

УДК 530.1, 53.02

*А. В. Белинский,¹ М. Х. Шульман²***ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ НЕЛОКАЛЬНОСТИ ДЛЯ ФОТОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ**

Выдвигается гипотеза, объясняющая квантовую нелокальность в экспериментах с фотонами (ЭПР, с отложенным выбором и тому подобное) различием в течении времени между лабораторной системой отсчета (ЛСО) и “сопутствующей (квази)системой отсчета” для фотона. 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 подобно известному парадоксу близнецов в теории относительности. Сформулированы аргументы в пользу обобщения основной гипотезы на квантовые частицы, обладающие ненулевой массой.

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

PACS: 03.65.Ud

1. О системах отсчета в теории относительности

В физике (условно) неподвижную систему отсчета, связанную с наблюдателем, принято называть *лабораторной* системой отсчета (ЛСО). Уже более 100 лет известно, что в теории относительности временной и пространственной промежутки, разделяющие два события в ЛСО, в общем случае не совпадают с соответствующими промежутками в движущейся системе отсчета. Это означает, что пространственные и временные промежутки в движущейся системе отсчета “укорачиваются” по отношению к неподвижной системе в одинаковой степени, зависящей от относительной скорости, которая, таким образом, остается неизменной. Например, достаточно хорошо исследован и многократно описан так называемый парадокс “парадокс близнецов”, когда некий космонавт с огромной скоростью путешествует в Космосе, а по возвращении на Землю обнаруживает, что за время путешествия постарел значительно меньше (а в пределе - совсем не постарел), чем остававшиеся на Земле сверстники.

С 1935 года в современной физике обсуждается проблема нелокальной связи между парой изначально взаимодействовавших, но затем взаимно удаленных на произвольное расстояние квантовых частиц [1]; Шрёдингер назвал [2,3] это явление запутыванием (entanglement). Оно характеризуется тем, что до момента измерения состояние обоих ЭПР-партнеров не определено (оно представляет собой суперпозицию возможных состояний), а при измерении (и в зависимости от конфигурации этого измерения) состояния партнеров оказываются мгновенно коррелированными независимо от разделяющего их расстояния. Данный факт подтвержден многочисленными экспериментами, начиная с работ группы Аспе (см. [4]).

В определенной степени это представляется противоречащим теории относительности, согласно которой перенос энергии и информации между разделенными пространственноподобным интервалом системами невозможен - это так называемое требование бессигнальности (non-signaling). Автор знаменитой теоремы Белла писал: “*Эти корреляции прямо-таки вопиют об объяснении, а мы не можем его дать!*” [5].

Ниже делается попытка объяснить возникновение таких корреляций на основе учета свойств фотона в теории относительности. Для ЭПР-опытов с фотонами это оправдано их предельно возможной скоростью распространения, что выводит ситуацию за пределы *внутренней* области светового конуса и, по нашему мнению, делает допустимым использование сопутствующей (квази)системы отсчета (ССО) для фотона³. *В такой системе отсчета нет причины и следствия, так как любые два события одновременны.*

¹E-mail: belinsky@inbox.ru

²E-mail: shulman@dol.ru

³Во внутренней области светового конуса “для частицы с равной нулю массой не существует системы покоя - в любой системе отсчета она движется со скоростью света” [8].

Обычно физики избегают говорить о системе отсчета, движущейся, в частности, со скоростью света в вакууме c . 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 [6] можно ввести ССО, в которой при пересечении горизонта событий черной дыры скорость падающей частицы становится (и затем остается) больше, чем указанная величина c , время падения оказывается конечным. Следует, правда, заметить, что в подобной ССО новые временная и радиальная координаты выражаются сразу через временную и радиальную координату удаленной системы, так что переход не вполне тривиален, но зато открывается возможность для описания процессов внутри черной дыры. И возникает удивительная ситуация: в одной системе координат горизонт событий черной дыры (неразрывно связанный с преодолением светового барьера) остается как бы непреодолимым, а в другой системе координат вполне может быть преодолен (правда, только в одну сторону) падающим объектом.

