

Квантовая механика как экспериментальная метафизика

Каминский А.В.

Цикл «понимание физики»

Квантовая механика сегодня позволяет нам экспериментально проверять базовые философские парадигмы. В статье мы рассмотрим некоторые эксперименты, интерпретация которых, затрагивает концептуальные вопросы философии.

Нильс Бор говорил, что «Если квантовая механика вас не потрясла до глубины души, значит, вы ее еще не поняли». Статья предназначена тем, кого квантовая механика не потрясла.

Введение

Физика имеет дело с феноменами, то есть явлениями, данными нам в чувственном восприятии, но никак не с объективными явлениями природы. Вас возмущает категоричность, с которой мы начали изложение? Или сказанное оскорбляет чувства «верующего» материалиста? Если это так, то я предлагаю отложить на время дальнейшее чтение и постараться понять, что сказанное выше не более, чем констатация факта. Не трудно видеть, что утверждение существования объективных явлений не зависящих от нашего сознания, гипотетично. Этот факт обычно обходят стороной, либо пытаются смягчить его, утверждая изоморфность отражения объективной реальности в нашем сознании. Именно к такой, примитивно-обывательской картине мира, тяготеют сегодня большинство физиков, не смотря на то, что уже более 100 лет, как квантовая механика настойчиво говорит нам об ошибочности такого взгляда. Еще И.Кант, основываясь на абстрактных рассуждениях, понял, что вещи не являются таковыми, какими мы их видим. Первым практическим намеком на то, что мир не совсем таков, как мы привыкли думать, было открытие корпускулярно-волнового дуализма. Как оказалось, материальные объекты являют себя нам в двух ипостасях – волновом и субстанциональном. А это означает, что реально они представляют собой нечто третье, находящееся за пределами возможности локально-реалистического описания. Так возникло представление о квантовой реальности и понимание того факта, что физическая реальность проективна. Об этом недвусмысленно свидетельствует использование в теории измерений проекционных операторов.

Квантовую механику не просто понять. Она, как женщина всегда остаётся недосказанной, ускользающей от прямого взгляда экспериментатора. Формул и уравнений мы, по возможности, будем избегать. Ведь, даже самой экзотической теорией сегодня ни кого не удивишь. Поэтому, только эксперимент, демонстрация чуда, - и вы уже никогда не расстанетесь с этой прекрасной «дамой».

Эксперимент Элицура – Вайдемана

В 1993 году Авшалом Элицур и Лев Вайдман описали очень простой мысленный эксперимент [1] из которого следовало, что объект можно «видеть» не взаимодействуя с ним. Например, можно сделать фотографию объекта не освещая его светом. Чтобы подчеркнуть парадоксальность своего открытия Элицур и Вайдман предложили следующую гипотетическую ситуацию. Предположим, — сказали они, — что на складе находятся бомбы с особо чувствительным взрывателем, срабатывающим всего от одного фотона. Половина из этих бомб исправна, а половина испорчена. Предположим так же, что исправные бомбы поглощают направленные на них фотоны, а испорченные по какой-то причине – прозрачны для света. Кроме того, конструкция бомб такова, что доступ к механизму взрывателя не возможен. Другими словами, проверить исправность бомбы можно только осветив ее светом. Задача состоит в том, чтобы отделить исправные бомбы от испорченных не взрывая их. Казалось бы задача нерешаемая. Однако, как показали Элицур и Вайдман, квантовая механика дает такую возможность!

Рассмотрим интерферометр Маха-Цендера. Его всегда можно так настроить, что, если свет свободно проходит по обоим плечам, то в результате интерференции на выходном зеркале, свет будет выходить только в порт Light. Очевидно, что, если перекрыть одно из плеч, например нижнее, то интерференции не будет, и свет на выходном делителе будет делиться в отношении 50/50. Поместим тестируемую бомбу в нижнее плечо интерферометра (рис.1), а на вход интерферометра запустим всего один фотон. Первый делитель с вероятностью 0.5 пропустит фотон к бомбе и той же вероятностью отразит его вверх во второе плечо интерферометра.

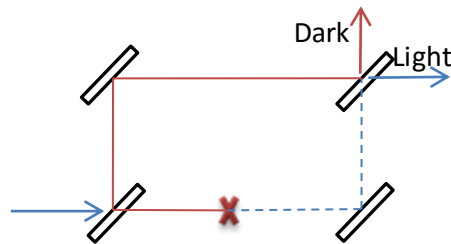


Рис.1

Предположим теперь, что бомба исправна. То есть, в нижнем плече имеется поглотитель взрывателя. В этом случае, как мы говорили выше, интерференции нет, и фотон может попасть, как в порт Light, так и в порт Dark с равной вероятностью. Пусть мы зарегистрировали фотон в порте Dark. Как мы уже говорили, **это может быть только в том случае, если в нижнем плече было препятствие, поглощающее свет**. А теперь, обратите внимание на то, что фотон был всего один. А именно, тот самый, который мы зарегистрировали. А это означает, что фотон, который мы запустили в интерферометр, отразился на первом же делителе и не пошел к бомбе (иначе она взорвалась бы!). Итак, мы получили информацию о том, что бомба исправна не взаимодействуя с ней физически. Легко понять, что статистически этим способом мы обнаруживаем объект не

взаимодействуя с ним с эффективностью превышающей случай на 25%. Это какая-то телепатия, - скажете вы! И будете правы. Это «квантовая телепатия»!

В 1994 году такой эксперимент был поставлен Полом Квятот из университета в Иннсбруке и Томасом Герцогом из Женевского университета (Kwiat et al., 1995). Здесь удивительно не то, что эксперимент подтвердил предсказания Элицура и Вайдемана, а то, что никто за 60 лет существования квантовой механики не додумался до такой тривиальной возможности!

Эффект формально описывается квантовой механикой и легко объясним в рамках многомировой интерпретации Х. Эверетта. Согласно этой интерпретации, первый расщепитель луча приводит к ветвлению Вселенной на 2 классических Вселенных, в одной из которых исправная Бомба всегда взрывается. Допустим, в нашей Вселенной она не взорвалась, тогда мы можем получить информацию о ее исправности. Информация возникает после интерференции «склейки»¹ этих двух Вселенных на выходном расщепителе. Пол Квят показал [2], что эффективность метода «селекции бомб» может быть как угодно близка к 100%. Для нас, однако, важны не цифры, а то, что такая процедура вообще осуществима. Ведь классическая физика в принципе не позволяет этого делать.

Сам Поль Квят весьма осторожен в выводах. «Я фактически не верю в эту интерпретацию, и, естественно, не думаю, что наш эксперимент является какой-то её «верификацией»; более того, я считаю, что было бы ошибочным придавать нашему эксперименту смысл подтверждения этой гипотезы»². И, хотя, из чисто эстетических приверженностей, теория Эверетта мне ближе, нельзя отрицать, то, что ряд других интерпретаций, среди которых интерпретация Д.Бома или транзакционная интерпретация Джона Крамера, вполне успешно объясняют этот результат.

