

П. Девис

# СУПЕРСИЛА

Издательство «Мир»

**П. Девис**

---

**СУПЕРСИЛА**

---

**Поиски  
единой теории  
природы**

Перевод с английского  
Ю. А. ДАНИЛОВА и Ю. Г. РУДОГО

под редакцией  
Е. М. ЛЕЙКИНА



Москва «Мир» 1989

ББК 22.382  
Д25  
УДК 530.12 : 531.51SG

Девис П.

Д25 Суперсила: Пер. с англ./Под ред. и с предисл. Е. М. Лейкина. — М.: Мир, 1989. — 272 с., ил.

ISBN 5-03-000546-3

Наука во все времена стремилась построить целостную картину окружающего мира. В последние десятилетия физики как никогда приблизились к осуществлению этой мечты: вырисовываются перспективы объединения четырех фундаментальных взаимодействий природы в рамках одной суперсилы, и физика микромира все теснее сливается с космологией — теорией происхождения и эволюции Вселенной.

Обо всем этом в популярной и увлекательной форме рассказывает книга известного английского ученого и популяризатора науки Пола Девиса (знакового советскому читателю по книге «Пространство и время в современной картине Вселенной». — М.: Мир, 1978).

Адресована всем, кто интересуется проблемами современной фундаментальной науки, особенно полезна преподавателям и студентам как физических, так и философских факультетов вузов.

Д  $\frac{1604030000-393}{041(01)-89}$  46—89

ББК 22.382

*Редакция научно-популярной  
и научно-фантастической литературы*

ISBN 5-03-000546-3 (русск.)

ISBN 0-671-47685-8 (англ.)

© 1984 by Glenister Gavin Ltd.

© перевод на русский язык, «Мир», 1989

## Оглавление

---

Предисловие редактора перевода . . . . .	5
Вступление . . . . .	8
Глава 1. Вселенная раскрывает свои тайны . . . . .	10
Глава 2. Новая физика и крушение здравого смысла . . . . .	28
Глава 3. Действительность и мир квантов . . . . .	48
Глава 4. Симметрия и красота . . . . .	58
Глава 5. Четыре взаимодействия . . . . .	79
Глава 6. Мир субатомных частиц . . . . .	90
Глава 7. Укрощение бесконечности . . . . .	112
Глава 8. Великая троица . . . . .	128
Глава 9. Проблески суперсилы . . . . .	148
Глава 10. А не живем ли мы в одиннадцатимерном пространстве? . . . . .	162
Глава 11. Ископаемые космоса . . . . .	186
Глава 12. Чем вызван Большой взрыв? . . . . .	201
Глава 13. Единство Вселенной . . . . .	226
Глава 14. Существует ли «космический план»? . . . . .	243
Литература . . . . .	267
Предметно-именной указатель . . . . .	268

Научно-популярное издание

Пол Девис

СУПЕРСИЛА

Заведующий редакцией В. С. Власенков

Научный редактор А. Н. Кондрашова. Мл. научный редактор М. А. Харузина

Художник В. И. Шедько. Художественный редактор Н. М. Иванов.

Технический редактор Е. В. Алехина. Корректор Т. М. Подгорная

ИБ № 6915

Сдано в набор 16.01.89. Подписано к печати 24.07.89. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага книжно-журн. Печать высшая. Гарнитура литературная. Объем 8,5 бум. л. Усл. печ. л. 17. Усл. кр.-отг. 17. Уч.-изд. л. 18,23. Изд. № 9/6524. Тираж 75 000 экз. Зак 683. Цена 1 р. 20 к.

Издательство «Мир» В/О «Совзксportкнига» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129820, ГСП, Москва, М-110, 1-й Рижский пер., 2.

Типография № 6 издательства «Машиностроение»  
при Государственном комитете СССР по печати.  
193144, г. Ленинград, ул. Монсеенко, 10.



## Предисловие редактора перевода

---

Книга известного английского популяризатора науки Пола Девиса, которую мы представляем советскому читателю, касается вопросов, относящихся на первый взгляд к диаметрально противоположным разделам современной физики — физике микромира, с одной стороны, и космологии — с другой. Однако подобный выбор темы вполне закономерен. Дело в том, что оба эти раздела посвящены наиболее фундаментальным проблемам современной науки, призванным пролить свет на самые сокровенные тайны природы. Именно здесь на наших глазах совершается переворот в общепринятых взглядах на устройство Вселенной, равнозначный по своему научному значению таким вехам в развитии физики, как создание теории электромагнетизма, теории относительности и квантовой механики. Речь идет о построении картины Вселенной, в которой различные виды взаимодействия частиц вещества сливаются в единой суперсиле и которую по достоинству можно назвать теорией всего сущего. Однако оказывается, что Вселенная — это единственная «лаборатория», в которой сегодня и в обозримом будущем физики могут проверить «экспериментально» свои гипотезы, и притом гораздо глубже, нежели это удастся сделать на обычных лабораторных ускорителях частиц. Природа устроена таким образом, что для более глубокого проникновения в ее суть, т. е. изучения структуры вещества во все меньших масштабах, приходится выплачивать своего рода дань в виде более высокой энергии, сообщаемой взаимодействующим частицам. Для этого требуются все более гигантские установки — ускорители встречных пучков частиц, коллайдеры. Так, итальянскими физиками предложен проект коллайдера на энергию протонов 100 ТэВ ( $10^{14}$  эВ), длина которого по периметру составит около 250 км, а стоимость оценивается в 5 млрд. долл. Коллайдер предполагается ввести в действие в 1997—2000 гг. Но какие бы грандиозные перспективы ни сулило развитие ускорителей, многие из современных теоретических идей можно проверить лишь в «лаборатории» самой природы; для этого придется проследить, как происходила эволюция Вселенной в первые и краткие мгновения с момента ее возникновения в процессе Большого взрыва. Такова особенность развития современной физики, и рассказ об

этом вряд ли оставит равнодушным читателя. Автор и сам не скрывает своего энтузиазма по поводу достигнутого современной наукой, справедливо усматривая в ее успехах яркое и убедительное свидетельство могущества человеческого разума.

Повествуя о достижениях науки, ее новых идеях, подчас далеко не очевидных, автор демонстрирует глубокие профессиональные знания и тонкое мастерство в изложении сложных вопросов на уровне, доступном широкому кругу читателей. Тем не менее книгу П. Девиса никак нельзя отнести к разряду легкого, занимательного «чтива», и она, безусловно, потребует от читателя определенных усилий, вознаградив его богатством содержащегося в ней материала.

Характер изложения материала в научно-популярной литературе не может подчиняться строгим канонам — ведь каждый автор делится с читателем своим личным восприятием строгих научных истин, в оценке которых, как показывает практика, даже у специалистов нередко возникают самые противоречивые суждения. На наш взгляд, П. Девису при рассказе о новейших научных идеях удалось найти такой подход, который примут большинство читателей. Думается, что и эмоциональная оценка автором основных достижений современной физики вызовет одобрение. Даже если современный читатель скептически воспримет описанную автором обстановку «интеллектуального стресса», сопровождавшего распространение квантовых представлений примерно полвека назад, то, дойдя до описания опытов по проверке природы квантовой неопределенности, выполненных А. Аспеком и его коллегами из Парижского университета, он вынужден будет вслед за Гамлетом воскликнуть: «И в небе и в земле сокрыто больше, чем снится вашей мудрости, Горацио!». Это при том, что нынешние поколения изучающих физику уже не приходят в недоумение, впервые столкнувшись с парадоксальными с точки зрения повседневного опыта явлениями квантового мира. Следует отметить, что под «новой физикой» сегодня, как правило, понимают уже не теорию относительности и квантовую механику, а новые идеи, основанные на суперсимметрии и т. п.

Хотя автор закончил работу над книгой несколько лет назад, можно смело утверждать, что ее содержание не потеряет актуальности еще довольно долго. Проблемы, о которых рассказано на страницах книги, останутся предметом многочисленных экспериментальных исследований на протяжении 5—10, а возможно, и 15 ближайших лет, когда в различных лабораториях мира будут введены в действие коллайдеры нового поколения. Однако уже сегодня ясно, что и тогда далеко не все фундаментальные проблемы физики получат свое решение. Иначе говоря, книге П. Девиса можно почти безошибочно предсказать долгий читательский интерес.

И наконец, о «самой главной» особенности книги. Автору удалось показать, что современной науке под силу не только описание отдельных явлений или даже целого круга фактов. Сегодня наука способна нарисовать единую последовательную картину мироздания. Читатель становится свидетелем того, как на смену многовековым метафизическим или мистическим представлениям приходит истинно научное понимание эволюции и строения Вселенной.

Как уже говорилось, книга Девиса касается самых передовых рубежей науки, и даже подготовленный читатель вряд ли может рассчитывать в одинаковой мере усвоить все затронутые в ней вопросы. Хочется надеяться, что это не охладит его интереса к предмету. А тем, кто желает быть в курсе новостей науки, следует обратиться к научно-популярной периодике, в первую очередь к журналам «Наука и жизнь», «Природа», «В мире науки». Специалистам смежных с физикой областей можно порекомендовать отдельные статьи в журнале «Успехи физических наук», а также книгу Л. Б. Окуня «Физика элементарных частиц» (М.: Наука, 1984), в которой дан обзор основных достижений и проблем физики элементарных частиц.

Книга П. Девиса адресована широкой читательской аудитории, прежде всего тем, кто так или иначе соприкасается с физикой в процессе учебы или работы. Ее с неослабевающим вниманием прочтут все, кто интересуется физикой, фундаментальными проблемами науки, ее достижениями и путями развития. Научно-популярные книги такого рода способны помочь молодым людям найти свое призвание, привлечь талантливую молодежь к решению актуальных проблем современной науки, без чего трудно представить себе ее ускоренное развитие и высокий темп научно-технического прогресса.

*Е. М. Лейкин*

## Вступление

---

Наблюдающийся в последнее время подъем общественного интереса к фундаментальной физике — одно из самых необычных социальных явлений нашего времени. Что же такое есть в физике с ее, казалось бы, непонятными формулами и загадочной терминологией, если она привлекает внимание широкой аудитории? Дело, как мне кажется, в замечательной способности физики объяснять окружающий мир и в глубокой таинственности многих разделов «новой физики». Физика, единственная среди естественных наук, претендует на роль всеобъемлющей дисциплины, предметом изучения которой является Вселенная в целом. Физика позволяет с единых позиций подойти ко всем объектам Вселенной — от элементарных частиц, составляющих атомы, до самых крупных астрономических структур. Способность физики обнаруживать единство в странном и загадочном мире, окружающем нас, не может не воодушевлять.

В этой книге я рассказал о том, что можно было бы назвать величайшим триумфом новой физики, — о полной теории Вселенной, включая ее происхождение. Начало этой поразительной перспективе было положено серией существенных продвижений в нашем познании сил, точнее взаимодействий, управляющих природой. Последние исследования свидетельствуют о существовании некой главенствующей суперсилы, различными проявлениями которой служат все известные нам взаимодействия. Новые открытия проложили путь к радикально новой концепции единой Вселенной, рожденной в результате чудовищного катаклизма, в котором под действием суперсилы из первичного горнила возникли все физические системы.

Этот переворот в нашем понимании Вселенной происходит ныне. И сейчас, когда я пишу эти строки, приходят сообщения о новых успехах и открытиях в исследовании тех вопросов, о которых пойдет речь в дальнейшем. Преждевременно объявлять новые смелые идеи твердо установленными, но общее представление быстро получает признание ученых, работающих в области фундаментальной физики. Я написал эту книгу, желая поделиться с широкой общественностью тем восхищением и энтузиазмом, которые вызывают у меня поразительные достижения современ-

ной физики. Хотя многие из ее концепций трудны для понимания и дамки от повседневных реалий, я старался излагать их по возможности непринужденно, языком, доступным для неспециалиста. Работая над книгой, я продолжал с пользой для себя многочисленные плодотворные дискуссии с друзьями и коллегами. Многие в содержании книги отражает прекрасные мысли и суждения, рожденные в этих беседах. Я особенно признателен моим ближайшим коллегам по университету в Ньюкасле Стивену Беддингу и Иану Моссу, оказавшим мне большую помощь в выяснении технических деталей. Существенную помощь и информацию я получил также от Алана Гута и проф. Мартина Риса.

В книге нередко встречаются очень большие и очень малые числа. Для их записи удобнее пользоваться специальными обозначениями степеней числа  $10$ :  $10^n$  означает единицу, за которой следует  $n$  нулей. Например,

$$\text{один миллион} = 10^6 = 1\,000\,000$$

$$\text{один миллиард} = 10^9 = 1\,000\,000\,000$$

$$\text{один триллион} = 10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000.$$

Аналогичным образом,  $10^{-n}$  означает единицу, деленную на  $10^n$ .  
Например,

$$\text{одна миллионная} = 10^{-6} = 1/1\,000\,000$$

$$\text{одна миллиардная} = 10^{-9} = 1/1\,000\,000\,000$$

$$\text{одна триллионная} = 10^{-12} = 1/1\,000\,000\,000\,000$$

и т. д.

## Вселенная раскрывает свои тайны

---

### Рождение Вселенной и поиск суперсилы

Рассказы о приключениях любят все. Одна из самых захватывающих приключенческих историй всех времен разворачивается ныне в таинственном мире фундаментальной физики. Действующие лица ее — ученые, а цель их поисков превосходит самое смелое воображение: речь идет не больше и не меньше как о «ключе» к Вселенной.

Важнейшее научное открытие нашего века состоит в том, что окружающий нас физический мир существовал отнюдь не всегда. У науки нет более увлекательной задачи, нежели объяснить, как возникла Вселенная и почему она устроена так, а не иначе. Думаю, что за последние годы в решении этой проблемы достигнуты определенные успехи. Впервые за всю историю человечества мы располагаем разумной научной теорией всего сущего. Это поистине революционный беспримерный прорыв в нашем понимании окружающего мира, который оставит глубокий след в развитии представлений человека о Вселенной и его месте в ней.

У истоков этих драматических событий лежит ряд существенных открытий, сделанных за последнее десятилетие в фундаментальной физике, особенно в области под названием физика высоких энергий. Важные экспериментальные результаты впервые открывают глубокую взаимосвязь субъядерных частиц и скрытых сил, действующих в недрах вещества. Но еще больше впечатляют успехи в области теоретического осмысления полученных результатов. Тон задают две новые концептуальные схемы: так называемая Теория великого объединения (ТВО) и суперсимметрия. Эти научные направления совместно приводят к весьма привлекательной идее, согласно которой вся природа в конечном счете подчинена действию некой *суперсилы*, проявляющейся в различных «ипостасях». Эта сила достаточно мощна, чтобы создать нашу Вселенную и наделить ее светом, энергией, материей и придать ей структуру. Но суперсила — нечто большее, чем просто создающее начало. В ней материя, пространство-время и взаимодей-

стве слиты в нераздельное гармоничное целое, порождающее такое единство Вселенной, которое ранее никто и не предполагал.

Назначение науки по существу заключается в поиске единства. Связывая различные явления в общую теорию или общее описание, ученый как бы соединяет части окружающего нас необычайно сложного мира. Последние открытия в физике вызывают энтузиазм потому, что позволяют охватить в теории *все* явления природы в рамках единой описательной схемы.

Поиск суперсилы можно проследить вплоть до пионерских работ Эйнштейна и других ученых, пытавшихся построить *единую теорию поля*. Более столетия назад Фарадей и Максвелл показали, что электричество и магнетизм — тесно связанные явления, которые можно описать на основе единого электромагнитного поля. Об успехе этого описания можно судить по тому колоссальному влиянию, которое оказывают на наше общество радио и электроника, берущие свое начало в концепции электромагнитного поля. Задача распространить процесс объединения, связав электромагнитное поле с другими силовыми полями, например с гравитационным, всегда выглядела весьма заманчиво. Кто знает, какие необыкновенные результаты удалось бы получить на основе подобного объединения?

Однако совершить следующий шаг оказалось не так просто. Предпринятая Эйнштейном попытка создать единую теорию электромагнитного и гравитационного полей не увенчалась успехом, и дальнейшее продвижение на пути к созданию единой теории поля произошло только в конце 60-х годов нашего столетия, когда было показано, что математически электромагнетизм можно объединить с одной из ядерных сил (так называемым слабым взаимодействием). Новая теория позволила сформулировать идеи, допускавшие экспериментальную проверку; наиболее эффективной из них было предсказание новой разновидности света, состоящего не из обычных фотонов, а из загадочных *Z*-частиц. В 1983 г. в серии экспериментов, исследующих столкновения частиц высоких энергий на ускорителе, расположенном в окрестностях Женевы, *Z*-частицы были, наконец, обнаружены — и единая теория поля получила блестящее подтверждение.

К тому времени теоретики продвинулись дальше, сформулировав гораздо более амбициозную теорию, объединяющую с электромагнитным и слабым взаимодействиями еще один тип ядерных сил — сильное взаимодействие. Одновременно были получены и первые результаты исследований в области гравитации, показавшие, каким образом гравитационное взаимодействие можно было бы объединить с другими типами взаимодействий. Физики считают, что в природе существуют только четыре перечисленных типа фундаментальных взаимодействий, таким образом, открывается путь к созданию универсальной всеобъемлющей теории,

в которой описания всех взаимодействий укладываются в единую схему. Казалось, что до создания единой теории поля, разработкой которой физики занимались многие десятилетия, отныне рукой подать.

Попытки физиков объединить четыре существующих в природе типа взаимодействия в единую суперсилу были вознаграждены щедрыми находками. Современная теория взаимодействий выросла из квантовой физики, согласно которой действие сил осуществляется путем обмена частицами. Поскольку все вещество также построено из частиц, квантовая физика обеспечивает единое описание сил и вещества. Действительно, природу сил (взаимодействий) невозможно отделить от микроскопической структуры материи: одни частицы взаимодействуют с другими (или сами с собой), обмениваясь некими третьими частицами. Следовательно, единая теория сил (взаимодействий) представляет собой и единую теорию материи. Ошеломляющий перечень субатомных частиц, обнаруженных экспериментаторами за последние пятьдесят лет, уже не выглядит бессмысленным нагромождением диковинных названий — частицы удастся упорядочить в стройную схему.

Фундаментальным для этой программы объединения является понятие симметрии. По самой своей сути симметрия присутствует повсюду, где существуют связи между различными частями какого-либо объекта или системы. Если субатомные частицы с близкими свойствами сгруппировать в семейства, то возникающая при этом картина обнаруживает проявления глубоких симметрий. Математический анализ сил, ответственных за формирование материи, также выявляет наличие скрытых симметрий с тонкими свойствами. Опираясь на это, физики установили, что силы можно рассматривать просто как способ, которым в природе поддерживаются различные абстрактные симметрии.

Только постигнув взаимосвязь силовых полей, частиц и симметрий, физики сформулировали вероятно самую замечательную из известных гипотез: мы живем в одиннадцатимерной Вселенной. Согласно этой теории, трехмерный мир наших чувственных восприятий дополняется семью невидимыми пространственными измерениями, что и составляет вместе с временем одиннадцать измерений. Невидимые нам дополнительные семь измерений проявляются как *силы*, или *взаимодействия*. Например, электромагнитное взаимодействие в действительности представляет собой некое невидимое пространственное измерение. Геометрия семи дополнительных измерений отражает симметрии, присущие взаимодействиям. Из этой теории следует, что в действительности силовых полей вообще нет, а существует только свернутое определенным образом пустое одиннадцатимерное пространство-время. Мир, возможно, в большей или меньшей степени построен из



ничего, наделенного структурой, а сила и вещество — лишь проявления пространства и времени. Если это так, то перед нами взаимосвязь глубочайшего значения.

Эти обнадеживающие успехи в понимании фундаментальных взаимодействий, лежащих в основе физического мира, приводят к осознанию того, что наиболее существенные особенности наблюдаемой ныне структуры Вселенной были заложены в самые ранние космические эпохи, когда возраст Вселенной был много меньше секунды. Современные астрономы считают, что Вселенная возникла внезапно, в результате Большого взрыва — чудовищного катаклизма, когда температура и давление значительно превосходили их предельные значения, наблюдаемые во Вселенной в наши дни. В мгновение ока пространство заполнилось материей необычных форм, управляемых силами, которые с того времени остались навсегда подавленными. Именно тот первоначальный краткий миг бытия ознаменовался безраздельным господством суперсилы.

В самом начале Вселенная была безликим сгустком энергии, пребывала в состоянии с исключительно высокой степенью симметрии. Действительно, начальное состояние Вселенной вполне могло быть предельно простым. И только по мере быстрого расширения и охлаждения Вселенной из первородного горнила стала вырисовываться, застывая, знакомая структура окружающего нас мира. Одно за другим из суперсилы выделились четыре фундаментальных взаимодействия. Одна за другой частицы, из которых построено все вещество Вселенной, обретали свое нынешнее обличье. Тогда же, на той ранней стадии развития Вселенной сформировались галактики. Можно сказать, что высоко упорядоченная и тонко организованная Вселенная, которую мы наблюдаем сегодня, образовалась в результате «отвердевания» бесформенного однородного сгустка, рожденного Большим взрывом. Любая фундаментальная структура окружающего нас мира — это реликт, т. е. окаменелость начальной фазы. Чем примитивнее объект, тем древнее эпоха, в которую он выплавлялся в первородном горниле.

Чем был вызван Большой взрыв — всегда являлось величайшей космической тайной. До последнего времени на этот вопрос предлагались лишь метафизические ответы. Ныне стали вырисовываться первые наброски подлинно научного объяснения Большого взрыва, основанного на действии суперсилы. Согласно новейшим представлениям, переход Вселенной буквально из ничего в физическую реальность произошел самопроизвольно наподобие извержения. Даже пространство и время возникли только в момент Большого взрыва. Тайну этого «беспричинного» космического события хранит квантовая физика — раздел науки, о котором мы подробно расскажем в следующих главах.

Обретя существование, управляемая суперсилой Вселенная эволюционировала чрезвычайно быстро. По мнению некоторых теоретиков, наблюдаемая ныне инфраструктура Вселенной сформировалась в первые  $10^{-32}$  с, и эта мгновенная ее упорядоченность включала переход от десяти пространственных измерений к трем, сохранившимся до настоящего времени. Именно в ту эпоху Вселенная могла оказаться запертой в «космической ловушке», что обеспечило генерацию из ничего огромных количеств энергии. Если это так, то из первичной энергии в дальнейшем возникла вся материя, из которой построена Вселенная, и вся энергия, которая по сей день питает Вселенную.

Ученые разделились на два лагеря. Одни считают, что наука в принципе способна объяснить Вселенную в целом. Другие склонны думать, что есть некий сверхъестественный элемент бытия, не поддающийся рациональному объяснению. Научные оптимисты, если позволительно называть их так, не отваживаются утверждать, что мы когда-нибудь достигнем исчерпывающего знания всех деталей окружающего нас мира, но упорно настаивают, что любой процесс и любое событие строго соответствуют правилам, вытекающим из законов природы. Их оппоненты отрицают это.

Этот решающий выбор встал перед физикой более остро, чем перед какой-либо другой наукой, отчасти потому, что она является «фундаментальной» наукой. Именно физике надлежит раскрыть природу пространства и времени, фундаментальное строение вещества и действие сил, формирующих объекты, которые вкуче мы и называем Вселенной. Конечная цель физики заключается в том, чтобы объяснить, из чего построен мир, что «скрепляет» его части и как он действует. Если какая-либо часть мира — прошлое, настоящее или будущее — не вписывается в эту программу, то именно у физика это скорее всего вызовет тревогу.

Еще совсем недавно — в середине 70-х годов — некоторые из описываемых в книге достижений казались немислимыми. Большинство ученых-космологов считали, что, хотя физика в состоянии объяснить эволюцию Вселенной, раз уж та возникла, но происхождение Вселенной лежит вне компетенции физики.

В частности, казалось необходимым предположить, что Вселенная первоначально находилась в довольно необычном состоянии — в противном случае она не могла бы прийти к тому состоянию, которое мы наблюдаем ныне. Таким образом, все важные физические объекты, все вещество и энергию, а также их крупномасштабную структуру приходилось рассматривать как данные богом; их следовало вводить «самолично» как необъяснимые начальные условия. Благодаря бурному прогрессу в понимании Вселенной, достигнутому в последние годы, все эти особенности оказались естественными следствиями законов физики. Начальные

условия — в той мере, в какой это понятие имеет смысл с точки зрения квантовых представлений, — не оказывают влияния на последующее строение Вселенной. Таким образом, Вселенная — в большей мере продукт *закономерности*, нежели *случая*.

Тот факт, что наблюдаемая ныне картина Вселенной ведет свое начало от Большого взрыва — а именно это предначертано законами физики, — убедительно свидетельствует о том, что и сами эти законы не случайны или бессистемны, а содержат элемент целесообразности. Несмотря на снижение роли религии, люди продолжают искать высший смысл за пределами бытия. Новая физика и новая космология установили, что наша упорядоченная Вселенная — это нечто гораздо большее, чем последнее гигантского катаклизма. Я убежден, что изучение недавнего революционного переворота в физике и космологии станет источником глубокого вдохновения в поисках смысла жизни.

Как обычно в науке, теории и модели носят пробный характер и могут оказаться ошибочными в свете новых открытий. Многие из вопросов, обсуждаемых в этой книге, находятся на переднем крае исследований, и я не сомневаюсь, что будущие достижения науки в основном подтвердят их значимость. Но некоторые детали, излагаемые ниже, следует воспринимать с осторожностью. Говоря это, я отнюдь не считаю, что последующее развитие науки поставит под сомнение главную тему нашей книги; более того, я убежден, что впервые за всю историю человечества мы стоим на пороге построения полной научной теории Вселенной в целом — теории, в которой ни один физический объект, ни одна система не выпадут из сферы воздействия небольшого числа фундаментальных научных принципов. Теория Вселенной, которую мы излагаем здесь, возможно, неверна, но теперь мы можем по крайней мере в общих чертах представить, как выглядит законченная теория «всего сущего». Мы увидим, что такая теория возможна. Мы можем, наконец, представить себе Вселенную, лишенную чего бы то ни было сверхъестественного, Вселенную, которая целиком и полностью является результатом действия подвластных науке законов природы, и в то же время обладает единством и гармонией, несущими отпечаток целенаправленного действия.

## Наше место в пространстве

Одно из самых ранних воспоминаний моего детства связано с тем, как я спросил отца, где кончается Вселенная. «Как она может где-то кончаться? — ответил отец. — Ведь если бы у пространства была граница, за ней должно было бы находиться еще что-то». Так я впервые столкнулся с понятием бесконечности и до сих пор помню охватившее меня смешанное чувство озадаченности, благоговейного трепета и восхищения. Оказалось, однако, что

этот вопрос решается не столь просто, как пытался меня убедить мой отец.

Чтобы составить некоторое представление о границах Вселенной, необходимо прежде всего знать наше местоположение в ней. Планета Земля вместе с восемью другими планетами, обращающимися вокруг Солнца, образуют Солнечную систему. Солнце представляет собой типичную звезду, и остальные звезды, которые мы видим на ночном небе, — почти те же солнца (быть может, только несколько больше и ярче его), возможно, также имеющие планетные системы. В пространстве звезды распределены не случайным образом, а собраны в гигантские структуры, по виду напоминающие колесо, которые называются галактиками. Широкая светлая полоса на небе, известная под названием Млечный Путь, при наблюдении в телескоп оказывается гигантским скоплением звезд, газа и пыли; это наиболее яркая часть нашей Галактики. Млечный Путь кажется светлой полосой, поскольку наша Галактика напоминает по форме диск. Наибольшее количество звезд в ней сосредоточено в плоскости диска. Солнце расположено от центра диска на расстоянии примерно в две третьих его радиуса. Галактика не имеет резкого края; вся эта структура окружена далеко простирающимся гало из звезд, удаленных на огромные расстояния друг от друга.

Посмотрев за пределы нашей Галактики, мы можем увидеть другие галактики, по форме напоминающие нашу; они разбросаны вокруг нас, образуя скопление. Типичной галактикой является Туманность Андромеды, видимая невооруженным глазом как расплывчатое светлое пятно. Эта локальная группа в свою очередь входит в более крупное галактическое скопление и т. д. Современные телескопы позволили обнаружить, что Вселенная заполнена скоплениями галактик, миллионы которых равномерно распределены в пространстве. Из галактик и построена Вселенная.

Расстояния, с которыми имеет дело астрономия, поистине ужасающи. Если выражать их в километрах, то быстро запутаешься в нулях. Более привычной единицей измерения расстояний здесь является световой год — расстояние, которое свет (его скорость распространения наиболее высокая) проходит за один год. Световой год равен примерно 9,5 млн. км, но более наглядное представление о его величине мы получим, вспомнив, что свет преодолевает расстояние от Солнца до Земли (150 млн. км) всего лишь за 8,5 мин. Луна находится от Земли на расстоянии около одной световой секунды. В этих единицах поперечник Солнечной системы составляет несколько световых часов, а ближайшая звезда находится от нас на расстоянии чуть больше 4 лет. Радиус нашей Галактики составляет примерно 100 тыс. св. лет, и в этом необъятном пространстве сосредоточено не менее 100 млрд. звезд. Расстояния до других галактик измеряются

миллионами световых лет. «Соседняя» галактика, Андромеда, расположена на расстоянии около 2,5 млн. св. лет от нас, а самые мощные телескопы позволяют обнаруживать галактики, удаленные на расстояния порядка 10 млрд. св. лет.

Такая картина Вселенной построена сравнительно недавно. У всех древних цивилизаций существовало убеждение, что Земля находится в центре мироздания. И хотя астрономия во многих древних обществах была довольно развита, подлинное понимание природы звезд и структуры Вселенной пришло только с развитием современной науки.

В древней Европе космологические идеи, как правило, заимствовались у древнегреческих философов. В VI в. до н. э. Пифагор разработал представление о сферической Земле, находящейся в центре сферической Вселенной. Небесные тела считались божественным творением, и представления об их круговых вращательных движениях диктовались соображениями геометрического совершенства. На протяжении столетий греки развивали эту основополагающую концепцию. Наивысшим достижением древнегреческой астрономии явилась сложная модель мира, созданная Клавдием Птолемеем во II в. Вселенная Птолемея представляла собой набор взаимопересекающихся вращающихся сфер, призванных воспроизвести сложные движения Луны и планет.

В этих первых моделях Вселенная обычно имела конечные размеры, но проблема «границы мира» вызывала немалую озабоченность у мыслителей того времени. Римский поэт Лукреций привлек внимание к ней, задавшись вопросом, что произойдет, если кто-нибудь, дойдя до «края света», метнет копьё. Наткнется ли оно на преграду? Одни модели давали положительный ответ на вопрос Лукреция, так как в них Вселенная считалась ограниченной своего рода стеной или непроницаемой поверхностью. Эта странная идея просуществовала до времен Кеплера, т. е. до XVI в.

Представлению о четкой границе Аристотель предпочел картину плавного, постепенного перехода физического мира в мир духов и эфирных субстанций. И в наши дни эта идея находит отклик у некоторых людей, убежденных в существовании за видимым небосводом «царствия небесного», и многие наши суеверия и религиозная символика основаны на аналогичных представлениях. Слово «небесный» до сих пор имеет смысл не только астрономический, но и возвышенно духовный. Еще одно космологическое предание связано с «пустотой». В соответствующей модели материальная Вселенная считалась конечной, но ее внешние границы отнюдь не означали предела «всего сущего». За границами Вселенной до бесконечности простиралось пустое пространство. Но какова бы ни была природа «края света», неизменно считалось, что Земля находится в центре мира.

Эти идеи потерпели крах в средние века, когда Николай Коперник провозгласил, что в центре мироздания находится Солнце, а не Земля и что планеты обращаются вокруг этого центра. В модели Коперника Вселенная все еще имела конечные размеры и внешнюю границу — сферу неподвижных звезд. Вскоре Томас Диггс предложил отказаться от внешней границы Коперника, противопоставив ей модель, где звезды были рассеяны по безграничному пространству. Идею бесконечной Вселенной тысячами лет ранее проповедовали Лукреций и представители так называемой школы атомистов, но мистические и религиозные аспекты бесконечного нередко выступали на первый план, затуманивая суть вопроса. Так, Джордано Бруно был сожжен по приказу церкви за проповедь идеи бесконечной множественности миров.

Развитие научной астрономии, в особенности создание больших телескопов и изобретение спектроскопа, резко изменило представление человечества о мироздании. Наблюдения показали, что Млечный Путь представляет собой «островную Вселенную», состоящую из разрозненных частей. Даже в начале прошлого века продолжались споры о том, является ли Млечный Путь галактикой, находящейся в бесконечной пустоте, или за пределами нашей Галактики существуют другие «островные миры». Некоторые астрономы полагали, что, отправившись достаточно далеко в космическое пространство, можно взглянуть оттуда на все сущее и увидеть все звезды мира, сконцентрированные в одной области, и безграничную пустоту за ее пределами.

Истинную природу Вселенной не удавалось выяснить вплоть до 20-х годов нашего столетия, пока не появились работы американских астрономов Харлоу Шепли и Эдвина Хаббла. Они раз и навсегда установили, что так называемые туманности, давно знакомые астрономам расплывчатые светлые пятна, в действительности представляют собой другие галактики, расположенные далеко от нашей. Нет никаких данных, свидетельствующих об уменьшении плотности галактик и о наличии у них границы или предела. Космологи полагают, что галактики не имеют внешней границы и что они существуют повсюду в пространстве. Тем не менее многие люди (включая и некоторых ученых) склонны считать, что Вселенная представляет собой скопление галактик, окруженное безграничной пустотой. В популярных статьях нередко говорится о «крае Вселенной», т. е. некоей внешней ее границе, за которой простирается пустота. Однако строго научная точка зрения заключается в том, что Вселенная не имеет ни края, ни центра. Вселенную нельзя считать скоплением галактик, распределенных в пространстве, — скорее Вселенная сама содержит пространство.

Как это ни парадоксально, но отсюда отнюдь не обязательно следует, что безграничная Вселенная должна иметь бесконечный

объем и содержать бесконечное множество галактик. Один из курьезов современной космологии состоит в том, что Вселенная может быть конечной, не имея при этом границ. Тем, кто усматривает в этом противоречие, надлежит вспомнить о свойствах окружности. В определенном смысле у окружности «нет ни начала, ни конца». Она не имеет ни границы (края), ни центра (который был бы расположен на окружности). Тем не менее окружность конечна. Можно сказать, что окружность — это линия, которая искривляясь замыкается сама на себя. Обобщив эту идею на трехмерное пространство, можно представить и Вселенную, которая искривляясь замыкается на себя, образуя конечное пространство, не имеющее границы. Многие люди испытывают трудности, пытаясь представить себе замкнутую и конечную Вселенную: им всегда хочется понять, что же лежит за ее пределами. Тем не менее это представление логически непротиворечиво и допускает надлежащее математическое описание. Однако по поводу того, действительно ли наша Вселенная имеет указанные особенности, мнения космологов расходятся.

Если у Вселенной нет внешней границы, то вопрос о нашем местоположении в значительной степени теряет смысл. Само пространство не содержит никаких вех, и инфраструктура Вселенной даже в самых удаленных ее уголках мало чем отличается от нашего ближайшего галактического окружения. В малых масштабах вопрос «Где находимся мы?» не лишен смысла, поскольку мы в состоянии измерить свое положение относительно какого-нибудь заметного ближнего объекта, например Солнца или центра Галактики. Но в пределах Вселенной как целого не существует выделенного места, относительно которого можно было бы отсчитывать положение объектов. Мы как бы находимся на бесконечно протяженной шахматной доске: имеет смысл утверждать, на каком расстоянии мы находимся от ближайшего угла нашего квадрата, но говорить что-либо о нашем положении на доске в целом бессмысленно.

## Наше место во времени

Хотя вопросу о нашем месте в пространстве невозможно придать сколько-нибудь общий смысл, космологи часто рассуждают о возрасте Вселенной. Вопрос «Когда?» во многом перекликается с вопросом «Где?» применительно к пространству, и споры и неразбериха по нему также имеют долгую историю. Платон учил, что мир как творение Бога совершенен и потому неизменен в своих основных чертах. И хотя ото дня ко дню мы замечаем какие-то изменения, на протяжении больших отрезков времени — онов — вещи остаются неизменными. Если бы Платон был прав, то мир не мог возникнуть в какой-то момент времени, а существовал

бы вечно. Вопрос о нашем месте во времени утратил бы смысл, ибо время не имело бы начала.

Другая традиционная точка зрения основана на идее о сотворенном мире, который имеет конечный возраст и непрестанно претерпевает необратимые изменения. И если в «момент творения» мир, возможно, был совершенен, то он не остается таковым, хотя вполне мог бы начать эволюционировать (или стремиться) в сторону совершенства.

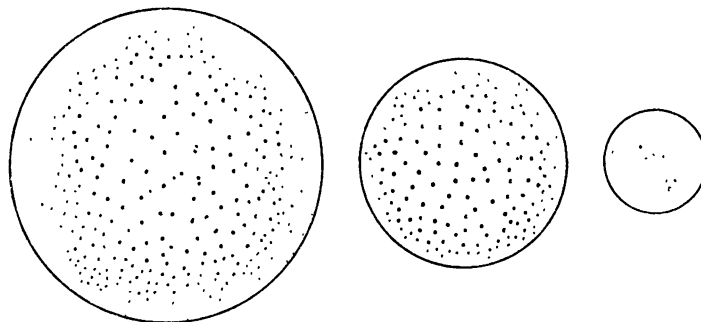
Мифы о сотворении мира бесчисленны и обычно весьма фантастичны. Научная версия происхождения мира была детально разработана совсем недавно. Она восходит к работам Хаббла по внегалактическим объектам, выполненным в 20-е годы нашего столетия. Тщательно исследовав спектры далеких галактик, Хаббл совершил неожиданное открытие, которое легло в основу современной научной космологии. По изменению спектра излучения галактик — так называемому красному смещению — Хаббл установил, что они удаляются от нас с огромной скоростью. Систематическое исследование характера движения и его зависимости от расстояния показало, что галактики кроме того «разбегаются» друг относительно друга. По существу вся Вселенная в каждой точке находится в состоянии расширения<sup>1</sup>.

Расширение Вселенной порождает определенные трудности при попытке наглядно представить себе этот процесс, что еще более запутывает поиск ответа на вопрос «Где?» Трудно удержаться от искушения мысленно рассматривать процесс расширения как взрыв сгустка материи, осколки которого разлетаются в беспредельном изначально существовавшем вакууме. Если исходить из такого ошибочного представления, то размеры Вселенной должны непрерывно увеличиваться по мере того, как внешние осколки все далее улетают в пустоту. Но, как мы уже знаем, подобная картина Вселенной неудовлетворительна, поскольку предполагает существование «края света». В более последовательной и корректной модели расширяется пространство *между* галактиками. В качестве аналогии удобно рассмотреть медленно раздувающийся воздушный шар. Представим себе, что поверхность шара покрыта точками, изображающими галактики. Когда шар раздувается, его резиновая оболочка растягивается, и точки на ее поверхности все дальше отходят друг от друга (рис. 1). Заметим, что сами точки на поверхности не движутся в направлении к чему-нибудь или от чего-нибудь. Раздвижение точек происходит вследствие расширения самой поверхности.

---

<sup>1</sup> Впервые возможность существования расширяющейся Вселенной была установлена в работах советского физика и математика А. А. Фридмана. Впоследствии это предсказание было подтверждено наблюдениями американского астронома Э. Хаббла. — *Прим. ред.*





**Рис. 1.** Расширяющаяся Вселенная похожа на раздувающийся шар. Точки, изображающие галактики, разбросаны по поверхности шара более или менее равномерно. Когда шар раздувается, расстояния между «галактиками» увеличиваются. Наблюдателю, находящемуся в любой из точек кажется, будто соседние точки удаляются, хотя в действительности они не движутся по поверхности: совокупность «галактик» вовсе *не* разбегается относительно какой-либо точки на поверхности. Разумеется, двумерная поверхность шара — не более, чем аналог трехмерного пространства. В реальной Вселенной не существует области, соответствующей областям внутри или снаружи оболочки шара.

Расширяющаяся Вселенная весьма напоминает трехмерный аналог раздувающегося воздушного шара, и неправильно представлять себе галактики мчющимися *через* пространство в разные стороны от общего центра расширения. В действительности пространство между галактиками, разрастаясь (вытягиваясь), раздвигает галактики относительно друг друга. Способность пространства вытягиваться следует из общей теории относительности Эйнштейна, которую мы постараемся объяснить в последующих главах. Тот факт, что мы видим, как далекие галактики разбегаются от нас, вовсе не означает, что мы находимся в центре расширяющейся Вселенной; с тем же успехом любую точку на поверхности раздувающегося воздушного шара можно принять за ее центр. (*У самой поверхности шара нет центра.*) Следовательно, Вселенная не расширяется *куда-то*, а просто вся увеличивается в размере.

Но если Вселенная раздувается, то в прошлом она должна была находиться в сжатом состоянии, и, экстраполируя назад во времени, мы приходим к заключению, что около 15 млрд. лет назад космическая материя должна была иметь необычайно высокую плотность. В этом суть теории *Большого взрыва*, согласно которой ныне наблюдаемая Вселенная возникла в результате гигантского взрыва.

По современной версии этой теории для ранних стадий Большого взрыва характерны необычайно высокие температура и плотность; при таких условиях ни один из современных элементов строения Вселенной, включая атомы, не мог существовать. Важ-

ное подтверждение такого сценария было получено в 1965 г., когда два специалиста по дальней связи из фирмы «Белл телефон лабораторис» обнаружили таинственное излучение, идущее из космического пространства. Физики и астрономы быстро идентифицировали это космическое фоновое излучение как реликтовое тепловое излучение Большого взрыва, своего рода отблески той огненной вспышки, которая 15 млрд. лет назад ознаменовала рождение нашего мира<sup>1</sup>.

Процесс Большого взрыва часто неверно трактуется наподобие взрыва глыбы вещества в уже существовавшем вакууме. Но, как известно, пространства вне Вселенной *не существует*. Большой взрыв следует рассматривать как событие, в результате которого возникло и само пространство. Таким образом, научная картина «сотворения мира» оказывается глубже библейской, ибо она отражает рождение не только материи, но и пространства. Последнее возникает не каким-то иным путем, а непосредственно в результате Большого взрыва. Следовательно, Большой взрыв не есть событие, которое произошло во Вселенной; это было само рождение Вселенной, целиком и буквально из ничего.

Другая важная особенность Большого взрыва связана с временем. Многие космологи считают, что время до Большого взрыва не существовало, т. е. не было никакого «прежде». Один из уроков новой физики состоит в том, что пространство и время существуют не сами по себе, а составляют неотъемлемую часть физического мира. Следовательно, если Большой взрыв ознаменовал рождение физического мира, то пространство и время возникли только в момент Большого взрыва. Идея отождествления момента рождения Вселенной с началом времени далеко не нова. Еще в IV в. Святой Августин писал: «Мир сотворен с временем, но не во времени».

Внезапное возникновение Вселенной в результате Большого взрыва означает, что вопрос «Где мы находимся во времени?» имеет смысл. Исчисления всех космических эпох можно вести от этого уникального всеопределяющего события, которое произошло около 15 млрд. лет назад. Историю Вселенной можно разделить на эоны, ведя отсчет от этого абсолютного нуля времени.

### Из чего мы состоим?

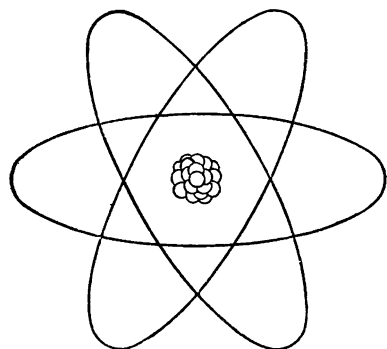
На этот вопрос ответить просто: из материи. Но что такое материя и как она возникла? Диапазон форм, красок, плотностей и текстуры материальных тел столь широк, что попытка понять природу материи может показаться безнадежной задачей. Однако

<sup>1</sup> Это реликтовое тепловое излучение было обнаружено в 1965 г. американскими учеными А. Пензиасом и Р. Вилсоном, удостоенными за свое открытие Нобелевской премии по физике. — *Прим. ред.*

еще две с половиной тысячи лет назад греческие философы заложили основы нашего понимания природы материи, когда попытались свести разнообразие окружающего мира к взаимодействию небольшого числа первичных составных частей — элементов. В VI в. до н. э. Фалес считал первоосновой всех вещей один первичный элемент — воду, но позднее мыслители ввели в рассмотрение четыре земных элемента: землю, воздух, огонь и воду. По мысли древних, эти элементы в целом сохраняются — их общее количество остается неизменным, — но могут образовывать друг с другом различные комбинации, необычайно разнообразные по форме и составу. Небесным телам отводилась пятая субстанция, называемая эфиром, или квинтэссенцией. Греческие философы сделали важный шаг, отвергнув ссылки на потусторонние силы и наблюдение — основу научного метода. Анаксагор (500—428 гг. до н. э.) существенно усовершенствовал более ранние теории, введя представление о бесконечной Вселенной, заполненной бесконечным множеством частиц, или «атомов». Кроме того, Анаксагор высказал предположение, что небесные тела состоят из таких же веществ, что и Земля, — эта «ересь» едва не стоила ему жизни. Левкипп внес свою лепту в развитие атомной теории материи, это дело продолжил его ученик Демокрит. Впоследствии атомистическая теория была отвергнута такими великими философами, как Аристотель, Платон и Сократ. Однако позднее идеи атомистов были подхвачены Эпикуром (341—270 гг. до н. э.).

Главная особенность учения атомизма заключалась в следующем: мир состоит всего лишь из двух вещей — неуничтожимых атомов и пустоты. Атомы имеют различную форму и могут соединяться между собой, образуя сложные системы. Атомы неделимы и свободно движутся в пустоте. Они непрерывно находятся в состоянии активности, сталкиваясь и объединяясь в новые конфигурации и неизменно подчиняясь рациональным законам причины и следствия.

На протяжении столетий атомная теория материи имела чисто умозрительный характер, ибо атомы слишком малы, чтобы их наблюдать непосредственно. Альтернативные представления о континууме, согласно которым материя бесконечно делима и не содержит пустоты, существовали вплоть до XIX в. С развитием химии как науки атомистическая теория подверглась пересмотру в рамках современного научного мышления. Английский химик Джон Дальтон (1766—1844) привел свидетельства в пользу того, что атомы имеют различные веса и, комбинируясь в определенных пропорциях, образуют соединения; однако прямые физические доказательства существования атомов по-прежнему отсутствовали. Лишь в конце XIX в. с открытием электрона и радиоактивности существование атомов стало, наконец, общепризнанным. Вскоре



**Рис. 2.** Схематическое изображение атома. Центральное ядро имеет вид шара, состоящего из сильно связанных протонов и нейтронов и окруженного облаком обращающихся вокруг него электронов. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Из-за квантовых эффектов орбиты электронов на самом деле не соответствуют четко определенным траекториям, показанным на рисунке.

выяснилось, что имеется множество различных типов атомов (каждый такой тип на современном языке соответствует химическому элементу). Ныне на Земле обнаружено около 90 естественных химических элементов и более десятка элементов синтезировано искусственным путем.

В 1909 г. Эрнест Резерфорд выяснил основные особенности строения атома. Бомбардируя атомы альфа-частицами, испускаемыми радиоактивным источником, Резерфорд установил по характеру рассеяния альфа-частиц, что атомы представляют собой не твердые кусочки неделимой материи, как полагали некоторые физики, а сложные структуры, основная масса которых сосредоточена в центральном ядре, окруженном облаком более легких подвижных электронов (рис. 2). Такая структура напоминает планетную систему. Электроны удерживаются на орбитах силой притяжения (положительно) заряженного ядра.

Строение ядра оставалось неясным до начала 30-х годов. Ядро, как оказалось, также является сложной системой, состоящей из (положительно заряженных) протонов и электрически нейтральных частиц — нейтронов. Согласно современной точке зрения, протоны и нейтроны в свою очередь состоят из еще более мелких частиц — *кварков*. Многие физики полагают, что электроны и кварки являются подлинно элементарными частицами, — в том смысле, как это понимали древние греки. Они, по-видимому, не обладают внутренней структурой, и из них построены все известные формы обычной материи.

Очевидно, что материя имеет иерархическую структуру. Из кварков состоят протоны и нейтроны, которые в свою очередь формируют ядра атомов. Атомы комбинируются в молекулы или кристаллы. Из этих основных «материалов» состоят твердые тела, окружающие нас. Двигаясь вверх по шкале масштабов, мы приходим к планетным системам, звездным скоплениям и, наконец, к галактикам, но даже галактики объединяются в скопления и сверхгалактики. Люди находятся где-то в середине этой иерархии:

наши размеры соотносятся с размерами атомов примерно так же, как размеры звезд с нашими собственными.

Известно, что одни химические элементы, например кислород и железо, имеются на Земле в изобилии, тогда как такие, как уран и золото, встречаются столь редко, что люди нередко развязывают войны, чтобы обеспечить доступ к их месторождениям. Если оценить распространенность химических элементов в целом по Вселенной, то возникнет поразительная картина. Около 90 % космического вещества приходится на долю водорода, самого легкого и простого элемента. Атом водорода состоит из одного протона и одного электрона. Подавляющую часть остальных 10 % составляет гелий — простейший после водорода элемент. Ядро гелия содержит два протона и два нейтрона. Доля всех остальных элементов вместе взятых не превышает 1 %. Если исключить железо, то вырисовывается следующая общая тенденция: более тяжелые элементы — такие, как золото, свинец и уран — распространены во Вселенной значительно в меньшей степени, чем более легкие: углерод, азот, кислород.

Подобная распространенность элементов весьма примечательна. Тяжелые ядра содержат большое количество протонов и нейтронов, легкие — мало. Если бы легкие ядра могли вступать друг с другом в реакцию ядерного синтеза, то это привело бы к образованию более тяжелых ядер. Напрашивается мысль, что во Вселенной первоначально присутствовал только один простейший элемент — водород, а более тяжелые элементы постепенно образовались на последующих стадиях ядерного синтеза. Подобная теория сразу объясняет, почему тяжелые ядра столь редки. Реакции ядерного синтеза могут протекать только при температурах, при которых преодолимо отталкивание электрически заряженных ядер. Чем больше протонов в ядре, тем сильнее отталкивание между ядрами и тем с большим трудом ядро принимает дополнительные протоны в реакции ядерного синтеза.

Понимание процесса образования химических элементов лишь отчасти объясняет «тайну» образования материи. Остается неясным, как же образовались протоны, нейтроны и электроны, из которых состоят атомы химических элементов.

Ученым давно известно, что вещество не вечно — оно возникает и исчезает. При концентрации достаточного количества энергии происходит рождение новых частиц вещества. Мы можем рассматривать вещество как «запертую» энергию. Возможность превращения энергии в вещество наводит на мысль, что во Вселенной первоначально не было вещества и все вещество, которое мы наблюдаем сейчас, возникло из энергии Большого взрыва. Эта привлекательная теория сталкивается, однако, с серьезным затруднением. Рождение частиц вещества в лаборатории (на ускорителях) стало обыденным явлением, но образование каждой но-

вой частицы сопровождается образованием ее «антипода» — *античастицы*. Например, электрон (имеющий отрицательный электрический заряд) всегда рождается в паре с антиэлектроном, который называют позитроном. Последний имеет такую же массу, как электрон, но противоположный (положительный) электрический заряд. Аналогично рождение каждого протона сопровождается рождением антипротона. В целом античастицы принято называть антивеществом.

При столкновении частицы с античастицей происходит их аннигиляция, при этом высвобождается заключенная в них энергия. Ясно, что смесь вещества и антивещества крайне неустойчива. Поэтому маловероятно, чтобы какая-нибудь, если только не самая крохотная, область Вселенной целиком состояла из антивещества. Тогда встает вопрос: каким образом возникло вещество без эквивалентного количества антивещества? Как мы узнаем в дальнейшем, последние открытия дают ключ к решению этой проблемы.

Рождение вещества из энергии не ограничивается такими общеизвестными частицами, как электрон, протон и нейтрон. Возможное образование и других, более экзотических, форм материи. На ускорителях при столкновении частиц высоких энергий рождаются сотни различных субатомных частиц. Все они нестабильны и быстро распадаются, превращаясь в более привычные виды частицы. Образующиеся при таких столкновениях частицы настолько короткоживущи, что не играют непосредственной роли во Вселенной.

### Почему мы не разваливаемся на части?

Если бы не взаимодействия, то частицы материи двигались бы независимо, «не подозревая» о существовании других частиц. Благодаря взаимодействиям частицы как бы обретают способность распознавать другие частицы и реагировать на них, в результате чего рождается коллективное поведение.

Когда инженер рассуждает о силах, он обычно имеет в виду способность толкать или тянуть, представляя при этом веревку или проволоку. Силы такого рода мы вполне можем представить наглядно и, опираясь на собственный опыт, понять, как под их воздействием могут перемещаться предметы. Но существуют и другие, менее привычные проявления сил, например, радиоактивный распад атомного ядра или взрыв звезды. Поскольку вся материя состоит из частиц, для объяснения природы сил, или взаимодействий, необходимо в конечном счете обратиться к физике элементарных частиц. Сделав это, физики обнаружили, что все взаимодействия независимо от того, как они проявляются в больших масштабах, можно свести к четырем фундаментальным

типам: гравитационному, электромагнитному и двум типам ядерных. В последующих главах мы узнаем, каким образом происходят эти взаимодействия между частицами. Мы увидим, что взаимодействия и частицы тесно связаны между собой, и понять природу одних без должного понимания природы других просто невозможно.

С увеличением масштаба относительное значение каждого из четырех взаимодействий меняется. На уровне кварков и атомных ядер доминируют два ядерных взаимодействия. Сильное ядерное взаимодействие связывает кварки в протоны и нейтроны и не позволяет атомным ядрам «разваливаться». На уровне атомов преобладает электромагнитное взаимодействие, связывающее электроны с ядрами и обеспечивающее объединение атомов в молекулы. Большая часть сил, с которыми мы имеем дело в нашей повседневной жизни (натяжение проволоки, толчок, испытываемый одним телом со стороны другого и т. д.) — это примеры макроскопического проявления электромагнитного взаимодействия. В астрономических масштабах господствующим становится гравитационное взаимодействие. Таким образом, каждое взаимодействие вступает в свои права, начиная с определенного масштаба, и играет важную роль в формировании характерных особенностей физического мира.

В последние годы физики заинтересовались соотношением между четырьмя фундаментальными взаимодействиями, которые в совокупности управляют Вселенной. Существует ли между ними какая-нибудь связь? Не являются ли эти четыре фундаментальных взаимодействия всего лишь различными ипостасями единственной основополагающей *суперсилы*? Если такая суперсила существует, то именно она представляет собой действующее начало всякой активности во Вселенной — от рождения субатомных частиц до коллапса звезд. Разгадка тайны суперсилы невообразимо увеличила бы нашу власть над природой и даже позволила бы объяснить само «сотворение» мира.

## 2

# Новая физика и крушение здравого смысла

---

### Будьте осторожны: физика может свести с ума!

«Наука — это просто-напросто хорошо натренированный и организованный здравый смысл», — так писал выдающийся биолог XIX в. Т. Г. Гексли (Хаксли). Во времена Гексли это, возможно, было верно. Хотя наука XIX в. включала в себя множество различных дисциплин, все ее понятия прочно опирались на здравый смысл, которым мы руководствуемся в повседневной жизни.

К концу XIX в. на счету физики было немало успехов. Удалось достичь глубокого понимания природы электричества и магнетизма, были открыты радиоволны, на твердую основу встала атомистическая теория. И хотя это заставило физику выйти за пределы доступных человеку непосредственных восприятий, новые идеи формулировались путем простой экстраполяции привычных представлений. Атомы рассматривались как всего лишь крохотные подобия бильярдных шаров. Электромагнитные поля мыслились как напряжения в гипотетической среде, названной эфиром, а световые волны — как колебания эфира. Таким образом, хотя атомы ввиду их слишком малых размеров были недоступны непосредственному наблюдению, а таинственный эфир — невидим и неосязаем, с помощью аналогий с хорошо известными объектами им удавалось придавать наглядность. Предполагалось также, что этими невидимыми конструкциями управляют те же законы, которые действуют в мире более конкретных, знакомых физических систем.

Потом возникла новая физика. Начало XX в. ознаменовалось бурным рождением новых идей, до основания разрушивших привычные, сложившиеся веками представления об окружающем мире. Многие заботливо взлелеянные и казавшиеся незыблемыми представления были просто-напросто сметены. Выяснилось, что в окружающем мире все зыбко и неопределенно, а здравый смысл — ненадежный проводник. Физики были вынуждены пересмотреть свои взгляды на реальность, наделив ее чертами, не известными человеческому опыту. Чтобы разобраться в потоке новых открытий,



пришлось ввести абстрактные, лишенные всякой наглядности понятия, допускающие чисто математическое описание.

Это было время революционных перемен в науке — не одной, а двух, следовавших одна за другой. Сначала появилась квантовая теория, открывшая новый подход к пониманию странного поведения микромира; затем настал черед теории относительности, сплавившей воедино пространство и время. Старое представление о рациональном и механистическом мире, которым управляют причинно-следственные связи, кануло в Лету, уступив место таинственному миру парадоксов и «потусторонней» реальности.

Первой жертвой двух научных революций-близнецов стала интуиция. Физик XIX в. мог мысленно составить достоверный образ предмета своего исследования, тогда как квантовая и релятивистская физики потребовали беспримерной работы ума. Наглядно представить себе некоторые явления оказалось трудно даже физикам-профессионалам. Создатель квантовой теории Макс Планк так и не принял всей ее причудливости, а Эйнштейн считал эту теорию столь абсурдной, что до конца дней своих упорно отрицал ее идеи.

Новая физика продолжает обнаруживать неожиданные особенности в поведении природы, и каждое новое поколение студентов-физиков находит эти идеи странными и даже лишенными смысла. В одном известном английском университете у входа в здание физического факультета вывешивали плакат: «Будьте осторожны: физика может свести с ума!»

Взять хотя бы мир субатомных частиц, где интуиция совершенно отказывается служить, и кажется, что природа разыгрывает с нами злые шутки. Один из ее фокусов — «барьерный эффект». Представьте себе, что вы бросили камешком в окно. Если камешек брошен слабо, то он отскочит от стекла, не повредив его. Но при сильном броске камешек разобьет стекло и влетит в комнату. Нечто подобное можно проделать и в мире атомов; здесь роль камешка играет электрон, а роль оконного стекла — непрочный барьер того типа, что создается цепочкой атомов или электрическим напряжением. Электрон чаще ведет себя, как камешек: отражается от барьера, если приближается к нему медленно, и преодолевает его, если имеет большую энергию. Но иногда это правило коренным образом нарушается: электрон отражается от барьера, хотя имеет энергию, вполне достаточную для его преодоления.

Еще более странно выглядит ситуация, когда электрон, не обладая энергией, достаточной для прохождения через барьер, тем не менее удивительным образом оказывается по другую его сторону. Представьте, что вы, легонько бросив в окно камешек, видите, что он проник сквозь стекло, а само оно осталось целым

и невредимым! Между тем именно такой фокус проделывают электроны. Они «туннелируют» сквозь непреодолимый барьер. Еще один фокус наблюдается, когда электрон приближается к «пропасти» и вот-вот должен свалиться в нее. Достигнув края, электрон может резко повернуть назад. Подобное странное поведение электрона совершенно не предсказуемо: он то отражается назад, то проваливается.

Эти удивительные явления создают впечатление, будто электрон ощущает окружающий его мир. Достигнув барьера, он словно «заглядывает» по ту сторону и «рассуждает»: «Барьер очень узкий, так что я исчезну и возникну по другую его сторону». Хотя представление о том, что электрон может быть «здесь» в один момент и «там» в следующий, кажется нелепым, но именно так и происходит. Электроны каким-то образом ведут себя так, будто они находятся одновременно в нескольких различных местах. Важно сознавать, что все эти «дикийные штучки» не просто домыслы умозрительной науки. Так, «туннельный эффект» используется в некоторых микросхемах, например в туннельном диоде. Более того, туннелирование в какой-то степени проявляется даже при протекании в медной проволоке обычного электрического тока.

Многое странное в поведении электронов связано с тем, что в некоторых отношениях они ведут себя подобно волнам. Волнообразное поведение электронов можно продемонстрировать с помощью ряда четко поставленных экспериментов. Наше воображение бессильно представить нечто такое, что может быть одновременно и волной, и частицей, но само по себе существование дуализма волна-частица (так называемого корпускулярно-волнового дуализма) не вызывает сомнения. Может случиться и так, что объект, который мы обычно считаем волной, обретает в микромире свойство частицы. Например, световые волны ведут себя подобно потоку частиц, выбивая электроны с поверхности металла (фотоэлектрический эффект). Частицы света называются *фотонами*, и физики относят их наряду с электронами и кварками к фундаментальным частицам. Наглядно представить себе волну-частицу невозможно, не стоит и пытаться. В нашей повседневной жизни нет ничего такого, что хотя бы отдаленно напоминало подобную нелепость. Доведись нам столкнуться с волной-частицей, мы никогда не поняли бы этого.

Много трудностей в понимании современной физики обусловлено тем, что люди тщетно пытаются подогнать используемые там абстрактные понятия под привычную схему представлений, основанных на здравом смысле. У нас существует, видимо, глубокая психологическая потребность сводить все явления окружающего мира к простым, понятным образам. И когда приходится сталкиваться с чем-то, не имеющим аналога в повседневном опыте, например с волной-частицей, рождается недоумение

и даже скептицизм. У изучающих физику может возникнуть ощущение, что они не способны правильно понять ее, поскольку не в силах создать простой мысленный образ описываемого. Я часто получаю письма и даже целые рукописи от физиков-дилетантов, где предпринимаются попытки построить, скажем, новую теорию элементарных частиц исключительно на основе здравого смысла. По утверждению авторов этих посланий, заняться таким делом их побудила мысль, что физики-профессионалы, должно быть, заблуждаются, поскольку никак невозможно понять, о чем они толкуют. Ни один глубокий принцип природы, заявляют эти любители, не может быть столь абстрактным и непонятным. Небезынтересно, что, кажется, никто не осуждал абстрактное искусство в столь бранных выражениях.

Не только электроны подчиняются капризам квантовой механики. Подобные свойства присущи всем микрочастицам, включая кварки. Описанные выше эффекты наблюдаются при относительно низких энергиях. Еще более необычны явления, происходящие при высоких энергиях, например внезапное рождение новой частицы или распад нестабильной частицы с превращением ее в ливень других частиц. Среди частиц есть даже соединяющие в себе черты двух совершенно различных частиц — своего рода «сумасшедшее» единство.

К числу самых необычных частиц относятся нейтрино. Это частицы-призраки, по-видимому, не имеющие массы и движущиеся со скоростью света. Они не имеют электрического заряда и почти «не замечают» твердого вещества. Нейтрино столь «бестелесны», что легко пронизывают толщу Земли и способны пройти слой свинца толщиной в несколько световых лет! Мириады нейтрино пронизывают вас, пока вы читаете эти строки. Нейтрино, как ничто другое, близки к тому, что можно назвать «абсолютно ничем», за одним исключением: они обладают таким важным свойством, как спин. Иногда для наглядности это свойство нейтрино буквально сопоставляют вращению вокруг собственной оси, уподобляя его суточному вращению Земли, но в действительности эта аналогия неверна. Как мы увидим далее, спин нейтрино отличается явно необычными особенностями.

Астрофизика — еще одна область, где терпят крах земные понятия, столь привычные нашему здравому смыслу. Хороший тому пример — гравитационные волны. Эти неуловимые возмущения представляют собой своего рода «рябь» самого пространства — распространяющееся искривление пространства. Такие волны генерируются в результате участия материальных тел или энергии в интенсивном движении. Хотя гравитационные волны переносят энергию и импульс, они не связаны с переносом вещества как такового — это просто колебания пустоты. Гравитационные волны обладают чрезвычайно высокой проникающей

способностью, превосходя в этом отношении даже эфемерные нейтрино. В сущности не существует материи, способной поглощать гравитационные волны, и поэтому их очень трудно обнаружить: они просто-напросто «игнорируют» детектор.

В схватке с подобными странными понятиями воображение исчерпывает себя до предела. Систематическое продвижение вперед было бы невозможно, если бы не математика. Абстрактные формулы не требуют воображения и позволяют точно описывать самые необычные явления, если используемые уравнения логически непротиворечивы. Проникновение в физику высшей математики означает, что большинство теоретических работ завершается лабиринтом непостижимых символов. Таинства математики и несколько мистический оттенок новой физики создают вокруг нее как бы ореол религиозности, а сами физики воспринимаются как верховные жрецы. Это в значительной степени объясняет популярность новой физики среди людей, склонных к философии и даже мистике. Тем не менее не следует забывать, что физика имеет практическое применение, и хотя некоторые ее понятия вполне созвучны «Алисе в Стране Чудес» Л. Кэрролла, развитие современной технологии во многом зависит от нашего понимания этих абстрактных идей.

### Искривление пространства

Среди вереницы странных образов, рожденных новой физикой, наибольший интерес вызывают те, которые относятся к квантовой теории и теории относительности. В своей наиболее разработанной форме, называемой квантовой механикой, квантовая теория по существу занимается изучением всех процессов, происходящих в микромире. На квантовой механике основано наше понимание всех явлений молекулярной, атомной, ядерной и субъядерной физики. Теория относительности изучает свойства пространства, времени и движения. Ее выводы становятся существенными, когда рассматриваемая система движется со скоростью, близкой к скорости света, или в сильном гравитационном поле.

Квантовая физика и теория относительности подрывают здравый смысл во многих аспектах. Не последняя среди их «жертв» — наше интуитивное представление о геометрии. В повседневной жизни метр всегда остается метром. Коль скоро ему дано определение, любую другую единицу длины можно считать заданной раз и навсегда. Мало кому могло бы прийти в голову, что 1 м сегодня мог бы оказаться завтра равным 2 м или что ваш метр равен половине моего метра. Однако теория относительности не только утверждает, что расстояния не абсолютны, т. е. не фиксированы раз и навсегда, но и указывает эксперименты, в которых могли бы выявиться подобные расхождения. Если один наблюдатель дви-

жется относительно другого, то при измерении длины *одного и того же* объекта они получают *разные* значения. И это несмотря на то что в состоянии покоя оба наблюдателя при измерении длины данного объекта получают в точности один и тот же результат.

Уменьшение расстояния с увеличением скорости называется эффектом сокращения длин Лоренца — Фитцджеральда, в честь сформулировавших его ученых Джорджа Фитцджеральда и Хендрика Антона Лоренца. Это один из основополагающих результатов теории относительности. Сокращение длины становится заметным только при скоростях, близких к скорости света, но существование эффекта не вызывает сомнений. Линейный ускоритель частиц в Станфорде (шт. Калифорния, США) представляет собой прямолинейную трубу длиной около 3 км (в нашей системе отсчета). Однако движущиеся в ней электроны обладают скоростью, столь близкими к скорости света, что в их «системе отсчета» длина ускорителя едва достигает 0,3 м! На практике, при проектировании такого ускорителя и работе на нем, следует учитывать эффект сокращения длины.

Если теория относительности лишает смысла понятие расстояния, то квантовая механика еще решительнее подрывает «устой», ставя под сомнение основанное на здравом смысле понятие местоположения. Считается непреложной истиной, что все материальные тела должны где-то находиться. Каждая субатомная частица, например, входящая в состав нашего тела, непременно должна иметь определенное местоположение. Может ли вообще существовать частица, не находясь где-то?

Когда физики принялись исследовать понятие местоположения в свете квантовой физики, они с изумлением обнаружили, что оно, вообще говоря, лишено смысла. Источник всех «неприятностей» связан с одним фундаментальным правилом квантовой механики, называемым принципом неопределенности Гейзенберга — в честь немецкого физика Вернера Гейзенберга, который в 20-х годах нашего столетия явился одним из создателей квантовой механики. Согласно этому принципу, невозможно одновременно точно определить положение и скорость частицы. Можно говорить о скорости (точнее, об импульсе), например, электрона и поставить эксперимент с целью измерения этой величины. Эксперимент даст определенный результат. Аналогичным образом можно при желании определить положение электрона. При этом каждый раз мы будем обнаруживать его в определенном месте. Но чего нам никак не удастся сделать — и что в принципе невозможно, — так это одновременно определить *обе* характеристики электрона: положение и скорость. Независимо от способа измерения сам акт наблюдения местоположения электрона непредсказуемым образом нарушает его движение. Точно так же

измерение импульса электрона «смазывает» данные о его местоположении. Эти два типа измерений просто несовместимы.

Невозможность одновременного определения положения и импульса частицы не следует относить за счет грубого характера эксперимента или недостаточной разрешающей способности прибора, ибо в данном случае мы имеем дело с особенностью, внутренне присущей природе. Само понятие электрона, находящегося в таком-то месте, становится абсолютно бессмысленным, если мы хотим узнать его импульс.

Все это говорит о том, насколько нелепа попытка представить себе мир атома как пространство, «населенное» вращающимися шариками. Если частица не может одновременно обладать определенными положением и импульсом, то мы не в состоянии разумным образом приписать ей траекторию в пространстве. Нам может быть известно, что в какой-то момент времени электрон находится в точке  $A$ , а в более поздний момент — в точке  $B$ , но мы не можем знать, как он попал из  $A$  в  $B$ . Представление о траектории (или орбите), непрерывно соединяющей исходный и конечный пункты, утрачивается. И в самом деле, мы уже упоминали, что в некоторых технических устройствах электроны проявляют способность «туннелировать» через барьер, исчезая с одной его стороны и внезапно вновь возникая по другую сторону. Это — типично квантовый эффект.

Единственный способ придать смысл столь странному поведению электрона заключается в предположении, что частица попадает из  $A$  в  $B$  одновременно по всем возможным путям! Это необычное свойство можно легко продемонстрировать, приспособив надлежащим образом эксперимент, впервые поставленный в XIX в. английским физиком Томасом Юнгом. Желая доказать справедливость волновой теории света, Юнг воспользовался явлением интерференции. Интерференция происходит при наложении двух волн. Если гребни одной волны совпадают с гребнями другой волны, то происходит усиление, и волновое движение становится более интенсивным. Если же гребни одной волны приходятся на впадины другой, то волны гасят друг друга, и волновое движение ослабевает.

В эксперименте Юнга (рис. 3) свет от небольшого источника падает на две близко расположенные щели в непрозрачном экране. Изображения щелей проецируются на второй экран. Достигая второго экрана, световые волны от каждой щели интерферируют. Результат интерференции зависит от того, как приходят к экрану волны — «в ногу» или «не в ногу». Это в свою очередь зависит от того, под каким углом волны падают на экран, и поэтому результат меняется от точки к точке. В итоге мы наблюдаем серию светлых и темных полос, образующихся вследствие того, что световые волны посчердно то усиливают, то гасят друг друга.

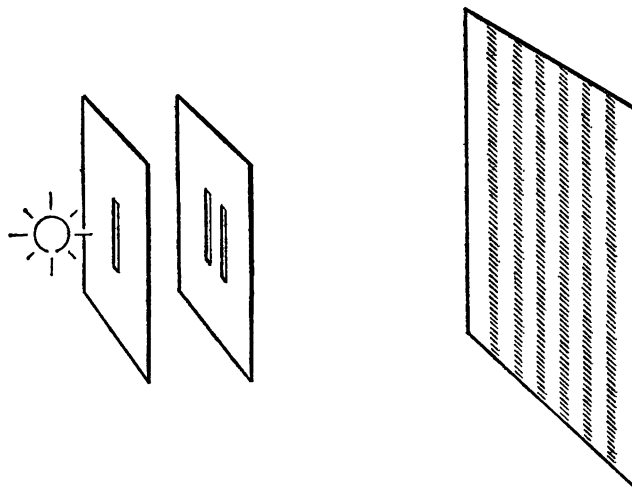


Рис. 3. Опыт Юнга по интерференции света. Источник света освещает две параллельные щели в непрозрачном экране. Изображение на экране состоит не из двух светлых полос, а из серии светлых и темных (интерференционных) полос. Этот опыт наглядно демонстрирует волновую породу света, но если взглянуть на него с корпускулярной (фотонной) точки зрения, то многое в опыте покажется странным.

Если принять во внимание квантовую природу света, то обнаруживаются удивительные детали. Квант света — фотон — ведет себя, как частица, в том смысле, что попадает на экран в определенном месте. (Если, желая зафиксировать интерференционную картину, заменить экран фотопластинкой, то каждый фотон вызовет химические изменения в единственном зерне фотоземлюльсии в четко определенном месте.) С другой стороны, интерференционная картина явно зависит от наличия двух щелей, порождающих *две* волны, которые налагаются друг на друга. Если одну щель закрыть, то интерференционная картина исчезает. Наблюдаемое явление нельзя объяснить ссылкой на то, что часть фотонов проходит через одну щель, а часть — через другую, так как интерференционная картина возникает в виде отдельных пятнышек, даже если на экран падают раздельно фотон за фотоном. Единственное возможное объяснение заключается в том, что каждый фотон каким-то образом проходит через *обе* щели и достигает экрана, неся на себе отпечаток их существования. Этим «отпечатком» является наибольшая вероятность попадания фотонов в область светлых полос, т. е. в сторону от области темных полос. В этом проявляется сосуществование двух аспектов природы света — волнового и корпускулярного. Хотя первоначально эксперимент был поставлен со светом, аналогичные соображения

остаются в силе, если использовать электроны или любые другие квантовые «волны-частицы».

Невозможно представить частицу, которая находится «одновременно повсюду». Можно, по-видимому, вообразить бесчисленные частицы-«призраки», движущиеся по всем возможным путям к точке наблюдения, где они сливаются в «реальную» частицу, но даже подобный образ оказывается неадекватным. Только математика в состоянии свести воедино все эти тонкости.

Вследствие нашей неспособности «прикрепить» частицу к определенному месту в случае нескольких частиц возникают необычные эффекты. Если имеется набор тождественных частиц и мы не можем сказать в каждом отдельном случае, где находится частица, здесь или там, то как можно узнать, где из них какая? Действительно, этого нельзя сделать. Индивидуальность частицы полностью стирается.

Это обстоятельство приводит к важным физическим следствиям. Когда два атома образуют молекулу, на движение электронов вокруг одного из атомов оказывает воздействие другой атом, в результате чего между атомами возникает сила притяжения. Отчасти она обусловлена тем, что данный электрон одного атома не отличим от электронов другого, а из-за размытости их положения ничто не препятствует этим электронам время от времени меняться местами. Иначе говоря, два электрона из разных атомов могут взаимно заменять друг друга. Подобные обменные взаимодействия (силы), хорошо известные в химии, порождают эффекты, доступные измерениям.

Все это делает понятие расстояния весьма расплывчатым. Но это еще не все. При более тщательном рассмотрении выясняется, что не только размыто положение частицы в пространстве, но и самому пространству присуща размытость. Плохо, когда неизвестно, где находится частица, но если нельзя сказать, где расположены точки пространства, то все представления геометрии рушатся.

Причина этого дальнейшего осложнения кроется в особых свойствах гравитации. В 1915 г. Эйнштейн обобщил теорию относительности, которая предсказывала возможное сжатие и растяжение пространства в зависимости от движения наблюдателя, включив в нее гравитационные явления. Согласно общей теории относительности гравитация представляет собой просто геометрию пустого пространства и времени, однако она совершенно не похожа на ту, которую мы изучаем в школе. Гравитация — это *искривленное* пространство-время. Пространство может не только растягиваться и сжиматься, но и изгибаться и скручиваться. Именно такими деформациями пространства объясняется, согласно теории Эйнштейна, гравитация.

Эйнштейн указал ряд примеров, когда искривление простран-



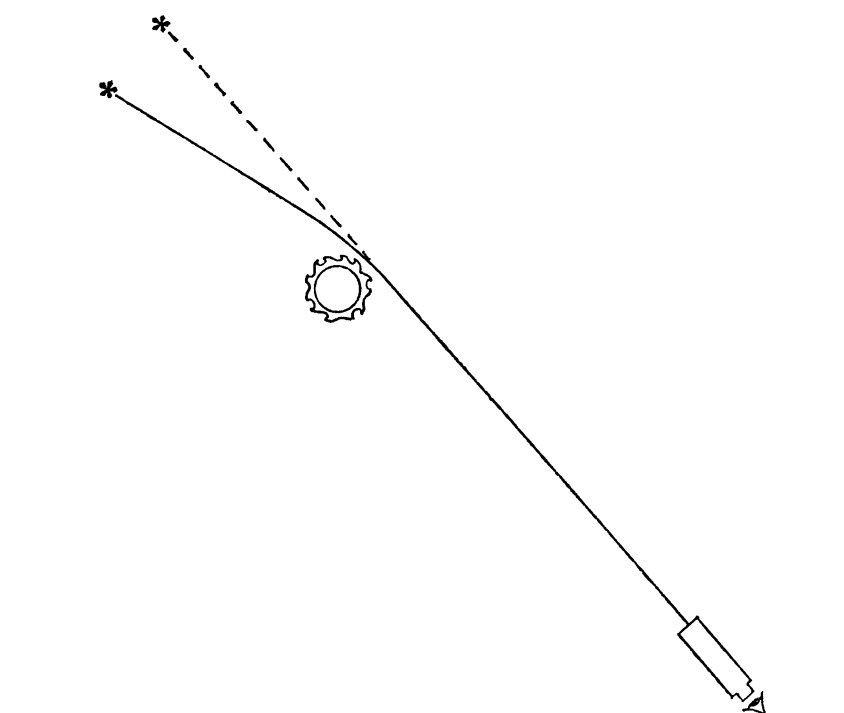


Рис. 4. Проходя вблизи Солнца, свет от звезды заметно отклоняется из-за вызванного Солнцем искривления пространства. В результате наблюдаемое нами положение звезды на небе несколько смещено относительно реального.

ства и времени можно наблюдать. Один из них — воздействие гравитационного поля Солнца на пространство в его ближайшей окрестности. Во время полного солнечного затмения, когда сияющий диск Солнца заслонен Луной, можно наблюдать небольшие отклонения в положениях звезд, расположенных на небе вблизи Солнца, по сравнению с их координатами, зафиксированными в астрономических атласах (рис. 4). Световые лучи, идущие от звезд, заметно отличаются от прямолинейных, что обусловлено искривлением пространства Солнцем.

Эта и другие проверки теории относительности, основанные на гораздо более сильных гравитационных полях нейтронных звезд, убедили физиков в том, что гравитация действительно искривляет пространство. Одно из следствий этого состоит в том, что пространство (строго говоря, пространство-время) следует считать как бы упругим, способным изменять свою геометрическую форму. Иначе говоря, мы можем наблюдать *динамику* пространства. Например, когда звезда коллапсирует, образуя черную

дыру, первоначально слабая деформация пространства в ее окрестности стремительно нарастает, создавая чудовищно деформированное пространство — ловушку, из которой ничто не может выйти наружу. Другим примером может служить расширяющаяся Вселенная (см. гл. 1): в ней пространство между галактиками непрерывно растягивается.

