

A POSSIBLE ORIGIN OF QUANTUM CORRELATIONS

(русская версия статьи)

О ВОЗМОЖНОЙ ПРИРОДЕ КВАНТОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

А. В. Белинский¹, М.Х. Шульман²

Аннотация

Статья посвящена попытке устранения конфликта между теорией относительности и квантовой механикой. Согласно нашей гипотезе, “мгновенная” корреляция между запутанными взаимно-удаленными квантовыми частицами может быть объяснена тем, что в лабораторной системе отсчета (ЛСО) время движения фотона конечно, тогда как длительность его т.н. *собственного* времени движения (в вакууме) равна нулю. В последнем случае в качестве одновременных могут рассматриваться события, разделенные в ЛСО произвольными конечными расстояниями; таким образом, свойство нелокальной корреляции фотонов оказывается относительным и может быть объяснено аналогично известному парадоксу близнецов в теории относительности. При этом между такими коррелированными частицами в ЛСО нет стандартного причинно-следственного взаимодействия, но возникает специфическое взаимовлияние строго колебательного характера без направленной передачи энергии и информации. Сформулированы также аргументы в пользу обобщения основной гипотезы на квантовые частицы, обладающие ненулевой массой.

Ключевые слова: теория относительности; квантовая механика; корреляция; парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена; сверхсветовая скорость; релятивистская причинность; запутанное состояние.

PACS: 03.65.UJ

1. Введение

В настоящее время распространено убеждение, что теория относительности (ТО) запрещающая сверхсветовую скорость физического взаимодействия, конфликтует с квантовой механикой (КМ), из которой следует возможность практически “мгновенной” корреляции на сколь угодно больших расстояниях (парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена). Последнее многократно подтверждено экспериментами (см. например, [1, 2]). Как указал в 1990 г. Дж. Белл в своем докладе [3]:

Мы имеем дело со статистическими предсказаниями квантовой механики, и они кажутся верными. Эти корреляции прямо-таки вопиют об объяснении, а мы не можем его дать.

Далее Белл высказывает надежду:

¹ E-mail: belinsy@inbox.ru

² E-mail: shulman@dol.ru

<...> здесь, как мне кажется, мы имеем временное затруднение. Ему, правда, шестьдесят лет, но в масштабах длительности существования человечества это очень небольшое время. Я думаю, что проблемы и загадки, с которыми мы здесь встречаемся, будут решены, и мы снова сможем смотреть на них с тем же чувством превосходства, или наши потомки будут смотреть на них с тем же чувством превосходства, с которым мы смотрим на людей конца девятнадцатого века, которые волновались по поводу эфира. А опыт Майкельсона-Морли... , загадки казалась им неразрешимыми. И вот в тысяча девятьсот пятом году пришел Эйнштейн, и теперь каждый школьник изучает это и чувствует <..>. свое превосходство над этими тогдашними парнями. Сейчас я чувствую, что все эти дела с действием на расстоянии и отсутствием действия на расстоянии разрешатся сходным образом. Кто-то придет с ответом, с подходящей точкой зрения на эти вещи. Если удача нам улыбнется, это станет новым большим шагом типа теории относительности. Может быть, кто-то просто укажет нам на наше недомыслие, и это не приведет к новым прорывам. Но, так или иначе, я верю, что вопрос будет решен.

Ниже мы рассматриваем примеры нелокальных явлений в физике и показываем, как, с нашей точки зрения, соответствующие парадоксы КМ могут быть объяснены именно на основе ТО.

2. “Галактический” парадокс Уилера

Уилер предложил [4] такой мысленный эксперимент (рис.1). Пусть удаленный квазар испускает фотон, миллиарды лет летящий к Земле. По дороге этот фотон огибает огромную галактику, которая и является причиной искривления пути фотона. В конечном счете свет попадает на вход установленного на Земле телескопа, снабженного интерферометром Маха-Цендера.

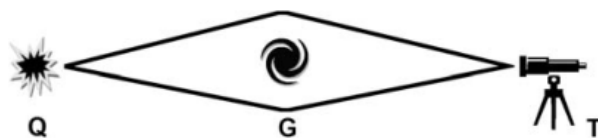


Рисунок 1. Свет от удаленного квазара Q огибает массивную галактику G и попадает на вход установленного на Земле телескопа T, снабженного интерферометром Маха-Цендера.

На входе телескопа помещают интерферометр Маха-Цендера, в котором можно убирать (или не убирать) входной 50% светоделитель, в результате чего не будет (или будет) наблюдаться интерференция³. Во втором случае нет способа выяснить, по какому именно пути прошли фотоны огибая галактику, т.е. они будут интерферировать; в первом – информация о выборе фотонами одной из возможных траекторий не пропадает, и интерференция исчезнет. Суть парадокса состоит в том, что выбор между интерферирующим и неинтерферирующим поведением осуществляется в самое последнее мгновение, когда фотон уже пролетел отведенные ему миллиарды лет путешествия [4]. Этот эффект можно рассматривать как проявление нелокальности – как может излучаемый фотон заранее “знать”, будет ли введен светоделитель?

