

Бесконтактные измерения !

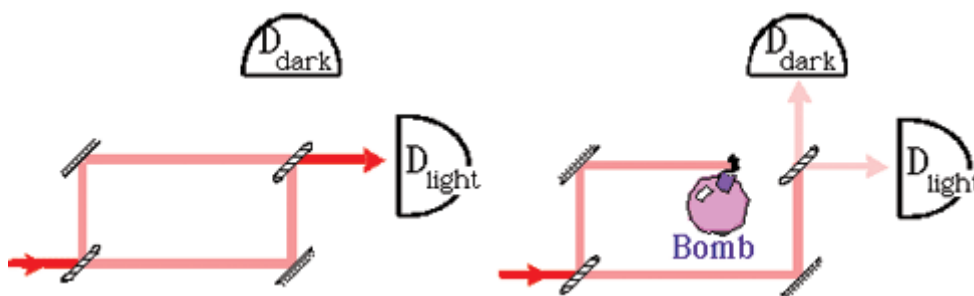
Введение: проблема

Проблема, которую мы надеемся разрешить – как *оптическими методами* определить присутствие чего-то, если это «что-то» не освещено фотонами. Это «что-то» может быть, например, рукой, детектором, сверхчувствительной частью фотопленки или отдельным атомом. Два физика, которые вывели эту тему в свет в 1993 году, Элицур и Вайдман (ЭВ), рассматривали «супербомбу», которая, если ее снабдить триггером/детонатором, взорвется, когда взрывателя коснется хотя бы один фотон. Некоторые бомбы снабжены таким фотоэлементом, а некоторые – нет. (Бомбы с фотоэлементом назовем «хорошими», остальные – «плохими» [только, пожалуйста, не думайте, что я считаю взрывающиеся бомбы *реально* хорошими!]). Цель теперь такова: учитывая, что бомбы доставлены в запечатанных ящиках, выяснить, какие из бомб хорошие. Ящики вскрывать нельзя, поскольку в этом случае существует риск, что бомба взорвется).

Детектив, чьи возможности расследования ограничены классической физикой, оказывается в сложном положении. Он может войти в совершенно темную комнату и открыть крышку ящика. Что тогда? Если в комнате реально нет света – ни один фотон не достигает триггера, – то сыщик не получает никакой информации. С другой стороны, если хотя бы один фотон достигает фотоэлемента, происходит громкий взрыв, и детектив узнаёт, что это *была* хорошая бомба. Похоже, что не существует способа определить хорошую бомбу без того, чтобы ее взорвать.

Первое решение: Простая (не)интерференция

Введем квантовую механику. Первое решение проблемы, поставленной ЭВ, было ими же и рассмотрено. А именно: мы можем использовать двойственную (волна-частица) природу света (или любого кванта). Рассмотрим интерферометр Маха-Цандера, как показано ниже (слева). Он состоит из двух полностью отражающих зеркал и двух, которые половину света отражают, а половину пропускают. Длины верхнего и нижнего «плеч» интерферометра предполагаются в точности одинаковыми. В этих условиях наблюдается полная деструктивная интерференция на верхнем выходе интерферометра – любой падающий свет всегда попадает на другой выход. Иными словами, для фотона, попавшего в интерферометр, существует нулевая вероятность достичь детектора D-dark (отсюда и название), и вероятность, равная единице, достичь детектора D-light (потому он так и назван).



