

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Концепция сознания в контексте квантовой механики

М.Б. Менский

Рассматриваются концептуальные проблемы квантовой теории измерений, которые находят свое выражение в известных парадоксах, а также в неравенствах Белла. Приводятся аргументы в пользу того, что разрешить эти проблемы вряд ли возможно без непосредственного включения сознания наблюдателя в теоретическое описание квантового измерения. В этой связи обсуждается так называемая многомировая интерпретация квантовой механики, предложенная Эвереттом, а также расширение концепции Эверетта, заключающееся в том, что разделение квантового состояния на компоненты, соответствующие альтернативным результатам измерения, не только связывается с сознанием наблюдателя, но полностью отождествляется с ним. Показывается, что такой подход открывает качественно новые перспективы объединения физики и психологии и, более широко, естественнонаучной и гуманитарной сфер познания. Это может привести к расширению теории сознания и пролить свет на важные и до сих пор не понятые явления в сфере сознания.

PACS numbers: 01.70.+w, 03.65.-w, 03.65.Ta, 03.67.-a

От редактора

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

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

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

М.Б. Менский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (095) 132-62-19. Факс (095) 132-78-80
E-mail: mensky@lebedev.ru

Статья поступила 19 ноября 2004 г.

сказывает, вообще говоря, лишь вероятность событий. Конкретно, в дифракционном опыте квантовая механика предсказывает распределение "точек" на экране или вероятность попадания электрона (т.е. появления "точки") в любое место экрана. Такая ситуация является отражением корпускулярно-волнового дуализма, т.е. того факта, что электрон (или, конечно, какая-нибудь другая микрочастица) — это не "материальная точка" классической физики, движущаяся по какой-то определенной траектории. Если описывать состояние электрона после его взаимодействия с атомами в фотопластинке с помощью волновой функции, то эта функция будет, очевидно, отлична от первоначальной и, скажем, локализована в "точке" на экране. Это и называют обычно редукцией волновой функции. Разумеется, "точки" на экране наблюдатель увидит и на следующий день после осуществления опыта, и при чем здесь какая-то особая роль его сознания, мне непонятно. Подобное толкование квантовой механики как указывающей вероятность наблюдаемых событий и есть, упрощенно говоря, ее "обычная" или, как иногда говорят, копенгагенская интерпретация (см., например, [7–9]). Во всяком случае, я понимаю ситуацию именно так. Однако существуют другие мнения, и вопрос об измерении в квантовой механике не элементарен и дискутируется, как это ясно уже из статьи М.Б. Менского. При этом М.Б. Менский и ряд других безусловно квалифицированных физиков придерживаются точки зрения, отличной от "обычной" интерпретации, что и отражено в публикуемой статье. Насколько я понимаю, это не просто солипсизм, который я усматриваю в аргументации Вигнера, а нечто более сложное. Далее, как известно, происхождение жизни и сознания еще не выяснено, проблема не решена (см., например, [10]). Поэтому просто отмахнуться от обсуждения происхождения человеческого сознания и какой-то связи этого вопроса с квантовой механикой было бы ошибкой. В такой ситуации опубликование статьи М.Б. Менского представляется оправданным и она, как можно думать, вызовет интерес. А это и нужно, ибо без дальнейшего анализа прогресс в области интерпретации квантовой теории измерений невозможен. Может при этом оказаться, что здесь и так все ясно, например, "обычная" интерпретация окончательно победит. Такое заключение также явилось бы успехом. Разумеется, если в обсуждаемой области будут получены достаточно убедительные новые результаты, они найдут отражение и в УФН.

В.Л. Гинзбург

Список литературы

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

Содержание

1. Введение (414).
 2. Квантовые парадоксы и сознание наблюдателя (415).
 3. Явление декогеренции (417).
 4. Неравенства Белла и опыты Аспекта (418).
 5. Некоторые направления дискуссии в УФН (420).
 6. Проблема измерения: этапы исследования (422).
 7. Концепция Эверетта и разделение альтернатив (423).
 8. отождествление сознания с разделением альтернатив (425).
 9. Представление альтернатив коридорами путей (426).
 10. Классические альтернативы — условие существования жизни (427).
 11. На краю сознания (428).
 12. Необходимость новой методологии (431).
 13. Заключение (432).
- Список литературы (434).

*In their beds at night, children ask for details about a fairy tale. How big was the pumpkin? What color were Puss-in-Boots' boots? In the same way, our reason questions our positive understanding. Now then, all this physics! Does it really disclose nothing but rules and recipes?*¹

Bernard d'Espagnat *In Search of Reality* [1]

1. Введение

В 2000 году редакцией УФН была инициирована дискуссия по методологии квантовой физики и, в том числе, по концептуальным проблемам квантовой механики [2]. Как, вероятно, и следовало ожидать, дискуссия сосредоточилась прежде всего на концептуальных проблемах и в частности на вопросе о той роли, которую играет в квантовой механике сознание наблюдателя. В настоящей статье мы подробно обсудим эту "вечную" проблему квантовой механики, уникальную по своей сложности и в сущности выводящую за рамки физики.

Если ограничиться очень краткой формулировкой, то особенность квантовой механики (точнее, квантовой физики, включая релятивистскую), отличающая ее от всей остальной физики, состоит в том, что процесс измерения в ней не удается представить как вполне объективный, абсолютно не зависящий от наблюдателя, воспринимающего результат этих измерений. Еще упрощая, скажем, что при описании квантовых измерений (по крайней мере, при попытках сделать такое описание логически полным, замкнутым) приходится вводить в это описание не только измеряемую систему и прибор, но и наблюдателя, точнее, его сознание, в котором фиксируется результат измерения. Эта черта квантовой механики противоречит нашей интуиции и при первом знакомстве неизбежно вызывает непонимание. Возникающий в этой связи комплекс вопросов чаще всего объединяется под условным названием "проблемы измерения". Несколько десятилетий, прошедших со времени

¹ *По ночам, лежа в своих кроватках, дети требуют деталей в волшебных сказках. Какой величины была тыква? А какого цвета были сапоги у Кота-в-Сапогах? Подобным образом и наш рассудок подвергает сомнению наше безапелляционное понимание. Ну, хорошо, что же вся эта физика? Неужели она на самом деле не может раскрыть перед нами ничего, кроме правил и рецептов?*

Бернард д'Эспанья *В поисках реальности* [1]. — Перевод автора.

создания квантовой механики, показали, что ни решить эту проблему удовлетворительным образом, ни отказаться от нее как ненаучной не удастся.

В отечественной литературе проблема измерения практически не обсуждается, хотя в пятидесятых годах она вызывала бурные и эмоциональные дискуссии. За рубежом, напротив, обсуждение этого вопроса в физической литературе активизировалось и стало более широким. Проблема в целом не воспринимается теперь зарубежными физиками как одиозная, какой она многим представлялась еще лет двадцать назад.

Цель дискуссии, предпринятой в *УФН*, состояла, в частности, в том, чтобы прояснить формулировку "проблемы измерения" и обсудить возможные пути ее решения. В ходе дискуссии выяснилось, что даже ясное понимание того, в чем, собственно, эта проблема состоит, у физиков порой отсутствует. Отчасти это объясняется тем, что концептуальные вопросы квантовой механики не играют никакой роли в практической работе по расчетам квантовых систем и, стало быть, просто неинтересны физикам, ориентированным на практические задачи. На этом основании многим "проблема измерения" вообще представляется надуманной и схоластической, хотя тот факт, что над ней работали выдающиеся физики, вряд ли позволяет игнорировать ее так легко.

Так или иначе, недостаточное понимание сути вопроса среди физиков существенно снизило уровень дискуссии (возможно, этот уровень пострадал и оттого, что первые отклики намеренно были опубликованы без всякого отбора). Однако в то же время такое непонимание подтвердило, что постановка вопроса была своевременной. Возможно, и не следовало ожидать, что после многолетнего перерыва, по разным причинам возникшего в отечественной литературе, обсуждение такого сложного вопроса сразу окажется эффективным. Можно надеяться, что толчок, который был, тем не менее, дан этим обсуждением, принесет свои плоды позднее.

Перейдем теперь к более конкретным вопросам и, по возможности кратко охарактеризовав суть вопроса, поговорим о том, в каком состоянии "проблема измерения" находится сейчас и в чем изменился подход к ее решению за последние десятилетия.

В первой половине статьи мы постараемся пояснить, почему процедура редукции состояния (коллапса волновой функции), фигурирующая в общепринятом описании квантового измерения, является по сути дела отступлением от квантовой механики. Для оправдания этой процедуры требуется апеллировать к чему-то, лежащему вне квантовой механики. Это может быть апелляция к понятию "классический прибор" (как в копенгагенской интерпретации квантовой механики), взаимодействие с которым каким-то таинственным образом нарушает линейность квантовой механики. Вместо этого можно апеллировать к понятию "сознание наблюдателя", явным образом введя его в описание измерения. Так делается в интерпретации Эверетта (многомировой интерпретации) [3, 4].

Во второй половине статьи мы подробнее остановимся на этой интерпретации, которая кажется наиболее перспективной для решения "проблемы измерения". Излагая интерпретацию Эверетта и ее следствия, мы будем опираться на гипотезу об отождествлении сознания наблюдателя с разделением квантового мира на

классические альтернативы, соответствующие альтернативным результатам измерения [2]. Особая роль сознания наблюдателя лежит в самом фундаменте многомировой интерпретации. Тем не менее полное отождествление сознания с тем, что происходит при измерении, радикально меняет точку зрения на всю проблему и особенно на феномен сознания. В результате возникает непосредственная связь между физикой и психологией и, в более общем плане, между естественнонаучной и гуманитарной сферами человеческого познания (см. раздел 11, а также статью [5]).

2. Квантовые парадоксы и сознание наблюдателя

Одна из особенностей квантового измерения состоит в том, что квантовую систему невозможно измерить (т.е. получить какую бы то ни было информацию о ней), не возмущив при этом ее состояния, причем тем сильнее, чем больше информации извлекается при измерении. Это, конечно, хорошо известно и количественно трактуется обычно с помощью соотношения неопределенностей (хотя и здесь некоторые тонкости, связанные с измерением, обычно не учитываются, см. об этом [6, гл. 3]).

Известно также, что, даже точно зная состояние системы, результат измерения в ней можно достоверно предсказать лишь в исключительных случаях (когда система перед измерением находится в одном из собственных состояний измеряемой наблюдаемой). В общем случае можно лишь рассчитать распределение вероятностей по различным результатам измерения. Для практических целей этого вполне достаточно. Все (вероятностные) предсказания, основанные на таких расчетах, хорошо подтверждаются, и в этом смысле измерения квантовых систем не представляют никакой проблемы. Теоретически такой "беспроблемный" подход формулируют в терминах квантового ансамбля — множества одинаковых систем, находящихся в одинаковых состояниях. Зная вероятность того или иного результата измерения, мы знаем, какая доля систем, входящих в ансамбль, даст при измерении данный результат. А большего нам знать (в общем случае) не дано, предсказания результатов измерений (или наблюдений) в квантовой механике имеют лишь вероятностный характер.

Остановившись на такой идеологии, можно вполне успешно работать в квантовой механике и никогда не столкнуться с пресловутой "проблемой измерения". Многие физики не знают, да и знать не хотят, что это за проблема. Она и действительно необычна, хотя бы потому, что наиболее ясные ее формулировки имеют форму парадоксов, знаменитых квантово-механических парадоксов, например парадокс кота Шрёдингера и парадокс друга Вигнера. А физики практического склада не интересуются парадоксами, коль скоро задачи, которые им нужно решить, можно сформулировать корректно.

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

Парадокс шрёдингеровского кота достаточно широко известен. В закрытом ящике находится кот, а

рядом с ним в том же ящике — атом радиоактивного изотопа, счетчик продуктов распада и устройство, которое при срабатывании счетчика разбивает ампулу с ядом. Пока атом не распался, с котом все в порядке, но когда атом распадается и срабатывает счетчик, кот умирает от яда. Далее вступает в силу вероятностный характер квантовой механики: неизвестно, когда атом распадется, в каждый данный момент имеется лишь определенная вероятность распада. А точнее — в каждый данный момент атом находится в суперпозиции (линейной комбинации) двух состояний: состояния, когда он еще не распался, и состояния, когда он распался.

И в результате возникает парадокс. Подходя к закрытому ящику, мы должны согласно законам квантовой механики считать, что система (атом + кот) находится в суперпозиции двух состояний: (нераспавшийся атом + живой кот) и (распавшийся атом + мертвый кот). Но открыв ящик, мы, разумеется, никогда никакой суперпозиции не обнаружим, а увидим либо живого кота (и еще не распавшийся атом), либо мертвого кота (и уже распавшийся атом). Описание системы зависит от того, открыли мы ящик или еще не открыли. В более общих терминах, описание системы после измерения зависит от того, осознал ли наблюдатель результат измерения или нет (в случае шрёдингеровского кота измерением можно считать всю описанную процедуру, а результатом измерения — то, что наблюдатель видит, открыв ящик)².

Парадоксальность происходящего при квантовом измерении еще более подчеркивается в парадоксе друга Вигнера. Вигнер в своей работе [7] рассмотрел ситуацию, в которой не он сам, а его друг проводит измерение некоторой квантовой системы, а потом сообщает ему результат измерения. Результат в конечном счете сводится к тому, что система находится в одном из двух состояний: $|\psi_1\rangle$ или $|\psi_2\rangle$. Экспериментатор узнает о состоянии системы по тому, видит ли он вспышку света в соответствующем измерительном устройстве.

И в этом случае, как и в парадоксе кота Шрёдингера, перед измерением система находится в состоянии, являющемся суперпозицией состояний $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$. А как описать состояние, в котором система находится после измерения? Оказывается, это опять зависит от сознания наблюдателя. Если экспериментатор еще не посмотрел на прибор, то он описывает состояние как суперпозицию $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$. Если уже посмотрел, то либо как $|\psi_1\rangle$, либо как $|\psi_2\rangle$ (в зависимости от того, что именно он увидел). Описание состояния системы зависит от того, осознал ли экспериментатор состояние системы или нет.

Это мы видели уже в парадоксе шрёдингеровского кота. Однако Вигнер вносит новый элемент за счет того, что его друг-экспериментатор передает информацию об измерении ему, Вигнеру. Пока Вигнер не получил этой информации, он описывает состояние системы как суперпозицию $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$. Получив информацию, описывает уже по-другому: либо как $|\psi_1\rangle$, либо как $|\psi_2\rangle$ (в зависимости от того, каково содержание переданной информации). Значит, описание состояния системы Вигнером зависит от того, вошла ли в его сознание информация о результате измерения, переданная ему его другом-экспериментатором.