³ Вводимый светоделитель играет роль “квантового ластика”, т.к. после его прохождения фотоном принципиально нет возможности определить путь, который фотон проделал до этого.

3. Парадокс Тетроде и концепция прямого межчастичного взаимодействия

В широко известной статье [5] цитируется замечательная по глубине мысль Хьюго Тетроде⁴ [6]:

Солнце не излучало бы, если бы где-либо не нашлось тела, способного поглотить это излучение ... Например, если я вчера наблюдал с помощью телескопа звезду, удаленную, скажем, на 100 световых лет, то не только я знаю, что испущенный ею 100 лет назад свет достиг моего глаза, но также и звезда или ее отдельные атомы уже 100 лет назад знали, что я, который даже еще не существовал тогда, вчера вечером увижу этот свет в такое-то время.

Но как удаленная звезда может “знать”, где и когда в будущем будет зарегистрирован испущенный ею фотон? С нашей точки зрения, это яркий пример проявления нелокальности, очень близкий к вышеописанному “галактическому” парадоксу Уилера.

Авторы статьи [5], стремясь обосновать тезис Тетроде, предложили схему “мгновенного” (прямого межчастичного) взаимодействия электронов со всеми возможными будущими поглотителями испускаемого ими излучения. Эта идея, в частности, позволяет легко вывести т.н. “радиационное затухание” излучателя, но при этом использует довольно сложные представления о комбинации опережающих и запаздывающих волн. С нашей точки зрения можно рассматривать прямое межчастичное взаимодействие (дальнодействие) как одно из проявлений эффекта нелокальности.

4. Сокращение времен и расстояний в теории относительности

Обратим теперь внимание на то, что Уилер анализирует вышеописанную ситуацию исключительно в ЛСО. Однако эту ситуацию можно проанализировать и в движущейся системе отсчета. Предположим сначала, что от квазара или звезды до Земли летит не фотон, а ракета, скорость которой меньше скорости света. Пусть при наблюдении этого путешествия с Земли, т.е. в *лабораторной* системе отсчета, оно длится, скажем, 1 миллиард лет. Но в *сопутствующей* системе отсчета, связанной с ракетой, собственное время путешествия и пройденное расстояние уменьшается, как известно, в $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз, где v - скорость ракеты, c - скорость света. Чем быстрее летит ракета, тем сильнее эффект сокращения, однако причинно-следственная связь событий сохраняется: старт ракеты всегда *предшествует* финишу.

Но что будет, если вместо ракеты или любого объекта, движущегося с досветовой скоростью, рассмотреть *фотон, летящий со скоростью света*?

Обычно физики избегают говорить о системе отсчета, движущейся со скоростью света c в вакууме. Так, в известном курсе квантовой электродинамики [7] утверждается, что для частицы с равной нулю массой не существует системы покоя – в любой системе отсчета она движется со скоростью света. Однако вне концепции пространства-времени Минковского такая необходимость возникает и реально применяется физиками. Речь идет, например, о падении частицы на черную дыру: с точки зрения удаленного наблюдателя скорость падающей частицы действительно не может превысить скорость света c (а время падения затягивается до бесконечности). Однако в преобразованной системе координат [8] можно ввести сопутствующую систему отсчета, в которой при пересечении горизонта событий черной дыры скорость падающей частицы становится (и затем остается) больше, чем указанная величина c , время падения оказывается конечным. При этом, правда, новые временная и радиальная координаты выражаются сразу через временную и радиальную координату удаленной системы,

⁴ Хьюго Мартин Тетроде (1895 – 1931) – голландский физик, работавший в области статистической физики и квантовой теории.

так что переход не вполне тривиален, но зато открывается возможность для описания процессов внутри черной дыры.

Во всяком случае, можно говорить о том (по этому поводу разногласий нет), что случай фотона является предельным, и в этом пределе (так сказать, “с точки зрения фотона”) собственное время движения фотона и собственное пройденное им расстояние станут равны нулю, а старт и финиш окажутся *одновременными* и разделенными *нулевым* 3-мерным пространственным расстоянием.

Поэтому момент старта фотона, покидающего квазар, и момент финиша, когда он проходит или (не проходит) через светоделитель на входе телескопа – это *один и тот же момент* его собственного времени. И с формально-логической точки зрения нет никакого противоречия в утверждении, что фотон выбрал, вести ли ему себя как частица или как волна, ровно в *тот же момент времени*, в который наличие или отсутствие светоделителя в телескопе заставило его сделать этот выбор. В рамках теории относительности мы видим, что подобный парадокс возможен (моменты излучения и поглощения фотона совпадают в его *собственном* времени), если не неизбежен, и притом ровно в той же степени, что и парадокс близнецов.

