
КВАНТОВЫЕ ПАРАДОКСЫ И КОНЦЕПЦИЯ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ

А.В. Белинский

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Необычное поведение квантовых объектов в традиционно понимаемом пространстве-времени до сих пор не нашло убедительного и исчерпывающего объяснения. Квантовая нелокальность и отсутствие априорных значений измеряемых величин (см., напр., [1]) наводят на мысль поиска их происхождения в фундаментальных физических парадигмах. Даже в ставшей уже классической схеме двухщелевой интерференции одиночных фотонов (или других квантовых частиц) наивно полагать, что фотонное поле «летит» от источника к экрану, проникает через одну и/или другую щель и, наконец, достигает регистратора. Более рельефно абсурдность полевой модели проявляется в интерференционном эксперименте третьего порядка, или в так называемой трехфотонной интерференции [1; 2]. Рассмотрим ее подробнее.

Отсутствие априорного значения числа фотонов до момента их регистрации. Пусть источник света освещает приемник (рис. 1). Постепенно уменьшая интенсивность света, достигаем режима счета фотонов, когда приемник регистрирует минимально возможные порции энергии – кванты. Принято считать, что фотоотсчетам (всплескам фототока приемника) соответствует прибытие фотонов. Но так ли это? Существуют ли кванты в самом световом поле? Приемник измеряет количество фотонов в поле, но существует ли определенное значение этого количества до момента измерения?



Рис. 1. Схема прямого детектирования

Будем повторять эксперимент многократно. Источник можно сделать таким, что в одних повторениях (реализациях) регистрируется по одному фотону, а в других – по два. Например, регистрация излучения идеального лазера со средним числом испускаемых в единицу времени фотонов равным единице, приведет к следующим результатам. Ни одного либо один фотоотсчет будут появляться с вероятностью 0,37; два фотоотсчета – реже – с вероятностью 0,18; три – 0,06, а четыре – вообще один из ста. Это связано с пу-

ассоновской статистикой фотоотчетов когерентного квантового состояния. Что при этом представляет собой световое поле? Казалось бы, то единичные, то парные, то тройные и т. д. фотоны. Однако можно экспериментально доказать, что это не так.

Рассмотрим схему эксперимента по наблюдению интерференции 3-го порядка с использованием эффекта параметрического преобразования света с изменением частоты (рис. 2). Пучок света с частотой f_c в прозрачном нелинейном кристалле с квадратичной нелинейностью (пьезокристалле) порождает два пучка излучения – сигнальный и холостой с частотами f_a и f_b , причем $f_a + f_b = f_c$. Эффективность преобразования накачки (c) в сигнальный и холостой пучки мала: порядка 0,000001%. Поэтому основная доля излучения накачки проходит через прозрачный кристалл, на выходе которого три пучка излучения. Во все три компоненты поля вносятся регулируемые сдвиги фаз Φ_a , Φ_b и Φ_c , после чего они вновь взаимодействуют во втором, точно таком же, нелинейном кристалле. Последний осуществляет обратное преобразование сигнального и холостого пучков в излучение на частоте накачки и прямое преобразование прошедшей первый кристалл накачки. Детекторы на выходе оптической схемы регистрируют интенсивности всех трех пучков. На рис. 2 изображен невырожденный случай, когда пучки неколлинеарны.

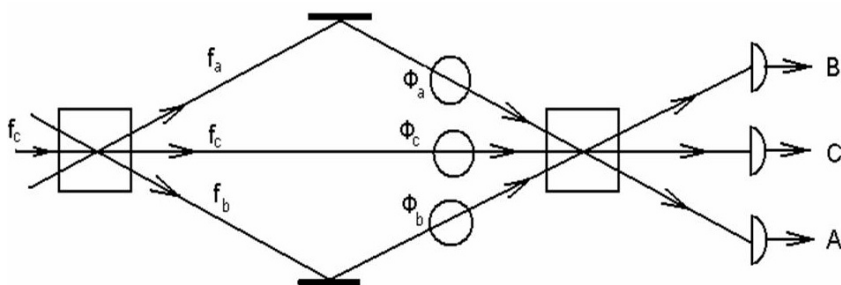


Рис. 2. Схема интерференционного эксперимента, доказывающего априорное несуществование измеряемых величин

Осветим первый кристалл одиночным фотоном.

