

М.Х.Шульман

ВРЕМЯ И КВАНТОВОЕ ПОВЕДЕНИЕ

Настоящая публикация представляет собой литературную версию доклада, сделанного автором на Российском междисциплинарном семинаре по исследованию природы времени 23 мая 2006 г. В докладе обосновываются следующие тезисы:

- Пространственно-временная структура мира, в том числе ее релятивистский характер, проистекают из свойств квантовых объектов.
- 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.
- Предложенное фон Нейманом утверждение о невозможности “скрытых параметров” в квантовой теории на самом деле доказано им только как теорема о достаточности (если теория стохастична, то она приводит к соотношению неопределенности), однако оно не является необходимым (соотношение неопределенности может выполняться и для детерминированной теории). В квантовой же теории такой “скрытый параметр” действительно существует – им является фаза волновой функции, частота колебания которой составляет 10^{17} и более Гц.
- Постоянная Планка с точностью до размерного множителя равна периметру (конечной) Вселенной и растет пропорционально возрасту Вселенной.
- Модель измерения фон Неймана, ассоциированная им с “принципом психофизического параллелизма” и подразумевающая наличие субъекта измерения, в этом смысле является неадекватной физике – акт измерения осуществляется произвольным необратимым регистратором и связанным с ним механизмом памяти, а наличие субъекта измерения вовсе не обязательно.
- 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.

1. Кванты, время и пространство

Первый тезис, который я выношу на суд читателя, касается проблемы универсальности пространственно-временных отношений. Я буду говорить только о естествознании, еще точнее – о физике. Физика относится к числу наук, экспериментальная основа которых – измерение. Измерение, как известно, представляет собой количественное сравнение некоторой величины с

эталоном, который не изменяется от измерения к измерению. Благодаря этому мы можем сравнивать затем между собой результаты различных измерений.

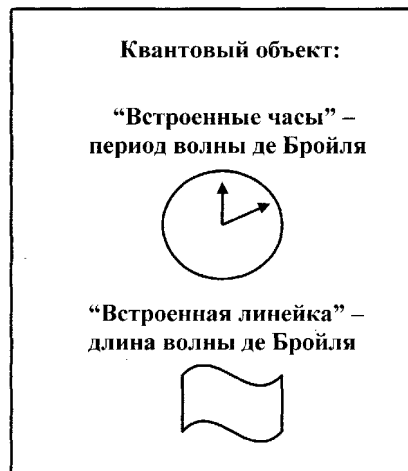
Основные измерения в физике – это измерение пространственных и временных отрезков с помощью, соответственно, некоторых линеек и часов. Поэтому нам необходимо ясное понимание того, на основании чего для *каждого* объекта и процесса во Вселенной мы имеем право надеяться на его измеримость в пространстве и во времени. В доквантовой физике из-за отсутствия универсальных линеек и часов эта *презумпция измеримости* была декларативным постулатом, смысл которого не только не был ясен, но и подвергся сильной ревизии при переходе к теории относительности.

Как мне кажется, квантовая механика впервые указала нам на “свет в конце туннеля”. Действительно, благодаря де Бройлю мы осознали, что каждому квантовому объекту отвечает некая волна его имени. Для параметров этой волны постулируется справедливость преобразований Лоренца. Поэтому *каждый* такой объект обладает как бы “встроенными” линейкой (длина волны) и часами (период волны). Все вместе эти объекты составляют вселенскую популяцию объектов, включенных таким образом в систему релятивистских пространственно-временных отношений. Точно так же экономическое сообщество какой-либо страны возникает и существует постольку, поскольку все его субъекты являются обладателями той или иной суммы денег. Не имеющий денег субъект выпадает из экономического сообщества. Если бы существовал объект, не обладающий волной де Бройля, он бы выпал из системы пространственно-временных отношений.

Эта мысль может иметь нетривиальное развитие. Возможно, специфическая квантовая нелокальность связана именно с тем, что *изолированные* от внешнего мира (в промежутках между взаимодействиями) квантовые объекты *не обладают* волной де Бройля, а занимаемая ими пространственно-временная область обладает совершенно иной метрикой. Только благодаря взаимодействию и в процессе его осуществления волна де Бройля возникает как реальный атрибут объекта и реализует пространственно-временное воплощение объекта.

Величиной, обратной к периоду, является частота. Величиной, обратной к длине волны, является так называемый пространственный волновой вектор. Частота и три пространственные компоненты волнового вектора волны де Бройля образуют 4-вектор, с точностью до постоянной Планка равный вектору энергии-импульса ассоциированного с волной объекта. Если постулировать, что этот 4-вектор инвариантен относительно преобразований Лоренца, то уже отсюда следует исключительно важный вывод: все объекты подчиняются соотношениям теории относительности именно в той степени и именно потому, что их “встроенные” часы и линейки ведут себя инвариантно относительно преобразований Лоренца!

Кванты, время и пространство



Необходимо, разумеется, отметить следующее важное обстоятельство. Мы связали с существованием волны де Бройля такое измеримое свойство пространства-времени, как его протяженность. Однако время характеризуется еще одним фундаментальным свойством, которое можно назвать существованием хода времени, или стрелы времени. С этим связана, в частности, необратимость многих явлений. Насколько можно судить, волна де Бройля здесь не только “не при чем”, но и, напротив, инвариантна по отношению к ходу времени. В моих работах течение и стрела времени связываются с расширением Вселенной, которое я приписываю внешним по отношению к самой Вселенной факторам.

2. Классические аналоги квантовых построений и теорема о “скрытых параметрах”

Из книги Гейзенберга хорошо известен трудный и извилистый путь, который привел его к построению математического аппарата квантовой механики. Это – формальная конструкция, для которой были получены некие правила коммутации, отличные от правил коммутации обычных чисел. Борн увидел, что эти правила коммутации совпадают с правилами для матриц. Затем к работе над новой теорией подключился Дирак, который разглядел в этих правилах аналоги известных соотношений для скобок Пуассона. Все это вместе взятое так и осталось в квантовой механике как экзотика, отличающая ее от механики классической.

Не менее экзотическим является описание объектов с помощью вероятностной волновой функции, которая к тому же является еще и комплексной. Например, *среднее* значение L физической величины в квантовой механике дается выражением

$$L = \int \Psi^* \cdot \mathbf{L} \Psi \cdot dV$$

где \mathbf{L} - оператор соответствующей физической величины. Здесь *интегрированием по объему* обеспечивается *усреднение по пространству*. Очевидно, что физически выражение $\Psi^* \cdot \mathbf{L} \Psi$ должно отвечать за *усреднение по времени*. И это действительно так.