Мы уверены, что здесь мы сталкиваемся фактически с тем же самым парадоксом. С одной стороны (как было отмечено выше), как, не входя в противоречие с современными физическими представлениями, удаленная звезда может “знать”, где и когда в будущем будет зарегистрирован испущенный ею фотон? С другой стороны, мысль о том, что фотон – всего лишь звено строго согласованного взаимодействия между двумя (хотя бы и взаимно удаленными) атомами, оказывается чрезвычайно соблазнительной и получает свое красивое объяснение. Нам представляется, что и “мгновенность” (в собственном времени) такого взаимодействия фотона вполне сочетается с точкой зрения *лабораторного* наблюдателя, что фотон вылетел в случайном направлении и через некоторое *конечное* время столкнулся со случайным поглотителем, хотя эта сочетаемость и кажется на первый взгляд парадоксальной.

5. Переосмысление причинно-следственных отношений

Таким образом, в отличие от ситуации с ракетой, для *фотона* (с его “точки зрения”) причинно-следственные отношения между событиями старта и финиша утрачивают смысл, становясь отношениями между *одновременными* событиями: ни одно из них не предшествует другому и не является следствием другого. Поместим теперь наблюдателя в начало системы координат Минковского и рассмотрим произвольное другое 4- событие.

- Если это другое 4-событие расположено *внутри* светового конуса, то 4-мерный интервал между этими событиями оказывается *действительным*.
- Если это другое 4-событие расположено *на самом* световом конусе, то 4-мерный интервал между этими событиями оказывается *равным нулю*.
- Если это другое 4-событие расположено *вне* светового конуса, то 4-мерный интервал между этими событиями оказывается *мнимым*.

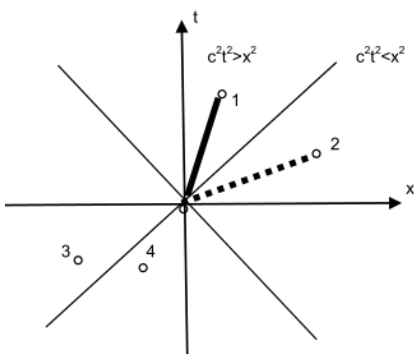


Рисунок 2

События 1 и 4 *могут* быть связаны с началом координат причинно-следственным взаимодействием, т.е. между ними может однонаправлено передаваться информация и/или энергия (аперiodический процесс).

События 2 и 3 *не могут* быть связаны с началом координат причинно-следственным взаимодействием, т.е. между ними, как обычно принято считать, *не может* однонаправлено передаваться информация и/или энергия. Но *взаимовлияние* может поддерживаться *строго периодическим* процессом. В этом мы видим решение конфликта между КМ и ТО.

В статье [9] мы указывали, что переход от причинно-следственного взаимодействия между событиями внутри светового конуса (временеподобный 4-интервал) к некоторому взаимовлиянию между событиями, разделенными световым конусом (пространственно-подобный 4-интервал) может описываться переходом от аperiodических процессов к *строго периодическим* процессам. При таком переходе исчезает *направленная* во времени передача информации и/или энергии взаимодействия, хотя среднеквадратичное значение этой энергии оказывается больше нуля, т.е. взаимовлияние двух событий имеет место, хотя ни одно из них в определенном смысле не может быть ни причиной, ни следствием другого. Действительно, пусть испущенный фонариком фотон инициирует взрыв бомбы. В ЛСО мы обычно считаем взрыв бомбы следствием, а акт излучения фотона – причиной, т.е. двумя событиями, разделенными в ЛСО строго положительным интервалом времени. Но, с точки зрения фотона, это НЕ два отдельных события, а одно, они одновременны, так что ни одно из них не может предшествовать другому; поэтому и в ЛСО корректнее считать эти события не причинно-связанными, а (квантово) коррелированными.

При переходе через световой барьер (в частности, при падении в черную дыру) и возникают квантовые корреляции по обе стороны такого барьера [10].

Выше мы рассматривали парадокс Уилера в лабораторной системе отсчета, в которой время движения между стартом и финишем было положительным. Однако *собственное* время движения фотона равно нулю. Поэтому момент старта фотона, покидающего квазар, и момент финиша, когда он проходит или (не проходит) через светоделитель на входе телескопа - это *один и тот же момент* его собственного времени. И формально нет никакого противоречия в утверждении, что фотон “выбрал” - вести ли ему себя как частица или как волна - ровно в *тот же момент времени*, в который наличие или отсутствие светоделителя в телескопе заставило его сделать этот выбор. Согласно теории относительности подобный парадокс не только возможен, но и необходим.

6. “Отложенный” выбор поведения фотонов

В вышеописанной ситуации с фотоном проявилась идея Уилера об “отложенном выборе” - когда (в *лабораторной* системе отсчета) решение о той или иной конфигурации измерения принимается на заключительной (а не начальной) стадии процесса распространения фотона (подразумевается хронология событий, используемая в ЛСО; с “точки зрения фотона” это не так). В двух экспериментальных реализациях [11] (Вена, 2007 и Канарские острова, 2008) источник запутанных фотонных ЭПР-пар испускал пару фотонов (“системный фотон” и “фотон среды”). Системный фотон распространялся через интерферометр в одну сторону, а фотон среды являлся объектом поляризационных измерений с другой стороны от источника. Выбор вида измерения, позволяющий либо задать информацию о выборе пути (“а” или “b”), либо получить интерференционную картину для системных фотонов, делались в условиях локальности по Эйнштейну, т.е. причинная связь (в *лабораторной* системе отсчета) между системным фотоном и фотоном среды заведомо отсутствовала.

