

## Критический анализ статьи: «A wave-particle delayed-choice experiment with a single-photon state» (J. Baldzuhn, E. Mohler and W. Martienssen)

П.В. Пугенихин

(Получена 12 мая 2007; опубликована 15 июля 2007)

Рассмотрена статья, в которой представлены результаты эксперимента с отложенным выбором корпускулярного или волнового поведения с парой фотонов и показано, что нет никакого существенного различия между нормальным и отложенным выбором. Авторы эксперимента утверждают, что в соответствии с квантовой оптикой в двухщелевом эксперименте выбор фотоном волнового или корпускулярного поведения происходит в момент его регистрации, что противоречит утверждению классической оптики о принятии такого решения до прохода фотоном щелей. Эксперимент проведен на кольцевом интерферометре Маха-Цендера, аналогичном двухщелевой установке Юнга. В предлагаемой статье утверждения авторов эксперимента ставятся под сомнение. На основе анализа результатов эксперимента показано, что выбор фотоном поведения происходит до регистрации фотона. Отмечена недостаточная обоснованность выводов авторов эксперимента из его результатов. Рассмотрен вариант эксперимента с двойным отложенным выбором.

### 1. Введение

В работе [1] приводятся результаты эксперимента отложенного выбора частица-волна, в котором использованы пары фотонов, произведенных параметрической флюоресценцией. Один из фотонов пары используется в переключателе, другой проходит через кольцевой интерферометр Маха-Цендера (Mach-Zehnder). Переключающий (trigger) фотон устанавливает режим интерферометр либо на регистрацию информации о траектории фотона либо на регистрацию фазы для второго фотона. Полученный результат не зависит от того, когда происходит переключение режима: до или после того, как второй фотон проходит входной делитель луча интерферометра.

Используемый кольцевой интерферометр Маха-Цендера сконфигурирован аналогично устройству Юнга с двумя щелями, как показано на рис. 1:

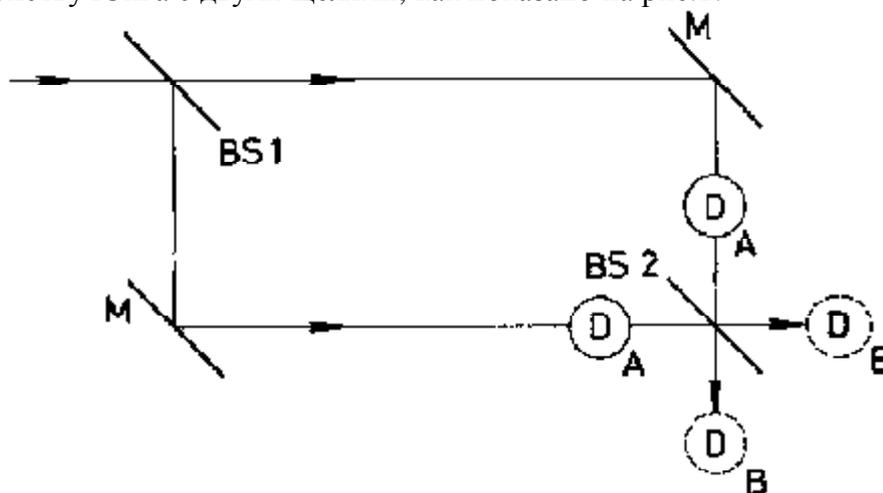


Рис.1. Интерферометр Маха-Цендера (BS1, BS2 – расщепители луча (beamsplitters); M - зеркала; D - детекторы). Метками А и В отмечены альтернативные позиции детекторов.

Когда в эксперименте Юнга (Young's) известно, каким путем двигался фотон, интерференция отсутствует. Если же известна информация о фазе, то невозможно сказать, через какую из этих двух щелей прошел фотон.

Предположим, что в интерферометр входит точно один фотон. Если два датчика помещены в позиции А в каждом плече интерферометра, фотон будет обнаружен с вероятностью  $1/2$  одним из этих двух датчиков согласно его корпускулярным (particle-like) свойствам. Этот случай относится к частице, прошедшей только через одну из двух щелей в эксперименте Юнга. Когда датчики перенесены в позиции В, интерференция между световыми лучами (the light fields) в обоих плечах вызывает вероятность обнаружения  $\sin^2 q$  для первого датчика и  $\cos^2 q$  для второго датчика, как ожидается для световой волны, проходящей одновременно через обе щели в эксперименте Юнга. Здесь угол фазы  $q$  определен разницей путей в двух плечах интерферометра.

