

О парадоксе ЭПР. Особенности разрешения

В.А. Касимов (E-mail: quadrica-m@mail.ru)

При интерпретации результатов экспериментов А. Аспека столкнулись две концепции - квантовой механики и теории относительности, что требует обстоятельного рассмотрения причин возникновения противоречий. Разбору этих вопросов посвящено много работ разных авторов, а затронутые здесь моменты также неоднократно выставлялись для анализа. Однако нам кажется, что обратиться ещё раз к ключевым моментам противоречия и по возможности в сжатом виде просто необходимо.

Теория относительности^[7]

Довольно некорректно говорить о *постоянстве* скорости света, зная о том, что свет отклоняется в гравитационном поле Солнца. Этот эмпирический факт не подвергается никакому сомнению. Более того, в теории относительности величина координатной скорости света довольно произвольна и её величина зависит от выбора системы отсчёта. "Закон сложения скоростей" перестал быть законом, а правило сложения скоростей определяется конкретными формулами преобразования 4-координат. Инвариант скорости света остаётся лишь в истории физики и не более того, а второй постулат Эйнштейна принимает форму принципа локальной лоренц-инвариантности и входит составной частью в общий принцип эквивалентности. Всё это благодаря тому, что 3-скорость (макро-) потеряла свойство ковариантности, а потому и способность быть эталоном измерения пространственно-временных отношений.

Таким образом имеем:

- ☞ говорить о пространственном постоянстве величины скорости света в смысле её физической измеримости с помощью релятивистского эталона нет большого смысла, а о свойстве максимальности – тем более. Просто сам эталон теряет своё атрибутивное свойство – неизменность;
- ☞ говорить о величине скорости света в нелокальном смысле, то есть в интегральном, также не имеет смысла, поскольку возникают те же трудности как и для большинства интегральных величин в ОТО. Можно говорить лишь о её локальной величине (в точке);
- ☞ принцип постоянства скорости света (второй постулат) надёжно приобретает форму локальной симметрии в преобразованиях точечных событий.

Определённость понятия локальности в связи с пространственно-временными отношениями, казалось бы, должна проявиться в микромасштабах квантовой физики. Оказалось, не тут-то было.

Квантовая механика^[6]

Лоренцевская локальная инвариантность становится одной из симметрий точечных преобразований уже *абстрактных* пространственно-временных точечных событий, которым, вообще говоря, не находится места в квантовой физике. Просто для них нет прообразов – потому и абстрактных. Кроме того, "топологическая связка" между непрерывным пространством и непрерывным временем – скорость, определяемая как производная координаты по времени теряет смысл, поскольку сам результат этой операции (вычисленная скорость) оказывается величиной, некоммутирующей с исходной – координатой. Но это абсурд! Встаёт вопрос о необходимости отказаться от использования понятия производной в определении эволюции.

Отказаться от операций дифференцирования и интегрирования пространственно-временных характеристик, то есть операций с их бесконечно малыми величинами? Пожалуй, для квантовой физики это возможно, поскольку на манер уравнений Гейзенберга можно заменить операции дифференцирования по времени на скобочные алгебраические коммутаторы, переходя от методов решения дифференциальных уравнений с помощью математического анализа к динамической алгебре физических наблюдаемых для нахождения эволюции системы. Именно

таким образом можно надеяться на возможность перехода к описанию эволюции с помощью алгебраических методов.

Ситуация, связанная с запутанными фотонами, испущенными из одного источника имеет характерную релятивистскую особенность, обусловленную тем, что события, связанные с фотонами являются "одновременно" пространственноподобны и времениподобны, что делает невозможным установить причинную обусловленность этих событий. Поэтому *конкретные макровремена и макрорасстояния, связанные с фотонами Аспека, как интегральные характеристики и рассчитанные из точечных характеристик принципа локальной лоренц-инвариантности, строго говоря (метрически), не могут являться "предикатами" принципа причинности в "локальном исполнении"*.