В моей книге [Шульман, 2004], которая доступна также на сайте Семинара по ссылке www.chronos.msu.ru/RREPORTS/shulman_variatsii.pdf, подробно рассказывается об эффективном (с моей точки зрения) описании классических объектов физики – электротехнических, механических и иных осцилляторов – с помощью вполне стандартного математического аппарата, удивительно близкого, как оказалось, к аппарату квантовой механики. Там мной приводятся и обосновываются следующие утверждения:

- Мощность, энергия и действие осцилляторов, усредненные за период, представимы в виде билинейных функций обобщенных координат и импульсов, причем один из сомножителей берется комплексно сопряженным (как и в квантовой теории).
- Для таких билинейных форм легко ввести коммутаторы, в точности подобные коммутаторам и антикоммутаторам квантовых величин. В частности, для классических механических осцилляторов в правой части коммутационных соотношений для координат и импульсов стоит мнимая единица, умноженная (и это единственное отличие) не на постоянную Планка, а на действие для данного конкретного осциллятора.
- Для классических двумерных механических осцилляторов двух важных типов без труда удастся вывести коммутационные соотношения, отвечающие в квантовой теории правилам коммутации для бозонов и фермионов. Для двумерного осциллятора со сдвигом фазы на четверть периода возникает классический аналог спина, а невозможность трехмерного осциллятора со сдвигом фазы на четверть периода между колебаниями вдоль *любой* пары осей приводит к аналогу принципа запрета Паули.

Поскольку полученные коммутационные соотношения для *классических* и *абсолютно детерминированных* величин в точности аналогичны квантовым коммутаторам, для них оказывается справедливым и выражение, эквивалентное соотношению неопределенности

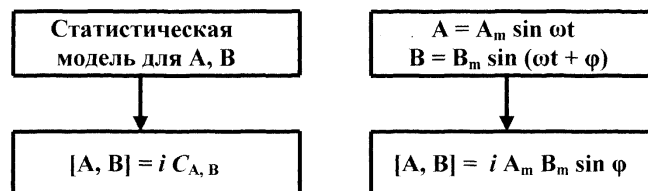
(только вместо постоянной Планка справа будет стоять *классическая* величина действия для *конкретного* осциллятора). В классическом случае коммутационное выражение говорит нам, например, о том, что нельзя одновременно измерить *максимальное* значение тока и напряжения, координаты и импульса классического осциллятора. Аналогом микроуровня в этой ситуации выступают *мгновенные* значения тока и напряжения, тогда как на макроуровне мы смело можем оперировать *действующими* значениями, уровнем эффективно передаваемой мощности в электрической линии, и т.п.

Между тем Джон фон Нейман в [фон Нейман, 1932] настаивал на том, что соотношение неопределенности обусловлено *именно и только влиянием процесса измерения на его результат*, что делает квантовую теорию принципиально статистической и акаузальной, вносит ненулевую дисперсию в распределение квантовомеханических величин в ансамбле. Тем самым фон Нейман исключает, как он считает, возможность восстановления детерминизма с помощью каких бы то ни было “скрытых” параметров.

Логика его рассуждений такова. Результаты измерений в силу стохастичности квантовой механики априорно имеют ненулевую дисперсию. Поэтому, сопоставляя каждой измеряемой физической величине соответствующий статистический оператор, получаем (как показали Кеннард и Робертсон) для двух одновременно неизмеримых величин операторное соотношение, эквивалентное обобщенному соотношению неопределенности Гейзенберга. Данное утверждение фон Неймана интерпретируется обычно как доказательство невозможности описания квантовых объектов с помощью введения в теорию “скрытых” параметров, т.е. как принципиальная стохастичность квантовой механики.

Однако на самом деле таким образом доказана лишь *достаточность* стохастичности для вывода обобщенного соотношения неопределенности. *Необходимое* же условие значительно слабее – оно допускает и детерминированную связь между двумя измеряемыми величинами, лишь бы эта связь характеризовалась некоторой ненулевой дисперсией при одновременном измерении. Тем самым теоретический запрет на скрытые параметры, по моему мнению, оказывается в общем случае не доказанным.

Соотношение неопределенностей и “скрытые параметры”



ВЫВОД: Из статистической модели следует $[A, B] \neq 0$, но из $[A, B] \neq 0$ НЕ ОБЯЗАТЕЛЬНО следует статистическая модель!

Я позволю себе зайти еще дальше и утверждать, что в квантовой теории такой скрытый параметр *действительно* существует! Этим параметром является не что иное, как фаза волновой функции. Таким образом я довожу до логического конца мысль о соответствии между классическими и квантовыми осцилляторами. Просто в квантовом случае мы имеем дело с очень высокими частотами (энергия покоя электрона, равная 0.511 МэВ, уже отвечает частоте волны более 10^{17} Гц). Следовательно, вероятностное толкование волновой функции в известном смысле утрачивает свой смысл, хотя и с определенными оговорками, которые связаны с нелокальной природой квантовых объектов.

3. Постоянная Планка и ее непостоянство

В 1923 г. Луи де Бройль сопоставил произвольной *покоящейся* частице с массой покоя m некоторый колебательный процесс. Согласно теории относительности, в *движущейся* системе

отсчета наблюдатель зарегистрирует *бегущую* волну. Таким образом, возникновение “квантовой” волны *в пространстве* сам де Бройль связал с наличием гармонических колебаний *во времени*. Развивая эту идею, воспользуемся представлениями о природе времени, изложенными в моей книге [Шульман, 2006]. Согласно этим представлениям, ось времени – это нормаль к 3-мерному пространству в 4-мерном континууме с евклидовой метрикой. Переход частицы от покоя к движению отвечает отклонению мировой линии от нормали на соответствующий угол. Вследствие этого колебания вдоль оси времени частично трансформируются в колебания вдоль пространственной оси, так что их пространственный период отвечает длине волны, а число узлов соответствует числу волн, укладывающихся в области существования колебаний.

Теперь еще раз напомним, что действие для классического осциллятора зависит только от его локальных характеристик, а для квантового осциллятора определяется универсальной мировой постоянной. При переходе к квантовой механике индивидуальная константа действия заменяется на постоянную Планка. Это означает, что одинаковым окажется и *произведение амплитуд* координат и импульсов для всех осцилляторов. Квантовый осциллятор сам по себе является сугубо нелокальным объектом, и *каждый такой осциллятор ограничен условием квантования, в которое входит характерный размер Вселенной в целом*. Независимо от того, идет ли речь о частице в потенциальной яме конечной ширины или о свободной частице, использование условий квантования означает отказ от представлений о локальной частице.

Рассмотрим вначале нерелятивистское описание частицы в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме *конечной* ширины. Эта классическая задача квантовой механики имеет хорошо известные гармонические решения, зависящие от ширины ямы и массы частицы. Наименьшая длина волны равна удвоенной ширине потенциальной ямы. Что касается импульса, то его квантованные уровни обратно пропорциональны соответствующим длинам волн. Таким образом, приняв величину импульса частицы в потенциальной яме заданной, мы однозначно фиксируем и длину волны де Бройля, отвечающей частице. Мы также приходим к неизбежному выводу, что для такой потенциальной ямы конечной ширины величина произведения ее импульса на длину волны де Бройля *всегда* равна константе h . Единственное разумное объяснение *неизменности* этого произведения состоит в том, что (по крайней мере, в данной задаче) *импульс* с точностью до масштабного множителя *совпадает с числом (полу)периодов волновой функции*. Что касается величины этого масштабного множителя, то он зависит от выбора единиц измерения массы и скорости и по порядку величины равен hR , где R – радиус Вселенной. При этом минимально возможная масса покоя (отвечающая волне де Бройля, равной радиусу Вселенной) составляет примерно 10^{-66} г (для сравнения: масса покоя электрона равна около 10^{-27} г).

