

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов

М.Б. Менский

Представлен обзор некоторых концептуальных проблем квантовой механики, их современного статуса и вытекающего из них развития теории. Анализируются специфика запутанных (entangled) состояний квантовой системы, новые эксперименты, направленные на исследование таких состояний, и основанные на них новые приложения квантовой механики (квантовая информация). Обсуждается широко известный парадокс "шрёдингерского кота" (ненаблюдаемость предсказываемых квантовой механикой суперпозиций макроскопически различных состояний) и показывается, что явление декогеренции (возникающее при измерении в квантовой системе, когда информация о ее состоянии в той или иной форме записывается в окружающей среде) приводит к неразличимости суперпозиции и смеси и тем самым позволяет преодолеть парадоксальность квантовой теории в рамках теории открытых систем. Остающиеся концептуальные трудности лежат по существу вне физики, однако они активно исследуются в литературе и привели к чрезвычайно интересным новым интерпретациям квантовой механики. В этой связи обсуждается мнение (высказанное, например, Вигнером) о необходимости включить сознание наблюдателя в квантовую теорию измерений. Предлагается гипотеза, которая позволила бы описать функцию сознания в терминах квантовых измерений.

PACS numbers: 03.65.Bz

От редакционной коллегии. Создание теории относительности и квантовой механики глубоко изменило физику и, естественно, затронуло фундаментальные философские (мировоззренческие, гносеологические) проблемы. В отношении теории относительности (не говоря о тесно связанной с ней космологии и, в какой-то мере, о черных дырах) споры об основах практически уже не ведутся. Напротив, квантовая механика, ее методологические основы, теория измерений и некоторые другие проблемы широко обсуждаются в мировой литературе до сих пор. Особенно это имеет место в связи с развитием экспериментальной техники, позволившей произвести ряд тончайших опытов (упомянем хотя бы квантовую телепортацию).

В СССР в свое время основы новой физики также, конечно, широко дискутировались, но, к сожалению, такое обсуждение должно было проводиться с учетом идеологических ограничений. Конкретно, обязательно нужно было по существу или хотя бы по форме следовать положениям философии, называвшейся диалектическим материализмом. В результате свободная дискуссия стала невозможна, и вопросы методологии физики на современном уровне практически в нашей литературе перестали затрагиваться. Чувствуется это и до сих пор, несмотря на то, что в настоящее время в России существует

полная свобода для подлинно научной дискуссии по методологическим и, в частности, гносеологическим вопросам. Примером такого научного и в то же время не ограниченного какими-либо догмами обсуждения основ квантовой механики может служить публикуемая статья М.Б. Менского. Мы надеемся, что она послужит поводом и для других авторов свободно высказывать свои взгляды в виде статей и писем в редакцию без ограничений, обусловленных какими-то требованиями философского характера. Но, разумеется, речь не может идти о спекуляциях, игнорирующих общепризнанное содержание современной физики и, в частности, квантовой механики.

Содержание

1. Введение (632).
 2. Запутанные (entangled) состояния (633).
 - 2.1. Неклассичность ЭПР-пары.
 - 2.2. Приложения: квантовая информация.
 - 2.3. Квантовая механика на новой стадии.
 3. "Шрёдингерский кот" (637).
 - 3.1. Суперпозиция живого и мертвого кота.
 - 3.2. "Усиление" квантовой суперпозиции.
 - 3.3. Декогеренция окружением.
 4. Расширение теории измерений (641).
 - 4.1. Решает ли декогеренция проблему измерения?
 - 4.2. Попытки углубить теорию.
 - 4.3. Квантовая механика и сознание.
 - 4.4. Выбор альтернативы — это и есть работа сознания?
 - 4.5. Квантовый мир и классический мир.
 5. Заключение (646).
- Список литературы (647).

М.Б. Менский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
E-mail: mensky@sci.lebedev.ru

Статья поступила 12 апреля 2000 г.,
после доработки 19 апреля 2000 г.

1. Введение

Квантовая механика давно стала привычным рабочим инструментом для исследователей в самых разных областях физики, однако концептуальные вопросы, которые впервые были поставлены еще в пору ее создания, до сих пор нельзя считать решенными. Общеизвестными примерами являются так называемый парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР) и парадокс "шрёдингерского кота". Нерешенные концептуальные вопросы квантовой механики часто объединяют под именем "проблемы измерения". Они не имеют, подобно другим проблемам в физике, вполне ясной и однозначной формулировки и порой разными авторами преподносятся по-разному. Более того, большое число вполне квалифицированных и опытных специалистов считает, что никаких концептуальных проблем в квантовой механике вообще не существует. Те, кто такие проблемы обсуждает, часто встречают не только непонимание, но и осуждение. Типичная оценка такого рода обсуждений состоит в замечании, что это не физика, а философия, и при этом слово "философия" иногда произносится несколько свысока.

В последние годы, однако, отношение к концептуальным проблемам квантовой механики быстро меняется. Несмотря на то, что они интенсивно обсуждались в период становления квантовой механики (см., например, перепечатки классических статей в [1]) и во все времена систематически освещались в учебниках (например, [2–5]), этим проблемам в настоящее время посвящена обширная литература. При этом они обсуждаются гораздо более детально и конкретно, чем раньше, и обсуждение их постепенно становится вполне respectable занятием (см., например, [6–15]). Более того, старые, известные со времен отцов-основателей вопросы получают новые формулировки, для ответа на них ставятся специальные эксперименты и в ходе их обсуждения возникают новые приложения квантовой механики. В этой статье мы попытаемся проиллюстрировать современное положение дел, насколько не претендуя на полноту и не скрывая известной субъективности излагаемых точек зрения.

Оговоримся сразу: новые приложения, объединяемые термином "квантовая информация", возникли не столько при исследовании концептуальных проблем квантовой механики, сколько при анализе специфики квантовой теории по сравнению с классической. Конечно, анализ квантовой специфики является необходимой предварительной стадией при изучении концептуальных проблем. Однако новые приложения появляются на том уровне анализа, на котором можно еще не говорить о концептуальных проблемах или парадоксах. При желании вполне можно сказать, что работа над новыми экспериментами и новыми приложениями — это настоящая и притом очень интересная физика, тогда как парадоксы квантовой механики — всего лишь философская (концептуальная, метафизическая) надстройка над ней.

Одна из целей данной статьи — показать, что так оно и есть. Точнее, мы попытаемся обосновать точку зрения, что существует формулировка квантовой механики, в которой не возникает никаких парадоксов и в рамках которой можно ответить на все вопросы, которые обычно задают физики. Парадоксы возникают лишь тогда, когда исследователь не удовлетворяется этим

"физическим" уровнем теории, когда он ставит такие вопросы, которые в физике ставить не принято, другими словами, — когда он берет на себя смелость попытаться выйти за пределы физики. Вполне оправданной является точка зрения, что такая попытка со стороны физика не имеет смысла.

Те, кто этой точки зрения придерживается, не заслуживают осуждения. Более того, они по-своему правы, потому что для конструктивной работы в физике необходимо ограничить себя точно сформулированными, чисто "физическими" задачами. Однако для некоторых физиков оказывается необходимым иногда попытаться выйти за рамки собственно физической методологии и поставить более широкий круг вопросов. Вот тогда возникают квантовые парадоксы. Оказывается, что попытки разрешить эти парадоксы могут приводить к удивительным новым концепциям, которые по меньшей мере весьма любопытны. Нельзя сказать, что на этом пути достигнут существенный прогресс. Однако красота и смелость возникающей при этом картины квантового мира невольно заставляют надеяться, что этот путь позволит в конце концов вывести теорию на качественно новый уровень. Возможная конкретизация этих надежд, которую мы будем защищать, состоит в том, что новая теория может включать в себя (а может быть, и объяснить) феномен сознания, который до сих пор во многом остается таинственным.

Итак, в следующих разделах мы проанализируем два основных специфически квантовых понятия: "запутанные состояния" и "шрёдингерский кот". Большая часть статьи (разделы 2, 3) будет посвящена анализу специфики квантовой механики (по сравнению с классической), заключенной в этих понятиях, и появляющимся в связи с этим новым физическим ситуациям. Мы обсудим схемы "квантовой информации", основанные на запутанных состояниях, и явление декогеренции¹, приводящее к ненаблюдаемости макроскопических "шрёдингерских котов" (суперпозиций макроскопически различимых состояний).

В разделе 4 будут кратко обсуждены парадоксы и концептуальные вопросы квантовой механики, которые не решаются в рамках декогеренции. Попробуем при этом выяснить:

- Нужно ли задавать эти "вечные" вопросы?
- Можно ли ответить на них в рамках физики?
- Имеются ли ответы на них вне физики?

Выводы, к которым мы придем, не новы, но до сих пор не являются общепризнанными:

— С практической точки зрения эти вопросы не нужны.

— Их нельзя решить (и не нужно ставить) в рамках физики.

— Если решение существует, то его формулировка так или иначе должна включать такой "нефизический" элемент, как сознание наблюдателя.

Наконец, мы сформулируем и попытаемся кратко обосновать гипотезу, которая, быть может, объясняет феномен сознания на основе квантовой теории измерений.

¹ Явление декогеренции (по-английски decoherence) часто называется в русскоязычной литературе декогерентизацией.

2. Запутанные (entangled) состояния

Квантовая корреляция или запутанные (entangled) состояния (иначе, ЭПР-состояния) могут возникать в такой системе, которая состоит из двух (или более) взаимодействующих подсистем. Никакого запутывания нет, если система находится в состоянии вида $|\Psi\rangle = |\psi\rangle|\varphi\rangle$, где $|\psi\rangle$ и $|\varphi\rangle$ — состояния соответствующих подсистем. Такое состояние называется факторизованным. Однако, даже если вначале состояние факторизовано, то после взаимодействия подсистем друг с другом оно может стать запутанным. Простейшее запутанное состояние имеет вид²

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle|\varphi_1\rangle + |\psi_2\rangle|\varphi_2\rangle). \quad (1)$$

Очевидно, что если полная система находится в состоянии (1), то состояние каждой из подсистем не является определенным. Существует лишь корреляция, которую можно охарактеризовать так: если первая система находится в состоянии $|\psi_i\rangle$ ($i = 1, 2$), то вторая — в состоянии $|\varphi_i\rangle$.

2.1. Неклассичность ЭПР-пары

Возможность существования запутанных состояний приводит к некоторым чертам квантовых систем, которым нет аналога в классической физике и которые поэтому кажутся весьма странными с точки зрения интуиции, воспитанной на анализе классических систем. Такого рода ситуации были проанализированы в работе Эйнштейна, Подольского и Розена [16]. Оказалось, что понятие "элемент реальности" в том виде, в каком оно употребляется в классической физике, неприменимо в квантовой теории. Это противоречие между квантовомеханическими предсказаниями и классической интуицией было названо парадоксом Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР).

Этот парадокс был в центре знаменитой дискуссии между Эйнштейном и Бором (см. [17]) и в дальнейшем очень много обсуждался в литературе. В 1964 г. Джон Белл сумел придать этому парадоксу простую и наглядную форму, выведя так называемые неравенства Белла (см. [6]), роль которых мы охарактеризуем качественно.

Проще всего провести этот анализ на примере распада частицы спина 0 на две частицы спинов 1/2. Состояние двух частиц после такого распада имеет вид³

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2), \quad (2)$$

где $|\uparrow\rangle_i$ означает состояние i -й частицы со спином, направленным вверх относительно выделенной оси (скажем, z), а $|\downarrow\rangle_i$ — состояние i -й частицы со спином вниз. Состояние (2) является, очевидно, запутанным состоянием двух частиц, причем направление спина каждой из частиц не определено, но между направле-

ниями спинов обеих частиц имеется квантовая корреляция.

Наличие корреляции приводит к тому, что измерения проекций спинов двух частиц оказываются коррелированными даже после того, как частицы удалятся друг от друга на любое расстояние. Если измерение проекции спина первой частицы показывает, что ее спин направлен вверх, то измерение проекции спина второй частицы (расположенной в этот момент как угодно далеко) заведомо покажет, что спин направлен вниз, и наоборот.