С самого начала создания КМ в 30-х годах прошлого века, идет нескончаемая дискуссия о том, что такое квантово-механическое измерение и о роли в нем наблюдателя. Совершенно очевидно, что ни какие реалистические концепции, представляющие R-процедуру физическим процессом не состоятельны. Лишь сознание наблюдателя ответственно за коллапс квантового состояния. Эксперимент свидетельствует о том, что сознание не просто фиксирует существующие независимо от него свойства, но участвует в самом их формировании. Таким образом нужно ясно понимать, что измерение не сводимо к взаимодействию. Более того, как это следует, в частности, из описанного эффекта Элицура - Вайдемана взаимодействие вообще не является обязательным при измерении. Такие измерения получили название отрицательных измерений или *interaction free measurements*. То есть, измерение это, прежде всего, получение информации об объекте, и совершенно не важно, как она получена. Взаимодействие это просто один из способов получить информацию. Рассмотрим классический опыт Юнга с двумя щелями А и В. Детектор установлен только напротив щели А. Тогда, «ненаблюдение» фотона детектором А, означает, что исходная волновая функция редуцирует без всякого взаимодействия:

$$|A\rangle + |B\rangle \rightarrow |B\rangle$$

¹ В терминологии Ю.А.Лебедева.

² Цитировано по книге Ю.А.Лебедева, «Многоликое мироздание. Эвереттская проблематика».

Таким образом, коллапс это не физический процесс. Это изменение знания наблюдателя о системе.

Вышесказанное перемещает проблему сознания из поля философии в поле физического эксперимента. Научный мир, однако, настолько консервативен, что отказывается признавать, порой, очевидные вещи. Самым несокрушимым доводом при этом является следующий: «этого не может быть потому, что этого не может быть никогда...». В этой связи, нельзя не упомянуть серию статей М.Б.Менского в УФН, посвященных физике сознания, которые увидели свет только благодаря научной смелости и честности В.Л.Гинзбурга, посчитавшего возможным пренебречь досужим мнением научного истеблишмента и допустить эти работы к публикации, чем, несомненно, способствовал не только углублению понимания квантовой механики, но и развитию научного плюрализма, так необходимого в поисках нового знания.

Призрачное действие на расстоянии (Spooky action at a distance³)

Излюбленным объектом экспериментаторов, работающих в области квантовой механики, является так называемое запутанное состояние. Формально его можно записать так:

$$\psi = |\psi_1\rangle_A |\psi_2\rangle_B + |\psi_2\rangle_A |\psi_1\rangle_B \quad (1)$$

Запутанное состояние конструируется, как суперпозиция состояний системы, состоящей из двух частей, которая в случае коллапса приводит к их корреляции. Если, например, наблюдатель Алиса имеет дело с одной частью системы, которая может иметь состояния ψ_1 или ψ_2 , а наблюдатель Боб имеет дело с другой частью системы, принимающей те же состояния ψ_1 или ψ_2 , то в случае коллапса возникает корреляция. Если Алиса измерит ψ_1 , то Боб обязательно измерит ψ_2 и наоборот. Но никогда они не измерят одно и то же состояние. Чтобы понять, что же здесь такого необычного, нужно обратиться к тривиальному случаю, который описал Белл. Он использовал пример своего коллеги по работе в CERN доктора Рейнхольда Бертлмана (нем. Reinhold Bertlmann) из Венского университета. Согласно легенде, Бертлман, отличаясь академической рассеянностью, нередко приходил на работу в разных носках. Предугадать заранее, на какой ноге какого цвета носок окажется сегодня, было невозможно. Однако достаточно было увидеть, допустим, розовый носок на левой ноге, чтобы заключить, что на правой ноге носок будет другого цвета — даже если правая нога ещё не видна.

³ Выражение Эйнштейна



Рис.2

Рисунок, принадлежит самому Д.Беллу. Заимствован из статьи [3]

Чем же этот, описанный Белом пример отличается от квантового запутанного состояния? А отличается он только тем, что цвет носков, одетых с утра вполне определен и вовсе не зависит от чьих либо наблюдений. Другими словами, до наблюдения он такой же, как и после наблюдения. В отличие от этого, до коллапса состояния ψ см.(1), Алиса ни чего не знает о состоянии системы. Не знает не потому, что поленилась узнать, а по более фундаментальной причине. Дело в том, что, согласно копенгагенской интерпретации квантовой механики, до измерения, система вообще не имеет определенного состояния. А это все в корне меняет. Может оказаться, что Алиса и Боб находятся на разных планетах на огромном расстоянии друг от друга. И тогда, реальность, проявленная Алисой⁴, мгновенно определит реальность Боба (с точки зрения Алисы, конечно). Это положение вещей называют нелокальностью. Нелокальность является важнейшим признаком квантового поведения материи но входит в противоречие с принципами близкодействия и причинности, вызывая подозрение, что мы здесь чего-то не понимаем. Так может быть, мы, действительно, все усложняем, и поведение квантовой системы подобно носкам Бертлмана? Покажем, что это не так.

Квантовые корреляции

Проще всего запутанное состояние получить, используя обычную делительную пластинку (beam splitter). Допустим, на 1-ом порте мы имеем однофотонное состояние $|1\rangle$, а на 2-ом вакуум $|0\rangle$, то есть, на входе делительной пластинки мы имеем состояние $|1,0\rangle$, тогда на выходе имеем запутанное состояние: $\frac{|1,0\rangle+|0,1\rangle}{\sqrt{2}}$; Которое означает антикоррелированное появление фотона в выходных портах делителя. Проблема в том, что такое запутанное состояние невозможно использовать для проверки нелокальности. Действительно,

⁴ Мы здесь рассуждаем с точки зрения наблюдателя, в системе координат которого, Алиса первая произвела измерение, разрушив, тем самым, суперпозицию.

