

Модель можно попытаться улучшить, объявив формально, что окружение  $E$  представляет собой весь остаток Вселенной. Тогда система  $U$  становится действительно замкнутой, так как Вселенная не имеет окружения. Однако это недопустимо по следующей причине. Если мы объявили систему  $E$  остатком Вселенной, то система  $U$  представляет уже Вселенную целиком. Однако хорошо известно [4], что для точного квантового состояния Вселенной не существует понятия внешнего времени, и эволюция квантового состояния Вселенной не есть унитарная эволюция во времени. Таким образом, опять унитарное описание эволюции системы  $U$  как эволюции во времени становится невозможным.

Можно представить себе два пути (две программы), на которых указанная трудность может быть устранена. Это либо (А) создание последовательно квантового описания Вселенной вместе с явным описанием генерации внутреннего феноменологического времени, указанием явного способа описания подсистем Вселенной и указанием способа связи этих подсистем с внутренним временем, т.е. создание полной квантовой космологии. Либо (В) учет всей внешней по отношению к рассматриваемой объединенной квантовой системе  $U$  Вселенной феноменологически: с использованием спонтанной редукции волновой функции, с помощью положительно-определенных операторов, с помощью ограниченного интеграла по путям или каким-то другим способом. Наиболее последовательным представляется путь (А), однако в настоящее время неясно, выполнима ли такая программа хотя бы в принципе. Путь (В), как замечает уважаемый автор статьи [1], не приводит к логическим трудностям и парадоксам. Однако, по нашему мнению, он 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 невыводимой (в отличие, например, от термодинамики, которая выводима из статистической физики). Она должна была бы выводиться из квантовой космологии, но в программе (В) квантовая космология оказывается существенно за рамками теории. Проблема усугубляется еще и тем (и это, по нашему мнению, является логической трудностью программы (В)), что возможны разные способы введения такой феноменологии, при этом не доказано, что все способы эквивалентны. На наш взгляд, проблема квантового измерения как раз и заключается в существовании дилеммы: либо квантовая теория измерения есть на самом деле квантовая космология, либо она содержит неустранимую и не вполне однозначную феноменологию.

Мы показали, что динамическое описание выбора альтернативы сознанием возможно в рамках рассмотренной выше унитарной модели. Хотя модель, как было отмечено, и может вызывать серьезные возражения, возможность такого описания, по нашему мнению, является определенным указанием на то, что сознание наблюдателя *a priori* не следует выводить за рамки унитарной квантовой динамики и поддерживает принцип психофизического параллелизма на квантовом уровне.

## Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
2. Everett H III *Rev. Mod. Phys.* **29** 454 (1957)
3. Zeh H D, *quant-ph/9908084; Found. Phys. Lett.* **13** 221 (2000)
4. DeWitt B S *Phys. Rev.* **160** 1113 (1967)

## Теория измерений и редукция волнового пакета

Г.Б. Лесовик

В *УФН* **170** (6) 631 (2000) была опубликована интересная статья М.Б. Менского, в которой затронут ряд вопросов, связанных с теорией измерения в квантовой механике, в частности обсуждается возможность интерпретации функции сознания в терминах квантовых измерений.

Уже сам факт написания и публикации такой статьи мне кажется очень важным и отрадным явлением. Как справедливо отмечалось в редакционном предисловии к статье М.Б. Менского (далее для краткости М.Б.М.), в советской (да и в российской) научной литературе обсуждения вопросов философского порядка, связанных с теорией измерения, почти не было. Такой крайний прагматизм советской (теперь российской) школы теоретической физики, возможно навеянный идеологическим давлением многих десятилетий, к сожалению, в сильной степени сохраняется и по сей день. Искусственное ограничение свободы мысли всегда дает свои "плоды". Сегодняшнее отставание нашего "теоретического цеха" по части идейной базы квантовых компьютеров (алгоритмов и т.п.) и в ряде аналогичных вопросов (и это при очень высоком, в общем, уровне школ теоретической физики и математики!) — еще одна иллюстрация этого правила. Некоторым утешением может служить лишь то, что по части именно прагматических идей (например, как можно построить квантовый компьютер "в железе") дела обстоят уже заметно лучше.

Возвращаясь теперь собственно к содержанию статьи М.Б.М., хотелось бы высказаться более детально по поводу некоторых вопросов, в которых автор данного письма не вполне согласен с мнением М.Б.М.

