

ЭПР: моделирование единичных квантовых событий (Обновлено: 07.06.2015)

The obvious models of individual quantum event in the frame of EPR-experiment are considered. Along with the quantum model and the Local Realistic one a Local Indeterministic model is shortly analyzed. It is shown that any adequate EPR-model should be non-local, in this case EPR-experiment adds up to Malus-test. I propose also an explanation how the Malus law originates during individual passing of a photon through the polarizer.

Рассмотрены “наглядные” модели единичных квантовых событий в рамках ЭПР-эксперимента. Наряду с квантовой моделью и моделью Локального Реализма рассмотрена индетерминистическая модель измерения. Показано, что адекватная модель ЭПР должна быть нелокальной, в этом случае ЭПР-эксперимент сводится к опыту Малюса. Предложена модель возникновения закона Малюса при единичных измерениях над фотоном.

Введение

Как известно, в ЭПР-экспериментах по проверке нарушения неравенства Белла имеют дело с разлетом пар когерентных фотонов из общей пространственной точки (см. [Aspect, 2000], [Weihs et al., 1998]). С обеих сторон установки имеются поляризационные фильтры, разделенные пространственно-подобным интервалом. В эксперименте подсчитываются совпадения при прохождении фотонов через поляризаторы, причем опыты осуществляются фактически с независимыми парами фотонов, а не с их интенсивным потоком. Последнее представляет особый интерес, поскольку квантовая механика дает лишь статистические предсказания для серии таких опытов.

В подобных ЭПР-экспериментах используют так называемые счетчики событий N_{++} , N_{+-} , N_{--} и N_{-+} . Например, N_{++} – это количество таких событий (совпадений), когда разлетевшиеся из общей точки когерентные фотоны прошли одновременно через оба поляризатора на концах ЭПР установки. Далее, N_{+-} – это количество таких событий, когда один фотон разлетевшейся пары прошел через первый поляризатор, а другой фотон не прошел через второй поляризатор, и т.д. Общее число событий N есть сумма всех четырех счетчиков событий, т.е. полное число учитываемых пар когерентных фотонов. Через счетчики событий вычисляется функция корреляции:

$$K = (N_{++} + N_{--} - N_{+-} - N_{-+})/N = P_{++} + P_{--} - P_{+-} - P_{-+}$$

где P – нормированные на N соответствующие вероятности событий. Квантовая механика (КМ) предсказывает следующие выражения:

$$P_{++}(\theta) = P_{--}(\theta) = \frac{1}{4} (1 + \cos 2\theta)$$

и

$$P_{+-}(\theta) = P_{-+}(\theta) = \frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta),$$

где θ – угол между ориентациями оптических осей двух поляризаторов. Соответственно, коэффициент корреляции K дается в КМ выражением $K = \cos 2\theta$.

Эти предсказания хорошо соответствуют данным эксперимента (см. рис.1).

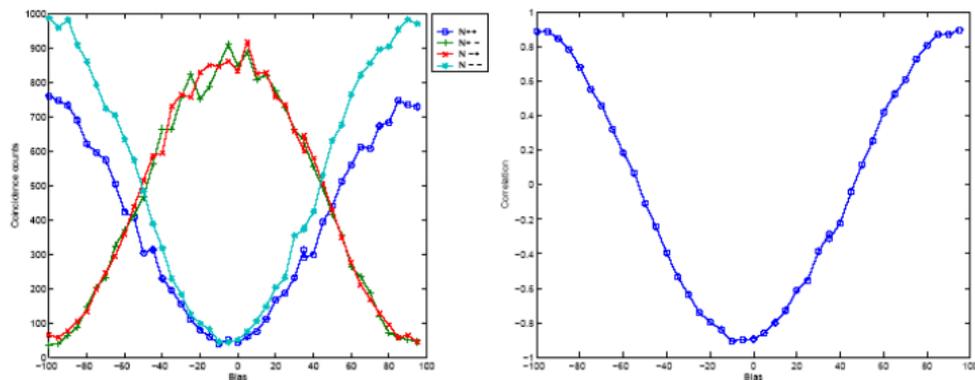


Рисунок 1 [Adenier and Khrennikov, 2006].

