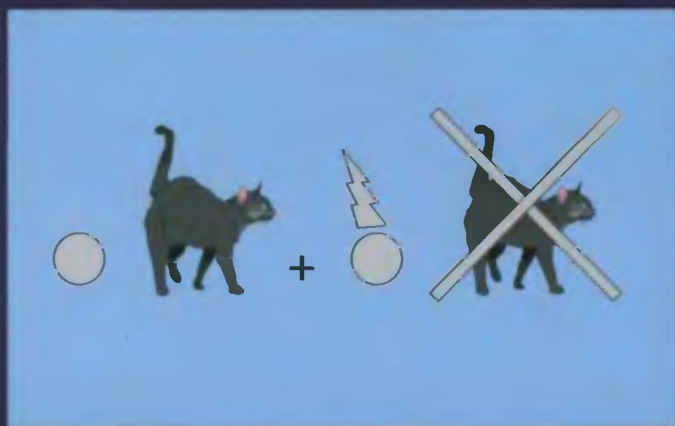


Наука
для всех

М. Б. Менский

ЧЕЛОВЕК И КВАНТОВЫЙ МИР



Наука
для всех

М. Б. Менский

ЧЕЛОВЕК И КВАНТОВЫЙ МИР

Странности квантового мира
и тайна сознания



**Фрязино
2005**

Менский Михаил Борисович — доктор физ.-мат наук, профессор, вед. научный сотрудник Физического института им. Лебедева РАН.

Область научных интересов — квантовая теория поля, теория групп, квантовая гравитация, квантовая механика, квантовая теория измерений.

Менский М. Б.

Человек и квантовый мир.

Фрязино: «Век 2», 2005. — 320 с. — (Наука для всех).

ISBN 5-85099-161-1

Квантовая механика, самый, пожалуй, удивительный раздел физики, обсуждается в этой книге с различных точек зрения. В части I излагается история создания квантовой механики и ее основные идеи, рождавшиеся в процессе трудного преодоления привычной классической картины мира. На некоторых важных примерах (сверхпроводимость и сверхтекучесть, лазеры, нанотехнология, квантовая информатика) иллюстрируются приложения квантовой механики в современной технике.

Часть II посвящена до сих пор нерешенным концептуальным вопросам (парадоксам) квантовой механики. Показывается, как попытка их решения приводит к картине параллельных миров (так называемая интерпретация Эверетта), а ее логическое продолжение — к новому пониманию феномена сознания и к объяснению его необычных возможностей, которые на первый взгляд противоречат законам физики.

На обложке: Парадокс кота Шредингера. Жизнь кота зависит от того, распалось или еще не распалось ядро радиоактивного элемента.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2005 году исполняется 100 лет с того момента, когда была написана важнейшая статья Эйнштейна по основаниям квантовой механики, в которой он ввел понятие фотона. В связи с этим ЮНЕСКО объявило 2005 год годом физики. Интерес к квантовой механике сейчас чрезвычайно высок, причем не только среди специалистов, но и в широкой публике. Сама квантовая механика находится в стадии очень быстрого развития и в связи с новыми ее приложениями в технике, и в связи с углублением интереса к концептуальным проблемам этой науки. Интерес в значительной степени подогревается тем, что эти знаменитые концептуальные проблемы, или парадоксы квантовой механики, по-видимому, напрямую связаны со странными и до сих пор необъясненными феноменами, происходящими в человеческом сознании.

Вот об этом и пойдет речь в этой книге: начиная с того, как родилась эта странная квантовая механика, и кончая тем, как она может «объяснить» странные возможности, таящиеся в сознании. Сначала — о том, как Человек познал Квантовый Мир, потом — о том, как особенности Квантового Мира помогают познать самого Человека, да и вообще Феномен Жизни.

Несмотря на то, что мною в последние годы опубликовано несколько книг и статей по квантовой механике, в том чис-

ле некоторые — по общим вопросам квантовой механики, было трудно решиться писать на эту тему книгу, рассчитанную на более широкий круг читателей. Нелегко было также выбрать уровень изложения в такой книге. Объективная трудность этого проекта состоит в том, чтобы свести к минимуму использование математического формализма, не переходя все же к чисто беллетристическому стилю изложения.

В конце концов был выбран такой подход, при котором в первых, в разных частях книги уровень «математизации» выбирается по-разному, а во-вторых, эти части в значительной степени независимы друг от друга. В результате читатель может опустить материал, который покажется для него слишком трудным. В частности, читатели с «гуманитарными» наклонностями могут опустить часть I и сразу перейти к части II. При этом они не будут полностью освобождены от математики, однако математика будет сведена к минимуму. Если смириться с некоторыми логическими пробелами, то можно даже читать часть II, начиная с главы 5 и попытаться познакомиться с идеями «квантового сознания», при этом практически полностью обойдя математический формализм.

На самом деле, конечно, глубокое понимание даже чисто «гуманитарных» или, точнее, концептуальных аспектов квантовой механики, требует математики. Если не использовать математические формулы, то можно назвать проблемы, но нельзя сделать ясным их реальное содержание. Поэтому тому, кто интересуется этими проблемами всерьез, можно порекомендовать все же разобраться (пусть не при первом, а при втором чтении) в тех простых формулах, которые имеются в части II. Надеюсь, что те трудности, которые должен преодолеть при этом читатель-непрофессионал, окупятся тем, что он познакомится с одним из самых интригующих вопросов в науке, который, по словам Вигнера, «возможно, является самым фундаментальным вопросом из всех».

М.Б.Менский
Москва, июль 2005

**Предисловие главного редактора
журнала «Успехи физических наук»
академика В. Л. Гинзбурга
к статье М. Б. Менского
«Концепция сознания
в контексте квантовой механики»
УФН, № 4, 2005**

При советской власти лишь диалектический материализм считался научной философией. Поэтому в условиях существования цензуры было фактически невозможно публиковать статьи, в которых высказывались и защищались взгляды, отличные от декларируемых философами-марксистами. Между тем в демократических странах такие взгляды широко обсуждались и обсуждаются. Если говорить о физике, то сказанное особенно относится к обсуждению методологических вопросов, связанных с квантовой механикой. В современной России, где объявлена свобода слова и нет цензуры, положение радикально изменилось. Поэтому редакция УФН с целью вернуть сообщество российских физиков к обсуждению актуальных вопросов квантовой физики (достаточно упомянуть хотя бы о внимании к квантовым компьютерам) опубликовала статью М. Б. Менского [1]. Затем появился целый ряд писем на эту тему [2], которые даже не рецензировались, чтобы дать возможность отразить различные взгляды на квантовую механику, в том числе взгляды, с которыми многие члены редколлегии (в частности, и я) совершенно не согласны. После этого были опубликованы также некоторые другие заметки на ту же тему [3, 4] и в тех же условиях. Наконец, ниже публикуется большая новая статья М. Б. Менского, посвященная

интерпретации квантовой механики, причем внимание сконцентрировано на возможной, по мнению автора (и не только его), связи квантовой теории измерений с сознанием наблюдателя. Ниже я еще сделаю на этот счет замечания по существу. Сейчас же подчеркну, что статья М.Б. Менского публикуется здесь в известной мере в порядке исключения. Дело в том, что УФН это журнал, предназначенный для освещения успехов в области физики и близких научных направлений. Разумеется, эта линия не может быть строго проведена, мы печатаем иногда также методические заметки и другие материалы. Но мы не можем и не будем широко предоставлять наши страницы для обсуждения философских проблем и, в частности, связи квантовой теории с теорией познания, психологией и т. д. Кстати, и сам М. Б. Менский развивает эту тему в другом месте [5].

Позволю себе теперь, как уже было упомянуто выше, сделать замечание по существу вопросов, обсуждаемых М. Б. Менским. Как известно, идеализм и, в частности, солипсизм нельзя опровергнуть чисто логическими рассуждениями, для выбора между материалистической и идеалистической точками зрения необходимо опираться еще на интуитивное суждение (усмотрение) [6]. Насколько я могу судить, позиция Вигнера, о которой М. Б. Менский пишет в начале своей статьи, это солипсизм, идеализм. Материалисты же, к которым я принадлежу, опираются на иное интуитивное суждение. В конкретном плане не понимаю, почему так называемая редукция волновой функции как-то связана с сознанием наблюдателя. Например, в известном дифракционном опыте электрон проходит через щели и затем на экране (фотопластинке) появляется «точка», т. е. становится известно, куда попал электрон. Появление «точки» есть, очевидно, результат взаимодействия падающего электрона с материалом фотопластинки. Главная особенность квантовой механики заключается в том, что она предсказывает, вообще говоря, лишь вероятность событий. Конкретно, в дифракционном опыте кванто-

вая механика предсказывает распределение «точек» на экране или вероятность попадания электрона (т. е. появления «точек») в любое место экрана. Такая ситуация является отражением корпускулярно-волнового дуализма, т. е. того факта, что электрон (или, конечно, какая-нибудь другая микрочастица) это не «материальная точка» классической физики, движущаяся по какой-то определенной траектории. Если описывать состояние электрона после его взаимодействия с атомами в фотопластинке с помощью волновой функции, то эта функция будет, очевидно, отлична от первоначальной и, скажем, локализована в «точке» на экране. Это и называют обычно редукцией волновой функции. Разумеется, «точки» на экране наблюдатель увидит и на следующий день после осуществления опыта, и при чем здесь какая-то особая роль его сознания, мне непонятно.

Подобное толкование квантовой механики как указывающей вероятность наблюдаемых событий и есть, упрощенно говоря, ее «обычная» или, как иногда говорят, копенгагенская интерпретация (см., например, [9]). Во всяком случае, я понимаю ситуацию именно так. Однако существуют другие мнения, и вопрос об измерении в квантовой механике не элементарен и дискутируется, как это ясно уже из статьи М. Б. Менского. При этом М. Б. Менский и ряд других, безусловно квалифицированных физиков, придерживаются точки зрения, отличной от «обычной» интерпретации, что и отражено в публикуемой статье. Насколько я понимаю, это не просто солипсизм, который я усматриваю в аргументации Вигнера, а нечто более сложное. Далее, как известно, происхождение жизни и сознания еще не выяснено, проблема не решена (см., например, [10]). Поэтому просто отмахнуться от обсуждения происхождения человеческого сознания и какой-то связи этого вопроса с квантовой механикой было бы ошибкой. В такой ситуации опубликование статьи М. Б. Менского представляется оправданным и она, как можно думать, вызовет интерес. А это и нужно, ибо без дальнейшего анализа прогресс

в области интерпретации квантовой теории измерений невозможен. Может при этом оказаться, что здесь и так все ясно, например, «обычная» интерпретация окончательно победит. Такое заключение также явилось бы успехом. Разумеется, если в обсуждаемой области будут получены достаточно убедительные новые результаты, они найдут отражение и в УФН.

В. Л. Гинзбург

Список литературы

1. Менский М. Б. УФН **170** 631 (2000).
2. Менский М. Б. УФН **171** 459 (2001).
3. Белинский А. В. УФН **173** 905 (2003).
4. Попов М. А. УФН **173** 1382 (2003).
5. Менский М. Б. Вопросы философии (6) 64 (2004).
6. Фейнберг Е. Л. Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. 3-е изд. (Фрязино: «Век 2», 2004).
7. Ландау Л. Д. Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория (М.: Наука. 1989).
8. Кадомцев Б. Б. УФН **173** 1221 (2003); Динамика и информация (М.: Ред. журн. «УФН», 1999).
9. Bohr A, Motte1son B. R., Ulfbeck O. Phys. Today **57** (10) 15 (2004).
10. Гинзбург В. Л. О науке, о себе и о других. 3-е изд. (М.: Физматлит. 2003) с. 56.

ВВЕДЕНИЕ

Прежде, чем начать систематическое обсуждение такого сложного предмета, каким является предмет этой книги, мы, по возможности кратко, во-первых, охарактеризуем этот предмет, а во-вторых — содержание книги. Это введение должно служить путеводителем по книге. В данном случае путеводитель не кажется лишним, потому что читатель, ознакомившись с ним, сможет найти самое интересное именно для него и не тратить время и силы на то, что ему менее интересно.

0.1. О чем эта книга

О чем эта книга? Какие это отношения между Человеком и Квантовым Миром имеются в виду? Да и вообще, что такое квантовый мир и имеет ли он отношение к тому, что важно для человека?

Конечно, многие слышали, что микроскопические объекты, такие как атом, подчиняются очень странным закономерностям. Например, атом (или электрон, или протон ...) — это, конечно, частица, но в то же время — это волна. Есть люди, которым это интересно, и они хотели бы понять не только что все это значит, но и то, как Человеку (сиречь, ученым) уда-

лось понять этот странный Квантовый Мир, проникнуть в его закономерности. Это одна сторона вопроса.

Есть, однако, и вторая, еще более интригующая и интересная для более широкого круга людей. Оказывается, Квантовый Мир, его странные закономерности помогают понять, как устроен сам Человек. И если обычная всем нам известная, то есть классическая, механика может объяснить, как функционирует тело человека, его руки и ноги, то квантовая механика проливает свет на гораздо более важное и несоизмеримо более таинственное и волнующее в человеке — на его сознание.

Конечно, о сознании известно очень много. Не только потому, что его специальными методами исследуют ученые (психологи, физиологи и другие), но и потому, что каждый из нас каждую минуту использует его в обычной жизни. Да и жизнь эту мы воспринимаем только через сознание. И, несмотря на все это, никто пока не знает, что же такое сознание. Вот эта глубочайшая тайна может приоткрыться, если подойти к ней со стороны квантовой механики, имея в виду закономерности квантового мира.

Более того, понятнее могут стать не только обычные свойства сознания, с которыми знаком каждый, но и те, о которых мы с удивлением слышим время от времени, которые воспринимаем с недоверием, но которые с каждым днем все труднее отрицать.

Может ли человек не просто догадываться о будущем, но предвидеть его? Может ли он, не предпринимая никаких действий, всего лишь усилием воли направить ход событий в том или ином направлении? Может ли он силой мысли вылечить себя или своего ближнего от тяжелой болезни? Может ли он совершать чудеса? Очевидный ответ на эти и другие подобные вопросы — нет, не может. Но все чаще и все убедительнее звучит другое мнение — да, может. Все чаще такое мнение основывается на хорошо документированных фактах. Возможно, тайны квантового мира помогут объяснить, как и почему это оказывается возможным.

Итак, о чем же эта книга?

Во-первых, о том, как человек постигал секреты квантовой механики и в чем они состоят (часть I, «Квантовая механика»). Во-вторых, о том, как квантовая механика помогает человеку проникнуть в секрет его собственного сознания и в тайну жизни (часть II, «Квантовая механика и сознание»). Эти две темы существенно разнятся и рассчитаны на различные категории читателей. Поэтому части I и II можно читать независимо друг от друга.

Часть I адресована тем, кто интересуется самой квантовой механикой (ее историей и современным состоянием). Математический аппарат используется при этом минимальным образом. Даже если пропустить все встречающиеся формулы, некоторое общее представление о предмете читатель получит. Для тех же, кто хочет познакомиться с квантовой механикой на более адекватном для нее языке, написано Приложение, которое содержит некоторую выборку из математического аппарата квантовой механики, рассчитанную прежде всего на изложение квантовой теории измерений и основных идей квантовой информатики.

В отличие от этого часть II написана и для этих читателей тоже, но также и для тех «гуманитариев», которым интересны лишь вопросы духовной жизни человека. Они увидят, что самые интересные и волнующие феномены этой духовной жизни (такие, как особые состояния сознания и происходящие в этих состояниях «чудеса») на самом деле непосредственно связаны с феноменами, которые изучает квантовая механика. Феномены сознания в некотором смысле получают свое объяснение или, говоря более осторожно, некоторое подобие научного обоснования, в квантовой механике. Часть II написана таким образом, чтобы используемые в ней формулы были самыми простыми, хотя избежать их вовсе все же нельзя. Для более легкого понимания одни и те же формулы встречаются несколько раз с небольшими изменениями, но комментируются при этом с разных точек зрения, разными словами.

Квантовая механика — это, пожалуй, самая удивительная область физики. В этом плане конкурировать с ней может, видимо, лишь теория гравитации. Однако в отличие от гравитации квантовая механика имеет множество технических приложений. Современные технологии в значительной степени базируются на закономерностях квантовой механики.

Мы попытаемся, не слишком вдаваясь в технические (точнее, математические) детали, показать, в чем существенное различие между квантовой и классической механикой и почему открытие и формулировка квантовомеханических закономерностей потребовали такой длительной и напряженной работы многих блестящих исследователей.

Период возникновения квантовой механики неоднократно освещался в литературе. Об этом периоде имеется большое число книг и историко-научного, и биографического характера, в том числе написанных самими участниками событий или непосредственными свидетелями их работы. Для того, чтобы получить живое представление о том, как все это происходило, следует обратиться к этой литературе. Мы же ограничимся тем, что проследим за «историей идей», за тем, как в трудной борьбе со старыми, классическими представлениями рождались основные принципы квантовой механики. Это будет содержанием части I.

Проблемы, обсуждаемые в части II, вырастают из той части квантовой механики, которая описывает наблюдение квантовых систем и называется квантовой теорией измерений. В части II сначала дается некоторое понятие о парадоксах, связанных с квантовым измерением, потом — о попытках разрешить эти парадоксы, и наконец — о том, как из этого вырастет новая теория сознания.

Несмотря на существенный прогресс, достигнутый в квантовой теории измерений в последние десятилетия, эта теория не может считаться завершенной до сих пор. Примирение между квантовым характером измеряемой системы и чисто классическим поведением измерительного прибора (и наблю-

дателя) достигается в ней лишь на прагматическом уровне. Этого вполне достаточно для расчетов, поэтому квантовая теория измерений удовлетворяет практическим требованиям квантовой механики. Однако отношения между квантовым характером измеряемой системы и классическим характером информации о системе, доступной наблюдателю, нельзя считать до конца ясными с теоретической точки зрения.

Это проявляется в том, что именно в квантовой теории измерений наиболее отчетливо видны парадоксальные черты квантовой механики, которые порождаются контринтуитивным поведением микроскопических систем. Можно сказать, что в квантовой теории измерений концентрируются концептуальные проблемы квантовой механики. Эти проблемы обсуждаются в части II без сколько-нибудь сложного математического формализма. Упор делается на понимании сути проблем, а главное — на следствиях, которые вытекают из этого понимания.

Уже то, что квантовая механика привела к серьезному техническому прогрессу, означает, что эта область науки давно вышла из стадии становления и стала надежным рабочим инструментом. Ее законы не подвергаются сомнению, так как не обнаружено никаких экспериментальных фактов, противоречащих им. Тем более удивительно, что со времени возникновения квантовой механики она вызывала вопросы, на которые не удавалось и до сих пор не удается ответить вполне удовлетворительно. Обычно эти трудности формулируются как «проблема измерения». Общепринятого решения квантово-механической проблемы измерения не существует до сих пор.

Такое положение в науке уникально. Теория существует уже более ста лет, получила полное подтверждение и отлично работает, позволяя решать сложнейшие практические задачи. И тем не менее в ней есть концептуальные проблемы, возникшие с самого начала и не решенные до сих пор.

Вот это странное положение и является главным предметом обсуждения во второй части книги. Осветив некоторые

положения квантовой механики, отличающие ее от классической физики и ведущие в конечном счете к «проблеме измерения», мы обсудим так называемую *многомировую интерпретацию* квантовой механики, которая предложена в 1957 году Эвереттом и является наиболее перспективным направлением в поисках решения проблемы измерения.

Вывод, следующий из этого обсуждения, является еще более удивительным, чем тот путь, который к нему приводит. Оказывается, концептуальные трудности квантовой механики можно надеяться преодолеть только в том случае, если квантовая теория измерений, кроме измеряемой системы и измерительной аппаратуры, будет непосредственно включать также сознание наблюдателя (экспериментатора).

А за этим следует нечто еще более удивительное. При включении сознания наблюдателя в квантовую теорию возникает возможность по-новому взглянуть на само сознание. Хотя эту возможность нельзя считать уже реализованной, можно тем не менее проследить некоторые главные следствия, к которым может привести этот шаг.

Можно надеяться, что теория сознания, учитывающая выводы квантовой теории измерений, поможет понять необычные свойства сознания, которые проявляются, когда человек находится в особом состоянии, похожем на сон или транс, на границе между сознательным и бессознательным. Если такое понимание действительно будет достигнуто, то это приведет к непосредственному контакту между физикой и психологией и даст шанс преодолеть барьер, существующий между естественными науками и гуманитарными методами познания действительности.

0.2. Квантовая механика (часть I)

Что такое *квантовая механика*? Чем она отличается от классической? Известно, что это теория, которой подчиняются *микроскопические системы*, например, атомы. Многие зна-

ют также об одной характерной черте квантовой механики, которая запечатлелась в ее названии: согласно квантовой механике, в некоторых физических системах *энергия квантуется*, то есть может быть равна одному из некоторого предопределенного дискретного множества чисел (скажем, $E_1, E_2, \dots$), но не может иметь никакого иного значения (например, не может иметь значение между E_1 и E_2). Множество разрешенных значений энергии называется спектром энергий данной системы.

Сказанное относится, например, к атому водорода.¹ Энергия атома водорода не может быть любой. Она может принимать лишь значения из некоторого дискретного множества. Другими словами, спектр энергий атома водорода является дискретным, состоит из отдельных изолированных точек, называемых *уровнями энергии* и обозначаемых обычно E_k (предположение Нильса Бора о дискретности «разрешенных» уровней энергии послужило отправной точкой для построения в 1913 году его квантовой модели атома). Любые значения энергии между этими точками (уровнями) запрещены. Если в каком-то процессе энергия атома водорода, например, увеличивается, то это увеличение происходит не непрерывно, а конечными порциями или квантами. Атом, находящийся на уровне E_k , получает сразу конечную энергию, равную $\Delta E = E_{k'} - E_k$, переходя при этом на другой энергетический уровень, имеющий энергию $E_{k'} = E_k + \Delta E$.

С этим связана другая особенность квантовой механики. В отличие от классической, она утверждает, что свет (то есть электромагнитное поле) состоит из отдельных неделимых порций, называемых *квантами света* или *фотонами*. Фотоны во многом похожи на элементарные частицы, но движутся всегда с одной и той же скоростью c , называемой скоростью света. Любая другая частица движется всегда со скоростью, меньшей скорости света: $v < c$. Исключением являются

¹ На самом деле и к любому другому атому, но спектр атома водорода устроен наиболее просто, и мы о нем будем специально говорить.

частицы нулевой массы, такие, как нейтрино. Они, как и фотоны, движутся со скоростью света c .

При переходе с одного уровня на другой атом водорода поглощает или излучает квант света (фотон), имеющий энергию, в точности равную разности энергий между уровнями. Если энергия атома увеличилась на ΔE , то это значит, что он поглотил фотон, энергия которого равна $E_{\text{photon}} = \Delta E$. Если энергия атома уменьшается (то есть он переходит с более высокого энергетического уровня на более низкий), то атом, наоборот, излучает фотон соответствующей энергии.

Квантовая механика утверждает, что *энергия фотона жестко связана с его частотой ν* , а именно, $E_{\text{photon}} = h\nu$. Здесь появляется ключевая для квантовой механики величина $h = 6,59 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек, которая называется *постоянной Планка*.² Из предыдущих формул следует, что $\nu = \Delta E/h$. Таким образом, частота света, поглощенного (или излученного) атомом, целиком определяется тем, насколько изменилась энергия атома при переходе с одного уровня на другой, то есть тем, на каком энергетическом уровне атом находился до этого события и на каком он будет находиться после него.

Косвенно с этим связана также еще одна удивительная черта квантовой механики. Свет, представлявшийся в классической физике как электромагнитная волна, оказался в квантовой физике совокупностью фотонов, подобных частицам. Но и наоборот, частицы, такие как электроны, обнаруживают свойства, характерные для волны: они *интерферируют* друг с другом и *дифрагируют* на препятствиях (то есть огибают их). Это свойство частиц дало основание в первые годы называть описывающую их теорию *волновой механикой*, и лишь впоследствии утвердилось название «квантовая механика».

²Вместо h часто используют величину $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек, которая также называется константой Планка. В большинстве случаев более удобно пользоваться константой $\hbar$. Например, через угловую частоту фотона $\omega = 2\pi\nu$ его энергия выражается как $E_{\text{photon}} = \hbar\omega$.

В квантовой механике не только фотон, но и любая элементарная частица проявляет волновые свойства. Квантовая частица является и корпускулой, и волной, тогда как в классической физике эти два типа объектов казались взаимно исключаящими. В этом заключается *корпускулярно-волновой дуализм*, одна из ключевых черт квантовой механики. С ним неразрывно связан и широко известный *принцип неопределенности Гейзенберга*: положение частицы q и ее импульс p не могут быть одновременно точно известны. Погрешности, с которыми они могут быть известны, связаны неравенством $\Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar/2$.

В период, когда квантовая механика возникла и делала свои первые шаги, перечисленные только что черты этой удивительной теории утверждались одна за другой. Каждая из них рождалась как предположение, которое было необходимо либо для того, чтобы объяснить известные экспериментальные факты, либо для того, чтобы связать различные части теории в логически стройное целое. Каждое из этих предположений настолько не соответствовало тому, что физики знали в момент открытия, было настолько неожиданным, что его мог сделать лишь великий ученый, обладавший незаурядной фантазией и научной смелостью. Тем не менее каждый раз обнаруживалось, что странные черты, которыми приходилось наделять материю, необходимы для объяснения экспериментальных фактов, а те предсказания, которые из них следовали, неизменно подтверждались новыми опытами.

Постепенно, усилиями многих ученых, был создан *математический аппарат квантовой механики*, центральными понятиями в котором стали пространство состояний квантовой системы (его элементами являются векторы состояния или, эквивалентно, волновые функции системы) и уравнение Шредингера, описывающее эволюцию состояния системы с течением времени.

В качестве следствий этот математический аппарат приводил к перечисленным чертам квантовой механики, но кроме

того позволял рассчитать любой процесс, в котором участвуют квантовые системы. Теория оказалась способной не только объяснить те экспериментальные факты, которые были известны к моменту ее возникновения, но и те, которые были открыты позднее. А факты эти, как правило, были сами по себе удивительны: например, сверхтекучесть (течение жидкости через капилляры без трения о стенки) или сверхпроводимость (протекание тока без сопротивления).

В наше время многие из типично квантовых явлений стали элементами технологии, привели к созданию приборов (таких, как лазеры, в том числе, полупроводниковые), которые окружают нас в повседневной жизни. Сейчас буквально на наших глазах рождается новая технология, основанная на квантовомеханических закономерностях, называемая квантовой информатикой. Квантовые компьютеры, о которых много писали, — это пример квантово-информационной технологии. Однако кроме этого есть еще квантовая криптография (возможность строить абсолютносекретные линии связи) и квантовая телепортация (пересылка состояния квантовой системы из одной точки в другую).

0.3. Квантовая теория измерений (главы 3 и 4 и приложение А)

Ввиду того, что поведение квантовых систем существенно отличается от привычного для нас поведения классических систем, связь квантовой механики с опытом сама по себе нетривиальна. Корректное описание этой связи оказалось непростой задачей и в конце концов породило отдельную ветвь квантовой механики, названную *квантовой теорией измерений*. В этой теории формулируются закономерности квантовых измерений, то есть измерений при которых сказываются квантовые эффекты, квантовые свойства систем, над которыми производятся измерения. Отличительной чертой квантовой теории измерений является то, что она позволя-

ет дать лишь *вероятностные предсказания* для исхода любого измерения, даже в том случае, если состояние измеряемой системы перед измерением известно абсолютно точно.

Квантовая теория измерений позволяет предсказать результат измерения (точнее — распределение вероятностей по различным результатам измерения), а также состояние, в котором измеряемая система окажется после измерения. Рецепты, позволяющие сделать такие предсказания для любого измерения, были сформулированы еще в 20-е годы XX века, и этим достижением здание квантовой механики было в основном завершено. Однако именно та часть этого здания, которая имела отношение к измерениям, долго еще вызывала чувство неудовлетворенности.

Прежде всего, не так-то легко было привыкнуть к вероятностному характеру предсказаний, которые дает квантовая теория измерений. В течение многих лет продолжались попытки построить теорию (так называемую теорию со *скрытыми параметрами*), которая описывала бы микроскопический мир детерминистически, то есть давала бы точные предсказания. В конце концов было доказано, что теория со скрытыми параметрами, которая бы так же правильно описывала мир, как квантовая механика, существовать не может.

Кроме того, рецепты, ведущие к предсказанию результата измерения, были феноменологическими и оставляли в стороне вопрос о том, что же «на самом деле» происходит, когда микроскопическая измеряемая система приходит в соприкосновение с измерительным прибором. Квантовая теория измерений предписывала считать измеряемую систему квантовой, а прибор — классическим. Предполагалось, что при соприкосновении с классическим прибором квантовая система перестает подчиняться обычному квантовому закону эволюции, описываемому уравнением Шредингера, а меняется скачком согласно особым предписаниям теории измерений. Этот скачок называется редукцией состояния (или коллапсом волновой функции).

Неудовлетворенность таким описанием измерения связана с тем, что прибор, хотя и является макроскопическим, однако состоит из микроскопических атомов, а значит, и сам является, хотя и очень сложной и больших размеров, но все же квантовой системой. Поэтому взаимодействие измеряемой квантовой системы с измерительным прибором должно, казалось бы, подчиняться все тем же законам квантовой механики, в том числе и уравнению Шредингера. Казалось непонятным, как при этом может возникнуть редукция состояния.

В последние десятилетия XX века произошел сдвиг в понимании того, как взаимодействие прибора с измеряемой системой может приводить к тому, что формально описывается феноменологической квантовой теорией измерений. Было показано, что при взаимодействии измеряемой системы с прибором, даже если это взаимодействие рассматривать по обычным законам квантовой механики, то есть с помощью уравнения Шредингера, измеряемая система частично теряет свои специфические квантовые свойства. Такой процесс называли декогеренцией. Если по обычным квантовомеханическим правилам (не включающим постулат редукции) описывать результат декогеренции, то предсказания получатся именно те, которые описываются феноменологической квантовой теорией измерений. Тем самым рецепты, содержащиеся в феноменологической теории, получили объяснение.³

Теория декогеренции означала существенный прогресс в понимании физической природы квантового измерения. И тем не менее, даже с учетом декогеренции квантовая теория измерений вызывала (и вызывает до сих пор) вопросы. Дело в том, что в квантовой механике с момента ее возникновения возникали *парадоксы*, которые не находили в ней своего разрешения, и все они были связаны с описанием измерений. Теория декогеренции объяснила вероятностный харак-

³Основные идеи теории декогеренции были понятны уже отцам-основателям квантовой механики, но не были в достаточной мере восприняты научной общественностью вплоть до последних десятилетий XX века.

тер предсказаний, которые дает квантовая теория измерений, но не объяснила квантово-механические парадоксы. Об этих неразрешенных вопросах квантовой теории измерений говорят обычно как о *проблеме измерения*.

Парадоксальность квантовых измерений связана с тем, что к ним неприменимо обычное классическое понимание реальности. Это было наглядно продемонстрировано *неравенствами Белла*. Они выводятся в предположении, что справедливо классическое понимание реальности, а именно: при измерении, проведенном над системой, мы получаем *информацию* о свойствах состояния этой системы, но сами эти свойства *реальны*, то есть существовали уже до измерения. Если предположить это, то для вероятностей различных результатов измерений можно вывести некоторые неравенства, названные неравенствами Белла. Однако эти неравенства опровергаются прямыми экспериментами. Это значит, что классическое понимание реальности неприменимо к квантовым (микроскопическим) системам.

Попытки решить проблему измерения привели к тому, что были предложены различные *интерпретации квантовой механики*, которые по-разному связывали между собой теорию и эксперимент. Однако проблема измерения не может считаться решенной до сих пор. При этом надежды на ее решение связаны с тем, чтобы включить сознание наблюдателя непосредственно в описание измерения.

0.4. Роль сознания в квантовом измерении (главы 5, 6 и Заключение)

Наиболее радикальная (и на наш взгляд — наиболее интересная и перспективная) попытка решения проблемы измерения — это *многомировая интерпретация* квантовой механики, предложенная в 1957 году Эвереттом. В этой интерпретации делается попытка решить концептуальные трудности

квантовой механики радикальным образом, изменив привычные взгляды на результат измерения и на понятие *реальности*.

В интерпретации Эверетта предполагается, что при измерении не происходит выбора одного из всех возможных результатов измерения и отбрасывания остальных. Все альтернативные результаты измерения, предсказываемые квантовой механикой, остаются равноправными, но каждый из них реализуется в своем классическом мире, одном из множества параллельно существующих миров (отсюда название — «многомировая интерпретация»). При этом в сознании наблюдателя возникает картина лишь одного из этих миров, или, другими словами, лишь одной из многих классических реальностей. Наблюдатель живет в одном из эвереттовских миров и непосредственно не воспринимает остальные миры. Однако в каждом из миров (в каждой из классических реальностей) живет как бы «двойник» этого наблюдателя. Правильнее сказать, что сознание наблюдателя «разделяется» между эвереттовскими мирами (классическими реальностями).

В чисто техническом плане интерпретация Эверетта ничего не добавляет к квантовой механике, рецепты предсказаний остаются старыми (потому-то это всего лишь новая интерпретация, но не новая квантовая механика). Однако в концептуальном плане эта интерпретация дает новое качество, связывая понятие классической реальности с сознанием наблюдателя и на этой основе решая концептуальные проблемы квантовой механики.

Многое указывает на то, что для решения проблемы измерения необходимо включить в теорию *сознание наблюдателя*. К этому выводу разные исследователи приходили в рамках различных концепций, но особенно естественным этот вывод оказывается в рамках многомировой интерпретации.

Подчеркнем, что хотя выбор конкретных решений проблемы измерения (скажем, интерпретации Эверетта или одного из возможных ее вариантов) содержит некоторый произвол, но общий вывод о необходимости непосредственно включить

сознание наблюдателя в описание измерительных процедур, является, по-видимому, неизбежным. Он следует из того, что все попытки без этого радикального шага решить «проблему измерения», возникшую в квантовой механике восемь десятилетий назад, оказались безуспешными.

Важно, что непосредственное включение сознания в квантовую теорию измерений не только позволяет преодолеть концептуальные трудности квантовой механики, но вместе с тем открывает совершенно неожиданную возможность по-новому взглянуть на сам *феномен сознания*. Это приводит фактически к выходу за рамки физики в обычном понимании этой науки, к непосредственному соприкосновению *физики и психологии* и в более общем плане — естественных наук и гуманитарной сферы познания.

Этот путь может привести к радикальному *расширению теории сознания* и даже — к лучшему пониманию феномена жизни вообще. Вместе с тем появляется возможность объяснить необычные явления, которые так или иначе связаны с работой сознания и которые кажутся таинственными, а иногда и несовместимыми с законами природы.

Такие явления лежат, видимо, в основе всех основных *мировых религий и восточных философий, или учений*. Самым распространенным (по крайней мере среди ученых) взглядом на отношения между религией и наукой является убеждение, что они должны быть абсолютно изолированы друг от друга: религия не может ни опровергнуть, ни подтвердить научные факты, и наоборот, наука не может ни опровергнуть, ни подтвердить догматы религии. Квантовая механика указывает на точку соприкосновения, даже на целую область соприкосновения этих двух сфер человеческого познания. Этой общей областью является сознание.

Вывод, к которому приводит логическое развитие интерпретации Эверетта, состоит в том, что несовместимость некоторых концепций, возникших в гуманитарной сфере, с законами природы, найденными в рамках естественных наук, яв-

ляется лишь кажущейся. Вывод о несовместимости возникает из-за слишком узкого, механистического понимания законов природы. Эти две сферы познания оказываются совместимыми, если не противиться тому, к чему нас упорно толкают сами естественные науки, в частности, физика и ее вершина — квантовая механика. Квантовая механика не позволяет в этом случае ничего доказать в обычном смысле этого слова. Однако тот факт, что без включения сознания не удастся решить возникшую в самой квантовой механике «проблему измерения», подтверждает *необходимость прямого соприкосновения и взаимопроникновения естественнонаучного и гуманитарного способов познания* нашего мира.

В обычном понимании это означает выход за рамки физики и вообще естественных наук. Вместо этого можно сказать, что физика должна перейти к более широкой методологии, явно включив сознание в свои законы. Внутренняя логика развития физики приводит к тому, что принятые ранее узкие рамки стали для нее тесны.

Часть I

Квантовая механика

В этой части книги будет рассказано об истории создания квантовой механики и о некоторых ее приложениях.

Мы проследим, как в начале XX века в напряженной работе и трудных дискуссиях плеяды великих ученых рождались основные идеи теории микромира — квантовой механики. Мы увидим, как постепенно формулировались законы квантового мира: квантование энергии, корпускулярно-волновой дуализм, принцип неопределенности и другие, как шаг за шагом прояснялись чрезвычайно странные черты микрообъектов (атомов, фотонов, электронов, элементарных частиц), приводящие к неожиданному их поведению и несовместимые с привычной классической интуицией.

На нескольких примерах будет показано, какие необычные приложения квантовой механики оказались в конце концов возможны в результате странных свойств микромира. Это сверхпроводимость и сверхтекучесть, лазеры, «искусственные атомы» (квантовые точки) и другие полупроводниковые структуры, сверхпрочные нити и другие объекты «нанотехнологии». Это также родившаяся в конце XX века квантовая информатика, которая уже сейчас позволяет с абсолютной надежностью передавать секретные сообщения и телепортировать состояния материальных объектов (пока простейших) и которая, возможно, позволит создать квантовые компьютеры, по быстродействию неизмеримо превосходящие любые компьютеры, построенные на классических принципах.

Математика более сложная, чем в школьном курсе, в основном тексте применяться не будет. Однако для тех, кто интересуется квантовой механикой более серьезно, в приложениях А и В будут приведены более сложные (но зато и более адекватные) формулировки некоторых вопросов квантовой механики, прежде всего связанных с квантовой теорией измерений.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

В этой главе мы расскажем об истории возникновения квантовой механики. При этом читатель познакомится с некоторыми из основных ее положений (квантование энергии, кванты света, атомные спектры, принцип неопределенности, квантовые корреляции) в той последовательности, в которой они появлялись в науке и в той форме, в которой они впервые были сформулированы. Такой подход имеет свои минусы, но и свои плюсы. Конечно, к настоящему времени возник мощный математический аппарат квантовой механики, который позволяет описать ее ключевые положения более последовательно и систематически. Однако этот формализм сложен и требует больших усилий для его освоения, что вряд ли оправдано для читателей данной книги (некоторое представление об этом аппарате можно получить из приложения А).

Кроме того, та первоначальная форма, в которой возникли основные идеи квантовой механики, интересна сама по себе: ведь именно в этой сравнительно простой и максимально наглядной форме научное сообщество смогло (и то не сразу) эти непростые идеи осмыслить, проверить и в конце концов принять. В современной формулировке эти положения про-

сто не могли бы возникнуть, даже в головах гениальных создателей квантовой механики. Потребовались десятилетия упорного труда трех поколений физиков, чтобы современная форма квантовой механики и ее обобщений, как великолепное и мощное дерево, могла вырасти из зерен, посеянных отцами-основателями. Но никакой труд не мог бы привести к этому результату, если бы зерна уже не содержали, пусть в скрытой форме, все огромное идейное богатство будущей теории.

В истории возникновения квантовой механики или, скорее, в истории возникновения основных ее идей, немалый интерес представляет и человеческий аспект. Какие люди и какими путями пришли к тем радикально новым идеям, на которых базируется квантовая механика? Почему это им удалось? Что помогло им сделать, казалось бы, невозможное и выйти за рамки привычных представлений классической физики? В этом, между прочим, есть какая-то загадка, потому что вряд ли в истории науки был другой период, когда на небольшом пространстве одновременно жили, работали и делали удивительные открытия гениальные ученые в таком количестве. Один из них, Поль Дирак, назвал одну из своих книг «Воспоминания о необычайной эпохе» (Москва, «Наука», 1990). И эта эпоха была поистине необычайной.

Разумеется, об истории возникновения и становления квантовой механики написано множество книг, и наше изложение этой истории никак не может претендовать на полноту воссоздаваемой картины. Но, тем не менее, сравнительно компактное изложение *истории идей* квантовой механики, выполненное к тому же с учетом проблем, стоящих перед ней именно сейчас, будет, как мы надеемся, интересно многим. Кроме того, вспомнить историю создания квантовой механики полезно для того, чтобы у читателя возник настрой, облегчающий для него восприятие второй части книги. В этой части речь будет идти о поисках ответов на те проблемы в сфере квантовой механики, которые еще остаются нерешенными. Речь идет о кон-

цептуальных проблемах, решение которых требует не столько сложной математики, сколько качественно новых идей.

История квантовой механики еще не закончилась, она продолжается на наших глазах, и есть основания полагать, что эта история еще преподнесет нам неожиданные сюрпризы. И сейчас, как на заре квантовой механики, речь идет о новых идеях, которые противоречат нашей интуиции. Поэтому для поиска и последующего освоения этих идей нужны методы, в чем-то подобные тем, которые применялись гениальными первооткрывателями квантовой механики. Самое время еще раз вспомнить, как они справлялись со стоящими перед ними проблемами, как преодолевали психологические барьеры, мешающие увидеть знакомые вещи по-новому.

1.1. Квантование энергии (Планк, 1900)

Самая парадоксальная физическая теория, квантовая механика и началась парадоксально: фактически открывший существование квантов немецкий физик Макс Планк считал, что предложил лишь «удачно угаданную промежуточную формулу». Более того, он не поверил в реальное существование квантов даже после того, как Эйнштейн убедительно доказал их реальность, анализируя фотоэффект (об этом будет рассказано в следующем разделе).

Работа Планка, фактически открывшая эпоху квантовой механики, была сделана в момент рождения XX века, в конце 1900 года. Макс Планк, в это время уже профессор Берлинского университета и постоянный член Прусской Академии Наук, практически всю жизнь работал над вторым законом *термодинамики*¹ и различными его следствиями. В предыдущие годы его основной задачей были попытки объяснить рас-

¹Термодинамика — наука о тепловых явлениях. Вторым закон (или второе начало) термодинамики гласит, что тепловые процессы необратимы, теплота всегда переходит от более горячего тела к более холодному, так что со временем устанавливается тепловое равновесие.



Рис. 1.1. Замкнутая полость может служить моделью абсолютно черного тела, так как попадающее в нее излучение после многократного отражения от стенок поглощается практически полностью. Макс Планк изучал распределение по энергиям в излучении черного тела, то есть внутри такой полости.

пределение по энергиям (спектр) светового излучения, находящегося в равновесии при определенной температуре. Такое излучение испускает нагретое до определенной температуры *абсолютно черное тело*, то есть тело, полностью поглощающее излучение, падающее на него извне.

На практике именно такое «чернотельное» распределение устанавливается в любой замкнутой полости (рис. 1.1). Действительно, проникающее в эту полость извне излучение будет многократно отражаться стенками полости, при каждом отражении частично поглощаясь. В конце концов излучение поглощается полностью, так что из полости уже не выходит: полость ведет себя как абсолютно черное тело. Это позволяет экспериментально проверять те формулы для спектра излучения черного тела, которые предлагают теоретики.

К концу 1900 года накопились новые экспериментальные данные по спектральному составу чернотельного излучения, и Планк предложил полуэмпирическую формулу, которая соответствовала бы этим данным. Эксперименты, проводившиеся в предыдущие годы для сравнительно коротких волн, хоро-

шо объяснялись формулой, которая называлась законом Вина. Однако в 1899–1900 годах были проведены эксперименты с более длинными волнами, которые не согласовывались с законом Вина. Формула, предложенная Планком, была более общей: при коротких длинах волн она переходила в закон Вина, а для длинных волн отклонялась от этого закона так, что согласовывалась с новыми экспериментальными данными.

Эксперименты, проводившиеся в последующие годы, показали, что предложенная Планком формула, вошедшая в науку под названием «закон Планка» или *«планковский спектр излучения абсолютно черного тела»*, правильно описывает спектр излучения при любых длинах волн и температурах. Причиной этого совпадения оказалось то, что в этой формуле впервые были учтены *квантовые свойства излучения*.

Сначала эта формула была опубликована в короткой заметке в октябре 1900 года как полуэмпирическая (то есть соответствующая эксперименту, но не имеющая полного теоретического обоснования). Однако затем Планк задался целью обосновать ее теоретически. С огромным упорством он пытался сделать это, оставаясь на позициях классической физики, но это ему не удалось. И вот 14 декабря 1900 года он выступил на заседании Немецкого физического общества с докладом «К теории распределения энергии излучения нормального спектра», в котором обосновывал свою формулу ценой введения квантов энергии. Фактически это было рождением квантовой механики. Впоследствии, в 1918 году, Макс Планк получил за эту работу Нобелевскую премию.

Что же именно сделал Планк? С математической точки зрения это была лишь замена непрерывного множества значений энергии дискретным множеством. Согласно предположению Планка порции энергии, которой излучение обменивается со стенками полости, не могут быть любыми, а принимают лишь определенные дискретные значения. Если излучение имеет частоту ν , то переданная энергия может принимать лишь значения, кратные $h\nu$, то есть $E = nh\nu$, где $n = 1, 2, 3, \dots$

— целое число. Через h Планк обозначил некоторое число, которое он подобрал так, чтобы получить согласие с экспериментом. Получилось, что $h = 6,59 \cdot 10^{-27}$ эрг-сек. Так появилась знаменитая *постоянная Планка* или константа Планка.² Минимальную порцию энергии $h\nu$ Планк назвал *квантом* (от латинского слова, означающего «сколько»).

Разберемся немного детальнее, как появился квант в работе Планка. В своем исследовании чернотельного излучения Планк опирался прежде всего на термодинамику, а не на более конкретные законы из теории электромагнитного поля. Его целью было исследование второго начала термодинамики в конкретном случае излучения абсолютно черного тела. На определенном этапе он воспользовался статистическим подходом (методом Больцмана), который предполагал разделение энергии на маленькие порции, применение к каждой из этих порций вероятностных законов и последующее суммирование по всем порциям энергии.

В методе Больцмана предполагалось на последней стадии произвести предельный переход к бесконечно малым порциям энергии, так что сумма превращалась в интеграл. Однако Планк заметил, что правильная (то есть соответствующая эксперименту) формула для излучения абсолютно черного тела получается, если не переходить к пределу, а оставить минимальную порцию энергии конечной и равной $h\nu$. Более того, если переходить к пределу, в котором порции энергии сколь угодно малы, то возникает так называемая «ультрафиолетовая катастрофа», то есть интегралы по частоте излучения становятся бесконечными. Если же минимальную порцию оставить конечной и равной $h\nu$, то вместо интеграла остается сумма. При этом не только не возникает никаких бесконечностей, но в результате суммирования получается формула, в точности соответствующая экспериментальным данным.

²Чаще используется величина $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг-сек, которая тоже называется постоянной Планка и связывает квант энергии с угловой частотой $\omega = 2\pi\nu$, так что $h\nu = \hbar\omega$.

Очевидно, что Планк занимался при этом не чем иным, как подгонкой. Метод Больцмана, который был теоретически обоснован, он произвольно изменил так, чтобы получался правильный (то есть соответствующий эксперименту) ответ. Смысл этого изменения был еще не ясен.

Луи де Бройль пишет в своей книге «По тропам науки»³: «Предположив, что в веществе существуют электроны, способные совершать гармонические колебания с частотой ν около положения равновесия, Планк допускает, что электроны эти могут отдавать или заимствовать энергию лишь в форме конечных количеств, равных $h\nu$ ». Таким образом, Планк в своей работе предположил, что электроны могут обмениваться энергией с излучением лишь дискретными порциями, квантами. Однако он не предполагал, что сама энергия излучения состоит из таких порций. Энергия излучения могла иметь любое значение, мысль об ее «квантовании» еще не возникала. Лишь на пять лет позднее, в 1905 году, Эйнштейн понял, что и само излучение квантовано, то есть существует лишь в форме световых квантов, фотонов, с энергией $h\nu$.

Сам Планк относился к своему выводу не как к великому открытию в физике (каким этот вывод был на самом деле), а как к математическому приему, который оказался удачным, но физическая причина эффективности которого не ясна. Более того, он посвятил многие годы попыткам получить те же результаты для спектра излучения, не вводя квантования энергии. Разумеется, это нисколько не умаляет его заслуги. Скорее наоборот, подчеркивает достоинства, позволившие ему преодолеть трудности, всегда возникающие перед первооткрывателем чего-то качественно нового. Первооткрывателю нужна изрядная смелость, чтобы не упустить это новое, и Макс Планк такую смелость продемонстрировал.

Макс Планк, увидев, что вывести «правильную» формулу удастся только если не переходить к пределу непрерывной

³Пер. с фр.. Изд-во иностр. лит., 1962.

энергии, мог посчитать такое доказательство просто не имеющим смысла и не опубликовать его: ведь переход к пределу был стандартным приемом, который считался абсолютно необходимым. Вот этой катастрофической ошибки ему удалось избежать, и это значит, что его интуиция была достаточно сильна. Он смог сделать первый, быть может самый трудный, шаг в создании квантовой механики.

Каждый ученый привыкает думать в рамках некоторой системы взглядов (как говорят, в рамках определенной *парадигмы*), которая в течение долгого времени приводила к выводам, подтверждавшимся экспериментами, и тем самым доказала свою истинность. Очень трудно бывает выйти за пределы этой системы взглядов, когда необходимость такого выхода назревает (например, когда ставятся новые эксперименты, которые не удастся объяснить в рамках старой парадигмы). Часто первые такие эксперименты, указывающие на недостаточность устоявшихся взглядов, принимают за ошибки и просто отбрасывают. Увидеть и принять качественно новое в науке могут далеко не все ученые.

Предположим, исследователю все же удалось преодолеть психологические трудности, понять, что следует отказаться от привычной для него и до сих пор безотказно действовавшей системы представлений, и ввести в эту систему нечто качественно новое. И в этом случае новые результаты он пытается сформулировать на языке, по возможности близком к привычному, приспособленному к старой парадигме. Поэтому формулировки новых результатов, которые дают этим результатам их первооткрыватели, часто бывают несколько искусственными и сопровождаются оговорками. Это неизбежно и несколько не умаляет заслуг первооткрывателя и важности открытия.

При переходе к новой парадигме гораздо легче бывает тем, кто идет по следам первооткрывателя. Они постепенно осознают появление новой парадигмы и разрабатывают соответствующий язык. В конце концов те результаты, которые в

своей первоначальной формулировке выглядели странно и неестественно, удастся сформулировать четко и просто. Этим завершается переход к новой парадигме. Для науки отшлифовка нового языка абсолютно необходима, потому что облегчает последующие шаги, которые делаются уже в рамках новой парадигмы.

Часто работа по отшлифовке новой парадигмы сама требует рискованных шагов, связанных с введением качественно новых понятий, что невозможно без большой интуиции и смелости мышления. Так, следующий шаг в создании квантовой механики был сделан Альбертом Эйнштейном уже вслед за Планком, но тем не менее этот второй шаг сам по себе тоже оказался важнейшим открытием. Если Планк ввел квантование в процессе передачи энергии от электронов к излучению, то Эйнштейн показал, что само излучение состоит из материальных квантов, фотонов. Другими словами, от квантования переданной энергии он перешел к квантованию материи (в данном случае — электромагнитного поля). Посмотрим, как это происходило.

1.2. Фотоны (Эйнштейн, 1905)

Когда в 1901 году работа Планка, содержащая квантование энергии, была опубликована, Альберт Эйнштейн в возрасте двадцати одного года, окончив политехнический институт, безуспешно искал работу. Получив наконец место в Швейцарском патентном бюро, он наряду с работой в бюро (где он анализировал патентные заявки) занялся несколькими проблемами теоретической физики. В итоге в 1905 году Эйнштейн получил три чрезвычайно важных результата в трех совершенно не связанных друг с другом областях физики. В честь 100-летия этого тройного открытия ЮНЕСКО объявило 2005 год годом физики.

Одной из проблем, над которыми работал в это время Эйнштейн, была попытка вывода термодинамических законов из

вероятностного описания молекулярного движения. Это направление привело его к созданию в 1905 году теории *броуновского движения*.⁴ Еще одна проблема, издавна занимавшая Эйнштейна, была связана с движением световой волны. Согласно опытам Майкельсона–Морли скорость движения фронта такой волны (скорость света) не зависит от скорости движения наблюдателя. Это кажется невозможным ввиду известного закона сложения скоростей. Тем более интересно было для Эйнштейна понять, как это может быть. Размышления над этой проблемой заняли много лет, но результатом стала знаменитая *специальная теория относительности*, в которой из единственного постулата о постоянстве скорости света не только выводился обобщенный закон сложения скоростей, но и все остальные законы механики обобщались на случай движений с высокими скоростями. Эта теория была опубликована Эйнштейном в том же 1905 году.

В том же замечательном (для Эйнштейна и для физики) 1905 году им была решена еще одна проблема, на которой мы остановимся подробнее. Это была задача построения теории *фотоэффекта*. Ее решение Эйнштейном было отмечено Нобелевской премией 1921 года. Это решение представляло собой следующий (после работы Планка) шаг в построении квантовой теории.

К вопросу о фотоэффекте Эйнштейн пришел после тщательного анализа работы Планка по излучению абсолютно черного тела. Рассмотрев этот процесс различными способами, он вслед за Планком убедился, что излучение и поглощение энергии излучения должно происходить квантами (иначе не только не получается согласия с экспериментом, но и возникает ультрафиолетовая катастрофа, то есть интегралы расходятся при высоких частотах). Эйнштейн, однако, задал следующий вопрос: а не может ли быть, что само излучение со-

⁴Броуновское движение — это хаотическое движение маленькой частички, которая погружена в жидкость и испытывает удары со стороны молекул этой жидкости.

стоит из квантов. Он начал анализировать различные эксперименты со светом, проведенные к тому времени. Целью было выяснить, нет ли в экспериментальных данных прямых указаний на квантование света. Это привело его к работам Ленарда, наблюдавшего явление фотоэффекта.

Явление фотоэлектрического эффекта, или фотоэффекта, было открыто в 1888 году профессором Московского университета А. Г. Столетовым. Оно заключается в том, что при освещении металла пространство вблизи его поверхности становится электропроводящим.

Немецкий физик Филипп Ленарт доказал, что появляющаяся в фотоэффекте электропроводность объясняется тем, что под действием падающего на поверхность металла света из металла выбиваются электроны. Именно наличие электронов не только внутри металла, но и вне его, вблизи его поверхности, приводит к проводимости. Ленарт освещал металл монохроматическим световым лучом и изучал зависимость эффекта от частоты этого света. В частности, он изучал энергию электронов, выбитых из металла, и обнаружил зависимость этой энергии от частоты падающего света. Это был сюрприз. Зависимость энергии от частоты казалась странной и не поддавалась объяснению.

Действительно, естественно было ожидать, что энергия выбитых из металла электронов тем больше, чем больше интенсивность падающего света. Так, при приближении источника света к поверхности металла следовало ожидать увеличения энергии выбитых электронов. Однако этого увеличения не наблюдалось. При приближении источника к поверхности металла электронов вылетало больше, но их энергия оставалась прежней. Зато энергия выбитых электронов увеличивалась, если, при той же интенсивности светового потока, увеличивалась частота падающего света (то есть уменьшалась длина его волны).

Эти экспериментально наблюдаемые черты фотоэффекта, а именно — зависимость энергии (а значит, и скорости) фо-

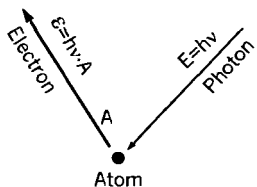


Рис. 1.2. Фотоэффект. Фотон, имеющий энергию $E = h\nu$, сталкиваясь с атомом, выбивает из него электрон, отдавая ему свою энергию. Для того, чтобы вылететь из металла, электрон тратит часть энергии A (работа выхода), так что после вылета его энергия равна $\epsilon = h\nu - A$.

тоэлектрон от частоты падающего света, невозможно было объяснить на основе представления о волновой природе света. Но приняв гипотезу о квантовании света, Эйнштейн нашел им простое и естественное объяснение.

Основываясь на результатах Планка, он предположил, что монохроматический свет частоты ν состоит из квантов, имеющих энергию $E = h\nu$. Если такой квант поглощается одним из атомов, из которых состоит металл (рис. 1.2), то энергия атома настолько увеличивается, что один из электронов выбрасывается из атома и может вообще вылететь из металла. При этом электрону сообщается энергия E , равная энергии фотона. Часть полученной энергии электрон тратит на то, чтобы совершить работу, преодолевая силы, удерживающие его в металле. Эта часть энергии (обозначим ее A) зависит от того, какой металл используется в эксперименте, и называется работой выхода. Следовательно, выброшенный из металла электрон имеет еще энергию $\epsilon = E - A$. Выражая энергию кванта через частоту, $E = h\nu$, получаем для энергии фотоэлектрона величину

$$\epsilon = h\nu - A.$$

Мы видим, что эта энергия зависит от частоты света ν , но совершенно не зависит от его интенсивности.

Энергия вылетевшего электрона — это его кинетическая энергия, $\epsilon = mv^2/2$ (здесь v — скорость, а m — масса электрона). Отсюда для скорости фотоэлектрона получаем формулу

$$v = \sqrt{\frac{2\epsilon}{m}} = \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m}}.$$

Эта скорость тоже зависит лишь от частоты падающего света (и кроме этого — от работы выхода A).

Эти простые выражения для энергии и скорости фотоэлектронов, предсказанные Эйнштейном на основе гипотезы световых квантов, прекрасно согласовывались с экспериментальными данными. Тем самым было получено первое прямое доказательство существования световых квантов. Позднее они были названы *фотонами*.

Постепенно представление о свете как множестве фотонов было признано научным сообществом и стало основой для расчета всех процессов, в которых проявляются квантовые свойства света и вообще электромагнитного поля. В то же время представление о волновой природе света остается верным приближенно, в ситуациях, когда его квантовые свойства влияют на процесс незначительно. Для этого процесс должен включать огромное количество фотонов очень малой энергии (а значит, — малой частоты). В этом случае поведение всей этой совокупности фотонов хорошо описывается классическим электромагнитным полем. С течением времени для описания поведения электромагнитного поля был разработан математический аппарат, названный *квантовой электродинамикой*, который адекватно описывает поведение этого поля во всех ситуациях, давая в предельных случаях простую картину непрерывного классического поля или, наоборот, дискретных (частицеподобных) фотонов.

1.3. Уровни энергии атома (Бор, 1913)

Следующим шагом в построении квантовой механики стала модель атома, предложенная в 1913 году великим датским физиком Нильсом Бором и объяснившая спектры излучения, испускаемого атомами. Работа Бора была отмечена Нобелевской премией в 1922 году.

Бор начал работу над проблемой атомных спектров в возрасте двадцати пяти лет, находясь на стажировке в Кавендишской лаборатории в Манчестере (Англия) у знаменитого Резерфорда. Как раз в этот период Эрнст Резерфорд предложил и экспериментально (наблюдениями рассеяния альфа-частиц на атомах) обосновал планетарную модель атома, в которой отрицательно заряженные электроны вращаются вокруг положительного ядра по круговым или эллиптическим орбитам. В творческой атмосфере Кавендишской лаборатории родились первые идеи Бора, касающиеся квантовой модели атома. Заканчивал эту модель он уже в Копенгагене, куда вернулся весной 1912 года.

Необходимость новой модели атома вызывалась прежде всего тем, что планетарная модель не объясняла его стабильности. Согласно существовавшей на тот момент классической теории электромагнитного поля электроны не должны были бы вращаться вокруг положительного ядра по круговым или эллиптическим орбитам сколько-нибудь долго. Ведь вращающаяся заряженная частица излучает электромагнитные волны и посредством этого излучения теряет энергию. Значит, если бы электрон подчинялся этой теории, скорость его движения вокруг ядра, а вместе с ней и радиус орбиты, должны были бы быстро уменьшаться. Орбита в этом случае должна быть не круговой или эллиптической, а спиральной, и очень скоро электрон, полностью потеряв свою энергию, должен упасть на ядро.

Однако известно, что атомы стабильны, а благодаря опытам Резерфорда известно, что размеры ядра очень малы по

сравнению с размерами той области, в которой находятся электроны, что можно объяснить только планетарной моделью. Возникает противоречие, разрешить которое, казалось бы, невозможно.

Пытаясь найти выход, Бор обратился к опыту Планка, который, введя квантование энергии, сумел построить удовлетворительную теорию излучения и в частности избавился от ультрафиолетовой катастрофы. Нельзя ли подобным же образом избавиться и от трудностей планетарной модели атома? Результаты Планка и Эйнштейна не были еще общепризнанными, но Бор считал, что они имеют большое будущее, поэтому стал искать решение задачи о модели атома именно в этом направлении. Он принял во внимание, что неразрешимое противоречие возникает в том случае, если к планетарной модели атома применяются законы обычной классической физики. Значит, можно надеяться, что это противоречие будет разрешено в той новой физике, которая должна (как верил Бор) вырасти из работ Планка и Эйнштейна.

Трудность, конечно, состояла в том, что этой новой физики еще не было, а известны были лишь два ее фрагмента, найденные Планком и Эйнштейном. Чтобы справиться с этой трудностью, Бор опирался на очевидное обстоятельство, состоящее в том, что даже при переходе к новой физике, старая (классическая) физика должна остаться справедливой в некоторой области параметров. Например, формула Планка в области больших длин волн (низких частот) находится в согласии с классической физикой. Точно так же, по мнению Бора, новая модель атома, которую он искал, должна была совпадать с обычной планетарной моделью атома в той области параметров, в которой последняя не противоречит законам классической физики.

Эта стратегия долгое время не давала конкретного результата, несмотря на то, что на последнем этапе Бор думал о модели атома практически непрерывно. Но весной 1913 года наступило неожиданное прозрение в момент, когда он на-

ткнулся на простую эмпирическую формулу, описывающую одну из серий спектральных линий атома водорода — формулу Бальмера. Вот что это значит.

Частота излучения любого атома не может быть произвольной. Для атомов данного элемента (например, водорода) имеется дискретный набор частот, и частота излучения этого атома обязательно совпадает с одной из этих частот. Эти частоты образуют дискретный спектр атома. Вместо частоты ν излучение можно характеризовать длиной волны $\lambda = c/\nu$ (где c — скорость света), так что можно говорить либо о спектре частот, либо о спектре длин волн данного атома.

Для большинства атомов спектр имеет сложную структуру и не может быть описан простыми формулами. Но спектр атома водорода является сравнительно простым (это объясняется очень простой структурой самого атома: он состоит из единственного электрона, вращающегося вокруг положительного ядра). Его можно разделить на серии, для каждой из них имеется очень простая формула. Одна из серий называется серией Бальмера, и принадлежащие к этой серии спектральные частоты ν_n , $n = 2, 4, 5, \dots$ равны

$$\nu_n = cR \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Здесь $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек — скорость света, $R = 1,1 \cdot 10^5$ см $^{-1}$ — эмпирически определенное так называемое число Ридберга. Вот эта формула и помогла Нильсу Бору проникнуть в тайну атомных спектров.

Бор понял, что эту формулу можно тождественно переписать, введя в нее постоянную Планка. После такого переписывания формула приняла вид $h\nu_n = E_n - E_2$, где $E_n = -chR/n^2$ — фиксированный набор энергий. В таком виде формулу можно было интерпретировать с позиций квантовой теории. Для этого достаточно было предположить, что до излучения фотона атом водорода имел энергию E_n , а после излучения — энергию E_2 . В таком случае при излучении фотона атом те-

ряет энергию, равную $E_n - E_2$. Значит, именно такой энергией обладает излученный фотон, то есть эта разность должна быть равна $h\nu_n$.

Все становится ясным, если предположить, что энергия атома не может принимать никаких значений за исключением E_n , то есть *энергия атома квантуется*. Поскольку квантование энергии излучения было для Бора уже установленным фактом, квантование энергии атома казалось естественным. Оставалось лишь одно: выяснить, чем определяются разрешенные значения энергии, то есть почему $E_n = -chR/n^2$. Бор блестяще решил и эту задачу, предложив свой знаменитый *постулат квантования*. Тем самым был сделан огромный шаг в построении квантовой теории.

Давайте уточним детали этой схемы рассуждений.

Первый шаг Бора состоял в том, что число Ридберга было выражено через мировые константы (включая постоянную Планка h , массу m и заряд e электрона):

$$R = \frac{2\pi^2 me^4}{ch^3}.$$

После этого Бор смог переписать энергию фотона $h\nu_n$, соответствующую частоте ν_n из серии Бальмера, в виде разности двух энергий:

$$h\nu_n = E_n - E_2, \quad \text{где} \quad E_n = -\frac{2\pi^2 me^4}{n^2 \hbar^2} = -\frac{me^4}{2n^2 \hbar^2}$$

(напомним, что $\hbar = h/2\pi$).