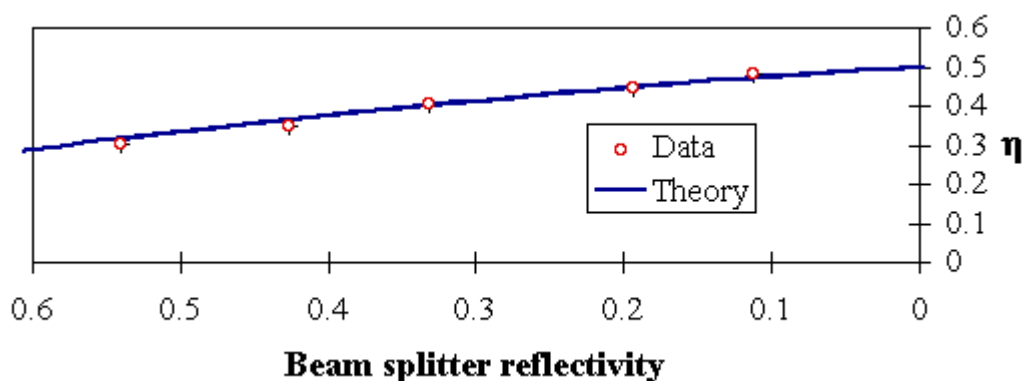
Что произойдет, если на одном из путей окажется объект, подобный «супербомбе» ЭВ? (см. выше, справа.) Теперь мы можем использовать классическое описание для понимания возможностей. У фотона есть шанс 50% пойти по пути, содержащему объект, встреча с которым закончится взрывом. Но этого не случится, если фотон (также с вероятностью

50%) пойдет по другому пути. На втором светоделителе интерференции нет, поскольку существует только один способ туда попасть. Таким образом, фотон опять делает случайный выбор. И потому вероятность того, что фотон оказывается в детекторе D-light, равна 25% ($= 0,5 * 0,5$), но этот результат не дает никакой информации (а также не разрушит бомбы), так как в отсутствие бомбы произошло бы то же самое. Существует также вероятность 25%, что фотон будет обнаружен детектором D-dark. В этот детектор фотон *никак не может* попасть в отсутствие бомбы – ведь всякий раз, когда детектор D-dark дает «клик», мы знаем, что в интерферометре находится объект. Если мы отправляем в интерферометр один фотон и он попадает на D-dark, это означает, что фотон не мог взаимодействовать с объектом в интерферометре (даже если этот объект реально не взорвался, все-таки предполагается, что он совершенно не пропускает свет).

Вышеописанное происходит из-за корпускулярно-волнового дуализма квантов. Когда интерферометр пуст, у фотона есть два возможных пути, чтобы добраться до детектора, пути эти неразличимы, и потому возникает интерференция - фотон ведет себя как волна. С другой стороны, когда один из путей заблокирован, у фотона есть только один способ достичь детектора, поэтому интерференции нет – фотон ведет себя как частица, он может только обнаружить бомбу и попасть *или* на D-light, *или* на D-dark, но никогда не более чем на один из них.²

Для дальнейшего полезно определить показатель качества этих систем, который скажет нам, какая часть наших измерений может быть свободна от взаимодействий. (Взять просто вероятность стрельбы в D-dark – слишком ограничено, поскольку мы всегда можем взять фотоны, летящие в D-light, и утилизировать их.) Это получается из $P(D_dark)/(P(D_dark) + P(boom))$, где мы определяем D-dark как вероятность измерения *без* взаимодействия, и P(boom) как вероятность измерения при *полном* взаимодействии.

Теперь, оказывается, что, регулируя коэффициенты отражения светоделителей в интерферометре, можно достичь $P(D-dark) = P(boom)$ (ну, почти - см. ниже теоретическую зависимость эффективности, а также наших экспериментальных данных). Для этого случая эффективность равна 1/2. (Заметим, однако, что в этом пределе, как P(D-dark), так и P(boom) на самом деле приближаются к 0, в то время как $P(D-light) > 1$.) Сразу возникает вопрос, составляет ли 50% максимум того, что мы можем сделать, - суждено ли быть взрыву в половине случаев?

