© М.Х.Шульман, 2013 (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

Нелокальность, дуализм и “невидимые” фотоны

(27.02.2013. Обновлено 28.02.2014)

Аннотация

Обсуждаются фундаментальные представления квантовой механики – нелокальность и корпускуляроно-волновой дуализм. Уточняется характер взаимодействия частиц в ЭПР-опыте, когда существует корреляции, но передача информации невозможна. Волновой аспект квантовой механики увязывается с волновыми свойствами полей одиночных элементарных частиц. Предлагается “пороговая” гипотеза, согласно которой квантовая случайность сводится к классической случайности значения (*нелокального* скрытого) фазового параметра частицы в момент измерения.

ЭПР-эксперимент как разновидность опыта Малюса

В известном законе Малюса речь идет о следующем опыте (рис. 1): фотоны с произвольной поляризацией, прошедшие сквозь поляризующий фильтр P1, *приобретают* поляризацию, соответствующую его оптической оси (y). Оптическая ось (p) второго поляризатора P2 повернута на некоторый угол θ относительно оси поляризатора P1 в плоскости, перпендикулярной направлению движения z.

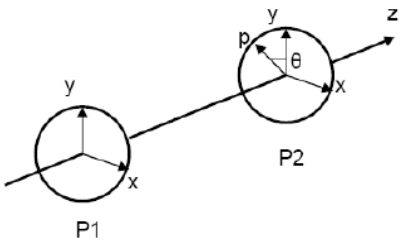

Рисунок 1. Опыт Малюса

Закон Малюса гласит, что в подобном опыте через поляризатор P2 пройдет только часть энергии падающего на него излучения (в частности, монохромного), и эта часть (доля фотонов) в относительном выражении будет равна $\cos^2\theta$, где θ – угол между направлениями оптических осей поляризаторов. Соответственно, часть фотонов, не прошедшая через P2, будет равна $\sin^2\theta$.

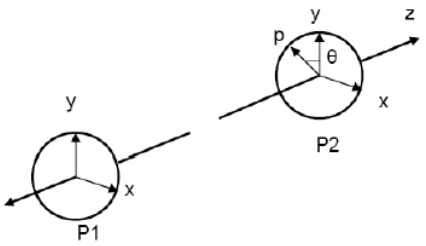

Рисунок 2. ЭПР-эксперимент

Рассмотрим теперь ЭПР-эксперимент (см., например, **[Aspect, 2000]**), схематически изображенный на рис. 2. В нем пара *запутанных* фотонов разлетается из общей точки в противоположные стороны. Оказывается (см., например, **[Белинский, 2008]**), этот опыт и качественно, и количественно можно рассматривать как опыт Малюса. Первый фотон, достигающий фильтра P1, можно рассматривать как *холостой* фотон, *запускающий окно экспозиции* определенной длительности (подобно тому, как это делалось, например, в опытах **[Grangier, 1986]**). Тогда ЭПР-опыт сводится к подсчету числа регистраций второго (рабочего) фотона на фильтре P2 в течение соответствующего окна. Поэтому *исход опыта будет определяться углом* между направлениями оптических осей поляризаторов, так что доля совпадений при регистрации фотонов будет пропорциональна величине $\cos^2\theta$, а несовпадений – величине $\sin^2\theta$.

О нелокальных взаимодействиях

В вышеописанных опытах величина разности $\theta = \theta_1 - \theta_2$ углов поляризации двух взаимно удаленных детекторов является глобальной характеристикой области, занимаемой рассматриваемым двухфотонным запутанным состоянием и поэтому бесспорно должна рассматриваться как *нелокальный* параметр. Соответственно, ЭПР-опыты показывают **[Salart et al., 2008]**, что угол любого из поляризаторов можно изменить буквально в “последний момент” перед измерением, и в тот же самый момент соответственно изменится разность θ.

Обычно в связи с этим обсуждается возможность сверхсветовой коммуникации между точками 1 и 2. Однако, с моей точки зрения, такой коммуникации *вовсе не требуется*. Обозначим внезапное скачкообразное изменение угла поляризации P1 через $\Delta\theta$. Ясно **[Shulman, 2006]**, что $(\Delta\theta + \theta_1) - \theta_2 = \Delta\theta + (\theta_1 - \theta_2)$, т.е. разность углов автоматически и в тот же момент изменяется на ту же самую величину $\Delta\theta$. Однако эта формальная линейная математическая операция суммирования должна обеспечиваться некоей *физической* структурой, т.е. как раз рассматриваемым запутанным двухфотонным состоянием. Действительно, математически этот результат верен для *любой* пространственной области, но только существование реальной двухфотонной запутанной области делает его физически осмысленным. Эта область, по существу, играет роль своего рода *несжимаемого* стержня; хотя теория относительности, как считается, запрещает существование подобных стержней, поскольку при движении стержня его длина сокращается в соответствии с преобразованиями Лоренца, однако в данном случае “стержень”, т.е. составляющие его фотоны, движутся со скоростью света в *любой* системе отсчета, так что его длина также не меняется в любой системе отсчета.