Способность пространства изменяться и двигаться имеет глубокий смысл для квантовой физики. Принцип неопределенности Гейзенберга размывает не только характер движения частицы, но и динамику пространства. Методом математического моделирования установлено, что в масштабах, по крайней мере в  $10^{20}$  раз меньших размеров атомного ядра, структура пространства напоминает пену и характеризуется резкими и спонтанными изменениями (увеличением и уменьшением) кривизны. Подобно тому как частица «использует» все доступные ей траектории движения, пространство в ультрамикроскопических масштабах реализует все возможные способы движения. В случае частицы речь шла о мириадах призрачных частиц, движущихся каждая по своей траектории. Аналогично мы можем говорить о бесконечном количестве призрачных пространств, каждое из которых имеет конкретную геометрию.

Такая призрачная динамика пространства предполагает, что в очень малых масштабах само понятие «местоположение» утрачивает смысл. Упорядоченное расположение точек, гладкая непрерывность пространства классической геометрии исчезает в пенообразном пространстве-времени. Вместо него мы имеем беспорядочное нагромождение полуреальных пространств-призраков. И в таком беспорядочно изменяющемся океане здравый смысл полностью теряет свою силу.

### Спин

Поскольку в квантовом мире положение в пространстве не может быть точно определено, неудивительно, что подобная участь постигает и углы. В повседневной жизни нам кажется само собой разумеющимся, что объекты имеют определенную ориентацию: ваза на столе стоит вертикально, стрелка компаса указывает на север, луч прожектора обшаривает небо. Понятие *направления* занимает центральное место в выработанной нами мысленной модели мира. Без него представление о внешнем мире утратило бы смысл.

Но в квантовом мире, в масштабе атомов и их составных частей, недопустимо наивное толкование понятий направления и ориентации. Нельзя утверждать, что электрон, обращающийся вокруг атомного ядра, в такой-то момент времени находится в данном направлении от ядра, так как положение электрона размыто. Пучок фотонов или других частиц нельзя использовать для

указания направления, так как частицы не следуют четко определенным траекториям: блуждая, они ведут себя непредсказуемо.

Тем не менее на первый взгляд кажется, что одна многообещающая возможность однозначного определения направления все же существует. Мы уже упоминали, что нейтрино обладают своеобразным собственным вращением, или «спином». Более того, это свойство присуще почти всем субатомным частицам; особенно отчетливо оно выражено у электронов и кварков. Привлекательно изобразить частицу со спином, например электрон, в виде крохотного шарика, вращающегося вокруг собственной оси, подобно Земле, совершающей суточное вращение. Чтобы такая «картинка» имела смысл, спин должен быть ориентирован в некотором направлении. Если это направление можно установить путем соответствующего измерения, то это означает, что у нас есть способ однозначного определения направления даже на квантовом уровне. Такие измерения действительно можно провести, но при этом возникает совершенно необычная ситуация.

Предположим, что экспериментатор включает прибор и сначала выбирает направление, чтобы измерить относительно него ориентацию спина частицы. На практике в качестве такого направления обычно принимают направление магнитного или электрического поля. Экспериментатор хочет определить угол между спином частицы и направлением поля. Проведя измерение, он с удивлением обнаруживает, что спин ориентирован строго по направлению поля. Эксперимент повторяется многократно, но результат всегда один и тот же: спин всегда ориентирован вдоль выбранного направления. Подозревая неладное, экспериментатор принимает менять направление внешнего поля, но спин частицы неизменно следует за его направлением. И как ни пытается экспериментатор обнаружить спин, направленный под углом к исходному направлению, у него ничего не получается. Экспериментатор в замешательстве: частица как бы читает его мысли, поскольку всегда указывает направление, которое он произвольно выбирает для отсчета.

Отчаявшись, экспериментатор прибегает к дьявольской хитрости — задает два различных исходных направления,  $A$  и  $B$ , и измеряет угол между направлением спина и каждым из них. Поскольку спин частицы, по мнению экспериментатора, не может быть одновременно ориентированным в двух различных направлениях, по крайней мере в одном случае спин образует с одним из них некоторый угол. Исходя из этого, экспериментатор производит первое измерение. То, что спин ориентирован вдоль направления  $A$ , не вызывает у него удивления. Второе измерение он проводит сразу же вслед за первым, чтобы спин не успел переориентироваться. Направление  $B$  было выбрано так, что составляло

угол  $25^\circ$  с направлением  $A$ , и экспериментатор, только что с удовлетворением установивший, что спин ориентирован вдоль оси  $A$ , естественно, ожидает, что спин будет направлен под углом  $25^\circ$  к оси  $B$ . Однако он с изумлением обнаруживает, что природа перехитрила его: частица каким-то образом упредила его, и ее спин, словно по волшебству, оказался ориентированным вдоль оси  $B$ ! В ярости экспериментатор принимается вновь измерять угол между направлением спина и осью  $A$  и видит, что спин, как и прежде, ориентирован вдоль оси  $A$ !

Поразительные эффекты, подобные описанному, стали неотъемлемой частью современной физики, и экспериментаторы давно привыкли к тому, что спин частицы всегда направлен вдоль оси, выбранной за исходную. Это свойство сводит на нет любую попытку придать смысл понятию направления в квантовом мире. Оно также приносит в физический мир элемент странной субъективности. Если спину частицы предопределено следовать за случайно выбранным направлением отсчета, то создается впечатление, что экспериментатор как бы вторгается в микромир. Рабская покорность, с которой все частицы со спином следуют заданному экспериментатором направлению, казалось бы, наводит на мысль, что материальным миром управляет какой-то высший разум. В гл. 3 мы увидим, что подобные субъективные элементы квантовой физики требуют полного пересмотра традиционных представлений о физической реальности и роли сознания в физическом мире.

Физика частиц со спином таит немало других сюрпризов. Один из них связан с простым, на первый взгляд даже тривиальным, понятием вращения. В повседневной жизни нам всем приходилось сталкиваться с процессом вращения. Представьте себе, что вы стоите в комнате, скажем, лицом к двери. Поворачиваясь вокруг своей вертикальной оси, вы увидите перед собой все новые и новые участки стен и, повернувшись на  $180^\circ$ , окажетесь спиной к двери. Повернувшись еще на  $180^\circ$ , вы окажетесь в исходной позиции — лицом к двери, — совершив полный оборот. Мир будет выглядеть в точности таким, каким был до начала вращения. Казалось бы, что может быть проще и очевиднее?

Но в мире субатомных частиц элементарный акт вращения приводит к удивительному результату. При прохождении электрона через магнитное поле определенной конфигурации его спин может поворачиваться на все больший угол, совершив в конце концов полный оборот на  $360^\circ$ . Основываясь на здравом смысле, естественно ожидать, что электрон вернется в исходное состояние. Однако это не так. Свойства электрона, совершившего поворот спина на  $360^\circ$ , заметно отличаются от свойств электрона, не подвергшегося воздействию. Чтобы вернуть в исходное состояние электрон, спин которого совершил поворот, его спин необходимо повернуть *дополнительно* на  $360^\circ$ , т. е. заставить

описать *два* полных оборота. Только после этого не обнаружится сколько-нибудь заметного различия между «повернувшимися» и «неповернувшимися» электронами.

Что это означает? Очевидно, что в простейшем случае необходим поворот на  $720^\circ$ , чтобы совершить полный оборот, т. е. вернуть мир в исходное состояние. Элементарная частица, например электрон, «ощущает» полный оборот в  $720^\circ$ . В мире людей и в случае крупных объектов это свойство утрачено — мы не отличаем один оборот на  $360^\circ$  от следующего. Следовательно, мы в некотором смысле лишь наполовину воспринимаем мир, доступный электрону.

Рис. 5 дает простую иллюстрацию сказанного, на нем изображена двойная проволочная петля с нанизанной на нее бусинкой. Издали мы не можем различить два витка, и нам кажется, что проволока просто согнута в окружность. Если бусинка, скользя по проволоке, опишет угол  $360^\circ$ , то мы ожидаем, что она вернется в исходную точку, но приглядевшись внимательнее, обнаруживаем, что это не так. Бусинка должна совершить еще один оборот на  $360^\circ$ , чтобы, обойдя всю петлю, вернуться к началу своего пути.

Это странное «двойственное» представление о мире, присущее электронам и другим микрочастицам, принято считать фундаментальным свойством природы. Оно приводит к многим неожиданным, доступным наблюдению следствиям. Например, создаваемое спином электрона магнитное поле вдвое превышает магнитное поле, которое создавал бы вращающийся заряженный шарик. В дальнейшем мы увидим, что необычная геометрическая природа спина может оказаться ключом к единой теории.

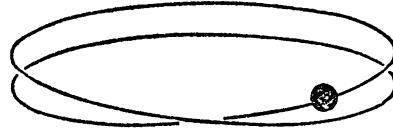


Рис. 5. Двойная проволочная петля дает весьма приблизительное представление о свойствах собственного спина. При перемещении на  $360^\circ$  бусина не возвращается в исходное положение — для этого необходим еще один оборот по проволоке, т. е. перемещение еще на  $360^\circ$ . Но на расстоянии столь тонкая особенность не заметна.

## Замедление времени

Новая физика разрушила не только геометрическую интуицию, но столь же безжалостно расправилась с привычным представлением о времени. Здравый смысл приучил нас мыслить в понятиях *Времени*, рассматриваемого как нечто универсальное и абсолютное, относительно чего мы отмечаем все события. Мы не делаем различия между своим и чужим временем — существует лишь единое время. Теория относительности отвергает столь упрощенный подход. Время, подобно пространству, также способно растягиваться или сжиматься в зависимости от движения

наблюдателя. Два события могут считаться, с точки зрения одного наблюдателя, разделенными промежутком времени в один час, с точки зрения другого — одной минутой.

Это не просто психологический эффект. Время действительно можно затянуть, или замедлить, даже в лаборатории, и зарегистрировать этот эффект можно с помощью точных часов. Чтобы заметить замедление времени, часы должны двигаться со скоростью, близкой к скорости света. Свет распространяется в пространстве со скоростью около 300 тыс. км/с, что намного превосходит скорость самого быстродвижущегося современного космического аппарата. Тем не менее точность хода современных атомных часов позволяет различить малейшее замедление времени даже на борту реактивного авиалайнера.

Вполне заметное замедление времени можно наблюдать, воспользовавшись субатомными частицами: они настолько бестелесны, что их можно разогнать почти до скорости света. Например, в эксперименте, проведенном в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), частицы, называемые мюонами, удалось разогнать до скорости, столь близкой к скорости света, что их масштаб времени растянулся в 24 раза. Мюоны удобны для таких исследований, поскольку они нестабильны и через малую долю секунды распадаются на электроны и другие частицы. Это превращение характеризуется определенным периодом полураспада, т. е. мюоны как бы наделены внутренними часами. В собственной (связанной с ними самими) системе отсчета распад мюонов происходит в среднем примерно через две миллионные доли секунды, но в лабораторной системе отсчета время жизни мюонов существенно возрастает.

Замедление времени в движущейся системе отсчета особенно раздражает непосвященных, видимо, задевая их глубже, чем другие странности современной физики. Примерно половина статей, поступающих в физические журналы от таких адресатов, касается проблемы времени и относительности, и авторы упорно ищут изъяны в рассуждениях Эйнштейна или противоречия в теории относительности. Они не приемлют мысль о том, что время «упруго» и его ход может меняться в зависимости от наблюдателя. С особыми ухищрениями они пытаются опровергнуть знаменитый «парадокс близнецов». Он состоит в следующем: если один из двух близнецов отправляется на ракете в космическое путешествие, то по возвращении он обнаруживает, что его брат оказался старше его, скажем, на десять лет. Явление, которое физики склонны рассматривать как курьез, вызывает у дилетантов абсолютное неприятие. Отчасти это объясняется тем, что у каждого вырабатывается собственное представление о времени и люди воспринимают манипуляции со временем как посягательство на нечто глубоко личное. Но нравится это или нет, замедление времени вполне реально.

Одно из самых сильных замедлений времени, которое удалось создать человеку, происходит на установке в Дарсбери (графство Чешир, Великобритания). Называется эта установка электронный синхротрон и предназначена для ускорения пучка электронов, который проходит по кольцу диаметром 30 м три миллиона раз в секунду. Большие магниты отклоняют электроны от естественного движения по прямой, и каждый оборот по кольцу сопровождается испусканием электромагнитного излучения, называемого синхротронным. Электроны движутся со скоростью лишь на одну десятитысячную процента меньше скорости света; при этом масштаб времени растягивается по сравнению с нашим примерно в десять тысяч раз. Именно это расхождение масштабов времени используют инженеры, для этого главным образом и был построен ускоритель. Хотя частота испускаемого излучения в собственной системе отсчета электронов составляет всего лишь несколько кГц (т. е. лежит в диапазоне радиочастот), в лабораторной системе отсчета вследствие замедления времени частота увеличивается в тысячи раз. Поэтому испускаемое электронами излучение мы воспринимаем как ультрафиолетовое или рентгеновское. Таким образом, с помощью синхротрона эффект замедления времени используется для генерации интенсивного коротковолнового излучения в широком диапазоне частот. Такие установки немногочисленны и находят ряд практических применений. Итак, в Дарсбери таинственное явление замедления времени приобретает сугубо практическое значение.

Замедление времени выступает рука об руку с сокращением длины (теория относительности заставляет нас связывать пространство и время в единое *пространство-время*), и по мере приближения к предельной скорости — скорости света — оба эффекта беспредельно возрастают. Именно поэтому невозможно преодолеть световой барьер и двигаться со сверхсветовой скоростью, ибо для этого понадобилось бы вывернуть пространство-время «наизнанку» и превратить пространство во время, а время — в пространство, что дало бы возможность телам совершать путешествия в прошлое. Поэтому скорость света является предельной скоростью, с которой могут двигаться во Вселенной тела или распространяться сигналы.

Замедление времени создается также и гравитацией. На крыше здания время течет чуть быстрее, чем у его основания, хотя эффект слишком слаб, чтобы его можно было заметить. Однако специальные «ядерные часы» позволяют обнаружить разность в течении времени даже в масштабах высоты здания. Чтобы проверить, влияет ли гравитация на течение времени, часы помещали на борт летающих на больших высотах самолетов и ракет. Реальность замедления времени не вызывает сомнений; в космосе время течет заметно быстрее, чем на Земле.

По астрономическим меркам гравитационное поле Земли довольно невелико; известны космические объекты, которые вызывают гораздо более сильное замедление времени. Например, на поверхности нейтронной звезды (чайная ложка ее вещества весит больше всех континентов Земли) гравитация такова, что время может течь вдвое медленнее, чем на Земле. Если гравитационное поле оказывается вдвое больше, чем у нейтронной звезды, то образуется черная дыра. В этом случае звезда полностью коллапсирует («схлопывается»), как бы погружаясь в бесконечно замедлившееся время и заточая себя в искривленном пространстве. Грубо говоря, время на поверхности черной дыры по нашей шкале оказывается полностью остановившимся.

То обстоятельство, что время не является абсолютным и универсальным, а подвержено изменениям, подрывает многие представления, основанные на нашем повседневном опыте. Если мое время может разойтись с вашим из-за того, что мы по-разному движемся или находимся в неодинаковых гравитационных полях, то не имеет смысла говорить о «времени вообще» или пользоваться понятием «теперь». Тщетно пытаться придать смысл выражению «в этот момент», например, на Марсе, учитывая возможность существования наблюдателей, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Точно так же бессмысленно спрашивать: «Который час на нейтронной звезде?». Время сугубо относительно. В нашей собственной системе отсчета оно течет своим темпом. Независимо от того, как мы движемся или как меняется гравитационное поле, течение времени нам будет казаться обычным. Необычные эффекты возникают, когда сравнивается время в двух различных системах отсчета. Тогда мы обнаруживаем, что в каждой системе отсчета время течет по-своему и что одна шкала времени, как правило, не согласуется с другой.

### Обычное становится аномальным

Под влиянием квантовой физики и теории относительности на наши традиционные представления о пространстве и времени мир приобрел неопределенность и субъективность, противоречащие его повседневной обычности. Представление об обычности возникает вследствие крайней ограниченности нашего опыта. В повседневной жизни нам не приходится двигаться с достаточно большими скоростями, которые сделали бы заметными эффекты замедления времени и сокращения пространства, и большинству из нас не приходится вторгаться в неясный и туманный мир атома. И все же рациональный, упорядоченный, основанный на здравом смысле и повседневном опыте мир обманчив. За ним скрывается сумеречная и парадоксальная картина таинственного существования и зыбких перспектив.



Кажущаяся потусторонность новой физики особенно проявляется, когда речь заходит о веществе. Незыблемость скалы вселяет в нас уверенность в реальном существовании объектов внешнего мира. Но и в этом случае при более тщательном рассмотрении рушатся привычные представления. Под микроскопом горная порода выглядит мозаикой из кристаллов. Электронный микроскоп позволяет нам различить отдельные атомы, образующие правильную решетку и разделенные большими промежутками. Исследуя сами атомы, мы обнаруживаем, что они представляют собой в основном пустое пространство. Крохотное ядро занимает всего лишь одну триллионную ( $10^{-12}$ ) часть объема атома. Остальное пространство заполняет облако эфемерных электронов, расположенных «ни тут, ни там», — ничтожно малых островков твердого вещества в океанах пустоты. Даже ядро при близком рассмотрении оказывается пульсирующим сгустком мимолетных частиц. Представление о незыблемости материи, сложившееся на основе повседневного опыта, уступает место неустойчивому миру квантов энергии.

Не подлежит сомнению, что новая физика несет на себе весьма сильный отпечаток таинственности. Старое представление о Вселенной как часовом механизме, неукоснительно следующем по предначертанному пути и помещенном в абсолютное пространство-время, было сметено. На смену ему пришли представления, каждое из которых отражает один из аспектов повседневного опыта, но которые не укладываются в единую стройную картину. Что такое электрон — волна или частица? Каждое из этих представлений соответствует ясному мысленному образу, но их нельзя связать в единое целое, которое было бы «и тем и другим». Столь же трудно представить себе искривленное или расширяющееся пространство. Дело в том, что пространство обычно ассоциируется с пустотой, а представить себе искривление пустоты по силам лишь немногим.

Таинственный ореол современной физики привлек к ней внимание людей, склонных к философии и мистике, увидевших в ее открытиях конец безликому материальному миру, сложившемуся в сознании людей современного технологического общества. Необычность эффектов замедления времени и сокращения пространства питает убеждения в том, что существует реальность, выходящая за пределы доступного созерцанию. Особенно привлекательно присущее новой физике целостное восприятие мира. Разочарование в естественных науках, возникшее в недавнем прошлом, в значительной степени является реакцией на традиционный научный «редукционизм», приверженцы которого хладнокровно разлагают окружающий мир на простейшие составные части.

Убеждение в возможности объяснить все путем разложения на составные части оказывало сильное влияние на научное мыш-

ление на протяжении нескольких столетий. Ньютон считал, что сложные движения можно объяснить, рассматривая простые тела небольших размеров, на которые действуют силы со стороны других подобных же тел. Хотя падение листа с дерева может быть чрезвычайно сложным, движения отдельных частиц должны в принципе подчиняться простым математическим законам.

Ньютоновский редукционизм достиг своего апогея в знаменитом высказывании Пьера Лапласа:

Разумное существо, которое в данный момент знало бы все движущие силы природы и взаимное расположение образующих ее тел, могло бы — если бы его разум был достаточно обширен для того, чтобы проанализировать эти данные, — выразить одним уравнением движение и самых больших тел во Вселенной, и мельчайших атомов. Ничто не осталось бы сокрытым от него — оно могло бы охватить единым взглядом как будущее, так и прошлое.

Итак, будь известны точные положения и скорости всех частиц во Вселенной, тогда в принципе можно было бы определить поведение любого тела в прошлом и будущем. Представление о том, что поведение всего жестко предопределено, опровергает идею свободы воли и создает образ безжизненного и бессмысленного космоса. Такое представление становится еще более неприемлемым, если обратиться к живым существам: попытка свести все живое лишь к движению мириадом атомов, подчиняющемуся воле слепого случая, более чем что либо порождает взгляд на науку как на бездушное, негуманное занятие.

Новая физика особенно резко контрастирует с подобным традиционно редукционистским подходом. Квантовый подход решительно отвергает лапласовский детерминизм, отрицая, что мир можно объяснить лишь как сумму его составных частей. В следующей главе мы увидим, что две изолированные частицы, разделенные большим расстоянием, тем не менее ведут себя согласованно. В самом общем случае при любом измерении или наблюдении в квантовой физике сущность субатомной частицы нельзя рассматривать в отрыве от ее окружения. В эксперименте Юнга с двумя щелями поведение столь крошечной частицы, как электрон, при прохождении ее сквозь экран, зависит от того, открыты ли одна или обе щели. Электрон каким-то таинственным способом получает информацию о сравнительно обширной окрестности и ведет себя соответствующим образом. Аналогично направление ориентации спина электрона неотделимо от выбранного экспериментатором способа измерения. Макромир и микромир оказываются тесно связанными. Не стоит надеяться, что полного понимания строения вещества удастся достичь, зная лишь свойства его составных частиц. Только подход к системе как *целому* дает возможность познания свойств микромира. Большое и малое существуют. Одно не исчерпывает другого, как равным образом второе не «объясняет» полностью первого.

Один из сильнейших ударов по редукционистской концепции нанес разум. Пытаясь свести все системы к функционированию ее более простых компонентов, некоторые ученые пришли к убеждению, что разум — это активность головного мозга, которая в свою очередь представляет собой не что иное, как серию электрохимических процессов, сводимых к движению электронов и ионов. Столь крайне упрощенный материалистический взгляд сводит мир человеческих мыслей, чувств и ощущений лишь к чисто внешнему проявлению.

В отличие от этого новая физика восстанавливает центральное положение разума в природе. Квантовая теория в обычной интерпретации приобретает смысл лишь с введением того или иного наблюдателя. Акт наблюдения в квантовой физике является не побочным обстоятельством, а средством получения информации, уже существующей во внешнем мире; наблюдатель весьма основательно вмешивается в микромир, и описание, содержащееся в уравнениях квантовой физики, явно включает акт наблюдения. Наблюдение вызывает определенное изменение в физической системе. Стоит только «взглянуть» на атом, как тот совершает характерный переход, не воспроизводимый обычным физическим взаимодействием. Здравый смысл, возможно, и сложил оружие перед лицом новой физики, но во Вселенной, какой рисуют ее последние достижения физической науки, снова нашлось место для человека.

**Лабиринт парадоксов**

Летом 1982 г. в Парижском университете был проведен исторический эксперимент. Французский физик Ален Аспек и его сотрудники решили проверить, не удастся ли им «перехитрить» квант. На карту были поставлены не только наиболее плодотворная научная теория, но и сама основа того, что мы считаем физической реальностью.

Как и многие решающие эксперименты в физике, парижский эксперимент восходил к парадоксу, который озадачивал и интриговал физиков и философов на протяжении почти половины века. Речь идет об одной из принципиальных особенностей квантовой физики — о неопределенности. Знаменитый принцип неопределенности Гейзенберга вынуждает вносить существенные поправки в простую, построенную на интуиции картину мира атомов, согласно которой частицы под действием сил движутся по вполне определенным траекториям. В действительности частица, например электрон, движется сложным, почти непредсказуемым образом, и проследить за ее движением в деталях или хотя бы дать его описание невозможно.

До появления квантовой теории физическую Вселенную рассматривали как огромный часовой механизм, ход которого до мельчайших деталей неукоснительно следовал безупречной логике причины и следствия, воплощенной в законах механики Ньютона. Разумеется, законы Ньютона и поныне справедливы для описания большинства явлений в окружающем нас мире. Они направляют пулю к цели и заставляют планеты двигаться точно по орбитам. Но, как мы теперь уже знаем, в масштабах атома многое обстоит совсем иначе. На смену знакомому упорядоченному движению макроскопических тел приходит беспорядок и хаос. Привычные твердые тела на поверку оказываются призрачной мозаикой, образованной всплесками энергии. Квантовая неопределенность убеждает нас, что невозможно всегда все знать о частице. Если, фигурально говоря, вы попытаетесь «пришпилить» частицу к определенному месту, она ускользнет от вас.

Эта неуловимость квантовых частиц доставила немало хлопот физикам при построении квантовой теории. В 20-х годах нашего столетия новая квантовая механика выглядела лабиринтом парадоксов. Хотя Вернер Гейзенберг и Эрвин Шрёдингер были главными строителями квантовой теории, ее интерпретацию предложили Макс Борн и особенно Нильс Бор. Датский физик Бор первым осознал во всей полноте, что квантовая теория в той же мере применима к веществу, как и к излучению, и в последующие годы стал ведущим авторитетом и лидером среди физиков в области концептуальных основ квантовой механики. Институт Бора в Копенгагене был центром исследований по квантовой физике на протяжении более чем десятилетия. Однажды Бор заметил своим коллегам: «Если у человека при первом знакомстве с квантовой механикой голова не идет кругом, то он не понимает в ней ничего». В своей книге «Физика и философия» Гейзенберг вспоминает о первых мучительных сомнениях по поводу смысла новой квантовой механики:

Я вспоминаю дискуссии с Бором, длившиеся за полночь, которые приводили меня почти в отчаяние. И когда я после таких обсуждений отправлялся на прогулку в соседний парк, передо мной снова и снова возникал вопрос: действительно ли природа может быть столь абсурдной, какой она предстает перед нами в этих атомных экспериментах?

Самым крупным оппонентом квантовой механики был Эйнштейн. Хотя ему самому довелось приложить руку к формулировке квантовой теории, он никогда полностью не разделял ее идей, считая квантовую теорию либо ошибочной, либо в лучшем случае «истинной наполовину». Известно его изречение: «Бог не играет в кости». Эйнштейн был убежден, что за квантовым миром с его непредсказуемостью, неопределенностью и беспорядком скрывается привычный классический мир конкретной действительности, где объекты обладают четко определенными свойствами, такими, как положение и скорость, и детерминированно движутся в соответствии с причинно-следственными закономерностями. «Безумие» атомного мира по утверждению Эйнштейна, не является фундаментальным свойством. Это всего лишь фасад, за которым «безумие» уступает место безраздельному господству разума.

Эйнштейн пытался найти это фундаментальное свойство в нескончаемых дискуссиях с Бором — наиболее ярким выразителем взглядов той группы физиков, которые считали квантовую неопределенность неотъемлемой чертой природы, не сводимой к чему-либо другому. Эйнштейн с завидным упорством продолжал свои атаки на квантовую неопределенность, пытаясь придумать гипотетические («мысленные», как принято говорить) эксперименты, которые обнаружили бы логический изъян в офици-

альной версии квантовой теории. Бор каждый раз отражал нападку Эйнштейна, опровергая его аргументы.

Особенно памятен один эпизод на конференции, на которой собрались многие ведущие физики Европы в надежде услышать о последних достижениях новой тогда квантовой теории. Эйнштейн направил свою критику против варианта принципа неопределенности, устанавливающего, с какой точностью можно определить энергию частицы и момент времени, когда частица ей обладает. Эйнштейн предложил необычайно остроумную схему, позволяющую обойти неопределенность энергии—времени. Его идея сводилась к точному измерению энергии с помощью взвешивания: знаменитая формула Эйнштейна  $E = mc^2$  сопоставляет энергию  $E$  и массу  $m$ , а массу можно измерить взвешиванием.

На этот раз Бор был обеспокоен, и те, кто видел, как он провожал Эйнштейна в гостиницу, заметили, что Бор был сильно взволнован. Но на следующий день Бор, прошедший бессонную ночь за детальным анализом рассуждений Эйнштейна, торжествуя, обратился к участникам конференции. Развивая свои аргументы против квантовомеханической неопределенности, Эйнштейн упустил из виду один важный аспект созданной им самим теории относительности. Согласно этой теории, гравитация замедляет течение времени. А поскольку при взвешивании без гравитации не обойтись, эффектом замедления времени пренебречь нельзя. Бор продемонстрировал, что при надлежащем учете этого эффекта неопределенность восстанавливается на обычном уровне.

### Эксперимент Эйнштейна — Подольского — Розена

Самые важные мысленные эксперименты Эйнштейна, не утратившие своего значения и поныне, были предложены лишь в 1935 г., когда вместе со своими коллегами Борисом Подольским и Натаном Розеном он опубликовал в журнале *The Physical Review* статью, содержащую наиболее убедительную и по сей день формулировку парадоксальной природы квантовой физики. По существу эксперимент Эйнштейна—Подольского—Розена затрагивал старую проблему: может ли частица одновременно обладать определенным положением и определенным импульсом. Задача, которую поставили перед собой Эйнштейн и его коллеги, состояла в том, чтобы придумать схему мысленного эксперимента, позволяющего (по крайней мере в принципе) сколь угодно точно измерить координаты частицы и ее импульс.

К тому времени было общепризнано, что любая попытка непосредственно измерить положение и импульс частицы обречена на провал по простой причине: когда вы пытаетесь измерить по-

ложение частицы, само измерение вносит не поддающиеся контролю изменения в величину импульса частицы. В свою очередь измерение импульса аннулирует всю полученную ранее информацию о положении частицы. Измерение одного типа несовместимо с измерением другого типа и аннулирует его результат. И если Эйнштейн надеялся преуспеть в попытке одновременного измерения координат и импульсов, ему надлежало избрать более тонкую стратегию.

Если отвлечься от второстепенных деталей, то суть работы Эйнштейна, Подольского и Розена сводится к следующему. Пусть установлено, что невозможно *непосредственно* измерить в одно и то же время положение и импульс одной частицы; тогда возникает мысль взять вторую частицу — «сообщницу». Располагая *двумя* частицами, можно одновременно измерять большее число величин. Если бы нам удалось каким-то образом заранее связать движение двух частиц, то измерения, выполненные одновременно над обеими частицами, позволили бы экспериментатору проникнуть сквозь завесу квантовой неопределенности, непреодолимую по утверждению Бора.

Использованный Эйнштейном и его коллегами принцип достаточно известен. При игре в бильярд, когда шар, по которому игрок ударяет кием, сталкивается с другим шаром, оба они разлетаются в разные стороны. Но их движения не произвольны, а жестко связаны друг с другом законом действия и противодействия — законом сохранения импульса. Измерив импульс одного шара, можно судить об импульсе другого (который может откатиться далеко в сторону), даже непосредственно не наблюдая за ним. Закон сохранения импульса справедлив и для квантовых частиц. Значит, необходимо лишь, чтобы две квантовые частицы, 1 и 2, столкнувшись между собой, провзаимодействовали и разлетелись на большое расстояние. В этот момент можно измерить импульс частицы 1. Зная его, можно, воспользовавшись законом сохранения импульса, точно вычислить импульс частицы 2, которая, собственно, нас и интересует. Измерение импульса частицы 1, разумеется, внесет неопределенность в ее положение, но это несущественно, так как не влияет на положение частицы 2 (а нас интересует именно она), поскольку та находится далеко; в принципе она могла бы располагаться на расстоянии нескольких световых лет. Если в один и тот же момент непосредственно измерить положение частицы 2, то ее положение и импульс станут известны одновременно. Иначе говоря, мы перехитрим принцип неопределенности!

Рассуждения Эйнштейна—Подольского—Розена основаны на двух допущениях, имеющих принципиальное значение. Во-первых, предполагается, что измерение, проведенное в одном месте, не может мгновенно повлиять на частицу, находящуюся далеко

от него. Такое допущение основано на том, что взаимодействие между системами ослабевает с расстоянием. Трудно представить, чтобы два электрона, разделенные расстоянием в несколько метров, а тем более световых лет, каким-то неведомым образом влияли на положение и импульс друг друга. Эйнштейн отвергал подобную мысль, называя ее «призрачным действием на расстоянии».

Отвергая идею мгновенного дальнего действия, Эйнштейн исходил из своего убеждения, что никакой сигнал или воздействие не могут распространяться быстрее света. Это — ключевой момент теории относительности, и им не следовало пренебрегать. Кроме того, невозможность распространения сигналов со скоростью выше скорости света принципиально важна для общего определения прошлого и будущего во Вселенной. Преодоление светового барьера эквивалентно распространению сигналов назад во времени, а это чревато парадоксами.

Второе фундаментальное допущение, из которого исходил Эйнштейн со своими коллегами, было связано с признанием существования «объективной реальности». Они предполагали, что такие характеристики, как положение и импульс частицы, существуют объективно, даже если частица удалена и эти характеристики непосредственно не наблюдаемы. Именно в этом Эйнштейн расходился с Бором. По мнению Бора, просто нельзя приписывать частице такие характеристики, как положение или импульс, если нет возможности реально их наблюдать. Измерение, выполненное кем-то еще («по доверенности») в счет не идет. Использование частицы-«сообщницы» — просто надувательство.

На этом этапе Эйнштейн и Бор могли признать лишь несоответствие своих позиций. Необходим был такой вариант мысленного эксперимента, который позволил бы проверить, нарушается или нет принцип неопределенности на практике. В 60-х годах Джон Белл из ЦЕРНа придумал, как это сделать. Он использовал два основных допущения Эйнштейна, Подольского и Розена (распространение сигналов со скоростью меньше скорости света и существование объективной реальности) для вывода наиболее общих соотношений между измерениями с частицей 1 и измерениями с частицей 2, причем измерениями не только положения и импульса, но и других характеристик, в частности ориентации спина. Белл обнаружил, что измерения некоторых типов позволяют различить позиции Эйнштейна и Бора, отдавая предпочтение одной из них. Иначе говоря, два упомянутых допущения позволяют сделать определенные экспериментальные предсказания, которые не подтвердились бы, будь справедлива квантовая механика в духе Бора с внутренне присущей ей неопределенностью. Таким образом, если бы удалось выполнить соответствующий реальный эксперимент, то тем самым осуществилась бы прямая проверка наличия квантовой неопределенности.



Белл записал суть различия двух соперничающих теорий в форме математического соотношения, получившего название неравенства Белла. Проще говоря, если прав Эйнштейн, то результаты реального эксперимента должны подтвердить неравенство Белла. Если же прав Бор, то это неравенство не будет выполнено. Очередь теперь была за экспериментаторами.

### Крушение наивного представления о реальности

Практическую проверку неравенства Белла не удалось осуществить в 60-е годы. Основная проблема заключалась в недостаточной точности оборудования того времени. Чтобы с уверенностью исключить обмен сигналами между двумя частицами, находящимися на некотором расстоянии друг от друга, измерения следовало произвести за столь короткий интервал времени, за который сигналы, распространяющиеся со скоростью света (или медленнее), не успевали бы преодолеть расстояние между частицами. Это означает, что при расстоянии между частицами в несколько метров измерения должны занимать не более нескольких миллиардных долей секунды.

В 70-е годы ряд групп экспериментаторов поставили различного рода эксперименты с двумя частицами, но ни одна из групп не достигла точности, при которой результаты можно было бы считать безупречными. Наконец, Ален Аспек в Париже, внося ряд усовершенствований в методику, приступил в 1981 г. к серии экспериментов, в которых одновременно измерялись направления поляризации двух фотонов, испущенных одним и тем же атомом и движущихся в противоположные стороны. Кульминационным стал эксперимент, выполненный летом 1982 г., который впервые позволил дать окончательный ответ на интересовавший всех вопрос. Результаты не оставляли никакого сомнения: Эйнштейн был неправ. Квантовую неопределенность невозможно обойти. Она — неотъемлемая особенность квантового мира и не может быть сведена к чему-то другому. Наивное представление о реальности частиц, обладающих четко определенными свойствами в отсутствие наблюдений над ними не выдержало испытания. Аспек «забил последний гвоздь» в гроб физики, основанной на здравом смысле.

Небезынтересен способ, которым в эксперименте Аспека выявлено различие между квантовой и альтернативной «реалистической» теориями. Экспериментаторы задались целью выяснить, в какой мере результаты измерений, производимых над одним фотоном, коррелируют с результатами измерений над другим фотоном. Как следует из неравенства Белла, «реалистические»

теории предсказывают существование верхнего предела, максимального уровня корреляции. В отличие от них квантовая механика предсказывает более высокую степень корреляции: между двумя частицами как бы существует некая сверхъестественная «телепатическая» связь. Результаты измерений показали, что корреляция превосходит максимум, предусмотренный неравенством Белла, и тем самым подтвердили наличие в квантовой физике внутренней неопределенности.

Эту ситуацию можно сравнить с тем, что происходит, когда два человека, сидя спиной друг к другу, одновременно бросают монеты. Если бросания совершенно случайны, то никакой корреляции между их результатами не будет. «Орлы» при бросаниях одной монеты будут выпадать с одинаковой частотой независимо от того, выпадет при бросании другой монеты «орел» или «решка». Предположим, однако, что бросания не вполне случайны и выпадение «орла» при бросании одной монеты чаще совпадает с выпадением «орла» при бросании другой; аналогичная картина наблюдается при выпадении «решки». Эксперименты демонстрируют наличие определенной положительной корреляции между результатами бросания двух монет. В эксперименте с двумя частицами поведение частиц случайно, но не независимо, так как обе они испущены одним и тем же атомом. Следовательно, некоторую корреляцию в поведении частиц можно ожидать заранее. Решающая проверка заключается в определении точной величины этой корреляции.

На первый взгляд может показаться, будто эксперимент Аспека позволяет достигать скорости распространения сигналов, превышающей скорость света. Применительно к бросанию монеты это означает следующее: если у меня «орел» чаще всего совпадает с вашим, то создается впечатление, будто я могу послать вам сигнал (даже если вы не видите моей монеты), пользуясь простым кодом, например, обозначая «орел» точкой, а «решку» — тире. Если корреляция ниже 100 %, то на сигнал накладывается «шум», но при достаточно большом числе повторений его можно передать без искажений.

Однако, как показывают дальнейшие размышления, подобная возможность передачи сигналов со скоростью выше скорости света иллюзорна. Исход каждого из моих бросаний монеты хотя и коррелирован с исходом ваших, но все же полностью непредсказуем, поскольку я не могу заранее заставить монету выпасть «орлом» или «решкой». Если при очередном бросании у меня выпадает «орел», то я знаю, что и у вас, вероятно, выпал «орел», но от этого мало толку, ибо я не могу управлять последовательностью точек и тире в передаваемом сигнале, и мой сигнал выражается в сплошной (белый) шум.

## Причуды квантовой реальности

Через несколько месяцев после того, как Аспек опубликовал результаты своего эксперимента, мне выпала честь составить для Би-Би-Си документальную радиопередачу о фундаментальных парадоксах квантовой физики. В число участников передачи входили сам Аспек, Джон Белл, Дэвид Бом, Джон Уилер, Джон Тейлор и Рудольф Пайерлс. Я спросил всех участников передачи, как они оценивают результаты эксперимента Аспека и не кажется ли им, что реальность, основанная на представлениях здравого смысла, теперь мертва. Разнообразие ответов было поразительным.

Один или два участника передачи вообще не выразили удивления по поводу эксперимента Аспека. Их вера в правильность общепринятой точки зрения, давно провозглашенной Бором, была столь сильна, что эксперимент Аспека они восприняли лишь как подтверждение (хотя и весьма желательное) того, что никогда не вызывало серьезных сомнений. Другие участники передачи не разделяли такой точки зрения. Их уверенность в существовании реальности, укладывающейся в рамки здравого смысла, — той объективной реальности, поиском которой занимался Эйнштейн, — осталась непоколебленной. По их мнению, следовало бы отказаться от предположения, что сигналы не могут распространяться со скоростью выше скорости света. В конечном счете должно существовать какое-то «призрачное действие на расстоянии». Бором уже была разработана теория, включающая подобные «нелокальные» эффекты.

А как быть с парадоксами, связанными с распространением сигналов? Возможно, что-то мешает нам управлять такими сигналами. В этих вопросах достичь полной ясности так и не удалось.

Хотя не все физики согласны с ниспровержением наивной реальности, взгляды Бора остаются общепринятыми, и результаты Аспека, несомненно, лишь подкрепили их. Эта точка зрения оказывает глубокое влияние на наши представления об окружающем нас физическом мире.

Во-первых, описанная схема эксперимента с двумя частицами показывает, что свойства частицы, находящейся «там», неразрывно связаны со свойствами частицы, находящейся «здесь». Упрощающее предположение, что две частицы можно рассматривать как изолированные и независимые физические объекты только потому, что они движутся на большом расстоянии друг от друга, в корне ошибочно. Пока над частицами не производится отдельных измерений, они остаются частью единого целого. То, что мы понимаем под свойствами частиц, определяется экспериментальной установкой в целом, а она может занимать значительную область пространства. Кроме того, хотя в эксперименте Аспека «целост-

ная» система двух частиц умышленно поставлена в контролируемые условия, частицы продолжают вести себя естественным образом — взаимодействовать и разлетаться. Следовательно, нелокальный характер квантовых систем является общим свойством природы, а не искусственной ситуацией, созданной в лаборатории.

Некоторые ученые подчеркивали, что квантовая физика рисует картину мира, в котором отдельные частицы материи не существуют сами по себе как первичные объекты. Статусом «реальности» обладает здесь только ансамбль частиц, рассматриваемый как единое целое, в том числе и частиц, из которых состоит измерительный прибор.

Совершенно иначе выглядит традиционное представление о реальности, основанное на классической ньютоновской физике. Согласно Ньютону, вещество состоит из частиц, которые рассматриваются, однако, просто как «строительные блоки» для более крупных конструкций. Такая картина, несомненно, привлекательна, поскольку позволяет наглядно представить мириады «элементарных частиц» наподобие твердых шариков, которые, сцепляясь друг с другом, образуют обычные тела, такие, как камень. Все свойства камня в этом случае можно приписать атомам или любым другим элементарным «строительным блокам» в зависимости от последних веяний моды. Камень *построен* из элементарных частиц, а те в свою очередь — простые части камня и ничего более. Немецкий физик Отто Фриш, открывший деление ядер, так описывает классическую картину мира:

Считается, что заведомо существует внешний мир, который состоит из частиц, обладающих местоположением, размером, твердостью и т. д. Чуть больше сомнений возникает относительно того, имеют ли частицы цвет и запах; однако все они вполне «добропорядочны» и существуют независимо от того, наблюдаем мы их или нет.

Подобный взгляд на природу можно с полным основанием назвать наивным реализмом.

Квантовая физика ниспровергает столь упрощенную классическую взаимосвязь целого и его частей. Квантовый подход требует рассматривать частицы только в их взаимосвязи с целым. Поэтому было бы неверно считать элементарные частицы вещества материальными *объектами*, которые, соединяясь в ансамбли, образуют более крупные объекты. При более точном описании мир выступает как совокупность *отношений*.

С точки зрения «наивного реалиста» Вселенная представляет собой совокупность объектов. Для специалиста по квантовой физике это подвижная единая ткань, состоящая из всплесков энергии, и ни одна из частей этой «ткани» не существует независимо от целого, а это целое включает и наблюдателя.

Американский физик Г. П. Стэпп так сформулировал квантовую концепцию частицы:

Элементарная частица не есть нечто независимо существующее и не поддающееся анализу. По существу — это среда, распространяющаяся вовне на другие объекты.

Невольно на память приходит строка из Уильяма Блейка: «Вселенная в песчинке видней ...»<sup>1</sup>. Мы должны рассматривать все вещество и энергию в рамках всеобъемлющего единого бытия.

Еще одно следствие квантовой физики затрагивает роль наблюдателя — лица, реально выполняющего измерения. Квантовая неопределенность не переносится на производимые нами реальные наблюдения. Это означает, что в каком-то звене цепи, соединяющей исследуемую квантовую систему с экспериментальной установкой, шкалами и измерительными приборами, нашими органами чувств, нашим мозгом и, наконец, нашим сознанием, должно происходить нечто такое, что рассеивает квантовую неопределенность. Правила квантовой физики вполне определены в этом отношении. В отсутствие наблюдателя квантовая система каким-то образом существует и развивается. После того как произведено наблюдение, поведение системы становится совершенно иным. Чем именно вызвано изменение в поведении системы, не ясно, но некоторые физики утверждают, что это изменение явно обусловлено вмешательством экспериментатора.

Этим слегка интригующим замечанием мы завершим наш рассказ о проблемах и парадоксах квантовой физики. И какие бы споры ни велись вокруг ее принципиальных основ, подавляющее большинство ученых все же сходится на том, что в своих приложениях квантовая теория работает блестяще. В частности, именно на ней основывается все описание мира элементарных частиц — того самого мира, в недрах которого погребена суперсила.

<sup>1</sup> Пророчания невинности (пер. В. Микушевича). В кн.: Блейк У. Стихи — М.: Художественная литература, 1978, с. 194.

## 4

# Симметрия и красота

---

Красота есть истина, а истина — красота.  
*Джон Китс*

### Математика как язык природы

Когда мне приходится читать первокурсникам лекцию «Основные понятия современной физики», я всегда говорю им о красоте физики, обусловленной тем, что ее содержание может быть выражено простыми математическими законами. Это замечание обычно вызывает взрыв иронических возгласов. Причина такой реакции заключается, конечно, в том, что первокурснику, сражающемуся с премудростями вводного курса математического анализа, уравнения физики кажутся необычайно сложными и неясными. Им, первокурсникам, еще предстоит узнать, что математика — это помимо прочего еще и язык науки. И когда они постигнут премудрости этого языка, он поможет им изящно сжать описание чрезвычайно сложных вещей в лаконичный математический эквивалент, укладывающийся в одну строку.

В этом отношении математика мало чем отличается от других технических языков (хотя и неизмеримо превосходит их по мощи и универсальности). Представьте себе, что вы пытаетесь растолковать кому-нибудь суть системы финансирования на обычном языке, не прибегая к таким понятиям, как капитал, ссудный процент, инфляция, или описать работу автомобильного двигателя, не упоминая о клапанах, коленчатом вале, прокладках или карбюраторе.

У всякого, кому хоть раз приходилось слышать разговор двух математиков, может создаться впечатление, что они беседуют, пользуясь кодом, и в некотором смысле это действительно так. Как и в любом коде, стоит вам узнать ключ, как сложная информация мгновенно станет простой. В закодированном сообщении нетрудно распознать упорядоченный набор знаков, несущий информацию, хотя истинное содержание сообщения скрыто за внешне бессмысленной грудой цифр. Любая математическая формула — своеобразный код со своим входом и выходом. Взять хотя бы формулу  $n^2$ , где  $n$  — произвольное натуральное число 1, 2, 3, 4, ... Подставляя в нее значения  $n$  по порядку, получаем 1, 4, 9, 16, ... В этом случае код не трудно «раскрыть» и по ответам 1,

4, 9, 16, ... вывести формулу  $n^2$ , восстановив числа «на входе»: 1, 2, 3, 4, ... Но если хотя бы немного усложнить формулу, то расшифровка кода становится непосильной задачей. Попробуйте, например, угадать, по какой формуле построена последовательность 2, 4, 6, 9, 12, 17, 20, 25, 28, 31, 34, ...

Вероятно, величайшим научным открытием всех времен следует считать осознание того, что законы природы можно записать с помощью математического кода. Причина этого нам неизвестна, но сам по себе факт математического кодирования явлений природы позволяет понимать, управлять и предсказывать ход физических процессов. Разгадав код, соответствующий той или иной конкретной физической системе, мы обретаем возможность читать природу как раскрытую книгу.

Люди далеко не сразу поняли, что на фундаментальном уровне законы природы могут быть записаны в математической форме. Древние астрологи вывели простые числовые соотношения, «управляющие» движением Солнца, Луны и других небесных светил, которые помогали предсказывать затмения. Пифагор обнаружил, что высота музыкального тона, создаваемого струной, связана строгой числовой зависимостью с длиной струны. Но первые систематические попытки расшифровать математический код природы были предприняты только в средние века. В XIV в. ученые из Оксфорда установили интересный факт: расстояние, проходимое телом, падающим по вертикали из состояния покоя, пропорционально квадрату времени  $t^2$ , прошедшего с момента начала падения. Но общее признание этот факт получил только в XVII в. после работ Галилея и Ньютона. Были обнаружены и другие факты, так или иначе связанные с первым: период колебаний маятника не зависит от размаха (амплитуды) его качаний, а пропорционален квадратному корню из его длины; тело, брошенное под углом к горизонту, движется по кривой, называемой квадратичной параболой. Кеплер вывел математические соотношения, которым подчиняются движения планет, установив, например, что квадраты периодов обращения планет по орбитам относятся, как кубы их средних расстояний от Солнца.

Кульминацией явилась формулировка Ньютоном законов механики и закона всемирного тяготения. Ньютон обнаружил, что действие гравитации можно описать особенно простой математической формулой — так называемым законом обратных квадратов. Этот закон связывает силу тяготения с расстоянием  $r$  от центра сферического тела соотношением  $1/r^2$ . В дальнейшем экспериментальные исследования электрической и магнитной сил показали, что они также подчиняются закону обратных квадратов.

В XVIII—XIX вв. математическая основа физики необычайно расширилась. Для удовлетворения растущих запросов физиков были разработаны новые разделы математики. В нашем столетии

«математизация» физики происходила еще быстрее, и ныне ее математический аппарат включает многие разделы чистой математики — неевклидову геометрию, теорию бесконечномерных векторных пространств, теорию групп.

То, что на первый взгляд кажется очень сложным или бессмысленным, при расшифровке «кода» может оказаться проявлением довольно простых математических соотношений. Исследуя природу, физик нередко сталкивается с такими вещами, которые сначала кажутся ему чрезмерно сложными и даже случайными. Но в дальнейшем благодаря использованию надлежащего математического аппарата сложное явление может свестись к поразительно простой математике.

Лучший пример тому — история исследования движений планет Солнечной системы. То, что планеты движутся в небе сравнительно упорядоченно, известно каждому, кто хотя бы мельком интересовался астрономией. Однако при более тщательном изучении выясняется, что движения отдельных планет заметно различаются. Например, Марс, обычно движущийся на фоне неподвижных звезд с востока на запад, иногда поворачивает и некоторое время движется вспять — с запада на восток. Кроме того, внешние планеты движутся гораздо медленнее внутренних. При еще более детальном анализе обнаруживается множество других тонких особенностей.

Некогда пользовалась всеобщим признанием модель мира, созданная Клавдием Птолемеем (II в.), которая основывалась на предположении, что Земля покоится в центре мироздания, а планеты «прикреплены» к жестким концентрическим сферам, вращающимся с различными скоростями. Совершенствование методов наблюдения выявило более точные детали движения, для учета которых к первоначальным сферам птолемеевой системы пришлось добавить дополнительные, меньших размеров, вращающиеся вместе с большими сферами так, чтобы сочетание двух или большего числа вращений воспроизводило наблюдаемые движения планет. К тому времени, когда Коперник открыл (XVI в.) истинное строение Солнечной системы, модель Птолемея стала чрезвычайно запутанной и сложной.

Научная революция, вызванная работами Галилея и Ньютона — классический пример того, как невообразимое нагромождение фактов обретает изящную простоту при использовании более адекватной математической модели. Основное достижение Ньютона состояло в рассмотрении планет как движущихся в пространстве материальных тел, которые подчиняются физическим законам движения и закону всемирного тяготения, открытым самим Ньютоном. Благодаря этому Ньютону удалось описать размеры и форму планетных орбит, а также периоды обращения по ним планет. Результаты расчетов хорошо согласовались с данными



наблюдений. А самое главное заключается в том, что и законы движения Ньютона, и его закон всемирного тяготения даже по меркам средней школы математически очень просты. Но в совокупности они дали описание богатого и сложного разнообразия движений.

Приведенный пример иллюстрирует еще одну важную особенность физического мира. Меня часто спрашивают, почему мир так сложен, если законы физики столь просты. Ответ следует из правильного понимания того, что мы считаем физическим законом. Когда физик говорит о законе, он имеет в виду некоторое ограничение на поведение определенного класса систем. Например, простой закон гласит: все брошенные бейсбольные мячи описывают параболические траектории. Этот закон можно проверить, наблюдая полеты большого числа бейсбольных мячей. Но закон не утверждает, что все траектории одинаковы. Если бы все мячи летели по одинаковым траекториям, то бейсбол оказался бы скучной игрой. Одни параболы плоские и стелятся низко, другие — крутые и взмывают высоко. И хотя все эти траектории принадлежат к одному и тому же классу кривых — к параболам, существует бесконечное разнообразие форм параболических кривых, так что есть из чего выбрать.

Что же определяет конкретную параболическую траекторию, по которой летит данный бейсбольный мяч? Именно в выборе траектории и проявляется искусство бейсболиста, так как ее форма зависит от того, с какой скоростью и под каким углом к горизонту брошен мяч. Эти два дополнительных параметра, называемые «начальными условиями», и следует задать для однозначного выбора траектории.

Физический закон оказался бы бесполезным, если бы был настолько жестким, что допускал единственный вариант поведения. Это был бы не истинный закон, а всего лишь *описание* мира. Все богатство и сложность явлений реального мира может основываться на простых законах, поскольку существует бесконечное множество начальных условий, создающих разнообразие. Физические законы требуют, чтобы орбиты всех планет Солнечной системы были эллиптическими, но точная их форма и отношение длин большой и малой полуосей каждого эллипса из этих законов не следуют. Они определяются начальными условиями, которые нам неизвестны, так как зависят в первую очередь от условий формирования Солнечной системы. Те же законы описывают гиперболические траектории комет и даже сложные траектории космических кораблей. Таким образом, открытые Ньютоном простые математические законы служат основой поистине множества сложных явлений.

## Красота как путеводная нить к истине

Красота — понятие туманное, однако нет сомнений в том, что именно она служит источником вдохновения ученых. В некоторых случаях, когда дальнейший путь не ясен, именно математическая красота и изящество ведут ученых к истине. Физик интуитивно чувствует, что природа предпочитает красивые «решения» некрасивым. До сих пор это убеждение, несмотря на его субъективизм, служило надежным и могущественным спутником физиков.

Однажды в беседе с Эйнштейном Гейзенберг заметил:

Если природа приводит нас к математическим выражениям необычайно простым и красивым... которые ранее не встречались, то мы невольно воспринимаем их как «истинные» и считаем, что они открывают то или иное свойство природы.

Затем Гейзенберг пустился в рассуждения о «почти пугающей простоте и цельности соотношений, которые природа внезапно открывает перед нами», — эта тема волновала многих его современников. Поль Дирак, пойдя еще дальше, провозгласил: «Красота уравнений важнее, чем их согласие с экспериментом». Дирак имел в виду, что игра творческого воображения может привести к созданию теории, столь привлекательной, что физики отринут всякие сомнения в ее истинности, прежде чем теория будет подвергнута экспериментальной проверке, и не отвергнут ее даже столкнувшись с, казалось бы, противоречащими ей экспериментальными данными.

Ту же мысль проводит и популяризатор науки Ричард Моррис в своей замечательной книге «Разоблачение Вселенной»:

Между наукой и искусством существует множество параллелей, которые сразу же бросаются в глаза. Подобно художникам, каждый ученый имеет свой неповторимый стиль. Представления ученых о том, какой должна быть хорошая научная теория, удивительно схожи с аналогичными воззрениями представителей искусства... Корректной считается та теория, которая предположительно допускает экспериментальную проверку. Тем не менее в некоторых случаях научная интуиция способна предугадать правильность теории еще до проведения ее экспериментальной проверки. Эйнштейн (как и многие другие физики) верил в истинность специальной теории относительности, даже когда... эксперименты, казалось бы, противоречили ей.

Моррис рассказывает, как Эйнштейн реагировал на известие о том, что решающее предсказание его общей теории относительности получило подтверждение при астрономических наблюдениях. Эйнштейн отнесся к сообщению совершенно безучастно, и когда его спросили, как бы он отреагировал, если бы результаты противоречили его теории, ответил: «Мне было бы жалко Господа Бога, ведь теория-то правильная».

Объяснить людям, далеким от математики, что такое математическое изящество, трудно, но я все-таки попытаюсь. Взгляните на кривую, изображенную на рис. 6. Хотя она гладкая и не имеет

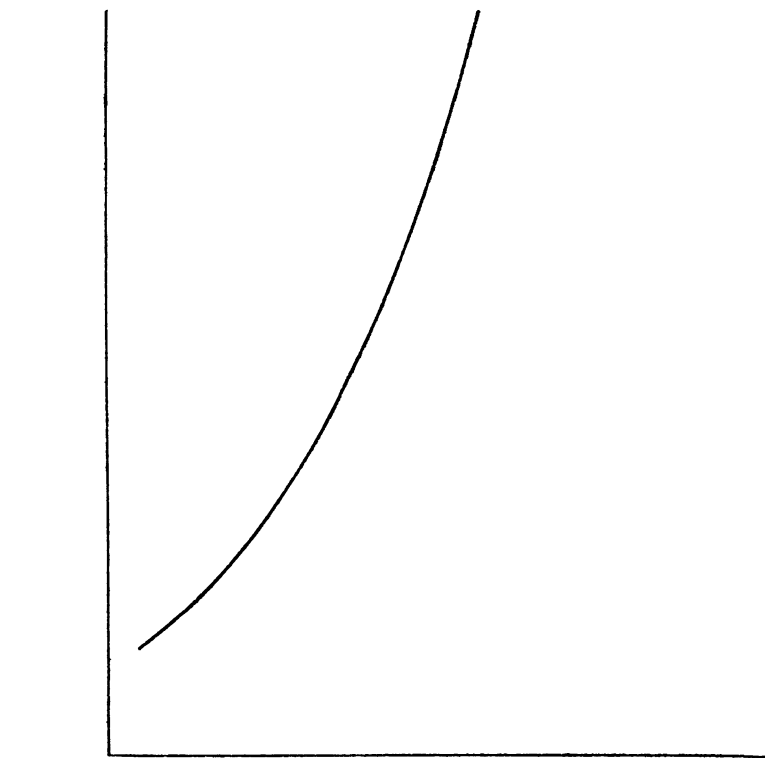


Рис. 6. Экспонента. Форма этой кривой отражает важные математические особенности, характерные для широкого круга физических явлений. Представленная в виде графика экспонента может, например, описывать неограниченный рост народонаселения.

никаких особенностей, кривую отнюдь не сразу поставишь в соответствие чему-либо, известному из повседневной жизни. Если бы вас попросили запомнить кривую и при случае *точно* воспроизвести ее, задача оказалась бы безнадежной. Вы легко могли бы воспроизвести, скажем, окружность или какую-нибудь более сложную, но легко узнаваемую кривую, например эллипс (который представляет собой не что иное, как окружность, рассматриваемую под некоторым углом); однако кривая на рис. 6 обладает более сложной структурой, чем окружность: и наклон касательной к ней, и кривизна кривой изменяются вдоль нее по определенному закону, который тем не менее трудно установить точно.

Что же касается математика, то он без труда опознает эту кривую, и ему известно, как «закодировать» все ее свойства, чтобы

легко вспомнить их и воспроизвести с любой степенью точности, если это понадобится. В действительности эта кривая представляет график так называемой экспоненциальной функции, или экспоненты, которая математически записывается как  $e^x$  и часто встречается в самых различных задачах. Математику хорошо известно, что эту функцию можно вывести из формулы  $(1 + x/n)^n$  в пределе, когда  $n$  становится бесконечно большим, и поэтому, вооружившись микрокалькулятором, он может вычислить координаты каждой точки на графике с любой требуемой точностью.

«Экспоненциальная функция — одно из самых изящных соотношений, известных человеку», — утверждает математик. Почему?

Предположим, что нас интересует наклон кривой в каждой ее точке. Сначала кривая идет очень полого, а по мере продвижения слева направо становится все круче. Построим график, но не самой экспоненциальной функции, а угла наклона касательной к ней. Как он выглядит? Оказывается, совпадает с графиком самой экспоненциальной функции. Экспонента — это такая функция, значение которой в любой точке совпадает с углом наклона касательной к ней в этой точке (или по крайней мере пропорционально ему). Именно поэтому экспоненциальная функция играет столь важную роль при описании простых форм роста, например, неограниченного размножения популяции, градиент (мера скорости роста) которой пропорционален численности самой популяции. В некоторых районах земного шара эта зависимость примерно справедлива и применительно к росту народонаселения.

В экспоненциальной кривой можно обнаружить скрытую красоту и другого рода. Взгляните на кривую, изображенную на рис. 7. Она напоминает нам нечто знакомое: волну. В математике ее называют синусоидой и обозначают  $\sin x$ ; эту кривую можно задать и алгебраически, вычисляя по формуле.

На первый взгляд синусоида имеет весьма отдаленное сходство с экспонентой. Синусоида периодична: подъемы на графике регулярно чередуются со спадами, тогда как экспоненциальная кривая непрерывно и все быстрее возрастает. Связь между этими двумя кривыми обнаружится, если начертить график градиента синусоиды: мы получим другую синусоиду, смещенную на четверть длины волны вправо относительно первой. Эта кривая называется косинусоидой. Построив график угла наклона касательной косинусоиды, мы сдвинем последнюю еще на четверть длины волны вправо и получим кривую, совпадающую с первой синусоидой, только перевернутой. Прделав такую операцию еще два раза, мы вернемся к исходной кривой. Таким образом, экспонента и синусоида (или косинусоида) обладают одним общим важным свойством симметрии, устанавливающим связь между

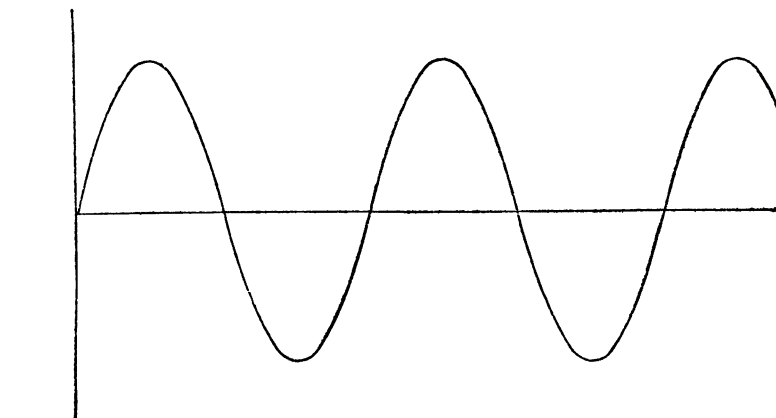


Рис. 7. Синусоида. Характерной форме этой кривой соответствуют математические свойства, тесно связанные со свойствами экспоненциальной кривой, изображенной на рис. 6. Синусоида описывает широкий круг физических явлений, включая волновое движение и периодические колебания.

формой самой кривой и формой кривой, описывающей угол наклона касательной к ней (градиент).

Эта глубокая связь между  $e^x$  и  $\sin x$  полностью выявляется в теории комплексных чисел, где обычная система чисел обобщается и включает квадратные корни из отрицательных чисел. Оказывается, что когда  $x$  — квадратный корень из отрицательного числа,  $e^x$  становится смесью двух волн — синусоидальной и косинусоидальной. Теперь уже не приходится удивляться, что физические системы, поведение которых описывается экспонентой, способны проявлять и периодическое, «синусоидальное», поведение. Примером такой системы может служить так называемый гармонический осциллятор, скажем, маятник или просто масса, прикрепленная к пружине. Если массу слегка отклонить от состояния равновесия, то она начнет колебаться взад-вперед в результате периодического воздействия пружины. Положение массы в зависимости от времени будет изменяться по синусоиде, изображенной на рис. 7. Такое движение массы определяется законом изменения силы натяжения пружины. Величина этой силы прямо пропорциональна смещению массы из положения равновесия, а направление таково, что она пытается вернуть массу в положение равновесия: если пружина растянута, то сила создает притяжение, если пружина сжата — отталкивание.

Предположим теперь, что сила, изменяющаяся по тому же закону, была бы направлена не к положению равновесия, а от него. Поведение системы в этом случае оказалось бы совершенно другим. Отклонение массы от равновесия нарастало бы по экспо-

ненте, масса разгонялась бы все быстрее в одном и том же направлении. С пружинами такое невозможно, а в других системах случается. Иногда система в одних условиях колеблется по синусоидальному закону, а в других срывается в экспоненциальный режим.

Умение находить с помощью математического анализа скрытые соотношения и симметрии, подобные описанным выше, характеризует профессиональное мастерство физиков. Нередко более тонкие симметрии удается обнаружить, только коренным образом изменив математическое описание. Так произошло при переходе от птолемеевой космологии к ньютоновской механике, гораздо позднее — и с самой ньютоновской механикой.

В XIX в. законы Ньютона были математически полностью переформулированы французским физиком Жозефом Луи Лагранжем и ирландским физиком Уильямом Роуэном Гамильтоном. И тот и другой видоизменили математическое описание с тем, чтобы подчеркнуть простоту и изящество, заключенные в механике Ньютона. В работе Гамильтона, в частности, неожиданно оказался предвестник квантовой революции, которой предстояло опрокинуть всю классическую физику. Но до этого было еще далеко.

Основная проблема механики состоит в том, чтобы понять, описать и предсказать траектории (пути), по которым движутся материальные частицы под воздействием приложенных сил. Эти траектории, очевидно, имеют самый различный вид в зависимости от характера действующих сил. Задача о путях распространения в прозрачной среде световых лучей на первый взгляд кажется другой. Свет не подчиняется законам механики Ньютона, хотя хорошо известно, что при прохождении через среду с изменяющейся плотностью световые лучи искривляются. Например, нам кажется, что погруженная в пруд палка имеет излом в том месте, где входит в воду. Дело в том, что световые волны замедляются в плотных средах, и вторичные волны, исходящие из различных точек волнового фронта, встречая на своем пути участки среды с различной плотностью, образно говоря, «сбиваются с шага»: одни идут медленнее, другие быстрее. В большинстве случаев световой луч в конечном счете распространяется по пути, на котором от точки к точке затрачивается наименьшее время. Таким образом, поведение светового луча можно понять на основе теории волн, которые распространяются со скоростью, изменяющейся в зависимости от свойств среды, через которую они проходят.

Изменив математическую формулировку механики Ньютона, Гамильтон заметил, что наиболее сжатое выражение законов движения содержится в математическом соотношении, тождественном принципу минимального времени распространения световых волн. Грубо говоря, частицы стремятся переходить от точки к точке по наиболее легкому пути, т. е. с наименьшим сопротивлением,

который в большинстве случаев оказывается и кратчайшим, т. е. требующим наименьших затрат времени. Тем самым было установлено, что материальные частицы и световые волны, несмотря на различие их характера и поведения, с математической точки зрения распространяются более или менее одинаковым образом.

Этот поразительный результат, полученный исключительно при попытке записать законы механики в новой математической форме, обнаруживает глубокую гармонию в природе, которая наводит на мысль, что в природе должны действовать и другие скрытые принципы. Взглянув ретроспективно, мы видим теперь, в чем состоят эти принципы. Тесная взаимосвязь между движением частиц и распространением световых волн указывает на то, что с материальными частицами могут связываться и некоторые волновые свойства. «Волны материи», о которых мы упоминали в гл. 2 и 3, послужили отправным пунктом развития квантовой теории. Таким образом, математическая оптика Гамильтона, которая первоначально казалась лишь жонглированием математическими символами, предстает перед нами в новом свете — как провозвестник новой волновой теории материи.

## Симметрия

Понятие симметрии хорошо знакомо и играет важную роль в повседневной жизни. Многим творениям человеческих рук умышленно придается симметричная форма как из эстетических, так и практических соображений. Мяч симметричен, так как выглядит одинаково, как бы его ни поворачивали вокруг центра. Круглая печная труба сохраняет свой внешний вид при более ограниченном наборе вращений — поворотах вокруг вертикальной оси, проходящей через центр поперечного сечения.

В природе симметрия также встречается в изобилии. Снежинка обладает удивительнейшей гексагональной симметрией. Кристаллы также имеют характерные геометрические формы — вспомним хотя бы кубическую форму кристаллов соли, отражающую регулярность атомной структуры. Падающая дождевая капля имеет форму идеальной сферы и, замерзая, превращается в ледяной шарик — градину.

Другой вид симметрии, часто наблюдаемый в природе и в созданных человеком вещах, — так называемая зеркальная симметрия. Человеческое тело обладает (приближенно) зеркальной симметрией относительно вертикальной оси. В зеркале правая и левая руки и другие части тела меняются местами, но видимое нами зеркальное отражение узнаваемо. Многие архитектурные сооружения, например арки или соборы, обладают зеркальной симметрией.

Между геометрической симметрией и тем, что в физике принято называть законами сохранения, существует тесная связь. Законы сохранения говорят нам, что некоторые величины не изменяются со временем. В американском футболе число игроков на поле сохраняется. Игроки могут выходить на поле и уходить с поля, но общее число их остается постоянным. В физике существует закон, согласно которому в любой изолированной системе энергия, импульс и момент импульса должны сохраняться. Это отнюдь не означает, что изолированная система не может изменяться, — просто любое изменение, происходящее в системе, должно быть таким, чтобы три названные величины оставались постоянными. В бильярде, где из-за гладкой текстуры поверхности бильярдного стола шары приближенно можно считать механически изолированными, законы сохранения энергии и импульса определяют направления движения и скорости шаров.

Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса вытекают непосредственно из законов движения Ньютона, но более поздняя формулировка этих законов, данная Лагранжем и Гамильтоном, позволила гораздо четче выявить их значение. Механика Лагранжа и Гамильтона обнажила глубокую и мощную связь между сохранением той или иной величины и соответствующей симметрией рассматриваемой системы. Например, если система симметрична относительно вращений, то из уравнений Гамильтона и Лагранжа следует, что сохраняется момент импульса. Хорошей иллюстрацией сказанному может служить сила тяготения Солнца. Хотя сферическое Солнце вращается вокруг своего центра, это никак не сказывается на движении Земли по орбите. Гравитационное поле Солнца симметрично и поэтому не изменяется при простом вращении. Этой геометрической симметрии соответствует физический результат: момент импульса планеты, движущейся по орбите, всегда постоянен. (Этот факт был открыт еще в XVII в. Кеплером, который, однако, не оценил его истинный смысл.) Аналогичные соображения применимы к импульсу и энергии.

Симметрии, соответствующие вращению или отражению, наглядны и радуют глаз, но они не исчерпывают весь запас симметрий, существующих в природе. Исследуя математическое описание той или иной физической системы, физики открывают время от времени новые и неожиданные симметрии. Симметрии таинственно и тонко «запрятаны» в математическом аппарате и совсем не очевидны тому, кто наблюдает саму физическую систему. Манипулируя символами в уравнениях, физики пытаются раскрыть весь набор симметрий, в том числе и таких, которые не видны «невооруженным глазом».

Классический пример такого рода, возникший на рубеже нашего столетия, относится к законам электромагнитного поля.



Несколькими десятилетиями раньше Майкл Фарадей и другие физики установили, что электричество и магнетизм тесно связаны между собой и что одно порождает другое. Действие электрических и магнитных сил удобнее всего было описать, пользуясь понятием *поля* — невидимого воздействия, создаваемого материей, простирающегося далеко в пространство и способного влиять на электрически заряженные частицы, электрические токи и магниты. Действие такого поля можно наблюдать, если попытаться сблизить два магнита: не соприкасаясь друг с другом, они будут отталкиваться или притягиваться.

Позднее, в 50-х годах XIX в., Джеймс Клерк Максвелл, опираясь на эти факты, разработал теорию, связав электрическое и магнитное поля единой системой уравнений. Сначала Максвелл обнаружил, что эти уравнения «несбалансированны»: члены, относящиеся к электрическому и магнитному полям, входят в них не вполне симметрично. Чтобы придать уравнениям более красивый и симметричный вид, он ввел дополнительный член. Его можно было бы интерпретировать как не замеченный ранее эффект — порождение магнетизма переменным электрическим полем, но оказалось, что такой эффект действительно существует. Природа, очевидно, одобрила эстетический вкус Максвелла!

Введение дополнительного члена в уравнения Максвелла повлекло за собой чрезвычайно глубокие последствия. Во-первых, это позволило соединить электрическое и магнитное поля в единое электромагнитное поле. Уравнения Максвелла можно считать первой единой теорией поля, первым шагом на долгом пути к суперсиле. Они показали, что две силы природы, кажущиеся на первый взгляд совершенно различными, в действительности могут оказаться двумя различными проявлениями объединяющей их силы.

Во-вторых, среди решений уравнения Максвелла обнаружались неожиданные, но весьма многообещающие. Выяснилось, что уравнения Максвелла удовлетворяют различные синусоидальные функции (опять симметрия!), которые, как уже говорилось ранее в этой главе, описывают периодические колебания, или волны. Эти *электромагнитные волны*, заключил Максвелл, самостоятельно распространяются в поле, т. е. в том, что кажется пустым пространством. Из своих уравнений он вывел формулу, выражающую скорость электромагнитных волн через электрические и магнитные величины. Подставляя численные значения, Максвелл получил, что скорость электромагнитных волн составляет около 300 000 км/с, т. е. совпадает со скоростью света. Отсюда последовал неизбежный вывод: свет должен представлять собой электромагнитную волну. Он действительно может распространяться в пустом пространстве, именно поэтому мы и видим Солнце.

Пойдя дальше, Максвелл предсказал также существование электромагнитных волн другой длины, и через несколько лет его предсказание подтвердилось: Генрих Герц открыл в лабораторных условиях радиоволны. Сегодня мы знаем, что гамма-, рентгеновское, инфракрасное, ультрафиолетовое и СВЧ-излучения также представляют собой электромагнитные волны. Небольшая добавка, внесенная Максвеллом в уравнения (носящие ныне его имя) из соображений симметрии, принесла большие результаты.

Открытие электромагнитных волн имело далеко идущие последствия, приведя к появлению радиотехники и в конечном счете к современной революции в электронике. Это великолепный пример, наглядно демонстрирующий не только гигантские возможности математики в описании мира и расширении нашего знания о нем, но и роль симметрии и красоты как путеводного принципа. Но оценить полностью все следствия, вытекающие из симметрии уравнений Максвелла, удалось лишь через пятьдесят лет.

На рубеже XX в. Анри Пуанкаре и Хендрик Лоренц исследовали математическую структуру уравнений Максвелла. Их особенно интересовали симметрии, скрытые в математических выражениях, — симметрии, которые тогда еще не были известны. Оказалось, что знаменитый «дополнительный член», введенный Максвеллом в уравнения для восстановления равноправия электрического и магнитного полей, соответствует электромагнитному полю, обладающему богатой, но тонкой симметрией, которая выявляется лишь при тщательном математическом анализе. Повидимому, только Эйнштейн с его сверхъестественной интуицией мог предвидеть из физических соображений существование подобной симметрии.

Симметрия Лоренца—Пуанкаре аналогична по своему духу таким геометрическим симметриям, как вращения и отражения, но отличается от них в одном важном отношении: никому до этого не приходило в голову физически смешивать пространство и время. Всегда считалось, что пространство — это пространство, а время — это время. То, что в симметрию Лоренца—Пуанкаре входят оба компонента этой пары, было странно и неожиданно.

По существу новую симметрию можно рассматривать наподобие вращения, но не только в одном пространстве. Это вращение затрагивает и время. Если к трем пространственным измерениям добавить одно временное, то получится четырехмерное *пространство-время*. Симметрия Лоренца—Пуанкаре — это своего рода вращение в пространстве-времени. В результате такого вращения часть пространственного интервала проектируется на время и наоборот. То, что уравнения Максвелла симметричны относительно

но операции, связывающей воедино пространство и время, наводит на размышления.

Понадобился гений Эйнштейна, чтобы полностью осознать все следствия такой симметрии. Пространство и время не существуют независимо друг от друга, они неразрывно связаны. Хитроумные «вращения» Лоренца и Пуанкаре — не просто абстрактная математика, они *могут происходить* в реальном мире, осуществляясь через *движение*. Ключ к причудливым пространственно-временным «проекциям», или преобразованиям, лежит в скорости света и других электромагнитных волн, и величина этой скорости также следует непосредственно из уравнений Максвелла. Таким образом, существует глубокая взаимосвязь между распространением электромагнитных волн и структурой пространства и времени. Когда наблюдатель движется со скоростью, близкой к скорости света, пространство и время сильно изменяются, причем симметрично, и это отражено в математических соотношениях, полученных Лоренцем и Пуанкаре. Именно такой необычный эффект, столь противоречащий здравому смыслу, был описан в гл. 2. Постигание столь тонкой и ранее не известной симметрии природы послужило толчком к созданию теории относительности Эйнштейна, а та в свою очередь ознаменовала рождение новой физики, потрясшей научный мир и изменившей лицо двадцатого столетия.

### Более абстрактные симметрии

Урок, преподнесенный работами Лоренца и Пуанкаре, состоит в том, что математическое исследование, в особенности на основе анализа симметрии, может стать источником выдающихся достижений в физике. Даже если заложенные в математическом описании симметрии трудно или невозможно представить себе наглядно физически, они могут указать путь к выявлению новых фундаментальных принципов природы. Поиск новых симметрий стал главным средством, помогающим физике в наши дни продвигаться к пониманию мира. Как мы увидим далее, суперсила — это высшее проявление симметрии в природе.

Все симметрии, о которых говорилось до сих пор, являются симметриями пространства или пространства-времени. Но понятия симметрии можно расширить, включив в него более абстрактные понятия. Как уже отмечалось, между симметрией и законами сохранения существует тесная связь. Один из наиболее твердо установленных законов сохранения — закон сохранения электрического заряда. Заряд может быть положительным и отрицательным, и закон сохранения заряда утверждает, что сумма положительного и отрицательного зарядов остается неизменной величиной. Если положительный заряд встречается с равным по абсолютной величине отрицательным зарядом, они нейтрализуют

друг друга, создавая в сумме нулевой заряд. Аналогично положительный заряд может возникать, если одновременно возникает равный по абсолютной величине отрицательный заряд. Но возникновение или исчезновение результирующего заряда абсолютно исключено.

Но коль скоро электрический заряд сохраняется, естественно возникает вопрос о том, какова природа симметрии, связанной с этим законом сохранения. Тщетно стали бы мы искать геометрическую симметрию, лежащую в основе закона сохранения электрического заряда. Но в природе далеко не все симметрии имеют геометрический характер. Рассмотрим, например, явление инфляции в экономике. Когда реальная стоимость доллара падает, падает и благосостояние лиц с фиксированным доходом. Но если чей-то доход следует индексу цен, то реальная покупательная способность этого лица не будет зависеть от стоимости доллара. Можно сказать, что доход, «привязанный» к уровню цен, симметричен относительно инфляционных процессов.

В физике также существует много симметрий негеометрического характера. Одна из них связана с работой, совершаемой при подъеме тела. Затрачиваемая энергия зависит от разности высот, которую требуется преодолеть при этом (но не зависит от траектории подъема). Однако энергия не зависит от абсолютной высоты: безразлично, измеряются высоты от уровня моря или от уровня суши, — важна только разность высот. Следовательно, существует симметрия относительно выбора начала отсчета высот.

Аналогичная симметрия существует и для электрических полей. Роль высоты в этом случае играет *напряжение* (электрический потенциал). Если электрический заряд движется в электрическом поле от одной точки к другой, то затрачиваемая энергия зависит только от *разности* потенциалов между конечной и начальной точками. Если к системе приложить дополнительное постоянное напряжение, то энергия, затрачиваемая на перемещение электрического заряда в поле, не изменится. Это еще одна скрытая симметрия уравнений Максвелла для электромагнитного поля!

Все три приведенных выше примера могут служить иллюстрациями того, что физики называют *калибровочными симметриями*. Все три указанные симметрии включают в себя «калибровку», т. е. изменение масштаба, соответственно — денег, высоты и напряжения. Все три симметрии — абстрактные в том смысле, что они по своему характеру не геометрические. Мы не сможем, взглянув на соответствующие явления, увидеть симметрию. Однако все три скрытые симметрии являются важными характеристиками рассматриваемой системы. Именно калибровочная симметрия напряжений обеспечивает сохранение электрического заряда.

