

Квантовая и мистическая картины мира (часть первая)

М. Заречный

(Получена 14 мая 2004; исправлена 15 мая 2004; опубликована 15 мая 2004)

Перед вами – реконструкция бесед с учащимися школы "Открытое Пространство Симорон" о последних достижениях квантовой физики и связи квантовой и мистической картин мира, которые состоялись по многочисленным "просьбам трудящихся". Наши встречи состоялись и потому, что именно сейчас, в последние 10 лет, квантовая физика, а в особенности теория запутанных состояний, теория декогеренции и квантовая теория информации, сделали решающие шаги, позволяющие соединить квантовую и мистическую картины мира, научное и религиозное мировоззрение.

То, что было легко объяснять при непосредственном живом контакте, оказалось практически невозможным изложить на бумаге, сохранив ясность и простоту изложения, и хотя бы умеренную "научную" строгость. Так что те кусочки, которые выделены курсивом, можно вообще не читать - они больше для строгости. Там нет ничего значимого. Совершенно так же, как его нет и в других местах.

В интересах читателя, мало знакомого с эзотерическими практиками, я обратился для иллюстрации некоторых положений к авторитетным и доступным буддистским текстам. Также, я дополнил текст ответами на вопросы, которые были заданы в ходе общения в интернете.

Михаил Заречный

Введение

Многие из вас наверняка встречались с утверждениями типа: "Материя не отлична от пустоты. Пустота не отлична от материи. Материя — это и есть пустота. Пустота — это и есть материя.... Поэтому в пустоте нет материи...". Это цитата из Сутры Сердца, её автор – Будда Гаутама. А вот слова Будды об иллюзорности окружающего нас мира: "Пребывающие повсюду феномены — все иллюзорны и пусты". Это относится и к времени, и к пространству. Наличие пространства и времени, атомов и элементарных частиц, да и самого нашего "я", согласно махаянскому буддизму, иллюзия.

Не менее шокирующими могут показаться и описание многих чисто "технологических" понятий, используемых в буддизме, например: "Не-мысль — это когда мысль есть, и её нет. Это умение не-мыслить, погружаясь в мышление".

Многим подобные высказывания кажутся бредом, но нет никаких сомнений, что Будда знал, о чём говорил. Мы попробуем разобраться в этих и других высказываниях, да и вообще в мистической картине мира, с позиций последних достижений квантовой физики.

Мы также затронем интересующие многих темы жизни, смерти, времени, реальности, сознания, паранормальных и таинственных явлений, соотношения Воли и Рока. А также затронем связь между физикой и эзотерическими практиками, и постараемся дать не только физическое обоснование некоторых из них, но и достаточно ясные рекомендации по их использованию. Только не думайте, что от меня вы услышите истину. Как всегда, я буду вешать лапшу на уши, а вы не забывайте её стряхивать! Может, наша беседа окажется полезной даже для тех, кому покажется, что он что-то понял.

1. Знаменитый эксперимент

В ближайших двух главах на примере конкретных экспериментов, мы познакомимся с базовыми понятиями квантовой физики, и сделаем их понятными и "рабочими". А потом перейдём к тому, что обычно относят к мистике, хотя мистика начнётся прямо сейчас. Начнём.

Согласно классической физике, исследуемый объект может находиться в каком-то одном из множества возможных состояний. Однако он не может находиться в нескольких состояниях одновременно, то есть нельзя придать никакого смысла сумме возможных состояний. Если я нахожусь сейчас в комнате, я, стало быть, не в коридоре. Состояние, когда я одновременно нахожусь и в комнате, и в коридоре, лишено смысла. Я ведь не могу в одно и то же время находиться и там, и там! И не могу одновременно выйти отсюда через дверь и выскочить через окно. Я либо выхожу через дверь, либо выскакиваю в окно. Как видно, такой подход полностью согласуется с житейским здравым смыслом.

Однако в квантовой физике такая ситуация является лишь одной из возможных. Состояния системы, когда возможен либо один вариант, либо другой, в квантовой механике называют **смешанными**, или **смесью**.

Это состояния, которые нельзя описать с помощью волновой функции из-за неизвестности компонент, обусловленных её взаимодействием с окружением. Иначе говоря, это тот случай, когда наша система является частью другой системы, и между ними существует взаимодействие. Подобные состояния описываются так называемой матрицей плотности. В этом случае можно говорить только о вероятности различных исходов экспериментальных измерений.