Парадоксальность ситуации подчеркивается следующим рассуждением. Вигнер говорит: «Если после окончания эксперимента я спрошу моего друга: "Что ты чувствовал по поводу вспышки света перед тем, как я тебя спросил?", он ответит: "Я уже сказал тебе, я видел (не видел) вспышку". Другими словами, вопрос о том, видел или не видел он вспышку, был уже решен в его уме прежде, чем я спросил его». Чтобы ясно понять, что здесь странного (парадоксального), переведем это на язык формул.

Пусть состояние измеряемой системы перед измерением было

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

а состояние прибора $|\Phi_0\rangle$. Тогда состояние составной системы (состоящей из измеряемой системы и прибора) перед измерением дается вектором состояния (волновой функцией)

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

Обозначим через $|\Phi_1\rangle$ состояние измерительного прибора, в котором происходит вспышка, и через $|\Phi_2\rangle$ его состояние, в котором вспышки не происходит. Тогда результат измерения, воспринимаемый наблюдателем, описывается либо вектором $|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle$ (если он видит вспышку), либо $|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$ (если он ее не видит). Первое означает, что прибор из состояния $|\Phi_0\rangle$ перешел в состояние $|\Phi_1\rangle$, а измеряемая система оказалась в состоянии $|\psi_1\rangle$. Второе интерпретируется аналогично. Такие состояния составной системы (состоящей из двух подсистем), как $|\psi_i\rangle|\Phi_i\rangle$, называются факторизованными. В них каждая из подсистем находится в определенном (чистом) состоянии, т.е. характеризуется вектором состояния (волновой функцией).

Предположим, однако, что измерительный прибор уже сработал, но наблюдатель еще не посмотрел на прибор. Тогда состояние полной системы (включающей измеряемую систему и прибор) получается из начального состояния

$$(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\Phi_0\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_0\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_0\rangle$$

действием линейного оператора эволюции или решением линейного уравнения Шрёдингера. Это обязательно, просто в силу линейности такой операции, дает

$$c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle.$$

Пока наблюдатель не осознал результат наблюдения, он руководствуется лишь законами квантовой механики и поэтому должен описывать состояние полной системы вектором

$$|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle.$$

Если же он осознал результат измерения, то будет описывать состояние одним из векторов

$$|\Psi_1\rangle = |\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle, \quad |\Psi_2\rangle = |\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$$

в зависимости от того, какой именно результат он наблюдает. Вигнер описывает состояние вектором $|\Psi\rangle$, пока его друг не сообщил ему результат измерения, но после сообщения — одним из векторов $|\Psi_1\rangle, |\Psi_2\rangle$. После

² Происходящее нельзя объяснить лишь отсутствием у наблюдателя информации. Мы обсудим это в разделе 4.

того, как друг Вигнера (экспериментатор) ответил ему на вопрос: "Что ты чувствовал по поводу вспышки света перед тем, как я тебя спросил?", Вигнер должен сделать вывод, что, даже не получив сообщения о результате измерения, но зная, что измерение произошло и его другу известен результат измерения, он должен описывать состояние одним из векторов $|\Psi_1\rangle$, $|\Psi_2\rangle$ (не зная, правда, каким именно из этих двух). В этом случае описание состояния Вигнером определяется его знанием того, что его друг-экспериментатор посмотрел на прибор, т.е. что в сознание его друга вошла информация о результате измерения.

Еще один нюанс появляется, если рассмотреть ситуацию, когда никакого живого наблюдателя (друга Вигнера) около прибора нет. В этом случае просто в силу линейности уравнений квантовой механики Вигнер (как и любой другой физик на его месте) должен описывать состояние после измерения вектором

$$|\Psi\rangle = c_1|\Psi_1\rangle + c_2|\Psi_2\rangle.$$

Если "измерительный прибор" является микроскопическим, например атомом, то с помощью дополнительных опытов можно убедиться (по наличию интерференционных эффектов), что правильное описание состояния действительно дается вектором $|\Psi\rangle$, а не $|\Psi_1\rangle$ или $|\Psi_2\rangle$. В случае макроскопического прибора такой проверки произвести нельзя, однако вектор $|\Psi\rangle = c_1|\Psi_1\rangle + c_2|\Psi_2\rangle$ можно вывести теоретически, опираясь только на линейность уравнений квантовой механики (например, уравнения Шрёдингера).

Из всего этого в статье Вигнера [7] делался вывод, что живой наблюдатель играет особую роль в квантовой механике, нарушая каким-то образом линейный характер эволюции. Если в сознание наблюдателя входит информация о результате измерения, то описание состояния становится таким, которое не может получиться при эволюции, описываемой линейным оператором.

Статья Вигнера была написана давно, еще в 1961 году, и ее аргументы кажутся на первый взгляд наивными. На самом деле, однако, они вскрывают глубокие и действительно специфические черты квантовых измерений, которые хорошо понятны с чисто формальной, математической стороны, но плохо уживаются с нашей интуицией. Для дальнейшего изложения наиболее важным выводом из сказанного является то, что сознание наблюдателя следует явным образом учитывать при анализе квантового измерения. Это можно аргументировать и другими способами.

3. Явление декогеренции

Формально измерение можно представить с помощью процедуры редукции. Так, в простом примере, рассмотренном в предыдущем разделе, исходное состояние $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ в процессе измерения подвергается редукции, в результате чего с вероятностью $|c_1|^2$ переходит в состояние $|\psi_1\rangle$, а с вероятностью $|c_2|^2$ — в состояние $|\psi_2\rangle$ ³. Редукция состояния (вместе с аналогич-

ными процедурами, которые следуют из редукции и описывают более сложные измерения) дает правильное феноменологическое описание квантового измерения. Однако невольно возникает вопрос, что же при этом происходит "на самом деле" и как возникает такое странное преобразование состояния, как его редукция. Частичный ответ на этот вопрос дает явление декогеренции [9–13, 6], которое мы кратко охарактеризуем, используя пример из раздела 2.

Мы видели, что если измерительный прибор рассматривать как некоторую *квантовую* систему и применять обычное квантово-механическое описание его взаимодействия с измеряемой системой, то в результате взаимодействия этих двух систем их исходное состояние

$$|\Psi_0\rangle = (c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\Phi_0\rangle$$

переходит в состояние

$$|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle.$$

О состоянии вида $|\Psi_0\rangle$ говорят, что оно *факторизованное*, потому что представляется произведением векторов состояния подсистем. Состояние каждой из подсистем в этом случае характеризуется определенным вектором состояния. Состояние $|\Psi\rangle$ после измерения относится к классу *запутанных состояний* (entangled states) двух подсистем (в данном случае — измеряемой системы и прибора). Говорят, что в запутанном состоянии между двумя подсистемами имеется *квантовая корреляция*.

Запутанное состояние невозможно представить в виде произведения двух векторов состояния, относящихся к подсистемам (нельзя факторизовать). Это значит, что хотя составная система, включающая обе подсистемы, находится в чистом состоянии (т.е. ее состояние представимо вектором состояния, в данном случае — $|\Psi\rangle$), но ни одна из подсистем, рассматриваемая отдельно, не находится ни в каком определенном чистом состоянии (т.е. не может быть представлена никаким вектором состояния). Однако вместо этого каждую из подсистем по отдельности можно охарактеризовать *матрицей плотности*. Для измеряемой системы матрица плотности находится следующим образом:

$$\rho = \text{Tr}_\Phi(|\Psi\rangle\langle\Psi|) = |c_1|^2|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |c_2|^2|\psi_2\rangle\langle\psi_2|.$$

В этой выкладке мы к матрице плотности всей системы $|\Psi\rangle\langle\Psi|$ применили операцию частичного следа по состояниям системы Φ (т.е. прибора). При такой операции возникают скалярные произведения $\langle\Phi_i|\Phi_j\rangle$ базисных состояний этой системы, и если состояния $|\Phi_1\rangle$ и $|\Phi_2\rangle$ ортогональны и нормированы, то получается выражение, которое записано справа.

Матрица плотности, в отличие от вектора состояния, описывает уже не чистое, а, как говорят, смешанное состояние. Смешанное состояние можно интерпретировать как вероятностное распределение по некоторому набору чистых состояний. В данном случае матрица плотности означает, что подсистема с вероятностью $|c_1|^2$ находится в чистом состоянии $|\psi_1\rangle$ и с вероятностью $|c_2|^2$ — в чистом состоянии $|\psi_2\rangle$. Нетрудно видеть, что это соответствует обычному вероятностному описанию квантового измерения, т.е. постулату редукции: измерение с вероятностью $|c_1|^2$ может дать первый результат (и тогда измеряемая система окажется в состоянии $|\psi_1\rangle$), а с вероятностью $|c_2|^2$ — второй результат (система в состоянии $|\psi_2\rangle$).

³ Согласно постулату редукции фон Неймана [8] каждое (идеальное) измерение характеризуется полной системой ортогональных проекторов $\{P_i\}$, и при i -м результате измерения начальное состояние системы $|\psi\rangle$ переходит в $P_i|\psi\rangle$.

Переход чистого состояния $|\psi\rangle$ в смешанное состояние ρ называется *декогеренцией*, потому что сопровождается потерей информации об относительной фазе⁴ комплексных коэффициентов c_1, c_2 . В данном случае декогеренция подсистемы произошла в результате того, что эта подсистема провзаимодействовала с другой подсистемой и это взаимодействие привело к запутыванию состояний (квантовой корреляции) двух подсистем.

Таким образом, если после измерения мы хотим описать только измеряемую систему, не включая в описание прибор, то мы вынуждены пользоваться уже не вектором состояния, а матрицей плотности, не чистыми состояниями, а смешанными. Важно, что матрица плотности выводится обычными квантово-механическими методами и содержит в себе вероятностное распределение по различным результатам измерения.

Если нас интересуют только вероятностные предсказания (а этого вполне достаточно для всех практических целей) и никакой более глубокий анализ нам не нужен, то можно считать, что матрица плотности и явление декогеренции, которое она представляет, дают полную картину квантового измерения. В этой картине нет ничего парадоксального, и никаких проблем типа "проблемы измерения" на этом уровне анализа не возникает.

Однако вернемся снова к более глубокому уровню анализа. Используем ставший очень популярным подход, предложенный Джоном Беллом.

4. Неравенства Белла и опыты Аспекта

Чрезвычайно существенно, что особенности квантовых измерений невозможно объяснить (разрешить парадоксы) никаким логически простым способом. Например, вероятностный характер предсказаний результатов измерений можно было бы попытаться объяснить отсутствием полной информации о начальном состоянии. Другими словами, можно было бы предположить, что при измерении квантовой системы все происходит точно так же, как и при измерении классической системы, только мы не знаем точно, каково начальное состояние системы, и потому не можем точно предсказать результат измерения. Однако такое предположение оказывается неверным. Его ошибочность наглядно демонстрируется теоремой Белла [14, 15] и опытами типа опыта Аспекта [16, 17], которые исключают "локальный реализм". Это означает следующее.

Неравенства Белла возникают при анализе экспериментов типа эксперимента Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР), предложенного в знаменитой работе [18]. Наиболее наглядная форма опыта типа ЭПР состоит в том, что частица со спином, равным 0, распадается на две частицы со спинами $1/2$, у каждой из которых измеряется проекция спина на некоторую ось. Результаты таких измерений определенным образом коррелированы. Это ясно уже из того, что сумма проекций спинов всех частиц, участвующих в реакции, сохраняется. До распада эта сумма равна 0 и поэтому после распада тоже должна

остаться нулевой. Корреляция очевидна, если изменятся проекции двух частиц на одну и ту же ось. Тогда если для первой частицы получается проекция, равная $+1/2$, то для второй частицы обязательно получится проекция $-1/2$, и наоборот. Если оси, вдоль которых измеряются проекции спинов, не совпадают, то корреляция сложнее, но она всегда присутствует (за единственным исключением ортогональных осей, когда корреляция полностью исчезает).

Джон Белл рассмотрел следствия, которые возникали бы, если бы еще до измерения проекций спинов они имели определенные значения или хотя бы до измерения частицы можно было характеризовать некоторым вероятностным распределением по проекциям их спинов на заданные оси. Существование такого типа вероятностного распределения еще до измерения характерно для классической физики и получило название "локальный реализм". Белл показал, что в предположении локального реализма результаты измерений в опыте ЭПР обязательно должны удовлетворять некоторым неравенствам, названным *неравенствами Белла*. Таким образом, проведя измерения и проверив, выполняются ли неравенства Белла, можно проверить, имеет ли место локальный реализм. Если неравенства Белла не выполняются, то предположение о локальном реализме следует отбросить.

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

Выполнение этих неравенств было проверено (правда, не с частицами спина $1/2$, а с поляризованными фотонами, но это эквивалентная ситуация) различными группами экспериментаторов. Первый результат был опубликован Аспектом с соавторами [16, 17]. Оказалось, что неравенства Белла нарушаются. Следовательно, предположение об априорном существовании распределения по проекциям спинов (из которого выводятся неравенства Белла) экспериментально опровергнуто.

Это значит, что неверным оказывается привычное (и обязательное в классической физике) представление о том, что свойства, наблюдаемые при измерении, реально существуют еще до измерения, а измерение лишь ликвидирует наше незнание того, какое именно свойство имеет место. При квантовых измерениях (т.е. при достаточно точных измерениях квантовых систем) это не так: свойства, обнаруженные при измерении, могут вообще не существовать до измерения.

Чтобы пояснить это, обратимся опять к приведенным выше простым формулам. Рассматривается измерение, которое выясняет, в каком из двух состояний, $|\psi_1\rangle$ или $|\psi_2\rangle$, находится система (другими словами, каким из двух свойств, обозначенных номерами 1 и 2, обладает измеряемая система). Измерение дает на этот вопрос определенный ответ, т.е. происходит выбор между номерами 1 и 2, и после измерения система действительно оказывается в состоянии ($|\psi_1\rangle$ или $|\psi_2\rangle$), соответствующем выбранному номеру, т.е. после измерения система обла-

⁴ Чистое состояние $|\psi\rangle$ тоже можно отобразить матрицей плотности $\rho_0 = |\psi\rangle\langle\psi|$. Если выразить ρ_0 через векторы $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle$, то окажется, что она отличается от ρ наличием недиагональных членов, пропорциональных $|\psi_1\rangle\langle\psi_2|$ и $|\psi_2\rangle\langle\psi_1|$. Поэтому декогеренцию определяют еще как исчезновение недиагональных членов.