## Нуклоны теряют свою индивидуальность

Последний пример абстрактной симметрии, которому отводится главная роль в последующих главах, демонстрирует сильное ядерное взаимодействие между протонами и нейтронами. Эксперименты показывают, что величина и другие свойства этого взаимодействия не зависят от того, о каких частицах идет речь — протонах или нейтронах. Действительно, протоны и нейтроны удивительно похожи друг на друга. Их массы отличаются всего лишь на 0,1 %. У них одинаковые спины и на них одинаково действуют ядерные силы. Единственно, чем они отличаются, — это наличием у протона электрического заряда, но поскольку при ядерных взаимодействиях электрический заряд не имеет значения, он служит лишь меткой протона. Заряд позволяет распознавать протон и отличать его от нейтрона, но никак не сказывается на ядерном взаимодействии, связывающем протоны и нейтроны. Если протон лишит электрического заряда, то он утратит свою индивидуальность.

Тесное сходство протона и нейтрона наводит на мысль, что здесь существует симметрия. Действительно, на ядерных процессах никак не отразится, если бы мы каким-то образом смогли заменить все протоны нейтронами и наоборот. Можно пойти и дальше. Представим себе, что у нас есть волшебная ручка с указателем, поворачивая которую, мы можем превращать протоны в нейтроны. Предположим, когда указатель находится в верхнем положении, все рассматриваемые частицы — протоны; если же ручку повернуть на пол-оборота, так чтобы указатель был направлен вниз, все протоны превратятся в нейтроны (рис. 8). Разумеется,

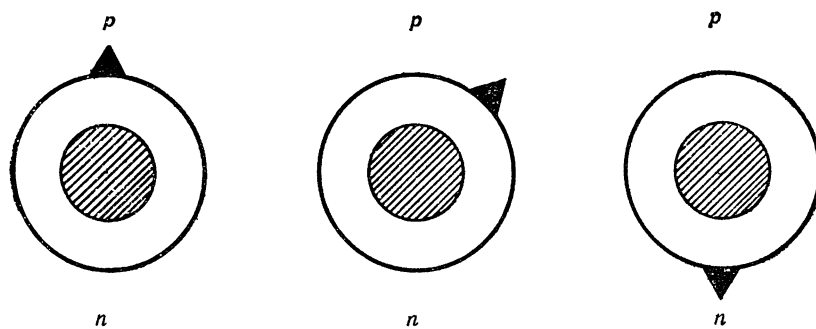


Рис. 8. Волшебная ручка. Ее вращение позволяет постепенно изменять природу ядерных частиц. Когда указатель ручки находится в верхнем положении, частицы на 100 % представляют собой протоны (p). При повороте ручки частицы переходят в смешанное состояние — отчасти протон, отчасти нейтрон. Когда же указатель направлен вниз, все протоны превращаются в нейтроны (n). Описанный процесс, несмотря на всю его условность, отражает фундаментальную симметрию ядерных сил.

это чисто мысленный эксперимент, так как в действительности мы не можем превращать протоны в нейтроны, а нейтроны в протоны. Эта абстрактная модель позволяет нам обнаружить абстрактную симметрию, но она очень полезна, поскольку помогает понять природу сильного взаимодействия.

Предположим теперь, что превращение протона в нейтрон происходит не скачком, а плавно по мере поворота волшебной ручки. Когда указатель находится в промежуточном положении, частицы не являются в чистом виде ни протонами, ни нейтронами, а представляют собой своего рода гибрид того и другого. По мере удаления указателя от положения, соответствующего на циферблате 12 ч, сродство с протоном у частиц убывает, а сродство с нейтроном растет. Возможно, не так-то просто представить себе, что такое сродство с протоном и с нейтроном или гибрид протона и нейтрона. Можно предложить другую интерпретацию промежуточного положения указателя: при наблюдении данная частица оказывается то протоном, то нейтроном. Частица утрачивает свою индивидуальность и хаотически переходит из одного состояния (например, «протон») в другое («нейтрон»). Когда указатель стоит в положении, близком к «12 ч», частица в основном находится в состоянии «протон», и вероятность обнаружить при ее наблюдении протон близка к единице. По мере того как указатель приближается к «6 ч», вероятность обнаружить при наблюдении частицы нейтрон все возрастает. Когда указатель направлен строго вниз, вероятность обнаружить протон падает до нуля, и все 100 % приходятся на нейтрон.

Если волшебная ручка снабжена двумя указателями, один из которых смотрит вверх, а другой — вниз (рис. 9), то вращая ручку, мы будем одновременно наблюдать превращение протонов в нейтроны, а нейтронов в протоны. Положение ручки, изображенное на рис. 9, а, соответствует нынешнему состоянию Вселенной. При повороте ручки (рис. 9, б) протоны начинают превращаться в нейтроны, а нейтроны — в протоны, и степень сродства с нейтронами у протонов равна степени сродства с протонами нейтронов. Когда же ручка совершит пол-оборота, все протоны превратятся в нейтроны, а нейтроны — в протоны.

Ручка с указателями — это не более чем удобный прием, позволяющий наглядно проиллюстрировать свойство симметрии ядерных сил. Применительно к рассматриваемой модели можно сказать, что в сущности ядерные силы *не зависят от положения указателя*. Направлен ли он вверх, вниз, вбок или под любым промежуточным углом, ядерные силы останутся неизменными. Это свойство получило довольно громоздкое название — симметрия изотопического спина, или изотопическая симметрия. Слово «изотопический» здесь связано с тем, что ядра, отличающиеся только

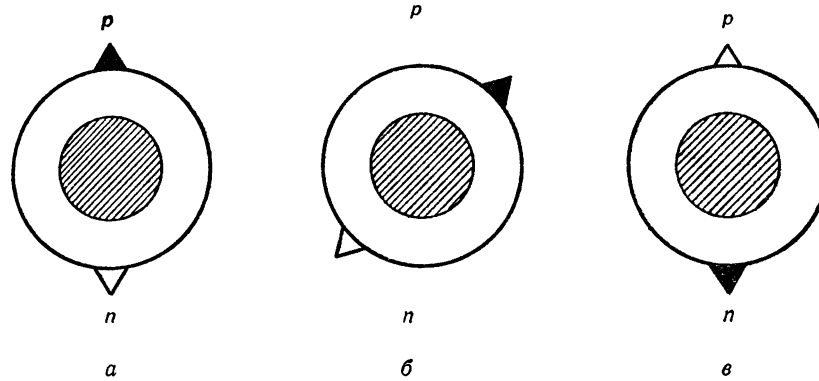


Рис. 9. Волшебная ручка с двумя указателями позволяет описать взаимное превращение протонов и нейтронов. Черный указатель действует, как и на рис. 8, а светлый — описывает превращение всех нейтронов в протоны. Случай *a* соответствует реально наблюдаемому соотношению числа протонов и нейтронов. В случае *б* протоны частично переходят в нейтроны, а нейтроны — в равной степени в протоны. Когда ручка перейдет в положение *в*, все исходные протоны превратятся в нейтроны, а все нейтроны — в протоны. Вследствие фундаментальной симметрии ядерные силы не зависят от положения волшебной ручки.

числом нейтронов, называются изотопами, а свойства симметрии, о которой идет речь, аналогичны свойствам собственного спина, упоминавшегося в гл. 2.

### Физика и фантазия

Понятие изотопического спина — великолепный пример роли абстрактного мышления в физике. Как мы увидим, введение этого понятия имело глубокие последствия. В реальном мире нет «волшебных ручек с указателями», нет и устройств для измерения сродства с протонами у нейтронов и с нейтронами у протонов. Идея смешения индивидуальности протонов и нейтронов — плод чисто теоретической мысли, своего рода фантазия. Но логически она вполне допустима. Мы можем мысленно представить себе подобное, даже если в реальном мире это исключено. То, что воображаемый процесс может иметь самое непосредственное отношение к физике реального мира, возможно, покажется удивительным, но таким приемом очень эффективно пользуется современный физик. Свою науку он рассматривает как модель, описывающую реальный мир наблюдений. Эта модель может включать множество дополнительных особенностей, которые, хотя сами по себе и не отражают реального опыта, играют важную роль в теории.

Почему физикам приходится придумывать чисто умозрительные, абстрактные понятия для моделирования реального мира?

Разве нельзя ограничиться исключительно наблюдаемыми величинами? Ведь в конце концов теорию можно проверить только при конкретном наблюдении, и умозрительные особенности модели никогда не входят явно в предсказания теории, относящиеся к реальным наблюдениям. Так стоит ли вообще прибегать к чистому вымыслу?

Включение умозрительных понятий в физические теории — обычная практика, которую труднее всего объяснить неспециалисту. Разумеется, когда какой-нибудь конкретный «вымысел», например изотопическая симметрия, приносит теории блестящий успех, физик может ответить: «Я воспользовался этой идеей потому, что она работает!».

Поразительно, каким же образом физик догадывается, какую именно абстракцию в духе кэрролловской «Алисы в Стране Чудес» следует ввести в теорию? Поскольку речь идет о чисто воображаемых понятиях, скептику может показаться, что годится любой вымысел: «Зачем выбирать то, что действительно встречается во внешнем мире, если можно придумать что угодно?». Диапазон выбора ничем не ограничен. Но как выбрать «то, что нужно?»

Дойдя в беседе с неспециалистом до этого момента, физик обычно начинает прибегать к таким словам, как красота, математическое изящество и симметрия. Хотя включение умозрительных, абстрактных идей, например калибровочной симметрии, логически не обязательно для построения удачной теории (в принципе все теории можно было бы формулировать, целиком основываясь на наблюдаемых величинах), использование абстрактных понятий позволяет иногда значительно упростить теорию, сделав ее более привлекательной.

Взять хотя бы представление о поле, оказавшееся столь результативным для физики и техники. Оно было введено Фарадеем и Максвеллом как некая абстракция. Мы не можем непосредственно ни увидеть электромагнитное поле, ни прикоснуться к нему. О том, что оно существует, мы знаем только по его действию на электрические заряды. Вместе с тем, так как поле порождается только другими электрическими зарядами, в действительности мы имеем дело с взаимодействием электрических зарядов. Но коль скоро наблюдаемы именно заряды, то зачем вообще вводить поле? Почему бы нам не говорить просто о том, каким образом заряды взаимодействуют между собой через пространство, и не сформулировать все уравнения теории электричества, пользуясь только понятием зарядов?

Ничего невозможного здесь действительно нет. Различие состоит лишь в том, что при этом получится громоздкая и сложная теория. Строго говоря, эти качества, по-видимому, невозможно оценить, но физик немедленно распознает их. Теория поля гораздо изящнее. Ее математический аппарат более естествен,



гармоничен, взаимосвязан и более экономичен. И дает *больше пищи для размышлений*.

Последнее обстоятельство очень важно. Изящная, продуманная в деталях, абстрактная теория часто подсказывает новые пути развития физики, которые просто невозможно было бы увидеть, придерживаясь моделей, основанных исключительно на конкретных наблюдаемых величинах. Например, квантовая теория поля, столь важная для суперсилы и ряда последних достижений в области фундаментальных исследований, не смогла бы возникнуть, не получи понятие поля такого широкого распространения в физике.

Когда абстрактное понятие оказывается столь эффективным, что становится достоянием широких кругов неспециалистов, различие между реальным и умозрительным постепенно исчезает. Понятие, возникшее в воображении физика, становится привычным настолько, что как бы обретает реальность. Именно так произошло с энергией. Понятие энергии первоначально выглядело в физике абстрактной идеей. Популярность она обрела благодаря закону сохранения, согласно которому энергия не возникает из ничего и не уничтожается. Но что такое энергия? Разве можно ее видеть или осязать?

Когда груз поднимается над землей, совершается определенная работа. Мы говорим, что при совершении этой работы затрачивается энергия, но закон сохранения энергии утверждает, что энергия не исчезает бесследно, а только переходит в другую форму. Мы видим, как напрягаются мышцы человека, поднимающего тяжесть. Можно считать, что мы действительно наблюдаем энергию в действии, когда видим искаженные от напряжения черты лица и вздувшиеся бицепсы. Но вот вес поднят и спокойно лежит на платформе. Куда же девалась энергия? Можно ли по-прежнему видеть ее?

Физик скажет, что энергия *запасена* грузом, так как он находится теперь на некоторой высоте. В таком ответе скрыто представление о потенциальной энергии. Энергия в этом случае хотя и невидима, но может легко высвободиться — стоит выбить опору из-под груза, как он тотчас рухнет вниз. Звук от удара груза о землю унесет часть энергии, высвободившейся при падении груза.

Итак, энергия — умозрительное, абстрактное понятие, но настолько вошедшее в наш обыденный лексикон, что мы приписываем ему реальное существование. «У меня не хватит энергии вскопать сад», — утверждение такого рода не вызовет недоуменных взглядов. Никто не спросит у вас, какого цвета ваша энергия, не посоветует заполнить ею сосуд, чтобы измерить ее объем. Принято считать, что каждый обладает энергией, точно так же, как у каждого есть кожа и кости.

Энергия — одно из наиболее устойчивых абстрактных понятий в физике. Оно необычайно упрощает описание широкого круга физических процессов. Закон сохранения энергии охватывает огромное множество экспериментальных фактов, которые, не будь понятия энергии, пришлось бы рассматривать по отдельности. Понятие энергии позволяет нам связать воедино многие идеи и поэтому не может не быть красивым.

В этом же кроется его привлекательность и полезность. Природа *красива*. Мы не знаем, почему, но опыт учит нас, что красота влечет за собой полезность. Эффективные теории всегда красивы. Но красивы они *не потому*, что эффективны, а потому, что наделены внутренней симметрией и экономичны с точки зрения математики. Красота в физике — представление, включающее в себя профессиональную интуицию, и объяснить суть его неспециалисту трудно, так как оно наилучшим образом выражается на языке, не знакомом непосвященному, — на языке математики. Но для того, кто владеет этим языком, красота теории столь же очевидна, как красота поэзии.

Сказанное возвращает меня к тому, с чего я начал. Математика — это язык, язык природы. Не зная языка, вы не можете понять красоту поэзии. Всегда найдутся скептики, которые скажут: «Что это за загадочная математическая красота, о которой вы толкуете? Мы не усматриваем ничего красивого в мешанине символов. Вы, физики, просто занимаетесь самообманом». Тем, кто так думает, я хотел бы ответить, сравнив математику с музыкой. Невозможно объяснить красоту симфонии тому, кто слышал лишь отдельные музыкальные звуки. Но кто станет отрицать, что в симфонии скрыта подлинная красота, хотя и отвлеченная, не поддающаяся строгому определению? Аналогичным образом обстоит дело и с математической красотой. Как объяснить восхищение, которое вызывают у физика уравнения Максвелла, их неотразимую, исполненную глубокого смысла привлекательность тому, чье знакомство с математикой ограничивается знанием натуральных чисел? И тем не менее эстетическое достоинство — качество вполне определенное. Физики, обладающие развитым математическим вкусом, как и их собратья-композиторы, создают более совершенные теории, чем обыватели.

Одна из величайших трагедий нашего общества состоит в том, что в силу страха перед премудростью, плохого преподавания или просто без всяких причин поэзия математики и музыка природы скрыты от большинства людей. Великолепные перспективы, которые открывает математика, недоступны для них. Они могут восхищаться ароматом розы или буйством красок заката, но ощутить всю полноту эстетического переживания им, увы, не дано.

## Четыре взаимодействия

---

### Источник всех изменений

Едва начав размышлять над окружающим миром, человек осознал, что этот мир изменчив. Он преисполнен активности — движется Солнце, дует ветер, парят птицы, струятся водные потоки. Еще в древности человек заметил, что происходит смена времен года, стареют люди, изнашиваются орудия труда.

Но какая причина вызывает все эти изменения и движение? Одни объекты, такие, как живые существа, содержат источник движения внутри себя, другим, подобным камням, стрелам, топорам, чтобы прийти в движение, требуется внешнее воздействие. Сначала между движением тела в пространстве и изменениями более общего характера не проводилось четкого различия. Точные понятия скорости и ускорения еще не были сформулированы. Наши далекие предки, безусловно, размышляли о силах, сотворивших мир и вызывающих его изменение, но в их представлении это были силы магического свойства, не отделимые от веры в богов и злых духов, правящих миром.

Древнегреческие философы предприняли более систематическое изучение процессов изменения и движения, но так и не смогли до конца разобраться в причинах, порождающих то и другое. Аристотель считал, что ключом к пониманию движения служит понятие сопротивления. Он заметил, что в разреженной среде, например в воздухе, тело движется свободнее и, следовательно, быстрее, чем в плотной среде, скажем в воде; в обоих случаях для преодоления сопротивления среды необходима движущая сила. Аристотель отверг идею атомистов о частицах, свободно движущихся в пустоте, ибо пустота, лишенная субстанции, не могла бы оказывать сопротивление движению. Поэтому частицы в пустоте должны были бы двигаться с бесконечной скоростью, что абсурдно.

Современное (техническое) представление о силе полностью сложилось лишь в XVII в. вслед за признанием законов движения Ньютона. Великим достижением Ньютона стало осознание того,

что движение как таковое отнюдь не требует приложения силы. Материальное тело будет двигаться с постоянной скоростью в заданном направлении без какого бы то ни было внешнего воздействия. Только отклонение от равномерного прямолинейного движения требует объяснения, т. е. наличия силы. Ньютон установил, что сила вызывает ускорение и вывел точную математическую формулу, связывающую эти величины.

Теория Ньютона позволила объяснить загадку движения Земли вокруг Солнца. Нет никакой видимой причины, вынуждающей Землю двигаться по орбите. В теории Ньютона такая причина и не требуется. Само движение Земли не требует объяснений; в объяснении нуждается только отклонение от равномерного прямолинейного движения. Траектория Земли в пространстве искривляется относительно направления на Солнце, что легко объяснить солнечным притяжением.

Механика Ньютона быстро получила признание, поскольку успешно описывала связь сил и движения, и в наши дни на ней основываются все технические расчеты. Однако механика Ньютона ничего не говорит о происхождении сил, вызывающих ускорение тел. На первый взгляд кажется, что эти силы многочисленны и разнообразны: напор ветра или набегающего потока воды на препятствие, гидростатическое давление воздуха или воды, непрерывное давление расширяющегося металла, мощный выброс взрывающихся химических веществ, тянущее усилие растянутого резинового жгута, мускульная сила человека, вес тяжелых объектов и т. д. Одни силы действуют непосредственно при контакте с телом (усилие, передаваемое телу натянутой веревкой), другие, например, гравитация, действуют на расстоянии, через пустое пространство.

Однако тщательный анализ показывает, что несмотря на столь большое разнообразие, все происходящее в природе можно свести всего к четырем фундаментальным взаимодействиям. Именно эти взаимодействия в конечном счете отвечают за все в мире, именно они являются источником всех изменений. Каждое из четырех фундаментальных взаимодействий имеет свои отличия и в то же время сходство с тремя остальными. Изучение свойств четырех фундаментальных взаимодействий составляет основную задачу физика и важную предварительную ступень на пути к суперсиле.

## Гравитация

Исторически гравитация (тяготение) первым из четырех фундаментальных взаимодействий стала предметом научного исследования. Хотя человек всегда был знаком с гравитацией и основывал на ней сами понятия «вверх» и «вниз», истинную роль

гравитации как силы природы удалось в полной мере осознать только после появления в XVII в. ньютоновской теории гравитации — закона всемирного тяготения. До этого гравитация неразрывно связывалась с Землей и смешивалась с господствовавшим в то или иное время космологическим представлением. Аристотель, считавший, что Земля находится в центре мироздания, усматривал в стремлении тел падать на землю просто пример проявления общего принципа, согласно которому все тела имеют «естественное место» в нашем мире и стремятся занять его. Массивные тела стремятся вниз, тогда как газообразные вспарываются к небесам, т. е. к менее материальной сфере. Небесные эфирные элементы обращаются вокруг Земли по строго круговым орбитам, которым соответствует геометрически наиболее совершенное движение.

В средние века, когда закладывались более современные астрономические представления, стало очевидным, что гравитация не ограничена лишь Землей и что гравитационные силы действуют между Солнцем, Луной, планетами и вообще всеми телами в космическом пространстве. Одним из наиболее убедительных подтверждений универсального характера гравитации явилось объяснение Ньютоном океанских приливов действием гравитационного притяжения Луны. Ньютоновский закон обратных квадратов стал воплощением «дальнодействующей» природы гравитации. Это означает, что, хотя интенсивность гравитационного взаимодействия убывает с расстоянием, оно распространяется в пространстве и может сказываться на весьма удаленных от источника телах. В этом нам «повезло», поскольку гравитация буквально не позволяет Вселенной развалиться на части: она удерживает планеты на орбитах, «связывает» звезды в галактики, препятствуя разбеганию звезд в космическом пространстве. В астрономическом масштабе гравитационное взаимодействие, как правило, играет главную роль.

Важная особенность гравитации — ее универсальность. Ничто во Вселенной не избавлено от нее. Каждая частица испытывает на себе действие гравитации, или, как говорят физики, участвует в гравитационном взаимодействии. Гравитация влияет даже на энергию. К тому же каждая частица сама является источником гравитации. Более того, сила гравитационного взаимодействия одинакова у всех частиц — именно это обстоятельство неявно выражено в знаменитом наблюдении (приписываемом Галилею), что все тела независимо от их веса или состава падают одинаково.

Сила гравитации, действующая между частицами, всегда представляет собой силу притяжения: она стремится сблизить частицы. Гравитационное отталкивание, или «антигравитация», никогда еще не наблюдалось. Причина этого вполне понятна. Гравитационному отталкиванию должна соответствовать отрицательная

энергия. Но поскольку энергия, запасенная в любой частице, всегда положительна и наделяет ее положительной массой, частицы под действием гравитации всегда стремятся сблизиться. Отрицательная энергия в этом смысле есть нечто непонятное. Но хотя частицы не могут обладать отрицательной энергией, энергия поля может быть отрицательной; это приводит к глубоким последствиям, которые мы рассмотрим в дальнейшем.

Возможно, наиболее удивительной особенностью гравитации является ее малая интенсивность. Величина гравитационного взаимодействия между компонентами атома водорода составляет  $10^{-39}$  от силы взаимодействия электрических зарядов. Если бы размеры атома водорода определялись гравитацией, а не взаимодействием между электрическими зарядами, то низшая (самая близкая к ядру) орбита электрона по размерам превосходила бы доступную наблюдению часть Вселенной! В мире субатомных частиц гравитация настолько слаба, что физики склонны полностью пренебрегать ею. Она не проявлялась ни в одном из наблюдавшихся до сих пор процессов с участием частиц.

Гравитационное взаимодействие макроскопических объектов также остается для нас незаметным. Когда мы идем по улице, огромные здания притягивают нас слабыми гравитационными «щупальцами», но это притяжение слишком слабо, чтобы его ощутить. Однако высокочувствительные устройства в состоянии уловить гравитационные эффекты. Еще в 1774 г. шотландец Невил Маскелин обнаружил незначительное отклонение отвеса от вертикали, вызванное гравитационным притяжением расположенной поблизости горы. В 1797 г. Генри Кавендиш поставил знаменитый эксперимент, тщательно измерив едва уловимую силу притяжения между двумя шариками, прикрепленными на концах горизонтально подвешенного деревянного стержня, и двумя большими свинцовыми шарами. Это было первое лабораторное наблюдение гравитационного притяжения между двумя телами.

Может показаться удивительным, что мы вообще ощущаем гравитацию, коль скоро она так слаба. Как она может оказаться основной силой во Вселенной? Ответ кроется в универсальности гравитации. Поскольку каждая частица вещества вызывает гравитационное притяжение, гравитация возрастает по мере образования все больших скоплений вещества. Мы ощущаем гравитацию в повседневной жизни потому, что все атомы Земли сообща притягивают нас. Действие гравитационного притяжения одного электрона или протона пренебрежимо мало, но результирующая сила притяжения со стороны всех электронов или протонов может быть значительной. Если бы антигравитирующих частиц было столько же, сколько гравитирующих, то одни частицы нейтрализовали бы другие и сила гравитации, хотя и существовала бы, не была бы заметной, поскольку оказалась бы слишком слабой.

Гравитацию следует рассматривать как *поле*. Каждая частица является источником гравитационного поля, окружающего ее невидимым ореолом. Другая частица, находящаяся в этом гравитационном поле, испытывает на себе действие силы. Поле — это не просто способ описания гравитации. Как уже упоминалось в гл. 2, в поле могут существовать волнообразные возмущения. Подобно тому как Максвелл обнаружил, что в электромагнитном поле могут возникать волны, распространяющиеся в пространстве, Эйнштейн установил, что волны могут зарождаться и в гравитационном поле.

Ньютоновская теория гравитации, остававшаяся незыблемой на протяжении более 200 лет, была повержена новой физикой, возникшей в первые десятилетия XX в. Долгое время не удавалось объяснить расхождение между предсказаниями теории Ньютона и результатами наблюдений орбиты планеты Меркурий, которая имеет не вполне эллиптическую форму. Небольшое вращение — прецессия — орбиты обусловлено гравитационным возмущением, вызванным воздействием других планет, но и после учета этих возмущений сохранялось небольшое расхождение — всего 43 угловые секунды в столетие, — которое не могла объяснить теория Ньютона.

Более серьезные затруднения возникли, когда теория Ньютона столкнулась с теорией относительности. Согласно Ньютону, гравитационное взаимодействие между двумя телами передается через пространство мгновенно, так что, если бы Солнце вдруг исчезло, траектория Земли тотчас же перестала бы искривляться, хотя мы продолжали бы видеть Солнце еще в течение 8 мин после его исчезновения — за это время солнечный свет достигает Земли. Согласно теории относительности Эйнштейна невозможно распространение физического сигнала со скоростью выше скорости света, и таким образом она вступает в противоречие с теорией гравитации Ньютона.

Пытаясь расширить свою теорию так, чтобы включить в нее гравитацию, Эйнштейн создал (1915) общую теорию относительности, которая не только вытеснила закон всемирного тяготения Ньютона, но и в корне изменила сами «идейные» основы нашего понимания гравитации. В теории Эйнштейна гравитация — это не сила, а проявление искривления пространства-времени. Тела вынуждены следовать по искривленным траекториям вовсе не потому, что на них действует гравитация, — просто они движутся кратчайшим, самым «быстрым», путем в искривленном пространстве-времени. По Эйнштейну гравитация обусловлена просто геометрией.

Теория Ньютона вполне применима во всех практических приложениях, в частности в авиации и космонавтике, она вполне адекватно описывает и большинство астрономических систем.

Однако она непригодна в тех случаях, когда гравитационные поля достигают большой силы, как вблизи коллапсирующих объектов типа нейтронных звезд или черных дыр. Влияние искривления пространства-времени можно обнаружить даже в умеренных гравитационных полях. Например, прецессия орбиты Меркурия обусловлена искривлением пространства, вызванного гравитационным воздействием Солнца. Кроме того, как упоминалось в гл. 2, очень чувствительные часы могут обнаружить замедление времени на поверхности Земли.

### Электромагнетизм

Хотя гравитация первой получила надлежащее научное объяснение, электромагнетизм в равной мере известен людям с незапамятных времен. Электрические силы зримо проявляются при вспышках молний, мы можем видеть, как они «работают» при коронном разряде и других атмосферных явлениях, сопровождающихся свечением. Магнитными силами обусловлена сложная игра света и красок в полярных сияниях.

Считается, что существование электричества впервые установил древнегреческий философ Фалес Милетский. Он заметил, что, если кусок янтаря потереть о шелк или мех, янтарь обретает способность притягивать мелкие предметы. Янтарь по-гречески называется *электрон*. В средние века открытое Фалесом странное явление тщательно изучал придворный медик английской королевы Елизаветы I Уильям Гильберт, который обнаружил, что способность электризоваться присуща и многим другим веществам. Дальнейшие исследования, проведенные в Англии и других странах Европы, показали, что некоторые вещества ведут себя как изоляторы. Французский ученый Шарль Дюфе установил, что существуют две разновидности электрических зарядов; теперь мы называем их положительными и отрицательными.

В XVIII—XIX вв. природа электричества частично проявилась после экспериментов Бенджамина Франклина и Майкла Фарадея. Выяснилось, что электрические заряды одного знака отталкиваются, а заряды противоположных знаков притягиваются, и в том и другом случае электрические силы ослабевают с расстоянием в соответствии с законом «обратных квадратов», который Ньютон вывел ранее для гравитации. Но по величине электрические силы намного превосходят гравитационные. В отличие от слабого гравитационного взаимодействия, наличие которого Кавендишу удалось продемонстрировать только с помощью специального прибора, электрические силы, действующие между телами обычных размеров, можно легко наблюдать.

Работы Фарадея навели на мысль, что электричество скрыто в атоме, но существование электрона было твердо установлено



только после того, как Дж. Дж. Томсон открыл «катодные лучи» в 90-е годы прошлого столетия. Ныне известно, что электрический заряд любой частицы вещества всегда кратен фундаментальной единице заряда — своего рода «атому» заряда. Почему это так — чрезвычайно интересный вопрос. Однако не все материальные частицы являются носителями электрического заряда. Например, фотон и нейтрино электрически нейтральны. В этом отношении электричество отличается от гравитации. Все материальные частицы создают гравитационное поле, тогда как с электромагнитным полем связаны только заряженные частицы.

Как и электричество, магнетизм в природе обнаружили древние греки. Примерно к 600 г. до н. э. им были известны свойства магнитного железняка (оксида железа); как обнаружилось, его куски могут действовать друг на друга на расстоянии. Примерно через 500 лет китайцы открыли поразительную способность магнитного железняка определенным образом ориентироваться в пространстве и создали первый примитивный компас. Правда, поначалу его использование ограничивалось мистическими действиями, и лишь через несколько столетий компас стал навигационным прибором.

К концу XVI в. европейские ученые начали постигать истинную природу магнетизма. Гильберт доказал, что Земля ведет себя как большой магнит, свойства которого весьма напоминают свойства построенной им модели — шара из магнитного железняка. Было установлено, что существуют две разновидности магнетизма, которые в соответствии с магнетизмом Земли получили название северного и южного полюсов. Как и электрические заряды, одноименные магнитные полюса отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Однако в отличие от электрических зарядов магнитные полюса встречаются не по отдельности, а только парами — северный полюс и южный полюс. В обычном магните, имеющем форму стержня (прямоугольного параллелепипеда), один конец действует как северный полюс, а другой — как южный. Если стержень разрезать пополам, то на месте разреза возникнут новые полюса, т. е. получатся два новых магнита, каждый из которых имеет и северный, и южный полюса. Все попытки получить таким способом изолированный магнитный полюс — *монополь* — заканчивались неудачей. Может быть, существование в природе изолированных магнитных полюсов исключено? Если это так, то почему? Как мы увидим в дальнейшем, исследование суперсилы дает ответы на эти интереснейшие вопросы.

Как электрическое и гравитационное взаимодействия, взаимодействие магнитных полюсов подчиняется закону обратных квадратов. Следовательно, электрическая и магнитная силы «дальнодействующие», и их действие ощутимо на больших расстояниях

от источника. Например, магнитное поле Земли простирается далеко в космическое пространство. Солнце также порождает магнитное поле, которое заполняет всю Солнечную систему. Существует даже галактическое магнитное поле.

В начале XIX в. выяснилось, что между электричеством и магнетизмом существует глубокая связь. Датский физик Ханс Кристиан Эрстед открыл, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле, тогда как Майкл Фарадей показал, что переменное магнитное поле индуцирует в проводнике электрический ток. Эти открытия легли в основу динамомашины и электрогенератора, играющих ныне столь важную роль в технике.

Как уже упоминалось в гл. 4, решающий шаг в познании электромагнетизма сделал в 50-х годах XIX в. Максвелл, объединивший электричество и магнетизм в единой теории электромагнетизма — первой единой теории поля. С соответствующими уточнениями для учета квантовых эффектов теория Максвелла с успехом продержалась вплоть до 1967 г., когда в объединении взаимодействий был сделан следующий крупный шаг.

### Слабое взаимодействие

Человечество познакомилось со слабым взаимодействием, так и не осознав этого события, еще в 1054 г., когда китайские астрономы отметили появление яркой голубой звезды в той области неба, где раньше не наблюдалось ничего. Соперничая в блеске даже с планетами, звезда ярко светила на протяжении нескольких недель, а затем стала медленно угасать. Современные астрономы считают вспышку 1054 г. взрывом сверхновой — гигантским по силе взрывом старой звезды, вызванным внезапным коллапсом ее ядра, который сопровождается кратковременным испусканием огромного количества нейтрино. Обладающие только слабым взаимодействием, эти нейтрино тем не менее разметали наружные слои звезды в космическом пространстве, образовав клочья облаков расширяющегося газа. Ныне сверхновая 1054 г. наблюдается в виде туманного светлого пятнышка в созвездии Тельца.

Сверхновые — один из немногих случаев зримого проявления слабого взаимодействия. Это взаимодействие действительно очень слабое, оно значительно уступает по величине всем взаимодействиям, кроме гравитационного, и в системах, где оно присутствует, его эффекты оказываются в тени электромагнитного и сильного взаимодействий.

К мысли о существовании слабого взаимодействия ученые продвигались медленно. Все началось в 1896 г., когда Анри Беккерель, исследуя загадочное почернение фотографической пластинки, оставшейся в ящике письменного стола рядом с кристаллами сульфата урана, случайно открыл радиоактивность. Систе-

матическое исследование радиоактивного излучения было предпринято Эрнестом Резерфордом; он установил, что радиоактивные атомы испускают частицы двух различных типов, которые назвал альфа и бета. Тяжелые положительно заряженные альфа-частицы, как выяснилось, представляли собой быстро движущиеся ядра гелия. Бета-частицы оказались летящими с большой скоростью электронами.

В деталях явление бета-радиоактивности оставалось не до конца понятным вплоть до 30-х годов. Бета-распад обладал в высшей степени странной особенностью. На первый взгляд казалось, что в этом распаде нарушается один из фундаментальных законов физики — закон сохранения энергии. Часть энергии куда-то исчезала. Вольфганг Паули «спас» закон сохранения энергии, предположив, что вместе с электроном при бета-распаде вылетает еще одна частица, нейтральная и обладающая необычайно высокой проникающей способностью, вследствие чего ее не удавалось наблюдать. Она-то и уносит с собой недостающую энергию. Энрико Ферми назвал частицу-невидимку «нейтрино», что означает «маленькая нейтральная частица». Нейтрино оказались настолько неуловимыми, что достоверно обнаружить их удалось лишь в 50-х годах.

Однако загадочность оставалась. Электроны и нейтрино испускались нестабильными ядрами. Но физики располагали неопровержимыми доказательствами, что внутри ядер таких частиц нет. Откуда же они возникали? Ферми высказал предположение, что электроны и нейтрино до своего вылета не существуют в ядре в «готовом виде», а каким-то образом мгновенно образуются из энергии, запасенной радиоактивным ядром. К тому времени было показано, что с точки зрения квантовой теории испускание и поглощение света можно интерпретировать как рождение и уничтожение фотонов; гипотеза Ферми означала, что подобное может происходить с электронами и нейтрино.

Свойства свободных нейтронов подтверждали гипотезу Ферми. Предоставленные самим себе, нейтроны через несколько минут распадаются на протон, электрон и нейтрино. Одна частица исчезает, а три новые появляются. Вскоре стало ясно, что известные силы не могут привести к такому распаду. Бета-распад, видимо, вызывался какой-то иной силой. Измерения скорости бета-распадов показали, что соответствующее этой силе взаимодействие чрезвычайно слабое, гораздо слабее электромагнитного (хотя и гораздо сильнее гравитационного).

С открытием нестабильных субъядерных частиц физики обнаружили, что слабое взаимодействие вызывает множество других превращений. Большинство известных частиц участвуют в слабом взаимодействии. Для неуловимого нейтрино слабое взаимодействие (не считая гравитации) — единственный способ проявить себя.

По своему характеру слабое взаимодействие совершенно не похоже как на гравитационное, так и на электромагнитное. Во-первых, если не считать таких явлений, как взрывы сверхновых, оно не создает тянущих или толкающих усилий в том смысле, как это принято понимать в механике. Слабое взаимодействие вызывает превращения одних частиц в другие, часто приводя продукты реакции в движение с высокими скоростями. Во-вторых, слабое взаимодействие ощутимо только в областях пространства чрезвычайно малой протяженности. Радиус действия слабых сил удалось точно измерить только в начале 80-х годов. Долгое время до этого считалось, что слабое взаимодействие по существу точечное и охватывает слишком малую область пространства, чтобы ее размеры можно было оценить. В отличие от «дальнодействующих» гравитации и электромагнетизма слабое взаимодействие прекращается на расстоянии, большем  $10^{-16}$  см от источника. Следовательно, оно не может влиять на макроскопические объекты, а ограничивается отдельными субатомными частицами.

Хотя разработанная Ферми и другими физиками в 30-е годы теория слабого взаимодействия непрерывно совершенствовалась, некоторые глубокие противоречия в ней все же не удалось устранить, и стало очевидно, что она не обеспечивает подлинного понимания слабого взаимодействия. Новая теория, заимствовавшая основные идеи Ферми, но дополненная рядом принципиально новых соображений, была создана в конце 60-х годов Стивеном Вайнбергом, работавшим тогда в Гарвардском университете (США), и Абдусом Саламом из «Империял колледжа» (Лондон). Создание новой теории слабого взаимодействия явилось самым крупным шагом (с момента создания Максвеллом теории электромагнитного поля) на пути к суперсиле; о ней мы подробно расскажем в гл. 8.

### Сильное взаимодействие

Представление о существовании сильного взаимодействия постепенно складывалось по мере того, как прояснялась структура атомного ядра. Что-то должно было удерживать протоны в ядре, не позволяя им разлетаться под действием электростатического отталкивания. Гравитация для этого слишком слаба; очевидно, необходимо какое-то новое взаимодействие, более сильное, чем электромагнитное. Но за пределами ядра сильное ядерное притяжение не ощущается, поэтому радиус действия новой силы должен быть очень мал. Действительно, сильное взаимодействие резко падает на расстоянии от протона или нейтрона, превышающем примерно  $10^{-13}$  см. Следовательно, хотя по своей величине сильное взаимодействие существенно превосходит все остальные фундаментальные взаимодействия, оно не может непосредственно проявляться в макроскопических телах.

Сильное взаимодействие испытывают протоны и нейтроны, но не электроны. Нейтрино и фотоны также не подвластны ему. Вообще в сильном взаимодействии участвуют только более тяжелые частицы. Оно проявляется и как обычное притяжение, не позволяющее развалиться ядру, но вместе с тем и как слабая сила, вызывая распад некоторых нестабильных частиц. Вследствие своей большой величины сильное взаимодействие является источником огромной энергии. По-видимому, наиболее важный пример энергии, высвобождаемой сильным взаимодействием, — это свечение Солнца. В недрах Солнца и звезд непрерывно протекают термоядерные реакции, вызываемые сильным взаимодействием. Именно в результате этого взаимодействия высвобождается энергия водородной бомбы.

Первые попытки объяснить природу сильного взаимодействия не принесли особого успеха. Ни одно из простых математических описаний процесса не было вполне удовлетворительным. Сильное взаимодействие, по-видимому, довольно сложным образом зависит от расстояния, и тем, кто старался моделировать его свойства, приходилось вводить в расчеты много произвольных параметров. Создавалось впечатление, что сильное взаимодействие представляет собой сплав взаимодействий с самыми различными свойствами.

А пока физики-ядерщики пытались преодолеть эти трудности, в начале 60-х годов была предложена кварковая модель. В этой теории нейтроны и протоны рассматриваются не как элементарные частицы, а как составные системы, построенные из трех кварков. Чтобы это «трио» кварков не распадалось, необходима удерживающая их сила, некий «клей»; оказалось, что результирующее взаимодействие между нейтронами и протонами представляет собой просто остаточный эффект более мощного взаимодействия между кварками. Это объяснило, почему сильное взаимодействие кажется столь сложным. Когда протон «прилипает» к нейтрону или другому протону, во взаимодействии участвуют шесть кварков, каждый из которых взаимодействует со всеми остальными. Значительная часть сил тратится на прочное склеивание трио кварков, а небольшая — на скрепление двух трио кварков друг с другом.

Как только природу сильного взаимодействия удалось объяснить на основе взаимодействия кварков, стало легче моделировать его математически. В дальнейшем мы увидим, как подобное описание выявило аналогии между сильным и другими взаимодействиями, указав тем самым на существование объединяющей все взаимодействия суперсилы.

## Мир субатомных частиц

---

### Расщепление атома

Часто говорят, что существуют два вида наук — большие науки и малые. Расщепление атома — большая наука. Она располагает гигантскими экспериментальными установками, колоссальными бюджетами и получает львиную долю Нобелевских премий.

Зачем физикам понадобилось расщеплять атом? Простой ответ — чтобы понять, как устроен атом, — содержит лишь долю истины, но есть и более общая причина. Говорить буквально о расщеплении атома не вполне правильно. В действительности речь идет о столкновении частиц высокой энергии. При столкновении субатомных частиц, движущихся с большими скоростями, происходит рождение нового мира взаимодействий и полей. Несущие огромную энергию осколки материи, разлетающиеся после столкновений, таят в себе секреты природы, которые от «сотворения мира» оставались погребенными в недрах атома.

Установки, на которых осуществляется столкновение частиц высоких энергий, — ускорители частиц — поражают своими размерами и стоимостью. Они достигают нескольких километров в поперечнике, и по сравнению с ними даже лаборатории, в которых изучаются столкновения частиц, кажутся крошечными. В других областях научных исследований оборудование размещается в лаборатории, в физике высоких энергий лаборатории пристраиваются к ускорителю. Недавно Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН), расположенный недалеко от Женевы, выделил несколько сотен миллионов долларов на строительство кольцевого ускорителя. Длина окружности сооружаемого для этой цели туннеля достигает 27 км. Ускоритель, получивший название ЛЭП (LEP, Large Electron-Positron ring — большое электрон-позитронное кольцо), предназначен для ускорения электронов и их античастиц (позитронов) до скоростей, всего лишь «на волосок» отличающихся от скорости света. Чтобы иметь представление о масштабах энергии, вообразим, что вместо электронов до таких скоростей разгоняется монетка достоинством в один пенни. В конце

цикла ускорения она обладала бы энергией, достаточной для производства электроэнергии на сумму 1000 млн. долл.! Неудивительно, что подобные эксперименты принято относить к физике «высоких энергий». Двигаясь внутри кольца навстречу друг другу, пучки электронов и позитронов испытывают лобовые столкновения, при которых электроны и позитроны аннигилируют, высвобождая энергию, достаточную для рождения десятков других частиц.

Что это за частицы? Некоторые из них — те самые «кирпичики», из которых построены мы с вами: протоны и нейтроны, составляющие атомные ядра, и обращающиеся вокруг ядер электроны. Другие частицы обычно в окружающем нас веществе не встречаются: их век чрезвычайно короток, и по истечении его они распадаются на обычные частицы. Число разновидностей таких нестабильных короткоживущих частиц поразительно: их известно уже несколько сотен. Подобно звездам, нестабильные частицы слишком многочисленны, чтобы их различать «по именам». Многие из них обозначены только греческими буквами, а некоторые — просто числами.

Важно иметь в виду, что все эти многочисленные и разнообразные нестабильные частицы отнюдь не являются в прямом смысле *составными частями* протонов, нейтронов или электронов. Сталкиваясь, электроны и позитроны высоких энергий вовсе не разлетаются на множество субатомных осколков. Даже при столкновениях протонов высоких энергий, заведомо состоящих из других объектов (кварков), они, как правило, не расщепляются на составные части в обычном смысле. То, что происходит при таких столкновениях, лучше рассматривать как непосредственное рождение новых частиц из энергии столкновения.

Лет двадцать назад физики были совершенно сбиты с толку многочисленностью и разнообразием новых субатомных частиц, которым, казалось, не будет конца. Невозможно было понять, *для чего* столько частиц. Может быть, элементарные частицы подобны обитателям зоопарка с их неявно выраженной принадлежностью к семействам, но без какой-либо четкой систематики. Или, возможно, как полагали некоторые оптимисты, элементарные частицы таят в себе ключ к Вселенной? Что такое наблюдаемые физиками частицы: малозначительные и случайные осколки материи или возникающие на наших глазах очертания смутно ощущаемого порядка, указывающего на существование богатой и сложной структуры субъядерного мира? Ныне в существовании такой структуры нет никаких сомнений. Микромиру присущ глубокий и рациональный порядок, и мы начинаем понимать, каково значение всех этих частиц.

Первый шаг к пониманию микромира был сделан в результате систематизации всех известных частиц, подобно тому как в XVIII в.

биологи составляли подробнейшие каталоги видов растений и животных. К числу наиболее важных характеристик субатомных частиц относятся масса, электрический заряд и спин.

Поскольку масса и вес связаны между собой, частицы с большой массой часто называют «тяжелыми». Соотношение Эйнштейна  $E = mc^2$  указывает, что масса частицы зависит от ее энергии и, следовательно, от скорости. Движущаяся частица тяжелее покоящейся. Когда говорят о массе частицы, имеют в виду ее *массу покоя*, поскольку эта масса не зависит от состояния движения. Частица, имеющая нулевую массу покоя, движется со скоростью света. Наиболее очевидный пример частицы с нулевой массой покоя — фотон. Считается, что электрон — самая легкая из частиц с ненулевой массой покоя. Протон и нейтрон почти в 2000 раз тяжелее, тогда как масса самой тяжелой частицы, которую удалось создать в лаборатории (*Z*-частицы), примерно в 200 000 раз больше массы электрона.

Электрический заряд частиц меняется в довольно узком диапазоне, но, как мы отмечали, всегда кратен фундаментальной единице заряда. Некоторые частицы, например фотон и нейтрино, не имеют электрического заряда. Если заряд положительно заряженного протона принять за +1, то заряд электрона равен —1.

В гл. 2 мы ввели еще одну характеристику частиц — спин. Он также всегда принимает значения, кратные некоторой фундаментальной единице, которая по историческим причинам выбрана равной  $1/2$ . Так, протон, нейтрон и электрон имеют спин  $1/2$ , а спин фотона равен 1. Известны также частицы со спином 0,  $3/2$  и 2. Фундаментальных частиц со спином больше 2 не обнаружено, и теоретики полагают, что частиц с такими спинами не существует.

Спин частицы — важная характеристика, и в зависимости от его величины все частицы разделяются на два класса. Частицы со спинами 0, 1 и 2 называются «бозонами» — в честь индийского физика Чатъендраната Бозе, а частицы с полуцелым спином (т. е. со спином  $1/2$  или  $3/2$ ) — «фермионами» в честь Энрико Ферми. Принадлежность к одному из этих двух классов является, вероятно, наиболее важной в перечне характеристик частицы.

Другая важная характеристика частицы — ее время жизни. До недавнего времени считалось, что электроны, протоны, фотоны и нейтрино абсолютно стабильны, т. е. имеют бесконечно большое время жизни. Нейтрон остается стабильным, пока он «заперт» в ядре, но свободный нейтрон распадается примерно за 15 мин. Все остальные известные частицы в высшей степени нестабильны, их времена жизни колеблются в пределах от нескольких микросекунд до  $10^{-23}$  с. Такие интервалы времени кажутся непостижимо малыми, однако не следует забывать, что частица, летящая со скоростью, близкой к скорости света (а большинство частиц, рожда-



ющихся на ускорителях, движутся именно с такими скоростями), успевает пролететь за микросекунду расстояние в 300 м.

Нестабильные частицы претерпевают распад, представляющий собой квантовый процесс, и поэтому в распаде всегда есть элемент непредсказуемости. Продолжительность жизни конкретной частицы невозможно предсказать заранее. На основе статистических соображений можно предсказать лишь среднее время жизни. Обычно говорят о периоде полураспада частицы — времени, за которое популяция тождественных частиц сокращается на половину. Эксперимент показывает, что уменьшение численности популяции происходит по экспоненте (см. с. 63) и период полураспада составляет 0,693 от среднего времени жизни.

Физикам недостаточно знать, что та или иная частица существует — они стремятся понять, какова ее роль. Ответ на этот вопрос зависит от перечисленных выше свойств частиц, а также от характера сил, действующих на частицу извне и внутри ее. В первую очередь свойства частицы определяются ее способностью (или неспособностью) участвовать в сильном взаимодействии. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии, образуют особый класс и называются *адронами*. Частицы, участвующие в слабом взаимодействии и не участвующие в сильном, называются *лептонами*, что означает «легкие». Познакомимся кратко с каждым из этих семейств.

## Лептоны

Наиболее известен из лептонов электрон. Подобно всем лептонам, он, по-видимому, является элементарным, точечным объектом. Насколько известно, электрон не имеет внутренней структуры, т. е. не состоит из каких-то других частиц. Хотя лептоны могут иметь электрический заряд, а могут и не иметь, спин у всех у них равен  $\frac{1}{2}$ , следовательно, они относятся к фермионам.

Другой хорошо известный лептон, но уже без заряда, — это нейтрино. Как уже говорилось в гл. 2, нейтрино неуловимы, словно призраки. Так как нейтрино не участвуют ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях, они почти полностью игнорируют вещество, проникая через него, как будто его вообще нет. Высокая проникающая способность нейтрино долгое время весьма затрудняла экспериментальное подтверждение их существования. Лишь почти через три десятилетия после предсказания нейтрино они были, наконец, обнаружены в лаборатории. Физикам пришлось ждать создания ядерных реакторов, при работе которых испускается огромное количество нейтрино, и только тогда удалось зарегистрировать лобовое столкновение одной частицы с ядром и тем самым доказать, что она действительно существует. Сегодня удается осуществить значительно больше экспериментов с пучками нейтрино, которые возникают

при распаде частиц на ускорителе и обладают нужными характеристиками. Подавляющее большинство нейтрино «игнорирует» мишень, но время от времени нейтрино все же взаимодействуют с мишенью, что позволяет получить полезную информацию о структуре других частиц и природе слабого взаимодействия. Разумеется, проведение экспериментов с нейтрино в отличие от экспериментов с другими субатомными частицами не требует использования специальной защиты. Проникающая способность нейтрино столь велика, что они полностью безвредны и проходят сквозь человеческое тело, не причиняя ему ни малейшего вреда.

Несмотря на их неосязаемость, нейтрино занимают особое положение среди других известных частиц, поскольку являются наиболее распространенными частицами во Вселенной, превосходя по численности электроны и протоны в миллиард раз. Вселенная по существу представляет собой море нейтрино, в котором изредка встречаются вкрапления в виде атомов. Вполне возможно даже, что общая масса нейтрино превышает суммарную массу звезд, и поэтому именно нейтрино вносят основной вклад в космическую гравитацию. Согласно данным группы советских исследователей, нейтрино обладает крохотной, но не нулевой массой покоя (менее одной десятичной массы электрона); если это действительно так, то гравитационно нейтрино преобладают во Вселенной, что в будущем может вызвать ее коллапс. Так, нейтрино, на первый взгляд наиболее «безобидные» и бестелесные частицы, способны вызвать крушение всей Вселенной.

Среди прочих лептонов следует назвать мюон, открытый в 1936 г. в продуктах взаимодействия космических лучей; он оказался одной из первых известных нестабильных субатомных частиц. Во всех отношениях, кроме стабильности, мюон напоминает электрон: имеет тот же заряд и спин, участвует в тех же взаимодействиях, но имеет бóльшую массу. Примерно за две миллионные доли секунды мюон распадается на электрон и два нейтрино. Мюоны широко распространены в природе, на их долю приходится значительная часть фонового космического излучения, которое регистрируется на поверхности Земли счетчиком Гейгера.

Долгие годы электрон и мюон оставались единственными известными заряженными лептонами. Затем в конце 70-х годов был обнаружен третий заряженный лептон, получивший название «тау-лептон». При массе около 3500 масс электрона тау-лептон заведомо является «тяжеловесом» в трио заряженных лептонов, но во всем остальном он ведет себя подобно электрону и мюону.

Этим список известных лептонов отнюдь не исчерпывается. В 60-х годах было установлено, что существует несколько типов нейтрино. Нейтрино одного типа рождается вместе с электроном при распаде нейтрона, а нейтрино другого типа — при рождении мюона. Нейтрино каждого типа существует в паре со своим соб-

Таблица 1

Название	Обозначение	Масса	Заряд
Электрон	$e^-$	1	-1
Мюон	$\mu^-$	206,7	-1
Тау-лептон	$\tau^-$	3536,0	-1
Электронное нейтрино	$\nu_e$	0	0
Мюонное нейтрино	$\nu_\mu$	0	0
Тау-нейтрино	$\nu_\tau$	0	0

Шесть лептонов соответствуют заряженным и нейтральным модификациям (анти-частоты в таблицу не включены). Масса и заряд выражены в единицах соответственно массы и заряда электрона. Имеются данные, свидетельствующие о том, что нейтрино могут обладать небольшой массой.

ственным заряженным лептоном; следовательно, есть «электронное нейтрино» и «мюонное нейтрино». По всей вероятности, должно существовать и нейтрино третьего типа — сопровождающее рождение тау-лептона. В таком случае общее число разновидностей нейтрино равно трем, а общее число лептонов — шести (табл. 1). Разумеется, у каждого лептона есть своя античастица; таким образом, общее число различных лептонов равно двенадцати.

## Адроны

В отличие от горстки известных лептонов адронов существует буквально сотни. Одно лишь это наводит на мысль, что адроны — не элементарные частицы, а построены из более мелких составляющих. Все адроны участвуют в сильном, слабом и гравитационном взаимодействиях, но встречаются в двух разновидностях — электрически заряженные и нейтральные. Среди адронов наиболее известны и широко распространены нейтрон и протон. Остальные адроны короткоживущие и распадаются либо менее чем за одну миллионную секунды за счет слабого взаимодействия, либо гораздо быстрее (за время порядка  $10^{-23}$  с) — за счет сильного взаимодействия.

В 50-х годах физиков крайне озадачили численность и разнообразие адронов. Но мало-помалу частицы удалось классифицировать по трем важным характеристикам: массе, заряду и спину. Постепенно стали появляться признаки порядка и выстраиваться четкая картина. Появились намеки на то, что за кажущимся хаосом данных скрываются симметрии. Решающий шаг в раскрытии тайны адронов был сделан в 1963 г., когда Марри Гелл-

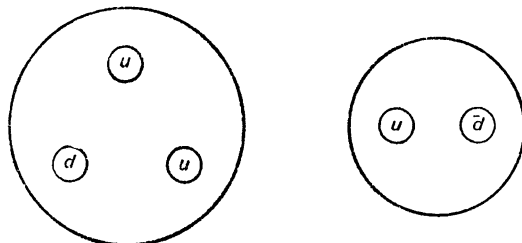


Рис. 10. Адроны построены из кварков. Протон (слева) состоит из двух  $u$ -кварков и одного  $d$ -кварка. Более легкий пион (справа) — это мезон, состоящий из одного  $u$ -кварка и одного  $d$ -антикварка. Другие адроны представляют собой всевозможные комбинации кварков.

Манн и Джордж Цвейг из Калифорнийского технологического института предложили теорию кварков.

Основная идея этой теории очень проста. Все адроны построены из более мелких частиц, называемых кварками. Кварки могут соединяться друг с другом одним из двух возможных способов: либо тройками, либо парами кварк—антикварк. Из трех кварков состоят сравнительно тяжелые частицы — *барионы*, что означает «тяжелые частицы». Наиболее известны из барионов нейтрон и протон. Более легкие пары кварк—антикварк образуют частицы, получившие название *мезоны* — «промежуточные частицы». Выбор такого наименования объясняется тем, что первые обнаруженные мезоны занимали по массе промежуточное положение между электронами и протонами. Чтобы учесть все известные тогда адроны, Гелл-Манн и Цвейг ввели три различных типа («аромата») кварков, получивших довольно причудливые названия:  $u$  (от *up* — верхний),  $d$  (от *down* — нижний) и  $s$  (от *strange* — странный). Допуская возможность различных комбинаций ароматов, можно объяснить существование большого числа адронов. Например, протон состоит из двух  $u$ - и одного  $d$ -кварков (рис. 10), а нейтрон — из двух  $d$ -кварков и одного  $u$ -кварка.

Чтобы предложенная Гелл-Манном и Цвейгом теория оказалась действенной, необходимо предположить, что кварки несут дробный электрический заряд. Иначе говоря, они обладают зарядом, величина которого составляет либо  $1/3$ , либо  $2/3$  фундаментальной единицы — заряда электрона. Комбинация из двух и трех кварков может иметь суммарный заряд, равный нулю или единице. Все кварки имеют спин  $1/2$ , поэтому они относятся к фермионам. Массы кварков не установлены столь точно, как массы других частиц, поскольку энергия связи их в адроне сравнима с массами самих кварков. Однако известно, что  $s$ -кварк тяжелее  $u$ - и  $d$ -кварков.

Внутри адронов кварки могут находиться в возбужденных состояниях, во многом сходных с возбужденными состояниями

атома, но со значительно большими энергиями. Избыток энергии, заключенный в возбужденном адроне, настолько увеличивает его массу, что до создания теории кварков физики ошибочно принимали возбужденные адроны за совершенно иные частицы. Ныне установлено, что многие из казавшихся различными адронов в действительности представляют собой лишь возбужденные состояния одного и того же фундаментального набора кварков.

Как уже говорилось в гл. 5, кварки скрепляются между собой сильным взаимодействием. Но они участвуют и в слабом взаимодействии. Слабое взаимодействие может изменять аромат кварка. Именно так происходит распад нейтрона. Один из  $d$ -кварков в нейтроне превращается в  $u$ -кварк, а избыток заряда уносит рождающийся одновременно электрон. Аналогичным образом, изменяя аромат, слабое взаимодействие приводит к распаду и других адронов.

Существование  $s$ -кварков необходимо для построения так называемых «странных» частиц — тяжелых адронов, открытых в начале 50-х годов. Необычное поведение этих частиц, подсказавшее их название, состояло в том, что они не могли распадаться за счет сильного взаимодействия, хотя как сами, так и продукты их распада представляли собой адроны. Физики ломали голову над тем, почему, если и материнские, и дочерние частицы принадлежат к семейству адронов, сильное взаимодействие не вызывает их распада. По какой-то причине эти адроны «предпочитали» гораздо менее интенсивное слабое взаимодействие. Почему? Теория кварков естественным образом решила эту загадку. Сильное взаимодействие не может изменять аромат кварков — на это способно только слабое взаимодействие. А без изменения аромата, сопровождающегося превращением  $s$ -кварка в  $u$ - или  $d$ -кварк, распад невозможен.

В табл. 2 представлены различные возможные комбинации кварков с тремя ароматами и указаны их названия (обычно просто греческая буква). Многочисленные возбужденные состояния не приведены. То обстоятельство, что из различных комбинаций трех основных частиц можно получить все известные адроны, символизировало главный триумф теории кварков. Но несмотря на этот успех, лишь через несколько лет удалось получить прямые физические доказательства существования кварков.

Эти доказательства были получены в 1969 г. в серии исторических экспериментов, проведенных на большом линейном ускорителе в Станфорде (Калифорния, США) — СЛАКе. Станфордские экспериментаторы рассуждали просто. Если в протоне действительно существуют кварки, то можно наблюдать столкновения с этими частицами внутри протона. Необходимо лишь субъядерный «снаряд», который можно было бы направить прямо в недра протона. Использовать для этой цели другой адрон бесполезно,

Таблица 2

Комбинация кварков	Название	Обозначение
$uud$	Протон	$p$
$udd$	Нейтрон	$n$
$uds$	Сигма ноль	$\Sigma^0$
$dds$	Сигма минус	$\Sigma^-$
$uus$	Сигма плюс	$\Sigma^+$
$uss$	Кси ноль	$\Xi^0$
$dss$	Кси минус	$\Xi^-$
$uds$	Лямбда	$\Lambda$
$u\bar{d}$	Положительный пион	$\pi^+$
$d\bar{u}$	Отрицательный пион	$\pi^-$
$d\bar{s}$	Нейтральный каон	$K^0$
$u\bar{s}$	Положительный каон	$K^+$
$s\bar{u}$	Отрицательный каон	$K^-$
$s\bar{d}$	Нейтральный антикаон	$\bar{K}^0$

Трем ароматам кварков,  $u$ ,  $d$  и  $s$ , соответствуют заряды  $+\frac{2}{3}$ ,  $-\frac{1}{3}$  и  $-\frac{1}{3}$ ; они комбинируются по три, образуя восемь барионов, приведенных в таблице. Пары кварк-антикварк образуют мезоны (Некоторые комбинации, такие, как  $sss$  и  $u\bar{u}$ , опущены.)

так как он имеет такие же размеры, как и протон. Идеальным снарядом мог бы стать лептон, например электрон. Так как электрон не участвует в сильном взаимодействии, он не «увязнет» в среде, которую образуют кварки. Вместе с тем электрон может почувствовать присутствие кварков благодаря наличию у них электрического заряда.

В станфордском эксперименте трехкилометровый ускоритель по существу выполнял роль гигантского электронного «микроскопа», который позволил получить изображение внутренности протона. Обычный электронный микроскоп дает возможность различать детали размером менее одной миллионной сантиметра. Протон же в несколько десятков миллионов раз меньше, и его можно «прощупать» только электронами, разогнанными до энергии  $2 \cdot 10^{10}$  эВ. Во времена станфордских экспериментов лишь немногие физики придерживались упрощенной теории кварков. Большинство ученых ожидало, что электроны будут отклоняться электрическими зарядами протонов, но при этом считалось, что заряд равномерно распределен внутри протона. Если бы это было действительно так, то происходило бы в основном слабое рассеяние электронов, т. е. при прохождении через протоны электроны не претерпевали бы сильных отклонений. Эксперимент показал, что картина рассеяния резко отличается от предполагаемой. Все происходило так, как если бы некоторые электроны

налетали на крохотные твердые вкрапления и отскакивали от них под самыми невероятными углами. Теперь мы знаем, что такими твердыми вкраплениями внутри протонов являются кварки<sup>1</sup>.

В 1974 г. упрощенному варианту теории кварков, которая к тому времени получила признание среди теоретиков, был нанесен чувствительный удар. С интервалом в несколько дней две группы американских физиков — одна в Станфорде во главе с Бартоном Рихтером, другая в Брукхейвенской национальной лаборатории под руководством Сэмюэла Тинга — объявили об открытии независимо друг от друга нового адрона, который получил название пси ( $\Psi$ )-частицы<sup>2</sup>. Само по себе открытие нового адрона вряд ли было бы особо достопримечательным, если бы не одно обстоятельство: дело в том, что в схеме, предлагаемой теорией кварков, не было места ни для одной новой частицы. Все возможные комбинации из  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков и их антикварков были уже «израсходованы». Из чего же состоит пси-частица?

Проблему удалось решить, обратившись к идее, которая уже некоторое время носилась в воздухе: должен существовать четвертый аромат, который до того никому не доводилось наблюдать. Новый аромат уже имел свое название — *charm* (очарование), или  $c$ . Было высказано предположение, что пси-частица — это мезон, состоящий из  $c$ -кварка и  $c$ -антикварка ( $\bar{c}$ ), т. е.  $c\bar{c}$ . Так как антикварки являются носителями антиаромата, очарование у пси-частицы нейтрализуется, и поэтому экспериментального подтверждения существования нового аромата (очарования) пришлось ждать до тех пор, пока не удалось обнаружить мезоны, в состав которых очарованные кварки входили в паре с антикварками других ароматов. Ныне известна целая вереница очарованных частиц. Все они очень тяжелые, так что очарованный кварк оказался тяжелее странного кварка.

Описанная выше ситуация повторилась в 1977 г., когда на сцену вышел так называемый ипсилон-мезон ( $\Upsilon$ ). На этот раз без особых колебаний был введен пятый аромат, получивший название  $b$ -кварк (от *bottom* — дно, а чаще *beauty* — красота, или прелесть). Ипсилон-мезон представляет собой пару кварк—антикварк, состоящую из  $b$ -кварков, и поэтому он обладает скрытой красотой; но, как и в предыдущем случае, другая комбинация кварков позволила в конечном счете обнаружить «красоту».

<sup>1</sup> Читатель, вероятно, помнит, что сходные аргументы при анализе экспериментальных данных привели Резерфорда к обнаружению атомных ядер. Таким образом, выполненные на СЛАКе опыты явились своего рода вторым поколением опытов Э. Резерфорда. — *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Поскольку новую частицу открыли независимо две группы исследователей, каждая из них дала ей свое название. Поэтому кроме  $\Psi$ -частицы ее называют также  $J$  (джи)- и  $J/\psi$  — пси-частицей и даже обозначают комбинацией этих двух букв. — *Прим. ред.*

Об относительных массах кварков можно судить хотя бы по тому, что легчайший из мезонов, пион, состоит из пар  $u$ - и  $d$ -кварков с антикварками. Пси-мезон примерно в 27 раз, а ипсилон-мезон не менее чем в 75 раз тяжелее пиона.

Постепенное расширение списка известных ароматов происходило параллельно увеличению числа лептонов; поэтому возник очевидный вопрос, будет ли когда-нибудь конец. Кварки были введены для того, чтобы упростить описание всего многообразия адронов, но и сейчас есть ощущение, что список частиц снова растет слишком быстро.

Со времен Демокрита основополагающая идея атомизма заключается в признании того, что в достаточно малых масштабах должны существовать подлинно элементарные частицы, из комбинаций которых состоит окружающее нас вещество. Атомистика привлекательна тем, что неделимые (по определению) фундаментальные частицы должны существовать в весьма ограниченном числе. Разнообразие природы обусловлено большим числом не составных частей, а их комбинаций. Когда обнаружилось, что существует множество различных атомных ядер, исчезла надежда, что то, что мы сегодня называем атомами, соответствует представлению древних греков об элементарных частицах вещества. И хотя по традиции мы продолжаем говорить о различных химических «элементах», известно, что атомы вовсе не элементарны, а состоят из протонов, нейтронов и электронов. И коль скоро число кварков оказывается слишком большим, возникает искушение предположить, что и они представляют собой сложные системы, состоящие из более мелких частиц.

Хотя по указанной причине и существует некоторая неудовлетворенность кварковой схемой, большинство физиков считает кварки подлинно элементарными частицами — точечными, неделимыми и не обладающими внутренней структурой. В этом отношении они напоминают лептоны, и уже давно предполагается, что между этими двумя различными, но сходными по своей структуре семействами должна существовать глубокая взаимосвязь. Основания для подобной точки зрения возникают из сравнения свойств лептонов и кварков (табл. 3). Лептоны можно сгруппировать попарно, сопоставив каждому заряженному лептону соответствующее нейтрино. Кварки также можно сгруппировать попарно. Табл. 3 составлена таким образом, что по структуре каждая клетка повторяет расположенную непосредственно перед ней. Например, во второй клетке мюон представлен как «тяжелый электрон», а очарованный и странный кварки — как тяжелые варианты  $u$ - и  $d$ -кварков. Из следующей клетки видно, что тау-лептон является еще более тяжелым «электроном», а  $b$ -кварк — тяжеловесной разновидностью  $d$ -кварка. Для полной аналогии необходимы еще одно (тау-лептонное) нейтрино и шестой аромат



Таблица 3

Лептоны	Кварки	Лептоны	Кварки
$e^-$	$u$	$\tau^-$	$t$
$\nu_e$	$d$	$\nu_\tau$	$b$
$\mu^-$	$c$		
$\nu_\mu$	$s$		

Лептоны и кварки естественно объединяются в пары, как показано в таблице. Окружающий нас мир состоит из четырех первых частиц. Но следующие группы, по-видимому, повторяют верхнюю и состоят, кроме нейтрино, из крайне нестабильных частиц

кварков, уже получивший название истинного (*truth, t*). В период работы над этой книгой экспериментальные данные в пользу существования *t*-кварков не были еще достаточно убедительными, и некоторые физики сомневались в том, что *t*-кварки вообще существуют.

Могут ли существовать четвертая, пятая и т. д. пары, содержащие еще более тяжелые частицы? Если да, то следующее поколение ускорителей, вероятно, даст физикам возможность обнаружить такие частицы. Однако высказывается любопытное соображение, из которого следует, что иных пар, кроме трех названных, не существует. Это соображение основано на числе типов нейтрино. Мы вскоре узнаем, что в момент Большого взрыва, ознаменовавшего возникновение Вселенной, происходило интенсивное рождение нейтрино. Своеобразная демократия гарантирует каждому виду частиц одинаковую с остальными долю энергии; поэтому, чем больше различных типов нейтрино, тем больше энергии содержится в море нейтрино, заполняющем космическое пространство. Вычисления показывают, что если существует более трех разновидностей нейтрино, то гравитация, создаваемая всеми ими, оказывала бы сильное возмущающее действие на ядерные процессы, протекавшие в первые несколько минут жизни Вселенной. Следовательно, из этих косвенных соображений следует весьма правдоподобный вывод о том, что тремя парами, показанными в табл. 3, исчерпываются все кварки и лептоны, которые существуют в природе.

Интересно отметить, что все обычное вещество во Вселенной состоит лишь из двух легчайших лептонов (электрона и электронного нейтрино) и двух легчайших кварков (*u* и *d*). Если бы все остальные лептоны и кварки внезапно прекратили свое существование, то в окружающем нас мире, по-видимому, очень мало что изменилось бы.

Возможно, более тяжелые кварки и лептоны играют роль своего рода дублеров легчайших кварков и лептонов. Все они нестабильны и быстро распадаются на частицы, расположенные в верхней клетке. Например, тау-лептон и мюон распадаются на электроны, в то время как странные, очарованные и красивые частицы довольно быстро распадаются либо на нейтроны или протоны (в случае барионов), либо на лептоны (в случае мезонов). Возникает вопрос: *для чего* существуют все эти частицы второго и третьего поколений? Зачем они понадобились природе?

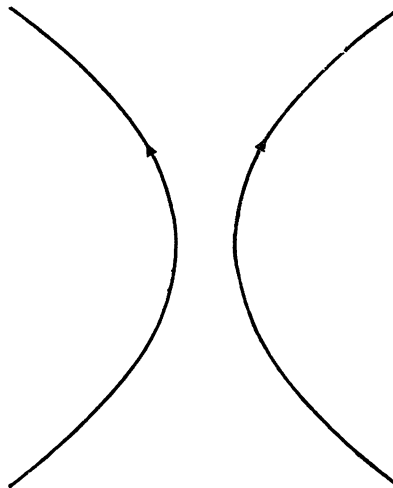
### Частицы — переносчики взаимодействий

Шестью парами лептонов и кварков, образующих строительный материал вещества, отнюдь не исчерпывается перечень известных частиц. Некоторые из них, например фотон, не включены в кварковую схему. Частицы, «оставшиеся за бортом», не являются «кирпичиками мироздания», а образуют своего рода «клей», не позволяющий миру распадаться на части, т. е. они связаны с четырьмя фундаментальными взаимодействиями.

Помню, как в детстве мне рассказывали, что Луна заставляет океаны подниматься и опускаться во время ежедневных приливов и отливов. Для меня всегда было загадкой, каким образом океан узнаёт, где находится Луна, и следует за ее движением в небе. Когда уже в школе я узнал о гравитации, мое недоумение только усилилось. Каким образом Луна, преодолев четверть миллиона километров пустого пространства, ухитряется «дотянуться» до океана? Стандартный ответ — Луна создает в этом пустом пространстве гравитационное поле, действие которого достигает океана, приводя его в движение, — конечно, имел какой-то смысл, но все же не удовлетворял меня до конца. Ведь мы не можем видеть гравитационное поле Луны. Может, так только говорится? Разве это действительно объясняет что-нибудь? Мне всегда казалось, что Луна должна каким-то образом сообщать океану, где она находится. Между Луной и океаном должен происходить какой-то обмен сигналами, чтобы вода знала, куда двигаться.

Со временем выяснилось, что представление о силе, передаваемой через пространство в форме сигнала, не так уж далеко от современного подхода к этой проблеме. Чтобы понять, каким образом возникает такое представление, следует рассмотреть более подробно природу силового поля. В качестве примера выберем не океанские приливы, а более простое явление: два электрона сближаются, а затем под действием электростатического отталкивания разлетаются в разные стороны. Физики называют этот процесс проблемой рассеяния. Разумеется, электроны не толкают друг друга буквально. Они взаимодействуют на расстоянии, через электромагнитное поле, порождаемое каждым электроном.

Рис. 11. Рассеяние двух заряженных частиц. Траектории частиц искривляются по мере их сближения вследствие действия силы электрического отталкивания.



Нетрудно представить картину рассеяния электрона на электроне. Первоначально электроны разделены большим расстоянием и слабо воздействуют друг на друга. Каждый электрон движется почти прямолинейно (рис. 11). Затем, по мере того как в работу включаются силы отталкивания, траектории электронов начинают искривляться, пока частицы максимально не сблизятся; после этого траектории расходятся, а электроны разлетаются, вновь начиная двигаться по прямолинейным, но уже расходящимся траекториям. Модель такого рода нетрудно продемонстрировать в лаборатории, используя вместо электронов электрически заряженные шарики. И снова возникает вопрос: откуда частица «знает», где находится другая частица, и соответственно этому меняет свое движение.

Хотя картина искривленных траекторий электронов довольно наглядна, она в ряде отношений совершенно непригодна. Дело в том, что электроны — квантовые частицы и их поведение подчиняется специфическим законам квантовой физики. Прежде всего электроны не движутся в пространстве по вполне определенным траекториям. Мы еще можем тем или иным способом определить начальную и конечную точки пути — до и после рассеяния, но сам путь в промежутке между началом и концом движения остается неизвестным и неопределенным. Кроме того, интуитивное представление о непрерывном обмене энергией и импульсом между электроном и полем, как бы ускоряющим электрон, противоречит существованию фотонов. Энергия и импульс могут переноситься только порциями, или квантами. Более точную картину движения электрона, вносимого полем в движение электрона, мы получим, предположив, что электрон, поглощая фотон поля, как бы испу-

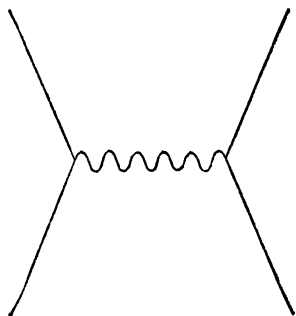


Рис. 12. Квантовое описание рассеяния заряженных частиц. Взаимодействие частиц обусловлено обменом переносчиком взаимодействия, или виртуальным фотоном (волнистая линия).

тывает внезапный толчок. Следовательно, на квантовом уровне акт рассеяния электрона на электроне можно изобразить, как показано на рис. 12. Волнистая линия, соединяющая траектории двух электронов, соответствует фотону, испущенному одним электроном и поглощенному другим. Теперь акт рассеяния предстает как внезапное изменение направления движения каждого электрона.

Диаграммы такого рода впервые применил Ричард Фейнман для наглядного представления различных членов уравнения, и первоначально они имели чисто символическое значение. Но затем диаграммы Фейнмана стали использовать для схематического изображения взаимодействий частиц. Такие картинки как бы дополняют интуицию физика, однако их следует толковать с известной долей осторожности. Например, в траектории электрона никогда не наблюдается резкого излома. Поскольку нам известны только начальное и конечное положения электронов, мы не знаем точно момента, когда происходит обмен фотоном, и какая из частиц испускает, а какая поглощает фотон. Все эти детали скрыты пеленой квантовой неопределенности.

Несмотря на это предостережение, диаграммы Фейнмана оказались эффективным средством квантового описания взаимодействия. Фотон, которым обмениваются электроны, можно рассматривать как своего рода посыльного одного из электронов, сообщаящего другому: «Я здесь, так что пошевеливайся!». Разумеется, все квантовые процессы носят вероятностный характер, поэтому подобный обмен происходит лишь с определенной вероятностью. Может случиться, что электроны обменяются двумя и более фотонами (рис. 13), хотя это менее вероятно.

Важно отдавать себе отчет в том, что в действительности мы не видим фотонов, снующих от одного электрона к другому. Переносчики взаимодействия — «внутреннее дело» двух электронов. Они существуют исключительно для того, чтобы сообщать электронам, как двигаться, и, хотя они переносят энергию и импульс, соответствующие законам сохранения классической фи-

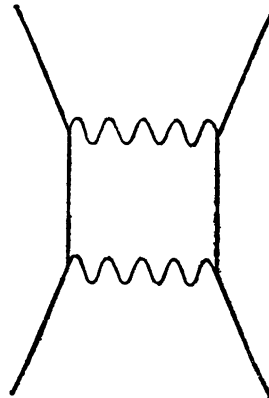
зика на них не распространяются. Фотоны в этом случае можно уподобить мячу, которым обмениваются на корте теннисисты. Подобно тому как теннисный мяч определяет поведение теннисистов на игровой площадке, фотон влияет на поведение электронов.

Успешное описание взаимодействия с помощью частицы-переносчика сопровождалось расширением понятия фотона: фотон оказывается не только частицей видимого нами света, но и призрачной частицей, которую «видят» только заряженные частицы, претерпевающие рассеяние. Иногда наблюдаемые нами фотоны называют *реальными*, а фотоны, переносящие взаимодействие, — *виртуальными*, что напоминает об их скоротечном, почти призрачном существовании. Различие между реальными и виртуальными фотонами несколько условно, но тем не менее эти понятия получили широкое распространение.

Описание электромагнитного взаимодействия с использованием понятия виртуальных фотонов — его переносчиков — по своему значению выходит за рамки просто иллюстраций квантового характера. В действительности речь идет о продуманной до мельчайших деталей и оснащенной совершенным математическим аппаратом теории, известной под названием *квантовой электродинамики*, сокращенно КЭД. Когда КЭД была впервые сформулирована (это произошло вскоре после второй мировой войны), физики получили в свое распоряжение теорию, удовлетворяющую основным принципам как квантовой теории, так и теории относительности. Это прекрасный случай увидеть совместные проявления двух важных аспектов новой физики и проверить их экспериментально.

Теоретически создание КЭД явилось выдающимся достижением. Более ранние исследования взаимодействия фотонов и электронов имели весьма ограниченный успех из-за математиче-

Рис. 13. Рассеяние электронов обусловлено обменом двумя виртуальными фотонами. Такие процессы составляют небольшую поправку к основному процессу, изображенному на рис. 12.



ских трудностей. Но коль скоро теоретики научились правильно проводить вычисления, все остальное становилось на место. КЭД предложила процедуру получения результатов любого сколь угодно сложного процесса с участием фотонов и электронов.

Чтобы проверить, насколько хорошо теория согласуется с реальностью, физики сосредоточили внимание на двух эффектах, представлявших особый интерес. Первый касался энергетических уровней атома водорода — простейшего атома. КЭД предсказывала, что уровни должны быть слегка смещены относительно положения, которое они занимали бы, если бы не существовало виртуальных фотонов. Теория очень точно предсказывала величину этого смещения. Эксперимент по обнаружению и измерению смещения с предельной точностью осуществил Уиллис Лэмб из Университета шт. Аризона. Ко всеобщему восторгу результаты вычислений прекрасно совпадали с экспериментальными данными.

Вторая решающая проверка КЭД касалась чрезвычайно малой поправки к собственному магнитному моменту электрона. И снова результаты теоретических расчетов и эксперимента полностью совпали. Теоретики принялись уточнять вычисления, экспериментаторы — усовершенствовать приборы. Но, хотя точность как теоретических предсказаний, так и экспериментальных результатов непрерывно повышалась, соответствие между КЭД и экспериментом оставалось безукоризненным. Ныне теоретические и экспериментальные результаты по-прежнему согласуются в пределах достигнутой точности, что означает совпадение более девяти знаков после запятой. Столь поразительное соответствие дает право считать КЭД наиболее совершенной из существующих естественнонаучных теорий.