В этом еще нет ничего необычного, специфически квантового. В классической физике вполне может существовать такого же рода корреляция между результатами измерений двух объектов. Пусть, например, в непрозрачном ящике лежат два шара — один белый, а другой черный, потом в ящик вводится перегородка, разделяющая шары, и половинки ящика, каждая из которых содержит один из шаров, разносятся на большое расстояние. Ясно, что результаты, которые получаются при вскрытии ящиков, коррелированы: если в одном из них оказался белый шар, то в другом заведомо окажется черный, и наоборот.

Квантовая специфика проявляется в том случае, если измеряются проекции спинов двух частиц на различные оси. Скажем, измеряется проекция спина первой частицы на ось z и проекция спина второй частицы на ось, наклоненную по отношению к z . Если в первом случае оказалось, что спин направлен вверх (в положительном направлении оси z), то результат второго измерения нельзя предсказать точно, но по обычным правилам квантовой механики предсказываются вероятности двух альтернативных результатов измерения. И оказывается, что результаты квантовомеханического расчета несовместимы с предположением, что наблюдаемые свойства существовали уже до наблюдения.

Белл ввел понятие "объективной локальной теории", в которой свойства системы (в данном случае — свойства частицы) существуют объективно независимо от измерения, а также имеют место некоторые другие положения, характерные для классической теории. Точнее, в объективной локальной теории:

— каждая частица характеризуется некоторыми переменными (которые могут соответствовать, например, волновой функции), возможно коррелированными для двух частиц;

— результаты измерения одной частицы не зависят от того, производится ли измерение другой частицы и если да, то какой результат дает это измерение;

— характеристики статистических ансамблей (и, следовательно, статистика измерения) зависят лишь от условий в более ранние моменты времени: невозможна "ретроспективная причинность".

Теорема Белла [6], доказанная в 1964 г., утверждает, что объективная локальная теория и квантовая механика дают разные предсказания для статистики результатов измерений. Точнее, из аксиом объективной локальной теории следуют некоторые неравенства (неравенства Белла) для вероятностей различных результатов измерений, и квантовая механика предсказывает, что эти неравенства должны нарушаться, если для двух частиц измеряются проекции спина на различные оси.

После того, как теорема Белла была сформулирована, были предприняты усилия для экспериментальной проверки неравенства Белла, и в 1980 г. в опытах Аспекта

² В общем случае запутанное состояние содержит более двух компонент, $|\Psi\rangle = (1/\sqrt{n})\sum_i|\psi_i\rangle|\varphi_i\rangle$. Множество компонент суперпозиции может быть даже непрерывным.

³ Знак минус в этой формуле необходим, чтобы состояние двух частиц было синглетным, а не компонентой триплетного, т.е. соответствовало полному спину 0, а не 1.

было экспериментально установлено, что неравенство нарушается (см. [18])⁴. Такой результат совместим с квантовой механикой и несовместим с объективной локальной теорией. Тем самым экспериментально доказано, что микроскопическим системам нельзя (во всяком случае не всегда можно) приписывать состояния как объективно существующие и независимые от проводимых измерений. Впоследствии были реализованы многочисленные корреляционные эксперименты типа тех, что провел Аспект.

Опыты Аспекта, и вообще измерения над ЭПР-парой, интересны еще и тем, что они демонстрируют так называемую "квантовую нелокальность": измерение, проведенное над одной из частиц, определяет результат измерения над второй частицей, которое проводится в тот же момент времени в другой точке пространства. Два события (измерение первой частицы и измерение второй частицы) могут быть разделены пространственно-подобным интервалом и, тем не менее, одно из них предопределяет второе. Чтобы сделать этот факт более убедительным, опыты, подобные опытам Аспекта, проводят при все большем пространственном разделении двух частиц. Недавно группой Гизина (N. Gisin) в Женеве был проведен корреляционный опыт [19] при пространственном разделении ЭПР-пары в 10 км. Результат опыта оказался тем же самым.

На первый взгляд кажется, что в опытах такого типа нарушается причинность. Это, однако, неверно, потому что отношение между двумя событиями (измерением первой и измерением второй частицы) — это не отношение причинно-следственной связи, а отношение корреляции. Хотя результаты измерений двух частиц скоррелированы друг с другом, но статистика измерений одной частицы не содержит никаких следов этой корреляции: проекция спина (на любую ось) при каждом измерении оказывается положительной с вероятностью 1/2 и отрицательной с той же вероятностью. Экспериментатор не может управлять результатами измерения, а следовательно, не может послать сигнал в точку, где расположена вторая частица. Сверхсветовая передача сигнала невозможна.

Невозможность передачи сверхсветового сигнала означает, что "квантовая нелокальность" имеет специфическую, корреляционную природу. Нелокальность результатов измерения имеет место, если имеется ЭПР-пара (две частицы в запутанном состоянии). Однако процесс создания такой пары является локальным. То, что процесс подготовки квантовой нелокальности сам по себе является локальным, будет видно в разделе 2.2.1 при описании квантовой телепортации. Еще одной иллюстрацией может служить рассмотрение в [20] ЭПР-пары спиновых частиц в гравитационном поле, поворачивающемся спин частиц. В этом случае не существует пространственного направления (на которое будет проектироваться спин), определенного во всем пространстве-времени, глобально. Для корректного описания корреляции следует ввести пространственные направления в точке, где расположена одна из частиц, а направления в точке

локализации второй частицы определить параллельным переносом вдоль мировых линий частиц⁵.

В опытах типа опыта Аспекта объективная локальная теория опровергается наблюдениями, в которых измеряется статистика результатов измерений над ЭПР-парой. Гринбергер, Хорн и Цайлингер предложили более сложный корреляционный опыт с тремя фотонами (см. [21]), в котором результаты измерения, предсказанные объективной локальной теорией, более радикально отличаются от того, что предсказывает квантовая механика: для некоторого измерения объективная локальная теория предсказывает положительный результат, а квантовая механика — отрицательный (и последнее подтверждается).

2.2. Приложения: квантовая информация

Свойства запутанных состояний и некоторые другие характерные черты квантовой механики удалось использовать для того, чтобы разработать новые практические приложения квантовой механики, объединяемые под именем квантовой информации [22–25]. Эти приложения развиваются в трех главных направлениях:

- квантовая телепортация,
- квантовая криптография,
- квантовый компьютер.

Основные результаты, полученные в области квантовой информации, формулируются в терминах кубита (qubit), т.е. системы, которая может находиться в одном из двух состояний, скажем, $|0\rangle$ и $|1\rangle$ или в суперпозиции этих состояний⁶. Два или более кубитов могут находиться в запутанном состоянии.

2.2.1. Квантовая телепортация. Квантовая телепортация ставит своей целью передать из одной точки в другую некоторое квантовое состояние, и это делается с помощью ЭПР-пары или, другими словами, за счет квантовой корреляции. До сих пор рассматривалась (теоретически и экспериментально) задача о телепортации лишь одного кубита.

Пусть наблюдатель А (Alice) имеет кубит, находящийся в состоянии

$$|\psi\rangle_A = \alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A,$$

причем параметры α и β ему неизвестны. Задача состоит в том, чтобы кубит, имеющийся в распоряжении удаленного наблюдателя В (Bob), перевести в такое же состояние:

$$|\psi\rangle_B = \alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B.$$

Для этого кубит В должен быть предварительно определенным образом скоррелирован, т.е. включен в ЭПР-пару. Например, можно в точке В создать ЭПР-пару из двух кубитов, С и В, а затем перенести кубит С в точку, где находится наблюдатель А (вместо этого ЭПР-пару из двух кубитов можно создать в любой точке, а затем

⁴ Фактически в этих опытах использовались не частицы спина 1/2, а поляризованные фотоны, а вместо проекции спина измерялась поляризация фотона, однако расчет такого измерения по существу не отличается от того, как рассчитываются измерения проекции спина.

⁵ Более того, корреляция частично "размывается", поскольку мировые линии квантовых частиц определены лишь приближенно.

⁶ Примерами могут служить состояния частицы спина 1/2 с определенной проекцией на выделенную ось, состояние фотона с одной из двух ортогональных поляризаций или состояния двухуровневой системы с определенной энергией.

разнести спаренные кубиты в точки, где находятся наблюдатели А и В). Теперь наблюдатель В имеет кубит В, и задача сводится лишь к тому, чтобы перевести его в нужное состояние. Это делается с помощью следующих трех шагов:

1. Производится некоторое специальным образом устроенное измерение системы, состоящей из кубитов А и С. Такое измерение может иметь 4 различных результата.

2. Результат измерения пересылается (по обычному, т.е. классическому каналу связи) в точку В.

3. Состояние кубита В (возникшее после измерения, проведенного в точке А) подвергается одному из четырех преобразований в зависимости от того, какой результат дало измерение.

Легко проверить, что телепортация по такой схеме возможна. Для этого достаточно выбрать состояние ЭПР-пары вида

$$|\Phi\rangle_{CB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{CB} - |10\rangle_{CB}) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_C|1\rangle_B - |1\rangle_C|0\rangle_B)$$

и на первом шаге произвести над кубитами А и С измерение, описываемое проекторами⁷

$$P_1 = \frac{1}{2}(|01\rangle_{AC} - |10\rangle_{AC})(\langle 01| - \langle 10|),$$

$$P_2 = \frac{1}{2}(|01\rangle_{AC} + |10\rangle_{AC})(\langle 01| + \langle 10|),$$

$$P_3 = \frac{1}{2}(|00\rangle_{AC} - |11\rangle_{AC})(\langle 00| - \langle 11|),$$

$$P_4 = \frac{1}{2}(|00\rangle_{AC} + |11\rangle_{AC})(\langle 00| + \langle 11|).$$

При таком выборе ЭПР-пары и измерения корректирующие преобразования U_i , выполняемые на третьем шаге, следует выбрать в виде

$$U_1 = 1, \quad U_2 = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|,$$

$$U_3 = |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|, \quad U_4 = i(|0\rangle\langle 1| - |1\rangle\langle 0|).$$

Если измерение дает i -й результат, то образующееся после измерения состояние есть (с точностью до нормировки) $P_i|\psi\rangle_A|\Phi\rangle_{CB}$. При этом, как можно убедиться, кубит В оказывается в определенном состоянии $|\psi_i\rangle_B$, которое определяется коэффициентами α и β и номером i . Это состояние тождественно исходному состоянию $|\psi\rangle_A$ лишь в случае, если $i = 1$. Однако в случае произвольного i мы знаем, как получить требуемое состояние кубита В: следует возникшее после измерения состояние $|\psi_i\rangle_B$ подвергнуть преобразованию U_i . После этого кубит В оказывается в нужном состоянии:

$$U_i|\psi_i\rangle_B = |\psi\rangle_B.$$

Заметим, что кубит А после этих операций вообще не находится в определенном состоянии. Вместо этого образуется запутанное состояние кубитов А и С.

Таким образом, при квантовой телепортации произвольное (и заранее не известное) состояние кубита А разрушается, однако возникает идентичное состояние кубита В в другой точке. Инструментом телепортации является ЭПР-пара с компонентами в точках А и В, которая по существу образует квантовую корреляционную линию. Кроме этой заранее подготовленной корреляционной линии требуется еще обычный канал связи между точками А и В, по которому передается информация о результате измерения кубитов А и С.

Телепортация состоит из трех этапов. На первом (подготовительном) этапе создается корреляционная линия (ЭПР-пара). На втором этапе производится измерение кубитов А и С, при этом "квантовая часть" информации о состоянии $|\psi\rangle$ мгновенно передается из точки А в точку В за счет квантовой корреляции. Однако для восстановления этого состояния в точке В требуется еще классическая информация, передача которой происходит 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 В, не может знать, какой из четырех альтернативных результатов измерения в точке А 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 заранее подготовленной корреляционной линии.