2. “Галактический” парадокс Уилера

Уилер предложил [7] 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.

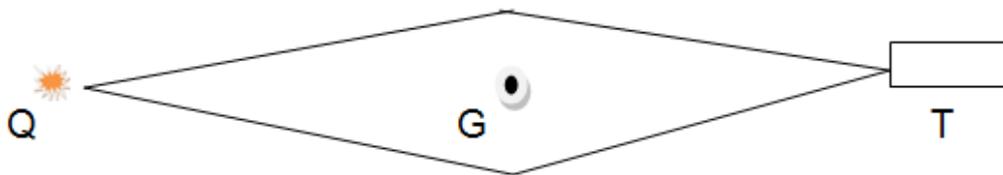


Рис. 1. Свет от удаленного квазара Q огибает массивную галактику G и попадает на вход установленного на Земле телескопа T, снабженного интерферометром Маха-Цендера.

На входе телескопа помещают интерферометр, в который можно ввести (или не ввести) 50% светоделитель, в результате чего будет (или не будет) наблюдаться интерференция⁴. В первом случае нет способа выяснить, по какому именно пути прошел фотон огибая галактику, то есть он поведет себя как волна; во втором случае информация о выборе фотоном одной из возможных траекторий не пропадает, и он поведет себя как частица. Суть парадокса состоит в том, что выбор между волновым и корпускулярным поведением осуществляется в самое последнее мгновение, когда фотон уже пролетел отведенные ему миллиарды лет путешествия [7].

Обратим внимание, что Уилер анализирует ситуацию исключительно в ЛСО. Однако представляет интерес посмотреть на эту же ситуацию в *сопутствующей* (квази)системе отсчета фотона. В соответствии с теорией относительности для фотона как бы не существует ни времени, ни пространства. И пройденный фотоном путь, и длительность этого пути равны (c его “точки зрения”) 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 времени в такой ССО. 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 *той же момент времени*, в который наличие или отсутствие светоделителя в телескопе заставило его сделать этот выбор. В рамках теории относительности - с помощью косвенных аргументов - мы видим, что подобный парадокс возможен (излучение и поглощение фотона одновременны в его системе отсчета), если не неизбежен, и притом ровно в той же степени, что и парадокс близнецов.

⁴Вводимый светоделитель играет роль “квантового ластика”, так как после его прохождения фотоном принципиально нет возможности определить путь, который фотон проделал до этого.

В широко известной статье [9] цитируется замечательная по глубине мысль Хьюго Тетроде⁵ [10]:

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.

Мы уверены, что здесь мы сталкиваемся фактически с тем же самым парадоксом. С одной стороны, 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 ССО 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.

3. Эксперименты с “отложенным выбором” поведения фотона

В вышеописанной ситуации с фотоном проявилась идея Уилера об “отложенном выборе” — когда (в ЛСО) решение о той или иной конфигурации измерения принимается на заключительной (а не начальной) стадии процесса распространения фотона, или даже еще позже. Ярким примером могут служить эксперименты, выполненные и описанные авторами работы [11]. В двух экспериментальных реализациях (Вена, 2007 и Канарские острова, 2008) источник запутанных фотонных ЭПР-пар испускал поляризованную по путям 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, делался в условиях локальности по Эйнштейну, то есть причинная связь (в ЛСО) между системным фотоном и фотоном среды заведомо отсутствовала.

