05 \times 10^{-27}$  (r-cm<sup>2</sup>)/c.
5. Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way*. New York: Anchor, 1989, p. 286.
6. Стивен Хокин. Доклад на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и теории струн, 21 июня 1997 г.
7. Следует отметить, что с помощью фейнмановского подхода к квантовой механике можно вывести подход, основанный на волновых функциях, и наоборот; следовательно, эти два подхода полностью эквивалентны. Однако концепции, терминология и интерпретация, даваемая каждым из этих подходов, различаются очень сильно, несмотря на то, что решения, которые они дают, тождественны.
8. Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton: Princeton University Press, 1988. (Рус. пер.: Фейнман Р. Квантовая электродинамика: странная теория света и материи. М.: Наука, 1988 (Библиотека «Квант». Вып. 66).)

## Глава 5

1. Stephen Hawking, *A Brief History of Time*. New York: Bantam Books, 1988, p. 175. (Рус. пер.: Хокин С. От Большого взрыва до черных дыр. М.: Мир, 1998.)
2. Цитируется по книге: Timothy Ferris, *The Whole Shebang*. New York: Simon & Schuster, 1997, p. 97.

3. Если вы все еще озабочены тем, как вообще что-либо может происходить в пустом пространстве, мы должны понять, что соотношение неопределенностей накладывает ограничения на то, насколько «пустой» может в действительности быть область пространства. Например, применительно к пустому пространству поля (таким, как электромагнитные волны, распространяющимся в электромагнитном поле) соотношение неопределенностей утверждает, что амплитуда волны и ее частота инверсионно связаны: чем выше частота, тем меньше амплитуда, тем тоньше узкая амплитуда, тем меньше моно частота, с которой она изменяется. Когда мы говорим, что область в пространстве является пустой, мы обычно имеем в виду, что, помимо всего пустой, мы обычно имеем в виду, что, помимо всего прочего, в ней не распространяются волны и что поля, в ней не имеют ненулевой интенсивности. Пользуясь все поля и имеют нулевую интенсивность. Мы можем по-прежнему использовать язык, мол, перепробуем по-прежнему, но очень близкую проблему, связанную с распределением энергии в духеке (или, если быть более точным, в «черном теле») по длинам волн. Дополнительные сведения по истории этой работы интересующий читатель может найти в книге Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quan-*





- Если говорить более точно, спин, равный  $1/2$ , означает, что *момент импульса* электрона, связанный с его спином, составляет  $\hbar/2$ .
- Открытие и развитие понятия суперсимметрии имеет непростую историю. В дополнение к тем, кто указан в тексте, основополагающий вклад внесли Р. Хагг, М. Соунус, Дж. Т. Лоушанский, Я. А. Гольдшайт, Е. П. Лихтман, Дж. Л. Шеррз, Б. Сюкита, В. П. Акулов, Д. В. Волков и В. А. Сорока. Некоторые из их работ вошли в обзор Rosane Di Stefano, *Notes on the Conceptual Development of Supersymmetry*, Institute for Theoretical Physics, State University of New York at Stony Brook, preprint ITP-SB-8878.
- Для читателя, имеющего математическую подготовку, заметим, что это расширение включает дополнение обычных декартовых координат в пространственно-временными, квантовыми координатами, скажем  $x$  и  $y$ , которые *антикоммутируют*, и  $\psi$  и  $\chi$ , которые *коммутируют*. Это позволяет рассматривать суперсимметрию как симметрию относительно трансляций в квантово-механическом расширении пространственно-времени.
- Для читателя, интересующегося деталями этого технического вопроса, заметим следующее. В примере 6 к главе 6 мы упоминали, что стандартная модель вводит «частицу, дающую массу, хитговской бозон, которая генерирует измеримые экспериментально массы элементарных частиц, перечисленных в табл. 1.1 и 1.2. Для того чтобы эта процедура работала, хитговская частица сама по себе не должна быть слишком тяжелой; проведенные исследования показывают, что ее масса, во всяком случае, не должна превышать примерно 1000 масс протона. Однако оказалось, что квантовые флуктуации могут внести значительный вклад в массу хитговской частицы: это, в принципе, может приводить к массам, близким к планковской. Тем не избежав этого результата, указавшего на серьезный дефект стандартной модели, путем тонкой настройки некоторых параметров стандартной модели (прежде всего так называемой голдой массы хитговской частицы) с точностью порядка  $10^{-15}$ , что позволяет нейтрализовать влияние квантовых флуктуаций на массу хитговской частицы.
- Один тонкий момент, относящийся к рис. 7.1, состоит в том, что на этом рисунке интенсивное слабое взаимодействие занимает промежуточное положение между интенсивностью сильного и электромагнитного взаимодействия, хотя ранее мы говорили, что она слабее всех. Объяснение этого можно найти в табл. 1.2, из которой видно, что частицы-переносчики слабого взаимодействия являются достаточно массивными, тогда как частицы-переносчики сильного и электромагнитного взаимодействия, являются слабо-массивными. В действительности интенсивность слабого взаимодействия (определяемая соответствующей константой связи, с которой мы сталкиваемся в главе 12) является такой, как показано на рис. 7.1, но массивная частица, передающая это взаимодействие, довольно пассивно выполняет свои функции, что приводит

к уменьшению интенсивности этого вида взаимодействия. В главе 14 мы увидим, как вписывается в картину рис. 7.1 гравитационное взаимодействие.

- Эдвард Виттен, из цикла лекций в память Хайнца Паульса, г. Аспен, Колорадо, 1997 год.
- Углубленное обсуждение этой и ряда других смежных идей приведено в книге Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (Рус. пер.: *Вальсере С. Мечты об окончательной теории*. М.: УРСС, 2004).