Слева – счетчики событий в зависимости от угла между осями поляризаторов в одном из ЭПР-экспериментов по проверке неравенства Белла [Weihs et al., 1998]. Справа – функция корреляции

Локальные детерминистические модели измерения и теорема Белла

Жесткая корреляция между одновременным прохождением (непрохождением) обоих фотонов через поляризаторы, предсказываемая КМ и подтверждаемая экспериментом, влечет за собой коллизию между КМ и теорией относительности, поскольку приводит к представлению о *нелокальном* (“мгновенном”) взаимодействии событий, разделенных пространственно-подобным интервалом. В попытках преодолеть эту коллизию вплоть до настоящего времени предлагаются так называемые теории со “скрытыми переменными”. Эти теории связывают корреляцию с существованием общего для двух когерентных фотонов фактора, который при взаимодействии фотонов с поляризаторами мог бы породить взаимно согласованные результаты.

В таких теориях действие общего фактора обычно подразумевается локальным (ограниченным местонахождением поляризатора и моментом измерения), а также детерминистическим (т.е. полностью воспроизводимым при повторении тех же настроек эксперимента). Однако два этих условия, как утверждает теорема Белла, противоречат предсказаниям квантовой механики, поскольку требуют выполнения неравенства Белла-Клаузера-Хорна-Шимони-Хольта (BCHSH). Между тем и ЭПР-эксперименты, и КМ говорят о невыполнении в общем случае этого неравенства.

Хочу добавить, что доказательство теоремы Белла связано с совместным рассмотрением нескольких конфигураций эксперимента и выглядит весьма формальным. В работе [Shulman, 2006] я высказал предположение, что фактически выполнение этого неравенства связано с линейностью зависимости результатов эксперимента от угла θ , так что любая теория (в том числе КМ), предсказывающая нелинейную зависимость, будет несовместима с Локальным Реализмом (терминология Дж. Белла). На рис. 2 показаны результаты выполненного мной на компьютере моделирования для подобной теории, описанной в качестве иллюстрации в работе [Aspect, 2000].

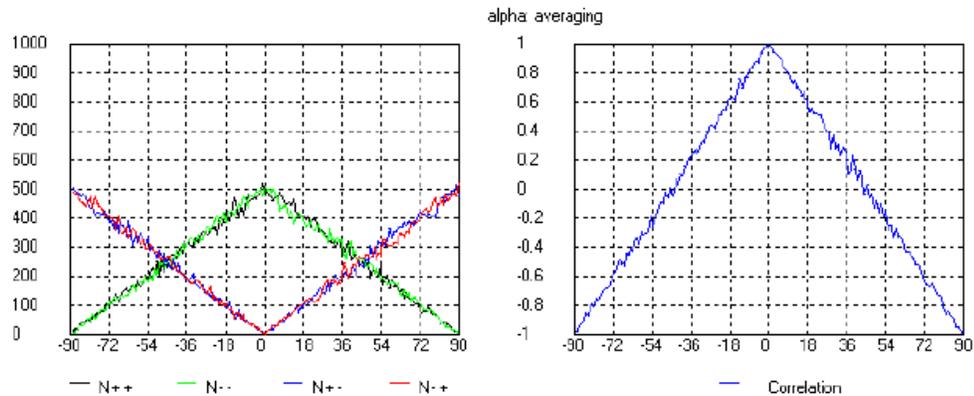


Рисунок 2. Моделирование ЭПР-эксперимента (детерминистическая “наивная” модель) при усреднении углов между поляризацией фотона и оптическими осями поляризаторов.

Индетерминистические локальные модели измерения

Теорема Белла, однако, ничего не говорит о возможности описать ЭПР-эксперимент, исходя из *индетерминистической* модели измерения над фотоном при его прохождении через поляризатор. Гипотетически это могло бы объяснить ЭПР-корреляции, тем более, если учесть, что вычисление коэффициента корреляции по стандартным правилам статистики (т.е. для *отклонений* от математического ожидания и при нормировании на среднеквадратический разброс по отношению к этому ожиданию) действительно дает его значение $\cos 2\theta$, соответствующее предсказанию КМ. Однако если рассчитывать коэффициент корреляций по показаниям не отклонений, а исходных показаний счетчиков совпадений/несовпадений событий (как это делается в реальных экспериментах), т.е. нецентрированный коэффициент корреляции, то он оказывается в два раза меньше¹ и не превышает по абсолютной величине 0.5. И аналитические расчеты, и компьютерная имитация приводят к зависимостям для этой модели, приведенным на рис. 3.