Нужно ли говорить, что после подобного триумфа КЭД была принята как модель для квантового описания трех других фундаментальных взаимодействий. Разумеется, полям, связанным с другими взаимодействиями, должны соответствовать иные частицы-переносчики. Для описания гравитации был введен *гравитон*, играющий такую же роль, как фотон. При гравитационном взаимодействии двух частиц между ними происходит обмен гравитонами. Это взаимодействие можно представить наглядно с помощью диаграмм, напоминающих те, что показаны на рис. 12 и 13. Именно гравитоны переносят сигналы от Луны океанам, следуя которым те поднимаются во время приливов и опускаются при отливах. Гравитоны, снующие между Землей и Солнцем, удерживают нашу планету на орбите. Гравитоны накрепко приковывают нас к Земле.

Подобно фотонам, гравитоны движутся со скоростью света; следовательно, гравитоны — это частицы с «нулевой массой покоя». Но на этом сходство между гравитонами и фотонами кончается. В то время как фотон имеет спин 1, спин гравитона ра-

Таблица 4

Взаимодействие	Название частицы-переносчика	Заряд	Масса
Электромагнитное	Фотон	0	0
Гравитационное	Гравитон	0	0
Слабое	{ W <sup>±</sup> -частицы	±1	85
	{ Z-частица	0	95
Сильное	Глюон	0	0

Частицы-переносчики четырех фундаментальных взаимодействий. Масса выражена в единицах массы протона.

вен 2. Это важное различие, поскольку оно определяет направление силы: при электромагнитном взаимодействии одноименно заряженные частицы, например электроны, отталкиваются, а при гравитационном — все частицы притягиваются друг к другу.

Гравитоны могут быть реальными и виртуальными. Реальный гравитон — это не что иное, как квант гравитационной волны, подобно тому как реальный фотон — квант электромагнитной волны. В принципе реальные гравитоны можно «наблюдать». Но поскольку гравитационное взаимодействие невероятно слабое, гравитоны не удается детектировать непосредственно. Взаимодействие гравитонов с другими квантовыми частицами настолько слабое, что вероятность рассеяния или поглощения гравитона, например, протоном бесконечно мала.

Основная идея обмена частицами-переносчиками распространяется и на остальные взаимодействия (табл. 4) — слабое и сильное. Однако в деталях имеются важные различия. Напомним, что сильное взаимодействие обеспечивает связь между кварками. Такую связь может создать силовое поле, сходное с электромагнитным, но более сложное. Электрические силы приводят к образованию связанного состояния двух частиц с зарядами противоположных знаков. В случае кварков возникают связанные состояния трех частиц, что свидетельствует о более сложном характере силового поля, которому соответствуют три разновидности «заряда». Частицы — переносчики взаимодействия между кварками, связывающие их попарно или тройками, называют *глюонами*.

В случае слабого взаимодействия ситуация несколько иная. Радиус этого взаимодействия чрезвычайно мал. Поэтому переносчиками слабого взаимодействия должны быть частицы с большими массами покоя. Энергию, заключенную в такой массе, приходится «брать в долг» в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, о котором уже шла речь на с. 50. Но поскольку «взятая в долг» масса (и, следовательно, энергия) столь велика, принцип неопределенности требует, чтобы срок погашения такого

кредита был чрезвычайно коротким — всего лишь около  $10^{-26}$  с. Столь короткоживущие частицы не успевают отойти особенно далеко, и радиус переносимого ими взаимодействия очень мал.

В действительности существуют два типа переносчиков слабого взаимодействия. Один из них во всем, кроме массы покоя, подобен фотону. Эти частицы называют Z-частицами. По существу Z-частицы представляют собой новую разновидность света. Другой тип переносчиков слабого взаимодействия, W-частицы, отличаются от Z-частиц наличием электрического заряда. В гл. 7 мы обсудим более подробно свойства Z- и W-частиц, которые были открыты лишь в 1983 г.

Классификация частиц на кварки, лептоны и переносчики взаимодействий завершает перечень известных субатомных частиц. Каждая из названных частиц играет свою, но решающую роль в формировании Вселенной. Не будь частиц-переносчиков, не существовало бы и взаимодействий, и каждая частица осталась бы в неведении относительно своих партнеров. Не могли бы возникнуть сложные системы, любая деятельность была бы невозможна. Без кварков не было бы ни атомных ядер, ни солнечного света. Без лептонов не могли бы существовать атомы, не возникли бы химические структуры и сама жизнь.

### Каковы задачи физики элементарных частиц?

Влиятельная британская газета «Гардиан» однажды опубликовала редакционную статью, в которой ставится под вопрос целесообразность развития физики элементарных частиц — дорогостоящего предприятия, которое поглощает не только заметную долю национального бюджета науки, но и львиную долю лучших умов. «Знают ли физики, что они делают? — вопрошала «Гардиан». — Если даже знают, то какая от этого польза? Кому, кроме физиков, нужны все эти частицы?».

Через несколько месяцев после этой публикации мне довелось присутствовать в Балтиморе на лекции Джорджа Киурта, советника президента США по науке. Киурт также обратился к физике элементарных частиц, но его лекция была выдержана в совершенно другом тоне. Американские физики были под впечатлением недавнего сообщения из ЦЕРНа, ведущей Европейской лаборатории по физике элементарных частиц, об открытии фундаментальных W- и Z-частиц, которые удалось, наконец, получить на большом протон-антипротонном ускорителе на встречных пучках (коллайдере). Американцы привыкли, что все сенсационные открытия совершаются в их лабораториях физики высоких энергий. Не является ли то, что они уступили пальму первенства, признаком научного и даже национального упадка?



У Киурта не вызывало сомнений, что для процветания США вообще и американской экономики в частности необходимо, чтобы страна занимала передовые рубежи в научных исследованиях. Основные проекты фундаментальных исследований, заявил Киурт, находятся на острие прогресса. Соединенные Штаты должны вернуть свое превосходство в области физики элементарных частиц.

На той же неделе по информационным каналам понеслись сообщения об американском проекте гигантского ускорителя, предназначенного для проведения нового поколения экспериментов по физике элементарных частиц. Основные затраты предусматривались в размере 2 млрд. долл., что делало этот ускоритель самой дорогой машиной из когда-либо построенных человеком. Этот гигант дядюшки Сэма, по сравнению с которым даже новый ускоритель ЦЕРНа ЛЭП покажется карликом, настолько велик, что внутри его кольца могло бы целиком разместиться государство Люксембург! Гигантские сверхпроводящие магниты предназначены для создания интенсивных магнитных полей, которые будут заворачивать пучок частиц, направляя его вдоль кольцевидной камеры; она представляет собой настолько огромное сооружение, что новый ускоритель предполагается разместить в пустыне. Хотелось бы знать, что думает по этому поводу редактор газеты «Гардиан».

Известная под названием Сверхпроводящий суперколлайдер (Superconducting Super Collider, SSC), но чаще именуемая «десертрон» (от англ. *desert* — пустыня. — *Ред.*), эта чудовищная машина сможет ускорять протоны до энергий, примерно в 20 тыс. раз превышающих энергию (массу) покоя. Эти цифры можно интерпретировать по-разному. При максимальном ускорении частицы будут двигаться со скоростью всего на 1 км/ч меньше скорости света — предельной скорости во Вселенной. Релятивистские эффекты при этом столь велики, что масса каждой частицы в 20 тыс. раз больше, чем в состоянии покоя. В системе, связанной с такой частицей, время растянуто настолько, что 1 с соответствует 5,5 ч в нашей системе отсчета. Каждый километр камеры, по которой проносится частица, будет «казаться» ей сжатым всего лишь до 5,0 см.

Что за крайняя нужда заставляет государства расходовать столь огромные ресурсы на все более разрушительное расщепление атома? Есть ли какая-нибудь практическая польза в таких исследованиях?

Любой большой науке, безусловно, не чужд дух борьбы за национальный приоритет. Здесь так же, как в искусстве или спорте, приятно завоевывать призы и мировое признание. Физика элементарных частиц стала своего рода символом государственной мощи. Если она развивается успешно и дает ощутимые резуль-

таты, то это свидетельствует о том, что наука, техника, равно как и экономика страны в целом, находятся в основном на должном уровне. Это поддерживает уверенность в высоком качестве продукции других отраслей технологии более общего назначения. Для создания ускорителя и всего сопутствующего оборудования требуется очень высокий уровень профессионализма. Накопленный при разработке новых технологий ценный опыт может оказать неожиданное и благотворное влияние на другие направления научных исследований. Например, научно-исследовательские разработки по сверхпроводящим магнитам, необходимым для «дезертрона», проводятся в США на протяжении двадцати лет. Тем не менее они не приносят прямой выгоды и поэтому их трудно оценить. А нет ли каких-нибудь более ощутимых результатов?

В поддержку фундаментальных исследований иногда приходится слышать и другой аргумент. Физика, как правило, опережает технологию примерно на пятьдесят лет. Практическое применение того или иного научного открытия поначалу отнюдь не очевидно, однако лишь немногие из значительных достижений фундаментальной физики не нашли со временем практических приложений. Вспомним теорию электромагнетизма Максвелла: мог ли ее создатель предвидеть создание и успехи современных телекоммуникации и электроники? А слова Резерфорда о том, что ядерная энергия вряд ли когда-нибудь найдет практическое применение? Можно ли предсказать, к чему способно привести развитие физики элементарных частиц, какие удастся обнаружить новые силы и новые принципы, которые расширят наше понимание окружающего мира и дадут нам власть над более широким кругом физических явлений. А это может привести к развитию не менее революционных по своему характеру технологий, чем радио или ядерная энергетика.

Большинство разделов науки в конечном итоге находили и определенное военное применение. В этом отношении физика элементарных частиц (в отличие от ядерной физики) пока оставалась неприкосновенной. По случайному стечению обстоятельств лекция Киурта совпала с рекламной шумихой вокруг предложенного президентом Рейганом спорного проекта создания противоракетного, так называемого пучкового, оружия (данный проект является частью программы, получившей название «Стратегическая оборонная инициатива», СОИ). Суть этого проекта в использовании против ракет противника пучков частиц высокой энергии. Такое применение физики элементарных частиц выглядит поистине зловещим.

Преобладает мнение, что создание подобных устройств неосуществимо. Большинство ученых, работающих в области физики элементарных частиц, считают эти идеи абсурдными и противоречивыми, резко высказываются против предложения прези-

дента. Осудив ученых, Киурт призвал их «поразмыслить над тем, какую роль они могут сыграть» в реализации проекта пучкового оружия. Это обращение Киурта к физикам (конечно, чисто случайно) последовало за его словами относительно финансирования физики высоких энергий.

По моему твердому убеждению, физикам, работающим в области высоких энергий, нет нужды оправдывать необходимость фундаментальных исследований ссылками на приложения (особенно военные), исторические аналоги или смутные обещания возможных технических чудес. Физики проводят эти исследования прежде всего во имя своего неистребимого желания узнать, как устроен наш мир, стремления более детально понять природу. Физика элементарных частиц не имеет себе равных среди других видов человеческой деятельности. На протяжении двух с половиной тысячелетий человечество стремилось найти изначальные «кирпичики» мироздания, и теперь мы близки к конечной цели. Гигантские установки помогут нам проникнуть в самое сердце материи и вырвать у природы ее сокровеннейшие тайны. Человечество может ожидать неожиданные приложения новых открытий, неведомые ранее технологии, но может оказаться, что физика высоких энергий ничего не даст для практики. Но ведь и от величественного собора или концертного зала немного практической пользы. В этой связи нельзя не вспомнить слова Фарадея, заметившего как-то: «Что толку от новорожденного?». Далекie от практики виды человеческой деятельности, к коим относится и физика элементарных частиц, служат свидетельством проявления человеческого духа, без которого мы были бы обречены в нашем излишне материальном и прагматичном мире.

## Укрощение бесконечности

---

### Путь к объединению

Посещение физической лаборатории при большом ускорителе всегда оставляет неизгладимое впечатление. Сотни ученых, инженеров обслуживающего персонала, концентрация талантов, обеспечивающих бесперебойную работу небольшого числа гигантских машин чудовищной мощи и сложности; дерзновенность замысла и его свершения, ощущение прикосновения к неизвестному — все это создает в наиболее чистом виде представление о науке.

Когда осенью 1982 г. я посетил ЦЕРН, чтобы прочитать там несколько лекций, мне сразу стало ясно, что вот-вот должно произойти нечто необычное. Там господствовала атмосфера приподнятости, ожидания и ощущения, что важные открытия где-то совсем рядом. Внешне все шло как обычно: суета в коридорах, ученые спешили к экспериментальным установкам или на семинары, гости из дальних стран увлеченно беседовали с коллегами или проглядывали последнюю информацию, теоретики терпеливо выписывали уравнения на досках или на бесконечных листах бумаги, секретарши склонялись над пишущими машинками, лаборанты колдовали над проводами и электронными лампами, в кафетерии во время завтрака не умолкали шум и гам. В ЦЕРНе всегда проводится одновременно много экспериментов. Сами ускорители, скрытые в бетонных параллелепипедах зданий или в подземных туннелях, внешне не подают никаких признаков жизни. Случайному прохожему и в голову не придет, какие силы вызываются из недр этих технических титанов.

Самой большой из машин ЦЕРНа в то время был протон-антипротонный ускоритель на встречных пучках, коллайдер, — кольцеобразная камера длиной в несколько километров, внутри которой циркулировали навстречу друг другу протоны и антипротоны. Пучки частиц, ускоренных до нужной энергии, направляли так, чтобы произошло лобовое столкновение. Происходила аннигиляция протонов и антипротонов, а из освобождавшейся

при этом энергии рождались потоки новых частиц, разлетающихся во все стороны от точки столкновения. Для обнаружения следов частиц обычно используются специальные электронные устройства, которые срабатывают при прохождении через них электрически заряженных тел. С помощью системы таких устройств экспериментатору удастся восстанавливать трехмерную картину столкновения. Протоны и антипротоны поступают в ускоритель из периферийных устройств, одно из которых предназначено для получения антипротонов и хранения их в магнитном накопительном кольце перед инъекцией в коллайдер. Возглавлял работу итальянский физик Карло Руббиа. Осенью 1982 г. Руббиа был героем дня.

Хотя коллайдер только выходил на расчетный режим, нетерпеливые физики увлеченно пытались предугадать, с какими процессами им придется иметь дело при столкновениях частиц в неисследованном пока диапазоне энергий. Но вступая на территорию, которой еще не было на карте, группа из ЦЕРНа все же имела путеводную нить — теорию, и в ней заметно выделялся один ранее намеченный ориентир. Если вычисления были правильными, то физикам со дня на день предстояло впервые увидеть частицу нового типа — так называемую W-частицу, переносчика слабого взаимодействия. Предсказанная пару десятилетий назад, W-частица еще никем не наблюдалась. Подтверждение ее существования означало бы первый шаг на пути к суперсиле.

В декабре 1982 г. у экспериментаторов рассеялись последние сомнения. По всему миру ползли слухи. Но только в середине января 1983 г. Руббиа пригласил прессу и объявил об открытии W-частицы.

В сущности, цель науки — это поиск единства. Научный метод обязан своими значительными успехами способности ученых связывать разрозненные фрагменты знания в единую картину. Отыскивать связующее звено — одна из главных задач научного исследования. Выявление Ньютоном связи между гравитацией и движением планет ознаменовало собой рождение научной эры. Выявление связи между болезнетворными микробами и заболеваниями положило начало современной медицине как истинной науке. Установление связи термодинамических свойств газа с хаотическим движением молекул поставило на прочную основу атомную теорию вещества. Обнаружение связи между массой и энергией проложило путь к ядерной энергии.

Всякий раз, когда ученым удается установить новые связи, расширяется понимание окружающего мира и возрастает наша власть над ним. Новые связи не просто объединяли наши познания — они указывали путь к ранее не известным явлениям. Связи — это одновременно и синтез знания, и стимул, направляющий научные исследования по новым, непроторенным дорогам.

Фундаментальная физика всегда прокладывала путь к единству знания. Но все происходившее в физике с начала 70-х годов не сравнимо ни с чем. По-видимому, мы стоим на пороге более могущественного и глубокого объединения, чем когда-либо ранее. Среди физиков растет убеждение, что начинают вырисовываться контуры не более и не менее как единой теории всего сущего.

Подобные теории отнюдь не новость. Большинство религий претендуют на описание естественного и потустороннего миров в их космическом единстве. Но религиозные космологии уходят корнями в древнюю мудрость, божественное откровение и теологические хитросплетения. Среди них нет и двух одинаковых.

Научные теории такого сорта редки, хотя и встречаются. Английский астроном Артур Эддингтон, например, пытался построить всеобъемлющее описание материи, силы и возникновения Вселенной в книге «Фундаментальная теория», опубликованной в 1946 г. Но претенциозные идеи Эддингтона были во многом лишь мечтой одинокого и, возможно, несколько эксцентричного ученого. Ныне же впервые научный эксперимент и теория достигли такого уровня, когда стало реальным создание полной теории Вселенной, которая опирается на общепринятые и допускающие проверку гипотезы.

Главный толчок столь существенному продвижению был дан исследованиями фундаментальных взаимодействий в природе. В гл. 5 мы рассказали, что физики различают четыре фундаментальных взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное. Еще в середине прошлого столетия Максвелл создал единую электромагнитную теорию, охватившую как электрические, так и магнитные явления. Затем в 20-х годах нашего века Эйнштейн предпринимал систематические попытки объединить электромагнетизм с его теорией гравитации (общей теорией относительности).

Но вскоре его увлекли другие события. Были открыты ядерные силы — сильное и слабое взаимодействия, и при любой попытке объединить силы природы приходилось считаться уже не с двумя, а с четырьмя фундаментальными взаимодействиями. Однако увлеченность идеей единого описания не прошла. Почему должно быть четыре различных фундаментальных взаимодействия? Перспектива описания всего происходящего в природе на основе одной-единственной суперсилы оставалась привлекательной, но неопределенно далекой мечтой. Ныне осуществление этой мечты — дело отнюдь не отдаленного будущего. Вскоре она вполне может стать реальностью.

Решающий шаг на пути к единой теории был сделан в конце 60-х годов. К тому времени теоретики добились невиданных успехов в применении квантовой теории к полям. Представление о поле возникло столетием раньше, успев доказать свою полез-

ность в широком диапазоне практических приложений, в частности в радиотехнике. Соединение квантовой механики с электромагнитным полем привело непосредственно к квантовой электродинамике (КЭД), обладающей легендарными точностью и предсказательной силой.

Что касается трёх остальных взаимодействий, то тут, к сожалению, нельзя было похвастаться аналогичными достижениями. Квантовая теория гравитации, в которой переносчиками гравитационного взаимодействия служат гравитоны, завязла в математических трудностях. Природа слабого взаимодействия по-прежнему оставалась во многом непонятной. По поводу существования  $Z$ -частиц не было единого мнения, а описание с помощью обмена только  $W$ -частицами давало разумные результаты лишь в случае простейших процессов при низких энергиях. Еще менее понятной казалась природа сильного взаимодействия. К тому времени стало ясно, что все адроны, в частности протоны и нейтроны, вовсе не элементарные частицы, хотя теория кварков еще не имела прочного фундамента. Взаимодействие адронов выглядело очень сложным, но никто не знал, как моделировать внутреннюю структуру адронов, чтобы получить более простое описание.

Таким образом, в 60-е годы каждое из четырех взаимодействий описывалось своей теорией, и из них только одну, а именно КЭД, можно было считать во всех отношениях удовлетворительной. Теоретики стали размышлять, в чем же секрет КЭД. Какими особенностями электромагнитного поля, не свойственными другим силовым полям, обусловлен успех квантового описания? Если бы удалось выявить эти особенности, то теорию других взаимодействий можно было бы так видоизменить, чтобы включить в нее эти решающие факторы.

## Оживший вакуум

Пустое пространство кажется не очень перспективным объектом для исследования, однако именно в нем скрыт ключ к полному пониманию существующих в природе взаимодействий. Вакуум довольно легко представить наглядно. Это область пространства, из которой удалено решительно все — частицы, поля, волны. Достичь абсолютного вакуума практически невозможно. Даже в космическом пространстве всегда присутствует остаток газа или плазмы, а также реликтовое фоновое излучение, оставшееся от Большого взрыва. Однако ничто не мешает нам рассматривать идеализированный вакуум.

Когда физики приступили к разработке квантовой теории поля, оказалось, что вакуум совсем не такой, каким его долгое время представляли, — это не пустое безжизненное пространство, ли-

шенное вещества. Оказалось, что квантовая физика способна на «трюки» даже в отсутствие квантовых частиц.

Источник таких «трюков» — принцип неопределенности Гейзенберга, точнее его разновидность, относящаяся к энергии. В гл. 2 мы говорили о том, что квантовые эффекты могут приостанавливать действие закона сохранения энергии на очень короткое время. В течение этого промежутка времени энергия может быть взята «взаймы» на различные цели, в том числе на рождение частиц. Разумеется, все возникающие при этом частицы будут короткоживущие, так как израсходованная на них энергия должна быть возвращена спустя ничтожную долю секунды. Тем не менее частицы могут возникнуть из ничего, обретя мимолетное бытие, прежде чем снова исчезнуть. И эту скоротечную деятельность невозможно предотвратить. Как бы мы ни старались опустошить пространство, в нем всегда будет присутствовать рой мимолетных частиц, возникновение которых «субсидируется» соотношением Гейзенберга. Эти частицы-призраки нельзя наблюдать, хотя они могут оставить следы своего кратковременного существования. Они представляют собой разновидность «виртуальных» частиц, аналогичных переносчикам взаимодействий, но не предназначенных для получения или передачи сигналов. Возникнув из пустоты, они снова превращаются в нее, являя собой наглядное доказательство существования силового поля и оставаясь при этом бесплотными призраками.

То, что казалось пустым пространством, в действительности кишит виртуальными частицами. Вакуум не безжизнен и безлик, а полон энергии. «Реальную» частицу, например электрон, всегда необходимо рассматривать на фоне этой непрерывной активности. Перемещаясь в пространстве, электрон в действительности оказывается в окружности частиц-призраков — виртуальных лептонов, кварков и переносчиков взаимодействий, — плутая в этой неразберихе. Своим присутствием он вносит возмущение в непрерывную активность вакуума, которая в свою очередь оказывает воздействие на электрон. Даже в состоянии покоя электрон не знает покоя: со всех сторон его непрерывно штурмуют другие частицы, появившиеся из вакуума.

Если два электрона обмениваются фотоном, то это не что иное, как дополнительное возмущение в существовавшей ранее системе обменов. Описание взаимодействия частиц должно учитывать все эти дополнительные виртуальные кванты. В присутствии силовых полей полное состояние данной частицы включает процессы обмена двумя, тремя или большим числом частиц-посредников, которые взаимодействуют с частицами вакуума так, что исходная частица и частицы-посредники оказываются буквально облеплены виртуальными частицами. Происходит бесконечное количество взаимодействий, причем все в одно и то же мгновение.



На рис. 14 изображен сравнительно простой пример одного из процессов высокого порядка. Одна из частиц испускает виртуальный фотон, который затем порождает электрон-позитронную пару. Частицы этой пары в свою очередь обмениваются другим виртуальным фотоном, а затем аннигилируют, образуя еще один виртуальный фотон, который поглощается второй частицей. Эта диаграмма может быть лишь частью еще более сложной диаграммы, в которой две исходные частицы существуют лишь в течение какого-то промежутка времени, после чего превращаются еще во что-нибудь.

Графическое изображение взаимодействия всех частиц имеет вид паутины со сложными переплетениями, отражающими многочисленными обмены между виртуальными частицами различных сортов. Силовое поле никогда не бывает статическим. В нем всегда присутствуют частицы-призраки, снующие туда-сюда, возникающие и исчезающие, вплетенные в трепещущую ткань энергии.

На первый взгляд кажется, что бесконечная сложность всего происходящего исключает всякую надежду на понимание характера взаимодействий между реальными частицами, не говоря уже о возможности вычислений. К счастью, это впечатление обманчиво. Оказывается — во всяком случае в КЭД, — что по мере усложнения процессов их влияние на реальные частицы ослабевает. В рассмотренном примере рассеяния электрона на электроне основной вклад обусловлен обменом одним фотоном. Остальные процессы приводят лишь к небольшим поправкам. Обычно при вычислениях, если не требуется необыкновенно высокая точность, редко приходится учитывать вклад более чем трех-четырех простейших диаграмм.

Представим себе, что в вакуум с его непрерывной активностью попадает новая частица. Ее мгновенно окутывает трепещущий покров энергии. Его нельзя наблюдать непосредственно, но представим себе, что у нас есть магический микроскоп, позволяющий обнаруживать любые виртуальные кванты. Взглянув в такой микроскоп, мы увидим «голую» частицу. Пусть это будет электрон. У внешнего края облака, окружающего частицу, снуют туда-сюда

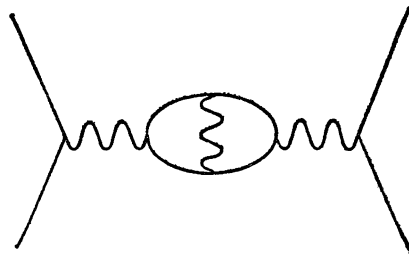


Рис. 14. Сложное взаимодействие двух частиц, обусловленное обменом виртуальным фотоном, который «по ходу дела» взаимодействует с другими виртуальными частицами.

фотоны низкой энергии, зондируя пространство вокруг электрона, плутая в полупрозрачном вакууме и сливаясь в заполняющее все пространство зыбкое море виртуальных квантов. По мере проникновения в облако, окружающее реальную частицу, возрастает энергия и активность виртуальных фотонов. Некоторые из фотонов время от времени превращаются в электрон-позитронные пары, которые вскоре вновь «сливаются» в фотон. Иногда происходит более сложный обмен, в котором участвует еще больше виртуальных частиц. Ближе к электрону облако буквально извергает энергию. Здесь фотоны перемешаны с более тяжелыми частицами; можно увидеть кварки, тяжелые лептоны и частицы — переносчики всевозможных взаимодействий.

Разглядывая открывающуюся в микроскоп картину под все большим увеличением, мы обнаружим, что по мере приближения к электрону энергия, заключенная в облаке, быстро и неограниченно возрастает. Это обстоятельство настораживает, ибо указывает на серьезный кризис.

### Чудо КЭД

Иногда говорят, что в науке каждый кризис приводит к рождению новой теории. Кризис, выявленный с помощью магического микроскопа, служит симптомом серьезного недостатка концепции поля. Несмотря на впечатляющие успехи, квантовая теория поля оказывается несостоятельной в одном решающем пункте.

Трудность, о которой идет речь, берет начало в классической физике. Планета, например Земля, создает гравитационное поле, которое действует, скажем, на Луну. Но кроме того, гравитационное поле Земли оказывает воздействие и на саму Землю. Почва у нас над ногами сдавлена собственным гравитационным полем Земли. Такое «самодействие» является неизбежным следствием теории поля.

Некогда полагали, что частица, подобная электрону, представляет собой уменьшенную копию Земли — крохотный твердый шарик с равномерно распределенным в нем электрическим зарядом. Подобно тому как Земля воздействует на себя собственной гравитацией, электрон должен воздействовать на себя своим электрическим полем. Однако гравитационное и электрическое взаимодействия имеют одно важное отличие: гравитация создает притяжение, которое удерживает вместе все части Земли; электрические силы внутри электрона создают отталкивание, которое стремится «разорвать» электрон на части. В этой связи возникает проблема: какие силы могли бы компенсировать электрическое отталкивание, обеспечив целостность электрона?

С появлением теории относительности представление электрона в виде крохотного твердого шарика столкнулось с допол-

нительной трудностью, обусловленной предположением, что электрон — это твердое тело. Представьте себе, что вы ударили по сферическому мячу, в результате чего мяч полетел в определенном направлении. Если бы мяч был абсолютно твердым, то он двигался бы, не меняя формы. Для этого все участки мяча должны начать двигаться одновременно. Но такое предположение противоречит принципу, утверждающему, что никакое физическое воздействие не может распространяться быстрее света. Часть поверхности мяча, удаленная от точки удара, не чувствует удара и поэтому не реагирует на него, по крайней мере, пока ударная волна (которая распространяется со скоростью меньше скорости света) не пробежит через мяч. Наоборот, область мяча, близкая к точке удара, должна начать двигаться раньше остальной части мяча. Следовательно, мяч изменит форму; он не может быть абсолютно твердым. А если электрон можно сдавить и расплющить, то в принципе его можно и разорвать на части. Но в таком случае он не был бы элементарной частицей. Мы могли бы увидеть кусочки заряженного вещества различных форм и размеров, хотя в действительности электроны неразличимы.

Чтобы избежать эту трудность, физики были вынуждены отказать от представления об электроне как абсолютно твердом шарике. Электрон стали рассматривать как точку не имеющую структуры и размеров. Хотя подобная модель несколько смягчает остроту вопроса о том, что удерживает вместе отдельные части электрона, возникает новая трудность. Создаваемая заряженным телом электрическая сила меняется в зависимости от расстояния по закону обратных квадратов. С приближением к источнику поле возрастает. В случае точечного источника поле растет до бесконечности. Это означает, что полная электрическая энергия такой системы будет бесконечной.

Бесконечная величина энергии поля точечного электрона, казалось бы, наносит смертельный удар теории поля: если бы электрон обладал бесконечной энергией, то он был бы бесконечно тяжелым, что абсурдно. Теоретики оказались перед выбором: либо отказаться от представления о точечном электроне, либо найти выход из тупика. И выход действительно был найден, хотя некоторые сочли его чем-то вроде жульничества. Он известен ныне как «перенормировка».

Представим себе, что мы как-то исхитрились «выключать» заряд электрона. С исчезновением заряда исчезнет и создаваемое им поле, и соответствующая электрическая энергия. То, что при этом осталось, уместно назвать «голым» электроном, с которого сорвано окутывающее его электромагнитное поле. Какова же масса «голового» электрона? *Наблюдаемая* масса реального электрона состоит как бы из двух частей — массы «голового» электрона и массы, соответствующей энергии электрического поля. Трудность за-

ключается в том, что масса, соответствующая энергии электрического поля, при вычислении оказывается бесконечной. Такой результат был бы бессмысленным, если бы мы действительно могли «выключить» электрический заряд электрона, поскольку ни одна физическая величина не может получать бесконечно большое приращение. Но заряд электрона нельзя выключить. Наблюдая электрон, мы воспринимаем его в целом: и поле, и все остальное. *Наблюдаемая* масса, разумеется, конечна. Так стоит ли всерьез беспокоиться, если вычисления показывают, что неотделимая часть массы электрона обращается в бесконечность?

Некоторых это действительно беспокоит, но не слишком серьезно. Возникновение в уравнениях теории бесконечных членов — своего рода предупреждение о том, что не все в порядке, но если бесконечности не появляются в наблюдаемых величинах, то их можно просто игнорировать и продолжить вычисления. При этом необходимо изгнать бесконечности из формул, чтобы продолжить пользоваться ими. Для этого теоретик просто смещает, «перенормирует», нулевую точку на шкале измерения масс, сдвигая ее на бесконечно большую величину. В какой-то степени это похоже на договоренность отсчитывать высоту полета самолета не от уровня моря, а от уровня земной поверхности, только в случае электрона такое смещение имеет бесконечную величину. При этом теоретик ссылается на то, что положение нуля несущественно, поскольку на шкале масс нет выделенного начала отсчета; любой сдвиг — даже на бесконечно большую величину — в нашей власти и ненаблюдаем в реальном, физическом мире.

Благодаря этому хитроумному приему из описания электрона удается исключить бесконечные члены, которые поначалу грозили низвести теорию до абсурда. Однако на этом неприятности, связанные с квантовым описанием точечного электрона, не кончились. Возникла проблема, связанная с природой виртуальных фотонов.

Как мы уже знаем, каждый электрон окружен облаком трепещущей энергии, которое содержит множество всевозможных виртуальных частиц. Рассмотрим подробнее, как возникает это облако. Первоначально виртуальные фотоны были введены, чтобы дать квантовое описание того, как один электрон сигнализирует другому, что собирается воздействовать на него. Однако изолированный электрон может воздействовать с помощью виртуальных фотонов и *на самого себя*. В классической теории подобное самодействие также существует и приводит к возникновению бесконечных членов в уравнениях, описывающих поведение точечного электрона. Квантовое описание самодействия, образно говоря, означает, что электрон посылает фотоны самому себе. Диаграмма, изображающая это самодействие, изображена на рис. 15. На ней показано, как испущенный электроном вир-



Рис. 15. Заряженная частица испускает, а затем поглощает виртуальную частицу. Подобные процессы приводят к самодействию (т. е. взаимодействию частицы с самой собой), которое наделяет заряженную частицу собственной энергией. Суммарная величина энергии, соответствующей таким петлям, обращается в бесконечность.



Рис. 16. Более сложные процессы самодействия также приводят к появлению в уравнениях члена с бесконечной энергией. В КЭД подобные члены, сколь бы сложны они ни были, можно устранить с помощью одной-единственной операции вычитания (перенормировки).

туальный фотон после непродолжительного путешествия в пространстве, возвращается назад и поглощается тем же электроном. Представление о подобном «круговороте» фотона может вызвать удивление. Но не следует забывать, что основанные на здравом смысле представления не имеют силы в квантовом мире, где крушение привычных устоев вполне обычно.

Таким образом, в квантовом описании электрона окружающее частицу электромагнитное поле следует рассматривать как облако виртуальных фотонов вокруг электрона, которое неотступно следует за ним, окружая его квантами энергии. Фотоны возникают и исчезают очень быстро. Фотоны, остающиеся вблизи электрона, в центре облака, имеют значительную энергию; при вычислении полной энергии фотонного облака она снова оказывается бесконечной.

Столкнувшись с такими результатами, теоретик может избавиться от бесконечно большой энергии, «перенормировав» ее, как это делалось в классической теории. Однако на этот раз все обстоит не так просто. Петля, изображенная на рис. 15, — лишь один из возможных процессов самодействия электрона. Возможны и более сложные петли самодействия, например изображенная на рис. 16. Здесь фотон создает «по дороге» виртуальную электрон-позитронную пару. Ясно, что по мере включения все более слож-

ных петель неограниченно растет число способов, которыми электрон может воздействовать на самого себя, испуская виртуальные частицы. Каждая из таких петель вносит собственный бесконечный вклад в энергию системы. Вклад каждой мыслимой паутины таких петель оказывается бесконечным. И вместо одной-единственной бесконечности, как в классической теории, теперь мы сталкиваемся при вычислениях с нескончаемой последовательностью бесконечно больших членов. Можно попытаться изгнать бесконечности на каждом шаге, искусственно вычитая бесконечный член, но стоит расправиться с одной бесконечностью, как тотчас возникает другая. Положение кажется безвыходным.

Но от столь мрачной перспективы спасает своего рода чудо. Если эту устрашающую последовательность бесконечных членов надлежащим (с точки зрения математики) образом «упаковать», то оказывается, что от всех бесконечностей можно избавиться сразу, одним махом. Единственное вычитание бесконечности, или перенормировка, позволяет устранить любую бесконечность, какой бы сложной петлей она ни создавалась. Разумеется, тридцать лет назад, когда это чудо возникло, доказать его эффективность стоило больших усилий. Не случись это, теория превратилась бы в бессмыслицу.

Естественно, теоретики были в восторге от достигнутого результата. Приятно сознавать, что метод действительно работает, что нет более ничего загадочного во взаимодействии электронов и фотонов. Физики назвали КЭД перенормируемой теорией и занялись проверкой слабых эффектов, обусловленных виртуальными частицами, которые получили столь убедительное экспериментальное подтверждение, например, в измеренном Лэмбом сдвиге уровней энергии атома водорода и малой поправке к собственному магнитному моменту электрона. Исключительное согласие теории с экспериментом на этом уровне описания показало, что виртуальные частицы и вакуумные эффекты — отнюдь не измышления теоретиков, не плод воображения. Они действительно необходимы, чтобы обеспечить точное описание атомного мира.

Вдохновленные этим замечательным успехом, теоретики обратились к другим типам взаимодействий с целью выяснить, не сработает ли и там перенормировка. Каждое силовое поле создает собственный набор бесконечных энергий (и других бесконечных величин). Физики надеялись, что чудесное исчезновение бесконечностей в КЭД повторится и в случае других взаимодействий.

К сожалению, их надежды не оправдались. Из четырех взаимодействий, существующих в природе, только электромагнитное, по-видимому, обладало чудесным свойством перенормируемости. Частицы-переносчики других взаимодействий (как мы представляем сегодня их природу) порождают бесконечное множество расходимостей, от которых не удается избавиться *одним махом*, как

в КЭД. Теоретики вернулись к доске, чтобы с мелом в руках попытаться понять, чем секрет успеха КЭД. Вскоре стало ясно, что он имеет отношение к симметрии.

### Симметрия указывает путь

Историк и писатель Ч. П. Сноу написал книгу о «двух культурах», которые существуют в современном технологическом обществе, — научной и художественной. Однако многие ученые обладают тонким художественным вкусом. Они великолепно разбираются в живописи и скульптуре, некоторые прекрасно играют на различных музыкальных инструментах, стремятся к глубокому пониманию стиля и красоты. Для ученых, особенно занимающихся теорией, сама наука может превратиться в вид искусства, тонкую смесь рационального и сверхъестественного.

В гл. 4 мы говорили о том, как эстетическое чутье влияет на развитие науки. Среди наиболее впечатляющих примеров роли эстетического начала — применение в фундаментальной физике симметрии в достаточно общем смысле. Действительно, в последние годы «симметричная лихорадка» завладела умами в ряде областей физики. Теперь уже ни у кого не вызывает сомнения, что именно симметрия служит ключом к пониманию природы взаимодействий. По убеждению физиков, все взаимодействия существуют лишь для того, чтобы поддерживать в природе некий набор абстрактных симметрий.

Какое отношение имеет взаимодействие, или сила, к симметрии? Само предположение о существовании подобной связи кажется парадоксальным и непонятным. Сила — это то, что действует на вещество или изменяет природу частиц. Симметрия — понятие, связанное с гармонией и соразмерностью форм.

Для ответа на поставленный вопрос уточним прежде всего, что понимается под симметрией. Обычно считается, что предмет обладает симметрией, если он остается неизменным в результате той или иной проделанной над ним операции. Сфера симметрична, потому что выглядит одинаково при повороте на любой угол относительно ее центра. Арка собора симметрична, поскольку не меняет своего вида при перестановке правого и левого относительно вертикальной оси. Законы электричества симметричны относительно замены положительных зарядов отрицательными и наоборот. Число примеров можно легко увеличить.

Симметрии, на которых основан пересмотр нашего понимания четырех фундаментальных взаимодействий, совершенно особого рода. Это так называемые калибровочные симметрии. Некоторые простые примеры проявления этих абстрактных симметрий, например инвариантность законов механики относительно изменения отсчета (нулевого уровня) высоты, были приведены в гл. 4. Калибровочные симметрии связаны с идеей калибровки путем

изменения отсчета уровня, масштаба или значения физической величины. Система обладает калибровочной симметрией, если ее природа остается неизменной при такого рода преобразовании. Попробуем на простом примере разобраться, как абстрактное понятие калибровочного преобразования можно связать с более конкретным представлением о физической силе.

Представьте себе, что вы находитесь на борту космического корабля, летящего равномерно и прямолинейно в мировом пространстве вдали от планет и других небесных тел. Вы не ощущаете ни действия каких-либо сил, ни самого движения. Вы пребываете в состоянии полной невесомости и свободно парите в кабине. Вообразить такую картину не составляет особого труда.

Теперь подвергнем этот сценарий калибровочному преобразованию. Иначе говоря, попытаемся изменить описание путем калибровочного преобразования, т. е. изменения масштаба, некоторой величины, в данном случае — расстояния. Предположим, что космический корабль по-прежнему движется в пространстве с постоянной скоростью, но уже по траектории, проходящей параллельно предыдущей на расстоянии 1 км от нее. Что означало бы такое калибровочное преобразование для пассажира космического корабля? Ровно ничего, если говорить о силах. Пассажир испытывал бы те же ощущения, что и в предыдущем сценарии. Точнее, поведение физических объектов вокруг пассажира абсолютно не зависит от того, по какой прямолинейной траектории движется корабль. Ясно, что в этом примере проявляется некая симметрия. Ее можно выразить утверждением, что законы физики инвариантны (т. е. неизменны) относительно параллельного переноса (или сдвига) при калибровке расстояния. Но пока силы по-настоящему не участвовали в нашем рассмотрении.

При калибровочном преобразовании траектория космического корабля оставалась прямолинейной. Пространственный сдвиг был *одинаков* у всех точек траектории. Иначе говоря, калибровочное преобразование было всюду одинаковым — подобное преобразование физики называют «глобальным» калибровочным преобразованием. Глобальный характер важен: если бы калибровочное преобразование непрерывно изменялось вдоль траектории космического корабля, то преобразованная траектория представляла бы собой извилистую линию. У космического корабля, запрограммированного для полета по такой траектории, должны были бы непрерывно работать двигатели, а пассажира при каждом маневре бросало бы из стороны в сторону. Он испытывал бы действие сил. Маневрирование сказалось бы на поведении всех физических объектов внутри корабля. Калибровочные преобразования, изменяющиеся от точки к точке, известны под названием «локальных» калибровочных преобразований. Совершенно очевидно, что законы физики не инвариантны относительно локальных калибро-



вочных преобразований, искривляющих траекторию космического корабля и причиняющих пассажиру столько неприятностей. А может быть, они все же инвариантны?

Для простоты предположим, что после калибровочного преобразования космический корабль запрограммирован для полета по круговой траектории с постоянной скоростью. Астронавт ощущает кривизну траектории, так как уже не находится в состоянии невесомости. Теперь он не будет свободно парить — центробежная сила прижимает его к стенкам корабля. Физические явления на борту космического корабля, движущегося по круговой орбите, существенно отличаются от того, что происходит на борту корабля, движущегося равномерно и прямолинейно.

Представьте себе, что вы и есть тот астронавт, который опирается на борту корабля круг за кругом в космическом пространстве. Вы засыпаете и, проснувшись, обнаруживаете, что снова находитесь в невесомости. «Должно быть, — подумаете вы, — космический корабль снова летит равномерно и прямолинейно». Но выглянув в иллюминатор, вы к своему удивлению увидите вокруг себя звезды. Каким образом, двигаясь по окружности, можно оставаться в состоянии невесомости? Посмотрев в иллюминатор на противоположной стене, вы поймете причину: корабль движется по круговой орбите вокруг планеты.

Одна из наиболее занимательных картин в реальном космическом полете — свободное парение астронавта в состоянии почти полной невесомости при движении космического корабля по орбите вокруг Земли. То, что испытывает при этом реальный астронавт, не отличимо от ощущений астронавта, движущегося в межзвездном пространстве равномерно и прямолинейно. В этом заключен глубокий физический принцип: явления, сопровождающие полет по криволинейной траектории вокруг планеты, ничем не отличаются от происходящих при равномерном и прямолинейном движении в глубоком космосе. Причина такого совпадения ясна: *гравитация* (тяготение) планеты в точности *компенсирует* эффекты, вызванные кривизной траектории космического корабля. Физики говорят в этом случае, что гравитация создает компенсирующее поле; она строго компенсирует отклонение системы от прямолинейного движения. Разумеется, мы выбрали простой пример кругового движения. В случае полета космического корабля по извилистой линии для компенсации понадобилось бы гораздо более сложное гравитационное поле. Но коль скоро траектория космического корабля задана, можно рассчитать и гравитационное поле, способное восстановить комфорт и невесомость пассажиров. В принципе гравитацию всегда можно использовать для устранения сильной тряски на неустойчивой траектории.

Из всего сказанного следует весьма важный вывод. Законы физики можно сделать инвариантными даже относительно *локаль-*

ных калибровочных преобразований, если ввести гравитационное поле для компенсации изменений от точки к точке. Физики предпочитают пользоваться обратным утверждением, а именно: гравитационное поле поддерживает в природе локальную калибровочную симметрию, возможность свободно изменять масштаб от точки к точке пространства. В отсутствие гравитации возможна только глобальная симметрия; не нарушая законов физики, можно только переходить от одной прямолинейной траектории к другой. При наличии гравитации возможно преобразование к траекториям любой формы без нарушения законов физики. Напомним, что под симметрией мы понимаем инвариантность относительно некоей операции. Симметрия, о которой только что говорилось, — это инвариантность законов физики относительно любых изменений формы траектории движения. С этой точки зрения гравитационное взаимодействие представляет собой проявление абстрактной симметрии, локальной калибровочной симметрии, лежащей в основе законов реального мира. Словно Творец сказал сам себе: «Мне так нравятся красота и симметрия! Прекрасно, если повсюду воцарится калибровочная симметрия. Да будет так! Но что я вижу? Попутно возникло и новое поле. Назовем его гравитацией».

Значение концепции калибровочной симметрии заключается в том, что благодаря ей создается не только гравитационное, а и все четыре фундаментальных взаимодействия, встречающиеся в природе. Все их можно рассматривать как калибровочные поля. В *квантовом* описании калибровочные поля связаны с частицами вещества и концепцию калибровочного преобразования следует расширить, связав с фазой квантовой волны, описывающей частицу. Входить в технические детали этой процедуры вряд ли стоит. Существенно другое: в природе существует целый ряд локальных калибровочных симметрий и необходимо соответствующее число полей для компенсации этих калибровочных преобразований. Силовые поля можно рассматривать как средство, с помощью которого в природе создаются присущие ей локальные калибровочные симметрии. С этой точки зрения, например, электромагнитное поле не просто определенный тип силового поля, существующего в природе, а проявление *простейшей из известных* калибровочных симметрий, совместимой с принципами специальной теории относительности. Калибровочные преобразования в этом случае соответствуют изменениям потенциала от точки к точке.

Интересно отметить, что физик-теоретик, ничего не знающий об электромагнетизме, но убежденный, что природа зиждется на симметрии, мог бы сделать вывод о существовании электромагнитных явлений, основываясь лишь на требовании простейшей локальной калибровочной симметрии и так называемой симметрии Лоренца—Пуанкаре специальной теории относительности, о которой мы упоминали в гл. 4. Используя математику и основываясь

только на существовании этих двух симметрий, теоретик смог бы построить уравнения Максвелла, не проведя ни единого эксперимента по электричеству и магнетизму и даже не подозревая об их существовании. При этом он, возможно, рассуждал бы так: коль скоро упомянутые симметрии — простейшие и наиболее тонкие, вряд ли природа не воспользовалась бы ими. Исходя из подобных чисто умозрительных соображений, теоретик пришел бы к выводу о существовании в реальном мире электромагнитных явлений. Он мог бы пойти и дальше: вывести все законы электромагнетизма, доказать существование радиоволн, возможность создания динамомашины и т. д., т. е. совершить все те открытия, которые в действительности были сделаны на основе реальных экспериментов. Могущество математического анализа, используемого для описания явлений природы, столь велико, что позволяет предвидеть такие особенности, о существовании которых мы и не помышляли.

Калибровочная симметрия — гораздо более важное понятие, чем просто изящный математический прием. В ней скрыт ключ к построению квантовых теорий взаимодействий, свободных от разрушительного действия бесконечных членов уравнений, о чем шла речь в предыдущем разделе. Калибровочная симметрия, как оказалось, тесно связана с перенормируемостью. Чудо КЭД основано на глубокой и простой симметрии, присущей электромагнитному полю. Это наводит на мысль о том, что трудности квантового описания трех других взаимодействий, по-видимому, связаны с тем, что нам не удалось обнаружить полный набор скрытых в них симметрий. Например, если бы теорию слабого взаимодействия можно было сформулировать на языке калибровочных полей, то это способствовало бы успешному построению квантового описания этого взаимодействия.

На первый взгляд, однако, кажется, что на пути к осуществлению такой программы возникает серьезное препятствие. Одна из особенностей калибровочных полей состоит в том, что эти поля — дальнедействующие. Возможность проведения калибровочных преобразований в любой точке требует, чтобы компенсирующие поля действовали во всем пространстве. Для гравитации и электромагнетизма, простирающихся в пространстве и оказывающих влияние на удаленные объекты, это нормально, но слабое взаимодействие существует только на очень малых расстояниях. На квантовом языке это означает, что гравитон и фотон имеют нулевые массы покоя, а переносчики слабого взаимодействия,  $W$  и  $Z$ -частицы, чрезвычайно массивны. Казалось, что это кладет конец всяким попыткам описания слабого взаимодействия на языке калибровочных полей. Но в 60-е годы в столь непровержимом на первый взгляд аргументе была обнаружена трещина, и в физике произошел один из случающихся время от времени гигантских скачков.

## Великая троица

---

### Новая сила

Оглядываясь на 70-е годы, историки будут рассматривать их как время, когда ученые обнаружили, что в природе вовсе не существует никаких четырех фундаментальных взаимодействий. Электромагнитное и слабое взаимодействия, при поверхностном взгляде весьма разные по своей природе, в действительности оказались двумя разновидностями единого — так называемого электрослабого — взаимодействия, о существовании которого никто и не подозревал.

Объединение этих двух сил стало исторической вехой на пути к суперсиле. Первый шаг сделал более ста лет назад Максвелл, объединив электричество и магнетизм. Электрослабая теория в окончательной форме была создана двумя физиками, работавшими независимо, — Стивеном Вайнбергом из Гарвардского университета и Абдусом Саламом из Империял-колледжа в Лондоне, — опиравшимися на более раннюю работу Шелдона Глэшоу. Теория электрослабого взаимодействия решающим образом повлияла на развитие физики элементарных частиц в последующие годы.

Суть теории Вайнберга и Салама состоит в описании слабого взаимодействия на языке концепции калибровочного поля. Этот шаг следовало предпринять еще до того, как появилась хоть какая-то надежда на унификацию. В предыдущей главе мы говорили, что понятие калибровочной симметрии является ключевым при построении теории взаимодействий, освобожденной от проблемы расходящихся членов.

Представляя слабое взаимодействие в виде калибровочного поля, мы должны исходить из того, что все частицы, участвующие в слабом взаимодействии, служат источниками поля нового типа — поля слабых сил, хотя мы не воспринимаем это поле непосредственно. Слабо взаимодействующие частицы, такие, как электроны и нейтрино, являются посетителями «слабого заряда», который аналогичен электрическому заряду и связывает эти частицы со слабым полем.

Если поле слабого взаимодействия рассматривать как калибровочное (т. е. как способ, которым в природе компенсируются локальные калибровочные преобразования), то первый шаг состоит в установлении точной формы соответствующей калибровочной симметрии. Как мы уже знаем, простейшей калибровочной симметрией обладает электромагнетизм. Не удивительно, что симметрия слабого взаимодействия гораздо сложнее чем электромагнитного, ибо сам механизм этого взаимодействия оказывается более сложным. При распаде нейтрона, например, в слабом взаимодействии участвуют частицы по крайней мере четырех различных типов (нейтрон, протон, электрон и нейтрино), и действие слабых сил приводит к изменению их природы (превращению одних частиц в другие за счет слабого взаимодействия). Напротив, электромагнитное взаимодействие не изменяет природы участвующих в нем частиц.

Это свидетельствует о том, что слабому взаимодействию соответствует более сложная калибровочная симметрия, связанная с изменением природы частиц. С калибровочной симметрией такого типа мы встречались в конце гл. 4. Она называлась симметрией изотопического спина, или изотопической симметрией. Первоначально изотопическая симметрия была разработана для описания сильного ядерного взаимодействия между протонами и нейтронами. Напомним, что калибровочное преобразование в этом случае соответствовало повороту некой волшебной ручки, превращающему протоны в нейтроны. Основная идея состояла в том, что ядерные силы инвариантны относительно таких воображаемых преобразований. Вайнберг и Салам, заимствовав идею изотопической симметрии из области ядерной физики, приспособили ее к совершенно другой области — *слабому* взаимодействию, дав его описание как калибровочного поля. По существу было использовано то же понятие симметрии, связанной со смешиванием различных частиц, но в данном случае речь шла о смешивании различных источников слабого взаимодействия, электронов и нейтрино.

Представим себе теперь, что у нас есть волшебная ручка, позволяющая превращать электроны в нейтрино и наоборот. По мере поворота ручки сродство с электроном у всех электронов постепенно убывает до тех пор, пока электроны не превращаются в нейтрино. Одновременно сродство с нейтрино у всех нейтрино также убывает, и все они превращаются в электроны. Разумеется, в действительности ничего подобного не происходит, но теоретики, исследуя уравнения, описывающие частицы и взаимодействия, могут изучать следствия подобных воображаемых превращений.

Только что описанная картина служит примером глобального калибровочного преобразования. Оно глобально, так как «поворот ручки» изменяет природу каждого электрона и каждого ней-

трино во всей Вселенной. В предыдущей главе мы видели, как переход от глобальной калибровочной симметрии к локальной приводит к возникновению силовых полей, необходимых для компенсации изменяющихся от точки к точке калибровочных преобразований. Меняя калибровку местоположения в каждой точке, мы пришли к необходимости ввести понятие гравитационного поля. Глобальное калибровочное преобразование, производимое волшебной ручкой, также можно превратить в локальное калибровочное преобразование. Вообразим, что в каждой точке пространства имеется своя волшебная ручка и что все ручки установлены в различных положениях. В таком случае для поддержания симметрии необходимы новые силовые поля, компенсирующие хаотическую установку ручек от точки к точке. Оказывается, что эти новые силовые поля точно описывают слабое взаимодействие. Соответствующая калибровочная симметрия гораздо сложнее, чем в случае электромагнитного взаимодействия; это усложнение выражается в том, что для поддержания симметрии необходимы три новых силовых поля, в отличие от единственного электромагнитного поля. Нетрудно получить и квантовое описание этих трех полей: должны существовать три новых типа частиц — переносчиков взаимодействия, по одному для каждого поля.

Насколько точно эти поля описывают слабое взаимодействие? Они призваны компенсировать изменение от точки к точке степени смешивания электронов и нейтрино. (Теория Вайнберга — Салама применима также к другим лептонам и кваркам.) Это означает, что при испускании или поглощении кванта поля, природа частицы тут же изменяется. Электрон может превратиться в нейтрино, нейтрино — в электрон. Именно так и происходит под действием слабых сил.

На рис. 17 показан типичный процесс, обусловленный слабым взаимодействием. Экспериментатор наблюдает его при столкновении (рассеянии) нейтрона ( $n$ ) и нейтрино ( $\nu_e$ ), когда обе частицы превращаются в протон ( $p$ ) и электрон ( $e$ ). При более детальном описании с использованием частиц-переносчиков  $d$ -кварк в нейтроне превращается в  $u$ -кварк (тем самым нейтрон превращается в протон) с испусканием виртуальной частицы (на диаграмме показана пунктиром), которая затем поглощается нейтрино (при этом нейтрино превращается в электрон). Так как протон обладает положительным электрическим зарядом, виртуальная частица должна уносить отрицательный заряд (по закону сохранения электрического заряда). Этот отрицательный заряд «оседает» на электроны. Отрицательно заряженный переносчик слабого взаимодействия получил название  $W^-$ -частицы. Должна существовать и положительно заряженная античастица  $W^+$ , которая служила бы переносчиком слабого взаимодействия, например, от антинейтрона к антинейтрино.

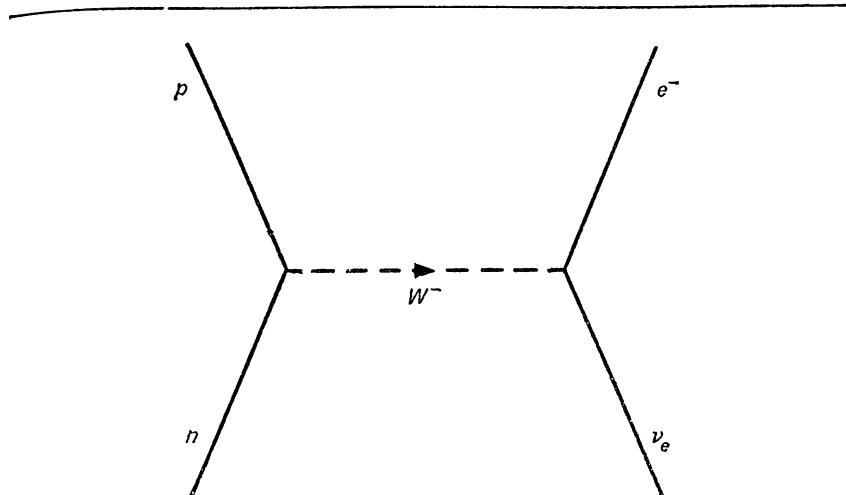
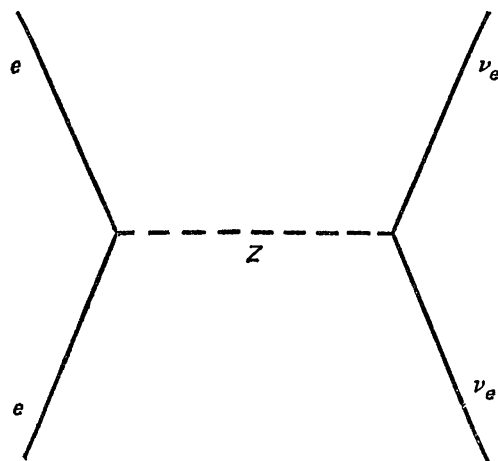


Рис. 17. В процессе слабого взаимодействия, происходящего при столкновении нейтрона ( $n$ ) с нейтрино ( $\nu_e$ ), они превращаются в протон ( $p$ ) и электрон ( $e^-$ ). Тщательный анализ показывает, что это превращение происходит в результате обмена тяжелой заряженной частицей (промежуточным векторным бозоном  $W^-$ ). Обмен  $W^-$  соответствует превращению нейтрона в протон, причем в момент испускания изменяется аромат одного из образующих нейтрон кварков ( $d \rightarrow u$ ).

Частицы  $W^+$  и  $W^-$  являются переносчиками двух из трех связанных со слабым взаимодействием полей, предсказанных теорией Вайнберга — Салама. Третье поле соответствует электрически нейтральной частице-переносчику, получившей название  $Z$ -частицы. Когда теория Вайнберга — Салама была сформулирована впервые, мысль о нейтральной частице — переносчике слабого взаимодействия была новой. Существование  $Z$ -частицы означало бы, что слабое взаимодействие могло бы не сопровождаться переносом электрического заряда. Пример такого процесса приведен на рис. 18: электрон и нейтрино рассеиваются, обмениваясь  $Z$ -частицей. В 1973 г. в длительном эксперименте, проведенном в ЦЕРНе, было продемонстрировано существование нейтральных переносчиков слабого взаимодействия. Этот результат поднял престиж теории Вайнберга — Салама.

Несмотря на столь счастливое согласие между теорией и экспериментом, описанию слабого взаимодействия как калибровочного поля еще предстояло преодолеть серьезное препятствие. Дело в том, что калибровочные поля по своей природе дальнедействующие, казалось, что теория неизбежно должна предсказывать нулевую массу покоя частиц-переносчиков, как в случае фотона. В действительности же слабое взаимодействие существует лишь на очень малых расстояниях, и частицы — переносчики слабого взаимодействия имеют огромную массу. Если в теории



**Рис. 18.** Теория Вайнберга—Салама предсказывает, что электроны могут рассеивать нейтрино, обмениваясь с ними электрически нейтральным переносчиком слабого взаимодействия — промежуточным векторным бозоном  $Z$ . Экспериментальное подтверждение такого процесса было получено в середине 70-х годов.

$W$ - и  $Z$ -частицам просто приписать какую-нибудь массу, то калибровочная инвариантность нарушится. Как наилучшим образом совместить несовместимое — калибровочную симметрию и частицы-переносчики с ненулевой массой покоя?

Решение этой головоломки было найдено Вайнбергом и Саламом в 1967 г. В основе его лежала остроумная идея, получившая название спонтанного нарушения симметрии. Вот как оно происходит.

Представим себе гладкую поверхность в форме мексиканского сомбреро, покоящегося на горизонтальном основании (рис. 19). Поместим на верхушку «сомбреро» шарик. В такой конфигурации система обладает очевидной симметрией, а именно: она не меняет своего вида при поворотах вокруг вертикальной оси, проходящей через центр шляпы. Если рассматривать только гравитацию, то никакого выделенного горизонтального направления здесь нет (гравитация действует по вертикали); все точки на полях сомбреро равнозначны.

Рассматриваемая система симметрична, но не устойчива. Стоит шарик тронуться с места, как он скатится вниз и остановится где-то на полях «сомбреро». Как только это произойдет, симметрия системы нарушится. Шарик остановится в определенном месте на полях шляпы, задав тем самым выделенное горизонтальное направление от центральной оси. Устойчивость оплачена нарушением симметрии. В устойчивой конфигурации исходная вращательная симметрия сил (в нашем случае — гравитации)



по-прежнему существует, но в скрытом виде. Наблюдаемое состояние системы не отражает симметрии тех взаимодействий, которые проявляются в системе.

Ту же общую идею использовали Вайнберг и Салам, хотя симметрия на этот раз была калибровочной, а не вращательной, и спонтанное нарушение соответствовало квантовому состоянию силовых полей. Таким образом, в теории Вайнберга и Салама поля по-прежнему обладают фундаментальной симметрией, но не могут нормально существовать в состоянии, обладающем этой симметрией, так как это состояние неустойчиво. Поэтому поле «выбирает» устойчивое состояние, в котором симметрия нарушена, а частицы — переносчики слабого взаимодействия обладают массой. Естественно, в деталях теория гораздо сложнее примера с «мексиканским сомбреро», но основная идея все та же: симметрия по-прежнему присуща фундаментальным законам, но не проявляется в реальном состоянии системы. Именно поэтому физикам не удавалось обнаружить эту крайне важную калибровочную симметрию в течение тридцати пяти лет исследований слабого взаимодействия.

Чтобы получить решающее спонтанное нарушение симметрии, Вайнберг и Салам ввели в теорию дополнительное поле — так называемое поле Хиггса (в честь Питера Хиггса из Эдинбургского университета, который ранее изучал спонтанное нарушение симметрии в физике элементарных частиц). Никто никогда не видел поля Хиггса, но его наличие может оказывать решающее влияние на поведение калибровочных полей. В примере с сомбреро симметричное состояние — с шариком на самой верхушке шляпы — неустойчиво. Шарик «предпочитает» скатиться на поля, так как

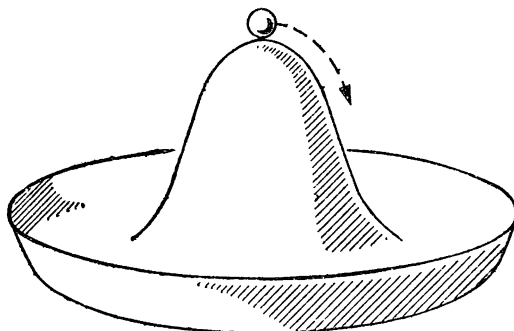


Рис. 19. Спонтанное нарушение симметрии. Шарик помещен на вершину поверхности, имеющей форму мексиканского сомбреро. Такая система обладает полной вращательной симметрией, но она неустойчива, и шарик самопроизвольно скатывается на поля «сомбреро», останавливаясь в произвольной точке. Вращательная симметрия при этом нарушается. Система обретает устойчивость ценой потери симметрии.

у состояния с нарушенной симметрией более низкая энергия. Аналогичным образом свойства поля Хиггса таковы, что состоянию с наименьшей энергией соответствует нарушение симметрии. Именно благодаря связи между полем Хиггса и калибровочными полями у  $W$ - и  $Z$ -частиц возникает масса. Теория Вайнберга — Салама предсказывает также существование частицы Хиггса — кванта поля Хиггса, или бозона Хиггса — с нулевым спином и большой массой.

Воспользовавшись идеей спонтанного нарушения симметрии, Вайнберг и Салам сделали следующий важный шаг, соединив электромагнетизм и слабое взаимодействие в единой теории калибровочного поля. Чтобы единая теория включала поля обоих типов, необходимо было начать с более сложной калибровочной симметрии, которая сочетает в себе и более простую калибровочную симметрию электромагнитного взаимодействия и изотопическую симметрию слабого взаимодействия. Таким образом, в теории Вайнберга — Салама представлено всего четыре поля: электромагнитное поле и три поля, соответствующие слабым взаимодействиям. Следующий шаг состоял во введении поля Хиггса, которое могло бы вызвать спонтанное нарушение симметрии. Первоначально  $W$ - и  $Z$ -кванты не имеют массы, но нарушение симметрии приводит к тому, что некоторые частицы Хиггса сливаются с  $W$ - и  $Z$ -частицами, наделяя их массой. По образному выражению Салама,  $W$ - и  $Z$ -частицы «поедают» частицы Хиггса, чтобы прибавить в весе. Фотоны не участвуют в этом процессе и остаются безмассовыми.

Теория Вайнберга — Салама великолепно объясняет, почему кажется, что электромагнитное и слабое взаимодействия обладают столь непохожими свойствами. В действительности фундаментальная структура их силовых полей во многом одинакова: и электромагнитное, и слабые поля — калибровочные. Различия в их свойствах обусловлены нарушением симметрии. Мы не замечаем калибровочную симметрию слабого поля, поскольку она скрыта от нас нарушением симметрии.

Между электромагнитным и слабым взаимодействиями есть еще одно существенное различие — это их величина. Почему слабое взаимодействие имеет столь малую величину? Теория Вайнберга — Салама объясняет это. Если бы симметрия не нарушалась, то оба взаимодействия были бы сравнимы по величине. Нарушение симметрии влечет за собой резкое уменьшение слабого взаимодействия. Действительно, величина слабого взаимодействия непосредственно связана с массами  $W$  и  $Z$ -частиц. Можно сказать, что слабое взаимодействие имеет столь малую величину потому, что  $W$ - и  $Z$ -частицы очень массивны.

После того как Вайнберг и Салам в конце 60-х годов опубликовали свою теорию, одна важная теоретическая проблема оста-

валась нерешенной. Будет ли теория Вайнберга — Салама перенормируемой? Произойдет ли чудо, позволившее КЭД избавиться от бесконечностей, с объединением электрослабых калибровочных полей? Решением этой проблемы в начале 70-х годов занялся Герхард 'т Хоофт из Утрехтского университета. Задача оказалась необычайно трудной. Потребовались сложные и громоздкие вычисления большого числа членов длинной последовательности, чтобы выяснить, где могут возникнуть серьезные бесконечности. В известной мере работу облегчало использование компьютера. Впоследствии 'т Хоофт поведал о том, с какой тревогой он изучал результаты, полученные с компьютера:

Несколько простых моделей дали обнадеживающие результаты. В этих особых случаях все бесконечности взаимно уничтожались независимо от числа калибровочных частиц, участвующих в обмене, и количества петель в диаграммах Фейнмана. Решающей могла бы стать проверка теории с помощью компьютерной программы, вычислявшей бесконечные члены во всех возможных диаграммах с двумя петлями. Результаты такой проверки были получены к июлю 1971 г.: программа выдала нескончаемую последовательность нулей. Все расходящиеся члены взаимно сократились.

Ясно, что решающее значение для исключения бесконечностей имела высокая степень симметрии, заложенная в электрослабой теории. Физики извлекли из этого хороший урок.

Теперь предстояло лишь выполнить окончательную экспериментальную проверку новой теории. Наиболее убедительная проверка заключалась в подтверждении существования пока еще гипотетических  $W$ - и  $Z$ -частиц.

В лабораторных условиях  $W$ - и  $Z$ -частицы в большинстве случаев не наблюдаемы. Они остаются виртуальными частицами — переносчиками взаимодействия, которыми обмениваются другие частицы. Но если сообщить системе достаточно большую энергию, то это позволит погасить «кредит Гейзенберга», обеспечивающий мимолетное существование  $W$ - и  $Z$ -частиц, и они могут обрести «реальность», т. е. разлетятся и будут существовать независимо. Так как  $W$ - и  $Z$ -частицы очень массивны (примерно в 90 раз массивнее протона), для их высвобождения требуется огромная энергия; поэтому наблюдать рождение и идентифицировать  $W$ - и  $Z$ -частицы стало возможным только с созданием очень больших ускорителей новейшего типа.

Открытие в 1983 г.  $W$ - и  $Z$ -частиц означало торжество теории Вайнберга — Салама. Не было больше нужды говорить о четырех фундаментальных взаимодействиях. Казавшиеся при поверхностном рассмотрении никак не связанными между собой электромагнитное и слабое взаимодействия в действительности были просто двумя компонентами единого электрослабого взаимодействия. За выдающиеся достижения Вайнберг и Салам были удостоены в 1979 г. Нобелевской премии по физике, разделив ее

с Шелдоном Глэшоу из Гарвардского университета, который ранее заложил основы этой теории.

Вдохновленные блестящими достижениями теории электро-слабого взаимодействия, физики заинтересовались возможностью дальнейшего объединения: а что если в природе существуют всего два фундаментальных взаимодействия или даже единственная суперсила? Незадолго до этого тщательному анализу подвергалось сильное взаимодействие.

### Цветные кварки и КХД

Вскоре после того, как успех теории Вайнберга — Салама стал очевиден, возникла идея дальнейшего объединения — слияния сильного взаимодействия с электрослабым. Но прежде чем такое объединение могло бы осуществиться, сильному взаимодействию следовало придать черты калибровочного поля. Мы уже знаем, что сильное взаимодействие можно представлять как результат обмена глюонами, который обеспечивает связь кварков попарно или тройками в адроны. Описание такого процесса на языке калибровочных полей можно построить, вновь воспользовавшись обобщенным представлением об изотопической симметрии.

Суть идеи состоит в следующем. Каждый кварк обладает аналогом электрического заряда, служащим источником глюонного поля. За неимением лучшего термина этот «заряд» назвали *цветом*. (Разумеется, это название не имеет никакого отношения к обычному цвету.) Электромагнитное поле порождается зарядом только одного сорта, а для создания более сложного глюонного поля потребовалось три различных цветовых заряда. Каждый кварк соответственно мог быть одного из трех возможных цветов, которые совершенно произвольно были названы красным, зеленым и синим.

Связанную с этими цветами калибровочную симметрию наглядно можно представить, снова воспользовавшись «волшебной ручкой», позволяющей смешивать цвета кварков. В данном случае ручка имеет *три* указателя цвета — красный, зеленый и синий (рис. 20), — а не два. Поворот ручки превращает красные кварки в зеленые или синие в зависимости от направления вращения. И в этом случае превращение происходит непрерывно: красный цвет постепенно переходит в синий и т. д.

Далее теория сильного взаимодействия развивается по тому же сценарию, что и теория слабого взаимодействия. Требование локальной калибровочной симметрии — инвариантности относительно изменений цвета в каждой точке пространства — приводит к необходимости введения компенсирующих силовых полей. Так как на этот раз «волшебная ручка» имеет не два, а три указателя,

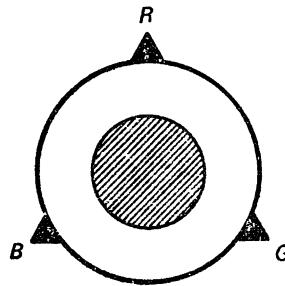
симметрия оказывается более сложной, что отражается в большем числе полей, необходимых для поддержания локальной калибровочной симметрии. Всего требуется *восемь* новых компенсирующих силовых полей. Частицами — переносчиками этих полей, разумеется, являются глюоны, и, таким образом, из теории следует, что должно быть восемь различных типов глюонов. Это изобилие резко отличается от одного-единственного переносчика электромагнитного взаимодействия (фотона) и трех переносчиков слабого взаимодействия ( $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z$ -частицы).

Антикварки бывают антикрасные, антизеленые и антисиние. Сами глюоны также несут различные цвета, но не чистые, а смешанные, например сине-антизеленый. Когда кварк испускает глюон, его цвет изменяется в зависимости от цвета глюона. Например, красный кварк может, испустив красно-антисиний глюон, изменить свой цвет на синий. Аналогично зеленый кварк, поглотив сине-антизеленый глюон, превращается в синий и т. д.

Итак, испускание или поглощение глюона сопровождается изменением природы кварка, например превращением красного кварка в зеленый. В этом отношении сильное взаимодействие напоминает слабое, при котором испускание  $W$ -частицы сопровождается, скажем, превращением электрона в нейтрино. Кварки участвуют как в сильном, так и в слабом взаимодействии, но изменение природы кварка, сопровождающееся испусканием переносчика слабого взаимодействия, отличается от того, что происходит с кварком при испускании глюона. В то время как глюоны изменяют *цвет* кварка, слабое взаимодействие изменяет его *аромат*. Например, при распаде нейтрона один из его  $d$ -кварков испускает  $W^-$ -частицу, превращаясь в  $u$ -кварк. Важно помнить, что кварки обладают и цветом, и ароматом, и не путать эти их характеристики.

В типичном адроне (например, в протоне) три кварка постоянно обмениваются глюонами, изменяя свой цвет. Однако такие изменения не носят произвольный характер. Математический аппарат теории накладывает жесткое ограничение в виде очень важного правила, которому должна неукоснительно следовать эта «игра

Рис. 20. Волшебная ручка с тремя указателями позволяет объяснить более сложную калибровочную симметрию, связанную с цветом кварков. Вращение ручки не сказывается на взаимодействии кварков (осуществляемом путем обмена глюона), но приводит к изменению цветов красного ( $R$ ), синего ( $B$ ) и зеленого ( $G$ ) кварков.



цветов». В любой момент времени «суммарный» цвет трех кварков должен представлять собой сумму «красный + зеленый + синий». Продолжая аналогию с реальным цветом, можно сказать, что комбинация цветов в адроне должна всегда давать белый цвет (смешение первичных цветов, красного, зеленого и синего, дает белый цвет). Итак, мы видим фундаментальную калибровочную симметрию «за работой». Действие глюонных полей компенсирует внутренние изменения цветов кварков, неизменно сохраняя чисто белым цвет адрона.

Адроны могут состоять из пар кварк — антикварк. Это так называемые мезоны. Так как антикварк характеризуется антицветом, такая комбинация заведомо бесцветна («белая»). Например, красный кварк в комбинации с антикрасным кварком образует бесцветный мезон. В этой схеме все лептоны также лишены цвета, поскольку не взаимодействуют с глюонным полем.

Квантовая теория цвета, или квантовая хромодинамика (КХД), великолепно объясняет правила, которым подчиняются комбинации кварков (первоначально, в 60-х годах, эти правила специально, *ad hoc*, вводились на каждый случай). С точки зрения КХД сильное взаимодействие есть не что иное, как стремление поддерживать абстрактную симметрию природы; в данном случае это сохранение белого цвета всех адронов при изменении цвета их составных частей. Стоит потребовать существования в природе такой абстрактной калибровочной симметрии, как неизбежно возникнут глюонные поля. Нам нет нужды измышлять их — они автоматически вытекают из математических выкладок.

Сильное взаимодействие имеет еще одну важную особенность, о которой пока не упоминалось. Когда теория кварков только появилась, казалось, что произвести экспериментальную проверку ее не очень сложно. Необходимо лишь раздробить адрон на части и продемонстрировать составляющие его кварки. Изолированный кварк должен сразу «бросаться в глаза», поскольку его электрический заряд составляет либо  $1/3$ , либо  $2/3$  заряда любой другой частицы.

С тех пор один за другим вступали в строй все более крупные ускорители, но «расщепить» адрон на составные части так и не удалось, и у физиков возникли сомнения в справедливости теории кварков. Действительно, коль скоро кварки существуют внутри протона, то должна же быть возможность выбить их оттуда при достаточно сильном соударении с протоном. Но даже при соударениях с энергией, многократно превосходящей его массу покоя, протон все равно никак не расщеплялся. При таких столкновениях появлялся лишь поток новых целехоньких адронов. Наблюдать отдельные кварки так и не удалось.

Альтернативная стратегия поиска кварков состояла в том, чтобы обратиться к самой природе. Если кварки существуют,

то разумно предположить, что где-то они возникли в природе. Возможно, что при образовании вещества сначала появились кварки, из которых затем возникли адроны. Не исключено, что при этом нескольким кваркам не хватило партнеров и они в одиночестве блуждают во Вселенной. Но если эта гипотеза верна, то в результате анализа обычного вещества можно обнаружить эти одиночные кварки, все еще блуждающие где-то неподалеку.

Таким анализом решил заняться Уильям Фейрбэнк из Стэнфордского университета. Он тщательно изучил небольшие образцы природных минералов, в частности ниобия, с целью выяснить, не содержат ли они частицы с электрическим зарядом  $1/3$  или  $2/3$ . Для этого Фейрбэнк наблюдал за поведением образцов в сильном электрическом поле. Он повторял тщательные эксперименты на протяжении ряда лет и не раз сообщал о положительных результатах. В некоторых образцах, по утверждениям Фейрбэнка, присутствовали частицы с дробным электрическим зарядом. Однако аналогичные эксперименты в других лабораториях не подтвердили результатов Фейрбэнка и многие физики относятся к его сообщениям скептически. Означает ли это, что у физиков есть сомнения относительно существования кварков? Отнюдь! Растет убеждение, что кварки могут существовать *только* внутри адронов. Если так, то должен быть закон природы, запрещающий существование изолированных кварков. Когда мы пытаемся «извлечь» кварк из адрона, что-то должно препятствовать его полному удалению из адрона. Возможно, таким препятствием оказывается глюонное поле. Очевидно, кварки внутри адрона связаны столь крепко, что никакие силы в мире не в состоянии разорвать эти связи и освободить кварки. Физики говорят, что кварки навсегда «заточены» внутри адронов, и называют придуманное впоследствии объяснение этого факта проблемой конфайнмента, или удержания.

### Суперклей

Главный вызов теории бросает проблема удержания кварков в рамках калибровочных полей. Если бы удалось создать отдельный кварк, то он обладал бы определенным цветовым зарядом — красным, зеленым или синим. Но поскольку кварки удерживаются внутри адронов, мы не наблюдаем первичных цветов, а только «белые», бесцветные, комбинации. Если удержание постоянно, то это означает, что по каким-то причинам природа запрещает появление «голового» цвета. Действует своеобразная цензура. Это объясняет, почему могут существовать изолированные лептоны, а не кварки: дело в том, что лептоны бесцветны.

А что произойдет, если попытаться просто-напросто силой вытолкнуть кварк из адрона? Каким суперклеем он удерживается там так прочно, что никогда не освобождается?

Важный ключ к разгадке природы взаимодействия между кварками был получен в экспериментах на СЛАКе (о которых мы упоминали ранее) при бомбардировке протонов электронами очень высоких энергий. Результаты экспериментов свидетельствовали о том, что на коротких расстояниях взаимодействие ослабевает и кварки по существу ведут себя, как свободные частицы. Более содержательную информацию удастся извлечь из свойств мезонов, в которых кварк и антикварк образуют связанную систему, напоминающую атом водорода. Исследуя возбужденные состояния атома водорода, можно сделать вывод, что, поскольку электрическая сила, действующая между протоном и электроном, подчиняется закону обратных квадратов, их взаимное притяжение быстро уменьшается с расстоянием. Аналогичные исследования возбужденных состояний мезонов свидетельствуют о прямо противоположной ситуации. Если две частицы удаляются на большое расстояние и переходят в состояние с более высокой энергией, взаимодействие между ними не ослабевает, а усиливается.