дает тем свойством, на которое указывает результат измерения.

Однако обладала ли система этим свойством до измерения, т.е. была ли она в состоянии $|\psi_1\rangle$ или в состоянии $|\psi_2\rangle$ еще до измерения? Вовсе нет. В общем случае система до измерения была в состоянии $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, которое не тождественно ни $|\psi_1\rangle$, ни $|\psi_2\rangle$. Свойство, обнаруженное при измерении, не существовало до измерения. Обычное для классической физики понимание реальности, которая познается при измерениях, не имеет места в квантовой физике. В некотором смысле при квантовом измерении реальность творится, а не просто познается! По сути дела, это означает, что классическое понимание реальности вообще никогда не бывает правильным, хотя в некоторых случаях, при достаточно грубых измерениях, классическое понимание реальности не приводит к заметным ошибкам, т.е. является достаточно хорошим приближением.

А теперь приходится внести некоторые *уточнения* в только что сказанное: в обсуждаемой нами проблеме нужно внимательно следить за точностью формулировок, а в тех простых формулировках, которые мы использовали, есть одна неточность. Мы сказали, что измерение обнаруживает некоторое свойство, и после измерения система действительно обладает этим свойством (хотя не обладала им до измерения). На языке формул: после измерения, различающего между состояниями $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$, система оказывается в одном из этих состояний. Действительно ли это так? Нет, наверняка мы можем выразиться лишь несколько более слабо: наше *сознание* говорит нам, что система оказывается либо в состоянии $|\psi_1\rangle$, либо в состоянии $|\psi_2\rangle$. Сознание нам так говорит, но так ли это на самом деле — отдельный вопрос.

Если то, о чем говорит нам сознание, действительно происходит, то мы можем сформулировать следующим образом: если результат измерения осознан наблюдателем, то это гарантирует, что система находится в одном из состояний $|\psi_1\rangle$ или $|\psi_2\rangle$. Однако на самом деле доказать это невозможно. Экспериментально доказывается лишь более слабое утверждение (обратите внимание, насколько тонкой является разница): *если результат измерения осознан наблюдателем, то предположение, что система находится в одном из состояний $|\psi_1\rangle$ или $|\psi_2\rangle$, никогда не приведет к противоречию с любыми дальнейшими наблюдениями*, проведенными этим или другим наблюдателем.

Но если наблюдатель вообще не смотрит на прибор, то картина иная, даже после того, как прибор сработал. Состояние полной системы (измеряемая система + прибор) описывается тогда вектором

$$|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle.$$

Это значит, что ни измеряемая система, ни прибор, ни в каком определенном (чистом) состоянии не находятся, а состоящая из них полная система находится в запутанном (квантово-коррелированном) состоянии.

Теперь, вероятно, цепочка рассуждений стала настолько сложной, что стоит выделить из нее главное. Для нас главным будет то, что *суперпозиция, существовавшая перед измерением, не исчезает в результате действия прибора*, по крайней мере до тех пор, пока

наблюдатель не осознает результат измерения. Суперпозиция $|\psi\rangle|\Phi_0\rangle = (c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\Phi_0\rangle$ после измерения переходит в суперпозицию $|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$, а вовсе не в одно из факторизованных состояний, являющихся компонентами этой суперпозиции.

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

Однако мы сейчас же вспоминаем, что именно это превращение и происходит в обычной, наивной, картине квантового измерения. Наблюдатель всегда видит либо $|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle$, либо $|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$. Он всегда видит, что из суперпозиции остается лишь одна ее компонента. И поскольку это всегда соответствует наблюдениям, то изменение, при котором исчезают все члены суперпозиции, кроме одного, было введено в квантовую механику *постулатом редукции* фон Неймана. Соответствующее преобразование называется редукцией состояния, или проекцией фон Неймана, или коллапсом волновой функции. Начиная с первых лет существования квантовой механики, предполагалось, что квантово-механические системы могут эволюционировать двумя качественно различными способами: пока они не измеряются, они эволюционируют линейно, а при измерении подвергаются редукции.

Этот постулат был принят в самой распространенной *копенгагенской интерпретации* квантовой механики, всегда прекрасно работал и так же замечательно работает до сих пор. С точки зрения практических надобностей, методики расчетов и предсказаний нет никаких причин отказываться от этого постулата. Более того, для практических, расчетных, надобностей этот постулат (и, разумеется, различные его чисто технические усложнения и обобщения) заведомо следует сохранить. А с какой же точки зрения в нем можно сомневаться? Ведь если он ведет к правильным предсказаниям, то он верен? Другого критерия в физике нет.

Да, это так. Те, кто делает попытки заменить постулат редукции чем-то качественно иным, стоят на несколько зыбкой почве. И все же основания для этих попыток есть. Перечислим эти основания, помня, однако, что доказательством они не являются и что отказ от постулата редукции будет оправдан лишь в том случае, если заменяющая его теория будет подтверждена экспериментально.

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

Постулат редукции кажется чужеродным в квантовой механике, он делает ее эклектичной. Почему система должна иначе эволюционировать, когда она подвергается измерению? Ведь измерение — это не что иное, как взаимодействие с некоторой другой системой, условно называемой прибором, и не более. А значит,

эволюция полной системы во время этого взаимодействия (т.е. во время измерения) должна быть линейной. Суперпозиция при такой эволюции не исчезнет, все члены суперпозиции, которые были перед измерением, останутся и после него.

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

Кроме макроскопичности прибора, существенно и то, что в ситуации измерения могут возникать неустойчивости, которые эффективно могут приводить к картине, напоминающей редукцию. Однако "вывод" редукции с помощью такого рода рассуждений (см., например, [19, раздел 2.3]) опять-таки связан с приближениями. Поэтому он не может опровергнуть результаты анализа, опирающегося лишь на одно обстоятельство — на линейность квантовой механики, т.е. как раз той теории, которая послужила отправной точкой для этих приближений.

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

Прежде чем перейти к обсуждению различных попыток решить концептуальные трудности квантовой механики, остановимся на некоторых работах, появившихся в *УФН* в рамках дискуссии по квантовой механике.

5. Некоторые направления дискуссии в *УФН*

Остановимся лишь на трех статьях, опубликованных в *УФН* в рамках дискуссии о концептуальных проблемах квантовой механики. Выбор является чисто субъективным и объясняется лишь желанием не отходить слишком далеко от выбранной линии рассуждений.

1. В статье А.В. Белинского [20] содержится интересное техническое замечание о неравенствах Белла при учете ошибок детекторов. Вывод автора состоит в том, что, несмотря на конечную точность детекторов в опытах типа опыта Аспекта, эти опыты, даже без дальнейшего совершенствования детекторов, надежно опровергают неравенства Белла, тем самым экспериментально подтверждая отсутствие в природе локального реализма.

Однако основное содержание статьи [20] посвящено другому. На детально разобранных конкретных примерах реальных или мысленных экспериментов с фотонами

Белинский иллюстрирует главное отличие квантовых измерений, которое как раз и порождает "проблему измерения": свойство системы, обнаруженное при ее измерении (например, определенная поляризация фотона), могло не существовать до измерения. Это положение квантовой теории измерений, ключевое для "проблемы измерения", было детально разобрано нами выше. Однако в примерах, приведенных Белинским, оно предстает в таком виде, который, вероятно, более убедителен для физиков, привыкших иметь дело скорее с описанием конкретных установок, чем с формальными выкладками и абстрактными рассуждениями.

Белинский рассматривает, например, эксперимент, в котором детектируются отдельные фотоны (испускаемые источником настолько малой интенсивности, что вероятность попадания в детектор одновременно более одного фотона ничтожно мала). При этом, очевидно, можно подсчитать количество срабатываний детектора и тем самым найти количество прибывших фотонов. Все это кажется настолько очевидным, что мы даже не замечаем, когда невольно поддаемся искушению пользоваться интуицией, почерпнутой из классической физики.

Но Белинский задает вопросы, которые не позволяют так забыться: "Принято считать, что фотоотсчетам (всплескам фототока приемника) соответствует прибытие фотонов. Но так ли это? Существуют ли кванты в самом световом поле? Приемник измеряет количество фотонов в поле. Но существует ли определенное значение этого количества до момента измерения?" И оказывается, что простыми экспериментами можно доказать, что ответы на эти вопросы отрицательны: световое поле нельзя представить как совокупность определенного количества фотонов, до момента измерения число фотонов не является определенным.

Например, источник фотонов можно сделать таким, что в одних случаях будет регистрироваться по одному фотону, а в других — по два. Казалось бы, световое поле должно представлять собой то единичные, то парные фотоны. Однако это не так, что можно доказать экспериментально. Здесь не место входить в детали. Интересующиеся могут прочесть статью [20], в которой детально прослеживается логика экспериментов, опровергающих классическое представление о числе фотонов.

2. М.А. Попов в статье [21] обсуждает в историческом контексте неизбежность прямого рассмотрения сознания наблюдателя при анализе квантовых измерений. Это важно для "просвещения" читателей как раз в связи с тем, что в отечественной литературе такого рода сведения найти не так-то легко. В этом смысле статья Попова очень полезна. Ее целью было показать, что в наше время теоретический и экспериментальный анализ квантовых измерений вышел на уровень, когда вопрос о роли сознания наблюдателя в таких измерениях можно исследовать экспериментально (см. выше, где говорилось о неравенствах Белла и опытах типа опыта Аспекта).

Некоторые читатели восприняли статью Попова как "проповедь философского идеализма" (если выразиться языком, характерным для ушедшей, но еще памятной эпохи социализма). Полемически заостренное название статьи ("О квантовом идеализме") и некоторые формулировки, которые автор допустил в конце статьи, действительно могут навести на эту мысль. Возможно, и следовало бы избежать этого, изменив название и

устранив некоторые броские фразы. Однако, если говорить не о форме, а о существе дела, то основное содержание статьи посвящено непосредственно физике, а никак не философии. Автор обосновывает мнение (безусловно, оправданное), что развитие квантовой физики, особенно в последние два-три десятилетия, сделало учет сознания наблюдателя совершенно необходимым при обсуждении концептуальных вопросов квантовой механики, а с некоторыми оговорками можно сказать, что вопрос о роли сознания стал доступен экспериментальной проверке.

Если рассматривать статью Попова с этой точки зрения, термин "квантовый идеализм", использованный в ее названии, звучит как яркая метафора, указывающая на необходимость в квантовой механике учитывать сознание наблюдателя самым непосредственным образом. Метафора смелая и острая, однако вполне уместная. Не стоит при этом вспоминать старые советские стереотипы и воспринимать как пропаганду философского идеализма то, что является лишь емкой словесной формулой, рассчитанной на привлечение внимания к важному аспекту квантовой механики — "проблеме измерения".

3. А.Д. Панов в статье [22] для анализа работы сознания наблюдателя использует понятие декогеренции, безусловно чрезвычайно важное в этом контексте. Панов обсуждает декогеренцию, происходящую в материальной субстанции, которая ответственна за осознание наблюдателем результата измерения (скажем, в специальной материальной структуре в мозгу). Желание свести все к обычным физическим процессам, происходящим в физических системах, совершенно естественно для физиков и всегда составляло одно из главных направлений работы над проблемой. И физически прозрачное явление декогеренции, безусловно, является подходящим инструментом для того, чтобы попытаться такое сведение реализовать.

Панов делает очень важное наблюдение, состоящее в том, что запутывание двух квантовых систем (в данном случае — измеряемой системы и материальной субстанции, в которой отражается, или осознается, результат измерения) ведет к декогеренции каждой из них. Если матрица плотности измеряемой системы после взаимодействия с прибором содержит компоненты, соответствующие всем результатам измерения, то аналогичное утверждение справедливо и в отношении сознания наблюдателя. Поясним сказанное.

Рассмотрим уже введенные ранее состояния $|\Psi_1\rangle = |\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle$, $|\Psi_2\rangle = |\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$ измеряемой системы и прибора, соответствующие определенному результату измерения. Как мы видели, на самом деле после измерения устанавливается состояние $c_1|\Psi_1\rangle + c_2|\Psi_2\rangle$. Включим теперь в описание еще и наблюдателя. Когда измерение совершилось, но наблюдатель еще не осознал его результат (например, еще не посмотрел на шкалу прибора), общее состояние измеряемой системы, прибора и наблюдателя имеет вид $(c_1|\Psi_1\rangle + c_2|\Psi_2\rangle)|\chi_0\rangle$. Однако после того как наблюдатель воспримет результат измерения (скажем, в его глаз попадут фотоны, испущенные прибором, и его мозг соответствующим образом среагирует на этот сигнал), состояние примет вид

$$|\Omega\rangle = c_1|\Psi_1\rangle|\chi_1\rangle + c_2|\Psi_2\rangle|\chi_2\rangle,$$

т.е. произойдет запутывание измеряемой системы и прибора с наблюдателем.

Тогда измеряемая система и прибор, рассматриваемые отдельно от наблюдателя, не могут быть охарактеризованы определенным вектором состояния. Вместо этого измеряемую систему вместе с прибором (но без наблюдателя) можно охарактеризовать матрицей плотности:

$$\rho_{\Psi} = \text{Tr}_{\chi} (|\Omega\rangle\langle\Omega|) = |c_1|^2|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1| + |c_2|^2|\Psi_2\rangle\langle\Psi_2|.$$

Матрица плотности описывает уже не чистое, а смешанное состояние измеряемой системы и прибора, рассматриваемых как единая система. В данном случае матрица плотности означает, что эта система с вероятностью $|c_1|^2$ находится в чистом состоянии $|\Psi_1\rangle$ и с вероятностью $|c_2|^2$ — в чистом состоянии $|\Psi_2\rangle$. Другими словами, произошла декогеренция системы, включающей измеряемую систему и прибор. Декогеренция вызвана взаимодействием этой системы с наблюдателем.

Важно, однако, что состояние наблюдателя тоже подверглось при этом декогеренции.