Общее резюме

Продолжение решения парадокса ЭПР должно быть алгебраическим, а не традиционным топологическим. Есть надежда на то, что в этом случае и локальная причинность перестанет быть столь "большим" вопросом!

Мысленный эксперимент ЭПР и новая реальность Аспека

Феноменология

Координата и импульс - описывают фрагменты *реальности*, поскольку они представляют свойства реального объекта. Соотношение неопределённости Гейзенберга не позволяют их совместное измерение (лучше сказать – эти характеристики не могут сосуществовать). Однако квантовая механика только констатирует невозможность совместного измерения некоммутирующих величин: измерение одной из них вносит неконтролируемые изменения другой. Поскольку речь идёт о влиянии измерения одной величины на поведение другой и даже о принципиальной несовместимости совместного существования их значений полная теория должна иметь возможность описания механизма влияния одного на другое. Описания же взаимодействия при подобном влиянии квантовая механика не даёт.

Вывод по мнению Эйнштейна: *квантовая механика либо даёт неполное описание реальности, либо её интерпретация неверна*, поскольку нет описания механизма, запрещающего совместное измерение координаты и импульса.

Для усиления аргументации группы ЭПР можно предложить мысленный эксперимент такого типа.

Предположим, что в точке с *известными координатами* некая частица распадается на две, летящие в противоположные стороны. Когда частицы разлетелись на достаточное расстояние они подвергаются детектированию и измерению их импульсов. По результатам измерений вычисляется *импульс исходной частицы*. Таким образом нам удалось обойти принципиальный запрет соотношений неопределённости Гейзенберга на совместную измеримость координаты и импульса. Для исходной частицы мы измерили импульс (хотя и "задним числом", но одномоментно совместный с координатами). Координаты же исходной частицы были известны заранее. Помог нам закон сохранения импульса.

Для удовлетворения принципу неопределённости можно предположить (по Эйнштейну) существование элементов некой реальности, описываемой скрытыми параметрами взаимодействия частиц, которая не позволит нам точно измерять импульсы совместно с координатами и что самое важное в данном случае - расстояние между частицами никак не регламентировано, а значит скрытое взаимодействие может иметь любую скорость распространения.

Вывод ЭПР: *в квантовой механике возникла альтернатива, которая предполагает*

принятие одного из двух – неполноты описания или нелокальности взаимодействия.

Конкретные исследования в этом направлении связаны с теоретическими работами Белла и экспериментами Аспека.

Суть выводов Белла. Для дихотомической (принимающей только два значения) переменной с достаточно произвольной функцией распределения вероятностей были выведены общие неравенства. Аналогичные формулы были выведены для дихотомических наблюдаемых, описываемых квантовой теорией. Оказалось, что квантовомеханические соотношения нарушают неравенства Белла.

Суть экспериментов Аспека. В качестве дихотомической переменной Аспек выбрал поляризацию фотона и, в конечном счёте, экспериментально подтвердил теоретические результаты Белла. Суть этих подтверждений состояла в регистрации корреляционной связи между поляризациями двух фотонов, а в форме мысленного эксперимента с импульсами можно говорить о существовании корреляции между импульсами частиц, аналог которых, возможно, и не позволяет нарушить принцип неопределённости Гейзенберга.

Вывод: в результате вместо "элементов реальности" по Эйнштейну, требуемых для объяснения мысленного эксперимента ЭПР, вполне и бесспорно проявила себя "новая реальность" квантовой возможности, причём и теоретически, и экспериментально. Возникает вопрос: что дальше, что с ней можно делать?

Важную роль в разрешении возникших вопросов играют состояния систем так называемых запутанных частиц, а анализ их поведения приводит к весьма нетривиальным следствиям, выводы из которых могут быть использованным в технологических целях для передачи информации. Чтобы понять, как концептуально строятся системы запутанных частиц, рассмотрим пример получения решения для пары фотонов в эксперименте Аспека.

Рассмотрим, как получается решение волнового уравнения для двухфотонной системы.