## Глава 8

- Это простая идея, однако, поскольку несовершенство нашего обычного языка приводит иногда к недопониманию, приведем два пояснения. Во-первых, мы считаем, что муравей *живет на поверхности* Салового шланга. Если бы муравей мог зарываться *вглубь* шланга, т.е. если бы он мог проникать внутрь резины, из которой сделан шланг, нам бы потребовалось три числа, чтобы указать его местоположение, поскольку нужно было бы указать, как глубоко он закопался. Однако если муравей живет только на поверхности шланга, то чтобы указать его положение, достаточно двух чисел. Отсюда следует необходимость второго пояснения. Даже тогда, когда муравей живет на поверхности шланга, мы можем, если захотим, указать его положение с помощью трех чисел: обычных положений в направлениях влево-вправо, вперед-назад и вверх-вниз в нашем привычном трехмерном пространстве. Однако когда известно, что муравей живет на поверхности шланга, два числа, упомянутые в тексте, представляют собой *минимальный* набор величин, однозначно определяющих положение муравья. Именно это и имелось в виду, когда мы говорили, что поверхность шланга двумерна.
- Как ни удивительно, физики Сасае Димодуле, Нина Аркани-Хамед и Тив Дали, основываясь на более ранних догадках Индиано Антониадзи и Джозефа Лигука, смогли показать, что даже если бы сферичные дополнительные измерения были столь велики, что достигли размера в один миллиметр, они могли бы оставаться необнаруженными экспериментально. Причина состоит в том, что сферичные части исследуют микроскоп с помощью сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Гравитационное взаимодействие, которое при технологически достижимых энергиях остается чрезвычайно слабым, обычно игнорируется. Однако Димодуле с коллегами показали, что сферичные измерения оказывают влияние (это выглядит вполне правдоподобно в теории струн); этот эффект вполне мог бы пропущен во всех экспериментах, выполненных до настоящего времени. В ближайшем будущем с использованием высокоточной аппаратуры будут проведены новые эксперименты по изучению гравитационных эффектов, предназначенных для поиска таких «крупных» сферичных измерений. Положительный результат будет означать одно из величайших открытий в истории человечества.

- Edwin Abbott, *Flatland*, Princeton: Princeton University Press, 1919. (Рус. пер.: *Эббот Э. Флатландия*. М.: Амфора, 2001.)
- Писмо А. Эйнштейна к Т. Калузе. Цитируется по книге: Abraham Pais, *Subtle is the Lord*, New York: Oxford University Press, 1982, p. 330. (Рус. пер.: *Пале А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*. М.: Наука, Физматлит, 1989.)
- Писмо А. Эйнштейна к Т. Калузе. Цитируется по статье Д. Фридман и P. van Nieuwenhuizen, *The Hidden Dimensions of Spacetime*, *Scientific American*, 252 (1985), 62.
- Там же.
- Физики установили, что в многомерную формулировку труднее всего включить такое понятие стандартной модели как *киральность*. Поэтому, чтобы не перегружать обсуждение, мы не стали рассматривать это понятие в основном тексте. Для читателей, интересующихся этим вопросом, дадим здесь его краткое описание. Представьте, что кто-то показывает вам фильм, демонстрирующий некоторый научный эксперимент, и предлагает необычное задание — определить, показывает ли фильм сам эксперимент или его отражение в зеркале. Поскольку оператор был очень опытным, никаких признаков наличия зеркала на ленте не видно. Можете ли вы решить эту задачу? В середине 1950-х гг. экспериментальные результаты П. С. Ву и ее коллег показали, что вы можете решить эту задачу, если на ленте снят подходящий эксперимент. А именно, их работы доказали, что законы мироздания не обладают полной зеркальной симметрией в том смысле, что зеркальные аналогии некоторых процессов, определяемых слабым взаимодействием, *не могут существовать в нашем мире*, даже если исходные процессы существуют. Таким образом, если, просматривая фильм, вы увидите, что он демонстрирует один из таких запрещенных процессов, вы будете знать, что наблюдаете зеркальное отражение, а не сам эксперимент. Поскольку зеркальное отражение меняет местами левое и правое, работы Ли, Янга и Ву показали, что Вселенная не обладает полной симметрией левого и правого, или, используя специальную терминологию, что Вселенная является *киральной*. Именно это свойство стандартной модели (в частности, слабого взаимодействия) физики считали почти невозможным включить в теорию супергравитации высших размерностей. Чтобы избежать несогласия, отметим, что в главе 10 мы будем обсуждать концепцию теории струн, известную под названием «зеркальной симметрии», но там слово «зеркальная» будет использоваться в совершенно ином смысле.

- Эта иллюстрация была любезно предоставлена Эндрю Хэнсоном из университета штата Иллиной, она была создана с использованием графического пакета *Mathematica 3-D*.
- Для читателя, имеющего математическую подготовку, заметим, что это конкретное пространство Каалаби-Яу представляет собой действительное трехмерное сечение гиперповерхности пятого порядка в комплексном проективном четырехмерном пространстве.

## Глава 9

- Edward Witten, *Reflections on the Fate of Spacetime*, *Physics Today*, April 1996, p. 24.
- Интервью с Эдвардом Виттеном, 11 мая 1998 г.
- Sheldon Glashow and Paul Ginsparg, *Desperately Seeking Superstrings?* *Physics Today*, May 1986, p. 7.
- Sheldon Glashow. Опубликован в *The Superworld 1*, ed. A. Zichichi, New York: Plenum, 1990, p. 250.
- Sheldon Glashow, *Interactions*, New York: Warner Books, 1988, p. 335.
- Richard Feynman, Опубликован в *Superstrings: A Theory of Everything?* ed. Paul Davies and Julian Brown, Cambridge, Eng: Cambridge University Press, 1988.
- Howard Georgi. Опубликован в *The New Physics*, ed. Paul Davies, Cambridge: Cambridge University Press 1989, p. 446.
- Интервью с Эдвардом Виттеном, 4 мая 1998 г.
- Интервью с Куртумом Вафой, 12 января 1998 г.
- Цитируется по книге: Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation*, New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996, p. 414.
- Интервью с Шедоном Глшоу, 28 декабря 1997 г.
- Там же.
- Интервью с Говардом Джорджи, 28 декабря 1997 г. Во время интервью Джорджи также отметил, что экспериментальное опровержение предсказания распада протона, которое следовало из предложенной им и Глшоу первой теории великого объединения (см. главу 7), сыграло существенную роль в его решении принять теорию суперструн. Он горько сожалел, что физики считали почти невозможным принять теорию суперструн, чем любя друг друга (и Глшоу) были настолько уверены, что она была предложена «природой», его отношение «да» было нонконформным по отношению к изучению физики чрезвычайно высоких энергий резко изменилось. Когда я спросил его, не будет ли для него экспериментальное опровержение теории для него экспериментальное подтверждение в на великого объединения стимулом масштабной, но отступление на один шаг «очень может быть».
- David Gross, *Superstrings and Unification*. Опубликован в *Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics*, ed. R. Kothaus and J. Kuhn, Berlin: Springer-Verlag, 1988, p. 329.