наличие антикорреляции в рассматриваемом случае неотличимо от обычной классической корреляции типа Берглмана. Поэтому для проверки нелокальности обычно, конструируют состояния фотонов запутанные по поляризации. Для этого используют коррелированные пары фотонов, рождающихся в процессе параметрического преобразования частоты вниз (Spontaneous Parametric Down Conversion SPDC). Этот процесс реализуется при нелинейном взаимодействии света с кристаллической решеткой некоторых кристаллов. Мы не будем вдаваться в детали этого процесса, описанного в специальной литературе. Конечно же, импульс и энергия здесь сохраняются. Прямым следствием этого является запутанность возникающей пары фотонов по поперечному импульсу:

$$\psi = \int |p\rangle | - p\rangle \quad (2)$$

Но и это мы никак не можем использовать для доказательства нелокальности. Однако, мы можем использовать тот факт, что 2 фотона, рожденные в этом процессе имеют строго определенную поляризацию. Так в SPDC первого типа рождаются 2 фотона с одинаковой поляризацией, ортогональной поляризации волны накачки. Рожденные фотоны разлетаются под некоторым углом, образуя конус. Если у нас поляризация волны накачки имеет горизонтальную поляризацию H, то на выходе кристалла мы имеем состояние $\psi = |V\rangle_A |V\rangle_B$. Если же поляризация волны накачки имеет вертикальную поляризацию V, то на выходе кристалла мы имеем состояние $\psi = |H\rangle_A |H\rangle_B$. Из этих факторизованных состояний мы построим суперпозицию. Для этого два кристалла, повернутые друг относительно друга на угол 90град разместим достаточно близко друг от друга, так, чтобы конусы разлета фотонов, рожденных в них, перекрывались. Тогда, согласно правилу Фейнмана, если наблюдатель не способен различить пути частиц, рожденных в первом и во втором кристалле, то соответствующие амплитуды нужно складывать:

$$\psi = |V\rangle_A |V\rangle_B + |H\rangle_A |H\rangle_B \quad (3)$$

Запутанность обеспечивается тем, что пара всегда рождается в одном из кристаллов. А ситуация, когда один фотон родился в одном кристалле, а второй во втором невозможна. В отличие от запутанности по импульсу, запутанность по поляризации мы сконструировали искусственно. Состояние (3) означает, что, если Алиса выловила фотон, рожденный в первом кристалле, то к Бобу летит фотон, рожденный в том же кристалле и, следовательно, у них одинаковая поляризация. Это рассуждение чисто классическое и поэтому не верное. На самом деле, есть определенная амплитуда рождения фотонов в обоих кристаллах, и мы имеем дело с их суперпозицией (3). Согласно интерпретации Эверетта, фотонные пары родились, в обоих кристаллах, но это произошло в разных мирах. У Алисы и Боба есть шанс оказаться в одном из этих миров, проведя измерения.

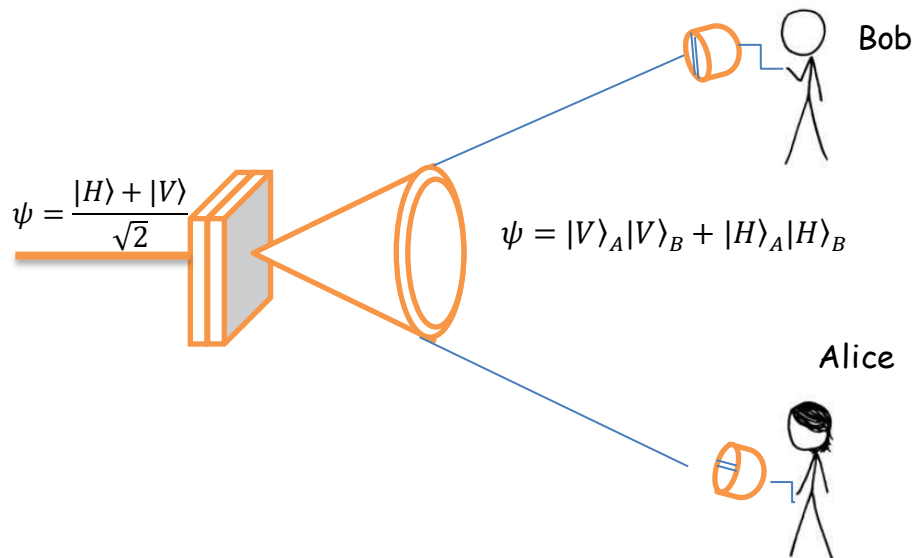


Рис.3

Согласно формализму квантовой механики, если Алиса измерит какое-либо конкретное состояние $|V\rangle_A$ или $|H\rangle_A$ то это «повлияет» на вероятность измерений, которые сделает Боб.

Спроецируем ψ на направление $|H\rangle_A$ это происходит, когда Алиса измеряет фотон в своем анализаторе, повернутом в направлении поляризации H.

$$|H\rangle_A \langle H|_A \psi = |H\rangle_A \langle H|_A (|V\rangle_A |V\rangle_B + |H\rangle_A |H\rangle_B) = |H\rangle_A |H\rangle_B \quad (4)$$

Мы видим, что проецирование разрушает суперпозицию. Это так и должно быть. Проецирование – не унитарная операция. Мы видим, что в этом примере Алиса получает состояние $|H\rangle_A$, а Бобу достается $|H\rangle_B$. И, если анализатор Боба так же сориентирован вдоль поляризации H, то Алиса и Боб будут регистрировать фотоны всегда вместе. То есть, корреляция будет 100%

А, что произойдет, если измерения провести в другом базисе (под некоторым углом). Допустим и Алиса и Боб повернули свои анализаторы на один и тот же угол относительно источника. Очевидно, это ничего не изменит. Это следует, хотя бы из принципа симметрии.

А теперь, давайте спроецируем (3) на произвольное направление S:

$$\psi' = |S\rangle_A \langle S|_A \psi \quad (5)$$

$$|S\rangle_A \langle S|_A (|V\rangle_A |V\rangle_B + |H\rangle_A |H\rangle_B) = \langle S|_A |V\rangle_A |V\rangle_B |S\rangle_A + \langle S|_A |H\rangle_A |H\rangle_B |S\rangle_A =$$

$$\psi' = (\langle S|_A|V\rangle_A|V\rangle_B + \langle S|_A|H\rangle_A|H\rangle_B)|S\rangle_A \quad (6)$$

Это тензорное произведение. Оно означает, что если Алиса измеряет фотон под углом (на направление $|S\rangle_A$), то Боб получит суперпозицию $(\langle S|_A|V\rangle_A|V\rangle_B + \langle S|_A|H\rangle_A|H\rangle_B)$ с амплитудами, зависящими от угла поворота Алисиного анализатора. Это и есть та самая «мистическая» связь, которая будоражит умы физиков. Белла пугала возможность нарушения его неравенств, так как это означало, что «Заведомо удаленные друг от друга части мира должны быть перепутаны, на глубоком и недоступном пониманию уровне, и наша, казалось бы, свободная воля должна быть перепутана с ними» [3]. Кстати, если у меня нет запутанного состояния, а есть просто:

$$\psi = |V\rangle_A|V\rangle_B \quad (7)$$

Это то самое состояние, которое генерируется одним кристаллом SPDC 1-го типа. То ничего интересного не будет. Подействуем на него проектором $|S\rangle_A\langle S|_A$ из (6) получим

$$\psi' = \langle S|_A|V\rangle_A|V\rangle_B|S\rangle_A \quad (8)$$

То есть вектор поляризации фотона, летящего к Бобу, здесь не поворачивается. Для этого нужно только запутанное состояние.