Как известно, исторически уравнение Шредингера было выведено его автором путем обобщения выражения для волны де Бройля свободной частицы. Небесполезно проделать обратный путь – от потенциальной ямы вернуться к свободной частице, сделав при этом одно существенное предположение. Это предположение состоит в том, чтобы считать *размер Вселенной конечным*, хотя и очень большим.

Начнем мысленно увеличивать ширину потенциальной ямы до тех пор, пока один ее край не совместится (в конечной и замкнутой Вселенной) с другим краем. Бесконечно высокие энергетические стенки ямы как физические ограничители местоположения частицы нам больше не требуются, поскольку математическое условие квантования останется тем же – число полуволен должно быть целым. Вместе с тем длина волны теперь выражается не через более или менее произвольный размер ямы, а через периметр Вселенной.

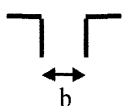
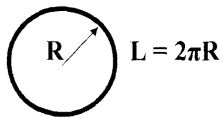
Поскольку мы ничего не меняли в формальной постановке задаче, по-прежнему произведение длины волны на импульс (теперь уже свободной!) частицы должно быть равно постоянной Планка. Что очень важно и нетривиально, хотя и предсказуемо, так это возникающая для *конечной* Вселенной *дискретность* значений спектра импульсов и соответствующих длин волн. И мы, как и выше, можем объяснить ее выполнением простого аналога правила Бора! Фундаментальная связь между импульсом и длиной волны остается той

же самой и для фотона - частицы с массой покоя, равной нулю, т.е. такой же, что и для квантовой частицы с ненулевой массой покоя.

В связи с вышесказанным может быть предложена новая интерпретация соотношения неопределенности (“физический” аспект), которая справедлива даже применительно к чисто гармонической волне. Так, при одновременном измерении координаты и импульса мы, по существу, “ловим” частицу в специально созданную измерительным устройством “сеть” потенциальных ям. Коль скоро частица *реально зафиксирована* в такой яме, то ясно, что длина соответствующей ей волны *не больше* удвоенного размера потенциальной ямы. Поскольку произведение длины полуволны на импульс (число полуволн по периметру Вселенной) фиксировано, то значение импульса должно быть *не меньше*, чем отношение константы \hbar к размеру ямы. Точно так же, если зафиксировано произведение полупериода волны на ее энергию, то значение энергии должно быть *не меньше*, чем отношение константы \hbar к временному интервалу измерения, что позволяет объяснить туннельный эффект.

Если все высказанные рассуждения справедливы, если постоянство произведения числа полуволн на длину этой полуволны действительно связано с тем фактом, что длина полуволны *по определению* равна длине базы, деленной на число полуволн, то постоянная Планка должна быть пропорциональна периметру Вселенной! Иными словами, периметр Вселенной должен выражаться через *наименьший возможный импульс* свободной частицы во Вселенной, так что эта новая величина принимает статус фундаментальной константы взамен постоянной Планка \hbar . Сама же постоянная Планка теперь оказывается зависимой от радиуса Вселенной, т.е. от ее возраста.

Физический смысл постоянной Планка

	<p>Потенциальная яма ширины b</p> $\lambda_n = 2b / n \quad p_n = \hbar / \lambda_n$
	<p>Замкнутая Вселенная с периметром L</p> $\lambda_n = 2L / n \quad p_n = \hbar / \lambda_n$ $p_n = p_{min} (L / \lambda_n)$
<p>С ростом t растут R и L, масса, энергия и импульс. Длина волны λ и частота колебаний ν не меняются.</p>	

Ранее в своих работах я высказывал убеждение, что энергия в расширяющейся Вселенной не должна сохраняться, т.к. *физические свойства Вселенной оказываются зависящими от ее возраста*. Так, представляется очевидным, что от возраста и радиуса Вселенной зависят компоненты фундаментального метрического тензора. Теперь же выясняется, что принципы квантовой механики позволяют выявить зависимость от возраста (и размера) Вселенной конкретных физических параметров, входящих в основные физические законы.

В частности, как было показано еще А. Эйнштейном, энергия фотона равна произведению его частоты на постоянную Планка. Таким образом, если считать длину волны фотона неизменной во времени, то с расширением Вселенной энергия фотонов линейно растет. Этот факт прекрасно согласуется с ранее полученным мною выводом о линейном же росте со временем массы вещества во Вселенной. Иными словами, и вещество с ненулевой массой покоя, и электромагнитное излучение испытывают одинаковое приращение энергии, так что соотношение между ними остается неизменным. При этом в конечном счете производная $\partial\psi/\partial t$ в уравнении Шредингера оказывается не зависящей от возраста Вселенной. Обобщая этот результат, можно заметить, что частоты и волновые векторы фундаментальных квантовых

объектов не зависят от возраста Вселенной, тогда как энергия и импульс, отвечающие этим объектам, в силу неоднородности времени возрастают в ходе его течения.

Если наша гипотеза о росте \hbar с увеличением возраста Вселенной справедлива, то и произведение погрешностей одновременного определения сомножителей в левой части соотношения неопределенности должна увеличиваться пропорционально возрасту Вселенной. Это следует понимать в том смысле, что *абсолютная* величина погрешности величин Δp (или ΔE в соотношении $\Delta E \Delta t \geq \hbar$) увеличивается пропорционально соответствующему увеличению p (и E), тогда как *относительная* погрешность определения $\Delta p/p$ и $\Delta E/E$ не изменяется.

4. Переход от квантовой картины мира к классической, декогеренция и необратимость

Джон фон Нейман в упомянутой монографии [фон Нейман, 1932] рассмотрел эволюцию квантовой системы и указал два ее возможных типа (1 и 2). Если процесс 2 (U-процедура по классификации Р. Пенроуза) соответствует унитарной эволюции и обратимому уравнению Шредингера, то процесс 1 (R-процедура по Пенроузу) отвечает необратимому процессу измерения, при котором реализуется только одна из квантовых альтернатив, т.е. происходит неунитарная редукция (коллапс) волновой функции. С такой R-процедурой связан целый комплекс проблем, которые не только выходят на все более заметный план, но и активно исследуются в последние десятилетия экспериментально.