Действительно, беря за основу запутанное состояние $|\Omega\rangle$ и пытаясь описать состояние лишь самого наблюдателя, мы можем добиться этого, применив опять процедуру взятия частичного следа, но теперь уже надо брать след по всем системам, кроме самого наблюдателя. Тогда для наблюдателя (рассматриваемого как физическая система) получим матрицу плотности

$$\rho_{\chi} = \text{Tr}_{\Psi} (|\Omega\rangle\langle\Omega|) = |c_1|^2|\chi_1\rangle\langle\chi_1| + |c_2|^2|\chi_2\rangle\langle\chi_2|.$$

Представленное этой матрицей плотности смешанное состояние наблюдателя интерпретируется очевидным образом: с вероятностями $|c_1|^2$, $|c_2|^2$ он находится в одном из чистых состояний $|\chi_1\rangle$, $|\chi_2\rangle$. Здесь важно, что одно и то же вероятностное распределение характеризует смешанные состояния как измеряемой системы и прибора, так и наблюдателя.

Хотя сейчас для простоты мы говорили о состоянии наблюдателя, на самом деле речь идет о некоем материальном носителе сознания наблюдателя (скажем, о некоторой структуре в его мозгу). Мы видим, что, рассматривая эту структуру, мы получаем картину декогеренции, полностью соответствующую декогеренции материальных систем вне наблюдателя.

Несомненно, такой анализ полезен для понимания происходящего. Но решает ли он проблему измерения? Очевидно, что при описании измерения можно не ограничиваться только описанием декогеренции наблюдателя, а попытаться сделать еще один шаг и задать следующий вопрос: а что на самом деле происходит после измерения? Остается ли наблюдатель после измерения в одном из чистых состояний $|\chi_1\rangle$, $|\chi_2\rangle$ или, опираясь на форму вектора состояния $|\Omega\rangle$, мы должны считать, что ни одно из этих состояний не может исчезнуть, все они остаются как компоненты суперпозиции $|\Omega\rangle$. Если мы выбираем последнее, то опять сталкиваемся с парадоксальностью ситуации и с "проблемой измерения": квантовая механика заставляет нас думать, что оба состояния $|\chi_1\rangle$, $|\chi_2\rangle$ после измерения продолжают существовать (в суперпозиции), тогда как "житейский опыт" показывает, что наблюдатель всегда "ощущает" лишь одно из них.

В литературе иногда встречается мнение, что явление декогеренции снимает "проблему измерения". Мы, тем

не менее, даже учитывая те рассуждения, которые содержатся в статье Панова, придерживаемся точки зрения, что декогеренция, хотя и существенно проясняет ситуацию с квантовыми измерениями, но не снимает всех вопросов. Для того чтобы продвинуться дальше, необходимо, по нашему мнению, продолжить анализ. Следуя этой логике, вернемся к обсуждению вопроса о роли сознания в квантовых измерениях.

6. Проблема измерения: этапы исследования

Проблему, которую мы попытались очертить выше, часто называют "проблемой измерения". Она была поставлена еще на заре квантовой механики и отражала стремление выйти за рамки копенгагенской интерпретации (связанной прежде всего с именем Бора), блестяще решавшей практические задачи, но оставлявшей некоторое неудовлетворение с концептуальной точки зрения. В попытке решить проблему измерения внесли вклад многие выдающиеся физики, в том числе Паули, Шрёдингер, Гейзенберг, Эйнштейн (и, конечно, сам Бор с его блестящим анализом особенностей квантовой механики). Однако и сейчас эту проблему ни в какой мере нельзя считать решенной.

Не так просто проследить тенденции в том, как сообщество физиков относится к "проблеме измерения", потому что в какой-то мере каждое поколение физиков начинает ее осмысление заново и лишь после трудного и долгого периода вхождения в проблему оказывается в состоянии внести в ее решение что-то новое. И все же, как нам кажется, в ходе исследований этой проблемы можно выделить три этапа, качественно отличающиеся друг от друга.

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

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

Когда стало понятно, что первые результаты мало что дали для решения "проблемы измерения", кроме, может быть, лучшего понимания и самой проблемы, и ее необычности, и ее масштабов, — начался второй этап. Он характеризовался почти всеобщей верой в копенга-

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

В 1957 году вышла статья Эверетта [3], в которой была предложена очень смелая и принципиально новая "многомировая" интерпретация квантовой механики. Она положила начало новому этапу в исследовании "проблемы измерения". Первоначально работа Эверетта была замечена немногими. Среди тех, кто ею заинтересовался, были, правда, такие известные физики, как ДеВитт и Уилер [4], но широкой научной общественностью эта работа осталась незамеченной. Однако она сыграла и продолжает играть главную роль на новом этапе исследований.

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

Были и более конкретные причины возобновления интереса к концептуальным вопросам квантовой механики, к "проблеме измерения". Требовались расчеты не только коллективов квантовых систем (атомов, электронов, фотонов и пр.), но и индивидуальных систем (единичный электрон в одноэлектронных устройствах, единичный ион в магнитной ловушке и пр.). Для расчета поведения таких систем "ансамблевая" идеология уже не совсем подходила. Нужно было уметь описывать не только ансамбль систем, но и индивидуальную систему. Более того, для чисто практических нужд (скажем, в квантовой оптике) было необходимо рассчитывать не одно единственное измерение, а целую серию измерений над одной и той же индивидуальной системой, или измерение, непрерывное во времени. В таких условиях настойчиво повторявшееся во многих учебниках по квантовой механике утверждение, что вектор состояния (волновая функция) описывает не индивидуальную систему, а квантовый ансамбль, стало все больше вызывать неудовлетворение. Ансамблевая идеология, в

которой концептуальных проблем вообще не возникает, стала явно недостаточной.

Кроме того, появились качественно новые приложения квантовой механики, которые требовали для своей реализации гораздо более глубокого понимания специфики квантовых систем. Эти новые приложения были объединены под общим названием — квантовая информатика и включали квантовую криптографию, квантовую телепортацию и, главное, квантовый компьютер. Возникшие на этой основе новые технологии существенно использовали как раз те специфические черты квантовых систем, которые порождают "проблему измерения". Для разработки квантово-информационных систем вообще и квантовых компьютеров в особенности нужно было гораздо более глубокое понимание сути квантовой механики, ее отличий от классической. Помимо этого, нужно было уметь корректно описывать поведение таких систем, которые обладают одновременно и квантовыми, и классическими свойствами.

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

7. Концепция Эверетта и разделение альтернатив

В каком же направлении сейчас идут поиски решений концептуальных проблем? Не претендуя на полноту охвата, отметим лишь одно направление, которое, по-видимому, является основным. Это возврат к концепции (или интерпретации) Эверетта [3], которая была предложена еще в 50-е годы. Сам Эверетт называл ее интерпретацией квантовой механики, основанной на понятии относительного состояния (relative state interpretation), однако позднее, после работ Уилера и ДеВитта [4], она стала называться многомировой интерпретацией (many-worlds interpretation). Это название связано с тем, что концепция Эверетта допускает существование многих (а фактически — бесконечного числа) классических реальностей, которые можно наглядно представлять себе как множество классических миров.

Многомировая интерпретация, или интерпретация Эверетта, ранее считавшаяся слишком фантастической, в последние два десятилетия очень активно обсуждается и принята большим количеством специалистов. Были тщательно изучены многие аспекты этой интерпретации и предложены различные варианты ее развития. Достаточно полный обзор литературы по этому вопросу можно найти в обзоре Вайдмана [23], включенном в стэнфордскую электронную энциклопедию по философии. Здесь, не претендуя на полноту отражения всех точек зрения, мы выделим лишь некоторую минимальную, но логически полную линию рассуждений, ведущую, на наш взгляд, к интересным новым перспективам.

Прежде всего поясним интерпретацию (концепцию) Эверетта, продолжая логику рассуждений, начатую в предыдущих разделах. Мы привели правдоподобные

аргументы, свидетельствующие о том, что постулат редукции фон Неймана чужд квантовой механике и принят в ней (ценой эклектичности) лишь для того, чтобы быстро и легко обойти концептуальные проблемы, не решая их по существу, и перейти к практическим расчетам. При редукции фон Неймана от исходной суперпозиции, в использованном ранее примере $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, остается лишь одна компонента (скажем, $|\psi_1\rangle$, а может быть, наоборот, $|\psi_2\rangle$). Но, в противоречие с этой картиной, линейность квантовой механики требует, чтобы все члены суперпозиции сохранились. При измерении происходит лишь запутывание измеряемой системы с окружением, т.е. суперпозиция принимает вид $c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$. Концепцию Эверетта можно трактовать как попытку принять этот аргумент всерьез и учесть его последовательно.

Итак, будем последовательны, не станем "портить" квантовую механику чуждым ей постулатом редукции, а напротив, будем опираться на присущую ей линейность. Тогда мы вынуждены сделать вывод, что после взаимодействия, которое мы называем измерением, состояние системы и прибора примет вид $c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$. Нельзя выбросить ни одной компоненты из этой суперпозиции (которая в общем случае может включать много или даже бесконечное число компонент в зависимости от типа измерения). Но если не выбрасывать, то все эти члены суперпозиции нужно интерпретировать. Это и сделал Эверетт.

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

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

Обозначим вектором $|\chi_0\rangle$ начальное состояние наблюдателя, когда он еще не осознал результаты измерения (быть может, оно еще не закончилось, а быть может, он еще не посмотрел на приборы). Обозначим через $|\chi_1\rangle$ (соответственно $|\chi_2\rangle$) его состояние в момент, когда он уже знает, что измерение дало результат 1 (соответственно 2). Тогда тройная система (измеряемая система + прибор + наблюдатель) находится до измерения в состоянии $(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\Phi_0\rangle|\chi_0\rangle$, после измерения, но до осознания результата измерения — в состоянии $(c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle)|\chi_0\rangle$, а после осознания — в состоянии $c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle|\chi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle|\chi_2\rangle$.

"Эвереттовская" интерпретация этого выражения очевидна: в каждом из классических миров наблюдатель видит (осознает) то, что именно в этом мире произошло. В мире, обозначенном номером 1, наблюдатель находится в состоянии $|\chi_1\rangle$. Это значит, что он осознал, что

измерение дало результат 1, т.е. что измеряемая система и прибор находятся в состоянии $|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle$. Аналогично в мире с номером 2 наблюдатель находится в состоянии $|\chi_2\rangle$, т.е. в его сознании картина происходящего соответствует состоянию $|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$ измеряемой системы и прибора (см. рисунок).

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

Рис. Разделение альтернатив.

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

В обычной (копенгагенской) картине измерения происходит редукция состояния или, что то же, выбор одного альтернативного результата измерения из всех возможных. Это можно назвать селекцией альтернативы. Все альтернативы, кроме выбранной, после редукции исчезают. Переходя к эвереттовской интерпретации, мы видим, что редукция, или селекция, одной альтернативы не происходит. Вместо этого осуществляется расщепление, или разделение, состояния квантового мира на альтернативные классические "реальности", или миры. Сознание наблюдателя воспринимает различные классические миры независимо друг от друга. Условно можно сказать, что сознание разделяется на компоненты, каждая из которых воспринимает лишь один классический мир. Субъективно наблюдатель воспринимает происходящее так, будто существует лишь один классический мир, именно тот, который он видит вокруг себя. Однако согласно концепции Эверетта на самом деле во всех альтернативных мирах имеются как бы "двойники" этого наблюдателя, ощущения которых дают каждому из них картину того мира, в котором "живет" именно он.

В интерпретации Эверетта возникает некоторая двойственность, довольно трудная для осмысления. Все альтернативы реализуются, и сознание наблюдателя разделяется между всеми альтернативами. В то же время индивидуальное сознание наблюдателя субъективно воспринимает происходящее так, будто существует лишь одна альтернатива, в которой он живет. Другими словами, сознание в целом разделяется между альтернативами, но индивидуальное сознание субъективно осуществляет выбор (селекцию) одной альтернативы.

Заметим во избежание недоразумений, что в одном (любом) эвереттовском мире все наблюдатели видят одно и то же, их наблюдения согласованы друг с другом (если, конечно, не говорить о возможных чисто человеческих ошибках, а иметь в виду идеальных наблюдателей). Это следует из того, что первоначальное состояние

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

измеряемой системы, прибора и двух наблюдателей в силу линейности квантово-механической эволюции перейдет в состояние

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

Состояния, включающие факторы $|\chi_1^{(1)}\rangle|\chi_2^{(2)}\rangle$ или $|\chi_2^{(1)}\rangle|\chi_1^{(2)}\rangle$, которые означали бы несогласованность наблюдений, появиться никак не могут.

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

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

Во-вторых, вся картина кажется более фантастической, чем она есть на самом деле, когда, стремясь выразиться наглядно, говорят о многих классических мирах. На самом деле картина многих миров не только излишне драматизирует ситуацию, но может вводить в заблуждение (и действительно нередко вводит в заблуждение) тех, кто знакомится с ней, не имея еще достаточного опыта в этом вопросе. Стоит периодически вспоминать (а в случае затруднений или колебаний нужно обязательно это делать), что никаких "многих классических миров" на самом деле нет. Есть только один мир, этот мир квантовый, и он находится в состоянии суперпозиции. Лишь каждая из компонент суперпозиции по отдельности соответствует тому, что наше сознание воспринимает как картину классического мира, и разным членам суперпозиции соответствуют разные картины. Каждый классический мир представляет собой лишь одну "классическую проекцию" квантового мира. Эти различные проекции создаются сознанием наблюдателя, тогда как сам квантовый мир существует независимо от какого бы то ни было наблюдателя.

Если говорить "различные компоненты суперпозиции" вместо "различные классические миры", то исчезают многие недоразумения, бытующие в популярной литературе и в дискуссиях по данному вопросу. Например, картина многих миров создает иллюзию, что в момент измерения один классический мир превращается в несколько (или даже бесконечное количество) миров. При этом иногда даже говорят о чудовищном несохранении энергии при таком "размножении миров". На самом деле ничего подобного, разумеется, нет в интерпретации Эверетта⁵. И до измерения, и после него существует один-единственный вектор состояния, описывающий состояние квантового мира. Просто в момент измерения (а точнее, в период взаимодействия измеряемой системы с прибором) происходят специфические изменения в этом состоянии и в описывающем его векторе: запутывание между измеряемой системой и измеритель-

⁵ В работе [24] эта мысль выражена в такой яркой форме: "What Everett does NOT postulate: At certain magic instances, the world undergoes some sort of metaphysical "split" into two branches that subsequently never interact". (Чего Эверетт НЕ постулирует: в определенные волшебные моменты мир испытывает какое-то метафизическое "расщепление" на две ветви, впоследствии никогда не взаимодействующие". — Перевод автора.)