Поскольку фотоны не взаимодействуют между собой, уравнение для замкнутой двухфотонной системы допускает разделение переменных по обеим частицам, что даёт возможным представить два независимых решения для каждого фотона с помощью одинаковых векторов состояния $|\psi\rangle$, поскольку фотоны находятся в идентичных состояниях, хотя и с разными параметрами.

Обозначим вектор первого фотона через $|\psi\rangle_1$, второго через $|\psi\rangle_2$. Следует отметить, что хотя $|\psi\rangle_1, |\psi\rangle_2$ и принадлежат к однотипным (одночастичным) гильбертовым пространствам, тем не менее, эти пространства разные. Поэтому вектор состояния двухчастичной системы необходимо записать в виде

$$|\Psi\rangle = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2. \quad (1)$$

Этот вектор принадлежит уже к двухчастичному гильбертовому пространству.

В координатном представлении вектора представляются волновыми функциями. Пусть ψ_1, ψ_2 волновые функции, соответствующие первому и второму фотонам. Учитывая, что волновые функции определены с точностью до множителя по модулю равным единице, представим эти функции в нормированном виде, выделив явно пространственно-временную и фазовую зависимости:

$$\psi_1 = \psi_1(x_1, y_1, z_1, t_1)e^{i\varphi_1}, \quad \psi_2 = \psi_2(x_2, y_2, z_2, t_2)e^{i\varphi_2}. \quad (2)$$

Состояния, описываемые векторами или волновыми функциями, называются *чистыми* состояниями.

Согласно (1), общее решение волнового уравнения для двухчастичной системы представляется в виде:

$$\begin{aligned} & \tilde{\psi}(x_1, y_1, z_1, t_1, \varphi_1; x_2, y_2, z_2, t_2, \varphi_2) = \\ & = \psi_1(x_1, y_1, z_1, t_1) \cdot \psi_2(x_2, y_2, z_2, t_2) e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} = \tilde{\psi} e^{i\chi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Волновая функция пары фотонов, как бозонов, должна быть симметричной относительно перестановки частиц. Чтобы удовлетворить этому требованию мы должны произвести операцию симметризации найденного решения после разделения переменных и получения решения в виде произведения волновых функций фотонов. После этого волновая функция Ψ для двухфотонной системы принимает вид:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \tilde{\psi}_1 e^{i\chi_1} + \tilde{\psi}_2 e^{i\chi_2} \} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \tilde{\psi}_1 + \tilde{\psi}_2 e^{i\delta} \} e^{i\chi_1}. \quad (4)$$

В связи с переходом от одночастичных описаний (2) к целостному описанию (4) происходит нечто, что называется потерей индивидуальности фотонов с фиксацией фазового соотношения между входящими волновыми функциями фотонов. Здесь, в (4):

во-первых, волновая функция Ψ симметрична относительно перестановки фотонов;
во-вторых, фазовый множитель δ становится внутренней характеристикой двухфотонной системы, которую теперь необходимо рассматривать как пару когерентных фотонов безотносительно к тому - где первый, а где второй.

Именно *когерентность*, то есть жёсткое закрепление фазовой разницы δ , и даёт эффект спутанности (связи) фотонов. Их же общая симметризованная волновая функция Ψ сама остаётся определённой с точностью до нового фазового множителя по модулю равным единице - $e^{i\chi_1}$, где χ_1 уже может принимать произвольные значения, поскольку когерентность фотонов, составляющих систему, фиксируется фазой δ .

Однако внутрифазовая связь по δ остаётся постоянной до тех пор, пока не будет разрушена целостность системы в результате рассогласования фаз между входящими в систему фотонами и эти компоненты не приобретут самостоятельность и независимость существования. Этот процесс естественно назвать *декогеренцией*.

В неразрушенной системе (системе спутанных когерентных фотонов (4)) каждый фотон уже не может быть представлен чистым состоянием, стандартно описываемым вектором или волновой функцией. Его описание возможно только с помощью, так называемых, матриц плотности — описания, которое является более общим в дисциплине квантовой механики.

Состояния, описываемые матрицами плотности, называются *смешанными* состояниями.

