

Квантовое измерение: декогеренция и сознание

М.Б. Менский

Письма в редакцию, пришедшие как отклики на мою статью в *УФН* [1] и опубликованные в настоящем номере, различны по характеру и целям. Кроме замечаний по поводу статьи, в них содержатся собственные предложения авторов писем по развитию квантовой теории. О том, насколько ценны эти предложения, читатель может судить сам. В настоящей заметке я прокомментирую лишь замечания в мой адрес, сделанные в трех из этих писем. Эти замечания касаются вопросов, которые сложны сами по себе или изложены в моей статье слишком кратко. Надеюсь, что непростые темы, поднятые в этой статье, получат при этом дополнительное освещение. Чтобы не снижать уровня дискуссии, я позволю себе не отвечать здесь на замечания, сделанные в остальных письмах, на которые, по моему мнению, достаточно ясный ответ имеется в самой статье.

Статья [1] четко делится на две части, которые совершенно различны по характеру обсуждаемого предмета. В первой (большей) части рассматриваются особенности запутанных (entangled) состояний квантовой системы и связанное с этими особенностями явление декогеренции. Теория декогеренции позволяет объяснить, как происходит квантовое измерение. Она разрешает парадоксы квантовой механики, если ограничиться рассмотрением лишь открытых систем и не пытаться найти механизм выбора (селекции) одного из возможных альтернативных результатов измерения. Этого вполне достаточно для ответов на все вопросы, которые можно корректно задать в рамках физики. С точки зрения физика вопрос о селекции можно считать некорректным или излишним, а любая реальная система является открытой, абсолютно замкнута лишь вся Вселенная.

Во второй части статьи рассматриваются концептуальные проблемы, возникающие, если выйти за рамки физики и задаться вопросом о механизме селекции. На этом, более глубоком уровне анализа, парадоксальность квантовой механики сохраняется, а описание квантового измерения оказывается невозможным без явного рассмотрения сознания наблюдателя. Для решения проблемы селекции на этом уровне рассмотрения предлагается отождествить два понятия: 1) селекция альтернативы квантового измерения и 2) осознание наблюдателем результата измерения.

Как и следовало ожидать, наиболее интересные вопросы и возражения возникли в связи со второй частью статьи, посвященной селекции и сознанию. Ниже (в пункте 2) я отвечу на эти вопросы. Но начну с недоразумения, которое возникло в одном из писем в связи с теорией декогеренции. Надеюсь, что при этом удастся сделать более ясными некоторые положения, которые в силу недостатка места не получили в статье [1] подробного разъяснения.

1. В письме А.И. Липкина [2] статья [1] критикуется за то, что она якобы основана на постулате редукции фон Неймана. В самом начале письма Липкин пишет:

"Ключевым, исходным и очевидным понятием для идущей от Дж. Неймана традиции, которой придерживается и М.Б. Менский, является постулат о существовании при измерении в квантовой механике явления "редукции волновой функции".

Это, конечно, заблуждение. Для тех концепций квантового измерения, которые обсуждаются в моей статье (это явление декогеренции и эвереттовские миры), постулат редукции не является не только ключевым, но даже необходимым. Наоборот, эти концепции, и прежде всего декогеренция, позволяют избавиться от необходимости постулировать редукцию состояния (коллапс волновой функции). Именно для этого они и были предложены.

Липкин пытается исключить постулат редукции, опираясь на весьма странное (если не сказать больше) утверждение, что "ВСЮ измерительную часть, включающую процедуру сравнения с эталоном, включить в теорию ПРИНЦИПИАЛЬНО НЕЛЬЗЯ. Мы утверждаем, что процедура измерения содержит часть (сравнение с эталоном), которая не может быть описана в рамках того раздела физики, в котором она используется (скорее всего, верно еще более жесткое утверждение: процедура сравнения с эталоном не может без остатка рассматриваться никаким разделом физики в принципе). Аналогичным качеством обладают и процедуры приготовления". (Выделение прописными буквами и полужирным шрифтом введено автором этого высказывания — А.И. Липкиным.)