Переписав таким образом формулу для серии Бальмера, Бор ввел два постулата, которые были вполне естественны в рамках теории квантов и из которых немедленно следовала общая структура этой формулы. Согласно *первому постулату Бора*, существуют стационарные состояния атома, в которых он не излучает и которые характеризуются дискретным набором «разрешенных» энергий. Согласно *второму постулату*, атом испускает электромагнитное излучение опре-

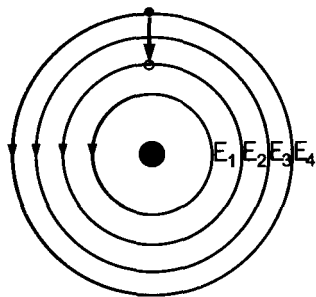


Рис. 1.3. Модель атома, предложенная Бором. Электрон сколь угодно долго может находиться на любой из стационарных орбит, соответствующих определенным уровням энергии E_n . При переходе между двумя уровнями E' и E'' испускается квант света, энергия которого $h\nu$ равна разности энергий этих уровней $E' - E''$. На рисунке — переход между уровнями E_4 и E_2 , соответствующий второй линии серии Бальмера.

деленной частоты ν , когда он переходит с одного разрешенного уровня E' на другой E'' . При этом испускается квант излучения с энергией, равной разности энергий этих двух уровней: $h\nu = E' - E''$ (см. рис. 1.3).

Согласно формуле для серии Бальмера, переписанной Бором в удобном для него виде, энергия кванта излучения $h\nu$ равна разности двух энергий, E_n и E_2 , одна из которых принимает дискретные значения, а вторая вообще фиксирована. Ясно, что это можно трактовать как испускание кванта при переходе атома с уровня энергии E_n на уровень E_2 .

После этого оставалось лишь объяснить, чем определяется энергия разрешенных уровней и почему она оказалась равной E_n . Этого Бор достиг, введя *третий постулат*, названный *постулатом квантования Бора*. Согласно этому постулату, момент вращения электрона при нахождении его на стационарной орбите должен быть кратен постоянной Планка: $mvr = n\hbar$, где v — скорость движения по орбите, r — ее ра-

диус и $\hbar = h/2\pi$ — постоянная Планка (орбита предполагается круговой). Кроме этого, следует учесть, что отрицательный электрон удерживается на орбите силой притяжения его к положительному ядру (заряд которого по величине равен заряду электрона) $f = e^2/r^2$ и эта сила создает центростремительное ускорение $w = v^2/r$. Тогда для радиуса стационарной орбиты и скорости движения электрона по этой орбите получаются два уравнения: выписанное выше условие квантования и уравнение Ньютона $mw = f$, выражающее ускорение через силу:

$$mvr = n\hbar, \quad \frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}.$$

Из этой системы уравнений находятся как радиус стационарной орбиты, так и скорость движения электрона по этой орбите:

$$v_n = \frac{e^2}{n\hbar}, \quad r_n = \frac{n^2\hbar^2}{me^2} = n^2 \cdot a_0.$$

Здесь через $a_0 = \hbar^2/me^2 = 0,53 \cdot 10^{-8}$ см обозначен так называемый *боровский радиус*, то есть радиус ближайшей к ядру стационарной орбиты. Наконец, легко вычисляется и энергия электрона на стационарной орбите. Она равна сумме кинетической и потенциальной (электростатической) энергий:

$$E_n = \frac{mv_n^2}{2} - \frac{e^2}{r_n} = -\frac{e^2}{2r_n} = -\frac{me^4}{2n^2\hbar^2},$$

что совпадает с величиной E_n , введенной ранее эмпирически. Так энергии стационарных уровней, а с ними и спектр атома водорода, были выведены теоретически из постулатов Бора.

Тем самым теория квантов была расширена так, что она включала боровскую модель атома водорода. Приведенные соображения объясняют частоты спектральных линий не только бальмеровской серии атома водорода, которая была взята в рассуждениях Бора в качестве отправного момента. Эта серия соответствует переходу электрона с орбиты, имеющей номер $n = 3, 4, \dots$, на орбиту с номером 2. Объясняются и все другие

серии водородного спектра. Так, серия Лаймана, соответствующая переходу с уровней $n = 2, 3, \dots$ на уровень с номером 1, соответствует частотам

$$\nu_n = \frac{E_n - E_1}{h} = cR \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Однако с объяснением спектров других атомов дело обстояло сложнее. Сложности возникали из-за того, что эти атомы включали более одного электрона. Бор не справился, например, с объяснением того, что в многоэлектронном атоме на первом энергетическом уровне обязательно оказывается два электрона, на втором — обязательно восемь, и так далее. Эту трудность в 1924–1925 годах преодолел молодой физик Вольфганг Паули. Он ввел так называемый *принцип запрета* (часто его называют *принципом Паули*), состоящий в том, что два электрона не могут находиться в одном и том же состоянии, например, двигаться по одной и той же орбите и иметь одно и то же состояние спина (спин — это «внутренний момент количества движения», не связанный с движением электрона как целого). Как оказалось позднее, принцип запрета справедлив не только для электрона, но и для любой частицы с полуцелым спином (то есть со спином, равным $\hbar/2$, как у электрона, или в нечетное число раз больше). Поэтому он имеет очень широкую область применения. В 1945 году Паули получил за это свое достижение Нобелевскую премию.

Но даже с учетом принципа запрета примененный Бором метод расчета энергетических уровней, и тем самым спектра атомов, для атомов с большим количеством электронов становится технически весьма сложным. Кроме того, он не является универсальным. В современной квантовой теории при вычислении спектров атомов вместо орбит фигурируют волновые функции электронов, которые находятся из решения уравне-

ния Шредингера.⁵ Это определяет спектр энергий, которыми могут обладать электроны в атоме.

Формализм волновых функций является, разумеется, более последовательным, так что постулаты Бора в современной теории уже не нужны. Однако вспомнить о них и проследить их применение, как мы только что сделали, полезно для того, чтобы понять, как отцы-основатели квантовой механики шаг за шагом продвигались к полной теории, угадывая отдельные ее черты и выражая их (пока полной теории еще нет) в наглядных образах. Преимущество наглядных образов перед формальной математической теорией состоит в том, что их легче анализировать при поиске еще неизвестных элементов теории. Без таких (по сути дела промежуточных) наглядных правил, как постулаты квантования Бора, построение современной квантовой теории было бы невозможно. Слишком уж сильно математический формализм квантовой теории отличается от формализма теории классической (мы еще поговорим об этом позднее).

1.4. Корпускулярно-волновой дуализм (де Бройль, 1923)

Одно из самых поразительных отличий квантовой механики — это провозглашаемый ею *корпускулярно-волновой дуализм*. Этим термином обозначается то обстоятельство, что фундаментальные материальные объекты, называемые элементарными частицами, похожи одновременно и на волну, и на точечную частицу (корпускулу). Точнее, они обладают и волновыми, и корпускулярными свойствами, проявляя те или другие в зависимости от того, какие измерения над ними производятся. Странная двойственная природа квантовых объектов обнаруживала себя с самого момента возникновения квантовой механики и была одним из основных психологических

⁵Понятие волновой функции и уравнение для неё (см. приложение А.2) были введены Эрвином Шредингером в 1926 году.

препятствий, которые приходилось преодолевать создателям новой науки.

Макс Планк еще в 1900 году вынужден был ввести минимальные порции (кванты) электромагнитного поля с энергией $E = h\nu$, то есть своего рода «электромагнитные частицы». Однако долгие годы он не мог поверить в их реальность, предпочитая думать о них как об элементах искусственного математического приема.

Следующий шаг в 1905 году сделал Эйнштейн, который, объясняя фотоэффект, рассуждал о квантах электромагнитного поля как о неделимых порциях, которые могут поглощаться лишь целиком, как элементарные частицы (такие, как электрон). Так были выявлены корпускулярные свойства электромагнитного поля. Поскольку волновые его свойства не подлежат сомнению, фактически приходилось признать двойственную природу этого поля.

В 1923–1924 годах Луи де Бройль непосредственно подошел к идее всеобщего корпускулярно-волнового дуализма. Он распространил идею Эйнштейна о двойственной природе электромагнитного поля на вещество. В ряде статей и в своей диссертации де Бройль предположил, что любые материальные частицы (например, электрон) обладают волновыми свойствами. Частице с энергией E и импульсом⁶ p де Бройль сопоставил волну с частотой $\nu = E/h$ и длиной волны $\lambda = h/p$.

Из этого предположения следовало, что все материальные частицы должны в определенных условиях⁷ вести себя так же, как ведут себя волны, то есть обнаруживать явления интерференции (когда волны, имеющие противоположные фазы, гасят друг друга, а при совпадении фаз — взаимно усиливаются) и дифракции (когда они огибают непрозрачные препятствия).

⁶Импульс, или момент количества движения, частицы массы m выражается через ее скорость формулой $p = mv$.

⁷А именно — когда характерные масштабы, характеризующие среду, через которую распространяются частицы, меньше или порядка $\lambda = h/p$.

Волновые свойства электронов были экспериментально обнаружены Джорджем Томсоном уже в 1927 году. Он наблюдал дифракцию электронов при прохождении их через тонкую золотую фольгу. На экране, который фиксировал прошедшие электроны, обнаруживалась картина дифракционных колец, аналогичная той, что бывает при дифракции волн. Зависимость длины волны электрона от его импульса (то есть от скорости) совпала с предсказанной де Бройлем.

Еще раньше, в 1925 году, волновые свойства электронов наблюдал американский физик Клинтон Дэвиссон, который в то время еще не знал теории де Бройля и потому не мог объяснить свои наблюдения. Таким образом, предположение де Бройля было блестяще подтверждено, и в 1929 году он получил за свои работы Нобелевскую премию.

Вместе с гипотезой Эйнштейна о реальности фотонов, теория де Бройля давала симметричную картину. То, что в классической физике представлялось волнами (например, свет), как оказалось, обладает свойствами частиц, и наоборот: то, что казалось частицами, обнаруживало волновые свойства. Выяснилось, что корпускулярные и волновые свойства неотделимы, они сосуществуют друг с другом. В квантовой механике, в отличие от классической, нет непроходимой пропасти между волной и частицей. Напротив, любой фундаментальный материальный объект обладает одновременно как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Другими словами, вся материя обладает *корпускулярно-волновым дуализмом*.

Пожалуй, легче примириться с тем, что электромагнитное (да и любое другое) поле состоит из порций, квантов. Гораздо труднее представить себе, что возможна дифракция или интерференция, скажем, электронов. Наиболее яркой иллюстрацией интерференции электронов является *двухщелевой эксперимент*, который состоит в следующем (рис. 1.4).

Между источником электронов и сцинтилляционным экраном, на котором они детектируются (или фотопленкой), ставится непрозрачный экран с двумя щелями, расстояние меж-

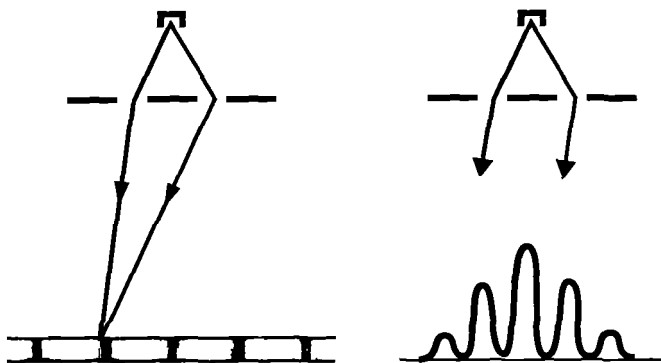


Рис. 1.4. Двухщелевой эксперимент. Электрон, пролетающий через непрозрачный экран с двумя щелями, обнаруживает волновые свойства. При его детектировании возникают интерференционные полосы: направления, в которых электрон обнаруживается с большой вероятностью, чередуются с теми, в которых вероятность мала. На левом рисунке изображена фотопленка, которая засвечивается там, где пролетают электроны. На правом рисунке — график, выражающий зависимость вероятности детектирования электрона от угла (эта зависимость соответствует волновой функции электрона в импульсном представлении).

ду которыми должно быть меньше длины волны электрона $\lambda = h/p$. Тогда на сцинтилляционном экране образуется интерференционная картина, состоящая из перемежающихся светлых и темных полос (то есть полос, куда попадает много электронов, и полос, куда их попадает мало). Это значит, что в некоторых точках экрана (фотопленки) вероятность обнаружить электрон увеличивается, а в других — уменьшается (график в нижней части рис. 1.4 показывает зависимость вероятности от положения точки наблюдения).

Легко понять, почему интерференционная картина должна наблюдаться в том случае, если через щели проходит волна. Если на экран со щелями перпендикулярно к нему падает

плоская волна, то за экраном возникает такая картина, как если бы каждая из щелей стала источником волн, расходящихся во всех направлениях. Поэтому в каждую точку сцинтилляционного экрана (фотопленки) приходит две волны, источником которых являются две щели. В точке наблюдения эти волны складываются. При этом они усиливают друг друга, если расстояния от точки наблюдения до щелей одинаковое или отличается на целое число длин волн (потому что в такую точку обе волны приходят с одной и той же фазой). Если же расстояния отличаются на половину длины волны или величину, в нечетное число раз большую, то две волны гасят друг друга (волны приходят в такую точку в противофазе). В результате на сцинтилляционном экране будут чередоваться полосы, в которых амплитуда волны велика, с полосами, где она мала. Это и есть явление интерференции.

Однако если для волн причина возникающей интерференции ясна (законы сложения волн, имеющих разные фазы), то интерференция электронов кажется неожиданной и странной. По существу она представляет собой экспериментальное доказательство того, что электроны (да и все вообще материальные частицы) обладают волновыми свойствами.

Странность явления, наблюдаемого в двухщелевом эксперименте, усугубляется тем, что интерференционная картина наблюдается даже в том случае, если поток электронов настолько слаб, что одновременно через щели проходит лишь один электрон. Казалось бы, один электрон может пройти либо через первую, либо через вторую щель, но не через обе. Однако если это действительно так, то интерференция не может возникнуть. Тот факт, что она все же возникает, означает, что даже один единственный электрон проходит сразу через обе щели, и при этом его распространение описывается некоторой волной, полем.

Именно такие соображения в 1926 году привели Шредингера к понятию волновой функции — понятию, до сих пор остающемуся ключевым для квантовой механики.

1.5. Матричная (Гейзенберг, 1925) и волновая (Шредингер, 1926) механика

Переход от постулатов Бора к последовательной и точно сформулированной квантовой механике был трудным и завершился в два этапа, которые связаны с именами Гейзенберга и Шредингера.

Сначала, в 1925 году, Вернер Гейзенберг предложил *матричную форму квантовой механики*, в которой наблюдаемые величины (такие, как координата и импульс) представлялись не числами, а матрицами, то есть квадратными таблицами чисел (строки и столбцы матриц нумеровались частотами, характерными для атома).⁸ Матрицы, как и числа, можно перемножать, но результат умножения зависит в этом случае от порядка сомножителей. Поэтому умножение наблюдаемых зависит от порядка, в котором они перемножаются. Для двух наблюдаемых, $\hat{A}$ и $\hat{B}$, выражение $\hat{A}\hat{B}$ отличается от выражения $\hat{B}\hat{A}$. Неперестановочность, или *некоммутативность*, наблюдаемых количественно характеризуется выражением $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$, которое называется *коммутатором* этих наблюдаемых.⁹ Так, коммутатор наблюдаемой положения (координаты) $\hat{q}$ и наблюдаемой импульса $\hat{p}$ равен

$$[\hat{q}, \hat{p}] = i\hbar,$$

где i — мнимая единица.¹⁰

⁸Гейзенберг, не знавший теории матриц, не подозревал, что в его вычислениях фактически фигурируют именно эти математические объекты. Первым это понял Макс Борн, который вместе с Паскуалем Йорданом сформулировал схему, предложенную Гейзенбергом, в терминах матриц, придав ей более стройный вид.

⁹В квантовой механике некоммутирующие наблюдаемые (матрицы или, в более общем случае, операторы), в отличие от обычных числовых переменных, обычно обозначаются буквами со «шляпкой», хотя это правило не всегда соблюдается.

¹⁰Мнимая единица появляется не случайно: комплексные и, в частности, мнимые числа — один из основных элементов математического аппарата квантовой механики.

Введение Гейзенбергом некоммутирующих (неперестановочных) наблюдаемых было очень важным шагом. После него коммутатор стал одним из ключевых инструментов в квантовой механике. Впоследствии Гейзенберг показал, что некоммутативность наблюдаемых ведет к тому, что они не могут быть известны точно, то есть к тому, что неопределенности, с которыми известны наблюдаемые, подчиняются *соотношению неопределенностей* и поэтому должны быть отличны от нуля. Но сразу после создания матричной механики он применил ее к объяснению спектров атомов. И это ему удалось.

Квантовая механика наконец «вышла из пеленок», получила адекватную и универсальную формулировку, заменившую искусственные конструкции типа постулатов квантования Бора. В 1932 году Гейзенберг получил за эту работу Нобелевскую премию.

Параллельно с матричной формой квантовой механики развивалась и другая ее форма, волновая. Отправным пунктом для нее была идея де Бройля о том, что движущейся частице с энергией E и импульсом p следует сопоставить волну с частотой $\nu = E/h$ и длиной $\lambda = h/p$. В 1926 году Эрвин Шредингер довел эту идею до логического совершенства, сформулировав свою *волновую механику*. В ней состояние квантовой системы представлялось функцией от координат (*волновой функцией*) $\psi(q)$, а изменение состояния с течением времени описывалось дифференциальным уравнением, впоследствии названным *уравнением Шредингера* (см. приложение А.2). Наблюдаемые величины в волновой механике так же, как в матричной механике, не коммутировали. Но теперь вместо матриц они выражались операторами, в которых фигурировали производные от волновой функции.

Был некоторый период замешательства, вызванный существованием двух форм механики, применимых к одному и тому же объекту (атому). Для решения конкретных задач можно было пользоваться любой из этих двух форм. Опыт показывал, что они всегда вели к одинаковым выводам. В 1932 го-

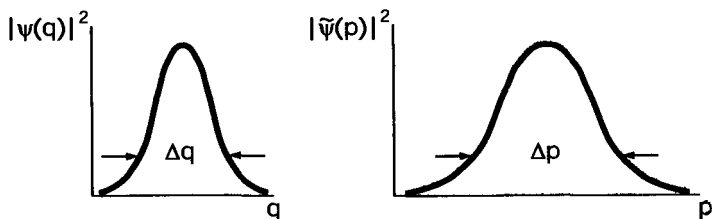


Рис. 1.5. Вероятностная интерпретация волновой функции. В координатном представлении: $|\psi(q)|^2$ — плотность вероятности нахождения частицы в точке q . С большой вероятностью частица находится в области размером Δq (неопределенность координаты). В импульсном представлении: $|\tilde{\psi}(p)|^2$ — плотность вероятности того, что частица имеет импульс p . С большой вероятностью импульс частицы принадлежит области размером Δp (неопределенность импульса).

ду Джон фон Нейман показал, что эти две физические теории математически эквивалентны.

Волновая механика Шредингера оказалась удобнее, и в настоящее время для представления состояний квантовых систем и наблюдаемых величин физики используют как правило именно язык волновых функций и действующих на эти функции дифференциальных операторов.

Очень важным шагом в понимании роли волновой функции была их *вероятностная интерпретация*, предложенная в 1926 году Максом Борном. Волновая функция $\psi(q)$, введенная Шредингером, есть функция координат системы, а значения этой функции — комплексные числа. Борн впервые понял, что квадрат модуля волновой функции $|\psi(q)|^2$ в точке q есть *плотность вероятности* того, что координата имеет значение q . Это значит, что величина $|\psi(q)|^2 dq$ равна *вероятности* того, что координата лежит в интервале $[q, q + dq]$, см. рис.1.5, левая часть. С большой вероятностью система имеет координату в той области, в которой ее волновая функция за-

метно отличается от нуля. Ширина этой области называется неопределенностью координаты и обозначается Δq .

После работы Борна стало ясно, что волновая функция — это «волна вероятности», и возникновение явления интерференции оказалось прямым математическим следствием уравнения Шредингера. За вероятностную интерпретацию волновой функции Борну в 1954 году была присуждена Нобелевская премия.

Введение волновой функции существенно изменило представление о том, как ведут себя квантовые частицы, по сравнению с той картиной, которую давали постулаты квантования, введенные Бором. Например, в атоме водорода электрон, согласно постулатам Бора, вращается вокруг положительно-го ядра (протона) по одной из тех орбит, которые являются устойчивыми (удовлетворяют условию квантования) и соответствуют определенной энергии атома E_n . На самом же деле в атоме, имеющем энергию E_n , состояние электрона описывается волновой функцией $\psi_n(x, y, z)$, которая отлична от нуля в некоторой 3-мерной области (а не только на одной кривой — орбите). В частности, в *основном состоянии* атома водорода (имеющем минимальную энергию E_1) волновая функция электрона сферически симметрична. Приближенно можно считать, что эта функция отлична от нуля внутри сферы с центром в ядре атома и с радиусом, равным *боровскому радиусу* $a_0 = \hbar^2 / me^2$, о котором мы уже говорили в связи с боровским квантованием. Значит неопределенность каждой из трех координат электрона (x, y, z) в этом состоянии приблизительно равна a_0 .

Математический формализм квантовой механики, использующий волновые функции, остался наиболее употребительным до сих пор. В 1926–1927 годах Поль Дирак разработал теорию преобразований, позволявшую переходить от *координатного представления* волновой функции $\psi(q)$ к *импульсному представлению* $\tilde{\psi}(p)$ или к представлению, связанному с

любой другой наблюдаемой.¹¹ В 1933 году Шредингер и Дирак были удостоены Нобелевской премии за создание формализма волновых функций, важнейшего математического инструмента в квантовой механике.

Волновая функция в координатном представлении позволяет наглядно представить свойства состояния системы по отношению к координате (или, в общем случае, координатам) этой системы. Переход к другому представлению делает наглядными свойства того же состояния по отношению к другой наблюдаемой.

Как уже говорилось, величина $|\psi(q)|^2$ (квадрат модуля волновой функции в координатном представлении) интерпретируется как плотность вероятности того, что система имеет координату q . Аналогично интерпретируется и квадрат модуля волновой функции в импульсном представлении, $|\tilde{\psi}(p)|^2$, см. рис.1.5, правая часть. Именно, величина $|\tilde{\psi}(p)|^2$ есть *плотность вероятности* того, что система имеет импульс p . Значит с большой вероятностью импульс системы лежит в области, где волновая функция в импульсном представлении $\tilde{\psi}(p)$ не слишком мала. Ширина этой области Δp называется неопределенностью импульса.¹²

Оказывается, что неопределенности координат и импульсов квантовой системы не могут быть сколь угодно малыми. Они ограничены принципом неопределенности.

1.6. Особенности квантовых измерений

Измерения, проводимые в квантовой системе, принципиально отличаются от измерений в классической системе. Это отличие было одним из самых трудных пунктов в период становления квантовой механики и обсуждалось с самых раз-

¹¹ Волновые функции в координатном и импульсном представлениях связаны друг с другом преобразованием Фурье. см. приложение А.1.

¹² Более точно, Δq и Δp — это среднеквадратичные отклонения координаты и импульса от их среднего значения, то есть $\Delta q^2 = \overline{(q - \bar{q})^2}$ и $\Delta p^2 = \overline{(p - \bar{p})^2}$, где обозначено $\bar{f}(q) = \int f(q) |\psi(q)|^2 dq$ и $\bar{f}(p) = \int f(p) |\tilde{\psi}(p)|^2 dp$.

ных точек зрения. Существенное прояснение вопроса возникло после открытия Гейзенбергом принципа неопределенности и затем после формулировки Бором принципа дополнительности. Математически корректная формулировка измерения была введена фон Нейманом в форме постулата редукции. Таким образом, к 1932 году вопрос о квантовых измерениях был в достаточной мере прояснен. На этом мы кратко остановимся в этом разделе.

И все же даже после этого, и вплоть до нашего времени, остаются нерешенные принципиальные вопросы по поводу того, что происходит при измерении квантовой системы. Эти вопросы, ведущие к очень важным выводам, мы будем подробно обсуждать позднее, в разделе 1.8 и во второй части книги.

1.6.1. Принцип неопределенности (Гейзенберг, 1927)

Принцип неопределенности был сформулирован Вернером Гейзенбергом в 1927 году под сильным влиянием долгих и трудных дискуссий с Бором. Это стало одним из самых важных шагов в понимании той специфики, которой квантовые системы отличаются от классических. Согласно принципу неопределенности, в любом состоянии одномерной системы неопределенность координаты Δq и неопределенность импульса Δp удовлетворяют неравенству¹³

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Это неравенство называется *соотношением неопределенностей Гейзенберга* или *принципом неопределенности*. Оно в чрезвычайно яркой форме выражает одно из основных отличий квантовой механики от классической. Это неравенство

¹³Одномерной называется система, которая описывается лишь одной координатой, например, электрон, движущийся вдоль заданной прямой. Если система описывается несколькими координатами $q_1, q_2, \dots, q_n$, то каждой из них соответствует свой импульс $p_1, p_2, \dots, p_n$, и для каждой пары q_i, p_i выполняется точно такое же неравенство.

применяется чрезвычайно широко, во-первых, для того, чтобы понять поведение той или иной квантовой системы, во-вторых, для грубых оценок некоторых параметров. Пример такой оценки, основанной на соотношении неопределенностей, имеется, например, в начале раздела 2.3.1, где показано, что характерная частота излучения атома обратно пропорциональна квадрату его размера.

Обсудим принцип неопределенности несколько более детально.

В классической физике и координата, и импульс точечной частицы имеют определенное значение, то есть неопределенности и координаты, и импульса равны нулю. Конечно, эти наблюдаемые всегда известны экспериментатору с некоторыми погрешностями. Однако эти погрешности — всего лишь мера незнания. В принципе, произведя достаточно точные измерения, экспериментатор может сделать эти погрешности сколь угодно малыми.

В квантовой механике этого сделать нельзя. Даже если состояние частицы известно абсолютно точно (то есть абсолютно точно известна ее волновая функция), неопределенности координаты и импульса Δq и Δp (то есть ширины координатного и импульсного представлений волновой функции) не равны нулю (см. рис. 1.5). Неопределенности координаты и импульса приобретают в квантовой механике другой статус. Это уже не мера незнания, а характеристики состояния. Произведение $\Delta q \cdot \Delta p$ ни в каком состоянии не может быть меньше,¹⁴ чем $\hbar/2$.

Чтобы проверить соотношение неопределенностей, нужно произвести большое количество очень точных измерений координаты в одном и том же состоянии частицы (которое пе-

¹⁴В качестве предельного случая в квантовой механике рассматривают состояния с точно известной координатой, то есть с нулевой неопределенностью координаты, $\Delta q = 0$. Но неопределенность импульса в таком состоянии бесконечна, $\Delta p = \infty$. Наоборот, если точно известен импульс, $\Delta p = 0$, то $\Delta q = \infty$.

ред каждым измерением восстанавливается) и выяснить, какой разброс будет наблюдаться в результатах измерений. Затем в том же самом состоянии следует много раз с большой точностью измерить импульс (каждый раз перед измерением приводя частицу в исходное состояние) и найти разброс значений импульса в этой серии измерений. Произведение полученных таким образом величин (Разброс Значений Координаты $\times$ Разброс Значений Импульса) будет равен или больше, чем $\hbar/2$, где $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек. Эксперимент всегда подтверждает эту закономерность. •

Чаше говорят о проверке соотношения неопределенностей в одном измерении, проведенном с конечным разрешением. Например, если измерить координату с разрешением Δq , то импульс должен получить неопределенность $\Delta p \geq \hbar/2\Delta q$. Эту закономерность иллюстрируют обычно мысленным экспериментом, в котором координата измеряется при помощи микроскопа (так называемый микроскоп Гейзенберга), а неопределенность импульса возникает в силу специфических свойств фотонов, которые падают на измеряемый объект во время измерения. Разберемся в этом более детально.

1.6.2. Возмущение состояния при измерении

Любое измерение физической системы производится с помощью некоторого прибора (в более общем случае — измеряющей среды). При взаимодействии происходит взаимодействие прибора с измеряемой системой, в результате чего состояние прибора меняется так, что в его состоянии каким-то образом отражается состояние системы (условно говоря — стрелка прибора занимает то или иное положение). В классической физике это взаимодействие можно сделать сколь угодно слабым, так чтобы оно сколь угодно слабо влияло на измеряемую систему.

Механическое измерение, например, измерение положения какого-то тела, можно произвести оптически, то есть направив на это тело луч света и отметив, куда он отразится. При

отражении от измеряемого тела свет оказывает на него давление, тем самым меняя его состояние. Однако интенсивность света можно сделать сколь угодно малой, так чтобы состояние измеряемого тела менялось пренебрежимо мало. Поэтому как в этом, так и во всех других случаях при измерениях классической системы вполне уместно пользоваться идеальной картиной, согласно которой измерение вообще не меняет состояние измеряемой системы.

Если же мы описываем состояние измеряемой системы и процедуру измерения настолько детально, что проявляются квантовые свойства тел, участвующих в этом процессе, то ситуация кардинально меняется. Оказывается, что в силу квантовой природы всех вообще физических систем при измерении обязательно меняется состояние измеряемой системы, притом это изменение тем больше, чем больше информации дает измерение. За информацию приходится платить.

Это можно наглядно проиллюстрировать на примере того же оптического измерения, но при учете квантовой природы света. Для того, чтобы снизить световое давление, мы должны уменьшать интенсивность светового потока, используемого для измерения. Однако этот поток должен содержать по крайней мере один фотон. Следовательно, и возможности измерения, и влияние этого измерения на состояние измеряемого тела зависят от параметров этого фотона, прежде всего — от его длины волны λ . И вот тут-то важным оказываются специфические свойства фотона как квантовой частицы. Оказывается, что они не позволяют увеличить точность измерения, не увеличив воздействие измерительной процедуры на состояние измеряемого объекта.

Предположим, что мы измеряем положение тела. Тогда точность измерения по порядку величины равна длине волны фотона λ , и для того, чтобы сделать измерение более точным, необходимо уменьшать λ . Но частота, которой характеризуется фотон, равна $\nu = c/\lambda$, где c — скорость света. Уменьшая длину волны фотона, мы тем самым увеличиваем его частоту.

Вместе с ней увеличивается и энергия фотона, которая, как выяснил еще в 1905 году Эйнштейн, равна $E = h\nu$ (см. раздел 1.2). Ясно, что при увеличении энергии фотона увеличивается его воздействие на состояние того тела, положение которого измеряется. Таким образом, увеличивая точность измерения, мы поневоле увеличиваем и обратное воздействие измерительной процедуры на состояние измеряемой системы.

Эту зависимость между точностью измерения и его воздействием на измеряемую систему можно охарактеризовать точнее. Энергия фотона E и его импульс (количество движения) p связаны простым соотношением $E = cp$. Если фотон имеет частоту ν , то его импульс равен $p = h\nu/c = h/\lambda$. При отражении фотона от измеряемого тела направление его движения меняется на противоположное. Это значит, что импульс фотона, понимаемый как вектор, по величине оставаясь тем же самым, по направлению меняется на противоположный: $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$. Это значит, что фотон получает от измеряемого тела импульс, равный $-2\vec{p}$. Поскольку полный импульс фотона и измеряемого тела сохраняется, то это тело получает от фотона импульс, равный $2\vec{p}$, по величине равный $2p = 2h/\lambda$. Вот эта передача импульса и создает давление на поверхность тела. Это давление, или изменение импульса тела, тем больше, чем меньше λ .

Мы видим, что возмущение импульса тела $\Delta p = 2p$ и погрешность измерения положения $\Delta q \sim \lambda$ связаны соотношением $\Delta q \Delta p \sim h$. Хотя мы вывели это соотношение, рассматривая конкретную модель измерения, на самом деле оно является универсальным (то есть должно выполняться при любой конструкции измерительной системы) и составляет содержание соотношения неопределенностей.¹⁵ Именно в силу прин-

¹⁵Формальное доказательство принципа неопределенности дает и более точное соотношение: $\Delta q \Delta p \geq \hbar/2$ (некоторые любопытные уточнения, касающиеся этого соотношения, можно найти в гл. 3 книги М. Б. Менский, *Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология*. Москва, Физматлит, 2001).

ципа неопределенности состояние измеряемой квантовой системы возмущается тем сильнее, чем точнее измерение.

Эта ситуация, возникающая при измерении, и ее связь со свойствами измерительных приборов была чрезвычайно важна для понимания квантовой механики. Поэтому она бурно обсуждалась с различных точек зрения. В связи с этим Бор предложил кроме количественного принципа неопределенности еще чисто качественный *принцип дополнительности*, согласно которому измерения координаты и импульса являются дополнительными по отношению друг к другу.

1.6.3. Принцип дополнительности (Бор, 1927)

Вопрос о теории измерений является для квантовой механики ключевым. На заключительном этапе формулировки этой теории он представлял серьезные трудности и постепенно прояснялся разными исследователями с разных точек зрения. Главный прорыв был совершен Гейзенбергом, который сформулировал принцип неопределенности, и Борном, предложившим вероятностную интерпретацию волновой функции. Но и после этого оставалось впечатление о незавершенности, а может быть даже противоречивости квантовой механики, в отличие от ясной и логичной классической механики. И вопросы возникали прежде всего в связи с процедурами измерения квантовых систем.

Преодолению этих трудностей в большой мере способствовал *принцип дополнительности*, предложенный Бором в 1927 году. Этот принцип, имеющий, по мнению Бора, весьма широкую область применимости, все же прежде всего применялся для анализа измерений координаты и импульса и прояснения принципа неопределенности Гейзенберга. Тот факт, что невозможно одновременно точно измерить и координату, и импульс, Бор трактовал как проявление общего принципа дополнительности. В данном случае характеристика состояния системы ее координатой и характеристика этого состояния импульсом дополняют друг друга. Поэтому для того,

чтобы получить одну из этих характеристик, требуются совершенно разные приборы.

Для измерения импульса частицы чувствительный элемент прибора, его датчик, должен быть очень легким, а для измерения координаты — тяжелым.¹⁶ Тяжелый датчик позволит точно охарактеризовать положение измеряемой частицы, и при этом во время измерения датчик почти не сдвинется, так что ошибка в измерении координаты будет очень мала. Но именно по этой причине такой прибор непригоден для точного измерения импульса: ведь из-за большой массы датчика он будет очень слабо реагировать на импульс измеряемой частицы. Наоборот, легкий датчик сильно реагирует на импульс измеряемой частицы, но зато при этом сильно сдвигается, так что определение координаты частицы становится практически невозможным.¹⁷

Таким образом, принципиально невозможно создать прибор, измеряющий (с большой точностью) и координату, и импульс. Приборы, измеряющие соответственно координату и импульс, дополняют друг друга. Причем это заложено в квантовой природе измеряемых величин, так что дополнительными друг к другу являются по существу сами эти величины: координата и импульс. Именно этот характер данной пары наблюдаемых, их дополнительность, объясняет, почему неопределенности в значениях этих величин подчиняются соотношению неопределенностей. Можно, впрочем, рассуждать прямо противоположным образом: координата и импульс дополнительные друг к другу, потому что удовлетворяют принципу неопределенности.

¹⁶ Датчиком может служить, скажем, вспомогательная частица, взаимодействующая с измеряемой, в том числе фотон, рассеивающийся на измеряемой частице. В последнем случае лучше говорить о фотоне, имеющем малый импульс (и значит малую частоту и большую длину волны) или о фотоне, имеющем большой импульс (и значит высокую частоту и малую длину волны).

¹⁷ Разумеется, это качественное рассуждение должно быть дополнено количественным рассмотрением свойств датчика, например, соотношением между длиной волны фотона и его импульсом.

Принцип дополнительности оказался действенным психологическим средством, позволившим физикам примириться со странными положениями квантовой механики. Это произошло потому, что в принципе дополнительности Бор продемонстрировал, что «взаимное влияние» неопределенностей координаты и импульса квантовой системы — это не просто произвольно принятое формальное положение, а точное отражение того, как устроены приборы, которыми эти величины измеряются. При этом под выражением «как устроены приборы» понимается, что они сами состоят из частиц, обладающих квантовыми свойствами (например, используют фотон в качестве чувствительного элемента).

1.6.4. Постулат редукции (фон Нейман, 1932)

Качественный анализ, который провел Бор в рамках своего принципа дополнительности, был дополнен строгой математической теорией измерений, которую в 1932 году предложил американский математик Джон фон Нейман. Он обосновал и математически строго сформулировал так называемый *постулат редукции*, согласно которому при измерении некоторой наблюдаемой состояние квантовой системы меняется таким образом, что в новом состоянии измеряемая наблюдаемая имеет уже определенное значение, и именно то, которое получилось в результате измерения. Возникновение этого состояния называется *редукцией состояния* системы или *коллапсом волновой функции*.

О постулате редукции мы еще будем говорить во второй части книги, а в приложении А будет дана его точная математическая формулировка. Сейчас подчеркнем лишь, что этот постулат, хотя он в приведенной словесной форме кажется тривиальным, на самом деле содержит в себе самую суть квантовой механики. Дело в том, что при измерении квантовой системы не просто появляется новое знание о состоянии системы, но это состояние обязательно меняется. *Изменение состо-*

яния измеряемой системы является платой за полученную информацию.

То свойство, которое обнаруживается у системы в результате ее измерения (например, значение измеряемой наблюдаемой величины), как правило вообще не существует до измерения (эта наблюдаемая не имеет никакого определенного значения). Позднее мы увидим, что эта черта квантовых измерений до сих пор вызывает споры. Эти споры относятся, конечно, не к технической (математической), а к концептуальной стороне вопроса, то есть к пониманию того, что же «на самом деле» происходит при измерении. По-видимому, полная ясность в этом вопросе невозможна без более глубокого понимания всей квантовой механики. В части II книги мы стараемся показать, что это свойство квантового измерения связано с особой ролью, которую играет в нем сознание наблюдателя. Это в свою очередь чревато далеко идущими выводами о самом сознании.

1.7. Завершение квантовой механики и дискуссии Бора и Эйнштейна

Квантовая механика до сих пор находится в процессе интенсивного развития, о чем мы еще будем особо говорить в части II. Однако основные контуры этой удивительной науки были очерчены в период с 1927 по 1932 год. К 1927 году принципы квантовой механики были сформулированы достаточно полно. В течение нескольких последующих лет научное сообщество постепенно свыкалось с новыми идеями, которые принесла с собой квантовая механика, с качественно новой картиной мира, которая открылась на микроскопических масштабах. Постепенно вырабатывалась квантовомеханическая интуиция и преодолевались «классические предрассудки».

Этот период, который можно назвать периодом становления квантовой механики, был так же важен, как и предшествующий период ее рождения. Хотя в дискуссиях на этом этапе

так или иначе участвовали все создатели квантовой механики, все же центральным событием была длительная дискуссия между Бором и Эйнштейном. Драматизм происходящего состоял в том, что два гения, стоявшие у истоков этой науки, признававшиеся всеми в качестве непререкаемых авторитетов, были категорически не согласны друг с другом. При этом Эйнштейн, первым сделавший решительный шаг к введению адекватных квантовых понятий (поскольку Планк относился к квантованию скорее как к формальному приему), был решительно не согласен с окончательной формой, которую придали квантовой механике Бор и другие талантливые физики, работавшие в тесном взаимодействии с ним, и которая получила название копенгагенской интерпретации квантовой механики.¹⁸

1.7.1. Две задачи: математический аппарат и интерпретация теории

На заключительном этапе построения теории параллельно решались две задачи. Первая заключалась в окончательной формулировке и отшлифовке *математического аппарата квантовой механики*. Вторая — в доказательстве внутренней согласованности, непротиворечивости этой теории и в понимании отношений между квантовой и классической механикой. Эта вторая задача формулировалась как *интерпретация квантовой механики*. Она была независимой от первой и абсолютно необходимой. При построении квантовой механики, пожалуй, впервые в истории физики было четко осознано, что недостаточно лишь сформулировать уравнения, описывающие поведение физической системы. Необходимо еще дать четкую интерпретацию этих уравнений, правила, которые позволяли бы однозначно связать формальные решения уравнений с выводами о том, что должны показывать прибо-

¹⁸ Все эти физики часто приезжали в Копенгаген, где в институте, руководимом Бором постоянно функционировал семинар по проблемам квантовой механики.

ры экспериментаторов, имеющих дело с реальными системами. Задача интерпретации квантовой механики была не менее важной, чем задача выработки ее математической структуры, а часто именно интерпретация становилась основным камнем преткновения.

Те аспекты новой теории, которые были связаны с ее интерпретацией, оказались чрезвычайно трудными и вызвали напряженные дискуссии. В центре дискуссий неизменно оказывались вопросы измерения. Причиной трудностей было радикальное отличие квантовой механики от классической, что часто требовало отказа от положений, казавшихся очевидными, и выработки совершенно новой, неклассической интуиции, которая на первый взгляд казалась почти безумием (как, например, в связи с понятием корпускулярно-волнового дуализма).

Прежде всего такого рода коллизии возникали при обсуждении измерений, потому что измерениям должна была подвергаться микроскопическая квантовая система, но прибор, производящий измерения, должен был быть макроскопическим, то есть классическим, и результаты измерений должны были отображаться этим прибором в доступной человеку, то есть в классической, форме. Поэтому при попытках последовательно описать измерение квантовой системы нужно было пользоваться одновременно и классической, и квантовой теорией, и при этом каким-то образом примирить их друг с другом, несмотря на присущие им кардинальные различия. В то же время построение теории измерений квантовых систем было не только необходимо, но и чрезвычайно важно, потому что только такая теория могла гарантировать, что квантовую механику можно проверять экспериментально. По этим причинам построение *квантовой теории измерений* было ключевым этапом при завершении всего здания квантовой механики.

Интересно и в сущности чрезвычайно важно, что, хотя на прагматическом уровне, позволявшем производить вычисления и делать предсказания, квантовая теория измерений бы-

ла четко сформулирована в 1932 году, некоторые ее концептуальные аспекты вызывают дискуссии до сих пор. Это значит, что в определенном смысле квантовая теория измерений окончательно не построена до сих пор.

Сейчас стало ясно, что эти концептуальные трудности квантовой теории измерений связаны с тем, что такое фундаментальное понятие, как *понятие реальности*, в квантовой механике оказывается совсем не таким, как в классической физике. Впервые на это различие указали Эйнштейн, Подольский и Розен в своей знаменитой работе 1935 года. Несколько, быть может, упрощая ситуацию, можно сказать так: если в классической физике реальность существует объективно, а при измерении классической системы экспериментатор лишь получает информацию об этой реальности, то в квантовой механике *реальность творится в процессе измерения и осознания наблюдателем результата измерения*.

В наше время дискуссия о концептуальных проблемах квантовой механики, о понимании реальности и о сознании наблюдателя резко активизировалась. На наш взгляд это указывает на то, что в квантовой механике нас ждут еще поразительные открытия. Подробнее об этом мы поговорим во второй части книги. А сейчас остановимся на том, чем завершился «период бурь и натиска», как возникала первая более или менее полная формулировка квантовой механики.

1.7.2. Создание математического аппарата

Пока квантовая механика в муках рождалась, заставляя своих создателей постепенно освобождаться от пут классической интуиции, были нужны достаточно наглядные конструкции, пусть даже временные и «наивные», сформулированные во многом еще на языке классической физики, то есть с точки зрения квантовой механики достаточно искусственно. Таким был, например, постулат Бора о том, что некоторые орбиты

электронов в атоме водорода стабильны.¹⁹ Такие наглядные, пусть и не совсем адекватные, образы были необходимы при последовательном, шаг за шагом, построении теории.

В период окончательной формулировки квантовой механики вместо этого была найдена математическая схема, позволявшая формулировать и решать задачи, касающиеся поведения микроскопических систем. Последними этапами построения этой схемы были: понятие волновой функции и вид уравнения, которому она подчиняется (Эрвин Шредингер, 1926), вероятностная интерпретация волновой функции (Макс Борн, 1926), соотношение неопределенностей (Вернер Гейзенберг, 1927). В период с 1927 по 1932 годы фон Нейман завершил математическую формулировку квантовой механики, подведя итог в своей книге «Математические основания квантовой механики» (Москва, «Наука», 1964), которая до сих пор является настольной книгой для специалистов.

Фон Нейман изложил квантовую механику на языке так называемого *гильбертова пространства* (бесконечномерного линейного, или векторного, пространства со скалярным произведением). Элементами этого пространства (векторами) являются волновые функции, описывающие состояния квантовой системы (см. приложение А). Тем самым квантовая механика была поставлена на прочную математическую основу. С другой стороны, поскольку квантовомеханические задачи были очень важны, их решение дало чувствительный толчок развитию соответствующей области математики — теории гильбертовых пространств и других бесконечномерных (функциональных) пространств.

Чрезвычайно важным достижением фон Неймана была формулировка так называемого *постулата редукции*. Этот постулат говорит о том, как изменяется состояние квантовой системы, т. е. ее волновая функция, когда система подвергается-

¹⁹ На самом-то деле, как потом оказалось, никаких орбит вообще нет, а вместо них электроны описываются волновой функцией, отличающейся от нуля в 3-мерной области.

ся измерению. В результате, та часть квантовой механики, которая описывает измерение, тоже была сформулирована математически корректно и недвусмысленно (хотя концептуальные аспекты этой теории, не сводящиеся к математике, как уже говорилось, до сих пор не выяснены до конца и представляют интереснейшую проблему).

Другие важные для квантовой механики результаты фон Неймана также имели прямое отношение к теории измерений. Наиболее известна доказанная им в 1927 году так называемая теорема о *скрытых параметрах*. Она утверждает, что квантовую механику невозможно свести к классической, предполагая, что квантовые системы имеют более тонкую структуру (скрытые параметры), которую мы пока не знаем, но которая подчиняется классическим законам. Из теоремы фон Неймана следует, что вероятностный характер предсказаний в квантовой механике — это не результат неполного знания, а фундаментальный закон: предсказания остаются вероятностными (недетерминированными) даже в том случае, если мы знаем состояние системы полностью.

В том же 1927 году фон Нейман ввел понятие *матрицы плотности*, или статистического оператора (см. приложение А.4). Еще раньше в этом же году матрица плотности была введена для частного случая 19-летним Львом Ландау (фон Нейман цитирует его работу). Матрица плотности позволяет представить состояние квантовой системы даже в том случае, когда эта система не полностью изолирована от окружения (как говорят, является открытой), например, находится в тепловом равновесии с окружающей средой. Матрица плотности играет ключевую роль в квантовой статистике при описании систем многих частиц (например, газа). В то же время матрица плотности позволяет глубже понять процесс измерения квантовой системы, поскольку при измерении система взаимодействует с прибором, то есть тоже не может рассматриваться как изолированная (см. приложение А.5).

1.7.3. Копенгагенская интерпретация

Квантовая теория создавалась долго и трудно, потому что она так сильно отличалась от существовавшей до этого классической физики, что создателям новой теории приходилось быть очень осторожными, чтобы привычные классические рассуждения, составлявшие основу интуиции, не приводили к ошибкам. Трудность состояла в том, что интуиция,работанная при работе с классической физикой, не могла быть опорой в квантовой механике, а новая, квантовая интуиция, еще не существовала.

На последнем этапе, когда уже все элементы для новой теории были известны, долго не удавалось соединить их в одну стройную систему. Одной из главных трудностей был корпускулярно-волновой дуализм. Было ясно, как описывать волны (и частицы в тех условиях, когда проявляются их волновые свойства). Было ясно, как описывать частицы (и волны, когда проявляются их корпускулярные свойства). Но не удавалось описать объект, который является *одновременно волной и частицей*.

Однако в конце концов была сформулирована сравнительно полная и, главное, вполне работоспособная система аксиом и правил, которую можно было применять в качестве рабочего инструмента для объяснения любых физических процессов. Эта система была создана Бором, его сотрудниками и гостями в процессе бесконечных обсуждений в институте Бора в Копенгагене.

Впервые в физике существенным элементом теории были не только математические уравнения, но и интерпретация этих уравнений и входящих в них понятий (до этого, в классической физике, интерпретация всегда была очевидной и потому не требовала отдельной формулировки). Теория, возникшая из слияния матричной механики с волновой механикой, была названа *квантовой механикой*, а ее интерпретация получила название *копенгагенской интерпретации*.

Основными элементами новой теории стали 1) описание состояния квантовой системы волновой функцией вместе с вероятностной интерпретацией этой функции, 2) описание эволюции системы уравнением Шредингера, 3) постулат редукции, согласно которому результат измерения предсказывается вероятностным образом и состояние системы при измерении скачком переходит в новое состояние, соответствующее результату измерения.

Постулат редукции, который являлся ключевым в плане интерпретации теории, вызывал особенно серьезные споры и сомнения. Для этого было две причины. Во-первых, трудно было примириться с вероятностным характером предсказаний при измерении. Во-вторых, было неясно, почему эволюция изолированной системы и эволюция той же системы в присутствии классического прибора радикально различаются. В случае изолированной системы это эволюция, происходящая непрерывно во времени (в соответствии с уравнением Шредингера), причем результат такой эволюции можно достоверно предсказать, зная начальное состояние. Но в присутствии классического прибора та же система должна эволюционировать скачком, причем результат эволюции точно предсказать нельзя, можно рассчитать лишь вероятности различных исходов.

Тем не менее избежать этого постулата, с точки зрения некоторых — сомнительного, не удавалось. С другой стороны, принятие этого постулата делало теорию самосогласованной и полной в том смысле, что она позволяла предсказать (правда, вероятностным образом), что должен наблюдать экспериментатор в любом эксперименте.²⁰ Ни один из экспериментов, проведенных к тому времени, не противоречил предсказани-

²⁰ Позднее (в 1935 году) Эйнштейн, Подольский и Розен показали, что квантовая механика неполна, однако в другом смысле: она не включает то, что эти авторы называли «элементами реальности». Это верно, понятие реальности в квантовой механике иное, чем в классической физике, и об этом будет речь во второй части книги.

ям, так что не было оснований сомневаться в теории, которая формулировалась таким образом. На самом деле никаких экспериментальных опровержений не было найдено и в дальнейшем. Квантовая механика, сформулированная Бором и его соратниками, оказалась вполне работоспособной.

Уже уяснив все главные пункты, Нильс Бор много недель трудился над окончательной формулировкой своих взглядов, готовясь сделать доклад в 1927 году на Сольвеевском конгрессе в Брюсселе, где он должен был представить новую теорию на суд сообщества физиков. Конгресс собирался каждые три года для обсуждения последних достижений в физике. На конгрессе должен был присутствовать и Альберт Эйнштейн. Так начались знаменитые дискуссии Бора и Эйнштейна, которые очень много дали и для утверждения квантовой механики и ее копенгагенской интерпретации, и для будущего ее развития.

1.7.4. Дискуссии Бора и Эйнштейна (1927, 1930)

Неожиданно для Бора Эйнштейн не принял копенгагенской интерпретации квантовой механики, которую Бор представил в 1927 году на Сольвеевском конгрессе в Брюсселе. Это казалось странным со стороны человека, который заложил основы этой теории. Однако причина была основательной, по крайней мере с точки зрения Эйнштейна. Он был не против квантовой механики, так как она действительно оказалась необходимой для описания явлений в микромире. Но он не верил в то, что вид, который этой теории придал Бор, является вполне адекватным, окончательным. Ему казалось, что в будущем будет найдена формулировка, лишенная недостатков, присущих копенгагенской интерпретации.

Главное возражение Эйнштейна было связано с вероятностным, недетерминированным характером квантовомеханических предсказаний. Эйнштейн не мог поверить, что даже зная все что можно о состоянии системы, нельзя предсказать точно результат того или иного измерения. Он говорил: «Я

не верю, что Бог играет в кости». Доказать это Эйнштейн не мог, и по существу это возражение было основано лишь на интуиции и эстетических соображениях: он считал, что теория, включающая вероятностные предсказания, не может быть настолько красивой, чтобы быть истинно фундаментальной. Такая теория может быть лишь временной схемой, в которой не хватает существенных элементов, считал Эйнштейн, а когда будет найдена более глубокая, фундаментальная теория, в ней предсказания будут детерминированными.

Второе утверждение, с которым Эйнштейн не мог примириться, относилось к принципу неопределенности Гейзенберга, то есть к тому, что координата и импульс не могут одновременно иметь определенные значения. Он считал, что в окончательной форме теории этого ограничения не останется. Принцип неопределенности он пытался опровергнуть с помощью более конкретных аргументов. Для этого Эйнштейн придумывал и предлагал на рассмотрение Бора все новые и новые *мысленные эксперименты*, то есть экспериментальные схемы, которые в принципе могли быть реализованы, хотя бы этому препятствовали чисто технические сложности. В схемах экспериментов, которые предлагал Эйнштейн, неприемлемые для него положения квантовой механики должны были бы, по его мнению, нарушиться.

Однако раз за разом Бор, анализируя предложенные Эйнштейном мысленные эксперименты, показывал, что нарушение в них принципов квантовой механики является лишь кажущимся. Каждый раз Бору удавалось доказать, что если учесть все детали предложенной схемы и того, как она будет работать, то выводы будут полностью согласовываться с принципами квантовой механики.

Этот спор был очень упорным и долгим. Он продолжался все время, пока шел Сольвеевский конгресс 1927 года, и даже покидая его, Эйнштейн не был согласен со своим оппонентом. На следующий конгресс, который собрался в Брюсселе в 1930 году, Эйнштейн привез новый мысленный эксперимент.

В нем он делал попытку опровергнуть соотношение неопределенностей энергия-время²¹ $\Delta E \cdot \Delta T > h$, которое тесно связано с соотношением Гейзенберга, но имеет несколько иной смысл. Согласно этому соотношению, чтобы измерить энергию с точностью ΔE , требуется время $\Delta T > h/\Delta E$. Другая формулировка состоит в следующем. При передаче энергии от одной системы к другой проконтролировать величину энергии с точностью ΔE и момент ее передачи с точностью ΔT можно лишь в том случае, если $\Delta E \cdot \Delta T > h$.

Эйнштейн считал, что он придумал, как следует организовать эксперимент, чтобы обойти это ограничение. Для этого он предлагал воспользоваться тем, что согласно развитой им специальной теории относительности энергия эквивалентна массе. Эта эквивалентность выражается соотношением $E = mc^2$, где $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек — скорость света. На основании эквивалентности энергии и массы для измерения энергии частицы можно эту частицу просто взвешивать, как взвешивается любая масса. А взвешивание, как утверждал Эйнштейн, можно произвести как угодно быстро с любой точностью, то есть время ΔT можно сделать сколь угодно малым при сколь угодно малом ΔE . Следовательно, заключал он, соотношение неопределенностей энергия-время не имеет места.

Более конкретно, Эйнштейн предлагал следующий мысленный эксперимент. В ящике находится световое излучение. В определенный момент, который можно точно измерить, в ящике на очень короткое время открывается отверстие, через которое из него выходит фотон, и отверстие вновь закрывается. Когда ящик закрыт, его можно с любой точностью взвесить до и после выхода фотона. Таким образом, экспериментатор будет с любой точностью знать переданную энергию и с любой точностью — момент ее передачи, что противоречило бы соотношению неопределенностей энергия-время.

²¹Здесь и далее мы приводим соотношения неопределенностей с точностью до порядка величины (как это и было в споре Бора с Эйнштейном), пренебрегая фактором 1/2 и различием между h и $\hbar$.

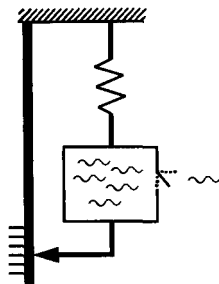


Рис. 1.6. Мысленный эксперимент Эйнштейна, якобы опровергающий соотношение неопределенности $\Delta E \Delta T > h$. Фотоны, находящиеся в ящике, взвешиваются, затем открывается дверца и один фотон выпускается, после чего взвешивание повторяется. По разности полученных масс энергия одного фотона находится с помощью формулы $E = mc^2$.

Эта задача оказалась для Бора непростой. В течение всего дня он не мог опровергнуть аргументы Эйнштейна и продолжал думать над этим вопросом всю ночь. Ответ пришел лишь утром и к удивлению самого Бора опирался на общую теорию относительности (ОТО), то есть теорию гравитации, предложенную самим Эйнштейном. Действительно, если не учитывать положений этой теории, то никаких ограничений на время измерения не возникает. Однако если рассуждать в рамках ОТО, то появляется ограничение на время измерения, которое и ведет к соотношению $\Delta E \cdot \Delta T > h$. Мы повторим сейчас рассуждения Бора, но если они покажутся сложными, читатель может их пропустить.

Для демонстрации своих соображений Бор предложил такую схему мысленного эксперимента (рис. 1.6), в которой фотоны, помещенные в ящик, взвешиваются на пружинных весах. При этом, однако, следует учесть, что согласно ОТО время по-разному течет в точках, имеющих различные гравитационные потенциалы φ . Если потенциал известен с точно-

стью $\Delta\varphi$, то относительная погрешность в определении момента времени равна

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta\varphi}{c^2}.$$

При взвешивании ящика на пружинных весах происходит измерение его координаты. Если это измерение производится с точностью Δq , то (согласно обычному принципу неопределенности Гейзенберга) импульс ящика с фотонами приобретает неопределенность $\Delta p > h/\Delta q$. Эта неопределенность импульса служит помехой при взвешивании. Для взвешивания с необходимой точностью нужно обеспечить условия, при которых эта помеха достаточно мала. Чтобы сформулировать эти условия, посмотрим, чем обеспечивается взвешивание.

Взвешивание возможно потому, что гравитационное поле действует на ящик массы m с силой gm (где g — ускорение силы тяжести) и заставляет его двигаться, растягивая пружину. За время взвешивания T гравитационное поле передает ящику импульс, равный произведению силы на время, то есть равный Tgm . Этот переданный гравитационным полем импульс как раз и приводит к тому, что ящик сдвигается, растягивая пружину, то есть этот импульс и позволяет взвесить тело. Чтобы взвешивание давало точность определения массы равную Δm , необходимо, чтобы неопределенность импульса Δp была меньше, чем $Tg\Delta m$ (величина импульса, переданная гравитационным полем телу массы Δm за время взвешивания T). Это значит, что должно выполняться неравенство $\Delta p < Tg\Delta m$. Добавляя еще ранее упомянутое неравенство для Δp , получаем цепочку неравенств $h/\Delta q < \Delta p < Tg\Delta m$, откуда

$$\Delta q > \frac{h}{Tg\Delta m}.$$

Вместе с тем гравитационный потенциал зависит от координаты q (высоты над поверхностью земли) как $\varphi = gq$.

Неопределенность координаты Δq означает, что и гравитационный потенциал имеет неопределенность $\Delta\varphi = g\Delta q$. Поскольку скорость, с которой течет время, зависит (в соответствии с ОТО) от гравитационного потенциала, неопределенность в величине гравитационного потенциала ведет к ошибке в определении момента времени:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{g\Delta q}{c^2}.$$

Учитывая предыдущее неравенство для Δq , получаем окончательно

$$\Delta T > \frac{h}{\Delta mc^2} = \frac{h}{\Delta E},$$

то есть соотношение неопределенностей энергия-время.

Этот анализ эйнштейновского мысленного эксперимента, опирающийся как раз на эйнштейновскую ОТО, был триумфом Бора и свидетельствовал о его победе в споре. В данном случае эффект был особенно силен потому, что соотношение неопределенностей энергия-время, как оказалось, выполняется в силу законов гравитации, хотя гравитация, казалось бы, не должна была иметь никакого отношения к рассматриваемой экспериментальной схеме. Помимо всего прочего, этот боровский анализ показал, каким удивительным образом все законы физики согласованы друг с другом и с квантовыми свойствами фигурирующих в них материальных систем.

Копенгагенская интерпретация квантовой механики была, таким образом, защищена от нападков такого сильного оппонента, как Эйнштейн. Последний был вынужден признать, что квантовая механика в предлагаемой Бором форме самосогласована, так что ее нельзя опровергнуть с помощью хитроумных мысленных экспериментов.

И все же Эйнштейн не отказался от своего мнения и считал имеющуюся формулировку квантовой механики несостоятельной, по-видимому, в каком-то более глубоком смысле, который нельзя сформулировать в терминах, характерных для физиков.

Итак, в этой многолетней дискуссии Эйнштейн проиграл Бору, но не признал своей неправоты. Почему же Эйнштейн при его несомненной гениальности спорил с гениальным Бором и почему так и не согласился с ним? Что ему не нравилось в квантовой механике, и к какому изменению ее он стремился? Прежде всего ему не нравился вероятностный характер предсказаний. Знаменитое эйнштейновское «Бог не играет в кости» ясно выражает это недовольство.

Развитие физики в следующие десятилетия показало, что Бор был прав. После этой его победы копенгагенская интерпретация квантовой механики прочно утвердилась в физике и послужила хорошей основой для многочисленных и часто неожиданных приложений. Более того, *новый статус вероятности* стал одной из красивейших идей квантовой механики. В классической физике вероятностные предсказания возникают лишь в результате неполного знания. Если же состояние системы известно полностью, то все предсказания становятся детерминированными, осуществляются с вероятностью единица. А в квантовой механике даже при полностью известном состоянии предсказания носят лишь вероятностный характер.

В квантовой теории *вероятность носит фундаментальный характер*. Сама возможность этого, ранее казавшаяся немислимой, стала огромным завоеванием науки. Пока не появилась квантовая механика, казалось очевидным, что движение, определяемое фундаментальными законами природы, всегда детерминировано, а случайность может возникать лишь в случае приближенного описания. Квантовая механика впервые показала, что случайность может быть существенным элементом фундаментальных законов природы, и тогда детерминистические (классические) законы движения возникают лишь при некотором огрублении, когда движение описывается не совсем точно (так что принцип неопределенности в рамках этого огрубления не проявляется).

В заключение выскажем, однако, крамольную мысль. Действительно ли Бор был в этом споре прав, а Эйнштейн оши-

бался? По поводу первого утверждения сомнений нет: Бор был прав. Но действительно ли Эйнштейн ошибался? Казалось бы, это с очевидностью следует как тривиальное логическое следствие: если один из спорящих прав, то второй ошибается. Однако тому же Бору принадлежит очень интересная мысль: случается, что некоторое высказывание истинно, но противоположное ему также истинно; тогда оба они выражают очень глубокие, фундаментальные истины. Не это ли случилось в случае спора Бора и Эйнштейна?

Иногда высказывается мнение, что даже в тех научных проблемах, в которых Эйнштейн потерпел неудачу, он был на самом деле прав в том, чего хотел или ожидал, в каком направлении предвидел дальнейшее развитие науки. Просто в этих случаях он не смог осуществить задуманное потому, что в этих своих стремлениях слишком опередил время. Примером являются многочисленные попытки Эйнштейна создать единую теорию поля, которым были посвящены его последние годы. Долгое время казалось, что в этом случае он ошибся, а его попытки были заранее обречены на провал, потому что вели в ложном направлении. Но в последние десятилетия XX века единая теория поля была создана, так что Эйнштейн оказался прав в своем стремлении ее построить. Только это его желание было преждевременным, не было еще инструментов для его осуществления.

Быть может, то же случилось и в споре Эйнштейна с Бором? Быть может, оба они были правы, каждый по-своему? Есть основания думать, что так оно и есть. Мы вернемся к этому в конце книги (см. главу 6 и стр. 244).

1.8. Парадокс

Эйнштейна–Подольского–Розена (1935)

Спор Альберта Эйнштейна с Нильсом Бором окончился на Сольвеевском конгрессе 1930 года победой Бора, однако Эйнштейн продолжал искать аргументы в пользу свое-

го мнения, то есть не против квантовой механики как таковой, но против той ее формы, которую предложил и отстаивал Бор, против копенгагенской интерпретации. Кроме вероятностной интерпретации, Эйнштейна тревожил принцип неопределенности. И вот в 1935 году он в соавторстве с Подольским и Розеном опубликовал работу, в которой попытался доказать, что квантовая механика, включающая принцип неопределенности, не может быть полной теорией. Эта работа строилась вокруг некоторого мысленного эксперимента, который приводил к выводам, казавшимся авторам работы парадоксальными. Эти выводы активно обсуждались в течение многих лет после выхода работы и получили название парадокса Эйнштейна–Подольского–Розена, или *парадокса ЭПР*.

Опыт, предложенный авторами, включал две точечные частицы, которые приводились в определенное состояние, а затем производились измерения над этими частицами. Состояние двух частиц описывается волновой функцией $\psi(q_1, q_2)$, зависящей от координат (q_1, q_2) обеих этих частиц. Требовалось, чтобы эта функция зависела лишь от суммы этих координат, $\psi(q_1, q_2) = f(q_1 + q_2)$, причем функция одной переменной $f(x)$ представляла собой очень узкий пик в точке 0. В этом случае волновая функция $\psi(q_1, q_2)$ отлична от нуля лишь тогда, когда сумма координат двух частиц $q_1 + q_2$ равна нулю. Это значит, что в том состоянии двух частиц, которое описывается данной волновой функцией, координата одной частицы равна по величине и противоположна по знаку координате второй частицы, $q_1 = -q_2$.

