

М.Х.Шульман

РАЗМЫШЛЕНИЯ О ПРИНЦИПЕ СУПЕРПОЗИЦИИ

Настоящая публикация представляет собой развитие идей доклада, сделанного автором на Российском междисциплинарном семинаре по исследованию природы времени 23 мая 2006 г. В докладе обосновывались, в частности, следующие тезисы:

- Математическая “экзотика” аппарата квантовой физики сводится к двум составляющим: первая связана с существенно колебательными свойствами квантовых объектов и в действительности имеет вполне адекватные аналоги в классической теории, тогда как вторая обусловлена пространственной нелокальностью и классической аналогии действительно не имеет.
- Редукция волновой функции происходит не вследствие расщепления реальности на различные миры (по Х. Эверетту) и, тем более, не под управлением со стороны сознания (по М.Б. Менскому), а вследствие обмена энергией и импульсом (например, при измерении) с элементами окружения. В промежутках между взаимодействиями квантовые объекты представляют собой системы, принципиально изолированные от “обычного” мира, и обладают иной метрикой, обеспечивающей механизм нелокальности.
- Состояние суперпозиции квантового объекта физически представляет собой строго упорядоченную во времени последовательность переходов из одного базисного состояния в другое, причем интенсивность переходов есть количественная мера интерференции. Измерение и редукция волновой функции отвечают мгновенному прекращению череды переходов в случайно выбранный момент времени. Эта ситуация допускает точные аналогии в неквантовой области.

Альтернативы Эверетта и альтернатива эвереттике

Внутренней мотивацией для появления как идеи Эверетта, так и сходных идей о существовании, рождении и гибели многих вселенных в космологии является такое соображение: опыт подтверждает вероятностную модель, а такая модель физически должна основываться на реальном существовании *всей* (а не только выявленных здесь и сейчас) группы возможных исходов. Не обнаружив этих исходов в нашей Вселенной, начинают их поиски в виртуальных мирах. Возвращаясь к принципу суперпозиции и коллапсу волновой функции, естественно задать вопрос: существует ли методологическая альтернатива идее альтернативных миров? Я думаю, что такая альтернатива существует.

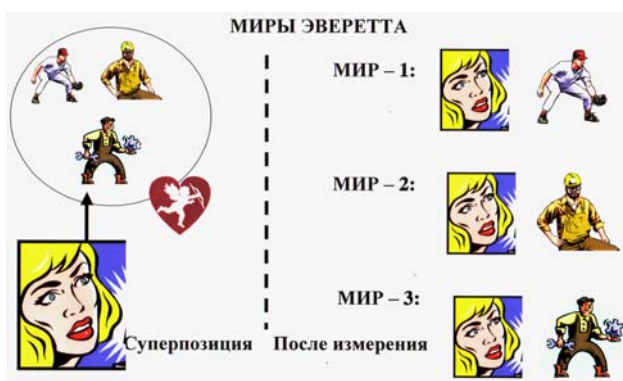
Согласно предложенной М. Борном вероятностной интерпретацией волновой функции можно вычислить вероятность того, что некоторая физическая величина

x , определенная на множестве $\{X\}$, примет численное значение x_0 . Для нахождения самой волновой функции и отвечающих ей собственных значений решается соответствующее уравнение (носящее имя Шредингера, Дирака или какое-нибудь еще). В промежутке между взаимодействиями состояние замкнутой системы описывается в общем случае суперпозицией собственных состояний. Квадраты коэффициентов, стоящих при базисных слагаемых, выражают относительную вероятность обнаружить систему в том или ином из базисных состояний, когда и если с этой целью производится соответствующее измерение. Такое измерение интерпретируется с физической точки зрения как *переход* из состояния суперпозиции в базисное состояние, а с математической точки зрения – как *проецирование* точки многомерного гильбертова пространства на одну из его осей. Последнее и представляет собой коллапс волновой функции.

Моя гипотеза состоит вот в чем. Парциальные вероятности нахождения частицы в том или ином собственном состоянии *реализуются благодаря тому, что квантовая частица строго последовательно пребывает поочередно в каждом из собственных состояний соответствующую часть некоторого (достаточно малого) периода колебаний*. Таким образом, во-первых, время пребывания в каждом состоянии *действительно пропорционально* квадрату соответствующего коэффициента разложения. Во-вторых, сохраняется *случайность выбора момента наблюдения* по отношению к фактической фазе состояния.

Чтобы сделать более ясными модель Эверетта и модель с чередованием фазы в состоянии суперпозиции, прибегнем к шутливой аналогии. В первом случае мы можем сравнить ситуацию, в которой три жениха – А(лександр), Б(орис) и В(ладимир) ухаживают за одной и той же девушкой. В классическом мире она может выбрать лишь одного из них, но в квантовых мирах Эверетта можно осуществить все три альтернативы!