Квантовая телепортация была экспериментально реализована в университете Инсбрука [26] с использованием поляризованных фотонов в качестве кубитов. Более подробно о телепортации см. в обзоре [25]⁸.

2.2.2. Квантовая криптография. Мы видели, что при телепортации квантового состояния из одной точки в другую состояние кубита в исходной точке разрушается. Это одно из проявлений общей теоремы о невозможности "клонирования" квантового состояния. Эта теорема является следствием линейности квантовой механики. Любой процесс в квантовой механике описывается унитарным линейным оператором. Клонирование, если бы оно было возможно, описывалось бы преобразованием

$$U|\psi'\rangle|A\rangle = |\psi'\rangle_1|\psi'\rangle_2|A'\rangle,$$

⁸ В работах Б.Б. Кадомцева и М.Б. Кадомцева (см., например, [27, 11]) высказывалось предположение, что необъясненный до сих пор эффект Соколова (поляризация атома водорода, пролетающего вблизи металлической поверхности [28]) может возникать за счет установления квантовой корреляции между атомом и огромным числом электронов в поверхностном слое металла. Это было бы еще одним интересным проявлением запутанных состояний, однако, на наш взгляд, авторы недостаточно убедительно аргументируют, что эффекты от ЭПР-пар, образуемых атомом с разными электронами, когерентно складываются (это необходимо для получения эффекта нужной величины). Вопрос нуждается в дополнительном рассмотрении. Кроме того, представляется сомнительным вывод [11] о том, что эффект Соколова может быть использован для передачи сигнала со сверхсветовой скоростью.

⁷ Изменение состояния измеряемой системы при i -м результате измерения описывается действием проектора P_i . Квадрат модуля получающегося вектора дает вероятность i -го результата измерения.

где через $|A\rangle$, $|A'\rangle$ обозначены состояния аппарата до и после клонирования. Записав такого рода уравнения для двух различных состояний системы $|\psi'\rangle$, $|\psi''\rangle$ и воспользовавшись линейностью оператора U , мы получим для суперпозиции этих состояний

$$U(\alpha|\psi'\rangle + \beta|\psi''\rangle)|A\rangle = \\ = \alpha|\psi'\rangle_1|\psi'\rangle_2|A'\rangle + \beta|\psi''\rangle_1|\psi''\rangle_2|A''\rangle.$$

Очевидно, что суперпозиция двух (не тождественных) состояний $|\psi'\rangle$, $|\psi''\rangle$ не клонируется: даже при $|A'\rangle = |A''\rangle$ состояние $\alpha|\psi'\rangle + \beta|\psi''\rangle$ переходит в $\alpha|\psi'\rangle_1|\psi'\rangle_2 + \beta|\psi''\rangle_1|\psi''\rangle_2$, что отлично от

$$(\alpha|\psi'\rangle_1 + \beta|\psi''\rangle_1)(\alpha|\psi'\rangle_2 + \beta|\psi''\rangle_2).$$

Невозможность клонирования квантового состояния лежит в основе квантовой криптографии. Квантовое криптографическое устройство пересылает вдоль волновода один за другим множество фотонов, причем в поляризациях последовательных фотонов закодирована некоторая информация. Если бы клонирование было возможно, то можно было бы подключиться к волноводу и переписать информацию (скажем, создать точно такую же последовательность фотонов), не нарушая состояния тех фотонов, которые движутся в волноводе. Но ввиду невозможности клонирования каждая попытка получить информацию (подслушать пересылаемое сообщение) с необходимостью приводит к искажению состояний фотонов, движущихся в волноводе. Разработаны специальные процедуры обработки информации, которые позволяют по этим искажениям обнаружить факт подслушивания с любой желаемой вероятностью.

Таким образом, специфика квантовой механики позволяет построить сколь угодно надежные по отношению к прослушиванию секретные линии связи (подробнее см. [25]).

2.2.3. Квантовый компьютер. Идея квантового компьютера [22, 24] основана на том, что в квантовой механике возможны суперпозиции состояний. Квантовая система с двумя базисными состояниями (кубит) позволяет закодировать в этих состояниях $|0\rangle$, $|1\rangle$ числа 0 и 1. Следовательно, цепочка из n кубитов, каждый из которых находится в одном из этих состояний, позволяет закодировать n -значное двоичное число. 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 двоичных чисел длины n . Если теперь 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 позволяет сделать некоторые вычисления в огромной степени более эффективными, чем это возможно с помощью классического компьютера. Задачи, которые могут быть решены на классическом компьютере за экспоненциально большое (т.е. на практике бесконечное) время, на квантовом компьютере могут решаться за полиномиально большое время

(которое для ряда практически важных задач вполне достижимо)⁹.

Согласно сказанному состояние квантового компьютера представляет собой сумму огромного числа слагаемых, каждое из которых есть произведение состояний вида $|0\rangle$ или $|1\rangle$ (сомножители в этом произведении описывают возможные состояния отдельных кубитов в длинной цепочке). 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 состояния. Результат этого измерения и есть цель вычисления. Таким образом, работа квантового компьютера основана на операциях со сложными запутанными состояниями цепочки кубитов.

С помощью такого рода операций можно, например, найти период периодической функции или разложить на множители очень большое число. Последняя задача представляет особую ценность, поскольку ее решение позволило бы легко расшифровывать коды, применяемые на практике. Расшифровка таких кодов с помощью классических компьютеров хотя и возможна в принципе, но требует такого долгого времени, что практически невыполнима.

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 различные 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. Как при взаимодействии происходит потеря когерентности (декогеренция), мы увидим в разделе 3.3.

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. Несколько подробнее можно познакомиться с идеей квантового компьютера в статье [25].

2.3. Квантовая механика на новой стадии

Заканчивая раздел о запутанных состояниях, сделаем еще ряд замечаний. Специфические черты квантовой механики, связанные с запутанными состояниями, впервые были сформулированы в связи с ЭПР-парадоксом, однако в настоящее время они не воспринимаются как парадоксальные. Для людей, профессионально работающих с квантовомеханическим формализмом (т.е. для большинства физиков) нет ничего парадоксального ни в ЭПР-парадах, ни даже в очень сложных запутанных состояниях с большим числом слагаемых и большим числом факторов в каждом слагаемом. Результаты любых опытов с такими состояниями, в принципе, легко

⁹ Имеются в виду экспоненты или полиномы от длины n обрабатываемых двоичных чисел.

просчитываются (хотя технические трудности при расчете сложных запутанных состояний, конечно, возможны).

То, что ощущение парадоксальности исчезло, объясняется тем, что специфика запутанных состояний, известная со времени становления квантовой механики, в наше время исследована более детально. В частности, это проявилось в том, что некоторые специфические черты были сформулированы в виде простых и очень наглядных утверждений или теорем, таких, как невозможность клонирования состояний. С этой детализацией связаны и новые приложения квантовой механики — квантовая информация.

Проходивший в последние два десятилетия процесс активного и детального изучения особенностей квантовомеханических состояний и квантовых измерений связан, разумеется, с появлением новых экспериментальных возможностей, с огромной чувствительностью современной аппаратуры. Увеличение чувствительности измерений привело к тому, что гораздо более широкий круг экспериментаторов вынужден был непосредственно применять в своей работе квантовую механику (см., например, [29]). В результате родились по сути дела новые области науки, такие, как квантовая оптика. Работавшие в этих новых областях люди выработали для себя наглядные образы и простые формулировки, позволяющие студенту или начинающему исследователю легко "войти" в квантовую механику, научиться безошибочно решать возникающие в ней типичные для его области исследований задачи. Появился простой язык, облегчающий выработку квантовомеханической интуиции.

Параллельно с этим процессом "освоения" квантовой механики гораздо большим, чем ранее, числом физиков и инженеров и в тесной связи с этим процессом расширились ее старые приложения (такие, как теория сверхпроводимости) и возникали совершенно новые (такие, как квантовая информация). Практика работы с квантовой механикой лишила многие ее специфические черты (такие, как суперпозиция состояний, запутанные состояния) ореола парадоксальности, присущего им ранее.

В квантовой механике есть, однако, другие вопросы, в которых до сих пор чувствуется некоторая таинственность или парадоксальность и которые именно по этой причине могут оказаться новой точкой роста в квантовой теории. Перейдем к рассмотрению этого круга вопросов.

3. "Шрёдингеровский кот"

Всем известно, что пространство состояний квантовомеханической системы линейно. Это значит, что наряду с любыми двумя ее состояниями $|\psi_1\rangle$, $|\psi_2\rangle$ возможным состоянием является также и их линейная комбинация (суперпозиция) $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ с любыми (комплексными) коэффициентами c_1 , c_2 . Например, если точечная частица может находиться в одной из двух точек, то она может находиться и "одновременно в обеих точках". В классической механике ничего подобного нет. Множество состояний классической системы не является линейным пространством. Классическая система может находиться в одном из возможных состояний, но нельзя придать никакого смысла сумме этих состояний. Более наглядно: камень может находиться либо в одной точке, либо в другой, но не в обеих. Под точками, разумеется,

понимаются конечные области, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними.

Возможность суперпозиций давно уже никого не удивляет в применении к микроскопическим объектам (элементарным частицам или атомам). Давно поставлены опыты, прямо демонстрирующие наличие суперпозиций. Классическим примером таких опытов является знаменитый двухщелевой эксперимент — возникновение интерференционной картины при прохождении потока частиц сквозь непрозрачный экран с двумя щелями. С другой стороны, кажется невозможным существование суперпозиций для макроскопически различных состояний макроскопического тела (например, для двух различных положений камня).

Однако между этими двумя утверждениями по сути дела имеется противоречие. Оно связано с возможностью "усиления", при котором суперпозиция двух микросостояний превращается в суперпозицию двух макросостояний. Такое усиление происходит при квантовом измерении, т.е. при любом измерении, произведенном над квантовомеханической системой.

Наличие противоречия или парадокса очень наглядно выразил Шрёдингер в рассуждении или мысленном эксперименте, получившем известность под именем "шрёдингеровского кота".

3.1. Суперпозиция живого и мертвого кота

Распад нестабильной квантовой системы (например, радиоактивного атома) подчиняется экспоненциальному вероятностному закону. За время, много большее, чем период полураспада, распад заведомо произойдет. Это значит, что за такое время состояние $|\psi_1\rangle$, описывающее нераспавшийся атом, перейдет в состояние $|\psi_2\rangle$, описывающее распавшийся атом и продукты его распада. В любой же промежуточный момент времени состояние нестабильного атома описывается как суперпозиция $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ нераспавшегося и распавшегося атома (коэффициент c_1 убывает, а коэффициент c_2 возрастает с течением времени).

Это не вызывает удивления, поскольку речь идет о микроскопической системе — атоме, а для микроскопических систем суперпозиции состояний возможны. Предположим, однако, что продукты распада детектируются, скажем, счетчиком Гейгера, а выход счетчика подключен к реле, которое включает макроскопическое устройство. Для того, чтобы драматизировать ситуацию и тем самым усилить убедительность рассуждения, Шрёдингер предположил, что атом вместе со счетчиком Гейгера помещен в ящик, где кроме этого находится кот, ампула с ядом и устройство, которое может эту ампулу разбить. При распаде атома и срабатывании счетчика включается устройство, разбивающее колбу с ядом, и бедняга кот умирает. Все ясно после того, как пройдет период, намного превышающий период полураспада атома: кот будет заведомо мертв. Однако в момент времени, сравнимый с периодом полураспада, атом находится в состоянии суперпозиции нераспавшегося и распавшегося атома. Но это значит, что кот в этот момент находится в состоянии суперпозиции живого и мертвого кота!

Налицо противоречие между выводом (о необходимости суперпозиции), к которому мы пришли, рассуждая логически, и наблюдением, которое вряд ли можно подвергнуть сомнению: кот может быть либо живым,

либо мертвым, никто никогда не видел чего-либо похожего на суперпозицию этих двух состояний.