- Сказав это, следует помнить о возможности, указанной в примечании 8 к главе 6, что струны могут иметь значительно больший размер, чем считается первоначально, и, следовательно, могут стать объектом прямого экспериментального изучения на ускорителях в течение ближайших десятилетий.
- Для читателя, ищющего математическую подготовку, заметим, что согласно более точной математической формулировке число семейств равно половине абсолютного значения числа Эйлера для пространства Калаби—Яу. Число Эйлера представляет собой сумму размерностей групп гомотопий многообразия, где группы гомотопий это то, что мы на нашем нестрогом языке назвали многомерными отверстиями. Таким образом, количество семейств, равное трем, следует из того, что число Эйлера для этих пространств Калаби—Яу равно  $\pm 6$ .
- Интервью с Джоном Шаррием, 23 декабря 1997 г.
- Для читателя, ищющего математическую подготовку, заметим, что мы ставим в соответствие многообразию Калаби—Яу конечную нетривиальную фундаментальную группу, порядок которой в некоторых случаях определяет знаменатель дробного заряда.
- Интервью с Эвардом Виттеном, 4 марта 1998 г.
- Для читателя, обоим знакомых с рассматриваемыми вопросами, заметим, что некоторые из этих профессоров нарушают закон сохранения лептонного числа, а также CPT-симметрию (инвариантность относительно изменения знака заряда, четности и направления времени).

## Глава 10

- Приведем для полноты, что хотя большая часть приведенных выше аргументов в равной степени справедлива как для открытых струн (струн со свободными концами), так и для замкнутых струн (которым мы уделили основное внимание), в рассматриваемом вопросе два типа струн могут, кажется, проявлять различные свойства. Действительно, открытая струна не может быть «насажена» на каллибровское измерение. Тем не менее, в результате исследования, сыгравших в конце концов ключевую роль во второй революции суперструн, Джо Полиньяк из Калифорнского университета в городе Санта-Барбара и двое его студентов, Джиан-Хои Дай и Роберт Лей, в 1989 г. продемонстрировали, что открытые струны прекрасно вписываются в схему, которая будет описана в данной главе.
- Чтобы ответить на вопрос о том, почему возможные энергии однопорочных колебаний равны *целым* кратным  $1/R$ , достаточно лишь вспомнить об особенностях квантовой механики (в частности, примечание а) в главе 4. Там мы узнали о том, что согласно квантовой механике энергия, как и длина, существуют в виде дискретных порций, т. е. в виде целых кратных различных энергетических единиц. В случае однопорочного колебательного

движения струны во вселенной Салдового шланга эта энергетическая единица в точности равна  $1/R$ , как объясняется в основном тексте на основе соотношения неопределенностей. Таким образом, энергия однопорочных колебаний равна произведению целых чисел на  $1/R$ .

- Математическое равенство энергий струн во вселенной с радиусом шиклического измерения  $R$  или  $1/R$  есть следствие формулы для энергии  $w/R + wR$ , где  $w$  — колебательное число, а  $w$  — топологическое число. Данное уравнение инвариантно относительно одновременных взаимных замен  $w$  на  $w$  и  $R$  на  $1/R$ , т. е. при перестановке колебательных и топологических чисел с одновременной инверсией радиуса. Мы используем планковские единицы, но можно работать и в более привычных единицах, если переписать формулу для энергии через так называемую струнную шкалу  $\sqrt{G'}$ , значение которого примерно равно планковской длине, т. е.  $10^{-33}$  сантиметра. В результате энергия запишется в виде выражения  $\pi R + wR/a'$ , инвариантного относительно взаимной замены  $w$  на  $w$  и  $R$  на  $a'/R$ , где последние две величины выражены в стандартных единицах расстояния.
- У читателя может возникнуть вопрос, каким образом с помощью струны, наматывающей вокруг шиклического измерения радиусом  $R$ , можно измерить значение радиуса  $1/R$ . Хотя этот вопрос совершенно правомерен, ответ на него, в действительности, заключается в том, что сам вопрос сформулирован некорректно. Когда мы говорим, что струна наматывается на окружность радиуса  $R$ , мы с необходимостью используем определение расстояния (чтобы фраза «радиус  $R$ » имела смысл). Однако *это* определение расстояния относится к модам ненамотанной струны, т. е. к колебательным модам. С точки зрения этого определения расстояния (и только этого!) конфигурация наматывающей струны выглядит так, что струна оборачивает вокруг шиклической компоненты пространства. Однако с точки зрения другого определения расстояния, соответствующего конфигурированию наматывающей струны, топологические моды точно так же локализованы в пространстве, как и колебательные моды с точки зрения первого определения, и радиус, который они «видят», равен  $1/R$ , что и отмечено в тексте.
- Эти пояснения дают некоторое представление о том, почему расстояния, измеренные с помощью наматывающей и ненамотанной струн, обратно пропорциональны друг другу. Однако, так как лангмун момент достаточно тонкий, возможно, имеет смысл привести технические подробности для читателя, склонного к математическому образу мышления. В обычной квантовой механике точечных частиц расстояние и импульс (по существу, энергия) связаны преобразованием Фурье. Иными словами, собственный вектор оператора координаты  $[x]$   $|x\rangle = \sum_n e^{i p x} |p\rangle$ , где  $p = w/R$ , а  $|p\rangle$  есть собственный вектор оператора импульса (прямой ангажированной — движение без изменения формы). В теории струн, однако, есть еще один собственный

вектор оператора координаты  $[z]$ , определяемый состояниями наматывающей струны:  $|z\rangle = \sum_n e^{i p z} |p\rangle$ , где  $|p\rangle$  — собственный вектор для  $\partial/\partial z$  мотанной струны с  $\tilde{p} = wR$ . Из этих определений немедленно следует, что  $x$  периодична с периодом  $2\pi R$ , а  $z$  периодична с периодом  $2\pi/R$ , так что  $x$  есть координата на окружности радиусом  $R$ , а  $z$  — координата на окружности радиусом  $1/R$ . Более конкретно, можно рассмотреть два волновых пакета  $|z\rangle$  и  $|\tilde{z}\rangle$ , распространяющихся из начала координат и эволюционирующих во времени, с помощью которых можно дать практическое определение расстояния. Радиус окружности, измеренный с помощью какого из пакетов, будет пропорционален времени возврата пакета в исходную точку. Так как состояние с энергией  $E$  эволюционирует с фазовым множителем, пропорциональным  $E$ , видно, что время, а, следовательно, и радиус, равны  $t \sim 1/E \sim R$  для колебательных мод и  $t \sim 1/E \sim 1/R$  для топологических мод.