Так взаимодействуют ли между собой приборы P1 и P2? Взаимодействие в физике принято в общем случае связывать с обменом энергией. Когда энергия *с определенностью* передается из точки 1 в точку 2, действие для этого процесса отлично от нуля, интервал между событиями 1 и 2 имеет времени-подобный характер. При обратном процессе, когда такая же энергия передается из точки 2 в точку 1, действие и интервал меняют знак на противоположный. Но возможен промежуточный случай, когда в *среднем* передаваемая энергия нулю, т.е. энергия и информация *не передаются*. Однако (если два такие события физически соединены, например, упомянутым несжимаемым стержнем) возможно, что при этом отлично от нуля *среднеквадратичное* значение энергии обмена (ср. с флуктуациями вакуума,

приводящими, например, к сдвигу Лэмба). Это и приводит к корреляциям без обмена информацией.

Волновой аспект квантовой механики и состояние суперпозиции

Мы можем сказать, что и в законе Малюса, и в ЭПР-опыте фактическое (измеренное) состояние фотона $|c\rangle$ можно разложить в двумерном ортогональном базисе $\{|a\rangle,|b\rangle\}$ в гильбертовом пространстве. Это измеренное состояние представляет собой суперпозицию базисных состояний и характеризуется углом θ, который состояние образует с базисными векторами:

$$|c\rangle = \cos\theta|a\rangle + \sin\theta|b\rangle$$

Соответственно, проекции этого состояния выражаются через синус и косинус этого угла (в данном случае – угла между осями поляризации фильтров).

В свое время Н.Бор сформулировал знаменитый принцип дополнительности, который декларировал, что качественно квантовые объекты в одних опытах ведут себя как волны, а в других – как частицы. Однако современные представления, основанные на большом экспериментальном материале, позволили уточнить этот принцип. Уже в рамках одного и того же эксперимента можно ввести два параметра: *видность* интерференции (*visibility*) V, характеризующую степень проявления волновых свойств, и *различимость* пути (*distinguishability*) D, характеризующую степень проявления корпускулярных свойств, причем в идеальном случае $V^2 + D^2 = 1$. В частности, в работе **[Jacques et al., 2008]** этот вывод проверен в экспериментах с интерферометром Маха-Цандера: измеренные значения V и D подчиняются условию $V^2 + D^2 \leq 1$. И опять-таки, величины V^2 и D^2 могут быть связаны с квадратами синуса и косинуса угла состояния относительно базисных состояний.

Синусная и косинусная составляющие совместно описывают не что иное, как гармоническую волну, соответствующую линейному осциллятору. У линейного гармонического осциллятора *без потерь* сдвиг по фазе θ между (обобщенной) координатой и (обобщенным) импульсом составляет по абсолютной величине π/2. В этом случае колебания энергии в системе носят, как говорят, чисто *реактивный* характер, она никуда не уходит из системы. Если же в осцилляторе имеются потери (как, например, в электрическом контуре, который содержит не только конденсаторы и индуктивности, но и резисторы), то сдвиг по фазе θ между координатой и импульсом отличается от π/2, и полная энергия, наряду с реактивной, включает в себя и *активную* компоненту, которая в течение периода безвозвратно уходит из системы. Поэтому в теории гармонических процессов *полную энергию принято рассматривать как комплексную величину, содержащую действительную (активную) и мнимую (реактивную) части*.

Связь между представлениями о волне и частице становится гораздо прозрачнее, если заметить, что *числу* частиц, регистрируемому в единицу времени, соответствует переносимая *активная* мощность, пропорциональная *квадрату косинуса* углового параметра θ[1]. Но это означает, что можно ввести *полное* число частиц, которое

[1] Фактически мы приходим к известному правилу Борна, согласно которому плотность вероятности обнаружить частицу пропорциональна |ψψ*|. Угловой параметр θ эквивалентен фазовому сдвигу между

соответствует полной (комплексной) мощности, и что существует также и *реактивная* компонента мощности, т.е. та доля числа частиц, которая *не регистрируется* детекторами. Поэтому при изменении в ЭПР-опыте разности θ углов поляризации детекторов *полное* число частиц *не изменяется*, а перераспределяется, так что сумма зарегистрированных совпадений и несовпадений остается *постоянной*.