Этот странный тезис и другие формальные построения Липкина, такие, как его "ядро раздела науки", нисколько не проясняют вопрос о редукции (коллапсе). Этого, впрочем, и не требуется, так как теория декогеренции обеспечивает ясный физический анализ этого вопроса.

Теория декогеренции и, в частности, обсуждение ее в моей статье показывает, как самый обычный квантово-механический анализ измеряемой системы, взаимодействующей со своим окружением (прибором или измеряющей средой), приводит к тем же предсказаниям, которые можно получить, применяя постулат редукции. При этом не предполагается, что редукция (коллапс) волновой функции реально происходит. Декогеренция объясняет, почему постулат редукции приводит к правильным предсказаниям, хотя на самом деле никакой редукции не бывает.

Ключевым в этом объяснении является понятие запутанного (entangled) состояния. В статье [1] нет полной теории декогеренции, а лишь излагается ее главная идея и даются ссылки на работы, содержащие более детальное изложение. Читатель, желающий познакомиться с деталями, должен обратиться к цитированной литературе. В частности, отношение между постулатом редукции и декогеренцией детально обсуждается в [3] и [4] (первая из этих работ процитирована в письме Липкина, но также, по видимому, понята превратно).

Хотя теория декогеренции дает физическое объяснение того, что феноменологически описывается редукцией, сам постулат редукции при этом не лишается смысла, но меняется его статус. Редукция остается простым и изящным вычислительным приемом в том случае, если требуется рассчитать поведение системы после того, как произошло измерение, и при этом известно, какой результат дало это измерение. В частности, картина редукции полезна для расчета результатов двух или нескольких измерений, следующих друг за другом.

Таким образом, возникает возможность описывать квантовое измерение на различных уровнях: постулат редукции дает феноменологический уровень описания, теория декогеренции — более глубокий "микрофизический" уровень. Существует еще более глубокий уровень

М.Б. Менский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
117924 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
E-mail: mensky@sci.lebedev.ru

Статья поступила 24 января 2001 г.

описания квантового измерения, выводящий, однако, за рамки физики и включающий сознание. Речь о нем пойдет ниже. Одной из целей статьи [1] и книги [4] — показать, что различные подходы к квантовому измерению, которые иногда воспринимаются как несовместимые, на самом деле являются лишь различными уровнями описания, каждый из которых корректен, если его правильно применять.

Кроме постулата редукции, есть и другие способы расчета результатов повторных квантовых измерений. Например, вместо того, чтобы использовать редукцию состояния (коллапс волновой функции) после каждого измерения, можно получить правильные предсказания, вычисляя корреляцию между результатами различных измерений. Этот путь проанализирован в работе Д.Н. Клышко [5], на которую ссылается Липкин в своем письме.

2. Перейдем теперь к более сложному вопросу о роли сознания в теории квантовых измерений. Этот вопрос затрагивается в письме А.Д. Панова [6].

Роль сознания обсуждалась во многих работах различных авторов, начиная с фон Неймана. К той литературе по этому вопросу, которая цитировалась в [1], следует добавить статью Дитера Цее [7], в которой имеется хороший обзор и концептуальный анализ проблемы. Заметим, что обсуждение этого вопроса в [1] ни в коей мере не претендует на полноту, а напротив, отражает лишь субъективную точку зрения автора.

В связи с письмом Панова прежде всего приходится заметить, что возникла некоторая путаница в терминологии. В своей статье [1] я обозначал термином "сознание" известное явление из области психологии, являющееся, по видимому, функцией мозга. Чтобы подчеркнуть, что это именно явление, процесс, я иногда использовал слово "осознание". Панов в своем письме обозначает термином "сознание" некий *материальный объект*, существование которого обеспечивает это явление. Я бы назвал такой объект (может быть, это мозг или какие-то структуры в мозгу) "носителем сознания". В статье [1] носитель сознания прямым образом не рассматривался, поэтому анализ, который предлагает Панов, хорошо дополняет эту статью. Панов описывает декогеренцию материального носителя сознания, происходящую одновременно с декогеренцией измеряемой системы. Это полезно для того, чтобы прояснить, что происходит при квантовом измерении. И хотя Панов полемизирует со статьей [1], на самом деле его анализ, как будет показано, подтверждает и дополнительно иллюстрирует выводы этой статьи.