Целью этого эксперимента (его концептуальная схема приведена на рис. 3) являлась манипуляция типом поведения системного фотона с помощью измерительного воздействия на фотон среды. При измерении фотона среды в линейном базисе выявляется информация о выборе пути системным фотоном, при этом интерференция системного фотона наблюдаться не может; при измерении фотона среды в круговом базисе информация о выборе пути стирается, возникает интерференция системного фотона, которая зависит от сдвига фаз в плечах “а” и “b” (волновое поведение).

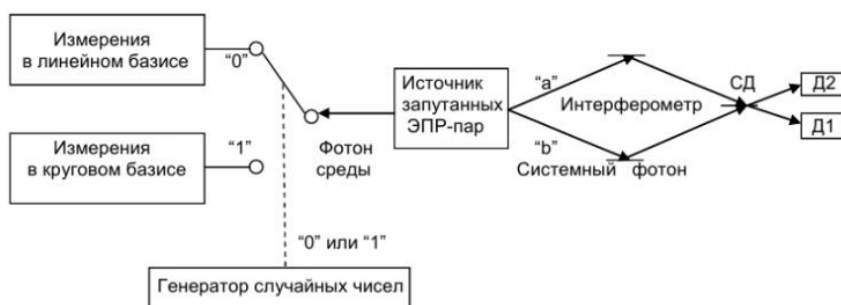


Рисунок 3
Концептуальная схема экспериментов в работе [11]

Если путь системного фотона (справа) до детекторов *длиннее*, чем путь фотона среды (слева) до коммутатора, то парадокса нет – событие манипуляции фотоном среды происходит *раньше*, чем на выходе интерферометра возникает или не возникает интерференционная картина, т.е. причина предшествует следствию. Однако в том случае, когда путь системного фотона (справа) до детектора делается *короче*, чем путь фотона среды (слева) до коммутатора, то в *лабораторной* системе отсчета возникает, как считают авторы работы [11], парадокс – событие манипуляции фотоном среды происходит *позже*, чем на выходе интерферометра возникает или не возникает интерференционная картина. Авторы [11] ссылаются на экспериментальные результаты, полученные ими в своей работе.

Для прояснения происходящего рассмотрим известный парадокс близнецов в специально адаптированной версии для двух фотонов. Пусть у нас имеется источник S (запутанной) пары фотонов и два идеальных оптоволоконных кабеля, имеющих в общем случае две различные длины L_1 и L_2 , концы которых расположены достаточно близко между собой в точке D (регистратор фотонов). Для определенности будем считать $L_2 > L_1$.

Рассмотрим ситуацию в *лабораторной* системе отсчета. Пусть пара фотонов генерируется в момент $T_0 = 0$. Первый фотон достигнет детектора D в момент времени $T_1 = L_1/c$, а второй фотон достигнет детектора D в момент времени $T_2 = L_2/c$, где c - скорость света. Соответственно разность этих времен ΔT в лабораторной системе отсчета составит

$$\Delta T = (L_2 - L_1)/c.$$

При этом по *собственному* времени для *каждого* из фотонов все путешествие является мгновенным, разность времен путешествия для них $\Delta T' = 0$. Т.е. если бы у фотонов были свои часы, и они были бы синхронизированы в момент излучения пары, то разность между их показаниями в момент прибытия была бы также равна нулю.

Поэтому, с нашей точки зрения, парадокс устраняется так же, как и в предыдущем случае. Вся логика авторов эксперимента (как и в ЭПР- экспериментах) основывается на анализе в *лабораторной* системе отсчета; если же рассмотреть события, используя *собственное* время фотонов, то промежуток времени (и расстояние) между измерениями над системным фотоном и фотоном среды будет стремиться к *нулю*, поэтому никакой рассогласованности в том, что с ними происходит, просто не может быть. Выходной бит генератора случайных чисел в этот момент времени (и в собственном времени фотона) связан с воздействием на фотон среды ровно таким сигналом, какой и должен быть, поэтому вся триада оказывается скоррелированной.

7. О распространении гипотезы на частицы с ненулевой массой

Если для фотонов относительность феномена нелокальности представляется довольно убедительной, то с первого взгляда кажется, что в случае квантовых частиц с ненулевой массой

покоя дело обстоит иначе. Впрочем, в некоторых опытах, в которых речь идет об отложенном выборе, казалось бы, не для фотонов, а для спинов электронов (см., например, [12], где участвуют электроны в двух лабораториях, разнесенных на 1280 м), при анализе выясняется, что на первой же стадии эксперимента взаимно удаленные спины электронов запутываются (с помощью процедуры свопинга) с *фотонами*, которые и являются реальными акторами эксперимента, так что предложенное нами объяснение оказывается применимым и в этом случае. Однако в ЭПР-опыте с запутанными *электронами* или другими массивными частицами, где последние разлетаются с досветовыми скоростями, такое объяснение не подходит.