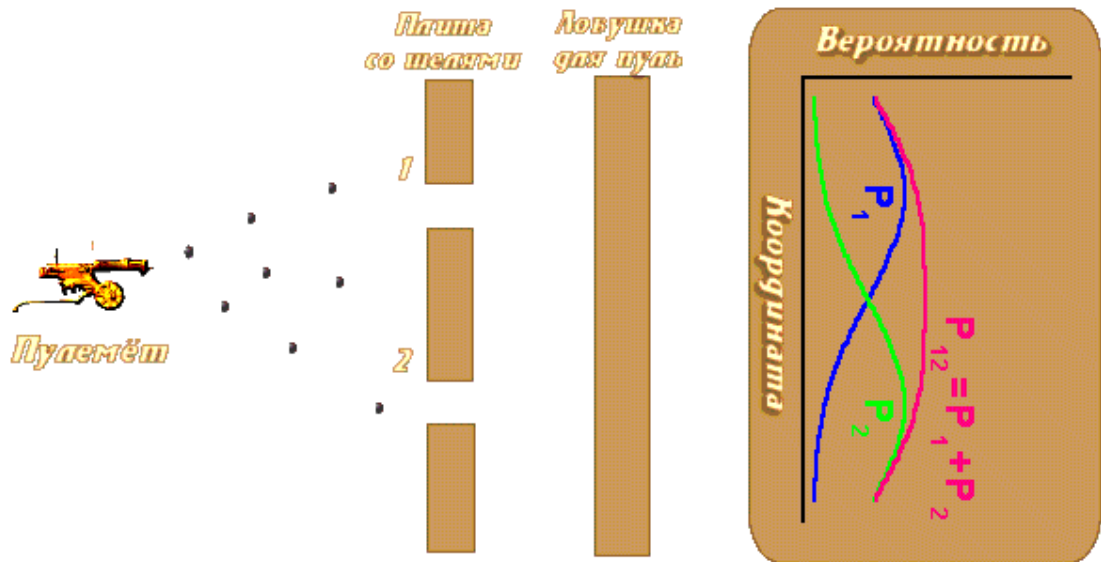
Сейчас хорошо известно, что в природе имеет место и совершенно другая ситуация, когда объект находится в нескольких состояниях одновременно, то есть имеет место наложение двух или большего числа состояний друг на друга. И не просто наложение, а наложение без какого-либо взаимного влияния. Например, экспериментально доказано, что одна частица может одновременно проходить через две щели в непрозрачном экране. Частица, проходящая через первую щель – это одно состояние. Та же частица, проходящая через вторую щель – другое состояние. И эксперимент показывает, что наблюдается сумма этих состояний! То есть частица одновременно проходит через две щели! В таком случае говорят о **суперпозиции** состояний.

Речь идет о квантовой суперпозиции (когерентной суперпозиции), то есть о суперпозиции состояний, которые не могут быть реализованы одновременно с классической точки зрения. То есть это суперпозиция альтернативных (взаимоисключающих с классической точки зрения) состояний, которая не может быть реализована в классической физике. Далее под словом "суперпозиция" понимается именно квантовая суперпозиция. Суперпозиционные состояния описываются с помощью так называемой волновой функции, которую также называют вектором состояния. Согласно аксиоматике квантовой механики, вектором состояния осуществляется полное описание замкнутых (то есть не взаимодействующих с окружением) систем.

Наличие этих **двух типов состояний – смеси и суперпозиции** – является узловым для понимания квантовой картины мира. И связи квантовой картины мира с мистической. Другой важной для нас темой будут условия перехода суперпозиции состояний в смесь и

наоборот. Эти и другие вопросы мы разберём на примере знаменитого двухщелевого эксперимента.

Для начала возьмём пулемёт и проведём мысленно эксперимент, показанный на рис. 1.



Он не очень хорош, наш пулемёт. Он выпускает пули, направление полёта которых заранее неизвестно. То ли направо они полетят, то ли налево.... Перед пулемётом стоит бронева плита, а в ней проделаны две щели, через которые пули свободно проходят. Далее стоит "детектор" - любая ловушка, в которой застревают все попавшие в неё пули. Когда нужно, можно пересчитать число пуль, застрявших в ловушке на единицу её длины, и разделить её на полное число выпущенных пуль. Или на время стрельбы, если скорость стрельбы считать постоянной. Эту величину – число застрявших пуль на единицу длины ловушки в окрестности некоторой точки X, отнесённое к полному числу пуль, мы будем называть вероятностью попадания пули в точку X. Заметим, что мы можем говорить только о вероятности – ведь мы не можем сказать определённо, куда попадёт очередная пуля. Ведь пуля, даже попав в дыру, может срикошетить от её края и уйти вообще неизвестно куда.

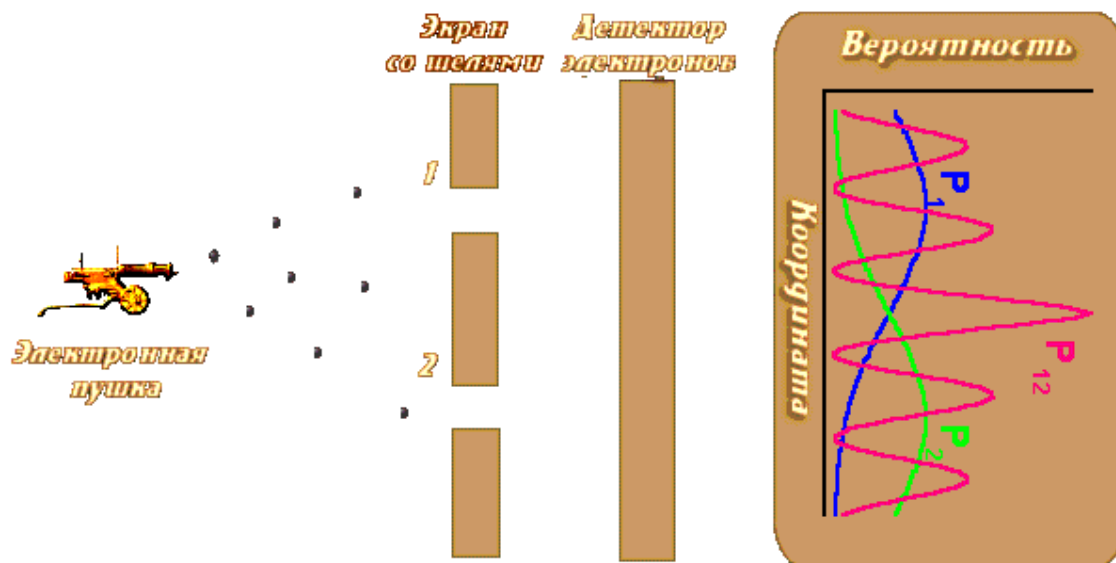
Давайте мысленно проведём три опыта: первый, когда открыта первая щель, а вторая закрыта, второй – когда открыта вторая щель, а первая закрыта. И наконец, третий опыт, когда обе щели открыты.