Если по правилам квантовой механики перейти от координатного представления к импульсному, то есть построить волновую функцию в импульсном представлении, $\tilde{\psi}(p_1, p_2)$, то окажется, что она имеет вид $\tilde{\psi}(p_1, p_2) = \tilde{f}(p_1 - p_2)$, где $f(x)$ — очень узкий пик в нуле. Это значит, что разность импульсов двух частиц $p_1 - p_2$ равна нулю, то есть импульсы двух частиц равны друг другу, $p_1 = p_2$. Итак, мы имеем дело с таким состо-

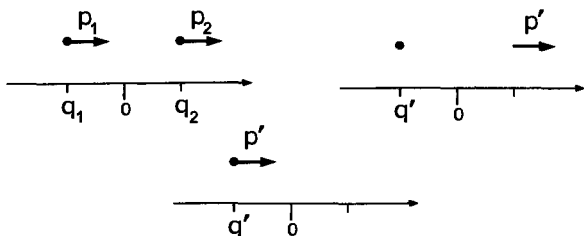


Рис. 1.7. Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена. Перед измерением $q_2 = -q_1$, $p_2 = p_1$; измерение дает $q_1 = q'$, $p_2 = p'$. В результате координата и импульс первой частицы точно известны: $q_1 = q'$, $p_1 = p'$. Но это невозможно в силу принципа неопределенностей.

янием двух частиц, в котором координаты этих частиц противоположны, а импульсы равны (рис. 1.7 слева).

Это означает, что координату первой частицы можно найти, измеряя координату второй частицы. То же касается и импульса: импульс первой частицы можно найти, измеряя импульс второй частицы. Это и приводило к парадоксу, к кажущемуся противоречию с принципом неопределенности.

Работу ЭПР понять непросто, логика рассуждений в ней очень тонкая. Попробуем упростить эту логику, рассуждая несколько иначе, но по существу эквивалентно.

Предположим, что в состоянии, предложенном ЭПР (которое только что описано), производится измерение координаты одной из частиц и импульс второй из них. Пусть при измерении координаты (первой частицы) получился результат q' , а при измерении импульса (второй частицы) результат p' . Но ведь в состоянии, которое было до измерения, сумма координат двух частиц и разность их импульсов равны нулю. Поэтому, рассуждая наивно, можно считать, что результат измерения координаты первой частицы дает нам одновременно и знание координаты второй, а измерение импульса второй частицы дает сведения и об импульсе первой. Итак, измерение показывает, что координата и импульс первой частицы равны

(q', p') , а координата и импульс второй частицы $(-q', p')$. Таким образом, такое наивное рассуждение приводит к выводу о том, что после проведенных измерений мы знаем точное значение и координаты, и импульса каждой из двух частиц, что противоречит принципу неопределенности Гейзенберга.

На самом деле, конечно, не стоит думать, что это наивное рассуждение справедливо и тем самым принцип неопределенности опровергнут. Напротив, поскольку принцип неопределенности является неотъемлемой чертой квантовой механики (подтверждается многими экспериментами), то следует сделать вывод, что такое наивное рассуждение некорректно.

Давайте уточним, какой именно элемент этого рассуждения оказывается некорректным и приводит к ошибке. Ключевой (на самом деле некорректный) элемент рассуждения состоит в следующем. Если мы измеряем импульс второй частицы и получаем величину p' , то это значит, что импульс первой частицы тоже равен p' . Это на самом деле неверно. Верно более слабое утверждение: если измерение импульса второй частицы дало величину p' , то измерение импульса первой частицы с вероятностью 1 (то есть вполне достоверно) даст величину p' . Итак, верно, что *измерение импульса первой частицы даст p'* . Неверно, что *импульс первой частицы равен p'* .

Почему нам наивно кажется, что это одно и то же? Потому что мы пользуемся классическим понятием реальности. Ведь *в классической теории* (к которой мы привыкли, и на которой выросла наша интуиция) *то, что мы получаем при измерении, реально существовало и до измерения*. При измерении мы лишь получаем информацию о реально существующем, но ни в какой мере не меняем реальность. Вот это-то казалось бы очевидное понимание реальности и измерения в квантовой механике не имеет места. *В квантовой механике реальность творится при измерении*.

Именно на эти очень тонкие различия в классическом и квантовом понимании реальности обратили внимание Эйнштейн, Подольский и Розен (в несколько иной формули-

ровке). Они пришли к заключению, что квантовая механика неполна в том смысле, что она не включает «элементы реальности» (читай — не включает реальность в классическом ее понимании). Различия между классическим и квантовым пониманием реальности стали очень актуальными в последние десятилетия.

Вывод ЭПР о неполноте квантовой механики (в смысле включения элементов реальности) был назван парадоксом ЭПР и чрезвычайно часто обсуждался в литературе. Впоследствии мысленный эксперимент, предложенный ЭПР, был модифицирован Давидом Бомом так, что стал более наглядным. В этой модификации частица спина 0 (спин — это «внутренний момент вращения» частицы) распадалась на две частицы спина $1/2$, а затем у этих частиц измерялись проекции спина на те или иные оси.

Если измерялись проекции на одну и ту же ось (скажем, ось z), то возникала корреляция: если проекция первой частицы при измерении оказывается равной $+1/2$, то проекция второй обязательно окажется равна $-1/2$ (это следует из сохранения суммарной проекции спина и того факта, что до измерения она равна нулю).

Парадокс возникал, когда измерялись проекции спина на ортогональные оси: скажем, проекция первой частицы на ось z , а проекция второй частицы — на ось x . В этом случае, если сделать предположение о том, что измеряемые значения проекций спина являются элементами реальности, то оказывается, что мы имеем возможность определить одновременно проекции спина частицы на две ортогональные оси. Но квантовая механика утверждает, что это сделать невозможно. Значит квантовая механика неполна.

Затем появилась работа Джона Белла, в которой корреляция результатов измерений в таком эксперименте формулировалась в форме некоторых неравенств (*неравенств Белла*). Для того, чтобы проверить, существуют ли на самом деле проекции спинов как элементы реальности, достаточно бы-

ло проверить выполнение неравенств Белла. Были проведены опыты, которые доказали, что неравенства Белла нарушаются, и значит понятие реальности в классическом смысле слова опровергнуто экспериментально (см. приложение В.2 и раздел 4.1).

Таким образом, работа Эйнштейна–Подольского–Розена не опровергла квантовой механики в силу ее неполноты (как, может быть, ожидали авторы), но в большой мере способствовала прояснению ее основ. В этой работе впервые критически обсуждалось понятие реальности, то есть такой элемент теории, который до этого принимался как самоочевидный.

Кроме того, в ходе последующего обсуждения работы ЭПР было особо выделено понятие квантовой корреляции, которое оказалось чрезвычайно важным не только в плане понимания основ квантовой механики, но и в чисто техническом и даже прикладном плане. В последние десятилетия на основе этого понятия возникли качественно новые приложения квантовой механики, в которых производятся операции с квантовой информацией, то есть информацией, записанной на квантовых носителях.

Оказывается, что квантовый характер носителей позволяет сделать информационные процессы существенно более эффективными. В частности, устройства квантовой криптографии позволяют абсолютно защитить информацию от несанкционированного прослушивания, а квантовый компьютер, если он будет создан, позволит решать такие задачи, для решения которых на классических компьютерах не хватит даже времени жизни Вселенной. Мы поговорим об этом позднее, в разделе 2.4.

Эффект ЭПР открывает путь к такому развитию квантовой механики, при котором учитывается сознание наблюдателя, и даже далее — к «квантовой теории сознания». Об этом мы будем говорить в части II. Возможно, именно такого развития теории хотел Эйнштейн, когда он не соглашался с Бомом, несмотря на неопровержимые доводы.

1.9. Основные этапы создания квантовой механики

Чтобы наглядно представить историю создания квантовой механики, перечислим основные результаты этого периода, их авторов и Нобелевские премии, полученные ими.

- Квантование энергии: Макс Планк, 1900 (премия 1918).
- Фотоны: Альберт Эйнштейн, 1905 (премия 1921).
- Атомные уровни: Нильс Бор, 1913 (премия 1922).
- Корпускулярно-волновой дуализм: Луи де Бройль, 1923–1924 (премия 1929).
- Принцип запрета: Вольфганг Паули, 1924–1925 (премия 1945).
- Матричная механика и принцип неопределенности: Вернер Гейзенберг, 1925 и 1927 (премия 1932).
- Волновая функция: Эрвин Шредингер, 1926; Поль Дирак, 1926–1927 (совместная премия 1933).
- Вероятностная интерпретация волновой функции: Макс Борн, 1926 (премия 1954).
- Математически строгая формулировка квантовой механики: Джон фон Нейман, 1927–1932.

НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Со времени создания квантовой механики основные ее идеи не изменились. Однако она существенно развилась, на ее основе возникли новые области науки и появилось большое количество приложений. В ряде случаев эти приложения нашли широкое применение в практике.

Изменения самой квантовой механики состоят в том, что развился ее математический аппарат, в том числе используемые ею вычислительные методы, и изучено большое количество специфических явлений (эффектов), возникающих в квантовых системах (о некоторых из них мы будем говорить ниже). Среди новых областей науки, которые выросли на основе квантовой механики, прежде всего следует назвать квантовую теорию поля, описывающую квантовомеханические объекты при скоростях, близких к скорости света. Еще одна интереснейшая новая наука — это квантовая гравитация. Формально ее можно рассматривать как частный случай квантовой теории поля, но она обладает существенной спецификой, потому что само гравитационное поле отличается от других полей (например, электромагнитного) тем, что имеет геометрическую природу: как показал Эйнштейн, гравитаци-

онные эффекты наиболее естественно описываются как искривление пространства-времени.

Мы не будем в этой книге касаться чрезвычайно интересных, но сложных новых областей квантовой физики. Остановимся лишь, по необходимости кратко, на технических приложениях, которые возникли на базе квантовой механики.

Приложения квантовой механики чрезвычайно многообразны. По сути дела уже с последней четверти XX века нас окружают приборы и устройства, основанные на квантовых эффектах. Есть еще множество интереснейших квантовых эффектов, которые пока не внедрены в практику, но рано или поздно тоже войдут в нашу жизнь. Не претендуя на полный обзор, в этой главе мы представим, в качестве иллюстраций, лишь несколько наиболее известных приложений квантовой механики. Каждое из этих приложений связано со специфическими квантовыми эффектами, которые интересны сами по себе. Суть этих эффектов будет интересовать нас больше, чем чисто техническая, прикладная сторона дела.

2.1. Макроскопические квантовые явления: сверхтекучесть и сверхпроводимость

Обычно говорят, что квантовая механика — это теория микроскопических явлений. И действительно, первые объекты, которые натолкнули на мысль о специфических чертах квантовых явлений, были микроскопическими: это фотоны, электроны и атомы.

Макроскопические тела тоже состоят из микроскопических объектов: атомов, молекул, ионов и электронов. Однако в макроскопическом теле содержится огромное количество таких микрообъектов.¹ Для того, чтобы вполне удовлетворительно описать поведение такого тела, вовсе не обязательно

¹Из школьного курса известно, что число атомов или молекул, содержащихся в одном моле вещества (например, в 12 г углерода), равно числу Авогадро $N_A = 6 \cdot 10^{23}$.

детально знать поведение каждого атома (не нужно знать, например, положение каждого атома, достаточно того, что известна плотность тела, то есть количество атомов в единице его объема). Квантовые свойства отдельных атомов обычно не проявляются в поведении макроскопических тел, и эти тела хорошо описываются классической физикой.

Однако это не всегда так. В частности, макроскопические тела проявляют квантовые свойства, если возникают такие *макроскопические квантовые явления*, как сверхпроводимость (полное отсутствие сопротивления при протекании тока) и сверхтекучесть (полное отсутствие трения при течении жидкости). Оба эти явления сначала были открыты экспериментально и лишь потом получили объяснение в рамках квантовой теории.

Сверхпроводимость была открыта голландским физиком Гейке Камерлинг-Оннесом в 1911 году при изучении сильно охлажденной ртути. Измеряя электрическое сопротивление ртути при ее охлаждении, он обнаружил, что при температуре² $T = 4\text{K}$ сопротивление ртути скачком падает до нуля. Это и есть явление сверхпроводимости. Позднее Камерлинг-Оннес обнаружил сверхпроводимость олова, свинца, галлия и других металлов. Затем другие исследователи создали сплавы, которые переходили в сверхпроводящее состояние при более высоких температурах. Наконец, уже в наше время, в слоистых керамиках, которые специальным образом изготавливались (спекались при высокой температуре), была обнаружена *высокотемпературная сверхпроводимость* (ВТСП), наступающая при температурах порядка 80K , то есть порядка -190°C .

Сверхпроводимость воспроизводится и используется в лабораториях, однако широкого применения она пока не может найти, потому что требует охлаждения до очень низких температур. Для металлов и сплавов это так называемые гелие-

²Это означает 4 градуса Кельвина, что на 4 градуса выше абсолютного нуля, равного в градусах Цельсия -273°C , то есть $4\text{K} = -269^\circ\text{C}$.

вые температуры, охлаждение до которых производится с помощью жидкого гелия, производство которого обходится дорого. Для высокотемпературных сверхпроводников достаточно охлаждения жидким азотом. Это значительно дешевле, однако керамики, проявляющие свойство высокотемпературной сверхпроводимости, хрупки и, кроме того, остаются в сверхпроводящем состоянии при пропускании лишь очень слабых токов, а для сильноточной аппаратуры непригодны.

Мечта экспериментаторов заключается в том, чтобы создать вещества, переходящие в сверхпроводящее состояние уже при комнатной температуре. Это открыло бы огромные перспективы для практического применения эффекта (особенно если бы сверхпроводники выдерживали большие токи). Еще бы, ток течет по сверхпроводнику, не встречая сопротивления, то есть без всяких потерь. Если из сверхпроводника изготовить обмотку электромагнита и пустить через нее ток, то на его поддержание уже не нужно расходовать энергию. Используя такие электромагниты, можно подвесить на магнитной подушке вагоны поезда, и они будут двигаться без трения. Фантастическая картина, которая в принципе может стать реальностью. Однако пока сверхпроводимости при комнатных температурах достичь не удастся. Работы в этом направлении продолжаются, и остается надежда, что они в конце концов приведут к успеху.

Не менее фантастической кажется и возможность того, что жидкость может течь без трения. Тем не менее квантовая механика делает это возможным. *Сверхтекучесть* была обнаружена в 1938 году Петром Леонидовичем Капицей, который при температурах ниже $2K$ наблюдал протекание жидкого гелия через очень узкие капилляры. Для нормальной жидкости это было бы невозможно из-за конечной вязкости. Капица показал, что гелий при таких температурах состоит из двух компонент, нормальной и сверхтекучей, и сверхтекучая компонента протекает через капилляры практически без трения.

Посмотрим, как квантовая механика объясняет эти странные явления, сверхпроводимость и сверхтекучесть.

Явления сверхпроводимости и сверхтекучести существенно отличаются друг от друга, потому что возникают в коллективах частиц различной природы. Сверхпроводимость наблюдается для тока, представляющего собой поток электронов, а сверхтекучесть — для потока атомов гелия. Принципиальная разница между электронами и атомами гелия состоит в том, что электрон является *фермионом*, а атом гелия — *бозоном*. Эти два типа частиц совершенно по-разному ведут себя, когда собираются в коллективы. Имея это в виду, говорят, что они обладают разными типами статистики.

Мы говорили уже об открытом Вольфгангом Паули принципе запрета, который не позволяет двум электронам находиться в одном и том же состоянии. Происходит это потому, что волновая функция двух электронов $\Psi(q_1, q_2)$ (зависящая от координат обоих этих электронов), должна быть антисимметричной, то есть менять знак при перестановке координат электронов. Если бы электроны были в одном и том же состоянии, описываемом волновой функцией $\psi(q)$, то их совместная волновая функция имела бы вид $\Psi(q_1, q_2) = \psi(q_1)\psi(q_2)$. Но такая функция не может быть антисимметричной. Значит, два электрона не могут быть в одном и том же состоянии. Волновая функция $\Psi(q_1, q_2, \dots)$ коллектива из многих электронов меняет знак при перестановке любой пары аргументов, так что никакие два электрона в этом коллективе не могут находиться в одном и том же состоянии.

Впоследствии было показано, что этим свойством обладают не только электроны, но и все частицы, у которых внутренний момент вращения (спин) s является полуцелым, то есть равен $s = \frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \frac{5}{2}\hbar, \dots$, или, если измерять спин в единицах $\hbar$, то $s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$. В честь ученых, открывших это свойство, про такие частицы говорят, что они подчиняются *статистике Ферми-Дирака*, или что они являются *фермионами*. Итак, два

одинаковых фермиона (например, два электрона, или два протона, или два нейтрино) не могут находиться в одном и том же состоянии.

Частицы, имеющие целый спин $s = 0, 1, 2, \dots$, обладают противоположным свойством. Волновая функция коллектива таких частиц $\Psi(q_1, q_2, \dots)$ симметрична по своим аргументам. О таких частицах говорят, что они подчиняются *статистике Бозе-Эйнштейна* или что они являются *бозонами*. В противоположность фермионам, бозоны не только могут быть в одном и том же состоянии, но и стремятся оказаться в одном состоянии: чем больше бозонов данного коллектива находится в одном и том же состоянии, тем более вероятно, что еще один бозон перейдет в это состояние. Вот это и приводит к специфическому явлению, которое проявляется как сверхтекучесть жидкости, состоящей из бозонов.

Поскольку бозоны стремятся перейти в одно и то же состояние, при достаточно низкой температуре (когда тепловое движение частиц перестает мешать этому переходу) в жидкости, состоящей из бозонов, большая часть этих частиц оказывается в одном и том же состоянии. Образуется так называемый *бозе-эйнштейновский конденсат*. Бозе-жидкость, находящаяся в таком состоянии, может обнаруживать свойство сверхтекучести.

Если почти все бозоны некоторого коллектива находятся в одном и том же состоянии, то описать состояние (волновую функцию) одной частицы — значит описать состояние всего коллектива частиц (или большей его части). Состояние всего коллектива бозонов описывается в этом случае волновой функцией одного единственного бозона. Макроскопическое тело (бозе-жидкость) проявляет при этом квантовые свойства точно так же, как и одна микроскопическая частица. Другими словами, мы имеем дело в этом случае с *макроскопическим квантовым явлением*.

Теория сверхтекучести гелия была создана в 1940–1941 годах Л. Д. Ландау. На этой основе он в 1956 году разработал

общую теорию квантовых жидкостей, включая теорию жидкостей, состоящих из фермионов. В 1962 году Ландау получил за эти работы Нобелевскую премию.

Явление *сверхпроводимости* означает, что поток электронов не встречает сопротивления. В этом смысле сверхпроводимость похожа на сверхтекучесть. Однако она не может быть объяснена тем же способом, потому что электроны являются фермионами и не могут находиться в одном и том же состоянии. Кроме того, будучи одинаково заряженными частицами, электроны отталкиваются друг от друга. По этим причинам сверхпроводимость долго не поддавалась объяснению.

В 1950 году Л. Д. Ландау и В. Л. Гинзбургом была предложена феноменологическая теория сверхпроводимости (так называемая *теория Гинзбурга-Ландау*). Она правильно описывала происходящие в сверхпроводниках явления и поэтому позволяла производить расчет, хотя все же не объясняла природу происходящего. За это достижение В. Л. Гинзбург получил Нобелевскую премию в 2003 году совместно с А. А. Абрикосовым и Энтони Леггетом, которые внесли вклад в дальнейшее развитие теории Гинзбурга-Ландау.

Феноменологическая теория правильно описывала явление сверхпроводимости, но не объясняла, почему это явление возникает. Лишь в 1957 году Джон Бардин, Леон Купер и Джон Роберт Шриффер сформулировали микроскопическую теорию сверхпроводимости (которую называют *теорией БКШ*). Оказалось, что в сверхпроводнике электроны связываются в пары (так называемые *куперовские пары*), которые ведут себя как бозоны. Поэтому сверхпроводимость — это сверхтекучесть пар электронов.

Секрет в том, что хотя отдельный электрон имеет полуцелый спин $s = 1/2$ и является, следовательно, фермионом, пара электронов имеет спин, который получается сложением двух полуцелых спинов. Значит, спин пары электронов является целым, то есть куперовская пара — это бозон, и коллектив ку-

перовских пар может перейти в макроскопическое квантовое состояние, в котором большая часть пар находится в одном и том же состоянии.

Заслуга Бардина, Купера и Шриффера состояла в том, что они поняли, как между электронами может возникнуть притяжение, которое связывает их в пары. В газе, состоящем из электронов (такой газ электронов называется плазмой) это было бы невозможно, так как одинаково заряженные электроны отталкиваются друг от друга. Но если электроны движутся в кристаллической решетке (именно это имеет место в металле или сплаве), то за счет взаимодействия электронов с кристаллической решеткой возникает эффективное притяжение электронов друг к другу. Если температура металла является достаточно низкой, то тепловое движение не может разрушить пары, возникающие за счет этого притяжения. В результате образуется конденсат куперовских пар, и поток таких электронных пар является сверхтекучим, то есть исчезает сопротивление электрическому току.

За создание микроскопической теории сверхпроводимости Бардин, Купер и Шриффер получили Нобелевскую премию в 1972 году.

2.2. Лазеры

Лазеры, то есть квантовые генераторы когерентного оптического излучения, широко применяются в современной технике, в том числе в бытовой технике. Типичный пример — устройство, считывающее информацию с компакт-диска в компьютере или музыкальном центре. Часто приходится слышать о медицинских операциях (например, на глазах), которые проводятся лазерным лучом вместо скальпеля. В фильмах-боевиках мы видим винтовки с лазерным прицелом, а в залах конференций — лазерные указки. Лазеры генерируют свет, который переносит по световоду огромное количество информации, и это используется в информационных

сетях. Словом, во многих современных технических устройствах основным элементом является лазер.

Связано это с тем, что лазер дает *монохроматическое когерентное излучение*. Это значит, что частота такого излучения и его фаза имеют определенные и строго постоянные значения (точнее — лежат в чрезвычайно узких интервалах). А это в свою очередь обеспечивается за счет квантового эффекта, аналогичного тому, который приводит к сверхпроводимости и сверхтекучести.

Световое излучение, вырабатываемое обычными, неквантовыми, устройствами, например, свечой или электрической лампочкой, состоит из огромного количества фотонов, находящихся в различных, никак не связанных друг с другом, состояниях. Поэтому излучение таких источников представляет собой сумму волн, имеющих самые разные частоты и фазы. Такое излучение является *некогерентным*. В лазере же удастся достичь того, что все фотоны, составляющие излучение (или большая их часть), находятся в одном и том же состоянии, которое характеризуется определенной частотой и определенной фазой. Излучение лазера *когерентно*.

Первые квантовые генераторы, сначала в радиодиапазоне (мазеры), а затем — в световом (лазеры) были созданы в 50-х годах XX века независимо российскими физиками А. М. Прохоровым и Н. Г. Басовым и американским физиком Чарльзом Таунсом. За эти работы всем троим в 1959 году присуждена Нобелевская премия.

Когерентность излучения в лазере достигается за счет квантового *эффекта индуцированного излучения*, который мы кратко опишем.

Основой конструкции лазера является резонатор (рис. 2.1), настроенный на определенную частоту ν . Это значит, что на длине резонатора укладывается целое число длин волн $\lambda = c/\nu$. Одна из стенок резонатора представляет собой полупрозрачное зеркало, так что через него часть излучения, на-

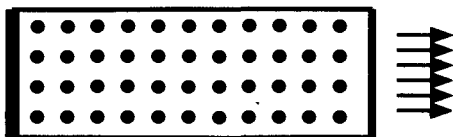


Рис. 2.1. Схема лазера. Внутри резонатора (пары параллельных зеркал), настроенного на определенную частоту, — активная среда. Правое зеркало полупрозрачно.

копленного в резонаторе, может выйти наружу. Внутри резонатора находится активная среда, перерабатывающая поступающую в него энергию в излучение частоты ν . Для этого каждый атом активной среды должен иметь пару энергетических уровней, скажем, E_1 и E_2 , переход между которыми дает фотоны той же частоты ν , что и частота резонатора, то есть имеет место соотношение $E_2 - E_1 = h\nu$. Уровни подбираются так, что возможен спонтанный (самопроизвольный) переход с уровня E_2 на уровень E_1 . При таком переходе излучается фотон частоты ν .

Такое устройство работает следующим образом. За счет энергии накачки, постоянно поступающей в лазер, большинство атомов активной среды переводится на верхний из двух резонансных уровней, то есть на уровень E_2 . Некоторое количество активированных таким образом атомов спонтанно перейдут на уровень E_1 . Испущенные при этом фотоны по большей части останутся в резонаторе, так как их частота согласована с его конфигурацией (на длине резонатора укладывается целое число волн этого излучения).

После этого переходы атомов среды с уровня E_2 на уровень E_1 с испусканием фотонов частоты ν станут более вероятными. Причина этого — специфический квантовый эффект *индуцированного излучения*. Дело в том, что переходы между уровнями могут происходить не только спонтанно, но и под влиянием электромагнитного поля, в котором оказыва-

ется атом (переходы могут индуцироваться этим полем). Вероятность индуцированных переходов резко возрастает, если внешнее поле имеет частоту, находящуюся в резонансе с данными уровнями. При этом испускается излучение, имеющее ту же частоту, фазу и поляризацию, что и у внешнего поля, то есть ничем от него не отличается. Это и есть квантовый эффект индуцированного излучения (понятие, введенное Эйнштейном).

Именно такая ситуация складывается в атомах активной среды лазера. Фотоны, полученные за счет спонтанного излучения, вызывают индуцированное излучение атомов активной среды, в результате чего число фотонов в резонаторе увеличивается. В течение короткого времени устанавливается режим, при котором почти все фотоны в резонаторе имеют одну и ту же частоту и фазу, а активированные атомы в режиме индуцированного излучения испускают фотоны этой же частоты и фазы. Часть фотонов уходит из резонатора через полупрозрачное зеркало, но атомы, которые уже перешли на нижний уровень, вновь активируются за счет энергии накачки и вновь испускают фотоны, поддерживая число фотонов в резонаторе на постоянном уровне. Процесс становится стационарным, и через полупрозрачное зеркало непрерывно испускается когерентное излучение (то есть излучение, имеющее фиксированные частоту и фазу).

Из-за когерентности излучения испускаемый лазером луч почти не расходится и поэтому может (при условии достаточной прозрачности внешней среды) распространяться на далекие расстояния. Более того, даже с непрозрачностью среды можно бороться. Разработаны технологии, которые позволяют, сканируя среду и выясняя, какие в ней имеются неоднородности, настраивать луч лазера так, чтобы он почти не затухал в этой среде (эффект сверхпрозрачности).

В настоящее время разработано большое число лазеров, генерирующих излучение различных частот и интенсивностей. Имеются и лазеры, частоту которых можно перестраивать, и

сверхмощные лазеры. Имеются лазеры, рассчитанные на различные способы накачки энергии, в том числе лазеры с накачкой за счет атомной энергии.

Сфера применения лазеров постоянно расширяется. Одним из интересных направлений их применения является *голография*, то есть создание, на основе когерентного излучения, объемных изображений. Несколько таких голограмм можно видеть в экспозиции Политехнического музея в Москве. Кроме того, голограммы можно использовать для создания записывающих устройств очень большой емкости и для переработки огромных массивов информации. Вероятно, оптические технологии будут основой для работы будущих поколений компьютеров. Лазеры, таким образом, дают пример огромной технологической мощи, которую обеспечивает применение принципов квантовой механики.

2.3. Полупроводниковые структуры и нанотехнология

Мы видели, что особые свойства квантовых систем по сравнению с классическими делает возможным появление новых технологий. Однако препятствием на пути этих технологий часто оказываются параметры естественных микроскопических объектов, например, атомов. Для тех или иных технических целей бывает желательно иметь микрообъекты с такими параметрами, которые не встречаются в природе. В последние десятилетия оказалось возможным создавать такие объекты в форме *полупроводниковых структур*. Это значит, что полупроводниковый материал сознательно делается неоднородным, чтобы на созданных таким образом микроскопических неоднородностях возникали нужные квантовые эффекты. Примером этого являются «квантовые точки», играющие роль искусственных атомов, имеющих гораздо большие размеры, чем атомы естественные.

С другой стороны, на основе квантовых эффектов созданы

приборы (туннельные и силовые микроскопы), которые позволяют «видеть» отдельные атомы вещества и манипулировать этими атомами. Это позволило изучать структуру материалов с точностью до индивидуальных атомов и конструировать материалы с заданной структурой, в которых атомы расположены так, как требуется человеку. Это открыло огромный спектр новых технологических возможностей, которые условно объединяются под именем *нанотехнологии*.

Важно отметить, что огромные и очень быстро расширяющиеся перспективы, связанные с нанотехнологией, вызывают в то же время тревогу, потому что могут иметь непредвиденные негативные последствия. Это возможно, например, при попытках вмешиваться в тонкие механизмы, работающие в живой природе.

2.3.1. «Искусственные атомы»

Квантовая механика, обнаружившая странные свойства микрообъектов (прежде всего атомов), позволила использовать эти свойства для создания приборов нового типа (например, лазеров). Однако такого рода приложения неизбежно встречаются с ограничениями, вытекающими из характерных параметров микрообъектов. Например, из-за малых размеров атомов их резонансные частоты сравнительно велики, они лежат в области видимого света или вблизи нее. Получить на основе атомов приборы, работающие на низких частотах (больших длин волн), невозможно. Поэтому для создания таких низкочастотных квантовых приборов необходимы своего рода «искусственные атомы» с размерами, которые намного больше, чем у обычных естественных атомов.

Действительно, характерные частоты атома прямо связаны с его размерами: частота излучения обратно пропорциональна квадрату размера атома, $\nu \propto 1/l^2$. Мы сейчас покажем это, используя для доказательства принцип неопределенности, и заодно найдем коэффициент пропорциональности (это вычисление читатель может пропустить).

Пусть размер атома по порядку величины равен l . Тогда неопределенность положения электрона в таком атоме тоже приближенно можно оценить величиной l . В соответствии с принципом неопределенности (раздел 1.6.1), электрон имеет при этом неопределенность импульса порядка или больше, чем $\hbar/2l$ (здесь $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-27}$ г·см²/сек). Это значит, что абсолютная величина импульса электрона по порядку величины тоже равна $p \sim \hbar/2l$. Энергия электрона тогда приблизительно равна $E_e = p^2/2m_e \sim \hbar^2/4m_el^2$. Если при излучении фотона электрон передает часть своей энергии этому фотону (и при этом размер атома меняется не слишком сильно), то энергия фотона имеет тот же порядок, $E_{\text{photon}} \sim \hbar^2/4m_el^2$. В силу соотношения $E_{\text{photon}} = h\nu = 2\pi\hbar\nu$ мы получаем оценку для частоты фотона:

$$\nu \sim \frac{\hbar}{8\pi m_e l^2} = \frac{0,04 \text{ см}^2/\text{сек}}{l^2}$$

Чтобы проверить полученную формулу, оценим с ее помощью характерную частоту излучения атома водорода. Подставим вместо l боровский радиус $a_0 = \hbar^2/me^2 = 0,5 \cdot 10^{-8}$ см (размер атома водорода в основном, то есть имеющем минимальную энергию, состоянии, см. разделы 1.3 и 1.5). Тогда для частоты излучения получим величину $\nu \sim 1,6 \cdot 10^{15}$ сек⁻¹. Это всего лишь в два раза меньше, чем частота первой спектральной линии, входящей в серию Лаймана спектра водорода (частота $\nu = 3,3 \cdot 10^{15}$ сек⁻¹, длина волны $\lambda = 1,22 \cdot 10^{-5}$ см). Для грубой оценки это очень хороший результат.

Итак, характерные для атомов частоты прямо связаны с размерами атомов. Чтобы получить излучение намного меньших частот, понадобились бы атомы намного больших размеров, чего в природе не бывает.³ Однако такие огромные «искусственные атомы» можно создать на основе полупроводниковых материалов. Для этого в полупроводнике создают неоднородности, вкрапления полупроводника с другими характеристиками, называемые *квантовыми точками*. В результате возникает область, в которой электрический потенциал понижен (потенциальная яма) и которая, следовательно, может удерживать электроны наподобие того, как они удерживаются положительным ядром атома.

³ На самом деле атом, находящийся на очень высоком уровне энергии, имеет большой размер. Это так называемые ридберговские состояния атомов. Но такие состояния нестабильны.

Создавая множество квантовых точек, расположенных через равные интервалы, можно получить искусственный кристалл. Вместо квантовых точек, можно конструировать одномерные и двумерные полупроводниковые структуры (*квантовые проволоки и квантовые стенки*). Комбинации различных типов полупроводниковых структур служат основой информационных технологий, которые все более окружают нас даже в повседневной жизни. В основе действия всех таких устройств лежат законы квантовой механики. В 2001 году петербургский ученый Ж. И. Алферов получил за разработку полупроводниковых гетероструктур Нобелевскую премию.

2.3.2. Нанотехнология

В конце XX века появилась возможность изучать, а потом и модифицировать пространственную структуру различных материалов с точностью до нескольких атомов и даже с точностью до одного атома. Атомы имеют размер порядка десятой доли нанометра, 10^{-8} см = 10^{-10} м = 0,1 нм (1 нм = 10^{-9} м). Поэтому для того, чтобы манипулировать небольшим количеством атомов или даже отдельными атомами, необходимы приборы, различающие объекты размерами порядка нанометра или даже долей нанометра. Такие приборы были созданы на основе квантовых эффектов. Они позволили решать совершенно новые технические задачи, которые объединяются под именем *нанотехнологии*.

Сейчас нанотехнология развивается невиданными темпами. Во всем мире в нее вкладываются огромные материальные и интеллектуальные ресурсы. Ее достижения быстро растут, а в перспективе сулят фантастические возможности.

Первым прибором, который позволил приблизиться к нанометровому диапазону пространственных размеров, был *сканирующий туннельный микроскоп* (G. Binnig, G. Rohrer, 1982 г.). Основным элементом его является металлическое острие, настолько тонкое, что на конце его находится всего один атом. При помощи специального устройства острие пе-

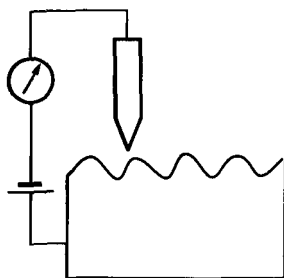


Рис. 2.2. Схема работы сканирующего микроскопа. Острый электрод помещается над определенной точкой образца, и на электрод подается постоянное напряжение. Туннельный ток между этим электродом и образцом зависит от расстояния между электродом и ближайшей к нему точкой образца. Изменение положения электрода (сканирование поверхности образца) и измерение тока позволяет определить форму поверхности с точностью до размера атома.

ремещается над поверхностью металла, сканируя эту поверхность (рис. 2.2).

Когда острый останавливается над некоторой точкой на поверхности металла, между ним и металлом прикладывается электрическое напряжение. В результате возникает ток, протекающий через узкий вакуумный зазор между острием и металлом. Несмотря на то, что вакуум является изолятором, такой ток через вакуум возможен из-за специфического квантового *туннельного эффекта*.⁴ При этом в силу специфики туннельного эффекта сила тока резко меняется при изменении расстояния между острием и ближайшей к нему точкой про-

⁴Электрон,двигающийся в проводнике и достигающий его границы, воспринимает вакуум,заполняющий промежуток между двумя проводниками, как высокий потенциальный барьер. Если бы электрон был классической частицей, он был бы остановлен таким барьером (потому вакуум и является изолятором). Но из-за своих квантовых свойств электрон может проникнуть сквозь барьер, как бы пробив в нем туннель. Эта его способность называется туннельным эффектом, а само проникновение сквозь барьер — *туннелированием*.

водника. Если это расстояние меняется на величину, равную размеру атома, ток меняется на три порядка. Поэтому по величине туннельного тока можно судить, находится ли острие над атомом или между атомами. При сканировании возникает картина, воспроизводящая рельеф поверхности.

Наилучшее разрешение по нормали к поверхности проводника достигает сотых долей нанометра. Таким образом, структура поверхности изучается с точностью до одного атома. Аналогичным образом действует и сканирующий атомно-силовой микроскоп, который измеряет силу притяжения между острием и поверхностью вещества (G. Binnig, K. Kuatt, K. Gerber, 1986 г., Нобелевская премия 1992 г.).

Сканирующий микроскоп можно использовать и для перемещения атома в точку, выбранную оператором. Для этого острие микроскопа определенным образом двигается, так, чтобы оно как бы сталкивало атом в соседнюю точку. Таким образом удастся создавать наноструктуры, то есть структуры на поверхности вещества, имеющие размеры порядка нанометра.

С помощью специальных манипуляторов можно не только создавать структуры на поверхности материала, но и собирать из отдельных атомов микроскопические объекты, состоящие из нескольких атомов. В таких объектах атомы расположены в том порядке, который необходим экспериментатору, даже если этот порядок никогда не встречается в природе.

Важным направлением в нанотехнологии оказалось создание *углеродных нанотрубок*. Нанотрубка представляет собой гигантскую молекулу, состоящую из огромного числа (сотен тысяч и даже миллионов) атомов углерода (см. рис. 2.3). Атомы углерода расположены на поверхности трубки в вершинах правильных шестиугольников. Концы трубки закрыты с помощью шести правильных пятиугольников. Диаметр такой трубки — около одного нанометра (10^{-9} м), а длина может достигать нескольких десятков микрон ($\sim 10^{-5}$ м). Если некоторые шестиугольники на поверхности трубки заменить

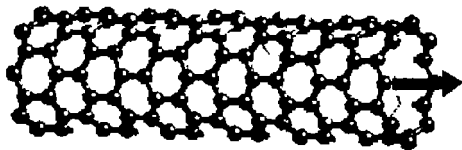


Рис. 2.3. Углеродная нанотрубка. Атомы углерода, расположенные в углах правильных шестиугольников, образуют поверхность трубки.

на пятиугольники (тем самым сознательно вводя «дефекты»), то возникает определенным образом изогнутая трубка.

Межатомные связи, которые соединяют атомы углерода друг с другом, настолько сильны, что бездефектная углеродная трубка на два порядка прочнее стальной проволоки того же диаметра. В то же время она в четыре раза легче. Поэтому на основе таких трубок можно создавать уникальные прочные и легкие конструкции, которые невозможны, если пользоваться лишь обычными материалами.

Конечно, мечтой исследователей является создание очень длинных углеродных трубок (теоретически они могут иметь любую длину). Если бы это удалось, то открылись бы фантастические возможности. Характерным примером является проект «космического лифта». Это лента длиной в 100 000 км, которая одним концом закреплена на поверхности Земли. Другой конец оказывается в космосе, причем вся лента поддерживается в поднятом положении центробежными силами, возникающими в результате вращения Земли. Такой «лифт» позволял бы поднимать в космос грузы с гораздо меньшей затратой энергии: если на начальном участке пути грузу нужно сообщить некоторую скорость, то на конечном этапе скорость будет увеличиваться за счет центробежной силы.

Кроме высокой прочности длинные нанотрубки должны иметь очень высокую электрическую проводимость. Предполагается, что электрические кабели, сделанные из нанотру-

бок, при комнатной температуре будут иметь электрическое сопротивление на два порядка меньше медных.

Есть, конечно, и другие возможности для приложения этих удивительных молекул — нанотрубок. Например, они могут применяться для конструирования плоских акустических систем и дисплеев.

Большие технологические возможности, которые уже сейчас находят применения, предоставляют так называемые *нанокластеры*, то есть частицы, содержащие от десятков до тысяч атомов. Из нанокластеров можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными свойствами, недостижимыми для обычных материалов. Можно создать, например, магнитные кластеры, обладающие собственным магнитным моментом. Полученные с помощью таких кластеров материалы можно будет использовать для создания магнитной памяти нового поколения. Плотность памяти при этом будет достигать 10 гигабайт на квадратный сантиметр.

Из наноматериалов в принципе могут создаваться всевозможные наноустройства, то есть технические устройства с размерами в нанодиапазоне. Это могут быть, например, нанодвигатели, наноманипуляторы, элементы механизмов нанороботов.

Если большинство такого рода проектов пока остаются лишь мечтами (хотя в принципе кажутся возможными), то многочисленные применения нанотехнологии в медицине и молекулярной биологии близки к реализации или уже реализованы в лаборатории. Ведь с помощью наноманипуляторов можно создавать причудливые конструкции, включающие как раз те молекулы и макромолекулы, которые нужны экспериментатору.

Следует заметить, что, как и всякая эффективная технология, нанотехнология несет с собой угрозы, которые трудно заранее полностью оценить. Особенно это видно в случае медицины. И сейчас уже очень сильные средства, которыми обладает современная медицина, несут с собой не только поло-

жительные, но и существенные и часто непредсказуемые отрицательные последствия. С появлением тех средств, которые предлагает нанотехнология, опасности только возрастут.

2.4. Квантовая информатика

В последние десятилетия 20-го века появился еще один класс приложений квантовой механики, получивший название *квантовой информатики*. Первая работа, в которой высказывалась идея квантового компьютера, была опубликована Ричардом Фейнманом. Первые серьезные разработки по квантовой информатике связаны с именем Чарльза Беннета. Основными направлениями в квантовой информатике являются квантовая телепортация, квантовая криптография и квантовый компьютеринг, которые мы здесь кратко охарактеризуем (интересующиеся могут найти более детальные, но математически более сложные сведения о них в приложении В).

Одно из направлений квантовой информатики уже используется практически: квантовые криптографические линии позволяют пересылать секретную информацию со сколь угодно надежной защитой от подслушивания. При этом секретность обеспечивается фундаментальными законами природы, которые нарушить невозможно.

2.4.1. Квантовая криптография

Тот факт, что в классической системе можно производить измерения, не нарушая ее состояния (см. раздел 1.6.2), означает, что всегда возможен несанкционированный доступ к такой системе и, значит, утечка информации. Например, если некоторое сообщение пересылается по линии связи, то можно подключиться к этой линии и подслушать сообщение. При этом всегда можно произвести подключение таким образом, что само сообщение, пересылаемое по линии связи, никак не изменится. Поэтому получатель его не будет иметь никакой возможности по содержанию полученного сообщения судить о

том, произошло ли несанкционированное подключение к линии и подслушивание сообщения.

В квантовой механике дело обстоит совершенно иначе. Любое измерение квантовой системы неизбежно сопровождается изменением состояния этой системы (см. раздел 1.6). Это позволяет создавать такие линии связи, что пересылаемые через них сообщения защищены от подслушивания. Если говорить точнее, само подслушивание предотвратить невозможно, однако если подслушивание произошло, то пересылаемое по линии сообщение обязательно в чем-то изменится, и по этим изменениям получатель имеет возможность обнаружить, что произошло подслушивание и содержание данного сообщения известно третьей стороне. Конструирование таких защищенных линий связи составляет предмет *квантовой криптографии*.

Технология квантовой криптографии позволяет пересылать секретные сообщения, с любой вероятностью исключая возможность того, что они будут перехвачены и об этом не будет известно. Таким образом, квантовая криптография не предотвращает подслушивания секретных сообщений, но зато делает известным получателю сообщения, имело ли место подслушивание. Эта технология не только теоретически обоснована, но и экспериментально реализована.

Как практически реализуется квантово-криптографическая линия? Любую информацию можно представить как длинное двоичное число, состоящее из нулей и единиц. Поэтому прежде всего нужен способ записывать каждую из этих двух цифр, 0 и 1, как одно из двух возможных состояний некоторой квантовой системы. Проще всего в качестве такой системы взять фотон. В этом случае цифры 0 и 1 соответствуют одной из двух поляризаций фотона. Обозначим соответствующие состояния фотона через ψ_0 и ψ_1 . Отправитель сообщения с помощью кодирующего устройства вырабатывает множество фотонов и переводит каждый из них, один за другим, либо в состояние ψ_0 , либо в состояние ψ_1 . Эта серия фото-

нов пересылается по световоду к получателю сообщения, где производится измерение поляризации фотонов, что позволяет расшифровать сообщение.

Если кто-то подключится к световоду и попытается измерить поляризацию пересылаемых фотонов, чтобы перехватить сообщение, то состояния фотонов обязательно (в силу законов квантовой механики) изменятся. Протокол, согласно которому отправитель и получатель производят все операции, разрабатывается таким образом, чтобы получатель мог не только расшифровать посланное ему сообщение, но и убедиться, что полученные им фотоны не подверглись измерению во время пересылки, то есть что не было никакого подслушивания. Если же подслушивание имело место, то получатель сообщения это обнаружит. Необходимо сделать важное замечание. Всегда есть некоторая вероятность того, что подслушивание не будет обнаружено получателем сообщения. Однако за счет усложнения протокола кодирования и декодирования эта вероятность может быть сделана сколь угодно малой.

Экспериментальные квантовые каналы пересылки информации уже сейчас достигают нескольких десятков километров. Один такой экспериментальный криптографический канал проложен по дну Женевского озера. Более короткие квантово-криптографические линии уже используются практически. Простейшие из них поступили на свободный рынок.

Принципиальное отличие квантовой криптографии перед любыми криптографическими системами, опирающимися на классическую физику, состоит в том, что защита от несанкционированного доступа к линии связи обеспечивается в данном случае законами природы. Нарушить эти законы и преодолеть защиту невозможно ни при каких обстоятельствах.

То, что до сих пор сказано о квантово-криптографической линии, может вызвать одно очевидное возражение. Дело в том, что подслушивание в такой линии не предотвращается, а лишь становится известно получателю. На первый взгляд кажется, что это не дает особых преимуществ. Действитель-

но, знает об этом получивший информацию или нет, но информация уже перехвачена «противником». Так в чем же преимущество квантовой криптографии? Действительно ли она защищает секреты тех, кто ею пользуется? Да, действительно защищает. Продемонстрируем это на примере двух возможных ситуаций.

Первая ситуация относится к случаю, когда требуется сохранить секретность большей части пересылаемой информации, однако допустимо, чтобы небольшая часть ее оказалась рассекреченной. Представьте себе, например, что с помощью квантово-криптографической линии происходит телефонный разговор. Предположим, что кто-то сумел подключиться к линии и начал подслушивание.

На то, чтобы обнаружить подслушивание, требуется некоторый промежуток времени, но за счет усложнения протокола кодирования этот промежуток можно сделать сколь угодно коротким. Значит, через некоторое время после начала подслушивания лица, разговаривающие по данной секретной линии, получают предупреждающий сигнал и сразу же прекращают разговор, после чего принимаются меры для обнаружения и ликвидации подключения к линии.

Если время, когда подслушивание происходило, но еще не было обнаружено, не слишком велико, то за это время никакой существенной информации «противник» не получит. Действительно, это время можно сделать таким, что его достаточно лишь для произнесения одного слова. Можно сделать его еще короче, и тогда оно вместит лишь часть слова. В этом случае подслушивание не принесет никакого ущерба для тех, кто вел секретный разговор.

Иная ситуация имеет место в том случае, если сообщение, пересылаемое по линии, настолько важно, что нельзя допустить рассекречивания никакой, даже самой малой его части. Это тоже можно обеспечить при помощи квантовой криптографии. Для этого нужно пересылать по квантово-крипто-

графической линии не саму содержательную информацию, а лишь секретное кодовое слово.

Обычно практика секретной переписки, используемая спецслужбами во всем мире, состоит в том, что сами секретные сообщения пересылаются по открытым каналам, которые может прослушать кто угодно (например, по радио), однако в зашифрованном виде. Если «противник», перехвативший такое сообщение, не обладает кодом для его дешифровки, то он увидит лишь длинный ряд цифр, которые не дадут ему ровно никакой информации. Скрывающееся за этими цифрами зашифрованное сообщение останется для него тайной. Правда, он может применить специальные методы дешифровки, которые позволяют расшифровать любое достаточно длинное сообщение (тем более, что сам метод кодирования применяется многократно и поэтому известен «противнику»). Однако на дешифровку достаточно сложного кода, даже с применением мощных компьютеров, требуется значительное время, и за это время сообщение успевает устареть.⁵ Что же касается адресата, которому направлено сообщение, то он производит расшифровку очень быстро, так как знает не только метод кодирования, но и *кодовое слово*, являющееся ключом к шифру. Поэтому если периодически менять кодовое слово, то секретность сообщений обеспечивается.

Задача сводится, таким образом, к тому, чтобы время от времени пересылать само кодовое слово (практически — длинное двоичное число) таким образом, чтобы было достоверно известно, что при пересылке не произошла утечка информации. В этом уже может помочь квантовая криптография. Кодовое слово при помощи специального протокола записыва-

⁵ При необходимости код можно сделать настолько сложным, что для декодирования с помощью обычных классических компьютеров не хватит даже времени, сопоставимого с временем существования Вселенной. В этом случае помочь в дешифровке может лишь достаточно мощный квантовый компьютер, которого пока не существует. Это одна из причин, почему на разработку квантовых компьютеров тратятся большие усилия и деньги (см. раздел 2.4.2).

ется в состояниях пересылаемых по световоду фотонов. Этот протокол устроен таким образом, чтобы получивший серию фотонов, производя над ними соответствующую серию измерений, мог не только восстановить записанное двоичное число, но и понять, изменились ли состояния фотонов во время пересылки, то есть произошло ли подслушивание. Если выясняется, что подслушивание произошло, то получатель сообщает по открытому каналу, что данное кодовое слово использовать нельзя, и ждет присылки другого. Если же он убеждается, что подслушивания не произошло, кодовое слово продолжает использоваться для пересылки содержательных сообщений.

Напомним еще раз, что вероятность обнаружения подслушивания зависит от используемого протокола кодирования, и за счет усложнения этого протокола можно сделать эту вероятность сколь угодно близкой к единице. Важно, что в рамках данной вероятности секретность обеспечивается *абсолютно*. Ее нарушение означало бы нарушение законов квантовой механики, что в принципе невозможно.

2.4.2. Квантовый компьютер

В последние десятилетия предложен, теоретически разработан и даже реализован (пока лишь на простейших прототипах) принцип квантового компьютеринга. Он позволяет вместо хорошо всем знакомых классических компьютеров использовать для вычислений квантовые устройства. В чем же преимущества квантовых компьютеров и на чем основаны эти преимущества?

Довольно широко известно, что *квантовые компьютеры*, когда (и если) они достигнут достаточной мощности, смогут решать такие вычислительные задачи, которые не под силу обычным классическим компьютерам. Это объясняется тем, что в квантовом компьютере используется *квантовый параллелизм*. Суть его можно понять, сравнивая, как хранится ин-

формация в классическом компьютере, с тем, как это делается в квантовом компьютере.

Известно, что в обычных классических компьютерах информация хранится в форме двоичных чисел, у которых в каждом разряде стоит либо цифра 0, либо цифра 1. Каждая из этих цифр хранится в двоичной ячейке памяти. Таким образом, одна двоичная ячейка — это физическая система, которая может находиться в одном из двух устойчивых состояний. Одно из них соответствует цифре 0, другое — цифре 1. В такой ячейке хранится информация, соответствующая выбору между двумя вариантами (цифрами 0 и 1 или, эквивалентно, двумя состояниями системы). Говорят, что количество информации, хранящееся в двоичной ячейке, равно 1 биту. В двух двоичных ячейках хранится 2 бита информации. Это соответствует выбору между 2-разрядными двоичными числами 00, 01, 10 и 11. В регистре, состоящем из N двоичных ячеек, хранится N бит информации, что соответствует выбору одного N -разрядного двоичного числа из всех возможных (всего таких чисел 2^N).

Посмотрим теперь, чем отличается хранение информации в квантовом компьютере. Сама информация тоже может быть представлена в форме двоичных чисел, то есть цепочек нулей и единиц. Одна цифра двоичного числа хранится в двоичной ячейке. Эта ячейка называется кубитом⁶ и представляет собой квантовую систему, одно из состояний которой соответствует цифре 0, а второе — цифре 1. Обозначим эти состояния ψ_0 и ψ_1 . До сих пор не видно никаких отличий от классического компьютера. Но именно в этом пункте появляется существенное отличие.

Дело в том, что для квантовых систем имеет место так называемый *принцип суперпозиции*. Он состоит в следующем. Если квантовая система может находиться в одном из двух состояний, скажем, в состоянии ψ_0 и в состоянии ψ_1 , то она

⁶По-английски qubit, сокращенное от quantum bit, то есть квантовый бит.

может также находиться в целом семействе состояний, которые строятся как *линейные комбинации* исходных. Это значит, что исходные состояния умножаются на некоторые (комплексные) числа и складываются. Если выбираются числа c_0 и c_1 , то получается состояние $c_0\psi_0 + c_1\psi_1$.⁷

Для нас достаточно будет выбрать простейшие множители $c_0 = c_1 = 1$. Тогда мы заключаем, что наряду с состояниями ψ_0 и ψ_1 кубит может также находиться в состоянии $\psi_0 + \psi_1$. Но что это значит по отношению к хранящейся в нем информации? Это значит, что *в одном кубите одновременно хранятся обе цифры, 0 и 1*. Вот это и приводит к тому, что квантовый компьютер обладает свойством квантового параллелизма.

Итак, в одной двоичной ячейке квантового компьютера, называемой *кубитом*, может храниться не только одна из двух цифр двоичного счисления, 0 или 1 (как было бы в случае классического компьютера), но одновременно обе эти цифры. В двух кубитах могут храниться одновременно 4 двоичных числа 00, 01, 10 и 11. А если в некотором регистре квантового компьютера содержится N кубитов, то в таком регистре может храниться одновременно 2^N двоичных чисел длины N . И при действии квантового компьютера одновременно обрабатываются все эти числа.

Это и есть квантовый параллелизм. Если бы в нашем распоряжении были только классические компьютеры, каждый из которых работает с двоичными числами длины N , то для одновременной обработки 2^N таких чисел было бы необходимо 2^N компьютеров. Если же мы сумели построить кван-

⁷Таким образом, с состояниями можно обращаться как с векторами, то есть умножать их на любые числа и складывать. Говорят, что все возможные состояния образуют *векторное пространство* (другой термин — *линейное пространство*). Отличие от обычных векторов состоит лишь в том, что числовые множители могут быть не только вещественными, но и комплексными, то есть состояния образуют *векторное пространство над полем комплексных чисел*. Нам не нужна будет эта математика в полном объеме, но если читатель интересуется, он может познакомиться с ней в приложении А.

товый компьютер, содержащий N кубитов, то один (!!!) этот компьютер одновременно обрабатывает все 2^N чисел.

Если, скажем, $N = 100$, то мы получаем выигрыш в 2^{100} раз, что примерно равно миллиону. А если $N = 1000$, то получается выигрыш в $2^{1000} \sim 10^{300}$ раз.⁸ Именно этим объясняется, почему квантовый компьютер может (если он будет практически реализован с достаточно большим N) решать такие задачи, на которые классическим компьютерам не хватит времени, сравнимого с временем существования Вселенной.

Проблема, стоящая перед этой областью науки, состоит в том, чтобы реализовать квантовые компьютеры с достаточно большим числом кубитов. Пока удалось реализовать лишь прототипы с числом N порядка десяти.⁹ Целью же является реализовать компьютер, в котором N достигает тысячи или хотя бы ста. Над этим работает во всем мире огромное число специалистов, и принципиальных запретов на построение таких устройств пока не видно.

Мы видели, что квантовые компьютеры, которые работали бы с достаточно длинными двоичными числами, имели бы огромные преимущества перед классическими. Это преимущество на практике должно проявляться в скорости вычислений. Если с ростом длины двоичных чисел N время вычислений на классическом компьютере растет экспоненциально, то есть $T_N \propto e^{\lambda N}$ (с некоторым числовым множителем λ), то для квантового компьютера этот рост лишь полиномиальный, то есть $T_N \propto T^\alpha$ (с некоторым числом α в качестве показателя степени). При больших N разница между этими двумя законами роста становится решающей. В результате некоторые задачи, которые при решении их на классическом компьютере

⁸ Действительно, $2^{10} = 1024 \sim 10^3$, поэтому $2^{1000} = 2^{10 \cdot 100} \sim 10^{3 \cdot 100}$.

⁹ Кубиты могут быть реализованы различными способами. Это могут быть, например, ионы, подвешенные в магнитной ловушке. Роль выделенных состояний ψ_0 и ψ_1 играют два уровня энергии иона, тогда как некоторые другие уровни используются для управления кубитом. Нахождение в магнитной ловушке обеспечивает изоляцию иона. Это необходимо для того, чтобы он работал в квантовом режиме.

заняли бы время, сравнимое с временем существования Вселенной, на квантовом компьютере могли бы быть решены за вполне разумное время.

В отличие от классических, квантовые компьютеры не универсальны: не для всяких вычислительных задач существует алгоритм их решения на квантовом компьютере. До сих пор найдено лишь небольшое число квантовых алгоритмов. Зато среди них есть практически очень важные. Наиболее известен алгоритм Шора, который позволяет решить любую из двух математически эквивалентных задач: 1) найти период сложной периодической функции или 2) разложить на простые множители очень большое число.

Вторая из этих задач имеет важное прикладное значение, потому что она используется в криптографии. Дело в том, что в одной из криптографических методик для шифровки и дешифровки секретных посланий используют большие числа, для которых известны их разложения на множители. Ясно, что такие числа получить легко: достаточно перемножить большое число простых чисел, и мы получим очень большое число, для которого разложение на простые множители известно. Получатель закодированного секретного послания может его декодировать потому, что в процедуре декодирования используется разложение на множители длинного числа, а он знает это разложение.

Если бы противник смог разложить это число на простые множители, он также смог бы декодировать послание. Однако для такого разложения требуется огромное время. Поэтому с практической точки зрения декодировать такое послание невозможно. Но если бы в распоряжении противника был квантовый компьютер (достаточной мощности, то есть работающий с достаточно большими числами), то он мог бы разлагать длинные числа на простые множители и значит легко мог бы расшифровывать такого рода послания. Этот распространенный в криптографии метод перестал бы работать. Это

один из аргументов, которые делают важным создание квантового компьютера.

До практической реализации мощных квантовых компьютеров еще очень далеко, если вообще эта цель достижима. Однако уже сейчас созданные прототипы квантовых компьютеров показывают, что сам принцип квантового компьютеринга справедлив. В разделе 6.2 (стр.191) мы вернемся к этому в связи с совершенно другим, но не менее интригующим вопросом о работе сознания.

2.4.3. Квантовая телепортация

Телепортация — это известный термин из научно-фантастической литературы. Он означает мгновенное (со сверхсветовой скоростью) перемещение некоторого предмета из одной точки в другую, отстоящую от первой, быть может, на огромное расстояние (у фантастов перемещается обычно человек). *Квантовая телепортация* — это реальный квантовомеханический процесс, который не только теоретически обоснован, но и реализован, правда, для очень простых физических систем, таких, как уже упомянутые в разделе 2.4.2 кубиты.

Квантовая телепортация состояния одного кубита была впервые экспериментально реализована в 90-х годах XX века в университете Иннсбрука (Австрия) группой физиков под руководством Антона Цайлингера (Anton Zeilinger). В качестве кубитов использовались поляризованные фотоны.

В свое время сообщения в средствах массовой информации о возможности и даже о реализации квантовой телепортации произвели сенсацию. Это было связано не только с тем, что физики назвали это явление термином, взятым из научно-фантастической литературы. В квантовой телепортации на самом деле есть нечто поразительное. Однако в изложении журналистов часто присутствовало еще одно утверждение, которое строго говоря неверно. Утверждалось, что квантовая телепортация происходит мгновенно, со сверхсветовой скоро-

стью. На самом деле это относится лишь к одной стадии телепортации, но не ко всему процессу.

Рассмотрим кратко, в чем суть этого процесса. Более детально, со всеми необходимыми математическими выкладками, одна из схем квантовой телепортации описана в приложении В.4.4.

Пусть имеется два оператора, расположенные в двух удаленных точках A и B . Обычно оператора, расположенного в точке A , называют Алисой (Alice), а того, что расположен в точке B — Бобом (Bob). У Алисы имеется кубит, состояние которого ей неизвестно. Предположим, что это состояние имеет вид $\psi = c_0\psi_0 + c_1\psi_1$. Задача состоит в том, чтобы кубит, который имеется у Боба, перешел в состояние, которое характеризуется теми же коэффициентами c_0 и c_1 . При этом процедура должна быть такой, чтобы результат достигался при любых коэффициентах c_0 и c_1 , причем эти коэффициенты неизвестны участникам процедуры.

Оказывается, эта задача имеет решение, причем процедура, с помощью которой совершается телепортация, довольно проста.

Хотя так сформулированная задача кажется скорее игрой, но на самом деле с принципиальной точки зрения она важна. Во-первых, если возможна телепортация состояния одного кубита, то усложнив процедуру можно в принципе телепортировать и состояние более сложной системы. Во-вторых, даже если мы всего лишь телепортировали состояние одного кубита, то тем самым мы передали из точки A в точку B информацию о коэффициентах c_0 и c_1 , которые могут выражаться числами с большим числом значащих цифр. Если для передачи при этом используются сравнительно простые процедуры, то передача с помощью этих простых процедур заранее неизвестной длинной серии цифр представляет интерес. Конечно, для этого процедура телепортации должна воспроизводить исходное состояние с достаточной точностью, однако это уже техническая задача, принципиальных препятствий для нее нет.

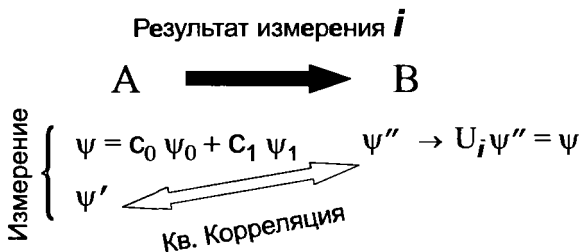


Рис. 2.4. Квантовая телепортация. В точке A имеется два кубита: основной в произвольном (и неизвестном) состоянии ψ и вспомогательный, который коррелирован с кубитом в точке B . Задача — перевести кубит в точке B в состояние ψ . Для этого производится измерение пары кубитов в точке A . Результат измерения i пересылается в точку B , где над имеющимся там кубитом производится преобразование U_i , зависящее от этого результата. Тогда этот кубит оказывается в состоянии ψ .

Полностью процедура квантовой телепортации состояния одного кубита описана в приложении В.4.4. Здесь мы лишь качественно охарактеризуем главные элементы этой процедуры (см. рис. 2.4).

Во-первых, для того, чтобы была возможна телепортация, необходимо снабдить Алису еще одним, вспомогательным кубитом, причем этот вспомогательный кубит должен быть коррелирован с кубитом, имеющимся у Боба (эти кубиты должны образовывать так называемую ЭПР-пару, см. приложение В.1). Во-вторых, Алиса должна произвести над имеющимися в ее распоряжении двумя кубитами некоторое специальное измерение, которое может дать один из четырех результатов. В-третьих, полученный результат (то есть просто одно из чисел 1, 2, 3, 4, условно обозначающих номер соответствующего результата измерения) нужно по обычному каналу связи переслать Бобу. В-четвертых, Боб должен произвести над своим кубитом преобразование U_i , зависящее от присланного

ему номера. После этого кубит Боба автоматически окажется в состоянии, в котором был основной кубит Алисы.

Чем удивительна квантовая телепортация? Удивительно в ней то, что она ведет к фактической пересылке из точки A в точку B информации о числах c_0 и c_1 (которые определяются вообще говоря большим количеством цифр), хотя по обычному каналу связи передается лишь одно из четырех чисел 1, 2, 3, 4, то есть всего два бита информации.

Однако бытующее среди непосвященных мнение, что квантовая телепортация происходит со сверхсветовой скоростью, неверно, так как для телепортации требуется обычный (то есть досветовой) канал связи. До того, как этот канал будет использован (при условии, что Алиса произвела свое измерение над двумя кубитами), кубит Боба заведомо находится в одном из четырех состояний $\psi_{1,2} = c_0\psi_0 \pm c_1\psi_1$ и $\psi_{3,4} = c_1\psi_0 \pm c_0\psi_1$. Только получив от Алисы информацию о результате измерения и производя соответствующее преобразование своего кубита (изменение знака и/или перестановку коэффициентов), Боб добивается, чтобы этот кубит оказался именно в первом из перечисленных состояний, которое точно соответствует состоянию, пересылаемому Алисой.

Вот так в принципе происходит квантовая телепортация. явление фантастическое по своему названию и удивительное по сути.

