

статистическую сумму и следует считать от природы конечной и заданной величиной. А она получается в терминах действия. Эволюция же протекает по пути сохранения информации, это должно быть эквивалентно принципу наименьшего действия. Возникает возможность описать фазовые переходы при охлаждении как накопление "памяти" со сжатием "файлов" освобождающим ячейки памяти. Отсюда и "стрела времени", и такие еще странно-сти физического мира, как биология с разумом наверху

Если символы в "гроссбухе" являются элементами однородного пространства (в котором транзитивно действует некая единая группа), то элементарный символ сведется к булевой единице, отмечающей присутствие чего-то... А все информативные предикаты сведутся к положению символа в "гроссбухе", положение характеризуется только числом (полу)шагов действия между символами (вспомним о дискретности наблюдаемых квантовых состояний компактных систем). Символы уложены не в строку, как двоичный код для машины Тьюринга, а в вершины многосвязного графа. То есть "костяшки на счетах у Бога" нанизаны не на общий одномерный стержень, как в речи или тексте, а пронизаны множеством спутанных "эйнштейнглментом" струн.

Итак:

1. "Господь Бог не играет в кости", но при этом владеет только конечной информацией.

2. "Голографический принцип" — вся физическая информация в причинно-связной мировой области имеет конечную меру и сохраняется по этой мере.

3. Информация скорее всего известна Богу в виде графа (матрицы) "действительных" расстояний (отношений) между элементарными идентификаторами, или между различимыми состояниями мира в целом. За различимость отвечает мера действия по пути. Эта картина сопоставима фейнмановским диаграммам, поскольку вероятности, амплитуды и представления групп Ли являются экспонентами действия, а информация связана с действием непосредственно после логарифмирования этих экспонент. Чтобы информация оказалась конечной без произвола, надо попробовать обойтись конкретным (полу)целочисленным действием.

Для обоснования следует перечислить аморфный список литературы, содержащей не слишком прозрачные аналогии [11–14]. Превращение чистого состояния в матрицу плотности в процедуре измерения описано Зуреком в [5], изложено в [6]. Вывод о сохранении информации получится, если всякий раз и измерительный прибор, и наблюдателя включать в замкнутую физическую систему, спрятанную под общим унитарным оператором эволюции — важно не вынимать и не толкать обратно информацию. Неисповедимы пути квантовой системы — не может прибавиться знаний у Бога (ведь и мы в Его ведении).

Список литературы

1. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000)
2. Фейнман Р *УФН* **149** 671 (1986)
3. Килин С Я *УФН* **169** 507 (1999)
4. Садбери А *Квантовая механика и физика элементарных частиц* Гл. 5 (М.: Мир, 1989)
5. Zurek W H *Phys. Rev. D* **26** 1862 (1982)
6. Менский М Б *УФН* **168** 1017 (1998)
7. Бремерман Г *Распределения, комплексные переменные и преобразование Фурье* (М.: Мир, 1968)
8. Bekenstein J D *Lett. Nuovo Cimento* **11** 467 (1974)
9. Kaloper N, Linde A *Phys. Rev. D* **60** 103509 (1999)
10. Климонтович Ю Л *УФН* **169** 443 (1999)
11. Charline G *Phys. Rep.* **315** 95 (1999)

12. Petersen C, Soberberg B, in *Local Search in Combinatorial Optimization* (Eds E Aats, J K Lenstra) (New York: John Wiley & Sons, 1997) см. главу "Artificial neural networks"
13. Фок В В, Чехов Л О *ТМФ* **120** 511 (1999); Чехов Л О *УМН* **54** (6) 109 (1999)
14. Литинский Л Б *ТМФ* **118** (1) 133 (1999)
15. Фейнман Р П, Хибс А *Квантовая механика и интегралы по траекториям* (М.: Мир, 1968)
16. Wilczek F *Phys. Today* **52** (1) 11 (1999)

О проблеме выбора альтернативы в квантовом измерении

А.Д. Панов

В последнее время динамично развиваются два новых тесно связанных направления исследований в квантовой теории — квантовая информатика и теория декогеренции. Сейчас ряд основных представлений, принадлежащих этому кругу вопросов, можно считать относительно устоявшимся. Достаточно популярное, но и без излишних упрощений, введение в эту новую область дается в первых трех разделах статьи М.Б. Менского [1]. Четвертый раздел статьи посвящен роли сознания наблюдателя в квантовом измерении и, по нашему мнению, является в достаточной мере дискуссионным.