Результат нашего первого "эксперимента" показан на этом же рисунке, на графике. Вероятность в нём отложена вправо, а координата – это и есть положение точки X. Синяя кривая показывает распределение вероятности P_1 попавших в детектор пуль при открытой первой щели, зелёная кривая – вероятность попадания в детектор пуль при открытой второй щели, и красная кривая – вероятность попадания в детектор пуль при обеих открытых щелях, которую мы обозначили P_{12} . Сравнив величины P_1 , P_2 и P_{12} , мы можем сделать вывод, что вероятности просто складываются,

$$P_1 + P_2 = P_{12}.$$

Итак, для пуль действие двух щелей складывается из действия каждой щели в отдельности.

Представим себе такой же опыт с электронами, схема которого показана на рис. 2.



Возьмём электронную пушку, типа тех, которые стоят почти в каждом телевизоре, и поместим перед ней непрозрачный для электронов экран с двумя щелями. Прошедшие через щели электроны можно регистрировать различными методами: с помощью сцинтиллирующего экрана, попадание электрона на который вызывает вспышку света, фотоплёнки или с помощью счётчиков различных типов, например, счётчика Гейгера.

Результаты измерений для электронов в случае, когда одна из щелей закрыта, выглядят вполне разумно и весьма похожат на наш опыт с пулёмётной стрельбой (синяя и зелёная кривая на рисунке). А вот для случая, когда обе щели открыты, мы получаем совершенно неожиданную кривую P_{12} , показанную красным цветом. Она явным образом не совпадает с суммой P_1 и P_2 ! Получившуюся картину называют интерференционной картиной от двух щелей.

Давайте попробуем разобраться, в чём тут дело. Если мы исходим из гипотезы, что электрон проходит либо через щель 1, либо через щель 2, то в случае двух открытых щелей мы должны получить сумму эффектов от одной и другой щели, как это имело место в опыте с пулёмётной стрельбой. Вероятности независимых событий складываются, и в этом случае мы бы получили $P_1 + P_2 = P_{12}$. Во избежание недоразумений отметим, что графики отражают вероятность попадания электрона, прошедшего через одну или обе щели, в то или иное место детектора. В пределах статистической погрешности они не чувствительны к полному числу зарегистрированных частиц.

Может, мы не учли какой-нибудь существенный эффект, и суперпозиция состояний (то есть одновременное прохождение электрона через две щели) здесь совсем ни при чём? Может быть, у нас очень мощный поток электронов, и разные электроны, проходя через разные щели, как-то искажают движение друг друга? Для проверки этой гипотезы надо модернизировать электронную пушку так, чтобы электроны вылетали из неё достаточно редко. Скажем, не чаще, чем раз в полчаса. За это время каждый электрон уж точно пролетит всё расстояние от пушки до детектора и будет зарегистрирован. Так что никакого взаимного влияния летящих электронов друг на друга уж точно не будет!

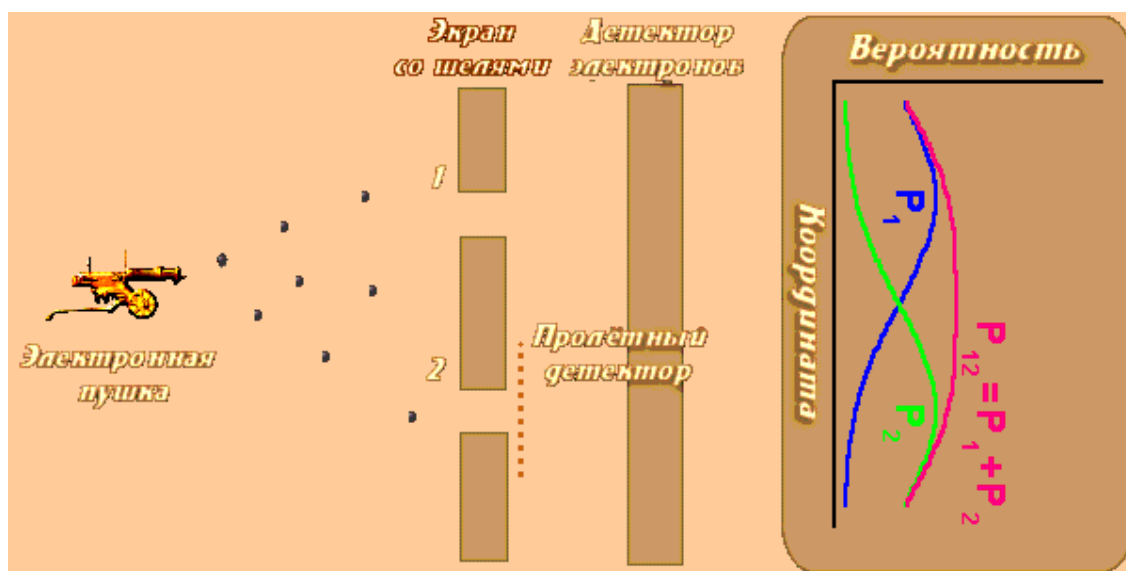
Сказано – сделано. Мы модернизировали электронную пушку и полгода провели возле установки, проводя эксперимент и набирая необходимую статистику. Каков же результат? Он ничуть не изменился.