ным прибором (измеряющей средой). Для формального описания этого изменения мы представляем вектор состояния в виде суперпозиции нескольких компонент и показываем, как меняется при измерении (под влиянием взаимодействия) каждая из этих компонент. Этот анализ подробно обсуждался в предыдущих разделах.

Не только ветвление мира, но даже представление о том, что измерение происходит в определенный момент времени сразу во всех точках конечной области (в которой отлична от нуля волновая функция измеряемой системы), является излишне упрощенным. Оно, например, несовместимо со специальной теорией относительности, в которой одновременность событий в различных точках вообще нельзя определить. Все эти трудности возникают из-за идеализации, содержащейся в понятии мгновенного измерения. Они исчезают при переходе к картине непрерывного измерения (см. в этой связи работу [25], в которой измерение положения обсуждается в рамках релятивистской теории). Позднее, в разделе 9, мы поговорим о непрерывном измерении подробнее и в связи с этим введем другой способ описания альтернатив — с помощью коридоров путей. При таком описании вопрос о "размножении" классических миров вообще не возникает.

Имеется одно действительно существенное возражение против концепции Эверетта. Оно состоит в том, что эту концепцию невозможно проверить, или, по крайней мере, так кажется на первый взгляд. Поскольку все формулы в ней — те же самые, что и в обычной квантовой механике, то и предсказания, которые получаются в рамках этой концепции, не отличаются от тех, что вытекают из обычных квантово-механических расчетов, проведенных в рамках копенгагенской интерпретации. Именно поэтому концепция Эверетта — это лишь иная интерпретация квантовой механики, но не иная квантовая механика.

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

По этой причине некоторые последователи Эверетта предлагали модифицировать его концепцию таким образом, чтобы она стала проверяемой. Мы считаем, однако, что даже без всякой модификации концепции Эверетта ее можно проверить, правда, экспериментами или, скорее, наблюдениями особого рода, а именно наблюдениями над индивидуальным сознанием. Об этом мы поговорим в конце статьи, а пока попытаемся еще более уточнить, как следует понимать сознание в рамках концепции Эверетта.

8. Отождествление сознания с разделением альтернатив

Два аспекта квантового измерения — декогеренция и выбор (селекция) альтернативы имеют различный статус в квантовой механике. Декогеренция, т.е. переход чистого состояния

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$$

в смешанное

$$\rho = |c_1|^2|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |c_2|^2|\psi_2\rangle\langle\psi_2|,$$

легко выводится обычными квантово-механическими методами из картины взаимодействия между измеряемой системой и измерительным прибором (см. раздел 3). В декогеренции нет ничего необычного и непонятного. Она порождается запутыванием измеряемой системы с измерительным прибором, которое, в свою очередь, вызывается их взаимодействием.

Необычным или, как мы уже замечали, чужеродным с точки зрения квантовой механики является второй аспект квантового измерения — выбор (селекция) одного из всех имеющихся альтернативных результатов измерения. Математически это выражается переходом от матрицы плотности ρ к одной из ее компонент $|\psi_1\rangle\langle\psi_1|$ или $|\psi_2\rangle\langle\psi_2|$, т.е. вновь к чистому состоянию $|\psi_1\rangle$ или $|\psi_2\rangle$. Альтернативно селекцию можно описать как переход от чистого (но запутанного) состояния измеряемой системы и прибора $|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$ к состоянию, описываемому лишь одной из компонент этой суперпозиции.

Законами эволюции квантово-механических систем такой переход (редукция состояния) не предусмотрен. Никакое взаимодействие не может этого перехода вызвать. Как мы уже говорили, введен он в квантовую теорию измерений (в форме постулата редукции) искусственно, чтобы описать то, что реально наблюдается при измерениях квантовых систем классическими приборами, однако это описание эклектически соединяет квантовую теорию с классической. Если считать квантовую теорию правильной и при этом быть последовательным, то нужно признать, что редукция вообще не может происходить и следует исключить ее из теории. Это и делается в концепции Эверетта. Требуется, однако, как-то объяснить, почему наблюдатель всегда видит лишь одну альтернативу.

Будем рассуждать логично. Если объективно (т.е. в соответствии с законами квантовой механики) селекции альтернативы не происходит, а наблюдатель, тем не менее, всегда осознает лишь одну альтернативу, значит, селекция альтернативы происходит в сознании наблюдателя.

Эта мысль не является новой. И Эверетт, и все его последователи в той или иной форме признают, что селекция альтернативы связана с сознанием (см., например, [26–29]). Однако, в отличие от других авторов, мы усилим это положение и будем предполагать [2], что это не просто связь между двумя различными явлениями или понятиями, а эти явления, которые кажутся различными (хотя и связанными), на самом деле тождественны друг другу. Другими словами, мы предполагаем, что селекция альтернативы должна быть отождествлена с сознанием. Уточним это.

В концепции Эверетта имеется два различных аспекта сознания (см. раздел 7). Сознание в целом разделяется между альтернативами, а "компонента" сознания живет в одной классической альтернативе. В психологии сознанием называется, конечно, лишь то, что воспринимается субъективно, т.е. в нашей терминологии — лишь "классическая компонента" сознания. Значит, для того, чтобы произвести отождествление понятия "сознание" с некоторым понятием из квантовой теории измерений,

мы должны понимать сознание расширительно, как нечто, способное охватить весь квантовый мир, а не только одну его классическую проекцию. Таким образом, мы приходим к следующей *гипотезе отождествления*:

Способность человека (и любого живого существа), называемая сознанием, — это то же самое явление, которое в квантовой теории измерений называется редукцией состояния или селекцией альтернативы, а в концепции Эверетта фигурирует как разделение единого квантового мира на классические альтернативы.

Гипотеза отождествления, о которой мы сейчас говорим, не является совершенно новой. Она тесно связана с такими вариантами интерпретации Эверетта, в которых фигурирует понятие "многих разумов" (many minds). Иногда таким вариантам интерпретации Эверетта присваивают отдельное название — "интерпретация многих разумов" (many-minds interpretation) (см. [30, 27, 23, 28]). Нам представляется, что предлагаемая гипотеза легче для понимания и более плодотворна, хотя эта оценка, конечно, вполне субъективна.

На первый взгляд шаг, который делается, если мы принимаем гипотезу отождествления, невелик. Однако на самом деле он позволяет совсем по-новому посмотреть на соотношение между квантовым измерением и сознанием наблюдателя.

В чем меняется точка зрения, если мы отождествляем разделение альтернатив и сознание? Раньше мы знали, что эти явления, принадлежащие качественно различным сферам, тем не менее, связаны друг с другом. Теперь мы считаем, что это просто одно и то же явление. Значит, раньше две сферы, квантовая механика и психология, не имели никаких общих элементов (хотя между ними и существовала некая функциональная связь), а теперь у них есть общий элемент — сознание. *Сознание оказывается общей частью квантовой физики и психологии*, а тем самым — общей частью естественнонаучной и гуманитарной сфер.

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

Отождествление сознания и разделения альтернатив, т.е. двух явлений из качественно различных сфер, объясняет, почему оба эти явления плохо поддаются пониманию при обычном подходе. Понимание не достигается потому, что анализ каждого из этих явлений производится в рамках лишь одной сферы и тем самым упускается важный аспект, лежащий в другой сфере.

В дальнейшем мы будем неоднократно опираться на понятие сознания как общей части физики и психологии,

что позволит яснее представить возможности, таящиеся в концепции Эверетта. Но прежде уточним понятие измерения и альтернативных результатов измерения, перейдя от мгновенных к непрерывным измерениям.

9. Представление альтернатив коридорами путей

До сих пор, говоря об измерении, мы имели в виду мгновенные измерения, поэтому в качестве альтернатив выступали векторы состояния, представляющие компоненты суперпозиции (в простейшем примере, который мы систематически использовали, это были векторы $|\psi_1\rangle|\Phi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$). Теперь мы рассмотрим более общую и более реалистическую ситуацию, когда измерение происходит непрерывно. В этом случае альтернативы можно представлять *коридорами путей*.

На самом деле мгновенных измерений вообще не существует, каждое измерение имеет конечную продолжительность. В некоторых случаях длительность измерения пренебрежимо мала, так что его можно считать мгновенным, не делая при этом большой ошибки. Вот тогда-то и можно говорить о мгновенном измерении.

Мгновенные измерения хороши для того, чтобы проанализировать некоторые черты квантовых измерений, не усложняя этот анализ техническими деталями. Так мы и поступали до сих пор. Однако в действительности измерения чаще всего нельзя считать мгновенными, а следует учитывать их продолжительность и говорить о *непрерывном измерении*. В некоторых случаях продолжительность непрерывного измерения очень велика. Особенно это касается ситуации, когда "квантовое измерение" не организуется специально экспериментатором, а возникает спонтанно в результате неконтролируемых взаимодействий квантовой системы с ее окружением⁶. В этом случае окружение часто называют резервуаром.

Простейшим примером спонтанно возникающего непрерывного измерения может служить "квантовая диффузия", т.е. движение микроскопической частицы через некоторую среду. На своем пути такая частица постоянно взаимодействует с молекулами среды, которые оказываются вблизи нее. В результате состояние молекул меняется, так что в резервуаре остается информация о положении движущейся частицы и ее импульсе, происходит измерение (с некоторым конечным разрешением) траектории этой частицы. Обратное влияние окружающей среды (резервуара) на частицу можно рассматривать как эффект ее измерения этой средой.

Непрерывное измерение можно представить как последовательность большого количества мгновенных измерений, происходящих достаточно часто. Вместо этого его можно описать с помощью пучков фейнмановских путей, которые для наглядности можно представлять как коридоры путей [31]. Дискретным аналогом таких коридоров являются квантовые истории [32].

Коридоры путей по отношению к квантово-механическим процессам играют ту же роль, что процедура редукции по отношению к состояниям квантовых систем. В подходе Фейнмана эволюция квантовой системы описывается интегралом по всем возможным

⁶ По всей видимости, назрела необходимость в более развитой терминологии, в которой для спонтанного непрерывного измерения использовался бы другой термин, однако пока такого термина нет.

путям в конфигурационном или в фазовом пространстве этой системы. Если система подвергается непрерывному измерению, то ее эволюция представляется интегралом по некоторому коридору путей. При этом сам коридор путей (обозначим его α) соответствует результату измерения.

Тем самым эволюция системы в течение конечного времени подвергается "проектированию" в соответствии с результатом непрерывного измерения. Это совершенно аналогично тому, как при редукции фон Неймана состояние системы проектируется в соответствии с тем, какой результат дало мгновенное измерение этой системы. И так же, как мгновенное измерение характеризуется альтернативными состояниями системы $\{|\psi_i\rangle|\Phi_i\rangle\}$, непрерывное измерение характеризуется семейством альтернатив $\{\alpha\}$, каждая из которых представляется коридором путей. Так же, как и для мгновенных измерений, различные альтернативы характеризуются вероятностями, которые могут быть рассчитаны на основе квантовой механики⁷.

Для последующего важно, что в случае достаточно широких коридоров *каждая из альтернатив описывает квазиклассическое движение системы*, а представляющий ее коридор α соответствует некоторой *классической траектории*⁸. В то же время полностью устранить квантовые эффекты нельзя. Это сказывается в том, что квантовые коридоры α , совпадающие на некотором отрезке, в целом могут различаться, тогда как задание некоторого отрезка классической траектории полностью определяет всю траекторию в целом.

Пример квазиклассического квантового состояния — когерентное состояние семейства фотонов. Оно максимально близко к состоянию классической волны. При известных начальных условиях эволюция когерентного состояния хорошо аппроксимируется эволюцией классической волны, которая является детерминированной, предсказуемой.

Пример нестабильного состояния — сумма или разность когерентных состояний с сильно отличающимися характеристиками (слагаемые могут, например, соответствовать классическим волнам с противоположными фазами). Такие состояния небольшого числа фотонов в последние годы успешно генерируются экспериментально, поэтому экспериментально подтверждено, что они очень быстро распадаются с образованием когерентных (т.е. близких к классическим) состояний. Распад происходит за счет декогеренции, возникающей при взаимодействии с окружающей средой (от которой при любых предосторожностях нельзя вполне изолироваться). Поскольку такого рода состояния представляют собой суперпозицию двух состояний, близких к сильно отличающимся классическим конфигурациям, эти состояния получили название шрёдингеровских котов (по аналогии с суперпозицией живого и мертвого кота).

⁷ Возможность характеризовать коридоры вероятностями (точнее, плотностями вероятности) вместо амплитуд вероятности связана с тем, что они приближенно декогерентны, т.е. интерференция между ними мала [31]. Дискретным аналогом условия декогерентности коридоров является условие совместности квантовых историй [32].

⁸ Это справедливо в том случае, если коридоры $\{\alpha\}$ представляют поведение не только измеряемой системы, но и ее окружения или прибора (так же, как для мгновенного измерения альтернативы $\{|\psi_i\rangle|\Phi_i\rangle\}$ представляют состояние и измеряемой системы, и прибора).

С математической точки зрения фейнмановские интегралы по путям и интегралы по коридорам путей достаточно сложны (см. [6, 31]). Однако нам не понадобятся конкретные вычисления, поэтому математические трудности не будут для нас препятствием. Зато в общих рассуждениях мы можем использовать очень наглядный образ квантового коридора: измеряемая система движется по коридору, который определяется результатом измерения. И хотя в общем случае имеется в виду коридор в фазовом пространстве, для наглядности можно при этом представлять себе частицу, движущуюся по коридору в обычном нашем 3-мерном пространстве. Альтернатива в случае непрерывного измерения — это коридор путей α . А семейство альтернатив — это семейство коридоров $\{\alpha\}$.

10. Классические альтернативы — условие существования жизни

Если рассматривать альтернативные результаты непрерывного измерения (альтернативные коридоры путей) $\{\alpha\}$ в рамках квантовой теории измерений, то их следует выбрать так, чтобы они, во-первых, были (приближенно) декогерентны, а во-вторых, (приближенно) классичны. Требование декогерентности необходимо для того, чтобы интерференция между двумя различными альтернативными эволюциями была малой и альтернативы можно было характеризовать вероятностями вместо амплитуд вероятности [32, 31]. Требование классичности не является необходимым для отсутствия интерференции [33], но вводится для того, чтобы теория соответствовала эксперименту.