В предложенной модели с чередованием ситуация иная. Состояние суперпозиции можно сравнить с женатым ловеласом, который строго поочередно проводит время у трех своих подружек – А(нны), Б(арбары) и В(алентины). Но настает момент “И” (истины или измерения), когда ревнивая жена его подстерегает и застаёт – но только с одной из подружек (например, с Анной), причем выбор – случаен, а фаза процесса, вопреки утверждению фон Неймана, оказывается скрытым параметром.



Благодаря этой гипотезе становится очевидным решение проблемы измерения в квантовой механике. Как известно, суть проблемы состоит в *необратимом* и *спонтанном*, как принято было считать, переходе объекта в процессе измерения из суперпозиции нескольких собственных состояний в одно из них. Почему в то, а не в иное среди прочих собственных состояний – объяснялось *формальной* ссылкой на “вероятностный” характер явления. Еще хуже обстоит дело с необратимостью, которая *не присуща* эволюции замкнутой квантовой системы в промежутке времени *между* взаимодействиями (измерениями).

Если же принять предлагаемую гипотезу, то все становится на свои места. В *случайный* момент времени (по отношению к фазе, или парциальному собственному состоянию) мы с помощью измерения *фиксируем* именно то состояние, в котором в *данное* мгновение *пребывает* квантовый объект. Это все равно, как если бы на вращающемся колесе обозрения мы взглядом выбрали одну из кабинок. Все кабинки равноправны, все они по очереди проходят через ту точку, на которую устремлен взгляд наблюдателя, но *случайно* выбранный момент фиксации выделяет только *одну* из них. В этом случае необратимость возникает извне, по инициативе наблюдателя или измеряющего устройства (регистратора), сама по себе она не присуща равномерному и в принципе обратимому движению череды кабинок.

Пока что мы не вдавались в характеристики природы набора собственных состояний. Например, речь могла идти о спине электрона, поляризации фотона и т.п. Психологически сложнее представить себе набор таких состояний, как, например, различные положения в пространстве, т.е. набор таких измеряемых величин, как пространственные координаты, если они достаточно сильно изменяются от измерения к измерению. Как выразился при обсуждении этой идеи А.В. Московский, “трудно представить себе частицу, координаты которой за считанные мгновения поочередно изменялись бы на величину порядка радиуса галактики”.

Это действительно трудно себе представить. Однако *не труднее*, чем представить себе частицу, которая переходит из одной 4-мерной точки в другую *сразу* по *всем* физически возможным во Вселенной траекториям, как это описал Р. Фейнман. Причем последнее подтверждено, например, экспериментами по отражению луча света различными участками зеркала (а не одной его точкой, как следовало бы из классической оптики). Но никто и *не* обещал свести квантовую механику к простой и понятной классической теории. Все, что я предлагаю, это некоторое развитие модельных представлений квантовой механики, которые проясняют лишь *некоторые*, хотя и фундаментальные ее проблемы.

Оговорив подобным образом чисто *психологические* барьеры, перейдем к оптимистическим аргументам. Если речь идет не о галактических “прыжках”, а о достаточно малых различиях в координате, то все выглядит вполне приемлемо. Именно такой случай мы имеем в каноническом эксперименте с несколькими (например, двумя) щелями, через которые на экран пролетают электроны или фотоны. Щели разделены весьма скромным в сравнении с галактикой

расстоянием, и уже целое столетие все вынуждены признавать, что фотон (электрон) может непостижимым образом проникать *сразу* через обе щели.

Что же говорит нам вновь предлагаемая гипотеза? А говорит она нам, что термин “сразу” здесь не очень точен. На самом деле координата частицы строго поочередно принимает два различных значения, отвечающих двум собственным состояниям – это координаты соответственно первой и второй щели. Очевидно, длительность пребывания в каждом из состояний весьма мала по сравнению со временем пролета через щель, поэтому в каком-то приближении действительно можно говорить, что частица пролетает “сразу” через обе щели, но это, как выясняется, всего лишь приближение.

Понятно, что когда мы пытаемся путем детектирования выяснить, через какую именно щель пролетает частица, мы прерываем чередование состояний и фиксируем случайно выбранное состояние. Именно поэтому мы блокируем дальнейший пролет частицы в качестве *суперпозиции* двух состояний.

Можно ли считать это объяснением физической сущности принципа суперпозиции? Как для предложенной модели, так и для модели Эверетта важнее всего вопрос об отличии набора обычных классических альтернатив от состояния суперпозиции как такового. Можем ли мы четко сформулировать эти отличия? Я полагаю, что да.