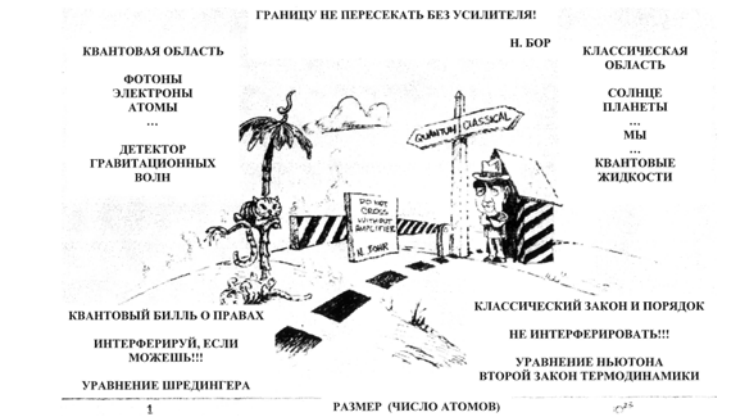
Одной из таких ключевых проблем при этом является следующая: почему наш мир “классичен” (т.е. почему в обычной жизни мы никогда не встречаем системы в состоянии квантовой суперпозиции, а только лишь в одном из альтернативных состояний)? Р Пенроуз пишет: “Часто высказывают мнение, что в некотором подходящем пределе квантовые описания атомов (или элементарных частиц, или молекул) с необходимостью переходят в классические ньютоновские описания, когда система увеличивается в размерах и усложняется. Но в такой формулировке *такое утверждение просто неверно*” (что далее в оригинальном тексте и аргументируется).

Заметим, что данный вопрос имеет и весьма практическое значение, поскольку в квантовых компьютерах используются именно состояния с суперпозицией, которые не только должны храниться в течение произвольного времени, но и подвергаться операциям, не приводящим к утрате их специфически квантового статуса.

Претензии на решение этой проблемы активно декларируются современным научным направлением, которое принято называть теорией *декогеренции*. Вот что пишет один из создателей этой теории [Зурек, 2002] (перевод мой – М.Х.Ш.):

Проблема измерения имеет долгую и очень занимательную историю. Первое широко распространенное объяснение того, как единственный вариант возникает из множества потенциально возможных, было предложено копенгагенской интерпретацией, данной Нильсом Бором, который утверждал, что для выявления результата измерения необходим классический прибор. Таким образом, квантовая теория объявлялась неуниверсальной. Ключевым моментом копенгагенской интерпретации является разделительная линия между квантовой и классической теориями. Бор подчеркивал, что этот водораздел должен быть подвижным, так что даже “оконечный прибор” – человеческая нервная система – в принципе может быть измерена и проанализирована в качестве квантового объекта, имея в виду, что подходящее классическое устройство может быть выбрано в зависимости от задачи.

ГРАНИЦА МЕЖДУ КЛАССИКОЙ И КВАНТАМИ (ZUREK)



В отсутствие жесткого критерия для выявления различия между квантовыми и классическими объектами часто использовалось отождествление классического объекта с макроскопическим. Неадекватность этого подхода стала понятной только в результате относительно недавних исследований: криогенный ... гравитационно-волновой детектор должен рассматриваться как квантовый гармонический осциллятор даже в предположении, что он может весить тонну. Неклассические конденсированные состояния могут описывать колебания подходящим образом приготовленных электромагнитных полей с макроскопическим числом фотонов. Наконец, квантовые состояния, связанные с токами в сверхпроводящих переходах Джозефсона, порождают макроскопическое число электронов, но все еще могут туннелировать через минимум эффективного потенциала, отвечающего противоположному направлению вращения.

Но если макроскопические системы не могут всегда использоваться в качестве надежно установленного классического объекта, то, может быть, границы между классическими и квантовыми объектами вообще не существуют? ...

Несмотря на глубокие корни указанных трудностей, в последние годы выявился растущий консенсус относительно того, что прогресс может быть достигнут при увязке этих вопросов с общей проблемой измерения (обычный эвфемизм для коллекции интерпретационных головоломок, описанных выше). Выявился ключевой (и бесспорный) факт, восходящий едва ли не к началам квантовой теории, однако его значение для перехода от квантовой к классической области было осознано лишь теперь: макроскопические системы никогда не изолированы от своего окружения. Поэтому ... не следует ожидать, что они подчиняются уравнению Шредингера, которое справедливо лишь для замкнутой системы. Как следствие, системы, обычно рассматриваемые как классические, естественным образом теряют квантовую когерентность, которая как бы “вытекает” в их окружение. Результирующая “декогеренция” не может игнорироваться, когда речь идет о проблеме редукции квантовомеханического волнового пакета: декогеренция действительно накладывает соответствующее “эмбарго” на потенциально возможные исходы, позволяя наблюдателю регистрировать потенциально возможные альтернативы, но следуя лишь одной из ветвей – одной из “декогерентных историй” в терминологии М. Гелл-Мана.

Теория декогеренции предлагает следующий подход к решению проблемы. Рассматривается модель открытой системы, отвечающей известному уравнению Ланжевена, т.е. уравнению движения частицы, расходующей энергию на трение, а также подвергающейся случайным (хаотическим) воздействиям со стороны частиц внешней среды. В классической версии теории это последнее приводит к диффузии и броуновскому движению рассматриваемой частицы.

УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ДЕКОГЕРЕНЦИИ (ZUREK)

$$\dot{\rho} = \underbrace{-\frac{i}{\hbar}[H, \rho]}_{\substack{\text{Von Neumann Equation} \\ p = -\text{FORCE} = \nabla V}} - \underbrace{\gamma(x-x')\left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x'}\right)\rho}_{\substack{\text{Relaxation} \\ p = -\gamma p}} - \underbrace{\frac{2m\gamma k_B T}{\hbar^2}(x-x')^2 \rho}_{\substack{\text{Decoherence} \\ \text{Classical Phase Space}}}$$

Квантовая когерентность исчезает за время

$$\tau_D \equiv \gamma^{-1} \left(\frac{\lambda_{dB}}{\Delta x} \right)^2 = \tau_R \left(\frac{\hbar}{\Delta x \sqrt{2mk_B T}} \right)^2, \quad \lambda_{dB} = \hbar / (2mk_B T)^{-1/2}$$

тепловая волна де Бройля

Для макроскопических объектов даже если время релаксации будет равно возрасту Вселенной, $\tau_R \sim 10^{17}$ секунд, то квантовая когерентность разрушится за время $\tau_D \sim 10^{-23}$ секунд.

Квантовая версия модели вместо массы частицы оперирует с матрицей плотности волнового пакета. Матрица плотности строится с помощью волновой функции; для чистых, т.е. не смешанных, состояний эти два описания эквивалентны. Матрица плотности имеет то преимущество, что в ней явно присутствуют *недиагональные* члены, ответственные за интерференцию различных базисных состояний, т.е. за состояние суперпозиции как таковое. Поэтому переход от состояния суперпозиции к (классической) смеси состояний теория декогеренции предлагает трактовать как переход к новой матрице, в которой остаются только диагональные члены.