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

Таким образом, требование классичности альтернатив позволяет построить теорию измерений, которая соответствует наблюдениям. Однако нельзя ли теоретически обосновать требование классичности альтернатив? Мы увидим сейчас, что это оказывается возможным, если принять интерпретацию Эверетта и ее расширение, т.е. отождествить разделение альтернатив с сознанием.

Если мы принимаем расширенную концепцию Эверетта, то разделение альтернатив — это не что иное, как сознание, т.е. функция, которой обладают только живые существа. Значит, и весь набор альтернатив, т.е. определение того, какие состояния рассматриваются как альтернативы, следует рассматривать, имея в виду, что использовать этот набор будут живые существа. Следовательно, мы можем задаться вопросом: какой набор альтернатив $\{\alpha\}$ с точки зрения живых существ является выделенным среди всех возможных наборов?

Каждая альтернатива α описывает поведение микроскопической измеряемой системы и ее макроскопического окружения так, как это поведение воспринимается сознанием. В данном случае для нашего рассуждения важно не то, что коридор путей α представляет измеряе-

мую систему, а то, что он представляет также все ее (макроскопическое) окружение, т.е. весь мир. Это та картина мира, которая возникает в сознании живого существа. Если в этой картине мир ведет себя в соответствии с классическими законами, то он "локально предсказуем" (т.е. будущее некоторой небольшой области этого мира можно с достаточно большой вероятностью предсказать, даже не зная, что происходит за пределами этой области). Видя вокруг себя предсказуемый мир, живое существо может выработать оптимальную стратегию выживания в этом мире.

Если бы альтернативы не были классическими, то в сознании возникала бы картина непредсказуемого мира (в частности, в этом мире существенную роль могли бы играть квантовые нелокальности). В этом случае выработка оптимальной стратегии (для локального живого существа) вообще была бы невозможна, т.е. невозможна была бы жизнь в той форме, в которой мы ее знаем. Предсказуемость эволюции, характерная для квазиклассических коридоров α (представляющих собой огрубленные образы классических траекторий), оказывается абсолютно необходимой в рамках расширенной концепции Эверетта⁹.

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

Итак, выбор именно классических эволюций α в качестве тех альтернатив, которые в сознании наблюдателя разделяются, благоприятен для живых существ. Это делает правдоподобным предположение, что явление разделения альтернатив, отождествляемое с сознанием, есть на самом деле не закон природы (как явно или неявно предполагалось обычно при работе над "проблемой измерения"), а *способность, которую живые существа выработали в себе в процессе эволюции*. Если выразиться точнее, то эта способность должна была появиться в процессе возникновения жизни, ибо только после появления этой способности возникло качество, необходимое для выживания, т.е. собственно возникли живые существа. Впрочем, это может быть недостаточно точной, слишком приземленной формулировкой. Скорее сознание (= разделение альтернатив) есть не что иное, как определение того, что такое жизнь в самом общем понимании этого слова.

Если принять концепцию, которая обсуждалась в этом разделе, то можно сказать, что классического мира вообще объективно не существует, а *иллюзия*

классического мира возникает лишь в сознании живого существа. Интересно, что к такому странному, с точки зрения физики, выводу приводит сама физика, правда, лишь в том случае, если мы доводим ее до логической полноты, избегая удобной эклектики типа копенгагенской интерпретации с постулатом редукции.

Различные попытки построить теорию эволюции живых существ в рамках многомировой интерпретации были предприняты в работах [35–42].

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

Действительно, в квантовом компьютере эволюционируют квантовые состояния, представляющие собой суперпозиции с большим числом компонент. Каждая компонента суперпозиции несет некоторую информацию (скажем, двоичное число), а эволюция всей суперпозиции обеспечивает квантовый параллелизм, т.е. одновременное преобразование всех этих вариантов классической информации. В модели квантового сознания отдельные компоненты суперпозиции могут моделировать альтернативы, на которые сознание разделяет квантовое состояние, а информация, содержащаяся в каждой компоненте, — состояние живого существа и его окружения. Задача состоит в том, чтобы сформулировать критерий выживания и подобрать закон эволюции таким образом, чтобы эволюция каждой из альтернатив (компонент суперпозиции) была предсказуемой и выживание в этой эволюции возможным. Разумеется, задача построения такой модели отнюдь не проста, но при наличии квантового компьютера принципиально разрешима.

Как известно, квантовые компьютеры, которые сулят необыкновенные новые возможности, до сих пор не реализованы, и некоторые даже сомневаются в том, что они будут реализованы в будущем (см., например, обзор [43]). Однако это относится лишь к квантовым компьютерам с числом ячеек порядка тысячи и более. Что же касается квантовых компьютеров с числом ячеек порядка десяти, то они реализованы уже сейчас. Очевидно, что достигнутое число ячеек будет еще расти, хотя, может быть, медленно. Возможно, что даже на таких "маломощных" квантовых компьютерах, которые будут построены в сравнительно близком будущем, можно попытаться реализовать модель "квантового сознания".

11. На краю сознания

Рассмотрим два предположения, которые в принципе оказываются возможными в рамках концепции Эверетта и которые, если окажутся справедливыми, приводят к радикальному изменению взглядов на роль сознания.

⁹ Это переключается с "экзистенциальной интерпретацией" квантовой механики, предложенной Зуреком [34].

1. Согласно интерпретации Эверетта имеется бесконечное множество эвереттовских миров (классических "реальностей"), каждый из которых характеризуется некоторой вероятностью (или, в случае непрерывного множества, плотностью вероятности). Распределение вероятностей рассчитывается по обычным квантово-механическим правилам. В простом примере с двумя альтернативами $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ — это вероятности $p_1 = |c_1|^2$ и $p_2 = |c_2|^2$; в более сложной (и более реалистической) картине непрерывного измерения альтернативные результаты измерения (коридоры) α характеризуются плотностями вероятности p_α , которые также находятся по законам квантовой механики [31].

Часто вероятность данной альтернативы интерпретируется как доля тех эвереттовских миров, в которых реализуется эта альтернатива, и отождествляется с вероятностью для индивидуального сознания оказаться именно в таком мире, т.е. наблюдать именно эту альтернативу. Тем не менее, в принципе, остается возможность отказаться от универсальности того распределения вероятностей, которое предписывается квантовой механикой. Некоторые авторы предполагали (не обязательно в рамках интерпретации Эверетта), что сознание может влиять на вероятности различных альтернатив [26, 44, 45].

Вывод о том, что распределение вероятностей альтернатив однозначно фиксировано законами квантовой механики, не подлежал бы сомнению, если бы выбор одной из альтернатив был одним из тех законов физики, которые объективны и не зависят от сознания наблюдателя. Однако в рамках концепции Эверетта разделение на альтернативы производится сознанием (или даже более определенно: разделение на альтернативы — это и есть сознание). Даже классический характер альтернатив в рамках концепции Эверетта выглядит не как закон природы, а как необходимое условие для существования живых существ (см. раздел 10). Вполне естественно предположить, что сознание может влиять не только на характер альтернатив, но и на их вероятности, точнее — на вероятности того, какую альтернативу оно будет наблюдать. Согласно такому предположению сознание может увеличить вероятность попадания в те классы эвереттовских миров, которые по каким-то причинам представляются для него предпочтительными.

Такое предположение может показаться неприемлемым, если вероятность альтернативы отождествляется с долей эвереттовских миров соответствующего типа (в которых эта альтернатива наблюдается). На первый взгляд, число, выражающее "долю миров данного класса", должно быть универсальным, а тогда оно должно совпадать с квантово-механической вероятностью и не может быть иным для сознания того или иного наблюдателя. Это действительно было бы так, если бы число эвереттовских миров было конечным. Однако для бесконечного множества миров само понятие "доля миров данного класса" не имеет смысла, и приведенный аргумент в пользу универсальности распределения вероятностей теряет силу. Причина этого в том, что бесконечное множество обладает парадоксальным свойством: его можно поставить во взаимно однозначное соответствие с его собственным подмножеством. Поэтому в случае бесконечного множества эвереттовских миров определение различных вероятностных распределений на этом множестве вполне допустимо и

предположение о влиянии сознания на распределение вероятностей не является внутренне противоречивым.

Чтобы сделать это утверждение наглядным, представим себе, что бесконечное множество "двойников" наблюдателя по очереди направляются сознанием в эвереттовский мир того или иного типа, чтобы заполнить бесконечное множество миров. Для простоты предположим, что имеется лишь две альтернативы, т.е. два типа миров. Тогда для одного наблюдателя двойники могут направляться поочередно то в мир первого типа, то в мир второго типа. Это соответствует тому, что вероятность для данного двойника попасть в мир первого типа равна $1/2$ (и то же для миров второго типа). Сознание второго наблюдателя может направлять своих двойников в те же миры иначе: сначала одного в мир первого типа, потом следующих девять — в мир второго типа, опять одного — в мир первого типа, опять девять — в мир второго типа и т.д. В результате для каждого из них вероятность попасть в мир первого типа равна $1/10$, а вероятность попасть в мир второго типа равна $9/10$. Однако обе описанные процедуры приводят к тому, что в каждом из эвереттовских миров оказывается по одному двойнику нашего наблюдателя. Ясно, что в этом случае бессмысленно спрашивать: какую долю от всех миров составляют миры первого типа (в силу того, что миров бесконечно много)?

Это рассуждение не доказывает, конечно, что сознание на самом деле может управлять вероятностями, но показывает, что предположение об этом не является внутренне противоречивым. Можно сказать: непротиворечивым является предположение о том, что сознание может сделать вероятным некоторое событие, даже если по законам физики (квантовой механики) вероятность этого события мала. Сделаем *важное уточнение формулировки*: сознание данного наблюдателя может сделать вероятным, что он увидит это событие.

Если сознание делает вероятным такое событие, для которого по законам физики вероятность чрезвычайно мала, то происходящее может выглядеть как чудо. Очень важно, что при этом имеется одно *абсолютное ограничение*. Если вероятность какой-то (мысленно построенной) "классической реальности" равна нулю (т.е. этой реальности на самом деле нет среди всех возможных альтернативных результатов измерения), то индивидуальное сознание не может сделать вероятность попадания в эту реальность ненулевой. Значит, не всякое чудо возможно. То, что абсолютно запрещено законами физики (то, что бывает лишь в сказках), осуществить в любом случае нельзя. А вот то, что маловероятно, но возможно, то можно реализовать "в действительности", даже если вероятность, рассчитанная физическими методами, очень мала.

2. Кроме предположения о возможном влиянии сознания на вероятности альтернатив, в рамках концепции Эверетта оказывается возможной еще одна радикальная гипотеза. Она подсказывается тем, что в концепции Эверетта сознание в целом (в отличие от отдельных его компонент) охватывает весь квантовый мир, т.е. все его "классические проекции". В свете этого представляется вполне возможным, что индивидуальное, субъективное сознание, которое живет в некотором эвереттовском мире (в некоторой классической реальности), при определенных условиях может выходить, тем не менее, в квантовый мир в целом, "заглядывать" в другие

альтернативы, в другие реальности. Если мы предполагаем (как обычно делают в квантовой теории измерений), что происходит редукция, то все альтернативы, кроме одной, исчезают и заглядывать просто некуда. Но если все альтернативы одинаково реальны, а сознание просто "разделяет" для себя их восприятие, то возможность заглянуть в любую альтернативу, осознать ее, в принципе, существует.

Есть образ, который иллюстрирует разделение сознания между альтернативными классическими реальностями, — это шоры, которые одеваются на лошадь, чтобы она не могла смотреть в сторону и сохраняла направление движения. Точно так же сознание надевает на себя шоры, ставит "перегородки" между различными классическими реальностями, для того чтобы каждая "компонента" сознания видела лишь одну из них и принимала решения в соответствии с информацией, идущей лишь из одного классического (а значит, относительно стабильного и предсказуемого, т.е. пригодного для жизни) мира. Однако так же как лошадь, на которую надели шоры, все же может, отклонив голову, взглянуть в сторону, так и индивидуальное сознание, живущее в некоторой определенной классической реальности, несмотря на перегородки, скорее всего должно иметь принципиальную возможность заглянуть в другие классические реальности, в другие эвереттовские миры. Тогда человек способен не только мысленно представить (что, конечно, возможно), но также непосредственно воспринять некую "другую реальность", в которой он тоже мог бы жить.

Можно даже качественно охарактеризовать то состояние сознания, в котором это может иметь место. Заглянуть в другие альтернативы (или, что то же, выйти в квантовый мир) удастся лишь в том случае, если перегородки между альтернативами исчезают или становятся проницаемыми. Согласно рассматриваемой концепции появление перегородок (разделение альтернатив) — это не что иное, как осознание, т.е. появление сознания, его "начало". Но тогда и наоборот, перегородки исчезают (или становятся проницаемыми) "на границе сознания", когда сознание почти исчезает. Такие состояния обычно называют трансом.

3. Сделаем два кратких замечания, которые необходимы для правильного понимания существа вопроса.

Первое замечание призвано уточнить, как следует понимать гипотезу об "отождествлении" сознания (обычно рассматриваемого в рамках психологии) с разделением альтернатив (понятие из квантовой физики). Согласно этой гипотезе сознание (= разделение альтернатив) представляет собой общую часть психологии и квантовой физики. Появляется возможность взглянуть на этот предмет, сознание, с двух сторон, из различных по своему характеру сфер знания: со стороны физики и со стороны психологии. Разумеется, при этом мы видим этот предмет по-разному, и разные черты этого предмета оказываются важными. Когда мы в физике говорим о разделении альтернатив или селекции одной альтернативы, то имеем в виду простейшие опыты с простейшими объектами, которые нарочно выбраны примитивными, чтобы их можно было исследовать математически точными методами. Когда же мы говорим о сознании, как оно видится со стороны психологии, то перед нами предстают гораздо более сложные и гораздо менее четко очерченные комплексы.

Это важно, например, если речь идет о гипотетической возможности сознанием влиять на выбор альтернативы. Вряд ли следует ожидать, что сознание может заметно влиять на то, какой окажется проекция спина или в какую сторону полетит электрон. Если сознание и может влиять на выбор реальности, то, скорее всего, выбирая из тех аспектов этой реальности, которые для данного человека жизненно важны (ведь и само это явление, сознание, возникает, согласно нашему рассуждению, потому, что оказалось жизненно важным для живых существ). Если, например, в одной из реальностей умирает близкий родственник, а в другой он остается жив, то у осознающего субъекта есть сильная мотивация выбрать вторую из этих двух альтернатив. Если при этом он верит, что может повлиять на выбор, то не исключено, что ему и на самом деле удастся несколько увеличить вероятность, что он окажется свидетелем именно второй альтернативы (следует ли такого рода возможностями пользоваться — это отдельный вопрос, и ответ на него не так очевиден, как кажется).