Суть моего письма сводится к следующему. Я излагаю (весьма сжато) свою точку зрения (которая является проверяемой гипотезой) на теорию измерения, которая подразумевает, что квантовая теория является полной теорией и, в частности, может (в принципе) полностью описать взаимодействие "квантовых" объектов с "классическими", "редукцию волнового пакета" и т.д. При этом источником "вероятности", присущей квантовой механике + стандартной интерпретации, предлагается считать детектор, который можно рассматривать как резервуар с особыми свойствами (см. более детально ниже). Именно степени свободы резервуара играют по нашей версии роль скрытых переменных Боба.

Тем самым обсуждавшийся М.Б.М. выбор альтернативы, возникающей в результате квантового измерения, осуществляется резервуаром. Фактически мы утверждаем, что квантовая вероятность имеет ту же самую природу, что и классическая, возникающая, например, при подбрасывании монеты. При этом, если в классическом случае исчезающе мала мера пространства начальных состояний, приводящих к падению монеты точно на ребро, то в квантовом случае этому должна соответствовать малость меры начальных состояний, приводящих к состоянию типа "шрёдингеровского кота" (ШК) — суперпозиции макроско-

---

Г.Б. Лесовик. Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, 117334 Москва, ул. Косыгина 2, Российская Федерация  
Тел. (095) 137-32-44. Факс (095) 938-20-77  
E-mail: lesovik@landau.ac.ru

Статья поступила 17 декабря 2000 г.

---

пически различных состояний. Заметим, что в многомировой интерпретации Эверетта III (поддержанной М.Б. Менским) как раз предполагается обратное, а именно, что начальные состояния, приводящие к суперпозициям различных макроскопических состояний, являются типичными. Так это или нет с точки зрения существующей квантовой теории можно проверить совершенно конкретными вычислениями стандартными методами (см. ниже). Такая проверка выглядит на сегодняшний день делом вполне возможным, хотя технически и не вполне тривиальным, и скорее всего в ближайшем будущем этот вопрос будет разрешен. Одной из целей моего письма собственно и является попытка внятно сформулировать, какие же именно величины следует вычислить, чтобы полнее и недвусмысленнее разрешить вопрос об измерениях в квантовой механике. Такие формулировки изложены чуть ниже в конце письма, а пока я изложу некоторые соображения, выходящие за пределы собственно физики, в связи с проблемами, возникающими при *любом* ответе на технический вопрос о редукции волнового пакета в рамках имеющейся квантовой теории.

**Вариант 1.** Удастся продемонстрировать редукцию волнового пакета.

Итак, если мы предположим сначала, несколько опережая события, мою точку зрения справедливой и доказанной, а квантовую теорию — полной и, более того, детерминистической в своей основе теорией, мы оказываемся фактически в ситуации прошлого или даже более раннего столетия, когда классическая механика считалась теоретически и экспериментально устоявшейся теорией, вполне удовлетворительно описывающей физический мир. Это приводит нас к следующему вопросу. Если современная физика в состоянии, в принципе, описать весь материальный мир, в том числе и человека с его нервной системой, генетическим механизмом и т.д., то и его психика, "свобода воли" и вообще все проявления также есть вполне однозначный результат унитарной эволюции нашей метагалактики, определенный начальными условиями "Большого Взрыва", быть может, слегка поправленный, например, наличием черных дыр. Вряд ли найдется большое число сторонников такой точки зрения, не разделяет ее и автор письма. Как можно примирить, и возможно ли это в принципе, детерминистическую физику, например, с субъективным ощущением "свободы выбора"? Выход мог бы быть в рассмотрении некоторого явления, которое пока не присутствует в стандартной квантовой теории. В восточной философии, например, кроме концепций Сознания и Материи, есть концепция Связника (Фохат), обеспечивающего взаимовлияние. Каким бы трансцендентным ни было это явление, должен иметься некоторый эффект, который экспериментально может быть обнаружен, например, как неустранимый слабый сбой фазы. Такого сорта идеи обсуждались, в частности, Б.Б. Кадомцевым, который вводил понятие внешнего шума как источника декогерентности. Р. Пенроуз в книге *Тени Разума* такое предполагаемое явление называет "фактором X". Единственное отличие в мнении автора настоящего письма от идей вышеупомянутых известных физиков в том, что существование подобного явления, как мне кажется, никак не следует из имеющейся теории и вовсе не необходимо для разрешения вопросов теории измерения (в соответствии с предположением (1) см. выше).

Как бы то ни было, если такой внешний шум существует, то он может быть как-то количественно описан, на основе экспериментальных данных. Практическое создание достаточно больших устройств, эволюционирующих в течение заметного времени унитарно (квантовых компьютеров),

возможно позволит экспериментально определить, с какой же точностью эволюция известной и, с точки зрения современной физики, полностью описанной физической системы может быть унитарной.