Рассматриваемая проблема состоит в следующем. Можно попытаться описать процесс измерения, опираясь исключительно на унитарную эволюцию в соответствии с уравнением Шрёдингера, как это впервые предложил сделать Эверетт [2]. Последовательное применение уравнения Шрёдингера к замкнутой системе, включающей наблюдаемый микробиъект и макроскопическое окружение (приборы и др.), приводит к суперпозиции макроскопически различных квантовых состояний, описывающих альтернативные исходы измерения. Уважаемый автор замечает, что такое описание не дает никакого механизма селекции одной из альтернатив. Так как в реальном опыте каждый экспериментатор имеет дело лишь с одной альтернативой, такое описание измерения рассматривается как неполное — в нем не хватает механизма выбора альтернативы. Далее автор замечает, что теория, которая могла бы описывать такой механизм, обязательно должна включать сознание и предлагает включить его в теорию как элемент, призванный логически замкнуть полностью квантовое описание измерения. Сознание наделяется *функцией* выбора одной из альтернатив из когерентной суперпозиции различных возможных исходов измерения, приводя к согласию предсказаний теории и опыта. Насколько мы понимаем, это означает, что сознание выводится за рамки динамического описания и предстает как явный *метатеоретический* элемент для интерпретации теории. Поскольку существует иная точка зрения на роль и место сознания в квантовом измерении и ввиду важности обсуждаемого вопроса, мы считаем необходимым представить ее в этом письме.

Известен ряд работ, в которых рассматривается последовательно квантовое описание выбора альтернативы

А.Д. Панов. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Российская Федерация
Тел. (095) 939-58-75, 939-38-08
E-mail: a.panov@relcom.ru

Статья поступила 3 октября 2000 г.

сознанием наблюдателя в квантовом измерении. Так, центральным моментом классической работы Эверетта [2] было именно явное включение сознания в квантовое описание. Более того, Эверетт прямо утверждает, что такое описание *предсказывает*, что сознание наблюдателя *должно* делать выбор одной из альтернатив. Современное освещение этой проблематики можно найти в работе Цее [3] и ссылках в ней. Покажем, как выбор альтернативы сознанием в квантовом измерении можно описать исключительно в рамках унитарной квантовой эволюции.

Рассмотрим систему, состоящую из следующих четырех частей: S — измеряемая микросистема; D — прибор (в состав прибора могут быть включены также все каналы связи, необходимые для того, чтобы довести информацию до сознания наблюдателя); M — сознание наблюдателя или мозг наблюдателя; E — макроскопическое окружение (может в себя включать сколь угодно большой фрагмент Вселенной, *но только не весь остаток Вселенной*). Объединенную систему $U = S \otimes D \otimes M \otimes E$ считаем изолированной и совершающей унитарную эволюцию во времени. Пусть начальное состояние системы S перед измерением есть

$$|\Psi_0\rangle = (\alpha|S_a\rangle + \beta|S_b\rangle)|D_0\rangle|M_0\rangle|E_0\rangle,$$

где $|D_0\rangle$, $|M_0\rangle$, $|E_0\rangle$ — состояние прибора, сознания и окружения до измерения, а состояния микросистемы $|S_a\rangle$ и $|S_b\rangle$ взаимно ортогональны. Для простоты будем считать, что микросистема взаимодействует только с прибором, прибор взаимодействует только с сознанием наблюдателя, сознание наблюдателя взаимодействует с окружением. Предполагаем также, что все взаимодействия устроены подобно неразрушающим измерениям.

Процесс измерения можно представить в виде трех последовательных этапов. Первый этап — взаимодействие микросистемы с прибором, которое приводит к корреляции показаний прибора и состояния микросистемы:

$$\begin{aligned} &(\alpha|S_a\rangle + \beta|S_b\rangle)|D_0\rangle|M_0\rangle|E_0\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow (\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle)|M_0\rangle|E_0\rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $|D_a\rangle$ и $|D_b\rangle$ представляют показания прибора, отвечающие состояниям $|S_a\rangle$ и $|S_b\rangle$ микросистемы. Второй этап — воздействие прибора на сознание наблюдателя, которое приводит к корреляции состояния сознания и показаний прибора:

$$\begin{aligned} &(\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle)|M_0\rangle|E_0\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow (\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle|M_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle|M_b\rangle)|E_0\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Третий этап — взаимодействие сознания наблюдателя с окружением, которое приводит к корреляции состояния сознания и окружения:

$$\begin{aligned} &(\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle|M_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle|M_b\rangle)|E_0\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow (\alpha|S_a\rangle|D_a\rangle|M_a\rangle|E_a\rangle + \beta|S_b\rangle|D_b\rangle|M_b\rangle|E_b\rangle). \end{aligned} \quad (3)$$