В [1; 2] показано, что вероятность появления фотоотчетов на детекторе A пропорциональна $1 + \cos(\Phi_a + \Phi_b\Phi_c)$. Это выражение можно интерпретировать как интерференцию с фазой $\Phi = \Phi_a + \Phi_b\Phi_c$. Неучтенный коэффициент пропорциональности определяется эффективностью нелинейного преобразования в кристаллах. Соответствующий интерференционный эксперимент проведен авторами работы [3], и косинусная зависимость от суперпозиции фаз подтверждена.

Попытаемся интерпретировать этот результат в рамках наглядной модели с априори (до момента регистрации детектором) определенным числом фотонов на выходе первого кристалла. Для простоты полагаем квантовую эффективность детекторов равной единице.

В первой серии испытаний убираем второй нелинейный кристалл. При этом фазовые задержки в каналах не влияют и наблюдаются отсчеты или одновременно в обоих детекторах A и B , или в детекторе C . Эта картина согласуется с предположением, что на выходе первого кристалла имеется попеременно то один фотон с частотой f_c , то пара фотонов с частотами f_a и f_b .

Во второй серии испытаний устанавливаем второй кристалл. При этом все три фазы Φ_a , Φ_b и Φ_c влияют на вероятности отсчетов.

Интерференция с единичной видностью, описываемая законом

$$1 + \cos(\Phi_a + \Phi_b \Phi_c),$$

свидетельствует о том, что – изменяя фазовую задержку любой компоненты поля – Φ_a , Φ_b или Φ_c – можно полностью подавить фотоотсчеты (при $1 + \cos(\Phi_a + \Phi_b \Phi_c) = -1$). Сделаем это, и на детекторе A фотоотсчетов не будет. Перекроем свет в промежутке между кристаллами в канале C . Появляются фотоотсчеты в канале A – их вероятность ненулевая. Следовательно, если бы хоть в одной реализации схемы со всеми тремя открытыми каналами отсутствовало поле в канале C , то вероятность фотоотсчетов в детекторе A была бы ненулевой. А она нулевая! Итак, поле в канале C (одиночные фотоны накачки) присутствует в *каждой* реализации. Аналогично, перекрывая свет в других каналах, доказываем одновременное присутствие в *каждой* реализации поля в каналах A и B (парных фотонов). Другими словами, если бы при всех открытых каналах в каких-либо реализациях поле отсутствовало, по крайней мере, в одном из каналов, то вероятность фотоотсчетов на детекторе A была бы ненулевой. Значит, поле присутствует в *каждой* реализации во всех трех каналах A , B и C между кристаллами. Об этом свидетельствует и косинусная зависимость $1 + \cos(\Phi_a + \Phi_b \Phi_c)$ вероятности фотоотсчетов от линейной комбинации всех трех фаз: ее нельзя представить в виде суммы вероятностей $P(\Phi_a, \Phi_b)$ и $P(\Phi_c)$. Хотя в эксперименте [3] эта гармоническая зависимость наблюдалась с некоторым постоянным фоном, так что «нулей», строго говоря, не было, последний аргумент не теряет силы.

Таким образом, в поле между кристаллами одновременно должны присутствовать все три фотона. Но это противоречит закону сохранения энергии, поскольку на вход интерферометра подавался один фотон накачки, энергия которого вдвое меньше энергии трех фотонов. Такой эксперимент интерференции поля в состоянии с определенной энергией и неопределенным числом фотонов противоречит модели с определенным априори числом фотонов.