Из полученных результатов следует, что взаимодействие между кварками носит странный характер. Все известные взаимодействия ослабевают с увеличением расстояния, тогда как в случае сил, действующих между кварками, наблюдается обратная картина. Они ведут себя, как кусок резины, который сопротивляется растяжению тем сильнее, чем больше его растягивают, и становится свободным, когда концы сближаются. Другой аналогией может служить цепь — кажется, что кварки внутри адронов скованы цепями. Когда кварки находятся близко друг к другу, цепи не ощущаются, и кварки в узких пределах ведут себя свободно и независимо. Но стоит лишь одному из кварков предпринять «попытку к бегству», как цепь натягивается и резко тянет его назад. Физики называют эту ситуацию заточением или удержанием кварков.

Как только идея удержания кварков получила всеобщее признание, возникла мысль, способна ли КХД объяснить его. Вычисления оказались чрезвычайно трудными, хотя и выявили ряд обнадеживающих моментов. С физической точки зрения удалось в общих чертах понять, каким образом взаимодействие между кварками усиливается с ростом расстояния.

Основное различие между электромагнитным полем, в котором сила убывает с увеличением расстояния, и глюонным полем состоит в том, что фотоны не имеют электрического заряда. Если бы у них был электрический заряд, то мир изменился бы до неузнаваемости. В отличие от фотонов глюоны несут цветовой «заряд» в различных комбинациях, например в комбинации красно-антизеленый. Но цвет — источник сильного взаимодействия. Следовательно, глюоны не только соединяют кварки, но и стремятся соединиться друг с другом. Это существенно услож-



няет ситуацию, но тщательный анализ приводит к мысли, что эта универсальная «липкость» глюонов, возможно, является ключом к объяснению удержания кварков.

Чтобы уяснить это, нам придется вернуться к понятию квантового вакуума. Посмотрим прежде всего, что произойдет с электроном, если его поместить в вакуум. Напомним, что пространство вокруг электрона в действительности не пусто, а заполнено виртуальными частицами всевозможных сортов, в том числе виртуальными электронами и виртуальными позитронами. Хотя мы непосредственно не наблюдаем эти виртуальные частицы, известно, что они тем не менее существуют и могут создавать физические эффекты. Электрон, помещенный в вакуум, также «узнает» об их существовании, так как они «отзовутся» на его появление. Электрическое поле электрона внесет возмущения в поведение виртуальных электронов и позитронов на протяжении их недолгого существования. Виртуальные позитроны будут притягиваться к электрону под действием силы электрического притяжения, а виртуальные электроны — отталкиваться от него. В распределении заряда возникает смещение, называемое поляризацией. То, что пустое пространство в присутствии электрического поля может стать электрически поляризованным, является любопытным следствием квантовой теории. Трудно представить себе вакуум, обладающий электрическими свойствами, однако поляризация вакуума — эффект вполне реальный и его нетрудно измерить экспериментально.

Поляризация вакуума приводит к тому, что вокруг электрона в вакууме возникает своего рода экран, нейтрализующий действие электрического заряда. Избавиться от этого экрана электрон никак не может, поскольку он является неотъемлемой частью облака виртуальных частиц, окружающих все электроны. Вследствие экранирования эффективный заряд электрона издали кажется меньше реального. Введя зонд внутрь облака, мы почувствовали бы «голый» электрон, имеющий гораздо больший заряд. По мере проникновения зонда в облако мы обнаружим, что простой закон обратных квадратов, выполняющийся на некотором расстоянии от заряда, перестает быть справедливым из-за облака виртуальных позитронов, окутывающих электрон. Таким образом, поляризация вакуума, или вакуумная экранировка, может изменить характер зависимости силы от расстояния.

Экранировка возникает и в глюонном поле, где она приводит к изменению цветового заряда кварков. Виртуальные антикварки стремятся облепить кварк «противоположного» цвета. Например, красный кварк притягивает облако антикрасных антикварков. Как и в случае электромагнитного взаимодействия, происходит частичная нейтрализация цветового заряда. Однако на этот раз дополнительный вклад в поляризацию вакуума вносят глюоны.

Поскольку глюоны также обладают цветом, виртуальные глюоны в вакууме «откликаются» на присутствие кварка. Оказывается, что глюонное облако действует не так, как облако кварков: оно стремится не нейтрализовать, а усилить цветовой заряд центрального кварка. Поэтому действие виртуальных глюонов противоположно действию виртуальных кварков, и, как показывают детальные вычисления, глюоны одерживают верх: в итоге совместного действия виртуальных глюонов и кварков вакуум *усиливает* цветовой заряд центрального кварка, а не ослабляет его.

Это обстоятельство оказывает серьезное влияние на взаимодействие кварков. Когда кварк проникает в облако виртуальных частиц своего «партнера», эффективный цветовой заряд кварка внутри облака ослабевает, и взаимодействие уменьшается. Вторгшись внутрь облака, кварк избавляется от взаимодействия с другими кварками. Ослабевая, взаимодействие между кварками утрачивает свою силу. Подобная ситуация прямо противоположна той, с которой мы сталкиваемся в электромагнетизме, и как раз пригодна для объяснения пленения кварков.

Было бы преждевременно предсказывать КХД беспрецедентный успех, сопутствовавший КЭД на протяжении более сорока лет ее существования. Тем не менее достижения КХД весьма впечатляющи. Еще в 60-е годы физика адронов казалась запутанным переплетением сил и необузданных частиц. КХД распутала этот клубок, заложив простые основы теории адронов со сравнительно небольшим числом параметров.

## Великое объединение

С появлением КХД все существующие в природе взаимодействия, наконец, приобрели единое описание на основе калибровочных полей. Это принесло новые надежды. Успешное объединение слабого и электромагнитного взаимодействий в рамках теории калибровочных полей подсказало возможность дальнейшего объединения. В 1973 г. Шелдон Глэшоу и Говард Джорджи опубликовали теорию, в которой новое электрослабое взаимодействие сливалось в сильное (глюонное) в великое единое взаимодействие. Это была первая теория Великого объединения, ТВО. Ныне существует несколько конкурирующих ТВО, но все они основаны на одной и той же идее.

Если электрослабое и сильное взаимодействия в действительности представляют собой лишь две стороны великого единого взаимодействия, то последнему должно соответствовать калибровочное поле с детально разработанной симметрией, достаточно широкой, чтобы охватить все калибровочные симметрии, содержащиеся в КХД и теории Вайнберга — Салама. Отыскание такой симметрии — задача математики. Единой симметрии, которая об-

ладала бы всеми нужными свойствами, не существует, отсюда и обилие конкурирующих теорий. Тем не менее все ТВО имеют ряд общих особенностей.

Одна из них состоит в том, что кварки, источники (носители) сильного взаимодействия, и лептоны, источники (носители) электрослабого взаимодействия, включаются в единую теоретическую схему. До сих пор кварки и лептоны рассматривались как совершенно различные объекты, так что их включение в единую теорию было совершенно новой идеей. Оно ознаменовало еще один важный шаг на пути к объединению.

Калибровочные симметрии, входящие в ТВО, можно наглядно представить с помощью все той же «волшебной ручки», перемешивающей природу частиц, но с большим числом указателей. Вместо двух указателей, как в случае электрослабого взаимодействия, и трех — в случае КХД, теперь требуется пять указателей. От поворота ручки ТВО зависит очень многое. Ручки с пятью указателями позволяют делать то, что было не под силу ручкам с меньшим числом указателей: превращать кварки в лептоны и даже в антикварки, т. е. осуществлять переходы, абсолютно запрещенные в прежних теориях.

Как и прежде, требование, чтобы в природе с помощью компенсирующих полей соблюдалась абстрактная калибровочная симметрия (на этот раз более широкая), приводит нас к открытию (чисто теоретическому) новых типов полей, обладающих новыми свойствами, например способностью превращать кварки в лептоны. В простейшем варианте ТВО, предложенном Джорджи и Глэшоу, волшебная ручка связывает вместе красные, зеленые и синие  $d$ -кварки, позитрон и антинейтрино. Для этого требуется двадцать четыре поля. Двенадцать из квантов этих полей уже известны: фотон, две  $W$ -частицы,  $Z$ -частица и восемь глюонов.

Остальные двенадцать квантов — новые, объединенные общим названием  $X$ -частицы. Эти кванты соответствуют полям, поддерживающим более широкую калибровочную симметрию и перемешивающим кварки с лептонами (это соответствует положениям волшебной ручки, при которых происходит смешивание, например, красного  $d$ -кварка и позитрона). Следовательно, кванты этих полей,  $X$ -частицы, могут превращать кварки в лептоны (и наоборот), если те обмениваются ими как переносчиками взаимодействия. Электрический заряд  $X$ -частиц равен  $1/3$  и  $4/3$ .

Проследим теперь за судьбой типичного адрона, который испытывает на себе действие этих необычных  $X$ -частиц. В качестве такого адрона удобно выбрать протон, состоящий из двух  $u$ -кварков и одного  $d$ -кварка.  $d$ -Кварк смешивается с позитроном посредством великой калибровочной симметрии Великого объединения и может превращаться в позитрон путем обмена  $X$ -частицей с нужными характеристиками, в данном случае с надлежащим цветовым

зарядом и электрическим зарядом  $-\frac{4}{3}$ . Эта X-частица должна быть передана какой-то другой частице, которой может служить один из *u*-кварков протона. Поглощая X-частицу, *u*-кварк превращается в анти*u*-кварк.

Происходит нечто замечательное. То, что в самом начале было комбинацией двух *u*-кварков и одного *d*-кварка, превратилось в позитрон и пару кварк — антикварк. Позитрон не участвует в сильном взаимодействии и поэтому вылетает из адрона, тогда как оставшаяся пара кварк — антикварк образует уже не протон, а мезон (точнее, пион). С точки зрения экспериментатора, эта последовательность событий выглядит как *распад протона* на позитрон и пион.

На протяжении всей истории физики элементарных частиц неизбывным правилом всегда оставалась абсолютная стабильность протона. Ведь обычное вещество построено из протонов. Предсказание ТВО, что протон может оказаться нестабильным и распадаться, было ошеломляющим. Из него следует, что все вещество в конечном счете нестабильно и, следовательно, не вечно — вывод, безусловно, чрезвычайно глубокий.

В начале зимы 1974 г. я ехал на машине из Лондона на конференцию в Резерфордскую лабораторию, расположенную близ Оксфорда. Одним из моих попутчиков был Абдус Салам, и разговор зашел о содержании доклада, с которым он собирался выступить. Салам сказал, что у него есть кое-какие идеи о возможности распада протонов. Помню, что сама мысль о распаде протона смутила меня, и я отнесся к ней не без изрядной доли скептицизма. В назначенное время Салам сделал свой доклад, который оказался весьма пророческим. Но эта конференция запомнилась мне беседой с Стивеном Хокингом из Кембриджского университета, который сообщил о своем сенсационном открытии; ему удалось доказать, что черные дыры неустойчивы и в конце концов взрываются, создавая потоки радиации. Небезынтересно, что процесс Хокинга, как стало ясно автору открытия спустя несколько лет, может также вызвать распад протона. Квантовые эффекты позволяют протону путем спонтанного туннелирования превращаться в виртуальную черную дыру, которая затем испаряется (что описывается процессом Хокинга), испуская при этом позитрон. Однако распад протона через черную дыру менее вероятен, чем по схеме ТВО.

Ясно, что внезапное исчезновение протона — событие, которое не может не привлечь острого внимания специалистов по физике элементарных частиц; в этой связи возникает вопрос, почему распад протона не был открыт давным-давно. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо выяснить, какую *скорость* распада предсказывает теория. Исследование радиоактивности показывает, что период полураспада может изменяться в широких пределах

в зависимости от силы взаимодействия, вызывающего распад, и масс, участвующих в распаде частиц. В случае распада протона решающее значение имеет масса X-частицы, которая, согласно «правилам игры», определяет ее пробег. Если X-частица очень массивна, то сфера ее действия сильно ограничена. Чтобы произошел распад протона, два участвующих в нем кварка должны сблизиться на расстояние, при котором возможен обмен X-частицей, а это происходит чрезвычайно редко. По этой причине распад протона не наблюдался на опыте. Используя самые точные из имеющихся на сегодня оценок периода полураспада протона и решая обратную задачу, физики пришли к заключению, что масса X-частицы составляет примерно  $10^{14}$  масс протона, т. е. колоссальную величину, по сравнению с которой масса самой тяжелой из известных ныне частиц, Z, равная примерно 90 массам протона, пренебрежимо мала.

Прежде чем подробнее остановиться на столь ошеломляющей цифре, необходимо разрешить один кажущийся парадокс. Возможно, читателя обескуражит утверждение, что протон может содержать внутри частицу — переносчик взаимодействия, которая в  $10^{14}$  раз тяжелее его самого. Это кажущееся противоречие разрешает принцип неопределенности Гейзенберга. Напомним, что X-частица существует лишь короткое мгновение, на протяжении которого два кварка, сблизившиеся до очень малого расстояния, обмениваются ею. На протяжении столь коротких интервалов времени энергия, а следовательно, и масса будут иметь громадную неопределенность.

С помощью принципа неопределенности квантовая теория устанавливает связь между энергией (или массой) и расстоянием. Следовательно, масштаб масс автоматически определяет масштаб расстояний. Физические явления, происходящие в некотором пространственном масштабе, — это процессы, играющие важную роль при определенной энергии (или массе). Именно поэтому для исследования происходящего на малых расстояниях необходимы ускорители частиц очень высоких энергий. Масштаб масс X-частиц задает соответствующий пространственный масштаб — грубо говоря, расстояние, которое проходят X-частицы, перенося взаимодействие. Это расстояние равно примерно  $10^{-29}$  см. Таков пробег X-частиц; его величина говорит о расстоянии, на которое должны сблизиться два кварка, чтобы произошел обмен X-частицей, приводящий к распаду протона.  $10^{-29}$  см по сравнению с размером протона — это примерно то же, что пылинка по сравнению с Солнечной системой. Масштаб пространства, где господствуют ТВО и происходит распад протона, в триллионы раз мельче мира кварков и глюонов, который нам до сих пор удавалось исследовать с помощью ускорителей. Он напоминает вселенную внутри протона, которая недоступна нам в силу своей малости, как недоступны

внегалактические пространства из-за их удаленности. Для прямого зондирования этой Лилипутии пришлось бы построить ускоритель, превосходящий по своим размерам Солнечную систему.

Любая полная теория существующих в природе взаимодействий должна объяснять относительную величину каждого из них. Создатели ТВО быстро продемонстрировали, каким образом их теории могли бы объяснить огромное различие в величинах электрослабого и сильного взаимодействий. Реальная величина этих взаимодействий — не то, что измеряют экспериментаторы, наблюдая за превращениями субатомных частиц, поскольку, как уже говорилось, все источники различных полей экранируются вследствие поляризации вакуума. Экранировка приводит к тому, что электромагнитное взаимодействие на малых расстояниях усиливается, а сильное — ослабевает, и их величины выравниваются. Когда величина слабого взаимодействия подобрана так, чтобы произошло нарушение симметрии, это взаимодействие вклинивается между двумя другими и, подобно сильному взаимодействию, испытывает антиэкранировку, т. е. ослабевает на малых расстояниях. Интересно оценить, на каком расстоянии все три взаимодействия станут сравнимы по величине. Оно снова оказывается равным примерно  $10^{-29}$  см, т. е. в точности совпадает с масштабом расстояний, соответствующим массе Х-частиц. Приятное совпадение.

Результат этого анализа заключается в следующем: при ультравысоких энергиях (что эквивалентно ничтожно малым расстояниям) электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия сливаются в одно взаимодействие и различие между кварками и лептонами исчезает. Взаимодействия и частицы в мире нашего опыта воспринимаются нами как совершенно различные явления, поскольку мы исследуем вещество при сравнительно низких энергиях. Физики называют величину, равную  $10^{14}$  массам протона, масштабом объединения. Значение этого числа поистине потрясает.

Прежде чем двигаться дальше, необходимо оценить состояние теорий Великого объединения. Создавая Великое объединение трех взаимодействий, ТВО существенно уменьшают число произвольных параметров, используемых для описания природы. Менее амбициозная теория Вайнберга — Салама содержит постоянные, значения которых можно определить из эксперимента. В ТВО некоторые из этих чисел уже нельзя задать *ad hoc*, а следует определить из теории.

ТВО обладают и некоторыми неожиданными преимуществами. Одно из них — возможность объяснить старую загадку: почему электрические заряды всегда кратны одной и той же фундаментальной единице? Если принять заряд электрона за  $-1$ , а заряд протона за  $+1$ , то наименьший из возможных зарядов,  $-1/3$ , имеет *d*-кварк. Все остальные заряды, независимо от того, являются ли их носителями кварки, лептоны или переносчики

взаимодействия, равны небольшому целому кратному этого значения. До создания ТВО было неясно, почему не могут существовать частицы с любым зарядом, например с зарядом, равным  $\pi$  фундаментальных единиц. Единая теория не допускает существования таких зарядов. Жесткие правила отбора допустимых зарядов обусловлены тем, что все частицы принадлежат большим семействам, члены которых могут обмениваться частицами — переносчиками взаимодействия, имеющими заряды, равные фиксированному числу единиц заряда. Например, при распаде протона, когда  $d$ -кварк превращается в позитрон и передает заряд  $-\frac{4}{3}$   $X$ -частице, поглощающей ее  $u$ -кварк должен приобрести (в результате поглощения  $X$ -частицы) заряд, соответствующий заряду возникающего при этом антикварка. Вся арифметика должна сходиться. Это означает, что все частицы семейства должны иметь заряды, равные небольшим целым кратным друг друга (или вообще не иметь заряда).

Среди аргументов против различных ТВО называют отсутствие однозначной теории и масштаб объединения, столь далекий, что вряд ли эта теория когда-нибудь будет доступна непосредственной экспериментальной проверке. Как же в таком случае выбрать одну из соперничающих теорий? Если ТВО описывают природу в столь малых масштабах и при столь высоких энергиях, которые мы никогда не сможем наблюдать, то не превратится ли физика в метафизику? Не находимся ли мы в положении Демокрита и других греческих философов, которые без конца размышляли о формах и свойствах атомов, не имея ни малейшей надежды наблюдать их?

Некоторые физики пылко надеются, что это не так, и указывают три спасительные путеводные нити, которые позволяют нам сохранить власть над физикой в масштабе объединения. Рассмотрим каждую из них в отдельности.

## Проблески суперсилы

---

### Распад протона

На той неделе, когда ЦЕРН оповестил мир об открытии Z-частицы, Стивен Вайнберг находился на заседании Королевского общества в Лондоне. Он заявил, что весьма пессимистически смотрит на будущее фундаментальной физики. Такой прогноз мог показаться неожиданным. Как может Вайнберг, чья теория как раз на этой неделе получила столь блестящее подтверждение, пессимистически смотреть на развитие физики?

Подобно многим выдающимся физикам-теоретикам, Вайнберг на несколько шагов опередил экспериментаторов. Его интересы уже давно переместились с электрослабой теории на Великое объединение и далее. Пессимизм Вайнберга был вызван не прекрасным положительным результатом, полученным в ЦЕРНе, а получившим меньшую огласку отрицательным результатом, сообщение о котором поступило с озера Эри.

Эксперимент на озере Эри был одним из нескольких экспериментов, повторенных в разных уголках мира, на которые возлагалась наибольшая, а возможно, и единственная надежда проверить ТВО и хотя бы мельком увидеть бледную тень физики в масштабах объединения. Все эти эксперименты преследовали одну цель — обнаружить распад хотя бы одного протона. Сенсационное предсказание ТВО нестабильности протона для большинства физиков явилось чем-то вроде грома среди ясного неба, хотя, как я уже говорил, мысль об этом в течение нескольких лет буквально носилась в воздухе. Долгое время проводились эксперименты по определению пределов времени жизни протонов, но все эти эксперименты были выдержаны в традиционном духе. Никто всерьез не ожидал обнаружить распад протона.

Когда из ТВО выяснилось, что массы, соответствующие объединению, составляют примерно  $10^{14}$  масс протона, сразу стало ясно, что физикам никогда не удастся исследовать явления, сопутствующие Великому объединению, в прямых экспериментах. Единственной надеждой была проверка какого-нибудь косвенного



эффекта, предсказываемого ТВО, и выбор пал на распад протона. Предсказываемое теорией точное значение среднего времени жизни протона зависит от выбранного варианта ТВО, но в большинстве теорий, в том числе в простейшей из них (известной под названием минимальное SU (5)), это время оценивалось примерно в  $10^{31}$  лет. Это в  $10^{21}$  раз больше возраста нашей Вселенной.

Как можно наблюдать процесс, который длится несравненно дольше возраста доступной наблюдению Вселенной? Но дело в том, что отнюдь не каждый протон живет до своего распада  $10^{31}$  лет. Согласно квантовой физике, каждый отдельный распад происходит непредсказуемо.  $10^{31}$  лет соответствует среднему времени жизни протона. Это означает, что если собрать  $10^{31}$  протонов, то можно быть уверенным, что за год-два один из протонов распадется. Именно из этого исходят при проведении всех экспериментов по распаду протона. Многие тонны вещества размещаются вне зоны влияния космических лучей и подвергаются непрерывному контролю с целью обнаружить внезапный единичный распад протона. Космические лучи — основная помеха в таких исследованиях: они загружают чувствительные приборы всевозможными посторонними частицами. Чтобы избежать этих помех, эксперимент приходится проводить у подножия горы или в глубокой шахте. Но и в этом случае невозможно избавиться от нейтрино.

До ТВО время жизни протона по самым точным оценкам составляло  $10^{28}$  лет. Это весьма впечатляющее число, хотя оно относится к событию, которое никогда не происходило. Должно быть, это наиболее достоверный пример события, о котором известно, что оно не произойдет. Что еще заведомо известно из прямого эксперимента о том, что *не произойдет* по крайней мере  $10^{28}$  лет? С появлением ТВО измерения времени жизни протона обрели главный стимул. Для подтверждения ТВО точность эксперимента требовалось повысить по крайней мере в тысячу раз, а это означало необходимость более сложных и дорогих экспериментальных установок.

Перспектива обнаружить распад протона настолько завладела умами физиков, что в исследования включилось несколько групп. Одной из первых была совместная японо-индийская группа, соорудившая глубоко под землей, в одной из шахт в Индии своего рода слоеный пирог из железных плит. Эта на первый взгляд абсолютно безжизненная глыба вещества была окружена детекторами частиц, готовыми зарегистрировать продукты распада протона. Ранней весной 1982 г. появилось первое сообщение. Было зарегистрировано несколько «событий-кандидатов», на основании которых время жизни протона было оценено примерно в  $10^{31}$  лет, как предсказывала простейшая версия ТВО.

Известие было встречено с огромным интересом, хотя и с определенной осторожностью. Дело в том, что даже на той глубине, где проводился эксперимент, распад протона вполне могли имитировать космические лучи и нейтрино. Чтобы подтвердить полученные результаты и вселить уверенность в физиков, требовались другие эксперименты. Через несколько месяцев группа из ЦЕРНа, проводившая эксперимент под Монбланом, также зарегистрировала событие, внешне выглядевшее как распад протона, и интерес к распаду протона стал возрастать. Казалось, мы подошли обнадеживающе близко к порогу новой области в физике.

Большое внимание было уделено последствиям нестабильности протона. Ведь протоны — строительный материал ядерного вещества. Если протонам предстоит распасться, то это означает исчезновение в конце концов и нашей Вселенной. Произойдет это, разумеется не вдруг и не сразу. Но постепенно, на протяжении космических эпох все вещество будет неумолимо улечиваться. Если оценка  $10^{31}$  лет верна, то это означает, что на протяжении жизни человека в его теле с вероятностью, близкой к единице, распадается по крайней мере один протон.

А как обстоит дело с другими составными частями атомов — нейтронами и электронами? Процесс, ведущий к распаду протона, может вызвать и распад нейтронов, хотя многие нейтроны претерпевают более обычный бета-распад. Каждый протон, распадаясь, оставляет свой электрический заряд позитрону — аналогу электрона в антивеществах. Каждый образовавшийся в результате этого позитрон будет искать свою античастицу — электрон и уничтожать его в процессе аннигиляции. Поскольку вначале электронов во Вселенной было ровно столько, сколько протонов, вполне вероятно, что электрон-позитронная аннигиляция в конце концов приведет к полному уничтожению электронов во Вселенной. Таким образом, в конечном итоге  $10^{60}$  т вещества в видимой части Вселенной однажды обратятся в прах. Печальная перспектива!

Чтобы быть уверенным в такой перспективе, физикам прежде всего необходимо удостовериться в правильности утверждения о реальности распада протона. По всему миру были проведены более точные эксперименты. Один из самых точных проводился в соляной шахте на глубине 600 м под озером Эри. Используемые в этом эксперименте протоны содержались в 8000 т тщательно очищенной воды, залитой в резервуар, имеющий форму куба с длиной ребра около 18 м. В воду были погружены 2000 фотомножителей. Им предстояло зарегистрировать мгновенные импульсы света, возникающие при движении быстрых заряженных частиц в плотной среде. Замысел состоял в том, что такие короткие вспышки света должны были свидетельствовать о появлении высокоэнергетических продуктов распада протона. Если оценка

времени жизни протона  $10^{31}$  лет верна, то в эксперименте на озере Эри в течение первых трех месяцев работы установки должно быть зарегистрировано несколько таких распадов. В действительности же не удалось наблюдать ни одного распада протона. Складывалось впечатление, что предыдущие сообщения были ошибочными, и надежды на то, что удастся наблюдать распад протона, начали угасать.

Этот отрицательный результат не опроверг ТВО, но, по-видимому, исключил простейшие версии Великого объединения. Существуют более сложные теории, предсказывающие гораздо большее время жизни протона, но и в этом случае маловероятно, что мы когда-нибудь станем свидетелями распада протона; точность экспериментов стремительно приближается к теоретическому пределу.

По мере того как становилось все яснее, что попытки обнаружить распад протона обречены на неудачу, все больше внимания стал привлекать единственно известный экспериментальный способ увидеть хотя бы смутные очертания физики, соответствующей масштабу объединения. Я имею в виду магнитный монополю.

## Магнитные монополи

В предыдущих главах мы часто упоминали о легендарной симметрии и красоте уравнений в теории электромагнетизма Максвелла. Однако существует один «недостаток», нарушающий в остальном безупречное изящество теории Максвелла. Электричество и магнетизм представлены в уравнениях Максвелла не равнозначно. Хотя электрическая и магнитная силы тесно взаимосвязаны, они входят в теорию не вполне симметрично. Электрические поля создаются либо электрическими зарядами, либо изменяющимися магнитными полями, в то время как магнитные поля создаются только электрическим током и изменяющимися электрическими полями. Казалось бы, нет веских оснований для того, чтобы магнитные поля не могли создаваться магнитными зарядами (а электрические поля — магнитными токами).

У любого обычного стержневого магнита есть северный и южный полюса, но более глубокий анализ показывает, что магнетизм в действительности обусловлен электрическими токами, циркулирующими в атомах. Так как виток с током эквивалентен *паре* магнитных полюсов — северному с одной стороны витка и южному — с другой, магнит представляет собой «диполь», т. е. имеет одновременно и северный, и южный полюса. Виток с током не может иметь только один полюс, подобно тому, как монета не может иметь лишь одну сторону. От магнита нельзя отделить один полюс, т. е. создать монополю.

Исследования показывают, что все магниты представляют собой диполи. Магнитные монополи, если они существуют, должны быть крайне неуловимы. Систематическое изучение горных пород, в том числе и лунного грунта и проб, взятых со дна океана, не обнаружило ни одного отдельного магнитного заряда. Многие физики склонны думать, что магнитных монополей не существует. Если это действительно так, то магнетизм — всего лишь вторичный продукт электричества. Принять такую гипотезу это значит признать, что в природе не существует симметрии между электричеством и магнетизмом.

В 1931 г. английский физик-теоретик Поль Дирак обнаружил, что в квантовой физике определено есть место магнитным монополям, хотя в природе такая возможность не используется. Связав существование магнитных монополей с фазами квантовых волн, Дирак обнаружил весьма любопытную связь между электрическим и магнитным зарядами. Если магнитный монополь действительно существует, утверждал Дирак, то магнитный заряд должен быть кратен некоторой заданной величине, которая в свою очередь определяется фундаментальной величиной электрического заряда. Следовательно, если монополь вдруг заявит о себе, мы по крайней мере знаем, какой величины должен быть магнитный заряд.

Хотя проведенный Дираком анализ выявил место магнитного монополя в физике, из теории Дирака отнюдь не следовало, что магнитные монополи непременно существуют. Почти за полвека на эту тему было написано не так уж много. И вдруг в 1975 г. физики были потрясены сообщением о том, что магнитный монополь обнаружен в космических лучах. Сообщение оказалось ложной тревогой, но послужило стимулом к возрождению интереса к проблеме. Этому немало способствовали новые теоретические идеи, благодаря которым новая концепция монополя оставила далеко позади работу Дирака. По существу теоретики установили, что существование магнитных диполей с той или иной степенью неизбежности вытекает из ТВО.

Монополь Великого объединения (МВО) «придумали» 'т Хофт и советский физик из Москвы Александр Поляков. В их теоретических работах было показано, что МВО, если они существуют, должны обладать довольно странными свойствами. Прежде всего масса монополя должна несколько превышать массу, характерную для объединения, т. е. составлять почти  $10^{16}$  масс протона, иначе говоря, достигать массы амебы. Магнитные монополи не являются точечными частицами. Они должны обладать сложной внутренней структурой луковичного типа, состоящей из силовых зон.

Поскольку о прямом рождении столь массивных частиц не может быть и речи, сторонники концепции магнитного монополя обратились к космологии. А что если МВО образовались вместе

с обычным веществом в процессе Большого взрыва и сохранились как реликты до наших дней? Срочно были произведены вычисления, чтобы выяснить, сколько монополей могло сохраниться в таком случае. К великому удивлению теоретиков оказалось, что Вселенная должна буквально кишеть МВО. Согласно одной из оценок, магнитных монополей должно быть не менее чем атомов. Ясно, что в вычислениях что-то не так. Жесткие пределы распространенности монополей вытекают из величины магнитного поля Галактики. В лучшем случае монополи уступают по численности атомам в  $10^{16}$  раз.

Теоретики все еще расходятся во мнениях относительно того, что тут делать, и называют эту конфликтную ситуацию проблемой монополя. В гл. 12 мы коснемся некоторых свежих идей, которые, по-видимому, позволяют точно решить проблему монополя. А пока внимание физиков привлекли некоторые возможные следствия того, что распространенность магнитных монополей во Вселенной действительно достигает максимальной величины, допускаемой астрономическими наблюдениями. Как показывают оценки, ежегодно до 200 монополей может попадать на каждый квадратный километр поверхности Земли из космического пространства. Если бы удалось зарегистрировать хотя бы один из них, то это явилось бы блестящим подтверждением Великого объединения.

Такая перспектива стимулировала ряд попыток обнаружить космические монополи с помощью витков с током. Все эти эксперименты основаны на одном принципе — использовании некоторых материалов, обладающих сверхпроводимостью (при охлаждении до очень низких температур сверхпроводники полностью утрачивают электрическое сопротивление). Сверхпроводимость — по существу квантовый эффект, и одно из важных свойств электрического тока, текущего по сверхпроводящему витку, состоит в том, что магнитное поле этого тока «квантовано», т. е. величина магнитного потока может быть лишь целым кратным некоторой величины. Если через такой виток пролетит магнитный монополь, то величина магнитного потока через виток скачком изменится на несколько квантовых единиц.

14 февраля 1981 г. Блаз Кабрера из Станфордского университета зарегистрировал такой скачок магнитного потока. Наблюдение Кабреры вызвало в некотором роде сенсацию и приветствовалось экспериментаторами как первое убедительное свидетельство обнаружения магнитного монополя из космического пространства. Другие группы поспешили провести свои эксперименты, надеясь подтвердить результат Кабреры, но пока безуспешно. В то время, когда писались эти строки, росло убеждение, что монополь Кабреры также может оказаться ложной тревогой.

Между тем теоретики вплотную занялись вопросом о том, что уже удалось бы наблюдать, если бы на Землю из космического

пространства посыпались монополи. Одна из отличительных особенностей МВО — огромная масса, что делает его гигантским хранилищем энергии, в  $10^{16}$  раз большей, чем выделяется при расщеплении ядра урана в ядерном реакторе. Для энергоснабжения среднего дома вполне хватило бы нескольких десятков монополей в день.

Чтобы выделилась такая энергия, должна произойти аннигиляция монополя и антимонполя, т. е. северного и южного полюсов. Возникновение каждого северного полюса сопровождается появлением южного полюса, поэтому в среднем на поверхности Земли должно попадать одинаковое количество северных и южных полюсов. Поскольку магнитные монополи, погружаясь в обычное вещество, сохраняют свою стабильность, их в принципе можно было бы накапливать, сортируя северные и южные и запасая в своего рода электромагнитных «сосудах». При необходимости, смешав несколько северных полюсов с равным количеством южных полюсов, можно было бы получить поразительное количество энергии. В крупных масштабах подобное устройство могло бы превратиться в бинарное оружие чудовищной силы.

Некоторые геофизики допускают, что нечто подобное может происходить в естественных условиях в недрах Земли. Падающие на Землю монополи замедляются в земной коре, а попав в ядро Земли, накапливаются там. Геомагнитное поле должно отводить северные полюсы к северу, а южные — к югу, препятствуя их перемешиванию. При обращении геомагнитного поля эти две популяции могут меняться местами, и при миграциях во встречных направлениях происходило бы большое число столкновений северных полюсов с южными, сопровождаемых их аннигиляцией. Высказывалось даже предположение, что этот процесс мог бы в основном объяснить внутреннее тепло Земли.

Поиски распада протона и магнитных монополей отражают угасающие надежды обнаружить хотя бы экспериментально проблески физических явлений, характерных для масштаба объединения. Отказаться от намеченных исследований было бы преждевременно, но многие физики приходят к заключению, что инициатива теперь принадлежит теоретикам. Лишь немногие физики-теоретики считают, что теории великого объединения — последнее слово науки. Но ведь ТВО преуспели в объединении лишь трех из четырех фундаментальных взаимодействий. Какие новые перспективы могут открыться, если появится единая теория в подлинном смысле слова?

## Суперсила

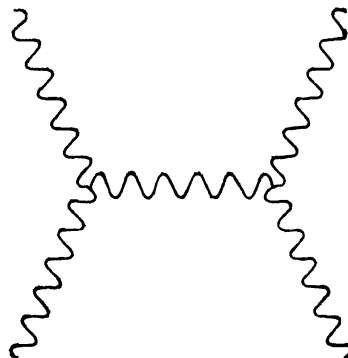
Гравитация — это «белая ворона» среди других сил природы. Остальные взаимодействия имеют характер силовых полей, простирающихся в пространстве и времени, гравитация же сама

представляет собой пространство и время. Общая теория относительности Эйнштейна описывает гравитацию как деформацию, искривление пространства-времени. Это не что иное, как пустота, испытывающая возмущение.

Геометрической природе гравитационного поля, по-видимому, присуща необычайная утонченность, но именно она создает серьезные трудности при любой попытке квантового описания. На протяжении десятилетий общая теория относительности Эйнштейна не поддавалась последовательной квантовой формулировке. Несмотря на то что гравитации соответствует калибровочное поле, ее описание на языке обмена гравитонами (частицами — переносчиками гравитационного взаимодействия) дает разумные результаты только в случае простейших процессов. Камнем преткновения, как всегда, служат бесконечные члены, возникающие в уравнениях всякий раз, когда встречаются замкнутые гравитационные петли.

Проблема расходимости гравитационного поля усугубляется тем, что гравитон сам по себе несет гравитационный заряд. В этом отношении он напоминает глюон, который является переносчиком сильного взаимодействия и несет цветовой заряд. Поскольку все формы энергии, включая гравитоны, являются источником гравитации, можно утверждать, что гравитоны «гравитируют». Это означает, что два гравитона могут взаимодействовать, обмениваясь между собой третьим гравитоном, как показано на рис. 21. Можно придумать много сложных диаграмм с обменом гравитонами, и совершенно очевидно, что число замкнутых гравитонных петель (рис. 22) быстро растет по мере того, как включаются процессы, более сложные, чем простой обмен гравитоном.

Появление бесконечной последовательности расходимостей в уравнениях гравитационного поля ныне принято считать неизбежным недостатком квантовой теории гравитации, основанной на теории Эйнштейна. Ситуация здесь напоминает положение дел со слабым взаимодействием до его объединения с электро-



**Рис. 21.** Взаимодействие гравитонов. Гравитация является источником самой себя. На квантовом уровне это приводит к тому, что гравитоны (*волнистые линии*) могут взаимодействовать друг с другом. В таком процессе два гравитона, обмениваясь третьим, гравитационно взаимодействуют друг с другом.

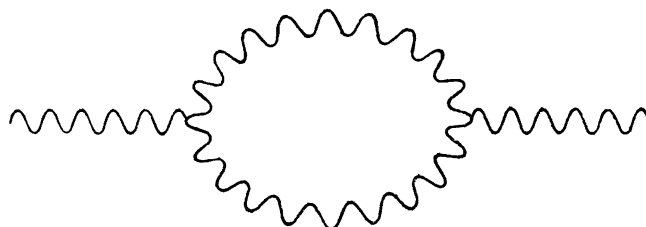


Рис. 22. Способность гравитонов взаимодействовать между собой делает возможным существование процессов, которым соответствует сложные сети гравитационных петель. Одна из таких петель изображена на рисунке. Гравитационные петли приводят к возникновению в математическом описании квантовой гравитации некомпенсируемых бесконечных членов и по существу делают теорию беспомощной.

магнетизмом. Обе теории «неперенормируемы». В случае слабого взаимодействия причина была в симметрии: старая теория испытывала недостаток симметрии. Но стоило ввести в нее мощную калибровочную симметрию, как все расходимости, словно по мановению волшебной палочки, исчезли. Теоретики извлекли из этого хороший урок, и лет десять назад принялись за поиски новой симметрии, более широкой, чем ранее известные, которая избавила бы гравитацию от неперенормируемости. Так физики пришли к идее *суперсимметрии*.

Суть суперсимметрии связана с понятием спина в том виде, в каком оно используется в физике элементарных частиц. Когда говорят о частице со спином, имеют в виду не просто представление о крохотном шарике, вращающемся вокруг собственной оси. Кое-что о необыкновенных свойствах спина было рассказано в гл. 2. У частицы со спином происходит своего рода «раздвоение мира», не соответствующее геометрической интуиции.

Существование спина имеет решающее значение для свойств частиц — в зависимости от спина частицы разделяются на два класса. К одному классу относятся «бозоны» — частицы, которые либо вообще не имеют спина (т. е. их спин равен 0), как, например, гипотетическая частица Хиггса, либо имеют целочисленный спин. К последним наряду с фотоном относятся W- и Z-частицы (все они имеют спин 1) и гравитон (имеющий спин 2). В том, что касается спина, поведение бозонов близко к нашим интуитивным представлениям.

Другой класс частиц образуют «фермионы». Они имеют полуцелый спин. Все кварки и лептоны имеют спин, равный  $1/2$ , и относятся к фермионам. Именно спином фермионов обусловлена необходимость двукратного поворота для возвращения в исходное состояние, и это бросает вызов нашему воображению.

Бозоны и фермионы существенно отличаются по своим физическим свойствам. Особенно сильно это различие проявляется



в ансамблях частиц. Фермионы с полужелтым спином, как у электрона, страдают своего рода «ксенофобией»<sup>1</sup>, не подпуская близко к себе своих двойников. В период младенчества квантовой физики Паули сформулировал свой знаменитый «принцип запрета», согласно которому два электрона не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. Это означает, что в контейнер заданных размеров можно поместить конечное число электронов, прежде чем возникнет своеобразный «протест». (Этот эффект не имеет ничего общего с электрическим отталкиванием. Нейтрино и нейтроны ведут себя столь же «несговорчиво».) Принцип Паули сыграл большую роль еще на заре квантовой физики, так как позволил объяснить, почему все электроны в тяжелых атомах не переходят в состояние с наименьшей энергией, образуя хаотическое скопление. Вместо этого они в строгом порядке заполняют один за другим энергетические уровни. Без подобного порядка химия оказалась бы совершенно бесполезным занятием. Принцип Паули позволяет объяснить периодическую систему химических элементов Д. И. Менделеева.

Принцип Паули дает возможность объяснить и многое другое в окружающем нас мире, например различие между проводниками и изоляторами. В проводнике некоторые электроны, приобретая энергию от внешнего электрического поля, могут переходить на более высокие энергетические уровни. В изоляторе этого не происходит, так как все более высокие уровни заняты другими электронами. Принцип Паули помог объяснить также природу силы, препятствующей гравитационному коллапсу белых карликов и нейтронных звезд. Не будь принципа Паули, все звезды заканчивали бы свое существование как черные дыры.

В отличие от склонных к уединению фермионов бозоны стремятся быть вместе. Принцип запрета не распространяется на них, и поэтому большие ансамбли бозонов отличаются по своему поведению от «кузенов»-фермионов. Бозоны готовы тесниться и ютиться в одном и том же состоянии. Из-за подобной склонности к сотрудничеству бозоны выступают одной дружной командой, объединяя, а не парализуя усилия друг друга. Большое количество бозонов может действовать слаженно, вызывать макроскопические эффекты, которые можно непосредственно наблюдать. Например, множество фотонов, движущихся согласованно, может приводить к вполне определенным электромагнитным явлениям, например, таким, как радиоволны. Фермионы не способны на нечто подобное, так как они мешают друг другу. Именно поэтому мы никогда не наблюдаем макроскопических электронных волн, хотя каждому электрону соответствует своя волна.

<sup>1</sup> Ксенофобия — от греч. *ξενος* — чужой, ненависть к чужакам. — *Плим Ред.*

Принципиальные различия в физических свойствах фермионов и бозонов приучили физиков десятилетиями хранить информацию о них в разных участках мозга. В частности, все переносчики взаимодействия — бозоны, тогда как кварки и лептоны — фермионы. Это означает, что бозоны принято ассоциировать с *взаимодействием*, а фермионы с *веществом*. Столь резкое различие между ними, вероятно, объясняет, почему у многих физиков вызвала недоумение предложенная в начале 70-х годов суперсимметрия, *объединяющая* бозоны и фермионы в рамках одной теории. Такое объединение напоминает вынужденный брак — столь различны по своим свойствам эти две группы частиц; тем не менее оно возможно, если обратиться к симметрии, более широкой, нежели симметрия Лоренца — Пуанкаре, лежащая в основе теории относительности. Математически суперсимметрия соответствует извлечению квадратного корня из симметрии Лоренца — Пуанкаре. Физически же она соответствует превращению фермиона в бозон и наоборот. Разумеется, в реальном мире невозможно проделать такую операцию, как невозможно, вращая «волшебную ручку», изменять индивидуальность электрона в случае калибровочных симметрий, рассмотренных в предыдущих главах. Тем не менее операцию суперсимметрии можно сформулировать математически и можно построить теории, включающие суперсимметрию.

Вскоре «супертеоретики» сосредоточили внимание на гравитации. Суперсимметрия тесно связана с геометрией: если произвести одну за другой две суперсимметричные операции, то получится простая геометрическая операция, вроде пространственного сдвига. Математический аппарат суперсимметрии получил название квадратного корня из геометрии. Гравитацию, представляющую собой в чистом виде геометрию искривленного пространства, можно естественным образом выразить на языке суперсимметрии, что позволяет более ярко продемонстрировать калибровочно-полевую природу.

Объединяя бозоны и фермионы, суперсимметрия сводит в одно семейство частицы с различными спинами. Набор частиц, одни из которых имеют спин, равный 0, другие —  $\frac{1}{2}$ , 1 и т. д., можно составить так, что семейство в целом будет суперсимметричным. Следовательно, если мы требуем, чтобы теория гравитации была суперсимметричной, то гравитон со спином 2 не сможет существовать отдельно. Он должен принадлежать целому семейству частиц, связанных со спином 2 операцией суперсимметрии. К числу таких частиц относятся частицы со спином 0,  $\frac{1}{2}$ , 1 и, что особенно важно,  $\frac{3}{2}$ . Элементарные частицы со спином  $\frac{3}{2}$  неизвестны (хотя комбинация из трех кварков может иметь суммарный спин  $\frac{3}{2}$ ), поэтому предсказание такой частицы — одна из неизведанных особенностей суперсимметрии.

Описание гравитации на языке суперсимметрии получило название *супергравитации*. От обычной гравитации супергравитация отличается тем, что гравитон здесь уже не единственный переносчик гравитационного взаимодействия. В качестве переносчиков выступает целое суперсимметричное семейство, в том числе загадочные частицы со спином  $3/2$ , которые физики назвали «гравитино».

Детальная структура этого семейства зависит от математического представления суперсимметрии, которому теоретик отдает предпочтение. Самое плодотворное представление называется супергравитацией  $N=8$ . В нем рассматривается семейство частиц внушительных размеров: 70 частиц со спином 0, 56 — со спином  $1/2$ ; 28 — со спином 1 и 8 — со спином  $3/2$ , а также единственный гравитон со спином 2. Возникает любопытный вопрос: можно ли отождествить все эти частицы с известными в природе, т. е. с кварками, лептонами и переносчиками взаимодействий? Если можно, то мы располагаем единой теорией природы, которая не только включает все частицы вещества в одно суперсемейство но и «обобществляет» всех переносчиков взаимодействий, тем самым объединяя все взаимодействия. Таким образом, супергравитация создает основу для *полного объединения*, в рамках которого весь мир управляется единственной верховной суперсилой — суперсилой, представляющей перед нами различными гранями: то как электромагнитное взаимодействие, переносимое фотонами, то как сильное взаимодействие, переносимое глюонами, и т. д., но все эти грани связаны между собой суперсимметрией (см. табл. 5).

В действительности супергравитация выходит и за такие рамки. Она дает единое описание *взаимодействия и вещества*. В основе как взаимодействия, так и вещества лежат квантовые частицы, причем фотоны, W- и Z-частицы, а также глюоны относятся к бозонам, тогда как кварки и лептоны — относятся к фермионам. В суперсимметрии все они объединены. Подобно тому как гравитон сопровождается гравитино, переносчики других фундаментальных взаимодействий сопровождаются новыми частицами, получившими названия фотино, ви́но, зи́но и глюино!

Существование всех этих «ино» решающим образом сказывается на математической формулировке теории, в особенности на доставляющем столько беспокойства вопросе о перенормируемости. Грубо говоря, «ино», относящиеся к фермионам, порождают в теории расходимости противоположного знака по сравнению с расходимостями, обусловленными бозонами, например гравитонами. Таким образом, имеется тенденция к взаимному уничтожению бесконечных членов — отрицательные бесконечности от гравитинных петель компенсируются положительными бес-

Таблица 5

Электричество Магнетизм	} Электро- магнетизм (Максвелл, 50-е годы XIX в.	} Электрослабое взаимодей- ствие (Салам, Вайнберг, 1967)	} Теория Большого объединения (Глэшоу и др., 1974)	} Супер- сила (1990 ?)
Слабое взаимо- действие				
Сильное взаимо- действие				
Гравитация				

Последовательное объединение фундаментальных взаимодействий началось с синтеза электричества и магнетизма в рамках теории Максвелла в XIX в. Объединение слабого и электромагнитного взаимодействий получило надежное подтверждение в 1983 г. благодаря открытию W- и Z-частиц. Данных, подтверждающих Великое объединение, пока нет, но их с нетерпением ожидают. Число теоретических предпосылок для создания теории суперобъединения всех фундаментальных взаимодействий в рамках единой суперсилы быстро растет.

конечностями от гравитонных петель. По существу бесконечности «на смерть» суперсимметризируют друг друга.

С первых шагов супергравитации возник единственный острый вопрос: окажется ли суперсимметрия достаточно широкой, чтобы обеспечить перенормируемость супергравитации? Ответить на этот вопрос было нелегко. Супергравитация открывает широкое поле деятельности, привлекающее внимание десятков теоретиков, ежегодно по супергравитации публикуются сотни статей. Ее математический аппарат стал настолько сложным, что за исключением узкого круга посвященных найдется немного людей, которые понимают значение того или иного символа. В моем отделе работает один специалист по супергравитации, и обычно даже неполный расчет занимает у него стопку бумаги толщиной 10 см. Ведь как ни просты и ни изящны математические основы теории, проверка деталей может оказаться достаточно кропотливой.

Из-за сложности и громоздкости вычислений пока еще не удалось ответить на вопрос о перенормируемости супергравитации, но и то, что сумели установить теоретики, выглядит весьма ободряюще. По-видимому, супергравитация не просто позволит достичь перенормируемости, при которой расходимость в теории сохраняются, но их удастся обойти с помощью того или иного математического приема. В супергравитации, очевидно, делается попытка получить *конечные* результаты. По крайней мере во всех выполненных до сих пор вычислениях окончательные результаты неизменно оказывались конечными. Существует твердое убежде-

ние, что в супергравитации удалось, наконец, искоренить расходимости, от которых теория поля страдала на протяжении по крайней мере двух поколений ученых.

Супергравитация — это последнее достижение, венчающее долгий поиск единства в физике. И хотя она пребывает еще в стадии формирования, ее успехи сулят надежду на решение трех главных проблем теоретической физики: как объединить все четыре фундаментальных взаимодействия в единственной суперсиле; как объяснить существование всех фундаментальных частиц (они необходимы для поддержания суперсимметрии); почему гравитация гораздо слабее остальных фундаментальных взаимодействий?

Уверенность в благополучном исходе исследований в некоторых кругах ученых настолько сильна, что Стивен Хокинг видит в супергравитации  $N = 8$  кульминацию теоретической физики. Действительно, эта теория в принципе способна дать объяснение всему, с чем имеет дело физика, — всем взаимодействиям и всем частицам. Если Хокинг прав (хотя, возможно, еще не пришло время физикам-теоретикам переквалифицироваться, скажем, в биохимики), то супергравитация принципиально отличается от прочих физических теорий. До сих пор физические теории рассматривались лишь как модели, которые приближенно описывают реальность. По мере усовершенствования моделей согласие теории с реальностью улучшалось. Некоторые физики теперь утверждают, что супергравитация и *есть* сама реальность, что эта модель идеально согласуется с реальным миром. Возможно, слишком амбициозное утверждение, но по нему можно судить об эйфории, порожденной последними достижениями.

Крайне неясные перспективы экспериментальной проверки многих новых идей противостоят энтузиазму теоретиков. На заседании Лондонского Королевского общества Вайнберг подчеркнул безысходность сложившейся ситуации. «Квантовая гравитация, по-видимому, недоступна любой экспериментальной проверке, которую мы способны придумать, — заявил он. — Физика в основном вступает в такую эру, когда эксперименты уже не в состоянии пролить свет на фундаментальные проблемы. Положение очень тревожно». Я спросил у Вайнберга, не означает ли это, что физика становится чисто умозрительной. «Не думаю, — ответил он. — Я надеюсь, что острый ум экспериментаторов найдет какой-то выход». Но он признался, что даже не представляет, каким мог бы быть выход.

В то время, когда я писал эту книгу, разработка единой теории существенно продвинулась вперед, и смутно обозначились контуры полной теории, хотя до ее экспериментальной проверки все еще очень далеко. Подобно многим заманчивым образам единая теория может оказаться миражом, но впервые за всю историю науки у нас складывается представление о том, как будет выглядеть законченная научная теория всего сущего.

## А не живем ли мы в одиннадцатимерном пространстве?

---

### Первая единая теория поля

Физика пленяет в значительной мере тем, что ей часто удается объяснить окружающий мир с помощью вещей, которых мы не видим — и, более того, которые вообще не поддаются наглядному представлению, сколько бы мы ни напрягали свое воображение. Мы уже называли несколько примеров подобного рода, в том числе спин частиц, корпускулярно-волновой дуализм, а также деформируемое пространство. Некоторых подобная абстрактность физики раздражает и даже пугает. Других она, наоборот, увлекает, вызывая игру воображения. Поклонники научной фантастики стремятся найти в новой физике богатый клад «странных» идей.

Классический пример использования абстрактных понятий для объяснения природы дал в 1915 г. Эйнштейн, опубликовав свою поистине эпохальную общую теорию относительности. Эта работа принадлежит к числу немногих, которые знаменуют поворотные моменты в представлениях человека об окружающем мире. Красота теории Эйнштейна обусловлена не только могуществом и элегантностью уравнений гравитационного поля, но и всеокрушающим радикализмом его взглядов. Теория Эйнштейна не только смела одним махом ньютоновскую теорию гравитации и механику, но и разрушила представление о гравитации как о силе. Общая теория относительности уверенно провозгласила, что гравитация представляет собой геометрию искривленного пространства. Таким образом, Эйнштейн свел само понятие гравитации к чистой геометрии. На смену представлению об ускорении в пространстве пришло представление об искривлении пространства.

Теория Эйнштейна ознаменовала столь важный прогресс в понимании природы, что уже вскоре стал неизбежным пересмотр взглядов и на другие силы природы. В это время единственной «другой» силой, существование которой было твердо установлено, являлось электромагнитное взаимодействие. Однако внешне оно

совершенно не походило на гравитацию. Более того, за несколько десятков лет до создания теории гравитации Эйнштейна электромагнетизм успешно описала теория Максвелла, и не было никаких оснований сомневаться в справедливости этой теории.

На протяжении всей жизни Эйнштейн мечтал о создании единой теории поля, в которой все силы природы сливались бы воедино на основе чистой геометрии. Поискам такой схемы Эйнштейн посвятил большую часть своей жизни после создания общей теории относительности. Однако по иронии судьбы ближе всех к реализации мечты Эйнштейна подошел малоизвестный польский физик Теодор Калуца, который еще в 1921 г. заложил основы нового и неожиданного подхода к объединению физики, до сих пор поражающего воображение своей дерзостью.

Калуца был вдохновлен способностью геометрии описать гравитацию; он задался целью обобщить теорию Эйнштейна, включив электромагнетизм в геометрическую формулировку теории поля. Это следовало сделать не нарушая «священных» уравнений теории электромагнетизма Максвелла. То, что удалось сделать Калуце, — классический пример проявления творческого воображения и физической интуиции. Калуца понимал, что теорию Максвелла невозможно сформулировать на языке чистой геометрии (в том смысле, как мы ее обычно понимаем), даже допуская наличие искривленного пространства. Он нашел удивительно простое решение, обобщив геометрию так, чтобы она «вместила в себя» теорию Максвелла. Чтобы выйти из затруднения, Калуца нашел весьма необычный, но вместе с тем неожиданно убедительный способ. Калуца показал, что электромагнетизм является своего рода «гравитацией», но не обычной, а «гравитацией» в ненаблюдаемых измерениях пространства.

Физики долго привыкали к тому, чтобы пользоваться временем как четвертым измерением. Теория относительности установила, что пространство и время сами по себе не являются универсальными физическими понятиями, так как они неизбежно сливаются в единую четырехмерную структуру, называемую «пространство-время». Калуца фактически сделал следующий шаг: он постулировал, что существует еще дополнительное пространственное измерение и общее число измерений пространства равно четырем, а всего пространство-время насчитывает пять измерений. Если принять это допущение, то, как показал Калуца, произойдет своего рода математическое чудо. Гравитационное поле в таком пятимерном мире проявляет себя в виде обычного гравитационного поля плюс электромагнитное поле Максвелла — если наблюдать этот мир из пространства-времени, ограниченного четырьмя измерениями. Своей смелой гипотезой Калуца по существу утверждал, что если мы расширим свое представление о мире до пяти измерений, то в нем будет существовать лишь единственное

силовое поле — гравитация. То, что мы называем электромагнетизмом, — всего лишь часть гравитационного поля, которая действует в пятом дополнительном измерении пространства, которое мы не в состоянии наглядно представить.

Теория Калуцы не только позволила соединить гравитацию и электромагнетизм в единой схеме, но и дала основанное на геометрии описание обоих силовых полей. Так, электромагнитная волна (например, радиоволна) в этой теории не что иное, как пульсации пятого измерения. Особенности движения электрически заряженных частиц в электрических и магнитных полях прекрасно объясняются, если предположить, что частицы пребывают в дополнительном пятом измерении. Если принять эту точку зрения, то вообще нет никаких сил — существует только геометрия искривленного пятимерного пространства, а частицы свободно «кочуют» по наделенной структурой пустоте.

Математически гравитационное поле Эйнштейна в пространстве пяти измерений в точности и полностью эквивалентно обычной гравитации плюс электромагнетизм в пространстве четырех измерений; разумеется, это нечто большее, чем просто случайное совпадение. Однако в таком случае теория Калуцы остается загадочной в том отношении, что столь важное четвертое измерение пространства вообще не воспринимается нами. Пространство, доступное нашему непосредственному восприятию, с полной очевидностью и неизменностью остается трехмерным. Если четвертое измерение пространства существует, то где же оно? Прежде чем ответить на этот вопрос, следует также выяснить, что мы в действительности понимаем под размерностью пространства.

### Что такое размерность?

В научной фантастике уже давно обыгрываются преимущества, связанные с дополнительными измерениями пространства. Авторы часто обращаются к ним, чтобы перемещать своих персонажей из одного места Вселенной в другое, избегая утомительных путешествий со скоростью света или около того — в общем черепашьим шагом — по обычному трехмерному пространству. Так, в книге Артура Кларка «Космическая Одиссея: 2001» экспедиция на Сатурн завершается рискованным проникновением в дополнительное измерение на одном из спутников Сатурна.

Однако интерес к проблеме размерности пространства возник задолго до появления фантастики. Древние греки остро чувствовали ее значение для развития науки геометрии. Непосредственно столкнуться с проблемой размерности их заставил любопытный случай, связанный со свойствами правильных многоугольников (замкнутых плоских фигур со сторонами равной длины, например квадратов, правильных пяти-, восьмиугольников и т. п.). Коли-



чество различных правильных многоугольников безгранично — могут существовать правильные многоугольники с любым числом сторон. Однако существует всего лишь пять типов различных правильных многогранников (замкнутых объемных фигур, грани которых образованы правильными многоугольниками). Грекам было свойственно наделять геометрию глубоким мистическим смыслом, а Птолемей даже написал исследование на тему о размерности, в котором утверждалось, что в природе вообще не может существовать более трех пространственных измерений.

В дальнейшем математики, в частности Риман, систематически изучали свойства многомерных пространств с чисто математических позиций. При этом основная проблема заключалась в формулировке последовательного определения размерности. Это было совершенно необходимо для доказательства строгих теорем относительно пространств с различным числом измерений.

Интуитивно все геометрические структуры мы подразделяем на одно-, двух- и трехмерные в соответствии с их протяженностью. Так, не имеющей протяженности точке соответствует нулевая размерность. Линия является одномерной, поверхность — двумерной, объем — трехмерным. Вряд ли нам удастся лучше сформулировать эти определения, чем это сделал сам Евклид почти за 300 лет до н. э.

Точка — это то, что не имеет частей.

Линия — длина, лишенная ширины.

Плоскость — это то, что имеет только длину и ширину.

Объем — это то, что имеет длину, ширину и глубину.

Далее Евклид уточнял, что границами линии служат точки, границами поверхности — линии, а границей объемного тела — поверхность. Возникла мысль определить размерность по иерархической схеме, начиная с нулевой размерности точки, а затем шаг за шагом увеличивая ее на единицу. Тогда одномерным будет объект, у которого началом и концом служат точки, т. е. линия. Двигаясь далее, мы по индукции придем к определению четырехмерной структуры как ограниченной трехмерным объемом. Число измерений, которые можно логически ввести таким способом, не ограничено, однако сама процедура не содержит каких-либо указаний на реальную физическую ситуацию.

Более наглядное и ясное представление о трехмерности можно получить с помощью другой схемы, основанной на указании местоположения точек в пространстве. Представьте себе, что вам необходимо встретиться с приятелем в заранее обусловленном месте. В этом случае можно указать географическую широту и долготу выбранного места; пусть это будет, например, Эмпайр-стейт-билдинг. Но в этом случае остается еще одна неопределенная величина — высота. На каком этаже должна состояться встреча? Итак, в общей сложности необходимо указать три независимых

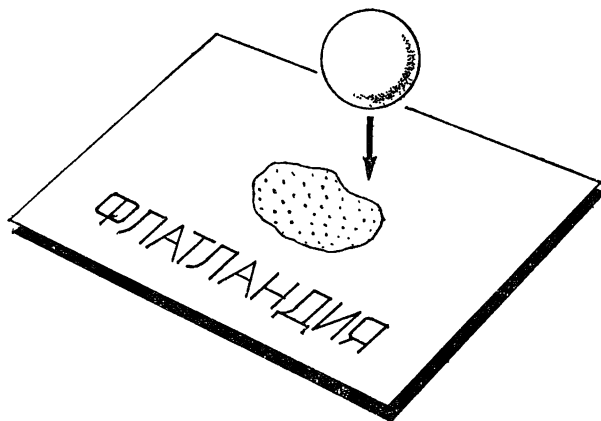


Рис. 23. Двумерная вселенная. Плоское существо, живущее во Флатландии, не имеет представления о «верхе» и «ниже». Шар, пронизывающий плоский мир, воспринимается этим существом как двумерный объект, меняющий свою форму.

числа для того, чтобы однозначно определить положение точки в пространстве. По этой причине такое пространство называют трехмерным.

Теория относительности обнаружила, что пространство переплетено со временем, поэтому в действительности следует говорить не об одном только пространстве, а о пространстве-времени. В какой день вы собираетесь встретиться с другом в здании Эмпайр-стейт-билдинг? Указание времени события требует задать единственное число («дату»), так что время одномерно. Объединяя пространство и время, мы приходим к четырехмерному пространству-времени.

Когда мы пытаемся наглядно представить дополнительные измерения, например, четвертое пространственное измерение (в этом случае полное пространство-время насчитывает пять измерений), нашей интуиции оказывается недостаточно. Для облегчения задачи можно обратиться к аналогии. Вообразим двумерное «блинообразное» создание, которое обречено существовать только на поверхности; у него отсутствуют представления о «верхе» и о «ниже». На рис. 23 изображена такая плоская вселенная. Мы можем догадываться, что эта поверхность в действительности «вложена» в трехмерное пространство, однако обитатель плоского мира не в состоянии понять эту более широкую точку зрения. Он воспринимает только события, происходящие на самой поверхности.

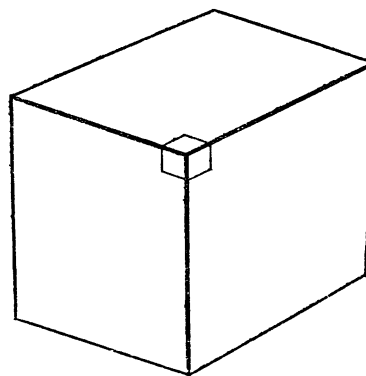
Возникает вопрос: а что будет наблюдать это создание, когда поверхность пересекается трехмерным объектом? Поверхность расщепит этот объект, причем размеры и форма сечения будут

в общем случае изменяться по мере прохождения объекта. Так, сечение сферы в первый момент будет выглядеть как точка, которая, постепенно «расплываясь», превратится в круг все увеличивающегося радиуса; достигнув максимального радиуса, круг начнет уменьшаться в размерах, напоследок снова превратившись в точку. Более сложные объекты будут создавать при прохождении следы более сложного сечения.

Рассуждая далее, по аналогии можно предположить, что четыре измерения пространства-времени «вложены» во вселенную, имеющую пять или даже большее число измерений. Геометрии такой вселенной трудно вообразить, однако с помощью математики можно построить законченное логическое описание ее. Математики уже давно обобщили законы геометрии на случай пространства с произвольным числом измерений (включая бесконечно большое). Поэтому смысл многомерных пространств вполне можно понять, хотя непосредственному восприятию доступно лишь три измерения.

Какие особенности присущи четырехмерному пространству? Один из аспектов размерности касается числа взаимно перпендикулярных направлений, которые существуют в данном пространстве. Например, пространство этой страницы двумерно. Если положить ее на стол, то в любом из углов края страницы образуют две прямые линии, перпендикулярные друг к другу. Из того же угла невозможно провести третью прямую, лежащую в плоскости страницы и перпендикулярную обоим ее краям. Однако направление такой прямой удастся найти, если выйти из плоскости страницы и начертить вертикальную линию. Таким образом, в трехмерном пространстве в отличие от двумерной поверхности страницы существует три взаимно перпендикулярных направления.

В четырехмерном пространстве удалось бы найти четыре взаимно перпендикулярных направления. На рис. 24 изображен случай трех измерений: три взаимно перпендикулярные прямые



**Рис. 24.** Вершины прямоугольного параллелепипеда образованы тремя взаимно перпендикулярными прямыми линиями. В трехмерном пространстве из вершины нельзя провести ни одной прямой, которая была бы перпендикулярна всем трем ребрам.

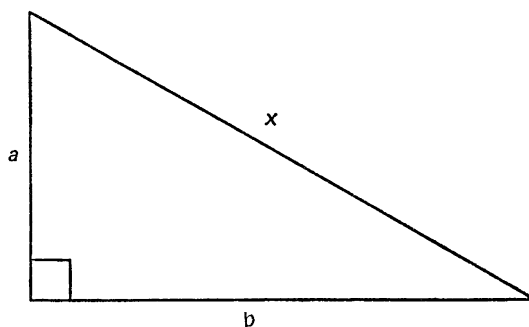


Рис. 25. Знаменитая теорема Пифагора, связывающая между собой длины сторон прямоугольного треугольника,  $a$ ,  $b$ ,  $x$ , без труда обобщается на случай больших размерностей.

исчерпывают максимально возможное число таких прямых. Как бы мы ни старались, мы никогда не найдем в обычном пространстве прямую, перпендикулярную всем трем. Любая прямая, перпендикулярная трем названным, должна идти в направлении, не принадлежащем нашему пространству. И хотя мы не в состоянии представить как проходит подобная прямая, очевидно, что *формально* она могла бы существовать. Ее можно описать, а именно вычислить и систематизировать ее геометрические параметры.

Простым примером сказанного может служить знаменитая геометрическая теорема древнегреческого геометра Пифагора, которая знакома любому школьнику. Эта теорема относится к прямоугольным треугольникам; на рис. 25 длины сторон такого треугольника обозначены соответственно  $a$ ,  $b$ ,  $x$ . Теорема Пифагора утверждает, что эти величины связаны между собой простой формулой  $x^2 = a^2 + b^2$ . Если положить для удобства  $a = 3$ ,  $b = 4$ , то  $x = 5$ , поскольку  $5^2 = 3^2 + 4^2$ .

Треугольник, изображенный на рис. 25, является, очевидно, двумерным объектом, однако теорему Пифагора можно без труда обобщить на случай трех измерений. На рис. 26 изображен прямоугольный ящик (параллелепипед) со сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Теорема Пифагора в этом случае относится к длине  $x$  диагонали, проведенной между противоположными вершинами ящика. Соответствующая формула имеет вид  $x^2 = a^2 + b^2 + c^2$ , очень сходный с двумерным случаем; однако теперь для вычисления длины диагонали нам необходимо знать длины трех взаимно перпендикулярных сторон.

В четырехмерном пространстве для нахождения длины диагонали пришлось бы использовать длины четырех взаимно перпендикулярных сторон,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ . В этом случае формула имела бы вид  $x^2 = a^2 + b^2 + c^2 + d^2$ . Таким образом, хотя нам и не удастся

вообразить четырехмерный ящик, мы в состоянии детально проанализировать его геометрические свойства.

Однако при всей важности подобных геометрических рассмотрений такие построения остаются не более чем карточным домиком. И этот домик рухнул с наступлением в конце прошлого века эры современной математики, ознаменовавшейся развитием могущественного раздела математики — теории множеств. Одно из сильнейших потрясений, испытанных математиками, было связано с открытием Георга Кантора. Оно заключалось в том, что линия насчитывает столько же точек, сколько и поверхность. Интуитивное представление, что на поверхности в бесконечное число раз больше точек, чем в проведенной на ней линии, было полностью опровергнуто. Это утверждение было встречено скептически весьма уважаемыми математиками. Некоторые отвергали открытие Кантора, объявив его безумным. Шарль Эрмит писал: «Чтение писаний Кантора напоминает настоящую пытку... Отображение линии на поверхности совершенно неубедительно... подобный произвол... Автору следовало бы подождать с этим...» — и далее в том же духе.

Лишь на рубеже нынешнего столетия справедливость восторжествовала и удалось дать удовлетворительное определение размерности. Благодаря важным работам Л. Е. Дж. Брауэра, Рене Лебега и других была в конце концов найдена надежная процедура сравнения двух пространств с целью сопоставления их размерностей. Соответствующие методы и доказательства основаны на тонких абстрактных понятиях теории множеств, весьма далеких

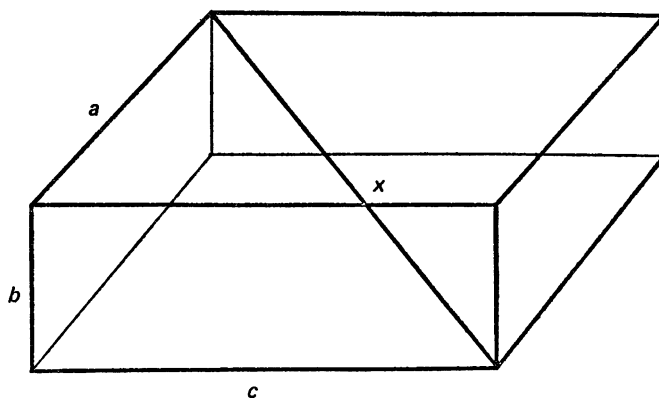


Рис. 26. Длину диагонали прямоугольного параллелепипеда можно выразить через длины его ребер  $a$ ,  $b$  и  $c$ , просто обобщив теорему Пифагора. Нетрудно перенести это обобщение и на случай четырех или большего числа измерений пространства.

от наших интуитивных представлений. Лишь подобная тщательность и внимание к деталям позволили закрепить формальные основы нашей науки и нашего повседневного опыта.

### Почему три?

Какова бы ни была действительная размерность пространства, несомненно, что нашему восприятию непосредственно доступны лишь три измерения. Многие ученые задавались вопросом, можно ли объяснить, почему природа «выбрала» именно число три и является ли это число в определенном смысле выделенным.

В 1917 г. физик Пауль Эренфест написал статью под названием «Каким образом в фундаментальных законах физики отражается тот факт, что пространство трехмерно?». Эренфест обратил внимание на факт существования устойчивых орбит — типа тех, по которым планеты движутся вокруг Солнца или электроны вокруг атомного ядра. В физике широко распространен закон «обратных квадратов», описывающий характер изменения различных сил с расстоянием. В гл. 5 мы узнали, что этому закону следуют гравитационные, электрические и магнитные силы. Еще в 1747 г. Иммануил Кант осознал глубокую связь между этим законом и трехмерностью пространства. Уравнения, описывающие гравитационное или электрическое поле точечного источника, можно легко обобщить на случай пространства с другим числом измерений и найти их решения для этого случая. Из этих решений видно, что в пространстве с  $n$  измерениями мы приходим к закону обратной степени  $n - 1$ . В частности, в трехмерном пространстве  $n - 1 = 2$  и справедлив закон «обратных квадратов»; в четырехмерном пространстве  $n - 1 = 3$  (закон «обратных кубов») и т. д. Нетрудно показать, что если бы гравитационное поле Солнца действовало на планеты, например, по закону «обратных кубов», то планеты, двигаясь по спиральным траекториям, довольно быстро упали бы на Солнце и оно поглотило бы их.

Аналогичная картина наблюдается и в мире атомов. Оказывается, что, даже если принять во внимание квантовые эффекты, у электронов не будет устойчивых орбит в пространстве с числом измерений больше трех. А без устойчивых атомных орбит не было бы химических процессов, а следовательно, и жизни.

От размерности пространства существенно зависит еще одно явление — распространение волн. Нетрудно показать, что в пространствах с четным числом измерений не могут распространяться «чистые» волны. За волной обязательно возникают возмущения, которые вызывают реверберацию. Именно поэтому четко сформированные сигналы нельзя передавать по двумерной поверхности (например, по резиновому покрытию). Анализируя этот вопрос, математик Г. Дж. Уитроу в 1955 г. пришел к выводу,

что высшие формы жизни были бы невозможны в пространствах четной размерности, поскольку живым организмам для согласованных действий необходимы эффективная передача и обработка информации.

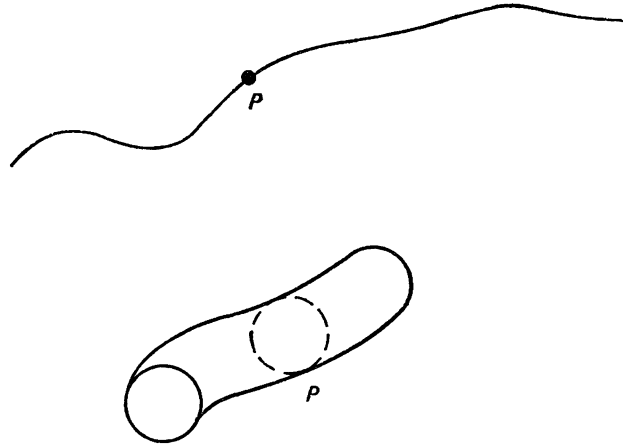
Эти исследования отнюдь не доказывают невозможность другого числа измерений пространства; они лишь говорят о том, что в мире с числом измерений, отличным от трех, физика была бы совершенно другой и, возможно, такой мир был бы значительно менее упорядочен по сравнению с тем, который мы реально воспринимаем.

Как совместить все это с теорией Калуцы, в которой вселенная имеет четыре пространственных измерения? Одна возможность состоит в том, чтобы рассматривать дополнительное, невидимое измерение исключительно как формальный математический прием, не имеющий физического смысла. Однако более привлекательная идея была высказана вскоре после публикации Калуцей первоначального варианта теории.

### Теория Калуцы — Клейна

В 1926 г. шведский физик Оскар Клейн предложил блестящий по простоте ответ на вопрос о том, куда же исчезло пятое измерение Калуцы. Клейн предположил, что мы не замечаем дополнительного измерения потому, что оно в некотором смысле «свернулось» до очень малых размеров. Поясним это на примере шланга для полива. Издали он выглядит просто как извилистая линия. При близком рассмотрении то, что мы принимали за точку на линии, оказывается окружностью (рис. 27). Клейн предположил, что Вселенная устроена аналогичным образом. То, что мы обычно считаем точкой в трехмерном пространстве, в действительности является крохотной окружностью в четвертом пространственном измерении. Из каждой точки пространства в направлении ни вверх, ни вниз, ни вбок, ни куда-либо еще в воспринимаемом нами пространстве выходит небольшая «петелька». Мы не замечаем всех этих «петель» вследствие крайней малости их размеров.

Чтобы свыкнуться с идеей Клейна, требуется время. Во-первых, мы не можем представить себе, где же свертываются эти петли? Ведь они находятся не в пространстве, а расширяют его, подобно тому, как кривая, многократно описывая петлю за петлей, вырисовывает трубку. Мы без труда представляем себе это в двух измерениях, но не в четырех. Однако предположение Клейна все-таки сохраняет смысл. При этом не возникает проблемы ни с устойчивостью орбит, ни с распространением волн. Дело в том, что ни вещество, ни поля (в виде волн) не могут неограниченно перемещаться в дополнительном измерении. Наличие пятого измерения допустимо, однако ничто не может ускользнуть



**Рис. 27.** С большого расстояния трубка кажется волнистой линией. При ближайшем рассмотрении точка  $P$  на этой линии оказывается окружностью поверхности трубки. Возможно, что объект, обычно воспринимаемый нами как точка в трехмерном пространстве, в действительности представляет собой крошечную окружность в других измерениях пространства. Эта идея лежит в основе теории Калуцы—Клейна, объединяющей электромагнитное и гравитационное взаимодействия.

из него сколь-нибудь далеко. Тем самым теория Калуцы — Клейна, увы, не оставляет никаких надежд фантастам использовать ее для сокращения пути в пространстве.

Клейн вычислил периметр петель вокруг пятого измерения, используя известное значение элементарного электрического заряда электрона и других частиц, а также величину гравитационного взаимодействия между частицами. Он оказался равным  $10^{-32}$  см, т. е. в  $10^{20}$  раз меньше размера атомного ядра. Поэтому неудивительно, что мы не замечаем пятого измерения: оно скручено в масштабах, которые значительно меньше размеров любой из известных нам структур, даже в физике субъядерных частиц. Очевидно, в таком случае не возникает вопроса о движении, скажем, атома в пятом измерении. Скорее это измерение следует представлять себе как нечто находящееся внутри атома.

Несмотря на ее неординарность теория Калуцы — Клейна на протяжении более полувека оставалась по существу не более чем математическим курьезом. С открытием в 30-е годы нашего столетия слабых и сильных взаимодействий идеи объединения гравитации и электромагнетизма в значительной мере потеряли свою привлекательность. Последовательная единая теория поля должна была включить в себя уже не две, а четыре силы. Очевидно, это нельзя было сделать, не достигнув глубокого понимания слабых и сильных взаимодействий. В конце 70-х годов благо-



даря свежему ветру, принесенному теориями Великого объединения (ТВО) и супергравитацией, вспомнили старую теорию Калуцы — Клейна. С нее стряхнули нафталин, сдули пыль, приодели по моде и включили в нее все известные на сегодня взаимодействия.

В ТВО теоретикам удалось собрать в рамках одной концепции три очень различных вида взаимодействий; как мы узнали из предыдущих глав, это обусловлено тем, что все три взаимодействия могут быть описаны с помощью калибровочных полей. Основное свойство калибровочных полей состоит в существовании абстрактных симметрий, благодаря которым этот подход обретает элегантность и открывает широкие возможности. Наличие симметрий силовых полей достаточно определенно указывает на проявление некоторой скрытой геометрии. В возвращенной к жизни теории Калуцы — Клейна симметрии калибровочных полей приобретают конкретность — это геометрические симметрии, связанные с дополнительными измерениями пространства.

Как и в первоначальном варианте, взаимодействия вводятся в теории путем присоединения к пространству-времени дополнительных пространственных измерений. Однако, поскольку теперь надо дать пристанище взаимодействиям трех типов, приходится вводить несколько дополнительных измерений. Простой подсчет количества операций симметрии, входящих в ТВО, приводит к теории с семью дополнительными пространственными измерениями (так что их общее число достигает десяти); если же учесть время, то всего пространство-время насчитывает *одиннадцать* измерений. Таким образом, современный вариант теории Калуцы — Клейна постулирует одиннадцатимерную вселенную.

При этом необходимо предполагать, что дополнительные семь измерений пространства каким-то образом свернуты в столь малых масштабах, что мы вообще не замечаем их. Одно дополнительное измерение можно свернуть лишь единственным способом, а именно в «окружность». Однако многомерные пространства можно свернуть (или компактифицировать) различными способами. Например, двумерную поверхность можно присоединить так, чтобы она образовывала либо поверхность сферы, либо поверхность тора (фигуры, имеющей формы бублика). Обе структуры замкнуты, и их размеры могут быть предельно малыми; однако они существенно различаются своей топологией: у бублика есть дырка!