Для лучшего понимания и в качестве упражнения, давайте повернем анализатор Алисы на 45 град.

$$|S\rangle_A = |H\rangle_A + |V\rangle_A \text{ то есть}$$

$$\langle S|_A = \langle H|_A + \langle V|_A \quad (9)$$

$$\psi' = |S\rangle_A\langle S|_A \psi \quad (10)$$

Из (6) получим:

$$\begin{aligned} \psi' &= (\langle H|_A + \langle V|_A)|V\rangle_A|V\rangle_B + (\langle H|_A + \langle V|_A)|H\rangle_A|H\rangle_B)|S\rangle_A = \\ &= (\langle H|_A|V\rangle_A|V\rangle_B + \langle V|_A|V\rangle_A|V\rangle_B + \langle H|_A|H\rangle_A|H\rangle_B + \langle V|_A|H\rangle_A|H\rangle_B)|S\rangle_A = \\ &= (|V\rangle_B + |H\rangle_B)|S\rangle_A \quad (11) \end{aligned}$$

Мы видим, что поляризация фотона, летящего к Бобу, повернулась на 45 градусов. Мы снова подтвердили наш прежний результат – если анализаторы Алисы и Боба параллельны, то корреляция составляет 100%. Это следует из квантовой механики.

Но, если бы фотоны вели себя подобно носкам Бертлмана, корреляция была бы не более 50% - Почему это так - легко объяснить «на пальцах». Действительно, классическая картина явления предполагает, что фотоны имеют априорную поляризацию. Допустим,

что эта поляризация направлена вдоль некоторого вектора λ . Тогда, если даже, анализаторы Алисы и Боба направлены одинаково, например, горизонтально Н, фотоны, летящие к Алисе и к Бобу, вовсе не обязаны синхронно проецироваться на одно и то же направление. Например, фотон, летящий к Алисе, спроецируется на Н и Алиса его зарегистрирует, но фотон, летящий к Бобу, может спроецироваться, как на Н, так и на V совершенно случайно (рис.4):

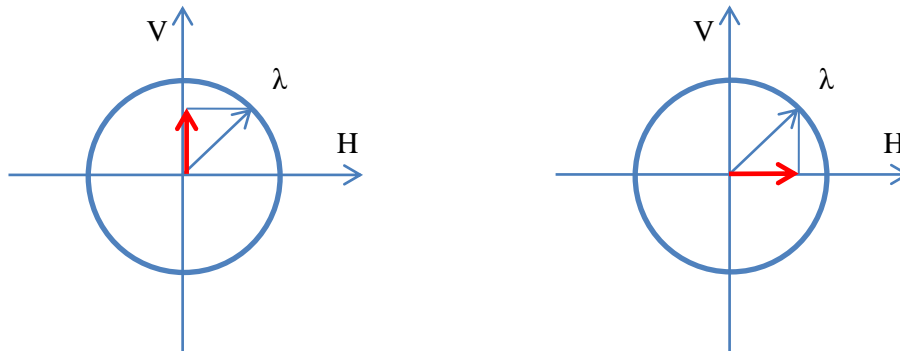


Рис.4

В отличие от этого, квантовая механика работает по-другому. Согласно (6), мы видим, что, когда Алиса выполнила свое измерение, фотон, летящий к Бобу и не имевший до этого хорошо определенной поляризации, «внезапно» проецируется в состояние поляризации, параллельное состоянию поляризатора Алисы. И только после этого, проецируется на аппаратный базис Боба.

Такая картина противоречит духу теории относительности. Согласно Эйнштейну, то, что происходит в данной области пространства времени, не может испытывать влияния со стороны события, происходящего в другой области, отделенной от первой пространственно-подобным интервалом. Ниже мы покажем, что рассмотрение этого процесса в рамках интерпретации Эверетта не создает даже видимых противоречий.

Неравенства Белла

Джон Белл нашел формальный математический критерий локального реализма. Он вывел неравенство, которое должно соблюдаться только в том случае, если процессы локальны и имеет место строгая причинность. Одной из форм записи неравенства является следующая:

$$C_n(a, c) - C_n(b, a) - C_n(b, c) \leq 1 \quad (12)$$

Здесь $C_h(a, b)$ означает корреляцию, некоторых функций $A(a, \lambda)$, $B(b, \lambda)$, измеряемых Алисой и Бобом. Очевидно, эти функции могут зависеть лишь от локальной установки анализатора, принадлежащего, соответственно Алисе и Бобу, и, некоего скрытого параметра λ , который, возможно, переносит информацию, меняя распределение вероятностей. В случае любого классического механизма такая корреляция может быть представлена в виде:

$$C_h(a, b) = \int A(a, \lambda) B(b, \lambda) p(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

a, b, c – относятся к трем произвольным установкам анализаторов. $p(\lambda)$ – распределение вероятностей.

В 1982 г Аспе (Aspect A.) показал [4], что в квантово-механическом эксперименте эти неравенства нарушаются. А это означало реальное существование того самого призрачного действия на расстоянии, которого так опасался Белл.

Для того чтобы лучше понять, как и что здесь измеряют, рассмотрим, как получают коэффициенты корреляции $C_h(a, b)$. В подобных экспериментах, обычно используют счетчики фотонов, которые срабатывают при попадании в них фотона. Раньше это были фотоумножители, а сейчас используют лавинные фотодиоды. Событие регистрации (не регистрации) фотона Алисой и Бобом будем обозначать индексами + (-). Тогда, корреляционная функция может быть найдена следующим образом:

$$C(a, b) = \frac{N_{++} + N_{--} - N_{+-} - N_{-+}}{N_{++} + N_{--} + N_{+-} + N_{-+}} \quad (14)$$

Находя, таким образом, экспериментально, значения корреляций и подставляя их в (12), при некоторых значениях a и b , мы обнаруживаем нарушение этого неравенства. А это, как мы уже говорили, нельзя объяснить ни каким механизмом, действующим локальным образом.

Как это работает, и почему нет конфликта со СТО

Здесь мы покажем, что видимый конфликт с причинностью возникает вследствие неполного рассмотрения процесса. А именно, ошибочным предположением, что эксперимент заканчивается после получения результатов Алисой и Бобом. Но, ни Боб не Алиса на этой стадии эксперимента еще не знают о результатах друг друга. К тому же, если нас интересует корреляция между этими результатами, они должны быть транспортированы в одну точку пространства - времени для сравнения. Домысливание, предполагающее априорное существование результатов измерений до того, как они станут известны наблюдателям, не допустимо. При последовательном подходе, этого делать нельзя, ибо процесс передачи «классической» информации от Алисы к Бобу (или

наоборот), и ознакомление с результатами, в результате чего, только и может быть выявлена корреляция, это тоже физический процесс, который требует аккуратного рассмотрения. Такое рассмотрение предлагает теория соответственных состояний Эверетта, согласно которой, в рассматриваемом примере, эксперимент может считаться законченным только после взаимного ознакомления наблюдателей с результатами измерений.