- Для читателя, сведущего в математике, отметим, что число семейств колебательных мод струны равно половине абсолютного значения эйлеровой характеристики многообразия Калаби—Яу, как указано в примечании 16 к главе 9. Эта величина равна абсолютному значению разности  $h^{2,1}$  и  $h^{1,1}$ , где  $h^{p,q}$  обозначает число Ходжа  $(p, q)$ . С точностью до константы эти значения равны числу нетривиальных гомотопий 3-циклов (треугольных отверстий) и числу гомотопий 2-циклов (двумерных отверстий). Таким образом, хотя в основном содержании говорится о полном числе отверстий, более точный анализ показывает, что число семейств зависит от абсолютного значения разности между числами четномерных и нечетномерных отверстий. Вызовы, однако, те же самые. Например, если два пространства Калаби—Яу отличаются перестановкой соответствующих чисел Ходжа  $h^{2,1}$  и  $h^{1,1}$ , то число семейств частей — полное число отверстий — не изменится.
- Название объясняется тем, что «ромбы Холджэ» математические выражения чисел отверстий различных размерностей для пространств Калаби—Яу, являются зеркальными отражениями друг друга для каждой зеркальной пары.
- Термин *зеркальная симметрия* используется в физике и в других контекстах, совершенно не связанных с данными, например, в связи с понятием киральности, т. е. в связи с вопросом о том, является ли Вселенная инвариантной относительно замены правого на левое (см. примечание 7 к главе 8).

## Глава 11

- Для читателя, склонного к математической строгости рассуждений, следует отметить, что вопрос состоит в том, является ли топология пространства динамической, т. е. может ли она меняться во времени. Отметим, что хотя представление о динамических изменениях топологии часто используется в этой книге, на практике обычно рассматривается

однопараметрическое семейство пространственно-временных многообразий, чья топология меняется при изменении параметра семейства. Формально этот параметр не является временем, но в определенном контексте может с ним отождествляться.

## Глава 12

- Цитируется по книге: John D. Barrow, *Theories of Everything*. New York: Fawcett-Columbine, 1992, p. 13. (В рус. пер. цитата есть в книге: Куненко Б. Г. Эйнштейн. Жизнь. Смерть. Бессмертие. М.: Наука, 1980, с. 363.)
- Кратко поясним различия между пятью теориями струн. Для этого отметим, что колебательные возбуждения вдоль струны могут распространяться по часовой стрелке и против нее. Теории струн типов IIA и IIB отличаются тем, что в последней теории колебания в обоих направлениях идентичны, а в первой теории противоположны по фазе. *Противоположность* в данном контексте имеет точный математический смысл, но написание всего его можно пропустить в терминологии колебательных мод в каждой теории. В теории типа IIB оказывается, что все частоты приходят в одно направление (у них одна и та же киральность), а в теории типа IIA — в разных направлениях (у них разная киральность). Тем не менее, в каждой теории реализуется суперсимметрия. Две тетратические теории имеют аналогичные, но более эфирные отличия. Все моды колебаний по часовой стрелке выглядят так же, как и моды струн типа I (если рассматривать только колебания по часовой стрелке, то теории струн IIA и IIB идентичны), но колебания против часовой стрелки совпадают с колебаниями исходной теории безонных струн. Хотя в безонных струнах возникают их неразрешимые проблемы, если рассматривать их колебания в обоих направлениях, Дэвид Рамос, Джеффри Арви, Эмиль Мартинек и Райан Росс (все они в то время работали в Принстонском университете и их прозвали «Принстонский струнный квартет») показали, что при использовании комбинации со струнами типа II они в результате вполне согласованная теория. Известная одно семейство странных особенностей, известная со времени работы Клода Левейса из университета Ратгерса в 1971 г. и Ричарда Броуэра из Бостонского университета, Питера Годдарда из Кембриджского университета и Чарльда Торна из Гарвардского университета (цитат Флориды) 1972 г. А именно, для

бозонной струны требовалось 26 пространственно-временных измерений, а для суперструны, как обсуждалось, требовалось 10. Так что гетеротические струны (от греческого *heteros*, т. е. разный) являются странными гибридами, в которых колебательные моды против часовой стрелки живут в 26 измерениях, а колебательные моды по часовой стрелке — в 10! Пока читатель окончательно не залупается, попытайтесь понять этот странный союз, сообщив мне о работе Проуса и его коллег, в которой было показано, что 16 лишних бозонных измерений доказано скручиваться в одно из двух торообразных многообразий очень специального вида, приводя к теориям  $O$  и  $E_8$ -гетеротических струн. Так как 16 добавочных бозонных измерений компактифицированы, каждая из этих теорий теоретически также реализован свой вариант суперсимметрии. И, наконец, теория типа I аналогична теории IIB, за исключением того, что помимо замкнутых струн, рассмотренных в предыдущих главах, в ней имеются струны со свободными концами, называемые *открытыми струнами*.

3. Понятие «точные» в смысле данной главы (например, «точные» уравнение движения Земли) в действительности относится к точному предсказанию некоторой физической величины *в рамках выбранного теоретического формализма*. До тех пор, пока у нас не будет истинной окончательной теории (возможно, она уже есть, а возможно, ее вообще не будет) все наши теории сами являются приближениями реальности. Но это понятие приближения не имеет никакого отношения к приближениям, рассматриваемым в данной главе. Здесь нас интересует тот факт, что в рамках выбранной теории часто сложно или невозможно сделать точные предсказания. Вместо этого приходится искать эти предсказания с помощью приближенных методов в рамках теории возмущений.

4. Эти диаграммы являются струнными вариантами так называемых диаграмм Фейнмана, предложенных Ринардом Фейнманом для вычисления по теории возмущений в квантовой теории поля точечных частиц.

5. Точнее, каждая пара виртуальных струн, т. е. каждая петля конкретной диаграммы, приводит (наряду с другими более сложными слагаемыми) к нулевой топологической вкладу, пропорциональному константе связи струны. Чем больше петель, тем выше показатель степени константы связи струны в ответе. Если константа связи струны меньше 1, повторные умножения сделают вклад следующих петель меньше, в противном случае эти вклады будут того же порядка или будут растут с числом петель.

6. Для читателя, осведомленного в математике, отметьте, что в силу этого уравнения пространственно-временя должно иметь Риччи-плоскую метрику. Если разбить пространство-время на прямое произведение четырехмерного пространства Минковского и шестимерного компактного каледора многообразия,

то обращение в нуль кривизны Риччи будет эквивалентно требованию того, что каледоро многообразие должно быть многообразием Калаби—Яу. Вот почему многообразия Калаби—Яу так важны в теории струн.

7. Разумеется, ничто не гарантирует правомочность таких косвенных подходов. Например, некоторые лица несимметричны, а в физике *могут* быть законы, разные в далеко удаленных частях Вселенной (это вкратце обсуждается в главе 14).

8. Для знающего читателя должно быть ясно, что для справедливости этих утверждений потребуется так называемая  $N = 2$  суперсимметрия.

9. Более точно, если обозначить константу связи  $O$ -гетеротической струны символом  $g_{O10}$ , а константу связи струны типа I символом  $g_{I10}$ , то соотношение между константами, для которых состояния в данных физических теориях эквивалентны, имеет вид  $g_{O10} = 1/g_{I10}$  или  $g_{I10} = 1/g_{O10}$ . Если одна из констант связи мала, то другая константа велика, и наоборот.