Когда же речь идет о семи измерениях, набор возможных топологий становится чрезвычайно большим. Какая из них верна? Один из наиболее привлекательных вариантов — это семимерный аналог сферы, т. е. 7-сфера. Если невидимые измерения пространства действительно имеют такую форму, это означает, что каждая точка трехмерного пространства фактически представляет собой

крохотный семимерный «гипершар». 7-сфера привлекла внимание математиков более полувека назад в связи с тем, что она обладает рядом уникальных геометрических свойств. Нет необходимости входить в детали этого, но если бы природе понадобилась замкнутая геометрическая структура, допускающая существование в реальном мире всех известных фундаментальных взаимодействий, то простейшей из них была бы 7-сфера. Все наблюдаемые нами структуры — от атомов до галактик — нельзя получить с помощью более простой математической конструкции.

Сфера — в высшей степени симметричная фигура, причем 7-сфера обладает многими дополнительными симметриями, не свойственными обычной сфере. Именно с их помощью удается смоделировать основополагающие калибровочные симметрии силовых полей. Однако физикам понадобилось много времени, чтобы обнаружить эти поля, в частности по той причине, что симметрии иногда оказываются скрытыми, или нарушенными (в том смысле, как это описано в гл. 8). В теории Калуцы — Клейна такое нарушение симметрии достигается небольшой деформацией семимерной структуры, ее отклонением от идеальной сферичности. Слегка сплюснутая 7-сфера считается сейчас наиболее вероятной конфигурацией дополнительных компактифицированных измерений пространства.

Воскрешенная теория Калуцы — Клейна вдохновила теоретиков на переформулировку законов физики с учетом одиннадцати измерений. При этом возникла необходимость объяснить, почему единое пространство-время допускает расщепление размерностей на семь и четыре. Насколько неизбежно, чтобы семь из одиннадцати измерений свернулись, став невидимыми, а остальные четыре оказались доступными непосредственному восприятию, или возможны и другие разбиения, например на восемь и три?

В поисках причин спонтанной компактификации семи измерений теоретики исходили из того, что физические системы всегда стремятся к состоянию с наименьшей энергией. В гл. 8 мы уже приводили пример действия этого принципа: шарик на поверхности «сомбреро» в конечном итоге переходит в устойчивое состояние с наименьшей энергией, скатываясь на «поля» сомбреро. Это наводит на мысль, что слегка сплюснутая 7-сфера в некотором смысле воплощает в себе конфигурацию пространства-времени с наименьшей энергией.

Вместе с тем можно допустить, что 7-сфера — лишь одна из многих возможных конфигураций. Заманчиво предположить, что где-то в космосе, за пределами наблюдаемой Вселенной пространство имеет другое число измерений. Возможно, переместившись на тысячи миллионов световых лет, мы оказались бы в мире с пятью пространственными измерениями вместо трех. Тогда мы

смогли бы ответить на вопрос: «Почему три?». Одиннадцатимерное пространство-время могло бы быть разбито на области (домены) с различной наблюдаемой размерностью. Поскольку свойства силовых полей зависят от геометрических симметрий компактифицированных измерений, характер взаимодействий должен был бы изменяться при переходе от одной области к другой. Эти изменения порождали бы ряд проблем, обсуждавшихся ранее, в частности связанных с устойчивостью, волновым движением и т. п. В результате физические условия в областях пространства-времени, где нет обычного расщепления на семь и четыре, резко отличались бы от условий, существующих в наблюдаемой нами Вселенной. Сомнительно, чтобы в подобных областях могла цвести жизнь или вообще могло что-либо существовать. Живые организмы имеют чрезвычайно тонкую организацию и их существование, по-видимому, критически зависит от единственно гармоничного сочетания взаимодействий, которое характерно для нашей Вселенной. Отсюда следует, что мы самим своим существованием выбрали область пространства-времени с тремя пространственными измерениями, доступными непосредственному восприятию. Мы просто не смогли бы жить в области с иным числом измерений.

### Почему одиннадцать?

Использование так называемого антропного принципа для объяснения трехмерности непосредственно воспринимаемого нами пространства порождает новые интересные вопросы. Должно ли полное число измерений пространства-времени неизбежно равняться одиннадцати или оно также может меняться от места к месту? Не может ли существовать мир, в котором из полного числа измерений, равного двадцати одному, семнадцать свернулись в компактную структуру? Такой мир будет обладать значительно более сложной системой силовых полей, чем те четыре взаимодействия, которые мы наблюдаем в окружающем нас мире. Кто знает, какие замысловатые структуры, какие утонченные формы жизни могли бы возникнуть в такой вселенной?

На протяжении всей истории человечества люди увлекались цифрологией, исповедовали культ чисел. Древние греки наделяли определенные числа мистическим смыслом. До наших дней число четыре — число сторон квадрата — хранит следы того, что в древности связывалось с честностью и справедливостью, — как в выражении *a square deal* (честная сделка)<sup>1</sup>. Многие люди

<sup>1</sup> *Square* в английском языке означает, с одной стороны, «квадрат, прямоугольник», а с другой — «честный», «прямой», а также «ровный», «точный», — *Прим. перев.*

до сих пор верят в «счастливые» и «несчастливые» числа, такие, как три, семь, тринадцать. В Библии неоднократно упоминаются числа семь и сорок; число 666 люди связывают с дьяволом и т. п.

Когда мы встречаемся с теми или иными числами, возникает искушение поискать скрывающийся за ними смысл. Иногда эти числа кажутся чисто случайными, как, например, число планет в Солнечной системе. За другими, возможно, скрывается какой-то более глубокий смысл. Так, оказалось, что число адронов определяется числом возможных комбинаций кварков. А что такое размерность пространства-времени: столь же случайное число, как количество планет и тому подобное? Или это указание на существование фундаментальных фактов, отражающих на языке логики и математики структуру физического мира?

Имеется любопытное свидетельство того, что число одиннадцать действительно имеет глубокий математический смысл. Оно происходит из области физики, называемой супергравитацией, которая, по крайней мере на первый взгляд, совершенно не связана с теорией Калуцы — Клейна.

В предыдущей главе рассматривался наиболее многообещающий вариант супергравитации, называемый  $N = 8$ . Это таинственное обозначение требует расшифровки. Операция суперсимметрии связывает частицы с разными спинами в единое суперсемейство, содержащее 163 частицы. Может возникнуть вопрос, почему их только 163. Если операция суперсимметрии превращает частицы с одним значением спина в частицы с другим спином, то что мешает, продолжая этот процесс до бесконечности, получить таким образом бесконечное количество частиц с произвольно большими значениями спина? Но чтобы операция суперсимметрии действительно представляла собой один из видов симметрии, она должна содержать лишь «замкнутую» последовательность операций. Подобная операция создает только конечное семейство частиц. Кроме того, поскольку в силу веских математических причин не могут существовать частицы со спином больше 2, суперсемейство из 163 частиц оказывается максимально возможным.  $N = 8$  обозначает число шагов, посредством которых операция суперсимметрии связывает частицы с различными спинами (в пределах возможного диапазона значений). Так как спин может быть направлен «вверх» либо «вниз», его проекция может изменяться от значения  $+2$  (частица со спином 2, направленным «вверх») до значения  $-2$  (частица со спином 2, направленным «вниз»), причем это изменение происходит с шагом  $1/2$ . Очевидно, что в интервале от  $-2$  до  $+2$  восемь таких шагов; это означает, что для создания всего суперсемейства частиц со всевозможными значениями проекций спина, необходимо восемь операций суперсимметрии. Оказывается, что это число связано и с количеством различных типов гравитино, которое в этой теории

также равно восьми. Понятие спина связано со свойствами вращения частиц в обычном трехмерном пространстве. Математики одно время тешили построением описания спина в пространствах с другим числом измерений — чтобы посмотреть, как это будет выглядеть. Оказывается, однако, что если основываться на супергравитации, то теория значительно упрощается, когда число измерений превышает три. В частности, для простейшей из всех формулировок требуется как раз *одиннадцать* измерений: в этом случае восемь различных операций суперсимметрии, соответствующих супергравитации « $N = 8$ », вырождаются в единственную операцию, и возникает супергравитация « $N = 1$ ».

Представим себе восторг математика, который, не имея представления о размерности реальной Вселенной и исходя лишь из соображений элегантности и единства описания, открыл бы супергравитацию. Он будет вынужден сформулировать теорию пространства-времени в одиннадцати измерениях и сделать вывод, что если бы природа имела представление о самой себе, то она, конечно, «выбрала» бы число одиннадцать в качестве размерности реального мира. Является ли это обстоятельство простой случайностью или оно указывает на глубокую связь супергравитации с теорией Калуцы — Клейна? Многие физики надеются, что такая связь действительно существует, и два направления объединения в физике — супергравитация и теория Великого объединения — приведут к созданию единого описания. Саламу принадлежит высказывание:

Если эта теория справедлива, то мы, возможно, очень близки к окончательному и полному объединению всех взаимодействий и обладающего спиром вещества, в котором (объединении) фундаментальные заряды служат проявлением скрытых размерностей пространства.

### Геометризация природы

Мы убедились, насколько близка к реализации мечта Эйнштейна о построении единой теории поля на основе геометрии. В современном варианте теории Калуцы — Клейна все силы природы, подобно гравитации, рассматриваются как проявление структуры пространства-времени. То, что мы обычно называем гравитацией, обусловлено кривизной четырехмерного пространства-времени, тогда как остальные силы обусловлены кривизной пространства более высокой размерности. Все силы природы выступают просто как проявление скрытой геометрии.

Еще в 1870 г. математик У. К. Клиффорд, обращаясь с мемуаром «О пространственной теории материи» в престижное Кембриджское философское общество, писал:

Небольшие участки пространства напоминают холмы на ровной в среднем поверхности... Подобные деформации (или искривления) непрерывным образом, точно волна, переходят из одной области пространства в другую... Изме-

нение кривизны пространства и есть то явление, о котором мы говорим как о *движении материи*. Вообще в физическом мире не происходит ничего, кроме такого изменения.

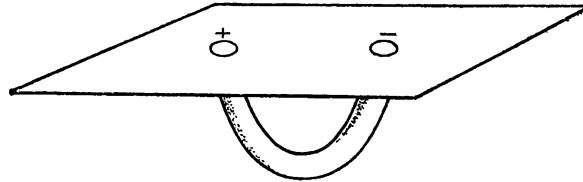
Эти мысли звучат удивительно пророчески, если вспомнить об общей теории относительности, примерно полвека спустя созданной Эйнштейном. Однако Клиффорд, по-видимому, пошел дальше общей теории относительности, предположив, что не только силы, но и частицы вещества в сущности представляют собой всего лишь «кочки» и «ухабы» пустого пространства.

Есть глубокие основания предполагать, что вся Вселенная, включая, по-видимому, «твердое» вещество, воспринимаемое нашими органами чувств, — это всего лишь проявление извилистого ничто. Мир в конечном итоге окажется слепком абсолютной пустоты, самоорганизованным вакуумом. Геометрия сыграла роль повивальной бабки науки. Кропотливая работа многих поколений астрономов, наносивших на карты звездного неба траектории небесных тел, привела в конечном счете к ньютоновской научной революции и объяснила движение небесных светил с помощью сил и полей. Теперь круг замыкается: поля и взаимодействия получают объяснение на языке геометрии.

В начале 60-х годов американский физик-теоретик Джон Уилер, обобщив труды Клиффорда и Эйнштейна, попытался создать всеобъемлющую теорию, основанную лишь на геометрии пустого пространства-времени. Он назвал свою программу геометродинамикой. Ее цель состоит в объяснении природы как частиц, так и взаимодействий на основе геометрии.

Хорошей иллюстрацией общих идей, лежащих в основе теории Уилера, может служить его модель электрического заряда. По мнению Уилера, заряженная частица представляет собой нечто вроде входа в крошечный туннель, соединяющий друг с другом точки пространства и проходящий через другое измерение. Противоположный конец туннеля предстает перед нами как другая частица с зарядом противоположного знака. Таким образом, два конца уилеровской «кротовой норы» могли бы соответствовать, например, паре электрон — позитрон. Физики прошлого века сказали бы, что электрические силовые линии сходятся к заряженной частице и заканчиваются на ней, а в теории Уилера эти линии просто концентрируются в норе, вновь появляясь с другого конца (рис. 28). Согласно этим представлениям, в источниках электрического поля вообще нет необходимости: нужны лишь «дыры» в пространстве, засасывающие в себя электрические поля.

Геометродинамика обладает множеством подобных замечательных свойств, однако эта теория никогда не пользовалась особым успехом. Сам Уилер писал, что «наиболее очевидным недостатком теории является то, что... в ней вообще нет естественного места для спина  $1/2$  и для частицы нейтрино в частности».



**Рис. 28.** Уилер предположил, что электрическая заряженная частица могла бы представлять собой торец крохотной трубки — «кратовой норы», проходящей через другое измерение пространства и соединяющейся с привычным нам трехмерным пространством в том месте, где во Вселенной находится частица с противоположным зарядом.

В дальнейшем Уилер пришел к убеждению, что вообще никакая теория, в которой изначально принимается существование пространства-времени, не может объяснить само это понятие. В частности, размерность пространства-времени привносится с самого начала в такую теорию и потому не может быть следствием. Любая законченная теория природы должна объяснить существование «исходного материала» — самого пространства-времени, — из которого далее строится геометродинамический мир. Уилер полагает, что подобная теория может основываться лишь на идеях квантовой физики, и предвидит время, когда мы поймем, каким образом именно квант (а не пространство-время) служит основным «кирпичиком» мироздания.

Теперь нам уже ясно, что неудача теории Уилера отчасти обусловлена тем, что она ограничивается четырьмя измерениями. При полном числе измерений, равном одиннадцати, резко возрастает разнообразие и сложность физических структур, которые удастся построить. В теории Калуцы — Клейна частицы рассматриваются не как «кратовые норы», а как *возбуждения* пространства с одиннадцатимерной геометрией. Остается только надеяться, что саму эту геометрию удастся объяснить с помощью квантовых явлений, как это предлагается программой Уилера.

### Исследование скрытых измерений

Сколь бы прекрасной ни была природа, однако сами по себе красота и изящество теории не могут убедить физиков в ее истинности. Необходимы неопровержимые физические доказательства. Могущество и элегантность одиннадцатимерной теории Калуцы — Клейна обязывают нас относиться к ней серьезно, однако, если не найдется никаких способов доказать существование семи дополнительных пространственных измерений, теория в значительной мере потеряет свою привлекательность.

К счастью, по-видимому, можно продемонстрировать существование дополнительных измерений. Чтобы теория Калуцы —

Клейна была единственной, семь дополнительных измерений пространства должны свернуться, по всей вероятности, в форме 7-сферы диаметром порядка  $10^{-32}$  см. Изучение подобных ультрамикроскопических структур представляет серьезный вызов современной физике. Пока столь малые объекты нам не подвластны, ибо нечего направить «внутрь» 7-сферы для ее изучения.

В квантовой физике каждому масштабу длин сопоставляется масштаб энергий (или эквивалентных масс). Например, диаметр ядра (около  $10^{-12}$  см) соответствует примерно массе пиона. Чем меньше изучаемый масштаб длин, тем выше необходимая для этого энергия. Для изучения кварковой структуры протона требуются энергии, эквивалентные по крайней мере десятикратной массе протона. Значительно выше по шкале энергий расположена масса, соответствующая Великому объединению (примерно  $10^{14}$  масс протона). Если нам когда-либо удастся достичь столь огромной массы (энергии), от чего мы сегодня весьма далеки, то появится возможность изучить мир X-частиц, в котором стираются различия между кварками и лептонами.

Какая же энергия необходима, чтобы проникнуть «внутрь» 7-сферы и исследовать дополнительные измерения пространства? Согласно теории Калуцы — Клейна, требуется превзойти масштаб Великого объединения и достичь энергий, эквивалентных  $10^{19}$  масс протона. Лишь при таких невообразимо огромных энергиях удалось бы непосредственно наблюдать проявления дополнительных измерений пространства.

Эта огромная величина —  $10^{19}$  масс протона — носит название массы Планка, так как она была впервые введена Максом Планком, создателем квантовой теории. При энергии, соответствующей массе Планка, все четыре взаимодействия в природе слились бы в единую суперсилу, а десять пространственных измерений оказались бы полностью равноправными. Если бы удалось сконцентрировать достаточное количество энергии, обеспечивающее достижение массы Планка, то полная размерность пространства проявилась бы во всем своем великолепии.

Дав свободу воображению, можно представить, что однажды человечество овладеет суперсилой. Если бы это случилось, то мы обрели бы власть над природой, поскольку суперсила в конечном счете порождает все взаимодействия и все физические объекты; в этом смысле она является первоосновой всего сущего. Овладев суперсилой, мы смогли бы менять структуру пространства и времени, по-своему искривить пустоту и привести в порядок материю. Управляя суперсилой, мы смогли бы по своему желанию создавать или превращать частицы, генерируя новые экзотические формы материи. Мы даже смогли бы манипулировать размерностью самого пространства, создавая причудливые искусственные миры



с немислимыми свойствами. Мы стали бы поистине властелинами Вселенной!

Но как этого достичь? Прежде всего необходимо добыть достаточное количество энергии. Чтобы представить, о чем идет речь, напомним, что линейный ускоритель в Станфорде длиной 3 км разгоняет электроны до энергий, эквивалентных 20 массам протона. Для достижения энергии Планка ускоритель потребовалось бы удлинить в  $10^{18}$  раз, сделав его размером с Млечный Путь (около ста тысяч световых лет). Подобный проект не из тех, что удастся осуществить в обозримом будущем.

В теории Великого объединения отчетливо различаются три пороговых значения, или масштаба, энергии. Прежде всего — это порог Вайнберга — Салама, эквивалентный почти 90 массам протона, выше которого электромагнитные и слабые взаимодействия сливаются в единое электрослабое. Вторым масштаб, соответствующий  $10^{14}$  массам протона, характерен для Великого объединения и основанной на нем новой физики. Наконец, предельный масштаб — масса Планка, — эквивалентный  $10^{19}$  массам протона, соответствует полному объединению всех взаимодействий, в результате чего мир поразительно упрощается. Одна из самых больших нерешенных проблем состоит в объяснении существования этих трех масштабов, а также причины столь сильного различия первого и второго из них.

Современная техника способна обеспечить достижение лишь первого масштаба. Как отмечалось в предыдущей главе, распад протона мог бы дать нам косвенное средство для изучения физического мира в масштабе Великого объединения, хотя в настоящее время, по-видимому, нет никаких надежд непосредственно достичь этот предел, не говоря уже о масштабе массы Планка.

Означает ли это, что мы никогда не сможем наблюдать проявлений изначальной суперсилы и невидимых семи измерений пространства. Используя такие технические средства, как сверхпроводящий суперколлайдер (см. с. 109), мы быстро продвигаемся по шкале достижимых в земных условиях энергий. Однако создаваемая людьми техника отнюдь не исчерпывает всех возможностей — существует и сама природа. Вселенная представляет собой гигантскую естественную лабораторию, в которой 18 млрд. лет назад был «проведен» величайший эксперимент в области физики элементарных частиц. Мы называем этот эксперимент Большим взрывом. Как будет сказано далее, этого изначального события оказалось достаточно для высвобождения — хотя и на очень короткое мгновение — суперсилы. Впрочем, этого, видимо, оказалось достаточно, чтобы призрачное существование суперсилы навсегда оставило свой след.

## Суперструны<sup>1</sup>

Темпы современных исследований таковы, что с тех пор, как английское издание книги было направлено в печать, в развитии программы Великого объединения достигнуты дальнейшие успехи — создана так называемая теория суперструн.

При обычном подходе к построению модели мира предполагается, что все вещество состоит из частиц, а поиск фундаментальных частиц является главной целью физики высоких энергий. Как мы видели, даже поля, описывающие силы природы, получают интерпретацию с помощью частиц — переносчиков взаимодействия. Но теперь этому фундаментальному предположению брошен вызов. По-видимому, мир состоит не из частиц, а из струн.

Теория струн возникла в 60-е годы при попытках выяснить внутреннее строение адронов. Оказывается, что кварки, связанные друг с другом снующими внутри адронов глюонами, в некотором отношении ведут себя подобно нитям, или струнам. Теория сначала вызвала определенный интерес, однако не была вполне успешной. В частности, обнаружилось, что при определенных условиях струны двигались бы быстрее света, что абсолютно недопустимо. Развитие тематики, связанной со струнами, приостановилось, и большинство физиков обратились к другим проблемам, а теория поддерживалась главным образом усилиями Майкла Грина из Колледжа королевы Марии при Лондонском университете и Джона Шварца из Калифорнийского технологического института, США.

Затем в середине 70-х годов теория струн получила значительное развитие, которое в конечном счете привело к превращению заумной старой теории в нечто несравненно более мощное и элегантное. В это время теория элементарных частиц находилась под большим влиянием концепции суперсимметрии, и теоретики исследовали результаты перехода к суперсимметричным струнам. При этом выяснилось, что новые «суперструны» имеют огромные преимущества перед старыми струнами. Во-первых, из теории было исключено сверхсветовое движение. Во-вторых, в пределе низких энергий теория выглядела весьма обычной — очень напоминала *супергравитацию*. Стало складываться впечатление, что теория суперструн может оказаться значительно более широкой, нежели просто теория адронов. Затем в 1982 г. Грин и Шварц обнаружили, что суперсимметрия позволяет изгнать бесконечности в случае струн аналогично тому, как это делает теория частиц. Бесконечности при высоких энергиях, вызывавшие столько бес-

---

<sup>1</sup> Раздел написан автором для издания книги в русском переводе (его чтение не обязательно для понимания дальнейшего материала). — *Прим. ред.*

покоя в теориях частиц и старой теории струн, в определенном классе теорий суперструн полностью исчезли.

Однако лишь в 1983 г. произошло то, что заставило физиков обратить серьезное внимание на теорию суперструн. Речь идет о замечательном математическом свойстве этой теории, которое казалось «слишком хорошим, чтобы быть верным». Один из недостатков физики квантовых частиц носит название проблемы аномалий. Под этим безобидным термином понимают появляющиеся в квантовой теории математические члены, которые согласно фундаментальным свойствам симметрии, присутствующим в теории еще до квантования, должны быть равны нулю. Иными словами, придание теории квантового характера вызывает неожиданное появление в ней членов, которые «не имеют права» на существование. Эти члены нарушают последовательность теории и могут приводить к столь нежелательным последствиям, как нарушение законов сохранения энергии и электрического заряда. Поразительное свойство конкретного варианта теории суперструн, исследованной Грином и Шварцем, состоит в неожиданной перегруппировке математических членов, которая точно компенсирует и устраняет аномалии! По словам Майкла Грина, «происходит сокращение слагаемых, от которых ничего подобного нельзя было ожидать». Таким образом, теория удивительным образом освобождается от аномалий.

Устранения аномалий оказалось достаточно, чтобы привлечь к теории суперструн внимание других известных теоретиков; но это было лишь начало. Выяснилось, что сокращение происходит лишь в том случае, когда суперструны конструируются на основе очень частного вида калибровочной симметрии (она известна как группа  $SO(32)$ , или  $E_8 \times E_8$ ). В отличие от теории частиц, где можно свободно выбирать среди многих конкурирующих видов калибровочной симметрии, в последовательной теории суперструн выбор разрешенной калибровочной группы почти однозначен. Обе допустимые группы включают уже известные — например группу  $SU(3)$ , связанную со слабыми, сильными и электромагнитными силами. Этот факт указывает на сходство теории суперструн со стандартной физикой частиц в области низких энергий.

Последнее обстоятельство, сразу обеспечившее теории суперструн хорошую репутацию, заключается в том, что эту теорию следует формулировать в пространстве-времени с десятью измерениями. В прошлом считалось, что высокая размерность теории суперструн делает ее безнадежно нереалистической, однако по прошествии нескольких лет под влиянием теорий Калуцы — Клейна физики восприняли идею высокой размерности довольно спокойно. В конце концов с нежелательными высокими размерностями всегда можно справиться с помощью «компактификации».

Однако десятимерная теория имеет важное математическое преимущество по сравнению с одиннадцатимерной теорией Калуцы — Клейна. Как показал Эд Уиттен из Принстона, любая теория, формулируемая в пространстве нечетной размерности, обладает серьезным недостатком. Речь идет о существовании в природе «врожденной» закрученности вправо или влево — «киральности». Как отмечалось, слабое взаимодействие вносит в физику асимметрию между левым и правым, и к четырехмерной теории киральной вселенной можно прийти лишь в том случае, если исходить из теории с четным числом измерений. Это препятствие, весьма серьезное для теории Калуцы — Клейна, полностью устранено в десятимерной теории суперструн.

Основное преимущество струн перед частицами состоит в их поведении при высоких энергиях. При низких энергиях струны ведут себя вполне аналогично частицам, однако с приближением к энергии Планка становятся существенными внутренние движения — струны начинают «вибрировать». Это резко меняет математическую структуру теории как раз там, где обычная теория начинает давать сбои и приводит к нежелательным бесконечностям. Благодаря объединению суперсимметрии и внутреннего движения струн становится весьма вероятным полное избавление от этих бесконечностей.

Таким образом, теории суперструн, возникшие из скромных попыток смоделировать некоторые свойства адронов, приобрели статус вполне зрелой программы объединения взаимодействий. Эти теории делятся на два класса: струны со свободными концами и струны в виде замкнутых петель. Грин и Шварц предпочли сначала вариант струн со свободными концами, однако в этом случае допустима лишь группа симметрии  $SU(32)$ . Некоторые теоретики обнаружили, что более привлекательна другая группа  $E_8$ , в частности потому, что позволяет построить теорию как чисто гравитационную и извлечь из нее другие силы, подобно тому как это делается в теории Калуцы — Клейна.

Буква  $E$  указывает здесь на особый характер группы (англ. *exceptional*. — Перев.), которая названа так, поскольку ее существование математически неочевидно. В модели замкнутых струн используется удвоенная группа  $E_8$  (обозначаемая  $E_8 \times E_8$ ), что открывает интересную возможность: предсказывается существование двух различных миров — по одному на каждую группу  $E_8$ . Частицы в каждом из этих миров обладают всеми обычными свойствами, включая способность взаимодействовать друг с другом посредством различных сил природы. Однако у частиц в «другом» мире будет существовать свой собственный идентичный набор иных взаимодействий. Таким образом, между частицами из разных миров не будет прямого взаимодействия, за исключением грави-

тации. Гравитационные эффекты, обусловленные веществом «иног» мира, будут проявляться и в «этом» мире.

Это приводит к фантастической идее о существовании «призрачной вселенной», взаимопереплетенной с реальной Вселенной, но во многом остающейся незаметной. Так, может существовать «призрачная материя», проникающая в вас в данный момент; ее слабое гравитационное воздействие не способно вызвать заметные эффекты. Вместе с тем «призрачная» планета, проходящая через Солнечную систему, могла бы сдвинуть Землю с ее орбиты. «Призрачную» черную дыру нельзя отличить от черной дыры из обычного вещества. Очень существенно, что космологам давно известно о существовании во Вселенной огромного количества невидимого вещества, вызывающего гравитационное возмущение, но в остальном остающегося совершенно незаметным. Возможно, что это невидимое вещество и есть «призрачная материя».

Уиттен отозвался о теории суперструн как о «безусловном чуде» и уверенно предсказал ей ведущую роль в физике в предстоящие пятьдесят лет. Будущее покажет, насколько оправданна или преждевременна такая эйфория, однако предстоит большая работа. Как и теория Калуцы — Клейна, теория суперструн имеет всеобъемлющий характер. Это означает, что, начиная с суперсилы — всеобщего и изящного объединения частиц и взаимодействий при сверхвысоких энергиях, теория в конечном счете так или иначе должна вернуться к описанию обычных физических явлений. Если теория вообще претендует на установление контакта с экспериментальной физикой, то необходим переход от струн в десяти измерениях к свойствам частиц в четырех измерениях при низких энергиях. В настоящее время математические проблемы, связанные с подобным шагом, кажутся непреодолимыми. Тем не менее концепция, которая известна под названием «теория всего сущего», — программа полного объединения в форме теории Калуцы — Клейна или суперструн — столь привлекательна, что многие талантливые теоретики с нетерпением ждут возможности испробовать свои силы.

## Ископаемые космоса

---

### Происхождение элементов

Солнечным весенним днем 1822 г. молодой сельский врач Гидеон Мантелл навещал пациента неподалеку от своего родного города Льюиса в графстве Сассекс (Англия). В этой поездке доктора Мантелла сопровождала его жена Мэри Энн, которая, пока муж занимался больным, воспользовалась возможностью побродить по сельским улочкам. Проходя мимо груды камней, добытых из карьера для ремонта дороги, миссис Мантелл заметила странный блестящий предмет коричневого цвета. При ближайшем рассмотрении он оказался куском песчаника, содержащим несколько гигантских зубов. Миссис Мантелл показала находку своему мужу, геологу-любителю, и он пришел в сильное возбуждение. Найденные зубы напоминали зубы ящерицы игуаны, и доктор Мантелл сделал смелое предположение, что они когда-то принадлежали огромным травоядным рептилиям, населявшим Землю еще до появления млекопитающих. Он назвал эти существа игуанодомами. Так чета Мантеллов впервые обнаружила и правильно описала останки динозавров.

Случайное открытие миссис Мантелл пришлось на критическое для науки время. По традиции возраст Земли считался равным нескольким тысячам лет, что усиленно поддерживалось библейским мифом о сотворении мира. Однако к концу восемнадцатого столетия геология уже становилась настоящей наукой, и большинство геологов начали осознавать, что такие процессы, как образование осадочных пород или выветривание, имеют затяжной характер и совершаются за огромные промежутки времени. Еще в 1779 г. французский геолог Жорж Луи Леклерк оценил возраст Земли лишь в 75 тыс. лет. Однако к середине XIX в. этот отрезок времени «растянулся» до сотен миллионов (а возможно, и миллиардов) лет. В настоящее время методами радиоактивного датирования возраст Земли оценивается в 4,6 млрд. лет.

Найденные Мантеллами останки вскоре были признаны останками вымерших существ, которые населяли Землю 65—200 млн.

лет назад. Достояна восхищения мысль, что, изучая современные горные породы, можно кое-что узнать о мире в столь далекие времена; 200 млн. лет — такой гигантский отрезок времени, что не поддается человеческому воображению. Дальнейшие более тщательные поиски привели к открытию останков живых организмов, возраст которых оценивается не менее чем в 3 млрд. лет (а возможно, близко к 4 млрд.).

У большинства людей представление об ископаемых, или реликтах, ассоциируется с застывшими отпечатками некогда существовавших живых организмов. Но имеется немало и других физических объектов, также несущих на себе отпечаток отдаленного прошлого. Например, «рябь» на поверхностях Луны, Марса и Меркурия — это след интенсивных метеоритных бомбардировок планет в период образования Солнечной системы. В определенном смысле все физические объекты являются реликтами. Любой из существующих объектов имеет свою историю и несет информацию об обстоятельствах своего возникновения и развития. Задача, причем весьма нетривиальная, состоит в том, чтобы расшифровать эту информацию.

Для начала интересно выбрать наиболее знакомый нам объект — наш собственный организм и попытаться выяснить, что он может поведать о прошлом.

Прежде всего отметим, что наш организм содержит биологическую информацию, которая закодирована в генах — отдельных участках молекул ДНК, имеющих характерную структуру. Молекулы ДНК лежат в основе всей жизни на Земле. Поэтому их можно рассматривать как реликт возникновения жизни на Земле около 4 млрд. лет назад. Наша генетическая структура несет на себе бесчисленные отпечатки физических условий, в которых находились наши предки на протяжении многих веков и которые способствовали эволюции человека. Поэтому наш организм — это живой реликт, который в закодированном виде хранит в себе историю нашей планеты.

Биологическая информация определяется тем, какими способами атомы углерода, водорода, кислорода и других элементов, входящих в состав живых организмов, образуют сложные соединения. Ну а что можно сказать о самих атомах, из которых построен наш организм и весь окружающий нас мир?

Согласно современным космологическим представлениям, эти атомы существовали не всегда: они являются реликтами физических процессов, происходивших в глубинах Вселенной задолго до образования Земли. Атомы — это ископаемые космоса. Как мы видели в гл. 2, первооснову космического вещества составляет водород, на который вместе с гелием приходится около 10 % всех атомов, тогда как на каждый из остальных примерно 90 элементов — лишь малая доля. В нашем организме сконцентрированы

многие элементы, которые в космосе встречаются в следовых количествах. Они зарождались в сложных процессах, происходящих внутри звезд.

На начальных стадиях существования Вселенной космическое вещество практически не содержало элементов среднего и тяжелого веса. Такие элементы — это «зола» ядерных «костров», пылающих в недрах звезд. Ядро звезд, подобных Солнцу, представляет собой термоядерный реактор, в котором горючим служат в основном ядра водорода (протоны). Огромная температура внутри Солнца заставляет протоны двигаться столь интенсивно, что, несмотря на мощное электростатическое отталкивание, они время от времени соударяются друг с другом. Если протоны при соударении сближаются до радиуса сильного ядерного взаимодействия, становится возможным их слияние (синтез). Ядро, состоящее из двух протонов, неустойчиво, но если один из протонов в результате слабого взаимодействия (процесса, обратного бета-распаду) превратится в нейтрон, то образуется устойчивое ядро дейтерия; при этом высвобождается энергия, способствующая поддержанию высокой температуры в недрах звезды. Последующие реакции синтеза приводят к превращению дейтерия в гелий. В старых звездах преобладает синтез более тяжелых ядер из легких. В ходе следующих один за другим процессов синтеза сначала образуется углерод, а затем и все более сложные ядра.

По мере исчерпания запасов ядерного горючего звезды ее внутренняя структура все более напоминает луковицу (мы вновь прибегаем к этой аналогии); последовательные слои «луковицы» состоят из различных химических элементов, и это строение отражает различные стадии в длительном процессе ядерного синтеза. На протяжении своей «жизни» звезда постепенно превращается из почти чистой смеси первичного водорода и гелия в хранилище ядерной «золы», состоящей из тяжелых химических элементов. На заключительном этапе эволюции такая звезда может стать неустойчивой. Слабеющие ядерные реакции уже не в состоянии поддерживать внутри звезды такие значения температуры и давления, которые обеспечивали бы устойчивость огромной звездной массы. В результате гравитация, выйдя из-под контроля, вызывает мгновенное сжатие (коллапс) звезды. Гигантский выброс энергии в виде нейтрино и ударных волн, исходящих из внутренней области звезды, буквально сдувает внешние слои звезды в окружающее пространство, разбрасывая тяжелые элементы по просторам галактики. Подобный выброс обычно называют взрывом сверхновой (см. гл. 5). Каждый взрыв сверхновой обогащает галактику ничтожно малыми (следовыми) количествами элементов, столь необходимых для образования планет типа Земли, а в дальнейшем — для зарождения и эволюции населяющих ее форм жизни. Таким образом, наш организм построен из реликтовых оскол-



ков когда-то ярких звезд, которые погибли задолго до возникновения Земли и Солнца.

Тяжелые элементы в окружающем нас мире несут на себе отпечаток бурной истории Вселенной; однако от несравненно более неистовой эпохи космической эволюции, Большого взрыва, ведут свое начало легкие элементы — водород и гелий. Возникает вопрос: существовали ли эти элементы «с самого начала» или они являются реликтами какой-то очень ранней фазы?

Ключ к пониманию ранних этапов эволюции Вселенной скрыт в гигантском количестве теплоты, выделившейся при Большом взрыве. В своем простейшем варианте теория горячей Вселенной предполагает, что Вселенная спонтанно возникла в результате взрыва из состояния с бесконечно большой плотностью и бесконечно большой тепловой (внутренней) энергией. По мере расширения Вселенной температура падала — сначала быстро, а затем все медленнее — от бесконечно большого значения до довольно низкой величины, при которой возникли условия, благоприятные для образования звезд и галактик. На протяжении около 100 тыс. лет температура превышала несколько тысяч градусов, что препятствовало образованию атомов. Таким образом, примерно 100 тыс. лет космическое вещество сохраняло форму разогретой плазмы, состоящей из ионизированного водорода и гелия. Лишь когда температура Вселенной понизилась приблизительно до температуры поверхности Солнца, возникли первые атомы. Таким образом, атомы — это реликты эпохи, наступившей через 100 тыс. лет после Большого взрыва.

Остается, однако, еще более интересный вопрос. Каково происхождение ядер водорода и гелия? Не являются ли они продуктами физических процессов, происходивших в еще более ранние эпохи? В первые несколько минут после Большого взрыва температура космической плазмы превышала  $10^6$  К — этого было вполне достаточно для протекания ядерных реакций. Методом численного моделирования на ЭВМ и с использованием данных ядерной физики астрофизикам удалось воспроизвести детали ядерных процессов, происходивших в первые минуты существования Вселенной.

Согласно полученным результатам, в конце первой секунды температура достигала  $10^{10}$  К — это слишком много для того, чтобы могли существовать сложные ядра. Все пространство было тогда заполнено хаотически движущимися протонами и нейтронами, вперемешку с электронами, нейтрино и фотонами (тепловым излучением). Ранняя Вселенная расширялась чрезвычайно быстро, так что по прошествии минуты температура упала до  $10^8$  К, а спустя еще несколько минут — ниже уровня, при котором возможны ядерные реакции. Таким образом, в процессе эволюции ранней Вселенной существовал относительно короткий

(порядка нескольких минут) промежутков времени, когда протоны и нейтроны могли объединяться, образуя сложные ядра.

Основной ядерной реакцией в тот период было слияние протонов и нейтронов с образованием ядер гелия, каждое из которых состоит из двух протонов и двух нейтронов. Поскольку протоны немного легче нейтронов, они присутствовали в несколько большем количестве, так что по завершении синтеза гелия часть протонов оставалась свободной. Как показывают вычисления, за столь короткое время очень мало что могло произойти. Поэтому образовавшаяся плазма состояла примерно на 10 % из ядер гелия и на 90 % из ядер водорода. Эти цифры с вполне удовлетворительной точностью характеризуют наблюдаемое содержание названных элементов в современной Вселенной. Таким образом, гелий — это реликт космического «костра», пылавшего в первые несколько минут после Большого взрыва. К счастью, в первичном веществе был некоторый избыток протонов; именно благодаря остатку несвязанных протонов во Вселенной присутствует водород. Без водорода не светило бы Солнце, а в космосе не было бы воды. Вряд ли при этом могла возникнуть жизнь.

### Реликты первой секунды

Возможность установить реликты первых минут существования Вселенной, безусловно, следует рассматривать как блестящее достижение астрофизики. Но ученым не свойственно почитать на лаврах — раздвигая границы возможного, они неуклонно стремятся идти к новой цели. В этом — сущность научного поиска. Для объяснения происхождения химических элементов требуется знать, в каком состоянии находилась Вселенная в конце первой секунды. А что было в более ранние моменты, в течение первой секунды?

Приступить к подобному исследованию означает проникнуть в мир «Алисы в Стране Чудес» с его таинственными состояниями вещества и неведомыми силами. Это значит еще больше приблизиться к самой главной загадке природы — самому акту «сотворения мира»! Чтобы было легче построить наглядную картину Вселенной в возрасте менее 1 с, вообразим, что мы находимся на борту некой машины времени, которая постепенно возвращает нас от момента, соответствующего 1 с, к моменту 0 с, когда в результате гигантского взрыва возникла Вселенная. Но будем осторожны! Наши представления об этом отрезке времени основаны главным образом на гипотезах и экстраполяциях, которым чрезвычайно сложно дать убедительное подтверждение. То, о чем мы будем говорить в этой и последующих главах, — всего лишь результат теоретического моделирования — процедуры во многом спорной и умозрительной.

Чтобы осмыслить события, вероятно, происходившие в первые мгновения существования Вселенной, необходимо понять природу космической активности. Если бы мы могли путешествовать вспять во времени, начиная с сегодняшнего дня, то заметили бы, что по мере движения назад темп развития ускоряется. Так, изменения Земли в процессе ее эволюции в течение 4,6 млрд. лет происходили очень медленно; поэтому геологические масштабы времени измеряются миллионами лет. Если бы нам удалось вернуться во времена, отстоящие от момента Большого взрыва не на миллиарды, а на миллионы лет, то мы обнаружили бы, что темп развития значительно ускорился. Галактики сформировались в течение нескольких сотен миллионов лет, тогда как звезды — еще быстрее (по-видимому, за несколько десятков миллионов лет).

За рубежом, отстоящим от Большого взрыва на 100 тыс. лет, Вселенная предстает почти лишенной какой-либо структуры — это период горячей плазмы. Темп эволюции здесь можно оценивать по скорости космического расширения и падения температуры. В этот период Вселенная расширялась примерно в 100 тыс. раз быстрее, чем сегодня, а ее температура достигала нескольких тысяч градусов. Еще раньше скорость расширения была много больше, а температура — гораздо выше. В момент 1 с размеры Вселенной возрастали вдвое примерно за 1 с, а ее температура достигала  $10^{10}$  К. Очевидно, в пределах первой секунды темп изменений Вселенной был еще выше, безгранично нарастая по мере приближения к моменту Большого взрыва.

Математически это нарастание темпа активности описывается обратно пропорциональной зависимостью. Если обозначить через  $t$  время, прошедшее от момента рождения Вселенной — момента Большого взрыва, — то скорость расширения будет пропорциональна  $1/t$ , а температура —  $1/\sqrt{t}$ . С уменьшением  $t$  обе эти величины возрастают все быстрее, стремясь к бесконечности. Таким образом, поскольку космическая активность неуклонно возрастает по мере приближения к моменту рождения Вселенной, существенные изменения происходят, по-видимому, за все более короткие промежутки времени. Поэтому здесь целесообразно перейти на исчисление времени в долях 10. Так, за промежуток времени 0,1—1 с происходит столько же событий, сколько в интервале 0,01—0,1 с и т. д. Хотя интервал времени уменьшается последовательно в 10 раз, темп изменений, происходящих в каждом таком интервале, оказывается примерно одинаковым.

Возникает вполне естественный вопрос, как далеко можно экстраполировать нашу модель ранней Вселенной, сохраняя уверенность в ее адекватности. Я вспоминаю, как будучи студентом присутствовал в конце 60-х годов на лекции по космологии, где разговор шел о недавно открытом фоновом тепловом излучении. Лектор был несколько смущен, говоря о расчетах содержания ге-

лия на основе ядерных реакций, происходивших, как предполагалось, в первые минуты существования Вселенной. Большинство аудитории открыто смеялось над этой дерзкой затеей и явно ощущало, что моделирование Вселенной в столь ранние моменты ее эволюции — занятие довольно сомнительное. Сегодня умунастроение резко переменялось. Расчеты содержания гелия стали частью общепризнанного подхода в космологических исследованиях, и наше внимание привлекают периоды времени, предшествующие нуклеосинтезу.

У многих вызывает удивление, что экстремальные условия, преобладавшие в первую секунду жизни Вселенной, сегодня можно изучать экспериментально. На современных ускорителях частиц удастся в течение очень короткого времени воспроизводить физические условия, существовавшие в столь ранние моменты времени как  $10^{-12}$  с, когда температура достигала  $10^{16}$  К, а вся наблюдаемая сегодня Вселенная была «сжата» до размеров Солнечной системы. Таким образом, в путешествии вспять во времени в странный мир первозданной Вселенной нашим проводником на части пути может быть эксперимент.

По мере углубления в прошлое мы встречаемся со все более экстремальными физическими условиями. Наиболее важным параметром, позволяющим оценить этот процесс, является энергия. С приближением к моменту рождения Вселенной энергия типичной частицы, «плавающей» в первичной плазме, возрастает все быстрее. Для момента, соответствующего 1 мин, характерны энергии рентгеновского диапазона. В момент, соответствующий 1 с, господствуют энергии, свойственные некоторым радиоактивным превращениям. В момент, равный 1 мкс (микросекунда), энергия типичной частицы сравнима с энергией, которую удавалось получить на ускорителях начала 50-х годов. Подходя к моменту, соответствующему 1 пс (пикосекунда,  $10^{-12}$  с), мы приближаемся к пределу энергии, достигнутому в настоящее время в физике элементарных частиц. За этим пределом путеводной нитью может служить только теория.

В предыдущих главах мы говорили, что существующие в природе четыре взаимодействия могут рассматриваться как части одной главной силы — суперсилы. Ошибочное представление о различной природе четырех взаимодействий сложилось потому, что обычно мы имеем дело с миром относительно низких энергий; с увеличением энергии взаимодействия объединяются. Прежде всего объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Это происходит при энергиях, эквивалентных примерно 90 массам протона, что соответствует температуре около  $10^{15}$  К. Существующие ускорители как раз позволяют достичь таких значений, при которых происходит рождение W и Z-частиц. Последующее объединение электрослабого и сильного взаимодействий, а в ко-

нечном счете и гравитации невозможно, пока не будут получены более высокие энергии. Для этого необходимо достичь масштабов Великого объединения и массы Планка, что в триллионы раз превосходит масштаб электрослабого взаимодействия.

С этой точки зрения ранняя Вселенная представляла собой гигантскую лабораторию природы, в которой энергия, высвободившаяся в результате Большого взрыва, пробудила физические процессы, не воспроизводимые в земных условиях. И хотя прямые эксперименты с суперсилой, вероятно, никогда не станут реальными, мы можем тем не менее обратиться к космологии за разгадкой причин кратковременной активности суперсилы в первые мгновения существования Вселенной.

Спустя  $10^{-12}$  с после Большого взрыва температура была столь высока, что тепловая энергия оказалась достаточной для рождения всех известных частиц и античастиц. Вещество и антивещество присутствовали во Вселенной почти в равных количествах. Позднее, когда составлявшие большую часть вещества пары частица—античастица аннигилировали, возник «остаток» вещества. Плотность частиц была столь высока, что установилось равновесие, при котором энергия равномерно распределялась между всеми видами частиц.

Характер вещества во Вселенной на этой стадии резко отличался от всего, что нам удастся непосредственно наблюдать. При столь высокой плотности адроны не имели индивидуальных свойств; протоны и нейтроны не существовали как различные объекты. Вещество представляло собой «кварковую жидкость», в которой кварки двигались более или менее независимо. Кроме того, при этих энергиях не было никакого различия между слабым и электромагнитным взаимодействиями, а природа кварков и лептонов проявлялась весьма своеобразно. Такие известные нам частицы, как электроны, мюоны и нейтрино, не существовали в обычном виде. Свойства фотонов, а также W- и Z-частиц оказались безнадежно перемешанными. Если бы нам удалось сдвинуться вспять во времени вплоть до этого момента, то нам предстало бы совершенно неизвестное состояние материи, когда частицы еще не приобрели той формы, к которой привыкли специалисты в области физики элементарных частиц.

Ключ к пониманию природы этой странной высокотемпературной фазы материи лежит в нарушении симметрии. В гл. 8 было показано, каким образом спонтанное нарушение калибровочной симметрии может наделить частицы массой и создать различие между электромагнитным и слабым взаимодействиями. Существует общее правило природы, согласно которому высокие температуры стремятся восстановить симметрию. Хорошим примером проявления этого правила могут служить две фазы воды — жидкая и твердая (лед). В кристалле льда обнаруживаются выделенные на-

правления — направления вдоль ребер кристаллической решетки. При таянии льда кристаллическая структура разрушается. У возникшей вместо кусочка льда капли воды уже нет никаких выделенных направлений в пространстве — она симметрична. Таким образом, повышение температуры привело к восстановлению изначальной пространственной симметрии, которая была спонтанно нарушена у кристалла льда. При увеличении температуры до  $10^{16}$  К происходит фазовый переход, аналогичный переходу лед—вода. Однако в этом случае восстанавливается калибровочная симметрия электрослабого взаимодействия.

Как видим, картина Вселенной в момент, соответствующий 1 пс, весьма примечательна. Вселенная заполнена таинственной жидкостью, в последующие времена уже нигде не встречающейся, и населена неведомыми нам частицами. Однако вещество не может продолжительно существовать в столь странной фазе. Падение температуры вызывает внезапный фазовый переход, напоминающий замерзание воды и образование льда. Столь же внезапно возникают и известные нам частицы — электроны, нейтрино, фотоны и кварки, которые теперь вполне различимы. Калибровочная симметрия нарушена, а электромагнитное взаимодействие отделилось от слабого.

Если проследить за дальнейшей эволюцией космического вещества, то мы станем свидетелями еще одного фазового перехода, который произойдет спустя 1 мс (миллисекунда) после Большого взрыва. Плотный конгломерат быстро движущихся кварков внезапно конденсируется, образуя адроны с вполне определенными свойствами. В этом море частиц можно различить отдельные протоны, нейтроны, мезоны и другие сильно взаимодействующие частицы, в которых кварки объединены в четкие группы — попарно или по три. По мере дальнейшего падения температуры все оставшиеся античастицы (например, позитроны) аннигилируют, создавая интенсивное гамма-излучение. В результате вещество превращается в знакомую нам смесь протонов, нейтронов, электронов, нейтрино и фотонов, и открывается прямой путь для синтеза гелия, который начинается спустя несколько секунд после Большого взрыва.

Попытка изучить эволюцию Вселенной начиная с  $10^{-12}$  с привела нас к новому замечательному представлению о природе вещества. Мы убедились, что протоны и нейтроны — эти «кирпичики» мироздания — существовали не всегда, а «выморозились» из кваркового бульона спустя примерно  $10^{-3}$  с после Большого взрыва. Поэтому эти ядерные частицы (нуклоны) можно считать реликтами первой миллисекунды существования Вселенной. Еще более удивителен тот факт, что лептоны и кварки, лежащие в основе всего вещества Вселенной, обрели свою индивидуаль-

ность лишь спустя примерно  $10^{-12}$  с; таким образом, они являются реликтами первой пикосекунды.

Постепенно начинает вырисовываться систематическая картина эволюции Вселенной. Происхождение элементов можно проследить до отдаленных эпох возникновения звезд и нуклеосинтеза в первые минуты существования Вселенной. Протоны и нейтроны, служащие материалом для создания ядер, образовались еще раньше, тогда как лептоны и кварки, лежащие в основе ядерных частиц, являются реликтами первой триллионной доли ( $10^{-12}$ ) секунды существования Вселенной. Однако остается главная загадка, которая возвращает нас к значительно более ранней эпохе — эпохе Великого объединения.

### Происхождение вещества

Первоначальный вариант теории Большого взрыва не давал убедительного объяснения того, каким образом в ходе первичного взрыва возникло вещество. Космологам не оставалось ничего другого, как предположить, что все вещество, из которого построена Вселенная, существовало с самого начала. Ни один из известных физических процессов не мог объяснить возникновение вещества. В настоящее время новая космология дает очень правдоподобное объяснение происхождению вещества, основанное на действии суперсилы.

О возможности возникновения вещества в результате концентрации энергии известно в течение нескольких десятков лет. При Большом взрыве не было недостатка в энергии, необходимой для образования вещества видимой части Вселенной, общая масса которого оценивается в  $10^{50}$  т. Загадка заключается в том, как все это вещество могло возникнуть без равного количества антивещества (мы уже упоминали об этой проблеме в гл. 2). В лабораторных условиях возникновение вещества всегда сопровождается рождением антивещества, и симметрия между ними, по-видимому, заложена в законах физики. Неизбежен вопрос: куда же девалось все антивещество?

Прежде всего следует убедиться в том, что Вселенная действительно построена только из вещества. Например, камень из антивещества во всех отношениях был бы сходен с камнем из вещества, и посмотрев на них, мы не отличили бы их друг от друга. Тем не менее существует безошибочный способ установить, что есть что. Если привести каждый из камней в соприкосновение с куском вещества, то камень из антивещества исчезнет, произведя взрыв, по мощности сравнимый с ядерным. Даже тоненькая струйка газа антивещества вызвала бы бурную реакцию — интенсивное гамма-

излучение. Мы, несомненно, можем быть уверены, что Земля на 100 % состоит из вещества.

Но присуща ли такая асимметрия Вселенной в целом? Насколько мы можем судить — да. Если бы наша Галактика содержала антивещество в сколько-нибудь значительном количестве, то при неизбежных столкновениях между газом, пылью, звездами, планетами и другими объектами вещество, встречаясь с антивеществом, аннигилировало бы, в результате чего возникали бы мощные потоки гамма-излучения. Столь высокий уровень гамма-излучения, безусловно, был бы зарегистрирован; пока же, по имеющимся у астрономов данным, содержание антивещества в нашей Галактике не превышает тысячной доли. Если исключить единичные антипротоны, обнаруженные в космических лучах, то в целом Галактика, по-видимому, состоит только из вещества.

Можно предположить, что некоторые галактики, напротив, состоят только из антивещества (с очень небольшой добавкой вещества). Однако время от времени даже галактики сталкиваются друг с другом, причем в прошлом они находились значительно ближе друг к другу. Гамма-излучение, возникшее в результате таких столкновений, наблюдалось бы и сегодня. Более того, если рассматривать Вселенную как целое, то трудно понять, каким образом первоначальная смесь вещества и антивещества могла когда-то разделиться и попасть в удаленные друг от друга области пространства. Основываясь на этих наблюдениях, большинство космологов считают, что Вселенная построена в основном из вещества, и эта асимметрия была заложена в самые ранние этапы эволюции Вселенной.

Еще десять лет назад предлагалось единственное объяснение первичного нарушения баланса между веществом и антивеществом — считалось, что асимметрия присуща Вселенной с самого начала, т. е. уже в процессе Большого взрыва возникла диспропорция между веществом и антивеществом. Подобное объяснение, основанное на искусственно подобранных начальных условиях, разумеется, не может быть удовлетворительным, ибо оно ведет по замкнутому логическому кругу. Такие «объяснения» нельзя считать научными. С их помощью можно описать любое начальное соотношение вещества и антивещества. Они ничего не говорят о том, почему наблюдаемая асимметрия столь мала или столь велика. По-видимому, не существует веских причин, по которым, например, количество вещества не могло бы оказаться в два, а возможно, и в миллион раз больше.

### ТВО приходит на помощь

Более естественно предполагать изначально полную симметрию между веществом и антивеществом, нежели считать, что преобладание вещества во Вселенной «от бога», и лишь затем в силу тех



или иных причин оно обозначилось и закрепилось. В этом случае уже нет необходимости доверять произвольно выбранным начальным условиям; состояние, в котором существует точное равенство количеств вещества и антивещества, единственно. Наблюдаемое преобладание вещества над антивеществом можно было бы количественно объяснить на основе физической теории.

Для осуществления этой идеи, очевидно, необходимо придумать физический механизм, который нарушал бы симметрию между веществом и антивеществом, считавшуюся по традиции одним из нерушимых законов физики. В конце 70-х годов физики нашли такой механизм нарушения симметрии в виде теорий Великого объединения (ТВО). Как отмечалось в предыдущих главах, одним из самых сенсационных предсказаний ТВО явилось предсказание распада протона с образованием позитрона. Связь между распадом протона и асимметрией вещества и антивещества можно усмотреть в возможной судьбе атома водорода (состоящего из протона и электрона) в отдаленном будущем. При распаде протона образуются пион и позитрон. Пион распадается на два фотона, а позитрон аннигилирует с электроном, создавая еще два фотона. Итак, атом вещества прекращает свое существование, превращаясь целиком в излучение. В результате этого процесса вещество, не взаимодействуя с антивеществом, полностью переходит в энергию излучения. Вспомним теперь, что каждый физический процесс обратим; в данном случае это означает прямое превращение энергии излучения в вещество, не сопровождающееся образованием антивещества. Именно такой процесс, значительно ускоренный, мог бы объяснить возникновение вещества.

Чтобы детально смоделировать процесс рождения Вселенной, необходимо вернуться к так называемой эре ТВО, т. е. сместиться во времени еще на двадцать порядков относительно эры электро-слабого взаимодействия, о которой мы говорили в предыдущем разделе. Это означает попытку описать Вселенную в возрасте всего лишь  $10^{-32}$  с! В этот момент космос был бы заполнен «супом» из странных, неведомых нам частиц, в том числе чрезвычайно массивных; плотность «супа» составляла по оценкам около  $10^{73}$  кг/м<sup>3</sup>, а температура — около  $10^{29}$  К. Вселенная в тот момент была еще столь юной, что свет не успел пройти путь, равный миллиардной доле поперечника протона.

Важнейшими составляющими экзотического супа были, вероятно, сверхмассивные частицы — переносчики взаимодействия в ТВО, так называемые X-частицы, о которых упоминалось в гл. 8. Именно эти частицы привели к асимметрии в соотношении вещества и антивещества. Дело в том, что при распаде X-частицы образуется много дочерних частиц, которые, например, на  $\frac{2}{3}$  представляют собой вещество, и лишь на  $\frac{1}{3}$  — антивещество. Точное значение такой асимметрии зависит от принятой формы ТВО.

Но в любом случае распад  $X$ -частицы ведет к преобладанию вещества над антивеществом.

Следует, однако, учитывать еще одно обстоятельство. Первичный «суп» содержит наряду с  $X$ -частицами и их античастицы, обозначаемые обычно  $\bar{X}$ . Напомним, что мы предполагаем исходную симметрию Вселенной, а это означает, естественно, равенство чисел  $X$ - и  $\bar{X}$ -частиц. Но тогда при распаде  $\bar{X}$  асимметрия должна быть обратной, т. е.  $2/3$  должно составлять антивещество, и лишь  $1/3$  — вещество.

Для выхода из этого тупика теоретики предположили, что должно существовать фундаментальное различие скоростей распада  $X$ - и  $\bar{X}$ -частиц. В таком случае распады  $\bar{X}$  не полностью компенсируют распады  $X$ , причем различие в пользу  $X$  составит, по-видимому, не более одной стомиллионной доли, что приведет к соответствующему преобладанию вещества над антивеществом.

Насколько разумно подобное предположение? Физики бывают проницательными историками, особенно когда дело касается предмета их исследований. Они никогда не забывают уроков истории, если вопрос идет о создании новых теорий. Один из таких уроков был преподнесен в 1956 г. Два американских физика китайского происхождения Т. Д. Ли и Ч. Н. Янг произвели переворот в существовавших представлениях, заявив, что слабые взаимодействия нарушают считавшееся «неприкосновенным» свойство природы, известное как зеркальная симметрия. До этого момента физики полагали, что силы природы не различают «правого» и «левого». Разумеется, в природе существует много объектов с «врожденной» спиральностью; наиболее известный пример — молекула ДНК. Эта молекула по форме сходна с винтовой лестницей, закрученной вправо. И хотя в природе нет левовинтовых молекул ДНК, ни один из фундаментальных законов физики не запрещает их существования. Тот факт, что жизнь на Земле построена на основе правовинтовых молекул ДНК, скорее всего говорит о том, что первые способные к самовоспроизводству молекулы оказались именно такой формы. Это хороший пример спонтанного нарушения симметрии: реальная структура асимметрична, тогда как лежащие в ее основе физические взаимодействия симметричны.

Когда физик утверждает, что существующие в природе взаимодействия зеркально симметричны, он подразумевает, что вызванные этими взаимодействиями фундаментальные процессы в зеркале выглядят столь же реально, как и при непосредственном наблюдении. Представим, например, что мы запечатлели на киноплёнку распад частицы, а затем зарядили в проектор перевернутую плёнку. Если вызывающие распад взаимодействия обладают свойством зеркальной симметрии, то ни один физик не заметит подвоха.

Долгое время предполагалось, что субатомные частицы не отличаются «правого» от «левого», и это даже не считали нужным проверять на опыте. Но вот явились Ли и Янг со своим предположением, а американка китайского происхождения мисс Ч. С. Ву вскоре поставила нужный эксперимент, и тогда ко всеобщему изумлению выяснилось, что Ли и Янг были правы. Слабое взаимодействие действительно нарушает зеркальную симметрию. Опыт Ву, в котором отдельно измерялось число электронов, испускаемых влево и вправо точно ориентированными ядрами радиоактивного кобальта, ознаменовал поворотный пункт в физике. После этого опыта ни одной из симметрий уже не гарантировалась неприкосновенность!

В 1964 г. последовало новое потрясение. Большой интерес вызывало загадочное поведение особой частицы, называемой нейтральным К-мезоном, или каоном. Представление о нарушении зеркальной симметрии к этому времени стало общепризнанным, однако считалось, что античастицы нарушают зеркальную симметрию в противоположном смысле по сравнению с частицами. (Как правило, античастицы проявляют свойства, противоположные свойствам частиц.) Если бы это было всегда справедливо, то в процессе Большого взрыва во Вселенной не могло бы возникнуть преобладание вещества над антивеществом. Действительно, для любого процесса рождения частицы существовал бы зеркальный процесс, в котором рождалась античастица. Особенности нейтрального К-мезона, представляющего собой некий гибрид частицы и античастицы, дали возможность проверить справедливость этих представлений.

Решающий эксперимент провели В. Л. Фитч и Дж. У. Кронин в Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Они установили, что частицы и античастицы нарушают зеркальную симметрию не противоположно друг другу и не в равной степени — по крайней мере для нейтральных К-мезонов. Здесь также наблюдалось совсем небольшое, но исключительно важное нарушение симметрии, отражающее фундаментальный разбаланс сил природы, ответственных за некоторые распады частиц; тем самым было найдено конкретное экспериментальное подтверждение асимметрии между веществом и антивеществом.

В конце 70-х годов теоретики приступили к созданию модели фазы ТВО в Большом взрыве на основе предположения, что указанная выше асимметрия действительно присуща силе, господствующей в ТВО. По оценкам асимметрия между веществом и антивеществом характеризуется отношением  $(10^9 + 1) : 10^9$ . Это означает, что на каждый миллиард античастиц рождается миллиард плюс одна частица. Несмотря на малость этого эффекта оказалось, что он играет решающую роль. По мере остывания Вселенной антивещество аннигилировало с веществом и при этом

почти все вещество исчезало. «Почти», а не целиком, — поскольку имеется избыток вещества над антивеществом в одну частицу на миллиард. Именно этот крошечный остаток — своего рода оплошность природы — и послужил материалом, из которого построено все, включая нас самих. Итак, мы пришли к тому, что *все* вещество Вселенной является реликтом эры ТВО, длившейся всего  $10^{-32}$  с с момента рождения Вселенной.

Если доверять проведенному анализу, то следует считать, что подавляющая часть вещества, возникшего в процессе Большого взрыва, исчезла до истечения нескольких первых секунд — а вместе с ним исчезло и все космическое антивещество. Теперь мы знаем, почему во Вселенной так мало антивещества. Однако, исчезнув, оно оставило о себе память в виде энергии. В результате аннигиляции вещества с антивеществом возникало около миллиарда гамма-квантов на каждый уцелевший электрон или протон. К настоящему времени в результате расширения Вселенной это гамма-излучение «остыло», образовав так называемое фоновое тепловое излучение, заполняющее Вселенную. Помимо энергии, заключенной в веществе, значительная часть энергии Вселенной приходится на фоновое тепловое излучение. Таким образом, мы располагаем теорией, которая не только объясняет происхождение вещества, но и указывает правильное соотношение количества вещества и энергии во Вселенной.

До создания ТВО не удавалось объяснить температуру космического фонового теплового излучения. Уровень тепловой энергии был, казалось, еще одним произвольным параметром, характеризующим Вселенную «от рождения». Оставалось непонятным, почему температура этого излучения не может быть равной, скажем, 0,3 или 30 К, а должна составлять именно 3 К. ТВО позволили объяснить это значение температуры из физических соображений. Современная температура фонового излучения, равная 3 К, соответствует примерно  $10^9$  фотонам на каждый электрон или протон во Вселенной<sup>1</sup>, что хорошо согласуется с превышением числа частиц над числом античастиц (1 на  $10^9$ ), предсказываемым ТВО. Таким образом, величину одного из фундаментальных параметров космологии можно объяснить на основе физических процессов, происходивших в эру ТВО. Именно в этот невообразимо ранний момент существования Вселенной и обозначились основы ее современного строения.

---

<sup>1</sup> В 1967 г. А. Д. Сахаров высказал идею о том, что это отношение определяется избытком нуклонов над антинуклонами, который обусловлен распадом протона и нарушением симметрии. — *Прим. ред.*

## Чем вызван Большой взрыв?

---

### Парадокс возникновения

Ни одна из лекций по космологии, которые мне доводилось читать, не обходилась без вопроса о том, чем же был вызван Большой взрыв? Еще несколько лет назад я не знал истинного ответа; сегодня, полагаю, он известен.

По существу в этом вопросе в завуалированной форме содержится два вопроса. Во-первых, нам хотелось бы знать, почему развитие Вселенной началось со взрыва и чем в первую очередь был вызван этот взрыв. Но за чисто физической проблемой скрывается другая, более глубокая проблема философского характера. Если Большой взрыв знаменует начало физического существования Вселенной, включая возникновение пространства и времени, то в каком смысле можно говорить о том, что *вызвало* этот взрыв?

С точки зрения физики внезапное возникновение Вселенной в результате гигантского взрыва представляется в какой-то степени парадоксальным. Из четырех управляющих миром взаимодействий только гравитация проявляется в космическом масштабе, причем, как показывает наш опыт, гравитация имеет характер притяжения. Однако для взрыва, ознаменовавшего рождение Вселенной, по-видимому, нужна была сила отталкивания невероятной величины, которая смогла в ключья разорвать космос и вызвать его расширение, продолжающееся и по сей день.

Это кажется странным, поскольку, если во Вселенной господствуют силы гравитации, то ей следовало бы не расширяться, а сжиматься. Действительно, гравитационные силы притяжения заставляют физические объекты сжиматься, а не взрываться. Например, очень плотная звезда теряет способность противостоять собственному весу и коллапсирует, образуя нейтронную звезду или черную дыру. Степень сжатия вещества в очень ранней Вселенной была значительно выше, чем у самой плотной звезды; поэтому нередко возникает вопрос, почему первичный космос с самого начала не сколлапсировал в черную дыру.

Обычно на это отвечают, что первичный взрыв следует просто принимать за начальное условие. Такой ответ явно не удовлетворителен и вызывает недоумение. Безусловно, под влиянием гравита-

ции скорость космического расширения с самого начала непрерывно уменьшалась, однако в момент рождения Вселенная расширялась бесконечно быстро. Взрыв не был вызван какой-либо силой — просто развитие Вселенной началось с расширения. Если бы взрыв оказался менее сильным, гравитация очень скоро воспрепятствовала бы разлету вещества. В результате расширение сменилось бы сжатием, которое приняло бы катастрофический характер и превратило Вселенную в нечто подобное черной дыре. Но в действительности взрыв оказался достаточно «большим», что дало возможность Вселенной, преодолев собственную гравитацию, либо продолжать вечно расширяться за счет силы первичного взрыва, либо по крайней мере просуществовать на протяжении многих миллиардов лет, прежде чем подвергнуться сжатию и уйти в небытие.

Недостаток этой традиционной картины состоит в том, что она ни в коей мере не объясняет Большого взрыва. Фундаментальное свойство Вселенной вновь просто трактуется как начальное условие, принятое *ad hoc* (на данный случай); по существу, здесь только утверждается, что Большой взрыв имел место. По-прежнему остается непонятным, почему сила взрыва была именно такой, а не иной. Почему взрыв не был еще более сильным, чтобы Вселенная расширялась сейчас значительно быстрее? Можно также спросить, почему Вселенная в настоящее время не расширяется значительно медленнее или вообще не сжимается. Разумеется, если бы взрыв не имел достаточной силы, Вселенная вскоре коллапсировала бы и некому было бы задавать подобные вопросы. Вряд ли, однако, подобные рассуждения можно принять за объяснение.

При более детальном анализе оказывается, что парадокс происхождения Вселенной в действительности еще более сложен, чем описано выше. Тщательные измерения показывают, что скорость расширения Вселенной очень близка к критическому значению, при котором Вселенная способна преодолеть собственную гравитацию и расширяться вечно. Будь эта скорость чуть меньше — и произошел бы коллапс Вселенной, а будь она чуть больше — космическое вещество давно бы полностью рассеялось. Интересно выяснить, насколько точно скорость расширения Вселенной попадает в этот очень узкий допустимый интервал между двумя возможными катастрофами. Если бы в момент времени, соответствующий 1 с, когда картина расширения уже четко определилась, скорость расширения отличалась бы от своего реального значения более чем на  $10^{-18}$ , этого оказалось бы достаточно для полного нарушения тонкого баланса. Таким образом, сила взрыва Вселенной с почти невероятной точностью соответствует ее гравитационному взаимодействию. Большой взрыв, таким образом, это не просто какой-то далекий взрыв — это был взрыв совершенно определен-

ной силы. В традиционном варианте теории Большого Взрыва приходится принимать не только сам факт взрыва, но и то, что взрыв произошел чрезвычайно прихотливым образом. Иными словами, начальные условия оказываются исключительно специфическими.

Скорость расширения Вселенной — лишь одна из нескольких очевидных космических загадок. Другая связана с картиной расширения Вселенной в пространстве. По данным современных наблюдений, Вселенная в больших масштабах чрезвычайно однородна, что касается распределения вещества и энергии. Глобальная структура космоса почти одинакова как при наблюдении с Земли, так и из отдаленной галактики. Галактики рассеяны в пространстве с одинаковой средней плотностью, и из каждой точки Вселенная выглядит одинаково по всем направлениям. Заполняющее Вселенную первичное тепловое излучение падает на Землю, имея во всех направлениях одну и ту же температуру с точностью не ниже  $10^{-4}$ . Это излучение на пути к нам проходит в пространстве миллиарды световых лет и несет на себе отпечаток любого встречающегося ему отклонения от однородности.

Крупномасштабная однородность Вселенной сохраняется по мере расширения Вселенной. Отсюда следует, что расширение происходит однородно и изотропно с очень высокой степенью точности. Это означает, что скорость расширения Вселенной не только одинакова по всем направлениям, но и постоянна в различных областях. Если бы Вселенная в одном направлении расширялась быстрее, чем в других, то это привело бы к уменьшению температуры фонового теплового излучения в этом направлении и изменило бы видимую с Земли картину движения галактик. Таким образом, эволюция Вселенной не просто началась со взрыва строго определенной силы — взрыв был четко «организован», т. е. произошел одновременно, точно с одинаковой силой во всех точках и по всем направлениям.

Крайне маловероятно, чтобы подобное одновременное и согласованное извержение могло произойти чисто самопроизвольно, и это сомнение усиливается в рамках традиционной теории Большого взрыва тем, что различные области первичного космоса причинно не связаны друг с другом. Дело в том, что, согласно теории относительности, никакое физическое воздействие не может распространяться быстрее света. Следовательно, различные области пространства могут оказаться причинно связанными друг с другом лишь по прошествии определенного промежутка времени. Например, спустя 1 с после взрыва свет может пройти расстояние не более одной световой секунды, что соответствует 300 тыс. км. Области Вселенной, разделенные большим расстоянием, через 1 с еще не будут оказывать влияния друг на друга. Но к этому моменту наблюдаемая нами область Вселенной уже занимала

пространство не менее  $10^{14}$  км в поперечнике. Следовательно, Вселенная состояла примерно из  $10^{27}$  причинно не связанных друг с другом областей, каждая из которых тем не менее расширялась с точно одинаковой скоростью. Даже сегодня, наблюдая тепловое космическое излучение, идущее с противоположных сторон звездного неба, мы регистрируем совершенно одинаковые «дактилоскопические» отпечатки областей Вселенной, разделенных огромными расстояниями: эти расстояния оказываются в 90 с лишним раз больше расстояния, которое мог бы пройти свет с момента испускания теплового излучения.

Как объяснить столь замечательную согласованность различных областей пространства, которые, очевидно, никогда не были связаны друг с другом? Как возникло столь сходное поведение? В традиционном ответе вновь звучит ссылка на особые начальные условия. Исключительная однородность свойств первичного взрыва рассматривается просто как факт: так возникла Вселенная.

Крупномасштабная однородность Вселенной выглядит еще более загадочной, если учесть, что в малых масштабах Вселенная отнюдь не однородна. Существование отдельных галактик и галактических скоплений свидетельствует об отклонении от строгой однородности, причем это отклонение к тому же повсеместно одинаково по масштабам и величине. Поскольку гравитация стремится увеличить любое начальное скопление вещества, степень неоднородности, необходимая для образования галактик, во время Большого взрыва была значительно меньше нежели теперь. Однако в начальной фазе Большого взрыва должна была все-таки присутствовать небольшая неоднородность, иначе галактики никогда бы не образовались. В старой теории Большого взрыва эти неоднородности на ранней стадии также приписывались «начальным условиям». Таким образом, мы должны были поверить, что развитие Вселенной началось не из совершенно идеального, а из крайне необычного состояния.

Все сказанное можно суммировать следующим образом: если единственной силой во Вселенной является гравитационное притяжение, то Большой взрыв следует трактовать как «ниспосланный богом», т. е. не имеющий причины, с заданными начальными условиями. Кроме того, для него характерна поразительная согласованность; чтобы прийти к существующей структуре, Вселенная должна была с самого начала развиваться надлежащим образом. В этом и заключается парадокс возникновения Вселенной.

### Поиск антигравитации

Парадокс возникновения Вселенной удалось разрешить лишь в последние годы; однако основную идею решения можно проследить в далекой истории, в те времена, когда еще не существо-



вало ни теории расширения Вселенной, ни теории Большого взрыва. Еще Ньютон понимал, сколь сложную проблему представляет устойчивость Вселенной. Каким образом звезды сохраняют свое положение в пространстве, не имея опоры? Универсальный характер гравитационного притяжения должен был привести к стягиванию звезд в скопления вплотную друг к другу.

Чтобы избежать этой нелепости, Ньютон прибег к весьма любопытному рассуждению. Если бы Вселенная коллапсировала под действием собственной гравитации, каждая звезда «падала» бы в направлении центра скопления звезд. Предположим, однако, что Вселенная бесконечна и звезды распределены в среднем равномерно по бесконечному пространству. В этом случае вообще отсутствовал бы общий центр, по направлению к которому могли бы падать все звезды, — ведь в бесконечной Вселенной все области идентичны. Любая звезда испытывала бы воздействие гравитационного притяжения всех своих соседей, но вследствие усреднения этих воздействий по различным направлениям не возникло бы никакой результирующей силы, стремящейся переместить данную звезду в определенное положение относительно всей совокупности звезд.

Когда спустя 200 лет после Ньютона Эйнштейн создал новую теорию гравитации, он также был озадачен проблемой, каким образом Вселенной удастся избежать коллапса. Его первая работа по космологии была опубликована до того, как Хаббл открыл расширение Вселенной; поэтому Эйнштейн, подобно Ньютону, предполагал, что Вселенная статична. Однако Эйнштейн пытался решить проблему устойчивости Вселенной гораздо более прямым путем. Он считал, что для предотвращения коллапса Вселенной под действием ее собственной гравитации должна существовать иная космическая сила, которая могла бы противостоять гравитации. Эта сила должна быть скорее силой отталкивания, а не притяжения, чтобы компенсировать гравитационное притяжение. В этом смысле подобную силу можно было бы назвать «антигравитационной», хотя правильнее говорить о силе космического отталкивания. Эйнштейн в этом случае не просто произвольно придумал эту силу. Он показал, что в его уравнения гравитационного поля можно ввести дополнительный член, который приводит к появлению силы, обладающей нужными свойствами.

Несмотря на то что представление о силе отталкивания, противодействующей силе гравитации, само по себе достаточно просто и естественно, в действительности свойства такой силы оказываются совершенно необычными. Разумеется, никакой подобной силы на Земле не замечено, и никакого намека на нее не обнаружено на протяжении нескольких веков существования планетной астрономии. Очевидно, если сила космического отталкивания и существует, то она не должна оказывать сколько-

нибудь заметного действия на малых расстояниях, но ее величина значительно возрастает в астрономических масштабах. Подобное поведение противоречит всему предшествующему опыту изучения природы сил: обычно они интенсивны на малых расстояниях и ослабевают с увеличением расстояния. Так, электромагнитное и гравитационное взаимодействия непрерывно убывают по закону обратных квадратов. Тем не менее в теории Эйнштейна естественным образом появилась сила с такими довольно необычными свойствами.

Не следует думать о введенной Эйнштейном силе космического отталкивания как о пятом взаимодействии в природе. Это просто причудливое проявление самой гравитации. Нетрудно показать, что эффекты космического отталкивания можно отнести на счет обычной гравитации, если в качестве источника гравитационного поля выбрать среду с необычными свойствами. Обычная материальная среда (например, газ) оказывает давление, тогда как обсуждаемая здесь гипотетическая среда должна обладать *отрицательным* давлением, или натяжением. Чтобы более наглядно представить, о чем идет речь, вообразим, что нам удалось наполнить таким космическим веществом сосуд. Тогда в отличие от обычного газа, гипотетическая космическая среда будет не давить на стенки сосуда, а стремиться втянуть их внутрь сосуда.

Таким образом, мы можем рассматривать космическое отталкивание как своего рода дополнение гравитации или как явление, обусловленное обычной гравитацией, присущей невидимой газообразной среде, заполняющей все пространство и обладающей отрицательным давлением. Нет никакого противоречия в том, что, с одной стороны, отрицательное давление как бы всасывает внутрь стенки сосуда, а с другой — эта гипотетическая среда отталкивает галактики, а не притягивает их. Ведь отталкивание обусловлено гравитацией среды, а отнюдь не механическим действием. В любом случае механические силы создаются не самим давлением, а разностью давлений, но предполагается, что гипотетическая среда заполняет все пространство. Ее нельзя ограничить стенками сосуда, и находящийся в этой среде наблюдатель вообще не воспринимал бы ее как осязаемую субстанцию. Пространство выглядело бы и воспринималось совершенно пустым.

Несмотря на столь удивительные особенности гипотетической среды, Эйнштейн в свое время заявил, что построил удовлетворительную модель Вселенной, в которой поддерживается равновесие между гравитационным притяжением и открытым им космическим отталкиванием. С помощью несложных расчетов Эйнштейн оценил величину силы космического отталкивания, необходимую, чтобы уравновесить гравитацию во Вселенной. Ему удалось подтвердить, что отталкивание должно быть столь малым в пределах Солнечной системы (и даже в масштабах Га-

лактики), что его невозможно обнаружить экспериментально. Какое-то время казалось, что вековая загадка блестяще решена.

Однако затем ситуация изменилась к худшему. Прежде всего возникла проблема устойчивости равновесия. Основная идея Эйнштейна основывалась на строгом балансе сил притяжения и отталкивания. Но, как и во многих других случаях строгого баланса, здесь также выявились тонкие детали. Если бы, например, статическая вселенная Эйнштейна немного расширилась, то гравитационное притяжение (ослабевающее с расстоянием) несколько уменьшилась бы, тогда как сила космического отталкивания (возрастающая с расстоянием) слегка возросла бы. Это привело бы к нарушению баланса в пользу сил отталкивания, что вызвало бы дальнейшее неограниченное расширение Вселенной под действием всепобеждающего отталкивания. Если бы, напротив, статическая вселенная Эйнштейна слегка бы сжалась, то гравитационная сила возросла, а сила космического отталкивания уменьшилась, что привело бы к нарушению баланса в пользу сил притяжения и, как следствие, ко все более быстрому сжатию, а в конечном итоге — к коллапсу, которого, как казалось Эйнштейну, он избежал. Таким образом, при малейшем отклонении строгой баланс нарушился бы и космическая катастрофа была бы неизбежна.

Позднее, в 1927 г., Хаббл открыл явление разбегания галактик (т. е. расширение Вселенной), что лишило смысла проблему равновесия. Стало ясно, что Вселенной не угрожает сжатие и коллапс, поскольку она *расширяется*. Если бы Эйнштейн не был отвлечен поиском силы космического отталкивания, он наверняка пришел бы к этому выводу теоретически, предсказав таким образом расширение Вселенной на добрый десяток лет раньше, чем его удалось открыть астрономам. Такое предсказание, несомненно, вошло бы в историю науки как одно из самых выдающихся<sup>1</sup>. В конце концов Эйнштейну пришлось с досадой отречься от космического отталкивания, которое он впоследствии считал «самой большой ошибкой своей жизни». Однако на этом история отнюдь не закончилась.