Здесь очень важны следующие два взаимосвязанных обстоятельства. Во-первых, из рис. 1 нетрудно видеть, что экспериментально установленный размах графика корреляционной функции (90%) лежит значительно ближе к предсказанию КМ (100%), чем к найденному для модели локального индетерминизма значению 50%. Более того, при 50%-ом размахе нарушение неравенств Белла было бы невозможным. Во-вторых, минимальные значения счетчиков событий оказываются существенно положительными.

Отличие минимального значения счетчиков событий от нуля *противоречит* квантовой механике как количественно, так и качественно. Действительно, согласно КМ факт совпадения или несовпадения регистрации фотонов в двух поляризаторах зависит только от угла ($\theta_I - \theta_{II}$) между осями поляризаторов. Например, если этот угол равен 90 градусов, то совпадения невозможны. Напротив, в модели локального индетерминизма, соответствующей закону Малюса, совпадения возможны даже при ортогональной ориентации поляризаторов, если разность между “истинной”

¹ Это объясняется несоблюдением при такой нормировке условий теоремы Белла (см. [Belinskii and Klyshko, 1993], [Barut and Meustr, 1984]).

поляризацией фотона λ и углом θ_I (и θ_{II}) отлична от нуля (см. рис. 4). Именно этим и объясняется смещение вверх графиков на рис. 3 (слева) при усреднении по различным значениям λ .

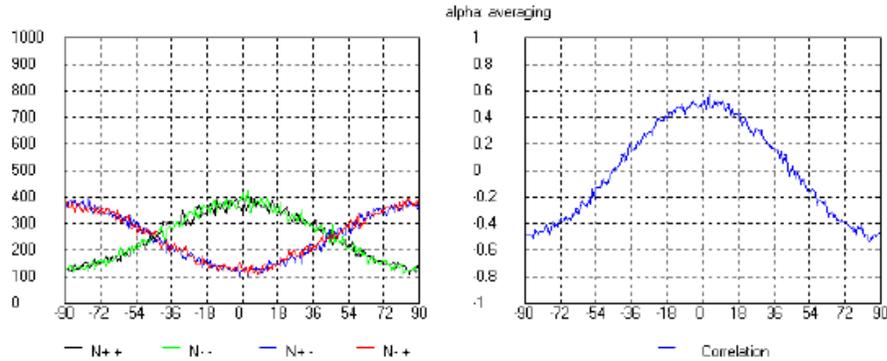


Рисунок 3. Моделирование ЭПР-эксперимента для индетерминистической модели измерения фотона на основе закона Малюса (для каждого поляризатора в отдельности) при усреднении углов между поляризацией фотона и оптическими осями поляризаторов.

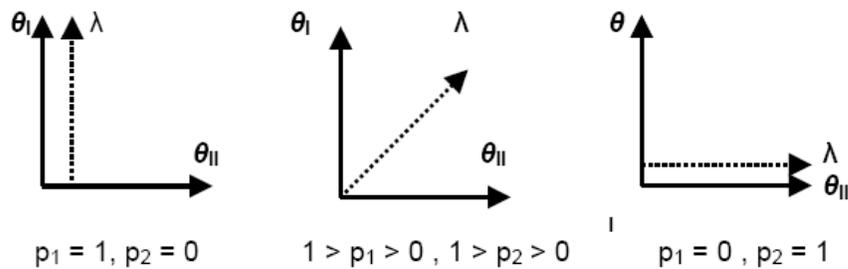


Рисунок 4. Предсказания модели локального индетерминизма при взаимно-перпендикулярном расположении осей поляризаторов.

Этот вывод носит достаточно общий характер. Даже если локальная *индетерминистическая* модель основывалась бы не на законе Малюса, а на каком либо ином конкретно законе, то усреднение по λ неминуемо дает ненулевой вклад в минимальные значения счетчиков событий.

Таким образом, теорема Белла, накладывающая ограничения лишь на локальные детерминированные модели, может быть расширена до *обобщенного тезиса Белла*, который состоит в *полном* признании неспособности *локальных* моделей (как детерминистических, так и индетерминистических) объяснить подтверждаемые в ЭПР-опытах предсказания квантовой механики.