10. Это близкий аналог рассмотренной выше ( $R, 1/R$ ) дуальности. Если обозначить константу связи струны типа IIB через  $g_{IIB}$ , то кажется правдоподобной гипотеза, что значения констант  $g_{IIB}$  и  $1/g_{IIB}$  приводят к одинаковым физическим результатам. Если  $g_{IIB}$  велико, то  $1/g_{IIB}$  мало, и наоборот.

11. Если свернуть все измерения, кроме четырех, то в теории с двенадцатью измерениями и более обязательно возникнут безмассовые частицы со спином, большим 2, что неприемлемо ни с теоретической, ни с экспериментальной точек зрения.

12. Заметим исключенное явление важная работа 1987 г. Дарфа, Пола Хоуа, Такео Инами и Келло Стедле, в которой более ранние наблюдения Эрика Бергшюфера, Эртлина Селгина и Таунсена использовались для обоснования того, что десятимерная теория струн может иметь глубокую связь с 11-мерной теорией.

13. Более точно, эту диаграмму следует интерпретировать в том смысле, что у нас есть единственная теория, которая зависит от нескольких параметров. В число этих параметров входят константы связи, а также геометрические размеры и форма. В принципе теорию можно использовать для вычисления определенных значений всех этих параметров, но в настоящий момент неясно, как выполнить такие расчеты. Поэтому, чтобы лучше разобраться в этой теории, физики исследуют ее свойства при возможных значениях параметров. Если параметры выбираются в любой из шести полуоткрытых частей рис. 12.11, свойства теории будут наследоваться одной из пяти теорий струн или 11-мерной супергравитации, как отмечено на рисунке. Если параметры выбираются в центральной части, физическими законами будет управлять все еще мистическая  $M$ -теория.

14. Следует отметить, однако, что даже в полуоткрытых областях существует ряд экзотических типов влияния бран на обычную физику. Например, высказывалось предположение, что три наших протажных измерения могут сами быть крупной

и несвернутой 3-браной. Если это предположение справедливо, то всю свою жизнь мы просто скользя по внутренности трехмерной мембраны. В настоящее время проводится анализ подобных гипотез.

15. Интервью с Эвардом Виттенем, 11 мая 1998 г.

## Глава 13

1. Знающему читателю будет понятно, что при преобразованиях зеркальной симметрии коллапсирующая трехмерная сфера одного пространства Калаби—Яу отображается на коллапсирующую двумерную сферу другого пространства Калаби—Яу, приводя, на первый взгляд, к той же ситуации флуп-пересторка, которая рассматривалась в главе 11. Разница, однако, в том, что в подобном зеркальном описании антисимметричные тензорные поле  $H_{p,q}$  (действительная часть комплексной каледорной формы на зеркальном пространстве Калаби—Яу) обращается в нуль, и сингулярность гораздо сильнее, чем в случае, который описывался в главе 11.

2. Более точно, примерами экстремальных черных дыр являются черные дыры с минимальными для данных зарядов массами, в полной аналогии с рассмотренными в главе 12 БПС-состояниями. Такие черные дыры будут играть важнейшую роль при обсуждении энтропии черной дыры.

3. Излучение черной дыры должно быть подобно излучению теплоты раскаленным каминем. Это как раз та проблема, которая обсуждалась в главе 4 и сыграла важнейшую роль в развитии квантовой механики.

4. Так как черные дыры, участвующие в конфидондальных переходах с размером пространства, являются экстремальными, оказывается, что ни при каких малых массах они не излучают по Хокингу.

5. Лекция Стивена Хокинга, прочитанная на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и струнам, 21 июня 1998 г.

6. В первых расчетах Строминджер и Вафа обнаружили, что математические подсказки становятся проще, если работать с петью, а не четырьмя пространственными пространственно-временными измерениями. После завершения вычислений энтропии пятимерной черной дыры они с удивлением обнаружили, что если никто не построит такие гипотетические экстремальные черные дыры в формальном пятимерной общей теории относительности. А так как результаты можно было проверить лишь сравнив ответ с площадью горизонта событий гипотетической черной дыры, Строминджер и Вафа занялись построением подобной пятимерной черной дыры. И им это удалось. Дальше уже не представляло труда показать, что результаты для энтропии в теории струн, полученной на основе анализа микроскопических свойств, согласуются с предсказанием Хокинга, сделанным на основе площади поверхности горизонта событий черной дыры.

После публикации их работы многим теоретикам, среди которых необходимо отметить пристонского физика Кербала Каллана и его последователей, удалось вычислить энтропию для более привычного случая четырех протажных пространственно-временных измерений, и все эти вычисления подтвердили правильность предсказания Хокинга.

7. Интервью с Шеллоном Глоузоу, 29 декабря 1997 г.

8. Laplace, *Philosophical Essay on Probabilities*, trans. Andrew D. New York: Springer-Verlag, 1995. (См. рус. изд.: *Лаплас. Опыт философии вероятности*. М., 1908.)

9. Цитируется по книге: Stephen Hawking and Roger Penrose, *The Nature of Space and Time*. Princeton: Princeton University Press, 1995, p. 41. (Рус. пер.: *Хокинг С., Пенроуз Р.* Природа пространства и времени. Ижевск: РХЛ, 2000.)

10. Лекция Стивена Хокинга, прочитанная на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и струнам, 21 июня 1997 г.

11. Интервью с Эндрю Строминджером, 29 декабря 1997 г.

12. Интервью с Курмуран Вафой, 12 января 1998 г.

13. Лекция Стивена Хокинга, прочитанная на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и струнам, 21 июня 1997 г.

14. Это в определенной мере связано с вопросом о потере информации, который обсуждался в последние годы. Неформальные физики придерживаются идеи о возможности существования внутри черной дыры «едра», где хранится вся информация, которую перенесли туда, попавшие под горизонт событий черной дыры.

15. В действительности, конфидондальные переходы с размером пространства, рассмотренные в этой главе, затрагивают черные дыры. Поэтому может показаться, что анализ снова упирается в проблему сингулярностей черных дыр. Вспомним, однако, что конфидондальный переход в момент коллапса черной дыры становится нулевой, следовательно, данный вопрос не имеет никакого отношения к проблеме сингулярностей черных дыр.

## Глава 14

1. Более точно, в данном температурном диапазоне Вселенная должна быть заполнена фотонами в соответствии с законами излучения абсолютно черного тела (абсолютно черного тела на языке космологии). Тот же спектр излучения на квантово-механическом уровне имеют, согласно Хокингу, черные дыры, или, согласно Планку, раскаленные звезды.