Но, может быть, электроны каким-то образом блуждают от отверстия к отверстию и только потом достигают детектора? Это объяснение также не проходит: на кривой P_{12} при двух открытых щелях есть точки, в которые попадает значительно меньше электронов, чем при любой из открытых щелей. И наоборот, есть точки, вероятность попадания электронов в которые более чем вдвое превышает вероятность попадания электронов, прошедших из каждой щели по отдельности.

Стало быть, утверждение о том, что электроны проходят либо сквозь щель 1, либо сквозь щель 2, неверно. Они проходят через обе щели одновременно. И очень простой математический аппарат, описывающий такой процесс, даёт абсолютно точное согласие с экспериментом, с тем, что показано красной линией на графике.

Чем же отличаются пули от электронов? С точки зрения квантовой механики, ничем. Только, как показывают расчёты, интерференционная картина от рассеяния пуль характеризуется столь узкими максимумами и минимумами, что никакой детектор их зарегистрировать не в состоянии. Расстояния между этими минимумами и максимумами неизмеримо меньше размеров самой пули. Так что детекторы будут давать усреднённую картину, показанную красной кривой на рис. 1.

Давайте теперь видоизменим наш опыт так, чтобы можно было "проследить" за электроном, то есть узнать, через какую щель он проходит. Поставим возле одной из щелей детектор, который регистрирует прохождение электрона сквозь неё (рис. 3).



В этом случае, если пролётный детектор регистрирует прохождение электрона через щель 2, мы будем знать, что электрон прошёл через эту щель, а если пролётный детектор не даёт сигнала, а основной детектор даёт сигнал, то ясно, что электрон прошёл через щель 1. Можно поставить и два пролётных детектора, на каждую из щелей, но это никак не скажется на результатах нашего опыта. Конечно, любой детектор, так или иначе, исказит движение электрона, но будем считать это влияние не очень существенным. Для нас ведь куда более важен сам факт регистрации того, через какую из щелей проходит электрон!

Как вы думаете, какую картину мы увидим? Результат эксперимента показан на рис. 3, качественно он ничем не отличается от опыта с пулемётной стрельбой. Таким образом, мы нашли, что когда мы смотрим на электрон и фиксируем его состояние, то обнаруживаем,

что он проходит либо через одно отверстие, либо через другое. Суперпозиции этих двух состояний нет! А когда мы не него не смотрим, он одновременно проходит через две щели, и распределение их на экране совсем не такое, как тогда, когда мы на них смотрим! Выходит, наблюдение как бы "вырывает" объект из совокупности неопределённых квантовых состояний и переводит его в проявленное, наблюдаемое, классическое состояние.

Может быть, всё это не так, и дело здесь только в том, что наш пролётный детектор уж слишком сильно искажает движение электронов? Проведя дополнительные опыты с различными пролётными детекторами, по-разному искажающими движение электронов, мы заключаем, что роль этого эффекта не очень существенна. Существенным оказывается только сам факт фиксации состояния объекта!

Сделаем теперь короткий экскурс в историю подобных опытов. Впервые интерференцию света на двух щелях наблюдал английский учёный Томас Юнг в начале 19-го века. Затем, в 1926-1927 годах К.Д. Дэвиссоном и Л.Х. Джермером в экспериментах с использованием монокристалла никеля была открыта дифракция электронов. Этим учёным, а также Д.П. Томсону, который независимо от них также открыл этот эффект, в 1937 году была присуждена Нобелевская премия. Затем подобные опыты многократно повторялись, в том числе и с летящими "поштучно" электронами. В последующем были проведены эксперименты с более крупными частицами, один из них (с молекулами тетрафенилпорфирина) был проведён в 2003 году группой ученых из Венского университета во главе с Антоном Цайлингером [1]. В этом классическом двухщелевом эксперименте было чётко продемонстрировано наличие интерференционной картины от одновременного прохождения очень большой по квантовым меркам молекулы через две щели.

Наиболее впечатляющий на сегодняшний день эксперимент был совсем недавно проведён группой А. Цайлингера [2]. В нём пучок фуллеренов (молекул, содержащих 70 атомов углерода) рассеивался на дифракционной решетке, состоящей из большого числа узких щелей. При этом имелась возможность контролируемого лазерного нагрева молекул C_{70} , что давало возможность контролируемо менять их внутреннюю температуру, т.е. энергию колебаний атомов углерода внутри этих молекул. Как известно, любое нагретое тело, в том числе молекула фуллерена, испускает тепловые фотоны, спектр которых отражает среднюю энергию этих колебаний. По этим фотонам можно с точностью до длины волны испускаемого кванта определить траекторию молекулы, - чем больше температура и меньше длина волны кванта, тем с большей точностью мы можем определить положение молекулы в пространстве. Другими словами, испускание молекулой квантов света и "создаёт" тот пролётный детектор, о котором мы только что говорили, - по ним, в принципе, можно определить, на какой из щелей дифракционной решётки рассеялся фуллерен. Только никакого специального устройства даже не надо, его роль выполняет окружающая среда, в которой при взаимодействии с фотонами в той или иной форме записывается информация о траектории и состоянии молекулы фуллерена.