“Кронингенская” модель квантовых единичных событий

В серии работ [de Raedt et al., 2004 - 2005] сотрудников университетского центра в г. Кронинген (Нидерланды) описан интересный подход к имитации

единичных (event-by-event) квантовых событий на основе детерминистических и статистических самообучающихся компьютерных моделей. Он основан на том, что при достаточно большом объеме обучающей выборки разработанная ими модель выдает псевдо-статистические результаты для единичных дихотомических событий с вероятностью $\cos^2\theta$. Выполненное *мною* (на основе опубликованного указанными авторами алгоритма) компьютерное моделирование *поляризатора* действительно полностью подтвердило совпадение результатов с законом Малюса. Однако оставался ключевой вопрос: как проявляет себя модель при ЭПР-измерениях *сразу над двумя фотонами* – как детерминистическая или как индетерминистическая?

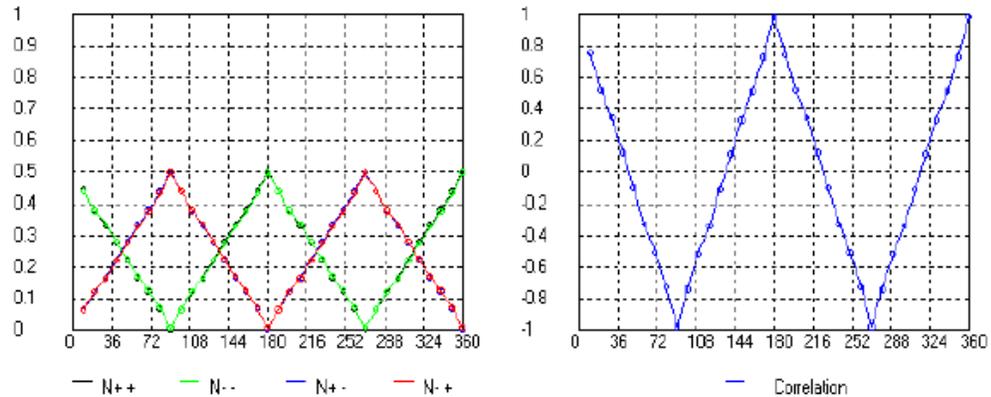


Рисунок 5. Результаты имитационного эксперимента для “кронингеновской” модели ($S = 1$, $P_{++ \text{ min}} = 0$, $K_{\text{max}} = 1$)

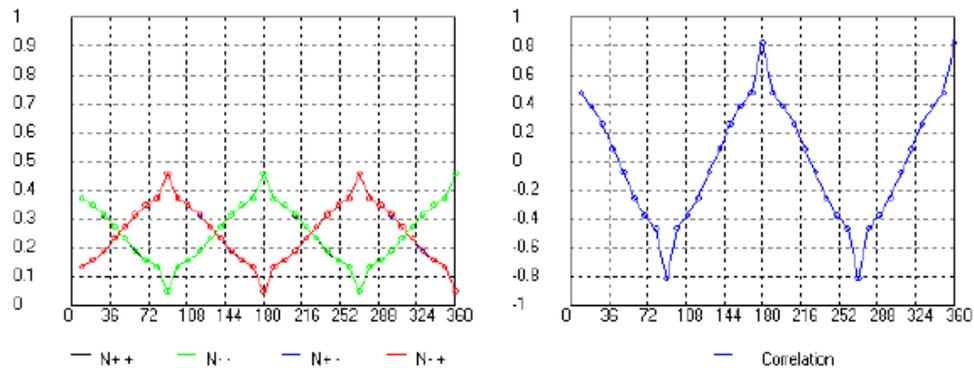


Рисунок 6. Результаты имитационного эксперимента для “кронингеновской” модели ($S = 100$, $P_{++ \text{ min}} = 0.05$, $K_{\text{max}} = 0.82$)

Результаты компьютерного моделирования, как оказалось, зависят от объема S обучающей выборки. На рис. 5 приведены результаты для выборки с минимальным объемом ($S = 1$), а на рисунке 6 – для выборки с $S = 100$. В первом случае мы, как и следовало ожидать, получаем чисто детерминистический вариант, во втором – вариант, очень близкий к индетерминистической модели. Дальнейшее увеличение объема выборки практически не меняет характера зависимостей, за исключением особых точек, которые соответствуют углам между ориентациями оптических осей поляризаторов, кратным 90° (положение этих точек варьируется в пределах 20%). В обоих случаях поведение модельных зависимостей не соответствует данным эксперимента (рис. 1) и предсказаниям КМ.