Волновые свойства фотона. Пороговая гипотеза

Почему же такую роль играют синусные и косинусные составляющие? Можно думать, что волновые свойства возникают непосредственно на уровне элементарных квантовых частиц – фотонов, электронов и др. В самом деле, при описании, например, фотона в квантовой оптике от комплексной амплитуды электрического поля переходят к описанию с помощью так называемых квадратур, одна из которых соответствует обобщенной *координате*, а другая – обобщенному *импульсу* электромагнитного осциллятора. Соответственно, первая соответствует потенциальной энергии электромагнитного осциллятора, а вторая – его кинетической энергии. Их сумма постоянна во времени, тогда как каждая из ее составляющих *колеблется* во времени (т.е. в точности так же, как это имеет место и для механического осциллятора). Так что, с одной стороны, говоря о тождественности фотонов “вообще”, мы, с другой стороны, должны понимать, что каждый фотон в один момент времени отличается от того, чем он является в другой момент времени, и это различие однозначно связано с *фазой* колебаний электромагнитного поля, переносимого фотоном.

Эта фаза, я думаю, является чистой воды “скрытым параметром” в том смысле, как это понимали фон Нейман и Белл. В стандартной квантовой теории, отрицающей существование *локальных* “скрытых параметров”, все квантовые события рассматриваются как “истинно” случайные. Однако в ряде работ уже сравнительно давно выдвигается идея о том, что относительная фаза парциальных членов волновой функции может играть роль *нелокального* скрытого параметра и даже может быть в принципе экспериментально измерена (см., например, **[Peil, 2013]**), так что теорема Белла *не препятствует* такой возможности.

Таким образом, регистрация (или нет) частицы детектором однозначно зависит от того, при каком именно (случайном) значении фазы колебаний частица встретится с детектором. Детектор регистрирует частицу, которая отдает ему свою *активную* энергию. Если эта частица – гармонический осциллятор, то ее *полная* энергия может быть представлена в виде *комплексной* величины. Действительная составляющая зависит от (обобщенного) импульса, это активная энергия, которая может *необратимо* передаваться от одной системы к другой, переносить информацию, переходить в тепло и т.д. Мнимая же составляющая отвечает потенциальной энергии, зависящей от (обобщенной) координаты. Это - реактивная энергия, как таковая связанная с протеканием строго *обратимых* колебательных процессов[2].

Тогда можно выдвинуть следующую “*пороговую*” гипотезу. Чтобы детектор сработал, доля *кинетической* (не полной!) энергии элементарного единичного осциллятора (фотона) должна оказаться выше некоторого порогового значения,

---

обобщенной координатой (например, напряженностью электрического поля) и обобщенным импульсом (например, напряженностью магнитного поля) в процессе колебаний поля частицы.

[2] Впрочем, возможны и переходы между этими формами энергии, например: заряд конденсатора от источника энергии или разряд конденсатора через резистор.

зависящего от вышеупомянутого угла θ (нелокального параметра). Рассмотрим этот вопрос поподробнее.

Энергия фотона определяется хорошо известным соотношением $E=\hbar\nu$, а модуль амплитуды связанного с ним поля – квадратным корнем из этой величины. Фаза колебаний квадратуры-импульса сдвинута по фазе относительно квадратуры-координаты. Чтобы кинетическая энергия (квадратура-импульс) *превышала* некоторый пороговый уровень, нужно, чтобы квадратура-координата была, наоборот, *меньше* соответствующего порога. Угол θ характеризует *пространственное* направление колебаний квадратуры-координаты, поэтому, если эта компонента колеблется по закону sin ωt, то интегрируя в пределах от θ до (– θ), мы как раз получим в качестве критерия превышения амплитудой *квадратуры-импульса* величину, пропорциональную cos θ, а для необходимой кинетической энергии (и квантовой вероятности) – величину, пропорциональную $\cos^2\theta$.

В случае поляризационных опытов (Малюса, ЭПР) угол θ равен разности поляризационных углов двух детекторов и задает распределение между отраженной и прошедшей долями фотонов.

Гипотеза о существовании порогового значения, которое должен преодолеть фотон, имеет, как я думаю, косвенное подтверждение при рассмотрении процессов в *нелинейном* светоделителе. В *квантовой* теории такого светоделителя автоматически учитывается принцип неопределенности Гейзенберга, согласно которому разброс коэффициента пропускания, приводящий к разбросу выходного сигнала *по амплитуде*, должен антикоррелировать с разбросом по фазе. Однако *классическая* модель **[Белинский, 2011]** не дает никаких указаний на появление такой антикорреляции (как и вообще какой-либо корреляции). Но если излагаемая гипотеза верна, то, как мы видели, селекция пропускаемых светоделителем фотонов по амплитуде и фазе *не является случайной*, связана с параметром θ, и амплитуда и фаза должны антикоррелировать именно так, как предписывается принципом неопределенности Гейзенберга.