Эйнштейн придумал космическое отталкивание для решения несуществующей проблемы статической вселенной. Но, как это всегда бывает, джинна, выпущенного из бутылки, невозможно загнать обратно. Идея о том, что и динамика Вселенной, возможно, обусловлена противоборством сил притяжения и отталкивания, продолжала жить. И хотя астрономические наблюдения не давали никаких свидетельств существования космического от-

<sup>1</sup> Как уже отмечалось (см сноску на с. 20), такое предсказание было сделано на основе уравнения Эйнштейна в 1922—1923 гг. профессором Петроградского университета А. А. Фридманом. — Прим. ред.

талкивания, они не могли доказать и его отсутствие — оно могло быть просто слишком слабым, чтобы проявиться.

Уравнения гравитационного поля Эйнштейна, хотя и допускают наличие силы отталкивания, не накладывают ограничений на ее величину. Наученный горьким опытом, Эйнштейн был вправе постулировать, что величина этой силы строго равна нулю, тем самым полностью исключая отталкивание. Однако это было отнюдь не обязательно. Некоторые ученые сочли необходимым сохранить отталкивание в уравнениях, хотя в этом уже не было нужды с точки зрения первоначальной задачи. Эти ученые считали, что при отсутствии надлежащих доказательств нет оснований полагать силу отталкивания равной нулю.

Не составляло особого труда проследить последствия, к которым приводит сохранение силы отталкивания в сценарии расширяющейся Вселенной. На ранних этапах развития, когда Вселенная еще находится в сжатом состоянии, отталкиванием можно пренебречь. В течение этой фазы гравитационное притяжение замедляло темп расширения — в полной аналогии с тем, как притяжение Земли замедляет движение ракеты, запущенной вертикально вверх. Если принять без объяснений, что эволюция Вселенной началась с быстрого расширения, то гравитация должна постоянно уменьшать скорость расширения до величины, наблюдаемой в настоящее время. С течением времени по мере рассеяния вещества гравитационное взаимодействие ослабевает. Напротив, космическое отталкивание возрастает, поскольку галактики продолжают удаляться друг от друга. В конечном счете отталкивание превзойдет гравитационное притяжение и скорость расширения Вселенной вновь начнет возрастать. Отсюда можно сделать вывод, что во Вселенной доминирует космическое отталкивание, и расширение будет происходить вечно.

Астрономы показали, что такое необычное поведение Вселенной, когда расширение сначала замедляется, а затем вновь ускоряется, должно было бы отразиться в наблюдаемом движении галактик. Но при самых тщательных астрономических наблюдениях не удалось выявить каких-либо убедительных свидетельств такого поведения, хотя время от времени высказываются и противоположные утверждения.

Интересно, что идею расширяющейся Вселенной голландский астроном Вилем де Ситтер выдвинул еще в 1916 г. — за много лет до того, как Хаббл экспериментально открыл это явление. Де Ситтер утверждал, что если из Вселенной удалить обычное вещество, то гравитационное притяжение исчезнет, и в космосе будут безраздельно господствовать силы отталкивания. Это вызовет расширение Вселенной — по тем временам это была новаторская идея.

Поскольку наблюдатель не в состоянии воспринимать странную

невидимую газообразную среду с отрицательным давлением, ему просто будет казаться, будто расширяется пустое пространство. Расширение можно было бы обнаружить, повесив в различные места пробные тела и наблюдая их удаление друг от друга. Представление о расширении пустого пространства рассматривалось в то время как некий курьез, хотя, как мы увидим, именно оно оказалось пророческим.

Итак, какой же вывод можно сделать из этой истории? Тот факт, что астрономы не обнаруживают космического отталкивания, еще не может служить логическим доказательством его отсутствия в природе. Вполне возможно, что оно просто слишком слабое, чтобы его удалось зарегистрировать современными приборами. Точность наблюдения всегда ограничена, и потому можно оценить только верхний предел этой силы. Против этого можно было бы возразить, что с эстетической точки зрения законы природы выглядели бы проще в отсутствие космического отталкивания. Подобные обсуждения тянулись многие годы, не приводя к определенным результатам, пока внезапно на проблему не взглянули под совершенно новым ракурсом, который придал ей неожиданную актуальность.

### Инфляция: объяснение Большого взрыва

В предыдущих разделах мы говорили, что если сила космического отталкивания и существует, то она должна быть очень слабой, настолько слабой, чтобы не оказать сколько-нибудь значительного влияния на Большой взрыв. Однако такой вывод основывается на предположении, что величина отталкивания не изменяется со временем. Во время Эйнштейна это мнение разделяли все ученые, поскольку космическое отталкивание вводилось в теорию «рукотворно». Никому не приходило в голову, что космическое отталкивание может *вызываться* другими физическими процессами, возникающими по мере расширения Вселенной. Если бы подобная возможность предусматривалась, то космология могла оказаться иной. В частности, не исключается сценарий эволюции Вселенной, допускающий, что в экстремальных условиях ранних стадий эволюции космическое отталкивание какое-то мгновение преобладало над гравитацией, заставив Вселенную взорваться, после чего его роль практически свелась к нулю.

Эта общая картина вырисовывается из последних работ по изучению поведения материи и сил на очень ранних этапах развития Вселенной. Стало ясно, что гигантское космическое отталкивание — неизбежный результат действия суперсилы. Итак, «антигравитация», которую Эйнштейн прогнал в дверь, вернулась через окно!

Ключ к пониманию нового открытия космического отталкивания дает природа квантового вакуума. Мы видели, как такое отталкивание может быть обусловлено необычной невидимой средой, не отличимой от пустого пространства, но обладающей отрицательным давлением. Сегодня физики считают, что именно такими свойствами обладает квантовый вакуум.

В гл. 7 отмечалось, что вакуум следует рассматривать как своего рода «фермент» квантовой активности, кишущий виртуальными частицами и насыщенный сложными взаимодействиями. Очень важно понять, что в рамках квантового описания вакуум играет определяющую роль. То, что мы называем частицами — всего лишь редкие возмущения, подобные «пузырькам» на поверхности целого моря активности.

В конце 70-х годов стало очевидно, что объединение четырех взаимодействий требует полного пересмотра представлений о физической природе вакуума. Теория предполагает, что энергия вакуума проявляется отнюдь не однозначно. Попросту говоря, вакуум может быть возбужденным и находиться в одном из многих состояний с сильно различающимися энергиями, подобно тому как атом может возбуждаться, переходя на уровни с более высокой энергией. Эти собственные состояния вакуума — если бы мы могли их наблюдать — выглядели бы совершенно одинаково, хотя обладают совершенно разными свойствами.

Прежде всего заключенная в вакууме энергия в огромных количествах перетекает из одного состояния в другое. В теориях Великого объединения, например, различие между самой низкой и самой высокой энергиями вакуума невообразимо велико. Чтобы получить какое-то представление о гигантских масштабах этих величин, оценим энергию, выделенную Солнцем за весь период его существования (около 5 млрд. лет). Представим себе, что все это колоссальное количество испущенной Солнцем энергии заключено в область пространства, по размерам меньшую Солнечной системы. Достигнутые в этом случае плотности энергии близки к плотностям энергии, соответствующим состоянию вакуума в ТВО.

Наряду с потрясающими разностями энергий различным вакуумным состояниям соответствуют столь же гигантские разности давлений. Но здесь-то и кроется «фокус»: все эти давления — *отрицательные*. Квантовый вакуум ведет себя точно так же, как упомянутая ранее гипотетическая среда, создающая космическое отталкивание, только на этот раз численные значения давления столь велики, что отталкивание в  $10^{120}$  раз превосходит силу, которая понадобилась Эйнштейну для поддержания равновесия в статической Вселенной.

Теперь открыт путь и для объяснения Большого взрыва. Предположим, что вначале Вселенная находилась в возбужденном

состоянии вакуума, которое называют «ложным» вакуумом. В этом состоянии во Вселенной действовало космическое отталкивание такой величины, которое вызвало бы безудержное и стремительное расширение Вселенной. По существу, в этой фазе Вселенная соответствовала бы модели де Ситтера, о которой шла речь в предыдущем разделе. Разница, однако, состоит в том, что у де Ситтера Вселенная спокойно расширяется в астрономических масштабах времени, тогда как «фаза де Ситтера» в эволюции Вселенной из «ложного» квантового вакуума в действительности далеко не спокойна. Занимаемый Вселенной объем пространства должен в этом случае удваиваться каждые  $10^{-34}$  с (или промежуток времени такого же порядка).

Подобное сверхрасширение Вселенной имеет ряд характерных особенностей: все расстояния возрастают по экспоненциальному закону (с понятием экспоненты мы уже встречались в гл. 4). Это означает, что каждые  $10^{-34}$  с все области Вселенной удваивают свои размеры, а затем этот процесс удвоения продолжается в геометрической прогрессии. Такой тип расширения, впервые рассмотренный в 1980 г. Аланом Гутом из МТИ (Массачусетский технологический институт, США), был назван им «инфляцией». В результате чрезвычайно быстрого и непрерывно ускоряющегося расширения очень скоро оказалось бы, что все части Вселенной разлетаются, как при взрыве. А это и есть Большой взрыв!

Однако так или иначе, но фаза инфляции должна прекратиться. Как и во всех возбужденных квантовых системах, «ложный» вакуум неустойчив и стремится к распаду. Когда распад происходит, отталкивание исчезает. Это в свою очередь ведет к прекращению инфляции и переходу Вселенной во власть обычного гравитационного притяжения. Разумеется, Вселенная и в этом случае продолжала бы расширяться благодаря первоначальному импульсу, приобретенному в период инфляции, однако скорость расширения неуклонно снижалась бы. Таким образом, единственный след, сохранившийся до настоящего времени от космического отталкивания, — это постепенное замедление расширения Вселенной.

Согласно «инфляционному сценарию», Вселенная начала свое существование из состояния вакуума, лишённого вещества и излучения. Но, если бы даже они присутствовали изначально, их следы быстро затерялись бы вследствие огромной скорости расширения в фазе инфляции. За чрезвычайно короткий отрезок времени, соответствующий этой фазе, область пространства, которую сегодня занимает вся наблюдаемая Вселенная, выросла от миллиардной доли размера протона до нескольких сантиметров. Плотность любого существовавшего первоначально вещества фактически стала бы равной нулю.

Итак, к концу фазы инфляции Вселенная была пустой и холодной. Однако, когда инфляция иссякла, Вселенная вдруг стала чрезвычайно «горячей». Этот всплеск тепла, осветивший космос, обусловлен огромными запасами энергии, заключенными в «ложном» вакууме. Когда состояние вакуума распалось, его энергия высвободилась в виде излучения, которое мгновенно нагрело Вселенную примерно до  $10^{27}$  К, что достаточно для протекания процессов в ТВО. С этого момента Вселенная развивалась согласно стандартной теории «горячего» Большого взрыва. Благодаря тепловой энергии возникло вещество и антивещество, затем Вселенная стала остывать, и постепенно стали «вымораживаться» все ее элементы, наблюдаемые сегодня.

Таким образом, трудную проблему — чем вызван Большой взрыв? — удалось решить с помощью теории инфляции; пустое пространство самопроизвольно взорвалось под действием отталкивания, свойственного квантовому вакууму. Однако загадка по-прежнему остается. Колоссальная энергия первичного взрыва, пошедшая на образование вещества и излучения, существующих во Вселенной, должна была откуда-то взяться! Мы не сможем объяснить существование Вселенной, пока не найдем источник первичной энергии.

### Космический бутстрэп <sup>1</sup>

Вселенная родилась в процессе гигантского выброса энергии. Следы ее мы обнаруживаем до сих пор — это фоновое тепловое излучение и космическое вещество (в частности, атомы, из которых состоят звезды и планеты), хранящее определенную энергию в виде «массы». Следы этой энергии проявляются также в разбегании галактик и в бурной активности астрономических объектов. Первичная энергия «завела пружину» рождающейся Вселенной и по сей день продолжает приводить ее в действие.

Откуда же взялась эта энергия, вдохнувшая жизнь в нашу Вселенную? Согласно теории инфляции, это — энергия пустого пространства, иначе — квантового вакуума. Однако может ли такой ответ полностью удовлетворить нас? Естественно спросить, каким образом приобрел энергию вакуум.

Вообще, задавая вопрос о том, откуда возникла энергия, мы по существу делаем важное предположение о природе этой энергии. Одним из фундаментальных законов физики является закон *сохранения* энергии, согласно которому различные формы энергии могут изменяться и переходить одна в другую, однако полное ко-

---

<sup>1</sup> Англ. *bootstrap* в буквальном смысле означает «зашнуровка», в переносном — самосогласование, отсутствие иерархии в системе элементарных частиц. — *Прим. перев.*



личество энергии остается неизменным. Нетрудно привести примеры, в которых можно проверить действие этого закона. Предположим, у нас имеется двигатель и запас горючего, причем двигатель используется в качестве привода электрического генератора, который в свою очередь питает электроэнергией нагреватель. При сгорании топлива запасенная в нем химическая энергия преобразуется в механическую, затем в электрическую и, наконец, в тепловую. Или допустим, что двигатель используется для подъема груза на вершину башни, после чего груз свободно падает; при ударе о землю возникает в точности такое же количество тепловой энергии, как и в примере с нагревателем. Дело в том, что, как бы энергия ни передавалась или как бы ни изменялась ее форма, ее, очевидно, нельзя ни создать, ни уничтожить. Этим законом инженеры пользуются в повседневной практике.

Если энергию нельзя ни создать, ни уничтожить, то как же все-таки возникает первичная энергия? Не впрыскивается ли она просто в первый момент (своего рода новое начальное условие, принимаемое *ad hoc*)? Если так, то почему Вселенная содержит данное, а не какое-то другое количество энергии? В доступной наблюдению Вселенной заключено около  $10^{68}$  Дж (джоулей) энергии — почему, скажем, не  $10^{99}$  или  $10^{10000}$  или любое другое число?

Теория инфляции предлагает одно из возможных научных объяснений этой загадки. Согласно этой теории, Вселенная вначале имела энергию, фактически равную нулю, и за первые  $10^{-32}$  с ей удалось вызвать к жизни все гигантское количество энергии. Ключ к пониманию этого чуда следует искать в том замечательном факте, что закон сохранения энергии в обычном смысле *не применим* к расширяющейся Вселенной.

По существу, мы уже встречались с подобным фактом. Космологическое расширение приводит к понижению температуры Вселенной: соответственно энергия теплового излучения, столь большая в первичной фазе, истощается и температура опускается до значений, близких к абсолютному нулю. Куда же делась вся эта тепловая энергия? В некотором смысле она израсходована Вселенной на расширение и обеспечила давление, дополняющее силу Большого взрыва. При расширении обычной жидкости ее давление, направленное наружу, совершает работу, используя энергию жидкости. При расширении обычного газа его внутренняя энергия расходуется на совершение работы. В полную противоположность этому космическое отталкивание сходно с поведением среды с *отрицательным* давлением. При расширении такой среды ее энергия не уменьшается, а растет. Именно это и происходило в период инфляции, когда космическое отталкивание заставило Вселенную ускоренно расширяться. В течение всего этого периода полная энергия вакуума продолжала возрастать, пока

к концу периода инфляции не достигла громадной величины. Как только период инфляции завершился, вся накопленная энергия высвободилась в одном гигантском всплеске, порождая теплоту и вещество в полном масштабе Большого взрыва. С этого момента началось обычное расширение с положительным давлением, так что энергия вновь стала уменьшаться.

Возникновение первичной энергии отмечено каким-то волшебством. Вакуум с таинственным отрицательным давлением, наделен, по-видимому, совершенно невероятными возможностями. С одной стороны, он создает гигантскую силу отталкивания, обеспечивающую его все ускоряющееся расширение, а с другой — само расширение форсирует возрастание энергии вакуума. Вакуум по существу сам питает себя энергией в огромных количествах. В нем заложена внутренняя неустойчивость, обеспечивающая непрерывное расширение и неограниченное производство энергии. И только квантовый распад ложного вакуума кладет предел этому «космическому мотовству».

Вакуум служит у природы волшебным, бездонным кувшином энергии. В принципе не существует предела величины энергии, которая могла бы выделяться в ходе инфляционного расширения. Это утверждение знаменует собой переворот в традиционном мышлении с его многовековым «из ничего не родится ничто» (это изречение датируется, по крайней мере эпохой Парменидов, т. е. V в. до н. э.). Идея о возможности «сотворения» из ничего до недавнего времени целиком находилась в компетенции религии. В частности, христиане издавна верят, что бог сотворил мир из Ничего, однако мысль о возможности самопроизвольного возникновения всего вещества и энергии в результате чисто физических процессов еще десяток лет назад считалось учеными абсолютно неприемлемой.

Те, кто не может внутренне примириться со всей концепцией возникновения «чего-то» из «ничего», имеют возможность иначе взглянуть на возникновение энергии при расширении Вселенной. Поскольку обычная гравитация имеет характер притяжения, для удаления частей вещества друг от друга необходимо совершить работу по преодолению гравитации, действующей между этими частями. Это означает, что гравитационная энергия системы тел отрицательна; при добавлении к системе новых тел происходит высвобождение энергии, и вследствие этого гравитационная энергия становится «еще более отрицательной». Если применить это рассуждение ко Вселенной на стадии инфляции, то именно появление теплоты и вещества как бы «компенсирует» отрицательную гравитационную энергию образовавшихся масс. В этом случае полная энергия Вселенной в целом равна нулю и никакой новой энергии вообще не возникает! Подобный взгляд на процесс «сотворения мира», конечно, привлекателен, однако его все же не

следует принимать слишком всерьез, поскольку в целом статус понятия энергии применительно к гравитации оказывается сомнительным.

Все сказанное здесь о вакууме очень напоминает излюбленную физиками историю о мальчике, который, провалившись в болото, вытащил себя за шнурки от собственных ботинок. Самосоздающаяся Вселенная напоминает этого мальчика — она тоже вытягивает сама себя за собственные «шнурки» (этот процесс обозначается термином «бутстрэп»). Действительно, благодаря собственной физической природе Вселенная возбуждает в себе всю энергию, необходимую для «создания» и «оживления» материи, а также инициирует порождающий ее взрыв. Это и есть космический бутстрэп; его поразительному могуществу мы и обязаны своим существованием.

### Успехи теории инфляции

После того как Гут выдвинул основополагающую идею о том, что Вселенная претерпела ранний период чрезвычайно быстрого расширения, стало очевидно, что такой сценарий позволяет красиво объяснить многие особенности космологии Большого взрыва, которые ранее принимались «на веру».

В одном из предшествующих разделов мы встретились с парадоксами очень высокой степени организации и согласованности первичного взрыва. Один из замечательных примеров тому — сила взрыва, которая оказалась точно «подогнанной» к величине гравитации космоса, вследствие чего скорость расширения Вселенной в наше время очень близка к граничному значению, разделяющему сжатие (коллапс) и быстрое разбегание. Решающая проверка инфляционного сценария как раз и состоит в том, предусматривает ли он Большой взрыв настолько точно определенной силы. Оказывается, что благодаря экспоненциальному расширению в фазе инфляции (что составляет ее самое характерное свойство) сила взрыва автоматически строго обеспечивает возможность преодоления Вселенной собственной гравитации. Инфляция может привести именно к той скорости расширения, которая наблюдается в действительности.

Другая «великая загадка» связана с однородностью Вселенной в больших масштабах. Она также немедленно решается на основе теории инфляции. Любые первоначальные неоднородности в структуре Вселенной должны абсолютно стираться при грандиозном увеличении ее размеров, подобно тому как складки на спущенном воздушном шаре разглаживаются при его надувании. А в результате увеличения размеров пространственных областей примерно в  $10^{50}$  раз любое начальное возмущение становится несущественным.

Однако неверно было бы говорить о *полной* однородности. Чтобы стало возможным появление современных галактик и галактических скоплений, структура ранней Вселенной должна была иметь некоторую «комковатость». Первоначально астрономы надеялись, что существование галактик можно объяснить скоплением вещества под действием гравитационного притяжения после Большого взрыва. Облако газа должно сжиматься под действием собственной гравитации, а затем распадаться на более мелкие фрагменты, а те в свою очередь — на еще меньшие и т. д. Возможно, распределение газа, возникшее в результате Большого взрыва, было совершенно однородным, но за счет чисто случайных процессов то там, то здесь возникали сгущения и разрежения. Гравитация еще более усиливала эти флуктуации, приводя к разрастанию областей сгущения и поглощению ими добавочного вещества. Затем эти области сжимались и последовательно распадались, а сгущения наименьших размеров превращались в звезды. В конце концов возникла иерархия структур: звезды объединялись в группы, те — в галактики и далее в скопления галактик.

К сожалению, если в газе с самого начала не было неоднородностей, то такой механизм возникновения галактик сработал бы за время, значительно превышающее возраст Вселенной. Дело в том, что процессы сгущения и фрагментации конкурировали с расширением Вселенной, которое сопровождалось рассеянием газа. В первоначальном варианте теории Большого взрыва предполагалось, что «зародыши» галактик существовали изначально в структуре Вселенной при ее возникновении. Более того, эти начальные неоднородности должны были иметь вполне определенные размеры: не слишком малые, иначе никогда бы не образовались, но и не слишком большие, иначе области большой плотности просто испытали бы коллапс, превратившись в огромные черные дыры. При этом совершенно непонятно, почему галактики имеют именно такие размеры или почему в скопление входит именно такое число галактик.

Инфляционный сценарий дает более последовательное объяснение галактической структуры. Основная идея достаточно проста. Инфляция обусловлена тем, что квантовым состоянием Вселенной является неустойчивое состояние ложного вакуума. В конце концов это состояние вакуума распадается и избыток его энергии превращается в теплоту и вещество. В этот момент космическое отталкивание исчезает — и инфляция прекращается. Однако распад ложного вакуума происходит не строго одновременно во всем пространстве. Как и в любых квантовых процессах, скорости распада ложного вакуума флуктуируют. В некоторых областях Вселенной распад осуществляется несколько быстрее, чем в других. В этих областях инфляция завершится рань-

ше. В результате этого неоднородности сохраняются и в конечном состоянии. Не исключено, что эти неоднородности могли служить «зародышами» (центрами) гравитационного сжатия и в конце концов привели к образованию галактик и их скоплений. Проводилось математическое моделирование механизма флуктуаций, однако с весьма ограниченным успехом. Как правило, эффект оказывается слишком большим, вычисленные неоднородности — слишком значительными. Правда, использовались слишком грубые модели и, возможно, более тонкий подход оказался бы более успешным. Хотя теория пока далека от завершения, она по крайней мере описывает характер механизма, который мог бы привести к возникновению галактик без необходимости введения специальных начальных условий.

В предложенном Гуттом варианте инфляционного сценария ложный вакуум вначале превращается в «истинный», или в вакуумное состояние с наименьшей энергией, которое мы отождествляем с пустым пространством. Характер этого изменения вполне аналогичен фазовому переходу (например, из газа в жидкость). При этом в ложном вакууме происходило бы случайное образование пузырьков истинного вакуума, которые, расширяясь со скоростью света, захватывали бы все большие области пространства. Чтобы ложный вакуум мог просуществовать достаточно долго и инфляция совершила бы свое «чудотворное» дело, эти два состояния должны быть разделены энергетическим барьером, сквозь который должно произойти «квантовое туннелирование» системы, аналогично тому, как это происходит с электронами (см. гл. 2). Однако у этой модели есть один серьезный недостаток: вся энергия, выделившаяся из ложного вакуума, оказывается сконцентрированной в стенках пузырьков и отсутствует механизм ее перераспределения по всему пузырьку. При столкновении и слиянии пузырьков энергия в конечном счете накапливалась бы в беспорядочно перемешанных слоях. В результате Вселенная содержала бы очень сильные неоднородности, и вся работа инфляции по созданию крупномасштабной однородности потерпела бы крах.

При дальнейшем усовершенствовании инфляционного сценария эти трудности удалось обойти. В новой теории отсутствует туннелирование между двумя состояниями вакуума; вместо этого параметры выбираются так, что распад ложного вакуума происходит очень медленно и, таким образом, Вселенная получает достаточное время для инфляции. Когда же распад завершается, энергия ложного вакуума высвобождается во всем объеме «пузыря», который быстро нагревается до  $10^{27}$  К. Предполагается, что вся наблюдаемая Вселенная содержится в одном таком пузыре. Таким образом, в ультрабольших масштабах Вселенная может быть крайне нерегулярной, но доступная нашему наблюдению

область (и даже значительно более крупные части Вселенной) находится в пределах полностью однородной зоны.

Любопытно, что Гут первоначально разрабатывал свою инфляционную теорию для решения совершенно другой космологической проблемы — отсутствия в природе магнитных монополей. Как показано в гл. 9, стандартная теория Большого взрыва предсказывает, что в первичной фазе эволюции Вселенной монополи должны возникать в избытке. Они, возможно, сопровождаются их одно- и двумерными аналогами — странными объектами, имеющими характер «струны» и «листа». Проблема заключалась в том, чтобы избавиться Вселенную от этих «нежелательных» объектов. Инфляция автоматически решает проблему монополей и другие аналогичные проблемы, поскольку гигантское расширение пространства эффективно уменьшает их плотность до нуля.

Хотя инфляционный сценарий разработан только частично и всего лишь правдоподобен, не более, он позволил сформулировать ряд идей, обещающих безвозвратно изменить облик космологии. Теперь мы не только можем предложить объяснение причины Большого взрыва, но и начинаем понимать, почему он был столь «большим» и почему принял такой характер. Мы можем теперь приступить к решению вопроса о том, каким образом возникла крупномасштабная однородность Вселенной, а наряду с ней — наблюдаемые неоднородности меньшего масштаба (например, галактики). Первичный взрыв, в котором возникло то, что мы называем Вселенной, отныне перестал быть загадкой, лежащей за пределами физической науки.

### Вселенная, создающая сама себя

И все-таки, несмотря на огромный успех инфляционной теории в объяснении происхождения Вселенной, тайна остается. Каким образом Вселенная первоначально оказалась в состоянии ложного вакуума? Что происходило до инфляции?

Последовательное, вполне удовлетворительное научное описание возникновения Вселенной должно объяснять, как возникло само пространство (точнее, пространство-время), которое затем подверглось инфляции. Одни ученые готовы допустить, что пространство существует всегда, другие считают, что этот вопрос вообще выходит за рамки научного подхода. И лишь немногие претендуют на большее и убеждены, что вполне правомерно ставить вопрос о том, каким образом пространство вообще (и ложный вакуум, в частности) могло возникнуть буквально из «ничего» в результате физических процессов, в принципе поддающихся изучению.

Как уже отмечалось, мы лишь недавно бросили вызов стойкому убеждению, «из ничего не возникает ничто». Космический

бутстрэп близок теологической концепции сотворения мира из ничего (*ex nihilo*). Без сомнения, в окружающем нас мире существование одних объектов обусловлено обычно наличием других объектов. Так, Земля возникла из протосолнечной туманности, та в свою очередь — из галактических газов и т. д. Если бы нам довелось увидеть объект, внезапно возникший «из ничего», мы, по-видимому, восприняли бы это как чудо; например, нас поразило бы, если бы в запертом пустом сейфе мы вдруг обнаружили массу монет, ножей или сладостей. В повседневной жизни мы привыкли сознавать, что все возникает откуда-то или из чего-то.

Однако все не так очевидно, если речь идет о менее конкретных вещах. Из чего, например, возникает живописное полотно? Разумеется, для этого необходимы кисть, краски и холст, но ведь это всего лишь инструменты. Манера, в которой написана картина, — выбор формы, цвета, текстуры, композиции — рождается не кистями и красками. Это результат творческого воображения художника.

Из чего возникают мысли и идеи? Мысли, без сомнения, существуют реально и, по-видимому, всегда требуют участия мозга. Но мозг лишь обеспечивает реализацию мыслей, а не является их причиной. Сам по себе мозг порождает мысли не более чем, например, компьютер — вычисления. Мысли могут быть вызваны другими мыслями, однако это не раскрывает природы самой мысли. Некоторые мысли могут рождаться ощущениями; мысли рождает и память. Большинство художников, однако, рассматривает свою работу как результат *неожиданного* вдохновения. Если это действительно так, то создание картины — или по крайней мере рождение ее идеи — как раз представляет собой пример рождения чего-то из ничего.

И все же можем ли мы считать, что физические объекты и даже Вселенная в целом возникают из ничего? Эта смелая гипотеза вполне серьезно обсуждается, например, в научных учреждениях восточного побережья США, где довольно много физиков-теоретиков и специалистов по космологии занимаются разработкой математического аппарата, который помог бы выяснить возможность рождения чего-то из ничего. В этот круг избранных входят Алан Гут из МТИ, Сидней Коулмен из Гарвардского университета, Алекс Виленкин из Университета Тафта, Эд Тайон и Хайнц Пейджелс из Нью-Йорка. Все они считают, что в том или ином смысле «ничто неустойчиво» и что физическая Вселенная спонтанно «распустилась из ничего», управляемая лишь законами физики. «Подобные идеи чисто умозрительны, — признается Гут, — однако на определенном уровне они, возможно, правильны... Иногда говорят, что бесплатного ланча не бывает, но Вселенная, по-видимому, как раз и являет собой такой «бесплатный ланч».

Во всех этих гипотезах ключевую роль играет квантовое поведение. Как мы говорили в гл. 2, основная особенность квантового поведения состоит в утрате строгой причинно-следственной связи. В классической физике изложение механики следовало строгому соблюдению причинности. Все детали движения каждой частицы были строго предопределены законами движения. Считалось, что движение непрерывно и строго определено действующими силами. Законы движения в прямом смысле воплощали в себе связь между причиной и следствием. Вселенная рассматривалась как гигантский часовой механизм, поведение которого строго регламентировано происходящим в данный момент. Именно вера в подобную всеобъемлющую и абсолютно строгую причинность побудила Пьера Лапласа утверждать, что сверхмощный калькулятор способен в принципе предвычислить на основе законов механики как историю, так и судьбу Вселенной. Согласно этой точке зрения, Вселенная обречена вечно следовать предписанному ей пути.

Квантовая физика разрушила методичную, но бесплодную лапласовскую схему. Физики убедились в том, что на атомном уровне материя и ее движение неопределенны и непредсказуемы. Частицы могут вести себя «сумасбродно», как бы сопротивляясь строго предписанным движениям, внезапно появляясь в самых неожиданных местах без видимых на то причин, а иногда возникая и исчезая «без предупреждения».

Квантовый мир не свободен полностью от причинности, однако она проявляется довольно нерешительно и неоднозначно. Например, если один атом в результате столкновения с другим атомом оказывается в возбужденном состоянии, он, как правило, быстро возвращается в состояние с наименьшей энергией, испуская при этом фотон. Возникновение фотона является, разумеется, следствием того, что атом перед этим перешел в возбужденное состояние. Мы можем с уверенностью сказать, что именно возбуждение привело к возникновению фотона, и в этом смысле связь причины и следствия сохраняется. Однако истинный момент возникновения фотона непредсказуем: атом может испустить его в любое мгновение. Физики в состоянии вычислить вероятное, или среднее, время появления фотона, но в каждом конкретном случае невозможно предсказать момент, когда это событие произойдет. Видимо, для характеристики подобной ситуации лучше всего сказать, что возбуждение атома не столько приводит к появлению фотона, сколько «подталкивает» его к этому.

Таким образом, квантовый микромир не опутан густой паутиной причинных взаимосвязей, но все же «прислушивается» к многочисленным ненавязчивым командам и предложениям. В старой ньютоновской схеме сила как бы обращалась к объекту с не допускающим возражения приказом: «Двигайся!». В квантовой фи-



зике взаимоотношения силы и объекта строятся скорее на приглашении, чем на приказе.

Почему вообще мы считаем столь неприемлемой мысль о внезапном рождении объекта «из ничего»? Что при этом заставляет нас думать о чудесах и сверхъестественных явлениях? Возможно, все дело лишь в необычности подобных событий: в повседневной жизни мы никогда не сталкиваемся с беспричинным появлением объектов. Когда, например, фокусник достает из шляпы кролика, мы знаем, что нас дурачат.

Предположим, что мы действительно живем в мире, где объекты время от времени явно возникают «ниоткуда», без всякой причины и притом совершенно непредсказуемым образом. Привыкнув к таким явлениям, мы перестали бы удивляться им. Спонтанное рождение воспринималось бы как одна из причуд природы. Возможно, в таком мире нам уже не пришлось бы напрягать свою доверчивость, чтобы представить внезапное возникновение из ничего всей физической Вселенной.

Этот воображаемый мир по существу не столь уж сильно отличается от реального. Если бы мы могли непосредственно воспринимать поведение атомов с помощью наших органов чувств (а не при посредничестве специальных приборов), нам бы часто приходилось наблюдать объекты, появляющиеся и исчезающие без четко определенных причин.

Явление, наиболее близкое «рождению из ничего», происходит в достаточно сильном электрическом поле. При критическом значении напряженности поля «из ничего» совершенно случайным образом начинают возникать электроны и позитроны. Расчеты показывают, что вблизи поверхности ядра урана напряженность электрического поля достаточно близка к пределу, за которым возникает этот эффект. Если бы существовали атомные ядра, содержащие 200 протонов (в ядре урана их 92), то происходило бы спонтанное рождение электронов и позитронов. К сожалению, ядро со столь большим числом протонов, по-видимому, становится крайне неустойчивым, но полной уверенности в этом нет.

Спонтанное рождение электронов и позитронов в сильном электрическом поле можно рассматривать как особый вид радиоактивности, когда распад испытывает пустое пространство, вакуум. Мы уже говорили о переходе одного вакуумного состояния в другое в результате распада. В этом случае вакуум распадается, превращаясь в состояние, в котором присутствуют частицы.

Хотя распад пространства, вызванный электрическим полем, трудно постижим, аналогичный процесс под действием гравитации вполне мог бы происходить в природе. Вблизи поверхности черных дыр гравитация столь сильна, что вакуум кишмя кишит непрерывно рождающимися частицами. Это и есть знаменитое излучение черных дыр, открытое Стивеном Хокингом. В конеч-

ном счете именно гравитация ответственна за рождение этого излучения, однако нельзя сказать, что это происходит «в старом ньютоновском смысле»: нельзя утверждать, что какая-то конкретная частица должна появиться в определенном месте в тот или иной момент времени в результате действия гравитационных сил. В любом случае, поскольку гравитация — лишь искривление пространства-времени, можно сказать, что пространство-время вызывает рождение вещества.

О спонтанном возникновении вещества из пустого пространства часто говорят как о рождении «из ничего», которое близко по духу рождению *ex nihilo* в христианской доктрине. Однако для физика пустое пространство совсем не «ничто», а весьма существенная часть физической Вселенной. Если мы все-таки хотим ответить на вопрос, как возникла Вселенная, то недостаточно предполагать, что с самого начала существовало пустое пространство. Необходимо объяснить, откуда взялось это пространство. Мысль о рождении *самого пространства* может показаться странной, однако в каком-то смысле это все время происходит вокруг нас. Расширение Вселенной есть не что иное, как непрерывное «разбухание» пространства. С каждым днем доступная нашим телескопам область Вселенной возрастает на  $10^{18}$  кубических световых лет. Откуда же берется это пространство? Здесь полезна аналогия с резиной. Если упругий резиновый жгут вытянуть, его «становится больше». Пространство напоминает суперэластик тем, что оно, насколько нам известно, может неограниченно долго растягиваться, не разрываясь.

Растяжение и искривление пространства напоминают деформацию упругого тела тем, что «движение» пространства происходит по законам механики точно так же, как и движение обычного вещества. В данном случае это законы гравитации. Квантовая теория в равной мере применима как к веществу, так и к пространству и к времени. В предшествующих главах мы говорили, что квантовая гравитация рассматривается как необходимый этап поиска суперсилы. В этой связи возникает любопытная возможность: если, согласно квантовой теории, частицы вещества могут возникать «из ничего», то применительно к гравитации не будет ли она описывать возникновение «из ничего» и пространства? Если это произойдет, то не является ли рождение Вселенной 18 млрд. лет назад примером именно такого процесса?

### Бесплатный ланч?

Основная идея квантовой космологии состоит в применении квантовой теории к Вселенной в целом: к пространству-времени и веществу; особенно серьезно эту идею рассматривают теоретики. На первый взгляд здесь налицо противоречие: квантовая физика

имеет дело с самыми малыми системами, тогда как космология — с самыми большими. Тем не менее Вселенная когда-то также была ограничена очень малыми размерами и, следовательно, тогда были чрезвычайно важны квантовые эффекты. Результаты вычислений говорят о том, что квантовые законы следует учитывать в эру ТВО ( $10^{-32}$  с), а в эру Планка ( $10^{-43}$  с) они, вероятно, должны играть определяющую роль. Как считают некоторые теоретики (например, Виленкин), между этими двумя эпохами существовал момент времени, когда возникла Вселенная. По словам Сиднея Коулмена, мы совершили квантовый скачок из Ничего во Время. По-видимому, пространство-время представляет собой реликт этой эпохи. Квантовый скачок, о котором говорит Коулмен, можно рассматривать как своего рода «туннельный процесс». Мы отмечали, что в первоначальном варианте теории инфляции состояние ложного вакуума должно было туннелировать через энергетический барьер в состояние истинного вакуума. Однако в случае спонтанного возникновения квантовой Вселенной «из ничего» наша интуиция достигает предела своих возможностей. Один конец туннеля представляет собой физическую Вселенную в пространстве и времени, которая попадает туда путем квантового туннелирования «из ничего». Следовательно, другой конец туннеля представляет собой это самое Ничто! Возможно, лучше было бы сказать, что у туннеля имеется лишь один конец, а второго просто «не существует».

Главная трудность этих попыток объяснить происхождение Вселенной состоит в описании процесса ее рождения из состояния ложного вакуума. Если бы вновь возникшее пространство-время оказалось в состоянии истинного вакуума, то инфляция никогда не смогла бы произойти. Большой взрыв свелся бы к слабому всплеску, а пространство-время спустя мгновение снова прекратило бы свое существование — его истребили бы те самые квантовые процессы, благодаря которым оно первоначально возникло. Не оказалась бы Вселенная в состоянии ложного вакуума, она никогда не оказалась бы вовлеченной в космический бутстрэп и не материализовала бы свое иллюзорное существование. Возможно, состояние ложного вакуума оказывается предпочтительным благодаря характерным для него экстремальным условиям. Например, если Вселенная возникала при достаточно высокой начальной температуре, а затем остывала, то она могла бы даже «сесть на мель» в ложном вакууме, но пока многие технические вопросы такого типа остаются нерешенными.

Но как бы ни обстояло в действительности дело с этими фундаментальными проблемами, Вселенная должна тем или иным образом возникнуть, и квантовая физика представляет собой единственную область науки, в которой имеет смысл говорить о событии, происходящем без видимой причины. Если речь идет

о пространстве-времени, то в любом случае бессмысленно говорить о причинности в обычном понимании. Обычно понятие причинности тесно связано с понятием времени, и потому любые соображения о процессах возникновения времени или его «выхода из небытия» должны опираться на более широкое представление о причинности.

Если пространство действительно десятимерно, то теория считает все десять измерений вполне равноправными на самых ранних стадиях. Привлекает возможность связать явление инфляции со спонтанной компактификацией (сворачиванием) семи из десяти измерений. Согласно такому сценарию, «движущая сила» инфляции представляет собой побочный продукт взаимодействий, проявляющихся через дополнительные измерения пространства. Далее десятимерное пространство могло бы естественно эволюционировать таким образом, что при инфляции три пространственных измерения сильно разрастаются за счет семи остальных, которые, напротив, сжимаются, становясь невидимыми? Таким образом, квантовый микропузырь десятимерного пространства сжимается, а три измерения благодаря этому раздуваются, образуя Вселенную; остальные семь измерений остаются в плену микрокосмоса, откуда проявляются лишь косвенно — в форме взаимодействий. Эта теория кажется очень привлекательной.

Несмотря на то что теоретикам предстоит еще много работы по изучению природы очень ранней Вселенной, уже сейчас можно дать общий набросок событий, в результате которых Вселенная обрела наблюдаемый сегодня облик. В самом начале Вселенная спонтанно возникла «из ничего». Благодаря способности квантовой энергии служить своего рода ферментом, пузыри пустого пространства могли раздуваться со все возрастающей скоростью, создавая благодаря бутстрэпу колоссальные запасы энергии. Этот ложный вакуум, наполненный саморожденной энергией, оказался неустойчивым и стал распадаться, выделяя энергию в виде теплоты, так что каждый пузырек заполнился огнедышащей материей (файерболом). Раздувание (инфляция) пузырей прекратилось, но начался Большой взрыв. На «часах» Вселенной в этот момент было  $10^{-32}$  с.

Из такого файерболом и возникла вся материя и все физические объекты. По мере остывания космический материал испытывал последовательные фазовые переходы. При каждом из переходов из первичного бесформенного материала «вымораживалось» все больше различных структур. Одно за другим отделялись друг от друга взаимодействия. Шаг за шагом объекты, которые мы называем теперь субатомными частицами, приобретали присущие им ныне черты. По мере того как состав «космического супа» все более усложнялся, оставшиеся со времен ин-

флящи крупномасштабные нерегулярности разрастались в галактики. В процессе дальнейшего образования структур и обособления различных видов вещества Вселенная все больше приобретала знакомые формы: горячая плазма конденсировалась в атомы, формируя звезды, планеты и в конечном счете — жизнь. Так Вселенная «осознала» самое себя.

Вещество, энергия, пространство, время, взаимодействие, поля, упорядоченность и структура — все эти понятия, замислованные из «прейскуранта творца», служат неотъемлемыми характеристиками Вселенной. Новая физика приоткрывает заманчивую возможность научного объяснения происхождения всех этих вещей. Нам уже не нужно с самого начала специально вводить их «вручную». Мы можем увидеть, каким образом все фундаментальные свойства физического мира могут появиться *автоматически* как следствия законов физики, без необходимости предполагать существование крайне специфических начальных условий. Новая космология утверждает, что начальное состояние космоса не играет никакой роли, так как вся информация о нем стерлась в ходе инфляции. Наблюдаемая нами Вселенная несет на себе лишь отпечатки тех физических процессов, которые происходили с момента начала инфляции.

Тысячелетиями человечество верило в то, что «из ничего не родится ничто». Сегодня мы можем утверждать, что из ничего произошло все. За Вселенную не надо «платить» — это абсолютно «бесплатный ленч».

## Единство Вселенной

---

Все сущее во все века  
 Без счета верст  
 Невидимый связует мост,  
 И не сорвать тебе цветка,  
 Не стронув звезд <sup>1</sup>.

Френсис Томпсон (1859—1907)

### Понятие Вселенной

Слово «Вселенная» (*Universe*) в английском языке имеет то же происхождение, что и «единство» (*unity*) или «единица» (*one*). Буквально оно означает единство, общность всех вещей, рассматриваемых как целое. Любопытно, что слово «целый» (*whole*) имеет один корень со словом «святой» (*holy*), что отражает глубоко таинственные и метафизические связи, с которыми имеет дело космология. Вплоть до XX в. познание Вселенной как целого в основном оставалось прерогативой религии. Научная космология как самостоятельная отрасль знания возникла сравнительно недавно.

Популярность космологии как среди ученых, так и среди широкой публики обусловлена ее своеобразной таинственностью. Многие вообще не видят серьезного различия между научной космологией, мистицизмом или сенсационными сторонами парапсихологии. Полагаю, что несмотря на такую путаницу, всеобщий интерес к космологии сам по себе благо в нашем мире, где разобщенность и конфликты часто одерживают верх над единством.

Банальные рассуждения о Вселенной оттеснили на второй план, пожалуй, самый замечательный факт космологии — то обстоятельство, что понятие Вселенной вообще имеет смысл. Можно ли рассматривать все сущее как некое единое целое?

В этом вопросе заключен глубокий философский смысл. В основе науки лежат законы, подлежащие экспериментальной проверке. Научная теория дает последовательное описание тех или иных явлений природы, основанное на сумме не противоречащих друг другу принципов (выраженных преимущественно в математической форме). Цель теории заключается в создании модели определенной части физического мира; она сохраняет силу или, наоборот, отвергается в зависимости от своей пригодности. Чтобы определить, насколько модель близка к реальности, ученым при-

---

<sup>1</sup> Перевод Н. В. Мицкевича.

ходится ставить эксперименты. Если неоднократные эксперименты подтверждают точность модели, то доверие к теории растёт, и она становится частью совершенного научного знания, оставаясь в этом качестве до тех пор, пока ей на смену не придет улучшенная, более точная или более глубокая теория.

Научный метод в значительной мере опирается на воспроизводимость экспериментальных проверок. Приведем простой пример. Галилей утверждал, что при падении все тела ускоряются одинаково, так что, начав падать вместе, два тела даже различной массы достигнут поверхности Земли одновременно. Это утверждение было встречено с большим скептицизмом, ибо столетиями люди верили учению Аристотеля о том, что массивные тела падают быстрее (видимо, такое представление больше соответствует интуиции). Однако, что бы ни говорила интуиция, утверждение Галилея сравнительно нетрудно проверить на опыте — достаточно просто проследить за падением нескольких одновременно отпущенных тел. После многократного повторения этого опыта люди пришли к выводу о справедливости утверждения Галилея об особенностях процесса падения материальных тел.

В приведенном примере проверка теории проста, поскольку мы располагаем безграничным количеством небольших тел, пригодных для проведения таких опытов. В космологии, однако, ситуация совершенно иная, ибо (по определению) существует лишь одна Вселенная. Здесь даже не возникает вопроса о «космическом законе», поскольку подобный закон никогда не удалось бы проверить в повторных экспериментах на наборе сходных систем. Отсюда возникает принципиальный вопрос, насколько вообще применимы научные выводы ко Вселенной как целому.

На практике космологи прибегают к экстраполяции. Законы физики, выведенные из наблюдений и экспериментов над отдельными частями Вселенной, применяются и ко Вселенной в целом. Например, общая теория относительности (лучшая из существующих на сегодня теорий гравитации), проверенная экспериментально в основном в пределах Солнечной системы, применяется тем не менее к расчету движения всей Вселенной. Замечательно, что, судя по всему, это дает правильные результаты! Применение законов, справедливых для какой-то отдельной части Вселенной, ко всему космосу, кажется, приводит к очень правдоподобному описанию наблюдаемой на опыте ситуации. Почему?

Для ответа на этот вопрос необходимо вернуться к исходной проблеме — насколько вообще имеет смысл говорить о «Вселенной в целом». Здесь есть аналогия с человеческим обществом. Политик может рассуждать следующим образом: «Я доволен снижением цен, мои друзья также удовлетворены этим; согласно опросам общественного мнения, другие люди также одобряют снижение цен. Следовательно, страна в целом будет удовлетво-

рена снижением цен». Исходное предположение здесь состоит в том, что общество в целом обладает неким коллективным сознанием, которое отражает мнения его отдельных членов.

Это позволяет считать, что принципы, применимые к отдельной личности, справедливы и для общества в целом. Но подобная аргументация убедительна лишь в том случае, если общество состоит из сходно мыслящих личностей. Разумеется, в вопросе о снижении цен большинство людей придерживается одинакового мнения. Однако результат может быть совершенно иным, если коснуться, например, вопроса об отношении к религии.

Применяя законы физики ко Вселенной в целом, мы совершаем тот же логический скачок, как и в примере с понижением цен. Вселенная состоит из огромного (возможно, бесконечного) числа подобных друг другу или даже идентичных систем. В больших масштабах структуру Вселенной можно представить как некое собрание галактик, а ее микроструктуру — как собрание атомов. В недрах строения вещества Вселенная представляет собой набор квантовых полей. Часто считается само собой разумеющимся, что за пределами наблюдаемой Вселенной мы встречаемся с объектами знакомых нам типов. Однако далеко не очевидно, что подобная поразительная универсальность должна существовать.

Универсальность физических систем служит отправной точкой всей научной космологии. Изучение звездного неба показывает, что звезды очень похожи на наше Солнце, а другие галактики напоминают наш Млечный Путь как по размерам, так и по структуре. Более детальный анализ свидетельствует, что удаленные тела состоят из тех же атомов, какие встречаются на Земле. «Земной» атом совершенно неотличим от атома на самом краю наблюдаемой Вселенной. Физические процессы, происходящие в наиболее удаленных областях космоса, по-видимому, абсолютно идентичны процессам в ближнем космосе. При этом особенно важно, что сами взаимодействия оказываются универсальными. Например, силу электромагнитного взаимодействия в удаленных квазарах можно определять на основе тщательного изучения их оптических спектров. При этом не обнаруживается заметного различия с электромагнитными взаимодействиями, наблюдаемыми в лабораторных условиях.

По мере того как астрономы расширяли свои горизонты, охватывая все более обширные области Вселенной, они, как правило, обнаруживали почти одно и то же. Почему так должно быть, совсем не ясно. Несколько столетий назад люди считали, что Земля — центр мироздания, уникальный по своему местоположению и форме. Однако со времен Коперника весь опыт стал говорить об обратном: Земля — типичная планета в типичной галактике, расположенная в типичной области Вселенной, и



вообще, Вселенная состоит из огромного числа более или менее сходных объектов.

Ученые сформулировали эти представления в виде так называемого «космологического принципа», который, попросту говоря, утверждает, что ближний космос является типичным образцом Вселенной в целом. Это относится не только к атомам, звездам и галактикам, но и ко всей организации Вселенной, а также к распределению вещества и энергии. Вселенная чрезвычайно однородна относительно распределения галактик в пространстве как по удаленности, так и по направлению. Насколько можно судить, в космосе отсутствуют какие-либо выделенные области или направления. Более того, эта однородность сохраняется с течением времени по мере расширения Вселенной; скорость расширения одинакова для всех областей пространства и всех направлений. Действительно, довольно трудно представить более простое устройство Вселенной, совместимой с существованием живых существ. В предыдущих главах — в рамках так называемой инфляционной теории эволюции Вселенной — приводились весьма убедительные основания для подобной крупномасштабной согласованности.

Таким образом, наука рисует картину однородной, самосогласованной и простой в больших масштабах Вселенной. Если бы Вселенная расширялась с существенно разными скоростями в различных направлениях или имела области, сильно отличающиеся по плотности или распределению вещества, то вряд ли вообще существовала бы научная космология. (Строго говоря, наверное, не существовало бы и самих ученых.) Именно эти три особенности Вселенной — однородность, самосогласованность и простота — позволяют говорить о Вселенной как едином целом. До самого последнего времени природа этих особенностей Вселенной оставалась загадкой. Теперь мы знаем, что «инструкции» для создания самосогласованного, однородного космоса заключены в законах физики. Свойства суперсилы определили развитие ранней Вселенной и организацию ее единой структуры, отличающейся простотой в больших масштабах.

### Принцип Маха: связь между большим и малым

Хотя мы все готовы признать присущее Вселенной всеобъемлющее единство *формы*, существует настоящее желание обнаружить более глубокое космическое единство — то, которое самым тесным образом «сплетает» воедино ближайшую нам локальную часть мира со всей необъятной Вселенной. Идея связи большого и малого, глобального и локального обладает большой

притягательной силой, поскольку заставляет нас чувствовать свое единство со всем мирозданием, испытывать таинственное стремление к общности, свойственное большинству религий. Многие люди, несомненно, чувствуют себя духовно связанными со всей совокупностью существующих в мире объектов, и в науке также существует традиция настойчивого поиска таких связей.

Один из первых научных аргументов в пользу существования глубокой связи между структурой Вселенной в больших масштабах и локальной физикой был провозглашен австрийским физиком и философом Эрнстом Махом (1838—1916), который навечно вошел в историю науки благодаря «числу Маха» (единица измерения скорости звука). Несмотря на некоторые ошибочные взгляды Маха (например, он не верил в реальность атомов), его труды, посвященные природе инерции и позднее обобщенные под названием «принцип Маха», оказались одной из наиболее прочных научных теорий. Без сомнения, идеи Маха оказали глубокое влияние на молодого Эйнштейна в его попытках сформулировать общую теорию относительности. В письме, написанном в июне 1913 г. вслед за публикацией в предшествующем году книги Маха «Наука механики», Эйнштейн признавал, что многим обязан Маху.

Мах родился в городе Турасе на территории нынешней Чехословакии. Он занимал профессорские кафедры как по математике, так и по физике в университете в Граце. Позднее Мах переехал в Прагу, а потом — в Вену, где получил должность профессора философии; здесь он присоединяется к философскому течению, получившему название позитивизма. Мах полагал, что действительность следует привязывать к наблюдениям, и именно эта точка зрения легла в основу его космологических представлений.

Мах глубоко интересовался природой движения, в частности, вопросом о различии между реальным и кажущимся движением. Наши предки верили, что небеса вращаются вокруг Земли, что Земля покоится в центре Вселенной, а Солнце, Луна и звезды движутся по криволинейным траекториям. Это казалось совершенно естественным, поскольку небесные тела совершали по небу видимое движение. В XVII в. подобные идеи были, однако, отвергнуты, так как выяснилось, что движение небесных тел всего лишь кажущееся. В действительности же вращается сама Земля.

Как можно было убедить скептика, что вращение звезд лишь кажущееся и что именно Земля вращается вокруг своей оси? Можно было бы, например, обратиться к механике Ньютона. Вследствие вращения Земли возникают «центробежные эффекты», которые вызывают утолщение земного шара в районе экватора. Тщательные измерения размеров Земли показывают, что ее диаметр по экватору на 43 км превышает расстояние между полю-

сами. Причина того, что вращение Земли вызывает ее утолщение на экваторе, кроется в существовании инерции.

Инерция — свойство вещества, хорошо всем нам знакомое. Тяжелые предметы обладают большой инерцией; это означает, что их трудно привести в движение, однако если это произошло, то их трудно остановить. Легкие предметы передвигать гораздо проще. Именно инерцией обусловлено движение Земли в пространстве. При отсутствии инерции Земля остановилась бы на своей орбите и упала на Солнце. Инерция выбрасывает нас из сиденья при резком торможении автомобиля, она заставляет нас почувствовать, как что-то обрывается в желудке при резком движении лифта. Именно инерция отбрасывает нас к внешнему ободу вращающейся карусели или прижимает к стенке вращающейся центрифуги. Инерция разрывает слишком быстро вращающийся маховик, именно эта тенденция сбрасывать с себя вещество (ее иногда называют центробежной силой) приводит к утолщению Земли на экваторе.

Как связать силу инерции с другими силами природы? Эта загадка восходит к самому Ньютону и данному им впервые систематическому описанию закона движения. Главным моментом работы Ньютона явилось признание относительности равномерного движения (происходящего с постоянной скоростью). Вообразите, что вы заключены в закрытую непрозрачную кабину, движущуюся в глубинах пространства. Не существует никакого способа, который помог бы вам выяснить, покоится кабина или движется равномерно. Такие условия вполне воспроизводятся на борту самолета, совершающего горизонтальный полет. Наше ощущение силы и движения на борту самолета неотличимы от аналогичных ощущений в помещении на Земле. Равномерное движение самолета никак не влияет на поведение тел внутри самолета, в частности на то, как пассажиры передвигаются, едят, дышат — все эти и другие действия выглядят, как обычно.

Почему же тогда мы утверждаем, что самолет движется? Разумеется, выглянув в иллюминатор, мы увидим, что земля под нами «уплывает из-под ног». Однако по существу движение в данном случае означает, что самолет движется *относительно* поверхности Земли, которая в свою очередь тоже не находится в покое. Земля движется по орбите вокруг Солнца (хотя мы не ощущаем этого движения), а Солнце движется в Галактике.

Здесь очень важно отметить, что пространство не имеет «верстовых столбов», поэтому наше движение в пространстве как таковое невозможно измерить. Каждая область пространства в точности подобна любой другой. Не существует способа увидеть или почувствовать проносящееся мимо пространство, как это удается плывущей в океане рыбе. Нет течения, которое помогло бы нам оценить свою скорость. Утверждение, что тело «покоится»

в пространстве, вообще не имеет смысла. Это хорошо понимал еще Ньютон, заметив, что «...возможно, не существует тела, находящегося в состоянии истинного покоя, относительно которого можно было бы описывать положение и движения других тел».

Относительность равномерного прямолинейного движения заложена в первый закон Ньютона, утверждающий, в частности, что для поддержания такого движения не требуется силы или другого физического воздействия. Напротив, тело будет продолжать двигаться прямолинейно и равномерно до тех пор, пока что-либо не изменит характера его движения. В отсутствие внешних воздействий тело непрерывно движется вперед благодаря инерции.

На Земле чрезвычайно трудно полностью устранить влияние сил. Шайба, пущенная по поверхности льда, движется почти как свободное тело. Благодаря инерции шайба сохраняет состояние движения с почти постоянной скоростью; при этом достаточно было придать шайбе начальный импульс, и нет необходимости в какой-либо «подталкивающей» силе. Однако, например, автомобиль испытывает столь сильное трение и сопротивление воздуха, что эти силы вскоре превзойдут его инерцию. В результате автомобиль останавливается, пройдя после выключения двигателя короткий отрезок пути.

Ускоренное неравномерное движение имеет совершенно иной характер, нежели равномерное прямолинейное. Если самолет делает вираж, пикирует или набирает скорость, пассажиры немедленно чувствуют это отклонение от равномерного движения по тому, как их «бросает» в сторону. Даже находясь внутри движущейся в пространстве непрозрачной кабины, можно сразу заметить ускоренный характер движения.

Каким же образом мы тотчас замечаем ускорение движения? Решающее значение имеет инерция. Тела, испытывающие ускорение, оказывают заметное сопротивление. Частным случаем ускоренного, неравномерного движения является вращение. Если непрозрачная кабина, внутри которой вы находитесь, начинает вращаться, вы чувствуете себя «прижатым к стене», поскольку тело стремится двигаться по прямой, а вращающаяся кабина вынуждает вас двигаться по кривой. Это, видимо, свидетельствует о том, что если равномерное движение имеет смысл только относительно других тел, то ускоренное движение абсолютно.

Некоторые ученые и философы не хотели согласиться с этим выводом. Один из них, почти современник Ньютона, ирландский философ епископ Джордж Беркли писал: «Я полагаю, что любое абсолютное движение, которое только можно вообразить, в основе своей имеет не что иное, как относительное движение. Беркли обосновывал это тем, что, поскольку пространство однородно, нельзя представить себе *любого* движения через пространство

как таковое. Представление о движении тел может иметь смысл, если только его относить к другим материальным телам:

Достаточно заменить слова «абсолютное пространство» словами «относительное пространство», которое связано с небосклоном и закрепленными на нем звездами... Движение и покой, определенные в этом относительном пространстве, вполне можно использовать вместо соответствующих абсолютных понятий.

Здесь Беркли вводит решающее и очень важное представление о «неподвижных звездах». Сегодня мы знаем, что звезды в действительности не «закреплены», а сами движутся в галактике. Однако это движение едва заметно, поскольку звезды чрезвычайно удалены от нас. Важное предположение Беркли состоит в том, что наиболее далекое вещество во Вселенной может в определенном смысле служить стандартной системой отсчета, относительно которой можно описывать все движения.

За этими дискуссиями о движении стоит вопрос о природе пространства и о различии между понятиями пространства и «ничто». Аристотель, провозгласив «природа не терпит пустоты», утверждал, что пустота есть «ничто» и потому не может существовать. Видимое пустое пространство между телами можно принять, лишь предположив, что оно непрерывно заполнено веществом — эфиром или еще чем-либо.

Однако и противоположное представление о самостоятельном существовании пустоты, или вакуума, — также имело своих сторонников. К ним относился и Ньютон, который рассматривал то, что он назвал «абсолютным пространством... не связанным с чем-либо внешним». Эту концепцию Ньютона высмеял его оппонент Готтфрид Лейбниц, провозгласивший, что «не существует пространства без материи».

Современная физика разрешает это древнее противоречие, заменяя пространство квантовым вакуумом, наделяя некой структурой то, что на первый взгляд кажется более чем пустотой. В то же время квантовый вакуум, населенный «резвящимися» виртуальными частицами, разумеется, далек от «непрерывной жидкости» Аристотеля.

Ньютон полагал, что может научно обосновать существование абсолютного пространства на основе явлений, обусловленных инерцией. Утолщение на экваторе вращающейся Земли показывает, что вращается именно Земля, а не звезды. Поэтому Ньютон утверждал, что вращение Земли не только происходит относительно звезд, но и имеет абсолютный характер. Земля действительно вращается в абсолютном пространстве.

Именно это утверждение оспаривал Беркли; его концепция сводилась к тому, что если бы во Вселенной вдруг исчезли все тела, кроме одного, то представление о движении — равномерном или любом другом — вообще потеряло бы смысл. Беркли

утверждал, что если бы кроме земного шара не существовало других тел, то его движение вообще нельзя было бы вообразить. Мы не смогли бы тогда определить, вращается земной шар или нет. Беркли развивал эту идею следующим образом. Пусть существует два земных шара и нет никаких других тел. Тогда может иметь смысл относительное движение этих шаров по направлению друг к другу или друг от друга, но и в этом случае, согласно Беркли, круговое движение этих двух шаров относительно их общего центра масс нельзя вообразить. С другой стороны, считал Беркли, если предположить, что существует небосвод с неподвижными звездами, то можно представить себе вращательное движение двух шаров на основе их положения относительно различных частей небосвода.

Несмотря на успехи механики Ньютона, эти рассуждения Беркли сохранили силу и два века спустя получили отклик в работах Маха, который не считал необходимым проводить принципиальное различие между равномерным и неравномерным относительными движениями. Мах полагал, что ускоренные и инерциальные (равномерные) движения происходят *одинаково*. Однако каким образом Мах собирался примирить свое убеждение в том, что даже ускоренные движения (например, вращение) чисто относительны, с существованием сил инерции, проявляющимся, например, в центробежных эффектах и приводящим к экваториальному утолщению Земли? В конце концов именно Ньютон бросил вызов тем, кто сомневается в существовании абсолютного движения: «Явления, которые отличают абсолютное движение от относительного, обусловлены центробежными силами... В чисто круговом движении, имеющем относительный характер, таких сил не существует».

Ход ответных рассуждений Маха прям до дерзости. Если вращение существует лишь относительно неподвижных звезд, то, утверждал Мах, испытываемые вращающимся телом центробежные силы должны *создаваться* звездами. Гипотеза Маха по существу означает не более и не менее как утверждение, что природа инерции коренится в глубинах Вселенной. Если принять подобное объяснение происхождения инерции, то можно отказаться от ньютоновского абсолютного пространства и рассматривать все движения как относительные. Именно эта линия рассуждений и составляет содержание так называемого принципа Маха, оказавшего удивительно сильное влияние на несколько поколений физиков. Этот принцип вызвал ряд резких критических оценок, в том числе со стороны В. И. Ленина<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> См. работу В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм», Полн. собр. сочинений, изд. IV, т. 18. — *Прим. ред.*

Можно ли воспользоваться принципом Маха? Прежде всего надо объяснить природу инерционного влияния удаленных звезд на тело, находящееся на Земле или где-то во Вселенной. Ключ к решению этой проблемы лежит в полном сходстве центробежной и гравитационной сил. В одном из проектов будущая космическая станция представляет собой нечто вроде большого колеса, которое должно вращаться вокруг своей оси с такой скоростью, чтобы обеспечить ускорение  $1g$  на периферии «колеса». В этом состоит идея создания искусственной силы тяжести. Близкое сходство центробежных и гравитационных сил хорошо понимали Галилей и Эйнштейн. Действительно, в основе общей теории относительности лежит так называемый принцип эквивалентности, согласно которому обе силы локально идентичны. Поэтому вполне естественно пытаться объяснить центробежные и другие инерционные силы на основе гравитационного поля Вселенной.

Каким образом гравитация звезд могла бы создавать инерцию тел? Одна из возможных идей состоит в том, что вращающееся тело оказывает на звезды некоторое гравитационное влияние. Звезды, испытывая лишь слабое воздействие, создают собственный гравитационный эффект, действующий на вращающееся тело. Этот эффект порождает то, что мы называем центробежной силой, однако по существу это гравитационный эффект космического происхождения. Разумеется, из-за огромных расстояний вклад каждой звезды в центробежную силу чрезвычайно мал, но число звезд столь велико, что суммарный эффект может оказаться весьма значительным. Это предположение выглядит фантастическим. Всякий раз, когда у вас что-то «обрывается в желудке», знайте, что причиной этому являются удаленные галактики, отстоящие на миллионы световых лет.

Однако с этой простой картиной связана некая сложность, состоящая в том, что, согласно теории относительности, гравитационное возмущение не может распространяться быстрее света. Но даже с учетом этого понадобилось бы много миллионов лет, чтобы гравитационное «эхо» вращающихся тел вернулось обратно. Мы же знаем, что центробежные эффекты возникают мгновенно, как только тело начинает вращаться.

Эйнштейн полагал, что нашел способ преодолеть проблему временной задержки, включив принцип Маха в свои космологические исследования. Несколько странно, что схема Эйнштейна оказалась действенной только в случае искривленной Вселенной, причем пространственно замкнутой (в виде гиперсферы). Бесконечное, неограниченное пространство в этом случае не подходит. Это вызвало беспорядочные, продолжающиеся по сей день дискуссии о том, в какой степени общая теория относительности Эйнштейна включает (или не включает) принцип Маха.

В 1949 г. математик и логик Курт Гёдель нашел решение уравнений Эйнштейна для гравитационного поля, которое фактически описывает вращающуюся Вселенную. Модель Гёделя не претендует непременно на описание реальной Вселенной, тем не менее такая логическая возможность оказывается в рамках теории Эйнштейна. Согласно принципу Маха, вращающаяся Вселенная немислима, ибо относительно чего вращается вся Вселенная?

Вместе с тем некоторые эффекты, предсказанные общей теорией относительности, явно отвечают принципу Маха. Об одном из них Эйнштейн упоминал в письме к Маху. Предположим, мы согласны с тем, что действующие на тело силы инерции обусловлены гравитационным воздействием всего остального вещества Вселенной. Основной вклад в эти силы дадут, очевидно, наиболее удаленные области, поскольку именно там больше всего вещества. Тем не менее небольшой вклад должны вносить и близко расположенные тела. Эйнштейн предложил Маху рассмотреть тело, помещенное внутри массивной материальной оболочки, которая вращается относительно неподвижных звезд. Если идеи Маха верны, то система отсчета, относительно которой следует описывать движение тела внутри оболочки, получается в результате усреднения по всему остальному веществу Вселенной; при таком усреднении, очевидно, нельзя исключать и сферическую оболочку. Ее вклад во всеобщую космическую систему отсчета будет, конечно, очень мал, однако все же отличен от нуля. Эту величину можно рассчитать теоретически, и вычисление показывает, что, как и предсказывал Мах, вращение оболочки действительно создает крошечную силу инерции. Эта сила действует на находящееся внутри оболочки тело, стремясь заставить его также участвовать во вращении.

Примечательно, что подобные эффекты можно действительно обнаружить. Рассмотрим, например, опыты с гироскопом на околоземной орбите. На движение гироскопа влияет искривление пространства, которое создается Землей и испытывает возмущение, обусловленное вращением. Таким образом, гироскоп будет прецессировать, и хотя эффект очень мал (потребовались бы миллионы лет, чтобы гироскоп совершил полный оборот), можно ожидать, что с помощью современных методов его удастся обнаружить. Например, поместив гироскоп в кожух для устранения возмущений негравитационного типа (в частности, воздействия солнечного ветра). Эксперимент такого типа планировался в течение нескольких лет профессором Уильямом Фейрбэнком в Стэнфордском университете (мы упоминали об этом ученом в гл. 8 в связи с экспериментами по понску свободных кварков).

У более массивных тел эффект, обусловленный вращением искривленного пространства, может быть более выраженным.



Предельный случай представляет вращение черной дыры, при котором наиболее близкие объекты могут оказаться столь вовлеченными в этот процесс, что никакая сила во Вселенной не в состоянии помешать этому. Подобный (предполагаемый) эффект в популярной литературе иногда называют пространственным вихрем вокруг черной дыры.

Вполне возможно, что принцип Маха не удастся проверить экспериментально. Как же можно узнать, что вращение Земли приводит к ее уширению в области экватора в совершенно пустой Вселенной, если у нас нет способа удалить из Вселенной остальные тела? Однако можно представить себе эксперимент, который мог бы дискредитировать этот принцип. Если бы на основании очень точных измерений удалось установить, что Вселенная в целом пребывает в абсолютном вращении, то принцип Маха был бы опровергнут.

Абсолютное космическое вращение означало бы существование преимущественного направления в пространстве, и можно ожидать, что это направление должно проявиться в распределении во Вселенной вещества и энергии. Известно, что космическое тепловое излучение однородно и изотропно по всем направлениям с точностью не менее  $10^{-4}$ ; отсюда можно получить строгие ограничения возможности космического вращения. Действительно, можно показать, что за время своей истории Вселенная могла повернуться не более чем на несколько градусов. Таким образом, с большой степенью точности следует утверждать, что движение Вселенной по крайней мере не противоречит принципу Маха.

## Сигналы из будущего

Подобно многим ученым-профессионалам, увлекающимся научной фантастикой, пару лет назад я взялся за чтение книги Грегори Бенфорда «Бегство времени». Каково же было мое удивление, когда почти в самом начале мне встретился персонаж по имени Пол Девис — физик, глубоко интересующийся проблемой времени и авторитетно утверждающий, что должна существовать возможность посылать сигналы в прошлое. Следуя его совету, герой книги, чтобы спасти мир от катастрофы, предпринял попытки связаться с ученым предшествующего поколения.

Неожиданное появление меня на страницах книги было вызвано, очевидно, моим давним и устойчивым интересом к проблеме происхождения времени. Впервые я увлекся идеей посылки сигнала в прошлое после посещения еще в студенческие годы лекции Фреда Хойла, которую он читал в Лондонском королевском обществе. Хойл указал, что знаменитые уравнения Максвелла для электромагнитного поля, описывающие распростра-

нение электромагнитных волн, допускают возможность распространения этих волн вспять во времени.

Этот поразительный вывод можно пояснить с помощью аналогии с обычными волнами на воде. Если бросить камень в спокойный пруд, то во все стороны от точки возмущения (падения камня) побегут волны, которые исчезнут на краях пруда. Подобную картину расходящихся волн нетрудно получить на практике. Вместе с тем мы никогда не встречаем упорядоченной картины, в которой волны, возникнув у краев пруда, сходились бы в одной точке. Однако физические процессы, управляющие волновым движением, полностью обратимы. Любую часть волны можно было бы заставить бежать в противоположном направлении. Несмотря на это, в природе спонтанно возникают лишь расходящиеся волны. Правда, сходящиеся волны можно создать искусственно — например, бросая кольцо горизонтально на поверхность пруда, но достичь такого результата значительно труднее. Почему?

Односторонняя направленность волнового возмущения характерна для всех видов волнового движения и как бы задает направление хода времени во Вселенной («стрела времени»), т. е. строгое различие между прошлым и будущим. Если снять распространение волн в пруду на кинолентку, а затем прокрутить фильм задом наперед, «обман» немедленно обнаружится. В случае электромагнитных волн, например радиоволн, картина упорядоченных волн, сходящихся в одну точку, выглядит вообще абсурдной. Поскольку радиоволны могут распространяться до границ Вселенной, единственный способ создать сходящиеся волны состоит в организации грандиозного космического «заговора», который заставил бы волны, приходящие со всех направлений бесконечного пространства, распространяться строго согласованно.

Вследствие связи характера волнового движения и направления хода времени расходящиеся волны можно рассматривать как движение в будущее обычным образом, а сходящиеся — как результат обращения времени, т. е. как движение в прошлое. Первый тип волн называется запаздывающим, поскольку волны возникают после того, как они испущены, а второй — опережающим, поскольку волны приходят раньше, чем были испущены. Еще со времен Максвелла считалось, что опережающие электромагнитные волны *возможны*, так как теория формально допускает их существование, однако физически они столь же нелепы, как, например, путешествие во времени, и потому их следует отбрасывать.

Большинство ученых с удовольствием отбрасывали опережающие волны как не имеющие отношения к действительности, не задумываясь над тем, почему Вселенная устроена таким обра-

зом, который повсеместно исключает этот тип волн. Иначе поступили Джон Уилер и Ричард Фейнман. В конце второй мировой войны они опубликовали любопытную статью, в которой пытались показать, почему запаздывающие электромагнитные волны являются нормой, а также исследовать вопрос о возможном существовании опережающих волн (волн из будущего). Позднее Уилер занялся ядерной физикой и вместе с Нильсом Бором и Энрико Ферми исследовал процесс деления урана; Фейнман в это время был еще студентом, но вскоре преуспел в разработке квантовой электродинамики, за что был удостоен Нобелевской премии.

Уилер и Фейнман решили исследовать, что происходило бы в мире, где запаздывающие и опережающие волны существуют на равных основаниях. В подобной гипотетической вселенной радиопередатчик посылал бы сигналы как в прошлое, так и в будущее. Можно было предполагать, что подобные обстоятельства обязательно приведут к бессмыслице, однако Уилер и Фейнман путем весьма интересного рассуждения показали, что это не обязательно так.

Проследим за судьбой доставляющих нам столько хлопот опережающих волн, которые из передатчика распространяются в пространстве вспять во времени. В конце концов эти волны где-то попадут в вещество, представляющее собой электрически заряженные частицы (например, в разреженный газ межгалактического пространства). Волны приведут частицы в движение, в результате будут испускаться вторичные волны той же самой частоты, причем одна половина волн будет запаздывающей, а другая — опережающей. Запаздывающие вторичные волны будут распространяться во времени в будущее, создавая в передатчике в момент излучения первичных волн небольшое эхо. Таким образом, мы получим разветвленную систему возмущений и сигналов-эхо, блуждающих во Вселенной в обоих направлениях во времени.

Эхо отдельной заряженной частицы будет непостижимо слабым из-за огромного расстояния, отделяющего частицу от передатчика. Однако если во Вселенной столько частиц, что она фактически непрозрачна для электромагнитного излучения, то суммарная интенсивность всех эхо была бы в точности равна интенсивности первичного сигнала. При более детальном анализе обнаруживается нечто еще более необычное. Если эхо перекрывается с первичной опережающей волной во всем пространстве, то оно оказывается точно в противофазе с ней. Это приводит к полному гашению опережающей волны в результате интерференции. Таким образом все сигналы, посылаемые в прошлое, полностью «гасятся» своим собственным эхом! Уилер и Фейнман отсюда заключили, что в непрозрачной Вселенной существуют только

запаздывающие электромагнитные волны, даже если каждая отдельная заряженная частица будет излучать одинаково как запаздывающие, так и опережающие волны.

Этот поразительный результат теории Уилера—Фейнмана обусловлен тем, что в ней электромагнитное излучение отдельной частицы и всей Вселенной в целом неотделимы друг от друга. Волны, возникшие в одном месте, невозможно отделить от их эха, в том числе из самых отдаленных областей космоса. Более того, благодаря способности опережающих сигналов распространяться в прошлое для возвращения эха нет нужды в миллиардах лет (напомним, что именно с этим была связана проблема создания силы инерции гравитационным «эхом»). Таким образом, каждая скромная радиопередача становится поистине космическим событием.

### Целое и его части

Теория Уилера — Фейнмана следует Маху в том смысле, что стремится установить связь между локальным и глобальным в системе взаимных воздействий, предполагая при этом, что понять свойства отдельной физической системы можно лишь путем надлежащего учета всего остального мира. Хотя эта теория остается умозрительной, существует общее мнение, что отсутствие в природе опережающих волн требует в конечном счете космологического объяснения; «стрела времени», по-видимому, также имеет космологическое происхождение. Таким образом, тот факт, что мы осознаем строгое разграничение прошлого и будущего в свойствах окружающего мира, служит примером связи между большим и малым, между целым и его частями.

Разумеется, возможны и другие взаимосвязи такого же типа; к их числу относится пример магнитного монополя. Как указывалось в гл. 9, Дирак, разрабатывая первоначальную идею магнитного монополя, обнаружил, что значение магнитного заряда каждого монополя связано законами квантовой электродинамики с величиной фундаментального электрического заряда электрона. Одно из неявных предположений теории Дирака состоит в следующем: если даже во всей Вселенной существует только один монополь, то это требует, чтобы электрический заряд электрона имел то значение, которое он в действительности имеет. Таким образом, величина заряда электрона может зависеть от существования магнитного монополя в отдаленном уголке Вселенной.

В последние годы много внимания уделялось роли квантовой физики в установлении связи между частью и целым. Весьма красноречиво говорит об этом в своей книге «Всеобщность и скрытый порядок» Дэвид Бом: «Квантовой теории присущ фундаментальный новый тип нелокальной взаимосвязи, который можно

определить как непричинную связь удаленных друг от друга элементов».

Бом проводит аналогию между упорядоченностью квантовой Вселенной и упорядоченностью голограммы. Голограмма — это способ кодирования информации об изображении. Закодированное изображение можно восстановить с помощью лазерного луча в виде трехмерного объекта. Вся информация об изображении хранится в виде интерференционной картины на фотографической пластинке, но в такой форме она не воспринимается глазом человека. Голографическое изображение получается в результате интерференции двух лазерных пучков и, как правило, очень сложно. Расшифровать его можно тоже лишь с помощью лазера. На обычном фотографическом слайде каждой детали проецируемого изображения соответствует определенный участок, т. е. они взаимно однозначно соответствуют друг другу. Голограмма существенно отличается в этом отношении от слайда. Каждый элемент голографируемого объекта закодирован по всей фотопластинке. При освещении лишь части ее изображение в целом сохраняется, однако его качество несколько ухудшается. Это связано с тем, что информация об изображении в целом содержится даже на части фотопластинки. В этом принципиальное отличие голограммы от обычного слайда, который при неполном освещении воспроизводит лишь часть объекта.

Другие авторы — в частности, Фритель Капра в своей книге «Дао<sup>1</sup> в физике» и Гэри Зукав в книге «Дансинг Ву Ли Мастерс» — подчеркивали наличие близких параллелей между квантовой физикой и восточным мистицизмом, в особенности в таких аспектах, как единство всего существующего и тонкие взаимосвязи между целым и его частями.

Мировоззрение целостности (холизм), подразумеваемое квантовой физикой, в большой степени является следствием нелокальности квантовых состояний (см. гл. 3). Напомним, что в опыте Эйнштейна, Подольского и Розена две частицы, находясь на большом расстоянии друг от друга, остаются тесно связанными между собой. В подобной ситуации неправомерно рассматривать каждую частицу как существующую независимо даже при вполне определенных условиях в отсутствие другой частицы.

В более общем смысле можно считать, что квантовая частица обладает вполне определенным признаком, например положением или состоянием движения, только при определенной экспериментальной ситуации, когда прибор специально предназначен для измерения соответствующего признака или свойства. Так, говорить о том, что частица находится в данном месте, имеет

<sup>1</sup> «Дао» означает свойственную восточной философии таинственность и магию, проявления которой автор усматривает в современной физике. — *Прим. персв.*

9 Дэвис П.

смысл только в том случае, если она является частью сложной системы, предназначенной для измерения ее положения. В отсутствие подобной измерительной установки все разговоры о положении частицы бессмысленны. Следовательно, мы можем определить положение квантовой частицы только в рамках макроскопической измерительной системы, которая сама содержит бесчисленное количество квантовых частиц. Положение частицы становится, таким образом, в действительности коллективным, или целостным (холлистическим), понятием.