Часть II

Квантовый мир и сознание

В этой части книги мы попытаемся проложить путь от квантовой механики к теории сознания.

Рассказ о квантовой механике будет продолжен, но теперь мы остановимся на концептуальных проблемах (парадоксах) этой науки, связанных с особенностями квантовых измерений. Для решения этих проблем оказывается необходимым включить в рассмотрение не только измерительный прибор, но и наблюдателя (экспериментатора) и его сознание.

Отсюда вырастает целый комплекс новых идей, которые могут служить базой для новой теории сознания. Эта теория бросает свет на феномен жизни и позволяет понять необычные свойства сознания, которыми оно обладает в особых состояниях, похожих на транс.

Тем самым квантовая механика перекидывает мост между естественными науками с одной стороны и гуманитарными науками, а также ненаучными методами познания духовной жизни человека — с другой. Сознание (точнее — самый глубокий или примитивный пласт сознания) оказывается общим элементом этих двух сфер познания.

Математические формулы, встречающиеся в этой части, очень просты, причем одна и та же формула встречается несколько раз в разных контекстах, что облегчает понимание

ее смысла. Те из читателей-гуманитариев, которые не хотят иметь дело даже с простыми формулами, могут пропускать как отдельные формулы, так и целые разделы. Эта часть написана так, чтобы такие пропуски не слишком затрудняли понимание. Ближе к концу книги математические формулы вообще перестают встречаться.

Для тех же, кто, наоборот, интересуется математическим содержанием затронутых вопросов, даются ссылки на разделы первой части книги и на приложения А и В, в которых применяется более сложный математический аппарат.

Читатель должен ясно понимать статус представленного в этой части книги материала. В главах 3, 4 излагаются концептуальные проблемы квантовой механики, которые обычно обозначаются термином «проблема измерения». Хотя эта проблема (или комплекс проблем) хорошо известна еще с 20-х годов XX века, но за прошедшие с тех пор десятилетия и ее сущность, и ее тесная связь с сознанием наблюдателя постепенно становились все более ясными, получив наиболее четкую формулировку в форме теоремы Белла. Весь материал этих глав основывается на теоретических положениях, хорошо понятых и принятых научным сообществом.

В главах 5, 6 излагается наиболее интересная (и наиболее радикальная) попытка решить «проблему измерения» и вместе с тем продвинуться в понимании феномена сознания. Эта попытка основана на так называемой интерпретации Эверетта, или многомировой интерпретации квантовой механики. Начиная с раздела 5.2, упор делается на том варианте интерпретации Эверетта, который предложен автором данной книги и назван расширенной концепцией Эверетта.

Таким образом, содержание этих глав не сводится к изложению известной теории. Скорее это изложение основ теории, которая рождается на наших глазах. Понятно, что при этом можно наметить лишь основную линию построения теории, но невозможно уточнить все детали ее реализации (некоторые из них еще требуют дополнительных исследований специа-

листами разных областей). Это может вызывать иногда ощущение недосказанности. Однако попытки уже сейчас изложить новую теорию с излишними деталями привело бы лишь к усложнению понимания ее основ и к неизбежным неточностям.

Конечно, пока теория в целом не прошла испытание на прочность в длительных дискуссиях, некоторые ее пункты остаются лишь гипотезами. Однако возможность более глубокого понимания феномена сознания (и вообще феномена жизни), которое дает новая теория, а также естественно возникающие в ней объяснения многих необычных свойств сознания, позволяет серьезно надеяться, что в основных своих чертах эта теория справедлива. Эти вопросы дополнительно обсуждаются в Заключении.

ПАРАДОКСЫ КВАНТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Одна из особенностей квантового измерения состоит в том, что квантовую систему невозможно измерить (то есть получить какую бы то ни было информацию о ней), не возмущив при этом ее состояния, причем тем сильнее, чем больше информации извлекается при измерении. Это, конечно, хорошо известно и количественно трактуется обычно при помощи соотношения неопределенностей.

Известно также, что, даже зная состояние системы совершенно точно, результат измерения в ней лишь в исключительных случаях можно предсказать достоверно. В общем случае можно лишь рассчитать вероятности различных результатов измерения. Зная вероятность того или иного результата измерения, мы знаем, как часто при измерении будет получаться данный результат, если много раз проводить одно и то же измерение, каждый раз приготавливая одно и то же начальное состояние измеряемой системы. А большего нам знать в общем случае не дано, предсказания результатов измерений в квантовой механике имеют лишь вероятностный характер. Для практических целей этого вполне достаточно. Все (вероятностные) предсказания, основанные на таких расчетах, хо-

рошо подтверждаются, и в этом смысле измерения квантовых систем не представляют никакой проблемы.

На языке формул простейшее измерение, различающее две альтернативы, представляется так (детали в приложении А). Пусть ψ_1 — состояние, соответствующее первой альтернативе, а ψ_2 — состояние, соответствующее второй альтернативе. Пусть перед измерением система находилась в состоянии¹ $c_1\psi_1 + c_2\psi_2$. Тогда с вероятностью $|c_1|^2$ измерение даст первый результат и система окажется после измерения в состоянии ψ_1 , а с вероятностью $|c_2|^2$ измерение даст второй результат и система окажется после измерения в состоянии ψ_2 .

Используя такую картину квантового измерения, можно вполне успешно работать с квантовой механикой и никогда не столкнуться с концептуальными проблемами. Многие физики не знают, да и знать не хотят, что это за проблемы. Они и действительно необычны, наиболее ясные их формулировки имеют форму парадоксов, знаменитых квантовомеханических парадоксов, например, «парадокс кота Шредингера» и «парадокс друга Вигнера». А физики практического склада не интересуются парадоксами, коль скоро задачи, которые им нужно решить, можно сформулировать корректно.

Давайте, однако, вспомним, что это за парадоксы, на которые считали необходимым тратить время и силы такие выдающиеся физики, как авторы упомянутых парадоксов Шредингер и Вигнер, а также Эйнштейн, Бор, Гейзенберг, Паули, Уилер, ДеВитт и многие другие.

3.1. Парадокс кота Шредингера

Парадокс шредингеровского кота достаточно широко известен. В закрытом ящике находится кот, а рядом с ним в том же ящике — атом радиоактивного изотопа, счетчик продуктов распада и устройство, которое при срабатывании счетчика

¹Здесь c_1 и c_2 — комплексные числа, удовлетворяющие условию $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$, а в остальном произвольные.

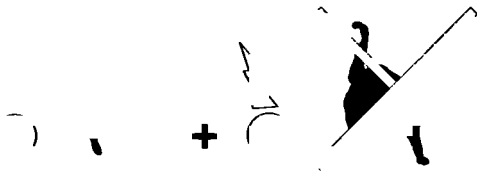


Рис. 3.1. Парадокс кота Шредингера. Жизнь кота зависит от того, распалось или еще не распалось ядро радиоактивного элемента. Согласно квантовой механике система (Ядро и Кот) находится в суперпозиции двух состояний: (Нераспавшееся Ядро и Живой Кот) + (Распавшееся Ядро и Мертвый Кот). Но посмотрев на эту систему, мы видим лишь одну компоненту этой суперпозиции.

разбивает ампулу с ядом. Пока атом не распался, с котом все в порядке, но когда атом распадается, под действием продуктов распада срабатывает счетчик, по его сигналу специальное устройство разбивает ампулу, и кот умирает от яда.

Далее вступает в силу вероятностный характер квантовой механики. Неизвестно, когда атом распадется, в каждый данный момент имеется лишь определенная вероятность распада. А точнее — в каждый данный момент атом находится в суперпозиции двух состояний: состояния, когда он еще не распался, и состояния, когда он распался.

И в результате возникает парадокс. Подходя к закрытому ящику, мы должны, согласно законам квантовой механики, считать, что система (атом+кот) находится в суперпозиции двух состояний: (нераспавшийся атом + живой кот) и (распавшийся атом + мертвый кот). Но открыв ящик мы, разумеется, никогда никакой суперпозиции не обнаружим, а увидим либо живого кота (и еще не распавшийся атом), либо мертвого кота (и уже распавшийся атом). Описание системы зависит, следовательно, от того, открыли мы ящик или еще не открыли. В этом и состоит парадокс.

В более общих терминах, описание системы после измерения зависит от того, осознал ли наблюдатель результат изме-

рения или нет. В случае шредингеровского кота измерением можно считать всю описанную процедуру, а результатом измерения — то, что наблюдатель видит, открыв ящик. При этом драматическая ситуация со смертью кота призвана лишь усилить психологическое воздействие на того, кто рассматривает эту ситуацию. На самом деле парадоксальность возникает в любом квантовом измерении:

пока результат измерения не осознан наблюдателем, этот наблюдатель описывает состояние системы как сосуществование (суперпозицию) двух или более альтернатив. Если же результат измерения уже осознан, наблюдатель описывает состояние как одну из альтернатив.

Заметим, что происходящее нельзя объяснить лишь отсутствием у наблюдателя информации о результате измерения. Такое незнание результата измерения, которое сменяется знанием, если этот результат осознан, ничего удивительного собой не представляет и сплошь и рядом встречается и в классической физике, и в обыденной жизни. В квантовой механике все гораздо серьезнее, так как можно строго доказать, в том числе экспериментально, что перед измерением на самом деле сосуществуют все альтернативы (мы поговорим об этом подробнее в разделе 4.1), и пока наблюдатель не осознал, какой результат дало измерение, он обязан, следуя законам квантовой механики, описывать состояние системы как сосуществование (суперпозицию) всех альтернатив. Мы еще будем возвращаться к этому трудному для понимания пункту, чтобы сделать его максимально ясным.

3.2. Парадокс друга Вигнера

Парадоксальность происходящего при квантовом измерении еще более подчеркивается в «парадоксе друга Вигнера».

Вигнер в своей работе 1961 года² рассмотрел ситуацию, в которой не он сам, а его друг проводит измерение некоторой квантовой системы, а потом сообщает ему результат измерения. Результат в конечном счете сводится к тому, что система находится в одном из двух состояний, ψ_1 или ψ_2 . Экспериментатор узнает о состоянии системы по вспышке света в измерительном устройстве.

И в этом случае, как и в случае кота Шредингера, перед измерением система находится в состоянии, являющемся суперпозицией состояний ψ_1 и ψ_2 . А как описать состояние, в котором система находится после измерения? Оказывается, это опять зависит от сознания наблюдателя. Если экспериментатор еще не посмотрел на прибор, то он описывает состояние как суперпозицию ψ_1 и ψ_2 . Если уже посмотрел, то либо как ψ_1 , либо как ψ_2 (в зависимости от того, что именно он увидел). Описание состояния системы зависит от того, осознал ли экспериментатор состояние системы или нет.

Это мы видели уже в парадоксе шредингеровского кота. Однако Вигнер вносит новый элемент за счет того, что его друг-экспериментатор передает информацию об измерении ему, Вигнеру. Пока Вигнер не получил этой информации, он описывает состояние системы как суперпозицию ψ_1 и ψ_2 . Получив информацию, описывает уже по-другому, либо как ψ_1 , либо как ψ_2 (в зависимости от того, каково содержание переданной информации). Значит, описание состояния системы Вигнером зависит от того, вошла ли в его сознание информация о результате измерения, переданная ему его другом-экспериментатором.

Парадоксальность ситуации подчеркивается следующим рассуждением. Вигнер говорит: «Если после окончания эксперимента я спрошу моего друга: Что ты чувствовал по пово-

²Е. P. Wigner, Remarks on the mind-body question, in L. G. Good, editor, The Scientist Speculates, pages 284–302, London, Heinemann, 1961. Перепечатано в сб. J. A. Wheeler and W. H. Zurek, editors. Quantum Theory and Measurement. Princeton University Press, Princeton, 1983.

ду вспышки света перед тем, как я тебя спросил? — он ответит: Я уже сказал тебе, я видел (не видел) вспышку. Другими словами, вопрос о том, видел или не видел он вспышку, был уже решен в его уме прежде, чем я спросил его». Чтобы ясно увидеть, что здесь странного (парадоксального), переведем это на язык формул.

Пусть состояние измеряемой системы перед измерением было

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2,$$

а состояние прибора Φ_0 . Тогда состояние составной системы, состоящей из измеряемой системы и прибора, перед измерением представляется вектором состояния

$$\Psi_0 = \psi\Phi_0 = (c_1\psi_1 + c_2\psi_2)\Phi_0 = c_1\psi_1\Phi_0 + c_2\psi_2\Phi_0.$$

Обозначим через Φ_1 то состояние измерительного прибора, в котором происходит вспышка, и через Φ_2 то его состояние, в котором вспышки не происходит. Тогда результат измерения, воспринимаемый наблюдателем, описывается либо вектором $\psi_1\Phi_1$ (если он видит вспышку), либо $\psi_2\Phi_2$ (если он ее не видит). Первое означает, что прибор из состояния Φ_0 перешел в состояние Φ_1 , а измеряемая система оказалась в состоянии ψ_1 . Второе интерпретируется аналогично.

Такие состояния составной системы (состоящей из двух подсистем), как $\Psi_1 = \psi_1\Phi_1$ или $\Psi_2 = \psi_2\Phi_2$, называются *факторизованными*. В них каждая из подсистем находится в определенном состоянии, то есть характеризуется вектором состояния.³

Предположим, однако, что измерительный прибор уже сработал, но наблюдатель еще не посмотрел на прибор. Тогда состояние полной системы (включающей измеряемую систему

³ В данном случае система ψ (измеряемая) находится в состоянии ψ_1 , а система Φ (прибор) в состоянии Φ_1 или, альтернативно, система ψ в состоянии ψ_2 , а система Φ в состоянии Φ_2 .

и прибор) получается из начального состояния действием линейного оператора эволюции или решением линейного уравнения Шредингера (см. раздел А.2). Это обязательно, просто в силу линейности этой операции, даёт

$$\Psi = c_1\psi_1\Phi_1 + c_2\psi_2\Phi_2 = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2.$$

Такое состояние, в отличие от факторизованного, называется запутанным, или квантово-коррелированным. В запутанном состоянии каждая из подсистем не находится ни в каком определенном состоянии. В данном случае ни измеряемая система, ни прибор ни в каком определенном состоянии не находятся. Имеется лишь квантовая корреляция, которую можно сформулировать так: если прибор находится в состоянии Φ_1 , то измеряемая система — в состоянии ψ_1 , а если прибор находится в состоянии Φ_2 , то измеряемая система — в состоянии ψ_2 (подробнее о квантовой корреляции в разделе А.5).

Пока наблюдатель не осознал результат наблюдения, он руководствуется лишь тем, что диктуется законами квантовой механики и поэтому должен описывать состояние полной системы вектором Ψ . Если же он осознал результат измерения, то будет описывать состояние либо вектором $\Psi_1 = \psi_1\Phi_1$, либо вектором $\Psi_2 = \psi_2\Phi_2$, в зависимости от того, какой именно результат он наблюдает.

Вигнер описывает состояние вектором Ψ , пока его друг не сообщил ему результат измерения, но после сообщения — одним из векторов Ψ_1 , Ψ_2 . После того, как друг Вигнера (экспериментатор) ответил ему на вопрос: Что ты чувствовал по поводу вспышки света перед тем, как я тебя спросил? Вигнер должен сделать вывод, что даже не получив сообщения о результате измерения, но зная, что измерение произошло и его друг знает результат измерения, он должен описывать состояние одним из векторов Ψ_1 , Ψ_2 (не зная, правда, каким именно из этих двух). В этом случае описание состояния Вигнером определяется его знанием того, что его друг-экспериментатор

посмотрел на прибор, то есть что в сознание его друга вошла информация о результате измерения.

Еще один нюанс появляется, если рассмотреть ситуацию, когда никакого живого наблюдателя (друга Вигнера) около прибора нет. В этом случае просто в силу линейности уравнений квантовой механики Вигнер (как и любой другой физик на его месте) должен описывать состояние после измерения вектором $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$. Если «измерительный прибор» является микроскопическим, например, атомом, то с помощью дополнительных опытов можно убедиться (по наличию интерференционных эффектов), что правильное описание состояния действительно дается вектором Ψ , а не Ψ_1 или Ψ_2 . В случае макроскопического прибора такой проверки произвести нельзя, однако вектор $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ можно вывести теоретически, опираясь только на линейность уравнений квантовой механики (например, уравнения Шредингера).

Из всего этого в статье Вигнера делался вывод, что живой наблюдатель играет особую роль в квантовой механике, нарушая каким-то образом линейный характер эволюции. Если в сознание наблюдателя входит информация о результате измерения, то описание состояния становится таким, которое не может получиться при эволюции, описываемой линейным оператором.

Статья Вигнера была написана давно, еще в 1961 году, и ее аргументы кажутся на первый взгляд наивными. На самом деле, однако, они вскрывают глубокие и действительно весьма своеобразные черты квантовых измерений, которые хорошо понятны с чисто формальной, математической стороны, но плохо уживаются с нашей интуицией.

Для дальнейшего изложения наиболее важным выводом из сказанного является то, что только осознание альтернативного результата измерения приводит к тому, что из двух (или более) членов суперпозиции остается лишь один. Это, в свою очередь, означает, что сознание наблю-

дателя следует явным образом учитывать при анализе квантового измерения, без такого учета описание квантового измерения является неполным.

Роль сознания в квантовом измерении можно аргументировать и другими способами. Упомянем некоторые из них.

3.3. Роль сознания наблюдателя

В предшествующих разделах было показано, как описывается измерение в квантовой механике⁴. Если быть кратким, то основой этого описания является, во-первых, вероятностное распределение по альтернативным результатам измерения и, во-вторых, постулат редукции, то есть переход от суперпозиции альтернатив к одной из этих альтернатив. Такое описание позволяет дать ответы на все вопросы, обычно задаваемые в физике, и предсказать (вероятностным образом) поведение любых реальных физических систем. Никакие парадоксы или концептуальные проблемы не мешают этим предсказаниям. Квантовая теория измерений хорошо работает.

Почему же возникают парадоксы, и с чем связано их возникновение? Нетрудно заметить, что парадоксы возникают каждый раз в том случае, когда упоминаются не только объективные аспекты измерения (состояние системы, состояние прибора), но и субъективный его аспект — что видит, или знает, наблюдатель. Это чрезвычайно важно. Хорошо работающая часть квантовой теории измерений — это та ее часть, которая остается после устранения субъективного элемента, сознания наблюдателя. Заметим, что после устранения наблюдателя нет никакой причины выделять один результат измерения (один член суперпозиции), а следует работать со всем множеством альтернативных результатов измерения, сопоставляя каждому из них его вероятность.

⁴С большими деталями это делается в приложении А.

Но что же представляет собой этот субъективный элемент, как он соотносится с объективными элементами квантовой теории измерений? При наивном подходе можно было бы думать, что сознание — это состояние некоторой материальной системы, скажем, мозга или некоторой структуры в мозгу. Однако это не так или не совсем так. Дело в том, что любую материальную систему, которая так или иначе отражает в своем состоянии результат измерения, можно включить в понятие прибора как его часть. А сознание наблюдателя в контексте квантовой теории измерений — это то, что остается за пределами прибора.

Более того, описание измерения существенно не изменится, если какие-то части прибора, отражающие результат измерения, описывать как части измеряемой системы. Это относится и к тем структурам в мозгу, которые отражают результат измерения.

Еще Гейзенберг заметил, что нельзя однозначно определить границу между измеряемой системой и прибором (точнее — между измеряемой системой и измеряющей средой, в которую следует включить и наблюдателя как материальную систему). Действительно, описание измерения принципиально не изменится, если включить в измеряемую систему и некоторые части прибора, состояние которых зависит от результата измерения.

Можно, например, отнести к измеряемой системе чувствительный элемент прибора, непосредственно взаимодействующий с измеряемой системой, а роль прибора отвести лишь остальным его частям. Но можно отнести к измеряемой системе также и регистрирующую часть прибора, его стрелку. Можно пойти еще дальше и отнести к измеряемой системе фотоны, летящие от стрелки к глазу наблюдателя и несущие информацию о результате измерения. Сделав еще один шаг, можно отнести к измеряемой системе глаз наблюдателя, затем также нерв, несущий информацию от глаза к мозгу, затем зрительную часть коры головного мозга и т. д. Таким образом, гра-

ница («Heisenberg's cut») между измеряемой системой и тем, что мы уславливаемся называть прибором, по существу произвольна.

При любом выборе этой границы измеряемая система после измерения находится в одном из альтернативных состояний (в использованном выше примере это состояние с номером 1 или состояние с номером 2) и характеризуется распределением вероятностей по этим альтернативам (в этом примере — соответственно $|c_1|^2$ и $|c_2|^2$). Множество альтернатив и вероятностное распределение на этом множестве не зависит от проведения границы между измеряемой системой и прибором.

Важно, что выбор границы не влияет ни на рассуждения, проводимые при расчетах, ни на сами расчеты. Ни при каком выборе границы не возникает никаких парадоксов и концептуальных проблем, поскольку мы 1) рассматриваем все множество альтернативных результатов измерения и 2) миримся с вероятностным характером предсказаний.

Когда же возникают парадоксы? Только тогда, когда мы начинаем говорить о том, что видит (сознает) наблюдатель. И именно при таком описании измерения, включающем сознание наблюдателя, возникает качественное изменение: 1) наблюдатель видит (сознает) лишь один результат измерения и 2) когда он видит этот результат, уже нет смысла говорить о вероятностях, потому что событие измерения и выбора результата измерения совершилось.

Это наводит на мысль, которая в той или иной форме высказывалась большинством авторов, обсуждавших концептуальные проблемы квантовой механики: эти проблемы непосредственно связаны с сознанием наблюдателя, то есть с субъективным аспектом измерения. А это в свою очередь означает, что трудно надеяться решить концептуальные проблемы (разрешить парадоксы) квантовой механики, если не включить

сознание наблюдателя непосредственно в описание квантового измерения.⁵

Именно этой линии мы будем придерживаться, и в качестве инструмента для этого выберем многомировую интерпретацию квантовой механики, предложенную Эвереттом.

⁵С другой стороны, при желании можно вообще не ставить концептуальные проблемы, исключив из теории измерений субъективный элемент (мы уже говорили об этом, но это важное обстоятельство следует подчеркнуть).

ОПРОВЕРЖЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО ПОНИМАНИЯ РЕАЛЬНОСТИ

Понятие измерения в классической физике является чрезвычайно простым. Если мы не знаем состояния некоторой физической системы или не полностью знаем его, мы производим измерение и восполняем отсутствующую у нас информацию. Конечно, есть, и притом серьезные, технические трудности, но нет никаких принципиальных ограничений для того, чтобы получить информацию о состоянии физической системы, и никаких сомнений в том, как полученная информация связана с состоянием системы до измерения.

Если мы измерили скорость летящего самолета и выяснили, что она равна, скажем, 500 км/час, то странно спрашивать, какой была эта скорость до измерения. Ведь целью измерения как раз и было выяснить то, чего мы не знали, а именно — какой была скорость самолета до измерения. После измерения мы эту скорость знаем: 500 км/час.

Все это настолько просто, что для физиков было трудно отказаться от этой картины, когда они столкнулись с квантовой механикой. Однако оказалось, что в микромире, который подчиняется законам квантовой механики, эта простая картина

неверна. Если мы измерили скорость летящей элементарной частицы (например, электрона или протона) или даже атома и получили, скажем, величину 10^7 см/сек ($=100$ км/сек), то это вовсе не означает, что до измерения частица имела такую скорость. Более того, скорее всего перед измерением эта частица вообще не имела определенной скорости, а было некоторое распределение по скоростям (описываемое волновой функцией этой частицы в импульсном представлении).

И дело вовсе не в том, что мы не знаем, какой была скорость, и потому вынуждены пользоваться вероятностным распределением. Нет, скорость на самом деле не имела определенной величины, пока мы ее не измерили. После измерения скорость приобрела определенную величину, соответствующую результату измерения (в данном случае — 10^7 см/сек).

Простая картина измерения в классической физике (раз измерение дало некоторую величину скорости, значит, именно такой скоростью была перед измерением) связана с тем, как в классической физике понимается реальность. Реальность — это то, что существует объективно, совершенно независимо от измерения. Измерение лишь дает ту или иную информацию о реальности. В квантовой механике приходится гораздо более тщательно анализировать понятие реальности. В контексте этого анализа простое классическое понимание реальности получило название *реализма*.

Оказалось, что предположение о реализме несовместимо с квантовой механикой. Впервые это отметили Эйнштейн, Подольский и Розен в своей работе 1935 года. Те концептуальные трудности, на которые указали авторы этой работы, были названы парадоксом Эйнштейна–Подольского–Розена, или *парадоксом ЭПР* (см. раздел 1.8 и приложение В.1). Иногда рассматриваемый в этой работе мысленный эксперимент называют эффектом ЭПР. Этот парадокс, или эффект, активно обсуждается до сих пор. Более того, в последние два десятилетия обсуждение этого парадокса и связанных с ним вопросов резко активизировалось. Работа Эйнштейна–Подольского–

Розена оказалась наиболее часто цитируемой работой в физике.

В 60-е годы XX века вопрос о реализме очень наглядно был сформулирован Джоном Беллом в форме *теоремы Белла*. Она утверждает, что в предположении реализма должны быть справедливы некоторые неравенства, названные *неравенствами Белла*. Эти неравенства были проверены экспериментально, и эксперимент показал, что они нарушаются. Это значит, что предположение о реализме (то есть о реальном существовании того, что измеряется, еще до измерения) действительно несправедливо. Теперь это не только теоретический вывод, но и экспериментально установленный факт.

Трудно переоценить значение этого результата. Квантовая механика заставляет заново анализировать вопрос о том, что же такое реальность. В главах 5, 6 мы увидим, какие интересные выводы о работе сознания можно из этого сделать. Пока же разберемся подробнее в том, почему вопрос о реализме ставится под сомнение в квантовой механике.

4.1. Неравенства Белла и опыты Аспекта

Чрезвычайно существенно, что особенности квантовых измерений невозможно объяснить (разрешить парадоксы) никаким логически простым способом. Например, вероятностный характер предсказаний результатов измерений можно было бы попытаться объяснить отсутствием полной информации о начальном состоянии. Другими словами, можно было бы предположить, что при измерении квантовой системы все происходит точно так же, как и при измерении классической системы, только мы не знаем точно, каково начальное состояние системы, и потому не можем точно предсказать результат измерения. Однако такое предположение оказывается неверным. Ошибочность этого предположения наглядно

демонстрируется теоремой Белла¹ и опытами типа опыта Аспекта,² которые исключают «локальный реализм». Это означает следующее.

Неравенства Белла возникают при анализе экспериментов типа эксперимента Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР). Наиболее наглядная форма опыта типа ЭПР состоит в том, что частица спина 0 распадается на две частицы со спинами $1/2$, у каждой из которых измеряется проекция спина на некоторую ось. Результаты таких измерений определенным образом коррелированы. Это ясно уже из того, что сумма проекций спинов всех частиц, участвующих в реакции, сохраняется. До распада эта сумма равна 0 и поэтому после распада тоже должна остаться нулевой. Характер корреляции очевиден, если измеряются проекции двух частиц на одну и ту же ось. Тогда если для первой частицы получается проекция, равная $(+1/2)$, то для второй частицы обязательно получится проекция $(-1/2)$, и наоборот. Если оси, вдоль которых измеряются проекции спинов, не совпадают, то корреляция сложнее, но она всегда присутствует (за единственным исключением ортогональных осей, когда корреляция полностью исчезает).

Джон Белл рассмотрел следствия, которые возникали бы, если бы еще до измерения проекции спинов на разные оси имели определенные значения или хотя бы до измерения состояние частицы можно было характеризовать некоторым вероятностным распределением по проекциям их спинов на различные оси. Существование такого типа вероятностного распределения еще до измерения характерно для классической физики и получило название «локального реализма». Слово «реализм» здесь означает, что нечто, обнаруживаемое при измерении, является вполне реальным, то есть существовало и до измерения. Слово «локальный» добавляется для того, что-

¹J. S. Bell. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

²Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gérard Roger, *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 460 (1981).

бы подчеркнуть, что нечто вполне реально существует в некоторой области абсолютно независимо от того, что происходит в других областях пространства (причинно не связанных с данной).

Локальность реализма важна потому, что в опытах типа ЭПР производятся измерения с двумя частицами, находящимися в разных областях. Если принять предположение о локальном реализме, то по результатам измерения проекции спина одной из частиц можно судить о реальном состоянии второй частицы, а именно — о том, что проекция спина этой второй частицы на ту же ось противоположна. Рассуждение, которое ведет к этому заключению, строится следующим образом. Если мы измерим проекцию спина одной частицы, скажем, на ось z , и получим результат $(+1/2)$, то, в силу корреляции (которую мы охарактеризовали выше), можно с достоверностью предсказать, что измерение проекции спина второй частицы на ту же ось даст $(-1/2)$. Если мы понимаем реальность так, как это принято в классической теории (то есть принимаем реализм), то мы можем заключить, что после первого измерения (проекции первой частицы) мы знаем, чему равна проекция второй частицы.

Итак, в предположении реализма мы не просто *можем предсказать результат измерения* проекции спина второй частицы, но *знаем, чему равна* эта проекция. В этом суть реализма. Но тогда сведения о проекции спина любой из частиц, фигурирующих в эксперименте ЭПР, можно получить любым из двух способов: либо измерив эту проекцию, либо измерив проекцию спина второй частицы на ту же ось. Это расширяет возможности судить о значениях проекций спина на различные оси: одновременно измерить проекции спина одной и той же частицы на две различные оси нельзя (для этого нужны приборы различных типов, несовместимые друг с другом), а измерить проекцию спина одной частицы на одну ось, а другой частицы — на другую ось, можно. Это и дало возможность Джону Беллу, принимая предположение о реализме, вывести

целый ряд неравенств, которые можно проверять экспериментально.

Белл показал, что в предположении локального реализма вероятности получения различных результатов измерений в опыте ЭПР должны удовлетворять некоторым неравенствам, которые получили название *неравенств Белла* (см. приложение В.2). Проведя измерения много раз и по статистике результатов измерений найдя вероятности различных результатов измерения, можно проверить, выполняются ли неравенства Белла. Тем самым можно выяснить, имеет ли место локальный реализм. Если неравенства Белла не выполняются, то предположение о локальном реализме следует отбросить.

Расчет вероятностей различных результатов измерения по законам квантовой механики приводит к нарушению неравенств Белла. Поэтому если верить квантовой механике, то эти неравенства, а с ними и предположение о «локальном реализме», нужно отвергнуть. Однако предположение о локальном реализме кажется настолько естественным, настолько соответствующим нашей интуиции, что для проверки неравенств Белла были поставлены специальные эксперименты.

Выполнение этих неравенств было проверено (правда, не с частицами спина $1/2$, а с поляризованными фотонами, но это эквивалентная ситуация) различными группами экспериментаторов. Первый результат был опубликован Аспектом с соавторами. Оказалось, что неравенства Белла нарушаются. А значит, локальный реализм (в предположении которого выводятся неравенства Белла) экспериментально опровергнут.

Это значит, что неверным оказывается привычное представление о том, что свойства, наблюдаемые при измерении, реально существуют до измерения, а измерение лишь ликвидирует наше незнание того, какие именно свойства имеют место. При квантовых измерениях³

³То есть при любых измерениях, если только они являются достаточно точными, так что в их результатах сказываются квантовые эффекты.

свойства, обнаруженные при измерении, могут вообще не существовать до измерения.

4.2. Что означает результат измерения

Чтобы пояснить это, обратимся опять к простым формулам из главы 3. Рассматривается измерение, которое выясняет, в каком из двух состояний, ψ_1 или ψ_2 , находится система (другими словами, каким из двух свойств, обозначенных номерами 1 и 2, обладает измеряемая система). Несущественно, какие именно свойства различает данное измерение. Для определенности можно представлять себе, что свойство 1 означает «находиться в области A_1 », а свойство 2 означает «находиться в области A_2 » (см. рис. 4.1).

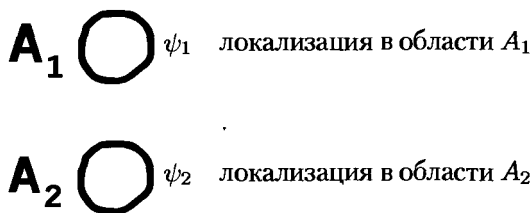


Рис. 4.1. Измерение, различающее между двумя альтернативными свойствами (например, «находиться в области A_1 » и «находиться в области A_2 »). Перед измерением квантовой системы могло не существовать ни одного из этих свойств (если система находилась в состоянии $c_1\psi_1 + c_2\psi_2$).

Измерение дает на заданный вопрос определенный ответ, то есть происходит выбор между номерами 1 и 2, и после измерения система действительно оказывается в состоянии (ψ_1 или ψ_2), соответствующем выбранному номеру, то есть после измерения система обладает тем свойством, на которое указывает результат измерения (см. рис. 4.2).

$$\begin{matrix} A_1 \bigcirc \\ A_2 \bigcirc \end{matrix} \begin{pmatrix} c_1 \psi_1 \\ + c_2 \psi_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} \psi_1 & \text{с вероятностью } |c_1|^2 \\ \psi_2 & \text{с вероятностью } |c_2|^2 \end{cases}$$

Рис. 4.2. Редукция при квантовом измерении. Измерение дает один из двух возможных результатов измерения. Вместо суперпозиции $c_1\psi_1 + c_2\psi_2$ после измерения остается лишь один из членов этой суперпозиции, ψ_1 или ψ_2 .

Однако обладала ли система этим свойством до измерения, то есть была ли она в состоянии ψ_1 или в состоянии ψ_2 еще до измерения? Вовсе нет. В общем случае система до измерения была в состоянии $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$, которое не тождественно ни ψ_1 , ни ψ_2 (состояние ψ называется суперпозицией состояний ψ_1 и ψ_2). *Свойство, которое обнаружено при измерении, не существовало до измерения.* Происходящий при измерении переход исходного состояния ψ в одно из состояний ψ_1 или ψ_2 называется *редукцией состояния* или (иногда) коллапсом волновой функции.

Обычное для классической физики понимание реальности, которая познается при измерениях, не имеет места в квантовой физике. В некотором смысле *при квантовом измерении реальность творится, а не просто познается!* По сути дела это означает, что классическое понимание реальности вообще никогда не является правильным, хотя в некоторых случаях, при достаточно грубых измерениях, классическое понимание реальности не приводит к заметным ошибкам, то есть является достаточно хорошим приближением.

А теперь приходится внести некоторые *уточнения* в только что сказанное: в обсуждаемой нами проблеме нужно внимательно следить за точностью формулировок, а в тех простых формулировках, которые мы использовали, есть одна неточность. Мы сказали, что измерение обнаруживает некоторое

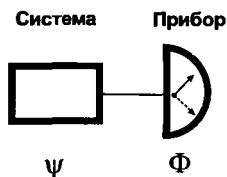
свойство и после измерения система действительно обладает этим свойством (хотя не обладала им до измерения). На языке формул: после измерения, различающего между состояниями ψ_1 и ψ_2 , система оказывается в одном из этих состояний. Действительно ли это так? Нет, наверняка мы можем выразиться лишь несколько слабее: наше *сознание* говорит нам, что система оказывается либо в состоянии ψ_1 , либо в состоянии ψ_2 .

Сознание нам так говорит, но так ли это «на самом деле» — отдельный вопрос. Впрочем, как мы только что видели, не так уж ясно и то, что следует понимать под выражением «на самом деле». Все это нам предстоит прояснить.

Если то, о чем говорит нам сознание, действительно происходит, то мы можем сформулировать ситуацию при измерении следующим образом: если результат измерения осознан наблюдателем, то это гарантирует, что система находится в одном из состояний ψ_1 или ψ_2 .

Однако на самом деле доказать это невозможно. Экспериментально доказывается лишь более слабое утверждение (обратите внимание, насколько тонкой является разница): *если результат измерения осознан наблюдателем, то предположение, что система находится в одном из состояний ψ_1 или ψ_2 , никогда не приведет к противоречию с любыми дальнейшими наблюдениями, проведенными этим наблюдателем или другим наблюдателем, с которым он может обсудить результаты наблюдений.*

Но, вспоминая анализ, проведенный в разделе 3.2, мы должны заключить следующее: если наблюдатель вообще не смотрит на прибор, то картина иная, даже после того, как прибор сработал. Состояние полной системы (измеряемая система + прибор) описывается тогда вектором $\Psi = c_1\psi_1\Phi_1 + c_2\psi_2\Phi_2$. Это значит, что ни измеряемая система, ни прибор ни в каком определенном состоянии не находятся, а состоящая из них полная система находится в запутанном (квантово-коррелированном) состоянии (подробнее о квантовой корреляции говорится в приложении А.5).



$$\begin{pmatrix} c_1\psi_1\Phi_0 \\ +c_2\psi_2\Phi_0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} c_1\psi_1\Phi_1 \\ +c_2\psi_2\Phi_2 \end{pmatrix}$$

Рис. 4.3. Квантовая эволюция в силу ее линейности не предполагает редукции: оба члена суперпозиции должны остаться. Постулат редукции является чужеродным в квантовой механике.

Теперь, вероятно, цепочка рассуждений стала настолько сложной, что стоит выделить из нее главное. Для нас главным будет следующее (рис. 4.3).

Если сознание наблюдателя исключено из измерения, то *суперпозиция, существовавшая перед измерением, не исчезает в результате действия прибора*. Суперпозиция $\psi\Phi_0 = (c_1\psi_1 + c_2\psi_2)\Phi_0$ после измерения переходит в $\Psi = c_1\psi_1\Phi_1 + c_2\psi_2\Phi_2$, а вовсе не в одно из состояний $\psi_1\Phi_1, \psi_2\Phi_2$, являющихся компонентами этой суперпозиции.

Так и должно быть, потому что закон эволюции в квантовой механике линеен, он описывается линейным оператором эволюции или линейным уравнением Шредингера. Такой закон не допускает, чтобы все члены суперпозиции, кроме одного, вдруг исчезли, как это предполагается в картине редукции, происходящей при измерении. Невозможно, чтобы состояние $c_1\psi_1\Phi_1 + c_2\psi_2\Phi_2$ превратилось в $\psi_1\Phi_1$ или в $\psi_2\Phi_2$.

Однако мы сейчас же вспоминаем, что именно это превращение и происходит в обычной, наивной, картине квантового измерения. Наблюдатель всегда видит либо $\psi_1\Phi_1$, либо $\psi_2\Phi_2$. Он всегда видит, что из суперпозиции остается лишь одна ее

компонента. И поскольку это всегда соответствует наблюдениям, то изменение, при котором исчезают все члены суперпозиции, кроме одного, было введено в квантовую механику *постулатом редукции* фон Неймана.⁴ Соответствующее преобразование называется редукцией состояния, или проекцией фон Неймана, или коллапсом волновой функции. Начиная с первых лет существования квантовой механики, предполагалось, что квантовомеханические системы могут эволюционировать двумя качественно различными способами: пока они не измеряются, они эволюционируют линейно, а при измерении подвергаются редукции.

Постулат редукции был принят в самой распространенной *копенгагенской интерпретации* квантовой механики, всегда прекрасно работал и так же замечательно работает до сих пор. С точки зрения практических надобностей, методики расчетов и предсказаний, нет никаких причин отказываться от этого постулата. Более того, для практических, расчетных, надобностей этот постулат (и, разумеется, различные его чисто технические усложнения и обобщения) заведомо следует сохранить.

А с какой же точки зрения в постулате редукции можно сомневаться? Ведь если он ведет к правильным предсказаниям, то он верен? Другого критерия в физике нет.

Да, это так. Те, кто делает попытки заменить постулат редукции чем-то качественно иным, стоят на несколько зыбкой почве. И все же основания для этих попыток есть. Перечислим некоторые из этих оснований, помня, однако, что доказательством они не являются и что отказ от постулата редукции будет оправдан лишь в том случае, если теория, обходящаяся без этого постулата, с той или иной точки зрения будет иметь существенные преимущества (будет подтверждена тем или иным способом).

⁴См. об этом подробнее в приложении А.3.

Во-первых, поиски другого пути, не опирающегося на картину редукции, продолжаются для того, чтобы попытаться избавиться от парадоксальности квантовой механики. Один из многообещающих путей для этого — отказ от постулата редукции в рамках концепции Эверетта, о которой мы будем говорить далее. Во-вторых, постулат редукции можно критиковать сам по себе. Остановимся вкратце на этой критике.

Постулат редукции кажется чужеродным в квантовой механике, он делает ее эклектичной. Почему система должна иначе эволюционировать, когда она подвергается измерению? Ведь измерение — это не что иное, как взаимодействие с некоторой другой системой, условно называемой прибором, и не более. А значит, эволюция полной системы во время этого взаимодействия (то есть во время измерения) должна быть линейной. Суперпозиция при такой эволюции не исчезнет, все члены суперпозиции, которые были перед измерением, останутся и после измерения.

Разумеется, существенно, что измерительная система является макроскопической, так что для нее хорошим приближением является классическое описание. Но если это лишь приближение, то и точное, то есть квантовое, описание измерительной системы равно применимо. В конце концов, измерительная система состоит из тех же микроскопических атомов, только в огромном количестве. Поэтому сделанный в рамках квантового описания вывод о том, что суперпозиция не может исчезнуть, а также его дальнейшие следствия, не опровергаются тем, что прибор является макроскопическим.

Кроме макроскопичности прибора, существенно и то, что в ситуации измерения могут возникать неустойчивости, которые эффективно могут приводить к картине, напоминающей редукцию. Однако «вывод» редукции при помощи такого рода рассуждений⁵ опять-таки связан с приближениями. Поэтому он не может опровергнуть результаты анализа, опирающе-

⁵См., например, Д. С. Чернавский, Синергетика и информация, Москва, Наука, 2001.

гося лишь на одно обстоятельство — на линейность квантовой механики, т. е. как раз той теории, которая послужила отправной точкой для этих приближений.

В той линии рассуждений, которой мы будем следовать далее, упор делается именно на общих свойствах квантовой механики. Цель состоит в том, чтобы из анализа этих общих свойств (прежде всего, линейности) попытаться извлечь как можно больше для понимания основ теории, ее интерпретации. На таком пути приходится делать шаги, которые иногда выглядят как фантазии. На наш взгляд, с такими шагами можно мириться в той мере, в какой они не только решают изначально сформулированную задачу (преодоление парадоксальности квантовой механики), но и существенно расширяют сферу применения и возможности всей теории.

4.3. Проблема измерения

Проблему, которую мы попытались очертить выше, часто называют *«проблемой измерения»*. Она была поставлена еще на заре квантовой механики, при ее анализе была выработана копенгагенская интерпретация (связанная прежде всего с именем Бора). Но не все согласились, что тем самым проблема измерения была решена. Проблема эта продолжала активно обсуждаться, и это обсуждение отражало стремление выйти за рамки копенгагенской интерпретации, блестяще решавшей практические задачи, но вызывавшей некоторое неудовлетворение с концептуальной точки зрения. В попытки решить проблему измерения внесли вклад многие выдающиеся физики, в том числе Паули, Шредингер, Гейзенберг, Эйнштейн (и, конечно, сам Бор с его блестящим анализом особенностей квантовой механики). Однако и сейчас эту проблему ни в какой мере нельзя считать решенной.

У «проблемы измерения» длинная история, и в разные периоды сообщество физиков относилось к ней по-разному. В какой-то мере каждое поколение физиков начинает осмысле-

ние этой проблемы заново и лишь после трудного и долгого периода вхождения в нее оказывается в состоянии внести в ее решение что-то новое. И все же, как нам кажется, в ходе исследований по этой проблеме можно выделить три этапа, качественно отличающиеся друг от друга.

Первый этап, на котором все отцы-основатели квантовой физики в той или иной мере прикоснулись к этой теме, отличался энтузиазмом и оптимизмом. Энтузиазм и интерес к вопросу поддерживался тем, что вопрос этот выводил физиков в совершенно новую, прежде не знакомую и потому интересную область мета-науки и философии, заставлял сопоставлять имеющиеся и появляющиеся вновь конкретные положения науки с самыми общими методологическими, а часто и мировоззренческими вопросами. Оптимизм, всегда естественный на ранней стадии, увеличивался еще и потому, что в исследовании участвовали чрезвычайно мощные интеллектуальные силы.

В этот период разведка велась по разным направлениям. Но серьезные успехи были достигнуты лишь в одном из них: была сформулирована и отшлифована до состояния четкого алгоритма *копенгагенская интерпретация* квантовой механики, основанная на вероятностных предсказаниях и редукции фон Неймана. Эта интерпретация по сути дела была компромиссом, позволявшим работать в квантовой механике, не сомневаясь в том, что эта работа производится корректно. Концептуальные трудности по существу не были устранены, но те, кого они не интересовали, могли о них забыть, не боясь из-за этого потерять всякую ориентировку (как могло бы быть на стадии становления квантовой механики).

Когда стало понятно, что первый натиск мало что дал для решения «проблемы измерения», кроме, может быть, лучшего понимания и самой проблемы, и ее необычности, и ее масштабов, — начался *второй этап*. Он характеризовался почти всеобщей верой в копенгагенскую интерпретацию и отличался маргинализацией исследований по «проблеме изме-

рения». Прошло время, когда понимание квантовой механики (на уровне интуиции) казалось, да и на самом деле было необходимым для эффективной работы. Теперь уже существовала четко сформулированная система правил, в рамках которой для получения результатов требовалась лишь математическая проработка конкретной задачи, то есть *расчеты*. Вопрос о *понимании* стал казаться лишним и большинство физиков уже не занимал. Характер работ по «проблеме измерения», которые все же регулярно появлялись, изменился и стал более схоластичным. Вместо смелых новых решений предлагались иные формулировки старых, менявшие эти старые формулировки в таких тонких словесных нюансах, что смысл изменений был полностью ясен (да и вообще интересен) лишь узкому кругу активных участников дискуссии. Большинству физиков казалось, что эта дискуссия вообще не имеет отношения к физике.

В 1957 году вышла работа Эверетта,⁶ в которой была предложена очень смелая и принципиально новая «многомировая» интерпретация квантовой механики. Она положила начало новому, *третьему этапу* в работе над проблемой измерения. Первоначально работа Эверетта была замечена немногими. Среди тех, кто ею заинтересовался, были, правда, такие известные физики, как ДеВитт и Уилер, однако широкой научной общественностью эта работа не была замечена. Однако она сыграла и продолжает играть главную роль на новом этапе исследований по проблеме измерений.

Затем, в 1964 году, появилась работа Джона Белла, которая позволила формулировать и обсуждать «проблему измерения» более конструктивно, а затем, в начале 80-х годов XX века, были поставлены опыты, показывавшие, что неравенства Белла нарушаются и, следовательно, в квантовой механике действительно несправедливо обычное классическое по-

⁶Н. Everett III, 'Relative state' formulation of quantum mechanics, Rev. Mod. Phys. **29**, 454 (1957). Печенечено в сб. J. A. Wheeler and W. H. Zurek, editors, Quantum Theory and Measurement, Princeton University Press, Princeton, 1983.

нимание реальности (см. приложение 4.1). Все это увеличивало интерес к концептуальным проблемам квантовой механики и знаменовало постепенный переход к третьему этапу в исследовании «проблемы измерения».

По-настоящему этот новый этап начался примерно два десятилетия назад и продолжается до сих пор. Интерес к «проблеме измерения» резко возрос, количество людей, занимающихся ею, существенно увеличилось. Для таких изменений были свои причины. Квантовая механика изменилась по существу, став инженерной наукой, и поэтому общее число физиков, вовлеченных в нее, стало намного больше, чем ранее. Кроме того, все предыдущее развитие квантовой механики показало, что она может найти приложения в самых неожиданных областях, и для поиска и последующего освоения новых приложений все больше требовались люди, не скованные догмами. Все это изменило саму атмосферу квантовомеханического сообщества, значительно уменьшив его консерватизм.

Были и более конкретные причины возобновления интереса к концептуальным вопросам квантовой механики, к «проблеме измерения». В повестку дня встал расчет не только коллективов квантовых систем (атомов, электронов, фотонов и пр.), но и индивидуальных систем (единичный электрон в одноэлектронных устройствах, единичный ион в магнитной ловушке и пр.). Для расчета поведения таких систем естественная для вероятностного подхода идеология квантового ансамбля (воображаемого коллектива большого количества одинаковых систем в одинаковых состояниях) уже не совсем подходила. Нужно было уметь описывать не только ансамбль систем, но и индивидуальную систему. Более того, для чисто практических нужд (скажем, в квантовой оптике) было необходимо рассчитывать не одно единственное измерение, а целую серию измерений над одной и той же индивидуальной системой, или измерение, непрерывное во времени. В таких условиях настойчиво повторявшееся во многих учебниках по квантовой механике утверждение, что вектор состо-

нения (волновая функция) описывает не индивидуальную систему, а воображаемое множество одинаковых систем (квантовый ансамбль), стало все больше вызывать неудовлетворение.⁷ Ансамблевая идеология, в которой концептуальных проблем вообще не возникает, стала явно недостаточной.

Кроме того, появились качественно новые приложения квантовой механики, которые требовали для своей реализации гораздо более глубокого понимания специфики квантовых систем. Эти приложения были объединены под именем квантовой информатики и включали квантовую криптографию, квантовую телепортацию и, главное, квантовый компьютер. Возникшие на этой основе новые технологии существенно использовали как раз те специфические особенности квантовых систем, которые порождают «проблему измерения» (ключевым здесь является понятие запутанных состояний, см. приложение А.5). Для разработки квантово-информационных систем вообще и квантовых компьютеров в особенности нужно было гораздо более глубокое понимание сути квантовой механики, ее отличий от классической. Помимо этого, нужно было уметь корректно описывать поведение таких систем, которые обладают одновременно и квантовыми, и классическими свойствами.

Нельзя, конечно, сказать, что для решения практических технологических задач требовалось сначала решить «проблему измерения». Однако для разработки методов решения практических задач требовалось работать на таком высоком уровне понимания квантовой механики, который близок к уровню, на котором формулируется эта проблема. Это расширило круг интересующихся концептуальными проблемами квантовой механики и круг активно работающих в этой области.

⁷ Во избежание недоразумений заметим, что понятие квантового ансамбля является корректным и часто привлекается для анализа вероятностных предсказаний. Однако, как правило, достаточно того, чтобы понятие ансамбля присутствовало неявно, а явно во всех рассуждениях фигурировало лишь понятие вероятности, применимое, разумеется, к индивидуальной системе.

Вот такой период резкой активизации интереса к проблеме измерения мы переживаем в настоящее время. Исследования по этой проблеме ведутся прежде всего на основе интерпретации Эверетта. В главе 5 мы попытаемся проследить некоторые возможные направления таких исследований. Наибольший интерес представляет надежда, по нашему мнению, вполне обоснованная, на то, что попытки решить квантовомеханическую проблему измерения могут не только устранить внутренние концептуальные трудности квантовой механики, но привести к новым подходам в гораздо более широкой и чрезвычайно интересной области — в теории сознания и даже в понимании феномена жизни.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И СОЗНАНИЕ

Мы уже говорили (см., например, раздел 3.3) о том, что для разрешения концептуальных трудностей квантовой механики («проблемы измерения») необходимо явным образом включить в нее сознание наблюдателя. В разделе 4.3 мы проследили, как физики пытались разрешить эти трудности в разные периоды развития квантовой механики. В последний период, который продолжается и сейчас, надежды возлагались и возлагаются прежде всего на интерпретацию Эверетта, которую еще называют многомировой интерпретацией квантовой механики.

В этой главе мы познакомимся с этой интерпретацией и попытаемся с ее помощью прояснить вопрос о роли сознания в квантовой теории измерений. Расширяя концепцию Эверетта, мы примем предположение о том, что *сознание как психический феномен на самом деле тождественно квантовомеханическому понятию выбора альтернативы*. Это предположение позволит в ином ракурсе взглянуть на проблему измерения и на понятие реальности (в главе 6 из этого анализа будут сделаны весьма далеко идущие выводы). В свете этого предположения сознание оказывается общим элементом квантовой физи-

ки и психологии и тем самым объединяет сферы естественно-научного и гуманитарного знания.¹

5.1. Концепция Эверетта: квантовая физика без коллапса

Концепция Эверетта была предложена еще в 50-е годы². Сам Эверетт называл ее интерпретацией квантовой механики, основанной на понятии относительного состояния (*relative state interpretation*), однако позднее, после работ Уилера и Де-Витта,³ она стала называться *многомировой интерпретацией* (*many-worlds interpretation*). Это название связано с тем, что концепция Эверетта допускает существование многих (а фактически — бесконечного числа) классических реальностей, которые можно наглядно представлять себе как множество классических миров.

Многомировая интерпретация, или интерпретация Эверетта, ранее считавшаяся слишком фантастической, в последние два десятилетия очень активно обсуждается, и в настоящее время ее принимает гораздо большее количество специалистов, чем раньше. Были тщательно изучены многие аспекты этой интерпретации и предложены различные варианты ее развития. Достаточно полный обзор литературы по этому вопросу можно найти в статье Вайдмана,⁴ включенной в Стэн-

¹Материал этой главы и главы 6 основан на работах: М. Б. Менский, Успехи физических наук **170**, 631 (2000); Успехи физических наук **171**, 459 (2001); Квантовая механика, сознание и мост между двумя культурами, «Вопросы философии», 2004, № 6, стр. 64; Понятие сознания в контексте квантовой механики, Успехи физических наук **175**, 413 (2005).

²H. Everett III, 'Relative state' formulation of quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 454, 1957. Reprinted in J. A. Wheeler and W. H. Zurek, editors, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.

³B. S. DeWitt and N. Graham, editors, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, Princeton University Press, 1973.

⁴Lev Vaidman, Many-worlds interpretation of quantum mechanics, in: Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Summer 2002, <http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/qm-manyworlds/>.

фордскую электронную энциклопедию по философии. В отличие от этой статьи, мы не будем пытаться анализировать все точки зрения на интерпретацию Эверетта, а проследим лишь одну возможную логически полную линию рассуждений, опирающуюся на эту интерпретацию и ведущую, на наш взгляд, к интересным новым перспективам, и не только в физике.

Прежде всего, поясним интерпретацию (концепцию) Эверетта, продолжая логику рассуждений, начатую в предыдущей главе. Мы привели там аргументы, свидетельствующие о том, что постулат редукции фон Неймана чужд квантовой механике. Он принят в ней, ценой эклектичности всей теории, лишь для того, чтобы обойти концептуальные проблемы, не решая их по существу, и построить схему, пригодную для практических расчетов. При редукции фон Неймана от исходной суперпозиции (в использованном ранее примере $c_1\psi_1 + c_2\psi_2$) остается лишь одна компонента (скажем, ψ_1 , а может быть, наоборот, ψ_2). Но, в противоречие с этой картиной, линейность квантовой механики (см. приложение А.2) требует, чтобы все компоненты суперпозиции сохранились. При измерении происходит лишь запутывание измеряемой системы с измерительным прибором, то есть суперпозиция принимает вид $c_1\psi_1\Phi_1 + c_2\psi_2\Phi_2$ (где Φ_1, Φ_2 — состояния прибора, соответствующие альтернативным результатам измерений). Концепцию Эверетта можно трактовать как попытку принять этот аргумент всерьез и учесть его последовательно.

Если быть последовательным, то не следует «портить» квантовую механику чуждым ей постулатом редукции, а, напротив, следует опираться на присущую ей линейность. Тогда приходится сделать вывод, что после взаимодействия, которое мы называем измерением, состояние системы и прибора примет вид $c_1\psi_1\Phi_1 + c_2\psi_2\Phi_2$. Нельзя выбросить ни одной компоненты из этой суперпозиции (которая в общем случае может включать много или даже бесконечное число компонент, в зависимости от типа измерения). Но если не выбрасывать, то

все компоненты суперпозиции нужно интерпретировать. Это и сделал Эверетт.

В концепции Эверетта (а точнее — в эквивалентной ей многомировой интерпретации) предполагается, что *различные компоненты суперпозиции соответствуют различным классическим реальностям, или классическим мирам*. Принимается, что эти реальности, или миры, совершенно равноправны, то есть ни одна (ни один) из них не более реальна (не более реален), чем остальные. В результате мы получаем картину многих миров в смысле Эверетта–Уилера–ДеВитта.

А как же быть с сознанием? Ведь каждый наблюдатель видит лишь один результат измерения, в его сознании, казалось бы, неизбежно происходит редукция, выбор одной компоненты суперпозиции из двух (или из многих). Не противоречит ли это концепции многих миров? Кажущееся противоречие разрешается очень просто: *сознание наблюдателя как бы расщепляется (разделяется)*, так что в каждом из классических миров этот наблюдатель видит то, что в этом мире происходит. Покажем это.

Обозначим вектором χ_0 начальное состояние наблюдателя, когда он еще не осознал результаты измерения (быть может, оно еще не закончилось, а быть может, он еще не посмотрел на приборы). Тогда состояние тройной системы (измеряемая система + прибор + наблюдатель) перед измерением описывается как

$$(c_1\psi_1 + c_2\psi_2)\Phi_0\chi_0.$$

Обозначим через χ_1 (соответственно χ_2) состояние наблюдателя в момент, когда он уже видит (осознает), что измерение дало результат 1 (соответственно 2). В этих обозначениях полная система (измеряемая система + прибор + наблюдатель) после измерения, но до осознания результата измерения, находится в состоянии

$$(c_1\psi_1\Phi_1 + c_2\psi_2\Phi_2)\chi_0,$$

$$\left(\begin{array}{c} c_1|\psi_1\Phi_0\chi_0\rangle \\ +c_2|\psi_2\Phi_0\chi_0\rangle \end{array} \right) \rightarrow \frac{c_1|\psi_1\Phi_1\chi_1\rangle}{+c_2|\psi_2\Phi_2\chi_2\rangle} \begin{array}{c} \chi_1 \\ \chi_2 \end{array} \bigtriangleright$$

Рис. 5.1. Разделение альтернатив. Компоненты суперпозиции соответствуют различным эвереттовским мирам, или классическим реальностям. Сознание наблюдателя «разделяется» между этими классическими реальностями. Каждая «компонента» сознания воспринимает лишь «свой» мир.

а после осознания — в состоянии

$$c_1\psi_1\Phi_1\chi_1 + c_2\psi_2\Phi_2\chi_2.$$

В «эвереттовской» интерпретации этого выражения каждое слагаемое (компонента суперпозиции) соответствует своей классической реальности, или своему миру. В каждом из этих миров наблюдатель видит (осознает) то, что произошло именно в этом мире. В мире, обозначенном номером 1, наблюдатель находится в состоянии χ_1 . Это значит, что он осознал, что измерение дало результат 1, то есть что измеряемая система и прибор находятся в состоянии $\psi_1\Phi_1$. Аналогично в мире с номером 2 тот же наблюдатель находится в состоянии χ_2 , то есть в его сознании картина происходящего соответствует состоянию $\psi_2\Phi_2$ измеряемой системы и прибора (см. рис. 5.1).

Таким образом, сознание наблюдателя расслаивается, разделяется, в соответствии с тем, как квантовый мир расслаивается на множество альтернативных классических миров. В нашем примере альтернатив всего две, в общем случае альтернативных классических миров после измерения оказывается столько, сколько альтернативных результатов может дать измерение. Заметим, впрочем, что классических миров на самом деле может быть сколько угодно, даже бесконечное количество, и после измерения они лишь распадаются на классы (в этом случае тоже бесконечные), соответствующие альтернативным результатам измерения.

В обычной (копенгагенской) картине измерения происходит редукция состояния или, что то же, выбор одного альтернативного результата измерения из всех возможных. Это можно назвать *выбором альтернативы*. Все альтернативы, кроме выбранной, после редукции исчезают. Переходя к эвереттовской интерпретации, мы видим, что редукции или выбора одной альтернативы (с отбрасыванием остальных) не происходит. Вместо этого происходит расслоение, или разделение, состояния квантового мира на альтернативные классические «реальности», или миры.

Сознание наблюдателя воспринимает различные классические миры независимо друг от друга. Условно можно сказать, что сознание разделяется на компоненты, каждая из которых воспринимает лишь один классический мир. Субъективно наблюдатель воспринимает происходящее так, будто существует лишь один классический мир, именно тот, который он видит вокруг себя. Однако, согласно концепции Эверетта, на самом деле во всех альтернативных мирах имеются как бы «двойники» этого наблюдателя, ощущения которых дают каждому из них картину того мира, в котором «живет» именно он.

В интерпретации Эверетта возникает некоторая двойственность, довольно трудная для осмысления. Все альтернативы реализуются, и сознание наблюдателя разделяется между всеми альтернативами. В то же время индивидуальное сознание наблюдателя субъективно воспринимает происходящее так, будто существует лишь одна альтернатива, в которой он живет. Другими словами, *сознание в целом разделяется между альтернативами, но индивидуальное сознание субъективно воспринимает лишь одну альтернативу*. Каждая «компонента» сознания не знает, что существуют другие компоненты, и интерпретирует воспринимаемую ею картину как единственную реальность. На самом же деле существует множество «реальностей», и ни одна из них не более (и не менее) реальна, чем остальные.

Очень важно понимать, что в любом эвереттовском мире все наблюдатели видят одно и то же, их наблюдения идеально согласованы друг с другом (если, конечно, не говорить о возможных чисто человеческих ошибках, а иметь в виду идеальных наблюдателей).

Чтобы показать это, обобщим предыдущие формулы так, чтобы в них фигурировали состояния двух наблюдателей. Пусть первоначальное состояние измеряемой системы, прибора и двух наблюдателей имеет вид

$$(c_1\psi_1 + c_2\psi_2)\Phi_0\chi_0^{(1)}\chi_0^{(2)}.$$

Тогда в силу линейности квантовомеханической эволюции после измерения это состояние перейдет в состояние

$$c_1\psi_1\Phi_1\chi_1^{(1)}\chi_1^{(2)} + c_2\psi_2\Phi_2\chi_2^{(1)}\chi_2^{(2)}.$$

Корреляция, описываемая этим вектором, такова, что либо оба наблюдателя находятся в состоянии, обозначенном номером 1 (то есть видят первый результат измерения), либо оба находятся в состоянии с номером 2 (то есть видят второй результат). Вектор состояния после измерения не может включать факторы $\chi_1^{(1)}\chi_2^{(2)}$ или $\chi_2^{(1)}\chi_1^{(2)}$, которые означали бы, что один наблюдатель видит результат наблюдения 1, а второй видит результат 2. Таким образом, несогласованность наблюдений различных наблюдателей в одном и том же эвереттовском мире появиться никак не может.

Такова вкратце концепция Эверетта. На первый взгляд она кажется и фантастической, и слишком сложной. Это, однако, не совсем так.

Во-первых, концепция Эверетта логически вытекает из единственного и, казалось бы, вполне естественного предположения — что *линейность квантовой механики не нарушается* в процессе взаимодействия измеряемой системы с прибором и последующего воздействия прибора на наблюдателя.

Во-вторых, вся картина кажется более фантастической, чем она есть на самом деле, когда, стремясь выразиться наглядно, говорят о многих классических мирах. На самом деле картина многих миров может вводить в заблуждение тех, кто знакомится с ней, не имея достаточного опыта в этом вопросе.

Стоит напомнить, что никаких «многих классических миров» на самом деле нет. *Есть только один мир, этот мир квантовый, и он находится в состоянии суперпозиции.* Лишь каждая из компонент суперпозиции по отдельности соответствует тому, что наше сознание воспринимает как картину классического мира, и разным компонентам суперпозиции соответствуют разные картины. Каждый классический мир представляет собой лишь одну «классическую проекцию» квантового мира. Эти различные проекции возникают в сознании наблюдателя, которое «разделяет» квантовый мир. Сам квантовый мир существует как единое целое независимо от какого бы то ни было наблюдателя.

Если говорить «различные компоненты суперпозиции» вместо «различные классические миры», то исчезают многие недоразумения, бытующие в популярной литературе и в дискуссиях по данному вопросу. Например, картина многих миров создает иллюзию, что в момент измерения один классический мир превращается в несколько (или даже бесконечное количество) миров. При этом иногда даже говорят о чудовищном несохранении энергии при таком «размножении миров». На самом деле, разумеется, никакого размножения миров в интерпретации Эверетта нет.⁵ И до измерения, и после него существует один-единственный вектор состояния, описывающий состояние квантового мира.

⁵В работе Max Tegmark, The interpretation of quantum mechanics: Many Worlds or Many Words, Fortsch.Phys. **46**, 855 (1998), эта мысль выражена в такой яркой форме: «Чего Эверетт НЕ постулирует: В определенные волшебные моменты мир испытывает какое-то метафизическое «расщепление» на две ветви, впоследствии никогда не взаимодействующие».