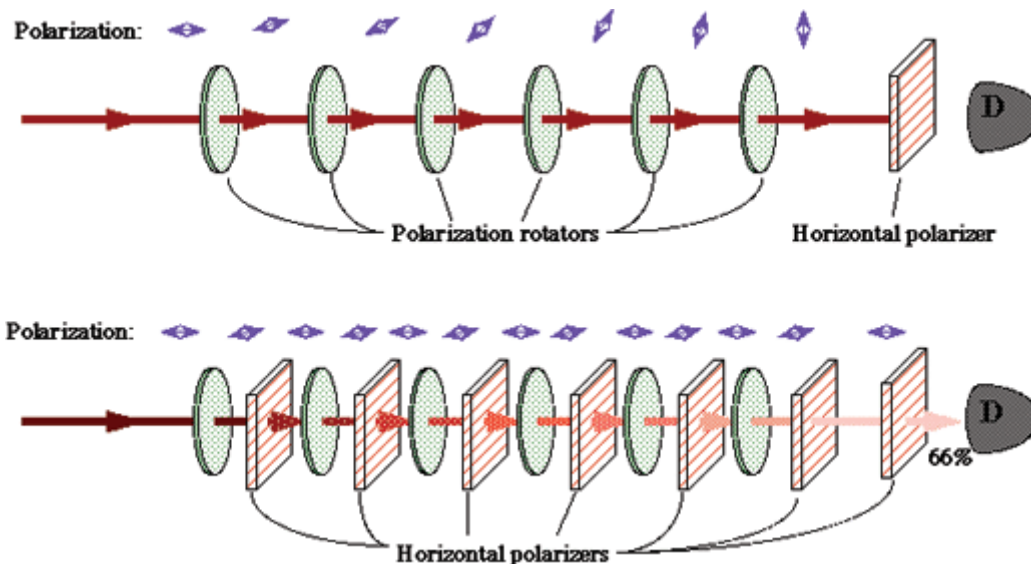


Шаг два: Квантовый эффект Зенона

Ответ, достаточно удивительный: Нет. Реально мы можем сделать вероятность для бомбы быть взорванной такой малой, как мы захотим (в принципе, конечно). Чтобы понять метод, нам нужно обсудить другой особенный квантово-механический феномен, который называется «квантовый эффект Зенона». Впервые описанный в работе Misra and Sudarshan в 1977, этот эффект включает повторяющиеся квантовые измерения для сдерживания эволюции квантовой системы. Он относится к квантовому «проеекционному

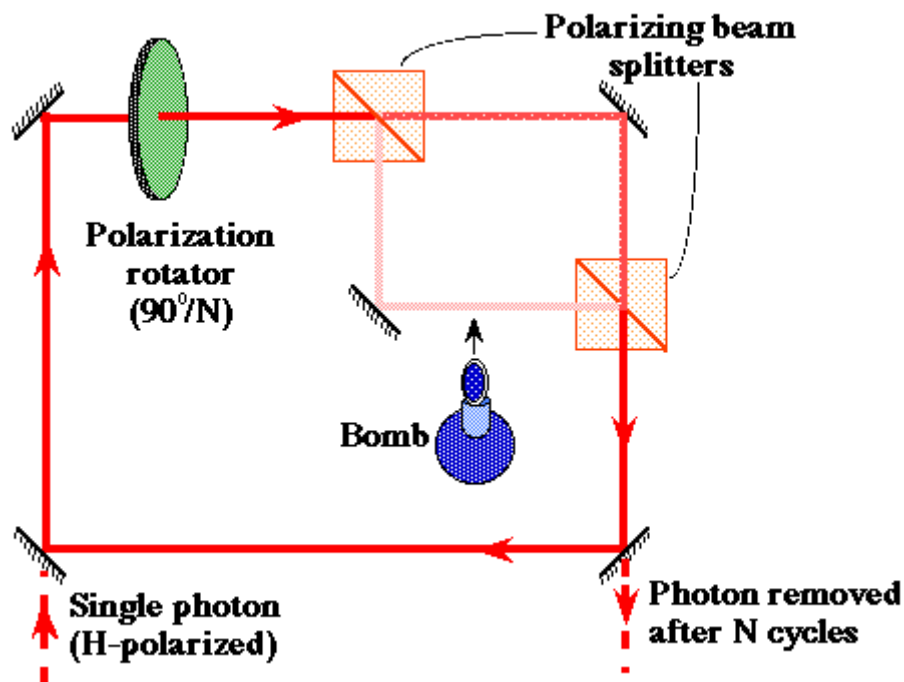
постулату», утверждающему, что для любого измерения, проведенного над квантовой системой, возможны только определенные ответы, и что результирующая квантовая система будет в состоянии, определенном этими результатами. Проще всего понять это на частном примере.