Рассматривая две взаимно удаляющиеся запутанные между собой частицы с *ненулевой* массой покоя, у одной из которых измеряется координата, а у другой импульс, следует иметь в виду, что сколь угодно точное измерение обеих величин при сохранении взаимной корреляции противоречило бы соотношению неопределенностей Гейзенберга в *лабораторной* системе отсчета. Это рассуждение было бы верно, если бы частицы можно было мыслить идеальными “механическими шариками”. Но в реальности, как мы постараемся убедить читателя далее, квантовые частицы *нельзя* считать механическими шариками, между которыми не существует никакой связи.

Действительно, массивные квантовые частицы (в частности, электроны) обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Так, для электрона Дираком в 1928 г. было получено [13] релятивистское описание волновой функции в виде системы четырех дифференциальных уравнений для четырех спинорных величин, где одна пара отвечает положительной, а вторая пара - отрицательной энергии электрона, и в каждой паре одна из величин отвечает одному направлению спина, а другая - противоположному. При этом операторы для составляющих скорости электрона не коммутируют между собой, а собственные значения каждого из них в результате измерения обязательно должны быть равны по абсолютной величине скорости света. Такой парадоксальный результат Шрёдингер в 1930 году объяснил [14] наличием у электрона двух компонент скорости – обычной (*медленной*) и *быстро осциллирующей* с частотой, отвечающей периоду *волны де Бройля* для электрона. Он писал там же по этому поводу: “Квадрат каждой компоненты скорости может, следовательно, принимать только значение c^2 , причем наряду с этим он должен в таком случае являться также средним значением (математическим ожиданием) для многих измерений на одном и том же волновом пакете. Сама компонента скорости допускает лишь значения $\pm c$. Ее математическое ожидание может быть и в общем будет меньшим. Тем не менее, для него ожидают порядок величины c и удивляются, как это может удаваться центру тяжести облака заряда двигаться всегда так быстро и все же при известных условиях перемещаться поступательно только с умеренной скоростью. Это, очевидно, возможно потому, что он не движется прямолинейно.”

Сходные представления о реальном электроне, “состоящем” из двух *безмассовых* компонент “zig” и “zag”, описаны в книге Пенроуза [15]:

Дираковский спинор с его четырьмя комплексными компонентами можно представить в виде пары 2-спиноров <...>. Тогда уравнение Дирака можно записать в виде уравнения, связывающего эти два 2-спинора, при этом каждый из них играет в отношении другого роль «источника» с «константой связи» $M/\sqrt{2}$ (где M – масса частицы), определяющей «силу взаимодействия» между ними... Форма этих уравнений показывает, что дираковский электрон можно считать состоящим из двух ингредиентов <...>. Им можно придать некоторый физический смысл. Можно представить себе картину, в которой существуют две «частицы», <...>, причем обе они не имеют массы, и каждая из них непрерывно превращается в другую. Дадим этим частицам имена «zig» и «zag», так что одна будет описывать частицу «zig», а другая — частицу «zag». Будучи безмассовыми, они должны перемещаться со скоростью света, однако вместо этого можно считать, что они «качаются» взад-вперед, причем движение вперед частицы «zig» непрерывно превращается в движение назад частицы «zag», и наоборот. Фактически это есть реализация явления, называемого «zitterbewegung» («дрожание») и состоящего в том, что мгновенное движение электрона из-за участия в

таких колебаниях всегда происходит со скоростью света, хотя полное усредненное движение электрона характеризуется скоростью, меньшей скорости света. Каждый из указанных ингредиентов имеет спин величиной $\hbar/2$ в направлении движения, соответствующий левому вращению в случае частицы «zig» и правому для частицы «zag». <...> Заметим, что хотя скорость все время меняется, направление спина в системе покоя электрона остается постоянным. <...> При такой интерпретации частица «zig» выступает как источник для частицы «zag», а частица «zag» — как источник в отношении частицы «zig», сила связи между ними определяется величиной M . Рассматривая процесс в целом, мы обнаружим, что средняя частота, с которой это происходит, связана обратным соотношением с параметром связи — массой M ; фактически это есть «де-бройлевская частота» электрона.

Наконец, в работе [16] еще более ясно сформулировано, что “дрожательному” движению соответствует представление стационарного состояния электрона в виде суперпозиции двух собственных состояний оператора скорости с собственными значениями $+c$ и $-c$. В итоге “эффективная” скорость электрона равна

$$v_z = c^2 \frac{p_z}{E} + \frac{i\hbar c \dot{v}_{z0}}{2E} \exp(-2iEt / \hbar) = (v_z)_{\text{средн}} + (v_z)_{\text{осц}}$$

здесь p_z — проекция импульса, E — энергия частицы, \dot{v}_{z0} — значение \dot{v}_z при $t=0$. Именно среднее значение скорости $(v_z)_{\text{средн}}$ определяется значением реально измеряемого импульса p_z частицы. Направления средней скорости и импульса совпадают только в стационарных состояниях с положительной энергией, тогда как в состояниях с отрицательной энергией они антипараллельны.