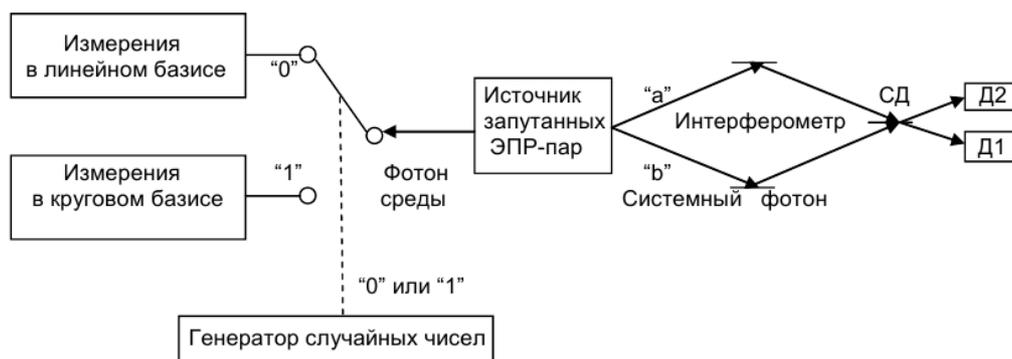


Рис. 2. Концептуальная схема эксперимента [11], СД — светоделитель, Д2 и Д1 — детекторы фотонов.

В эксперименте формировались фотонные ЭПР-пары с запутыванием между двумя различными степенями свободы, а именно между *путем* одного (системного) фотона и *поляризацией* другого фотона (фотона среды). Системный фотон посылался в интерферометр, а фотон среды посылался в поляризационный анализатор, который выполнял измерение согласно причинно отделенному выбору (относительно связанных с интерферометром событий). Вследствие запутывания между двумя фотонами поляризация фотона среды определяла наличие информации о выборе пути (“а” или “b”) системного фотона.

⁵Хьюго Мартин Тетроде (1895 - 1931) — голландский физик, работавший в области статистической физики и квантовой теории.

Квантовый генератор случайных чисел формировал два числа: 0 или 1. Если на его выходе формировался 0, то над фотоном среды выполнялось поляризационное измерение первого типа (в линейном базисе), в результате чего возникала информация о выборе пути (“a” или “b”) системным фотоном, при этом интерференция наблюдаться не могла. Если же на выходе генератора случайных чисел формировалась 1, то фотон среды измерялся в круговом поляризационном базисе, что “стирало” информацию о выборе пути (это — так называемый “квантовый ластик”) и приводило к интерференции системного фотона.

Итак, целью этого эксперимента являлась манипуляция типом поведения системного фотона с помощью измерительного воздействия на фотон среды. Авторы работы построили измерительную схему таким образом, чтобы максимально надежно разделить (в ЛСО) пространственно-подобным интервалом акт воздействия на фотон среды от акта детектирования системного фотона, и получили парадоксальный результат: регистрация системного фотона происходила *раньше*, чем осуществлялось воздействие на фотон среды, но при этом системный фотон вел себя в точности так, как ему предписывало *более позднее во времени* воздействие на фотон среды, а оно, в свою очередь, до того задавалось выходным числом (0 или 1) генератора случайных чисел.

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 источника S и детектора D . 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 ЛСО составит

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

При этом в ССО для *каждого* из фотонов все путешествие является мгновенным, разность времен путешествия для них $\Delta T' = 0$. То есть, 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 (раздел 2). Вся логика авторов эксперимента основывается на анализе в *лабораторной* системе отсчета; если же рассмотреть события в ССО, 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 с точки зрения фотона) связан с воздействием на фотон среды ровно таким сигналом, какой и должен быть, поэтому вся триада оказывается скоррелированной.

4. Другие эксперименты с двумя фотонами

В ЭПР-экспериментах с фотонами пара запутанных квантов света также разлетается от общего источника, после чего детектируется поляризационными анализаторами с регулируемыми углами поворота (см., например, [12]). Оказывается, что между результатами регистрации фотонов (да/нет) имеется корреляция, определяемая разностью $\Delta\varphi$ углов поворота двух анализаторов. Эта корреляция — в ЛСО — представляется *нелокальной*: теоретически в квантовой механике никак не учитывается возможная динамика эволюции $\Delta\varphi$, а тонкие и тщательные экспериментальные исследования подтверждают, что значение имеет лишь величина $\Delta\varphi$ в самый момент измерения. Более подробно, в ЛСО события прохождения фотонов через соответствующие анализаторы разделены пространственно-подобными промежутками. В работе [13] приводится описание эксперимента, выполненного в Швейцарии. Там источник посылал пары фотонов из Женевы на две приемные станции через оптоволоконную сеть. Станции расположены в двух населенных пунктах в окрестностях Женевы, на расстоянии 8.2 и 10.7 км, соответственно. Прямое расстояние между ними равно 18.0 км. На каждой приемной станции фотоны проходили через идентичные несбалансированные интерферометры Майкельсона и регистрировались детектором одиночных фотонов.