Можно несколько уточнить или по-другому сформулировать вывод. В какой бы момент мы ни открыли ящик, мы увидим либо живого кота (и это будет означать, что атом еще не распался), либо мертвого (и это значит, что атом успел к этому моменту распастся). Однако пока мы не открыли ящик, логика квантовой механики заставляет нас считать, что система (атом + кот) находится в суперпозиции двух состояний: (неразпавшийся атом + живой кот) и (разпавшийся атом + мертвый кот). Парадокс состоит в том, что описание ситуации зависит от того, открыли ли мы ящик, чтобы посмотреть, что в нем находится, или не открывали его.

3.2. "Усиление" квантовой суперпозиции

Все, что находится в ящике помимо атома, имеет целью произвести "усиление", превращающее суперпозицию состояний микроскопической системы в суперпозицию состояний макроскопической системы. Такое усиление происходит при любом квантовом измерении. Механизм усиления состоит в образовании запутанного состояния, включающего макроскопическое количество подсистем (или степеней свободы). Поясним это.

При усилении происходит взаимодействие квантовой системы (находящейся в состоянии суперпозиции) с другими системами (или степенями свободы), вызывающее запутывание (квантовую корреляция) с ними. Затем и исходная система, и уже запутанные с ней системы в свою очередь взаимодействуют с еще большим количеством систем, вовлекая их в запутанное состояние. Так происходит до тех пор, пока не образуется запутанное состояние, включающее огромное число систем или по крайней мере огромное число степеней свободы. Если такие процессы охватывают достаточное количество степеней свободы, то результирующее состояние нельзя интерпретировать иначе чем как суперпозицию макроскопически различных состояний макроскопической системы. Теперь мы то же самое опишем с помощью простейших формул. Предположим, что микроскопическая (и потому заведомо квантовая) система ψ находится в состоянии суперпозиции $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$. Пусть эта система провзаимодействовала с некоторой другой системой α . При заданном начальном состоянии $|\alpha_0\rangle$ системы α результат взаимодействия зависит от состояния системы ψ . Мы будем рассматривать лишь такое взаимодействие, которое приводит к различию между состояниями $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ и при этом не меняет этих состояний. Именно такое взаимодействие характерно для ситуаций, которые можно назвать измерением (в данном случае это измерение, характеризующее проекторами $|\psi_1\rangle\langle\psi_1|$ и $|\psi_2\rangle\langle\psi_2|$). "Различение" означает, что конечные состояния системы α , соответствующие начальным состояниям $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ системы ψ , различны. Переход, вызванный таким взаимодействием, можно описать как

$$|\psi_1\rangle|\alpha_0\rangle \rightarrow |\psi_1\rangle|\alpha_1\rangle, \quad |\psi_2\rangle|\alpha_0\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle|\alpha_2\rangle.$$

Здесь стрелка заменяет действие унитарного оператора, описывающего эволюцию. Но тогда в силу линейности этого оператора начальное состояние $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ системы ψ вызовет переход

$$(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\alpha_0\rangle \rightarrow c_1|\psi_1\rangle|\alpha_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\alpha_2\rangle.$$

Таким образом, после взаимодействия возникло запутанное состояние систем ψ и α .

Предположим теперь, что взаимодействие захватывает большее число систем (или степеней свободы) $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \omega$. При этом исходная (измеряемая) система ψ не обязательно взаимодействует с каждой из этих систем. Она может взаимодействовать лишь с некоторыми из них, а далее уже эти провзаимодействовавшие с ψ системы могут взаимодействовать с остальными (и друг с другом). Важно лишь, что так или иначе информация о состоянии системы ψ будет записана в состояниях всех остальных рассматриваемых систем. По-прежнему мы будем предполагать, что состояние системы ψ не меняется, а состояния остальных систем зависят от этого состояния таким образом, что они различают между состояниями $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$. Это значит, что в результате взаимодействия происходит переход

$$\begin{aligned} |\psi_1\rangle|\alpha_0\rangle|\beta_0\rangle|\gamma_0\rangle \dots |\omega_0\rangle &\rightarrow |\psi_1\rangle|\alpha_1\rangle|\beta_1\rangle|\gamma_1\rangle \dots |\omega_1\rangle, \\ |\psi_2\rangle|\alpha_0\rangle|\beta_0\rangle|\gamma_0\rangle \dots |\omega_0\rangle &\rightarrow |\psi_2\rangle|\alpha_2\rangle|\beta_2\rangle|\gamma_2\rangle \dots |\omega_2\rangle. \end{aligned}$$

Тогда в силу линейности оператора эволюции суперпозиция состояний $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ системы ψ вызывает переход

$$\begin{aligned} (c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\alpha_0\rangle|\beta_0\rangle|\gamma_0\rangle \dots |\omega_0\rangle &\rightarrow \\ \rightarrow c_1|\psi_1\rangle|\alpha_1\rangle|\beta_1\rangle|\gamma_1\rangle \dots |\omega_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\alpha_2\rangle|\beta_2\rangle|\gamma_2\rangle \dots |\omega_2\rangle &= \\ = c_1|\psi_1\rangle|A_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|A_2\rangle. & \end{aligned} \quad (3)$$

Если число систем, участвующих во взаимодействии, макроскопически велико, то таким образом возникает запутывание системы ψ с макроскопической системой A , и образуется суперпозиция двух различных состояний макроскопической системы. Состояния, входящие в суперпозицию, "макроскопически различимы" в том смысле, что огромное число степеней свободы в них описываются различными волновыми функциями. Таким образом, возникает суперпозиция макроскопически различных состояний макроскопической системы. Это и есть механизм усиления, о котором говорилось выше.

Таким образом, следуя обычным правилам квантовой механики, мы приходим к выводу, что суперпозиции должны существовать даже для сколь угодно больших систем (имеющих сколь угодно много степеней свободы). Естественно возникает вопрос о том, можно ли создавать и наблюдать суперпозиции различных состояний макроскопических систем. Иногда такую задачу формулируют как создание и наблюдение "шрёдингеровских котов".

Разумеется, вопрос о том, что значит макроскопическая система или какая система ведет себя классически, не так прост [9, 30–32]. Однако в любом случае можно пытаться создавать суперпозиции для систем, состоящих из все большего и большего количества частиц. Трудность экспериментальной реализации этой программы состоит в том, что при этом система должна быть очень тщательно изолирована, иначе суперпозиции быстро превращаются в смеси за счет декогеренции (см. далее). Для мезоскопических систем, содержащих несколько частиц, задача решена [33, 34]. Экспериментально доказано, что квантовой механике подчиняются не только микроскопические, но и мезоскопические системы.

Суперпозиции удается создавать и в системах с гораздо большим числом частиц. Например, в сверхпроводящем кольце с помощью эффекта Джозефсона создаются условия, которые (по законам квантовой механики) порождают суперпозицию двух токов противоположного направления, в каждом из которых участвует порядка 10^{15} электронов. Эксперименты такого рода согласуются с предсказаниями квантовой механики, но до сих пор ни один из них не дает прямого доказательства существования суперпозиции: не исключается интерпретация этих экспериментов в терминах "макрореалистической" теории, в которой нет суперпозиции, а имеется лишь один из токов, только неизвестно, какой именно. Не исключено, что скоро прямое доказательство будет получено в более точных экспериментах.

3.3. Декогеренция окружением

Мы видели, что усиление квантовой суперпозиции приводит к парадоксу: квантовая механика логически ведет к выводу, что должны существовать суперпозиции макроскопически различных состояний, однако такие состояния никто никогда не наблюдал. Вместо этого всегда наблюдалось одно из таких состояний. Еще раз поясним суть парадокса на ярком примере "шрёдингеровского кота": пока ящик закрыт, мы можем лишь догадываться, что в нем, и если мы верим квантовой механике, то приходим к выводу, что там суперпозиция живого и мертвого кота; однако открыв ящик, мы обнаружим либо живого, либо мертвого кота — ничего другого быть не может.

Эта ситуация воспринимается как парадокс, который требует какого-то объяснения (разрешения). Попытка объяснения, восходящая еще к Гейзенбергу и все более признаваемая научным сообществом в наше время, основана на понятии "декогеренции" (decoherence).

Декогеренция квантовой системы происходит каждый раз, когда ее состояние запутывается с состоянием ее окружения, так что информация о состоянии системы "записывается" в состоянии ее окружения. Рассмотрим, например, процесс (3), переводящий исходное факторизованное состояние системы и ее окружение в запутанное состояние

$$|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle|A_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|A_2\rangle.$$

Это чистое состояние, поэтому оно может быть выражено вектором состояния (волновой функцией). Но мы можем выразить его и в форме матрицы плотности:

$$R = |\Psi\rangle\langle\Psi|.$$

Если нас интересует лишь состояние системы ψ (но не ее окружения A), то описать это состояние можно так называемой редуцированной матрицей плотности, которая равна следу матрицы R по степеням свободы окружения:

$$\rho = \text{tr}_A R = |c_1|^2|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |c_2|^2|\psi_2\rangle\langle\psi_2| + c_1c_2^*\langle A_2|A_1\rangle|\psi_1\rangle\langle\psi_2| + c_2c_1^*\langle A_1|A_2\rangle|\psi_2\rangle\langle\psi_1|. \quad (4)$$

Состояния $|A_1\rangle$ и $|A_2\rangle$ макроскопически различимы, т.е. отличаются друг от друга в огромном числе степеней свободы. В обозначениях уравнения (3) $|\alpha_1\rangle$ отличается от $|\alpha_2\rangle$, $|\beta_1\rangle$ отличается от $|\beta_2\rangle$ и так далее. Поэтому ска-

лярные произведения $\langle\alpha_1|\alpha_2\rangle, \langle\beta_1|\beta_2\rangle, \dots$ по модулю меньше единицы. Следовательно, произведение этих чисел $\langle A_1|A_2\rangle$ практически равно нулю, и перекрестные члены в (4) исчезают.

Состояние системы ψ описывается, следовательно, матрицей плотности

$$\rho = |c_1|^2|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |c_2|^2|\psi_2\rangle\langle\psi_2|. \quad (5)$$

Это смешанное состояние, которое можно интерпретировать следующим образом: система находится с вероятностью $|c_1|^2$ в состоянии $|\psi_1\rangle$ и с вероятностью $|c_2|^2$ в состоянии $|\psi_2\rangle$. Это в точности то, чего следует ожидать после измерения (по крайней мере для простейшего типа измерения, описываемого постулатом редукции фон Неймана). Возникновение смешанного состояния (5) называется декогеренцией (decoherence). При декогеренции теряется информация об относительной фазе коэффициентов c_1, c_2 . Литература по теории декогеренции обширна. Важными работами в этом направлении являются [30, 35–41]. Очень детально и с разных точек зрения физическая природа декогеренции обсуждается в книгах [9, 11], где имеется также полный список литературы. Обзор различных феноменологических подходов к описанию процесса декогеренции имеется в [42, 43].

Иногда различают два типа смешанных состояний, имеющих одинаковые матрицы плотности: 1) собственные смешанные состояния замкнутой системы, которые возникают, если неизвестно точно, в каком из чистых состояний эта система находится, и 2) несобственные смешанные состояния, возникающие, как в нашем случае, при редуцировании, т.е. при переходе от замкнутой системы к ее подсистеме. Если такое различие проводится, то часто утверждается, что несобственные смеси некорректно интерпретировать в терминах "неполного знания", как для собственных смесей. Однако это различие имеет смысл лишь в том случае, если имеется возможность экспериментально контролировать не только саму систему, но и ее окружение (или, в случае замкнутой системы, имеется возможность опытным путем удостовериться, что она замкнута). Никакими опытами, проведенными в рамках некоторой системы, находящейся в смешанном состоянии, невозможно выяснить, является ли эта система замкнутой (и тогда смесь описывает неполное знание) или открытой (и тогда она является следствием запутывания системы с окружением). Невозможность опытного различения этих двух случаев непосредственно следует из того факта, что предсказания всех опытов, возможных в данной системе, выражаются через матрицу плотности этой же системы.