Характерным отличием смешанных состояний от чистых является следующее: энтропия чистых состояний равна нулю, энтропия Ξ смешанных состояний определяется по формуле

$$\Xi = -\overline{(\ln M)} = -\text{Sp}(M \ln M), \quad (5)$$

где M - матрица плотности системы. Энтропия обращается в нуль в случае чистого состояния, и только в этом случае. Неравенство нулю энтропии смешанного состояния означает наличие у таких систем информационной ёмкости (по Шеннону). В силу этого, именно с помощью модуляции фазы δ общей для компонент системы *спутанных* и *когерентных* частиц можно пытаться реализовать возможность передачи данных.

Принципы реализации передачи информации на основе двухфотонной модели предложил 1998 годы D. Greenberger^[1]. Подробнее ознакомиться можно в ^[2]. Наиболее естественным выглядит использование многочастичных систем спутанных частиц. Предполагаемое

использование трёхфотонной системы обосновывает Raymond W. Jensen в [3]. В работе [4] приведён конкретный расчёт спутанных состояний для двухфотонной системы.

Понять суть попытки передачи информации с помощью, например, трёхфотонной системы спутанных состояний можно, обратившись к работе [3]. Для начала отметим особенности релятивистского фона, на которых строится эксперимент.

Технология

В чём особенности экспериментов с фотонами?

1. Фотон – релятивистский объект. Все события, связанные с движением нескольких фотонов из одного источника можно рассматривать как времениподобные, так и пространственноподобные. Первое позволяет рассматривать эти события как происходящие в одной точке, то есть как локально и причинно связанные; второе – как одновременные и разноместные, причинно несвязанные (нелокальность). Однако движение фотонов происходит в конкретной системе отсчёта и события реально разделены и пространственно, и по времени. То есть, локальность/нелокальность, причинность/непричинность – "всё в одном". Однако в этих состояниях, вообще говоря, нет ни прошлого, ни будущего, ни близкого, ни далёкого, хотя в конкретной системе отсчёта присутствует и первое, и второе, и третье, и четвёртое.

Квантовая же теория связывает их в одно целое с помощью спутанных состояний нескольких частиц, каждая из которых может быть зарегистрирована своим детектором, как отдельный объект.

2. Спутанные квантовые объекты, как целое, могут описываться как чистые состояния, то есть с помощью волновых функций. Компоненты, составляющие эту спутанную целостность суб'объекты и именуемые "частицами", не могут быть описаны волновыми функциями. Они описываются матрицами плотности. Главной особенностью описания состояний с помощью матриц плотности – их ненулевая энтропия, что означает наличие у этого объекта информационной ёмкости. Это даёт принципиальную возможность обмена информацией между объектами, входящими в целостность.

3. Фотон – квантовый объект и обладает дихотомическим свойством – "поляризацией". Этим же свойством обладает и монохроматический луч света (по-видимому, это одно из немногих свойств в классической физике, подчиняющееся реальному квантованию). На этом основании эксперименты со светом могут достаточно адекватно имитировать поведение фотонов в отношении их поляризации.

4. В экспериментах со спутанными фотонами, в силу сказанного, суждения Боба с Алисой по поводу причинности событий, связанными со спутанными фотонами, могут оказаться совершенно неуместными. Например, если Алису и Боба поместить в системы отсчёта пена и карандаша одноименного парадокса [5], они никогда не смогут договориться. В задачах анализа событий, связанных распространением фотонов, их положение усугубляется фактом нулевого значения интервала, то есть единством пространственной и временной подобности событий.

Принцип передачи информации в трёхфотонной системе FTLC

FTLC-устройство¹⁾, предложенное в [3], показано рис. 1. Источником S испускаются триплеты запутанных фотонов, которые распространяются в плоскости с нормалью N как показано на рисунке. Отправитель - справа, Получатель - слева. Получатель располагает двумя приёмниками фотонов. При любом испущенном триплете из S Отправитель получает один фотон и выбирает либо измерение поляризации, либо стирание информации. Получатель тем временем получает два фотона и выполняет сравнение корреляций по типу эксперимента Аспека. Разница в статистиках корреляций является основой для FTLC.