Обозначая через S , D , M и E соответственно измеряемую систему, измерительный прибор (детектор), носитель сознания (мозг) и окружение (резервуар), Панов рассматривает унитарную эволюцию, происходящую в результате взаимодействия этих объектов и приводящую к следующему изменению состояния полной системы:

$$\begin{aligned} & (\alpha|S_\alpha\rangle + \beta|S_\beta\rangle)|D_0\rangle|M_0\rangle|E_0\rangle \rightarrow \\ & \rightarrow \alpha|S_\alpha\rangle|D_\alpha\rangle|M_\alpha\rangle|E_\alpha\rangle + \beta|S_\beta\rangle|D_\beta\rangle|M_\beta\rangle|E_\beta\rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

От рассмотрения в статье [1] это отличается лишь тем, что выделяются степени свободы M , интерпретируемые как носитель сознания. Совершенно так же, как в [1], легко показать, что хотя конечное состояние полной системы после взаимодействия остается чистым, но состояние каждой из подсистем становится смешанным — возникает декогеренция. Так, состояние измеряемой системы описывается теперь (редуцированной) матрицей плотности

$$\rho_S = |\alpha|^2|S_\alpha\rangle\langle S_\alpha| + |\beta|^2|S_\beta\rangle\langle S_\beta|. \quad (2)$$

Эта формула эквивалентна формуле (5) из [1] и описывает декогеренцию измеряемой системы S . Панов задает вопрос и о состоянии носителя сознания M после взаимодействия. Оно описывается матрицей плотности, редуцированной к подсистеме M :

$$\rho_M = |\alpha|^2|M_\alpha\rangle\langle M_\alpha| + |\beta|^2|M_\beta\rangle\langle M_\beta|. \quad (3)$$

Это значит, что носитель сознания находится (с соответствующими вероятностями) либо в состоянии $|M_\alpha\rangle$, либо в состоянии $|M_\beta\rangle$, но не в суперпозиции этих состояний. Следовательно, процесс взаимодействия всех указанных объектов приводит к декогеренции не только измеряемой системы S , но и носителя сознания M .

Заметим в скобках, что матрица плотности ρ_M вида (3) получается при более слабых предположениях, чем те, которые принимает Панов. При наличии макроскопического окружения (резервуара) E матрица плотности ρ_M всегда имеет вид (3) в силу ортогональности состояний $|E_\alpha\rangle$ и $|E_\beta\rangle$. Если же состояния детектора $|D_\alpha\rangle$ и $|D_\beta\rangle$ ортогональны друг другу (как часто бывает в реальной ситуации), то уже одно это обеспечивает вид (3) для матрицы ρ_M , и это справедливо даже в отсутствие макроскопического окружения.

Более существенным является следующее замечание. Панов считает, что формула (3) решает проблему выбора (селекции) сознанием одного из альтернативных результатов измерения. Он пишет: "Точно так же, как в статистической механике нет проблемы выбора одного из классических состояний (p, q) для состояния, заданного распределением $\rho(p, q)$, так и здесь проблемы выбора состояния сознания уже нет".

На самом деле проблема выбора (селекции) альтернативы не решается формулой (3). Аналогия со статистической механикой, использованная Пановым, показывает лишь, что перед физиком эта проблема обычно вообще не возникает. Если перечислены альтернативы и соответствующие им вероятности, то ничего больше не требуется, чтобы ответить на любой вопрос, который может поставить физик. Именно это я имел в виду, когда в своей статье утверждал, что в рамках теории декогеренции открытых систем (состояния которых описываются матрицами плотности) не возникает никаких парадоксов или логических трудностей и результирующая теория может считаться вполне удовлетворительной, пока мы ограничиваем себя тем уровнем рассмотрения, который характерен для физики.