Скорее всего, эффект "внешнего шума" настолько слаб, что на фоне обычных известных причин сбоя фазы его будет невозможно достоверно выделить, но ответ — за будущим экспериментом.

**Вариант 2.** Не удастся продемонстрировать редукцию волнового пакета.

Обсуждавшийся М.Б. Менским выбор альтернативы, возникающей в результате квантового измерения, является ключевым вопросом, беспокоившим многих. Особенно ярко по этому поводу высказывался Эйнштейн. Если считать, что такой выбор действительно происходит неким совершенно мистическим образом, так что механизм выбора нигде более в физике не возникал бы (а именно так дело выглядит в стандартной интерпретации), то вполне естественно считать (см. М.Б.М., также Р. Пенроуз), что именно "в этом месте" физика естественно соприкасается с вопросами к физике не относящимися, например с вопросом о природе сознания. Именно такая ситуация имела бы место, если технически продемонстрировать редукцию волнового пакета не просто не удалось бы, а, более того, стало бы вполне ясно, что это невозможно в рамках существующей теории.

Тем не менее, не отрицая в принципе такой возможности, мы хотим отметить, что это была бы довольно странная ситуация, когда главный механизм этого явления скрыто присутствует как главная и единственная причина редукции волновых пакетов с непредсказуемым исходом и нигде более себя не проявляет, не поддается количественным характеристикам и т.д. Более вероятным кажется существование вполне описываемого физикой (по крайней мере экспериментальной) механизма (см. выше).

Обсудим теперь более детально вопрос о теоретической (технической) демонстрации возможности редукции волнового пакета. Сначала заметим, что если удастся технически продемонстрировать редукцию волнового пакета как результат унитарной эволюции системы частицы + резервуар при заданном состоянии системы, результат может быть только однозначным, т.е. какая альтернатива реализована, должно быть ясно из вида конечной волновой функции. Это, однако, непростая задача. Фактически требуется определить исход измерения как функции бесконечного числа переменных, описывающих детектор (резервуар). То, что только бесконечное число переменных, имеющееся, например, в пространственно неограниченном резервуаре с мягкими модами (типа фотонов) может обеспечить редукцию волнового пакета, довольно очевидно. Поэтому ясно, что, например численный счет может дать только некоторые указания на соответствующую тенденцию (что, впрочем, тоже очень полезно).

Другой путь — это вычислять некоторые усредненные по состоянию резервуара величины. Рассмотрим этот вопрос на примере задачи о частице в двухъямном потенциале, связанной с некоторым резервуаром. Такая задача ранее изучалась многими авторами, она же оказалась хорошей моделью для изучения процессов декогерентности в физически реализованных квантовых битах (кубитах). В силу хорошей изученности эта модель может послужить и для выяснения интересующего нас вопроса, так как при определенных условиях на резервуар она может рассматриваться как модель детектора.

В такой задаче обычно изучается разность вероятностей того, что частица находится в левой, либо в правой яме  $P(t) = P_L(t) - P_R(t)$ , усредненная по состоянию резервуара.

Изучения такой величины, однако, недостаточно для наших целей. Скажем, обращение ее в нуль на бесконечности могло бы происходить разными способами. Можно себе представить, что в зависимости от состояния резервуара либо  $P_L(\infty) = 1$ , либо  $P_R(\infty) = 1$ , как мы и предполагаем. Однако не исключен и вариант  $P_{L(R)}(\infty) = 1/2$ , или существует какая-то функция распределения для вероятностей, а конечные состояния есть состояния типа шрёдингеровского кота, т.е. когерентные суперпозиции левых и правых. Поэтому было бы интересно изучить, например такую величину:

$$M = P_L(t)P_R(t), \quad (1)$$

усредненную по состояниям резервуара. Такая величина обращается в нуль уже тогда и только тогда, когда состояния типа ШК исключены (или мера таких состояний, нормированная на полную меру, обращается в нуль).

Представим теперь дополнительный, быть может несколько неожиданный, аргумент в пользу того, что именно резервуар отвечает за исход измерения. Если бы кроме волновой функции частицы на исход измерения влияло бы состояние резервуара, естественно было бы предположить, как такое влияние снижало бы точность правила "квадрата волновой функции" и делало бы его законом только в идеализированной ситуации.