Было обнаружено, что увеличение мощности лазерного излучения приводит сначала к ослаблению интерференционного контраста, а затем и к его полному исчезновению. При температурах $T < 1000\text{K}$, когда число и длина волны испускаемых молекулой фотонов недостаточно для фиксации окружением её траектории с точностью до шага дифракционной решётки, молекулы ведут себя как квантовые частицы, а при $T > 3000\text{K}$,

когда траектории фиксируются с необходимой точностью - как классические тела. Возможность контролируемого нагрева и позволила изучить переход от квантового к классическому режиму во всех деталях. Оказалось, что расчеты, выполненные в рамках теории декогеренции (о ней пойдёт речь ниже), очень хорошо согласуются с экспериментальными данными.

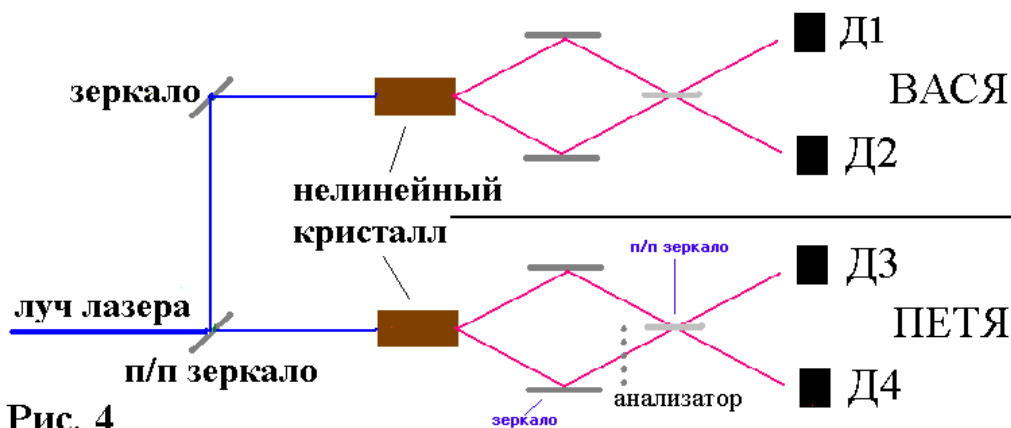
Таким образом, в данном эксперименте было получено убедительное доказательство плавного перехода от квантового к классическому режиму в поведении достаточно сложного (70-атомного) материального объекта. Этот переход вызван в данном случае ни чем иным, как переводом суперпозиции в смесь (декогеренцией), осуществляемой при взаимодействии испускаемых тепловых фотонов с окружением и происходящей при этом фиксации состояния объекта.

2. Чудеса, да и только (о квантовых корреляциях)

Хотите ещё чудес? Как говорят в Одессе, их есть у нас!

Рассмотрим эксперимент [3], проведённый в Рочестерском университете известнейшим специалистом по квантовой оптике Леонардом Манделом с коллегами в середине 90-х годов прошлого столетия. А по ходу познакомимся с важнейшим для нас понятием запутанных, или квантово-коррелированных состояний, которым не раз используем в дальнейшем. Именно нелокальные свойства запутанных состояний являются ключом к магии и ко всем якобы "сверхъестественным" явлениям!

Схема эксперимента Мандела показана на рис. 4.



Лазерный луч с помощью полупрозрачного зеркала расщеплялся на два пучка, а затем каждый из пучков направлялся на так называемый нелинейный кристалл, способный расщеплять квант света (фотон) на два дочерних кванта. Закон сохранения энергии при этом, конечно же, выполняется: энергия каждого из дочерних квантов вдвое меньше энергии материнского кванта. Например, если падает луч лазера с длиной волны 405 нм (синего цвета), то на выходе из кристалла будут два луча с длиной волны 810 нм (красного цвета), энергия каждого кванта которых вдвое меньше энергии кванта в исходном луче. Затем с помощью системы зеркал делалось так, что каждая из этих двух пар фотонов интерферировала между собой, примерно так, как интерферировали компоненты суперпозиции в нашем опыте с рассеянием электронов на двух щелях. Результаты

наблюдения интерференционной картины фиксировались детекторами Д1-Д2 для первой пары фотонов, и детекторами Д3-Д4 – для второй пары.

Как известно, любая частица, обладающая ненулевым спином, в том числе фотон, характеризуется поляризацией, то есть проекцией спина на направление движения. Фотоны могут обладать двумя состояниями поляризации, отвечающими двум возможным проекциям спина - вдоль и против направления движения. Вид поляризации света определяет плоскость колебаний электрического поля электромагнитных волн, и существуют так называемые анализаторы (специальные кристаллы), способные пропускать кванты только с определённой поляризацией. Поскольку различные состояния поляризации находятся в состоянии суперпозиции, то с помощью такого кристалла можно выделять те или иные её компоненты. Если подобный кристалл поставить по ходу одного из лучей и вращать его относительно оси луча, то интерференционная картина будет меняться из-за изменения соотношения между компонентами суперпозиции. Подобные действия в данном эксперименте приведут к изменению вероятностей регистрации фотонов (одного или двух) каждым из детекторов.