Реальное “загадочное действие на расстоянии”, по выражению Эйнштейна, требовало бы сверхсветового влияния. В указанной работе оцениваются экспериментальные границы скорости всех таких гипотетических воздействий. Был осуществлен эксперимент по проверке неравенств Белла продолжительностью более чем 24 часа между двумя населенными пунктами, удаленными один от другого на 18 км примерно по оси восток-запад, источник фотонов был расположен примерно посередине. Непрерывно наблюдалась двухфотонная интерференция, заведомо превышавшая порог для неравенства Белла. Конфигурация эксперимента позволила определить нижнюю границу скорости этого “загадочного влияния”, которая могла бы превысить скорость света по крайней мере на 4 порядка амплитуды.

С нашей точки зрения, указанная нелокальность исчезает в ССО, поскольку там моменты измерения над фотонами разделены *нулевым* промежутком времени, а значит — *одновременны* и происходят в одной и той же точке пространства. Именно это обстоятельство делает возможным для обоих фотонов синхронный учет углов (а значит, и их разности), который и определяет объективный (реально возникающий) результат эксперимента, в том числе — и в лабораторной (и в любой другой) системе отсчета.

Интересно также рассмотреть некоторые опыты, в которых речь идет об отложенном выборе, казалось бы, не для фотонов, а для спинов электронов. В публикации [14] описывается опыт, в котором участвуют электроны в двух лабораториях, разнесенных на 1280 м. Однако 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.

Заметим, наконец, что в рамках предложенного представления в новом свете предстает теория поглотителя Уилера-Фейнмана [9]: отпадает необходимость обосновывать прямое межчастичное взаимодействие (см., например, [15]) сложной схемой с опережающей и запаздывающей волнами, так как с “точки зрения фотона” излучатель и поглотитель взаимодействуют мгновенно.

5. О возможности распространения гипотезы на квантовые частицы с ненулевой массой

Если для фотонов относительность феномена нелокальности кажется довольно убедительной, то в случае квантовых частиц с ненулевой массой покоя имеются лишь косвенные аргументы в пользу аналогичного эффекта.

При анализе эффекта ЭПР можно рассмотреть две взаимно удаляющиеся частицы, у одной из которых измеряется координата, а у другой импульс. Если это запутанные между собой частицы, то сколь угодно точное измерение обеих величин при сохранении взаимной корреляции противоречило бы соотношению неопределенностей Гейзенберга, в этом и проявляется эффект нелокальности в ЛСО. Однако прямой переход к ССО здесь, казалось бы, не решает парадокса, так как частицы движутся с досветовыми скоростями. Это верно, если частицы мыслятся идеальными “механическими шариками”. Но в реальности квантовые частицы нельзя считать механическими шариками. Вспомним о том, что массивные квантовые частицы (в частности, электроны) обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами.

В самом деле, например, для электрона было получено в [16] 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 [17] наличием у электрона двух компонент скорости — обычной (медленной) и быстро осциллирующей с частотой, отвечающей периоду волны де Бройля для электрона⁶. Известный британский математик Р. Пенроуз в своей книге [18] пишет:

⁶Шрёдингер писал также по этому поводу [16]: “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

Дираковский спинор с его четырьмя комплексными компонентами можно представить в виде пары 2-спиноров $\langle \dots \rangle$. 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 $\langle \dots \rangle$. Им можно придать некоторый физический смысл. Можно представить себе картину, в которой существуют две «частицы», $\langle \dots \rangle$, причем обе они не имеют массы, и каждая из них непрерывно превращается в другую. Дадим этим частицам имена «зиг» и «заг», так что одна будет описывать частицу «зиг», а другая — частицу «заг». Будучи безмассовыми, они должны перемещаться со скоростью света, однако вместо этого можно считать, что они «качаются» взад-вперед, причем движение вперед частицы «зиг» непрерывно превращается в движение назад частицы «заг», 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 «зиг» и правому для частицы «заг». $\langle \dots \rangle$ Заметим, что хотя скорость все время меняется, направление спина в системе покоя электрона остается постоянным. $\langle \dots \rangle$ При такой интерпретации частица «зиг» выступает как источник для частицы «заг», а частица «заг» — как источник в отношении частицы «зиг», 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.