Для нас сейчас важно, что вследствие запутывания с окружением система из чистого начального состояния переходит в смешанное состояние. Суперпозиция состояний системы исчезает, по крайней мере ее невозможно наблюдать, если ограничиться опытами лишь над системой, не затрагивая ее окружения A . Верно и другое: если состояния $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ ортогональны, то после запутывания системы с ее окружением не только система, но и окружение находится не в состоянии суперпозиции, а переходит в смешанное состояние.

Применяя это к ситуации со шрёдингеровским котом, мы можем теперь описать ситуацию несколько точнее.

Квантовая механика предсказывает, что составная система (атом + кот) находится в суперпозиции двух факторизованных состояний: (нераспавшийся атом + живой кот) и (распавшийся атом + мертвый кот). Если же мы интересуемся лишь атомом, то о нем можно лишь сказать, что он находится в смешанном состоянии, т.е. с вероятностью $|c_1|^2$ он не распался и с вероятностью $|c_2|^2$ распался. Аналогично относительно одного лишь кота (если забыть об атоме) можно утверждать, что он находится в смешанном состоянии: с вероятностью $|c_1|^2$ он живой и с вероятностью $|c_2|^2$ мертвый. Во всяком случае никакими опытами, проводимыми с котом и не затрагивающими атом, нельзя выяснить, что истинной причиной появления вероятностного распределения $(|c_1|^2, |c_2|^2)$ является именно суперпозиция, а не просто неполное знание о том, какое из двух состояний кота (живой или мертвый) имеет место.

Если проводить опыты над полной системой (в нашем случае над системой, включающей и атом, и кота), то отличить суперпозицию от смеси в принципе можно: суперпозиция приводит к некоторым интерференционным эффектам, которые отсутствуют в случае смеси. Это, конечно, верно, но следует иметь в виду, что для наблюдения таких эффектов обязательно должны быть задействованы все степени свободы макроскопической системы (кота). Во всяком случае вне контроля измерительной системы может оставаться лишь ничтожное число степеней свободы, иначе суперпозицию от смеси отличить нельзя.

Это видно из модели (3). Если состояния некоторых из степеней свободы $\psi, \alpha, \beta, \gamma, \dots, \omega$ остаются вне наблюдения, то для описания состояния оставшихся степеней свободы следует вычислить для них редуцированную матрицу плотности, вычисляя след по всем степеням свободы, которые не наблюдаются. При этом перекрестные (интерференционные) члены в этой матрице плотности будут содержать скалярные произведения, относящиеся к степеням свободы, исключенным из наблюдения. Каждое из этих скалярных произведений по модулю меньше единицы, и если их достаточно много, интерференционные члены исчезают, суперпозицию нельзя отличить от смеси. Более того, даже если лишь одна степень свободы (скажем, ω) остается вне наблюдения, но скалярное произведение для нее $\langle \omega_1 | \omega_2 \rangle$ равно нулю, то суперпозиция неотличима от смеси. В случае макроскопического числа степеней свободы невозможно, конечно, контролировать в эксперименте абсолютно все степени свободы. Поэтому с практической точки зрения декогеренция в макроскопических системах представляется неизбежной.

Итак, разрешение парадокса шрёдингеровского кота (состоящего в том, что суперпозиции макроскопически различных состояний, предсказываемые квантовой механикой, никогда не наблюдаются) может состоять в следующем. Даже если некоторая система находится в состоянии, описываемом суперпозицией, но затем это состояние запутывается с состоянием окружения таким образом, что в окружении остается информация, позволяющая различить компоненты суперпозиции, то состояние системы подвергается декогеренции. Это значит, что оно становится смесью (а не суперпозицией) тех же компонент, причем никакими экспериментами, проведенными над системой (но не затрагивающими окружение, вызвавшее декогеренцию), невозможно выяснить,

является ли смесь следствием имевшейся до этого суперпозиции или она порождается неполным знанием о том, какая из компонент реально существует. Следствием декогеренции является то, что предсказания квантовой теории для макроскопических состояний невозможно отличить от предсказаний макрореалистической теории, если только не контролируются буквально все степени свободы. Разумеется, число компонент в суперпозиции и в смеси может быть любым. Случай двух компонент рассматривался до сих пор лишь для простоты.

Явление декогеренции, следовательно, чрезвычайно важно с концептуальной точки зрения. Кроме того, это явление необходимо учитывать, если влияние окружения на динамику исследуемой системы не является пренебрежимо малым, т.е. если исследуемая система является открытой. Ввиду этого исследованию декогеренции уделяется большое внимание. В частности, роль декогеренции в квантовых измерениях изучалась не только теоретически, но и экспериментально. Наиболее интересными являются опыты, поставленные в Ecole Normale Supérieure в Париже [44]. Роль компонент суперпозиции играли состояния электромагнитного поля в сверхпроводящем резонаторе, близкие к когерентным состояниям.

Когерентное состояние — это состояние, максимально близкое к некоторой моде классического электромагнитного поля¹⁰, и оно включает очень много фотонов. Для опыта брались состояния, близкие к двум модам, которые отличаются фазой. Поскольку в резонаторе было лишь несколько фотонов, исследуемые состояния не были в точности когерентными, но обладали близкими свойствами. Поскольку фотонов было мало, можно было образовать суперпозицию двух мод с разными фазами ("мезоскопический шрёдингеровский кот"). Ввиду того, что диссипация в сверхпроводящем резонаторе мала, суперпозиция не распадалась в течение заметного времени, так что в течение этого времени отсутствовала неконтролируемая декогеренция. Вместо этого вводилась медленная контролируемая декогеренция. Для этого через резонатор один за другим пропускались атомы, которые, взаимодействуя с фотонами, постепенно производили декогеренцию. При этом возникало запутанное состояние фотонов и атомов и информация о фазе электромагнитного поля записывалась в состояниях атомов. В итоге суперпозиция мод электромагнитного поля с двумя разными фазами постепенно превращалась в их смесь (происходила декогеренция).

Таким образом, картина декогеренции, происходящей во время квантового измерения, реализована и исследована в мезоскопической системе. Декогеренция, следовательно, не только предсказана теоретически, но и подтверждена экспериментально. Несомненно, что декогеренция приподнимает завесу таинственности, которой окутано квантовое измерение. Однако полностью ли решается этим "проблема измерения" в квантовой механике? У некоторых физиков на этот счет остаются сомнения. Попытки решить эту проблему более ради-

¹⁰ Во избежание недоразумений заметим, что в термине "когерентное состояние" слово "когерентный" означает наличие определенной фазы классического волнового процесса. Во всех предыдущих случаях это слово использовалось в другом смысле: наличие определенной относительной фазы между различными компонентами квантовой суперпозиции.

кально ведут к очень интересным вариантам развития теории.

4. Расширение теории измерений

В этом разделе мы рассмотрим некоторые варианты квантовой теории измерений, которые выходят за рамки теории декогеренции, но начнем с того, что сформулируем преимущества и недостатки этой последней.

4.1. Решает ли декогеренция проблему измерения?

С практической точки зрения декогеренция полностью объясняет, как происходит процесс измерения и как после измерения возникает смешанное состояние, эквивалентное вероятностному распределению по различным чистым состояниям, соответствующим альтернативным результатам измерения. Объяснение дается в рамках квантовой механики замкнутой системы, однако на последнем этапе рассмотрение ограничивается некоторой подсистемой, а по степеням свободы, остающимся вне этой подсистемы, производится усреднение. Именно это усреднение и ведет к появлению смешанного состояния. Если не ограничиваться подсистемой, а рассматривать замкнутую систему, то вместо смешанного состояния будет фигурировать суперпозиция, что, как было показано, ведет к парадоксу шрёдингеровского кота.

Таким образом, объяснение квантового измерения на основе декогеренции можно считать вполне удовлетворительным, если мы готовы ограничиться рассмотрением только открытых систем и никогда не рассматривать замкнутые системы. В сущности, в таком ограничении нет ничего неприемлемого. Более того, оно вполне соответствует духу физики. В физике принято ставить лишь такие вопросы, на которые можно ответить путем наблюдения (измерения), а наблюдение не может контролировать каждую из макроскопического числа степеней свободы.

Если измерение описывается в терминах открытой системы, то эта система может быть сколь угодно широкой, но вне ее должны оставаться какие-то степени свободы, в которых в той или иной форме записывается информация о результатах измерения. Эта оговорка характерна для квантового измерения и соответствует хорошо известному произволу в разделении всей Вселенной на измеряемую систему и прибор. Можно назвать прибором все, кроме той системы, состояние которой измеряется, а можно включить в систему и часть аппаратуры, назвав прибором лишь его записывающее устройство (стрелку), можно стрелку также включить в измеряемую систему, а прибором назвать все остальное, начиная с фотонов, летящих в глаз наблюдателя, и т.д. Можно называть измеряемой системой все более и более широкую систему, но вне ее всегда следует оставлять нечто, несущее информацию о состоянии измеряемой системы. Поскольку самого наблюдателя, его мозг, механизмы памяти и т.д. обычно не рассматривают в рамках физики, мы приходим к заключению, что все собственно физические вопросы можно сформулировать и решить в рамках теории открытых систем, опираясь на механизм декогеренции. Как мы могли убедиться, концептуальные вопросы квантовой механики находят в рамках такого подхода вполне удовлетворительное разрешение.

Этот подход активно развивается, в частности, в направлении описания все более и более сложных измерений. Рассматриваются и непрерывные (длящиеся во времени) квантовые измерения. Проблемы, возникающие при таком подходе, носят технический, а не концептуальный характер. Они направлены на построение эффективной теории открытых (измеряемых) систем (см., например, обзор [42] и книгу [43]). Можно выделить два существенно различных уровня описания таких систем — неселективный и селективный. При неселективном описании учитываются все возможные результаты измерения, каждый из которых характеризуется определенной вероятностью. Поведение измеряемой системы описывается при этом матрицей плотности, которая содержит в себе и альтернативные чистые состояния, и распределение вероятностей по этим состояниям. При селективном описании вопрос ставится иначе: как ведет себя система в случае, если измерение дает один определенный результат из всех возможных альтернативных результатов? В этом случае поведение системы описывается вектором состояния (волновой функцией), который зависит от результата измерения. Разумеется, для однократного измерения (которое только и рассматривалось выше) разница между этими двумя описаниями невелика. Однако в случае, если измерение повторяется много раз и нужно проследить, как меняется состояние системы под влиянием этой серии измерений, два подхода существенно различаются технически (при этом физическое содержание процесса, разумеется, одно и то же). В еще большей степени это относится к непрерывному измерению.

Итак, теория открытых систем позволяет описать квантовые измерения, не сталкиваясь с серьезными концептуальными проблемами. Однако для некоторых исследователей этого оказывается недостаточно, и они пытаются пойти дальше, еще более усовершенствовать квантовую теорию. Мотивировки могут быть различными. Некоторые считают, что первичной должна быть непременно теория замкнутых систем, а открытые системы следует рассматривать лишь как подсистемы замкнутых. Для других мотив для дальнейших поисков состоит в том, что несобственные смеси нельзя интерпретировать в терминах неполного знания (как мы это делали в разделе 3.3), так что рассуждение, приводящее к неразличимости суперпозиций и смесей при декогеренции, кажется им неубедительным. Фактически такой аргумент означает, что исследователь не согласен ограничивать описание открытой системой и хочет включить в описание ее окружение (только там лежит ответ на вопрос, является ли смесь собственной или несобственной). Это также предполагает описание в терминах замкнутой системы.

На наш взгляд, самой убедительной мотивировкой исследований, идущих дальше, чем теория декогеренции, является следующая: явление декогеренции хорошо объясняет, почему возникают различные альтернативные результаты измерения, каждая со своей вероятностью, но хотелось бы иметь теорию, которая описывала бы, как происходит выбор (селекция) одной из альтернатив.