В недавно опубликованной работе [Zhao et al., 2007] практически тот же коллектив авторов приводит результаты *собственного* моделирования. Как и следовало ожидать, прямое моделирование дает всего лишь 50%-амплитуду корреляционной функции (черные кружки на рис. 7). Авторы пытаются преодолеть это обстоятельство, вводя некоторый механизм распределения моментов регистрации фотонов и недостаточно аргументированный дополнительный параметр модели d . При $d = 4$ им удается достичь согласия с опытом (красные квадратики на рис. 7). Однако предсказания КМ (сплошная линия на рис. 7) были сделаны без всякого использования подобной дополнительной степени свободы, и поэтому такое решение проблемы не может, с моей точки зрения, считаться удовлетворительным.

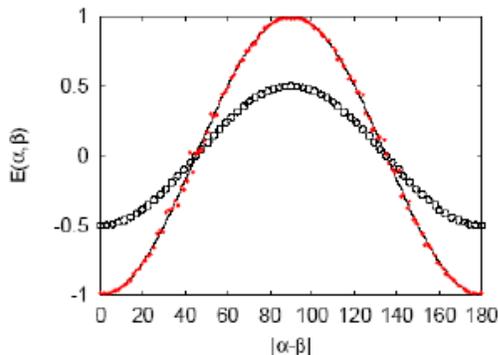


Рисунок 7. Корреляционная функция в имитационном ЭПР-эксперименте [Zhao et al., 2007]. Красные квадратики соответствуют предсказанию квантовой теории (сплошная линия) и механизму задержки во времени моментов регистрации фотонов (с параметром $d = 4$). Черные кружки отвечают отсутствию такого механизма ($d = 0$).

Так или иначе, вопрос о возможности построения “наглядной” модели единичных событий, отличной от квантовомеханического описания, остается открытым. Попытка дать ответ на этот вопрос делается в оставшейся части настоящей публикации.

ЭПР-эксперимент как разновидность опыта Малюса

В законе Малюса речь идет о следующем опыте (рис. 8): фотоны с произвольной (или неопределенной) 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 .

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

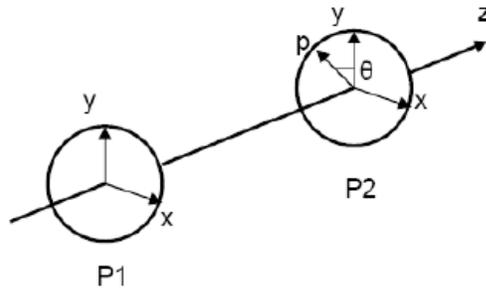


Рисунок 8. Опыт Малюса

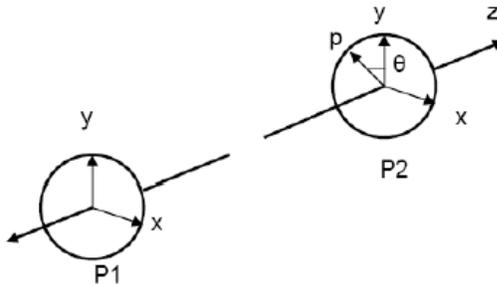


Рисунок 9. ЭПР-эксперимент

Рассмотрим теперь ЭПР-эксперимент (рис. 9). В нем фотоны разлетаются из общей точки в противоположные стороны, и в силу случайных факторов один из них достигнет своего поляризатора чуть раньше, а другой – чуть позже (в системе отсчета, где оба фильтра покоятся). Примем теперь, что фотон 1, измеренный чуть раньше, приобрел определенную поляризацию. Далее, будем исходить из того, что опыт *существенно нелокальный*, т.е. что фотон 2 синхронно с этим событием приобрел ту же самую поляризацию. Тогда мы сразу же приходим к схеме опыта Малюса, в котором фотон 2 измеряется *после того*, как фотон 1 уже имеет определенную поляризацию. Поэтому *исход опыта будет снова определяться углом* между направлениями оптических осей поляризаторов.