Таким образом, рассматривая, скажем, спины запутанных между собой электронов, мы обязательно сталкиваемся с нетривиальным волновым (колебательным) процессом, в котором взаимодействие компонент (не связанное с реальным движением электронов) осуществляется со скоростью света. Но тогда есть основания полагать, что описанные выше аргументы в пользу относительной (а не абсолютной) нелокальности экспериментов с фотонами могут быть справедливыми и для квантовых частиц, обладающих массой.

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 косвенные 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.

потому, что он не движется прямолинейно.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Phys. Rev.* 1935. Vol. 47. № 10. P. 777-780.
2. Schrödinger E. Discussion of probability relations between separated systems // *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* 1935. № 31 (4). P. 555-563.
3. Schrödinger E. Probability relations between separated systems // *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* 1936. № 32 (3). P. 446-452.
4. Aspect A. Bell's theorem: the naive view of an experimentalist. The text prepared for a talk at a conference in memory of John Bell, held in Vienna in December 2000 // *Quantum [Un]speakables - From Bell to Quantum information.* Springer, 2002. URL: <http://arXiv.org/abs/quant-ph/0402001>
5. Bell J.S. Indeterminism and nonlocality // *Mathematical Undecidability, Quantum Nonlocality and the Question of the Existence of God* / edited by A. Driessen, A. Suarez. Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 83-100. URL: <http://www.quantumphil.org/Bell-indeterminism-and-nonlocality.pdf>
6. Lemaitre G. The Expanding Universe // *General Relativity and Gravitation.* 1997. Vol. 29. P. 641-680.
7. Wheeler J.A. *Quantum Theory and Measurement.* Princeton: Princeton University Press, 1984.
8. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Пятаевский Л.П. *Квантовая электродинамика.* М.: Наука, 1989. 704 с.
9. Wheeler J.A., Feynman R.P. Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation // *Reviews of Modern Physics.* 1945. № 17. P. 156.
10. Tetrode H. Über den Wirkungszusammenhang der Welt. Eine Erweiterung der Klassischen Dynamik // *Zeits. f. Physik.* 1922. № 10. P. 317-328.
11. Ma X. Quantum erasure with causality disconnected choice // arXiv:1206.6578v2 [quant-ph]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1206.6578.pdf>
12. Белинский А.В., Клышко Д.Н. Интерференция света и теорема Белла // *УФН.* 1993. Т. 163. № 8. С. 1-45.
13. Salart D., Baas A., Branciard C., Gisin N., Zbinden H. Testing spooky action at a distance // arXiv:0808.3316v1 [quant-ph]. URL: <http://arxiv.org/pdf/0808.3316v1.pdf>
14. Hensen B. Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km. // arXiv:1508.05949v1 [quant-ph]. URL: <http://arxiv.org/pdf/1508.05949v1.pdf>
15. Владимиров Ю.С., Турыгин Ф.Ю. *Теория прямого межчастичного взаимодействия.* М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.
16. Dirac P.A. The Quantum Theory of the Electron // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 1928. № 117. P. 778. URL: <http://www.math.ucsd.edu/~nwallach/Dirac1928.pdf>
17. Schrödinger E. Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik // *Sitzungsberichte der Königlich Preubischen Akademie der Wissenschaften.* 1930. P. 418-428.
18. Пенроуз Р. *Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель.* Москва-Ижевск: РХД, 2007. 910 с.

Поступила в редакцию 17.01.2017

Белинский Александр Витальевич, д. ф.-м. н., профессор, физический факультет, Московский государственный университет, 19991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: belinsky@inbox.ru

Шульман Михаил Хананович.