Попробуем объяснить этот результат в рамках полевой модели близкого действия, предполагая существование и интерференцию неких полевых конгломератов, представляющих собой «части фотонов», в сумме дающих постоянное значение энергии поля. В этом случае придется признать, что в схеме на рис. 2 в свободном пространстве между кристаллами присутствуют

все три таких «части фотона» (поскольку поле одновременно должно присутствовать во всех трех каналах). Тогда в первой серии эксперимента (с изъятым вторым кристаллом) эти «части фотонов» при детектировании случайным образом мгновенно складываются то в один, то в два фотона. Но между тремя детекторами можно установить непрозрачные стенки. Как в таком случае поле мгновенно сложится то в один, то в два фотоотсчета? Похоже, что полевая модель близкого действия не может справиться с этой задачей.

На вход подаются единичные фотоны на частоте f_c . Вероятность фотоотсчетов на детекторе А пропорциональна $1 + \cos(\Phi_a + \Phi_b - \Phi_c)$, что свидетельствует об одновременном присутствии поля во всех трех каналах, то есть всех трех фотонов в случае их существования до момента детектирования (точнее, после первого кристалла). Но энергии одного входного фотона достаточно лишь на половину энергии трех фотонов!

Квантовая нелокальность. Рассмотрим эксперимент с интерферометром Маха–Цендера (рис. 3). Подадим на него однофотонное состояние и уберем вначале второй светоделитель, расположенный перед фотодетекторами. Детекторы будут регистрировать одиночные фотоотсчеты либо в одном, либо в другом канале, и никогда оба одновременно, так как на входе – один фотон.

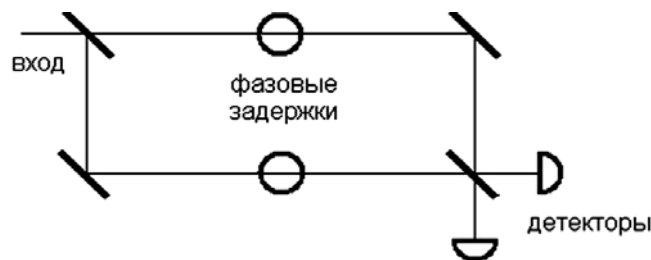


Рис. 3. Схема интерферометра Маха–Цендера

Вернем светоделитель. Вероятность фотоотсчетов на детекторах описывается гармонической функцией $1 \pm \cos(\Phi_1 - \Phi_2)$, где Φ_1 и Φ_2 – фазовые задержки в плечах интерферометра. Знак зависит от того, каким детектором ведется регистрация. Эту гармоническую функцию нельзя представить в виде суммы двух вероятностей $P(\Phi_1) + P(\Phi_2)$. Следовательно, после первого светоделителя фотон присутствует как бы в обоих плечах интерферометра одновременно, хотя в первом акте эксперимента он находился только в одном плече. Это необычное поведение в пространстве и носит название *квантовой нелокальности*. Ее нельзя объяснить с позиций привычных пространственных интуиций здравого смысла, обычно присутствующих в макромире. Причина, по-видимому, состоит в том, что векторы квантовых состояний принадлежат гильбертову векторному пространству, для которого пространственная локальность вовсе не является обязательной. Кроме того,

совершенно очевидно, что попытки интерпретации эксперимента посредством полевой модели ближкодействия с «частями» фотонов, как и в предыдущем случае, ведут к абсурду.

Вот еще один пример квантовой нелокальности (рис. 4) [4].