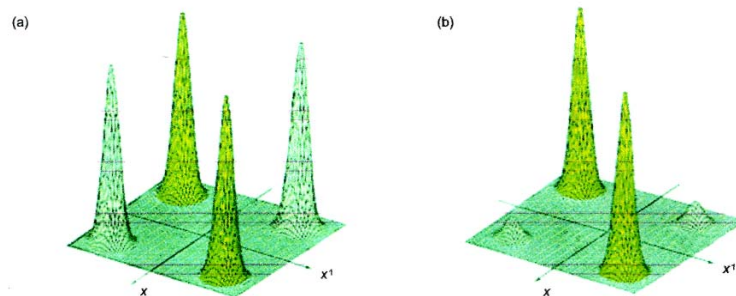
СУПЕРПОЗИЦИЯ ДВУХ СОСТОЯНИЙ

$$|\Psi\rangle = C_1 |a_1\rangle + C_2 |a_2\rangle \longleftrightarrow \begin{cases} |a_1\rangle, p_1 = |C_1|^2 \\ |a_2\rangle, p_2 = |C_2|^2 \end{cases}$$

ПРОЦЕСС ДЕКОГЕРЕНЦИИ

$$\begin{bmatrix} |C_1|^2 & C_1 C_2^* \\ C_1^* C_2 & |C_2|^2 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} |C_1|^2 & 0 \\ 0 & |C_2|^2 \end{bmatrix}$$

Оказывается, решение квантового уравнения для матрицы плотности частицы в состоянии суперпозиции, взаимодействующей с хаотической средой, действительно таково, что недиагональные члены матрицы с течением времени обычно очень быстро стремятся к нулю.



Некогерентная часть обусловлена только диагональными пиками

Таким образом необратимость, по существу, закладывается непосредственно в основу данного подхода, а в ходе его реализации действительно удастся получить *количественное* описание процесса декогерентизации, имеющего много общего с процессом диссипации. Очень подробное и интересное описание этого и смежных подходов можно найти на русском языке в содержательных обзорах [Менский, 1998, 2003].

В уже цитировавшейся мною работе [Зурек, 2002] ее автор пишет далее:

С 1991 г. была проделана большая работа по исследованию основного уравнения и его модификаций для различных случаев... Возможно, наиболее важное развитие изучение декогеренции получило в экспериментальной области. За прошедшее десятилетие был осуществлен ряд экспериментов по изучению декогеренции в разных системах. В частности, Michel Brune, Serge Haroche, Jean-Michel Raimond и их коллеги из Ecole Normale Supérieure в Париже ... осуществили серию экспериментов в микрополостях, в которых они манипулировали электромагнитными полями над суперпозициями с двумя базисными состояниями, используя атомы рубидия. Они исследовали процесс разрушения квантовой когерентности. Эти эксперименты подтвердили основные положения теории декогеренции. С тех пор французские ученые использовали ту же самую технику для внедрения различных квантово-информационных технологий. Они совершенствуют свое оборудование, создавая все более “крупных” кошек Шредингера и изучая процесс их декогеренции.

Итак, классичность измерительного прибора теория декогеренции связывает с его ролью посредника между квантовой системой и внешней средой. Т.е. изолированная квантовая система не способна перейти в состояние смеси (или, по крайней мере, вероятность этого не слишком велика), но это становится крайне вероятным под воздействием окружения (так же многие родители пытаются объяснить плохое поведение своих чад).

Какая же картина возникает в результате? В любой точке Вселенной более или менее регулярно происходит рождение одной или группы частиц в состоянии квантовой суперпозиции, характеризующихся наличием сильной корреляции между базисными состояниями системы. Возникновение корреляции сильно понижает вероятность и энтропию в этой области пространства-времени, т.е. нарушает имевшееся до этого равновесие. Это обычно рано или поздно приводит к появлению встречного процесса – разрушению корреляций под влиянием взаимодействия с окружающей средой.

Интересно сопоставить эту картину с феноменом классической необратимости. Я являюсь сторонником идеи Козырева и автором одного из возможных обоснований этой идеи [Шульман, 2006], согласно которой в каждой точке Вселенной с течением времени энергия не сохраняется, а возрастает. При этом прирост энергии происходит пропорционально массе, имеющейся в этой точке, т.е. в общем случае неравномерно, что приводит к локальным понижениям энтропии и появлению областей с повышенными корреляциями. Вследствие этого и возникают потоки энергии, исходящие от массивных объектов (например, звезд), противодействующие понижению энтропии и разрушающие возникшие корреляции.

И в том, и в другом случае мы, таким образом, можем связывать восстановление равновесия – классического или квантового – именно с процессом разрушения корреляций. Но это лишь одна сторона медали, в качестве которой мы рассматриваем феномен необратимости. Другой (и на самом деле – первичной) стороной необратимости является исходный процесс нарушения равновесия и генерации корреляций, играющий фундаментальную роль в эволюции Вселенной.

5. Критика модели измерения фон Неймана

В современной квантовой механике изучаются такие удивительнейшие явления, как, например, квантовый эффект Зенона. Оказывается, измерения в квантовой механике играют роль, которую, в отличие от классической физике, в принципе нельзя игнорировать. Эффект Зенона состоит в том, что достаточно эффективный мониторинг состояния (но без *прямого* воздействия) может предотвратить радиоактивный распад частицы! Точно так же один лишь факт установки детектора радикально влияет на судьбу знаменитой кошки Шредингера

При этом кардинальный вопрос, который остается вызовом для научного общественного мнения, заключается в том, связана ли роль измерений *с сознанием* наблюдателя, или нет. М.Б. Менский в научных публикациях и в докладе на Семинаре изложил свою позицию по этому вопросу. Надо сказать, что он фактически продолжает идейную линию таких выдающихся физиков, как фон Нейман, Вигнер и Эверетт.

В связи с этим возникает необходимость более тщательного исследования того, что же именно представляет собой процедура измерения вообще и процедура измерения в опытах типа эксперимента с двумя или несколькими щелями в частности. В своей работе Дж. фон Нейман (см. [фон Нейман, 1932]) сформулировал широко известную с тех пор модель измерения, состоящую из *трех* частей: объекта измерения, измерительной системы (прибора) и субъекта, осуществляющего измерение. В этой работе он высказал следующие весьма сильные утверждения:

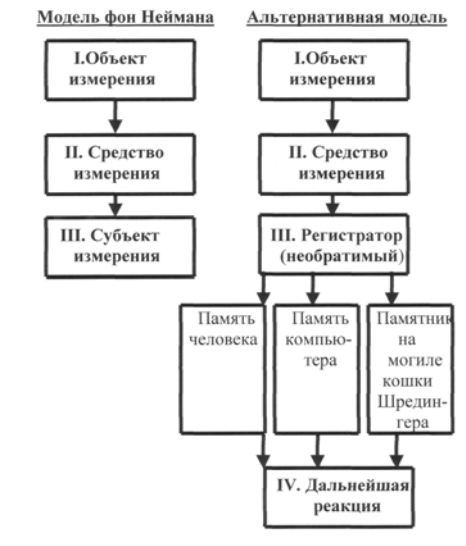
Само по себе безусловно верно, что измерение или связанный с ним процесс субъективного восприятия является по отношению к внешнему физическому миру новой, не сводящейся к нему сущностью. Действительно, такой процесс выводит нас из внешнего физического мира или, правильнее, вводит в неконтролируемую, так как в каждом контрольном опыте уже предполагаемую, мысленную внутреннюю жизнь индивидуума Однако имеется, несмотря на это, фундаментальное для всего естественнонаучного мировоззрения требование, так называемый принцип психофизического параллелизма, согласно которому должно быть возможно так описать в действительности нефизический процесс субъективного восприятия, как если бы он имел место в физическом мире, — это значит сопоставить его последовательным этапам физические процессы в объективном внешнем мире, в обычном пространстве (естественно, что при этом процессе сопоставления возникает еще необходимость локализовать эти физические процессы в таких точках, которые лежат в занимаемой нашим телом части пространства).