4.2. Попытки углубить теорию

Наиболее прямолинейной попыткой построить более глубокую теорию квантовых измерений является гипотеза

теза *спонтанной декогеренции* [45]. В этой теории уравнение Шрёдингера модифицируется включением стохастического члена, описывающего спонтанную декогеренцию. Таким образом, декогеренция в этой теории не является следствием взаимодействия системы с окружением, а время от времени происходит спонтанно без всякого внешнего влияния. Декогеренция становится, таким образом, одним из фундаментальных законов природы. Параметры модифицированного уравнения Шрёдингера подбираются так, чтобы его предсказания на микроскопическом уровне согласовывались с предсказаниями квантовой механики, но на макроскопическом уровне приводили к отсутствию суперпозиций макроскопически различимых состояний. Такую теорию при фиксированных параметрах всегда можно проверить экспериментально, и предложенные уже варианты теории, видимо, будут проверены в ближайшие годы. С другой стороны, если проверка на сегодняшнем уровне точности даст отрицательный результат, можно не отказываться от теории, но лишь изменить ее параметры.

Еще ряд теорий, которые претендуют на более высокий уровень фундаментальности, чем обычная квантовая теория — это

- квантовая механика Давида Бома,
- теория совместных квантовых историй,
- многомировая интерпретация квантовой механики.

В *квантовой механике Бома* [46] наряду с волновой функцией элементарной частицы вводится также ее траектория. Предполагается, что движение частицы можно описывать как движение по траектории, но статистика траекторий выводится из уравнения Шрёдингера. Таким образом, предсказания теории совпадают с предсказаниями обычной квантовой механики. Отличие теории Бома от обычной вероятностной интерпретации квантовой механики в какой-то мере можно считать лишь терминологическим, однако такого рода отличия часто рассматриваются, когда дело идет о различных "интерпретациях" и обобщениях квантовой механики.

Теория *совместных квантовых историй* [47–49] опирается на картину эволюции квантовой системы, напоминающую фейнмановский интеграл по путям. У Фейнмана амплитуда распространения представляется как сумма (интеграл) амплитуд, соответствующих различным путям, ведущим из начальной точки к конечной. В теории совместных историй полная амплитуда представляется как сумма амплитуд, соответствующих различным "квантовым историям". Каждую историю можно (несколько упрощенно) представить как пучок фейнмановских путей. Далее ставится вопрос о том, в каком случае с таким пучком путей (с квантовой историей) можно корректно ассоциировать не только амплитуду вероятности, но и вероятность. Оказывается, это можно сделать, если пучок путей является достаточно широким. Более конкретно, выводится условие, необходимое для корректного введения вероятностей. Оно называется условием совместности квантовых историй. Такие достаточно широкие пучки путей (совместные истории) можно рассматривать как описывающие классическое движение.

Теория совместных историй показывает, следовательно, как классические черты эволюции возникают из чисто квантового описания системы. В данном случае

квантовая система предполагается замкнутой. Если в рамках такой теории мы описываем измерение, то рассмотрение включает и измеряемую систему, и измерительный аппарат. Теория совместных историй позволяет сформулировать необходимое условие появления классических черт — это условие совместности историй (в работе [50] показано, что это условие не является достаточным). Однако эта теория тоже ограничивается перечислением альтернативных классических вариантов эволюции вместе с соответствующими вероятностями. Такая теория не претендует на явное описание механизма селекции, выбора одной из этих альтернатив. Таким образом, задача, сформулированная в конце раздела 4.1, теорией совместных историй не решается.

Наиболее радикальным вариантом углубления теории является *многомировая интерпретация* квантовой механики, предложенная Эвереттом и развитая Уилером [51, 52]. Иногда она называется интерпретацией Эверетта–Уилера. В этом подходе рассматривается замкнутая система, включающая и измеряемую подсистему, и прибор, и наблюдателя (словом, всю Вселенную, весь мир). Соответственно, декогеренции не происходит и нет никакой причины для того, чтобы суперпозиция альтернативных чистых состояний превратилась в смесь. Согласно интерпретации Эверетта, каждая из компонент суперпозиции описывает целый мир, и ни одна из них не имеет преимущества перед другой. Имеется столько миров, сколько альтернативных результатов имеет рассматриваемое измерение. В каждом из этих миров имеется и измеряемая система, и прибор, и наблюдатель. И состояние системы, и состояние прибора, и сознание наблюдателя в каждом из этих миров соответствует лишь одному результату измерения, но в разных мирах результаты измерения различны.

Таким образом, если в теории декогеренции возможны разные результаты измерения, но реализуется (с соответствующей вероятностью) лишь один из них, то в интерпретации Эверетта одинаково реальны все результаты измерения, но реализуются они в разных мирах. Заметим, что в интерпретации Эверетта проблема выбора (селекции) результата измерения все же существует, она лишь иначе формулируется. Вопрос: "Какой из результатов измерения реализуется?" — теперь не стоит, потому что одинаково реальны все результаты. Зато появляется вопрос: "В каком из эвереттовских миров оказался данный наблюдатель?"

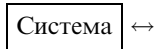
В более наглядной формулировке, предложенной Уилером, в момент квантового измерения перед наблюдателем как бы оказывается железнодорожная стрелка, и его поезд может пойти в одном из нескольких направлений. В зависимости от того, в каком направлении пойдет поезд, наблюдатель увидит тот или иной результат измерения. Возможные направления поезда соответствуют альтернативным результатам измерения или различным эвереттовским мирам. Поезд всегда пойдет лишь по одному из направлений, но все остальные столь же реально существуют, и в других направлениях то же измерение дает другие результаты.

4.3. Квантовая механика и сознание

Таким образом, в интерпретации Эверетта–Уилера трудный вопрос о селекции, т.е. о выборе одного из множества альтернативных результатов измерения, по крайней мере освещается с иной точки зрения. Попро-

буем все же выяснить, нельзя ли далее продвинуться в решении этого вопроса.

Прежде напомним вывод, к которому мы пришли ранее относительно теории открытых измеряемых систем. Условно теорию открытой системы можно представить следующей диаграммой:



Эта диаграмма означает, что влияние окружения на систему учитывается, хотя конкретная модель окружения не включается в описание. Мы выяснили, что такая теория

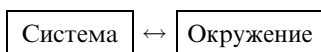
- с точки зрения физики полна, так как может включать любую часть Вселенной, за исключением, быть может, каких-то глубоких структур в мозгу, в которых отображается информация о результате измерения;

- не содержит парадоксов (приводит к смешанным состояниям, а не к суперпозициям);

- может описывать выбор альтернативного результата измерения (селекцию) лишь феноменологически, механизм выбора не обсуждается.

Упомянутое в последнем пункте феноменологическое описание селекции можно формализовать в случае мгновенного (в реальности — пренебрежимо малой длительности) измерения постулатом редукции фон Неймана, а в случае непрерывного измерения — ограниченным интегралом по путям или мнимым потенциалом [42, 43].

Такое описание селекции решает, разумеется, все практические задачи. Однако с концептуальной точки зрения именно то, что в теории открытых систем селекция описывается феноменологически, можно воспринимать как слабый пункт, требующий поиска более полной или более фундаментальной теории. По-видимому, такая теория должна базироваться на рассмотрении замкнутых систем, соответствующих диаграмме



(в этом случае модель окружения фигурирует в теории в явном виде).

Как мы могли уже убедиться, такая теория приводит к суперпозициям макроскопически различимых состояний (к парадоксу шрёдингеровского кота), поскольку не содержит механизма декогеренции. Кроме того, стремясь описать измерение в терминах замкнутой системы, мы вынуждены все дальше и дальше отодвигать границы рассматриваемой системы, так что в конце концов она начинает захватывать органы чувств наблюдателя и те структуры в его мозгу, которые ответственны за отображение информации о результате измерения.

Если хотя бы одна такая структура останется вне того, что мы включаем в измеряемую систему, то 1) возникает декогеренция, в результате которой мы избавляемся от парадоксальной суперпозиции различных состояний, но зато 2) селекция (выбор) одной из альтернатив описывается лишь феноменологически, но не вскрывается ее механизм.

Если же мы включаем в рассматриваемую систему все степени свободы, в которых могла бы быть отра-

жена информация об альтернативе (переходим к теории замкнутой системы), то декогеренции не происходит, в силу чего: 1) остается суперпозиция и 2) по-прежнему не видно никакого механизма селекции одной из альтернатив (в данном случае — одной из компонент суперпозиции).

Может быть, селекция вообще никогда не происходит? В интерпретации Эверетта предполагается именно это: все альтернативы одинаково реальны. Однако одно обстоятельство убеждает, что выбор все же всегда делается: в реальном опыте каждый экспериментатор имеет дело лишь с одной альтернативой. Открывая ящик со шрёдингеровским котом, любой экспериментатор увидит либо живого, либо мертвого кота.

Таким образом, пытаясь оставаться в рамках обычных физических концепций, мы всегда имеем дело со всей совокупностью альтернатив, но описывая происходящее с точки зрения сознания конкретного наблюдателя мы всегда имеем дело лишь с одной из них. По-видимому, приходится сделать вывод, который очень труден для физика: *теория, которая могла бы описывать не только множество альтернативных результатов измерения и вероятностное распределение по ним, но и механизм выбора одного из них, обязательно должна включать сознание.*

В различных формах мысль о необходимости включения наблюдателя и даже сознания в теорию высказывалась с первых лет существования квантовой механики. Например, это было характерно для взглядов Паули [53]. В работе Вигнера [54] содержится даже гораздо более сильное утверждение: сознание не только необходимо включить в теорию измерения, но *сознание может влиять на реальность*. Подобную мысль высказывал и Шрёдингер в эпилоге, которым заканчивается книга [55]. Позже мы еще вернемся к странному утверждению о влиянии сознания на реальность. Сейчас же лишь заметим, что роль сознания в интерпретации квантовой механики обсуждалась в последние годы очень широко (см., например, [7, 8–10, 15]).

4.4. Выбор альтернативы — это и есть работа сознания?

Можно ли что-либо добавить к тому, что уже говорилось по поводу роли сознания в квантовом измерении? Кажется существенным сделать еще один шаг, на первый взгляд небольшой, но по нашему мнению принципиальный.

Мы уже отмечали, что оставаясь в рамках концепций, типичных для физики, мы не можем описать механизм выбора одной из альтернатив. Это нерешенная задача. Предыдущие аргументы дают намек, что решение этой задачи следует искать, включая в рассмотрение сознание наблюдателя. С другой стороны, хотя психологи давно исследуют работу сознания, по-видимому, никто никогда не ответил в достаточно удовлетворительной форме, что же такое сознание или как и почему происходит осознание? Функция сознания остается таинственной и непонятной. Это также нерешенная задача.

Таким образом, мы имеем дело с двумя нерешенными проблемами: 1) как происходит выбор одной альтернативы при квантовом измерении и 2) как функционирует сознание. В истории науки известно, что иногда две трудные проблемы решаются одновременно, как бы помогают решать одна другую. Возможно, в

данном случае мы имеем дело именно с такой парой глубоко связанных друг с другом проблем.

Основываясь на этом, мы предлагаем следующую гипотезу: *Функция сознания состоит в том, чтобы выбрать один из альтернативных результатов квантового измерения.* Если сформулировать нашу гипотезу в рамках многомировой интерпретации Эверетта, она звучит несколько иначе: *функция сознания состоит в том, чтобы выбрать один из альтернативных эвереттовских миров*¹¹. На вопрос: что такое осознание? следует ответить: это выбор альтернативы при квантовом измерении. Лишь после того, как выбор сделан, возникает определенная картина происходящего, описываемая языком классической физики (например, лишь после этого стрелка прибора оказывается в определенном положении). Пока же выбор не произошел, есть лишь квантовая картина с присущим ей множеством альтернатив. Можно сказать так: лишь выбор альтернативы определяет, что же происходит в реальности. Но ведь это именно то, что принято понимать под осознанием: только осознание отвечает на вопрос, что же происходит в реальности. Таким образом, гипотеза об отождествлении сознания с квантовой селекцией вполне соответствует нашей интуиции.