Что же происходит в момент измерения, а точнее, — в период, когда происходит взаимодействие измеряемой системы с прибором? В этот период происходят специфические изменения в состоянии взаимодействующих физических систем, что отражается в изменении вектора состояния полной системы. Возникает *квантовая корреляция, или запутывание, между измеряемой системой и измеряющей средой, включая наблюдателя*. Для формального описания этого изменения, чтобы наглядно представить возникающие корреляции, мы уже первоначальный вектор состояния представляем в виде суперпозиции нескольких компонент, а потом показываем, как меняется при измерении (под влиянием взаимодействия) каждая из этих компонент.

Этот анализ подробно обсуждался в предыдущих разделах. Согласно ему, первоначальное состояние

$$c_1\psi_1\Phi_0\chi_0 + c_2\psi_2\Phi_0\chi_0$$

под действием взаимодействия переходит в

$$c_1\psi_1\Phi_1\chi_1 + c_2\psi_2\Phi_2\chi_2.$$

Этот переход вовсе не означает удвоения материальных систем. После перехода остаются те же самые системы, что существовали перед измерением (измеряемая система, прибор, наблюдатель, ...). Меняются лишь состояния этих систем. Изменения состояний участвующих во взаимодействии систем происходят согласованно, так что после взаимодействия имеет место квантовая корреляция этих систем, которой до взаимодействия не было.

Излишне упрощенным является не только представление о «ветвлении» мира, но и о том, что измерение происходит в определенный момент времени сразу во всех точках конечной области (в которой отлична от нуля волновая функция измеряемой системы). Такое представление несовместимо, например, со специальной теорией относительности, в которой

одновременность событий в различных точках вообще нельзя определить.

Все эти трудности возникают из-за идеализации, содержащейся в понятии мгновенного измерения. Они исчезают, если учесть, что реально взаимодействия, которые мы называем измерениями, происходят непрерывно. Позднее (в разделе 5.3), мы перейдем к этой более общей картине измерения, как происходящего непрерывно во времени, и в связи с этим введем другой способ описания альтернатив, при помощи коридоров путей. При использовании коридоров путей вопрос о «размножении» классических миров вообще не возникает.

Имеется одно *возражение против концепции Эверетта*, которое выглядит действительно серьезным. Оно состоит в том, что эту концепцию невозможно проверить, или по крайней мере так кажется на первый взгляд. Поскольку все формулы в ней — те же самые, что и в обычной квантовой механике, то и предсказания, которые получаются в рамках этой концепции, не отличаются от тех, что вытекают из обычных квантовомеханических расчетов, проведенных в рамках копенгагенской интерпретации.

Именно поэтому концепция Эверетта — это лишь иная интерпретация квантовой механики, но не иная квантовая механика. Но действительно ли эту интерпретацию нельзя проверить? Позднее мы поговорим об этом подробнее, но несколько слов скажем уже сейчас.

На первый взгляд кажется, что многомировую интерпретацию действительно невозможно подтвердить или опровергнуть экспериментом, и в некотором смысле это действительно так. Обвинение это серьезное, ибо конструирование довольно сложной (в концептуальном плане) интерпретации, которую нельзя проверить, кажется слишком дорогой ценой за то, что теория становится более последовательной в чисто логическом плане.

По этой причине некоторые последователи Эверетта предлагали модифицировать его концепцию таким образом, что-

бы она стала проверяемой. Мы считаем, однако, что даже без всякой модификации *концепцию Эверетта можно проверить* экспериментами или, скорее, наблюдениями, особого рода: наблюдениями над индивидуальным сознанием. Мы обсудим это в разделах 6.3 и 6.4.2, а пока уточним, как следует понимать сознание в рамках концепции Эверетта.

5.2. *Расширение концепции Эверетта:*

сознание — это разделение альтернатив

Мы видели, что в квантовом измерении можно выделить два аспекта, статус которых очень существенно различается. Первый аспект является общепризнанным и лежит в основе всех квантовомеханических вычислений. Суть его в том, что даже при точно известном состоянии измеряемой системы квантовое измерение может иметь более одного исхода, и каждый характеризуется своей вероятностью.⁶ Для любых расчетов вполне достаточно такого описания измерения: в терминах *множества альтернатив и распределения вероятностей* на этом множестве. Поэтому многие физики считают, что этим описание квантового измерения исчерпывается.

Этот аспект квантового измерения хорошо понятен и не вызывает никаких вопросов. Измерение представляет собой взаимодействие измеряемой системы с измерительным прибором. При таком взаимодействии возникает квантовая корреляция (запутывание) измеряемой системы с прибором (или измеряющей средой).⁷ Важно, что при этом структура состояния не меняется: и до измерения, и после него состояние представляет собой суперпозицию, разные компоненты которой

⁶Если состояние измеряемой системы перед измерением имеет вид $\sum_i c_i \psi_i$, где ψ_i — состояние, соответствующее i -ому результату измерения, то вероятность i -го результата равна $|c_i|^2$.

⁷Это значит, что состояние измеряемой системы и прибора меняется как $(\sum_i c_i \psi_i) \Phi_0 \rightarrow \sum_i c_i \psi_i \Phi_i$. Запутывание сопровождается декогеренцией измеряемой системы, при которой теряется информация о фазах комплексных коэффициентов c_i (см. приложение А.5).

соответствуют различным результатам измерения. Если ограничиться лишь этим аспектом измерения, то при описании измерения в нем с начала и до конца *присутствуют все альтернативные результаты измерения*.

Однако наш опыт говорит о том, что в квантовом измерении имеется еще и второй аспект — *выбор одного из альтернативных результатов измерения*. При общепринятом описании этого аспекта меняется структура состояния. Из суперпозиции, компоненты которой соответствуют различным результатам измерения, сохраняется лишь одна компонента, остальные компоненты отбрасываются. Эта операция (отбрасывания всех компонент суперпозиции, кроме одной) называется *редукцией состояния*.⁸

Вот этот второй аспект квантового измерения, редукция состояния, и вызывает концептуальные трудности, или парадоксы, квантовой механики. Причина этого состоит в том, что редукцию состояния (отбрасывание всех компонент суперпозиции, всех альтернативных результатов измерения, кроме одного) невозможно вывести в рамках квантовой механики. Поскольку в квантовой механике эволюция линейна (описывается линейным оператором или линейным уравнением), все компоненты суперпозиции должны сохраниться, ни одна из них не может исчезнуть. *Процедура редукции является чужеродной по отношению к квантовой механике*, так как противоречит линейному характеру эволюции любой квантовомеханической системы.

Тем не менее, в квантовой теории измерений обычно принимается, что при измерении происходит именно такой переход, редукция состояния, то есть при измерении обычный в квантовой механике линейный закон эволюции перестает действовать. Это предположение составляет содержание *постулата редукции*. Постулат редукции принимается для то-

⁸ Математически редукцию можно описать как переход от запутанного состояния измеряемой системы и прибора $\sum_i c_i \psi_i \Phi_i$ к состоянию, описываемому лишь одной из компонент $\psi_i \Phi_i$ этой суперпозиции.

го, чтобы описать то, что *реально наблюдается при измерениях* квантовых систем классическими приборами. Однако по существу такое описание эклектически соединяет квантовую теорию с классической.

Если считать квантовую теорию правильной и при этом быть последовательным, то нужно признать, что редукция вообще не может происходить и следует исключить ее из теории. Это и делается в концепции Эверетта. Однако это вызывает новую проблему. *Требуется как-то объяснить, почему наблюдатель всегда видит лишь одну альтернативу*, тогда как квантовая механика не разрешает переход, при котором из всех альтернатив остается лишь одна. Многие считают эту проблему не менее серьезной, чем та «проблема измерения», которую призвана решить интерпретация Эверетта, и на этом основании отвергают эту интерпретацию. Мы, однако, попытаемся понять, почему наблюдатель видит лишь одну альтернативу, опираясь именно на концепцию Эверетта, то есть настаивая на равноправном существовании всех альтернатив (всех компонент суперпозиции).

Если объективно выбора одной альтернативы не происходит, а наблюдатель, тем не менее, всегда осознает лишь одну альтернативу, значит, *выбор альтернативы происходит в сознании наблюдателя*.

Эта мысль не является новой. И Эверетт, и многие его последователи в той или иной форме признают, что выбор альтернативы связан с сознанием. Однако, в отличие от других авторов, мы *усилим это положение* и будем предполагать,⁹ что не просто существует связь между двумя различными явлениями или понятиями, а эти явления, которые кажутся различными (хотя и связанными), на самом деле тождественны

⁹см. М. Б. Менский, Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов, Успехи физических наук **170**, 631, 2000; Понятие сознания в контексте квантовой механики, Успехи физических наук **175**, 413, 2005

друг другу. Другими словами, мы предполагаем, что *выбор альтернативы должен быть отождествлен с сознанием*. Уточним это.

В концепции Эверетта имеется два различных аспекта сознания (см. раздел 5.1). Сознание в целом разделяется между альтернативами, а «компонента» сознания живет в одной классической альтернативе. В психологии сознанием называется, конечно, лишь то, что воспринимается субъективно, то есть, в нашей терминологии, лишь «классическая компонента» сознания. Значит, для того, чтобы произвести отождествление понятия «сознание» с некоторым понятием из квантовой теории измерений, мы должны понимать сознание расширительно, как нечто, способное охватить весь квантовый мир, а не только одну его классическую проекцию. Таким образом, мы приходим к следующей *гипотезе отождествления*.

Свойство человека (и любого живого существа), называемое сознанием, — это то же самое явление, которое в квантовой теории измерений фигурирует как редукция состояния или выбор альтернативы, а в концепции Эверетта — как разделение квантового мира на классические альтернативы.

Гипотеза отождествления, о которой мы сейчас говорим, тесно связана с такими вариантами интерпретации Эверетта, в которых фигурирует понятие «многих разумов» (many minds). Иногда этим вариантам интерпретации Эверетта присваивают отдельное название: «интерпретация многих разумов» (many-minds interpretation). Но предлагаемая гипотеза по нашему мнению легче для понимания и более плодотворна. Хотя эта оценка, конечно, вполне субъективна, все же последующее изложение в какой-то мере подтвердит, что эта гипотеза действительно порождает нечто новое: она *естественным образом ведет к объяснению целого класса явлений в области сознания*, явлений удивительных и до сих пор не объясненных.

На первый взгляд шаг, который делается, если мы принимаем гипотезу отождествления, невелик. Однако на самом деле он позволяет совсем по-новому посмотреть на соотношение между квантовым измерением и сознанием наблюдателя. Что же именно меняется, если мы отождествляем разделение альтернатив и сознание?

В рамках интерпретации Эверетта всегда предполагалось, что эти явления, принадлежащие качественно различным сферам, тем не менее *связаны друг с другом*. Теперь, принимая гипотезу отождествления и тем самым расширяя концепцию Эверетта, мы считаем, что это просто *одно и то же явление*. Значит раньше две сферы, квантовая механика и психология, не имели никаких общих элементов (хотя между ними и существовала некая функциональная связь), а теперь у них есть общий элемент — сознание. *Сознание оказывается общей частью квантовой физики и психологии*, а тем самым — общей частью естественнонаучной и гуманитарной сфер познания.

Уточним несколько это утверждение. Общую часть квантовой физики и психологии, которую в контексте квантовой физики можно назвать разделением альтернатив, следует отождествить лишь с самым глубоким (или самым примитивным) пластом сознания. Этот пласт сознания лежит как бы *«на границе сознания»* и тесно связан с явлением *осознавания*, т. е. с переходом от состояния, когда нечто не осознано, к состоянию, когда оно осознано. Для упрощения терминологии мы будем называть эту общую часть квантовой физики и психологии просто сознанием. Лишь иногда, когда это необходимо, мы будем пояснять, что речь идет не о всем многообразии явлений, которое обычно охватывается термином «сознание», а лишь о том неуловимом, что отличает состояние, в котором субъект осознает происходящее, от состояния, в котором он его не осознает.

Мы много и с различных точек зрения говорили о том, что в квантовой механике *редукция состояния* при измерении не поддается пониманию, вызывает концептуальные проблемы, которые уже много лет не удастся решить. Точно так же, несмотря на еще более долгое тщательное изучение, остается непонятным *феномен сознания*. Различные проявления сознания (такие, как распознавание образов, обработка зрительной информации и т. д.) очень хорошо изучены. Однако сама суть сознания, то, что отличает состояние сознающего субъекта от состояния мертвой материи, остается тайной, одной из величайших тайн. Таким образом, сейчас идет речь об *отождествлении двух понятий, или явлений, каждое из которых не поддается пониманию*, несмотря на интенсивные исследования, уже в течение многих десятилетий. Возможно, что при отождествлении этих явлений они станут более прозрачными, «*объяснят друг друга*».

Если принять отождествление сознания и разделения альтернатив, то есть двух явлений из качественно различных сфер, то становится правдоподобным, что *при обычном подходе, без отождествления, эти явления и не могли быть поняты*. Понимание в этом случае не достигается потому, что анализ каждого из этих явлений производится в рамках лишь одной из этих двух сфер и тем самым упускается важный аспект изучаемого явления, лежащий в другой сфере.

Это особенно очевидно относительно явления редукции в квантовой физике. Если считать, что редукция (а точнее — разделение альтернатив) есть не что иное как сознание наблюдателя, то перестаешь удивляться, что оно не поддается объяснению в рамках физики. Ведь из физики, согласно принятой в ней методологии, принципиально изгоняется все субъективное, в том числе само понятие сознания. Явление редукции упорно пытались объяснить как нечто, происходящее с материальными системами и не имеющее прямого отношения к наблюдателю, тем более к сознанию наблюдателя. Если на самом деле редукция — это и есть само сознание, то что же

удивительного, что его не удастся понять, когда сознание исключается из рассмотрения? Можно ли в физике действовать иначе — об этом мы поговорим в разделе 6.4.2.

В дальнейшем мы будем неоднократно опираться на понятие сознания как общей части физики и психологии, что расширяет возможности концепции Эверетта. Но прежде уточним понятие измерения и альтернативных результатов измерения, перейдя от мгновенных к непрерывным измерениям.

5.3. Представление альтернатив коридорами путей

До сих пор, говоря об измерении, мы для простоты имели в виду мгновенные измерения, поэтому в качестве альтернатив выступали векторы состояния, которые представляли компоненты суперпозиции (в простейшем примере это были векторы $\psi_1 \Phi_1$ и $\psi_2 \Phi_2$). На самом деле при более общем и более реалистическом описании измерения следует учитывать его длительность, то есть *рассматривать измерение как непрерывное*. В случае непрерывного измерения можно представлять *результат измерения как коридор путей*, описывающих эволюцию системы и ее окружения. Коридор путей, представляющий результат непрерывного измерения, мы будем обозначать буквой α . Множество всех альтернативных результатов непрерывного измерения представляется тогда как множество $\{\alpha\}$ различных коридоров путей.

Переход к непрерывным измерениям важен в том смысле, что альтернативой является в этом случае *не состояние системы и прибора в определенный момент времени, а эволюция системы и ее окружения* в течение интервала времени (возможно, очень длительного). В остальном же все высказанные до сих пор соображения остаются справедливыми.

На самом деле мгновенных измерений вообще не существует, каждое измерение имеет конечную продолжительность. В некоторых случаях длительность измерения пренебрежимо

мала, так что его можно считать мгновенным, не делая при этом большой ошибки. Вот тогда-то и можно говорить о мгновенном измерении.

Мгновенные измерения хороши для того, чтобы проанализировать некоторые черты квантовых измерений, не усложняя этот анализ техническими деталями. Так мы и поступали до сих пор. Однако в действительности измерения чаще всего нельзя считать мгновенными, а следует учитывать их продолжительность и говорить о *непрерывном измерении*. В некоторых случаях продолжительность непрерывного измерения очень велика, особенно когда «квантовое измерение» не организуется специально экспериментатором, а возникает спонтанно в результате неконтролируемых взаимодействий квантовой системы с ее окружением.

Непрерывное измерение можно представить как последовательность большого количества мгновенных измерений, происходящих достаточно часто. Вместо этого его можно описать при помощи пучков «фейнмановских путей».¹⁰ Каждый из пучков для наглядности можно представлять себе как коридор, по которому прокладываются пути и из которого они не выходят. Если мы говорим, что нам известен результат непрерывного измерения, это значит, что нам известно, в каком коридоре лежал фейнмановский путь измеряемой системы и ее окружения. Нам сейчас техника фейнмановских путей по существу не потребуется. Достаточно будет очень простого наглядного образа — частицы, движущейся вдоль коридора путей.

Для большей наглядности можно представлять себе эволюцию квантовой системы как движение квантовой частицы. Это на самом деле вполне адекватный образ, потому что сколь угодно сложная система представляется значениями своих координат, то есть точкой в многомерном пространстве. Из-

¹⁰Фейнмановские пути и фейнмановский интеграл по путям — это наглядный образ и в то же время математически точное понятие, которое описывает эволюцию квантовой системы, см. об этом приложение А.6.

менение состояния этой системы с течением времени выглядит тогда как движение этой точки.

Если система классическая, то ее эволюция представляется движением точки (частицы) по определенной траектории, или пути. Путь, который выбирает классическая система, называется классической траекторией. Он находится по известным законам, в простейшем случае — с помощью известного из школьного курса закона Ньютона. *Квантовая система* движется иначе: «одновременно» по всем возможным путям (это соответствует фейнмановскому интегралу по путям).

Случай квантовой системы, подвергающейся непрерывному измерению, является промежуточным между классической и квантовой картинами. Если система подвергается *непрерывному измерению*, то этим измерением ее *путь частицы становится известным*. Это значит, что из всех возможных путей, по которым могла бы двигаться система, выделяется пучок, или коридор, путей. Таким образом, *коридор путей α* представляет результат измерения. Множество альтернативных результатов измерения представляется множеством коридоров $\{\alpha\}$. Так же, как в случае мгновенного измерения, для каждого коридора α (то есть для каждого результата непрерывного измерения) можно найти соответствующую ему вероятность.

Коридоры путей по отношению к квантовомеханическим процессам играют ту же роль, что процедура редукции по отношению к состояниям квантовых систем. Эволюция квантовой системы описывается интегралом по всем возможным путям, что можно представить как сумму по всем возможным коридорам путей $\{\alpha\}$. Если система подвергается непрерывному измерению, то с учетом результата этого измерения ее эволюция представляется интегралом по некоторому конкретному коридору путей α .

Тем самым *эволюция системы подвергается «проектированию»* в соответствии с результатом непрерывного измерения. Это совершенно аналогично тому, как при редукции фон Неймана состояние системы проектируется в соответствии с тем, какой результат да-

ло мгновенное измерение этой системы. И так же, как мгновенное измерение характеризуется альтернативными состояниями системы $\{\psi_i \Phi_i\}$, непрерывное измерение характеризуется семейством альтернатив $\{\alpha\}$, каждая из которых представляется коридором путей. Так же, как и для мгновенных измерений, различные альтернативы характеризуются вероятностями, которые могут быть рассчитаны на основе квантовой механики.

Важно, что в случае достаточно широких коридоров *каждая из альтернатив описывает квазиклассическое движение системы*, а соответствующий коридор α приближенно представляет некоторую *классическую траекторию*. Эволюция квантовой системы, спроектированная на такой коридор, остается квазиклассической, то есть в значительной степени предсказуемой.¹¹

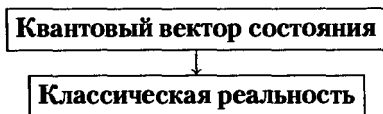
В то же время полностью устранить квантовые эффекты нельзя. Это сказывается в том, что квантовые коридоры α , совпадающие на некотором отрезке, в целом могут различаться. Для классических траекторий (в отличие от их приближенного представления коридорами) это не так: задание некоторого отрезка классической траектории полностью определяет всю траекторию в целом.

Примером квазиклассического квантового состояния является когерентное состояние семейства фотонов, максимально близкое к состоянию классической волны. Суперпозиция когерентных состояний с сильно отличающимися характеристиками, наоборот, нестабильна и очень быстро распадается с образованием когерентных (то есть близких к классическим) состояний. Такие быстро распадающиеся существенно неклассические состояния реально создают в лаборатории. Поскольку каждое из них представляет собой суперпозицию состояний, близких к классическим, такие суперпозиции называют шредингеровскими котами (по аналогии с суперпозицией живого и мертвого кота в парадоксе, предложенном Шредингером).

¹¹ Это справедливо в том случае, если коридоры $\{\alpha\}$ представляют поведение не только измеряемой системы, но и ее окружения, или прибора (так же как для мгновенного измерения альтернативы $\{\psi_i \Phi_i\}$ представляют состояние и измеряемой системы, и прибора).

5.4. Иллюзия классической реальности

Если принять точку зрения, которая развивалась в разделе 5.2, то взаимоотношение между квантовым и классическим мирами выглядит совершенно иначе, чем обычно. Обычная интерпретация взаимоотношений этих миров иллюстрируется следующей схемой:



Классический мир — это то, что мы наблюдаем, поэтому он интерпретируется как реальность. Квантовый же мир (вектор состояния, или волновая функция) существует лишь как некоторый математический образ, позволяющий предсказать классическую реальность, да и то лишь вероятностным образом. Во всяком случае, при таком подходе кажется неправильным интерпретировать квантовый мир как объективно существующий.

Если же принять интерпретацию Эверетта, дополнив ее вдобавок гипотезой, что разделение квантового мира на альтернативные «классические реальности» — это то, что мы воспринимаем как сознание, тогда возникает совершенно другая схема взаимоотношений квантового и классического миров:



В этой схеме квантовый мир объективен, потому что он не зависит от сознания. Он существует в форме параллельных классических миров, каждый из которых не менее и не более

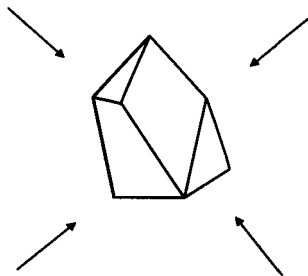


Рис. 5.2. Классическая реальность возникает в сознании как выбор одного из альтернативных результатов измерения и представляет собой взгляд на квантовый мир с одной из возможных точек зрения. В квантовом мире все альтернативы объективно существуют. В сознании тоже все они сосуществуют, но разделены.

реален, чем все остальные.¹² По существу каждый из «классических миров» представляет собой лишь одну из альтернативных «классических проекций» квантового мира (см. рис. 5.2).

«Реальность» одного классического мира, каким-то образом выбранного из всего множества альтернативных эвереттовских миров, оказывается вполне иллюзорной: ведь этот мир является лишь образом, возникающим в сознании. Если сознание видит один из эвереттовских миров, то остальные миры при этом вовсе не перестают существовать, а оказываются другими образами, также существующими в сознании как другие «классические компоненты» этого сознания. Представление о том, что лишь один, выбранный сознанием, мир реален, — это лишь иллюзия, возникающая в сознании на-

¹² Вектор, описывающий состояние квантового мира, можно представить в виде суперпозиции векторов, каждый из которых соответствует определенной классической реальности. Однако это разложение требуется лишь для интерпретации состояния. На самом деле состояние описывается всей суперпозицией в целом.

блюдателя. Эта иллюзия вполне подобна другой, широко известной иллюзии — что Солнце вращается вокруг Земли.

Такие взаимоотношения можно проиллюстрировать рисунком 5.2, на котором квантовый мир символически изображен как некоторая сложная объемная фигура, а то, что мы называем «классической реальностью», соответствует лишь одной из проекций этой фигуры. Работа сознания состоит в том, чтобы отделить каждую из возможных проекций от всех остальных, однако одна проекция ни в какой мере не отображает всей сложности объективно существующего квантового мира.

5.5. Сознание — мост между «двумя культурами»

Предположим, что разделение альтернатив (необходимый элемент описания квантового измерения) отождествляется, как это сделано в разделе 5.2, с актом «осознавания», то есть с глубинным пластом феномена сознания. В этом случае сознание оказывается одновременно элементом физики и психологии, то есть становится границей и даже общим элементом естественнонаучной и гуманитарной культур (см. М. Б. Менский, «Вопросы философии», 2004, №. 6, стр. 64).¹³ Это приводит к качественно новому пониманию того, как соотносятся друг с другом эти две сферы человеческого знания.

5.5.1. Новое понимание феномена сознания

Во-первых, при этом появляется новый, и гораздо более глубокий, взгляд на феномен сознания. Отождествляются в этом случае явления, принадлежащие двум качественно различающимся областям науки: физике и психологии. В каждой из этих сфер соответствующее явление (разделение альтерна-

¹³Строго говоря, общим элементом физики и психологии является не сознание как целое, а «начало сознания», но в отсутствие развитой терминологии мы будем говорить в этом контексте просто о сознании.

тив в квантовой физике и осознание в психологии) остается недоступным для понимания. Но отождествив их друг с другом, мы этим отождествлением в какой-то мере объясняем оба явления.

На вопрос, что же такое разделение альтернатив, мы теперь можем ответить: это осознание наблюдателем квантового мира. На вопрос, что же такое осознание, то есть «включение» сознания, мы можем ответить: это то самое, что в физике представляется разделением единого квантового мира на классические проекции (которые в сознании изолированы друг от друга).

Становится ясным и то, почему оба эти явления до сих пор остаются непонятными и таинственными. Каждое из них рассматривается лишь в одной из двух сфер: редукция в физике, а осознание — в психологии. В рамках одной сферы понимания достичь нельзя. Понимание достигается (или по крайней мере степень непонимания уменьшается) в том случае, когда единое явление, получившееся после отождествления, рассматривается одновременно в двух сферах.

При таком подходе феномен сознания описывается как бы с двух сторон — со стороны психологии и со стороны квантовой физики (как один из аспектов в описании измерения квантовой системы). *Сознание оказывается границей между физикой и психологией*, имеющей прямое отношение к обеим этим сферам. Описание сознания лишь в рамках одной из этих сфер может осветить лишь одну сторону этого явления. Лишь изучая роль сознания в обеих этих сферах, можно надеяться построить полную теорию сознания, включающую его самые глубокие (примитивные) слои. Об этом мы еще будем говорить подробнее в главе 6.

5.5.2. Сознание — место встречи двух культур

Таким образом, концептуальный анализ квантовой механики приводит к необходимости ввести в эту теорию сознание наблюдателя как необходимый элемент теории. Включе-

ние сознания и в квантовую физику, и в психологию, как их общего элемента, открывает путь к непосредственному контакту между физикой и психологией, а если смотреть более широко — между естественными науками с одной стороны и различными способами изучения духовного мира человека — с другой. Эти две сферы интеллектуальной деятельности людей обычно считаются взаимно исключаящими. В статье «Две культуры», написанной в 1956 году¹⁴ и вызвавшей многолетние жаркие дискуссии в западной литературе, Чарльз Сноу высказывает обеспокоенность отсутствием контакта между этими сферами («двумя культурами») и даже неприятием их друг другом (см. также книгу Е. Л. Фейнберг, Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке, Век 2, Фрязино, 2004).

Как мы теперь видим, в рамках концепции Эверетта две культуры не только не исключают друг друга, но непосредственно встречаются при изучении феномена сознания. Каждая из них подходит к этому феномену со своими специфическими методами, но достигает при этом лишь одностороннего знания о нем (рис. 5.3).

Если это так, то скорее всего познание самых интересных аспектов феномена сознания оказывается возможным лишь при взгляде на него одновременно с двух сторон: естественнонаучной и гуманитарной. Только таким образом можно построить теорию сознания, включающую его самые глубинные слои («осознавание», корень сознания). Некоторые подтверждения этого мы обсудим в главе 6. С другой стороны, только привлекая понятие или феномен сознания, можно разрешить «проблему измерения», возникшую в квантовой физике.

Таким образом, полнота каждой из «двух культур» не может быть достигнута без обращения к другой культуре, без учета ее выводов, относящихся к сознанию как явлению, по-

¹⁴Чарльз Перси Сноу, Две культуры и научная революция, в сб. Ч.П.Сноу, «Портреты и размышления: Художественная публицистика», пер. с англ., Москва, Прогресс, 1985.

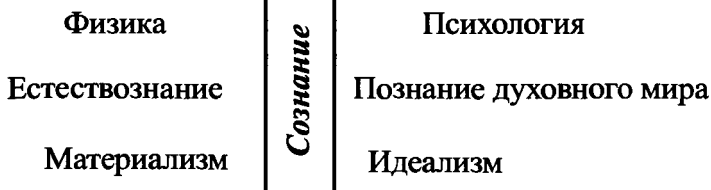


Рис. 5.3. Сознание соединяет Две Культуры (в смысле Чарльза Сноу). В рамках концепции Эверетта и при отождествлении сознания с разделением альтернатив сознание становится общим элементом физики и психологии, а значит, естественнонаучной и гуманитарной культур. Материализм и идеализм оказываются относительными понятиями.

границному между двумя культурами. С этой точки зрения неприятие или недооценка естественнонаучного знания со стороны гуманитариев или гуманитарного знания — со стороны естественников, выглядит особенно странно. По сути дела такая недооценка свидетельствует о недостаточно глубоком понимании не только «чужой», но также и своей собственной культуры.

5.5.3. Между материализмом и идеализмом

С точки зрения философии отношение к сознанию (вторично оно или первично по отношению к материи) характеризует различие между материализмом и идеализмом. Физики и вообще естествоиспытатели в большинстве своем склонны, разумеется, к материализму. Однако многие физики, в том числе Паули и Вигнер, приходили к выводу, что квантовая механика, которая вынуждена включить в рассмотрение сознание наблюдателя, несовместима с материализмом. В интерпретации Эверетта сознание трактуется таким образом, что вопрос о его первичности или вторичности приходится рассматривать иначе, чем обычно. Новое понимание сознания

оказывается как бы «на границе» материализма и идеализма и связывает эти два философских направления, вопреки общепринятому убеждению в их несовместимости.

Вспомним, что в многомировой интерпретации квантовый мир включает в себе (в качестве компонент суперпозиции) альтернативные классические миры, которые фактически являются различными его проекциями. Посмотрим, как в этой концепции звучит вопрос о соотношении сознания и материи.

В развиваемой концепции под *материей* естественно понимать неживые физические системы, а также тела живых существ, рассматриваемые как совокупность атомов, элементарных частиц и других «единиц материи», то есть тоже как физические системы. *Сознание* определяется в этой концепции лишь как некоторое явление: разделение альтернатив = осознание. Что же из них первично, а что вторично, то есть в каком-то смысле порождается первичным?

Мы говорили в разделе 3.3, что границу между измеряемой системой и прибором (Heisenberg's cut) можно провести как угодно далеко, то есть включить в измеряемую систему и тело (в том числе мозг) наблюдателя. При этом редукцию состояния все же не удастся вывести из законов материи, то есть сознание всегда остается за этой границей. Поэтому сознание (его глубинный слой, «осознание») вряд ли можно «вывести» из свойств материи. Тем более из явления сознания, то есть из разделения альтернатив, нельзя «вывести» свойства материи, то есть законы квантовой механики. Получается, что *материя и сознание являются независимыми друг от друга и в некотором смысле дополняют друг друга*. Вопрос о первичности или вторичности сознания кажется в этом случае некорректным.

Можно несколько иначе понимать слова «первично» и «вторично», называя вторичным то, что является частью первичного или в каком-то смысле подчинено ему, играет вспомогательную роль, не является самодостаточным. Как в этом случае выглядит вопрос о первичности или вторичности со-

знания? Нам представляется, что это зависит от того, что понимается под реальностью, то есть под «всем существующим».

Наиболее естественно в рамках развиваемой концепции понимать «все существующее» как квантовый мир, описываемый полным вектором состояния. Тогда этот квантовый мир, то есть материя, окажется первичным, а индивидуальное сознание, выделяющее одну альтернативу, следует считать вторичным. Более того, даже «полное» сознание, которое не выделяет единственной альтернативы, а лишь разделяет квантовый мир на альтернативы, все же окажется вторичным. Ведь операция разделения на альтернативы может быть определена лишь после того, как определен полный вектор, который подлежит разделению. В этом смысле материя первична, а сознание вторично.

Это больше напоминает материализм. Однако, во-первых, в этом рассуждении понимание первичности и вторичности является иным, чем обычно при определении материализма, а во-вторых, даже при этом вывод о вторичности сознания сделан на основе того, что «все существующее» определяется как квантовый мир, соответствующий полному вектору состояния.

Вывод изменился бы, если бы мы исходили из другого понимания того, что есть «все существующее». С точки зрения (быть может, наивного) здравого смысла «все существующее» — это то, что может видеть наблюдатель или различные наблюдатели, имеющие возможность сравнивать свои наблюдения. Это как раз то, что в рамках развиваемой концепции мы называем (одной) классической реальностью или (одним) эвереттовским миром. Поскольку в данной концепции классические реальности порождаются сознанием, то сознание оказалось бы в этом случае первичным. Более того, первичным оказалось бы индивидуальное сознание, которое видит одну классическую реальность, один эвереттовский мир, а «наивный» наблюдатель или «наивный философ» именно

эту единственную наблюдаемую реальность отождествляет со «всем существующим». Правда, такое понимание кажется отступлением назад от концепции Эверетта, так что быть может рассматривать его в рамках этой концепции не следует.

Общий вывод, по-видимому, состоит в том, что из-за специфического понимания сознания в расширенной концепции Эверетта отнесение этой концепции к материализму или идеализму лишается смысла или по меньшей мере становится относительным (см. М. Б. Менский, «Вопросы философии», 2004, No. 6, стр. 64).

ТАЙНА СОЗНАНИЯ

Анализируя картину квантового измерения, мы выяснили, что ключевым понятием в этой картине являются альтернативные результаты измерения, которые представляются компонентами суперпозиции в случае мгновенного измерения или коридорами путей, если измерение производится непрерывно. Продолжая анализ в рамках концепции Эверетта, мы убедились, что альтернативы непосредственно связаны с сознанием наблюдателя. Теперь пришло время разобраться в этом более детально и ответить на естественный вопрос: какие новые выводы можно сделать из проведенного анализа и для квантовой механики, и, главное, для понимания феномена сознания.

Прежде всего, мы поговорим о том, что понимается под выражением «классические альтернативы» и почему собственно альтернативы являются классическими. Заключение окажется очень интересным. Классичность каждой альтернативы означает предсказуемость ее временной эволюции, а такая предсказуемость является необходимым условием существования жизни. Поэтому разделение квантового мира на классические альтернативы теснейшим образом связано с самым таинственным из известных нам явлений — с феноменом жизни.

Анализ этой связи позволяет построить очень стройную концепцию, которая, по-видимому, не только отвечает на вопросы, возникшие в квантовой механике, но претендует на объяснение многих важных и иногда совсем непонятных явлений, наблюдающихся при исследовании человеческого сознания. Это приводит к неожиданным и глубоким связям квантовой физики и психологии, и даже более широко — естественнонаучной и гуманитарной сфер человеческого познания.

6.1. Квантовый мир, сознание и тайна жизни

Если рассматривать альтернативные результаты непрерывного измерения (альтернативные коридоры путей) $\{\alpha\}$ в рамках квантовой теории измерений, то их следует выбрать так, чтобы они были (приближенно) *классическими*.¹ Требование классичности вводится для того, чтобы теория соответствовала эксперименту.

Действительно, проводя любые измерения, экспериментатор может получать различные альтернативные результаты измерения, но каждый из этих результатов α , согласно его наблюдениям, совместим с законами классической физики (шредингеровский кот либо жив, либо мертв, но не суперпозиция живого и мертвого кота). Чтобы теория описывала именно то, что наблюдается на опыте, требуется, чтобы каждый коридор α представлял (квази)классическую эволюцию измеряемой системы и ее окружения. Если мы выберем неклассические альтернативы, то это будет противоречить тому, что наблюдается экспериментально.

Таким образом, требование классичности альтернатив соответствует наблюдениям. Однако нельзя ли *теоретически*

¹ Классичность альтернатив предполагает также их декогерентность. Это значит, что интерференция между различными альтернативными эволюциями мала, так что альтернативы можно характеризовать вероятностями вместо амплитуд вероятности.

обосновать требование классичности альтернатив? Другими словами, нельзя ли без всякой ссылки на эксперимент показать, что при разделении эволюции квантового мира на альтернативные эволюции $\{\alpha\}$ эти альтернативные эволюции обязательно должны быть классическими?

Мы увидим сейчас, что это оказывается возможным, если принять интерпретацию Эверетта и ее расширение, то есть отождествить разделение альтернатив с сознанием. Мы покажем, что разделение на альтернативы — это сознание живого существа, то альтернативы обязательно являются классическими.

Ключевую роль в таком доказательстве играет тот факт, что состояния, близкие к классическим, остаются *стабильными*, а их эволюция близка к тому, что предсказывают *классические законы*. Другими словами, будущее классических состояний предсказуемо.² Значит *классические альтернативы $\{\alpha\}$ описывают управляемый классическими законами, то есть предсказуемый мир.*

Если мы принимаем расширенную концепцию Эверетта, то разделение альтернатив — это не что иное, как сознание, то есть функция, которой обладают только живые существа. Значит и набор альтернатив, то есть определение того, на какие состояния разделяется состояние квантового мира, следует рассматривать, имея в виду, что использовать этот набор будут живые существа, когда они реализуют функцию сознания.³ Мы можем, следовательно, задаться вопросом: какой набор альтернатив $\{\alpha\}$ с точки зрения живых существ является предпочтительным среди всех возможных наборов. Это может

² В отличие от этого, суперпозиция классических состояний нестабильна и в течение короткого времени под влиянием окружения превращается в одну из своих классических компонент, причем можно лишь вероятностным образом предсказать, в какую именно (см. приложение А.6).

³ Заметим, что сознанием в том смысле, который мы вкладываем в это слово, то есть самой примитивной функцией сознания, обладают все живые существа, а не только человек (быть может, скорее следовало бы обозначить его словом «ощущение»).

привести к объяснению того, почему альтернативы оказываются классическими.

Каждая альтернатива α описывает поведение микроскопической измеряемой системы и ее макроскопического окружения так, как это поведение воспринимается сознанием. В данном случае для нашего рассуждения важно не то, что коридор путей α представляет измеряемую систему, а то, что он представляет также все ее (макроскопическое) окружение, то есть весь мир. Это та *картина мира, которая возникает в сознании живого существа*. И вот это как раз и позволяет обосновать классичность каждой альтернативы α .

Действительно, если α — классическая альтернатива, то это значит, что в той картине, которая возникает в сознании живого существа, мир ведет себя в соответствии с классическими законами. Это, в частности, означает, что этот мир *«локально предсказуем»*, то есть будущее некоторой небольшой области этого мира можно с достаточно большой вероятностью предсказать, даже не зная, что происходит за пределами этой области. Более того, для предсказания будущего такого мира несущественны даже детали того, что происходит в локальной области, достаточно знать лишь основные «опорные» параметры состояния материи в этой области. Видя вокруг себя предсказуемый мир, живое существо может выработать *оптимальную стратегию выживания в этом мире*. В классическом мире *возможна жизнь*.

Если бы альтернативы не были классическими, то в сознании возникала бы картина непредсказуемого мира. В частности, в том, как будет происходить эволюция локальной области этого мира, существенную роль могли бы играть состояние материи за пределами этой области (за счет квантовых нелокальностей) и самые мелкие детали начального состояния в самой этой области. В таком случае выработка оптимальной стратегии вообще была бы невозможна для локального живого существа, которое ничего не воспринимает за пределами небольшой области и даже в этой области воспри-

нимает далеко не все. Это значит, что невозможна была бы жизнь в той форме, в которой мы ее знаем.

Предсказуемость эволюции, характерная для классических коридоров α (представляющих собой огрубленные образы классических траекторий), в рамках расширенной концепции Эверетта оказывается абсолютно необходимой для существования жизни.

Таким образом, в расширенной концепции Эверетта *классичность эвереттовских миров оказывается необходимой для самого существования сознающих живых существ* (сознающих хотя бы на примитивном уровне, ощущающих). По сути дела, в рамках расширенной концепции Эверетта квантовая механика проливает свет на само понятие жизни, живой материи. Живое существо, в отличие от неживой материи, обладает способностью особым образом воспринимать квантовый мир. Этот мир, с его характерной квантовой нелокальностью, живое существо воспринимает не в целом, а в виде отдельных классических проекций. Каждая из таких проекций является «локально предсказуемой». В каждой из них живое существо осуществляет сценарий, называемый жизнью, тогда как без этого расслоения само понятие жизни (по крайней мере в известном нам локальном варианте) представляется невозможным.

Итак, выбор именно классических эволюций α в качестве тех альтернатив, которые в сознании наблюдателя разделяются, благоприятен для живых существ. Это делает правдоподобным предположение, что явление разделения альтернатив, отождествляемое с сознанием, есть на самом деле не закон природы (как явно или неявно предполагалось обычно при работе над «проблемой измерения»), а *способность, которую живые существа выработали в процессе эволюции.*

Если выражаться точнее, то эта способность должна была появиться в процессе возникновения жизни, ибо только после появления этой способности возникло качество, необходимое для выживания, то есть собственно возникли живые существа. Впрочем, и это может быть недостаточно точной, слишком приземленной формулировкой. Скорее сознание (= разделение альтернатив) есть не что иное как *определение того, что такое жизнь* в самом общем понимании этого слова.

Если принять концепцию, которая таким образом вырисовывается, то можно сказать, что классического мира объективно не существует, а *иллюзия классического мира возникает лишь в сознании живого существа*. Интересно, что к такому странному, с точки зрения физики, выводу приводит сама физика, правда, лишь в том случае, когда мы доводим ее до логической полноты, избегая удобной эклектики типа копенгагенской интерпретации с постулатом редукции.⁴

6.2. Модель квантового сознания на основе квантового компьютера

Нарисованная картина функционирования сознания и его роли в выживании живого существа кажется настолько далекой от того, что мы непосредственно видим в нашем классическом мире, что невольно возникает сомнение в том, можно ли эту картину каким-то образом проверить или она обречена оставаться лишь умозрительным предположением. В следующих разделах мы обсудим, как можно подтвердить это предположение наблюдениями над сознанием. А сейчас заметим, что прямыми физическими экспериментами можно проверить по крайней мере принципиальную возможность реального существования такого «квантового сознания». Для это-

⁴Заметим, что попытки построить теорию эволюции живых существ в рамках многомировой интерпретации предпринимались неоднократно различными авторами. Мы не ставим перед собой задачи дать обзор этих попыток.

го нужно построить модель «квантового сознания» на основе квантового компьютера.

Действительно, в квантовом компьютере эволюционируют квантовые состояния, представляющие собой суперпозиции с большим числом компонент (см. приложение В.4.3). Каждая компонента суперпозиции несет некоторую классическую информацию (скажем, двоичное число), а эволюция всей суперпозиции обеспечивает квантовый параллелизм, т. е. одновременное преобразование всех этих вариантов классической информации.

В модели квантового сознания отдельные компоненты суперпозиции могут моделировать альтернативы, на которые сознание разделяет квантовое состояние, а информация, содержащаяся в каждой компоненте, — состояние живого существа и его окружения. Задача конструирования модели состоит в том, чтобы сформулировать критерий выживания и подобрать закон эволюции таким образом, чтобы эволюция каждой из альтернатив (компонент суперпозиции) была предсказуемой и выживание в этой эволюции возможным. Разумеется, задача построения такой модели отнюдь не проста, но при наличии квантового компьютера принципиально разрешима.

Как известно, «большие» квантовые компьютеры, которые сулят необыкновенные новые возможности, до сих пор не реализованы, и некоторые специалисты даже сомневаются в том, что такие квантовые компьютеры будут вообще реализованы (хотя, с другой стороны, невозможность их реализации тоже не доказана). Однако это относится лишь к квантовым компьютерам с числом ячеек порядка тысячи и более. Что же касается квантовых компьютеров с числом ячеек порядка десяти, то они реализованы уже сейчас. Очевидно, что достигнутое число ячеек будет еще расти, хотя, может быть, медленно. Возможно, что даже на таких «маломощных» квантовых компьютерах, которые уже построены или будут построены в сравнительно близком будущем, можно попытаться реализовать игрушечную модель «квантового сознания».

Кроме того, работу квантового компьютера можно симулировать на обычном классическом компьютере. Поэтому если квантовый алгоритм, имитирующий работу «квантового сознания», будет создан, то проверить его корректность можно, симулируя работу квантового компьютера на достаточно мощном, но обычном классическом компьютере.

6.3. На краю сознания

Те представления о взаимоотношениях квантового мира, его классических проекций и роли сознания, которые были намечены в главе 5 и в разделе 6.1, кажутся правдоподобными в контексте интерпретации Эверетта. Однако этого, конечно, недостаточно. Возникают вопросы: можно ли подтвердить эти представления каким-то более убедительным способом? можно ли, наоборот, опровергнуть их? Мы обсудим эти вопросы с точки зрения научной методологии (критериев истинности) в разделе 6.4.2. Пока же попытаемся выяснить, *какие конкретные следствия может иметь развиваемая концепция «квантового сознания»*. Ведь если следствия этой концепции соответствуют каким-то известным фактам, то это может служить косвенным подтверждением самой концепции, какой бы фантастической она ни казалась на первый взгляд.

Мы увидим, что в рамках развиваемой концепции возникает *возможность объяснить некоторые до сих пор непонятные феномены в области сознания*. Представляется, что естественность и логическая стройность той картины, которая при этом возникает, делает предлагаемую концепцию если не доказанной, то в большой степени правдоподобной.

По-видимому, строгих доказательств ее в обычном смысле (в рамках обычной научной методологии) и не может существовать (см. по этому поводу раздел 6.4.2). Зато, видимо, уже давно *существуют доказательства, основанные на наблюдениях за работой сознания*. Такие доказательства можно искать целенаправленно.

6.3.1. Сознание выбирает альтернативу

Согласно интерпретации Эверетта, имеется бесконечное множество миров (классических «реальностей»), каждый из которых характеризуется некоторой вероятностью (или, в случае непрерывного множества, плотностью вероятности). Распределение вероятностей рассчитывается по обычным квантовомеханическим правилам.⁵

В рамках эвереттовской интерпретации квантовой механики *вероятность* данной альтернативы, найденная по законам квантовой механики, интерпретируется как *доля тех эвереттовских миров, в которых реализуется эта альтернатива*. Эта вероятность обычно отождествляется с вероятностью для индивидуального сознания оказаться именно в таком мире, то есть наблюдать именно эту альтернативу.

Такая интерпретация очень естественна, по крайней мере с наивной точки зрения. Индивидуальное сознание выбирает один из эвереттовских миров наугад, поэтому вероятность для индивидуального сознания попасть в определенную альтернативу равна доле тех миров, в которых эта альтернатива реализуется. Если эта доля равна той вероятности, которая предсказывается квантовой механикой, то вероятность для индивидуального сознания попасть в данную альтернативу как раз и равна квантовомеханической вероятности. Поэтому в реальных экспериментах, наблюдаемых данным индивидуальным сознанием, предсказания, которые дает квантовая механика, будут всегда подтверждаться (статистическим, вероятностным образом).

Эта цепочка рассуждений вполне логична. Как раз она ведет к выводу, что концепция Эверетта дает точно такие же

⁵ В рассмотренном ранее простом примере с двумя альтернативами ψ_1 и ψ_2 и начальным состоянием $c_1\psi_1 + c_2\psi_2$ это вероятности $p_1 = |c_1|^2$ и $p_2 = |c_2|^2$. В более сложной (и более реалистической) картине непрерывного измерения альтернативные результаты измерения (коридоры) α характеризуются плотностями вероятности $p(\alpha)$, которые также находятся по законам квантовой механики.

предсказания, что и копенгагенская интерпретация квантовой механики.⁶ Однако эти рассуждения не являются обязательными, в этом пункте интерпретация Эверетта допускает произвол.

В принципе остается возможность отказаться от универсальности того распределения вероятностей, которое предписывается квантовой механикой. В частности, при желании можно отказаться вообще от универсальности распределения вероятностей. Наиболее радикальное предположение состояло бы в том, что *сознание может влиять на распределение вероятностей, модифицировать его*. Некоторые авторы принимали такое радикальное предположение.

Вывод о том, что распределение вероятностей альтернатив однозначно фиксировано законами квантовой механики, не подлежал бы сомнению, если бы выбор одной из альтернатив был одним из тех законов физики, которые объективны и не зависят от сознания наблюдателя. Однако *в рамках концепции Эверетта разделение на альтернативы производится сознанием* (или даже более определенно: разделение на альтернативы — это и есть сознание). Даже классический характер альтернатив, как мы видели в разделе 6.1, выглядит не как закон природы, а как необходимое условие для существования живых существ.

Вполне естественно предположить, что *сознание может влиять не только на характер альтернатив, но и на их вероятности*, точнее — на вероятности того, какую альтернативу будет наблюдать индивидуальное сознание.

Таким образом, в рамках развиваемой расширенной концепции Эверетта естественным кажется предположение, что индивидуальное сознание может увеличить вероятность попадания в те классы эвереттовских миров, ко-

⁶Напомним, что это одно из возражений против интерпретации Эверетта: с этой точки зрения ее нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть (см. раздел 5.1).

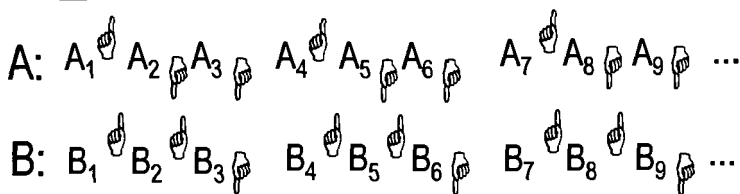
торые по каким-то причинам представляются для него предпочтительными.

Если *вероятность альтернативы отождествляется с долей эвереттовских миров соответствующего типа* (в которых эта альтернатива наблюдается), высказанное только что предположение может показаться неприемлемым по чисто математической причине. Дело в том, что число, выражающее «долю миров данного класса», на первый взгляд обязательно должно быть универсальным. Кажется, что эта доля не может зависеть от сознания того или иного наблюдателя. Скорее всего соответствующее распределение вероятностей должно совпадать с квантовомеханическим распределением вероятностей, но уж во всяком случае оно должно быть универсальным, не зависеть от наблюдателя. Так кажется на первый взгляд. Однако это верно лишь в том случае, если само понятие «доли миров данного класса» однозначно определено. А так ли это?

Это действительно было бы так, если бы число эвереттовских миров было конечным. Однако для *бесконечного множества миров само понятие «доля миров данного класса» не имеет смысла*, так что приведенный аргумент в пользу универсальности распределения вероятностей теряет силу. Причина этого в том, что бесконечное множество обладает парадоксальным свойством: его можно поставить во взаимно-однозначное соответствие с его собственным подмножеством. Поэтому в случае бесконечного множества эвереттовских миров распределение вероятностей не обязано быть универсальным, определение различных вероятностных распределений на этом множестве вполне допустимо. Но тогда и *предположение о влиянии сознания на распределение вероятностей не является внутренне противоречивым*.

Чтобы сделать это утверждение наглядным, представим себе, что бесконечное множество «двойников» данного наблюдателя по оче-

Мир 1



Мир 2

Рис. 6.1. Сознание модифицирует вероятности эвереттовских миров. Наблюдатель A направляет одного двойника в мир 1, потом двух своих двойников в мир 2, потом повторяет эту операцию. Если эвереттовских миров (и двойников) бесконечно много, то процедура повторяется неограниченно. В результате с вероятностью $1/3$ его сознание обнаружит себя в мире 1 и с вероятностью $2/3$ — в мире 2. Наблюдатель B , наоборот, отправляет двух своих двойников в мир 1, потом одного — в мир 2 и так далее. Его сознание с вероятностью $2/3$ окажется в мире 1 и с вероятностью $1/3$ — в мире 2.

реди направляются сознанием в эвереттовский мир того или иного типа, чтобы заполнить бесконечное множество миров.

Для простоты предположим, что имеется лишь две альтернативы, то есть два типа миров. Предположим, что сознание одного наблюдателя (обозначим его A) распределяет своих двойников таким образом: сначала одного в мир первого типа, потом двух — в мир второго типа, затем снова одного в мир 1, двух — в мир 2 и так далее (рис. 6.1).

Сознание второго наблюдателя (обозначенного B) направляет своих двойников в те же миры иначе: сначала двух — в мир первого типа, потом одного — в мир второго типа, опять двух — в мир 1, одного — в мир 2 и т.д. Какова в этих двух случаях вероятность для каждого двойника попасть в мир типа 1 и вероятность попасть в мир

типа 2? Ответ зависит от того, является ли полное число миров конечным или бесконечным.

Рассмотрим сначала случай, когда полное число миров N конечно, причем существует N_1 миров типа 1 и N_2 миров типа 2 (для определенности пусть $N_1 < N_2$). Всего миров $N = N_1 + N_2$, и количество двойников как у наблюдателя A , так и у наблюдателя B равно N . Тогда через какое-то время все миры типа 1 будут заполнены и двойниками наблюдателя A , и двойниками наблюдателя B . После этого они вынуждены будут отказаться от своих процедур распределения и всех оставшихся двойников направить в миры типа 2. В результате и для двойников наблюдателя A , и для двойников наблюдателя B вероятность попасть в мир типа 1 окажется равной $p_1 = N_1/N$, а вероятность попасть в мир типа 2 будет равна $p_2 = N_2/N$. Распределение вероятностей в этом случае универсально, оно не может зависеть от сознания наблюдателя.

Совсем иной результат получится в случае, если и общее количество миров, и количество миров типа 1, и количество миров типа 2 бесконечны. Бесконечным должен быть и запас двойников у каждого из наблюдателей A и B . В этом случае каждый из этих наблюдателей может продолжать свою процедуру распределения двойников неограниченно и распределить в соответствии с этой процедурой все бесконечное количество двойников. Ясно, что при этом для двойника наблюдателя A вероятность попасть в мир 1 окажется равной $1/3$ (а вероятность попасть в мир 2 — равной $2/3$), а для двойника наблюдателя B вероятность попасть в мир 1 будет равна $2/3$ (а вероятность для него попасть в мир 2 будет равна $1/3$). Распределение вероятностей в этом случае не универсально: оно зависит от сознания наблюдателя, который выбирает процедуру распределения двойников. В рассмотренном примере наблюдатель A предпочитает мир 2 и старается увеличить вероятность попадания в него. Наблюдатель B , наоборот, предпочитает мир 1 и увеличивает вероятность попадания в этот мир.

Это рассуждение не доказывает, конечно, что сознание на самом деле может управлять вероятностями, но показывает, что *предположение о зависимости вероятностей от сознания*

ния не является внутренне противоречивым. Можно сказать: непротиворечивым является предположение о том, что сознание может сделать вероятным некоторое событие, даже если по законам физики (квантовой механики) вероятность этого события мала. Сделаем *важное уточнение формулировки*: сознание данного наблюдателя может сделать вероятным, что он увидит это событие.

Если на самом деле сознание человека обладает способностью модифицировать вероятности попадания его в ту или иную классическую реальность, то это, разумеется, очень важно. Хотя и с оговорками, но можно сказать, что в этом случае *каждый сам выбирает мир, в котором он живет*.

Выбор сознанием той альтернативы, в котором оно окажется, объясняет, во-первых, *свободу воли*. Если человек может поднять руку, а может ее опустить, то это соответствует двум различным альтернативам, и сознание может увеличить вероятность одной из этих альтернатив за счет вероятности другой. Это объясняет (в рамках расширенной концепции Эверетта), как возникает возможность произвольно управлять движениями своего тела.

Заметим, что общепризнанного объяснения этой привычной возможности не существует. Конечно, известно, что мышцами управляет мозг, посылая управляющие сигналы по нервам. Однако как происходит выбор того управляющего импульса, который будет послан, неизвестно. В рамках расширенной концепции Эверетта это объясняется естественным образом.

Однако одновременно с объяснением свободы воли возможность сознанием модифицировать вероятности альтернатив приводит и к более экзотическим следствиям. Они возникают потому, что альтернативы могут различаться тем, как ведут себя материальные системы, расположенные вне тела и не имеющие к нему прямого отношения. То же рассуждение, которое объясняет свободу воли, приводит к выводу, что сознание может творить «*вероятностные чудеса*». Поясним это.

Если сознание делает вероятным такое событие, для которого по законам физики вероятность чрезвычайно мала, то *происходящее может выглядеть как чудо*. Очень важно, что при этом имеется одно *абсолютное ограничение*. Вероятность какой-то альтернативы может быть увеличена, но нулевая вероятность не может быть сделана ненулевой.

Предположим, что для какой-то (мысленно построенной) «классической реальности» вероятность, рассчитанная по законам квантовой механики, точно равна нулю, то есть этой реальности на самом деле нет среди всех возможных альтернативных результатов измерения. Тогда индивидуальное сознание не может сделать вероятность попадания в эту реальность ненулевой.

Значит, *не всякое чудо возможно*. То, что абсолютно запрещено законами физики (то, что бывает лишь в сказках), осуществить в любом случае нельзя. А вот то, что маловероятно, но возможно, то можно реализовать «в действительности», даже если вероятность, рассчитанная научными методами, очень мала. Мы не зря взяли в кавычки выражение «в действительности». Точнее следует сказать: сознание может сделать так, что оно увидит то, что по законам квантовой механики чрезвычайно маловероятно.

Наличие абсолютного ограничения на модификацию вероятностей вызывает большее доверие к гипотезе о модификации вероятностей сознанием. Если бы этого ограничения не было, то есть данная гипотеза допускала бы любые, в том числе и сказочные, чудеса, она уже из-за этого выглядела бы совершенно произвольной, а значит — сомнительной. Ничем не ограниченная фантазия вряд ли интересна. Те же предположения, которые мы рассматриваем, хотя и выглядят весьма смелыми (а кому-то наверняка кажутся произвольными), на самом деле являются естественными после того, как принята одна-единственная гипотеза об отождествлении сознания с разделением альтернатив (раздел 5.2).

6.3.2. Сознание выходит в квантовый мир

Кроме предположения о возможном влиянии сознания на вероятности альтернатив, в рамках расширенной концепции Эверетта оказывается правдоподобной еще одна радикальная гипотеза. Она подсказывается тем, что в концепции Эверетта *сознание охватывает весь квантовый мир, то есть все его «классические проекции»*. Ведь согласно развиваемой концепции сознание — это разделение альтернатив, но не выбор одной из них с отбрасыванием остальных. В свете этого представляется вполне возможным, что индивидуальное сознание, которое живет в некотором эвереттовском мире (в некоторой классической реальности), при определенных условиях может выходить тем не менее в квантовый мир в целом, *«заглядывать» в другие (альтернативные) реальности*.

Если предполагается (как это обычно делают в квантовой теории измерений), что при измерении происходит редукция состояния, то все альтернативы, кроме одной, исчезают, и сознанию, живущему в единственной оставшейся альтернативе, заглядывать просто некуда: кроме нее ничего нет. Но если все альтернативы одинаково реальны, а сознание просто «разделяет» для себя их восприятие, то возможность заглянуть в любую альтернативу, осознать ее, в принципе существует.

Есть образ, который наглядно иллюстрирует разделение сознания между альтернативными классическими реальностями: это шоры, которые надеваются на лошадь, чтобы она не могла смотреть в сторону и сохраняла направление движения. Точно так же *сознание надевает на себя шоры, ставит «перегородки» между различными классическими реальностями*. Это делается для того,⁷ чтобы каждая «классическая компонента» сознания видела лишь одну из этих реальностей и принимала решения в соответствии с информацией, идущей лишь из одного классического (а значит, относительно ста-

⁷Заметим, что выражение «для того», предполагающее наличие цели, допустимо в данном случае, потому что речь идет о жизни.

бильного и предсказуемого, т. е. пригодного для жизни) мира. Наличие перегородок целесообразно с точки зрения существования жизни.

Без этих перегородок сознанию представал бы весь квантовый мир, в котором, из-за его непредсказуемости, нельзя было бы выработать стратегии выживания. Поэтому перегородки между классическими реальностями так же полезны для сознания, как шоры для лошади.⁸ Однако лошадь, на которую надели шоры, все же может, отклонив голову, взглянуть в сторону, так как что-то, на что можно взглянуть, реально существует не только впереди нее. Так и индивидуальное сознание (компонента сознания), хотя оно живет в некоторой определенной классической реальности, может, несмотря на перегородки, заглянуть в другие реальности, в другие эвереттовские миры, потому что согласно концепции Эверетта эти миры реально существуют. Вот если бы «других» реальностей вообще не было (если бы они исчезли в результате редукции), тогда заглядывать было бы просто некуда.

Оговоримся еще раз, что приведенное рассуждение не доказывает возможности заглянуть в другие реальности, но доказывает, что такая возможность в принципе может существовать, что в рамках (расширенной) концепции Эверетта она не запрещена. Если такая возможность действительно существует, и если человек может ее реализовать, то он оказывается способен не только мысленно представить (что, конечно, всегда возможно), но также *непосредственно воспринять некую «другую реальность»*, в которой он тоже мог бы оказаться.⁹

⁸Скорее, правда, следует сказать: перегородки между классическими реальностями так же полезны (и даже необходимы) для *существования жизни*, как шоры для *ездока*, который запрягает лошадь.

⁹И опять можно заметить разницу между безудержной фантазией и эвереттовской реальностью: вообразить человек может все, что угодно, а непосредственно воспринимая «другую реальность», он может увидеть только то, что действительно может существовать, что является *реальной альтернативой*.

Наличие такой возможности полезно для сознания, особенно если оно действительно может влиять на вероятности альтернатив (как мы предположили в разделе 6.3.1). Ведь прежде, чем выбрать предпочтительный эвереттовский мир, стоит ознакомиться со всеми или по крайней мере с некоторыми из них.¹⁰

Итак, каждое индивидуальное сознание должно постоянно видеть лишь одну классическую реальность, или эвереттовский мир (иначе жизнь невозможна), но иногда оно должно заглядывать и в другие реальности, то есть выходить в квантовый мир (это позволяет критически оценить ту реальность, в которой оно находится, и выбрать ту, которую оно предпочитает).

Можно даже качественно охарактеризовать то *состояние сознания, в котором возможен контакт с другими реальностями*. Заглянуть в другие альтернативы (или, что то же, выйти в квантовый мир) удастся лишь в том случае, если перегородки между альтернативами исчезают или становятся проницаемыми. Согласно рассматриваемой концепции появление перегородок (разделение альтернатив) — это не что иное как осознание, то есть появление сознания, его «начало». Но тогда и наоборот, перегородки исчезают (или становятся проницаемыми) *«на границе сознания»*, когда сознание почти исчезает. Такие состояния обычно называют *трансом*. Именно такого рода состоянием является *медитация*, являющаяся основным элементом восточных психологических практик.

Это подводит нас к вопросу о том, нет ли уже сейчас известных феноменов в области сознания, которые подтверждают рассматриваемые гипотезы.

¹⁰ В развиваемой концепции кажущаяся необратимая редукция состояния при измерении есть феномен сознания. В квантовом мире редукции нет, эволюция этого мира полностью обратима (она описывается обратимым уравнением Шредингера). В таком квантовом мире нет различия между настоящим, прошлым и будущим, и, проникая в него, сознание может получать информацию, относящуюся к любому времени.

6.4. Как проверить высказанные гипотезы

Как мы видим, сформулированная в главе 5 расширенная концепция Эверетта приводит к радикальным выводам относительно того, что такое сознание, как оно работает и какими возможностями оно обладает. Все это выглядит (по крайней мере для физика) чрезвычайно необычным и вызывает многочисленные вопросы. Основной вопрос, разумеется, состоит в том, можно ли верить и самой этой концепции, и выводам, которые из нее сделаны, не является ли все это чистой фантазией, не имеющей под собой никаких оснований. Другими словами, это вопрос об истинности высказанных положений.

В физике, да и вообще в естественных науках, мы привыкли к тому, что критерием истинности является опыт (хотя, скажем, в философии ощущение истинности или ложности некоторого положения основывается лишь на убедительности тех рассуждений, которые его поддерживают). С этой точки зрения расширенная концепция Эверетта — это шаг вперед по сравнению с оригинальной (многомировой) интерпретацией Эверетта, так как допускает проверку, хотя и необычную: наблюдением над сознанием, а не наблюдением над поведением материальных тел. Об этом мы поговорим с общих позиций в разделе 6.4.2 и более конкретно — в разделе 6.5.

Сначала, однако, в разделе 6.4.1 разберемся в логике проведенных рассуждений. Цель этого состоит в том, чтобы за деревьями увидеть лес. Последовательное и более или менее детальное изложение, проведенное до сих пор, может оставить впечатление, что оно включает довольно большое количество предположений и тем самым все построение оказывается искусственным. На самом деле все сделанные предположения естественно вытекают из одного, основного, сделанного в разделе 5.2: о том, что сознание — это разделение альтернатив. Остальные предположения, относящиеся уже к работе сознания, вытекают из этого основного почти с необходимостью. Этот факт с самого начала придает всему построению доста-

точную убедительность. Вот эту логику построения концепции мы и попытаемся проследить в разделе 6.4.1.