Рассмотрим серию из N поляризаторов, каждый из которых поворачивает угол поляризации на $90^\circ/N$. Поэтому, пройдя через все поляризаторы, фотоны, которые были первоначально поляризованы горизонтально, окажутся поляризованы вертикально. То есть, вероятность их обнаружения горизонтальным поляризатором, будет равна нулю.



Однако, если мы разнообразим серии горизонтальных поляризаторами, по одному на каждом этапе, то результат будет совсем другой. Для конкретности рассмотрим случай шести циклов, так что угол поворота на каждом этапе составляет 15° . Попадая на первый поляризатор, фотон имеет лишь небольшой шанс быть поглощенным - $6,7\% = \sin^2(15^\circ)$. Если он *не* поглощается, то, согласно проекционному постулату, фотон должен быть горизонтально поляризованным. Идентичный процесс происходит на каждом этапе. Для случая $N = 6$, вероятность того, что фотон пройдет через все 6 поляризаторов, равна просто $(\cos^2(15^\circ))^6$, что составляет около $2/3$. Заметим, что без перемежающихся поляризаторов мы никогда не увидим света на детекторе. Поэтому, когда мы имеем «клик» на детекторе, то знаем, что были вставлены дополнительные поляризаторы. Более того, если мы проводим эксперимент с единственным входящим фотоном, и он появляется в финальном детекторе, то, конечно, он не мог быть поглощен любым из дополнительных поляризаторов. И по мере того, как мы увеличиваем число N (в то же время соответственно сокращая угол вращения поляризации), то вероятность того, что фотон поглощается, обращается в нуль - фотон всегда передается!

В согласии с предыдущими предсказаниями, мы находим, что когда поляризатор (который пропускает горизонтально поляризованный свет и отражает вертикально поляризованный) не находится на месте, детектор D никогда не дает клика, в то время как если поляризатор на месте, детектор D дает клик в $2/3$ случаев.