В соответствии с нашим допущением, фотон 1 проходит через поляризатор P1 с вероятностью $pr(1) = 1/2$, в этом случае его поляризация становится равной y , а угол между ней и оптической осью поляризатора P2 – равным θ . Мы также знаем, что КМ дает совместную вероятность для фотонов 1 и 2 пройти, соответственно, через поляризаторы P1 и P2, равную $pr(2) = 1/2 \cos^2\theta$. Иными словами, ее можно представить в виде $pr(2) = pr(1) \cdot pr(\theta)$, где *условная вероятность* $pr(\theta) = \cos^2\theta$ как раз соответствует закону Малюса.

Как из отдельных событий возникает закон Малюса

Самое интересное, однако, состоит в построении “наглядной” модели, в которой результат дихотомического теста для фотона (прошел он или не прошел через поляризатор) определяется конкретным законом $\cos^2\theta$. Откуда *каждый отдельный* фотон “знает”, с какой вероятностью должен выбираться тот или иной результат? Я предлагаю свой ответ на этот вопрос.

Сопоставим летящему фотону бегущую волну. Хотя фотон обладает постоянной энергией, она складывается из двух колеблющихся частей –электрической и магнитной. Каждый фотон, достигающий измерительного поляризатора, в момент “встречи” с ним обладает определенной (хотя и случайной) фазой, т.е. соответствующим случайным мгновенным значением напряженности электрического поля и связанной с этим полем доли энергии.

Как известно, при падении волны на “решетку”, образованную вытянутыми молекулами поляризатора, возникает отраженная волна, “гасящая” исходную. Амплитуда этой отраженной волны в рассматриваемом случае составит $\cos \theta$ по отношению к амплитуде колебаний напряженности поля фотона, т.е. “энергетический порог” окажется равным $\cos^2 \theta$. Если мгновенное значение той части энергии фотона, которая связана с напряженностью электрического поля, превышает этот порог, то фотон пройдет через поляризатор.

Заключение

В данной публикации рассмотрены “наглядные” модели единичных квантовых событий в рамках ЭПР-эксперимента. Наряду с квантовой моделью и моделями Локального Реализма рассмотрены возможности индетерминистических моделей измерения. Показано, что адекватная модель взаимодействия фотонов должна быть нелокальной, в этом случае ЭПР-эксперимент сводится к опыту Малюса. Предложена модель возникновения закона Малюса при единичных событиях.

Библиография

[Adenier and Khrennikov, 2006] Guillaume Adenier, Andrei Yu. Khrennikov. “Is the Fair Sampling Assumption supported by EPR Experiments?” arXiv:quant-ph/0606122v2. Русский перевод “Подтверждают ли ЭПР-эксперименты гипотезу представительности выборки?” доступен по ссылке

http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Anomalies.pdf

[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.

[Barut and Meustr, 1984] A. Barut, P. Meustr. Phys. Lett. A. 1984, 105, 458.

[Belinskii and Klyshko, 1993] Д.Н. Белинский А.В., Клышко Д.Н. “Интерференция света и теорема Белла”, Успехи физических наук. Август 1993г. Т. 163, № 8 – 1 – 45.

[de Raedt et al., 2004 - 2005] K. De Raedt, H. De Raedt, and K. Michielsen – “Deterministic event-based simulation of quantum interference” (arXiv:quantph/0409213v1); “New method to simulate quantum interference using deterministic processes and application to event-based simulation of quantum computation” (arXiv:quant-ph/0501139v1); “Event-based simulation of single-photon beam splitters and Mach-Zehnder interferometers” (arXiv:quant-ph/0501141v1)

[Shulman, 2006] Шульман М.Х. “Почему квантовая механика нелокальна?” Доступно по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/Why.pdf

[Weih's et al., 1998] Weih's G, Jennewein T, Simon C, Weinfurter H, and Zeilinger A 1998
Phys. Rev. Lett. 81 5039-5043

[Zhao et al., 2007] Shuang Zhao, Hans De Raedt, and Kristel Michielsen. "Event-by-event simulation of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm experiments". arXiv:0712.3693v1 [quant-ph] 21 Dec 2007.