Этот этап является существенным, так как именно здесь проявляется классичность сознания. Состояние сознания, как классического объекта, должно быстро декогерировать из-за взаимодействия с окружением.

Наблюдатель непосредственно воспринимает только свои собственные субъективные ощущения, т. е. состояние своего сознания. Поэтому субъективные ощущения наблю-

дателя определяются редуцированной матрицей плотности его сознания, получающейся из полной функции состояния объединенной системы усреднением по внешним по отношению к сознанию степеням свободы. После этапа (1) состояние сознания, очевидно, не изменяется по сравнению с исходным. После этапа (2) сознание более не описывается единственным вектором состояния. Предполагая, что для различающихся макросостояний $\langle D_a|D_b\rangle \cong 0$, из правой части уравнения (2) легко найти редуцированную матрицу плотности сознания наблюдателя:

$$\rho_M^{(2)} = |\alpha|^2|M_a\rangle\langle M_a| + |\beta|^2|M_b\rangle\langle M_b|. \quad (4)$$

Состояние сознания декогерирует из-за возникновения корреляций между состояниями прибора и состояниями сознания. Предполагая $\langle E_a|E_b\rangle \cong 0$, из правой части уравнения (3) нетрудно найти состояние сознания по окончании третьего шага эволюции, и, как легко убедиться, $\rho_M^{(3)} = \rho_M^{(2)}$. Этап (3) ничего не меняет в сознании наблюдателя, все существенные изменения происходят уже на этапе (2).

Состояние сознания (4) следует интерпретировать следующим образом. Так как $|M_a\rangle$ и $|M_b\rangle$ есть классические макросостояния, то состояние (4) является полностью декогерентным классическим распределением вероятностей, подобным распределению $\rho(p, q)$ статистической механики. Это, в свою очередь, означает, во-первых, что система M оказывается в одном, и только одном, из двух классических состояний, во-вторых, вероятности оказаться в них есть $|\alpha|^2$ и $|\beta|^2$, как и предсказывает проекционный постулат. 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. Наблюдатель воспринимает себя в одном из классических состояний: либо $|M_a\rangle$, либо $|M_b\rangle$, т. е. выбор сделан. Наличие функции распределения показывает только, что *заранее* нельзя сказать, в каком состоянии сознание окажется. Более того, следуя Эверетту можно констатировать, что формализм *предсказывает* — в момент возникновения корреляций состояний прибора и сознания наблюдатель субъективно делает выбор альтернативы. Заметим, что точное уравнение Шрёдингера дает неселективное описание эволюции, поэтому никакого более детального описания выбора одной из альтернатив требовать нельзя; для этого просто нет подходящего языка.

Таким образом, выбор наблюдателя полностью описан в рамках унитарной эволюции. Несмотря на то, что вся объединенная система U совершает унитарную эволюцию и не делает никакого выбора, сознание наблюдателя субъективно такой выбор делает, и *механизм выбора явно описан*.

Может показаться, что такой подход может привести к полному решению проблемы квантового измерения. Однако, по нашему мнению, это не так. Решение проблемы измерения действительно дано в рамках введенной выше модели, но при более внимательном рассмотрении сама модель в некоторых отношениях должна быть признана несостоятельной. Мы рассматривали объединенную систему U как изолированную и совершающую унитарную эволюцию, что, в действительности, даже приближенно не может быть принято для макроскопической системы рассмотренного типа. Окружение E , будучи макроскопическим и классическим, должно чрезвычайно эффективно декогерировать при взаимодействии с "окружением этого окружения", что приведет к декогеренции и всего состояния объединенной системы U . Поэтому мы должны признать, что система U принципиально является открытой и не может совершать унитарную эволюцию.

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 "георетического 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 "шрёдингерского 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.