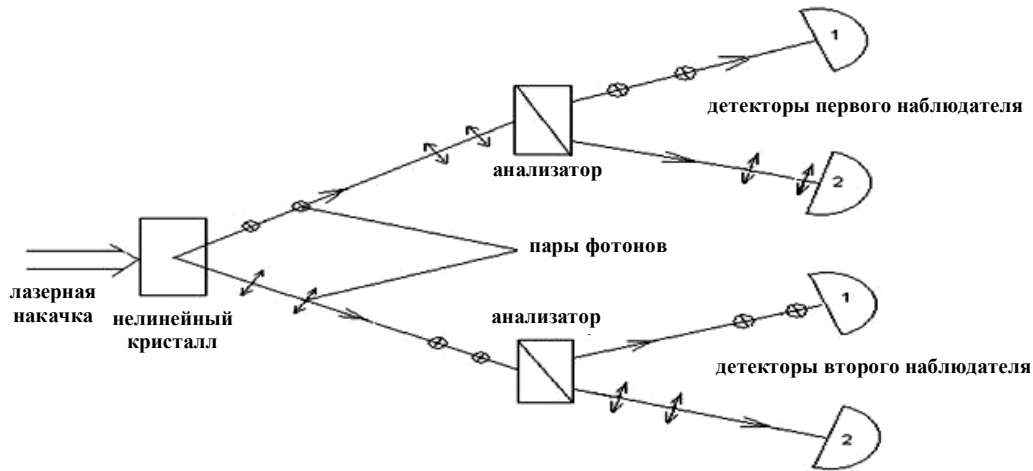


Рис. 4. Эксперимент с парами одновременно испускаемых фотонов

При том что на рис. 4 у фотонов показаны определенные поляризации, реально до момента регистрации хотя бы одного фотона ни у одного из фотонов пары нет определенной поляризации. Тем не менее их поляризации всегда оказываются взаимно ортогональными. В момент регистрации одного из фотонов пары происходит мгновенное изменение состояния второго фотона – он получает определенную поляризацию.

В некоторых кристаллах реализуется так называемый второй тип параметрического взаимодействия, когда фотоны плоско-поляризованного лазерного света распадаются на пары рассеянных фотонов с взаимно ортогональными поляризациями. Рождение пары происходит одновременно, но поляризация каждого фотона заранее неизвестна. Например, один из пары может после анализатора попасть на детектор 2 первого наблюдателя, что соответствует поляризации в плоскости рисунка, тогда как второй фотон при этом *необходимо* попадет на детектор 1 второго наблюдателя, что соответствует взаимно ортогональной его поляризации. С вероятностью 1/2 может наблюдаться взаимно обратная ситуация (сработает детектор 1 первого наблюдателя, и 2 – второго). Если интерпретация результатов эксперимента, описанного в первом подразделе, правильна, то можно считать, что *априори*, то есть до момента регистрации хотя бы одного из фотонов пары, определенной поляризации каждого из фотонов пары не существовало. В момент же регистрации – срабатывания детектора в одном из каналов – происходит так называемая редукция квантового состояния: если второй фотон пары еще не достиг детектора, то с вероятностью единица он приобретает поляри-

зацию, взаимно ортогональную зарегистрированной у первого. Согласно общепринятому мнению, подтвержденному экспериментально, редукция происходит мгновенно (конечно, в пределах возможностей экспериментаторов). Фотоны пары могут разлететься на несколько километров друг от друга, но «информация» о результате детектирования первого фотона мгновенно изменяет квантовое состояние второго: оно становится состоянием с определенной поляризацией.

Можно ли при этом говорить о сверхсветовой скорости передачи информации при помощи параметрического рассеяния света? По-видимому, это невозможно. Дело в том, что для функционирования линии связи между удаленными наблюдателями пар фотонов, они, помимо детекторов, должны еще располагать и «телефоном», ибо, не имея сведений о результате детектирования первого фотона, наблюдатель второго видит фактически случайный сигнал с равновероятной (1/2) поляризацией.

Очевидно, также, что полевая модель близкого действия не может объяснить мгновенную (без запаздывания) редукцию квантового состояния.

Парадокс Белла. В несколько упрощенном виде вариант одного из экспериментов по проверке теоремы Белла для двух наблюдателей представлен на рис. 5.