Есть ли различие между результатами интерференционных экспериментов так называемого нормального выбора и отложенного выбора (delayed-choice)? Выбор, в результате которого должны наблюдаться свойства света, в эксперименте нормального выбора делается до того, как фотон пройдет через делитель луча интерферометра. В эксперименте с отложенным выбором этот выбор делается после того, как фотон проходит через делитель луча. В какой момент предопределяется наблюдение волновых или корпускулярных свойств света (с помощью датчиков, помещенных в позицию А или в позицию В): в момент обнаружения фотона, или в момент, когда фотон входит в интерферометр? Классическая (semiclassical) оптика настаивает на последнем предположении, квантовая оптика заявляет, что только первое предположение дает правильное описание.

В рассматриваемой статье авторы представляют эксперимент с отложенным выбором, выполненным с отдельными фотонами, произведенными параметрической флуоресценцией. Этот процесс обеспечивает пары коллинеарных линейно поляризованных фотонов сигнала и спутника (idler). Оба фотона испускаются в одном направлении с одинаковыми волновыми векторами, и разделяются делителем луча. Один из фотонов пары вызывает процесс переключения, а другой фотон входит в модифицированный интерферометр Маха-Цендера. Регистрация совпадения между переключающим фотоном и фотоном в интерферометре позволяет выбрать состояние света в интерферометре, которое в момент наблюдения соответствует однофотонному состоянию.

## 2. Эксперимент

Эскиз использованного в эксперименте аппарата показан на рис.2.

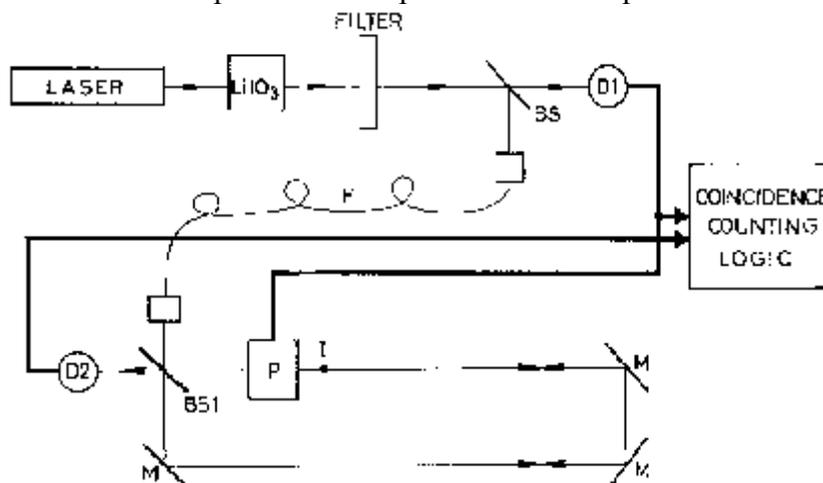


Рис. 2. Экспериментальная установка (BS, BS1 - делители луча; D1, D2 - датчики; F оптоволокно; P – ячейка Покейльса (Pockels cell); M - зеркала). Символом I отмечена контрольная точка на луче.

Непрерывный луч аргонового лазера вызывает параметрический распад в нелинейном кристалле и рождает пары коллинеарных линейно поляризованных фотонов сигнала и спутника с длиной волны около 702.2 nm. После фильтрования эти пары разделяются с вероятностью  $1/2$  делителем луча BS на переключающий фотон и фотон, который поступает в интерферометр Маха-Цендера. Лавинный фотодиод D1 регистрирует переключающие фотоны, а диод D2 регистрирует фотоны, выходящие из интерферометра. Импульсы с диода D1 включают полуволновое напряжение 1.1 kV на ячейке Покельса P, которая помещена в интерферометр и вызывает вращение направления поляризации линейно поляризованного света на 90 градусов. Чтобы компенсировать задержку времени переключения ячейки Покельса P, использована оптическая задержка для второго фотона с помощью оптоволокна.

Кольцевая конфигурация интерферометра Маха-Цендера позволяет устранить дрейф фазы. Одно из зеркал M может отклоняться с помощью пьезо устройства на небольшой угол, создающим, таким образом, разность фаз  $q$ , что позволяет построить интерференционную кривую. Логическое устройство совпадения регистрирует импульсы D1 и D2.