Другое соображение связано с переходом от опыта с большим числом частиц к опыту с единичной частицей. Уменьшая число частиц в опыте, мы рано или поздно приходим к ситуации, когда частица (например, фотон) должна либо “разделиться”, либо вести себя *вероятностным* образом. Но откуда фотон “знает”, с какой именно вероятностью он должен выбирать тот или иной вариант пути? В свете пороговой гипотезы каждый раз ответ на этот вопрос получается путем сравнения случайной фазы колебаний во времени его электромагнитного поля с функцией *нелокального* параметра θ. Разумеется, если одновременно делается попытка дополнительного контроля траектории частицы, то значение нелокального параметра искажается.

“Невидимые” фотоны

Разберем еще один важный вопрос, не получивший, с моей точки зрения, полного описания в литературе. Хорошо известен опыт с интерферометром Маха-Цандера рис. 3). Интерферометр состоит из двух светоделителей (B1 и B2) и двух зеркал (M). Согласно *корпускулярным* представлениям, на выходе интерферометра фотоны с *равной вероятностью* регистрируются детекторами D1 и D2. Однако *волновая* теория и квантовая механика предсказывают другой результат, соответствующий действительности (см., например, **[DeWeerd, 2001]**). Пусть, в частности, оптические длины верхнего и нижнего плеча интерферометра равны, а

коэффициент отражения первого светоделителя равен коэффициенту пропускания второго светоделителя. Тогда фотон, проникающий в интерферометр снизу, всегда будет обнаружен в первом детекторе (D1) и никогда – во втором (D2).

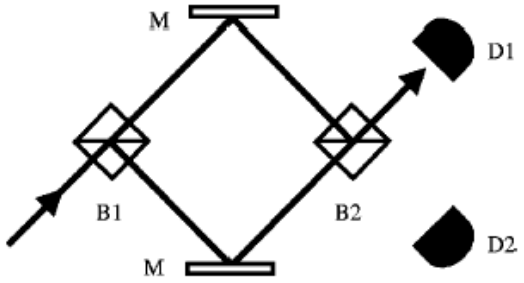

Рисунок 3. Интерферометр Маха-Цандера (**[DeWeerd, 2001]**)

Действительно, волновое описание учитывает *фазы* фотонов. Волна, поступающая на выход D2, состоит из двух компонент одинаковой амплитуды, но противоположных по фазе, так что суммарная амплитуда волны, достигающей детектора D2, всегда равна нулю. Точно так же на воде две волны от разных источников, встречаясь, могут взаимно погасить друг друга в определенных точках вследствие интерференции[3].

Но что означает отсутствие фотонов в точках с нулевой суммарной амплитудой волны? В наивной постановке вопрос звучит так: куда “исчезают” фотоны? Стандартная квантовая механика в этом случае может только развести руками. Однако высказанная нами выше гипотеза о колебании во времени составляющих энергии фотона позволяет предложить другой ответ: фотоны не исчезают в окрестности детектора D2, но не *регистрируются* им, поскольку их активная компонента энергии (благодаря конфигурации интерферометра) в этой точке всегда равна нулю и не может быть использована детектором для отбора сигнала. Это означает, что информация со входа интерферометра не может быть передана в точку D2. Следовательно, не только пространственно-подобное разделение двух точек может препятствовать односторонней передаче энергии и информации между ними.

Приложение

Об одной попытке опровергнуть существование ЭПР-парадокса

К настоящему времени известно большое число попыток теоретических попыток опровергнуть теорему Белла и существование ЭПР-парадокса. В частности, с конца 1990-х годов свое решение неоднократно публикует профессор В. Хофер, автор интересных публикаций, в которых он подвергает ревизии различные представления квантовой механики (в том числе, соотношение неопределенностей и пр.). Его доказательство ошибочности теоремы Белла как раз связано с тем, что говорилось выше, поэтому я, в свою очередь, подвергаю критике концепцию д-ра Хофера (см., например, **[Hofer, 2011]**).

[3] Заметим, что в общем случае интерференция приводит к “частичному исчезновению” частиц, что проявляется, например, в известном опыте с двумя щелями.

Для каждого из разлетающихся ЭПР-фотонов Хофер использует комплексную волновую функцию вида $R(\varphi) = \exp^{i\varphi}$, где φ - измеренное (случайное) значение угла поляризации для соответствующего фотона в точке детектирования.