Таким образом, рассматривая, скажем, спины запутанных между собой электронов, мы обязательно сталкиваемся с нетривиальным волновым (колебательным) процессом, в котором взаимодействие компонент (не связанное с реально наблюдаемым движением электронов) осуществляется со скоростью света. При этом две запутанные частицы, как отмечалось выше, не могут рассматриваться в виде двух независимых механических шариков, а должны восприниматься как компоненты нелокального волнового процесса (рис. 4), простирающегося (в ЛСО) между его начальной и финальной точками. В то же время с условной “точки зрения фотона” вся эта область просто “стягивается” в одну точку.

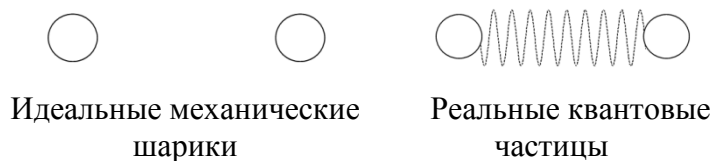


Рисунок 4

Классические и квантовые представления о паре (запутанных) частиц

Иначе говоря, в ЛСО мы имеем “эффективное” движение частиц с досветовой средней скоростью, но с “точки зрения фотона” возникает мгновенное взаимовлияние между граничными точками области движения. Фактически эта двойственность является не чем иным, как концепцией волны-пилота де Бройля-Бома [17, 18] и, соответственно, непосредственно приводит к возможности количественного описания результатов в полном соответствии с законами квантовой механики.

8. Концепция де Бройля – Бома

В 1923 Луи де Бройль опубликовал [17] гипотезу о том, что частицы с ненулевой массой покоя (например, электроны), как и фотоны, обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. При этом движение частицы управляется некоей волной-пилотом. В 1952 г. Дэвид Бом, развивая его идеи, опубликовал две связанные общей концепцией статьи [18], где предложил перейти от *одного* уравнения Шрёдингера для *комплекснозначной* волновой функции $\Psi = \sqrt{\rho} \exp(iS/\hbar)$ с внешним потенциалом V :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \Psi$$

к системе двух связанных уравнений для двух *действительных* величин – квадрата модуля амплитуды ρ и фазы S волновой функции:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \frac{\nabla S}{m} \right) = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V + Q = 0.$$

Здесь

$$Q \equiv \frac{\hbar^2}{4m} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\nabla \rho}{\rho} \right)^2 - \frac{\nabla^2 \rho}{\rho} \right]$$

есть так называемый *квантовый потенциал*. Первое уравнение представляет собой уравнение непрерывности для плотности вероятности ρ . Второе уравнение вместе с квантовым потенциалом описывают эволюцию поля фазы, управляющей движением квантовых частиц.

Фаза в уравнении Бома оказывается *нелокальным* параметром, ее динамика зависит от специфического квантового потенциала который, в свою очередь, зависит исключительно от *неравномерности* плотности распределения в пространстве. Наличие квантового потенциала отличает квантовое описание от классического, где *никакого аналога этому члену нет*. Квантовый потенциал обеспечивает в общем случае так называемую *запутанность* между частицами, т.е. тот факт, что отдельные траектории (которые в бомовской интерпретации имеют физический смысл) не независимы одна от другой и не описываются отдельными независимыми волновыми функциями.

Бом считал [18], что фазу волны-пилота следует рассматривать как “скрытый параметр” в смысле фон Неймана [19]. Последний доказывал, что такого типа параметры, которые гипотетически могли бы уточнить статистическое описание квантовомеханических объектов, не существуют. В свою очередь Белл в 1964 году показал [20], что существование скрытых параметров приводит к необходимости выполнения определенных неравенств [21], которые квантовой механикой нарушаются в полном соответствии с экспериментами.

Анализируя источник нарушения неравенства, Белл выдвинул предположение, что он связан с нелокальностью квантового взаимодействия. Поскольку у Бома фаза волновой функции *нелокальна* (см. [22]), то это, с точки зрения Белла, могло бы примирить теорию Бома с утверждением фон Неймана о невозможности скрытых параметров в квантовой механике.

Следует отметить, что само доказательство результатов Белла подверглось ряду попыток критически его оспорить. Например, в интересной работе А.Ю. Хренникова [23] утверждается, “что условия Белла являются только достаточными, но не необходимыми для нарушения неравенств Белла. Поэтому возможны и другие интерпретации нарушения этих неравенств. Альтернативу Белла – или локальный реализм, или квантовая механика – можно продолжить: или существование единой вероятностной меры для несовместных экспериментальных контекстов, или квантовая механика.”

Так или иначе, позже Леггет показал [24], что и нелокальные теории скрытых параметров определенного вида (нелокального взаимовлияния удаленных друг от друга измерителей) ограничены неравенствами, которые нарушаются квантово-механическими предсказаниями.