2. В обсуждении правильно передали смысл общей идеи, но опустили некоторые тонкие моменты, относящиеся к распространению идеалов в расщепленном пространстве. Учет этих моментов влияет на конкретные численные значения. В частности, на конкретный теоретический утверждается, что идеалы в специальной теории утверждается, что идеалы объективно не могут двигаться быстрее света.





рой должно вычисляться из некоторого уравнения. В настоящее время подобные уравнения недостаточно изучены для того, чтобы из них можно было получить какую-либо полезную информацию. Если константа связи меньше 1, применимы методы теории возмущений.

**Корпускулярно-волновой дуализм.** Фундаментальное понятие *квантовой механики*, состоящее в том, что объекты проявляют как волновые свойства, так и свойства частиц.

**Космологическая постоянная.** Постоянная, вводимая в исходные уравнения *общей теории относительности* для получения решения, описывающего статическую Вселенную; она интерпретируется как постоянная плотность энергии вакуума.

**Кривизна.** Отклонение объекта, пространства или *пространства-времени* от плоской формы и, тем самым, отклонение от законов евклидовой геометрии.

**Лоренцское сокращение.** Эффект *специальной теории относительности*, вследствие которого движущееся тело оказывается укороченным в направлении его движения.

**Макроскопический.** Относящийся к масштабам, с которыми люди сталкиваются в повседневной жизни, а также к более крупным масштабам; противопоставляется микрокосмическому.

**Мировая поверхность.** Двумерная поверхность, заматаемая *струной* при ее движении.

**Многомерное отверстие.** Обобщение понятия отверстия тора на случай высших размерностей.

**Мода струны.** Конфигурация (*колебательная мода*, *топологическая мода*), в которой может находиться струна.

**М-теория.** Теория, возникшая во время *второй революции в теории струн*, и объединяющая пять ранее известных *теорий струн* в рамках одного всеобъемлющего формализма. В М-теории однанадцать *пространственно-временных измерений*, многие из которых до сих пор не изучены.

**Мульти-вселенная.** Пилотическое образование, в котором наша Вселенная является лишь одной из огромного числа отдельных и самостоятельных вселенных.

**Наблюдатель.** Идеальное лицо или устройство, измеряющее определенные свойства физической системы.

**Нарушение симметрии.** Появление *симметрии*, присутствующей системе, обычно связываемое с *фазовым переходом*.

**Начальные условия.** Данные, описывающие исходное состояние физической системы.

**Нейтринно.** Электрически нейтральная частица, участвующая лишь в *слабых взаимодействиях*.

**Нейтрон.** Электрически нейтральная частица, обычно находящаяся в ядре *атома*; нейтрон состоит из трех *кварков* (два *d-кварка* и одного *u-кварка*).

**Нумерация сферы.** См. *сфера*.

**Ньютоновская механика.** Законы, описывающие движение тел исходя из понятия абсолютного пространства и времени; эти законы господствовали в фи-

зике до создания Эйнштейном *специальной теории относительности*.

**Ньютоновская универсальная теория тяготения.** Теория тяготения, в которой сила притяжения между двумя точечными неподвижными телами пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Позже эта теория была заменена эйнштейновской *общей теорией относительности*.

**Обратный.** Обратный логично числу, например, обратное 3 равно 1/3, обратное 1/2 есть 2.

**Общая теория относительности.** Эйнштейновская формулировка теории гравитации, в которой пространство-время, вследствие его кривизны, передает гравитационное взаимодействие.

**Однородные колебания.** Движение *струны* как единого целого без изменения формы.

**Однотеловой вклад.** Вклад вычислений по *теории возмущений* для процесса, в котором участвует одна виртуальная пара *струн* (или частиц, в теории точечных частиц).

**Открытая струна.** *Струна* с двумя свободными концами.

**Пена.** См. *пространственно-временная пена*.

**Первичный нуклеосинтез.** Образование атомных ядер, происходящее в течение первых трех минут после *Большого взрыва*.

**Переход к изменению топологии.** Эволюция структуры пространства, в ходе которой пространство разрывается, что приводит к изменению его *топологии*.

**Планковская длина.** Составляет около  $10^{-33}$  см. Масштаб, ниже которого *квантовые флуктуации* структуры *пространства-времени* становятся громадными. Характерный размер *струны* в *теории струн*.

**Планковская масса.** Приблизительно  $10^{19}$  масс *протонов* или приблизительно  $10^{-5}$  г; примерная масса небольшой *планки*. Характерная масса колеблющейся *струны* в *теории струн*.

**Планковская энергия.** Приблизительно  $1000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Энергия, необходимая для изучения явлений на масштабах *планковской длины*. Характерная энергия колеблющейся *струны* в *теории струн*.

**Планковское время.** Приблизительно  $10^{-43}$  с. Время, когда размер Вселенной был примерно равен *планковской длине*; точнее, время, за которое свет проходит расстояние, равное *планковской длине*.

**Планковское натяжение.** Приблизительно  $10^{39}$  т. Характерное натяжение *струны* в *теории струн*.

**Плоский.** Подчиняющийся законам евклидовой геометрии; имеющий форму, похожую на поверхность совершенно гладкого стола, а также многомерные обобщения подобных объектов.

**Подход к использованию теории возмущений.** См. *теория возмущений*.

**Поле, поле сил.** С *макроскопической* точки зрения это способ передачи действия точки зрения; поле описывается набором чисел в каждой точке пространства, задающих величину и направление сил в этой точке.

**Постоянная Планка.** Фундаментальная *квантово-механическая* константа, обозначаемая символом  $h$ . Она определяет масштаб дискретных значений энергии.

массы, *спина*, и т. д. на микрокосмическом уровне. Ее значение равно  $1,05 \times 10^{-27} \text{ (г} \cdot \text{см}^2\text{)}/\text{с}$ .

**Принцип относительности.** Фундаментальный принцип *специальной теории относительности*, постулирующий, что все *наблюдатели*, движущиеся с постоянной скоростью, испытывают действие одних и тех же физических законов и, следовательно, каждый наблюдатель, движущийся с постоянной скоростью, вправе утверждать, что он находится в покое. Этот принцип обобщается *принципом эквивалентности*.

**Принцип эквивалентности.** Фундаментальный принцип *общей теории относительности*, постулирующий невозможность отличить ускоренное движение от погружения в гравитационное поле (для достаточно малых областей наблюдения). Обобщает *принцип относительности*, утверждая, что любой наблюдатель, вне зависимости от характера его движения, может считаться покоящимся, если только допускает наличие подходящего гравитационного поля.

**Проблема горизонта.** Космологический парадокс, связанный с тем, что области Вселенной, разделенные огромными расстояниями, имеют, тем не менее, практически одинаковые свойства (например, температуру). Решение проблемы предлагает *инфляционная космология*.