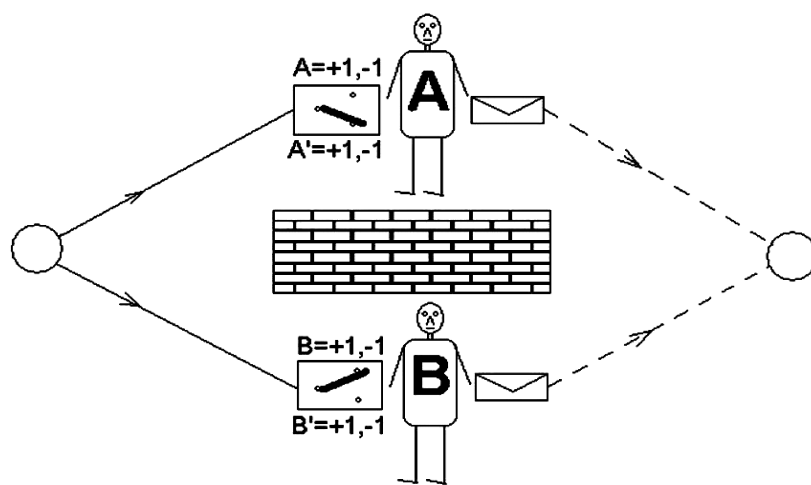


Рис. 5. Схема эксперимента проверки неравенства Белла

Источник света одновременно испускает пары фотонов, один из которых направляется к первому наблюдателю – А, а второй – к В. У каждого наблюдателя имеется измерительный прибор, регистрирующий фотоны. Он может работать в двух режимах (символически это показано в виде двух положений переключателя, аналогично переключателю диапазонов радиоприемника). Прибор устроен так, что в результате регистрации фотона мы получаем бинарную информацию типа «да–нет». Удобнее обозначить результат измерения как +1 либо –1. Наблюдатели ведут протокол измерений, в

котором они указывают время регистрации фотона и результат регистрации (+1 или -1). Если регистрация произошла в режиме «верхнего» положения переключателя, то результат +1 у первого наблюдателя записывается как $A = +1$, если в режиме «нижнего» положения, то $A' = +1$. Аналогично у второго наблюдателя. Между собой наблюдатели не сообщаются (символически – между ними кирпичная стена). Протоколы измерений они направляют координатору (кружок справа). Координатор берет результаты одновременных измерений и составляет из них произведения типа AB или AB' (всего четыре варианта) в зависимости от режима, в котором происходила регистрация. Предварительно план эксперимента согласуется с наблюдателями: когда им следует производить переключения режимов. Эти произведения усредняются, и из них составляется так называемое неравенство Белла: $S = (\langle AB \rangle + \langle A'B \rangle + \langle AB' \rangle - \langle A'B' \rangle) / 2$ по абсолютной величине не превосходит единицы. Угловыми скобками обозначена операция усреднения.

Вывести неравенство Белла очень просто [5]. Предположим, что результат измерения каждого акта испускания фотонных пар полностью предопределен источником в момент их испускания, и источник не подвержен какому-либо влиянию со стороны измерительных приборов и наблюдателей. Тогда все возможные результаты измерений (значения A , A' , B и B') предопределены. Поскольку их значения равны +1 или -1, величина S также равна +1 или -1, соответственно, и усреднение не может вывести S из интервала $[-1, +1]$.

При определенных условиях неравенство Белла может нарушаться (см., напр., [6–12]). Это означает, что фотоны пары ведут себя не как независимые объекты, но как коррелированная система, то есть результат регистрации фотона у первого наблюдателя (+1 или -1) как бы моментально становится «известен» второму фотону, хотя они могли уже разлететься на очень большое расстояние. Например, в экспериментах [9; 10] расстояние между наблюдателями А и В составляло более 10 км. Использовалась так называемая схема интерференции Франсона, в которой каждый наблюдатель принимает фотон на вход интерферометра Маха–Цендера. Разность хода в плечах этих интерферометров выбиралась большей длины когерентности, так что обычная однофотонная интерференция, которая обсуждалась в начале раздела о квантовой нелокальности (см. рис. 3), отсутствовала. Тем не менее квантовая корреляция между разлетевшимися на 10 км фотонами оставалась и неравенство Белла нарушалось.