Когда мы говорим о вероятности различных исходов опыта, мы должны выяснить, существуют ли корреляции между различными исходами, и какова природа этих корреляций. При описании идей декогеренции мы уже обращались к использованию матрицы плотности, в которой диагональные члены соответствовали вероятностям собственных состояний, а недиагональным приписывалась ответственность за интерференцию и корреляцию между ними. Как же понимать характер этой интерференции? В квантовой механике (а также в теории стохастических процессов) матричным недиагональным элементам отвечает *вероятность перехода* между соответствующими состояниями. Если диагональные члены являются действительными числами (как квадраты модулей комплексных амплитуд a_i), то недиагональные члены имеют вид произведений $a_i a_j^*$, т.е. являются комплексными. Но в начале настоящей работы мы уже выяснили, что это свидетельствует об осциллирующем характере соответствующих величин, причем частота осцилляции равна разности начальной и конечной частот. Таким образом, появляются основания утверждать, что *состояние суперпозиции – это в действительности сложное состояние, в котором происходят сбалансированные по численности переходы между базисными состояниями, причем интенсивности переходов меняются по гармоническому закону*.

Оказывается возможным дать примеры полностью классических систем, для которых применимы представления о состоянии суперпозиции. Простейшей системой такого типа является электрический осциллятор, состоящий из конденсатора и катушки индуктивности. Когда рубильник в соединяющей их цепи замкнут, в контуре происходит периодический перезаряд. При этом энергия конденсатора и индуктивности меняется (в противофазе) от нуля до максимального значения, их полная энергия всегда постоянна, а среднее за

период колебаний значение энергии каждого элемента равно половине полной энергии контура.

Рассмотрим теперь два типа измерений. Измерение первого типа (неразрушающее), характерного именно для неклассических объектов, практически не возмущает его состояния. Если с помощью осциллографа измерить ток и напряжение в каждом из элементов цепи, мы обнаружим максимально возможную корреляцию между значениями мгновенной энергии для этих элементов.

Измерения второго типа можно назвать разрушающими, т.к. они необратимым образом изменяют конфигурацию объекта, что характерно прежде всего для классического случая. Однако это можно смоделировать и для классического объекта. Если в нашем примере разомкнуть рубильник *в момент, когда ток равен нулю* (это естественное физическое ограничение, иначе возникает дуга, и энергия контура не сохраняется), то с равной вероятностью вся энергия окажется сосредоточенной либо в индуктивности, либо в конденсаторе, что полностью аналогично, например, ситуации с измерением спина электрона. Более того, если написать матрицу плотности для энергии, то мы увидим и недиагональные члены, отвечающие перетокам энергии из одного элемента в другой.

Эта ситуация легко обобщается на электрические цепи с любым числом контуров и аналогичные классические линейные системы произвольной природы. При этом важно еще раз подчеркнуть, что моментам измерения для классических объектов отвечают *не любые* моменты измерения для их классических аналогов, а *только такие*, когда в системе при коммутации *не происходит потеря энергии* (например, токи через индуктивности и напряжения на емкостях должны быть равны нулю)! Для классических объектов это требование обусловлено просто дискретностью уровней энергии.

В случае классической системы с одной частотой колебаний (например, электрического контура с индуктивностью и емкостью) мы имеем *периодический переток энергии* из одного элемента в другой – среднее значение потока энергии за период равно нулю, но среднее значение квадрата или абсолютной величины больше нуля! В этом и состоит отличие состояния суперпозиции от простого “сосуществования” двух различных состояний; в первом случае имеется колебательная динамика общего состояния, второй случай – чисто статический. Кстати говоря, сходными свойствами обладает вакуумное состояние физического поля – среднее значение полевого параметра равно нулю, но имеется энергия “нулевых” колебаний.

В случае системы с несколькими различными частотами колебаний возникает соответствующее число собственных (“базисных”) состояний (например, энергии различных конденсаторов или индуктивностей цепи), а также перетоки энергии между ними. Если все частоты соизмеримы, то средние значения всех потоков энергии за общий кратный период равны нулю, но их действующие значения будут опять-таки отличны от нуля. Очень важно заметить, что перетоки энергии будут происходить с *комбинационными* частотами, равными

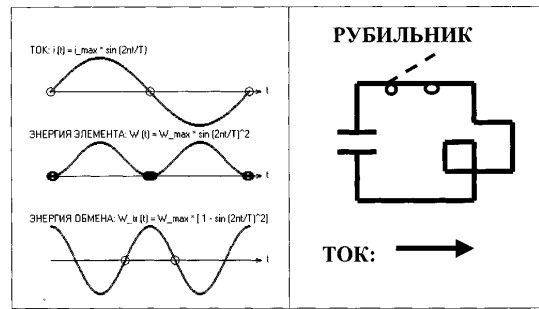
как *разности* соответствующей пары частот, так и их *сумме*. В моей книге [Шульман, 2004] я уже обращал внимание читателей на это обстоятельство:

Что касается *суммарных* частот, то в квантовой теории мы их не встречаем. Объяснение этому факту я предлагаю следующее. Как известно, видимое электромагнитное излучение охватывает диапазон частот от $4 \cdot 10^{14}$ до $7.5 \cdot 10^{14}$ Гц, что соответствует энергии перехода между электронными уровнями в атоме от 1.65 до 3.1 эВ. Именно на законах оптического излучения и основывались создатели квантовой механики. Если предположить, что только *разности* реальных частот колебаний в атоме лежат *внутри* оптического диапазона, а *суммы* этих частот имеют значительно *более высокие* значения, то можно понять, почему их наличие до сих пор игнорируется.

В свою очередь, объяснение такого различия в порядке величины между разностями и суммами частот я вижу в том, что *к энергии электронных уровней*, вычисляемой из нерелятивистского уравнения Шредингера, *должна прибавляться энергия покоя электрона*, равная 0.511 МэВ (что отвечает частоте волны более 10^{17} Гц). При вычислении *разности* частот это слагаемое исчезает, а вот при вычислении *суммы* частот - удваивается, что выводит излучение в диапазон гамма-квантов с энергией более 1 Мэв. Физически схема выделения или поглощения такой энергии может быть связана с аннигиляцией электрона и позитрона или их рождением из гамма-кванта, несущего достаточную энергию.

Возвратимся к квантовым объектам. Если и когда интенсивности переходов с течением времени ослабевают, можно говорить о декогеренции. Очевидно, что можно сформулировать и обратное заключение: возникновение запутанных, специфическим образом квантово скоррелированных состояний должно быть связано с возникновением и возрастанием интенсивности взаимных переходов между базисными состояниями.

СОСТОЯНИЕ СУПЕРПОЗИЦИИ ДЛЯ НЕКВАНТОВОГО ОБЪЕКТА



$$\vec{W} = \frac{1}{2} \vec{W}_L + \frac{1}{2} \vec{W}_C; \quad \vec{W}_C = \vec{W}_L * \exp i\pi$$

$$\underline{\vec{W}} = \begin{bmatrix} (1/\sqrt{2})^2 & (1/\sqrt{2}) * (1/\sqrt{2}) * \exp(-i\pi) \\ (1/\sqrt{2}) * (1/\sqrt{2}) * \exp i\pi & (1/\sqrt{2})^2 \end{bmatrix}$$

БИБЛИОГРАФИЯ

[Ведринский, 1997] Ведринский Р.В. Квантовый эффект Зенона. Соросовский образовательный журнал, № 9, 1997 (текст доступен на сайте <http://quantum3000.narod.ru/>)

[Зурек, 2002] Zurek H. Woitech. *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical*. Los Alamos Science, Number 27, 2002 (текст доступен на сайте <http://quantum3000.narod.ru/>)

[Менский, 1998] Менский М.Б. *Явление декогеренции и теория непрерывных квантовых измерений*. УФН, том 168, № 9, стр. 1017, 1998 (текст доступен на сайте <http://quantum3000.narod.ru/>)

[Менский, 2003] Менский М.Б. *Диссипация и декогеренция квантовых систем*. УФН, том 173, № 11, стр. 1999, 2003 (текст доступен на сайте <http://quantum3000.narod.ru/>)

[фон Нейнман, 1932] v. Neumann J. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1932. (Рус. пер.: фон Нейнман И. *Математические основы квантовой механики*. Москва, Наука, 1964).

[Пенроуз, 2003] Penrose, R. *The Emperor's New Mind*. Oxford University Press, 1989 (Рус. пер.: Пенроуз Р. *Новый ум короля*. Москва, Едиториал УРСС, 2003)

[Фейнман и др., 1963] Feynman R., Leighton R., Sands M. *The Feynman lectures on physics*. Addison wesley publishing company, inc., 1963. (Рус. пер.: Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. Москва, Мир, 1978)

[Шишлова, 1998] Шишлова А. *Квантовая механика. Иной взгляд. По материалам журналов "Успехи физических наук" и "Scientific american"*. Журнал "Наука и жизнь" № 8, 1998 (текст доступен на сайте <http://quantum3000.narod.ru/>)

- [Шульман, 2004] Шульман М.Х. *Вариации на темы квантовой теории*. Москва, Едиториал УРСС, 2004._____См. также http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/shulman_variatsii.pdf
- [Шульман, 2006] Шульман М.Х. *Парадоксы, логика и физическая природа времени*. См. http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/shulman_paradoksy.pdf