**Проявление.** Результат умножения двух чисел.

**Пространственно-временная пена.** Пеннистая, волнистая и нерегулярная структура ткани *пространства-времени* на *ультрамикроскопических* масштабах с точки зрения теории точечных частиц. Эта пена являлась главной причиной несовместимости *квантовой механики* и *общей теории относительности* до формулировки *теории струн*.

**Пространство Калаби-Яу.** Многообразие Калаби-Яу. Пространство (многообразие), в котором в теории струн могут существовать топологические пространственные измерения; вид пространства согласован с уравнениями движения.

**Пространство-время.** Обобщение пространства и времени, первоначально появившееся в *специальной теории относительности*. Его можно расширять как «ткань», из которой скроена Вселенная; пространство-время представляет собой динамическую среду, на которой разыгрываются все события во Вселенной.

**Протон.** Положительно заряженная частица, обычно находящаяся в ядре *атома*; протон состоит из трех *кварков* (два *u-кварка* и одного *d-кварка*).

**Протяженное измерение.** Пространственное (или *пространственно-временное*) измерение больших размеров, являющееся непосредственно наблюдаемым; измерение, известное из опыта, в противоположность *свернутому измерению*.

**Резонанс.** Один из естественных состояний колебательной физической системы.

**Релятивское излучение.** Микроноволновое излучение во Вселенной, рожденное в момент *Большого взрыва*; по мере расширения Вселенной его плотность и энергия уменьшаются.

**Релятивистская квантовая теория поля.** Квантово-механическая теория поля (например, электромагнит-

ного), в которую заложены принципы *специальной теории относительности*.

**Решение Шварцшильда.** Решение уравнений *общей теории относительности* для случая сферически-симметричного распределения материи; одним из следствий этого решения является возможность существования *черных дыр*.

**Риманова геометрия.** Математический формализм описания искривленных пространств *большого* размера. Играет центральную роль в эйнштейновском описании *пространства-времени* в *общей теории относительности*.

**Свернутое (компактифицированное) измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Световые часы.** Пилотические часы, измеряющие время поделением числа пролетов одного фотона, движущегося между двумя зеркалами.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Симметрия.** Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, *сфера* симметрична относительно вращений, так как при вращении ее вид не изменяется.

**Симметрия сильных взаимодействий.** *Калибровочная симметрия*, лежащая в основе *сильных взаимодействий*, выражающаяся в неизменности системы при сдвиге цветовых зарядов *кварков*.

**Сингулярность.** Место, где структура пространства или *пространства-времени* претерпевает сильный разрыв.

**Скорость.** Быстрота и направление движения объекта. *Слабое взаимодействие*, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

**Соотношение неопределенности.** Открытый Гейзенбергом принцип *квантовой механики*, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и *скорость* частицы, не могут быть измерены абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выразительным по мере того как пространство расширяется.

Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются в определенных пределах значений; допустимых соотношений неопределенности. Это означает, что отношение неопределенности к величине измеряемой величины уменьшается.

**Свернутое измерение.** Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смысло, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

**Семейства.** Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы последнего поколения семейства отличаются от частиц предыдущего поколения массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

**Сильные взаимодействия.** Сильнейшее из четырех видов взаимодействий, удерживающее *кварки* внутри *протонов* и *нейтронов*, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

**Состояния БПС.** Состояния *суперсимметричной* теории, свойства которых полностью определяются из соображений *симметрии*.

**Специальная теория относительности.** Предложенные Эйнштейном законы о свойствах пространства и времени в отсутствие гравитации (см. также *общая теория относительности*).

**Спин.** Квантово-механическое понятие, соответствующее моменту импульса в классической механике. У частиц есть «врожденное» количество спина, равное целому или полуслому числу (в единицах постоянной Планка), которое никогда не изменяется.

**Стандартная космологическая модель.** Теория *Большого взрыва*, дополненная пониманием трех негравитационных взаимодействий, составляющих *стандартную модель элементарных частиц*.

**Стандартная модель элементарных частиц, стандартная модель.** Стандартная теория. Вельса и Уилсона теория, описывающая негравитационные силы и их действие на материю. По сути, она является объединением *квантовой хромодинамики* и *теории электрослабых взаимодействий*.

**Струна.** Фундаментальный одномерный объект, являющийся основным понятием *теории струн*.

**Суммирование по путям.** Формулировка *квантовой механики*, в которой учитываются движения частиц из одной точки в другую по всем возможным путям между точками.

**Супергравитация.** Класс теорий (описывающих точечные частицы), в которых принципы *общей теории относительности* дополняются *суперсимметрией*.

**Суперпартеры.** Частицы, спин которых отличается на  $1/2$ , и которые связаны преобразованием *суперсимметрии*.

**Суперсимметричная квантовая теория поля.** *Квантовая теория поля*, включающая *суперсимметрию*.

**Суперсимметричная стандартная модель.** Суперсимметричное обобщение *стандартной модели элементарных частиц*. Для нее характерно удвоение числа известных элементарных частиц.

**Суперсимметрия.** *Симметрия*, связывающая свойства частиц с целым спином (*бозоны*) со свойствами частиц с полусломым спином (*фермионы*).

**Сфера.** Поверхность шара. Поверхность обычного трехмерного шара имеет два измерения (которые, аналогично поверхности Земли, можно параметризовать двумя числами — «широтой» и «долготой»). Однако понятие сферы может быть обобщено для шаров и их поверхностей в любом числе измерений. Одномерная сфера есть необычное название окружности, нульмерная сфера состоит из двух точек (это объясняется в основном тексте книги). Трехмерную сферу представить сложнее: она является поверхностью четырехмерного шара.

**Тазов.** Частица, квадрат массы которой отрицателен; ее присутствие в теории обычно приводит к несоответствию теории.

**Теория Калаби—Клейна.** Класс квантовых теорий, содержащих *свернутые измерения*.

**Теория супергравитации высших размерностей.** Класс теорий *супергравитации*, в которых число *пространственно-временных измерений* больше четырех.

**Теория 11-мерной супергравитации.** Перспективная многомерная теория *супергравитации*, разработанная в 1970-х гг., затем почти забытая, а впоследствии оказавшаяся важной частью *теории струн*.

**Теория бозонных струн.** Первая из известных теорий струн; все ее *колебательные моды* — *бозоны*. **Теория возмущений.** Формализм для упрощения сложной задачи поиска приближенного решения, в процессе которого решение последовательно уточняется путем систематического учета информации, полученной на предыдущих этапах.

**Теория всего.** Квантово-механическая теория, объединяющая все взаимодействия и типы материи.

**Теория E-гетеротических струн; теория гетеротических струн с группой симметрии  $E_8 \times E_8$ .** Одна из пяти *теорий суперструн*; описывает замкнутые струны, правые колебательные моды которых похожи на моды *струн типа II*, а левые колебательные моды включают моды *бозонных струн*. Имеет важные, но не тривиальные отличия от *теории O-гетеротических струн*.