Для поведения фотона в интерферометре теперь могут быть рассмотрены два взаимно дополнительных случая:

- i) Фотон движется через интерферометр либо по часовой, либо против часовой стрелки. Это соответствует частице, прошедшей через одну из двух щелей в эксперименте Юнга и в эксперименте названо корпускулярным поведением.
- ii) фотон движется через интерферометр одновременно и по часовой стрелке и против часовой стрелки. Это вызывает интерференцию, которая появляется из-за волнового характера света и соответствует световым волнам в эксперименте Юнга, прошедшим через обе щели одновременно.

Какое поведение будет зарегистрировано - корпускулярное или волновое, зависит от того, приложено напряжение в соответствующий момент к ячейке Покельса P или нет. Если напряжение не приложено к ячейке, или если напряжение приложено непрерывно, наличие интерференции явно указывает на волновую природу света. Действительно, если напряжение не прикладывается, поляризация остается неизменной; если же напряжение приложено постоянно, то направление поляризации фотонов вращается на 90 градусов в обоих плечах. В этих двух случаях разница фаз равна нулю и фотон интерферирует. Если напряжение не приложено в момент, когда фотон прошел первый делитель луча, но включено переключателем от импульса диода D1 после того, как фотон уже прошел делитель луча и ячейку, то осуществлен случай эксперимента с отложенным выбором для корпускулярного поведения частицы. В этом случае вектор поляризации фотона, движущегося против часовой стрелки, поворачивается на 90 градусов, в то время как поляризация фотона, движущегося по часовой стрелке, остается неизменной. Таким образом, становится доступной информация, по какому пути двигался фотон, и его корпускулярная природа становится очевидной.

Использованная кольцевая конфигурация интерферометра Маха-Цендера позволяет определенно доказать в случае исчезновения интерференции, что процесс переключения имеет место сразу после того, как фотон прошел ячейку Покельса. Интерференция будет наблюдаться, если переключение имеет место прежде, чем фотон входит в интерферометр или после того, как выходит из него.

#### 4. Результаты

Основные результаты эксперимента представлены на рис.4 и рис.7. На рисунках приведены данные измерений в режиме отложенного выбора (точки) и контрольных измерений с нормальным выбором (сплошные кривые).

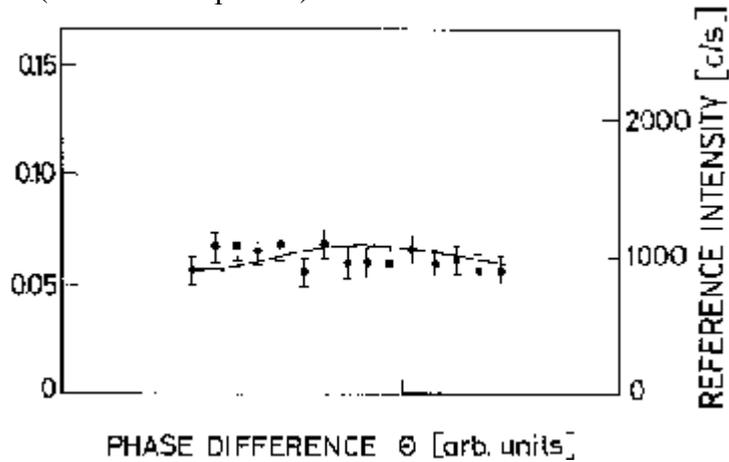


Рис.4. Результаты эксперимента с отложенным выбором, в котором выбрано наблюдение корпускулярного поведения фотонов.

На рис.4 показана норма совпадения для случая отложенный выбора для корпускулярного поведения частицы. Ячейка Покоельса активизирована в момент, когда фотон, движущийся по часовой стрелке, только что прошел ячейку. Интерференция исчезает, хотя наблюдаемый фотон уже прошел делитель луча BS1, причем ячейка еще не была активизирована. Отложенный выбор способа наблюдения дает те же самые результаты, какие можно было бы получать с нормальным выбором интерферометра, который настроен, чтобы определять траекторию фотона (случай А на рис.1). На рисунке видно, что интерференция отсутствует. В рассматриваемом эксперименте это означает, что фотоны равновероятно поступают на датчик D2 и мимо него (вертикально вверх на рис.2).