Итак, Мандел пространственно разнёс два пучка на достаточно большое расстояние и начал менять помощью анализатора соотношение между компонентами суперпозиции на одном из них (нижнем на рис. 4). В силу его манипуляций интерференционная картина на этом пучке менялась. Второй пучок он вообще не трогал! Но интерференционная картина, наблюдаемая на этом втором пучке, точно повторяла интерференционную картину на пучке, с которым экспериментировал Мандел. И картина эта менялась мгновенно, в то же самое время, когда менялась картина на первом пучке. И это притом, что никаких "объективных" причин для изменения картины на первом пучке просто не было! Ведь человек в этом случае никак не взаимодействовал с объектом наблюдения, и никакого материального носителя взаимодействия между пучками не было!

Выходит, квантовый объект каким-то образом узнавал, что происходит с другим объектом, удалённым от него на значительное расстояние (сейчас проведены эксперименты с расстоянием между парами фотонов более 100 км).

Подобную связь между частицами называют квантовыми корреляциями, а состояния участвующих в них частиц запутанными.

***Запутанные** (это устоявшийся термин, хотя мне больше нравится термин "сцеплённые") состояния в общем случае могут возникать в системе, которая в какой-то момент времени распадается на невзаимодействующие подсистемы. Например, если электрон сталкивается с атомом, то образуется запутанное состояние, в котором состояние электрона будет коррелировано с состоянием атома в результате произошедшего взаимодействия. Отметим, что запутанное состояние не может быть представлено в виде совокупности состояний отдельных частей системы в силу наличия корреляций между ними. Также, запутанность – это физическая величина, которая имеет количественные характеристики, и она может быть определена непосредственно в эксперименте.*

Суперпозиционные состояния – более общее понятие, чем запутанные состояния. В них компоненты волновой функции могут быть как коррелированы между собой, так и нет. Последний случай отвечает наличию в системе изолированных подсистем, которые никогда не взаимодействовали друг с другом. В эксперименте Мандела запутанные состояния пар фотонов возникали в ходе расщепления исходного кванта на нелинейном

кристалле, а лазер был необходим для создания совершенно идентичных по своим характеристикам фотонов.

Не беспокойтесь, если не все термины станут сразу понятны и привычны, это ни сколько не будет мешать восприятию дальнейшего. А вскоре, на конкретных примерах, всё станет гораздо яснее.

Наличие квантовых корреляций – неотъемлемое свойство запутанных состояний. Для сцепленных фотонов нельзя указать, какова поляризация каждого из фотонов пары; если же произвести измерение над одним фотоном и тем самым определить его поляризацию, то поляризация другого фотона также станет определенной. И вести себя эта частица будет теперь иначе, чем до измерения, проведенного с первой частицей. Запутанные состояния частиц означают наличие связи между характеристиками этих частиц после их взаимодействия, и эта связь куда более жёсткая, чем следует из классических представлений. Если частицы когда-то провзаимодействовали, то в замкнутых системах связь между ними будет сохраняться всегда, и она будет мгновенной, на каком бы расстоянии друг от друга они не находились. То есть пара или какая-либо совокупность частиц будет вести себя как единый объект! Это утверждение справедливо всегда для замкнутых (изолированных) систем, а в случае открытых систем связь между частицами будет сохраняться до тех пор, пока суперпозиция состояний не превратится под влиянием взаимодействия с окружающими телами в смесь

Ситуация с мгновенной связью между частицами похожа на то, как если бы сталкивались два шара, чёрный и белый, при этом область их столкновения не наблюдаема, и мы не знаем, какой куда полетит. Мы просто наблюдаем вылетевшие из невидимой области шары, а какой из них каким был, мы не знаем. Для квантовых частиц не будет так, как подсказывает здравый смысл: каждый шар изначально белый или чёрный, мы только можем не знать его цвет. Вылетевшие шары будут вести себя как "серые", то есть в каждом из них будет присутствовать суперпозиция белого и чёрного, и это проявляется в эксперименте. Но так будет происходить только до тех пор, пока мы не определим цвет одного из шаров. Если мы определили его цвет как чёрный, то другой немедленно перестаёт вести себя как серый, и начинает проявлять себя в эксперименте как белый, на каком бы расстоянии он не находился!

С позиций квантовой механики эту связанную систему можно описать некоторой волновой функцией. Когда взаимодействие прекращается, и частицы разлетаются далеко друг от друга, они по-прежнему описываются той же функцией. Но состояние каждой отдельной частицы неизвестно в принципе, это вытекает из соотношения неопределенностей. И только когда одна из них попадает в детектор, регистрирующий ее параметры, у другой появляются (именно появляются, а не становятся известными) соответствующие характеристики.