... Однако в любом случае, сколь далеко ни продолжали бы мы вычисления — до ртутного сосуда термометра, до его шкалы, до сетчатки или до клеток мозга, — в некоторый момент мы должны будем сказать: а это воспринимается наблюдателем. Это значит, что мы всегда должны делить мир на две части — наблюдаемую систему и наблюдателя. В первой из них мы можем, по крайней мере принципиально, сколь угодно подробно исследовать все физические процессы; в последней это бессмысленно. Положение границы между ними в высокой степени произвольно. ... То, что такую границу можно переместить сколь угодно далеко внутрь организма действительного наблюдателя, и составляет содержание принципа психофизического параллелизма. Однако это обстоятельство ничего не меняет в том, что при каждом способе описания эта граница должна быть где-нибудь проведена, если только все не проходит впустую, т. е. если сравнение с опытом должно быть возможным. Ибо опыт может приводить только к утверждениям этого типа — наблюдатель испытал определенное (субъективное) восприятие, но никогда не к утверждениям таким, как: некоторая физическая величина имеет определенное значение.

Цель фон Неймана состояла в изучении того, что и как меняется в зависимости от того или иного разбиения всей модели на *три* составные части, причем в качестве последней части выступает некоторый *субъект*, который наделяется весьма неопределенными нефизическими характеристиками.

Мне представляется, что указанный принцип психофизического параллелизма является в данной ситуации излишним. Ни в коей мере не отрицая удивительных свойств человеческого сознания, я вовсе не считаю “безусловно верным, что измерение или связанный с ним процесс субъективного восприятия является по отношению к внешнему физическому миру новой,

не сводящейся к нему сущностью”. Напротив, я утверждаю, что в действительности в модели измерения за средством измерения (измерительным прибором) должен следовать всего лишь регистратор (т.е. необратимое устройство памяти) любой физической природы (в том числе, возможно, и органической природы). Субъективное восприятие *может* соседствовать с актом регистрации результата измерения, но это никак не влияет на процедуру измерения и даже не является обязательным условием для дальнейшей реакции, т.е. дальнейшей цепочки событий – например, компьютер или простой автомат вполне может отреагировать на опасное значение параметра и остановить работу промышленной установки.



В действительности роль квантовых измерений состоит *просто* в задании конечных условий. Таким образом, речь в каждом конкретном случае должна идти о факторе, задающем для волновой функции объекта конкретное конечное условие. *Вмешательство наблюдателя при соизмеримости параметров наблюдаемого процесса и наблюдательного устройства меняет 4-мерную конфигурацию события или процесса*, разрушает условия, которые имеют место в отсутствие наблюдения. Измерение (наблюдение) играет роль в точности в той мере, в которой оно само по себе задает финальное условие. Если именно оно способно фиксировать параметры волновой функции, то это и происходит; если же, например, параметры измерительного устройства несоизмеримы параметрам микропроцесса, либо оно (устройство) лишь усредняет зафиксированные иными обстоятельствами результаты многих микропроцессов, то можно пренебречь влиянием такого измерительного устройства/наблюдения. Сам процесс измерения представляет собой набор финальных условий, фиксирующих результат измерения.

За последние годы в результате многочисленных обсуждений эта точка зрения активно завоевывает сторонников среди физиков. Весьма определенно это подытожено, например, в публикации [Ведринский, 1997] в связи с описанием известного опыта по прохождению микрочастицы через две щели:

Выяснение того, через которую из щелей прошла частица, приводит к ее пространственной локализации, а появившаяся вследствие этого неопределенность поперечного импульса частицы вызывает наблюдаемое замывание интерференционной картины. ... Рассмотрим тот же мысленный эксперимент с двумя щелями, но дополнительно поместим в каждую из них микрочастицу, состояние которой может изменяться при взаимодействии с частицей, падающей на щели. В таком случае мы будем иметь дело со сложной микросистемой, состоящей из трех частиц: падающей и двух частиц в щелях. Процессы, происходящие в такой системе, можно описать полностью квантовомеханически без использования каких-либо ссылок на процедуру макроскопического измерения, основываясь на решении должным образом

записанного уравнения Шредингера. ... Не особенно сложный расчет показывает, что в случае, если падающая частица рассеялась на частицах в щелях упруго, то есть состояния последних при рассеянии не изменились, то состояния падающей частицы, прошедшей через первую и вторую щели соответственно, оказываются когерентными и интерференция наблюдается. В случае же неупругого рассеяния, то есть рассеяния, в результате которого состояние одной из частиц в щелях изменилось, эти состояния становятся некогерентными, и интерференция полностью исчезает.

... микроскопической первопричиной нарушения когерентности различных квантовых состояний микрочастицы является не сам акт макроскопического наблюдения над ней (измерения), а предшествующие ему микропроцессы, в ходе которых рассматриваемая частица взаимодействует *неупругим* образом с окружающими частицами, изменяя состояния последних... Сказанное снимает налет таинственности, который неизбежно возникает при обсуждении вопроса о влиянии наблюдения на квантовые процессы. На самом деле на эти процессы оказывает влияние не сам акт наблюдения, а реальные микроскопические *неупругие* взаимодействия между исследуемой частицей и частицами окружающей среды, нарушающие когерентность состояний частицы, испытавшей такие взаимодействия.

А вот мнение В. Зурека ([Зурек, 2002], перевод мой – М.Х.Ш.):

Действительно, можно, следуя Вигнеру, оставить за сознанием последнее слово в проблеме коллапса вектора состояния. Я предполагаю противоположное. То-есть я буду рассматривать идею о том, что все высшие ментальные процессы соответствуют хорошо определенным, но в настоящее время плохо понятым функциям информационной деятельности, которые поддерживаются физическим устройством – нашим мозгом.

Описываемая подобным образом, осведомленность становится доступной для физического анализа. В частности, процесс декогеренции, описанный выше, ограничивает воздействия на состояния мозга: релевантные наблюдаемые индивидуальных нейронов, включая химические концентрации и электрические потенциалы, являются макроскопическими. Они подчиняются классическим диссипативным уравнениям движения. Таким образом, некоторая квантовая суперпозиция состояний нейронов окажется слишком быстро разрушенной для нас, чтобы стать продолжительным квантовым феноменом сознания. Декогеренция, или даже индуцированный окружением суперотбор, действует на наше собственное "состояние мозга".

Можно еще спросить, почему выделенный базис состояния нейронов коррелирует с классическими наблюдаемыми в привычном мире. После всего сказанного насколько легче было бы доверять квантовой физике, если бы мы могли обучить наши чувства восприятию неклассических суперпозиций. Подходящее объяснение состоит в том, что отбор доступных гамильтонианов взаимодействия ограничивает выбор измеряемых переменных. Имеется, однако, и другая причина для такого акцента на классической области, которая должна играть решающую роль: наше восприятие не приспособлено для проверки квантовой механики. Скорее, оно развилось в ходе процесса, в котором выживание наиболее приспособленного играло центральную роль. Нет причин эволюционного характера для формирования восприятия, если ничего нельзя извлечь из предсказания.