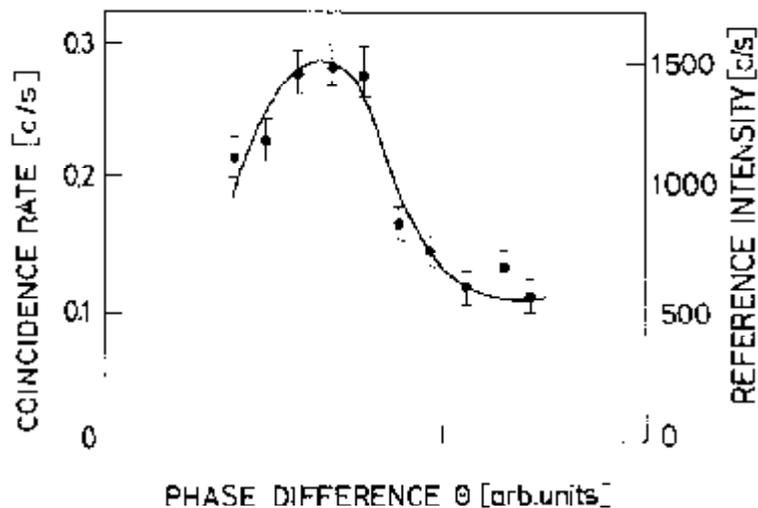


Рис.7. Результаты эксперимента с отложенным выбором, когда выбрано наблюдение волнового поведения фотонов.

На рис.7 показаны результаты при переключении с измерения фазы на измерение траектории. Наблюдается явная интерференционная картина. Как видно из рисунка, отложенный выбор способа наблюдения дает те же самые результаты, какие можно было бы получать с нормальным выбором интерферометра, который настроен, чтобы определять фазу (волновое поведение) фотона (случай В на рис.1). Это означает, что фотоны с большей

вероятностью поступают на датчик D2 (в зависимости от фазы  $q$ ), чем мимо него (вертикально вверх на рис.2).

Для проведения контрольных измерений вместо бездействующей ячейки Покельса использована специальная пластина задержки, установленная в точке I на рис.2.

Заметим, что в тексте статьи звучит небольшая двусмысленность, которая, однако, не искажает общего смысла и достоверности полученных результатов:

*«Figure 7 shows results for the reversal of the switching process from phase to pathway information. Here, we start in the mode for detection of particle-like behavior but finish the process by switching delayed into the mode for detection of wave-like behavior» [1].*

Сначала сказано, что показаны результаты при переключении с измерения фазы на измерение траектории. Затем говорится наоборот, что измерение начато с режима обнаружения корпускулярного поведения, а закончено режимом обнаружения волнового поведения. Этот этап описан недостаточно подробно, поэтому можно предположить, что на рисунке 7 показаны измерения и волнового и корпускулярного поведения фотона в рамках одного этапа. Для этого, вероятно, переключение с режим на режим производилось в пределах полного отклонения подвижного зеркала в момент, когда оно проходит нейтральное положение. То есть, данные на левой половине рисунка 7 соответствуют отклонению зеркала в одну сторону и бездействующей ячейке Покельса, а данные на правой половине рисунка соответствуют отклонению зеркала в другую сторону и активированной управляющим фотоном ячейке Покельса. Такая схема эксперимента наглядно показывает появление и нарушение интерференционной картины в зависимости от действия ячейки на интервале углов  $q$ .

## 5. Обсуждение

Главные результаты этой статьи, полученные в режиме отложенного выбора и представленные на рис.4 и 7, показывают хорошее совпадение с сопровождающими контрольными измерениями, которые приняты за эквивалент эксперимента нормального выбора. Авторы делают обоснованное заключение, что нет никаких существенных отличий между экспериментами с нормальным выбором и с отложенным выбором поведения частица-волна. Выводы справедливы при переключении от выбора корпускулярного к выбору волнового поведения частицы, а также обратного выбора.

Авторы делают заключение, что этот результат соответствует предсказаниям квантовой оптики, и не может быть объяснен в рамках классической оптики. После того, как единичный фотон вошел в интерферометр Маха-Цендера, чтобы интерферировать согласно его фазовой информации, настройка интерферометра может быть переключена в режим регистрации информации о траектории или наоборот. ***Решение, какие свойства проявит фотон - волновые или корпускулярные, окончательно принимается лишь в момент, когда фотон обнаружен [1]:***

*«The decision whether the photon shows up wave-like or particlelike appearance is brought to a close only at the moment when the photon is detected» [1].*

Так как активация ячейки Покельса происходит лишь с вероятностью 36%, фотон в интерферометре «не знает», будет он вовлечен в эксперимент с отложенным выбором или нет, и любое дополнительное влияние периодической рабочей договоренности с фотоном может быть исключено.