Между реальностью микромира и обычным макромиром существует весьма тонкая связь. В конечном счете мы не можем отделить квантовую реальность от структуры всей Вселенной и состояние отдельной частицы имеет смысл, только когда она рассматривается в рамках единого целого. Микро- и макромиры переплетены друг с другом и их нельзя разделить.

Мысль о том, что во Вселенной существует всеобъемлющий и непричинный порядок, возникла отнюдь не с появлением современной физики. Например, астрология представляет собой попытку распознать космический «регламент», согласно которому земные дела людей находят отражение в расположении небесных тел. Психоаналитик Карл Юнг и физик Вольфганг Паули предложили принцип непричинной связи, который они назвали синхронизмом. Они обобщили факты, свидетельствующие о наличии некоего всеобщего порядка, согласно которому события внешне не зависимые оказываются, тем не менее, взаимосвязанными разумным образом. К событиям подобного рода относятся, например, официально зарегистрированные случаи необычайных совпадений, выходящих далеко за пределы случайности. Все эти идеи в популярной форме изложены Артуром Кестлером в книге «Причины совпадений».

Эти идеи несут отпечаток некоей парадоксальности, напоминая о философии дзен-буддизма и «странных петлях», о которых говорится в книге Дугласа Хофштадтера «Гёдель, Эшер, Бах». Целое содержит части, которые в свою очередь составляют целое. Прежде чем мы сможем приписать конкретную реальность атомам, составляющим Вселенную, нам необходима сама Вселенная в целом! Что же «первично» — атомы или Вселенная? Ни то, ни другое. Большое и малое, глобальное и локальное, космос и атом — все это взаимосвязанные и неразделимые стороны объективной реальности. Одно не существует без другого. Старая идея редуccionистов о том, что Вселенная — это просто сумма своих частей, полностью отвергнута современной физикой. Вселенная действительно обладает единством, причем гораздо более глубоким, чем простое выражение однородности Вселенной. Это единство подразумевает, что, не располагая всем, нельзя вообще ничего иметь.

## Существует ли „космический план“

---

### Рациональная Вселенная

Как-то Стивен Вайнберг написал: «Чем понятнее кажется нам Вселенная, тем очевидней бесцельность ее существования». Вайнберг — один из ведущих физиков-теоретиков в мире, сделавший, вероятно, более чем кто-либо другой из физиков его поколения для объединения различных разделов физики. Один из авторов теории объединения электромагнитных и слабых взаимодействий, Вайнберг способен чрезвычайно квалифицированно оценить состояние дел в значительной части современной физики и космологии и сделать исходя из этого вполне обоснованные выводы. Его замечание по поводу Вселенной разделяют многие современные ученые, которые на основе своих исследований приходят к выводу об отсутствии какой-либо видимой цели существования Вселенной, что следует, таким образом, рассматривать как грандиозное, но совершенно случайное событие.

Странно, однако, что другие ученые, опосываясь на тех же принципах и экспериментальных данных, приходят к совершенно иным заключениям. Некоторые, подобно Эрвину Шрёдингеру, испытывают замешательство: «Я не знаю, откуда я пришел, куда иду и даже кто я такой». Эти ученые понимают, что природа слишком неуловима и сложна, и мы можем лишь вечно скользить поверх реальности, простирающейся над безграничной бездной истины. Мы можем надеяться лишь почувствовать проявление некоторых принципов, управляющих космосом, и изумиться их красоте. Наш кругозор слишком ограничен, чтобы проникнуть в суть столь глубоких проблем, как смысл и цель существования Вселенной.

Однако кое-кто из ученых придерживается более смелых и оптимистичных взглядов. Они также готовы признать, что наши знания о природе ограничены и не вполне определены, но твердо верят, что в конечном итоге нам удастся открыть действительно фундаментальные законы, управляющие Вселенной. Джон

Уилер писал: «Однажды дверь, конечно, откроется и мы увидим сверкающий механизм нашего мира во всей его простоте и совершенстве».

Встречаются даже такие ученые, которые готовы предположить, что этот «сверкающий механизм» уже сейчас в наших руках. Вступая на пост руководителя люкасовской кафедры Кембриджского университета, которую некогда занимал Ньютон, Стивен Хокинг прочитал лекцию под названием: «Виден ли конец теоретической физики?»<sup>1</sup>. В этой лекции Хокинг утверждает, что впервые за все время развития науки супергравитация дает возможность построить единую теорию природы, в которой все физические объекты и процессы описываются на основе одного математического принципа. Создание теории супергравитации явилось бы кульминацией развития физической науки. Такую теорию можно было бы считать не просто еще одним приближением на бесконечном пути к истине, а самой истиной. Мы могли бы быть убеждены в истинности этого самого последнего закона природы, как сегодня убеждены в правильности таблицы умножения.

Мало кто из физиков готов зайти столь далеко, но многие находят под глубоким впечатлением замечательной гармонии, порядка и единства природы, которые открыли последние достижения науки. Сильное впечатление производит взаимосвязь законов природы друг с другом, вынуждающая поверить, что за всем этим что-то есть. Фред Хойл выразительно заметил: «Вселенная — это вызов всем нам».

Что приводит ученых к столь сильным выводам? В предшествующей главе были представлены доказательства всеобщего единства природы. Особенно убедительные свидетельства дает космология, само существование которой обусловлено возможностью говорить о «Вселенной» как о единой системе.

Однако экспериментальные данные говорят о большем. Каждое продвижение в фундаментальной физике, по-видимому, открывает еще одну сторону *порядка*. Сам успех научного метода определяется тем, что физическим миром управляют рациональные принципы, которые, следовательно, можно распознавать, разумно проводя исследования. Логически Вселенная совершенно «не обязана» вести себя подобным образом. Можно представить себе космос, в котором царит хаос. Тогда поведение вещества и энергии вместо упорядоченного и организованного было бы произвольным и случайным. Не существовали бы устойчивые структуры — такие, как атомы, люди, звезды. Однако реальный мир не таков — он упорядочен и сложен. Разве этот сам по себе удивительный факт не заслуживает восхищения?

<sup>1</sup> Перевод этой лекции опубликован в журнале «Природа», № 5, 1982. — *Прим. перев.*



Почему же тогда некоторые ученые, как и Вайнберг, приходят к выводу, что мир бесцелен, несмотря на всеобщий порядок, который демонстрируют законы природы. Полагаю, что отчасти это обусловлено неумением увидеть за деревьями лес. Профессиональный ученый настолько поглощен изучением законов природы, что порой забывает, сколь замечательно само их существование. Поскольку наука основана на существовании рациональных законов, ученый редко задумывается о том, почему эти законы существуют. Подобно тому как любитель кроссвордов заранее уверен в существовании ответов на все вопросы, ученый редко сомневается в наличии рациональных ответов на поставленные им вопросы.

Подобный дух рационализма пронизывает все западное индустриальное общество. Даже люди, далекие от науки, без особых размышлений принимают на веру упорядоченность Вселенной. Они знают, что Солнце каждое утро восходит «по расписанию», что камень неизменно падает вниз, а не вверх, а все механизмы вокруг них будут работать как положено, пока не сломаются. Свойственная физическому миру рациональность, взаимозависимость и упорядоченность считаются само собой разумеющимися. Это настолько вошло в повседневную жизнь, что редко вызывает хотя бы слабое удивление.

## Гармония природы

Глубокое впечатление на физиков производит не только единство и упорядоченность природы, но и ее неожиданная гармония и согласованность. Традиционно физика делится на довольно самостоятельные разделы: механика, оптика, электромагнетизм, гравитация, термодинамика, атомная и ядерная физика, физика твердого тела и т. д. Это весьма искусственное деление скрывает, с какой четкостью эти разделы согласуются друг с другом. Красивый пример, близкий к области моих научных интересов, связан со вторым законом термодинамики. Этот закон был сформулирован в середине XIX в. для довольно ограниченного класса процессов, происходящих при работе тепловых двигателей. Однако вскоре стало очевидно, что применимость этого закона значительно шире, и сейчас он рассматривается как наиболее общий закон, который управляет всеми процессами в природе. Второй закон термодинамики упорядочивает обмен веществом и энергией, происходящий между физическими системами, в частности, строго запрещает многократно использовать для работы (например, для приведения в действие двигателя) одно и то же количество энергии.

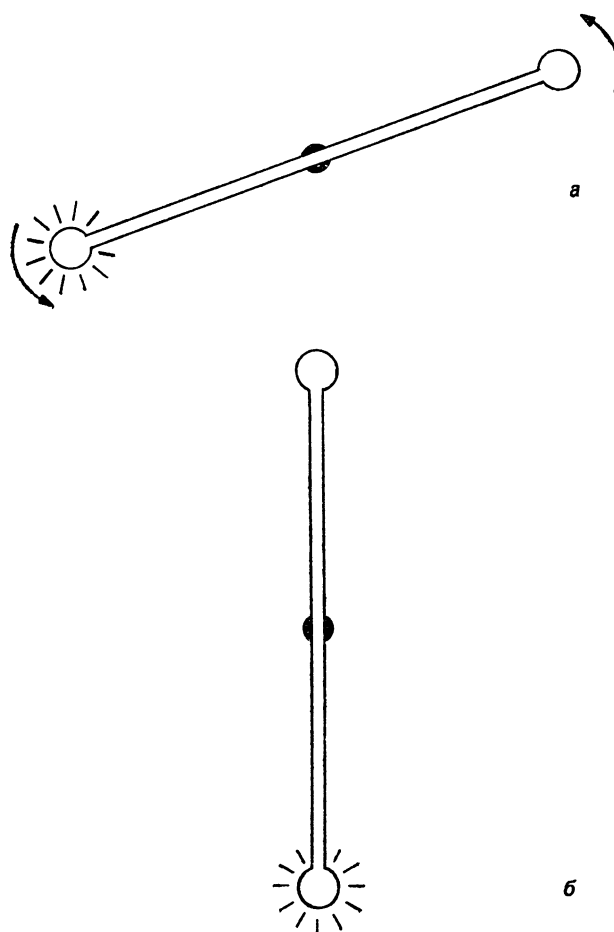
Коротко говоря, второй закон термодинамики утверждает,

что из беспорядка не может самопроизвольно возникнуть порядок. Точнее, этот закон как бы распоряжается тем «счетом» природы, величина которого измеряется энтропией — мерой беспорядка в физической системе. Когда речь идет о тепловых двигателях, энтропия характеризует наличие полезной энергии. В любом физическом процессе часть энергии ускользает из-под нашего контроля — рассеивается в окружающую среду. При этом упорядоченная энергия становится неупорядоченной и энтропия растет. Второй закон термодинамики запрещает уменьшение энтропии замкнутой системы. Даже самый эффективный двигатель не может вернуть теплоту, выделившуюся вследствие трения.

Можно было бы предположить, что среди столь разнообразных и сложных процессов природы (множество форм энергии и вещества, а также видов их активности) обнаружится хотя бы один случай нарушения закона. Однако этого не происходит. Какие бы новые виды вещества и взаимодействий ни обнаруживались, они неизменно подчиняются второму закону термодинамики.

Рассмотрим в качестве примера гравитацию. Эта область науки на первый взгляд не имеет прямого отношения к термодинамике. Тем не менее интересный мысленный эксперимент, предложенный Германом Бонди, показывает, что это не так. На рис. 29 изображен (я несколько видоизменил схему установки) тонкий стержень, изготовленный из жесткого оптического волокна. На каждом конце коромысла укреплены сферы, содержащие внутри по одному соответствующим образом подобранному атому; внешняя поверхность стержня посеребрена и непрозрачна для света. Пусть первоначально возбужден атом в левой сфере. При этом он обладает большей энергией, чем такой же атом в правой сфере, а следовательно, и больше весит. Гравитация будет стремиться повернуть стержень так, что левая сфера пойдет вниз, а правая — вверх. Энергию этого движения можно использовать для запуска динамомшины, питающей двигатель. В конце концов стержень достигает предельного наклона, в наилучшем случае он займет вертикальное положение, причем возбужденный атом окажется внизу (рис. 29, б). В этот момент двигатель останавливается.

До сих пор не произошло ничего особенно примечательного. Однако в этот момент мы вспоминаем, что возбужденные атомы обычно неустойчивы и в конечном счете переходят в невозбужденное состояние, испуская при этом фотоны. Когда это произойдет с возбужденным атомом в нижней сфере, по оптическому волокну снизу вверх побежит световой импульс. Попав внутрь верхней сферы, он возбудит находящийся там атом, сделав его тяжелее атома в нижней сфере. Тогда «голова» стержня перевесит и будет спускаться вниз, пока возбужденный атом вновь не ока-



**Рис. 29.** Новый проект вечного двигателя. Стержень из оптического волокна (световод) закреплен на оси вращения; на каждом из концов стержня находится шарик, внутри которого заключен атом. *а.* Если возбужден атом слева, то его масса окажется больше и стержень начнет вращаться. Энергию движения в принципе можно использовать. *б.* В конце концов стержень остановится в вертикальном положении, причем возбужденный (т. е. более массивный) атом окажется внизу. Теперь атом может перейти в основное состояние, испустив фотон, который, двигаясь по световоду, приведет в возбужденное состояние атом в верхнем шарике. Это вызовет нарушение равновесия и, следовательно, новое вращение стержня, что опять позволит извлечь энергию. Если пренебречь влиянием гравитации на течение времени, то такое устройство, очевидно, противоречит законам термодинамики, т. е. представляет собой неограниченный источник полезной энергии.

жется вниз, а невозбужденный — наверху. В ходе этого процесса удастся извлечь еще некоторое количество энергии. Затем цикл повторится — и так *до бесконечности*.

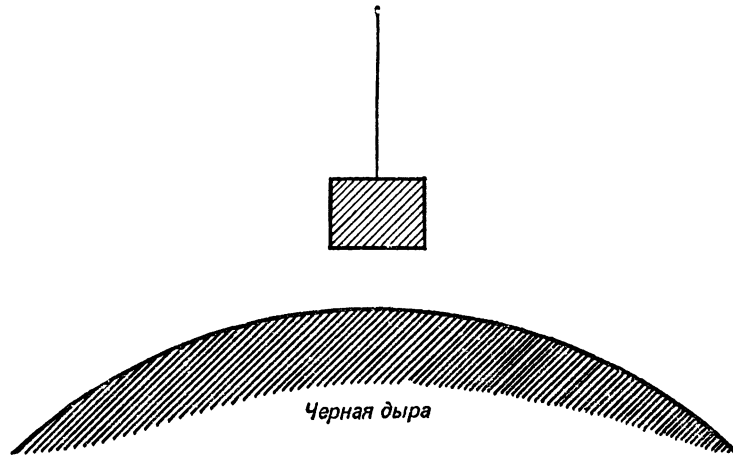
Несмотря на то что силы в этом опыте ничтожны по величине, а энергетический выход вряд ли ощутим, в принципе такое устройство способно «бесплатно» создавать неограниченные количества энергии, если мы готовы ждать довольно долго или располагаем достаточным числом таких устройств. Это своего рода современный вариант вечного двигателя (*perpetuum mobile*), над созданием которого упорно трудились средневековые изобретатели. Однако описанное устройство противоречит второму закону термодинамики, отрицающему возможность существования вечного двигателя. Но в чем наше упущение?

Тщательный анализ показывает, что работа описанного устройства основана на некоем неявном предположении. Оно заключается в том, что при переходе из верхнего положения в нижнее в возбужденном атоме не происходит изменений. Но это предположение не верно: мы упустили из виду одно из проявлений гравитации. Как указывалось в гл. 2, гравитация замедляет течение времени, а возбуждение атома подобно колебаниям, частота которых при замедлении времени также уменьшается. Это в свою очередь означает, что энергия возбуждения понижается и эту потерю энергии нельзя использовать для питания двигателя. Следовательно, фотон попадает в верхнюю сферу с меньшей энергией, чем ранее, и либо вообще не сможет возбудить атом, либо возбудит лишь более низкий уровень. После нескольких циклов энергия возбуждения станет пренебрежимо малой, и устройство прекратит свою работу. Второй закон термодинамики вновь восторжествует.

Обсуждая этот интересный пример, Бонди отметил, что замедление течения времени в гравитационном поле — один из основных фактов, на которых базируется общая теория относительности Эйнштейна. Можно показать, что этим обусловлен хорошо известный факт (установленный еще Галилеем), что все свободно падающие тела испытывают одинаковое ускорение. Если бы мы не знали этих свойств гравитации, то могли бы их вывести из второго закона термодинамики.

Как говорилось в гл. 3, формальная аналогия между гравитацией и квантовой механикой позволила Бору спасти принцип неопределенности Гейзенберга от нападков Эйнштейна. Еще один прекрасный пример взаимосвязи законов физики!

Около пятнадцати лет назад физики решили, что, они, наконец, обнаружили необычную физическую систему, которая не подчиняется второму закону термодинамики. Такой системой была черная дыра.



**Рис. 30.** Ящик, заполненный тепловым излучением, медленно опускается к поверхности черной дыры; вблизи нее ящик открывается, и тепловое излучение попадает в черную дыру. Возникает парадокс, связанный со вторым началом термодинамики: черная дыра мгновенно поглощает энтропию теплового излучения, тогда как его энергия выделяется за счет работы, совершаемой при опускании ящика.

Первое систематическое исследование термодинамических свойств черных дыр провел (по совету Роберта Героха из Чикагского университета) в 70-е годы Якоб Бекенштейн (работающий ныне в Университете Бен-Гуриона в Негёве, Израиль), в то время студент Принстонского университета. Бекенштейн придумал «мысленный эксперимент»: ящик, заполненный тепловым излучением, медленно опускается на канате к поверхности черной дыры (называемой обычно горизонтом). Непосредственно над поверхностью ящик раскрывается, его содержимое приносится в жертву черной дыре, а ящик убирается на безопасное расстояние (рис. 30).

Очевидно, что невозможная потеря теплоты в черной дыре способствует понижению энтропии вокруг нее, и потому Бекенштейн предположил, что черная дыра должна быть носителем энтропии, которая возрастает за счет поглощения теплоты. Таким образом, удастся спасти всеобщий второй закон термодинамики. Заметив, что любая поглощенная энергия приводит к увеличению размеров черной дыры, Бекенштейн выдвинул идею, что площадь ее горизонта (примерно равная площади поверхности) является мерой энтропии черной дыры.

Эти умоглядные рассуждения были поставлены на твердую основу Стивеном Хокингом из Кембриджского университета, который в 1974 г. сообщил об эффектном результате, получен-

ном им с помощью нового метода математического анализа. Квантовую теорию, используемую обычно для описания атомов и молекул, Хокинг применил к новому объекту — черной дыре — и получил первый из длинного ряда сюрпризов. Он обнаружил, что черные дыры совсем не черные, а окружены ореолом теплового излучения. Являясь следствием атомной теории, излучение Хокинга существует только для микроскопических черных дыр, размеры которых сравнимы с размерами ядер. Однако благодаря этому излучению у каждой черной дыры возникает новый вид энтропии, что подтверждает первоначальную догадку Бекенштейна о ее связи с площадью поверхности черной дыры. Энергия может попадать в черную дыру извне, а спустя время, необходимое для вытекания излучения Хокинга, вновь вернуться в окружающее пространство. Во всех подобных процессах обмена полная энтропия, складывающаяся из обычной энтропии и площади черной дыры, не должна никогда уменьшаться.

Насколько точен обобщенный второй закон термодинамики? В простых процессах обмена энергией энтропия черной дыры, несомненно, восполняет недостачу, вызванную потерей обычной энтропии в недрах черной дыры. Однако повторение мысленного эксперимента с подвешенным ящиком вызывает затруднение. Дело в том, что по мере приближения ящика к горизонту черной дыры, эффективная энергия его содержимого уменьшается вследствие действия гравитации черной дыры. В этом можно убедиться, вычислив работу, совершаемую силой тяжести над содержимым ящика при его опускании. Гравитационное поле черной дыры столь велико, что по мере приближения к горизонту полная энергия содержимого ящика (с учетом массы покоя  $m$ , эквивалентной энергии  $E = mc^2$ ) стремится к нулю. Отсюда следует, что если открыть дверцу ящика и сбросить его содержимое в черную дыру, то переданная энергия окажется значительно меньше первоначально заключенной в ящике.

Нетрудно оценить важность этого «недостатка» энергии. Размеры черной дыры определяются ее полной энергией: добавление энергии пропорционально увеличивает ее размеры. Энтропия черной дыры также зависит от ее размеров, точнее, от площади горизонта; тем самым добавление энергии приводит к росту энтропии черной дыры. Трудность в описанном мысленном опыте заключается в том, что «недостаток» энергии уменьшает рост энтропии черной дыры. Бекенштейн установил, что если открыть ящик очень близко от горизонта, то эффективная тепловая энергия настолько истощится, что ее не хватит для «оплаты» энтропии черной дыры, т. е. для компенсации избытка энтропии, возникшего в черной дыре вследствие попадания в нее теплового излучения. Это приводит к нарушению второго закона термодинамики и открывает путь к построению вечного двигателя.

Проведя исчерпывающий анализ проблемы в целом, Уильям Унру из университета в Британской Колумбии и Роберт Уолд из Чикагского университета смогли разрешить эту трудность. Их соображения основаны на том, что в мысленном эксперименте совершенно выпущены из виду квантовые эффекты черных дыр, существенно влияющие на содержимое ящика. Вследствие эффекта Хокинга черная дыра издала представляется окутанной тепловым излучением. Хотя температура большой черной дыры пренебрежимо мала, *эффективная* температура, воспринимаемая ящиком, неуклонно возрастает по мере его приближения к горизонту.

Рост эффективной температуры можно представить себе следующим образом. Гравитационное поле черной дыры приводит к тому, что время течет все медленнее и медленнее по мере приближения к черной дыре; на уровне горизонта время полностью останавливается — разумеется, лишь по отношению к удаленным часам. Тепловое излучение, представляющее собой волны, содержит бесчисленное количество естественных «часов» — колебаний, которые по мере приближения к черной дыре вынуждены «тикагать» в замедляющемся времени более учащенно, чтобы не отставать от часов, расположенных выше над горизонтом, и таким образом поддерживать тепловое равновесие. Более высокие частоты подразумевают более высокие температуры, так что тепловое равновесие в гравитационном поле предполагает наличие градиента температуры. Поскольку излучение Хокинга имеет как раз такой равновесный характер, можно ожидать, что оно будет более горячим вблизи черной дыры.

Вооружившись этой новой идеей, Унру и Уолд вскоре обнаружили, что поведение подвешенного ящика коренным образом меняется. Чтобы удержать собственное тепловое излучение, ящик должен иметь хорошо отражающие стенки. Однако это свойство, позволяющее ящику удерживать собственное излучение, в то же время экранирует его от излучения Хокинга. Следовательно, по мере опускания ящик как бы вырезает полость в окутывающей черную дыру облаке теплового излучения, так что «вытесненное» излучение выталкивает ящик вверх, подобно тому как вытесненная вода поддерживает судно на плаву. Архимед, наверное, перевернулся бы в гробу, узнав, что здесь действует его знаменитый принцип.

Учет выталкивающей, или архимедовой силы, действие которой испытывает ящик, изменяет всю картину взаимоотношений между энергией и энтропией, поскольку эффективный вес ящика по мере его снижения уменьшается, а следовательно, уменьшается и работа, производимая при выпуске содержимого ящика в черную дыру. Отсюда следует, что при открывании ящика «недостаток» энергии будет не столь велик, как предпола-

галось ранее. Более того, когда ящик опустится достаточно низко, температура окружающего его облака может полностью нейтрализовать вес содержимого ящика. Опускание ящика ниже точки нейтрализации не дает выигрыша в энергии. Если открыть ящик в точке нейтрализации и принести его содержимое «в жертву» черной дыре, то добавка к энергии черной дыры окажется минимальной. Унру и Уолд показали, что учет этих эффектов «спасает» второй закон термодинамики — по существу, благодаря им дефицит энергии содержимого ящика по мере снижения ограничивается сверху.

Очень интересная возможность возникает, когда ящик опускается ниже точки нейтрализации. Возрастающая выталкивающая сила достигает в конце концов величины, при которой она полностью уравнивает вес ящика; тогда можно перерезать канат и ящик будет сам по себе плавать в окружающей черную дыру тепловой ванне.

Еще более поразительная возможность открывается, если пустой ящик опустить до точки нейтрализации и затем открыть. Ящик мгновенно заполнится высокотемпературным излучением из теплового облака, окружающего черную дыру; эту тепловую энергию можно извлечь и использовать. Таким образом, мы буквально «черпали» бы энергию из черной дыры (рис. 31).

Описанное явление выглядело бы совершенно парадоксальным, если бы не понятие «отрицательной квантовой энергии», поскольку энергия должна браться из самой черной дыры; однако ничто — в том числе и энергия — не может по определению покидать черную дыру. Можно показать, что заполнившая ящик энергия заимствована не непосредственно у черной дыры, а возникает за счет «впрыскивания» отрицательной энергии. Приток отрицательной энергии заставляет черную дыру немного уменьшиться в размерах, компенсируя тем самым энергию внутри ящика. Разумеется, запас «топлива» черной дыры может вскоре восполниться за счет соответствующего количества ненужной массы. Таким образом, в принципе мы получаем устройство, способное перерабатывать любое ненужное вещество в тепловую энергию.

Никто, конечно, не думает, что открытие Унру — Уолда решит мировые энергетические проблемы или что оно хоть отдаленно соответствует действительности. Весь мысленный эксперимент с ящиком на канате — не более чем фантазия, предназначенная для проверки справедливости физических законов. Но это не лишает эксперимент его значения. Если бы основополагающие принципы термодинамики, квантовой теории и гравитации были несовместимы (даже в воображаемой ситуации), нам пришлось бы отказаться по крайней мере от одного из них. Тот факт, что даже в столь необычных условиях обеспечивается согласованность



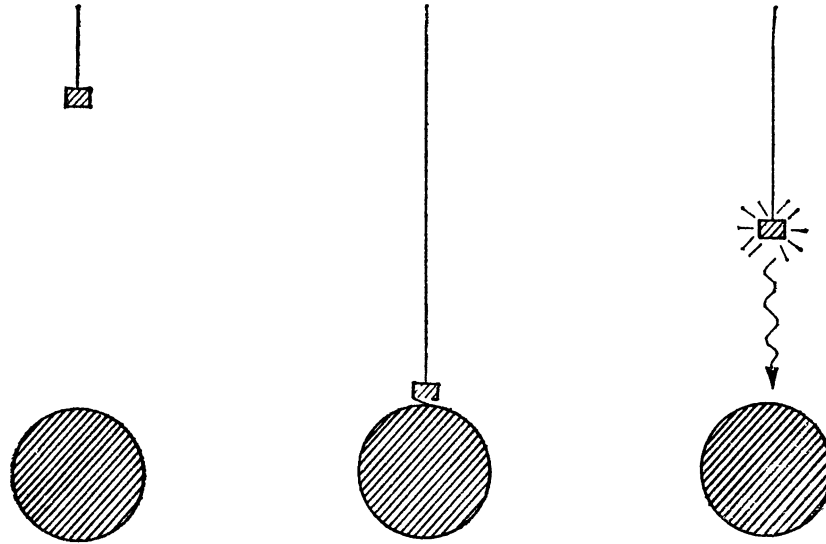


Рис. 31. Добыча энергии из черной дыры. Пустой ящик опускается к поверхности черной дыры. Затем он открывается и заполняется интенсивным тепловым излучением черной дыры. После этого ящик удаляется, а тепловая энергия используется. Добытая энергия оплачивается потоком отрицательной энергии, излучаемой отражающей нижней поверхностью ящика в черную дыру. При этом энергия черной дыры (а тем самым ее масса и размеры) уменьшается. Таким образом осуществляется эффективная добыча энергии, содержащейся в черной дыре в виде ее массы.

этих принципов, дает нам обоснованную уверенность в универсальности фундаментальных законов.

Анализ этого мысленного эксперимента показывает, что в случае черной дыры сводятся воедино три весьма разных раздела физики: гравитация, вследствие которой появляется сама черная дыра; квантовая механика, благодаря которой черная дыра начинает «светиться» и испускать тепловое излучение и, наконец, термодинамика, регулирующая обмен энергией между черной дырой и ее окружением. На первый взгляд кажется, что здесь имеет место конфликт (в частности, нарушается второй закон термодинамики). В действительности оказывается, что это не так, но лишь при учете квантовой физики. Эти три раздела физики оказывают друг другу взаимную поддержку даже в случае столь необычных систем, как черные дыры. Более того, взаимная согласованность этих трех столь отличающихся между собой разделов физики вскрывается лишь в результате тщательного анализа весьма необычных эффектов (таких, как парение ящика над черной дырой) и с первого взгляда совсем не очевидна.

Черные дыры демонстрируют яркий пример того, насколько тесно и гармонично связаны между собой разделы физики (иногда по совсем неуловимым причинам). Если бы мы не знали квантовой механики и имели в своем распоряжении лишь законы гравитации и черные дыры, нам пришлось прийти к заключению, что что-то не в порядке. Возможно, мы пришли бы к открытию излучения Хокинга, а через него — к выводу законов квантовой физики.

### Гений природы

Существует легенда, что Ньютон изготовил сложный часовой механизм, моделирующий Солнечную систему. Когда кто-то заметил, что для этого надо обладать недюжинным умом, Ньютон будто бы ответил, что Господу богу пришлось быть гораздо более мудрым, чтобы сконструировать реальную вещь. Разве может кого-либо оставить равнодушным изобретательность самой природы? Природа поразительно искусна в своих деяниях. Классическим примером ее изобретательности служит вся история суперсилы. Обратимся к роли калибровочных симметрий и возникновению взаимодействий из требования поддержания симметрий в природе при произвольных калибровочных преобразованиях. Будь мать-природа менее изобретательной, эти силы пришлось бы вводить искусственно.

Рассмотрим с этой точки зрения объединение взаимодействий. Все взаимодействия, необходимые для создания сложного и разнообразного окружающего нас мира, можно получить из одной суперсилы — это ли не яркое проявление изобретательности и изящества природы! Ведь природа могла избрать куда более грубый способ даровать нам четыре самостоятельных взаимодействия. Как будто бы всего этого недостаточно! Вся структура калибровочных полей представляет собой именно то, что с математической точки зрения необходимо для описания мира на основе чистой геометрии с одиннадцатью измерениями, что само по себе является уникальной структурой с неожиданными и весьма специфическими математическими свойствами. Все это производит впечатление чуда!

Столь же удивительно не только все созданное природой, но и то, что «упущено» ею. Четырех взаимодействий достаточно для построения мира средней сложности. Например, без гравитации не только не было бы галактик, звезд и планет, но и Вселенная не могла бы возникнуть — ведь сами понятия расширяющейся Вселенной и Большого взрыва, от которого берет начало пространство-время, основаны на гравитации.

Без электромагнитных взаимодействий не было бы ни атомов, ни химии или биологии, а также солнечного тепла и света. Без сильных ядерных взаимодействий не существовали бы ядра,

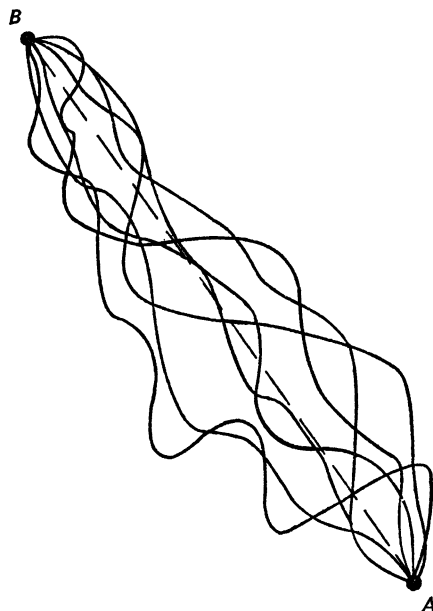
а следовательно — атомы и молекулы, химия и биология, а звезды и Солнце не могли бы генерировать за счет ядерной энергии теплоту и свет. Даже слабые ядерные взаимодействия играют определенную роль в образовании Вселенной. Без них невозможны были бы ядерные реакции в Солнце и звездах, по-видимому, не происходили бы вспышки сверхновых и необходимые для жизни тяжелые элементы не могли бы распространиться во Вселенной. Жизнь вполне могла бы и не возникнуть. Если вспомнить, что все эти четыре совершенно различных взаимодействия, каждое из которых по-своему необходимо для возникновения сложных структур, делающих Вселенную столь активной и интересной, порождаются единственной простой суперсилой, то изобретательность природы поистине поражает воображение.

Не менее значительно и то, что, хотя все четыре взаимодействия необходимы для возникновения сложного и интересного мира, природа почему-то не решилась действовать наверняка, подкинув «для ровного счета» еще несколько сил. Такая поразительная экономия — ровно столько, сколько надо и ни на йоту больше — дала повод британскому специалисту в области математической физики Юану Сквайрсу поставить вопрос: «Живем ли мы в самом простом из возможных интересных миров?» Сквайрс пришел к выводу, что Вселенную, в которой имеется в том или ином виде химия (а следовательно, и жизнь), нельзя построить на основе взаимодействий и полей с более простыми свойствами, нежели у тех, которые известны нам.

Физика полна примеров подобных тонких и остроумных совпадений, описаниями которых можно заполнить не один том. На мой взгляд, достаточно лишь одного последнего примера, чтобы окончательно убедить читателя в редкостных способностях природы. Этот пример служит также одновременно иллюстрацией цельности, порядка и гармонии.

Для представления об упорядоченном мире существенна степень его постоянства. Если бы весь мир произвольно изменялся от случая к случаю, в нем царил бы хаос. Мы хотим быть уверены, что наш автомобиль останется на том месте, где его припарковали, мебель не сдвинется со своих мест, Земля не улетит в межзвездное пространство и т. д. Свойство вещества «оставаться на месте» неотделимо от нашего жизненного опыта, и мы редко сомневаемся в нем. Мир стал бы ужасающим, если бы тела сами по себе срывались со своих мест без всякой видимой причины.

Это рассуждение можно несколько обобщить, поскольку тело может покоиться только в одной системе отсчета. В более общем случае в отсутствие приложенной силы тело будет двигаться прямолинейно без ускорения. Этот элементарный факт воплощен в законах движения Ньютона. По словам самого Ньютона, «описание прямых линий... на которых основана геометрия, принадле-



**Рис. 32.** Как частица «узнает» какой именно путь из точки *A* в точку *B* будет прямолинейным? Квантовая теория отвечает на этот вопрос. Частица «обследует» одновременно все возможные пути между точками *A* и *B*. Вследствие волновой природы квантовых частиц во всем пространстве — кроме области вблизи прямолинейной траектории (обозначенной пунктиром) — волны гасят друг друга в результате интерференции. Следовательно, в соответствии с вероятностной интерпретацией наиболее вероятными будут пути, проходящие вблизи прямолинейной траектории. Сколько-нибудь заметное отклонение от прямолинейной (классической) траектории можно заметить лишь в атомных масштабах.

жит механике». Здесь мы хотели бы поставить вопрос: каким образом реализуется это чудо, столь важное для упорядочения мира? Откуда телу известно, по какой траектории ему следует двигаться? Каким образом возникает эта прямая линия?

Верим мы в это или нет, но причина обусловлена квантовыми эффектами, в частности волновой природой микрочастиц. Мы уже касались этого вопроса в гл. 4. В оптике давно было известно, что свет распространяется прямолинейно. В действительности существует тесное соответствие между движением материального тела и распространением света даже в гораздо более сложных условиях — при наличии сил и искривлении траекторий. По существу эти движения подчиняются так называемому «принципу лениности», утверждающему, что материальные тела и световые лучи следуют вдоль путей, которым соответствует минимальная активность. (Уровню активности можно дать достаточно строгое математическое определение, однако здесь нет необходимости зани-

маться этим). В определенном смысле световой луч и материальное тело следуют наиболее легким из всех возможных путей. Напомним, что кратчайшему расстоянию между двумя точками соответствует отрезок прямой. Однако свет представляет собой волну, тогда как материальное тело — это отдельная частица или совокупность частиц.

Подобная общность принципов, лежащая в основе движения волн и частиц, наводит на мысль о том, что движению в природе присуща глубокая гармония. Однако способ, которым в природе реализуется прямолинейное движение материального тела, изучимельнее прост. У микрочастицы вообще нет, строго говоря, траектории, тем более прямолинейной. Напротив, движение микрочастицы хаотично и расплывчато. Каким образом можно прийти к упорядоченному прямолинейному движению макроскопического тела, если движение составляющих его атомов имеет случайный квантовый характер? Похоже, что в этом случае природа стремится обратить порок в добродетель. Как объяснялось в гл. 2, квантовая частица попадает из точки *A* в точку *B*, как бы пробуя одновременно все возможные пути; здесь уместно напомнить, как в опыте Юнга по интерференции отдельный фотон каким-то образом проходит сразу через две щели. В более общем случае можно считать, что частица, например электрон, пробует все возможные пути, соединяющие точку отправления *A* с точкой прибытия *B* (рис. 32). В соответствии с «принципом равноправия» каждому из путей соответствует один и тот же вклад в полную волну, представляющую электрон и характеризующую вероятность прибытия электрона в определенный пункт назначения.

Именно на этой стадии проявляется столь важная волновая природа электрона. Как уже отмечалось в гл. 2, при наложении волн происходит интерференция. Если волны приходят в фазе, они усиливают друг друга, если в противофазе — гасят. При случайном наложении сразу очень большого числа волн происходит их общее гашение. Именно это осуществляется на всех криволинейных путях электрона. Волны, соответствующие таким траекториям, гасят друг друга в результате интерференции. Единственные траектории, на которых этого не происходит, — те, по которым волны приходят в фазе и, следовательно, не гасят, а усиливают друг друга. Строго говоря, усиление происходит только вдоль прямолинейной траектории и в ограниченной степени на близких траекториях. Поэтому наиболее вероятно, что частица следует по кратчайшему из возможных путей. Вероятность неопределенного блуждания частицы вместо движения по прямолинейному узкому пути зависит от массы частицы. Движение электрона оказывается крайне неустойчивым и плохо определенным, однако более тяжелые частицы движутся более устой-

чиво. В пределе больших тел — например, в случае бильярдного шара — отклонение от прямолинейной траектории будет бесконечно малым. Таким образом, мы вновь приходим к точно определенной прямолинейной траектории в классической механике. Итак, упорядоченное поведение макроскопических тел обязано своим происхождением квантовой физике, которая в конечном счете лежит в основе всех объектов.

### Устройство Вселенной

Обычно реакция физиков на замечательные открытия, подобные описанному выше, бывает смешанной — с одной стороны, восхищение утонченностью и изяществом природы, с другой — некоторое оцепенение: «Я бы никогда не додумался до этого». Если природа столь искусна, что может использовать средства, изумляющие нас своей изощренностью, то не служит ли это убедительным свидетельством разумного построения всей физической Вселенной? Если лучшим умам мира с трудом удастся вскрывать глубинные проявления природы, то как можно думать, что они порождены бессмысленной случайностью, слепым случаем?

И вновь уместна аналогия с отгадыванием кроссворда. Природа дает нам «ключи», часто скрытые, и решение загадок природы оказывается делом довольно тонким. Законы природы не открываются при поверхностном взгляде на мир. Они скрываются за более очевидными явлениями, и их можно обнаружить, лишь «клиннув глубже». Мы никогда не познали бы законов атомной и ядерной физики, если бы не применяли специальных приборов и тщательно не планировали экспериментов. Природа зашифрована для нас подобно кроссворду. Поскольку ответы редко бывают очевидными, подбор ключей к этим шифрам требует недюжинной изобретательности, опыта и вдохновения.

Когда часть ключей уже подобрана, начинает возникать целостная картина. Подобно кроссворду, где слова согласованно и упорядоченно пересекаются друг с другом, законы природы образуют согласованную структуру, и мы начинаем распознавать присущий природе замечательный порядок, о котором упоминалось в этой главе. Мир представляет собой единство различных физических механизмов, и это единство ведет не к беспорядочному переплетению явлений, как могло бы показаться, а к точно организованной гармонии.

Говоря о кроссворде, нам никогда не пришло бы в голову предположить, что слова составляют согласованную взаимопересекающуюся систему совершенно случайно, что хитроумность и изощренность ключей к кроссворду — просто ничего не значащие факты или продукт нашего собственного ума, пытающегося придать смысл бессмысленной информации. Однако мы часто встре-

чаемся в точности с такими же суждениями, когда речь идет об удивительных явлениях природы, несравненно более хитроумных и утонченных, чем любой кроссворд. Если мы не сомневаемся, что порядок, самосогласованность и гармония кроссворда свидетельствуют об изобретательности ума его создателей, то почему подобные сомнения считаются правомерными, когда речь идет о Вселенной? Почему свидетельство наличия «плана» столь убедительно в одном случае, но неубедительно в другом?

В XIX в. существование порядка и гармонии в природе часто использовалось теологами как свидетельство существования сверхъестественного творца. Одним из наиболее ярких выразителей этих взглядов был Уильям Пэли, проводивший аналогию между природными механизмами и *часами*. Пэли рассуждал так. Рассмотрим сложный механизм часов, состоящий из подогнанных друг к другу частей; естественно предположить, что часы сконструированы для определенной цели разумным существом. Сравним часы с многочисленными чрезвычайно утонченными механизмами природы — такими, как порядок в расположении планет Солнечной системы или сложная организация живых существ, — Пэли пришел к выводу, что доказательство существования «разумного планирования» природы еще более убедительно, чем в случае часов.

Несмотря на внешнюю привлекательность, рассуждение Пэли, как и многие последующие попытки вывести наличие плана из рассмотрения явления природы, подверглись жесткой критике философов и ученых. Приведем лишь три из таких контрдоводов, используемых и по сей день: природе навязывают порядок, чтобы придать ей смысл; подобная аргументация не убедительна; существующий в природе порядок — явление чисто случайное, а не результат некоего плана.

Итак, прежде всего навязываем ли мы природе порядок, чтобы придать ей смысл? Дело в том, что человеческий ум чрезвычайно склонен усматривать порядок в хаосе многочисленных данных, и это качество, по-видимому, даровано нам процессом эволюции как знак нашего преимущества над другими видами. Мы непрерывно получаем сложную информацию, которую мозг должен каким-то образом приводить в порядок, чтобы мы могли эффективно функционировать. Хорошим примером того, как человеческий разум обнаруживает порядок даже там, где его нет, могут служить знаменитые созвездия. Наши предки воспринимали хаотическое распределение звезд на небе как упорядоченную картину. Ведь в действительности не существует ни Большой Медведицы, ни Девы, ни Скорпиона — все это лишь случайный набор светящихся точек.

Тем не менее применительно к науке этот аргумент не вполне убедителен. Существуют вполне объективные способы установить

наличие порядка в физической системе. Так, упорядоченность живых организмов, очевидно, не плод нашего воображения. В фундаментальной физике законам природы соответствуют математические выражения, которые зачастую известны математикам задолго до их применения к реальному миру. Математическое описание изобретается не просто для лаконичной формулировки законов природы. Часто совпадение свойств природы с конкретными математическими выражениями оказывается совершенно неожиданным. Структура математического описания *выявляется* по мере анализа физической системы.

Хорошим примером может служить описание взаимодействий природы в одиннадцатимерном пространстве. Математическое «чудо» заключается в том, что законы действия сил могут быть выражены через ранее неясные геометрические свойства многомерного пространства. Разумеется, это вызывает восхищение, однако обнаруженный здесь порядок не был кем-то навязан, а выявился в результате деятельного математического анализа.

Ни один физик никогда всерьез не поверит, что предмет его исследований был попросту грудой неупорядоченных и бессмысленных фактов и что законы физики не знаменуют реального успеха в нашем понимании природы. Было бы нелепо предполагать, что вся наука—это просто измышление ума, имеющее к реальности не больше отношения, чем созвездие Рыбы к реальным рыбам.

Рассмотрим второе возражение — неубедительность аргументации. Иногда говорят, что утверждение о наличии плана в природе основано на софистике спорного объяснения, а проще говоря, на «крепости задним умом».

Рассмотрим, например, отрывок из книги «Жизнь вне Земли» Джеральда Фейнберга и Роберта Шапиро.

Географ, убежденный в предопределенности всего сущего, был бы в конечном счете поражен тем, насколько точно вписывается в свою долину река Миссисипи. Она течет в правильном направлении, имеет в точности необходимые контуры и притоки, обеспечивающие впадение вод центральной части Соединенных Штатов в Мексиканский залив. На всем своем долгом пути река очень удобно подходит ко всем пристаням и проходит под всеми мостами. Географ мог бы попытаться заменить реку Миссисипи, например, рекой Амазонкой. Наложив Амазонку на карту Соединенных Штатов, он сразу заметил бы, что она течет с запада на восток. Здесь это бы не прошло, так как реке пришлось бы течь через горы. Даже повернув Амазонку в «нужном» направлении, географ столкнулся бы с многими трудностями. Новый Орлеан оказался бы затоплен большой дельтой Амазонки, и бесчисленное количество дорог и городов ушло бы под воду. Отсюда географ заключил бы, что для его цели Амазонка не годится, но прекрасно подходит Миссисипи.

Еще более ограничим ситуацию. Пусть у географа нет сведений о других речных системах, но реку Миссисипи он изучил досконально. Он заметил бы также, что любое значительное изменение русла реки привело бы к разрушениям и перемещениям, и сделал бы вывод, что данное русло Миссисипи единственно возможно с точки зрения географической системы. Если существуют другие реки, то их русла должны иметь аналогичную форму.



Подобная критика рассматривается и в статье Ральфа Эстлинга в журнале *New scientist*.

Рассуждения о сверхъестественном и сверхразумном основаны на антропном принципе, утверждающем, что реализуется именно та Вселенная, которая пригодна для человека, и нам следует поразмыслить о тех бесчисленных совпадениях, которые абсолютно необходимы для существования человека и самой жизни. Единственное небольшое отклонение в одном из тысяч важных совпадений резко (возможно, даже полностью) изменило бы Вселенную. Однако абсолютно во всем, начиная от постоянных, определяющих гравитационные, электромагнитные, сильные и слабые ядерные взаимодействия, и вплоть до основных биологических предпосылок мы обнаруживаем, что космос в целом, наше Солнце в частности, и в особенности Земля настолько точно подогнаны к нам, что неизбежно напрашивается вопрос: «А не Бог или кто-то еще с аналогичным именем создал все это, прежде всего имея в виду нас? Это слишком много для совпадения, даже для чуда, чтобы назвать это чистой случайностью».

Авторы приведенных отрывков совершенно справедливо привлекают внимание к тем ловушкам, в которые легко попасть, используя в поисках объяснений апостериорные аргументы; не следует, однако, думать, что подобный подход всегда ошибочен. Нетрудно привести примеры, когда он весьма эффективен — в частности, в повседневной жизни. Пэли, разумеется, был совершенно прав, рассматривая часы как результат определенного проекта. Важно лишь соблюдать осторожность и избегать неразумного использования апостериорных аргументов.

Как определить, в каких случаях апостериорные доводы могут завести нас в тупик при рассмотрении упорядоченности окружающего нас мира? Ключевой критерий состоит в том, чтобы различать две совершенно разные формы порядка. Здесь мы подходим к третьему возражению против наличия «плана», согласно которому любой существующий в природе порядок возникает чисто случайно, а вовсе не запланирован.

Это сильное возражение, и оно, бесспорно, справедливо во многих случаях; именно из-за него аргументы в пользу существования космического плана отвергались теологами. Однако часто это возражение применяют не вполне продуманно, не проводя различия между двумя совершенно разными смыслами понятия «порядок».

В одном смысле слово «порядок» означает *сложную организацию*, которая характерна, в частности, для живых организмов. Рассмотрим, к примеру, глаз человека. Этот хрупкий и сложный механизм, похоже, специально «сконструирован» для того, чтобы обеспечить нам возможность видеть. Расположение хрусталика и сетчатки идеально соответствует законам физической оптики. Миллионы клеток глаза и зрительного нерва в высокой степени специализированы с точки зрения их функций; они взаимодействуют с соседями строго определенным методичным образом.

Случайный набор клеток, не говоря уже о случайном наборе атомов, никогда не смог бы сотворить «чудо» зрения.

Биологи не отрицают невероятно высокого уровня адаптации глаза или любого другого органа. Тем не менее у них не возникает необходимости предполагать, что глаз был заранее «сконструирован» и собран какими-либо сверхъестественными силами. Теория эволюции вполне удовлетворительно объясняет, как возник глаз человека. Изучение ископаемых останков и сравнительная анатомия дают детальную картину поэтапного развития столь сложного органа, как глаз, в течение многих поколений. Случайные генетические изменения — дело слепого случая — порождают произвольный набор возможностей, из которых природа отбирает только то, что дает преимущество организму в его непрерывной борьбе за выживание. Лишь путем перебора чрезвычайно широкого диапазона возможных изменений орган совершенно случайно находит вариант, который способствует его адаптации в условиях окружающей среды.

Таким образом, сложная организация может возникать спонтанно и не нуждается в заранее предписанном плане. Однако для успеха описанной выше процедуры отбора необходимо существование ансамбля, под которым понимается набор большого числа сходных систем. В биологии этот ансамбль составляют миллиарды организмов и миллионы поколений, существовавших на протяжении истории Земли. Огромный фонд сходных генов, которые поставляют многочисленные организмы, дает природе возможность испробовать все возможные варианты, прежде чем случайно не встретится благоприятная мутация. В дальнейшем в результате естественного отбора эта мутация закрепляется в генофонде. Постепенное накопление бесчисленного множества благоприятных малых изменений приводит к медленному прогрессу столь сложных систем, как глаз.

Кроме понятия порядка как сложной организации существует понятие порядка, заключающееся в простоте и симметрии, причем этот порядок может возникать как в пространстве, так и во времени. Хорошим примером пространственного порядка служит кристаллическая решетка. В кристалле атомы удерживают друг друга, образуя правильную структуру простого геометрического вида, обладающую высокой степенью симметрии. В основе кристаллической структуры лежит атомная ячейка определенного типа, отражающегося в симметричной форме, которая характерна для кристалла (например, кристалл поваренной соли обладает кубической формой). Именно атомной симметрией в конечном счете обусловлена правильная форма снежинок. Другим примером пространственного порядка является строение Солнечной системы, в которой планеты почти сферической формы обращаются по почти круговым орбитам вокруг почти сферического Солнца.

В обоих этих примерах мы можем обнаружить, что причины пространственного порядка лежат в симметрии законов физики, управляющих рассматриваемыми системами. Многие физические системы обладают устойчивыми состояниями, которые демонстрируют высокую степень простоты и симметрии. Разумеется, предстоит еще объяснить, каким образом системы приходят в такие состояния. Одна из причин заключается в том, что сложные состояния неустойчивы. Например, состояние атома водорода с наименьшей энергией сферически симметрично, тогда как большинство возбужденных состояний не обладает этим свойством. Аналогично жидкое гравитирующее тело принимает в состоянии равновесия (в отсутствие вращения) форму идеальной сферы. Мы убедились в том, что физические системы стремятся занять положение с минимальной энергией — это универсальный закон природы. Если система первоначально обладает избытком энергии, т. е. находится в возбужденном состоянии, то включаются всевозможные механизмы, стремящиеся освободить ее от этого избытка. Рано или поздно система переходит в состояние с наименьшей энергией, которое, как правило, является простейшим. По этой причине пространственный порядок представляет собой общее свойство нашего мира. Важно, однако, иметь в виду, что этот порядок обусловлен пространственным порядком, присущим законам физики. Если бы, например, сила тяжести оказалась более сложной и зависела не только от расстояния между двумя телами, но и от их взаимной ориентации, планеты двигались бы по гораздо более запутанным орбитам.

Обратимся теперь к временному порядку. Его можно увидеть в регулярном течении многих естественных процессов: тиканье часов, колебаниях атома, смене дня и ночи, зимы и лета. Вновь, как и при пространственном порядке, причины подобной регулярности можно отыскать в законах физики, которые часто допускают простое *периодическое* поведение. Периодическое движение — колебания — представляет собой, вероятно, самый распространенный в физике пример порядка. Волнообразные колебательные движения составляют существо всех квантовых движений; электромагнитные волны переносят теплоту и свет во Вселенной; планеты, звезды и галактики содержат объекты, движущиеся в пространстве по периодическим орбитам.

Кроме упорядоченного движения материальных тел существует и более глубокое проявление временного порядка, заключенное в самой сути законов природы (часто порядок такого рода считают само собой разумеющимся). Тот факт, что в природе вообще существуют законы, обеспечивает определенную последовательность эволюции Вселенной от данного момента времени к последующему. На фундаментальном уровне эта самосогласованность означает просто, что мир продолжает существовать. Более того,

законы не изменяются от одной эпохи к другой (иначе их нельзя было бы назвать законами). Земля сегодня движется по эллиптической орбите вокруг Солнца так же, как и на протяжении миллионов лет.

Пространственный и временной порядки — это не просто случайные особенности мира: оба этих порядка присущи фундаментальным физическим законам. Именно *законы*, а не конкретные физические системы заключают в себе поразительную упорядоченность мира. Эти законы вдвойне замечательны, поскольку допускают *как* порядок, выражающийся в пространственной и временной простоте, *так* и порядок, проявляющийся в сложной организации. Один и тот же набор законов обуславливает и простую форму кристаллов, и возникновение столь сложных систем, как живые организмы. Вполне можно представить и такую Вселенную, в которой законы допускали бы лишь простые типы поведения (например, регулярные движения планет), а чрезвычайно сложные структуры (например, полимеры, не говоря уже о ДНК) там не могли бы существовать. Действительно, кажется совершенно необычным, что столь простые законы современной физики обеспечивают все разнообразие и сложность реального мира. Но дело обстоит именно так.

### Имеет ли существование какой-то смысл?

Интересно поставить вопрос о том, насколько вероятно с точки зрения законов физики существование сложных систем или сколь точно эти законы должны быть согласованы между собой?

В своей знаменитой статье в журнале *Nature* английские астрофизики Бернар Карр и Мартин Рис пришли к выводу, что мир чрезвычайно чувствителен даже к самым малым вариациям законов физики, так что, если бы известный нам конкретный набор законов как-то изменился, Вселенная также изменилась бы до неузнаваемости.

Карр и Рис обнаружили, что существование сложных систем, по-видимому, критически зависит от численных значений, которые природа присвоила так называемым фундаментальным постоянным; именно эти значения определяют масштаб физических явлений. К числу фундаментальных постоянных относятся скорость света, массы субатомных частиц и несколько «констант связи» — таких, как элементарный электрический заряд, — от которых зависит величина различных взаимодействий с веществом. Фактические численные значения этих постоянных определяют основные особенности мира в целом — размеры атомов, ядер, планет и звезд, плотность вещества во Вселенной, время жизни звезд и даже размер живых существ.

Большинство встречающихся в природе сложных систем возникают в результате противоборства или баланса различных взаимодействий. Звезды, например, кажутся внешне спокойными; однако они представляют собой «поле битвы» четырех взаимодействий. Гравитация стремится сдвинуть звезды. С ней борется электромагнитная энергия, создавая внутреннее давление. Сама эта энергия высвобождается в ходе ядерных процессов, которыми управляют сильные и слабые ядерные взаимодействия. В этих условиях из-за переплетения конкурирующих процессов структура системы критически зависит от величины взаимодействий, а тем самым — от численных значений фундаментальных постоянных.

Астрофизик Брендон Картер, детально изучив звездное «поле битвы», обнаружил, что равновесие между гравитационными и электромагнитными взаимодействиями внутри звезд соблюдается почти с немыслимой точностью. Вычисления показывают, что изменение любого из взаимодействий всего лишь на  $10^{-40}$  его величины повлекло бы за собой катастрофу для звезд типа Солнца.

Многие другие важные физические системы крайне чувствительны к самым малым изменениям относительной величины взаимодействий. Например, совсем небольшое относительное увеличение сильного взаимодействия привело бы к тому, что все ядра водорода во Вселенной были бы израсходованы в ходе Большого взрыва, оставив тем самым космос без важнейшего звездного топлива.

В книге «Случайная Вселенная»<sup>1</sup> мною проведено исчерпывающее изучение всех очевидных случайностей и «совпадений», которые кажутся необходимыми с точки зрения существования во Вселенной важных сложных систем. Абсолютно невероятно, чтобы столь счастливые совпадения могли быть результатом последовательности исключительно удачных случайностей. Именно это побудило многих ученых согласиться с утверждением Хойла о том, что Вселенная — результат «мошенничества».

Высочайшим проявлением сложной организации во Вселенной является жизнь, и потому чрезвычайно интересен вопрос, насколько наше собственное существование зависит от точной формы законов физики. Человеку для выживания необходимы в высшей степени специальные условия, и почти любые изменения в законах физики, в том числе самые незначительные изменения численных значений фундаментальных постоянных, полностью исключили бы существование известных нам форм жизни. Однако более интересен вопрос: а не сделали бы такие малые изменения невозможными любые формы жизни? На этот вопрос трудно ответить, поскольку нет общепринятого определения жизни. Если все же

<sup>1</sup> Делс П. Случайная Вселенная. — М.: Мир, 1985. — *Прим. перс.*

согласиться с тем, что для жизни требуется по крайней мере наличие тяжелых атомов (например, углерода), то уже это налагает весьма строгие ограничения на некоторые фундаментальные постоянные. Например, слабое ядерное взаимодействие, ответственное за взрывы сверхновых, в которых тяжелые элементы выбрасываются в межзвездное пространство, не может, существенно изменив свою (наблюдаемую) величину, по-прежнему вызывать взрывы звезд.

Итак, совершенно очевидно, что существование большого числа важных физических систем во Вселенной — в том числе живых организмов — критически зависит от точной формы законов физики. Если бы Вселенная возникла с несколько иными законами, то не только мы и вряд ли кто другой) не могли бы оказаться тут и наблюдать Вселенную, но и сомнительна была бы сама возможность возникновения любых сложных структур.

На это иногда возражают, что если бы законы физики были иными, то это лишь означало бы, что иными были бы и системы, а если невозможной оказалась бы известная нам форма жизни, то вполне могла бы возникнуть другая форма жизни. Однако еще никто не пытался показать, что сложные системы вообще являются неизбежным (или даже вероятным) следствием действия физических законов; все имеющиеся в нашем распоряжении данные говорят о том, что многие сложные системы предельно чувствительны к реальному виду этих законов. Поэтому заманчиво считать, что сложная Вселенная возникнет только при условии, что законы физики чрезвычайно близки к реально существующим.

Следует ли из всего этого сделать вывод, что Вселенная — это результат предначертанного плана? Новая физика и новая космология выполняют свое заманчивое обещание объяснить возникновение всех физических систем во Вселенной автоматически, исключительно за счет естественных процессов. В этом случае нам уже не понадобится вмешательство «творца». Тем не менее, хотя наука и в состоянии объяснить мир, еще остается дать объяснение самой науки. Законы, обеспечившие спонтанное возникновение Вселенной, по всей вероятности, сами рождены каким-то остроумнейшим планом. Но если физика продукт подобного плана, то у Вселенной должна быть конечная цель, и вся совокупность данных современной физики достаточно убедительно указывает на то, что эта цель включает и наше существование.

## Литература<sup>†</sup>

---

### *Общие вопросы*

- Calder N. *The Key to the Universe: a report on the new physics.* — L.: BBC Publications, 1977.
- Capra F. *The Tao of Physics.* — N. Y.: Random House/L.: Wildwood House, 1975.
- Capra F. *The Turning Point.* — N. Y.: Simon & Schuster, 1982.
- Davies P. *God and the New Physics.* — L.: Dent/N. Y.: Simon & Schuster, 1982.
- Feynman R. *The Character of Physical Law.* — Cambridge, Mass.: MIT Press, 2nd ed., 1982. [Русский перевод: Фейнман Р. Характер физических законов. — М.: Наука, 1987.]
- March R. H. *Physics for Poets.* — N. Y.: Mc. Graw-Hill, 2nd ed., 1978.
- \*Mehra J. (ed.). *The Physicist's Conception of Nature.* — Hingham, Mass.: D. Reidel, 1973.
- Morris R. *Dismantling the Universe.* — N. Y.: Simon & Schuster, 1984.
- Pagels H. *The Cosmic Code.* — L.: Michael Joseph; N. Y.: Simon & Schuster, 1981.
- Trefil J. S. *Physics as a Liberal Art.* — Oxford: Pergamon Press, 1978.

### *Физика элементарных частиц*

- \*Cheng D. C., O'Neill G. K. *Elementary Particle Physics.* — Reading, Mass: Addison-Wesley, 1979.
- Close F. *The Cosmic Onion.* — L.: Heinemann, 1983.
- Davies P. C. W. *The Forces of Nature.* — Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- Feinberg G. *What is the World Made of?* — N. Y.: Doubleday, 1977. [Русский перевод: Фейнберг Дж. Из чего сделан мир? — М.: Мир, 1981.]
- Mulvey J. H. (ed.). *The Nature of Matter.* — Oxford: Clarendon Press, 1981. [Русский перевод: Фундаментальная структура материи. — М.: Мир, 1984.]
- Polkinghorne J. *The Particle Play.* — San Francisco: W. H. Freeman, 1980.
- Trefil J. S. *From Atoms to Quarks.* — N. Y.: Charles Scribner's Sons, 1980.

### *Космология*

- Atkins P. W. *The Creation.* — San Francisco: W. H. Freeman, 1981.
- Barrow J. Silk J. *The Left Hand of Creation.* — L.: Heinemann/N. Y.: Basic Books, 1984.
- Davies P. *The Runaway Universe.* — L.: Dent/N. Y.: Harper & Row, 1981.
- Gribbin J. *Genesis.* — L.: Dent/N. Y.: Delacorte, 1981.
- \*Harrison E. R. *Cosmology.* — Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- \*Sciama D. W. *Modern Cosmology.* — Cambridge: Cambridge University Press, 2nd ed., 1982.
- Silk J. *The Big Bang.* — San Francisco: W. H. Freeman, 1980. [Русский перевод: Сплк Дж. Большой взрыв. — М.: Мир, 1982.]
- Weinberg S. *The First Three Minutes.* — N. Y.: Basic Books/L.: Andre Deutsch, 1977. [Русский перевод: Вайнберг С. Первые три минуты. — М.: Энергоиздат, 1981.]

---

<sup>†</sup> Звездочкой обозначены книги повышенной трудности.

## Предметно-именной указатель

- Абсолютное пространство 233, 234  
Абстрактные понятия (в физике) 71—78  
Адроны 93, 95—102, 116, 137—138, 193  
Альфа частицы 24, 87  
Антивещество 26, 94—95, 194, 196—200  
Антигравитация 81, 204—205, 209. *См. также* Космическое отталкивание  
Антикаон 98  
Антимонополь 154  
Антронный принцип 175, 261  
Аристотель 17, 23, 79, 227, 233  
Асимметрия между веществом и антивеществом 196—200  
Аспек А 48, 53, 55  
Аспека эксперимент 48, 53—55  
Атомизм 23, 79, 100  
Атомная теория 23—25, 28
- Барьоны 96, 102  
Бекенштейн Я. 249, 250  
Беккерель А 86  
Белл Дж 55  
Балла неравенство 53  
Беркли Дж 232—234  
Бесконечность, перенормирование 120—122, 154—156, 160  
Бета-распад 87—88, 150  
Бозе Ч. 92  
Бозоны 92, 157—158  
Большого взрыва теория 13—15, 21—22, 189—190  
МВО 152  
причины 201—225  
рождение нейтрино 101  
ТВО эра 195—200, 223  
температура 191—193  
энергия 25, 193  
Бом Д. 55, 240—241  
Бонди Г 246—248  
Бор Н 49—50, 52, 53, 239, 248  
Борн М 49  
Брауэр Л. Е. Дж. 169  
Бруно Дж 18
- Вайнберг С 88, 128—136, 148, 161, 243, 245  
Вайнберга—Салама теория 128—136, 146, 181  
Вакуум  
виртуальные частицы в 115—118  
ложный 219, 224—225  
поляризация 141—142, 146. *См. также*  
Квантовый вакуум  
«Вечный двигатель» 246—248  
Вещество  
асимметрия 196—200  
атомизм 23—24, 28  
нестабильность 144  
рождение из энергии 25, 195  
Вилленкин А. 219, 223
- Вильсон Р. 22  
Вино 159  
Водород 25, 187, 189—190  
энергетические уровни 106, 122  
Волны 30, 170, 238, 256—257  
Время  
замедление 42—43  
первые секунды 190—195  
природа 237—238  
Вселенная 13, 101, 226—242, 244, 265—266  
возраст 19—20  
вращение 235—237  
границы 16—19  
единство 241—242, 244  
исчезновение 150  
однородность 203—204, 215—216, 218, 228—229  
расширение 20—21, 202—203, 207—209, 215, 229  
спонтанное рождение 218—222  
статическая 207  
существование 13—14  
устройство 258—264  
Ву Ч. С. 199  
Ву эксперимент 199
- Галактики 16—19  
образование в результате Большого взрыва 215—218, 223  
плотность 203, 228—229  
спектр излучения 20  
Галилей Г. 59—60, 227, 248  
Гамильтон У. Р. 66, 68  
Гамма-излучение 195—196, 200. *См. также* Космическое фоновое излучение  
Гармония природы 245—246, 258—259  
Гейзенберг В. 33, 42, 62  
Гейзенберга принцип неопределенности 33, 36, 107, 116  
Аспека эксперимент 53—56  
мысленные эксперименты 50—53, 248  
энергетический «кредит» 135  
Гексли Т. Г. 28  
Гелий 25, 187, 189—190  
синтез 194  
содержание во Вселенной 192  
Гелл-Манн М. 95—96  
Геоманнитное поле, обращение 154  
Геометрия 59, 162, 165—166, 254, 260  
Геометродинамика 178—179  
Герох Р. 249  
Герц Г. 70  
Гёдель К. 236  
Гильберт У. 84, 85  
Глэшоу Ш. 128, 136, 142—143  
Глюнно 159  
Глюоны 107, 136—137, 138, 139  
Голограмма 241  
Гравитационное поле 11, 32  
калибровочная симметрия 126



- проблема расходимости 155—156  
 Гравитационные волны 31, 83, 107  
 Гравитация 26—27, 38, 80—84, 264  
 вызванная искривлением пространства 36—37  
 искусственная 235  
 как геометрия пространства 83  
 — компенсирующее поле 125  
 — причина замедления времени 43—44  
 — — инерции 235  
 квантовая теория 115  
 отрицательная *См.* Космическое отталкивание  
 Гравитино 159, 176  
 Гравитон 106—107, 155—156  
 «Границы» Вселенной 16—20  
 Грин М 182—184  
 Гут А 9, 211, 215, 217, 219
- Дальтон Дж. 23  
 Движение планет 60—61, 81  
 Демокрит 23, 100, 147  
 де Ситтер В. 208, 211  
 Джорджи Г. 142—143  
 Диггс Т. 18  
 Дирак П 62, 152, 240  
 ДНК 187, 198, 264  
 Дюфе Ш 84
- Единая теория поля 11—12, 69, 86, 162—163
- Замедление времени 36, 41—44  
 Зинно 159  
 Зукав Г 241
- Изотопическая симметрия 74, 129—139  
 Инерция 231—232, 235  
 Инфляция теория 209—212, 216—218  
 Искривление пространства 31, 32—38, 83—84, 162, 236—237  
 Искусственная гравитация 235
- Кабрера Б 153  
 Кавендиш Г 82  
 Калибровочные поля 126, 254  
 сильное взаимодействие 136—139  
 слабое взаимодействие 128—136  
 ТВО 142—143, 173  
 удержание кварков 140  
 электромагнитное взаимодействие 127  
 Калибровочные симметрии 72, 74, 123—127, 173  
 в ТВО 142—143  
 сильного взаимодействия 136—139  
 слабого — 128—136  
 электромагнитного — 127  
 электрослабого — 194  
 Калуца Т. 163—164, 171  
 Калуца—Клейна теория 171—180, 183—185  
 Кант И. 170  
 Кантор Г 169  
 Каон 87, 199  
 Капра Ф 241  
 Карр Б 264—265  
 Картер Б 265  
 Кварки 228  
 Квантовая космология 222—223  
 Квантовая физика 11—14, 28—29, 33, 48—57  
 Аспекта эксперимент 43, 53—55  
 Билла неравенство 53
- вакуум 115—118, 210—212, 216—218, 233  
 и реальность 53—57  
 — рождение Вселенной 221—225  
 понятие целостности 241—242  
 энергия 14, 180—181, 252  
 Квантовая хромодинамика (КХД) 138—142  
 Квантовая электродинамика (КЭД) 105—106, 115, 117, 118—123, 135, 239  
 Кварки 24, 30—31, 39, 95, 138—139, 143, 193  
 ароматы 95—102  
 конфайнмент (удержание) 139—142  
 теория 95—102  
 цвета 136—139  
 Кеплер И. 17, 68  
 Кёстлер А. 242  
 Клейн О. 171  
 Клиффорд У. К. 177—178  
 Компенсирующее поле 125  
 Коперник Н 18, 60, 228  
 Космическая плазма 189—191  
 Космические лучи 94  
 Космический бутстрэп 212—215, 219, 223  
 Космическое отталкивание 205—210, 214  
 Космическое фоновое излучение 22, 191, 200  
 однородность 203  
 энергия 212—215  
 Космологический принцип 228—229  
 Коулмен С 219, 223  
 Красное смещение 20  
 Кристаллическая структура 45, 262  
 Кронин Дж У 199
- Лагранж Ж. Л 66, 68  
 Лаплас П. 46, 220  
 Лебег Р 169  
 Лейбниц Г. 233  
 Леклер Ж. Л 186  
 Лептоны 93—95, 100, 143  
 Ли Т Д 198  
 Лоренц Х А 33, 70  
 Лоренца—Фитцджеральда симметрия 70—71, 126—127, 158  
 Лоренца—Фитцджеральда сокращение длины 33  
 Лэмб У 106, 122
- Магнетизм 85—86, 151—153  
 Магнитные монополи 85, 151—154, 218, 240  
 Максвелл Дж. К. 11, 69—76, 86  
 Максвелла уравнения 69—72, 127, 151, 163, 237  
 Маскелли Н 82  
 Масса покоя 92  
 Математика  
 абстрактные понятия 75—78  
 движение планет 60  
 калибровочная симметрия 126  
 кварковая модель 89  
 математическая красота 62—67, 75—78  
 порядок, выявленный математикой 260  
 язык природы 58—61, 78  
 Мах Э. 230, 234—236  
 Маха принцип 229—237  
 Мезоны 96, 102, 138, 144, 199  
 Меркурий 83—84, 187  
 Монополи Великого объединения (МВО) 152—154  
 Мысленные эксперименты 50—53, 249—254  
 Мюонное нейтрино 95, 101  
 Мюоны 94, 95, 102

- Наблюдаемая масса 119  
 Наблюдения в квантовой физике 46—47, 56—57  
 Начальные условия 61, 196, 202, 213  
 Нейтрино 31, 39, 87, 93—94, 101  
 Нейтронные звезды 37, 44, 157  
 Нейтроны 24, 26, 73—75, 96  
 Ниобий 139  
 Ньютон И 46, 59—61, 79—80, 205, 230—234  
*Ньютона* физика 46, 48, 56, 59—61, 66, 68, 79—80, 230—234
- Обратных квадратов закон 59, 81, 85—86, 140  
 Объединение (взаимодействий) 11—12, 113—115, 138—161, 254—255  
   масштаб 146—147, 154, 180—181  
   масса 152—153, 180  
   энергия 180—181, 192  
 Отрицательная квантовая энергия 252
- Найерлс Р. 55  
 Парадокс близнецов 42  
 Паули В. 87, 157, 242  
*Паули* принцип 157  
 Пейджелс Х. 219  
 Пензиас А. 22  
 Период полураспада 93  
 Пионы 98, 100, 144, 197  
 Пифагор 17, 59, 168—169  
 Планк М. 29, 180  
*Планка* масштаб 180, 193  
   — энергия 180—181  
   — эра 223  
 Подольский Б. 50—53  
 Позитрон 26, 91, 197, 221  
 Поляков А. 152  
 Порядок  
   в голограммах 241  
   восприятие человеком 259—260  
   в природе 244—245, 258—262  
   временной 263—264  
   пространственный 262, 264  
 «Принцип лениности» 256  
 Принцип минимального времени 66  
 Причинность 220, 223—224  
 Пространство-время  
   искривление 36, 83—84  
   размерности 162—175  
   спонтанное рождение 218—219  
 Протон 24, 25, 26, 73—75, 91, 98, 100, 148, 149  
   время жизни 148—149  
   распад 144, 148—149, 154, 181, 197  
 Пси-частица 99  
 Птолемей К. 17, 60, 66, 165  
 Пуанкаре А. 70  
 Пэли У. 259, 261
- Радиоактивность 24, 26, 86—87  
 Размерности (пространства-времени) 12, 14, 162—175, 224, 260  
 Резерфорд Э. 24, 87, 110—111  
 Риман Б. 165  
 Рис М. 9, 264—265  
 Рихтер Б. 99  
 Розен Б. 50—53  
 Руббин К. 113
- Салам А. 88, 128—136, 144, 177  
 Сахаров А. Д. 209  
 Сверхновые (звезды) 86—87, 188, 265
- Свет 28, 35, 69  
 Световой год 16  
 7-сфера 173—175  
 Сигма-частица 98  
 Симметрия 13, 67—75, 173  
   вещества—антивещества 197—200  
   взаимодействий 123—127  
   зеркальная 198  
   нарушение 132—136, 146, 194, 198  
   пространственный порядок 262. *См. также* Калибровочная симметрия и Суперсимметрия  
 Синусоида 64—65, 69  
 Синхронизм 242  
 Синхротронное излучение 43  
 Сквэйрс Ю. 255  
 Спин 31, 38—41, 92, 106, 156  
 Стрела времени 238, 240  
 Стэпп Г. П. 57  
 Супергравитация 159—161, 176—177, 182, 244  
 Суперсила 7, 10—13, 27, 154—161, 255  
 Суперсимметрия 156, 176—177  
 Суперструны 182—185
- Тайон Э. 219  
 Тау-лептон 94—95, 102  
 Тау-нейтрино 95  
 Тейлор Дж. 55  
 Теории Великого объединения (ТВО) 10, 142—147, 151—152  
   *Калуцы—Клейна* теория 171—180, 183—185  
   магнитные монополи в 152  
   состояние вакуума в 210—211  
   ТВО эра 195—200, 223  
 Термодинамики второй закон 245—253  
 Тинг С. 99  
 Томсон Дж. Дж. 85  
 Туннельный эффект 30, 34, 144, 217—218, 223  
 ван Хофт Г. 135, 152
- Уилер Дж. 53, 239, 244, 178—179  
*Уилера* «кротовая нора» 178—179  
*Уилера—Фейнмана* теория 239—240  
 Уитроу Г. Дж. 170—171  
 Унру У. 251—252  
 Уолд Р. 251—252  
 Ускорители частиц 11, 25—26, 33, 90—91, 97—98, 108—110, 112—113, 181  
   дезертрон 109, 181  
   ЛЭП 90, 103  
   СЛАК 33, 97, 140, 181
- Фарадей М. 11, 69, 76, 84—85  
 Фербэнк У. 139, 236  
 Фейнберг Дж. 260  
 Фейнман Р. 104, 239  
*Фейнмана* диаграммы 104, 135  
 Ферми Э. 67—88, 92, 239  
 Фермионы 92—95, 157—158  
 Физика элементарных частиц, цели 108—111  
 Физические законы 60—61, 264, 266  
 Фитцджеральд Дж. 33  
 Фитч В. Л. 199  
 Фоинно 159  
 Фотон 11, 30, 85, 104—105  
 Франклин Б. 84  
 Фридман А. А. 20, 207  
 Фриш О. 56  
 Фундаментальные постоянные 265

- Хаббл Э 18, 20, 205, 207  
 Хиггс П 133  
 Хиггса поле 133—134  
   — частицы 133—134, 156  
 Химические элементы, происхождение 186—187, 190—191  
 Хойл Ф. 237, 244, 265  
 Хоскинс С 144, 161, 221, 244, 249  
 Хокингс излучение 144, 221, 250—251, 254  
   — процесс 144, 250  
 Холлизм 55—56, 241—242  
 Хофштадтер Д. 242
- Цвейг Дж 96  
 Центробежная сила 125, 230, 231, 235  
 ЦЕРН 42  
   детектирование распада протона 149  
   ЛЭП 90, 109  
   открытие W-частиц 113, 149  
   — Z-148
- Частицы 88—89, 91—93  
   виртуальные 115—118, 120  
   как волны 30, 66—67, 256—257  
   квантовые 24, 29—30, 55—57  
   «призраки» 36, 38, 116—117  
   с нулевой массой покоя 92, 106. *См. также* названия отдельных частиц и Частицы — переносчики взаимодействий
- Частицы — переносчики взаимодействий 11, 102—108, 116—117, 122, 158  
   X- 143—147, 197—198  
   W- 107, 108, 130—135  
   Z 11, 92, 115, 10, 108, 131—135, 147
- Черная дыра 157, 216  
   вращение 237  
   замедление времени 44  
   излучение 221  
   искривление пространства 37—38  
   мысленные эксперименты 249—254  
   нестабильность 144  
   термодинамические свойства 219
- Шапиро Р. 260  
 Шварц Дж. 182—184  
 Шепли Х 18  
 Шредингер Э 49, 243
- Эволюция жизни 261—262  
 Эддингтон А 114  
 Эйбштетн А 11, 29, 49—53, 62, 70, 205—208, 210, 230, 235
- Эйнштейна—Подольского—Розена* эксперимент 50—53, 241  
 Экспоненциальная функция 62—66, 93, 211, 215  
 Электрический заряд 24, 71, 84—85, 92, 146—147  
 Электричество 84—85, 157  
 Электромагнетизм 69—71, 76, 84—86  
   как «гравитация» 163  
   спережающие волны 237—240  
   фотоны как кванты 107  
 Электронный синхротрон 43  
 Электрон 24—25, 27, 85, 90, 118—120  
   «барьерный эффект» 29  
   спин 39  
   спонтанное рождение 221  
   туннельный эффект 30. *См. также* Бета-распад
- Электрослабое взаимодействие 123—136, 148, 192—193  
 Энергия  
   Большого взрыва 193—194, 212—214  
   гравитационных волн 31  
   закон сохранения при рождении Вселенной 212—213  
   нарушение 213—214  
   как абстрактное понятие 77  
   квантовые эффекты 116  
   магнитных монополей 154  
   Планка 180—181  
   рождение вещества из 25, 195  
   «саморождение» 224—225  
   эквивалентность массе 50, 92
- Эренфест П 170  
 Эрмит Ш. 169  
 Эрстед Х. К. 86  
 Эстлинг Р. 261  
 Эфир, или квинтэссенция 23, 28
- Юнг Т. 34  
 Юнга эксперимент 34—35, 257
- Ядерные взаимодействия 12, 27  
   сильное 73, 88—89, 93, 95, 254—255  
   как калибровочное поле 136—139  
   переносчики 107—108  
   слабое 86—88, 93—95, 254—255, 266  
   как калибровочное поле 128—136  
   переносчики 107—108
- Ядерный синтез  
   в Большом взрыве 190—195  
   — звездах 188  
 Янг Ч. Н. 198