6. Редукция волновой функции

Центральным методологическим вопросом в квантовой механике до сих пор остается следующий: что же все-таки происходит с квантовым объектом при выполнении над ним измерения? Существует ли и что собой представляет коллапс волновой функции?

При обсуждении этого вопроса М.Б. Менский совершенно справедливо заявил, что если признать справедливость стандартной квантовой механики для всего круга явлений, то, в силу ее постулируемой *линейности*, редукция состояния суперпозиции в одно из базисных состояний невозможна в принципе! Выход из этого парадокса Эверетт и Вигнер искали в привлечении некоего *аномального внешнего* фактора, которым они объявили сознание. Лично я никак не могу признать этот выход удачным. Вот несколько возражений:

- Многомирие по Эверетту – скорее прием фокусника, а не научная концепция. С какого момента началось расщепление на альтернативные миры, каким образом (дискретным или непрерывным) происходит ветвление?
- Определяется ли ветвление индивидуальным или коллективным сознанием? Если индивидуальным, то это прямая дорога к солипсизму. Если коллективным, то как быть с сознанием еще не рожденных и уже умерших людей, вземных мыслящих существ и пр.
- Если сознание материально, то и оно должно подчиняться законам квантовой механики. Если оно не материально, то как выглядит интерфейс между ним и материальным миром?

Короче говоря, я думаю, что вся эта концепция есть прекрасный образец большого и пыльного ковра, под который очень удобно замечать мусор (выражение Фейнмана по другому поводу). Следовательно, единственный разумный выход, который нам остается – объявить неуниверсальной область действия принципа линейности и уравнения Шредингера (что, собственно, и предлагает теория декогеренции), и использовать обобщения, предусматривающие существование в той или иной форме коллапса волновой функции.

С моей точки зрения, успех теории декогеренции не является решением проблемы во всей ее полноте. Привлечение идеи декогеренции в практическом плане позволяет ставить и решать конкретные задачи, однако не позволяет полностью прояснить различие и связь между квантовым и классическим миром. Хотя эта идея позволяет получить вероятностное описание плавного расплывания волнового пакета, однако она не дает физического истолкования факта исчезновения состояния суперпозиции.

В моей книге [Шульман, 2004] я предположил, что материя во Вселенной организована на двух уровнях. Квантовые частицы взаимодействуют между собой напрямую, подобно соударяющимся молекулам газа. Однако в отличие от частиц классического газа, такие взаимодействия происходят по квантовым законам, с нелокальными квантовыми ЭПР-корреляциями. Обычная причинность в таких взаимодействиях не работает, участвующие в них объекты находятся, как правило, в состоянии суперпозиции и являются “запутанными” между собой. Однако после того, как взаимодействие состоялось, все финальные условия реализовались, возникает “кирпичик” более высокого – классического – уровня. Из этих кирпичиков и строится классический мир по обычным законам причинности, где будущее определяется прошлым.

В качестве аналогии можно рассмотреть футбольный чемпионат. Каждый матч очередного тура – это некоторое распределенное во времени взаимодействие между командами, здесь между ними нельзя выстроить какой-либо порядок во времени. Но последовательность самих туров уже приобретает такой четкий логический временной порядок и является аналогом классической последовательности событий с причинной связью предшествующих и последующих результатов, например: “Спартак” в полуфинале выиграл у “Локомотива” и поэтому в финале именно он встречается с “Динамо”. Иными словами, модель и описание ситуации на уровне матча и на уровне туров чемпионата принципиально различны!

Каким же образом возникает граница между квантовым и классическим уровнями? Когда для системы объектов действует обратимая U-процедура и уравнение Шредингера, а когда происходит R-процедура редукции? Я предлагаю следующий ответ, согласованный с подходом теории декогеренции и идеями некоторых других подходов: U-процедура описывает эволюцию состояния физической системы до тех пор, *пока она не взаимодействует с другими системами, т.е. ее энергия и импульс неизменны*. Как только энергия и/или импульс объекта *изменяется при каком бы то ни было взаимодействии* (например, в ходе *измерительной* процедуры), его состояние *объективно* становится иным, это и есть необратимая R-процедура. Отдавая или получая энергию и импульс, система обменивается информацией с окружающей средой, и наоборот – не может быть обмена информацией без обмена энергией и импульсом.

Классическая физика позволяла себе пренебрегать изменением энергии объекта при измерении его состояния. Однако *оказалось, что изменение энергии не может быть сколь угодно малым, и что это изменение энергии вполне может оказаться сопоставимой с энергией самого объекта*. Привожу мнение В.Зурека ([Зурек, 2002], перевод мой – М.Х.Ш.):

Естественные науки были построены на молчаливом допущении: информация об окружающем мире может быть получена без изменения его состояния. Идеалом "строгой науки" был объективизм и беспристрастное описание реальности. Информация рассматривалась как нечто нефизическое, нематериальное, как бесплотная фиксация реальности, материального мира, как несущественное отображение, существующее за пределами и заведомо отличное от сферы, где правят законы физики. Эта точка зрения более не считается справедливой (Landauer 1991). Квантовая теория положила конец этой мечте Лапласа о механическом мире. Наблюдатели квантовых явлений больше не могут считаться только пассивными зрителями. Квантовые законы запрещают прирост информации без изменения состояния измеряемого объекта. Разделительная линия между тем, что есть, и тем, что известно, навечно стала размытой. Упразднив эту границу, квантовая теория одновременно лишила "сознание наблюдателя" монополии на получение и хранение информации: любая корреляция есть регистрация, любое квантовое состояние есть запись некоторого другого квантового состояния.

Дискретность изменения энергии неминуемо ставит вопрос о той физической ситуации, в которой энергия объекта *принципиально не изменяется вообще*. И выясняется, что такая ситуация характеризуется *полной обратимостью* (что в достаточной мере естественно), а также (и это уже совершенно новый феномен!) *нелокальностью* в пространстве и во времени.

Последнее как раз и означает, что обычное причинно-следственное описание здесь не работает, что разбить картинку на составляющие пространственно-временные "кирпичики" не удастся. Наоборот, эффективное (моделируемое марковской цепочкой *необратимых* R-переходов, R-событий) причинно-следственное описание для объектов, участвующих во взаимодействиях, возможно лишь с точностью до разбиения процесса на U-фрагменты (состояния) между взаимодействиями.

Нелокальность в пространстве и времени, т.е. ЭПР-корреляции – фундаментальный признак, отличающий квантовый уровень от классического. Если существует нелокальное взаимодействие внутри изолированной квантовой системы, то как быть при этом с теорией относительности и максимально возможной скоростью света? Некоторые авторы, анализируя аппарат квантовой механики, говорят о принципиальной возможности гораздо большей конечной или даже о бесконечно большой скорости. Я думаю, дело здесь в другом – нелокальность изолированного, не взаимодействующего ни с чем объекта обусловлена тем, что занимаемая им пространственно-временная область обладает существенно иной, нежели обычная, метрикой. Точно так же внутренние области черной дыры не взаимодействуют с внешним миром, иные и скорости, и механизмы обмена информацией между ними и внешней средой.