После рассмотрения основных положений рассматриваемой статьи приступим к критическому анализу выводов, сделанных ее авторами.

## АНАЛИЗ ВЫВОДОВ АВТОРОВ СТАТЬИ

*«...в самом направлении  $A$ , вокруг которого электрон «вращается как вокруг оси» до того, как произведено измерение, по-видимому, есть нечто полностью объективное. Действительно, мы могли бы остановить свой выбор на измерении спина электрона в направлении  $A$ , и электрон должен быть приготовлен так, чтобы достоверно (т.е. с вероятностью 100%) дать ответ ДА, если мы случайно угадаем истинное направление спина! Каким-то образом «информация» о том, что электрон действительно должен дать именно такой ответ, хранится в спиновом состоянии электрона». (Пенроуз)*

*«Возникает вопрос: является ли наблюдение волновых или корпускулярных свойств света, predetermined позицией датчиков (помещенных в позицию  $A$  или в позицию  $B$ ) в момент обнаружения фотона, или это predetermined позицией датчиков в момент, когда фотон проходит через первый делитель луча? Классическая оптика принимает последнее предположение, квантовая оптика заявляет, что только первое предположение дает правильное описание» [1].*

В приведенной цитате утверждается, что поведение фотона с точки зрения КМ определяется в момент его регистрации - выбор зависит только от места расположения датчиков. Однако это утверждение в данном эксперименте недостаточно обоснованно. Бесспорно, что после регистрации фотон уже не может изменить своей природы и в определенном смысле это решение, безусловно, окончательное. Тем не менее, природа фотона становится однозначно определенной до регистрации, и его поведение соответствует этой природе, а после регистрации фотон уже никак себя не ведет и не проявляет никакой природы. То есть природа фотона может иметь смысл и быть определенной лишь до момента его регистрации.

Что можно считать «регистрацией»? Это уничтожение фотона и появление вместо него электрического импульса, почернения на фотопластинке, выделение тепла и так далее. В рассматриваемой статье к точке регистрации фотон подходит уже с выбранным состоянием: либо как интерференционный всплеск волн, либо как частица. Следовательно, на самом деле выбор (решение) фотона определено несколько раньше регистрации. Фотон предопределяет свою природу до регистрации – когда возникают условия для будущего проявления той или иной его природы. Это необходимое, решающее условие для выбора поведения фотона. При этом не имеет никакого значения, через какое время после выполнения этого условия произойдет собственно регистрация фотона, и которой в общем случае может вообще не быть. Тем не менее, в любом случае фотон уже перейдет в определенное состояние: либо волновое, либо корпускулярное.

Утверждение, что фотон принимает решение в момент регистрации, фактически означает, что фотон «изменяет прошлое». Поскольку в момент входа в интерферометр фотон «не знает», какую природу он проявит в момент регистрации, он не может обоснованно выбрать одну или две траектории. Квантовая оптика не может определенно указать, какой выбор делает фотон, она избегает прямого ответа на этот вопрос. Лишь в момент регистрации фотона квантовая оптика может сделать заключение: двигался он одной или двумя траекториями. То есть выбор траектории (или корпускулярно-волнового поведения) фотоном производится, с точки зрения квантовой оптики, после того, когда фотон уже прошел по ним.

На данном этапе авторы от имени квантовой оптики явно создают модель, полностью согласующуюся с моделью классической оптики, предполагающую, что поведение фотона определяется не в момент регистрации, а в момент входа в интерферометр:

*«В этом случае волновая функция фотона, движущегося против часовой стрелки отмечена поворотом ее вектора поляризации на 90 градусов, в то время как поляризация волновой функции фотона, движущегося по часовой стрелке, остается неизменной. Таким образом, стала доступной информация, какой путь выбрал фотон, и его корпускулярная природа становится очевидной» [1].*

Как видим, даже демонстрация фотоном корпускулярной природы исходит из входной волновой природы и устанавливается задолго до регистрации. Даже если считать, что по интерферометру движутся волновые функции (материализованные абстракции), это не снимает вопроса, по какой траектории двигался сам фотон. Для описания поведения фотона в интерферометре фактически рассматриваются три случая:

- i) фотон движется через интерферометр по часовой стрелке.*
- ii) фотон движется через интерферометр против часовой стрелки.*
- iii) фотон движется через интерферометр одновременно и по часовой стрелке и против часовой стрелки.*