Этому факту существует несколько объяснений. Первое – состоит в формальном утверждении, что измеряемых значений параметров фотонов просто не существует. Это концепция отсутствия априорных значений параметров. Однако при этом невыясненным остается вопрос о природе связи между параметрами, которых не существует!

Второе объяснение привлекает таинственную взаимосвязь неизвестной природы между разлетающимися фотонами, происходящую мгновенно между пространственно удаленными объектами, – это квантовая нелокальность, о которой упоминалось выше.

Третье – предполагает, что одна из пары разлетающихся частиц «живет» в «отрицательном времени» – из будущего в прошлое. Это означает, что она рождается в детекторе и летит к источнику. В момент встречи в источнике рождается вторая частица. Поскольку первая для нас существует как на киноплёнке, запущенной в обратную сторону, нам кажется, что обе частицы рождаются одновременно в источнике.

Но на описанные эксперименты можно взглянуть иначе. В приведенных умозаключениях использовались традиционно понимаемые пространство и время, в которых в рамках концепции близкодействия реально существует световое поле. Эти послышки, однако, принимаются не всеми физиками. Например, в монографиях профессора Московского университета Ю.С. Владимирова [13; 14] развивается теория, согласно которой всеобщего пространства и времени в микромире не существует. Такой подход, как представляется, разрешает квантовые парадоксы, поскольку снимается само понятие *априорности* в отсутствие времени в микромире. Время (и пространство) возникает лишь как результат некоторого усреднения «индивидуальных времен» большого количества элементарных частиц, характерного уже для макрообъектов. При этом успешно может быть использована концепция дальнего действия.

Для нас же важно и то, что в настоящее время серьезно обсуждаются возможности существования объектов вне пространства-времени, и что пространство-время в макромире можно вводить не аксиоматически, а выводить из более фундаментальных понятий. Еще раз в этой связи подчеркнем, что векторы квантовых состояний, принадлежащие гильбертову векторному пространству, не подвержены стандартным пространственно-временным ограничениям.

Теорема Белла с учетом потерь. Нарушение неравенства Белла, зарегистрированное в экспериментах [6], опровергающее теорию скрытых параметров, подверглось последующей критике, поскольку наличие потерь позволяет эти результаты формально объяснить локальной теорией скрытых параметров (см., напр., [7; 8] и цитируемую там литературу). В [1; 15; 16] показана возможность реабилитировать эксперименты [6].

Последние примерно 10 лет ведутся довольно интенсивные дорогостоящие попытки экспериментального опровержения теории скрытых параметров в схемах с высокоэффективными детекторами (см., напр., [12]). Изложенные в [1; 15; 16] соображения позволяют снизить требования к квантовой эффективности детекторов для экспериментального опровержения локальной теории скрытых параметров.

Квантовый парадокс Зенона. Этот парадокс формулируется так [17]: повторяющееся (в пределе – непрерывное) измерение квантовой системы препятствует ее переходу в другое состояние. Другое его название – *эффект сторожевой собаки*. Он выводится из квантовой теории измерений, в частности из постулата фон Неймана. С одной стороны, это звучит неожиданно,

поскольку, например, наблюдая за Луной, вряд ли можно ожидать изменения ее траектории. Но, с другой стороны, и в обыденной жизни мы знаем, что если напряженно, не отрывая глаз, ждать, когда закипит чайник, ожидание покажется бесконечным, как и сверление больного зуба, хотя, казалось бы, надо потерпеть чуть-чуть.