¹⁾ Faster-Than-Light or superluminal Communication

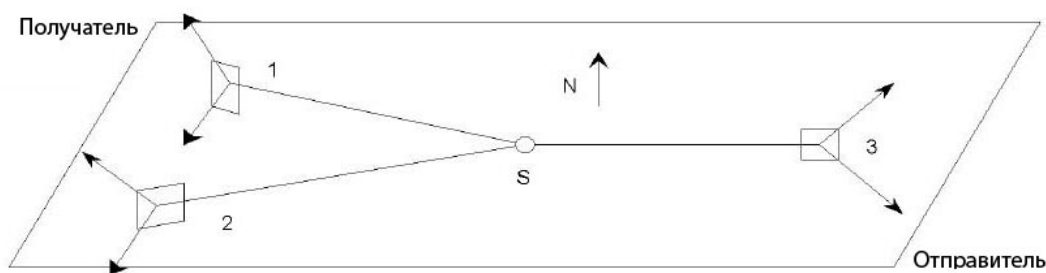


Рис. 1

Следует отметить, что авторы ^[2] не отвергают саму идею Гринбергера, выдвинувшем впервые идею сверхсветовой передачи, а лишь указывают на возможные технические недоработки при реализации концепции. Между тем и в их аргументации присутствуют очевидные некорректности связанные с неучётом особенностей релятивистского фона, на котором планируется эксперимент в фотонном исполнении (см. примечания 3, 4, 5, 6), в связи с чем мы и остановились подробнее в предыдущем разделе.

Ссылки

- [1] Greenberger D M 1998 Physica Scripta T 76 57.
 [2]. Gian Carlo Ghirardi, Raffaele Romano. arXiv:1205.1416v1 [quant-ph] 7 May 2012.
<https://www.academia.edu/32443461/>
 [3]. Raymond W. Jensen. *On using Greenberger-Horne-Zeilinger three-particle states for superluminal communication.*
<https://www.academia.edu/32443465/>
 [4]. Касимов ВА. *Некоторые топологические парадоксы СТО.* Новосибирск. 2014.
<https://www.academia.edu/32427340/>
 [5]. Касимов ВА. *Тень улыбки "Чеширского кота".* Новосибирск. 2014.
<https://www.academia.edu/32427332/>
 [6]. Касимов ВА. *Квантовая механика (принципы).* Новосибирск, "Сибпринт". 2013 г.
<https://www.academia.edu/32434510/>
 [7]. Касимов ВА. *Теория относительности.* Новосибирск, "Сибпринт". 2013 г.
<https://www.academia.edu/35877014/>

Для связи:

quadrica-m@mail.ru

Авторский семинар

<http://my.mail.ru/community/physiks.principis/?ref=cat>

<http://quadrica.ucoz.net/>

<https://independent.academia.edu/KasimovVladimir>

<https://vk.com/public128913510>

<https://www.facebook.com/notes/1557999174417186/>

<http://orcid.org/0000-0002-1435-9220>

В.А. Касимов. О парадоксе ЭПР. Особенности разрешения

Аннотация

При интерпретации результатов экспериментов А. Аспекта столкнулись две концепции - квантовой механики и теории относительности, что требует обстоятельного рассмотрения причин возникновения противоречий. Разбору этих вопросов посвящено много работ разных авторов, а затронутые здесь моменты также неоднократно выставлялись для анализа. Однако нам кажется, что обратиться ещё раз к ключевым моментам противоречия и по возможности в сжатом виде просто необходимо.

V.A. Kasimov. About the EPR paradox. Resolution features

Abstract

In interpreting the results of experiments A. Aspect faced two concepts of quantum mechanics and relativity theory, which requires a thorough consideration of the causes of contradictions. The analysis of these issues devoted many works of different authors, and the points raised here also have been exhibited for analysis. However, we feel that contact again to the key moments of the contradiction and possibly in compressed form is a must.