Теперь представим, что возле одного из пучков находится Петя, который проводит эксперименты, а возле другого – Вася, который не знает о существовании Пети. Для Васи изменение результатов эксперимента на его пучке выглядит как чудо, чудо в самом мракобесном понимании! Ведь Вася ничего не делает со своим пучком, все условия эксперимента остаются постоянными, а интерференционная картина по совершенно непонятным причинам меняется! То он видит "белые" шары, то "серые", то "чёрные". А никаких причин для изменения картины Вася не найдёт, как бы он не старался. Эта причина находится в другом событийном пространстве, можно сказать, что она "магически" (то есть через квантовые корреляции) связана с его событийным

пространством. Для Васи же всё выглядит так, как будто есть следствие, но нет причины, ведь классически эти два пространства событий никак не связаны.

Может возникнуть вопрос, можно ли использовать и для "мгновенной" передачи информации между Васей и Петей. Ответ таков. Непосредственно передавать информацию с помощью описанной выше установки нельзя, ведь определяемые состояния частиц на установке Пети случайны, и в общем случае их последовательность не несёт никакой информации. Однако посредством присоединения третьей – "информационной" частицы к одной из сцепленных частиц у Пети (состояние которой известно), можно передать ее свойства другой подобной частице, находящейся на установке Васи. То есть мы можем не только мгновенно передать информацию о состоянии какой-либо частицы, но и воспроизвести это состояние. А там это состояние можно измерить, и таким образом закодировать в последовательности передаваемых состояний любое сообщение.

Явление мгновенной передачи свойств частицы на расстояние получило название квантовой телепортации. Способ практической реализации этого эффекта был предложен в 1993 году группой Чарльза Беннета (IBM) [4], а само явление впервые наблюдалось (см. обзоры [5]) в работах австрийских исследователей из университета в Инсбруке, возглавляемых Антоном Цайлингером, и итальянских, из Римского университета под руководством Франческо Де Мартини.

Однако для передачи информации необходимо, чтобы Вася и Петя согласовали свои действия. Ведь по поступающим сигналам нельзя определить, передаёт ли коллега сообщение, или нет. Поэтому нужно либо заранее договориться о времени передачи, либо об условном сигнале (например, определённой последовательности переданных состояний), означающим начало передачи. И, конечно, необходимо договориться о кодировке сообщений, – то есть, какая последовательность состояний означает, к примеру, ту или иную букву алфавита. Собственно говоря, никакой "передачи" информации не происходит, информация просто распределена между подсистемами, а Вася и Петя в ходе подобного эксперимента имеют доступ к единому нелокальному объекту. Само собой, для мгновенного обмена информацией необходимо сначала где-то создать запутанные пары фотонов, и как-то переслать им. На сегодняшний день, использование оптоволоконных технологий позволяет сохранить запутанность пар фотонов на расстояниях до нескольких сотен километров, это пока создаёт предел для реализации устройств мгновенной квантовой связи. Но это чисто технический вопрос, рано или поздно он будет решён, и уже сейчас интенсивно обсуждаются вопросы создания глобальных систем квантовой связи. Можно помечтать и о создании "квантовых консервов" – устройств, в которых когерентность состояний тех или иных объектов не разрушается достаточно долго, и которые можно будет просто брать с собой.

Часто спрашивают: не противоречит ли возможность мгновенной передачи информации теории относительности? Нет, не противоречит. Теория относительности говорит о пределе в виде скорости света на скорость движения материальных объектов и скорость передачи взаимодействия между ними. Это совершенно справедливо для локальных (классических) объектов. В случае же пар фотонов в запутанном состоянии нет никакого взаимодействия между ними, нет никакой передачи информации между ними, они просто остаются единым объектом, как бы далеко друг от друга не находились. Это грань реальности, которая выходит за рамки теории относительности.

Давайте теперь вообразим, что Петя находится возле нас, а Вася, вместе со своей установкой и источником пар фотонов – возле звезды, расстояние до которой миллион световых лет. То есть Вася поставил свои эксперименты миллион лет назад, а до Пети только сейчас долетел свет из расщеплённого пучка, и он начал свои манипуляции с ним. Что же будет? Результат не изменится: проводимые сейчас эксперименты Пети изменят результаты экспериментов Васи, который, может быть, уже давным-давно умер, и даже успел опубликовать их результаты. Ведь определение Петей состояния фотонов определяет свойства Васиных фотонов, и результаты у того меняются вне зависимости от расстояния между ними и прошедшего времени. То есть более позднее во времени действие влияет на произошедшее ранее событие. Это парадокс, неразрешимый в рамках классического подхода, в квантовой механике следует понимать так, что физическая интерпретация более ранних экспериментов зависит от позднейших измерений. Если же Вася не знает о проводимом Петей эксперименте, он вероятнее всего решит, что необъяснимые статистически результаты эксперимента вызваны какими-либо неполадками в установке. Он ведь не может найти никаких причин для аномальных результатов, поскольку они находятся в другом событийном пространстве.

Подобный эффект обратной причинности был совсем недавно исследован группой уже известного нам Антона Цайлингера. Предсказания квантовой механики подтвердились в очередной раз: более ранняя регистрация фотонов Васей по сравнению с действиями Пети никак не сказывается на результатах эксперимента. Совершенно безразлично, регистрирует Вася фотоны до или после манипуляций с пучком на установке Пети, – он получит ту же картину, что и у Пети.

А что происходит, когда мы наблюдаем свет далёких звёзд? Или наблюдаем температурные неоднородности и поляризацию реликтового излучения, которое возникло задолго до возникновения первых звёзд и галактик? Совершенно верно, мы определяем состояния фотонов и тем самым меняем состояние далёкого прошлого Вселенной, а стало быть, меняем историю! Получается парадоксальный вывод: история – это то, что создаётся проводимыми сейчас наблюдениями! И не только человека, но и любого объекта. А к вопросу почему же история представляется нам объективной, и когда это имеет место, мы ещё вернёмся!