"Отождествление" разделения альтернатив в квантовой физике с явлением осознания в психологии следует понимать лишь с этой оговоркой. Отождествляются лишь самые глубокие слои соответствующих явлений, принцип, на котором эти явления основаны, но не их проявления, которые в сфере физики и в сфере психологии могут быть внешне совершенно непохожими.

Второе замечание касается тех новых перспектив в психологии и вообще в гуманитарной сфере, которые проистекают из ее связи с физикой. Мы говорим о том, что в рамках данной концепции сознание (психика) может обладать некоторыми чертами, которые в "классической" психологии ему не приписываются (такими, как возможность выходить из классической альтернативы в квантовый мир, т.е. заглядывать в другие, альтернативные, реальности или даже влиять на выбор "своей" реальности). Эти гипотетические возможности требуют, разумеется, проверки.

Однако вполне естественно попытаться отождествить эти "новые" возможности с теми необычными явлениями в области психологии, теории сознания и психологической практики, которые уже давно замечены, изучаются различными способами и даже эксплуатируются. С этой точки зрения обсуждаемые "новые" черты сознания, возможно, давно известны. Если так, то некоторые подтверждения рассматриваемой нами концепции могут уже существовать без всяких дополнительных проверок. Но и в этом случае требуется тщательная и осторожная работа для анализа известных фактов и сопоставления их с тем, чего можно ожидать в рамках концепции Эверетта¹⁰. Среди тех необычных явлений в области сознания (психики), которые могут иметь отношение к нашей концепции, упомянем, во-первых, особые состояния сознания (типа транс), в частности состояние сознания во время сна, а также, во-вторых, невербальное и неконтролируемое мышление, которое играет большую роль в науке и для объяснения которого, по мнению Пенроуза [49, гл. 10], необходимо привлечь квантовую физику. Об особых состояниях сознания и о

¹⁰ Упомянем, что существуют другие (не имеющие прямого отношения к концепции Эверетта) квантово-механические объяснения необычных явлений в психике, например объяснение телепатии квантовой корреляцией живых организмов [46–48].

состоянии сна говорилось и писалось очень много (см. в этой связи интригующий очерк Павла Флоренского "Иконостас" [50, с. 73–198]). Явление невербального мышления известно меньше. Поясним вкратце, что имеется в виду.

Обычно мышление ученого считают строго логичным и последовательным потоком мыслей, которые излагаются на бумаге или, во всяком случае, при желании могут быть изложены на бумаге с помощью нашего обычного языка (с добавлением некоторого количества формул и рисунков). И оно действительно является таковым на первом этапе работы, когда формулируется проблема, и на последнем, когда формулируется результат. Но ключевой этап работы ученого, который, собственно, и приносит результат, это *открытие*. И оказывается, что на этом этапе мышление ученого часто (а может быть, и всегда) принимает невербальную форму и происходит неконтролируемо, независимо от его воли (однако после напряженной и вполне контролируемой работы на предшествующих этапах).

Роджер Пенроуз в книге "Новый ум короля" [49] приводит примеры важных открытий, сделанных в невербальной форме. Быть может, самое поразительное в приводимых им свидетельствах великих ученых — это то, что в момент открытия, при отсутствии формальных доказательств истинности своего прозрения они чувствуют абсолютную уверенность в том, что оно истинно.

Это необыкновенное и в то же время чрезвычайно важное явление невозможно объяснить обычными способами. Кажется возможным объяснить его тем, что сознание в этот момент выходит в квантовый мир. Конечно, здесь еще предстоит много поработать, но некоторые предварительные соображения напрашиваются сразу. В частности, представление о том, что научное открытие происходит "на границе сознания", приводит к следующей практической рекомендации. После периода напряженной предварительной работы над проблемой, в момент, когда требуется "угадать ключ к ее решению", полезно на время "отключить" сознание от этой проблемы, переориентировав его на что-то другое (или на другую проблему, или даже просто на развлечение). В таком случае работа над проблемой на самом деле продолжается, но уже на уровне подсознания (или сверхсознания), что и требуется для "открытия", т.е. для появления качественно новых соображений по этой проблеме. Высокая эффективность этой методики была доказана на практике. Близкие рекомендации часто встречаются в литературе по научной методологии.

И это лишь один пример, наиболее близкий для представителя науки. А есть еще много удивительных явлений в сфере сознания, и многие из них, по-видимому, вполне достоверны. Надежда на то, что они могут получить объяснение, оправдывает некоторый риск, на который приходится идти, делая предположения, формально пока недоказуемые.

4. Когда мы говорим о необыкновенных явлениях, так или иначе связанных с сознанием человека, нельзя не упомянуть о таких формах их познания или даже управления ими, которые не являются научными. Прежде всего, это различные направления религии и восточные философии. Для ученых соблазнительно вообще исключить из рассмотрения эту сферу человеческой мысли как ненаучную, т.е. недостоверную. Однако вряд

ли можно так легко отмахнуться от того, что существует тысячелетия и представляет, быть может, наиболее устойчивое явление в сфере духовной жизни человека. Скорее всего, такая устойчивость указывает на то, что все эти ненаучные направления опираются на нечто реально существующее, хотя для более сильного эмоционального воздействия реально существующее часто облекается в них в сказочную форму.

С этой точки зрения интересны восточные философии, которые прямо призывают человека работать с собственным сознанием. Наиболее интересным в этом плане нам представляется дзен-буддизм и близкие к нему направления (о существенной концептуальной близости квантовой механики и "буддизма среднего пути" см. [51]). Отметим два отличия этой философско-психологической школы, которые кажутся привлекательными с рассматриваемой точки зрения.

Во-первых, буддизм не требует слепой веры в провозглашаемые им догмы. Ученики призываются верить только тогда, когда сами убедятся в справедливости учения в процессе работы с собственным сознанием. Во-вторых, дзен-буддизм выделяется в буддизме как направление, в котором особо разрабатывается идея "дзен" и перед каждым учеником ставится цель научиться ощущать "дзен". А "дзен" — это особое состояние или ощущение, которое невозможно точно передать словами, но приблизительно можно охарактеризовать как "корень сознания", "начало сознания" или "предсознание". Это то трудноуловимое состояние, которое предшествует появлению сознания. Ученики призываются работать со своим сознанием до тех пор, пока они не смогут уловить это ощущение "быть между сознанием и отсутствием сознания". (Довольно широко известная среди европейцев методика медитации обычно трактуется как умение выключить свое сознание, но истинная цель ее — научиться быть между сознанием и отсутствием сознания.) Нетрудно видеть, что понятие "дзен" очень похоже на тот наиболее глубокий или наиболее примитивный пласт сознания, который в концепции Эверетта можно отождествить с разделением альтернатив.

12. Необходимость новой методологии

Рассматривая концепцию Эверетта и принимая гипотезу об отождествлении сознания с разделением альтернатив, мы видим, что сознание может обладать необычными свойствами: способностью заглядывать в "другие классические реальности" и даже влиять на выбор той реальности, в которой оно живет. Важно, что эти черты сознания, если они действительно существуют, в принципе наблюдаемы, их можно обнаружить и исследовать. Тем самым расширенная концепция Эверетта может быть проверена, т.е. подтверждена или опровергнута, путем наблюдений. Самый серьезный недостаток интерпретации Эверетта — принципиальная невозможность проверить ее в этом случае исчезает.

Следует, однако, отдавать себе отчет в том, что проверка была бы в данном случае совершенно необычной и не вписывалась бы в рамки принятой методологии

¹¹ Напомним, впрочем, о возможности вполне традиционной для физики квантово-компьютерной модели сознания, упомянутой в разделе 10.

физики¹¹. Дело в том, что такая проверка предполагает наблюдение за индивидуальным сознанием. Предположим, что такие наблюдения оказались в согласии с предсказаниями (расширенной) концепции Эверетта. Было бы это, с точки зрения физики и физиков, доказательством истинности этой концепции? Отнюдь не очевидно. Ведь в физике (да и вообще в естественных науках) принято считать критерием истинности только серии экспериментов с повторяющимися результатами, проведенные к тому же разными экспериментаторами (чтобы подтвердить их объективность, независимость от человека, который их проводит). Эксперименты со своим собственным индивидуальным сознанием или наблюдения над ним не имеют с этой точки зрения доказательной силы.

Чтобы проиллюстрировать своеобразие ситуации, рассмотрим подробнее, чего следует ожидать, если верно предположение о том, что сознание может влиять на вероятности наблюдения этим сознанием различных альтернатив. В разделе 11 отмечалось, что нулевая вероятность не может при этом превратиться в ненулевую, т.е. сознание может сделать вероятным лишь то, что может произойти и без его влияния, естественным путем, по законам физики. Но это значит, что если какой-то человек на самом деле обладает способностью усилием воли (своего сознания) обеспечивать тот ход событий, который ему нравится, то он никогда не сможет с абсолютной убедительностью доказать, что это именно он так повлиял на события. Даже если он много раз обеспечит реализацию маловероятных событий ("вызовет чудо"), всегда будет оставаться, пусть малая, вероятность, что события пошли по этому пути "естественным образом", в соответствии с обычными законами.

Значит, если и возможны "чудеса" такого рода, то доказательства того, что это на самом деле "рукотворные чудеса", а не случайное везение, никогда не будут абсолютными. А поэтому любой, кто решит не верить в них, будет иметь для этого основания. Скептик будет иметь возможность сомневаться, даже оказавшись вместе с "чудотворцем" в том эвереттовском мире, в котором маловероятное событие реализовалось. Но мало того. Сам "неверующий" предпочтет оказаться в таком мире, в котором "чуда" не произойдет. Поэтому для скептика вероятность, что он своими глазами увидит осуществление маловероятного события, остается малой¹².

Итак, если принять предположение, что сознание может модифицировать вероятности альтернатив, ситуация оказывается очень странной. Те, кто верит в это предположение, с заметной вероятностью будут иметь возможность убедиться, что оно верно, т.е. что сознание действительно влияет на вероятности событий. Те, кто не хочет в это верить, с большой вероятностью будут убеждаться, что этого не происходит. Скептики окажутся в таких эвереттовских мирах, где безраздельно господствуют обычные физические законы, объективные и не зависящие от сознания. Зато те, кто предпочитает

верить в "чудеса", творимые сознанием, окажутся в таких мирах, где такие "вероятностные чудеса" действительно происходят.

Приходится признать, что, рассматривая предположение о влиянии сознания на вероятности альтернатив, следует гораздо более осторожно, чем это принято в естественных науках, рассматривать вопрос о критериях истинности. Это значит, что либо расширенная указанным образом концепция Эверетта не может быть включена в русло физики (и вообще естественных наук), либо методология этих наук должна быть существенно расширена. Новая методология должна, во-первых, допускать эксперименты с индивидуальным сознанием или наблюдения над ним в качестве инструмента проверки теории, а во-вторых, учитывать возможное влияние априорных установок на результаты наблюдений¹³.

Было бы очень странно, если бы рассмотренное нами расширение концепции Эверетта с теми новыми совершенно неожиданными возможностями, которые оно сулит, было отвергнуто только потому, что оказалось несовместимым с существующей в настоящее время научной методологией. Скорее всего, если отмеченные возможности так или иначе получают подтверждение, работа в этом направлении будет продолжена.

Пожалуй, есть известная аналогия ситуации, которая при этом может сложиться, с той, которая возникла, когда были предложены неевклидовы геометрии. Эти новые геометрии были несовместимы с методологией, принятой в то время в математике: они требовали отказа от пятого постулата Евклида, считавшегося в геометрии обязательным. Однако было чрезвычайно интересно пойти в неожиданно открывшемся новом направлении и посмотреть, что получится, если методологию изменить, от пятого постулата отказаться. И возможность эта не была, конечно, упущена. Самое удивительное, что для тех умозрительных геометрий, которые на этом пути были построены, достаточно скоро нашлись реальные воплощения, а потом из этого родился тот поразительно красивый и богатый геометрический мир, который носит название общей теории относительности и который адекватно описывает Вселенную.

13. Заключение

Ситуация, сложившаяся с "проблемой измерения" в квантовой механике, уникальна. Скоро уже век, как эта неожиданно возникшая проблема не решается, однако снова и снова, на все более широкой основе, подтверждается, что она все еще существует и ждет своего решения (см., например, [53; 54, гл. 1]). Такая ситуация, скорее всего, означает, что решения проблемы следует ждать в совершенно неожиданном направлении или характер решения будет непривычным с точки зрения стереотипов, сложившихся в физике. По этой причине при оценке предлагаемых решений следует всегда быть готовыми к неожиданностям, чтобы не забраковать пробивающиеся ростки истины из-за того, что они выглядят непривычно. Уверенность в том, что проблема не является пустой,

¹² Здесь мы имеем дело с одним из пунктов, контринтуитивных и потому трудных для понимания. Поэтому следует очень тщательно проанализировать ситуацию, когда результаты усилий "чудотворца" наблюдают другие люди, среди которых есть и те, кто склонен ему верить, и скептики, не желающие верить.

¹³ Впрочем, детальный анализ показывает, что и без фантастического предположения о роли сознания, в рамках обычной научной методологии заключение об истинности всегда опирается на ряд интуитивных суждений, роль которых обычно не осознается в должной мере [52].

придает список великих ученых, работавших над ней (сошлемся на Бора, Эйнштейна и Шрёдингера [55, 56], но кроме них в этом списке еще Гейзенберг, Паули, Уилер и многие другие).

На наш взгляд, решение будет достигнуто в направлении, намеченном концепцией Эверетта, которая в последние десятилетия привлекает очень большое внимание (см. [23] и ссылки, приведенные в этом обзоре). Дело не ограничивается лишь такими абстрактными вопросами, как "проблема измерения". В контексте новых квантово-механических задач, в частности теории и практики квантовых компьютеров, некоторые исследователи (например, Дэвид Дойч [37]) используют концепцию Эверетта как удобный язык для конкретных исследований. Разумеется, это очень субъективно, и большинство физиков даже в области квантовой информатики пользуется обычным квантово-механическим языком. Однако в концептуальных проблемах интерпретация Эверетта, видимо, дает новое качество.