Проблема появляется лишь в том случае, если мы считаем необходимым не только перечислить альтернативы и соответствующие им вероятности, но и явно описать механизм выбора одной из этих альтернатив. Это значит, что мы задаем вопросы, которых физики обычно не задают, т.е. переходим на уровень метафизики. В этом случае, на этом, более глубоком уровне анализа, матрица плотности вида (3) нас уже не удовлетворяет. Эта матрица плотности, описывающая декогеренцию носителя сознания, не решает проблему селекции так же, как не решает ее матрица плотности (2), которая (в других обозначениях) обсуждалась в статье [1] и которая описывает декогеренцию измеряемой системы.

Для того чтобы на самом деле решить проблему селекции, необходимо сделать следующий, более радикальный шаг. Разные авторы делают его по-разному, однако наиболее интересные (с моей точки зрения) решения опираются на многомировую интерпретацию квантовой механики, предложенную Эвереттом. Согласно концепции Эверетта, реализуются все альтернативные результаты кван-

тового измерения, но реализуются они в разных мирах. Миры эти совершенно тождественны, за исключением того, что данное измерение приводит в них к различным результатам (разумеется, при каждом следующем измерении каждый из миров опять расщепляется). В каждом из миров имеется наблюдатель (или наблюдатели), и наблюдатели в разных мирах не отличаются друг от друга ничем, кроме того, что видят различные результаты измерения.

Кажется, что проблемы выбора (селекции) результата измерения теперь не существует, так как все альтернативы (все эвереттовские миры) одинаково реальны. Однако из опыта мы знаем: в сознании любого реального наблюдателя измерение дает один определенный результат. И при описании сознания (психики) данного конкретного наблюдателя необходимо указать лишь один результат измерения, именно тот, который будет наблюдаться данным наблюдателем. Следовательно, выбор (селекция) одной альтернативы из всех возможных все еще необходим. Проблема селекции не исчезает, но переносится из области физики в область психологии (в теорию сознания индивидуального наблюдателя) или, точнее, в область метафизики (потому что источник проблемы, возникающей в психологии, связан с квантовой физикой).

Можно ли теперь решить проблему селекции, которая стала субъективной? Можно ли "объяснить", как в сознании индивидуального наблюдателя происходит выбор альтернативы или, другими словами, выбор того эвереттовского мира, в котором данный наблюдатель себя обнаруживает (осознает)?

Конечно, ответ зависит от того, что понимается под словом "объяснить". В некоторых случаях объяснение — это сближение понятий, которые до объяснения кажутся далекими. Одно объясняется в терминах другого. В статье [1] предлагалось *отождествить понятие селекции, возникающее в квантовой физике, с тем, что в психологии называется осознанием*. На вопрос: что такое селекция, предлагается отвечать — это осознание. Селекция (альтернативного результата измерения) происходит тогда, когда данный конкретный наблюдатель осознает, в каком из эвереттовских миров он оказался. И обратно, на вопрос: что такое осознание (т.е. переход от состояния, когда нечто не осознано, к состоянию, когда оно осознано), предлагается отвечать — это выбор одного из множества альтернативных эвереттовских миров.

Разумеется, нечто близкое всегда говорится в связи с эвереттовскими мирами. Нечто близкое говорил и сам Эверетт, и все его последователи. В статье [1] делается попытка максимально упростить формулировку, отсечь все лишнее, выделить главное. Вместо формулы: "Сознание наблюдателя выбирает одну из альтернатив" предлагается другая: "Сознание (осознание) — это и есть выбор альтернативы". Возможно, что некоторые авторы именно это и имели в виду, хотя мне не попадались формулировки, которые выражали бы эту мысль недвусмысленно.

Вот, например, в письме И.З. Цехмистро [8] в связи с предложенным мной решением проблемы выбора говорится: "Однако этот путь уже был пройден Дж. фон Нейманом в гораздо более тонком и изящном анализе, когда он показал, что последовательный анализ проблемы измерения неизбежно ведет к сознанию (именно акту осознания показания прибора) как последней инстанции, на которую падает ответственность за *редукцию* волновой функции". Однако, обратившись к цитированной в этой связи книге фон Неймана, мы обнаружим, что он лишь обосновывает необходимость явно рассматривать сознание наблюдателя, но не более. Вслед за фон Нейманом к этой необходимости приходили многие авторы, что я и

отмечал в своей статье. Но это лишь постановка вопроса, но не его решение. Решения, в котором сознание и селекция *отождествляются*, я не встречал.

