
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 во-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

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 быть открыта, 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 двигаются 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

¹На 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, представлявший 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 *интерferируют* 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 абсолютно секретные 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 назвали 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. Второй 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.

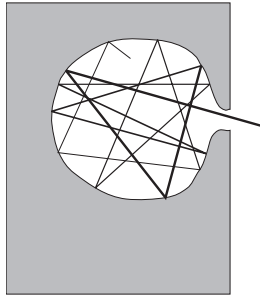


Рис. 1.1. Запнутая полость может служить моделью абсолютно черного тела, так как попадающее в нее излучение после многократного отражения от стенок поглощается практически полностью. Макс Планк изучал распределение по энергиям в излучении черного тела, то есть внутри такой полости.

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 несколько 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 удается 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-

⁴ Броуновское 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-

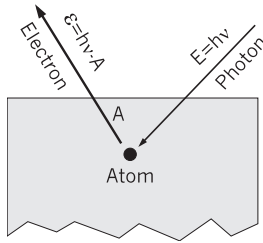


Рис. 1.2. Фотоэффект. Фотон, имеющий энергию $E = h\nu$, сталкиваясь с атомом, выбивает из него электрон, отдавая ему свою энергию. Для того, чтобы вылететь из металла, электрон тратит часть энергии A (работа выхода), так что после вылета его энергия равна $\epsilon = h\nu - A$.

тоэлектронов 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):

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{c h^3}.$$

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

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

(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-

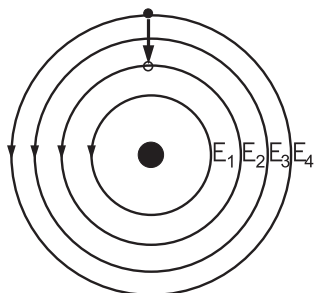


Рис. 1.3. Модель атома, предложенная Бором. Электрон сколько угодно долго может находиться на любой из стационарных орбит, соответствующих определенным уровням энергии E_n . При переходе между двумя уровнями E' и E'' испускается квант света, энергия которого $h\nu$ равна разности энергий этих уровней $E' - E''$. 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 получается 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-

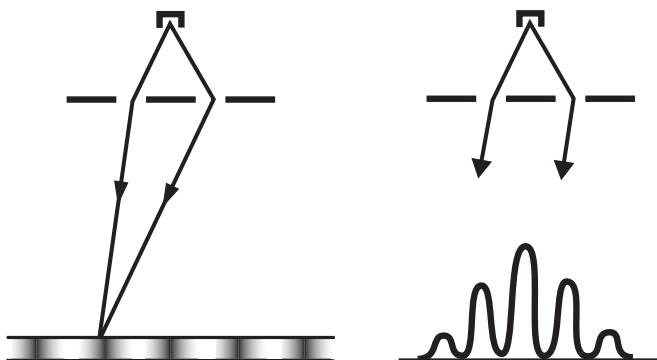


Рис. 1.4. Двухщелевой эксперимент. Электрон, пролетающий через непрозрачный экран с двумя щелями, обнаруживает волновые свойства. При его детектировании возникают интерференционные полосы: направления, в которых электрон обнаруживается с большой вероятностью, чередуются с теми, в которых вероятность мала. На левом рисунке изображена фото пленка, 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 одинаковые или отличаются 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.

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
A.1. Пространство состояний	249
A.2. Эволюция системы	256
A.3. Редукция состояния при измерении	258
A.4. Матрица плотности	261
A.5. Декогеренция	264
A.6. Непрерывные измерения	272
Приложение В. Квантовая корреляция	281
V.1. Эффект (парадокс) ЭПР	282
V.2. Неравенства Белла	288
V.3. Квантовые игры	293
V.3.1. Отгадывание чисел	293
V.3.2. Корреляция GHZ	295
V.4. Квантовая информатика	299
V.4.1. Кубиты	299
V.4.2. Запрет квантового клонирования	301
V.4.3. Квантовый компьютер	305
V.4.4. Квантовая телепортация	309