Рассмотрим систему, состоящую из двух наблюдателей (Алиса и Боб) и бифотона, в состоянии: $|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle|H\rangle - |H\rangle|V\rangle)$. Когда наблюдатель получает информацию об объекте, его волновая функция изменяется. Согласно Теории Эверетта, волновая функция наблюдателя представляет память субъекта. Волновые функции наших наблюдателей можно представить в виде:

$$\Psi^A = |\Psi_{\dots\alpha_i}^{\dots\alpha_i}\rangle_A; \quad \Psi^B = |\Psi_{\dots\beta_i}^{\dots\beta_i}\rangle_B; \quad (15)$$

Здесь мы память представляем двумя списками событий (2 банка памяти). В верхней строке индексов сохраняется последовательность событий взаимодействия с бифотоном, а в нижней – последовательность взаимодействий с другим наблюдателем. После того, как Алиса произвела измерение, возникло 2 ее копии (суперпозиция Алис) с памятью $\{V, H\}$ и $\{H, V\}$. Состояние системы приобретает вид:

$$\Psi^{S+\tilde{A}+B} = |V\rangle|H\rangle|\Psi_{\dots}^{V,H}\rangle_A |\Psi_{\dots}^{\dots}\rangle_B + |H\rangle|V\rangle|\Psi_{\dots}^{H,V}\rangle_A |\Psi_{\dots}^{\dots}\rangle_B \quad (16)$$

Соответственно после измерения Боба, возникло 2 копии Боба с соответствующим содержанием памяти. Состояние системы приняло вид:

$$\Psi^{S+\tilde{A}+\tilde{B}} = |V\rangle|H\rangle|\Psi_{\dots}^{V,H}\rangle_A |\Psi_{\dots}^{H,V}\rangle_B + |H\rangle|V\rangle|\Psi_{\dots}^{H,V}\rangle_A |\Psi_{\dots}^{V,H}\rangle_B \quad (17)$$

Теперь, если наблюдатели встретятся и обменяются информацией (по сути дела это тоже измерение), то состояние системы примет вид:

$$\Psi^{S+\tilde{A}+\tilde{B}} = |V\rangle|H\rangle|\Psi_{H,V}^{V,H}\rangle_A |\Psi_{V,H}^{H,V}\rangle_B + |H\rangle|V\rangle|\Psi_{V,H}^{H,V}\rangle_A |\Psi_{H,V}^{V,H}\rangle_B \quad (18)$$

Это выражение означает, что если Алиса измерила фотон в состоянии $|V\rangle$, то тем самым она выбрала один из миров. Выбор Боба никак не связан с выбором Алисы. Но Алису, очевидно, интересует не любой Боб, а Боб из ее собственного мира, в котором она сделала измерение. И этот Боб, конечно же, измерил фотон в том же состоянии $|H\rangle$. Найти этого Боба не представляет труда, ибо в классическом мире Алисы есть всего один Боб. В этой модели, как видно из (18), результат квантовой корреляции «проявляется» только при встрече и сверке протоколов измерений. И это происходит либо в сознании Алисы либо в сознании Боба. То есть, процедура сверки протоколов существенно субъективна. Заметим, что эти протоколы измерений, почти наверняка будут разными. Однако, в сознании

каждого из наблюдателей, все будет согласовано. Так как Алиса будет сверять данные с Бобом из своего мира, а Боб, соответственно с Алисой из своего. Важно понимать, что ни какой корреляции не существует до тех пор, пока результаты измерений не перемещены в одну точку пространства – времени для сверки и запоминания (осознания?) результата. Это перемещение очевидно может быть осуществлено только путем передачи информации по обычным времени-подобным каналам.

Перенос запутывания, телепортация (Entanglement swapping and teleportation)

Для лучшего понимания экспериментов, которые мы собираемся рассмотреть далее, уделим немного времени рассмотрению механизма переноса кантовой запутанности, процесса, имеющего так же большое прикладное значение для разработки квантово-информационных технологий.

Рассмотрим следующую ситуацию. Имеются 2 макроскопических наблюдателя Алиса и Боб. У Алисы имеется частица 1 (номера частиц будем указывать индексом внизу вектора состояния) с неизвестным квантовым состоянием:

$$|\phi_0\rangle = \alpha|H\rangle_1 + \beta|V\rangle_1 \quad (19)$$

Это состояние мы хотим перенести в другую точку пространства. Например, передать Бобу. Очевидно, что напрямую измерять состояние частицы 1 бессмысленно, так как мы тем самым, разрушим ее состояние. В 1993 году С. Bennett предложил следующую «хитрость» [5]. Воспользуемся вспомогательной парой запутанных частиц (частицы номер 2 и 3) в состоянии:

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle_2|H\rangle_3 - |H\rangle_2|V\rangle_3); \quad (20)$$

Это одно из состояний Белловского базиса:

$$\begin{aligned} |\psi_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle|H\rangle - |H\rangle|V\rangle); & |H\rangle|V\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_2\rangle - |\psi_1\rangle); \\ |\psi_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle|H\rangle + |H\rangle|V\rangle); & |H\rangle|H\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_4\rangle - |\psi_3\rangle) \\ |\psi_3\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle|V\rangle - |H\rangle|H\rangle); & |V\rangle|V\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_4\rangle + |\psi_3\rangle); \\ |\psi_4\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle|V\rangle + |H\rangle|H\rangle); & |V\rangle|H\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_2\rangle + |\psi_1\rangle); \end{aligned}$$

Тогда мы имеем трехчастичное состояние:

$$\psi_{123} = |\phi_0\rangle|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|H\rangle_1 + \beta|V\rangle_1)(|V\rangle_2|H\rangle_3 - |H\rangle_2|V\rangle_3) = \quad (21)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha |H\rangle_1 |V\rangle_2 |H\rangle_3 - \alpha |H\rangle_1 |H\rangle_2 |V\rangle_3 + \beta |V\rangle_1 |V\rangle_2 |H\rangle_3 - \beta |V\rangle_1 |H\rangle_2 |V\rangle_3) =$$