Еще раз повторю: правомерна точка зрения, согласно которой проблемы вообще нет. Цехмистро пишет далее:

"Подчеркнем существенное различие между позицией Дж. фон Неймана и М.Б. Менского. Дж. фон Нейман, очевидно, принимает стандартную копенгагенскую интерпретацию квантовой механики с исходной и (как теперь это подтверждено всей историей развития квантовой механики) правильной идеей первичности вероятностей. Поэтому у него нет вопроса, который ставит М.Б. Менский: "1) как происходит выбор одной альтернативы при квантовом измерении". Ответ очевиден — случайно".

Ну, конечно, все так. Такой вопрос не возникает в рамках физики. Для физика вполне достаточно вероятностных предсказаний и случайный выбор той или иной альтернативы само собой разумеется. Приходится еще раз повторить: вопрос о *механизме* выбора альтернативы возникает лишь на метафизическом уровне рассмотрения. Никто не обязан рассматривать вопрос на этом уровне. Обычный физический уровень рассмотрения вполне достаточен для решения всех практических вопросов. Получающаяся теория логически замкнута, ее можно проверить экспериментально, и при этом она великолепно подтверждается.

Переход на метафизический уровень и постановка дополнительных вопросов для многих кажется ненужной игрой, и эта точка зрения вполне допустима, а со многих точек зрения имеет огромные преимущества. То, что я пытался сказать во второй части своей статьи, было сформулировано весьма осторожно: если мы по тем или иным причинам (в конце концов, просто из любопытства или в качестве интеллектуальной игры) перейдем на метафизический уровень и позволим себе задавать "нефизические" вопросы, то одним из них будет вопрос о механизме выбора альтернативы, а одним из решений этого вопроса (на мой взгляд, — красивым) является отождествление сознания и селекции.

Конечно, такое решение проблемы селекции является чисто словесным и потому с точки зрения физика может вообще не представлять ценности. Однако для метафизики характерны именно словесные решения. В данном же случае решение представляется красивым, потому что оно решает (сближает между собой) две трудные концептуальные проблемы из совершенно разных областей науки: 1) что означает понятие селекции в квантовой физике и 2) что означает понятие или явление осознания в психологии. Мы получаем объяснение (или описание) трудного понятия из области психологии в терминах, характерных для физики, и наоборот.

Кроме всего прочего, такая постановка вопроса делает очень естественной гипотезу о существовании активного сознания, способного изменить для данного наблюдателя вероятности различных альтернатив. Эта гипотеза обсуждается (впрочем, весьма предварительно) в статье [1], однако здесь мы не будем ее касаться. Заметим только, что она корректна лишь в случае, если число эвереттовских миров бесконечно (это замечание было дополнительно включено в английский перевод статьи [1]).

Возвращаясь к вопросу о редукции (коллапсе) волновой функции, мы должны заключить, что так же, как теория декогеренции, эвереттовская квантовая механика тоже не предполагает реального коллапса. Ведь коллапс или редукция означает исчезновение всех альтернатив, кроме одной. А в эвереттовской квантовой механике все альтернативы остаются одинаково реальными, только существуют в

различных мирах. И лишь в сознании каждого индивидуального наблюдателя возникает *иллюзия*, будто существует лишь один из этих миров, т.е. лишь одна альтернатива. Никакого коллапса нет, но индивидуальному наблюдателю кажется, что он происходит.

Кстати сказать, именно это делает понятие коллапса полезным в практических вычислениях. Ведь для данного конкретного наблюдателя существует лишь тот эвереттовский мир, в котором он себя осознает. А в этом мире реализуется лишь одна альтернатива. То, что в других мирах (где находятся "двойники" этого наблюдателя) реализуются другие альтернативы, он может игнорировать без всякого ущерба. Следовательно, он может принять, что в момент измерения происходит коллапс, после которого остается лишь одна альтернатива. Вычисления, основанные на этом предположении, дадут правильный ответ для того эвереттовского мира, в котором живет данный наблюдатель.