E-mail: shulman@dol.ru

A. V. Belinsky, M. H. Shulman

On the relative photon correlation non-locality

Keywords: relativity, non-locality, quantum mechanics, correlation, Einstein-Podolsky-Rosen paradox, superluminal velocity, relativistic causality, reference frame, entangled state.

PACS: 03.65.Ud

We present a hypothesis explaining quantum non-locality in the experiments with photons (EPR, delay choice, etc.) by the time course difference in two reference frames (a laboratory reference frame and “photon’s co-moving reference frame”). In the last case one can consider as simultaneous ones the events separated by an arbitrary distance in a laboratory reference frame; so, the non-locality property turns out to be relative like the age difference in the known twin paradox. The arguments are proposed in order to expand this hypothesis for massive particles.

REFERENCES

1. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.*, 1935, vol. 47, no. 10, pp. 777-780.
2. Schrödinger E. Discussion of probability relations between separated systems, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1935, no. 31 (4), pp. 555–563.
3. Schrödinger E. Probability relations between separated systems, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1936, no. 32 (3), pp. 446-452.
4. Aspect A. Bell’s theorem: the naive view of an experimentalist. The text prepared for a talk at a conference in memory of John Bell, held in Vienna in December 2000, *Quantum [Un]speakables - From Bell to Quantum information*, Springer, 2002. <http://arXiv.org/abs/quant-ph/0402001>.
5. Bell J.S. Indeterminism and nonlocality, *Mathematical Undecidability, Quantum Nonlocality and the Question of the Existence of God*, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 83-100.
<http://www.quantumphil.org/Bell-indeterminism-and-nonlocality.pdf>
6. Lemaitre G. The Expanding Universe, *General Relativity and Gravitation*, 1997, vol. 29, pp. 641-680.
7. Wheeler J. A. *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press, 1984.
8. Berestetskii V.B., Lifshitz E.M., Pitaevskii L.P. *Kvantovaya elektrodinamika* (Quantum electrodynamics), Moscow: Nauka, 1989, 704 p.
9. Wheeler J.A., Feynman R.P. Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation, *Reviews of Modern Physics*, 1945, no. 17, pp. 156.
10. Tetrode H. Über den Wirkungszusammenhang der Welt. Eine Erweiterung der Klassischen Dynamik, *Zeits. f. Physik.*, 1922, no. 10, pp. 317-328.
11. Ma X. Quantum erasure with causality disconnected choice, *arXiv:1206.6578v2 [quant-ph]*.
<https://arxiv.org/pdf/1206.6578.pdf>
12. Belinskii A.V., Klyshko D.N. The interference of light and Bell’s theorem, *Physics Uspekhi*, 1993, vol. 36, no. 8, pp. 1-45.
13. Salart D., Baas A., Branciard C., Gisin N., Zbinden H. Testing spooky action at a distance, *arXiv:0808.3316v1 [quant-ph]*. <http://arxiv.org/pdf/0808.3316v1.pdf>
14. Hensen B. Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km, *arXiv:1508.05949v1 [quant-ph]*. <http://arxiv.org/pdf/1508.05949v1.pdf>
15. Vladimirov Yu.S., Turygin F.Yu. *Teoriya pryamogo mezhchastichnovo vzaimodeistviya* (Direct interaction between particles theory), Moscow: Energoatomisdat, 1986, 136 p.
16. Dirac P. A. M. The Quantum Theory of the Electron, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1928, no. 117, pp. 778. <http://www.math.ucsd.edu/~nwallach/Dirac1928.pdf>
17. Schrödinger E. On the free movement in relativistic quantum mechanics, *Sitzungsberichte der Königlich Preubischen Akademie der Wissenschaften*, 1930, pp. 418-428.
18. Penrose R. *The Road to Reality: a Complete Guide to the Laws of the Universe*, USA: Alfred A. Knopf, 2004, 1136 p.

Received 17.01.2017

Belinsky Alexandr Vitalievich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Physics, Moscow State University, Leninskiye Gory, 1-2, Moscow, 19991, Russia.
E-mail: belinsky@inbox.ru

Shulman Mikhail Hananovich.
E-mail: shulman@dol.ru