Перейдем к Белловскому базису по первым двум частицам:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\alpha \frac{(|\psi_2\rangle_{12} - |\psi_1\rangle_{12})}{\sqrt{2}} |H\rangle_3 - \alpha \frac{(|\psi_4\rangle_{12} - |\psi_3\rangle_{12})}{\sqrt{2}} |V\rangle_3 + \right. \\ \left. + \beta \frac{(|\psi_4\rangle_{12} + |\psi_3\rangle_{12})}{\sqrt{2}} |H\rangle_3 - \beta \frac{(|\psi_2\rangle_{12} + |\psi_1\rangle_{12})}{\sqrt{2}} |V\rangle_3 \right)$$

Собирая вместе члены с ψ_n , получим:

$$\psi_{123} = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} |\psi_n\rangle_{12} |\varphi_n\rangle_3 \quad (22)$$

Где :

$$\begin{aligned} |\varphi_1\rangle_3 &= -\alpha |H\rangle_3 - \beta |V\rangle_3 \\ |\varphi_2\rangle_3 &= \alpha |H\rangle_3 - \beta |V\rangle_3 \\ |\varphi_3\rangle_3 &= \beta |H\rangle_3 + \alpha |V\rangle_3 \\ |\varphi_4\rangle_3 &= \beta |H\rangle_3 - \alpha |V\rangle_3 \end{aligned} \quad (23)$$

Состояние (21) является запутанным состоянием трех частиц, где каждому белловскому состоянию частиц принадлежащих Алисе, соответствует определенное одночастичное состояние третьей частицы Боба. Алиса производит измерение в белловском базисе. Для этого использует проектор:

$$\hat{A} = \sum_{n=1}^4 n |\psi_n\rangle_{12} \langle \psi_n |_{12} \quad (24)$$

Нужно понимать, что, белловское измерение запутывает частицы, даже, если до измерения они не были запутаны. Собственные значения этого оператора ($n=1,2,3,4$) нумеруют белловский базис. Проецирование состояния ψ_{123} на белловский базис в результате измерения, проведенного Алисой, приводит к одному из четырех состояний Белла $|\psi_n\rangle$ и соответствующему состоянию $|\varphi_n\rangle$ третьей частицы у Боба. Состояния третьей частицы связаны с исходным состоянием (20) соответствующими унитарными преобразованиями $U_1; U_2; U_3; U_4$. Поэтому, зная результат измерения, Алиса может сообщить Бобу, какое из перечисленных преобразований применить к его частице (третья частица), чтобы привести ее к состоянию, которое до измерения имела частица 1. Таким образом, для передачи квантового состояния необходим так же классический канал передачи информации. Важно то, что результатом квантовой телепортации является разрушение исходного состояния и теорема о запрете клонирования квантовых состояний no-cloning theorem не нарушается.

Мы не можем в рамках этой статьи вникать в многочисленные технические детали этого сложного эксперимента, однако, было бы полезно для понимания, рассмотреть простейшую схему белловского анализатора состояний (BSA), использованного в ранних экспериментах по телепортации. Здесь использовался простейший НОМ (Hong–Ou–Mandel) интерферометр, с помощью которого осуществляется интерференция второго порядка. Интерферометр представляет собой полупрозрачную пластинку (splitter) с двумя входными 1,2 и двумя выходными портами 3,4.

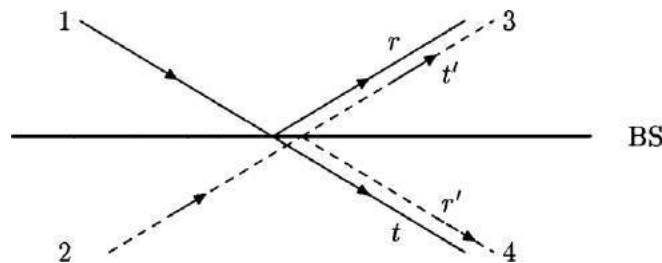


Рис.5

В выходных портах 3,4 установлены быстродействующие детекторы фотонов. Когда Алиса подает на входные порты фотоны 1 и 2, то по тому, в какие выходные порты они попадут (то есть, какие детекторы сработают), можно судить о состоянии на входе. Оказывается, что только состояние $|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle|H\rangle - |H\rangle|V\rangle)$ приводит к корреляции в выходных портах. Остальные 3 состояния дают тот самый знаменитый «*Hong–Ou–Mandel dip*». То есть, оба фотона попадают либо в порт 3, либо в порт 4. Полностью различить все 4 Белловских состояния этот метод не позволяет. Но отличить $|\psi_2\rangle$ от $|\psi_3\rangle$ или $|\psi_4\rangle$ можно, установив в портах 3, 4 дополнительные поляризаторы. Полноценный анализатор белловских состояний можно построить только, используя методы нелинейной оптики [6].

В завершение обсуждения приведем простейшую схему реализации квантовой телепортации

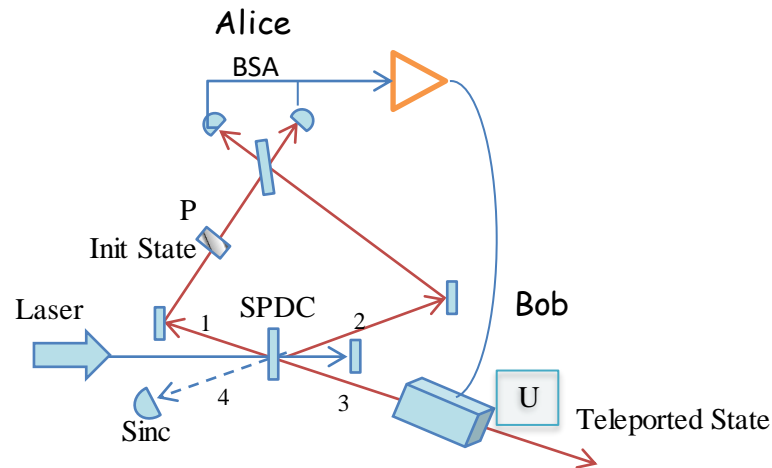


Рис.6

Ультрафиолетовый импульс, проходя через нелинейный кристалл, создает вспомогательную пару запутанных фотонов 2 и 3. Один из которых получит Боб, а другой – Алиса. После отражения тот же импульс снова проходит через нелинейный кристалл в обратном направлении, создавая другую пару запутанных фотонов 1 и 4. Фотон 1 используется для дальнейшей телепортации. Фотон же 4 используется в качестве триггера. Алиса анализирует белловское состояние пришедших к ней фотонов 1 и 2 и по классическому каналу сообщает эту информацию Бобу, который может, применив соответствующее унитарное преобразование к своему фотону, перевести его в состояние фотона 1, которого к этому моменту уже не существует, так как он был измерен Алисой.

Экспериментальная реализация квантовой телепортации поляризационного состояния фотона была осуществлена в 1997 году почти одновременно группами физиков под руководством Антона Цайлингера (Университет Инсбрука) и Франческо де Мартини (Университет Рима).