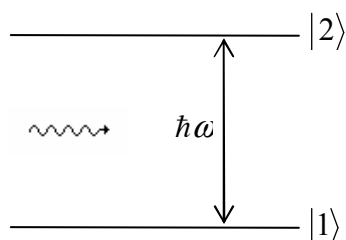


Рис. 6. Двухуровневый атом в поле резонансного излучения

В качестве простого примера рассмотрим в начале двухуровневый атом, то есть имеющий две электронные орбиты: нижнюю – стабильную, и верхнюю, соответствующую возбужденному состоянию, которое через некоторое время переходит в стабильное, что сопровождается излучением фотона света с частотой резонансного излучения (рис. 6). Если теперь осветить этот атом извне таким же резонансным излучением, то

электрон атома начинает периодически переходить с нижней орбиты на верхнюю и обратно. При этом говорят, что атом гармонически осциллирует между уровнями с так называемой частотой Раби Ω .

Теперь произведем измерение состояния атома. Пусть в результате измерения через небольшой промежуток времени Δt с момента $t = 0$, когда атом находился в основном состоянии, мы установим, что атом продолжает находиться в основном (нижнем) состоянии. Тогда эволюция начнется снова – уже не с момента времени $t = 0$, а с $t = \Delta t$, то есть измерение приведет к задержке по времени на Δt . Если за атомом наблюдать непрерывно ($\Delta t \rightarrow 0$), то эволюция атома вообще прекратится, несмотря на наличие резонансного излучения. Правда, в реальном эксперименте этого добиться трудно, а вот существенное замедление эволюции зарегистрировано [18].

Итак, в противовес формальной логике мы получили несомненную зависимость динамики объекта от наличия наблюдателя, производящего измерение. Но как произвести такое наблюдение? Можно взять атом с тремя уровнями [19], расположенными в соответствии с рис. 7. По наличию излучения, соответствующего переходу $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$, можно заключить о том, что атом находился в возбужденном состоянии.

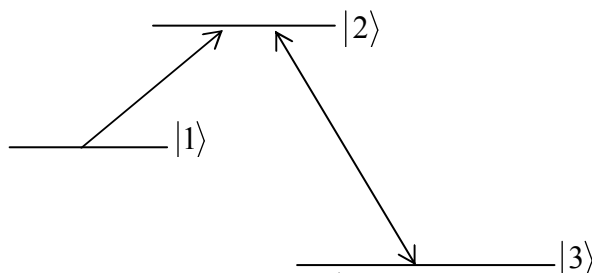


Рис. 7. Трехуровневая Λ -конфигурация

Уровень $|2\rangle$ нестабильный и может спонтанно распадаться на уровень $|3\rangle$, который никак более не участвует в динамике системы. Исходно атом приводится в состояние $|1\rangle$. Резонансное излучение на частоте перехода $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ может перевести

атом в состояние $|2\rangle$, однако вероятность этого перехода уменьшается с ростом эффективности спонтанного перехода $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$, который является измерением состояния атома по регистрации спонтанных фотонов на частоте ω_{23} .

Каким же будет результат подобного эксперимента? Система «замораживается» на уровне $|1\rangle$ при наличии возможности ее моментального перехода (измерения) с уровня $|2\rangle$ на уровень $|3\rangle$. Это пример реализации парадокса Зенона при непрерывном измерении – слежении за испусканием спонтанных фотонов на частоте ω_{23} . Хотя самого слежения фактически может и не быть. Важно, что имеется потенциальная возможность такого слежения. Еще раз остановимся на необычности эффекта. Мы имеем возможность двух последовательных переходов: $|1\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |3\rangle$. Казалось бы, чем «легче» переход $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$, тем лучше для всего каскада двух процессов. Но это не так: переход $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ тормозит переход $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$, то есть переходы не являются статистически независимыми. Здесь мы вновь сталкиваемся с парадоксальной, с точки зрения житейского опыта, ситуацией, когда возможность наблюдения за системой кардинально меняет ее поведение, а в последовательном каскаде двух, казалось бы, независимых процессов второй по времени может радикально влиять на первый. В этом необычном поведении системы во времени можно усмотреть и нарушение причинности.