6.4.1. Логика концепции квантового сознания

Оригинальная *концепция (интерпретация) Эверетта* состоит в том, что состояние квантового мира, описываемое как сумма (суперпозиция) некоторого количества компонент (альтернатив), воспринимается сознанием не как целое, а каждая альтернатива воспринимается независимо от остальных. Происходит разделение альтернатив. Каждая альтернатива сама по себе является вектором состояния квантового мира, но отличается тем, что это состояние очень близко к состоянию классической системы (является квазиклассическим). Таким образом, состояние квантового мира представляется как сумма его «классических проекций», а сознание воспринимает каждую из этих классических проекций независимо от остальных: происходит *разделение классических альтернатив*. Это разделение происходит в сознании наблюдателя.

Таким образом, в оригинальной концепции Эверетта сознание фигурирует как нечто внешнее по отношению к разделению альтернатив. *Согласно расширенной концепции Эверетта (РКЭ) сознание — это и есть разделение альтернатив* (см. раздел 5.2). Это почти с необходимостью ведет к следующим шагам в рассуждении и тем самым — к выводу об особых возможностях сознания.

С одной стороны, сознание — это то, чем человек (по крайней мере до некоторой степени) может управлять. С другой стороны, приняв РКЭ, мы соглашаемся с тем, что сознание — это разделение альтернатив. Значит человек может управлять разделением альтернатив. Как это происходит и что это дает?

Посмотрим с этой точки зрения на известный в психологии и очень важный *процесс выключения сознания*. На самом деле этот процесс в различных формах известен каждому человеку. Это может быть минутное забытие, когда мысли и ощущения человека отвлекаются от того, что его окружает,

и улетают куда-то далеко, так что он даже не вполне сознает, что же в этот момент остается в его сознании (и остается ли что-то). Это может быть, конечно, сон, причем, как известно, под одним этим словом могут пониматься очень сильно отличающиеся состояния, разновидности сна (например, «быстрый сон» и «медленный сон»). Все это знает каждый. Но специальным образом тренированный человек может намеренно погрузиться в *транс* или *медитацию*, когда его сознание становится почти пустым, то есть почти выключается.

Итак, что же происходит при выключении сознания (то есть при переходе в состояние транса) с точки зрения РКЭ? Если сознание — это разделение альтернатив, то выключение сознания — это снятие разделения альтернатив. В состоянии транса, следовательно, перегородки между классическими альтернативами исчезают или по крайней мере становятся прозрачными. Но это значит, что *сознание, находясь в одной из альтернативных «классических реальностей», получает возможность «заглянуть» в «другие реальности», извлечь оттуда информацию.*

Рассуждаем далее. Состояние квантового мира, взятое как целое, то есть без разделения на альтернативы, — это вектор состояния (или волновая функция), подчиняющийся квантовомеханическому уравнению Шредингера. Это уравнение обратимо, поэтому при описании эволюции такого состояния не возникает никакого различия между разными моментами времени. Никаких понятий настоящего, будущего и прошлого с известными различиями между ними (прошлое — это то, что нельзя изменить, будущее — это то, чего нельзя знать) в такой эволюции не существует.

Значит, когда сознание (почти) выключается, когда оно выходит в единый квантовый мир (не разделенный перегородками на классические проекции), для него *не существует запретов на получение информации из будущего и прошлого.* В отличие от классической системы (эволюция которой «локально предсказуема»), квантовая система существенно нело-

кальна. Поэтому, погрузившись в квантовый мир, сознание получает возможность *получать информацию из пространственно удаленных областей квантового мира*.

Вернемся к обсуждению обычного состояния сознания, когда альтернативы разделены. Чем определяется вся совокупность альтернатив? Почему альтернативы оказываются (приблизленно) классическими? В квантовой теории, в том числе и в интерпретации Эверетта, общепризнанных ответов на эти вопросы нет. Вопрос о выборе семейства альтернатив — это активно обсуждаемая, но не имеющая общепризнанного решения проблема.¹¹

В РКЭ ответ на этот вопрос почти очевиден. В рамках этой концепции разделение на альтернативы (в том числе и выбор семейства альтернатив, на которые производится разделение) не является законом природы, а отождествляется с сознанием, то есть с некоторым характерным свойством живых существ, отличающим их от неживых материальных тел. Поэтому, в отличие от квантовой механики, появляется новый критерий выбора семейства альтернатив. Теперь можно спросить, какой набор альтернатив является предпочтительным с точки зрения живого существа. И ответ очевиден. Преимуществом обладает такой набор альтернатив, который в каждой из этих альтернатив делает возможным выработку оптимальной стратегии. Но этим отличаются только классические альтернативы, эволюция которых локально предсказуема. Таким образом, классичность альтернатив в рамках РКЭ получает объяснение. А заодно возникает чрезвычайно интересная связь самого понятия жизни с квантовой механикой.

И, наконец, последнее: влияние сознания на вероятность той или иной альтернативы. В квантовой теории измерений эти вероятности фиксированы (для заданного семейства альтернатив). Однако в рамках РКЭ разделение на альтернати-

¹¹ Обычно она формулируется как вопрос: по какому базису следует разложить вектор состояния для описания измерения, т. е. как выбрать «измерительный базис», pointer basis.

серьезный недостаток интерпретации Эверетта — принципиальная невозможность проверить ее — отсутствует, если расширить эту интерпретацию так, как предложено в предыдущих разделах.

Следует, однако, отдавать себе отчет в том, что проверка была бы в данном случае совершенно необычной и не вписывалась бы в рамки методологии, принятой в настоящее время в физике.¹² Дело в том, что такая проверка предполагает *наблюдение за индивидуальным сознанием*, лучше всего — за собственным сознанием исследователя.

Предположим, что такие наблюдения оказались в согласии с предсказаниями (расширенной) концепции Эверетта. Было бы это, с точки зрения физики и физиков, доказательством истинности этой концепции? Отнюдь не очевидно. Ведь в физике, да и вообще в естественных науках, *принято считать критерием истинности только серии экспериментов с повторяющимися результатами*, проведенные к тому же разными экспериментаторами (чтобы подтвердить объективность результатов, независимость от человека, который проводит опыты). Эксперименты со своим собственным индивидуальным сознанием или наблюдения над ним не имеют с этой точки зрения доказательной силы.

Чтобы проиллюстрировать своеобразие ситуации, рассмотрим подробнее, чего следует ожидать, если верно предположение о том, что *сознание может влиять на вероятности* наблюдения этим сознанием различных альтернатив.

В разделе 6.3 отмечалось, что нулевая вероятность не может при этом превратиться в ненулевую, то есть *сознание может сделать вероятным лишь то, что может произойти и без его влияния*, естественным путем, по законам физики. Но это значит, что если какой-то человек на самом деле обладает способностью усилием воли (своего сознания) обеспечивать тот ход событий, который ему нравится, то он *никогда не сможет*

¹²Напомним, впрочем, о возможности вполне традиционной для физики квантово-компьютерной модели сознания, упомянутой в разделе 6.2.

с абсолютной убедительностью доказать, что это именно он так повлиял на события. Даже если он много раз обеспечит реализацию маловероятных событий («вызовет чудо»), всегда будет оставаться, пусть малая, вероятность того, что события пошли по этому пути «естественным образом», в соответствии с обычными законами.

Значит, если и возможны «чудеса» такого рода, то доказательства того, что это на самом деле «рукотворные чудеса», а не случайное везение, никогда не будут абсолютными. А поэтому любой, кто решит не верить в них, будет иметь для этого основания. Скептик будет иметь возможность сомневаться, даже оказавшись вместе с «чудотворцем» в том эвереттовском мире, в котором маловероятное событие реализовалось.

Но мало того. Сам «неверующий», чтобы подтвердить, что его неверие имеет основание, предпочтет оказаться в таком мире, в котором «чуда» не произойдет. Предположим, что он тоже «обладает активным сознанием», то есть умеет модифицировать вероятности альтернатив. Что тогда произойдет? Он модифицирует вероятности так, чтобы увеличить вероятность того эвереттовского мира, в котором «чудес» не происходит, в котором маловероятные события не происходят. Другими словами, скептик с большой вероятностью сможет своими глазами увидеть, как «чудотворец» терпит провал, как ему не удастся сотворить «чудо». Для скептика вероятность того, что он своими глазами увидит осуществление маловероятного события, остается малой.

Несколько огрубляя ситуацию, можно сказать, что *каждый увидит то, что хочет видеть*: «чудотворец» скорее всего окажется в таком мире, в котором он сможет осуществлять свои «чудеса». Скептик скорее всего окажется в другом мире, в котором тот же «чудотворец» не сможет сделать ничего необычного.

Так можно или нельзя доказать возможность «чудес»? Можно ли, скажем, добиться того, что большинство людей убедятся в том, что сознание может влиять на реальность?

Ввиду специфики ситуации, состоящей в том, что имеются разные эвереттовские миры, ответ не так прост. То самое большинство, которое так или иначе знакомится с результатами опытов, состоит из энтузиастов и скептиков. Что же они увидят? Каков будет их опыт?

Каждый энтузиаст с большой вероятностью окажется в таком эвереттовском мире, в котором результаты опытов с сознанием будут положительными и в котором большинство людей убедится в том, что сознание влияет на реальность. Но в то же время двойники этого энтузиаста будут присутствовать и во всех остальных эвереттовских мирах, в том числе и в тех, в которых опыты закончатся неудачей и в который большинство людей увидят, что сознание не может влиять на реальность.

Для скептиков ситуация будет обратной. Каждый скептик с большой вероятностью окажется в таком мире, в котором опыты дадут отрицательный результат и теория о влиянии сознания на реальность будет опровергнута. В таких мирах большинство людей отбросит эту теорию как ошибочную. В то же время двойники того же скептика будут присутствовать и в тех мирах, в которых теория победит.

Здесь мы имеем дело с одним из пунктов, который является контринтуитивным и потому трудным для понимания. Поэтому следует очень тщательно проанализировать для себя ситуацию, когда результаты усилий «чудотворца» наблюдают другие люди, среди которых есть и те, кто склонен ему верить, и скептики, не желающие верить.

Итак, если принять предположение, что сознание может модифицировать вероятности альтернатив, ситуация оказывается очень странной. Те, кто заранее готов поверить в это предположение, с заметной вероятностью будут иметь возможность убедиться, что оно верно, т. е. что сознание действительно влияет на вероятности событий. Те, кто не хочет в это верить, с большой вероятностью будут убеждаться, что этого не происходит. Скептики окажутся в таких эвереттов-

ских мирах, где безраздельно господствуют обычные физические законы, объективные и не зависящие от сознания. Зато те, кто предпочитает верить в «чудеса», творимые сознанием, окажутся в таких мирах, где такие «вероятностные чудеса» действительно происходят.

Приходится признать, что, рассматривая предположение о влиянии сознания на вероятности альтернатив, следует гораздо более осторожно, чем это принято в естественных науках, рассматривать вопрос о критериях истинности. Это значит, что либо расширенная указанным образом концепция Эверетта не может быть включена в русло физики (и вообще естественных наук), либо *методология этих наук должна быть существенно расширена*. Новая методология должна, во-первых, допускать эксперименты с индивидуальным сознанием или наблюдения над ним в качестве инструмента проверки теории, а во-вторых, учитывать возможное влияние априорных установок на результаты наблюдений.¹³

Было бы очень странно, если бы рассмотренное нами расширение концепции Эверетта, с теми новыми совершенно неожиданными возможностями, которые оно сулит, было отвергнуто только потому, что оказалось несовместимым с существующей в настоящее время научной методологией. Скорее всего, если отмеченные возможности так или иначе получат хотя бы частичное подтверждение, то есть станут казаться приемлемыми и вызывать интерес у достаточно большого числа ученых, работа в этом направлении будет продолжена.

Пожалуй, есть известная аналогия ситуации, которая при этом может сложиться, с той, которая возникла, когда были предложены неевклидовы геометрии. Эти новые геометрии были несовместимы с методологией, принятой в то время

¹³ Впрочем, детальный анализ показывает, что и без фантастического предположения о роли сознания, в рамках обычной научной методологии, заключение об истинности всегда опирается на ряд интуитивных суждений, роль которых обычно не осознается в должной мере, см. Е. Л. Фейнберг. Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. Век 2, Фрязино, 2004.

в математике: они требовали отказа от пятого постулата Евклида, считавшегося в геометрии обязательным. Однако было чрезвычайно интересно пойти в неожиданно открывшемся новом направлении и посмотреть, что получится, если методологию изменить, от пятого постулата отказаться. И возможность эта не была, конечно, упущена. Самое удивительное, что для тех умозрительных геометрий, которые на этом пути были построены, достаточно скоро нашлись реальные воплощения, а потом из этого родился тот поразительно красивый и богатый геометрический мир, который носит название общей теории относительности и который адекватно описывает Вселенную.

Мы видим, что если особые возможности сознания действительно существуют, то доказать их так, чтобы это стало достоверным для большинства людей, скорее всего, трудно или невозможно. Однако для каждого отдельного человека мнение других людей не так уж важно. И этот отдельный человек, индивид, имеет возможность проверить особые возможности своего собственного сознания и либо убедиться в том, что они существуют, и поверить в них, либо признать, что его опыт скорее опровергает существование таких возможностей, и отвергнуть их.

Для него, для данного индивида, это будет вполне доказательным. Он не обязан опираться в этом на мнения других. Концепция Эверетта дает для этого дополнительные основания. Согласно этой концепции ожидания данного индивида действительно оправдываются реальностью (потому что он оказывается в таком эвереттовском мире, который ему нравится), а не просто ему так кажется, потому что хочется в это верить. Каждый человек не просто по-своему воспринимает окружающий мир, но строит его в соответствии со своими предпочтениями.

Очень важно разъяснить одно обстоятельство. То, что только что говорилось о доказательности индивидуального опыта, относится к *психологическому опыту*, в котором человек имеет

дело со сложными явлениями, обстоятельствами и причинно-следственными связями, возникающими в его жизни или в жизни окружающих. Если же говорить о тех сравнительно простых¹⁴ явлениях, с которыми имеет дело физика (скажем, о движении электронов и фотонов), то здесь индивидуальные ощущения недостаточны. Чтобы найти правильные законы физики, следует ставить длинные *серии экспериментов*. В разделе 6.5.1 мы поговорим об этих различиях подробнее и с другой точки зрения.

Итак, критерии истинности могут быть различны для различных предметов исследования. Если исследуются явления, жизненно важные для человека, то индивидуальные ощущения приобретают больший вес и при определенных условиях становятся доказательными. Если наука хочет изучать явления, непосредственно связанные с человеком, она должна расширить свою методологию и научиться работать с теми данными, которые дает индивидуальное сознание. При этом убедительным может быть даже единичный опыт, если он содержит большое количество деталей, закономерно связанных друг с другом.

Поясним последнее утверждение примером. Некоторые люди верят в вещие сны как в одну из необычных способностей сознания. Есть ли для этого основания? Что может служить таким основанием?

Имеется много случаев, когда один человек видит во сне некоторое событие и позднее это событие действительно происходит. Означает ли это, что сон был вещим? Большинство людей скажет, что имело место простое совпадение. Как правило такой скептицизм оправдан. Предположим, однако, что сон содержит множество деталей: какие люди присутствовали при данном событии, в чем они были одеты, в какой день это случилось, какая была погода и прочее, и прочее. Предположим, что событие, которое привиделось во сне, действи-

¹⁴Скорее элементарных, потому что описание их может быть математически сложным.

тельно позднее произошло и при этом имели место все многочисленные детали сновидения (такие примеры тоже встречаются, хотя надежно установленных, видимо, мало). Здравый смысл подсказывает, что в таком случае расценивать совпадение сна с действительностью простой случайностью очень трудно. Придется сделать вывод, что сон был вещим.

Это пример того, что даже единичный опыт может быть доказательным, когда он содержит большое число деталей. Причина очень проста. Предсказанное событие может действительно произойти, и это может быть случайным. Любая деталь в сновидении (скажем, присутствие данного человека) может случайно совпасть с реальностью. Однако совпадение очень большого числа деталей чрезвычайно маловероятно. Вот на этом и может основываться методология, которая позволила бы работать с единичным актом сознания (вместо серии специально поставленных опытов).

6.5. Феномены, которые объясняются

На основе концепции Эверетта, особенно если расширить эту концепцию, отождествив разделение альтернатив с сознанием (см. раздел 5.2), можно объяснить целый ряд необычных способностей, которыми, по-видимому, обладает сознание. В этом разделе мы коснемся некоторых из этих способностей, стараясь выбирать лишь те, которые кажутся наиболее достоверными. Однако прежде уточним, что следует понимать под отождествлением таких различных понятий, как сознание и разделение альтернатив.

6.5.1. Сознание в психологии и в квантовой физике

Прежде чем рассмотреть некоторые феномены, которые могут иметь отношение к рассматриваемой концепции, сделаем одно важное замечание, необходимое для правильного понимания существа вопроса. Это замечание призвано уточнить, *как следует понимать гипотезу об «отождествлении»*

сознания (обычно рассматриваемого в рамках психологии) с разделением альтернатив (понятие из квантовой физики).

Согласно этой гипотезе, сознание (= разделение альтернатив) является общей частью психологии и квантовой физики. Появляется возможность взглянуть на этот предмет, сознание, с двух сторон, из различных по своему характеру сфер знания: со стороны физики и со стороны психологии. Разумеется, при этом мы видим этот предмет по-разному и разные черты этого предмета оказываются важными.

Когда мы в физике говорим о разделении альтернатив или выборе одной альтернативы, мы имеем в виду сравнительно *простые опыты с простейшими объектами*, которые нарочно выбраны примитивными, чтобы их можно было исследовать математически точными методами. Когда же мы говорим о сознании, как оно видится со стороны психологии, то перед нами предстают *гораздо более сложные и гораздо менее четко очерченные комплексы*.

Это важно, например, когда речь идет о гипотетической возможности сознанием влиять на выбор альтернативы. Вряд ли следует ожидать, что сознание может заметно влиять на то, какой окажется проекция спина электрона или в какую сторону он полетит.

Если сознание и может влиять на выбор реальности, то скорее всего выбирая из тех аспектов этой реальности, которые для данного человека *жизненно важны* (ведь и сам феномен сознания возникает, согласно рассуждению из раздела 6.1, потому, что разделение альтернатив оказалось жизненно важным для живых существ).

Если, например, в одной из реальностей умирает близкий родственник, а в другой он остается жив, то у сознающего субъекта есть сильная мотивация выбрать вторую из этих двух альтернатив. Если при этом он верит, что может повлиять на выбор, то не исключено, что ему и на самом деле удастся несколько увеличить вероятность, что он окажется свидетелем именно второй альтернативы.

Заметим, что здесь мы рассматриваем такого рода возможности абстрактно. Отдельным и непростым вопросом является то, *следует ли такого рода возможностями пользоваться*. На первый взгляд ответ очевиден: конечно, следует пользоваться тем, что позволяет улучшить ситуацию. Трудность, однако, состоит в том, как понять, что улучшает ситуацию, а что ее ухудшает.

Мало того, что такая оценка, если ее дает человек, субъективна и потому он может выбрать то, что принесет вред другим людям или живым существам. Дело гораздо сложнее, потому что человек не может с полной уверенностью оценить даже то, что является благом для него самого, хотя как правило и пытается это сделать. По этой и по некоторым другим причинам правильным скорее всего является неожиданный выбор: не пользоваться этой возможностью и дать событиям развиваться естественным путем. Однако здесь мы вторгаемся в сложную и спорную область, которую в рамках данной книги невозможно осветить сколько-нибудь полно.

Вернемся к прерванной линии рассуждений. Мы выяснили, что «отождествление» разделения альтернатив в квантовой физике с явлением осознания в психологии следует понимать лишь с определенными оговорками. Отождествляются лишь самые глубокие слои соответствующих явлений, принцип, на котором эти явления основаны, но не их непосредственные проявления. *Проявления сознания в сфере физики и в сфере психологии могут быть внешне совершенно непохожими.*

С учетом этого уточнения, попытаемся охарактеризовать те новые перспективы, которые открываются в связи с концепцией Эверетта. Мы уже говорили в разделе 5.1, что эта концепция не дает новых предсказаний в квантовой физике. Если мы принимаем гипотезу об отождествлении разделения альтернатив с сознанием, этот вывод не меняется. Дело в том, что для тех простых объектов, которыми занимается кванто-

вая физика (электронов, атомов и пр.) действует универсальное вероятностное распределение по альтернативным результатам измерения, которое не зависит от сознания и ведет к обычным квантовомеханическим предсказаниям. Таким образом, *в физике мы ничего, кроме логической полноты теории, не выигрываем*. Однако в психологии открываются новые возможности.

Действительно, в рамках данной концепции *сознание (психика) может обладать некоторыми чертами, которые в «классической» психологии ему не притисываются* (такими, как возможность выходить из классической реальности в квантовый мир (т. е. заглядывать в другие реальности) или даже влиять на выбор «своей» реальности. Эти гипотетические возможности требуют, разумеется, проверки.

Однако вполне естественно *попытаться отождествить эти «новые» возможности с необычными явлениями в области психологии*, теории сознания и психологической практики, которые уже давно замечены, изучаются различными способами и даже эксплуатируются. С этой точки зрения обсуждаемые «новые» черты сознания, возможно, давно известны. Если так, то некоторые подтверждения рассматриваемой нами концепции могут уже существовать без всяких дополнительных проверок. Но и в этом случае требуется тщательная и осторожная работа для анализа известных фактов и сопоставления их с тем, чего можно ожидать в рамках концепции Эверетта.

6.5.2. Особые состояния сознания (транс)

Мы уже говорили о том, что необычные способности сознания должны проявляться «на краю сознания», то есть тогда, когда сознание «почти выключено». Исходя из гипотезы отождествления сознания с разделением альтернатив, выключение сознания означает, что квантовый мир перестает разделяться на (изолированные друг от друга) классические альтернативы, а вместо этого начинает восприниматься как целое. Возникает *особое состояние сознания* (возможно, это то

же самое, что психологи называют «измененным состоянием сознания»¹⁵, которое похоже на сон или скорее транс.

Об особых состояниях сознания и в частности о состоянии сна говорилось и писалось очень много. Упомянем в этой связи лишь интригующий очерк Павла Флоренского «Иконостас».¹⁶ В нем обосновывается мнение, что во сне человек заглядывает в «потусторонний мир» и что в сновидениях он получает в символической форме некоторую информацию из этого мира. На этом основании Флоренский сравнивает сон, отделяющий «этот мир» от «того мира», с иконостасом, который отделяет часть храма, где могут находиться прихожане, от алтарной части, куда вход им запрещен.

Можно не верить в потусторонний мир в том смысле, который он имеет в той или иной религиозной догме. Однако вполне возможно, что на самом деле существуют какие-то особого рода феномены, которые верующими отождествляются с потусторонним миром. Если сравнить аргументы Флоренского с тем, к чему привела нас расширенная концепция Эверетта, то вывод очевиден. *«Потусторонний мир» может оказаться не чем иным как квантовым миром*, в который человек способен заглянуть, лишь находясь в особом состоянии между сознанием и отсутствием сознания, то есть «на границе сознания». Ясно, что сон (точнее — фаза быстрого сна, когда возникают сновидения) — это как раз состояние «на границе сознания».

Поскольку квантовый мир состоит из огромного количества альтернативных реальностей, в нем можно почерпнуть такую информацию, которая в принципе недоступна сознанию, ограниченному рамками лишь одной классической ре-

¹⁵ Здесь есть нелогичность: чем воспринимается квантовый мир, если сознание выключено? Но эта нелогичность свидетельствует лишь о неразвитости терминологии. То, что остается от сознания, когда сняты (или стали прозрачными) перегородки между альтернативами, можно назвать *сверхсознанием*.

¹⁶ В сб. Павел Флоренский, Избранные труды по искусству, изд-во «Изобразительное искусство», Москва, 1996, с. 73.

альности. Очевидно, что это именно то качество, которым верующие наделяют «потусторонний мир». Поэтому отождествление его с квантовым миром является не формальным, а содержательным. Конечно, эта тема здесь лишь намечена и нуждается в более серьезном развитии.

6.5.3. Невербальное мышление

Среди тех необычных явлений в области сознания (психики), которые могут иметь отношение к нашей концепции, одним из самых интересных (по крайней мере с точки зрения ученого) является *невербальное и неконтролируемое мышление*. По мнению Роджера Пенроуза для объяснения этого важного явления необходимо привлечь квантовую физику.¹⁷ С нашей точки зрения, оно легко объясняется в рамках расширенной концепции Эверетта.

Что же такое невербальное мышление и при каких условиях оно возникает?

Распространено мнение, что мышление ученого — это строго логичный и последовательный поток мыслей, которые излагаются на бумаге или, во всяком случае, при желании могут быть изложены на бумаге с помощью нашего обычного языка, с добавлением лишь некоторого количества формул и рисунков. И действительно, ученый рассуждает именно так, во-первых, на первом этапе работы, когда формулируется проблема, а во-вторых, — на последнем, когда формулируется результат. Но ключевой этап работы, который собственно и приносит результат, — это *открытие*. И оказывается, что на этом этапе мышление ученого часто (а может быть и всегда) принимает невербальную форму и происходит неконтролируемо, независимо от его воли.

Необходимым условием открытия является напряженная и вполне контролируемая работа на предшествующих этапах. Без этой предварительной всесторонней проработки предме-

¹⁷Роджер Пенроуз, Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики, пер. с англ., УРСС, Москва, 2003.

та никакого открытия состояться не может. Эта предварительная работа, разумеется, производится в вербальной форме и строится логично (хотя включает и элементы поиска в разных направлениях). Однако само *открытие часто совершается в невербальной форме и очень быстро, как мгновенное озарение, не поддающееся контролю*. Это происходит не обязательно во время работы, но часто — во время посторонних занятий.

Роджер Пенроуз в своей книге «Новый ум короля» приводит многочисленные свидетельства известных ученых о том, как они работают и как приходят к открытиям. Вот что писал, например, Альберт Эйнштейн в письме к великому математику Адамару по поводу невербального характера своего мышления:

«Слова или язык, как в устной, так и в письменной форме, по-видимому, не играют никакой роли в механизме моего мышления. Психические сущности, которые, по-видимому, и являются составляющими элементами мысли — это определенные знаки и более или менее отчетливые образы, которые могут «произвольно» воспроизводиться и комбинироваться по собственному желанию... В моем случае упомянутые элементы носят визуальный и моторный характер. Общепринятые слова или другие знаки мне приходится подбирать только на второй стадии, когда упомянутые ассоциативные связи приобретают отчетливые очертания и могут быть воспроизведены по моей воле».

Быть может, самое поразительное в приводимых Пенроузом свидетельствах великих ученых — это то, что в момент открытия, при отсутствии формальных доказательств истинности своего прозрения, они чувствуют *абсолютную уверенность* в том, что оно истинно. Например, великий математик Анри Пуанкаре так описывает момент озарения, неожиданно пришедший после долгой, напряженной и заведшей в тупик работы над построением «функций Фукса»:

«...Я покинул Кон, где я жил в то время, чтобы принять участие в геологической экспедиции, организованной Горной школой. Впечатления от поездки заставили меня забыть о моей математической работе. Достигнув местечка Кутонс, мы сели в омнибус, чтобы добраться на нем до следующего пункта назначения. В тот момент, когда я ставил ногу на подножку, мне пришла в голову идея, которая, казалось, никоим образом не вытекала из моих прошлых раздумий, что преобразования, используемые мной для определения функций Фукса, были идентичны определенным преобразованиям в неевклидовой геометрии. Я не проверил эту идею. У меня просто не было времени, так как когда я занял свое место в омнибусе, я продолжил прерванную беседу, — но я был совершенно уверен в правильности моей догадки. Вернувшись в Кон, я выбрал свободное время и, проверив для собственного спокойствия свое предположение, убедился в его справедливости».

Необыкновенное и в то же время чрезвычайно важное явление научного озарения невозможно объяснить обычными способами. Кажется возможным объяснить его тем, что *в момент открытия сознание выходит в квантовый мир*. Конечно, здесь еще предстоит много поработать, но некоторые предварительные соображения напрашиваются сразу.

В частности, представление о том, что научное открытие происходит *«на границе сознания»*, вполне согласуется с тем, что озарение, открывающее новый путь решения некоторой проблемы, часто приходит во время посторонних занятий, то есть тогда, когда эта проблема отсутствует в сознании исследователя. В момент озарения происходит прорыв этого неосознанного знания в область сознания, то есть происходит переход через границу сознания.

Это вполне соответствует следующей *практической рекомендации*, которая в различных формах встречается в лите-

ратуре по научной методологии. После периода напряженной предварительной работы над проблемой, в момент, когда требуется «угадать ключ к ее решению», то есть собственно совершить открытие, полезно на время «отключить» сознание от этой проблемы, переориентировав его на что-то другое. Можно переключить его на решение другой проблемы, но лучше всего — просто на развлечение, которое создало бы положительный эмоциональный фон. В таком случае работа над проблемой на самом деле продолжается, но уже на уровне подсознания (или, по другой терминологии, сверхсознания). Это и требуется для «открытия», то есть появления качественно новых соображений по данной проблеме. Вызревшее в подсознании открытие выходит затем на уровень сознания как мгновенное озарение, часто совершенно неожиданно и в нерабочей обстановке.

Близкие рекомендации часто встречаются в литературе по научной методологии. Примеры, аналогичные описанному выше случаю с Пуанкаре, подтверждают, что прекращение сознательной работы над проблемой (разумеется, после ее очень серьезной предварительной проработки) благоприятствует озарению. Интересно, однако, что наиболее ясная формулировка этой методики, с четким указанием — после предварительной проработки переключиться на развлечение, чтобы вызвать положительные эмоции, встретила мне *в книге по раджа-йоге*.¹⁸ Я прочел эту рекомендацию в одном из изданий этой книги много лет назад. После этого я освоил рекомендуемую методику и много лет ее практиковал с очевидным эффектом. Теперь она уже давно стала просто привычным способом поведения.

Явление озарения — лишь один пример необычной работы сознания. Этот пример наиболее близок для представителя науки. А есть еще много удивительных явлений в сфере сознания, установленных вполне достоверно.

¹⁸Йог Рамачарака, «Раджа-йога. Учение йогов о психическом мире человека», Москва, Айрис-пресс, 2005.

6.5.4. Ненаучные формы познания

Когда мы говорим о необыкновенных явлениях, так или иначе связанных с сознанием человека, нельзя не упомянуть о таких формах познания этих явлений или даже управления ими, которые не являются научными. Прежде всего это *различные направления религии и восточные философии (учения)*. Почему самые разные религии и восточные учения имеют отношение к обсуждаемой теме? Потому, что все они в той или иной мере связаны с мистикой, признают чудеса, а часто и опираются на них. Если искать в этом возможный реалистический аспект, то он может состоять в необычных свойствах человеческого сознания.

Для представителя науки соблазнительно вообще исключить из рассмотрения сферу человеческой мысли, так или иначе связанную с религией, верованиями, мистическими учениями, объявив ее ненаучной, то есть недостоверной. Однако вряд ли можно так легко отмахнуться от того, что существует тысячелетия и представляет, быть может, наиболее устойчивое явление в сфере духовной жизни человека. Скорее всего, такая устойчивость указывает на то, что все эти ненаучные направления опираются на нечто реально существующее, хотя для более сильного эмоционального воздействия реально существующее часто облекается в них в сказочную форму.¹⁹

С интересующей нас точки зрения особенно примечательны восточные учения, которые прямо призывают человека работать с собственным сознанием. Наиболее интересным в этом плане нам представляется *дзен-буддизм* и близкие к нему направления (например, даосизм). Отметим два отличия этой философско-психологической школы, которые кажутся важными с рассматриваемой точки зрения.

¹⁹ Есть, правда, другое объяснение устойчивости религиозного мышления. Оно состоит в том, что человеку свойственно искать в различных верованиях психологического убежища от страшного для него мира. Однако это объяснение неприменимо к людям умным и сильным, которых среди верующих немало.

Буддизм, как направление, более общее, чем дзен-буддизм, *не требует слепой веры* в провозглашаемые им положения, и этим он ближе к науке, чем к традиционным религиям. Буддийский проповедник (учитель) призывает своих учеников верить только тогда, когда в процессе работы с собственным сознанием они сами убедятся в справедливости учения. Такой подход в какой-то мере сближает это учение с наукой. Во всяком случае к буддизму труднее предъявить стандартное обвинение, предъявляемое обычно к религии: что она не допускает сомнений и требует от своих адептов слепой веры. Конечно, у человека, настроенного скептически, такой призыв может вызвать подозрение в обмане. Но буддизм этого избегает.

Дзен-буддизм выделяется в буддизме как направление, в котором особо разрабатывается *идея «дзен»* и перед учеником ставится цель в процессе работы со своим сознанием постигнуть «дзен». А «дзен» предполагает прежде всего способность достигать особого состояния или ощущения (*состояния самадхи*), которое невозможно точно передать словами, но приблизительно можно охарактеризовать как «корень сознания», «начало сознания» или «предсознание». Это то трудноуловимое состояние, которое предшествует появлению сознания или, наоборот, остается последним перед тем, как сознание, постепенно ослабевая, совсем исчезает. Ученики призываются работать со своим сознанием до тех пор, пока они не смогут уловить это ощущение «быть между сознанием и отсутствием сознания».

Очевидно, что это как раз то особое состояние, о котором мы говорили выше как о состоянии «на границе сознания», и в котором могут проявляться «неклассические» свойства сознания. Именно поэтому дзен-буддизм чрезвычайно интересен с точки зрения теории «квантового сознания».

Заметим, что довольно широко известная среди европейцев методика *медитации*, которая используется во всех восточных психологических практиках, тоже ведет к состоянию «на границе сознания». Обычно на Западе медитация тракту-

ется как умение выключить свое сознание, однако это не совсем так. Полное выключение сознания означает переход к состоянию сна. Истинная же цель медитации — научиться быть *между сознанием и отсутствием сознания*, то есть на границе сознания. Разумеется, в дзен-буддизме состояние самадхи достигается при помощи медитации.

Таким образом, медитация, являющаяся главным инструментом восточных практик, *есть проникновение на границу того наиболее глубокого пласта сознания, который в расширенной концепции Эверетта отождествляется с разделением альтернатив*. Напрашивается мысль, что психологическая практика дзен-буддизма (а также многих других близких восточных школ) дает *рецепт проникновения в квантовый мир*, в другие классические реальности.

6.5.5. Концепция Эверетта и здоровье

Кроме перечисленных, можно найти довольно много других подтверждений развиваемой здесь расширенной концепции Эверетта. Многое убеждает нас в том, что «на границе сознания» действительно наблюдаются необычные явления, естественным образом вписывающиеся в эту концепцию.

Приведем некоторые соображения такого рода, относящиеся к области физического, телесного, здоровья. Не совсем точно было бы сказать «к области медицины», потому что медицина прежде всего занята болезнями (часто лишь симптомами или «механизмами» болезней, но не их глубинными причинами) и слишком мало интересуется здоровьем. В то же время имеется уже достаточно развитая «наука о здоровье» и большая литература о том, как быть здоровым. Вот в этой области встречается достаточно много фактов, которые можно считать косвенными подтверждениями высказанных гипотез. Постепенно все большая часть приемов, выработанных наукой о здоровье, начинает применяться также и в медицине.

Здесь не место говорить об этом слишком подробно. Упомянем лишь две группы фактов, связанные соответственно с самовнушением и с релаксацией, а потом обсудим феноменальный опыт лечения, который практиковал американский целитель Эдгар Кейси.

Мы увидим, что эффекты, связанные с самовнушением и релаксацией, возникают «на границе сознания» и могут быть объяснены снятием перегородок между альтернативами. Более того, анализируя то, что происходит в случае релаксации, мы наметим некоторое расширение или уточнение того, что следует понимать под сознанием в контексте рассматриваемой проблемы.

Потом мы покажем, что феномен Кейси естественно объясняется выходом его сознания в квантовый мир.

Самовнушение

Известно, что облегчение болезни может наступить в результате самовнушения. Те, кто пропагандирует самовнушение, рекомендуют как бы уговаривать свой организм: «Я совершенно здоров», или «Мое сердце работает как часы». Утверждается, что при достаточной настойчивости это помогает. И действительно, часто помогает и эта простая методика, и более изощренные ее варианты, в частности те, что связаны с ауто-тренингом, или релаксацией (см. далее).

Большинство людей, даже признавая этот факт, относится к нему пренебрежительно. Если человек почувствовал себя лучше в результате самовнушения, то часто можно слышать убийственный комментарий: дескать, это не медицина, а «всего лишь самовнушение». По-видимому, предполагается, что вылечить-то (то есть ликвидировать болезнь) можно лишь медицинскими препаратами или операцией, а самовнушением можно лишь обмануть себя, тогда как болезнь останется где-то в глубине, затаится и потом снова проявится. Но так ли это?

Не будем останавливаться на том, что и медицина не всегда ликвидирует болезнь, часто ликвидирует лишь ее симптомы, да и то временно. Такое мнение все более распространяется (в том числе и среди самих медиков), однако это лежит в стороне от нашей темы. Поговорим о самовнушении. Действительно ли при самовнушении болезнь лишь временно отступает, а затем возвращается?

Иногда действительно бывает так, что болезнь, отступившая на время в результате самовнушения, потом снова наступает. Но что это доказывает? Во-первых, никто не сказал, что для любого человека и любой болезни самовнушение дает стопроцентную гарантию выздоровления. Это было бы смешно. Поэтому следует, разумеется, ожидать, что в некоторых случаях болезнь вернется (а в некоторых даже на время не отступит). Во-вторых, нельзя сбрасывать со счета бессознательное. Возможно, человек, занимающийся самовнушением здоровья, в глубине души не верит в действенность этого метода (да и как может не появиться у него сомнения, когда вокруг он слышит в основном пессимистические оценки такого «ненаучного» лечения, как самовнушение). А если так, то сознательно он внушает себе здоровье, а подсознательно — ожидает возвращения болезни. Вот она и возвращается, как раз в соответствии с бессознательным самовнушением.

Таким образом, случаи неудач не доказывают неэффективности метода, они просто неизбежны. Поразительны как раз случаи удач, иногда возникающие в ситуации, когда медицина уже призналась в своем бессилии. Да и сами медики давно уже знают силу самовнушения и призывают ее в помощь своим научным методам. Известно: хорошо лечит лишь тот врач, в которого пациент верит. Бывает, конечно, и обратное: пациент верит, потому что врач хорошо лечит. Однако часто вера пациента во врача не основана на каких-то известных ему фактах о достоинствах этого врача, а все равно такая вера во врача, действуя как самовнушение, помогает. Известна также

сила плацебо: пустая таблетка помогает, потому что пациент верит, что она поможет.

Откуда же такая сила у самовнушения? Почему силы, которые могут обеспечить выздоровление, дремлют в организме, если человек в них не верит, и начинают работать, если он верит? Казалось бы, этого не должно быть. Ведь если силы, способные победить болезнь, имеются в организме, то природа должна была позаботиться, чтобы эти силы всегда включались на полную мощность. А они не включаются, если не помогает сознание. Откуда эта фантастическая сила сознания?

Ответ, очень конечно неопределенный, может состоять в следующем. Сознание не просто включает силы, которые и без того имеются в организме, но дремлют. Сознание подключается к некоторому внешнему источнику, из которого оно и черпает эти силы. Кстати, известно, что при любой болезни *сон лечит*. Почему? Не потому ли, что именно в этом состоянии, на границе сознания, происходит непосредственное подключение к источнику здоровья? Все это очень естественно смыкается с тем, что мы говорили в разделе 6.3.2 о выходе сознания в квантовый мир, включающий разные альтернативы.

Можно предположить, что при самовнушении происходит выход в квантовый мир, анализ различных альтернатив и выбор той альтернативы, в которой болезнь исчезает.

Итак, выздоровление под действием самовнушения может объясняться (расширенной) концепцией Эверетта. Это объяснение нельзя, конечно, считать достоверным, однако оно представляется вполне логичным и в ряду многих других фактов может служить косвенным подтверждением всей концепции. Такой вывод становится еще более убедительным в связи с другим действенным методом оздоровления — релаксацией.

Релаксация

«Оздоровительная» работа сознания усиливается не только во сне, но и в состоянии глубокой релаксации, когда сознание

включено, но все мышцы тела максимально расслаблены. На этом основана очень сильная методика аутотренинга, которая стала известна в нашей стране лет 40–50 назад, но сейчас уже давно включена в арсенал средств, применяемых в медицине.

Для нас важно, что глубокое расслабление (релаксация) уже само по себе действует как оздоравливающее средство, даже если оно не дополняется самовнушением.

Согласно некоторым руководствам по релаксации признаком максимально глубокого расслабления является полное исчезновение ощущения тела. Тело как бы исчезает, растворяется. Сознание при этом остается полным, но как бы «висит в пустоте». Вот это особое состояние по-видимому особенно интересно в контексте нашего обсуждения.

Широко известна оздоровительная методика Кацудзо Ниши. Имеется много различных книг по этой методике. Среди них недавно издана небольшая книжка «Система естественного омоложения» (изд-во «Невский проспект», СПб, 2005). Она примечательна тем, что предлагаемая в ней на удивление простая «система омоложения» основана прежде всего на упражнении по глубокому расслаблению. При этом автор подчеркивает, что расслабление должно достигать такой степени, при котором полностью исчезает ощущение тела.

Ниши считает, что в состоянии глубокого расслабления человек получает контроль над «жизненной силой», которая поддерживает в организме здоровье. Болезнь наступает, когда в организме возникают препятствия для циркуляции этой жизненной силы. А вот в состоянии глубокого расслабления человек может восстановить ее свободную циркуляцию, то есть восстановить здоровье.

Почему в этом случае восстанавливается или поддерживается здоровье? Ниши объясняет это очень интересно. Он замечает, что тело человека, как материальный объект, все время обновляется: составляющие его частицы заменяются новыми, так что тело все время строится заново, обновляется. Значит оно могло бы быть вечно молодым и здоровым. Одна-

ко с возрастом искажается «план», по которому должно строиться здоровое тело. В результате тело оказывается не таким, каким оно должно быть, наступает болезнь.²⁰

Так вот, именно «жизненная сила», по Ниши, содержит правильный план построения здорового тела. При нарушении циркуляции этой «субстанции» план искажается или не полностью доносится до некоторых частей тела. При восстановлении циркуляции (которое обеспечивается глубоким расслаблением) восстанавливается правильный план и возвращается здоровье.

По моему мнению, такие наглядные образы, как энергия или жизненная сила, являются скорее метафорами, полезными, если требуется сделать происходящее понятным для любого человека. Ключевым представляется то, что план, обеспечивающий поддержание или восстановление здоровья, появляется в состоянии такого расслабления мышц, при котором исчезает ощущение тела. Ниши называет такое максимально глубокое расслабление упражнением «мертвая поза». В хатхайоге тоже аналогичное упражнение рекомендуется как ключевое. Там оно называется «позой мертвого тела».

В свете концепции Эверетта не слишком-то приятно звучащий термин «поза мертвого тела» представляется весьма точным и многое объясняющим. В нем отражается главный признак того состояния, которого нужно достичь: это состояние, пограничное между жизнью и не-жизнью.²¹

Для действенности глубокого расслабления оно должно доводиться до стадии, когда ощущение тела исчезает. Это вполне аналогично состоянию «на границе сознания», кото-

²⁰ Используемая в книге Ниши картина вечно обновляемого тела в основных своих чертах подтверждается наукой: во всех тканях живого организма происходит отбраковка и уничтожение клеток, которые отклонились от нормы, и замена их новыми.

²¹ Здесь тоже могут возникнуть неправильные ассоциации, если сказать «пограничное между жизнью и смертью». Смерть обычно понимается как результат болезни или раны. В данном случае имеется в виду нечто другое: «не-жизнь» — это не смерть.

рое возникает при медитации. Однако при релаксации пограничного состояния достигают телесные ощущения, то есть, говоря условно, отключается «осознание тела». Сознание же в обычном понимании этого слова остается полностью включенным.

В рамках расширенной концепции Эверетта этому тоже может соответствовать контакт с квантовым миром. Но теперь этот контакт происходит на более конкретном уровне: не весь мир воспринимается как квантовый, а лишь состояние тела воспринимается как состояние квантовой системы. Это значит, что тело в этом случае воспринимается как материальный объект, но не наделенный особым качеством, называемым «жизнь». Теперь это просто совокупность атомов, но не живое существо, состоящее из этих атомов.

Вспомним, что в концепции Эверетта тело, понимаемое лишь как совокупность атомов, подчиняется квантовой механике без разделения альтернатив. Но это значит, что если достичь такого состояния, когда разделение альтернатив исчезает (то есть когда тело воспринимается лишь как совокупность атомов), то возникает возможность получать информацию из всех альтернатив. Правда, теперь это не альтернативные состояния всего мира, а лишь альтернативные состояния тела.

Этого, однако, достаточно для оздоровления. Ведь по логике вещей именно это дает информацию, необходимую для построения здорового тела: среди всех классических альтернатив этого тела есть наилучшая, соответствующая абсолютно здоровью. Доступ к этой информации, возникающий при глубоком расслаблении (на границе телесных ощущений), дает возможность строить тело по правильному плану, и при постепенном обновлении клеток тела они выстраиваются в абсолютно здоровое тело.

Итак, даже в этом феномене оздоровления под влиянием глубокого расслабления можно увидеть косвенное подтверждение расширенной концепции Эверетта. Во всяком случае,

оно приобретает определенный вес в ряду многочисленных других свидетельств в пользу этой концепции.

В то же время именно этот феномен указывает на следующий шаг в развитии всей концепции. В нем фигурирует уже не просто «сознание», а «осознание тела». Таким образом, происходит структурирование основного объекта, с которым имеет дело расширенная концепция Эверетта и который мы достаточно условно назвали сознанием.

Итак, глубокое расслабление погружает тело человека в квантовое состояние, не разделенное на классические альтернативы. Это позволяет обновить информацию о плане построения здорового тела и тем самым приводит к омоложению, к восстановлению здоровья. Возникает вопрос: а нет ли аналогичного *естественного* процесса, который в молодости постоянно обновляет такую информацию и этим постоянно поддерживает здоровье человека? И ответ практически очевиден. Таковую роль может выполнять фаза быстрого (парадоксального) сна, которую человек испытывает несколько раз каждую ночь. Это предположение согласуется с известными характеристиками этой фазы сна. Это не только наличие сновидений именно в этой фазе. Это также и тот факт, что в этой фазе сна полностью исчезает мышечный тонус (то есть возникает глубокое расслабление), и то, что в старости фаза быстрого сна сокращается. Главное же состоит в том, что такое предположение легко объясняет, почему человек, полностью лишенный сна, в короткий срок погибает (что иначе объяснить не удастся).

Эдгар Кейси: рецепты лечения — из квантового мира

Очевидно, что в рамках расширенной концепции Эверетта можно пытаться объяснить так называемые *паранормальные явления*, такие как предсказания будущего, ясновидение, целительство и другие. В связи с этим всегда возникает вопрос о достоверности таких явлений. Многие люди твердо уверены, что раз такого рода явления не объяснены наукой, то их вооб-

ще не существует, а многочисленные свидетельства этих явлений — не что иное как обман или самообман. Ситуация осложняется тем, что в обстановке ажиотажа вокруг паранормальных явлений действительно возникает много пустых спекуляций и прямого обмана. Поэтому при обсуждении этого вопроса следует проявлять максимальную осторожность. Во всяком случае имеет смысл ссылаться лишь на те свидетельства паранормальных явлений, которые хорошо документированы.

Примером такой тщательно документированной серии необыкновенных событий является жизнь и деятельность Эдгара Кейси (Edgar Cayce).²² Эдгара Кейси обычно называют целителем, но он не был целителем в обычном смысле этого слова. Он не лечил людей, а лишь давал рекомендации по лечению, которые затем применяли профессиональные медики. Поразительно то, что рекомендации по лечению самых разнообразных, часто очень тяжелых болезней, Кейси получал, находясь в трансе.

Кейси родился в штате Кентукки в 1877 году и умер в 1945 году в возрасте 67 лет. Ему, да и всем нам, повезло в том, что он получил помощь в организации своей работы, в результате чего эта работа тщательно прослеживалась и фиксировалась. Один из вылеченных Кейси пациентов, Мортон Блументаль, предложил ему финансовую поддержку, чтобы основать исследовательский центр и больницу, где Кейси мог бы работать.

Это было реализовано в феврале 1929 года. Вскоре в результате экономической депрессии возникли трудности, и Блументаль был вынужден прекратить финансирование больницы. 26 февраля 1931 года она закрылась. Однако вскоре была создана новая организация, «Ассоциация Исследований и Просвещения» (The Association for Research and Enlightenment — A.R.E.). Задачей ее было ведение тщательных записей се-

²²Doris Agee, Edgar Cayce on ESP, Warner Books Inc, 1988; Х.-Л. Кейси, Э. Кейси, Смерти нет: Другая дверь Бога (пер. с англ.), Изд-во «Будущее земли», СПб, 2005.

ансов Кейси, которые послужили бы основой для будущих исследований. В архиве Ассоциации (Вирджиния Бич, штат Вирджиния) хранится почти 14000 стенографических записей его «чтений», в которых фигурируют более 6000 лиц, получивших помощь от Эдгара Кейси. Со временем филиалы Ассоциации возникли во многих странах.

Чаще всего Кейси помогал людям, у которых врачами были установлены очень серьезные болезни, в большинстве случаев неизлечимые. Сеансы, которые для таких людей проводил Кейси, он называл «чтениями». Когда к нему приходил пациент (а иногда это делалось и заочно), Кейси ложился на диван и погружался в транс. В этом состоянии, не имея никаких предварительных сведений о пациенте, он описывал его состояние и назначал лечение. В качестве исцеляющих средств он назначал иногда лекарства (порой малоизвестные), иногда какие-то специальные пищевые продукты или лечебные процедуры. По свидетельству врачей, проводивших лечение по его назначениям, эти назначения приводили к выздоровлению в 90 процентах случаев. Некоторые из методов лечения, впервые найденные Кейси, впоследствии вошли в медицинскую практику.

Все это звучит неправдоподобно, однако все это документировано и, по-видимому, не подлежит сомнению. Удивительно, но в рамках расширенной концепции Эверетта происходившее во время «чтений» объясняется очень легко.

Погружаясь в транс, Кейси выходит в квантовый мир, то есть получает доступ ко всем альтернативам. Среди них есть и такая, в которой пациент выздоравливает. Прослеживая эту альтернативу от момента выздоровления назад во времени,²³ Кейси видит, какие препараты дают пациенту или какие лечебные процедуры применяют. Обо всем этом он и сообщает окружающим его людям непосредственно во время транса.

²³ Это возможно в силу обратимости квантового мира, см. подстрочное примечание 10 на с.202.

Кроме лечения, Кейси занимался и предсказаниями будущего, которые могли касаться судеб отдельных людей или целых стран. Среди прочего, он сделал целый ряд важных предсказаний. Утверждается, что он предсказал годы начала и окончания двух мировых войн.

Назначая лечение больного в состоянии транса, Кейси тоже делал не что иное, как предсказание. Он предсказывал, что пациент выздоровеет. Более того, он даже предсказывал, при каких условиях это произойдет: этими условиями был назначаемый им курс лечения. Поскольку врачи, следуя указаниям Кейси, обеспечивали эти условия, предсказание обычно сбывалось.

Последнее замечание очень важно. Если справедлива концепция Эверетта, то абсолютные предсказания практически невозможны. Для каждого события (кроме очевидно неизбежных, которые может предсказать любой) существуют альтернативные эвереттовские миры, в которых это событие не осуществляется.

Но если вместе с предсказываемым событием указываются условия, при которых оно должно иметь место, эти условия могут выделять тот класс альтернатив, в которых данное событие происходит. Такие «условные предсказания» могут быть успешными с большей вероятностью. Выход сознания в квантовый мир (снятие перегородок между альтернативами) может быть механизмом, делающим такие предсказания возможными.

«Чтения» Эдгара Кейси являются примером парапсихического феномена. Этот пример представляется одним из самых достоверных. В течение десятилетий «чтения» стенографировались. Эти стенограммы опубликованы, и каждый желающий может сопоставить их содержание с медицинскими документами, фиксировавшими истории болезней его пациентов в самых разных частях страны, в самых разных лечебных учреждениях и самыми разными врачами (разумеется, такие проверки неоднократно проводились).

Мы видим, что работа Эдгара Кейси становится понятной, если принять расширенную концепцию Эверетта. Аналогичные рассуждения можно использовать, чтобы попытаться объяснить другие парапсихические явления (ясновидение, телепатия и пр.). Мы не будем здесь этого делать, и не только потому, что снова и снова возникает вопрос о достоверности самих этих явлений.²⁴ Дело еще и в том, что на данном этапе кажется преждевременным детализировать такие объяснения. Любые детали были бы в значительной степени спекулятивными. То, что представляется надежным (если принять расширенную концепцию Эверетта), — это общая схема объяснения, проиллюстрированная приведенным примером. Она заключается в том, что при почти полном выключении сознания оно может выходить в квантовый мир, получать в нем информацию из разных времен, разных пространственных областей и разных альтернатив, а затем использовать эту информацию после возвращения в «свою» классическую реальность, в позицию «здесь и сейчас».²⁵

²⁴ Уже когда я правил корректуру этой книги, по телевидению прошла передача о научном руководителе Института мозга человека РАН академике РАН и РАМН Н. П. Бехтеревой. В этой передаче Наталья Петровна рассказывает о парапсихических явлениях, свидетелем которых была сама, в том числе о вещих снах.

²⁵ Попытки объяснения парапсихических явлений существованием неких до сих пор не обнаруженных физических полей представляются нам бесперспективными. Предлагавшееся для этого «микролептонное» поле — не более чем ничего не значащее слово, а торсионное поле (то есть поле кручения) действительно может существовать как одна из сверхслабых компонент гравитационного поля, но предположение о его связи с парапсихическими явлениями ничем не обосновано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассказали в этой книге о самой, пожалуй, эффективной и самой таинственной науке, созданной человеком, — о квантовой механике. Во-первых, мы попытались проследить, как при создании квантовой механики гениальные мыслители шаг за шагом преодолевали беспрецедентные трудности, стоявшие на их пути. Мы увидели, как постепенно не только были найдены новые, квантовые законы природы, управляющие микромиром, но и разработан совершенно новый взгляд на природу и ее познание.

Во-вторых, мы на небольшом количестве примеров увидели, как квантовая механика позволяет создавать новые технологии, которые постепенно входят в жизнь и становятся ее неотъемлемой частью. Познакомились мы и с принципами, на которых основаны технологии квантовой информатики, разработанные совсем недавно и еще не полностью реализованные.

В-третьих, и это, пожалуй, главное, мы подробно обсудили так называемую *«проблему измерения»*, концептуальную проблему, которая радикально отличает квантовую механику от всех других наук. Возникнув в рамках физики, эта проблема в ходе ее решения заставляет выйти за эти рамки и вообще за рамки естественных наук. В ходе рассмотрения проблемы

измерения приходится ставить *философские и мировоззренческие вопросы*. Вполне возможно, что в конце концов это перевернет наши представления о том, что такое *сознание*, как оно относится к реальности и что такое вообще *реальность*.

Ситуация, сложившаяся с «проблемой измерения» в квантовой механике, уникальна. Скоро уже век как эта неожиданно возникшая проблема не решается, однако снова и снова, на все более широкой основе, подтверждается, что она все еще существует и ждет своего решения (см., например, книгу академика М. А. Маркова О трех интерпретациях квантовой механики, Наука, Москва, 1991, и статью нобелевского лауреата академика В. Л. Гинзбурга «Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века?» в сборнике В. Л. Гинзбург, О науке, о себе и о других: статьи и выступления, 3-е изд., дополненное, Физматлит, Москва, 2003).

Такая ситуация скорее всего означает, что решения проблемы следует ждать в совершенно неожиданном направлении или характер решения будет непривычным с точки зрения стереотипов, сложившихся в физике. По этой причине при оценке предлагаемых решений следует всегда быть готовыми к неожиданностям, чтобы не забраковать пробивающиеся ростки истины из-за того, что ничего похожего на них в физике никогда не появлялось. Уверенность в том, что проблема не является пустой, надуманной или схоластической, придаст список великих ученых, работавших над ней. Сошлемся на Бора, Эйнштейна и Шредингера,²⁶ но кроме них в этом списке еще Гейзенберг, Паули, Уилер и многие другие.

По всей видимости, решение проблемы измерения будет достигнуто в направлении, намеченном *концепцией Эверет-*

²⁶Нильс Бор, Дискуссии с Эйнштейном о проблемах теории познания в атомной физике, в сб. Нильс Бор, «Атомная физика и человеческое познание», изд-во иностранной литературы, М., 1961; Эрвин Шредингер, «Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки», Редакция журнала «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевск, 1999.

та. Эта в высшей степени необычная и смелая концепция в последние десятилетия привлекает очень большое внимание. Дело не ограничивается лишь такими абстрактными вопросами, как «проблема измерения». В контексте новых квантовомеханических задач, в частности, теории и практики квантовых компьютеров, некоторые исследователи, например, один из создателей квантовой информатики Дэвид Дойч, используют концепцию Эверетта как удобный язык для конкретных исследований.²⁷ Разумеется, это очень субъективно, и большинство физиков даже в области квантовой информатики пользуется обычным квантовомеханическим языком. Однако в концептуальных проблемах интерпретация Эверетта, видимо, дает новое качество.

Квантовое измерение отличается от классического тем, что в ходе измерения реальность не просто выявляется, но создается (те свойства измеряемой системы, которые обнаруживаются измерением, не существовали до измерения). Интерпретация Эверетта непосредственно вводит в квантовую механику сознание наблюдателя, связывая появление реальности при измерении именно с осознанием ее наблюдателем. Технически это можно представить как разделение состояния квантового мира на классические альтернативы, осознаваемые независимо друг от друга.

Оказывается, что полезно не просто функционально связать, но полностью отождествить сознание с разделением квантового мира на классические реальности (или, что то же, на эвереттовские альтернативные миры).²⁸ Развитие концепции Эверетта, опирающееся на такое отождествление, имеет то преимущество, что допускает проверку с помощью наблюдений над индивидуальным сознанием, тогда как интерпретация Эверетта в ее первоначальном виде, казалось, в принципе не может быть проверена.

²⁷ См. Дэвид Дойч, Структура реальности, пер. с англ., РХД, Ижевск, 2001.

²⁸ См. раздел 5.2 и работы М. Б. Менский, Успехи физических наук **170**, 631 (2000); **175**, 413 (2005).

Главные пункты расширенной концепции Эверетта и следствия, естественным образом вытекающие из нее, можно сформулировать так:

1. Набор альтернатив, характерный для квантовой теории измерений, интерпретируется как множество равноправных *проекций квантового мира*, называемых эвереттовскими мирами.
2. Разделение квантового мира на альтернативы отождествляется с примитивным уровнем феномена *сознания*, характерного для живых организмов.
3. Классический характер каждой из альтернатив, на которые сознание разделяет квантовый мир, обеспечивает стабильность и предсказуемость классического мира, воспринимаемого индивидуальным сознанием, что является *необходимым условием жизни*.
4. В особых состояниях (на грани бессознательного) индивидуальное *сознание получает доступ к квантовому миру* за рамками одной классической проекции. Это может объяснять необычные явления в области психики, которые играют центральную роль в ненаучных формах познания духовной жизни человека (религия, а также восточные философии, или учения).
5. Тот факт, что феномен сознания является общим элементом психологии и квантовой физики, создает *прямую связь между гуманитарной и естественнонаучной культурами*.

Пункт 3 в этом перечне наиболее важен. Он объясняет, почему при осознании происходит *расслоение квантового мира на альтернативные «классические реальности»* (являющиеся на самом деле лишь проекциями единственно реального

квантового мира). Такое расслоение оказывается необходимым общим свойством всех живых существ, т.е. *определением жизни*.

Заметим в этой связи, что в вышеупомянутой статье «Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века?» В. Л. Гинзбург особо выделяет три «великих» проблемы, и среди них названы как проблема *интерпретации квантовой механики*, так и вопрос о *редукционизме*, т. е. о том, возможно ли объяснить феномен жизни на основе уже известной физики. Мы видели, что расширенная концепция Эверетта естественно соединяет в себе обе эти проблемы и в известном смысле сводит одну из них к другой.

Более того, и последняя из трех «великих» проблем, упомянутых в статье В. Л. Гинзбурга, именно, вопрос о *возрастании энтропии, необратимости и «стреле времени»*,²⁹ может иметь отношение к обсуждаемой нами концепции. Дело в том, что квантовый мир в этой концепции подчиняется квантовой механике, из которой исключен постулат редукции. Следовательно, *в расширенной концепции Эверетта квантовый мир обратим. Необратимость фигурирует лишь как феномен сознания*.³⁰

Другими словами, для квантовой механики, описывающей *неживую материю*, характерно описание в терминах *4-мерного пространства-времени*, в котором все моменты времени рассматриваются на равной ноге. Представление о «*ходе времени*», об отношениях между настоящим, будущим и прошлым, а с ними и необратимость, появляются лишь при описании *феномена жизни* и характерного для него *сознания*.³¹

²⁹ В перечислении В. Л. Гинзбурга эта проблема названа как раз первой.

³⁰ См. в этой связи подстрочное примечание 10 на с.202.

³¹ Напомним, что под сознанием в этом контексте понимается лишь самый глубинный (самый примитивный) уровень сознания, который можно назвать осознанием.

В изложенной программе, как и вообще в области концептуальных проблем квантовой механики, многое нельзя обосновать, а приходится принимать в качестве гипотез, что может создать впечатление дилетантизма. Однако на самом деле такой характер исследований неизбежен в данной области науки на современном этапе. Дело в следующем.

Даже после того, как особая роль сознания в квантовой теории измерений стала казаться очевидной (по крайней мере для людей, непосредственно занимающихся этой теорией в концептуальном плане), решение вопроса все еще пытались искать в привычном для физиков направлении: в попытках описать свойства той *материальной субстанции, которая порождает сознание* (это мог быть мозг или какая-то структура внутри него). Одно время серьезные надежды в этой связи возлагались на теорию *декогеренции*.

Однако со временем стало ясно, что усилиями в этом направлении проблему решить не удастся. После этого все чаще стали понимать *сознание как явление, которое можно описать феноменологически, но нельзя вывести из известных свойств материи*. Ясно, что элементы такого феноменологического описания могут вводиться в теорию лишь как гипотезы. Таким образом, наличие гипотез указывает скорее не на дилетантизм подхода, а на то, что мы имеем дело с начальным этапом нового направления в науке.

Работа в рамках концепции Эверетта требует расширения методологии и в каком-то смысле *выводит за рамки физики* и даже вообще естественных наук. Это, конечно, должно вызывать настороженность и критику. Однако вопрос кажется чрезвычайно важным, и это оправдывает даже рискованные шаги. В случае успеха в решении концептуальных проблем квантовой механики эта наука, да и вообще физика, наверняка поднимется на качественно *новый уровень понимания природы*. Если ориентироваться на то, что уже сделано в рамках концепции Эверетта, можно надеяться, что возникнет продук-

тивный симбиоз физики с психологией, да и с другими средствами познания духовной жизни человека.

Вопрос о сознании в квантовой механике имеет (и всегда имел) важный общекультурный аспект: включение сознания в качестве существенного элемента квантовой физики устанавливает еще одну *связь между естественнонаучным и гуманитарным познанием*. Связь эта становится, на наш взгляд, особенно глубокой, если принять расширенную концепцию Эверетта.³²

Мы показали, что на основе эвереттовской многомировой интерпретации квантовой механики можно приблизиться к пониманию *необычных свойств сознания*, связанных с этими свойствами таинственных явлений. Не следует, однако, понимать это слишком буквально и ждать, что теперь эти явления можно будет вывести из квантовой механики. По-видимому, самое большее, чего можно ожидать, — это *устранения пропасти между естественными науками и ненаучными способами познания реальности*.

Тем не менее, можно надеяться, что это поможет ликвидировать *высокомерие естественников*, которые подчас готовы отвергать все, что не доказано научными методами (не понимая, что эти методы лишь ограниченно применимы к таким сложным предметам исследования, как жизнь), и *высокомерие гуманитариев*, иногда считающих естественные науки чем-то низким, сугубо прикладным, приземленно-материалистическим (игнорируя при этом не только фантастическую красоту естественных наук, но и применяемый естественниками вполне гуманитарный интуитивный метод познания,³³ без которого наивысшие достижения естественных наук невозможны). Устранение этой пропасти и этого взаимного неприятия является одной из очень важных задач в области куль-

³² См. в этой связи работу М. Б. Менский, Квантовая механика, сознание и мост между двумя культурами, Вопросы философии, 2004, №6, с. 64.

³³ См. Е. Л. Фейнберг, «Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке», Фрязино, Век 2, 2004.