Метод запутывания фотонов, путем проецирования их на белловский базис, оказался полезным инструментом, позволившим впоследствии продемонстрировать более сложные схемы, реализующие телепортацию запутанных состояний (Entanglement swapping).

Создадим две независимые запутанные пары фотонов 1-2 и 3-4, а затем выполним измерение в Белловском базисе состояний частиц 2 и 3, так, как показано на рисунке:

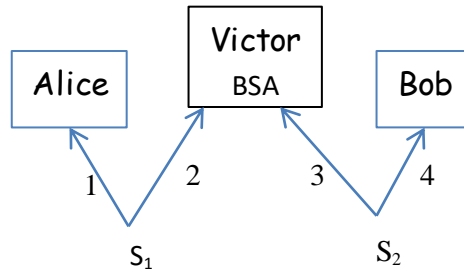


Рис.7

В результате такого измерения, запутанность между парами частиц 1-2 и 3-4 будет разрушена, однако, возникнет ранее отсутствовавшая запутанность между частицами 1-4. Здесь важно понимать то, что это «контекстуальная» запутанность, которую может распознать только Виктор, выполнивший белловское измерение частиц 2 и 3. Запутанность между частицами 1 и 4 может быть объективирована, и даже, физически перенесена на частицы 1 и 4, если Виктор сообщит о своих результатах Бобу и Алисе и один из них применит соответствующие унитарные преобразования к своим частицам в соответствии с рассмотренным выше протоколом телепортации.

Перенос запутанности впервые был осуществлен в экспериментах Zeilinger's group in 1998.[7]

Подобный «перенос запутывания» стал ключевым элементом мысленного эксперимента по запутыванию частиц во времени, предложенного Ашером Пересом (Asher Peres) в 1999 году[8] и 10 лет спустя реализованном на лабораторном столе группой физиков из Австрии [9].

Запутывание во времени

Ашер предложил, как обычно, создать две пары запутанных фотонов 1-2 и 3-4, и, как обычно, частицы 1 и 4 отправить Алисе и Бобу для немедленного измерения. Частицы же 2 и 3 Ашер предложил измерять не сразу, а только по прошествии некоторого времени. Следуя оригинальной статье, поручим это задержанное во времени измерение провести третьему экспериментатору - Виктору. Эксперимент построен так, что именно Виктор может свободно решать какое измерение выполнять над частицами. Он может измерять частицы по отдельности, а может реализовать запутывающее белловское измерение. На рисунке приведена упрощенная схема эксперимента:

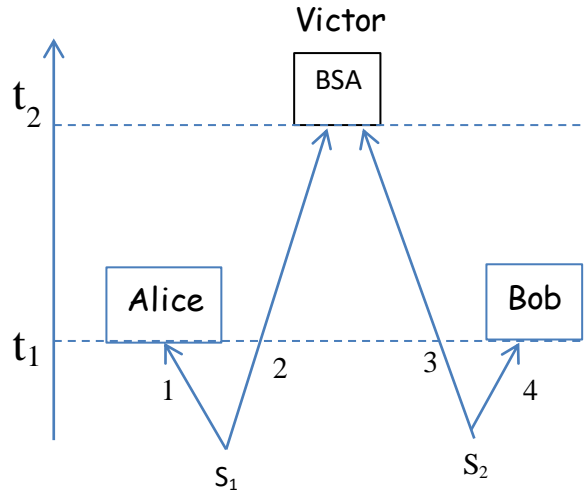


Рис.8

По сути дела, это несколько усложненный вариант классического эксперимента Уиллера с отложенным выбором (delayed choice experiment). Как выяснилось, решение Виктора, принятое им уже после измерения фотонов 1 и 4, каким то образом определяет, какие именно корреляции между частицами — квантовые или классические — обнаружат Алиса и Боб после сопоставления результатов измерений. Этот, парадоксальный эффект «влияния» действий в будущем на уже свершившиеся события был зарегистрирован в реальном эксперименте. Тут сразу же возникает законный вопрос – передается ли при этом информация из будущего в прошлое? Ответ – нет, не передается, и поэтому, причинность не нарушается. Так же, как в известном эксперименте Аспека, имеет место только корреляция между событиями, разнесенными в пространстве, здесь мы имеем корреляцию событий, отстоящих друг от друга во времени. Ни о какой передаче информации не может быть и речи. Тем не менее, не смотря на уверенность в том, что законы физики здесь не нарушаются, сам факт такого рода корреляций не может не вызывать тревогу у той части физиков, которые хотят понять природу квантовых явлений. Мы частично согласны с авторами рассматриваемой работы, утверждающими, что видимая парадоксальность квантовой механики обусловлена ошибочной точкой зрения, согласно которой квантовое состояние существует объективно. От парадоксов мы можем избавиться только ценой отказа от наивного реализма, предположив, по выражению Шредингера, что квантовое состояние это “catalogue of our knowledge”. В контексте полученных экспериментальных результатов, авторы статьи уточнили известное высказывание Бора, утверждавшего почти в духе Д.Беркли, что «ни какое явление не является явлением до тех пор, пока оно не зарегистрировано». Уточненная формулировка звучит следующим образом: «Некоторые зарегистрированные явления не имеют смысла,

если они не рассматриваются в отношении с другими зарегистрированными явлениями». Описанный эксперимент полностью подтверждает это понимание. Действительно, данные полученные Алисой и Бобом в момент времени t_1 совершенно случайны. Порядок в них может быть выявлен только в контексте данных, полученных Виктором в момент времени $t_2 > t_1$. На наш взгляд, это означает лишь то, что редукция происходит не ранее, чем, когда я сопоставляю протоколы измерений не зависимо от того, разделены ли они пространством или временем. Только здесь прерывается «цепочка фон-Неймана» [10] и происходит редукция. Это можно пояснить еще следующим образом. Здесь мы имеем дело со сложным (3-х стадийным) измерением см. рис.9. Результат, полученный Бобом и Алисой, хотя он задокументирован и осознан каждым из них, является только частью сложного измерения, которое завершается уже на макроскопическом уровне, сопоставлением результатов всех трех наблюдателей – Алисы, Боба и Виктора.