С нашей точки зрения, справедливость концепции де Бройля-Бома теоретически вытекает как раз из предложенной нами модели, в которой, “с точки зрения фотона (или любой распространяющейся со скоростью света компоненты)”, проблема нелокальности просто отсутствует, а все 4-события стягиваются в общую 4-точку.

Исследователи, работающие в рамках подхода де Бройля – Бома, получили ряд глубоких, важных и общих результатов. Они рассчитали интерференционную и дифракционную картины для стандартных, а также и нетривиальных конфигураций.

Например, в [25] представлены результаты численного моделирования для двухщелевых экспериментов с электронами. Там выведена эволюция плотности вероятности от источника к детектирующему экрану; расчеты были выполнены с использованием метода интегралов Фейнмана по путям. Волновая функция за щелями была выведена, исходя из значений волновой функции в щелях А и В. Кроме того, авторы нашли аналитическое решение для волновой функции в эксперименте Штерна – Герлаха, где они рассчитали время декогеренции и была выполнена диагонализация матрицы плотности. Это решение требует представления спинора Паули с пространственным разложением в виде

$$\Psi(z) = (2\pi\sigma_0^2)^{-1/2} \exp\left(-\frac{z^2}{4\sigma_0^2}\right) \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} e^{-i\varphi/2} \\ \sin \frac{\theta}{2} e^{-i\varphi/2} \end{pmatrix}$$

тогда как учебники по квантовой механике не учитывают пространственное разложение спинора и используют упрощенный спинор

$$\Psi(z) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} e^{-i\varphi/2} \\ \sin \frac{\theta}{2} e^{-i\varphi/2} \end{pmatrix}$$

Авторы [25] показали, что различные эволюции пространственного разложения между двумя компонентами спинора играют ключевую роль при объяснении процесса измерения и позволяют переосмыслить эксперимент Штерна – Герлаха.

Кроме того, в [25] исследуется бомовская версия ЭПР-эксперимента. Предложена следующая причинная интерпретация ЭПРБ – эксперимента: как предполагают авторы, при рождении двух запутанных частиц А и В каждая из двух запутанных частиц обладает индивидуальной волновой начальной функцией с противоположными спинами. Тогда принцип Паули говорит нам, что эта волновая функция двух тел должна быть антисимметричной. Таким образом, можно считать, что синглетная волновая функция семейства из двух фермионов А и В с противоположными спинами, где направление начальных спинов существует, но *не известно*. Это не та интерпретация, которая поддерживается школой Бома при интерпретации синглетной волновой функцией; там не предполагается существование собственной различной функции для каждой частицы, следовательно, подразумевается нулевой спин для каждой частицы в начальный момент времени и модуль спина, варьирующийся во время эксперимента от 0 до $\hbar/2$. Напротив, авторы [25] предполагают, что в начальный момент времени спин каждой частицы (задаваемый каждой начальной волновой функцией) и начальное положение каждой частицы известны.

Концепция де Бройля – Бома может быть применена не только к частицам с ненулевой массой, но и в физике электромагнитного излучения, физике других волновых процессов (например, акустических). Например, в работе [26] было рассмотрено прохождение светового импульса по волноводу с малым углом или в параксиальном приближении. Предположив, что оптическая ось ориентирована вдоль оси z , и что электромагнитное поле, проходящее через волновод, является гармоническим во времени, мы можем аппроксимировать это поле плоской волной вдоль z -направления, модулированной определенной комплексно-значной амплитудой

$$\Psi(r) = \psi(r) \exp(ik_z z)$$

где $k_z = n_0 k$, $k = 2\pi / \lambda$, λ - длина световой волны в вакуум, r – объемный коэффициент преломления. Подставив это выражение в уравнение Гельмгольца, мы приходим к уравнению, изоморфному уравнению Шрёдингера, где z (а не время t) играет роль параметра эволюции. Последнее уравнение использовалось, например, при разработке волновода с оптимальными условиями распространения света.

Заметим, что результаты всех этих расчетов полностью соответствуют предсказаниям стандартной квантовой механики.

9. Заключение

Итак, мы исходим из простого утверждения: когда осуществляется некоторый опыт, рассматриваемый в различных системах отсчета, и существенно различным течением времени в этих системах отсчета пренебрегать нельзя, то следует исходить из того, что совпадение результатов для одних и тех же 4-мерных событий должно иметь *объективный* характер, хотя при этом могут возникать кажущиеся парадоксальными ситуации, а некоторые свойства (в частности – нелокальность) могут оказаться относительными.

Например, в парадоксе близнецов и возраст Землянина, и возраст Космонавта сравниваются в одних и тех же – начальной и финальной – 4-мерных точках пространства-времени, при этом в каждой системе отсчета этот возраст вычисляется строго по правилам теории относительности; таким образом, в соответствии с теорией, парадокс должен проявляться и действительно проявляется.