Нам кажется, что в попытках продвинуться в решении "проблемы измерения" на основе интерпретации Эверетта полезна точка зрения, которая возникает, если не просто функционально связать, но полностью отождествить сознание с разделением квантового мира на эвереттовские альтернативные миры (см. раздел 8 и работу [2]). Для изложения и некоторого развития концепции Эверетта мы попытались построить логически связную цепочку рассуждений, опираясь на такое отождествление. Важно, что так расширенную концепцию в принципе можно проверять с помощью наблюдений над индивидуальным сознанием. Близкие (в некоторых пунктах совпадающие) построения предпринимались разными авторами, что видно из приведенных литературных ссылок. Особенно много писали (как в рамках интерпретации Эверетта, так и вне ее) о связи сознания с редукцией состояния.

Резюмируя все сказанное, можно следующим образом сформулировать главные пункты обсуждавшейся выше расширенной концепции Эверетта и следствия, естественным образом вытекающие из нее.

1. Набор альтернатив, характерный для квантовой теории измерений, интерпретируется как множество равноправных проекций квантового мира, называемых эвереттовскими мирами.

2. Разделение квантового мира на альтернативы отождествляется с функцией живых организмов, называемой сознанием.

3. Классический характер каждой из альтернатив, на которые квантовый мир расслаивается сознанием, определяется тем, что обеспечивает стабильность и предсказуемость окружающего мира, как он воспринимается сознанием, что является необходимым условием жизни.

4. В особых состояниях (на грани бессознательного) индивидуальное сознание получает доступ к квантовому миру за рамками одной классической проекции. Это может объяснять наблюдаемые иногда необычные явления в области психики, которые играют центральную роль в ненаучных формах познания духовной жизни человека (восточные философии, религия).

Пункт 3 в этом перечне наиболее важен. Он объясняет, почему при измерении (осознании) происходит расслоение квантового мира именно на классические альтернативы. Расслоение квантового мира на "классические реальности" (являющиеся на самом деле лишь

проекциями единственно реального квантового мира) оказывается необходимым общим свойством всех живых существ, т.е. определением жизни. Заметим в этой связи, что в статье "Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века?" [54, гл. 1] среди трех "великих" проблем В.Л. Гинзбург называет как проблему интерпретации квантовой механики, так и вопрос о редукционизме, т.е. о том, возможно ли объяснить феномен жизни на основе уже известной физики. Мы видели, что концепция Эверетта естественно соединяет в себе обе эти проблемы и в известном смысле сводит одну из них к другой.

Более того, и последняя из трех "великих" проблем, упомянутых в статье [54, гл. 1], именно, вопрос о возрастании энтропии, необратимости и "стреле времени"¹⁴, может иметь отношение к обсуждаемой нами концепции. Дело в том, что квантовый мир в этой концепции подчиняется квантовой механике, из которой исключен постулат редукции, и, следовательно, этот мир остается обратимым. Необратимость, проявляющаяся в выборе той или иной альтернативы, фигурирует лишь как феномен сознания. Другими словами, для квантовой механики, описывающей неживую материю, характерно описание в терминах 4-мерного пространства-времени, в котором все моменты времени расматриваются как равноценные, а представление о "ходе времени", об отношениях между настоящим, будущим и прошлым, а с ними и необратимость появляются лишь при описании феномена жизни.

В изложенной программе, как и вообще в области концептуальных проблем квантовой механики, многое нельзя обосновать, а приходится принимать в качестве гипотез, что может создать впечатление дилетантизма. Однако на самом деле такой характер исследований неизбежен в данной области науки на современном этапе. Дело в следующем. Даже после того, как особая роль сознания в квантовой теории измерений стала (для людей, занимающейся этой теорией) казаться очевидной, решение вопроса пытались искать в привычном для физиков направлении: описать свойства той материальной субстанции, которая порождает сознание (это мог быть мозг или какая-то структура внутри него). Серьезные надежды в этой связи возлагались на теорию декогеренции. Однако со временем стало ясно, что усилиями в этом направлении проблему решить не удастся. С этого времени все чаще стали понимать сознание как некое явление, которое можно описать феноменологически, но нельзя вывести из известных свойств (квантовой) материи. Ясно, что элементы такого феноменологического описания могут вводиться в теорию лишь как гипотезы. Таким образом, наличие гипотез указывает скорее не на дилетантизм подхода, а на то, что мы имеем дело с начальным этапом нового направления в науке.

Работа в рамках концепции Эверетта требует расширения методологии и в каком-то смысле выводит за рамки физики и даже вообще естественных наук. Это, конечно, должно вызывать настороженность и критику. Однако вопрос кажется чрезвычайно важным, и это оправдывает даже рискованные шаги. В случае успеха в

¹⁴ В перечислении В.Л. Гинзбурга эта проблема называется как раз в первую очередь.

решении концептуальных проблем квантовой механики наверняка эта наука, да и вообще физика, поднимется на качественно новый уровень понимания природы. Если ориентироваться на то, что уже сделано в рамках концепции Эверетта, можно надеяться, что возникнет продуктивный симбиоз физики с психологией, да и с другими средствами познания духовной жизни человека.

Вопрос о сознании в квантовой механике имеет (и всегда имел) важный общекультурный аспект: включение сознания в качестве существенного элемента идеологии квантовой физики устанавливает еще одну связь между естественнонаучным и гуманитарным познанием. Связь эта становится, на наш взгляд, особенно глубокой, если принять расширенную концепцию Эверетта (см. в этой связи работу [5]).

Мы не ставили своей целью дать исчерпывающий обзор проблемы, а скорее, проследили логическую цепочку, которая кажется нам перспективной. При этом приведенные аргументы скорее качественно намечают путь решения, чем решают проблему. В частности, нужна серьезная работа по вопросу о вероятностях альтернатив (см. в этой связи [57, 58]). И все же главным в этой "проблеме века" является, на наш взгляд, поиск не математических, а концептуальных решений. Поэтому мы сознательно избегали деталей и старались оставаться в рамках достаточно общих принципов и идей.

Хочется закончить словами из статьи Вигнера [7], которые, хотя и были написаны более сорока лет назад, очень точно характеризуют и сегодняшнее состояние вопроса:

"Настоящий автор хорошо сознает тот факт, что он не первый, кто обсуждает вопросы, составляющие содержание данной статьи и что догадки его предшественников были либо признаны неверными, либо недоказуемыми, следовательно, в конечном счете неинтересными. Он не был бы слишком удивлен, если бы настоящая статья разделила судьбу этих его предшественников. Он чувствует, однако, что многие из более ранних спекуляций по этому предмету, даже если их нельзя оправдать, стимулировали наше мышление и эмоции и вносили вклад в возрождение научного интереса к данному вопросу, который, возможно, является самым фундаментальным вопросом из всех".

Благодарности

Автор чрезвычайно благодарен В.Л. Гинзбургу, дискуссии с которым способствовали существенному улучшению статьи и который оказал неоценимую моральную поддержку при работе над ней. Конструктивные замечания В.А. Рубакова позволили значительно улучшить структуру статьи. На начальном этапе работы над этой темой (много лет назад) бесценными были многочисленные длительные (продолжавшиеся иногда по многу дней подряд) дискуссии с Н.-Д. Зех, которые позволили автору не только глубоко понять явление декогеренции, но и по-новому осмыслить концепцию Эверетта.

Список литературы

1. d'Espagnat B *In Search of Reality* (New York: Springer-Verlag, 1983)
2. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
3. Everett H III *Rev. Mod. Phys.* **29** 454 (1957), reprinted in [59]
4. DeWitt B S, Graham N (Eds) *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1973)
5. Менский М Б *Вопросы философии* (6) 64 (2004)
6. Mensky M B *Quantum Measurements and Decoherence. Models and Phenomenology* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2000) [Менский М Б *Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология* (М.: Физматлит, 2001)]
7. Wigner E P "Remarks on the mind-body question", in *The Scientist Speculates* (Ed. I J Good) (London: Heinemann, 1961) p. 284, reprinted in [59]
8. фон Нейман И *Математические основы квантовой механики* (М.: Наука, 1964)
9. Zeh H-D *Found. Phys.* **1** 69 (1970)
10. Zurek W H *Phys. Rev. D* **24** 1516 (1981)
11. Zurek W H *Phys. Rev. D* **26** 1862 (1982)
12. Joos E, Zeh H-D *Z. Phys. B* **59** 223 (1985)
13. Giulini D et al. *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory* (Berlin: Springer, 1996)
14. Bell J S *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987)
15. Bell J S *Physics* **1** 195 (1964), reprinted in [14]
16. Aspect A, Grangier P, Roger G *Phys. Rev. Lett.* **47** 460 (1981)
17. Aspect A, Dalibard J, Roger G *Phys. Rev. Lett.* **49** 1804 (1982)
18. Einstein A, Podolsky B, Rosen N *Phys. Rev.* **47** 777 (1935)
19. Чернавский Д С *Синергетика и информация: Динамическая теория информации* (М.: Наука, 2001)
20. Белинский А В *УФН* **173** 905 (2003)
21. Попов М А *УФН* **173** 1382 (2003)
22. Панов А Д *УФН* **171** 447 (2001)
23. Vaidman L "The many-worlds interpretation of quantum mechanics", in *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Electronic Resource) (Ed. E N Zalta) (Stanford, Calif.: Metaphysics Research Lab, Centre for the Study of Language and Information, Stanford Univ., 2002); <http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/qm-manyworlds/>
24. Tegmark M *Fortschr. Phys.* **46** 855 (1998)
25. Mensky M B, von Borzeszkowski H *Phys. Lett. A* **208** 269 (1995); quant-ph/0007091
26. Squires E *The Mystery of the Quantum World* 2nd ed. (Bristol: IOP Publ., 1994)
27. Lockwood M *Brit. J. Philos. Sci.* **47** 159 (1996)
28. Whitaker A "Many minds and single mind interpretations of quantum theory", in *Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems: Proc. of a Workshop, Bielefeld, Germany, 10–14 November 1998* (Eds P Blanchard et al.) (Berlin: Springer, 2000) p. 299
29. Stapp H P *Found. Phys.* **31** 1465 (2001)
30. Albert D, Loewer B *Synthese* **77** 195 (1988)
31. Менский М Б *УФН* **173** 1199 (2003)
32. Gell-Mann M, Hartle J B *Phys. Rev. D* **47** 3345 (1993)
33. Paz J P, Zurek W H *Phys. Rev. D* **48** 2728 (1993)
34. Zurek W H *Philos. Trans. R. Soc. London A* **356** 1793 (1998)
35. Albert D Z *Quantum Mechanics and Experience* (Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, 1992)
36. Chalmers D J *The Conscious Mind in Search of a Fundamental Theory* (New York: Oxford Univ. Press, 1996)
37. Дойч Д *Структура реальности* (Ижевск: РХД, 2001)
38. Donald M J *Philos. Trans. R. Soc. London A* **427** 43 (1990)
39. Lehner C *Synthese* **110** 191 (1997)
40. Lockwood M *Mind, Brain, and the Quantum: the Compound T* (Oxford: B. Blackwell, 1989)
41. Penrose R *Shadows of the Mind: a Search for the Missing Science of Consciousness* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1994)
42. Saunders S *Phys. Lett. A* **184** 1 (1993)
43. Валиев К А *УФН* **175** 3 (2005)
44. Eccles J C *How the Self Controls its Brain* (Berlin: Springer-Verlag, 1994)
45. Beck F, Eccles J "Quantum processes in the brain: A scientific basis of consciousness", in *Neural Basis of Consciousness* (Adv. in Consciousness Res., Vol. 49, Ed. N Osaka) (Philadelphia, PA: John Benjamins Publ., 2003) p. 141
46. Josephson B D, Pallikari-Viras F *Found. Phys.* **21** 197 (1991)
47. Villars C N *Psychoenergetics* **5** 1 (1983)
48. Lovelock J E *Nature* **344** 100 (1990)

49. Пенроуз Р *Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики* (М.: УРСС, 2003)
50. Флоренский П *Избранные труды по искусству* (М.: Изобразительное искусство, 1996)
51. Mansfield V "Possible worlds, quantum mechanics, and Middle Way Buddhism", in *Symposium on the Foundations of Modern Physics, Joensuu, Finland, 13–17 August 1990* (Eds P Lahti, P Mittelstaedt) (Singapore: World Scientific, 1991) p. 242
52. Фейнберг Е Л *Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке* 3-е изд. (Фрязино: Век-2, 2004)
53. Марков М А *О трех интерпретациях квантовой механики* (М.: Наука, 1991)
54. Гинзбург В Л *О науке, о себе и о других* 3-е изд. (М.: Физматлит, 2003)
55. Bohr N "Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics", in *Albert Einstein: Philosopher – Scientist* (The Library of Living Philosophers, Vol. 7, Ed. P A Schilpp) (Evanston, Ill.: Library of Living Philosophers, 1949) p. 200; reprinted in [59] [Бор Н "Дискуссии с Эйнштейном о проблемах теории познания в атомной физике", в сб. *Атомная физика и человеческое познание* (М.: ИЛ, 1961) с. 51
56. Schrödinger E *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* (Cambridge: The Univ. Press, 1944) [Шрёдингер Э *Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки* (Ижевск: РХД, 1999)]
57. Hartle J *Am. J. Phys.* **36** 704 (1968)
58. Rubin M A *Found. Phys.* **33** 379 (2003); quant-ph/0209055
59. Wheeler J A, Zurek W H (Eds) *Quantum Theory and Measurement* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1983)

Conception of consciousness in the context of quantum mechanics

M.B. Menskiĭ

*P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskiĭ prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-095) 132-62 19. Fax (7-095) 135-78 80
E-mail: mensky@lebedev.ru*

Conceptual problems of quantum measurement theory as highlighted by the well-known paradoxes and Bell's inequalities are argued to be unlikely resolvable without the observer's consciousness being directly included into the theoretical description of measurements. Related to this, Everett's many-worlds interpretation of quantum mechanics is discussed, as is its extension in which decomposing a quantum state into states corresponding to alternative measurements is not only related to but indeed is completely identified with the observer's consciousness. It is shown that this approach opens a qualitatively new way to unify physics and psychology and, more broadly, science and humanity — potentially extending the theory of consciousness and shedding light on important and as-yet-not-understood phenomena in the sphere of consciousness.

PACS numbers: **01.70.+w**, **03.65.-w**, 03.65.Ta, **03.67.-a**

Bibliography — 59 references

Received 19 November 2004

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **175** (4) 413–435 (2005)

Physics–Uspekhi **48** (4) (2005)