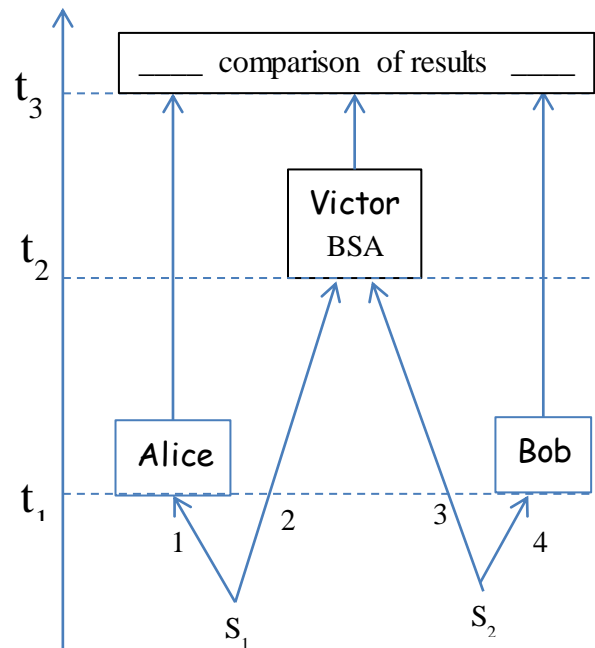


Рис.9

До того, как Виктор произвел измерение, вообще нельзя утверждать, что результаты измерений Алисы и Боба имеют какой-то смысл. Смысл они обретают только в контексте измерения Виктора. С несколько более простой, но похожей ситуацией мы уже сталкивались при рассмотрении простого ЭПР эксперимента в интерпретации Эверетта. Конечно, говоря о «смысле» мы выходим за рамки физики. Однако, здесь философская категория смысла может быть формализована на основе представления о корреляции состояний сознания (памяти) наблюдателя.

О чем свидетельствует квантовая механика?

Несомненно, полученный Ашером результат затрагивает очень глубокие вопросы связанные с сознанием, свободой воли и т.д. Авторы статьи [7] обозначают свое понимание проблемы, провоцирующим обсуждением, как они сами пишут, «конспирологического» варианта возможного отсутствия свободы выбора у наблюдателя - Виктора. Действительно, полученные корреляции могут быть следствием того, что выбор Виктора не свободен, а определяется событиями измерения, осуществленными Алисой и Бобом в прошлом. Это понимание сводится к формально не противоречивой, но крайне не естественной в ее наивной формулировке, концепции сверхдетерминизма [11]. Не сложный анализ показывает, что, если мы хотим сохранить свободу воли, то будем вынуждены призвать на помощь еще более странную гипотезу, предположив, что прошлое ретроспективно фундируется этим свободным выбором, подстраиваясь под него.

Казалось бы, выхода нет, и эксперимент Ашера ставит нас перед выбором принятия либо «конспирологического» варианта сверхдетерминизма, либо акаузального влияния будущего на прошлое.

Но, как мы уже говорили, к этим парадоксальным выводам, приводит объективация результатов измерений, на которую, как нам кажется, мы имеем право, ибо после момента $t > t_2$ квантовые измерения уже завершены, и мы имеем «твердые копии» результатов измерений в виде распечаток, магнитных записей и т.д. Эти твердые копии не менее реальны чем носки Берглмана, которые, конечно же не могут самопроизвольно менять свой цвет или же перескакивать с одной ноги на другую. Однако, как мы уже не раз отмечали, процесс сравнения результатов измерений разными наблюдателями, не смотря на макроскопичность, должен рассматриваться в рамках квантовой механики. Такой подход реализуется, в частности, в концепции Эверетта. При таком подходе нельзя утверждать, что к моменту времени t_3 все процессы завершены, и мы просто подводим итоги эксперимента. Согласно теории Эверетта, именно в этот момент и *конституируется* реальность корреляции, что, конечно же, сразу снимает все парадоксы, связанные с каузальностью. Следует так же отметить, что при последовательном рассмотрении подобных экспериментов в рамках интерпретации Эверетта, говорить об объективной реальности и объективных результатах измерений бессмысленно, ибо для каждого из наблюдателей возникает своя внутренне согласованная классическая реальность.

Квантовая физика, как бы мы не сопротивлялись этому, вплотную подошла к психологии. Этим открытие квантовой механики в корне отличается от всей предшествующей истории естественных наук, много веков, гордо несших титул объективных. Но времена меняются... *O tempora! O mores!* Еще фон Нейман, размышляя над сущностью измерения, пришел к выводу, что, цепочка, включающая в себя измерительный прибор, стрелку прибора, глаз наблюдателя, зрительный нерв, нейронные структуры мозга, в конечном

счете, уходит в никуда.... Нет той границы, где физический процесс превращается в осознанный факт. В этой связи Нейман говорил об абстрактном «Я» наблюдателя, не имеющем материального носителя. Квантовая механика не решает проблему наблюдателя. Она только ставит ее. Но она дает нам все предпосылки для ее решения, показывая теоретически и демонстрируя экспериментально, что физическая реальность не существует сама по себе, но конституируется в сознании того самого фон Неймановского абстрактного наблюдателя. Сегодня уже нет сомнения в том, что парадигма объективного реализма входит в противоречие с квантовой механикой и экспериментально установленными фактами.

Мы, конечно не станем спорить с вами, уважаемый читатель, если у вас возникнет желание расширить само понятие физической реальности, включив в него наблюдателя. Но тогда, мы должны предупредить вас, что такая реальность уже не будет объективной и обретет все признаки психической реальности.

Литература

[1] *Avshalom C. Elitzur(a) and Lev Vaidman*, QUANTUM MECHANICAL INTERACTION-FREE MEASUREMENTS
arXiv:hep-th/9305002v2 5 May 1993

[2] *Paul Kwiat, Harald Weinfurter, Thomas Herzog, Anton Zeilinger, and Mark A. Kasevich*. Interaction-Free Measurement; Phys. Rev. Lett. 74, 4763 – Published 12 June 1995

[3] *Bell J. S. (1980)*, Bertlmann's socks and the nature of reality, *Paris: Fondation Hugot du Collège de France*.

[4] *Aspect A, Dalibard J, Roger G (1982)* Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. Phys. Rev. Lett. 49:1804-1807.

[5]. *C. H. Bennett., Brassard G., et al.* Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels // Physical Review Letters : журнал. — 1993. — Т. 70, вып. 13. — DOI:10.1103/PhysRevLett.70.1895

[6] *Y.-H. Kim, S. P. Kulik, and Y. Shih*, Phys. Rev. Lett. 86, 1370 (2001) .

[7] *J.-W. Pan, D. Bouwmeester, H. Weinfurter & A. Zeilinger*, Experimental entanglement swapping: Entangling photons that never interacted, Phys. Rev. Lett. 80 (18), 3891-3894 (1998). Abstract.

[8] *Asher Peres*. Delayed choice for entanglement swapping. arXiv:quant-ph/9904042v1 11 Apr 1999

[9] *Xiao-song Ma, Stefan Zotter, Johannes Kofler, Rupert Ursin*, Thomas Jennewein, Časlav Brukner, and Anton Zeilinger. Experimental delayed-choice entanglement swapping. *Nature Physics* 8, 479–484 (2012) doi:10.1038/nphys2294

[10] *Иоганн фон Нейман*, Математические принципы квантовой механики. — М.: Наука, 1964.

[11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Superdeterminism>