Кроме того, объект наблюдения и измеритель в рассмотренных иллюстрациях квантового парадокса Зенона образуют неделимую, с точки зрения результата эксперимента, систему, то есть представляют собой так называемый *холон* [20]. Холоном является и каскад двух последовательных процессов $|1\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |3\rangle$. Следовательно, холоны могут связывать воедино не только пространственно разделенные объекты, но и процессы, происходящие в разные моменты времени. Здесь можно, по-видимому, говорить о своего рода «дальнем действии во времени», когда начальное и конечное состояния системы оказываются как бы связанными между собой без посредника – промежуточного состояния.

Еще раз подчеркнем, что концепция дальнего действия не только дает более разумное представление о происходящем, но и стимулирует поиски более фундаментальной физической реальности, нежели пространство-время, на основании которой это пространство-время может быть получено «на кончике пера», поскольку традиционно понимаемые пространство-время макромира не вмещают парадоксального поведения квантовых объектов [21].

ЛИТЕРАТУРА

1. Белинский А.В. Квантовые измерения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
2. Belinskii A.V., Klyshko D.N. // Laser Physics. – 6, 1082. – 1996.
3. Burlakov A.V., Chekhova M.V., Klyshko D.N., Kulik S.P., Penin A.N., Shih Y.H., Strekalov D.V. // Phys. Rev. A. – 1997. – 56, 3214.
4. Belinskii A.V. // Laser Physics. – 2002. – 12, 939.

5. Клышко Д.Н. // УФН. – 1994. – 164, 1187.
6. Aspect A., Grangier P., Roger G. // Phys. Rev. Lett. – 1981. – 47, 460; Aspect A., Dalibard J., Roger G. // Phys. Rev. Lett. – 1982. – 49, 1804.
7. Белинский А.В. Письма // ЖЭТФ. – 1996. – 64, 294.
8. Белинский А.В. // УФН. – 1997. – 167, 323.
9. Tittel W., Brendel J., Gisin B., Zbinden H., Gisin N. // Phys Rev. A. – 1998. – 57, 3229.
10. Tittel W., Brendel J., Zbinden H., Gisin N. // Phys Rev. Lett. – 1998. – 81, 3563.
11. Kwiat P.G. et.al. // Phys Rev. A. – 1999. – 60, 773.
12. Brida G. et.al. // Phys. Lett. A. – 2000. – 268, 12.
13. Владимиров Ю.С. Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. 1: Теория систем отношений. – М.: МГУ, 1996.
14. Владимиров Ю.С. Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. 2: Теория физических взаимодействий. – М.: МГУ, 1998.
15. Белинский А.В. // УФН. – 2003. – 173, 905.
16. Белинский А.В. // Оптика и спектроскоп. – 2004. – № 5. – 96, 732.
17. Misra B., Sudarshan E.C.G. // J. Math. Phys. – 1977. – № 18. – P. 756.
18. Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J. et. al. // Phys. Rev. A. – 1990. – 41, 2295.
19. Менский М.Б. Квантовые измерения и декогеренция. – М.: Физматлит, 2001.
20. Московский А.В. От метафизики к физике // Седьмые Международные Рождественские образовательные чтения. Христианство и наука: Сборник докладов Конференции. – М.: Просветитель, 2000. – С. 196–204; Московский А.В. Существует ли научная альтернатива дарвиновской концепции эволюции // Девятые Международные Рождественские образовательные чтения. Христианство и наука: Сборник докладов Конференции. – М.: Просветитель, 2001 – С. 297–321; Московский А.В. Квантовая телепортация: От физики к метафизике // Десятые Международные Рождественские образовательные чтения. Христианство и наука: Сборник докладов Конференции. – М.: Просветитель, 2003. – С. 341–356.
21. Белинский А.В. Квантовые парадоксы и кризис традиционно понимаемой концепции пространства-времени // Основы физики и геометрии. – М.: РУДН, 2008. – С. 75–88.