3. В конце письма Панова [6] обсуждается статус такой квантовой теории, которая решает проблему измерения при помощи концепции декогеренции. Панов согласен с выводом, сделанным в статье [1], что никаких логических трудностей не возникает в квантовой теории открытой системы, если явление декогеренции, вызванное влиянием окружения, учитывается феноменологически. Однако он считает, что такая теория "может вызывать неудовлетворенность на том основании, что наряду с фундаментальным динамическим законом (уравнение Шрёдингера) в теорию вводится феноменология, которая имеет столь же фундаментальный характер, как и сами динамические законы. Эта феноменология фундаментальна в том смысле, что она должна считаться в принципе ниоткуда не выводимой (в отличие, например, от термодинамики, которая выводима из статистической физики)".

Это замечание совершенно справедливо. На него, однако, можно ответить, что по крайней мере один способ феноменологического описания декогеренции обладает нужными свойствами. Это феноменология непрерывных квантовых измерений (т.е. непрерывной декогеренции), основанная на ограниченных интегралах по путям или,

эквивалентно, на комплексных гамильтонианах [3, 4]. Она фундаментальна по построению.

Эта феноменология ниоткуда не выводится и фактически составляет часть квантовой механики. Это становится очевидным, если воспользоваться формулировкой квантовой механики в терминах фейнмановских интегралов по путям. Тогда эволюция замкнутой системы описывается интегралом по всем возможным путям, а для открытой непрерывно измеряемой системы следует ограничить интегрирование на некоторое подмножество путей. Именно, следует включить в интеграл лишь те пути, которые согласуются с информацией, полученной в процессе измерения (и "записанной" в окружающей среде). В результате как замкнутая, так и открытая система описывается уравнением Шрёдингера, но в случае открытой системы гамильтониан содержит мнимую часть [3, 4].

Другим указанием на фундаментальность именно этой феноменологии является то, что в ней становится очевидной динамическая роль информации: влияние окружения некоторой подсистемы на ее динамику зависит только от того, какая информация в подсистеме остается в окружении. Все эти вопросы подробно обсуждаются в книге [4].

Таким образом, Панов совершенно справедливо замечает, что феноменология в теории открытых систем должна иметь фундаментальный характер. Однако теория ограниченных интегралов по путям фундаментальна по своей природе. Поэтому построенная на ее основе теория открытых систем вполне удовлетворительна.

Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000) [*Phys. Usp.* **43** 585 (2000)]
2. Липкин А И *УФН* **171** 437 (2001)
3. Менский М Б *УФН* **168** 1017 (1998) [*Phys. Usp.* **41** 923 (1998)]
4. Mensky M B *Quantum Measurements and Decoherence. Models and Phenomenology* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2000)
5. Клышко Д Н *УФН* **168** 975 (1998)
6. Панов А Д *УФН* **171** 447 (2001)
7. Zeh H D *Found. Phys. Lett.* **13** 221 (2000)
8. Цехмистро И З *УФН* **171** 452 (2001)

Reader response to M B Menskii's paper "Quantum mechanics: new experiments, new applications, and new formulations of old problems"

Editorial Note. At the time the interpretation and, more generally, foundations of quantum theory are undergoing yet another period of discussion within the worldwide physics community, the Russian language literature fails to give a proper coverage to the subject. A step to remedy this is a review paper by M B Menskii, "Quantum mechanics: new experiments, new applications, and new formulations of old problems", recently published in our journal (*Phys. – Usp.* **170** (6) 631 (2000)). In the editorial preface to the paper we committed ourselves to publishing our readers' letters on the subject. Some papers have already been received and are offered below. It should be noted however that, to secure the freedom of discussion, the papers were not peer reviewed and the editorial board has therefore no responsibility for their content — an approach which, within limits, seems to be reasonable at this point of time.

PACS number: 03.65.Bz