туры, которая была поставлена еще в 30-х годах в известной статье Чарльза Сноу «Две культуры».³⁴

Современное состояние «проблемы измерения» можно связать с некоторыми высказываниями *Альберта Эйнштейна о квантовой механике*. Будучи одним из главных ее создателей, Эйнштейн, как известно, так и не смог примириться с той формой квантовой механики, которая в конце концов возникла и утвердилась в физике. Прежде всего он был недоволен вероятностным характером квантовомеханических предсказаний. Известно высказывание Эйнштейна о том, что он не верит, что Бог играет в кости. Второе возражение было выдвинуто Эйнштейном в совместной работе с Подольским и Розеном (см. раздел 1.8). В ней авторы пытались доказать, что квантовая механика неполна, так как она не описывает корректно некоторые «элементы реальности».

Все возражения Эйнштейна против квантовой механики были успешно опровергнуты Нильсом Бором, в частности, в их знаменитой дискуссии на Сольвеевских конгрессах в Брюсселе (см. раздел 1.7.4). И естественно, что Эйнштейну приписывают ошибку в этом споре с Бором. Но возможно, что и в этом случае по большому счету он оказался прав. В книге Б.Клайна «В поисках»³⁵ приведено такое высказывание Эйнштейна о копенгагенской интерпретации: эта теория «много даст, но едва ли приблизит нас к тайнам старого господ Бога». Сейчас, после того как вместо копенгагенской появилась эвереттовская (многомировая) интерпретация квантовой механики (потом она была почти забыта, а затем снова стала активно обсуждаться), это высказывание Эйнштейна звучит как очень глубокое предсказание.

Во-первых, это вновь активизировавшееся направление прежде всего отталкивается от теоремы Белла, которая наглядно формулирует как раз то расхождение между квантовой

³⁴Русский перевод в сборнике: Чарльз Перси Сноу, Портреты и размышления, Москва, Прогресс, 1985.

³⁵Пер. с англ., Москва, Атомиздат, 1971.

механикой и классическим пониманием реальности, которое впервые было отмечено в работе Эйнштейна–Подольского–Розена. Во-вторых, многое, и в том числе анализ, изложенный в этой книге, делает весьма правдоподобным, что «приблизиться к тайнам старого господина Бога» можно лишь в том случае, если выйти за рамки копенгагенской интерпретации и вероятностной трактовки измерения, как этого хотел Эйнштейн.

Оказывается, что в тех специфических чертах квантовой механики, которые так трудно поддаются осмыслению, проявляется отношение нашего сознания (которое воспринимает независимо друг от друга различные проекции квантового мира, интерпретируя каждую из них как классическую реальность) к квантовому миру как целому. Быть может, само существование квантового мира за пределами одной классической реальности — это и есть «тайна господина Бога». Это наталкивает на мысль, что сознание может выйти из тесных рамок классической реальности в широкий и таинственный квантовый мир, тем самым приблизившись к постижению «божественных тайн» самым непосредственным образом.

Конечно, эти гипотетические свойства сознания (или свойства реальности) совсем не обязательно совпадают с тем, что люди называют Богом (тем более с тем, как Бог понимается в рамках определенной конфессии). Однако открывающуюся таким образом квантовую реальность, гораздо более широкую, чем привычная классическая реальность, следует обозначить каким-то словом, передающим ее смысл. Быть может, отождествление ее с Богом и не совсем адекватно, но зато дает в наше распоряжение яркий и в своей основе правильный образ. Полной адекватности при этом ожидать не приходится. Ведь и Эйнштейн в своем высказывании использовал имя Бога скорее как метафору чего-то, выходящего за рамки рутинного научного анализа. Если изложенная нами расширенная интерпретация Эверетта верна, то Эйнштейн был в определенном смысле прав и в своем споре с Бором, точнее — в

том, что даже согласившись с конкретным содержанием его доводов, сохранил убеждение, что ими не исчерпывается Истина.

Эйнштейн, правда, не сумел превратить свою догадку на этот счет в более точные и развернутые утверждения, не смог реализовать их в форме более удачной интерпретации квантовой механики. Слишком уж его догадка опережала время, в 30-х годах XX века было еще слишком рано ждать ее адекватного воплощения. Время Эверетта еще не пришло.

Но хотя и не имея возможности реализовать свою догадку, Эйнштейн все же сделал шаг в направлении ее реализации, и это был шаг в правильном направлении. В знаменитой работе 1935 года он вместе с Подольским и Розеном сформулировал мысленный эксперимент, который по именам авторов называется теперь эффектом ЭПР.

Целью Эйнштейна и его соавторов и в этом случае было продемонстрировать несостоятельность квантовой механики, и этого им в очередной раз сделать не удалось. Однако именно эффект ЭПР, один из самых широко обсуждаемых квантово-механических эффектов, послужил отправной точкой для такого развития квантовой механики, которое приблизило ее к идеалу, которого хотел Эйнштейн. Именно в этой работе было показано, что реальность понимается в квантовой механике не так, как мы привыкли ее понимать, опираясь на опыт классической физики и здравый смысл. Только сейчас начинает в полной мере проясняться значение того факта, что реальность в классическом понимании и реальность квантового мира не совпадают. При этом оказалось, что не нужно выбирать между ними, а нужно понять, какие из известных нам феноменов соответствуют каждой из этих реальностей.

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ КВАНТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В этом приложении мы покажем, как формально (математически) описывается измерение в квантовой механике. Специфика квантовой механики в вопросе об измерении (по сравнению с классической механикой) состоит в том, что обратное влияние прибора на измеряемую систему принципиально не может быть устранено. Более того, оно даже не может быть сделано сколь угодно малым: возмущение состояния системы зависит от того, какую информацию об этом состоянии дает измерение.

Эта специфика играет определяющую роль для квантовой механики, порождая знаменитые квантовые парадоксы и до сих пор не решенные концептуальные проблемы (обычно называемые «проблемой измерения»). Эти вопросы подробно обсуждаются в части II книги. Здесь же мы покажем, какими математическими образами описывается измерение в квантовой механике.

Квантовое измерение (то есть измерение квантовой системы) — это процесс взаимодействия измеряемой системы с другой системой, которая играет роль прибора. В результате этого взаимодействия прибор изменяет свое состояние,

так что по его новому состоянию можно судить о состоянии измеряемой системы. Однако и состояние измеряемой системы меняется. Информация о системе не может быть получена бесплатно, платой является возмущение состояния системы.

Можно по-разному описывать квантовое измерение. Простейшее описание дается *постулатом редукции фон Неймана*. Оно является феноменологическим, и поэтому в нем даже не фигурирует явно модель прибора, указывается лишь, какую информацию об измеряемой системе дает этот прибор.

Другой уровень описания того же самого явления, квантового измерения, является более детальным. Вводится модель прибора и прослеживается, как происходит взаимодействие измеряемой системы с прибором. Это позволяет физически обосновать постулат редукции вместо того, чтобы просто принимать его без доказательства. При этом оказывается, что измеряемая система подвергается *декогеренции*, то есть ее состояние частично теряет специфически квантовые свойства.

Сначала мы проиллюстрируем процесс квантового измерения на простейшем примере, когда измерение различает между двумя альтернативами, двумя состояниями системы. Например, такое измерение может выяснять, на каком из двух уровней энергии находится атом или какое из двух возможных значений имеет проекция спина электрона. От этого простейшего *дихотомического* измерения легко перейти к описанию измерения с любым числом альтернатив. Принципиально более сложным процессом является непрерывное измерение, например, слежение за координатой частицы. Несколько слов нам придется сказать и о таком измерении.

Однако предварительно мы вкратце познакомимся с формализмом квантовой механики вообще, то есть не обязательно в связи с измерениями. Мы не будем ставить своей целью изложить этот формализм хоть сколько-нибудь полно, однако некоторые его аспекты нам понадобятся, потому что они находятся в глубокой связи с теми свойствами квантовых измерений, которые нас интересуют. Прежде всего это относится

к принципу суперпозиции или, говоря математическим языком, к линейной структуре пространства состояний в квантовой механике.

А.1. Пространство состояний квантовой системы

В части I уже говорилось о том, что состояния квантовой системы можно представлять волновыми функциями. Например, волновая функция в координатном представлении $\psi(q)$ зависит от координат системы q . Обратим теперь внимание на тот факт, что функцию можно умножить на число (и при этом опять получить функцию), а две функции можно сложить (и также получить функцию). В этом смысле функции, и в частности волновые функции, являются векторами.¹ В квантовой механике это свойство волновых функций, то есть состояний, играет первостепенную роль.

Говорят, что в квантовой механике действует *принцип суперпозиции*, который гласит, что если система может находиться в состоянии ψ_1 и в состоянии ψ_2 , то она может также находиться и в любом из состояний $c_1\psi_1 + c_2\psi_2$, где c_1 и c_2 — любые комплексные числа. Это значит, что пространство состояний обладает *линейной структурой*. Иначе говорят, что пространство состояний данной системы является *линейным, или векторным, пространством*.

С состояниями можно обращаться как с обычными векторами, то есть умножать их на любые комплексные числа (аналог процедуры растяжения векторов) и складывать (как складывают обычные векторы). Отличие от известного из школьного курса пространства 3-мерных векторов состоит в том, что

¹ Аналогия с векторами станет более прозрачной, если заметить, что значения функции при разных значениях аргумента можно рассматривать как компоненты вектора. Обозначив $\psi_q = \psi(q)$, мы можем обращаться с числами ψ_q так же, как принято обращаться с компонентами a_i , $i = 1, 2, \dots$ конечно-мерного вектора $\vec{a}$.

в квантовой механике числовые множители могут быть комплексными, а пространство обладает любой размерностью, в том числе может быть и бесконечномерным. Очень важно, что два вектора, которые отличаются лишь числовым множителем, представляют одно и то же физическое состояние.

Как и для векторов, для состояний определяется *скалярное произведение*, которое является (комплексным) числом. Скалярное произведение двух состояний ψ' и ψ'' обозначается через (ψ', ψ'') . Если векторы состояний представлены волновыми функциями, то скалярное произведение выражается интегралом (звездочкой обозначено комплексное сопряжение)

$$(\psi', \psi'') = \int \psi'^*(q) \psi''(q) dq.$$

Если скалярное произведение двух состояний равно нулю, то говорят, что эти состояния *ортogonalны*.

Скалярный квадрат вектора (произведение его на себя)

$$||\psi||^2 = (\psi, \psi) = \int |\psi(q)|^2 dq$$

всегда является положительным (точнее, неотрицательным) числом. Корень из этого числа $||\psi||$ называется нормой вектора и аналогичен длине конечномерного вектора.

Обычно вектор выбирают *нормированным*. Это значит, что его норма равна единице, $||\psi|| = 1$. Иногда, впрочем, удобно пользоваться ненормированными векторами состояний. При необходимости такой вектор всегда можно «нормировать», умножив на подходящий числовой множитель. После нормировки вектор будет, разумеется, представлять то же самое физическое состояние.²

²Иногда удобно пользоваться такими волновыми функциями, для которых нормировочный интеграл расходится (то есть равен бесконечности). Соответствующие векторы нельзя нормировать, они являются *ненормируемыми*. Ненормируемым является, например, состояние элементарной частицы, в котором она имеет определенную координату, то есть находится в определенной точке.

Скалярное произведение — очень важная операция, потому что через него выражаются вероятности различных результатов измерений, проводимых в квантовой системе, то есть то, что можно наблюдать и проверять на эксперименте. Скалярное произведение обладает простыми свойствами: 1) при перестановке сомножителей оно подвергается комплексному сопряжению: $(\psi'', \psi') = (\psi', \psi'')^*$; 2) оно линейно по второму аргументу: $(\psi, c_1\psi_1 + c_2\psi_2) = c_1(\psi, \psi_1) + c_2(\psi, \psi_2)$ и 3) неотрицательно: $(\psi, \psi) \geq 0$ (равенство нулю имеет место лишь для нулевого вектора).

Наблюдаемые величины (такие, как координата или импульс частицы, или некоторая функция координаты и импульса), или просто *наблюдаемые*, представляются в квантовой механике не числами, а линейными операторами. Действуя на состояния, оператор $\hat{A}$ переводит их в другие состояния. Это значит, что если ψ — состояние, то $\hat{A}\psi$ — другое состояние той же системы. Операторы линейны в том смысле, что при действии на суперпозицию состояний они дают такую же суперпозицию новых состояний:

$$\hat{A}(c_1\psi_1 + c_2\psi_2) = c_1\hat{A}\psi_1 + c_2\hat{A}\psi_2.$$

Кроме того, операторы, сопоставляемые наблюдаемым, эрмитовы, то есть удовлетворяют условию $\hat{A}^\dagger = \hat{A}$, где использована операция эрмитова сопряжения $\hat{A} \rightarrow \hat{A}^\dagger$, определенная равенством

$$(\psi', \hat{A}^\dagger \psi'') = (\hat{A} \psi', \psi'').$$

Если состояние выражается волновой функцией $\psi(q)$ в координатном представлении, то наблюдаемая, называемая координатой, соответствует оператору умножения на аргумент q , а наблюдаемая, называемая импульсом, — оператором дифференцирования по координате (умноженным на мнимую единицу и постоянную Планка):

$$\hat{q}\psi(q) = q\psi(q), \quad \hat{p}\psi(q) = -i\hbar \frac{\partial}{\partial q}\psi(q).$$

Оба эти оператора обладают упомянутыми свойствами наблюдаемых: они линейны и эрмитовы.³

Введем еще другие обозначения для состояний квантовых систем. Эти обозначения были разработаны Дираком и оказались во многих ситуациях очень удобными.

Дирак предложил для обозначения состояний квантовой системы вместо волновых функций использовать так называемые кет-векторы $|\psi\rangle$ (по-английски — ket-vectors) и бра-векторы $\langle\psi|$ (по-английски — bra-vectors). Оба эти вектора соответствуют одному и тому же состоянию ψ . Преимущество дираковских обозначений основано на том, что написав бра-вектор, соответствующий одному состоянию ψ' , а справа от него кет-вектор, соответствующий другому состоянию ψ'' , мы получим выражение для скалярного произведения:

$$\langle\psi'|\psi''\rangle = (\psi', \psi'').$$

Именно это явилось основанием для названия векторов: поставив рядом bra-vector и ket-vector, мы получаем bracket, что по-английски означает: скобка (скалярное произведение часто называют «скобочным произведением»).

Продemonстрируем одно из преимуществ, которое дают дираковские обозначения. Некоторые операторы (не обязательно эрмитовы) записываются в этих обозначения очень просто. Для этого достаточно тоже поставить рядом бра- и кет-векторы, только в обратном порядке: слева кет-вектор, а справа — бра-вектор: $\hat{A} = |\psi'\rangle\langle\psi''|$. Чтобы найти действие такого оператора на произвольное состояние $|\psi\rangle$, достаточно написать оператор в дираковской форме слева от этого состояния:

$$\hat{A}|\psi\rangle = |\psi'\rangle\langle\psi''|\psi\rangle = \langle\psi''|\psi\rangle \cdot |\psi'\rangle$$

³ В случае многомерной системы, когда имеется более одной координаты, операторы $\hat{q}$ и $\hat{p}$ можно считать векторами: $\hat{q} = \{\hat{q}_i\}$ и $\hat{p} = \{\hat{p}_i\} = \{-i\hbar\partial/\partial q_i\}$. Формулы для одномерной системы, используемые в этой книге, легко обобщаются на случай любого числа координат.

(скалярное произведение является числом, поэтому его как числовой множитель можно записать как справа, так и слева от вектора). Поскольку любой линейный оператор можно выразить как линейную комбинацию таких дираковских «кет-бра операторов», ясно, что данное преимущество можно использовать очень широко.

Такая форма представления операторов оказывается удобной, например, при вычислениях, основанных на разложении вектора по базису. Пусть векторы $|i\rangle$ (где $i = 1, 2, \dots$) составляют ортонормированный (ортогональный и нормированный) базис, то есть удовлетворяют условию

$$\langle i|j\rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если } i = j \\ 0 & \text{если } i \neq j \end{cases}$$

Тогда имеет место соотношение (справа — единичный оператор)

$$\sum_i |i\rangle\langle i| = 1,$$

которое легко проверить, действуя левой и правой частью этого равенства на произвольный базисный вектор $|j\rangle$. Это формальное равенство (разложение единицы) оказывается полезным во многих ситуациях. Например, чтобы разложить произвольный вектор $|\psi\rangle$ по данному базису, подействуем на него левой и правой частью этого равенства (то есть единицей и разложением этой единицы) и приравняем:

$$|\psi\rangle = \sum_i |i\rangle\langle i|\psi\rangle = \sum_i \langle i|\psi\rangle \cdot |i\rangle.$$

Это автоматически дает выражение для коэффициентов разложения произвольного вектора по базису. Коэффициенты разложения представляются в виде скалярных произведений.

Вернемся к физическому смыслу векторов и наблюдаемых. Естественно возникает вопрос, какое значение (какую величину) имеет та или иная наблюдаемая $\hat{A}$ в том или ином

состоянии $|\psi\rangle$. В общем случае, отвечая на этот вопрос, нельзя назвать какое-то определенное число. Это значит, что в данном состоянии $|\psi\rangle$ наблюдаемая $\hat{A}$ не имеет какого бы то ни было определенного значения (как обязательно должно быть в классической физике). Однако для каждой наблюдаемой $\hat{A}$ имеются состояния, в каждом из которых эта наблюдаемая имеет определенное значение. Что это за состояния?

Для того, чтобы в некотором состоянии (обозначим его $|a\rangle$) наблюдаемая $\hat{A}$ имела определенное значение, равное числу a , это состояние должно удовлетворять условию

$$\hat{A}|a\rangle = a|a\rangle.$$

Другими словами, состояние $|a\rangle$ отличается тем, что оператор $\hat{A}$, действуя на него, лишь умножает его на число a . Это число обязательно вещественное, что обеспечивается эрмитовостью оператора.

Вектор $|a\rangle$, обладающий таким свойством, называется *собственным вектором* оператора $\hat{A}$, а число a — *собственным числом*, или *собственным значением*, этого оператора. Таким образом, наблюдаемая имеет в некотором состоянии определенное значение, если это состояние представляется собственным вектором этой наблюдаемой.

Собственные векторы, соответствующие различным значениям наблюдаемой, обязательно ортогональны друг другу,

$$\langle a'|a''\rangle = 0, \quad \text{если} \quad a' \neq a''.$$

Если нормировать собственные векторы $|a\rangle$ данной наблюдаемой, то они образуют ортонормированный базис пространства состояний, то есть любой вектор состояния можно представить в виде линейной комбинации собственных векторов:⁴

$$|\psi\rangle = \sum_a \psi_A(a)|a\rangle$$

⁴Для простоты мы предполагаем, что все собственные значения невырождены, то есть для каждого a имеется лишь один собственный вектор $|a\rangle$ (определенный с точностью до числового множителя).

(если множество собственных значений является непрерывным, то вместо суммы следует использовать интеграл).

Появляющиеся здесь коэффициенты $\psi_A(a)$ имеют вид функции от аргумента a . Это не что иное как волновая функция состояния $|\psi\rangle$ в представлении наблюдаемой $\hat{A}$. В состоянии $|\psi\rangle$, которое выражается такой суммой, наблюдаемая $\hat{A}$ не имеет никакого определенного значения. Исключение составляет лишь случай, когда функция $\psi_A(a)$ отлична от нуля лишь для одного единственного значения аргумента $a = a'$. Тогда сумма сводится лишь к одному слагаемому $|a'\rangle$.

Если базисные векторы $|a\rangle$ нормированы, то для них имеет место соотношение

$$\sum_a |a\rangle\langle a| = 1.$$

Поддействовав обеими частями этого равенства на произвольный вектор $|\psi\rangle$, получим

$$|\psi\rangle = \sum_a |a\rangle\langle a|\psi\rangle = \sum_a \langle a|\psi\rangle \cdot |a\rangle,$$

что позволяет уточнить коэффициенты разложения в равенстве, приведенном выше:

$$\psi_A(a) = \langle a|\psi\rangle,$$

то есть фактически дает выражение для волновой функции в представлении произвольной наблюдаемой.

Эта формула связывает между собой формализм Дирака, использующий бра- и кет-векторы, и обычный формализм волновых функций. Для того, чтобы продемонстрировать, как она работает, применим ее к случаю координатного и импульсного представлений волновой функции.

Волновая функция в координатном представлении равна, согласно этой формуле, $\psi(q) = \langle q|\psi\rangle$, где $|q\rangle$ — состояние, в котором координата $\hat{q}$ имеет определенное значение q . Волновая функция в импульсном представлении имеет вид

$\tilde{\psi}(p) = \langle p | \psi \rangle$, где $|p\rangle$ — состояние, в котором импульс $\hat{p}$ имеет определенное значение p . Используя формулы

$$\int dq |q\rangle \langle q| = 1, \quad \int dp |p\rangle \langle p| = 1,$$

нетрудно найти связь между координатным и импульсным представлениями:

$$\tilde{\psi}(p) = \langle p | \psi \rangle = \langle p | \cdot \int dq |q\rangle \langle q| \cdot | \psi \rangle = \int dq \langle p | q \rangle \psi(q).$$

Скалярное произведение $\langle p | q \rangle$, фигурирующее в этой формуле, находится с использованием определений операторов $\hat{p}$ и $\hat{q}$ и оказывается пропорциональным экспоненте $\exp(-\frac{i}{\hbar}pq)$. В результате формулы перехода между координатным и импульсным представлениями принимают вид преобразования Фурье⁵

$$\psi(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{\frac{i}{\hbar}qp} \tilde{\psi}(p) dp, \quad \tilde{\psi}(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{i}{\hbar}qp} \psi(q) dq.$$

А.2. Эволюция системы и уравнение Шредингера

Изменение состояния квантовой системы с течением времени представляется *уравнением Шредингера*:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle_t = \hat{H} |\psi\rangle_t,$$

где $\hat{H}$ — оператор Гамильтона, или *гамильтониан*, данной системы. Гамильтониан — это оператор, соответствующий наблюдаемой энергии. Этот оператор получается, если взять

⁵Для фиксации коэффициента важна нормировка векторов $|q\rangle$ и $|p\rangle$. Их нельзя, как обычно, нормировать на единицу (так как соответствующие наблюдаемые имеют непрерывные спектры). Вместо этого их нормируют на дельта функцию, то есть полагают $\langle q' | q'' \rangle = \delta(q' - q'')$ и $\langle p' | p'' \rangle = \delta(p' - p'')$, где дельта-функция определяется условием $\int dx \delta(x) f(x) = f(0)$. В вычислениях используется разложение дельта-функции в интеграл Фурье: $\delta(x) = (1/2\pi) \int dy \exp(ixy)$.

обычное (известное из классической теории) выражение энергии системы через ее координаты и импульсы, а потом вместо координат и импульсов подставить в это выражение соответствующие квантовые операторы координат и импульсов.

Например, кинетическая энергия свободной классической частицы равна $p^2/2m$, а если на частицу действует сила, описываемая потенциальной энергией $V(q)$, то полная энергия частицы равна $p^2/2m + V(q)$. Поэтому гамильтониан квантовой частицы имеет вид

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\hat{q}).$$

Если состояние системы описывать не вектором состояния $|\psi\rangle_t$, а волновой функцией $\psi_t(q)$ и использовать выражения для операторов координаты и импульса в координатном представлении (приложение А.1), то уравнение Шредингера для частицы принимает вид дифференциального уравнения второго порядка:

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi_t(q) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial q^2} + V(q) \right] \psi_t(q).$$

Удобно описывать эволюцию системы при помощи *оператора эволюции* U_t , который вектор состояния в любой момент времени t' переводит в вектор состояния, относящийся к более позднему моменту $t' + t$:

$$|\psi\rangle_{t'+t} = U_t |\psi\rangle_{t'}.$$

Из того, что вектор состояния должен удовлетворять уравнению Шредингера, следует, что оператор эволюции тоже удовлетворяет этому уравнению:

$$i\hbar \frac{d}{dt} U_t = \hat{H} U_t.$$

Если гамильтониан $\hat{H}$ не зависит явно от времени (то есть в любой момент времени выражается одной и той же функцией

координат и импульсов), то из этого уравнения легко получается очень простое выражение для оператора эволюции в виде экспоненты от гамильтониана, умноженного на время:⁶

$$U_t = e^{-\frac{i}{\hbar} \hat{H} t}.$$

Для дальнейшего особенно важным является то обстоятельство, что *уравнение Шредингера является линейным* (то есть вектор состояния или волновая функция входит в него лишь в первой степени). Это значит, что при эволюции вектор состояния или волновая функция преобразуется линейно. В частности, это означает, что *оператор эволюции U_t — это линейный оператор*, то есть соотношение

$$U_t(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle) = c_1U_t|\psi_1\rangle + c_2U_t|\psi_2\rangle$$

выполняется для любых векторов состояния $|\psi_i\rangle$ и любых комплексных чисел c_i .

Свойство линейности квантовомеханической эволюции очень важно. Если учесть это свойство при анализе квантовых измерений, то возникает необходимость многомировой интерпретации квантовой механики, см. главу 5.

Здесь мы дадим формальное описание квантового измерения, которое предложил фон Нейман и которое принято в копенгагенской интерпретации квантовой механики. Затем мы опишем измерение как взаимодействие с прибором и выведем явление декогеренции, происходящее при измерении.

А.3. Описание квантового измерения редукцией фон Неймана

Простейшее измерение — это дихотомическое измерение, которое позволяет различить два альтернативных состояния

⁶Экспонента $e^{\hat{A}}$ от любого оператора $\hat{A}$ получается, если обычную экспоненту e^x разложить в ряд Тейлора и затем в этом разложении положить $x = \hat{A}$.

(или два класса состояний). Природа альтернативных состояний может быть различна и не имеет значения при формальном описании измерения. Это может быть два уровня энергии атома, и тогда измерение говорит о том, на каком из этих уровней находится атом. Вместо этого альтернативные результаты измерения могут говорить о том, в какой из двух областей расположена частица, и так далее.

Обозначим альтернативные состояния нашей системы через $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ (например, одно из них соответствует локализации частицы в области A_1 , а другое — в области A_2). Будем предполагать, что эти состояния нормированы и ортогональны, то есть $\langle\psi_1|\psi_2\rangle = 0$. Пусть перед измерением система находилась в состоянии $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, то есть ее состояние было суперпозицией тех состояний, которые различает наше измерение (будем считать состояние нормированным, так что $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$). Что может в этом случае получиться в результате измерения и каким будет состояние системы после измерения?

Согласно постулату фон Неймана,⁷ измерение может альтернативно 1) дать результат 1 и перевести систему в состояние $|\psi_1\rangle$ или 2) дать результат 2 и перевести систему в состояние $|\psi_2\rangle$. При этом первый результат может получиться с вероятностью $|c_1|^2$, а второй — с вероятностью $|c_2|^2$. Это можно выразить схемой

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle \xrightarrow{\text{meas}} \begin{cases} |\psi_1\rangle, & \text{Prob}_1 = |c_1|^2 \\ |\psi_2\rangle, & \text{Prob}_2 = |c_2|^2 \end{cases}$$

То изменение состояния, которое, согласно постулату фон Неймана, происходит при измерении, называется *редукцией состояния* или *коллапсом волновой функции*. Редукция состояния подробно обсуждается в части II, так как именно понятие о редукции ведет к парадоксам квантовой механики. Парадокс-

⁷См. Иоганн фон Нейман, Математические основы квантовой механики, пер. с англ., Наука, Москва, 1964.

сы возникают из-за того, что квантовое измерение, описываемое редукцией, отличается одной удивительной (с точки зрения классической физики) чертой: то свойство состояния, которое обнаруживается при измерении, не существовало до измерения. Покажем это на простом примере дихотомического измерения.

Измерение имело своей целью выяснить, каким из двух свойств, обозначаемых номерами 1 и 2, обладает система. После измерения система находится либо в состоянии $|\psi_1\rangle$, в котором она обладает свойством 1, либо в состоянии $|\psi_2\rangle$, в котором она обладает свойством 2. Однако до измерения она была в суперпозиции этих состояний, то есть *не обладала ни тем, ни другим свойством*. Например, если в измерении выясняется, в какой из двух областей A_1 или A_2 находится частица, то до измерения эта частица может не обладать ни свойством «быть в области A_1 », ни свойством «быть в области A_2 ».

Это обстоятельство радикально отличает квантовое измерение от классического: свойство, обнаруживаемое при измерении, возникает на самом деле лишь после измерения, но не существует до него. До измерения имеется лишь потенциальная возможность для того, чтобы это свойство было обнаружено при измерении (в то же время имеется потенциальная возможность обнаружить и другое, альтернативное свойство). Исключением является ситуация, когда до измерения система уже была либо в состоянии $|\psi_1\rangle$, либо в состоянии $|\psi_2\rangle$, то есть уже обладала свойством, которое должно выявить измерение. В такой вырожденной ситуации квантовое измерение теряет свою специфику и ничем по существу не отличается от классического.

Для общности приведем еще формулы, которые описывают более сложные измерения. Сначала сформулируем постулат фон Неймана для того же самого измерения, но в другой, математически эквивалентной форме. Для этого введем операторы $P_1 = |\psi_1\rangle\langle\psi_1|$ и $P_2 = |\psi_2\rangle\langle\psi_2|$. Эти операторы 1) являются проекторами, то есть удовлетворяют соотношениям

$(P_1)^2 = P_1$, $(P_2)^2 = P_2$, 2) ортогональны друг другу, то есть $P_1 P_2 = P_2 P_1 = 0$, и 3) образуют полную систему проекторов, то есть в сумме дают единичный оператор: $P_1 + P_2 = 1$. В терминах этих проекторов схему того же самого измерения можно записать следующим образом:⁸

$$|\psi\rangle \xrightarrow{\text{meas}} \begin{cases} P_1|\psi\rangle, & \text{Prob}_1 = \langle\psi|P_1|\psi\rangle \\ P_2|\psi\rangle, & \text{Prob}_2 = \langle\psi|P_2|\psi\rangle \end{cases}$$

Измерение более общего типа имеет более двух альтернативных исходов. Тогда оно описывается полной системой $\{P_i\}$ ортогональных проекторов ($P_i^2 = P_i$, $P_i P_j = 0$, если $i \neq j$, и $\sum_i P_i = 1$) по схеме

$$|\psi\rangle \xrightarrow{\text{meas}} P_i|\psi\rangle, \quad \text{Prob}_i = \langle\psi|P_i|\psi\rangle$$

Наконец, имеется еще более общий тип измерения, описываемый произвольной системой операторов $\{R_i\}$ (не являющихся проекторами и даже не обязательно эрмитовых), подчиненных лишь условию нормировки $\sum_i R_i^\dagger R_i = 1$. В таком измерении состояние измеряемой системы меняется в соответствии со схемой

$$|\psi\rangle \xrightarrow{\text{meas}} R_i|\psi\rangle, \quad \text{Prob}_i = \langle\psi|R_i^\dagger R_i|\psi\rangle$$

А.4. Матрица плотности

До сих пор мы говорили, что состояния квантовой системы представляются векторами состояния $|\psi\rangle$, которые можно умножать на (комплексные) числа и складывать. Более точно такие состояния, описываемые векторами, называются *чистыми состояниями*. Однако часто приходится иметь дело с ситуацией, когда вектор состояния не известен точно, но имеется частичная, вероятностная, информация о нем. Тогда говорят о *смешанном состоянии*. Это понятие необходимо при

⁸В формулах для вероятностей мы предполагаем, что исходное состояние нормировано, $\|\psi\|^2 = \langle\psi|\psi\rangle = 1$.

описании важного явления декогеренции, возникающего при квантовом измерении (см. далее приложение А.5). Джон Белл и Лев Ландау независимо друг от друга предложили для описания смешанных состояний использовать так называемые *матрицы плотности*, которые сейчас иногда называются также *статистическими операторами*.

Предположим, что вектор состояния не известен точно, но известно, что с вероятностью p_1 вектор состояния равен $|\psi_1\rangle$, а с вероятностью p_2 он равен $|\psi_2\rangle$. В этом случае матрица плотности равна $\rho = p_1|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + p_2|\psi_2\rangle\langle\psi_2|$ (предполагается, что векторы $|\psi_1\rangle$, $|\psi_2\rangle$ нормированы, иначе коэффициенты p_1 , p_2 не имеют смысла вероятностей). В более общем случае матрица плотности может быть равна

$$\rho = \sum_i p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$$

(векторы $|\psi_i\rangle$ в этой формуле предполагаются нормированными, но они не обязательно ортогональны). Это значит, что с вероятностью p_i состояние системы равно $|\psi_i\rangle$. Разумеется, все числа p_i должны быть неотрицательными, $p_i \geq 0$ и в сумме составлять единицу, $\sum_i p_i = 1$.

Если состояние описывается одним единственным вектором состояния $|\psi\rangle$, то ему тоже можно сопоставить матрицу плотности, равную $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$. В этом случае описание состояния при помощи матрицы плотности ничего нового не добавляет по сравнению с описанием в терминах векторов состояния. Состояние, которое можно представить вектором, называется *чистым состоянием*. Матрица плотности, соответствующая чистому состоянию, является проектором, то есть ее квадрат равен ей самой: $\rho^2 = \rho$. Если же состояние представляется матрицей плотности ρ , которая проектором не является (то есть не существует единственного вектора, представляющего это состояние), то оно называется *смешанным состоянием*.

Нормировка матрицы плотности осуществляется с помощью операции взятия следа, которая определяется следующим образом. Если оператор имеет вид $\hat{A} = |\psi'\rangle\langle\psi''|$, то его след равен

$$\text{Tr } \hat{A} = \text{Tr } |\psi'\rangle\langle\psi''| = \langle\psi''|\psi'\rangle.$$

Поскольку операция взятия следа линейна,

$$\text{Tr}(\alpha\hat{A} + \beta\hat{B}) = \alpha \text{Tr } \hat{A} + \beta \text{Tr } \hat{B},$$

то приведенной формулы достаточно, чтобы найти след любого оператора (для этого достаточно представить этот оператор в виде суммы операторов вида $|\psi'\rangle\langle\psi''|$).

Из вышеприведенного определения легко получить другое, эквивалентное, определение в терминах матричных элементов этого оператора (в любом ортонормированном базисе):

$$\text{Tr } \hat{A} = \sum_i \langle i|\hat{A}|i\rangle = \sum_i A_{ii}.$$

Другими словами, след матрицы — это сумма ее диагональных элементов.

Используя определение матрицы плотности и условие $\sum_i p_i = 1$, нетрудно показать, что след любой матрицы плотности равен единице:

$$\text{Tr } \rho = 1.$$

Это условие выражает собой нормировку матрицы плотности.⁹

Среднее значение наблюдаемой $\hat{A}$ в чистом состоянии $|\psi\rangle$ определяется как $\bar{A} = \langle\psi|\hat{A}|\psi\rangle$. Для смешанного состояния $\rho = \sum_i p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$ среднее значение наблюдаемой равно

$$\bar{A} = \sum_i p_i \langle\psi_i|\hat{A}|\psi_i\rangle = \text{Tr}(\rho\hat{A}).$$

⁹ Иногда удобно использовать ненормированные матрицы плотности. Ясно, что умножением на соответствующий множитель ненормированную матрицу плотности можно сделать нормированной.

Для описания состояния составной системы и составляющих ее подсистем очень важным является понятие *редуцированной матрицы плотности*.

Пусть составная система Ψ состоит из двух подсистем ψ и Φ . Тогда любой вектор состояния полной системы можно представить как суперпозицию векторов вида $|\psi'\rangle|\Phi'\rangle$ (где сомножители являются векторами состояния соответствующих подсистем). Матрица плотности составной системы выражается как линейная комбинация операторов вида

$$|\Phi'\rangle|\psi'\rangle\langle\psi''|\langle\Phi''|.$$

Предположим, что известна матрица плотности $\mathcal{R}$ составной системы. Тогда состояние ее подсистемы ψ представляется матрицей плотности

$$\rho = \text{Tr}_{\Phi} \mathcal{R},$$

которая называется *редуцированной матрицей плотности*.

Здесь фигурирует операция взятия частичного следа по состояниям системы Φ , определяемая как¹⁰

$$\text{Tr}_{\Phi}(|\Phi'\rangle|\psi'\rangle\langle\psi''|\langle\Phi''|) = \langle\Phi''|\Phi'\rangle \cdot |\psi'\rangle\langle\psi''|.$$

Важно, что даже если состояние составной системы является чистым (то есть представляется вектором), то состояние ее подсистемы как правило оказывается смешанным, то есть не может быть описано никаким определенным вектором. В приложении А.5 мы используем редуцированную матрицу плотности для описания очень важного явления декогеренции, возникающего при измерении квантовой системы.

А.5. Физика квантового измерения: запутанные состояния и декогеренция

В приложении А.3 мы видели, что измерение можно представить при помощи процедуры редукции фон Неймана. В

¹⁰Чтобы распространить определение на любой оператор, нужно учесть, что операция Tr_{Φ} линейна.

простом примере дихотомического измерения исходное состояние $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ в процессе измерения подвергается редукции, в результате чего с вероятностью $|c_1|^2$ переходит в состояние $|\psi_1\rangle$, а с вероятностью $|c_2|^2$ — в состояние $|\psi_2\rangle$. Редукция состояния (и ее обобщения, описывающие более сложные измерения) дает правильное феноменологическое описание квантового измерения. Однако невольно возникает вопрос, что же при этом происходит «на самом деле» и как возникает такое странное преобразование состояния, как его редукция. Частичный ответ на этот вопрос дает явление декогеренции, которое мы кратко охарактеризуем, используя пример измерения с двумя альтернативными исходами.¹¹

На самом деле процесс измерения сводится к взаимодействию измеряемой системы с другой системой, которую можно назвать измерительным прибором или измерительной средой. Мы видели в приложении А.2, что *эволюция любой квантовой системы описывается линейным оператором* (оператором эволюции), то есть представляет собой линейный процесс. Если измерительный прибор рассматривать как некоторую *квантовую* систему и применять обычное квантовомеханическое описание его взаимодействия с измеряемой системой, то эволюция состояния измеряемой системы и прибора также будет линейной.

Мы покажем, что взаимодействие системы с прибором (окружением) ведет к декогеренции системы, то есть к тому, что ее состояние становится смешанным (рис. А.1 вверху). Феноменологически можно описать изменение состояния системы, происходящее при таком взаимодействии, не рассматривая явно прибора (рис. А.1 внизу). Такое феноменологическое описание и дается постулатом редукции, который рассматривался в приложении А.3.

Предположим, что перед измерением измеряемая система находится в состоянии $|\psi\rangle$, а прибор (или измерительная си-

¹¹ Детали можно найти в книге М. Б. Менский, *Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология*. Москва, Физматлит, 2001.

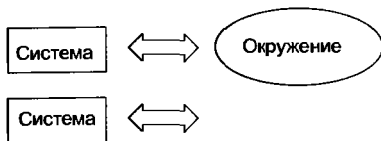


Рис. А.1. Разные способы описания взаимодействия: взаимодействие измеряемой системы с прибором, или окружением, (вверху) или редукция состояния измеряемой системы (внизу). В последнем случае влияние прибора (окружения) учитывается неявно, феноменологически.

стема, или измерительная среда) — в состоянии $|\Phi_0\rangle$.¹² Состояние обеих этих систем представляется произведением этих векторов: $|\Psi_0\rangle = |\psi\rangle|\Phi_0\rangle$. Эволюция полной системы в течение того времени, что совершается измерение, описывается некоторым оператором эволюции U , то есть после измерения состояние полной системы имеет вид $U|\Psi_0\rangle = U|\psi\rangle|\Phi_0\rangle$.

Оператор эволюции U обязательно является линейным, так как линейность эволюции — общий закон квантовой механики. Но, кроме того, чтобы он описывал взаимодействие того типа, который мы сейчас рассматриваем, этот оператор должен удовлетворять еще некоторым специальным требованиям.

Мы хотим описать взаимодействие, которое различает состояния $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ измеряемой системы. Это значит, что после измерения состояние прибора должно указывать на то, в каком из этих двух состояний находится измеряемая система. Обозначим состояния прибора, указывающие на это, через $|\Phi_1\rangle$ и $|\Phi_2\rangle$, и наложим на оператор U (то есть на характер вза-

¹² На самом деле в силу макроскопичности прибора он находится перед измерением в смешанном состоянии $\sum_{\lambda} p_{\lambda} |\Phi_0^{(\lambda)}\rangle\langle\Phi_0^{(\lambda)}|$, однако наши рассуждения могут быть применены к каждому из векторов $|\Phi_0^{(\lambda)}\rangle$ и потому верны для смешанного состояния.

имодействия между измеряемой системой и прибором) условия

$$U|\psi_1\rangle|\Phi_0\rangle = |\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle, \quad U|\psi_2\rangle|\Phi_0\rangle = |\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle.$$

Эти условия гарантируют, что оператор U описывает идеальное измерение, различающее состояния $|\psi_i\rangle$. Действительно, если система уже перед измерением была в одном из этих состояний, то после измерения прибор должен оказаться в соответствующем состоянии $|\Phi_i\rangle$. Кроме того, мы требуем, чтобы сама измеряемая система осталась при этом в том же самом состоянии. Это дополнительное требование характерно для идеального измерения.

Таким образом, если перед измерением система находилась в одном из состояний $|\psi_i\rangle$, то при измерении все происходит так, как обычно, то есть так, как в классической теории. Посмотрим теперь, что произойдет, если перед измерением система находится в произвольном состоянии

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle.$$

В этом случае состояние полной системы перед измерением имеет вид

$$|\Psi_0\rangle = (c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\Phi_0\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_0\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_0\rangle.$$

После измерения это состояние просто в силу линейности оператора U (и условий, которые мы на него наложили) перейдет в состояние

$$|\Psi\rangle = U|\Psi_0\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle.$$

О состоянии вида $|\Psi_0\rangle = |\psi\rangle|\Phi_0\rangle$ говорят, что оно *факторизованное*, потому что представляется произведением векторов состояния подсистем. Состояние каждой из подсистем в этом случае характеризуется определенным вектором состояния. Состояние $|\Psi\rangle$ после измерения относится к классу *запутанных состояний* (entangled states) двух подсистем (в данном случае — измеряемой системы и прибора). Говорят, что

в запутанном состоянии между двумя подсистемами имеется *квантовая корреляция*.

Запутанное состояние невозможно представить в виде произведения двух векторов состояния, относящихся к подсистемам (нельзя факторизовать). Это значит, что хотя составная система (Измеряемая Система + Прибор) находится в чистом состоянии (т. е. ее состояние представимо вектором состояния, в данном случае $|\Psi\rangle$), но ни одна из подсистем, рассматриваемая отдельно, не находится ни в каком определенном чистом состоянии (т. е. не может быть представлена никаким вектором состояния).

Если все же мы хотим рассматривать состояние лишь одной подсистемы, то оно оказывается смешанным, то есть характеризуется не вектором, а матрицей плотности. Эту матрицу плотности можно найти как *редуцированную матрицу плотности* (см. приложение А.4).

Используя матрицу плотности полной системы $\mathcal{R} = |\Psi\rangle\langle\Psi|$ и вычисляя частичный след по степеням свободы Φ , мы получим для измеряемой системы редуцированную матрицу плотности в виде¹³

$$\rho = \text{Tr}_{\Phi}(|\Psi\rangle\langle\Psi|) = |c_1|^2|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |c_2|^2|\psi_2\rangle\langle\psi_2|.$$

Как мы уже говорили в приложении А.4, смешанное состояние можно интерпретировать как вероятностное распределение по некоторому набору чистых состояний. В данном случае матрица плотности ρ означает, что подсистема с вероятностью $|c_1|^2$ находится в чистом состоянии $|\psi_1\rangle$ и с вероятностью $|c_2|^2$ — в чистом состоянии $|\psi_2\rangle$. Нетрудно видеть, что это соответствует обычному вероятностному описанию квантового измерения, то есть постулату редукии (см. приложение А.3): измерение с вероятностью $|c_1|^2$ может дать первый результат (и тогда измеряемая система окажется в состоянии $|\psi_1\rangle$), а с

¹³При вычислении частичного следа возникают скалярные произведения $\langle\Phi_i|\Phi_j\rangle$, и если (как мы предполагаем) состояния $|\Phi_1\rangle$ и $|\Phi_2\rangle$ ортогональны и нормированы, то как раз и получается выражение, которое записано справа.

вероятностью $|c_2|^2$ — второй результат (система в состоянии $|\psi_2\rangle$).

Итак, если перед измерением измеряемая система находится в чистом состоянии $|\psi\rangle$, то после измерения она переходит в смешанное состояние ρ , которое соответствует феноменологическому описанию измерения (редукции фон Неймана).

Переход чистого состояния $|\psi\rangle$ в смешанное состояние ρ называется *декогеренцией*, потому что сопровождается потерей информации об относительной фазе комплексных коэффициентов c_1, c_2 . В данном случае декогеренция подсистемы произошла в результате того, что эта подсистема провзаимодействовала с другой подсистемой и это привело к запутыванию состояний (квантовой корреляции) двух подсистем.

Чистое состояние $|\psi\rangle$, в котором система находилась перед измерением, тоже можно отобразить матрицей плотности, $\rho_0 = |\psi\rangle\langle\psi|$. Если выразить матрицу плотности ρ_0 через векторы $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle$, то окажется, что она отличается от ρ наличием недиагональных членов, пропорциональных $|\psi_1\rangle\langle\psi_2|$ и $|\psi_2\rangle\langle\psi_1|$. Для наглядности векторы можно представить как двухкомпонентные векторы-столбцы, а матрицы плотности — как матрицы 2×2 . Тогда вектор $|\psi\rangle$ представляется столбцом с компонентами c_1 и c_2 , а матрицы плотности ρ_0 и ρ равны соответственно

$$\rho_0 = \begin{bmatrix} |c_1|^2 & c_1 c_2^* \\ c_2 c_1^* & |c_2|^2 \end{bmatrix}, \quad \rho = \begin{bmatrix} |c_1|^2 & 0 \\ 0 & |c_2|^2 \end{bmatrix}.$$

Поэтому *декогеренцию* определяют еще как *исчезновение недиагональных элементов матрицы плотности*.

Таким образом, если после измерения мы хотим описать только измеряемую систему, не включая в описание прибор, то мы вынуждены пользоваться уже не вектором состояния, а матрицей плотности, не чистыми состояниями, а смешанными. Важно, что матрица плотности выводится обычными

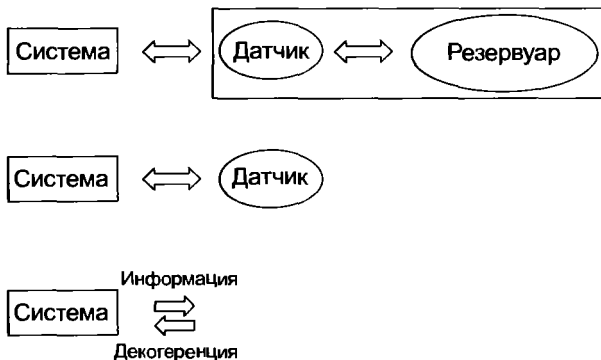


Рис. А.2. Обратимая (в середине) и необратимая (вверху) декогеренция. Необратимость возникает в случае, если окружение системы, вызывающее ее декогеренцию, содержит макроскопическую часть (резервуар), так как огромное число степеней свободы резервуара невозможно контролировать так, чтобы обратить процесс. Декогеренция зависит от информации о системе, которая уходит в окружение, что феноменологически описывается операцией редукции (нижняя часть рисунка).

квантовомеханическими методами и содержит в себе вероятностное распределение по различным результатам измерения.

В предыдущих рассуждениях описание прибора (или, в другой терминологии, окружения измеряемой системы) является настолько общим, что оно применимо и в том случае, если это окружение является микроскопическим или мезоскопическим, например, содержит небольшое количество атомов или фотонов. И в самом деле, явление декогеренции появляется даже в случае мезоскопического окружения системы. Однако если окружение является макроскопическим, то декогеренция оказывается необратимой (рис. А.2).

Причина этого состоит в том, что макроскопическое число степеней свободы практически невозможно контролировать так, чтобы обратить вспять процесс, который привел к декоге-

ренции, и вернуть систему в ее исходное состояние. В том случае, если макроскопическое окружение, приводящее к декогеренции, специально сконструировано для измерения (в этом случае его можно назвать измерительным прибором), в нем обычно можно различить 1) микроскопические степени свободы, которые непосредственно реагируют на состояние измеряемой системы, то есть выполняют роль датчика, и 2) резервуар, состоящий из макроскопического числа степеней свободы (например, газ состоящий из огромного числа атомов) и обеспечивающий необратимость декогеренции, то есть классический характер измерения.

Очень часто процесс, физически эквивалентный квантовому измерению, возникает спонтанно, а не организован намеренно. Тогда окружение «измеряемой» (то есть декогерирующей) системы может содержать лишь резервуар, взаимодействующий непосредственно с измеряемой системой, но никакой микроскопической системы, играющей роль датчика, выделить нельзя.

Для понимания декогеренции важно, что ее характер зависит от той информации о состоянии системы, которая остается в ее окружении. При феноменологическом описании измерения посредством процедуры редукции зависимость декогеренции от информации (динамическая роль информации) очевидна. Действительно, изменение состояния системы описывается в этом случае действием одного из проекторов, а конкретный выбор этого проектора определяется результатом измерения. Это символически изображено на рис. А.2 внизу.

Если нас интересуют только вероятностные предсказания (а этого вполне достаточно для практических целей) и никакой более глубокий анализ нам не нужен, то можно считать, что матрица плотности и явление декогеренции, которое она представляет, дают полную картину квантового измерения.

Более глубокий анализ, проведенный в части II книги, обнаруживает в этой картине неполноту, которая приводит к знаменитым парадоксам квантовой механики. Возникающие

при этом концептуальные трудности не затрагивают практические аспекты квантовой механики и нисколько не влияют на способность ее объяснять явления микромира и служить основой для расчетов реальных процессов. Однако концептуальные проблемы представляют интерес с принципиальной точки зрения, а попытки решить их ведут к интересным выводам, касающимся не только квантовой механики, но и вообще понятия реальности и отношения сознания к реальности.

А.6. Непрерывные измерения

Квантовое измерение проще всего описать, если пренебречь его длительностью, то есть представить как мгновенное измерение. Так мы и делали до сих пор. При описании мгновенного измерения в качестве альтернатив выступают векторы состояния, представляющие компоненты суперпозиции. В простейшем примере, который мы использовали, это были векторы $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ измеряемой системы или векторы $|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$, описывающие альтернативные состояния измеряемой системы и соответствующие им состояния прибора, или измеряющей среды.

В общем случае, однако, длительностью квантового измерения пренебречь нельзя, и следует учесть, что измерение происходит непрерывно. Возникает понятие *непрерывного квантового измерения*. Для него альтернативные результаты измерения можно представлять *коридорами путей*.

Иногда продолжительность непрерывного измерения велика. Особенно это касается ситуации, когда «квантовое измерение» не организуется специально экспериментатором, а возникает спонтанно в результате неконтролируемых взаимодействий квантовой системы с ее окружением. В этом случае окружение часто называют резервуаром.¹⁴

¹⁴ По всей видимости, назрела необходимость в более развитой терминологии, в которой для спонтанного непрерывного измерения использовался бы другой термин, однако пока такого термина нет.

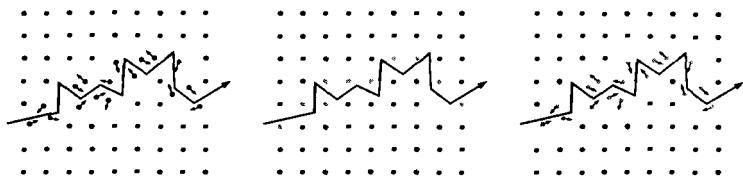


Рис. А.3. Квантовая диффузия. Частица, пролетая через среду, состоящую из атомов, оставляет в ней свой след: ближайшие к ней атомы смещаются (на рисунке слева), или переходят в возбужденное состояние (в середине), или возникают оба эффекта (справа).

В качестве простейшего примера спонтанно возникающего непрерывного измерения может служить «квантовая диффузия», то есть движение микроскопической частицы через некоторую среду, играющую роль резервуара (рис. А.3). На своем пути такая частица постоянно взаимодействует с атомами среды, которые оказываются вблизи нее. В результате состояние атомов меняется. Они могут сместиться со своего положения равновесия, или перейти в возбужденное состояние, или могут возникнуть оба эти эффекта. В итоге в резервуаре остается информация о положении движущейся частицы и ее импульсе, происходит непрерывное измерение (с некоторым конечным разрешением) траектории этой частицы. Обратное влияние окружающей среды (резервуара) на частицу можно рассматривать как эффект ее измерения этой средой.

Непрерывное измерение можно представить как последовательность большого количества мгновенных измерений, происходящих достаточно часто. Вместо этого его можно описать при помощи пучков *фейнмановских путей*, которые для наглядности можно представлять себе как *коридоры путей*.¹⁵

В этом случае используется подход к квантовой механике, предложенный Ричардом Фейнманом и обладающий боль-

¹⁵См. М. Б. Менский, *Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология*. Москва, Физматлит, 2001.

шой эвристической силой, в том числе при сопоставлении квантовой механики с классической. До Фейнмана было распространено мнение, что понятие траектории частицы в квантовой механике, в отличие от классической, вообще не имеет смысла. Фейнман же предложил такое описание квантовых систем (в частности, частиц), в которых как раз траектории, или пути, играют главную роль. Отличие от классической физики состоит в том, что в квантовой механике не только нельзя выделить один определенный путь, но нельзя даже сопоставить различным путям вероятности. Вместо этого отдельным путям сопоставляются *амплитуды вероятности*.

Проиллюстрируем понятие амплитуды вероятности и его роль на простом примере двухщелевого эксперимента.

В квантовой механике если некоторое событие может происходить различными способами или, как говорят, через разные каналы, то каждому такому каналу сопоставляется амплитуда вероятности. Например, если частица (скажем, электрон), двигаясь от источника до детектора, проходит через одну из двух щелей в непрозрачном экране, то вводятся амплитуды вероятности U_1 и U_2 прохождения через каждую из этих щелей. Каждая из этих амплитуд является комплексным числом, которое можно найти, пользуясь правилами квантовой механики. Разумеется, амплитуды U_1 и U_2 зависят от положения детектора. Полная амплитуда вероятности того, что частица достигнет детектора, равна в этом случае $U = U_1 + U_2$.

Зная полную амплитуду вероятности события, можно найти вероятность этого события как квадрат модуля амплитуды вероятности:

$$\text{Prob} = |U|^2 = |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* U_2 + U_2^* U_1.$$

Вычисления показывают, что последние два члена в правой части («перекрестные члены») приводят к интерференционной картине. При изменении положения детектора вероятность его срабатывания периодически увеличивается и опять уменьшается — возникают интерференционные полосы (с фи-

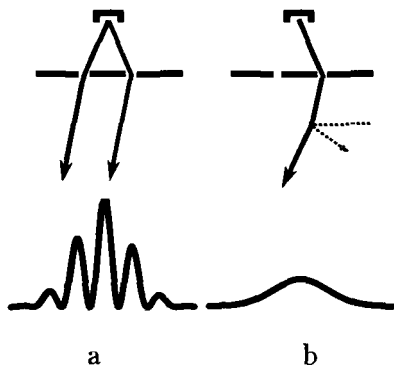


Рис. А.4. Двухщелевой эксперимент и эксперимент типа Который Путь. При пролете электрона через две щели в непрозрачном экране возникает интерференционная картина. Она исчезает, если на пути электрона имеется устройство, дающее информацию о том, через какую щель он пролетел.

зической точки зрения это является проявлением волновых свойств электрона).

Картина кардинально меняется, если на пути электрона поставить устройство, которое дает информацию о том, через какую щель он прошел. В этом случае прохождение через щель с номером i можно характеризовать вероятностью $\text{Prob}_i = |U_i|^2$. Полная вероятность того, что электрон достигнет детектора, равна в этом случае

$$\text{Prob} = \text{Prob}_1 + \text{Prob}_2 = |U_1|^2 + |U_2|^2.$$

Поскольку теперь перекрестные члены отсутствуют, никакого периодического изменения вероятности в зависимости от положения детектора уже не будет, и интерференционная картина исчезает.

В проведенном рассуждении интересен и принципиальный, и технический аспекты. Движение квантовой частицы характеризуется амплитудой вероятности, которая зависит от

пути, вдоль которого эта частица движется. Сложение амплитуд, соответствующих разным путям, дает интерференционную картину. Если наблюдатель имеет возможность определить путь, по которому движется частица, то этот путь характеризуется уже не амплитудой, а вероятностью.¹⁶ Сложение вероятностей уже не дает интерференционной картины, волновые свойства частицы не проявляются.

Вот этот формализм амплитуд вероятности и использовал Фейнман в своем подходе к квантовой механике. Он предложил эволюцию любой квантовой системы описывать так, будто она движется по различным путям, и каждому пути приписать амплитуду вероятности.¹⁷ Тогда расчет любого процесса сведется к сложению амплитуд, соответствующих разным путям, то есть к интегрированию по путям (рис. А.5 слева).

В этой книге не используются конкретные формулы для фейнмановских амплитуд, однако приведем их для общности изложения (все эти достаточно сложные формулы можно пропустить). Каждому пути $[q]$ Фейнман предложил сопоставить амплитуду вероятности, равную мнимой экспоненте от классического действия (в единицах $\hbar$), вычисленного вдоль этого пути:

$$U[q] = \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} S[q] \right\}, \quad S[q] = \int_{t'}^{t''} L(q(t), \dot{q}(t), t) dt,$$

где L — *лагранжиан* системы, представляющий собой разность ее кинетической и потенциальной энергий. Полная амплитуда вероятно-

¹⁶ Кроме вероятностей, и в этом случае также имеются амплитуды U_i , однако в вычислении полной вероятности Prob фигурируют лишь вероятности $\text{Prob}_i = |U_i|^2$.

¹⁷ Если система характеризуется координатами $q_1, q_2, \dots, q_n$, то ее путь характеризуется изменением этих координат с течением времени, $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$.

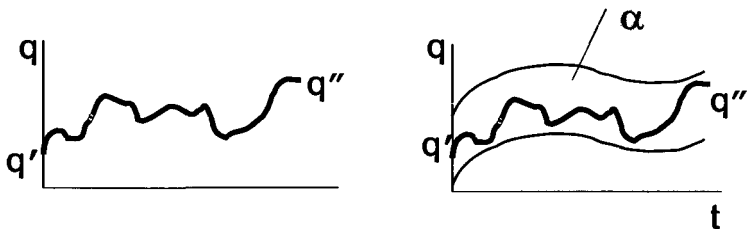


Рис. А.5. Описание непрерывного измерения ограниченным интегралом по путям. Эволюция системы вдоль определенного пути представляется амплитудой, зависящей от этого пути. Эволюция изолированной системы представляется суммой таких амплитуд, то есть интегралом по всем путям (слева). Эволюция непрерывно измеряемой системы представляется интегралом по путям, лежащим в определенном коридоре α . Этот коридор представляет результат непрерывного измерения, например, слежения (с конечной точностью) за координатой системы.

сти перехода из точки q' в точку q'' выражается в подходе Фейнмана интегралом по всем путям, соединяющим эти точки:

$$\begin{aligned} U(q'', t'' | q', t') &= \int_{q'}^{q''} U[q] d[q] \\ &= \int_{q'}^{q''} \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \int_{t'}^{t''} L(q(t), \dot{q}(t), t) dt \right\} d[q]. \end{aligned}$$

Получающаяся таким образом амплитуда, которая называется *пропэгатором* системы, позволяет описать ее эволюцию и эквивалентна уравнению Шредингера. Эквивалентно пропэгатор можно выразить как интеграл по путям в пространстве координат (между точками q' и q'') и путям в пространстве импульсов:

$$U(q'', t'' | q', t') = \int_{q'}^{q''} d[q] d[p] \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \int_{t'}^{t''} dt [p(t)\dot{q}(t) - H(p, q, t)] \right\}.$$

Здесь $H(p, q, t)$ — (классический) гамильтониан системы. Пространство, точки которого характеризуются координатами и импульсами,

называется фазовым пространством. Поэтому последнее выражение представляет собой интеграл по путям в фазовом пространстве.

Коридоры путей по отношению к квантовомеханическим процессам играют ту же роль, что процедура редукции по отношению к состояниям квантовых систем. В подходе Фейнмана эволюция квантовой системы описывается интегралом по всем возможным путям в конфигурационном или в фазовом пространстве этой системы. Почему фейнмановский интеграл берется по всем путям? Потому что рассматриваемая система свободна, то есть ни с чем не взаимодействует, и принципиально нет никакой возможности выяснить, по какому из фейнмановских путей она движется.

Если же система подвергается непрерывному измерению, то ее эволюция представляется интегралом по некоторому коридору путей (рис. А.5 справа). При этом сам коридор путей (обозначим его через α) соответствует результату измерения. Почему в этом случае интеграл берется не по всем путям? Потому что измерение (то есть взаимодействие с прибором) дает возможность получить (частичную) информацию о пути, по которому движется система. Эта информация как раз и представляется коридором путей.

Переход от интеграла по всем путям к интегралу по путям, лежащим в некотором коридоре α , означает, что эволюция системы в течение конечного времени подвергается «проектированию» в соответствии с результатом непрерывного измерения. Это совершенно аналогично тому, как при редукции фон Неймана состояние системы проектируется в соответствии с тем, какой результат дало мгновенное измерение этой системы. И так же, как мгновенное измерение характеризуется альтернативными состояниями системы $\{|\psi_i\rangle|\Phi_i\rangle\}$, непрерывное измерение характеризуется семейством альтернатив $\{\alpha\}$, каждая из которых представляется коридором путей. Так же, как и в случае мгновенных измерений, различные альтернативы

характеризуются вероятностями, которые могут быть рассчитаны на основе квантовой механики.¹⁸

Для анализа, проведенного в главе 5, важно, что в случае достаточно широких коридоров *каждая из альтернатив описывает квазиклассическое движение системы*, а представляющий ее коридор α есть огрубленный образ некоторой *классической траектории*.¹⁹ В то же время полностью устранить квантовые эффекты нельзя. Это сказывается в том, что квантовые коридоры, скажем α' и α'' , совпадающие на некотором отрезке, в целом могут различаться, тогда как задание некоторого отрезка классической траектории полностью определяет всю траекторию в целом.

Примером квазиклассического квантового состояния является когерентное состояние семейства фотонов. Оно максимально близко к состоянию классической волны. При известных начальных условиях эволюция когерентного состояния хорошо аппроксимируется эволюцией классической волны, которая является детерминированной, предсказуемой.

Примером нестабильного состояния является сумма или разность когерентных состояний с сильно отличающимися характеристиками (слагаемые могут, например, соответствовать классическим волнам с противоположными фазами). Такие состояния небольшого числа фотонов в последние годы успешно генерируются экспериментально, поэтому экспериментально подтверждено, что они очень быстро распадаются с образованием когерентных (то есть близких к классическим) состояний. Распад происходит за счет декогеренции, возникающей при взаимодействии с окружающей средой (от которой при любых предосторожностях нельзя вполне изолировать

¹⁸ Возможность характеризовать коридоры вероятностями (точнее, плотностями вероятности) вместо амплитуд вероятности связана с тем, что они приблизительно декогерентны, то есть интерференция между ними мала.

¹⁹ Это справедливо в том случае, если коридоры $\{\alpha\}$ представляют поведение не только измеряемой системы, но и ее окружения, или прибора (так же как для мгновенного измерения альтернативы $\{|\psi_i\rangle|\Phi_i\rangle\}$ представляют состояние и измеряемой системы, и прибора).

ся). Из-за того, что такого рода состояния представляют собой суперпозицию двух состояний, близких к сильно отличающимся классическим конфигурациям, эти состояния получили название шредингеровских котов (по аналогии с суперпозицией живого и мертвого кота в парадоксе Шредингера).

С математической точки зрения фейнмановские интегралы по путям и интегралы по коридорам путей достаточно сложны.²⁰ Однако в главе 5, где используется понятие коридора как альтернативного результата непрерывного измерения, нам не требуются конкретные вычисления. Поэтому математические трудности не являются в этом случае препятствием. Зато в общих рассуждениях можно использовать очень наглядный образ квантового коридора: измеряемая система движется по коридору, который определяется результатом измерения. И хотя в общем случае имеется в виду коридор в фазовом пространстве, для наглядности можно при этом представлять себе частицу, движущуюся по коридору в обычном нашем 3-мерном пространстве. Альтернатива в случае непрерывного измерения — это коридор путей α . А семейство альтернатив — это семейство коридоров $\{\alpha\}$.

²⁰См. М. Б. Менский, *Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология*. Москва, Физматлит. 2001.

ЗАПУТАННЫЕ СОСТОЯНИЯ И КВАНТОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

Современное развитие квантовой теории измерений привело к ясному пониманию того, что центральную роль в ней играет явление *квантовой корреляции* или *запутывания состояний* различных физических систем. В приложении А запутывание и его связь с квантовой теорией измерений рассмотрена с технической (чисто математической) точки зрения. В части II книги подробно обсуждается концептуальный аспект этого вопроса.