Как видим, утверждается, что фотон проходит (входной) делитель луча (или две щели) независимо от дальнейшего своего решения всегда одинаково: с определенными (для фотона) траекториями задолго до регистрации. Отметим это обстоятельство еще более определенно: фотон еще не был зарегистрирован, но он уже имеет (известную только ему) траекторию, которая уже определяет поведение фотона в момент регистрации: корпускулярное (случаи движения по одной траектории) и волновое (движение одновременно по двум траекториям). Хотя это и отрицается, но фактически авторы с позиции квантовой оптики утверждают: фотон выбирает один из случаев i)...iii) поведения в момент входа в интерферометр. Разумнее всего было бы предположить, что для выбора своего поведения фотон либо видит будущее, либо все траектории до точки регистрации. Если траектория безальтернативная – фотон выбирает ее и корпускулярное поведение, если есть альтернативы, то фотон выбирает волновое, интерференционное поведение.

При анализе процессов авторы без объяснений рассматривают волновое поведение фотона при входе в интерферометр. Зададимся вопросом: что происходит в момент поворота вектора поляризации одной из «половинок» фотона, движущегося по двум траекториям одновременно? В рассматриваемом эксперименте – это «половинка» фотона, которая движется против часовой стрелки. В анализе авторов получается, что в момент входа фотона в интерферометр он как бы «увидел» (то есть получил информацию со сверхсветовой скоростью от входного расщепителя по полному оптическому пути BS1-M-M-M-P-BS1), что существуют два альтернативных пути и «выбрал» волновое поведение. То есть задолго до регистрации фотона он уже перешел в состояние, которое демонстрирует его волновые свойства. Любая регистрация фотона (не меняющая его поведение) в этот момент однозначно предопределена и известна экспериментатору: фотон находится в волновом состоянии. Но в результате отложенного выбора изменились состояния траекторий фотона (теперь одна из траекторий должна быть выбранной, другая - пустой). Вследствие этого, с точки зрения предстоящей регистрации фотона, очевидно, что он приобрел новые, явные корпускулярные свойства и теперь он определенно целый, никаких половинок. Что произошло в этот момент с его первой «волновой половинкой», движущейся по часовой стрелке, которая к несчастью не приобрела определенности траектории? Она или попросту должна исчезла или перейти в состояние (по-прежнему волновое), которое не способно ни интерферировать с первой полуволной, ни воздействовать на датчик. Либо мы должны признать, что фотон способен изменять прошлое: в момент возникновения определенности о его траектории, фотон оказывает влияние на прошлое, в котором он отказывается от расщепления и выбирает этот определенный путь, на котором он будет зарегистрирован. Во всех случаях поведение фотона становится определенным **до регистрации**.

*«Мы заключаем, что не получено никакого существенного отклонения между нормальным выбором и отложенным выбором эксперимента частицы-волны. Это имеет силу как при переключении от корпускулярного к волновому поведению, так и при переключении от волнового к корпускулярному поведению частицы» [1].*

Данное заключение является главным результатом эксперимента. Заключение следует из полученных экспериментальных данных и не вызывает возражений. Однако некоторые выводы авторов работы на основе этих результатов, как показано, следует отнести к недостаточно обоснованным, спорным:

*«Этот результат совместим с предсказаниями квантовой оптики, и не может быть объяснен в рамках классической оптики» [1].*

Покажем, что для объяснения этого явления один и тот же прием – «предвидение будущего» - используют обе теории и на основе этого одинаково не испытывают трудностей в объяснении поведения отложенного выбора.

*«Даже после того, как единственный фотон вошел и интерферометр Маха-Цендера, чтобы интерферировать согласно его фазовой информации, настройка может быть переключена в режим, дающий информацию о траектории, или наоборот» [1].*

Это главная техническая деталь рассмотренного эксперимента. Из этой цитаты явно следует вывод, что именно в момент переключения режима и происходит «навязывание» фотону способа его поведения при регистрации. То есть независимо от того, какой выбор сделает фотон в момент входа в интерферометр, он его поменяет в зависимости от настройки прибора к моменту регистрации. Имеет значение лишь последняя перед регистрацией настройка.