Тогда для вероятностей детектирования 1-го и 2-го фотонов получаем

$$p(\varphi_1) = \{\mathrm{Re}[R(\varphi_1)]\}^2, \quad p(\varphi_2) = \{\mathrm{Re}[R(\varphi_2)]\}^2.$$

т. е. вероятность каждого независимого измерения есть квадрат *действительной части* волновой функции. Обычно вероятность совместного результата вычисляют как произведение:

$$p(\varphi_1, \varphi_2) = \{\mathrm{Re}[R(\varphi_1)] \cdot \mathrm{Re}[R(\varphi_2)]\}^2$$

Но Хофер предлагает использовать другое соотношение:

$$p_H(\varphi_1, \varphi_2) = \{\mathrm{Re}[R(\varphi_1) \cdot R(\varphi_2)]\}^2$$

Таким образом, вместо *произведения действительных частей* используется *действительная часть от произведения двух комплексных сомножителей,* и только тогда получается требуемое значение для коэффициента корреляции:

$$p_H(\varphi_1, \varphi_2) = \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta)$$

Но, с моей точки зрения, эта замена справедлива лишь в том случае, если измерения в точках 1 и 2 производятся над физически *единым* объектом, т.е. на краях “абсолютно твердого стержня”, которым является нелокальная ЭПР-пара запутанных фотонов!

Ссылки:

[Aspect, 2000] Alain Aspect. Bell's theorem: the naive view of an experimentalist. "Quantum [Un]speakables - From Bell to Quantum information", edited by R. A. Bertlmann and A. Zeilinger, Springer (2002). Available at http://arXiv.org/abs/quant-ph/0402001
Выступление на конференции памяти Джона Белла, состоявшейся в Вене в декабре 2000 года. Русский перевод “Теорема Белла: наивная точка зрения экспериментатора” доступен по ссылке:
http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/aspek_teorema_bella.pdf .
[DeWeerd, 2001] Alan J. DeWeerd. Interaction-free measurement.
http://www.quantum3000.narod.ru/papers/edu/IFM-AJP.pdf
Русский перевод “Измерение, свободное от взаимодействий”, доступен по ссылке:
http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Interaction_free_meas.pdf
[Grangier et al, 1986] Grangier P., Roger G. and Aspect A. Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A new Light on Single-Photon Interferences. Europhysics Letters, **1**(4), pp. 173-179 (1986). Русский перевод “Экспериментальное подтверждение эффекта антикорреляции фотонов в светоделителе: интерференция одиночных фотонов в новом свете” доступен по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Grangier_1986_rus.pdf

[Hofer, 2011] Werner A. Hofer. Solving the Einstein-Podolsky-Rosen puzzle: the origin of non-locality in Aspect-type experiments. ArXiv:1109.6750v3 [physics.gen-ph] 7 Jun 2012
[Jacques et al., 2008] Vincent Jacques, E Wu, Frederic Grosshans, Francois Treussart, Philippe Grangier, Alain Aspect and Jean-Francois Roch. Delayed-choice test of complementarity with single photons. arXiv:0801.0979v1 [quant-ph] 7 Jan 2008
Русский перевод доступен по ссылке:
http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Wheeler_2.pdf
[Peil, 2013] Steven Peil. Proposed Test of Relative Phase as Hidden Variable in Quantum Mechanics. arXiv:1302.3787v1 [quant-ph] 15 Feb 2013. Русский перевод “Предлагаемый тест для относительной фазы как скрытого параметра в квантовой механике” доступен по ссылке
http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/1302_3787_Phase_as_hv_ref.pdf
[Salart et al., 2008] D. Salart, A. Baas, C. Branciard, N. Gisin, and H. Zbinden. Testing spooky action at a distance arXiv:0808.3316v1 [quant-ph] 25 Aug 2008. Русский перевод “Тестирование призрачного действия на расстоянии” доступен по ссылке:
http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Gisin_spooky_action.pdf
[Shulman, 2006] Shulman Michael. Why Quantum Mechanics is Non-local
http://www.timeorigin21.narod.ru/eng_quantum/Eng_Why_QM.pdf
Шульман М.Х. Почему квантовая механика нелокальна
http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/Why.pdf
[Белинский, 2008] Белинский А.В. УФН, 2003, **173**, 8, с. 905-908.
[Белинский, 2011] Белинский А.В., Грановский А.А. Парадокс нелинейного светоделителя и селекция фотонных флуктуаций. Письма в ЖЭТФ, том 93, вып. 9, с. 552-554.