С нашей точки зрения, точно такая же ситуация имеет место и в квантовых экспериментах с нелокальной (в ЛСО) корреляцией между фотонами. Сопоставление результатов, полученных в разных системах отсчета, но сопоставимых по отношению к начальным и финальным условиям, приводит к кажущимся парадоксам, которые, тем не менее, неизбежны и отражают различие свойств объектов в разных системах отсчета. Вероятно, “мгновенностью” взаимодействия с “точки зрения фотона” объясняется и сам факт влияния принципиального наличия *информации* о выборе пути на результат измерения: эта информация возникает ровно в тот же момент времени, когда и осуществляется результат.

Что же касается запутанных пар квантовых частиц, обладающих массой и распространяющихся с досветовой скоростью, то мы рассмотрели аргументы в пользу справедливости предложенной гипотезы и в этом случае. Те же аргументы должны быть справедливы в общем случае и для экспериментов с телепортацией, хотя стоит отметить, что там “переносчиками” запутанности обычно служат именно фотоны.

Ссылки

- [1] Bradley G. Christensen, Yeong-Cherng Liang, Nicolas Brunner, Nicolas Gisin, and Paul G. Kwiat. Exploring the limits of quantum nonlocality with entangled photons. *PHYS. REV. X* 5, 041052 (2015)
- [2] Salart D., Baas A., Branciard C., Gisin N., and Zbinden H. Testing spooky action at a distance. *Nature* 454, 861-864

- [3] Bell J.S. Indeterminism and nonlocality (the talk presented on 22 January 1990 at CERN on invitation of the Center for Quantum Philosophy, Geneva).
1997-Bell-Kluwer-indeterminism.doc, page 1 A.Driessen & A.Suarez: Mathematical Undecidability, Quantum Nonlocality and the Question of the Existence of God, chapter VII
- [4] J.A. Wheeler, 1984, in Quantum Theory and Measurement, ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek (Princeton University Press).
- [5] J.A.Wheeler, R.P. Feynman. Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation, Reviews of Modern Physics, **17**, 156, (1945).
- [6] Tetrode. Zeits. f. Physik 10, 317 (1922).
- [7] V.B. Berestetskii, E.M. Lifshitz and L.P.Pitaevskii. Quantum electrodynamics. Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford, England. 2nd edition, 1982. 666 PP.
- [8] L.D. Landau & E.M. Lifshitz E.M. The Classical Theory of Fields (*Volume 2* of A Course of Theoretical Physics) Pergamon Press 1971, 387 pp.
- [9] A.V. Belinsky, M.H. Shulman. Quantum correlations and Superluminal interaction // Space, Time and Fundamental Interactions (in Russian), 2016, Issue 4. pp. 29 – 38. (In Russian)
- [10] U. Leonhardt. Essential quantum optics. From quantum measurements to black holes, Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 301 p.
- [11] X. Ma et al. Quantum erasure with causality disconnected choice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 110, 1221-1226 (2013)
- [12] B. Hensen et al., 2015. Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km. *Nature* **526**, 682–686 (29 October 2015) doi:10.1038/nature15759
- [13] P. A. M. Dirac. The Quantum Theory of the Electron. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 117 (778), (1928).
- [14] E. Schrödinger. Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik («On the free movement in relativistic quantum mechanics»), Berliner Ber., pp. 418—428 (1930); Zur Quantendynamik des Elektrons, Berliner Ber, pp. 63-72 (1931).
- [15] R. Penrose. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. USA, Alfred A. Knopf, 2004, 1136 pp.
- [16] S.V. Vonsovsky, M.S.Svirsky. // Problems of the theoretical physics. Collection of papers in memory of I.E. Tamm. Moscow, Nauka, 1972. P. 389 (in Russian)
- [17] Lois de Broglie. Compt. Rend. , 1923, v. 179, p. 507 – 548.
- [18] D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. I, Phys. Rev. 85, 166-179(1952); A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. II, Phys. Rev. 85, 180-193 (1952)]
- [19] J. von Neumann. Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Verlag von Julius Springer. 1932, Berlin.
- [20] J. S. Bell. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. Physics, I, 195-200 (1964)
- [21] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. Phys. Rev. Lett. 23, 880–884 (1969).
- [22] J. Bernstein. Von Neumann, Bell and Bohm.
URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1102/1102.2222.pdf>
- [23] A.Yu. Khrennikov. EPR-B experiment and Bell’s inequality: quantum physics and probability theory. Theoretical and mathematical physics, vol. 157, № 1, October of 2008, pp. 99–115 (in Russian); A.Yu. Khrennikov. Bell’s inequality: Physics meets Probability. URL: arXiv:0709.3909v1 [quant-ph] 25 Sep 2007
- [24] A. J. Leggett. Nonlocal Hidden-Variable Theories and Quantum. Mechanics: An Incompatibility Theorem. Foundations of Physics, vol. 33, № 10, October 2003.
- [25] M. Gondran, A Gondran. Measurement in the de Broglie-Bohm interpretation: Double-slit, Stern-Gerlach and EPRB. Physics Research International, Hindawi, 2014, 2014
- [26] Ángel S. Sanz. Quantumness beyond quantum mechanics. Journal of Physics: Conference Series 361 (2012) 012016 doi:10.1088/1742-6596/361/1/012016