Сформулированная гипотеза близка к тому, что предлагал Сквайрс [7]. Он считал, что сознание — это окно, открывающееся в квантовый мир. Оно не позволяет видеть весь квантовый мир, но лишь один его фрагмент (соответствующий одному из альтернативных результатов квантового измерения или одному из эвереттовских миров).

Подчеркнем все же некоторое отличие предлагаемой нами гипотезы от того, что обсуждалось в литературе до сих пор. Многие авторы говорили о том, что при объяснении квантового измерения следует так или иначе включать в рассмотрение сознание наблюдателя. Мы же считаем, что функция сознания (осознание) сама по себе есть один из этапов квантового измерения, именно — выбор (селекция) альтернативы. Сознание, следовательно, не нужно включать в теорию измерения. Оно уже включено в нее. Нужно лишь узнать в одном из элементов теории измерения (этим элементом является выбор альтернативы) то, что в другом контексте называется осознанием.

Может возникнуть одно возражение против такой гипотезы. Если функция сознания состоит в том, чтобы выбрать один из результатов измерения, то почему они выбираются с разными вероятностями, именно с теми, которые предсказывает квантовая механика? Оказывается, однако, что в теории Эверетта на этот вопрос имеется очень простой и красивый ответ. В этой теории показывается, что среди всех параллельных миров есть тождественные (т.е. такие, в которых все подсистемы имеют одно и то же состояние). При этом мир некоторого определенного типа встречается тем чаще, чем больше квантовомеханическая вероятность соответствующей альтернативы. Другими словами, если N — общее число эвереттовских миров, а N_i — число миров,

соответствующих i -й альтернативе, то $p_i = N_i/N$ — квантовомеханическая вероятность соответствующей альтернативы.

Таким образом, если функция сознания состоит в выборе одного из параллельных миров и этот выбор делается наугад (т.е. с равной вероятностью будет выбран любой из миров), то i -й альтернативный результат измерения будет выбран как раз с вероятностью p_i .

Это замечание является существенной поддержкой нашей гипотезы об отождествлении функции сознания с селекцией эвереттовского мира. При этом можно ответить на известное возражение Эйнштейна Бору. Имея в виду вероятностную интерпретацию квантовой механики, Эйнштейн сказал: "Я не верю, что Бог играет в кости". Исходя из сформулированной гипотезы, можно на это ответить: "Да, Бог не играет в кости, он равно приемлет все возможности. В кости играет сознание каждого наблюдателя".

Рассуждая далее на основе высказанной гипотезы, можно заметить, что от нее остается лишь небольшой шаг до мысли Вигнера [54] о том, что сознание может влиять на реальность. Действительно, если обычно сознание выбирает один из эвереттовских миров наугад, вслепую, то почему не предположить, что может существовать такое сознание (наделенное особым талантом или специальным образом тренированное), которое может делать этот выбор целенаправленно. В таком случае выбор может быть предопределен или по крайней мере вероятность определенного выбора может быть повышена усилием воли. В терминологии Уилера, наблюдатель, наделенный таким "активным" сознанием, может по своей воле переключать стрелку и направлять поезд по избранному им пути (или по крайней мере увеличивать вероятность того, что поезд пойдет по избранному пути).

Разумеется, это не доказательство, а чистая спекуляция, однако в данном контексте она кажется естественной. Тем не менее в такую спекуляцию не так-то легко поверить. Сделаем замечания, которые снимают два возможных возражения. На первый взгляд кажется, что гипотеза о влиянии сознания на выбор альтернативы (назовем ее гипотезой об активном сознании) ведет 1) к несогласованности наблюдений различных экспериментаторов и 2) к возможности нарушения законов природы. Однако это не так или не совсем так.

Кажется, что если исход измерения в какой-то мере зависит от наблюдателя, то два разных наблюдателя одного и того же измерения могут видеть разные результаты. Скажем, руководитель экспериментальной группы и его ассистент, взглянув на прибор, увидят разные показания, потому что руководитель хочет, чтобы показания были высокими, а ассистент стремится к низким (это может быть, если они верят в различные теории и каждый хочет, чтобы его теория подтвердилась). Разумеется, в практике такое не происходит, и это могло бы немедленно дискредитировать гипотезу о влиянии сознания на результат измерения. Однако более тщательный анализ показывает, что гипотеза об активном сознании никогда не приведет к такого рода несогласованностям.

Обратимся к наглядной модели (3). В ней состояние руководителя (его мозга) и состояние ассистента описывается различными факторами (или группами факторов) в каждом произведении. Пусть, например, это факторы α

¹¹ Если принять эту гипотезу, то с чисто технической точки зрения работа сознания описывается ограниченным интегралом по путям или мнимым потенциалом, так как именно этими математическими инструментами можно описать непрерывное измерение при условии, что выбран один определенный результат этого измерения [42, 43].

и β . Очевидно, что эти факторы будут либо в состоянии $|\alpha_1\rangle|\beta_1\rangle$, либо в состоянии $|\alpha_2\rangle|\beta_2\rangle$. Показания прибора, которые видят оба сотрудника, всегда согласованы друг с другом. Если какой-то наблюдатель усилием воли увеличивает вероятность своего попадания в некоторый из эвереттовских миров, то вместе с ним в этом мире он обнаруживает и всех других людей, которые имеют доступ к информации о результате измерения (или его последствий).

В приведенном выше примере, если и руководитель группы, и его ассистент обладают активным сознанием, то руководитель, взглянув на прибор, скорее всего удостоверится, что прибор выдал высокие показания (и продемонстрирует это своему ассистенту, который вынужден будет согласиться); с сознанием ассистента все будет наоборот: скорее всего он увидит, что прибор дает низкие показания, и продемонстрирует это своему руководителю. Руководитель и ассистент скорее всего по-разному переключат железнодорожную стрелку и скорее всего увидят (каждый в своем сознании) разные эвереттовские миры, однако каждый из этих миров будет внутренне согласован. Правда, этот произвол с переключением стрелок вселяет сомнения в объективности науки. К этому мы вскоре вернемся.

Второе из упомянутых выше сомнений состоит в следующем. На первый взгляд кажется, что если усилием воли можно попасть в тот из эвереттовских миров, который больше нравится, то тем самым меняются вероятности различных результатов измерения, т.е. обычные выводы квантовой механики неверны, нарушаются законы природы. Первое возражение против этого состоит в том, что попасть можно лишь в такой эвереттовский мир, который существует и в который всегда можно попасть также и обычным образом, когда сознание выбирает один из миров наугад. Следовательно, если один из людей обладает способностью по своему желанию выбирать некоторый определенный результат измерения, то окружающие всегда могут объяснить это случайностью: вероятность этого, пусть малая, всегда существует. Другое дело, что такой человек мог бы демонстрировать такие способности повторно. Каждый раз его успех может быть объяснен случайным совпадением, но если это будет происходить много раз, то вероятность случайного совпадения будет уменьшаться и может стать чрезвычайно малой. При этом все же нет никакой возможности доказать с достоверностью, что это не случайное совпадение.

К тому же представлением о том, что данному человеку удастся многократно повторить маловероятное событие (сотворить чудо), возникает лишь в сознании самого "чудотворца" (в силу того, что это сознание специальным образом выбирает эвереттовский мир). И это лишь в его сознании другие наблюдатели оказываются свидетелями этого многократного повторения и тем самым убеждаются в его способностях. Если же мы рассмотрим, как то же самое выглядит с точки зрения одного из наблюдателей, обладающего обычным сознанием, то окажется, что он в огромном большинстве случаев увидит, что событие, обещанное чудотворцем, не происходит. Ведь его сознание, выбирая эвереттовский мир наугад, окажется скорее всего в таком мире, в котором маловероятное событие не осуществляется. Вывод состоит в том, что нарушение законов природы может оказаться возможным в индивидуальном опыте

некоторых людей (обладающих активным сознанием), но люди с обыкновенным сознанием, пользуясь методами статистики, не подтвердят этого.

Рассмотрим эту ситуацию с несколько иной точки зрения. Предположим, что человек, умеющий по своему желанию увеличивать или уменьшать вероятность попадания в тот или иной эвереттовский мир, является ученым-экспериментатором (как в рассмотренном ранее примере). Если это возможно, то под сомнением оказывается объективность научных исследований. Какой же объективностью обладает научный результат, если получивший его ученый может на него влиять и в конце концов может получить тот результат, который он хочет? Ответ на это сомнение уже содержится в предыдущем рассуждении, но все же мы повторим его в несколько иной формулировке. Если данный экспериментатор обладает активным сознанием, то в некотором смысле он является чудотворцем и полученные им результаты могут противоречить предсказаниям квантовой механики. Однако, как уже было отмечено, чудо (т.е. реализация заранее намеченного им результата) происходит лишь в его собственном сознании. Кроме того, даже он сам может объяснить это "чудо" случайным совпадением, поскольку полученный им результат допускается квантовой механикой, хоть и с малой вероятностью. Наконец, любой другой наблюдатель, не обладающий активным сознанием, т.е. выбирающий эвереттовский мир наугад, как правило будет оказываться в таком мире, в котором результат опыта соответствует наиболее вероятной из предсказанных квантовой механикой альтернатив (и в котором, следовательно, экспериментатор-чудотворец терпит неудачу). Индивидуальный опыт любого человека с пассивным сознанием всегда будет подтверждать обычные квантовомеханические вероятностные предсказания, и любые "чудотворцы" будут таким опытом посрамлены.

Чтобы сделать последний вывод более наглядным, скажем так. Пока экспериментатор-чудотворец, обладающий активным сознанием, работает наедине в своей лаборатории, он с большой вероятностью получает тот результат, к которому стремится, и лишь с малой вероятностью — результат, наиболее вероятный с точки зрения квантовой механики. Пусть теперь результат опубликован и с ним знакомится большое число людей. Рассмотрим любого из этих людей, который не обладает активным сознанием, не является чудотворцем (или даже является им, но не заинтересован в некотором специальном исходе данного эксперимента) и спросим себя, какой результат эксперимента он увидит в публикации. Ответ очевиден. Его сознание окажется в том или ином эвереттовском мире в соответствии с обычным квантовомеханическим вероятностным распределением. Следовательно, этот человек скорее всего увидит в публикации тот результат, который является наиболее вероятным согласно квантовой механики. Даже если экспериментатор-чудотворец стремился к результату, маловероятному по квантовомеханическим законам, аудитория журнала, состоящая из обычных людей, скорее всего обнаружит в публикации наиболее вероятный результат.

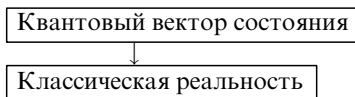
Окончательный вывод можно сформулировать так. Даже если принять гипотезу о возможности активного сознания, тем не менее объективность научных выводов гарантируется тем, что каждый научный результат широко публикуется и затем используется большим

количеством ученых, не обладающих активным сознанием и не имеющих возможности влиять на выбор квантовомеханической альтернативы. Это делает гипотезу об активной роли сознания приемлемой. Она не приводит к абсурдным выводам. Разумеется, это не является еще ее доказательством. Верна ли эта гипотеза, остается неясным. Возможно, что ее принципиально нельзя доказать или опровергнуть. Тогда каждый может верить в эту гипотезу или не верить в нее. Ни в том, ни в другом случае не возникнет противоречия с тем, что наблюдается на практике.

Это напоминает довольно широко распространенное мнение, что существование Бога является только вопросом веры. В сознании глубоко верующего, в его индивидуальном опыте, существование Бога может иметь весьма веские доказательства. Но оно не может быть ни доказано, ни опровергнуто научными методами.