Именно решение о выявлении траектории фотона однозначно определяет его дальнейшее поведение, влияет на результат регистрации. В момент регистрации фотона должна быть достоверно известна информация либо о его траектории, либо о его фазе. Действительно, графики и данные счетчиков совпадения получены позже того, как была включена или нет ячейка Покельса. Включение ячейки в строго определенный момент является причиной регистрации фотона на выходе интерферометра либо с интерференционной, либо с равновероятной координатой. Иначе нам следует признать, что в момент регистрации фотона происходит возврат в прошлое и фотону придается определенное значение либо фазы, либо траектории. При этом фотон должен оказать воздействие в прошлом даже не на себя, а на экспериментатора (или логическое устройство), который принимает решение о включении или нет ячейки Покельса. Из последней цитаты (приведенного примера) следует, что с точки зрения квантовой теории:

- фотон входит в интерферометр, разделившись на две полуволны;
- одна из полуволн претерпевает поворот вектора поляризации в ячейке Покельса, делая доступной информацию о траектории;
- теперь фотон должен демонстрировать корпускулярное поведение, то есть двигаться только по одной траектории, поэтому:
- фотон возвращается в прошлое и входит в интерферометр повторно, но теперь двигаясь только по одной траектории.

А что произошло бы в этом примере, если поведение фотона определяется в момент его регистрации, но экспериментатором было принято решение об изменении этого поведения? Либо фотон изменяет свое будущее решение на решение экспериментатора, либо изменяет *прошлое* решение экспериментатора, либо до входа в интерферометр предвидит будущее и выбирает свое поведение до входа в интерферометр. Последнее предположение вполне согласуется с классической теорией и заслуживает большего доверия. Действительно, «предвидение будущего» вполне может быть заменено более реальным «видением» пути к датчику, хотя и со сверхсветовой скоростью. Во всех приведенных

предположениях регистрация лишь демонстрирует, но не устанавливает, не предопределяет поведение фотона. Поэтому следует признать недостаточно обоснованным заключение авторов статьи:

**«Решение, какие свойства проявит фотон - волновые или корпускулярные, окончательно принимается лишь в момент, когда фотон обнаружен» [1].**

В действительности решение о демонстрации волновых или корпускулярных свойств фотон принимает **вынужденно** – по решению экспериментатора, включающего или нет ячейку Покоельса, задолго до обнаружения фотона, которое в общем случае не обязательно. Разумеется, это решение может быть изменено фотоном (опять же по воле экспериментатора) в любой момент до тех пор, пока он не зарегистрирован. Регистрация лишь делает явной, видимой для экспериментатора информацию об **известном, принятом** решении (состоянии) фотона. Такое описание явления отложенного выбора не противоречит явно классической оптике, утверждающей, что поведение фотона определяется до его регистрации, в момент, когда установлена окончательная конфигурация установки.

### Варианты эксперимента с кратным отложенным выбором

Рассмотрим вариант эксперимента с двойным отложенным выбором (double delayed-choice experiment). Экспериментальная установка на основе рис.1 показана на рис.8. Добавим к использованной в эксперименте ячейке Покоельса P1 еще одну ячейку P2.

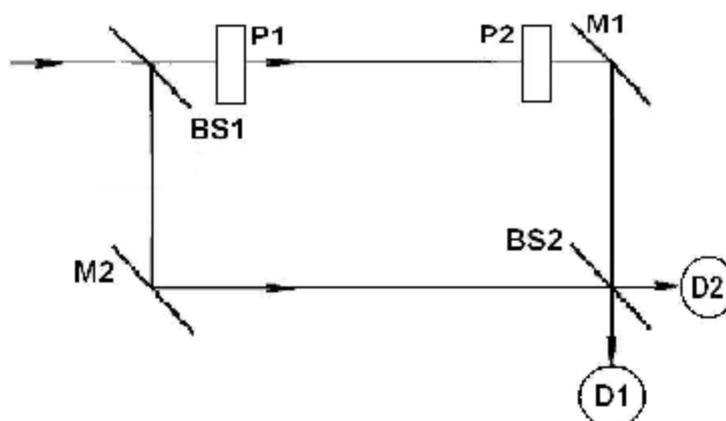


Рис.8 Эксперимент с двойным отложенным выбором

Рассмотрим три этапа эксперимента.

1. До входа фотона в интерферометр ячейки выключены. Будет наблюдаться волновое поведение фотона (интерференция), поскольку обе полуволны проходят без вращения поляризации. Фотон будет расщеплен делителем BS1 на два потока – две волны, движущиеся по часовой и против часовой стрелки. Если ячейки Покоельса P1 и P2 не будут включаться, то на выходе из интерферометра эти две волны будут интерферировать, и фотон будет зарегистрирован только датчиком D2. Таким образом, в этом варианте фотону предписано волновое поведение внутри интерферометра, и он прошел через него обоими возможными путями.