Если кто хочет ближе ознакомиться с темой влияния сегодняшних наблюдений на историю, ищите ссылки на сильный и слабый антропный принцип, теорему Белла, квантовые корреляции. Думаю, что в журнале *Scientific American* должны быть обзоры по этим вопросам. Только не стоит чрезмерно доверять популярным публикациям, особенно если они не исходят от профессионалов.

Замечу, что опыты по исследованию квантовых корреляций во многом оказались возможными потому, что физики научились приготавливать запутанные состояния с известными характеристиками. Запутанные состояния образуются всегда, но найти метод "приготовления" того типа связи, который необходим для эксперимента, было очень непросто, этому научились не так давно. Вот почему опыты, задуманные ещё Эйнштейном, удалось провести только сейчас. Подобные опыты, направленные на проверку так называемых неравенств Белла и исследование квантовой нелокальности, начались в 1981 году с исторического эксперимента группы Алена Аспекта [6]. В настоящее время проведено около сотни подобных экспериментов, и в них были получены чёткие экспериментальные доказательства нелокальности окружающего нас мира. Более того, сейчас имеются и коммерческие приложения, использующие

нелокальную связь между частицами, – например, в предлагаемых на рынке системах квантовой криптографии.

Кстати, когда Эйнштейн задумывал свои мысленные опыты с парами частиц, он хотел тем самым опровергнуть квантовую механику, поскольку в этом случае её предсказания явно противоречили классическим представлениям о локальном характере взаимодействий и невозможности мгновенного дальнего действия. Однако мир оказался гораздо фантастичнее, чем это представлялось величайшему из физиков!

Ход рассуждений А. Эйнштейна стоит того, чтобы на нём остановиться.

Из квантовой механики вытекает, что у частицы нельзя одновременно точно измерить координаты и импульс. Но что если проводить одновременно наблюдение за двумя частицами? Например, после столкновения двух частиц импульс одной можно измерить, а импульс второй рассчитать из закона сохранения импульса.

Затем можно измерить координаты второй частицы. Тем самым, для второй частицы будут известны одновременно координаты и импульс, и соотношение неопределённости, таким образом, рухнет. Это и казалось ему опровержением квантовой механики в мысленном эксперименте.

Однако здесь заложено предположение, что в момент измерения импульса первой частицы она никак не может передать информацию об этом второй частице, – ведь они могут находиться на огромном расстоянии, и никакого взаимодействия между ними уже нет. Выполнение принципа неопределённости означало бы, напротив, что между частицами существует мгновенная связь с бесконечной скоростью передачи информации. Наличие этой связи, которую позже называли квантовой нелокальностью, или каналом Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР – каналом), и подтвердилось в многочисленных экспериментах, проведённых уже после смерти Эйнштейна.

Содержание этой главы можно выразить короче. Физическим системам нельзя приписать (по крайней мере всегда) характеристики как объективно существующие и независимые от проводимых измерений. Другими словами, характеристики объекта "создаются" наблюдателем, вне акта наблюдения состояние любого объекта во многом является неопределённым. Частицы, образованные когда-то в одном акте, остаются в замкнутой (целостной) системе единым объектом, вне зависимости от того, на каком расстоянии они находятся, и как давно произошло их разделение. Если с одной из них что-то происходит, то другие "мгновенно" чувствуют это и меняют свои наблюдаемые свойства, вне зависимости от расстояния между ними, и это происходит вне какого-либо материального носителя взаимодействия. Такие объекты находятся в целостной системе везде и нигде, и обычно называются нелокальными (или квантово-коррелированными) структурами. Как мы убедимся в следующей главе, для них понятия времени и пространства, причины и следствия теряют смысл. В любой замкнутой системе когерентность состояний не разрушается (то есть суперпозиция не переходит в смесь), и в этом случае состояние каждой частицы может быть квантово-коррелированным с состояниями всех остальных частиц в данной системе. А сама система становится полностью нелокальной. Наша Вселенная в целом и есть такой объект, она представляет собой единое образование, и говорить о существовании в ней отдельных частиц в общем случае проблематично, – отдельные частицы наблюдаются только при особых условиях при взаимодействии отдельных подсистем.

Литература

- [1] L. Hackermüller, S. Uttenthaler, K. Hornberger, E. Reiger, B. Brezger, A. Zeilinger, and M. Arndt, Wave Nature of Biomolecules and Fluorofullerenes, Phys. Rev. Lett. **91**, 090408 (2003).
- [2] L. Hackermüller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger & M. Arndt, Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation, Nature **427**, 711 (2004).
- [3] J.R. Torgerson, D. Branning, C.H. Monken, L. Mandel, Physics Letters A **204**, 323 (1995).
- [4] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **70**, 1895 (1993).
- [5] Zeilinger A. Sci. Am. **282**, 5 (2000); Волович И.В. *Квантовая телепортация, криптография и парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена*. М., 2002; Килин С.Я. УФН, **169**, 507 (1999).
- [6] A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, Phys. Rev. Lett. **49**, 91 (1982); A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, Phys. Rev. Lett. **49**, 1804 (1982).