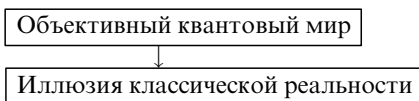
4.5. Квантовый мир и классический мир

Если принять точку зрения, которая развивалась в предыдущем разделе, 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 выбор одного из параллельных эвереттовских миров — это функция сознания, 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 миров, каждый из которых не менее реален, чем все остальные. Что же касается классического мира, то он возникает лишь после того, как сознание выбирает один из параллельных миров. При этом остальные миры вовсе не перестают существовать, поэтому то, что лишь один, выбранный мир, реален — это лишь иллюзия, возникающая в сознании наблюдателя.

Такие взаимоотношения можно проиллюстрировать рисунком, на котором квантовый мир символически изображен как некоторая сложная объемная фигура, а то, что мы называем "классической реальностью", является лишь одной из проекций этой фигуры. Работа сознания состоит в том, чтобы выбрать одну из возможных проекций, однако ни в каком случае эта проекция не

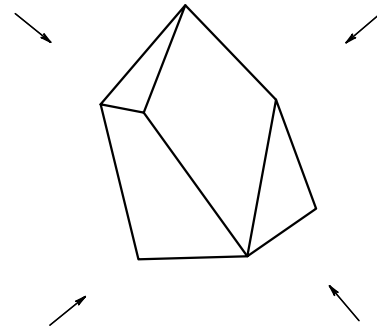


Рисунок. Классическая реальность возникает в сознании как выбор одного из альтернативных результатов измерения и представляет собой взгляд на квантовый мир с одной из возможных точек зрения. В квантовом мире все альтернативы объективно существуют.

отобразит всей сложности объективно существующего квантового мира.

5. Заключение

Мы рассмотрели в этой статье проблему квантовых измерений, причем это рассмотрение распадается на две части, совершенно различные по характеру. Большая часть статьи (разделы 1–3) была посвящена обсуждению специфических черт запутанных состояний квантовомеханических систем и основанной на таких состояниях картины декогеренции, возникающей при квантовом измерении. Было показано, что запутанные состояния не только объясняют, что происходит при квантовом измерении, но делают возможным новые приложения квантовой механики, объединяемые под названием квантовой информации.

В последнем разделе 4 обсуждалась "маленькая тучка", которая еще остается в квантовой теории измерений, основанной на декогеренции. Эта "тучка", т.е. нерешенная концептуальная проблема, состоит в том, что, правильно описывая возникающие при квантовом измерении альтернативные результаты и распределение вероятностей по множеству этих альтернатив, теория декогеренции ничего не говорит о том, как именно происходит выбор одной из альтернатив.

Анализ показывает, что эта проблема по существу лежит вне физики, и по этой причине вполне оправдана точка зрения, что такой проблемы вообще нет. Во всяком случае, этой точки зрения придерживается большинство физиков, она является вполне последовательной и не ведет ни к каким неприятностям и противоречиям в чисто физических задачах. Оставаясь на этой точке зрения, можно вполне успешно решать все практические задачи. Следовательно, с достаточным основанием можно считать, что теория декогеренции и основанная на ней теория открытых измеряемых систем вполне закончена и не нуждается ни в каком развитии, кроме чисто технического (последнее как раз происходит весьма активно, см. обзоры [42, 43]).

Однако были все же физики, и среди них весьма уважаемые, в том числе Вигнер, которые не удовлетворялись этим уровнем решения "проблемы измерения". В разделе 4 обсуждались попытки выхода на более фундаментальный уровень и были кратко охарактеризованы некоторые из путей совершенствования теории, которые позволяют вывести ее за рамки теории декогеренции и

сформулировать в терминах замкнутых, а не открытых систем.

По нашему мнению, наиболее интересной и последовательной среди этих расширенных теорий является многомировая интерпретация квантовой механики Эверетта – Уилера. Мы дополнили эту интерпретацию гипотезой о том, что выбор одного из эвереттовских миров — это и есть то, что называется работой сознания. Этот небольшой, но по нашему мнению принципиальный шаг приводит к очень красивой теоретической конструкции и может предоставить совершенно новую основу для теории сознания.

Если попытаться на основе всего сказанного взглянуть в будущее, то можно предположить, что

— практические приложения запутанных состояний будут и в дальнейшем расширяться,

— эксперименты по квантовой механике включают с течением времени работу мозга и сознание,

— квантовая теория измерений может привести к теории сознания как фундаментального физического свойства, которым тем не менее обладает лишь живая материя.

Последний пункт пока остается в значительной мере спекулятивным, однако он заслуживает особого внимания уже потому, что в случае успеха может привести к радикальному расширению предмета физики, по существу к переходу физики на качественно новый уровень.

Благодарности. Пониманием непростых вопросов, которые затронуты в данной статье, автор обязан многочисленным обсуждениям с коллегами, прежде всего происходившим много лет назад беседам с Ю.А. Гольфандом и недавним дискуссиям с Дитером Цее (H.D. Zeh) и В.А. Намиотом. Работа была частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 98-01-00161.

Список литературы

1. Wheeler J A, Zurek W H (Eds) *Quantum Theory and Measurement* (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1983)
2. Мандельштам Л Д *Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике* (М.: Наука, 1972)
3. Bohm D *Quantum Theory* (New York: Prentice-Hall, 1951) [Перевод: Бом Д *Квантовая теория* (М.: Наука, 1965)]
4. Блохинцев Д И *Принципиальные вопросы квантовой механики* 2-е изд. (М.: Наука, 1987)
5. Марков М А *О трех интерпретациях квантовой механики* (М.: Наука, 1991)
6. Bell J S *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy* (Cambridge: Cambridge University Press, 1987); Bell J S *Physics* (Long Island City, N.Y.) 1 195 (1964)
7. Squires E J *The Mystery of the Quantum World* 2nd ed. (Bristol: IOP Publ., 1994)
8. Penrose R *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (Oxford: Oxford University Press, 1994)
9. Giulini D et al. *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory* (Berlin: Springer, 1996)
10. Lockwood M Br. *J. Philos. Sci.* 47 159 (1996)
11. Кадомцев Б Б *УФН* 164 449 (1994); Кадомцев Б Б *Динамика и информация* 2 изд. (М.: Редакция журнала "Успехи физических наук", 1999)
12. Zurek W H *Prog. Theor. Phys.* 89 281 (1993)
13. Zurek W H *Phys. Today* 46 13 (1993)
14. Leggett T *Phys. World* 12 (12) 73 (1999)
15. Whitaker A, in *Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems* (Lecture Notes in Physics, 0075–8450, 538, Eds P Blanchard et al.) (Berlin: Springer, 2000) p. 299
16. Einstein A, Podolsky B, Rosen N *Phys. Rev.* 47 777 (1935) [Перевод на русский язык ¹² *УФН* 16 (4) 440 (1936)]
17. Bohr N, in *Albert Einstein, Philosopher-Scientist* (The Library of Living Philosophers, Vol. 7, Ed. P A Schliepp) (Evanston, Ill.: Library of Living Philosophers, 1949) p. 200 [Перевод: Бор Н, в сб. *Атомная физика и человеческое познание* (М.: ИЛ, 1961) с. 51]
18. Aspect A *Nature* (London) 390 189 (1999)
19. Tittel W et al. *Europhys. Lett.* 40 595 (1997)
20. von Borzeszkowski H, Mensky M B *Phys. Lett. A* 269 204 (2000)
21. Pan J-W et al. *Nature* (London) 403 515 (2000)
22. Feynman R P *Found. Phys.* 16 507 (1986) [*УФН* 149 671 (1986)]
23. Deutsch D, Ekert A *Phys. World* 11 (3) 41 (1998)
24. Bennett C H *Phys. Today* 48 (10) 24 (1995)
25. Килин С Я *УФН* 169 507 (1999)
26. Bouwmeester D et al. *Nature* (London) 390 575 (1997)
27. Kadomtsev B B, Kadomtsev M B *Phys. Scripta* 50 243 (1994)
28. Соколов Ю Л *УФН* 169 559 (1999)
29. Braginsky V B, Khalili F Ya *Quantum Measurement* (Cambridge: Cambridge University Press, 1992)
30. Joos E, Zeh H D *Z. Phys. B* 59 223 (1985)
31. Zurek W H *Phys. Today* 44 (10) 36 (1991)
32. Leggett A J *J. Supercond.* 12 683 (1999)
33. Garraway B M, Knight P L *Phys. Rev. A* 50 2548 (1994)
34. Haroche S, Brune M, Raimond J R *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* 355 2367 (1997)
35. Mensky M B *Phys. Rev. D* 20 384 (1979)
36. Менский М Б *ЖЭТФ* 77 1326 (1979)
37. Zurek W H *Phys. Rev. D* 24 1516 (1981)
38. Zurek W H *Phys. Rev. D* 26 1862 (1982)
39. Stodolsky L *Phys. Lett. B* 116 464 (1982)
40. Stodolsky L, in *Quantum Coherence Proc. Intern. Conf. on Fundamental Aspects of Quantum Theory, to Celebrate 30 Years of the Aharonov–Bohm Effect, USA, 1989* (Ed. J S Anandan) (Singapore: World Scientific, 1990) p. 320
41. Joos E *Phys. Rev. D* 29 1626 (1984)
42. Менский М Б *УФН* 168 1017 (1998)
43. Mensky M B *Quantum Measurements and Decoherence: Models and Phenomenology* (Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2000)
44. Davidovich L et al. *Phys. Rev. A* 53 1295 (1996)
45. Ghirardi G C, Rimini A, Weber T *Phys. Rev. D* 34 470 (1986)
46. Bohm D *Phys. Rev.* 85 166 (1952); Reprinted in *Quantum Theory and Measurement* (Eds J A Wheeler, W H Zurek) (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1983)
47. Griffiths R B *J. Stat. Phys.* 36 219 (1984)
48. Omnès R *The Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1994)
49. Gell-Mann M, Hartle J *Phys. Rev. D* 47 3345 (1993)
50. Paz J P, Zurek W H *Phys. Rev. D* 48 2728 (1993)
51. Everett H III *Rev. Mod. Phys.* 29 454 (1957); Reprinted in *Quantum Theory and Measurement* (Eds J A Wheeler, W H Zurek) (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1983)
52. DeWitt B S, Graham N (Eds) *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1973)
53. Laurikainen K V *Beyond the Atom: The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli* (Berlin: Springer-Verlag, 1988)
54. Wigner E P, in *Quantum Theory and Measurement* (Eds J A Wheeler, W H Zurek) (Princeton: Princeton University Press, 1983) p. 168; Originally published in *The Scientist Speculates* (Ed. L G Good) (London: Heinemann, 1961) p. 284
55. Schrödinger E *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* (Cambridge: The University Press, 1944) [Перевод: Шрёдингер Э *Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки* (Ижевск: Редакция журнала "Регулярная и хаотическая динамика", 1999)]

¹² Перевод снабжен предисловием В.А. Фока, а после статьи приведен также перевод статьи Н. Бора

Quantum mechanics: new experiments, new applications, new formulations

M.B. Menskiĭ

P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences

Leninskiĭ prosp. 53, 117924 Moscow, Russian Federation

E-mail: mensky@sci.lebedev.ru

Some of the quantum mechanical conceptual problems, their current status, and related theoretical developments are reviewed. The characteristics of the entangled quantum states are analyzed, and new experiments on and quantum information applications of such states are discussed. The well-known paradox of the Schrödinger cat (the impossibility of observing superpositions of macroscopically distinct states that are predicted by quantum mechanics) is discussed. It is shown that decoherence (arising when a quantum system is measured in such a way that some information about its state is recorded in its environment) prevents distinguishing between a superposition and the corresponding mixture. This overcomes the difficulties associated with the paradoxical nature of quantum measurement provided we remain within the framework of the theory of open systems. Other conceptual difficulties, while actually lying outside of physics, are now the subject of much research and have already led to new interesting interpretations of quantum mechanics. The suggestion of Wigner and others that the observer's consciousness be included in the theory of quantum measurement is discussed in this context. A hypothesis is put forward which might enable the functioning of consciousness to be described in quantum measurement terms.

PACS numbers: 03.65.Bz

Bibliography — 55 references

Received 12 April 2000, revised 19 April 2000