2. Если сразу же после того, как фотон прошел через делитель луча BS1, включается ячейка P1, то становится доступной информация о траектории фотона. Интерференция нарушается. Очевидно, что до момента включения ячейки фотон «не знает», будет ли доступна информация о его траектории, поэтому можно считать, что он как и в рассмотренной статье проходит расщепитель луча BS1, разделившись на две полуволны и двигаясь по часовой и против часовой стрелки. В момент, когда включается первая ячейка P1, фотону предписывается изменить свое поведение с волнового на корпускулярное (на выходе будут равновероятно регистрироваться фотоны обоими датчиками D1 и D2). Но фотон, как мы

предположили, до этого момента двигался по двум траекториям одновременно как волна. Что же произошло в этот момент? Если фотон «переключился» на корпускулярное поведение (это и есть момент принятия решения о демонстрации своей природы, хотя регистрации еще нет), то возможны два варианта:

- фотон «случайно» двигался по часовой стрелке, поэтому он просто продолжил свой путь, повернув при этом направление своей поляризации. Тогда что же «двигалось» против часовой стрелки и куда «оно» подевалось, поскольку при корпускулярном поведении фотон должен двигаться лишь по одной траектории, а изначально мы предположили, что двигались две полуволны?
- фотон «случайно» двигался против часовой стрелки. Видимо, он также продолжит свое движение. Но тогда что произошло при включении ячейки P1? На что эта ячейка оказала влияние и куда «оно» подевалось?

3. Если далее сразу же после того, как фотон проходит и ячейку P1, включается ячейка P2, то информация о траектории фотона вновь становится недоступной (квантовое стирание). Интерференция вновь должна наблюдаться (фотоны регистрируются только датчиком D2). В этом случае также возможны два варианта:

- фотон двигался по часовой стрелке, и в момент прохода через вторую ячейку P2 фотон вновь превращается в полуволну, и вновь должна появиться такая же полуволна фотона, движущаяся против часовой стрелки. То есть в этот момент времени во втором канале из ниоткуда вновь появляется вторая полуволна.
- фотон двигался против часовой стрелке. Что же произошло в момент включения ячейки P2? В этом канале фотон должен был отсутствовать и ячейке вроде бы не на кого оказывать влияние. Тем не менее фотон превращается в полуволну, а на выходе ячейки P2 тоже появляется такая же полуволна.

Итак, в одной из возможных картин процесса можно увидеть, что на интервале между включением ячейки P1 и ячейки P2 в канале, в котором фотон может двигаться против часовой стрелки, происходит сначала исчезновение «отрезка» волны, затем его повторное появление.

За все время движения фотона нам достоверно известно его поведение: волновое или корпускулярное. Это поведение мы можем произвольно изменять. Наши действия делают *предопределенным* поведение фотона к моменту будущей регистрации, его природа однозначно задается. Регистрация фотона лишь *подтверждает* известную экспериментатору информацию о поведении фотона. Поведение фотона в прошлом становится противоречивым, означающим, что фотон проявлял «не ту» природу, которая должна быть продемонстрирована им в момент будущей регистрации. Следовательно, изменения в настройке установки влияют определенно и однозначно на будущее поведение фотона и неопределенно изменяют наши представления о его прошлом поведении.

Можно заметить, что в рассмотренном эксперименте с двойным отложенным выбором наиболее приемлемой картиной является такая: при распространении (движении) фотон демонстрирует (проявляет) волновую природу, а в момент регистрации - корпускулярную.

## Выводы

1. Результаты эксперимента, описанного в статье, не могут быть достаточными основаниями для утверждения - «Решение, какие свойства проявит фотон - волновые или корпускулярные, окончательно принимается лишь в момент, когда фотон обнаружен».

2. Описание поведения фотона в интерферометре как традиционных либо частицы, либо волны не отражает достоверно происходящих в интерферометре процессов.

### Ссылки

1. A wave-particle delayed-choice experiment with a single-photon state J. Balduhn, E. Mohler, and W. Martienssen, Z. Phys. B - Condensed Matter 77, 347-352 (1989)  
[http://www.springerlink.com/content/q13g18724hl0/?sortorder=asc&p\\_o=20](http://www.springerlink.com/content/q13g18724hl0/?sortorder=asc&p_o=20)