Именно так и обстоит дело, и такое явление известно как фликкер-шум (эффект мерцания) или, как говорят для краткости, "1/f-шум" (по типичной зависимости спектра от частоты). Такой шум возникает во всех неравновесных процессах, а процесс последовательного изготовления и последующего детектирования большого числа частиц в одном из состояний является одним из примеров такого процесса. Более или менее общепринятая точка зрения на природу фликкер-шума такова. В каждой системе, помимо детектируемых частиц (например, это электроны в проводнике), имеется большое количество других, взаимодействующих с этими частицами степеней свободы (фононы, фотоны, примеси). Эти степени свободы и обеспечивают своеобразное "мерцание" во времени, в том числе на очень больших временных масштабах. Это приводит к тому, что попытка измерять как можно дольше для большей точности наталкивается на быстро растущую по времени ошибку  $\delta N \propto t$  (в случае отклонения спектральной плотности от 1/f степень времени соответственно изменится). При этом, конечно, не все степени свободы, дающие вклад во фликкер-шум, обязательно существенны для редукции волнового пакета, но степени свободы детектора (или резервуара, ответственного за редукцию волнового пакета) обязательно дадут вклад в шум.

Обсудим теперь другой сложный вопрос теории измерения: скорость редукции волнового пакета. Эта проблема особенно ярко возникает в эксперименте Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР). С точки зрения теории такая же проблема возникает и при описании обычного измерения координаты одной частицы. Действительно, в последнем случае после регистрации частицы в одной точке мы уверены, что в других точках этого не произойдет: в этом случае, опять же, налицо нелокальное изменение априорных вероятностей. И в том, и в другом случае, если считать время, необходимое для измерения, конечным и не зависящим от вида волновых пакетов, приходится предполагать, что редукция волнового пакета (локализация волновой функции) происходит со скоростью превышающей скорость света. Вообще говоря, это обстоятельство не противоречит релятивистской инвариантности и не дает возможности передавать информацию быстрее скорости света

(это обстоятельство подробно обсуждалось многими авторами).

Тем не менее и в этом вопросе имеется явная необходимость продемонстрировать технически, как это происходит. По аналогии с (1) следовало бы изучить разновременной коррелятор

$$\langle P_L(t)P_R(t + \tau) \rangle. \quad (2)$$

Качественно редукцию волнового пакета можно представить как процесс туннелирования. Такая аналогия особенно уместна, например, для случая расщепления волнового пакета, падающего через одномерный проводник на сочленение с двумя другими (сочленение в форме буквы Y). Предположим, прошедшая частица может быть зарегистрирована в одном из проводников детекторами, расположенными на большом расстоянии от сочленения. После регистрации одним из детекторов регистрация в другом может произойти только в результате сбоя. В процессе запутывания степеней свободы первого детектора за степени свободы частицы волновой пакет, расположенный возле второго детектора, должен начать уменьшаться по абсолютной величине и, быть может, как-то деформироваться. Тем не менее эта деформация не может привести к буквальному стягиванию (движению) этого волнового пакета к первому — это противоречило бы динамике распространения и вероятностям детектирования, вычисленным стандартным образом. Остается предполагать, что происходит процесс типа туннелирования, при котором волновой пакет (из канала с несработавшим детектором) не появляется ни в каких промежуточных положениях, а просто (за некоторое время) исчезает.

В заключение подчеркнем основной лейтмотив этого письма. Многие сложные вопросы теории измерения в квантовой механике могут быть переведены с уровня качественных рассуждений и аргументов "верю — не верю" на уровень конкретной теоретической и экспериментальной проверки определенных предположений, гипотез и теорий. Формулировка таких *проверяемых гипотез* — уже некоторый шаг вперед, и выше была сделана попытка представить некоторые из них.

В частности, мы предположили, что:

а) резервуар есть источник квантовомеханической вероятностности, и имеется прямая аналогия между классическими и квантовыми "случайными" процессами;

б) степени свободы детектора играют роль "скрытых переменных";

в) фликкер-шум можно рассматривать как свидетельство определяющей роли резервуара во всех видах шумов, в том числе дробового, возникающего, как принято считать (при низких температурах), из-за "квантовомеханической вероятностности";

г) квантовая механика локальна в том смысле, что все фундаментальные законы локальны, а "нелокальность", связанная со сверхсветовой редукцией волнового пакета, есть явление (качественно похожее на туннелирование), которое следует из этих локальных и лоренц-инвариантных законов (уравнений);

д) должно существовать некоторое экспериментально обнаружимое явление ("фактор X" Пенроуза, "внешний шум" Кадомцева), которое указывает на неустранимую неунитарность эволюции квантовой системы.

Если перечисленные выше гипотезы а)–г) верны, существование такого явления не следует из теории, и аргументом в пользу его возможного наличия может служить лишь уверенность в том, что Вселенная вместе с живущим в ней человеком не является "квантовым компьютером" со строго определенным поведением.