**Теория O-гетеротических струн; теория гетеротических струн с группой симметрии  $O(32)$ .** Одна из пяти *теорий суперструн*; описывает замкнутые струны, правые колебательные моды которых похожи на моды *струн типа II*, а левые колебательные моды включают моды *бозонных струн*. Имеет важные, но не тривиальные отличия от *теории E-гетеротических струн*.

**Теория Максвелла, теория электромагнитных взаимодействий.** Теория, объединяющая электричество и магнетизм, предложенная Максвеллом в 1880-е годы и основанная на понятии *электромагнитного поля*; доказывает, что null-подобный свет является примером *электромагнитной волны*.

**Теория с сильной связью.** Теория, в которой *константа связи струны* больше 1.

**Теория со слабой связью.** Теория, в которой *константа связи струны* меньше 1.

**Теория струн.** *Обобщенная теория мироздания*, в которой постулируется, что фундаментальными объектами в природе являются не нульмерные точечные частицы, а крошечные одномерные нити, называемые *струнами*. В теории струн гармонические сочетаются *квантовая механика* и *общая теория относительности* — ранее известные законы малого сокращения несовместимы. Часто «теория струн» является сокращением от *теории суперструн*.

**Теория струн типа I.** Одна из пяти *теорий суперструн*; включает как *открытые*, так и *замкнутые струны*.

**Теория струн типа II.** Одна из пяти *теорий суперструн*; включает *замкнутые струны* с симметрией между правыми и левыми *колебательными модами*.

**Теория струн типа IIB.** Одна из пяти *теорий суперструн*; включает *замкнутые струны* с асимметрией между правыми и левыми *колебательными модами*.

**Теория суперструн.** Суперсимметричное обобщение *теории струн*.

**Теория электрослабых взаимодействий.** *Релятивистская квантовая теория поля*, описывающая *слабые взаимодействия* и *электромагнитные взаимодействия* в рамках единого формализма.

**Термодинамика.** Установленные в XIX в. законы, описывающие свойства, связанные с теплотой, работой, энергией, *энтропией*, и взаимосвязь между ними в ходе эволюции физической системы.

**Топологическая мера.** Конфигурация *струны*, наматыванной вокруг циклического *пространственного измерения*.

**Топологически неэквивалентные.** Два многообразия, которые нельзя продеформировать одно в другое без какого-либо повреждения их структуры.

**Топологический вклад в энергию.** Энергия *струны*, наматыванной вокруг циклического измерения пространства.

**Топологическое число.** Число витков *струны* вокруг циклического *пространственного измерения*.

**Топология.** Разбиение многообразий на группы, в каждой из которых одно многообразие можно продеформировать в другое без какого-либо разрыва или повреждения структуры.

Тор. Двумерная поверхность «бублика».

Тор с несколькими ручками. Обобщение многообразия тора на случай более одного отверстия.

Трехмерная сфера. См. *сфера*.

Туннель. Трубообразная область пространства, соединяющая одну часть Вселенной с другой.

**Ультракосмологические.** Масштабы длин короче *планковской длины* (а также временные масштабы короче *планковского времени*).

**Уравнение Клейна—Гордона.** Фундаментальное уравнение *релятивистской квантовой теории поля*.

**Уравнение Шредингера.** Уравнение, описывающее эволюцию волн вероятности в *квантовой механике*.

**Ускорение.** Изменение скорости объекта или его направления движения. См. также *скорость*.

**Ускоритель частиц.** Установка для разгона частиц до скорости, близкой к скорости света, и для столкновения их друг с другом с целью изучения структуры материи.

**Фаза.** Применительно к веществу фаза означает одно из его возможных состояний: твердая фаза, жидкая фаза, газообразная фаза. В общем случае фаза относится к возможному описанию физической системы при изменении параметров, от которых зависит система (например, температуры, значения *константы связи струны*, вида *пространства-времени* и т. д.).

**Фазовый переход.** Эволюция физической системы от одной фазы к другой.

**Фейнмановское суммирование по путям.** См. *суммирование по путям*.

**Фермион.** Частица или колебательная мода *струны*, имеющая *полуцелый спин* и обычно являющаяся *частицей материи*.

**Флоп-перестройка.** Эволюция компоненты *Калаби—Яу* всего пространства, при которой ее структура разбивается и склеивается заново, при этом изменение физических характеристик малы и допустимы в рамках *теории струн*.

**Флоп-перестройка с разрывом пространства.** См. *флоп-перестройка*.

**Фотон.** Минимальный пакет *электромагнитного поля*; *частица, передающая электромагнитные взаимодействия*; наименьший сгусток света.

**Фотоэффект.** Явление выбивания электронов с поверхности металлов под действием света.

**Частица, передающая взаимодействие.** Наименьший сгусток *поля* или; микроскопический переносчик взаимодействия.

**Частота.** Число полных периодов волновых колебаний в секунду.

**Черная дыра.** Объект, гравитационное поле которого настолько сильно, что способно захватывать все, что подойдет достаточно близко (ближе *горизонта событий* черной дыры), даже свет.

**Шкала Кельвина.** Шкала температур, в которой отсчет идет относительно *абсолютного нуля*.

**Экстремальные черные дыры.** *Черные дыры*, обладающие максимально возможным количеством *заряда* при данной полной массе.

**Электромагнитная волна.** Волнообразное возмущение *электромагнитного поля*; электромагнитные волны распространяются со скоростью света. Примеры: видимый свет, рентгеновские лучи, радиоволны, инфракрасное излучение.

**Электромагнитное взаимодействие, электромагнитные силы.** Одно из четырех типов фундаментальных взаимодействий, объединяющее электрические и магнитные силы.

**Электромагнитное излучение.** Перенос энергии *электромагнитной волной*.

**Электромагнитное поле.** Словное поле *электромагнитных сил*, состоящее из силовых электрических и магнитных линий в каждой точке пространства.

**Электрон.** Отрицательно заряженная частица, вращающаяся по орбите вокруг ядра *атома*.

**Энтропия.** Мера беспорядка в физической системе; нечисло переступивших компонент системы, не зависящих к изменению ее общего вида.

**Энтропия черной дыры.** *Энтропия*, характеризующая *черную дыру*.

**Ядро.** Сердцевина *атома*, состоящая из *протонов* и *нейтронов*.

2-брана. См. *брана*.

3-брана. См. *брана*.

W-бозон. См. *калибровочный бозон слабого взаимодействия*.

Z-бозон. См. *калибровочный бозон слабого взаимодействия*.