Впервые нетривиальный пример запутанных состояний рассматривали Эйнштейн, Подольский и Розен (см. раздел 1.8), которые на основе этих состояний сформулировали некоторые парадоксальные черты квантовой механики, то есть коснулись самого сложного вопроса, связанного с запутыванием (квантовой корреляцией). Предложенный этими авторами мысленный эксперимент (эффект ЭПР) активно обсуждался и обсуждается до сих пор с самых разных точек зрения.

Одной из важных линий обсуждения эффекта ЭПР была теорема Белла и связанная с ней дискуссия о понимании реальности в квантовой механике. С практической точки зрения чрезвычайно важным было создание в последние десяти-

летия двадцатого века целого класса новых квантовомеханических приложений, использующих квантовую корреляцию. Они были названы квантовой информатикой (см. раздел 2.4). В этом приложении мы рассмотрим технические (математические) аспекты квантово-коррелированных состояний и их приложений.

Мы начнем с анализа эффекта ЭПР и сформулируем на основе этого анализа теорему Белла. Затем проиллюстрируем специфику квантовой корреляции ярким примером так называемых «квантовых игр», в которых можно выиграть при помощи квантовых устройств, несмотря на казалось бы строгое «доказательство» невозможности выигрыша. В конце мы кратко коснемся технических аспектов квантовой информации. Несколько более подробно будет изложена простейшая схема квантовой телепортации.

В.1. Эффект (парадокс) Эйнштейна–Подольского–Розена

Впервые квантовая корреляция (для которой еще не было введено этого термина) рассматривалась в 1935 году в работе Эйнштейна–Подольского–Розена (см. раздел 1.8). Здесь мы более подробно и под другим углом зрения рассмотрим эффект ЭПР, как классический пример квантовой корреляции или запутанных состояний. Впоследствии на этой основе мы изложим основные идеи квантовой информатики.

В литературе обычно используется вариант ЭПР эффекта, предложенный позднее Дэвидом Бомом. В нем корреляция двух частиц спина $1/2$ возникает из-за того, что эти частицы рождаются при распаде частицы спина 0 (см. рис. В.1). Приведем некоторые формулы, характеризующие возникающую таким образом корреляцию.

Частица спина $1/2$ (например, электрон), кроме ее положения, характеризуется еще внутренним состоянием. Поло-

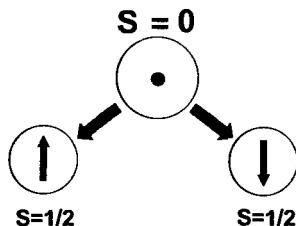


Рис. В.1. ЭПР эффект. Две частицы спина $1/2$ возникают при распаде частицы спина 0 . Вследствие этого проекции спинов двух частиц коррелированы, в том числе проекции на одну и ту же ось противоположны.

жение частицы нас в данный момент не будет интересовать.¹ Внутренняя структура такой частицы представлена спином, то есть внутренним моментом вращения, равным $s = \hbar/2$, или, если измерять его в единицах $\hbar$, равным $1/2$. Проекция спина на любую ось может быть равна $+1/2$ или $-1/2$ (то есть в размерных единицах $\pm\hbar/2$).

Предположим, что мы говорим о проекции на ось z . Оператор, соответствующий наблюдаемой «проекция на ось z », обозначим через $\hat{s}_z$. Состояния, соответствующие $s_z = +1/2$ и $s_z = -1/2$, образуют ортонормированный базис в двумерном пространстве внутренних состояний частицы. Мы обозначим эти состояния через $|z^+\rangle$ и $|z^-\rangle$. В этом базисе состояние двух частиц спина $1/2$, образующееся в результате распада частицы спина 0 , имеет вид

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|z_{(1)}^+\rangle |z_{(2)}^-\rangle - |z_{(1)}^-\rangle |z_{(2)}^+\rangle \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|z^+\rangle |z^-\rangle - |z^-\rangle |z^+\rangle \right).$$

Здесь цифрой обозначен номер частицы, а в последней части равенства номер частицы опущен, вместо этого информация о

¹Предположим лишь, что две частицы, возникшие при распаде, разлетаются настолько далеко друг от друга, что непосредственное взаимное влияние (взаимодействие) их исключено.

номере частицы передается тем, на каком месте стоит данный вектор в произведении.

В состоянии $|\psi\rangle$ имеется корреляция проекций спина первой и второй частиц: если для одной частицы $s_z = +1/2$, то для второй $s_z = -1/2$. Происхождение этой корреляции очевидно. Частицы возникли при распаде частицы спина 0. Поэтому после распада полная проекция спинов обеих частиц тоже должна быть равна нулю, то есть проекции спинов двух частиц должны быть противоположны.

Эта корреляция проявляется, если измерять для обеих частиц наблюдаемую $\hat{s}_z$: если измерение для одной из частиц даст результат $+1/2$, то для второй частицы результат обязательно будет $-1/2$, и наоборот. Такое предсказание для измерений этого типа интуитивно кажется очевидным, но можно вывести его формально, если применить формальную процедуру редукции, описанную в разделе А.3.

Действительно, измерение наблюдаемой $\hat{s}_z$ для первой частицы описывается парой проекторов $P(z_{(1)}^+) = |z_{(1)}^+\rangle\langle z_{(1)}^+|$ и $P(z_{(1)}^-) = |z_{(1)}^-\rangle\langle z_{(1)}^-|$. Предположим, что при измерении первой частицы получен результат $z_{(1)}^+$. Тогда состояние обеих частиц после измерения получается, если подействовать на исходное их состояние проектором $P(z_{(1)}^+)$. Это дает

$$P(z_{(1)}^+)|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|z_{(1)}^+\rangle|z_{(2)}^-\rangle$$

(квадрат нормы этого состояния равен $1/2$, что дает вероятность получения результата измерения $z_{(1)}^+$). Важно, что вторая частица оказывается при этом в состоянии с определенной, а именно — отрицательной проекцией спина. Поэтому произведенное в этом состоянии измерение проекции спина второй частицы гарантированно даст результат $z_{(2)}^-$.

²Формально это можно доказать с помощью проекторов $P(z_{(2)}^+) = |z_{(2)}^+\rangle\langle z_{(2)}^+|$ и $P(z_{(2)}^-) = |z_{(2)}^-\rangle\langle z_{(2)}^-|$, описывающих измерение проекции спина второй частицы на ту же ось z .

Аналогичное рассуждение показывает, что если результат измерения проекции спина первой частицы дает $z_{(1)}^-$, то для второй частицы обязательно получится $z_{(2)}^+$.

На самом деле эта простая корреляция справедлива не только для проекций спинов двух частиц ЭПР-пары на ось z , но и для проекций спинов этих частиц на произвольную ось. Рассмотрим, например, ось x и выведем аналогичную корреляцию для проекций спинов на эту ось.

Состояние $|\psi\rangle$ — это так называемое максимально запутанное состояние двух частиц спина $1/2$. Оно характеризуется тем, что в терминах проекции на любую другую ось будет выглядеть точно так же, как в терминах проекции на ось z . Например, в силу соотношений³

$$|z^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x^+\rangle + |x^-\rangle), \quad |z^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x^+\rangle - |x^-\rangle)$$

получаем

$$|\psi\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|x_{(1)}^+\rangle|x_{(2)}^-\rangle - |x_{(1)}^-\rangle|x_{(2)}^+\rangle).$$

Следует помнить, что вектор состояния, умноженный на любое число, представляет то же самое физическое состояние квантовой системы, поэтому общий знак минус в правой части этого равенства не играет роли. Из такого представления вектора $|\psi\rangle$ очевидно, что при измерении проекций спинов двух частиц на ось x будет иметь место такая же корреляция, как и для проекций спинов на ось z .

³Эти соотношения можно вывести, если представить векторы состояния как двухкомпонентные векторы-столбцы и учесть, что в этом представлении наблюдаемые $\sigma_n = 2s_n$ представляются так называемыми матрицами Паули:

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Аналогичным образом можно доказать, что ЭПР-состояние (то есть максимально коррелированное состояние двух спинов $1/2$) можно представить через проекции спинов на произвольную ось n :

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|n_{(1)}^+\rangle |n_{(2)}^-\rangle - |n_{(1)}^-\rangle |n_{(2)}^+\rangle \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|n^+\rangle |n^-\rangle - |n^-\rangle |n^+\rangle \right).$$

Это значит, что проекции спинов двух частиц на произвольную ось n абсолютно скоррелированы: если измерение одной из них дает положительный результат ($n_{(1)}^+$), то измерение второй обязательно даст отрицательный результат ($n_{(2)}^-$), и наоборот.

Такая абсолютная корреляция проекций спинов двух частиц на любую ось неизменно подтверждается экспериментально и потому может считаться достоверным фактом. Она играет важную роль в доказательстве *теоремы Белла*, которая будет обсуждаться в приложении В.2.

Формальная процедура редукции, рассмотренная выше, дает результат, который легко предвидеть с самого начала. Однако с помощью этой процедуры можно получить и такие выводы, которые не являются очевидными.

Чтобы получить менее очевидный результат, выразим в представлении вектора $|\psi\rangle$ состояния первой частицы в базисе $|z^+\rangle, |z^-\rangle$, а состояния второй частицы — в базисе $|x^+\rangle, |x^-\rangle$. Получим

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2} \left[|z_{(1)}^+\rangle \left(|x_{(2)}^+\rangle - |x_{(2)}^-\rangle \right) - |z_{(1)}^-\rangle \left(|x_{(2)}^+\rangle + |x_{(2)}^-\rangle \right) \right].$$

Такое представление удобно для анализа другого типа измерения: когда для первой частицы измеряется проекция на ось z , а для второй — на ось x . Действуя на вектор $|\psi\rangle$, представленный в такой форме, проектором $P(z_{(1)}^+)$, мы увидим, что после измерения $\hat{s}_z(1)$, которое дало результат $z_{(1)}^+$, вторая части-

ца оказывается в состоянии $|x_{(2)}^+\rangle - |x_{(2)}^-\rangle$. Значит, последующее измерение $\hat{s}_x(2)$ может (с равными вероятностями) дать как положительный, так и отрицательный результат. Вероятности таких исходов равны, потому что коэффициенты перед соответствующими слагаемыми равны по модулю.⁴

Итак, измерение проекции спина первой частицы на ось z вообще не коррелировано с измерением проекции спина второй частицы на ось x . Это же верно для любых ортогональных осей. Как мы видели ранее, корреляция на параллельные оси, наоборот, является абсолютной. Технически несколько сложнее, но принципиально так же доказывается, что корреляция оказывается частичной, если угол между осями больше нуля, но меньше прямого. Это значит, что если при измерении на первой частице получен положительный результат, то более вероятно, что на второй частице будет получен отрицательный результат.⁵

Сделаем в конце одно техническое замечание. Распад частицы спина 0 на две частицы спина 1/2 и последующее измерение проекций спинов этих частиц — процессы вполне реальные, но требующие для своей реализации сложной техники. Однако квантовую корреляцию описанного типа можно осуществить и исследовать с помощью более простой системы коррелированных пар фотонов. В этом случае вместо проекции спина измеряют поляризацию фотона в той или иной плоскости, а для получения коррелированного состояния двух фотонов используют процесс «параметрического рассеяния» фотонов в различных средах, при котором один фотон может превратиться в пару коррелированных фотонов.

⁴Чтобы показать это формально, нужно нормировать состояние второй частицы, подействовать на него соответствующим проектором и найти квадрат нормы получившегося состояния.

⁵Разумеется, вероятность отрицательного результата в этом случае можно рассчитать точно. Она оказывается равной $\cos^2(\theta/2)$, где θ — угол между осями. При $\theta = 0$ (параллельные оси) мы получаем вероятность отрицательного результата, равную единице, а при $\theta = \pi/2$ (ортогональные оси) вероятность оказывается равной 1/2, что согласуется с ранее полученными результатами.

Именно таким образом были организованы опыты по проверке теоремы Белла. Мы сейчас сформулируем эту теорему, для удобства — в терминах частиц спина $1/2$, а не поляризованных фотонов.

В.2. Неравенства Белла

Теорема Белла была доказана в 1964 году. Она состоит в том, что при определенных предположениях о том, что такое реальность, справедливы так называемые *неравенства Белла*, связывающие между собой вероятности различных исходов измерений, проведенных на коррелированных частицах. Уже после работы Джона Белла были предложены различные модификации неравенств Белла. Сформулируем и докажем одно из таких неравенств.

Неравенства Белла доказываются в предположении, что справедливо *классическое представление о реальности*. На самом деле в квантовой механике от такого понимания реальности приходится отказаться. Однако чтобы вывести неравенства Белла, мы должны принять классическое представление о реальности в качестве предположения. Поэтому пока мы будем рассуждать, опираясь на это предположение.

Выше (в приложении В.1), рассматривая измерение проекций спинов частиц, составляющих ЭПР-пару, мы выяснили, что *для проекций спинов на одну и ту же ось существует стопроцентная корреляция*: если при измерении проекция спина одной из частиц оказывается положительной, то измерение проекции спина второй частицы заведомо даст отрицательный результат, и наоборот. Обсудим, что это означает, если принять классическое понимание реальности.

Согласно классическому пониманию реальности и вытекающей из него интерпретации измерения, *то, что мы получаем как результат измерения, уже существовало до измерения*. Измерение дает нам лишь информацию, а то свойство, которое мы выявляем при измерении, существовало уже до этого

измерения. В данном случае мы должны применить это к измерению проекции спина. Значит, если при измерении проекции спина на некоторую ось мы получили положительный результат, значит, уже до измерения проекция спина на эту ось была положительной (при измерении мы лишь получили информацию об этом).

А теперь добавим к этому тот факт, что между результатами измерения проекций спинов двух частиц ЭПР-пары на одну и ту же ось имеется абсолютная корреляция. Будем рассуждать так. Мы измерили, скажем, проекцию спина второй частицы на некоторую ось и получили результат измерения: эта проекция отрицательна. Мы знаем наверняка, что если теперь мы измерим проекцию спина первой частицы на эту ось, то обязательно окажется, что эта проекция положительна. Но ведь, принимая предположение о классической реальности, мы должны сделать вывод, что даже не производя измерение проекции спина первой частицы (но зная результат измерения для второй частицы), мы уже знаем, что проекция спина первой частицы положительна. Ведь мы знаем наверняка, что ее измерение даст положительный результат, а классические представления о реальности позволяют заключить, что еще до этого измерения проекция спина первой частицы является положительной.

Итак, классическое представление о характере реальности вместе с фактом корреляции между проекциями спинов двух частиц на одну и ту же ось, делает справедливым следующее заключение. *Измерив проекцию спина второй из ЭПР-частиц на некоторую ось и получив отрицательное значение, мы знаем, что проекция спина первой частицы на ту же ось положительна, и наоборот.* Значит, чтобы узнать проекцию спина первой частицы, достаточно измерить проекцию спина второй частицы на ту же ось. Предположения, в которых такое заключение становится справедливым, называется предположением о *локальном реализме*.

Слово «локальный» появляется потому, что частицы, о ко-

торых идет речь, расположены далеко друг от друга. Желательно, чтобы они были на таком расстоянии, которое даже со скоростью света нельзя было бы преодолеть за время измерения. Тогда измерение второй частицы не может оказывать никакого непосредственного влияния на состояние первой частицы. В этом случае, рассуждая о том, к чему должно привести измерение первой частицы, мы должны принимать во внимание только ее корреляцию со второй частицей, как мы и сделали. Если бы частицы были близко друг к другу, то непосредственное влияние измерения второй частицы на измерение первой нельзя было бы исключить, так что рассуждение, опирающееся только на корреляцию, было бы некорректным.

Итак, в предположении локального реализма *чтобы узнать, чему равна проекция спина первой частицы на ось n , достаточно измерить проекцию второй частицы на ту же ось.* Это, в свою очередь, означает, что мы можем провести измерения, которые позволят нам знать одновременно проекции спина некоторой частицы на две различные оси.

Пусть, например, нам нужно знать проекции спина частицы (спина $1/2$) на оси a и b . Тогда мы составляем ЭПР-пару, в которую входит интересующая нас частица. Присвоим ей номер 1. Теперь мы можем во-первых, измерить проекцию спина первой частицы на ось a и во-вторых, измерить проекцию спина второй частицы на ось b и интерпретировать результат этого измерения как сведения о том, чему равна проекция спина первой частицы на ось b . Тем самым мы (в предположении локального реализма) получаем информацию как о проекции спина первой частицы на ось a , так и о проекции спина первой частицы на ось b .

Это позволяет при помощи экспериментов (измерений) определять вероятности типа $P(a^+b^-)$, в которых имеются в виду проекции спина одной и той же частицы на две разные оси. Например, чтобы определить вероятность $P(a^+b^-)$, нужно много раз произвести измерение проекции этой частицы на ось a и проекции ее ЭПР-партнера на ось b и посмотреть,

сколько раз такое измерение даст результат: проекция этой частицы на ось a положительна, и проекция ее партнера на ось b положительна. Если такой результат назвать положительным исходом, то величина $P(a^+b^-)$ оценивается отношением числа положительных исходов к числу всех измерений. При большом числе измерений это отношение неограниченно приближается к искомой вероятности, так что таким способом эту вероятность можно найти с любой точностью.

Теперь мы выведем неравенство Белла, которое связывает между собой вероятности этого типа. В том неравенстве, которое мы хотим вывести, фигурируют проекции спина (одной и той же частицы) на три разные оси a , b и c . Для вывода неравенства мы опять будем следовать классическому представлению о реальности, то есть предположим, что при измерениях лишь появляется информация о реальности, но сама реальность (в данном случае — величины проекций спина) существует уже до измерения.

Предположим, что реальность, существующая до измерения, описывается распределением вероятностей по различным проекциям спина нашей частицы на все три оси. Это значит, что для каждой конфигурации типа $a^+b^-c^+$ имеется вероятность $P(a^+b^-c^+)$. Тогда из этих «тройных» вероятностей можно вывести «парные» вероятности типа $P(a^+b^-)$. Это делается на основании теоремы о сложении вероятностей. Например, событие a^+b^- реализуется как в случае события $a^+b^-c^+$, так и в случае события $a^+b^-c^-$. Поскольку эти последние события являются взаимоисключающими, то вероятность события a^+b^- равна сумме вероятностей событий $a^+b^-c^+$ и $a^+b^-c^-$. Таким образом мы получаем следующие три равенства:

$$\begin{aligned} P(a^+b^-) &= P(a^+b^-c^+) + P(a^+b^-c^-) \\ P(a^-c^+) &= P(a^-b^+c^+) + P(a^-b^-c^+) \\ P(b^-c^+) &= P(a^+b^-c^+) + P(a^-b^-c^+). \end{aligned}$$

Складывая первые два из них и вычитая третье, получим

$$P(a^+b^-) + P(a^-c^+) - P(b^-c^+) = P(a^+b^-c^-) + P(a^-b^+c^+).$$

Сумма двух вероятностей, стоящая справа, есть неотрицательная величина. Поэтому и левая часть неотрицательна, то есть имеет место неравенство

$$P(a^+b^-) + P(a^-c^+) \geq P(b^-c^+).$$

Это и есть неравенство Белла (точнее, одна из форм неравенств Белла).

Как мы выяснили выше, в предположении локального реализма для всех вероятностей, входящих в неравенство Белла, можно найти экспериментальные оценки и тем самым экспериментально проверить выполнение неравенства. Если справедливо предположение о локальном реализме, то неравенство обязательно должно выполняться. В то же время расчет вероятностей по правилам квантовой механики показывает, что неравенство Белла может нарушаться, то есть квантовая механика несовместима с предположением о локальном реализме.

Были проведены эксперименты по экспериментальной проверке неравенства Белла. Оказалось, что оно нарушается, то есть предположение о локальном реализме несправедливо. С другой стороны, найденные экспериментально вероятности полностью соответствовали предсказаниям квантовой механики. Таким образом, *эксперимент подтверждает квантовую механику и прямо опровергает локальный реализм.*

Это означает, что понимание реальности в квантовой механике радикально отличается от того, которое принято в классической физике и которое интуитивно кажется очевидным. Можно сказать иначе: квантовые измерения радикально отличаются от измерений классических. Это отличие состоит в том, что свойства измеряемой системы, обнаруженные при ее измерении, могли не существовать до измерения. Эта черта

квантового измерения и ее следствия очень подробно обсуждаются в части II книги.

В.3. Квантовые игры

Квантовая корреляция наподобие той, что имеется в ЭПР-состоянии, рассмотренном в разделе В.2, используется в различных технологиях квантовой информатики. Прежде чем рассказать об этих технологиях, проиллюстрируем квантовые корреляционные эффекты на примере «квантовых игр». Суть таких игр можно сформулировать вопросом: «Как выиграть в игре, в которой выиграть нельзя?» Квантовая теория измерений показывает, как это сделать (разумеется, при некотором уточнении слова «нельзя»). Обычно это производит сильное впечатление на непосвященного.

В.3.1. Отгадывание чисел

Начнем с примера, который еще не является впечатляющим, но зато прост с математической точки зрения. Предположим, что играющий создал ЭПР пару, после чего одну из частиц взял себе, а другую отдал ведущему. После этого он сказал: измерь проекцию спина своей частицы на ось z , а я угадаю, какой ты получишь результат. Ведущий измеряет проекцию спина и получает какой-то результат. Играющий измеряет проекцию спина своей частицы и получает, скажем, $+1/2$. Тогда он сообщает ведущему: «Ты получил результат $-1/2$ ». Ответ правильный.

Этот «фокус» по сути должен вызывать изумление, но не вызывает. Должен вызывать потому, что 1) заранее неизвестно, какой результат получит ведущий, и 2) после того, как ведущий получил свой результат, играющий не получил никакой информации об этом результате. Не было, скажем, какой-то возможности подсмотреть, что видит ведущий на своих приборах. Подсказку играющий нашел *на своих приборах*, ко-

торые, после того как была создана ЭПР-пара, были полностью изолированы от приборов ведущего.

Итак, происходящее должно вызывать изумление. Но на самом деле изумления не возникает, потому что предполагается возможность обмана, а доказать, что обмана нет, играющий не может. Действительно, если бы он задумал обман, то мог бы дать ведущему устройство, которое выдаст ему результат, который заранее ему, играющему, известен. Только сам играющий знает, что такого трюка не было. Но доказать, что его действительно не было, он не может.

Эту игру легко усложнить следующим образом. Играющий дает ведущему «генератор случайных чисел», а после того, как ведущий получает из этого генератора некоторое число, играющий его угадывает, несмотря на то, что он находится в изолированной (в том числе и от радиоволн) комнате и не может получать никакой информации.

Эта игра строится следующим образом. Имеется две квантовых системы, A и B , каждая из которых может находиться в одном из N ортогональных состояний. Эти два устройства приводятся в состояние, когда они коррелированы друг с другом:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \left(|1\rangle_A |1\rangle_B + |2\rangle_A |2\rangle_B + |3\rangle_A |3\rangle_B + \dots |N\rangle_A |N\rangle_B \right).$$

После этого устройство A отдается ведущему. Если он производит измерение этой системы, которое определяет различие между состояниями $|i\rangle$, то устройство работает как генератор случайных чисел, выдавая с равной вероятностью любой из результатов $i = 1, 2, \dots, N$. Играющий легко угадает результат ведущего, если произведет такое же измерение со своим устройством. Оно обязательно даст тот же самый результат, что и у ведущего. Это измерение можно произвести где угодно (в сколь угодно хорошо изолированном помещении) и когда угодно (даже раньше, чем ведущий произведет свое измерение). Совпадение результатов обеспечивается не наличием

некой секретной линии связи, а заранее организованной квантовой корреляцией, которая сохраняется при любом перемещении устройств и при полной их изоляции друг от друга.

Но и эта игра не производит сильного впечатления, если предполагается возможность обмана. Действительно, трудно абсолютно достоверно доказать, что ведущему не было вручено устройство, которое выдает результат, заранее известный играющему.

Однако поскольку на самом деле обмана здесь нет, можно, несколько усложнив правила игры, добиться того, чтобы сделать ее абсолютно убедительной, то есть чтобы «выиграть в игре, в которой выиграть нельзя».

В.3.2. Игра, основанная на корреляции GHZ

Поразительный пример квантовой игры можно построить на основе GHZ корреляции, которая называется так по именам предложивших ее физиков Гринбергера, Хорна и Цайлингера.⁶

Игра проводится командой из трех игроков А, В и С. Игра организована следующим образом:

- Любые приготовления перед игрой разрешаются, затем игроки А, В и С разделяются так, что связь между ними становится невозможной. Для абсолютного исключения пересылки сигнала за время Δt игроки могут располагаться далеко друг от друга, на расстоянии $l > c\Delta t$, где c — скорость света (например, на спутниках, движущихся так, что все время остаются далеко друг от друга).
- В определенный момент t каждому игроку задают один из двух возможных вопросов: «Чему равен X ?» или «Чему равен Y ?»

⁶См. статью D. M. Greenberger, M. A. Horne, and A. Zeilinger, в сборнике M. Kafatos (editor), *Bell Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe*, Kluwer, Dordrecht, p. 69, 1989, и статью N. D. Mermin, *Am. J. Phys.* **58**, 731 (1990).

- Каждый игрок должен дать ответ $+1$ или -1 .
- Ответ должен быть дан в течение времени Δt , пока игрок еще не может получить послание от другого игрока.

Условия игры таковы:

- Либо всем трем игрокам задают вопрос об X ,
- либо одному игроку — об X , а двум другим — об Y .
- Если всем задан вопрос об X , то команда игроков выигрывает в случае, если произведение трех ответов равно -1 .
- Если одному задан вопрос об X , а двум другим — об Y , то команда игроков выигрывает в случае, если произведение трех ответов равно $+1$.

Рассмотрим вопрос: Что должны делать игроки, чтобы выиграть наверняка? Ответ состоит в том, что это невозможно.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО невозможности выиграть наверняка:

- Поскольку пересылать сообщения невозможно, то откладывать ответ до получения вопроса не имеет смысла и можно заготовить заранее ответ каждого игрока на каждый из возможных вопросов, то есть числа $\{X_A, Y_A; X_B, Y_B; X_C, Y_C\}$, каждое из которых равно $+1$ или -1 .
- Чтобы выиграть наверняка, эти числа должны удовлетворять условиям

$$X_A X_B X_C = -1,$$

$$X_A Y_B Y_C = 1, \quad Y_A X_B Y_C = 1, \quad Y_A Y_B X_C = 1.$$

- Это невозможно, потому что произведение всех левых частей этих уравнений есть полный квадрат и потому равно $+1$, а произведение всех правых частей равно -1 .

Итак, мы «абсолютно строго» доказали, что команда трех игроков не может так подготовиться, чтобы выиграть наверняка. Однако это «доказательство» опирается на интуицию, работающую лишь в классическом мире. В нем не предполагается наличия квантовых устройств. Если же такие устройства используются, то команда трех игроков может подготовиться так, чтобы выиграть наверняка.

Решение, основанное на теории спина, квантовой корреляции и квантовой теории измерений, предполагает создание следующего коррелированного состояния трех спинов A , B и C :

$$|GHZ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|z^+\rangle_A |z^+\rangle_B |z^+\rangle_C - |z^-\rangle_A |z^-\rangle_B |z^-\rangle_C \right).$$

После приготовления спины раздаются игрокам. Перед ответом каждый игрок производит соответствующее измерение имеющегося у него квантового устройства и отвечает в соответствии с результатом измерения. Именно, он

- измеряет $\sigma_x = 2s_x$, если ему задан вопрос об X , и отвечает в соответствии с результатом измерения;⁷
- измеряет $\sigma_y = 2s_y$, если ему задан вопрос об Y , и отвечает в соответствии с результатом измерения.

Анализируя измерения при помощи постулата редукции, можно показать, что результаты измерения всегда будут удовлетворять соотношениям

$$\sigma_{xA} \sigma_{xB} \sigma_{xC} = -1,$$

$$\sigma_{xA} \sigma_{yB} \sigma_{yC} = 1, \quad \sigma_{yA} \sigma_{xB} \sigma_{yC} = 1, \quad \sigma_{yA} \sigma_{yB} \sigma_{xC} = 1.$$

Значит, отвечая в соответствии с этими результатами, команда игроков обязательно выигрывает.

⁷То есть дает ответ $+1$, если при измерении оказывается $\sigma_x = +1$, и отвечает -1 , если измерение дает $\sigma_x = -1$.

Чтобы доказать, что команда обязательно выиграет, необходимо доказать все четыре последних равенства. Докажем, например, первое из них (остальные доказываются аналогично).

В силу соотношений

$$|z^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x^+\rangle + |x^-\rangle), \quad |z^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x^+\rangle - |x^-\rangle)$$

состояние $|GHZ\rangle$ можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} 4|GHZ\rangle = & (|x^+\rangle_A + |x^-\rangle_A)(|x^+\rangle_B + |x^-\rangle_B)(|x^+\rangle_C + |x^-\rangle_C) \\ & - (|x^+\rangle_A - |x^-\rangle_A)(|x^+\rangle_B - |x^-\rangle_B)(|x^+\rangle_C - |x^-\rangle_C) \end{aligned}$$

или, после раскрытия скобок,

$$\begin{aligned} 2|GHZ\rangle = & |x^-\rangle_A |x^-\rangle_B |x^-\rangle_C \\ & + |x^+\rangle_A |x^+\rangle_B |x^-\rangle_C + |x^+\rangle_A |x^-\rangle_B |x^+\rangle_C + |x^-\rangle_A |x^+\rangle_B |x^+\rangle_C. \end{aligned}$$

Отсюда непосредственно видно, что результаты измерения каждым из трех игроков проекции спина на ось x всегда будут удовлетворять условию $\sigma_{xA}\sigma_{xB}\sigma_{xC} = -1$, так что команда выиграет. Более конкретно, если всем трем игрокам задан вопрос об X и они действуют в соответствии с указаниями своих квантовых устройств, то либо все трое дадут ответ -1 , либо двое дадут ответ $+1$, а третий — ответ -1 . В любом случае произведение их ответов будет равно -1 .

Аналогично доказывается, что команда игроков выиграет и в тех случаях, когда двум из них будет задан вопрос об Y , а одному — об X . При доказательстве нужно использовать соотношения

$$|z^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|y^+\rangle - i|y^-\rangle), \quad |z^-\rangle = -\frac{i}{\sqrt{2}}(|y^+\rangle + i|y^-\rangle).$$

Итак, на простом и убедительном примере мы видим, какими странными и «контр-интуитивными» свойствами обладают квантовые измерения. Очевидно, что использовать специфические квантовые преимущества можно не только в игре, но и в серьезных ситуациях. Эта возможность реализуется в квантовой информатике.

В.4. Квантовая информатика

Квантовая информатика — это класс новых квантовомеханических приложений, появившихся в конце XX века. Основными направлениями в квантовой информатике являются квантовая телепортация, квантовая криптография и квантовый компьютеринг.

Мы поясним, что понимается под квантовой криптографией и на чем основаны преимущества квантовых компьютеров перед классическими, а затем несколько более подробно расскажем о квантовой телепортации. Но начнем с рассказа об основной ячейке любого квантово-информационного устройства, называемой кубитом, и с теоремы о невозможности квантового клонирования, которая лежит в основе квантовой криптографии.

В.4.1. Кубиты

В квантовой информатике основным элементом всех построений является простая квантовая система, которая носит название *кубит* (по-английски qubit, от выражения quantum bit, то есть квантовый бит). Это система, в которой записывается единица информации (1 бит), эквивалентная различию между двумя альтернативными возможностями, условно соответствующими цифрам 0 и 1 двоичной системы счисления.

В классических информационных устройствах элементарная ячейка, хранящая 1 бит информации, — это любая система, которая может находиться в одном из двух устойчивых

состояний, которые интерпретируются как соответствующие цифрам 0 и 1. Никакого другого устойчивого состояния в такой системе быть не должно. Квантовый аналог такой двоичной ячейки, называемый кубитом, — это квантовая система с двумерным пространством состояний. Это значит, что среди ее состояний имеются два состояния, которые можно обозначить как $|0\rangle$ и $|1\rangle$, а произвольное состояние является суперпозицией

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle.$$

Принципиально важно, что кубит может находиться не только в состояниях $|0\rangle$ и $|1\rangle$, но и в суперпозиции этих состояний. В частности, если кубит приводится в состояние $(|0\rangle + |1\rangle) / \sqrt{2}$, то это значит, что в нем *одновременно* записаны и цифра 0, и цифра 1. Это является основой квантового параллелизма, объясняющего колоссальные преимущества квантового компьютера над классическим.

Что касается реализации кубитов, то для этого можно использовать и используют различные способы. Кубитом может, например, служить ион, подвешенный в магнитной ловушке, у которого задействованы два уровня энергии, играющие роль состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$, а также еще некоторое количество уровней, необходимых для управления кубитом. Такой ион-кубит управляется лазерным излучением, настроенным в резонанс с переходами между некоторыми из этих уровней. Имеются и другие способы реализовать кубиты. Например, в качестве кубитов часто используют отдельные фотоны. В этом случае в качестве базисных состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$ выступают два состояния поляризации фотонов. При любом способе реализации кубитов главной проблемой является необходимость надежной изоляции кубита от его окружения, без которой кубит не может работать в квантовом режиме.

Для того, чтобы кубит работал в квантовом режиме, необходимо, чтобы он был полностью изолирован от всех систем, кроме тех, которые нужны для управления им. Любое

непредусмотренное взаимодействие может приводить к декогеренции кубита, в результате чего он перейдет из чистого состояния в смешанное. В этом случае кубит потеряет свои специфические квантовые свойства и окажется классической двоичной ячейкой. Если кубит из состояния $c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$ переходит в смешанное состояние $|c_0|^2|0\rangle\langle 0| + |c_1|^2|1\rangle\langle 1|$, то это означает, что он находится либо в состоянии $|0\rangle$ (с вероятностью $|c_0|^2$), либо в $|1\rangle$ (с вероятностью $|c_1|^2$), но не в суперпозиции этих состояний. Квантовый параллелизм теряется.

В.4.2. Запрет квантового клонирования

Квантовая криптография — это способ пересылать секретные сообщения, при котором утечка информации невозможна, так как противоречит законам природы (в данном случае — законам квантовой механики). Квантовая криптография основана на теореме о *невозможности квантового клонирования*. Поясним, что это значит.

В классической физике всегда можно построить точную копию любой физической системы. Затем можно с помощью точных измерений выяснить, в каком состоянии находится оригинальная система, и привести дублирующую систему точно в такое же состояние. Полученную таким образом новую систему невозможно отличить от оригинальной. Такой процесс условно можно назвать «клонированием» физической системы.

Более точно это процесс *клонирования состояния системы*. Действительно физически вторая система может заранее существовать. Важно, чтобы с помощью определенного процесса она перешла в то состояние, в котором находится первая система. При этом сам процесс (или реализующие его технические средства) должен быть универсальным, не зависящим от состояния первой системы. Экспериментатор должен всегда иметь возможность перевести вторую систему в состояние, в котором находится первая система, даже в том случае, если он ничего не знает о состоянии первой системы. При этом сама

первая система должна остаться в своем первоначальном состоянии.

Оказывается, что в квантовой механике этого сделать нельзя. Это формулируют как *теорему о невозможности квантового клонирования*. Существенным здесь является невозможность воспроизвести состояние первой системы, не разрушив этого состояния.

Разумеется, имея физическую систему, можно создать еще одну систему, устроенную точно так же. Можно воспользоваться уже готовыми системами, не отличающимися друг от друга. Например, два атома водорода ничем не отличаются. Можно также привести такие тождественные системы в одинаковые состояния. Например, имея несколько атомов водорода, можно при помощи лазерного излучения привести все эти атомы в основное состояние, в котором энергия каждого атома минимальна (если какой-то атом имеет более высокую энергию, то под действием излучения он испустит фотон или несколько фотонов, и перейдет в основное состояние). Однако подобный процесс изготовления тождественных систем — это не то, что называется квантовым клонированием.

Предположим, что экспериментатор имеет две тождественные системы, одна из которых находится в произвольном состоянии $|\psi\rangle_1$, которое экспериментатору не известно. Вторая (тождественная по своему устройству) система может находиться в каком угодно состоянии $|\rangle_2$, и это состояние может быть известно. Задача клонирования состоит в том, чтобы перевести вторую систему в то же самое состояние $|\psi\rangle_2$, в котором находится первая система, и при этом не нарушить состояние первой системы. Если говорить об обеих системах, то вначале они находятся в состоянии $|\psi\rangle_1|\rangle_2$, а в конце должны оказаться в состоянии $|\psi\rangle_1|\psi\rangle_2$. Вот это-то и называется квантовым клонированием, и именно это невозможно осуществить, так как это запрещено законами квантовой механики.

Ключевым здесь является то, что состояние $|\psi\rangle$ произволь-

но и не известно экспериментатору.⁸ Формулируя несколько иначе, можно сказать, что задача квантового клонирования состоит в том, чтобы создать такой аппарат, который состояние $|\psi\rangle$ (где ψ любое) превращает в состояние $|\psi\rangle|\psi\rangle$. Мы должны доказать, что такого аппарата существовать не может.

Оказывается, что невозможность квантового клонирования — прямое следствие линейности квантовой механики, то есть того факта, что эволюция любой квантовой системы описывается линейным оператором. Действительно, предположим, что некоторый аппарат, находящийся в состоянии $|A\rangle$, позволяет осуществить квантовое клонирование некоторой системы. Это значит, что возможен процесс, описываемый оператором эволюции U , который для произвольного состояния $|\psi\rangle$ этой системы удовлетворяет соотношению

$$U|\psi\rangle|A\rangle = |\psi\rangle|\psi\rangle|A'\rangle$$

(система клонируется, а аппарат переходит в некоторое новое состояние). Это равенство должно выполняться для любого состояния $|\psi\rangle$ (конечное состояние аппарата $|A'\rangle$ вообще говоря зависит от ψ). Покажем, что выполнить это требование невозможно.

Предположим, что требуемое условие выполняется для двух состояний $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$, то есть имеют место два равенства

$$U|\psi_1\rangle|A\rangle = |\psi_1\rangle|\psi_1\rangle|A_1\rangle,$$

$$U|\psi_2\rangle|A\rangle = |\psi_2\rangle|\psi_2\rangle|A_2\rangle.$$

Складывая эти равенства и пользуясь линейностью оператора U , получим

$$U(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)|A\rangle = |\psi_1\rangle|\psi_1\rangle|A_1\rangle + |\psi_2\rangle|\psi_2\rangle|A_2\rangle$$

⁸ Если бы состояние $|\psi\rangle$ было известно, то можно было бы разработать процесс, приводящий любое число одинаковых систем в это состояние, как с атомами водорода в предыдущем примере.

Даже если считать, что конечные состояния аппарата $|A_1\rangle$ и $|A_2\rangle$ равны друг другу, то и в этом случае получаем

$$U(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)|A\rangle = (|\psi_1\rangle|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle|\psi_2\rangle)|A_1\rangle.$$

Но если аппарат A действительно обладает свойством клонировать любое состояние, как предположено, то он должен клонировать и состояние $|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle$, то есть должно выполняться равенство

$$\begin{aligned} U(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)|A\rangle = \\ (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)|A''\rangle = \\ (|\psi_1\rangle|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle|\psi_2\rangle + |\psi_1\rangle|\psi_2\rangle + |\psi_2\rangle|\psi_1\rangle)|A''\rangle. \end{aligned}$$

Это выражение по сравнению с предыдущим содержит два лишних члена, то есть не может с ним совпадать. Значит, аппарат, который клонирует состояния $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$, не может клонировать состояние $|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle$, являющееся их суммой. Это значит, что квантовое клонирование *произвольного* состояния невозможно, оно бы противоречило линейности оператора U .

Невозможность квантового клонирования означает, что невозможно выяснить, в каком состоянии находится система, не разрушив это состояние. Если бы квантовое клонирование было возможно, то, применив его много раз, экспериментатор мог бы привести любое число систем в то же самое, неизвестное ему состояние. Потом он мог бы произвести над этими системами сколько угодно измерений, чтобы по результатам измерений найти неизвестное состояние. При этом первая система (состояние которой как раз и нужно найти) осталась бы в том же самом состоянии, но ее состояние было бы теперь известно. Однако это невозможно из-за теоремы о невозможности квантового клонирования.

Это обстоятельство используется в протоколах квантовой криптографии (см. раздел 2.4.1).

В.4.3. Квантовый компьютер

Идея квантового компьютера⁹ (см. раздел 2.4.2) основана на том, что в квантовой механике возможны суперпозиции состояний и потому вычисления можно производить в режиме *квантового параллелизма*. Вот что это значит.

Квантовая система с двумя базисными состояниями (кубит) позволяет закодировать в этих состояниях $|0\rangle$, $|1\rangle$ одно из чисел 0 или 1. То же самое можно сделать и в элементарной ячейке классического компьютера. Однако квантовый характер кубита дает выигрыш за счет принципа суперпозиции. Предположим, что кубит находится в состоянии суперпозиции базисных состояний

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle).$$

Тогда в одном кубите закодированы одновременно число 0 и число 1. Получается, таким образом, выигрыш в два раза. Выигрыш небольшой, но он экспоненциально возрастает с ростом числа кубитов. Убедимся в этом.

Цепочка из двух кубитов может находиться, скажем, в состоянии $|1\rangle|0\rangle = |10\rangle$ (мы использовали здесь упрощенное обозначение для состояния двух кубитов). Это значит, что в ней записано двоичное число 10 (которое соответствует числу $1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 2$ в обычной десятичной системе счисления). Точно так же можно записать в этой цепочке из двух кубитов еще три 2-разрядных двоичных числа. Всего мы получаем четыре числа 00, 01, 10, 11, соответствующие базисным состояниям цепочки из двух кубитов: $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$. То же самое возможно и в двух ячейках классического компьютера, так что пока выигрыша нет. Однако если каждый кубит в цепочке из двух кубитов находится в состоянии суперпози-

⁹R. P. Feynman, Found. Phys. **16**, 507, 1986, русский перевод: УФН **149**, 671, 1986; Charles H. Bennett, Physics Today, 24–30, 1995.

ции $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, то вся цепочка находится тем самым в состоянии

$$\frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle)(|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle).$$

Это значит, что в цепочке из двух кубитов одновременно записаны 4 двоичных числа, а именно, — все 2-разрядные двоичные числа от 00 до 11 (то есть, в десятичной системе счисления, от 0 до $2^2-1=3$).

Цепочка из N кубитов, каждый из которых находится в одном из состояний $|0\rangle$ или $|1\rangle$, позволяет закодировать одно N -значное двоичное число x (какое именно — зависит от того, какие из кубитов находятся в состоянии $|0\rangle$, а какие — в состоянии $|1\rangle$). Но если каждый из кубитов в цепочке находится в суперпозиции базисных состояний $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, то состояние всей цепочки кубитов можно описать как суперпозицию из 2^N состояний, каждое из которых соответствует N -разрядному двоичному числу x , начиная с числа $x = \underbrace{00\dots 0}_N$ и

кончая числом $x = \underbrace{11\dots 1}_N$;

$$\frac{1}{2^{N/2}} \underbrace{(|0\rangle + |1\rangle) \dots (|0\rangle + |1\rangle)}_N = \frac{1}{2^{N/2}} \sum_{x=0}^{2^N-1} |x\rangle.$$

Если совершать с такой цепочкой кубитов последовательность унитарных преобразований, то будет реализована некоторая процедура обработки информации (записанной в двоичных числах), причем параллельно будут обрабатываться все 2^N вариантов входных данных.

Таким образом реализуется «квантовый параллелизм», который в принципе позволяет сделать некоторые вычисления на квантовом компьютере в огромной степени более эффективными, чем это возможно на классическом компьютере. Задачи, требующие обработки N -разрядных двоичных чисел,

могут быть решены на классическом компьютере за время порядка $T \sim T_0 b^N$, где параметры T_0, b зависят от быстродействия компьютера (как говорят, T — экспоненциально большое время). При N порядка 1000 это время становится столь большим (даже при очень большом быстродействии компьютера), что практически вычисления становятся невозможными. На квантовом компьютере из-за квантового параллелизма время такого же вычисления оказывается порядка $T \sim T_0 N^a$ с некоторым числом a (как говорят, время в этом случае лишь полиномиально велико).

Поскольку при большом N отношение b^N/N^a становится чрезвычайно большим, квантовый компьютер приводит к колоссальному выигрышу во времени вычислений. Поэтому для ряда важных задач время вычислений, которое для классического компьютера неприемлемо велико, для квантового становится приемлемым. Значит, задачи, с практической точки зрения неразрешимые с помощью классических компьютеров, становятся разрешимыми для компьютеров квантовых. Это и объясняет, почему огромные усилия и деньги тратятся в настоящее время на разработку, конструирование и реализацию квантовых компьютеров.

Согласно сказанному, состояние квантового компьютера с достаточно большим числом кубитов N представляет собой сумму огромного числа (равного 2^N) слагаемых, каждое из которых есть произведение состояний вида $|0\rangle$ или $|1\rangle$ (сомножители в этом произведении описывают возможные состояния отдельных кубитов). Следовательно, состояние квантового компьютера — не что иное как очень сложное запутанное состояние. После серии унитарных преобразований, преобразующих это состояние в соответствии с поставленной задачей, производится измерение полученного в итоге нового состояния. Результат этого измерения и есть цель вычисления. Таким образом, работа квантового компьютера основана на операциях со сложными запутанными состояниями цепочки кубитов, а результат вычисления выводится из квантового ком-

пьютера во внешнюю среду (и записывается в классической форме) при помощи измерения итогового запутанного состояния.

Поскольку схема работы квантового компьютера принципиально отличается от схемы работы классического компьютера, не для всяких задач удастся разработать алгоритм их решения на квантовом компьютере. Но уж если для данной задачи такой алгоритм существует, то решение на квантовом компьютере оказывается гораздо более быстрым, чем на классическом. Удастся, например, найти квантовый алгоритм для вычисления периода периодической функции и, значит, для эквивалентной задачи разложения на множители очень большого числа (квантовый алгоритм, решающий эту задачу, был разработан Питером Шором).

Последняя задача представляет особую ценность в криптографии, поскольку на практике широко используются такие системы кодирования, которые при дешифровке секретных сообщений используют разложение на простые множители очень длинного числа. Если получатель послания знает разложение того числа, которое использовано для кодирования, то он может расшифровать сообщение. Противник, не знающий разложения этого числа, расшифровать сообщение не может. Ясно, что если бы он мог достаточно быстро разложить на простые множители любое число, то такой способ кодирования оказался бы бесполезным. Но на классическом компьютере решить эту задачу нельзя из-за слишком большого времени вычислений. Квантовый компьютер (работающий с достаточно длинными двоичными числами, то есть с большим N) мог бы эту задачу решить и тем самым обесценить данный способ кодирования.

Конечно, на пути построения квантовых компьютеров, работающих с числами достаточной длины, встречаются огромные трудности. Прежде всего они связаны с тем, что требуется обеспечить квантовую когерентность огромного числа кубитов (в качестве которых могут быть использованы различ-

ные физические системы, например, атомы). Для этого необходимо каким-то образом предотвратить (сделать чрезвычайно малыми) любые неконтролируемые взаимодействия кубитов друг с другом и с окружающей средой, так как при таких взаимодействиях происходит потеря квантовой когерентности (декогеренция).

Трудности, вытекающие из этой задачи, настолько велики, что могут стать непреодолимыми. Например, не исключено, что в конце концов для реализации квантовых вычислений необходимо сделать неконтролируемые взаимодействия экспоненциально малыми, что вряд ли возможно. Однако пока реализация квантовых компьютеров считается в принципе возможной, и на решение этой проблемы направлены большие ресурсы.

Декогеренция нарушает квантовый параллелизм и потому сводит на нет преимущества квантового компьютера. С ней пытаются бороться не только при помощи более надежной изоляции кубитов, но и при помощи дублирования информации (то есть использования большего числа кубитов, чем это минимально необходимо для записи данной информации). При достаточном дублировании специально разработанные протоколы, исправляющие ошибки, могут предотвратить сбои в работе квантового компьютера. Однако, несмотря на огромные усилия, до сих пор удалось реализовать квантовые компьютеры, работающие лишь с 10-разрядными двоичными числами. Для того, чтобы реализовать достоинства квантовых компьютеров в полной мере, требуется работать с 1000-разрядными или по крайней мере с 100-разрядными двоичными числами.

В.4.4. Квантовая телепортация

Квантовая телепортация (см. раздел 2.4.3) ставит своей целью передать из одной точки в другую некоторое квантовое состояние. Телепортация достигается за счет квантовой корреляции состояний, находящихся далеко друг от друга. Дру-

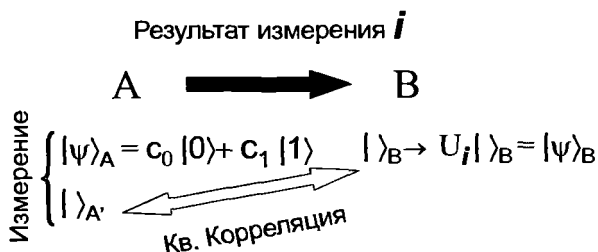


Рис. В.2. Квантовая телепортация состояния кубита $|\psi\rangle_A$ из точки A в точку B . Заранее устанавливается корреляция между кубитом $| \rangle_{A'}$ в точке A и кубитом $| \rangle_B$ в точке B . Производится измерение белловских состояний пары кубитов $| \rangle_{A'}$ и $|\psi\rangle_A$. Результат измерения i пересылается в точку B , где над кубитом $| \rangle_B$ производится преобразование U_i , зависящее от этого результата. Этот кубит оказывается в состоянии $|\psi\rangle_B$, а кубит $| \rangle_A$ — в состоянии, запутанном с $| \rangle_{A'}$.

гими словами, существенную роль в этом процессе играет состояние типа ЭПР-пары (см. приложение В.1).

Обычно и при теоретическом, и при экспериментальном изучении квантовой телепортации рассматривается задача о телепортации состояния одного кубита, однако этого достаточно, чтобы продемонстрировать принципиальную возможность такого процесса и указать на его главные отличия. Мы тоже, разумеется, будем говорить о телепортации состояния одного кубита.

Пусть наблюдатель A (обычно его называют Алисе, то есть Алиса) имеет кубит $| \rangle_A$, находящийся в состоянии

$$|\psi\rangle_A = c_0|0\rangle_A + c_1|1\rangle_A,$$

где состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$ ортонормированы. Параметры c_0 и c_1 неизвестны этому наблюдателю (Алисе). Задача состоит в том, чтобы кубит $| \rangle_B$, имеющийся в распоряжении удаленного

наблюдателя B (которого зовут Bob, то есть Боб), перевести в состояние, характеризуемое теми же параметрами c_0 и c_1 :

$$|\psi\rangle_B = c_0|0\rangle_B + c_1|1\rangle_B.$$

Эту задачу можно решить (см. рис. В.2), если предварительно создать соответствующую квантовую корреляцию, связывающую точки A и B , а потом 1) провести в точке A подходящее измерение, 2) послать в точку B сообщение о результате измерения и 3) провести над кубитом $|\rangle_B$ соответствующее преобразование.

Предварительная работа состоит в создании квантового корреляционного канала. Для этого кубит $|\rangle_B$, находящийся в точке B в распоряжении Боба, должен быть скоррелирован (то есть включен в ЭПР-пару) со вспомогательным кубитом $|\rangle_{A'}$, находящимся в точке A в распоряжении Алисы. Например, можно в точке B создать ЭПР-пару из двух кубитов, $|\rangle_B$ и $|\rangle_{A'}$, а затем перенести кубит $|\rangle_{A'}$ в точку A . Вместо этого ЭПР-пару из двух кубитов, $|\rangle_B$ и $|\rangle_{A'}$, можно создать в любой точке, а затем разнести спаренные кубиты в точки A и B .

Если коррелированная пара кубитов создана, то наблюдатель B имеет в своем распоряжении кубит $|\rangle_B$, коррелированный с кубитом $|\rangle_{A'}$ в точке A . После этого задача сводится лишь к тому, чтобы перевести кубит $|\rangle_B$ в нужное состояние с помощью подходящего измерения в точке A . Это делается с помощью следующих трех шагов:

1. В точке A производится некоторое специальным образом устроенное измерение системы, состоящей из кубитов $|\rangle_A$ и $|\rangle_{A'}$. Такое измерение может иметь 4 различных результата.
2. Результат измерения пересылается (по обычному, то есть классическому) каналу связи в точку B .
3. Состояние кубита $|\rangle_B$ (возникшее после измерения, проведенного в точке A) подвергается одному из четырех

преобразований в зависимости от того, какой результат дало измерение.

Теперь конкретизируем сказанное и проверим, что телепортация по такой схеме возможна. Прежде всего выберем состояние ЭПР-пары, состоящей из кубитов $| \rangle_B$ и $| \rangle_{A'}$, в таком виде:

$$| \Phi \rangle_{A'B} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0 \rangle_{A'}|1 \rangle_B - |1 \rangle_{A'}|0 \rangle_B) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01 \rangle_{A'B} - |10 \rangle_{A'B}).$$

Это то самое состояние, которое мы обсуждали выше (приложение В.1) и которое называется максимально коррелированным. В последней части равенства мы использовали очевидные упрощенные обозначения для состояний пары кубитов.

Теперь охарактеризуем измерение, которое следует произвести в точке A над кубитами $| \rangle_A$ и $| \rangle_{A'}$. В соответствии с тем, что говорилось в разделе А.3, зададим проекторы, соответствующие разным результатам измерения.¹⁰ Измерение имеет четыре альтернативных исхода и поэтому описывается четырьмя проекторами.

Это проекторы $P_i = |\Psi_i \rangle \langle \Psi_i|$ на так называемые “белловские состояния” $|\Psi_i \rangle$

$$\begin{aligned} |\Psi_1 \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|01 \rangle_{AA'} - |10 \rangle_{AA'}), \\ |\Psi_2 \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|01 \rangle_{AA'} + |10 \rangle_{AA'}), \\ |\Psi_3 \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00 \rangle_{AA'} - |11 \rangle_{AA'}), \\ |\Psi_4 \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00 \rangle_{AA'} + |11 \rangle_{AA'}). \end{aligned}$$

¹⁰Напомним, что изменение состояния измеряемой системы при i -м результате измерения описывается действием проектора P_i . Квадрат модуля получающегося вектора дает вероятность i -го результата измерения.

Поэтому сами проекторы выглядят как

$$P_1 = \frac{1}{2}(|01\rangle_{AA'} - |10\rangle_{AA'})_{(AA' \langle 01| - AA' \langle 10|)},$$

$$P_2 = \frac{1}{2}(|01\rangle_{AA'} + |10\rangle_{AA'})_{(AA' \langle 01| + AA' \langle 10|)},$$

$$P_3 = \frac{1}{2}(|00\rangle_{AA'} - |11\rangle_{AA'})_{(AA' \langle 00| - AA' \langle 11|)},$$

$$P_4 = \frac{1}{2}(|00\rangle_{AA'} + |11\rangle_{AA'})_{(AA' \langle 00| + AA' \langle 11|)}.$$

Получив один из четырех результатов измерения, наблюдатель A посылает сообщение об этом результате наблюдателю B , и тот производит над своим кубитом соответствующее корректирующее преобразование, после чего телепортация завершается. Опишем эти корректирующие преобразования.

Если получен первый результат измерения, то уже без всякой коррекции кубит $|\rangle_B$ оказывается в нужном состоянии, так что телепортация уже завершена. Формально можно сказать, что в этом случае корректирующее преобразование описывается единичным оператором, $U_1 = 1$. В остальных трех случаях коррекция необходима, однако она сводится лишь к изменению знака и/или перестановке $0 \leftrightarrow 1$. Если включить первый результат измерения, то корректирующие операторы имеют вид

$$\begin{aligned} U_1 = 1 &= |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|, & U_2 &= |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|, \\ U_3 &= |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|, & U_4 &= i(|0\rangle\langle 1| - |1\rangle\langle 0|). \end{aligned}$$

Отметим, что хотя в этих формулах не отмечено, на какой кубит действует оператор U_i , он применяется всегда к кубиту $|\rangle_B$, так что в определении этого оператора состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$ можно заменить на $|0\rangle_B$ и $|1\rangle_B$.

Итак, перед измерением состояние всех трех участвующих в телепортации кубитов имеет вид $|\psi\rangle_A |\Phi\rangle_{A'B}$. Если измерение даст i -й результат, то образующееся после измерения со-

состояние с тем, что по существу до перемешивки $U_i P_i |\psi\rangle_A |\Phi\rangle_{A'B}$. На конец, после коррекции состояние равно $U_i P_i |\psi\rangle_A |\Phi\rangle_{A'B}$ (где оператор U_i действует на кубит $|\rangle_B$). Это дает нужный результат, то есть переводит кубит $|\rangle_B$ в состояние $|\psi\rangle_B$, в котором до измерения находился кубит $|\rangle_A$.

Как можно убедиться, сразу после измерения в точке A кубит $|\rangle_B$ оказывается в определенном состоянии $|\psi_i\rangle_B$ (то есть его запутывание с кубитом $|\rangle_{A'}$ исчезает). Это состояние определяется коэффициентами c_0 и c_1 и номером i результата измерения. Оно тождественно исходному состоянию $|\psi\rangle_A$ лишь в случае, если $i = 1$. В случае произвольного i следует возникшее после измерения состояние $|\psi_i\rangle_B$ подвергнуть преобразованию U_i . После этого кубит $|\rangle_B$ оказывается в нужном состоянии:

$$U_i |\psi_i\rangle_B = |\psi\rangle_B.$$

Заметим, что кубит $|\rangle_A$ после этих операций вообще не находится в определенном состоянии. Вместо этого образуется запутанное состояние кубитов $|\rangle_A$ и $|\rangle_{A'}$.

Таким образом, при квантовой телепортации произвольное (и заранее не известное) состояние кубита $|\rangle_A$ разрушается, однако возникает идентичное состояние кубита $|\rangle_B$ в другой точке. Инструментом телепортации является ЭПР-пара с компонентами в точках A и B , которая по существу образует квантовую корреляционную линию. Кроме этой заранее подготовленной корреляционной линии требуется еще обычный канал связи между точками A и B , по которому передается информация о результате измерения кубитов $|\rangle_A$ и $|\rangle_{A'}$.

Телепортация состоит из трех этапов. На первом (подготовительном) этапе создается корреляционная линия (ЭПР-пара). На втором этапе производится измерение кубитов $|\rangle_A$ и $|\rangle_{A'}$, при этом «квантовая часть» информации о состоянии $|\psi\rangle$ мгновенно передается из точки A в точку B за счет квантовой корреляции. Однако для восстановления этого состояния в точке B требуется еще классическая информация, передача

которой происходит по обычному каналу не быстрее, чем со скоростью света.

Правда, в случае, если результат измерения равен $i = 1$, состояние $|\psi\rangle$ телепортируется мгновенно, в момент измерения, и никакого дополнительного преобразования не требуется. Однако экспериментатор, находящийся в точке B , не может знать, какой из четырех альтернативных результатов измерения в точке A получен. Поэтому каждый раз в момент измерения остается неизвестным, произошла ли при телепортации деформация состояния, которая требует корректирующего преобразования. В итоге мы вынуждены заключить, что сверхсветовая телепортация невозможна даже при наличии заранее подготовленной корреляционной линии.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Предисловие В. Л. Гинзбурга	7
Введение	11
0.1. О чем эта книга	11
0.2. Что такое квантовая механика	16
0.3. Квантовая теория измерений	20
0.4. Квантовая механика и сознание	23
Часть I КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА	27
Глава 1. Создание квантовой механики	29
1.1. Квантование энергии	31
1.2. Фотоны	37
1.3. Уровни энергии атома	42
1.4. Частица и волна	49
1.5. Матричная и волновая механика	54
1.6. Особенности квантовых измерений	58
1.6.1. Принцип неопределенности	59
1.6.2. Возмущение состояния при измерении . .	61
1.6.3. Принцип дополнительности	64
1.6.4. Постулат редукции фон Неймана	66
1.7. Завершение квантовой механики	67
1.7.1. Математика и интерпретация теории . . .	68
1.7.2. Создание математического аппарата . . .	70

1.7.3.	Копенгагенская интерпретация	73
1.7.4.	Дискуссии Бора и Эйнштейна	75
1.8.	Парадокс ЭПР	82
1.9.	Основные даты	88
Глава 2.	Приложения квантовой механики	89
2.1.	Сверхтекучесть и сверхпроводимость	90
2.2.	Лазеры	96
2.3.	Нанотехнология	100
2.3.1.	«Искусственные атомы»	101
2.3.2.	Нанотехнология	103
2.4.	Квантовая информатика	108
2.4.1.	Квантовая криптография	108
2.4.2.	Квантовый компьютер	113
2.4.3.	Квантовая телепортация	118
Часть II	КВАНТОВЫЙ МИР И СОЗНАНИЕ	122
Глава 3.	Квантовые парадоксы	126
3.1.	Парадокс кота Шредингера	127
3.2.	Парадокс друга Вигнера	129
3.3.	Роль сознания наблюдателя	134
Глава 4.	Опровержение реализма	138
4.1.	Неравенства Белла и опыты Аспекта	140
4.2.	Что означает результат измерения	144
4.3.	Проблема измерения	150
Глава 5.	Квантовая физика и сознание	156
5.1.	Концепция Эверетта	157
5.2.	Расширенная концепция Эверетта	166
5.3.	Альтернативы как коридоры путей	172
5.4.	Иллюзия классической реальности	176
5.5.	Сознание и «две культуры»	178
5.5.1.	Новое понимание феномена сознания	178
5.5.2.	Сознание — место встречи двух культур	179
5.5.3.	Между материализмом и идеализмом	181

Глава 6. Тайна сознания	185
6.1. Квантовый мир, сознание и тайна жизни	186
6.2. Модель сознания на квантовом компьютере	190
6.3. На краю сознания	192
6.3.1. Сознание выбирает альтернативу	193
6.3.2. Сознание выходит в квантовый мир	200
6.4. Как проверить высказанные гипотезы	203
6.4.1. Логика концепции квантового сознания	204
6.4.2. Наблюдение над сознанием вместо экс- периментов	207
6.5. Феномены, которые объясняются	214
6.5.1. Сознание в психологии и в физике	214
6.5.2. Особые состояния сознания (транс)	217
6.5.3. Невербальное мышление	219
6.5.4. Ненаучные формы познания	223
6.5.5. Концепция Эверетта и здоровье	225
Заключение	237
Приложение А. Квантовые измерения	247
А.1. Пространство состояний	249
А.2. Эволюция системы	256
А.3. Редукция состояния при измерении	258
А.4. Матрица плотности	261
А.5. Декогеренция	264
А.6. Непрерывные измерения	272
Приложение В. Квантовая корреляция	281
В.1. Эффект (парадокс) ЭПР	282
В.2. Неравенства Белла	288
В.3. Квантовые игры	293
В.3.1. Отгадывание чисел	293
В.3.2. Корреляция GHZ	295
В.4. Квантовая информатика	299
В.4.1. Кубиты	299
В.4.2. Запрет квантового клонирования	301
В.4.3. Квантовый компьютер	305
В.4.4. Квантовая телепортация	309

серия «Наука для всех»

А. М. Черепашук, А. Д. Чернин.

Вселенная, жизнь, черные дыры.

Под редакцией Л. И. Корочкина.

Геном, клонирование, происхождение человека.

Е. Л. Фейнберг.

Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке.

В. Г. Ротштейн.

Психиатрия. Наука или искусство?

Б. М. Владимирский и др.

Космическая погода и наша жизнь.

М. Л. Бутовская.

Тайны пола. Мужчина и женщина в зеркале эволюции.

Л. Б. Вишняцкий.

История одной случайности или происхождение человека.

А. И. Козлов.

Пища людей.

Ю. Н. Ефремов.

Звездные острова. Галактики звезд и Вселенная галактик.

М. И. Панасюк.

Странники Вселенной или эхо Большого взрыва.

ООО «Век 2», тел. (095) 785-56-39, доб. *15-14;

E-mail: vek-2@mail.ru, www.vek2.nm.ru

Высылаем книги наложенным платежом. Заявки по адресу:

141195, Фрязино-5, Московской обл., а/я 107, ООО «Век 2»

или по E-mail: vek-2@mail.ru

Научно-популярное издание

Менский Михаил Борисович

Человек и квантовый мир

(Странности квантового мира и тайна сознания)

Подп. в печ. 29.10.2005. Формат 84х108/32.
Усл. п.л. 16,8. Тираж 1500 экз. Заказ № 1718.

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино-5, Моск. обл., а/я 107.
Тел. (095) 785-56-39, доб. *15-14, E-mail: vek-2@mail.ru.
Фрязино, пл. Введенского, 1, к. 102.
Изд. Лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

Отпечатано в ОАО «Можайский полиграфкомбинат»
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93.