Существует большое число реальных и мысленных опытов, доказывающих нелокальное влияние их конфигурации на результаты. Например, в публикации [Шишлова, 1998] так описывается знаменитый мысленный эксперимент с кошкой Шредингера.

В закрытом ящике сидит кошка. Там же находятся флакон с ядом, источник излучения и счетчик заряженных частиц, подсоединенный к устройству, разбивающему флакон в момент регистрации частицы. Если яд разольется, кошка погибнет. ... Пока счетчик не произвел измерения, он находится в суперпозиции двух состояний: "регистрация — нерегистрация". Но тогда в этот момент и кошка оказывается в суперпозиции состояний жизни и смерти.

В действительности, конечно, реального парадокса здесь быть не может. Регистрация частицы — процесс необратимый. Он сопровождается коллапсом волновой функции, вслед за чем срабатывает механизм, разбивающий флакон.

Последние две процитированные фразы являются ключевыми. Если обратиться известным к опытам с расщеплением фотонов или электронов на две или более компоненты, то из их описания очевидно, что наличие или отсутствие детектора в одном из каналов делает эти варианты *различными* опытами. Так и детектор устройства, убивающего кошку Шредингера, в принципе *устраняет возможность суперпозиции состояний* и для испускаемой частицы, и для кошки.



Любопытно, что это *дискретное*, казалось бы, различие (есть детектор – нет детектора) может быть сделано и *непрерывным*. В публикации [Ведринский, 1997] примером такой версии опыта выступает тонкий кристалл, через который без поглощения проходит лишь часть фотонов. В учебнике [Фейнман и др., 1963] приведена другая возможность: пролетающие электроны детектируются источником достаточно редких фотонов. И в том, и в другом случае мы получим на экране наложение двух картин – с интерференцией и без нее – в точном соответствии с долей частиц, реально подвергающихся взаимодействию с детектором. Очевидно, эта доля в принципе может варьироваться от нуля до единицы.

Еще один любопытный пример нелокальности и связанной с ней редукции волновой функции представляет собой факт биений (и соответствующей интерференции), возникающих при атомных переходах с близкими *начальными* состояниями и общим *конечным* состоянием. Однако в казалось бы симметричном случае – близкие *конечные* состояния и общее *начальное* состояние – биения отсутствуют и интерференции не возникает, т.к. в этом случае мы *получаем информацию* о том, по какому именно каналу прошел фотон. Не менее интересно и то, что наличие детектора способно не только устранить интерференцию, но и привести к ее появлению (последние два примера найдены благодаря сайту <http://bourabai.georisk.kz/>).

7. 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

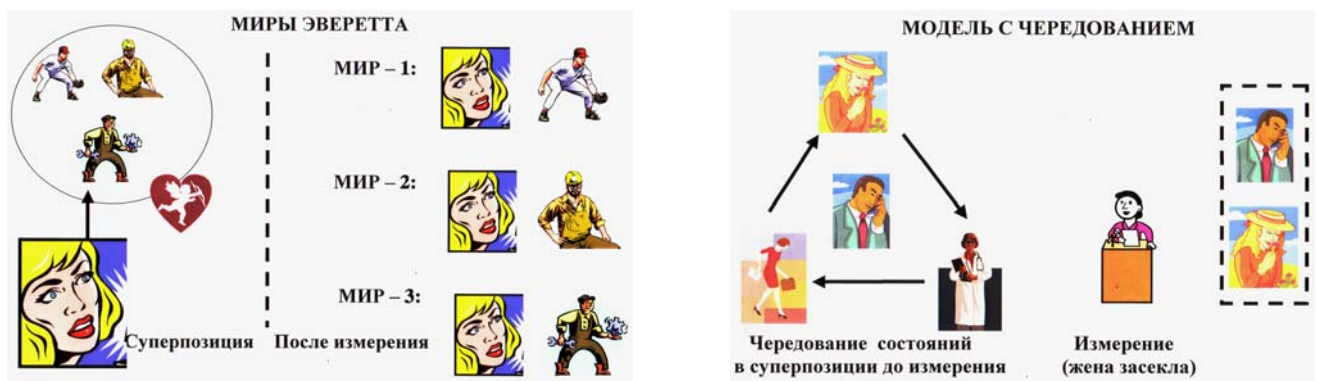
соображение: опыт подтверждает вероятностную модель, а такая модель физически должна основываться на реальном существовании *всей* (а не только выявленных здесь и сейчас) группы возможных исходов. Не обнаружив этих исходов в нашей Вселенной, начинают их поиски в виртуальных мирах. Возвращаясь к принципу 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 шутовой 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.

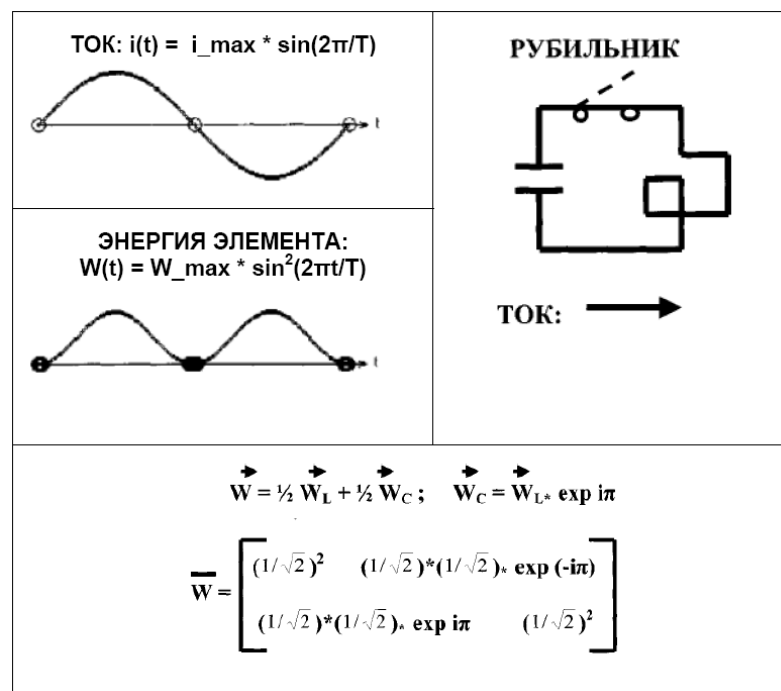
Когда мы говорим о вероятности различных исходов опыта, мы должны выяснить, существуют ли корреляции между различными исходами, и какова природа этих корреляций.

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.

СОСТОЯНИЕ СУПЕРПОЗИЦИИ ДЛЯ НЕКВАНТОВОГО ОБЪЕКТА



Измерения второго типа можно назвать разрушающими, т.к. они необратимым образом изменяют конфигурацию объекта, что характерно прежде всего для квантового 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 квантовых 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 квантовых 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 недостаточную 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.

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 Нейман, 1932] v. Neumann J. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1932. (Рус. пер.: фон Нейман 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