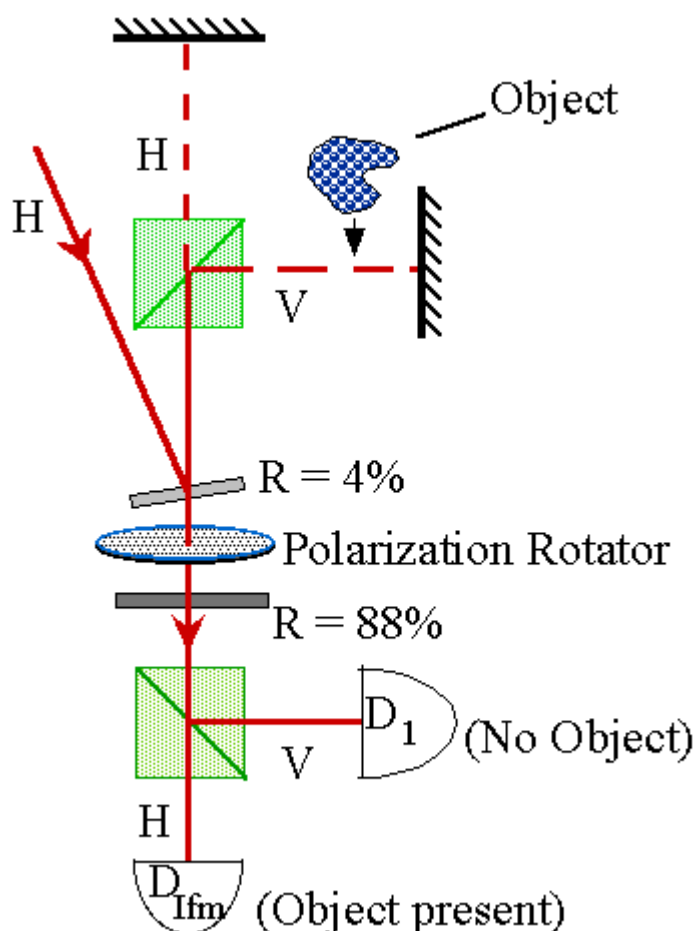
Комбинированное совершенство

Мы видим, что прошли полпути к нашей цели с обеих сторон. Простое использование метода ЭВ разрушает интерферометр, мы можем обнаружить наличие какого-либо объекта (например, непрозрачного объекта), но только в менее 50% случаев бесконтактных взаимодействий. Используя технику квантового эффекта Зенона, мы показали, что мы можем обнаружить наличие *поляризованного* объекта более, чем в 50% случаев. Объединяя обе схемы, можно достичь nirваны – выявления непрозрачного объекта при произвольно малой вероятности поглощения им фотона. Хотя существует много методов сделать это, мы приведем здесь лишь один, наиболее тесно связанной с предыдущей дискуссией.

Рассмотрим систему, показанную справа. Мы опять имеем циркулирующий фотон, как и в предыдущей демонстрации эффекта Зенона. Фотон совершает N циклов в системе прежде чем его регистрируют и анализируют поляризацию. В каждом цикле угол поляризации опять меняется на $90^\circ/N$, так что в конце горизонтально поляризованный фотон становится вертикально поляризованным. Ключ к отличию этого эксперимента от предыдущего заключается в использовании интерферометра Маха-Цендера. Вместо обычного светоделителя мы используем два поляризованных светоделителя, которые пропускают горизонтально поляризованный фотон и отражают вертикально поляризованный. Два «плеча» интерферометра должны иметь одинаковую длину. Тогда случайный свет разделяется на горизонтальную и вертикальную компоненты (первая – «высокий путь», вторая – «низкий путь»), которые затем опять складываются, меняя первоначально поляризованное состояние.

Это верно только тогда, когда плечи интерферометра не блокированы. Если, однако, мы помещаем объект в нижний путь, эволюция полностью меняется. Вновь для конкретности рассмотрим случай $N = 6$. В течение первого цикла существует вероятность только 6,7%, что фотон попадает в нижнюю часть (и поглощается). Если этого *не* происходит, тогда волновая функция фотона «коллапсирует» в верхнюю часть – фотон снова полностью горизонтально поляризован. Подобное явление происходит каждый цикл, причем при N -ном цикле фотон вылетает. Если фотон успешно выживает каждый цикл (т.е. не поглощается), то он, безусловно, поляризован горизонтально. Вспомним, что в отсутствие объекта фотон определенно имел вертикальную поляризацию. Измеряя конечное состояние поляризации фотона, мы можем сказать, находится ли в нижнем пути блокирующий объект. Используя большое количество циклов, можно сделать сколь

угодно малой вероятностью того, что фотон когда-либо будет поглощен объектом. В этом и состоит суть бесконтактного измерения.



Развитие исследований

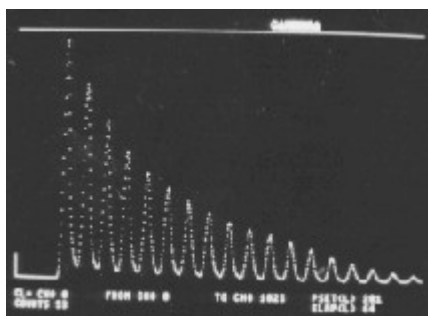
Текущие настройки, используемые в LANL для демонстрации бесконтактных взаимодействий, показаны справа. Очень слабый импульс (менее 1 фотона)³ производится 670nm лазерным диодом. Импульса с помощью 4% отражателя запускается в нашу систему, с начальной горизонтальной поляризацией. Импульс циркулирует в системе, отражаясь 88%-м зеркалом, каждый цикл плоскость поляризации ненамного поворачивается (угол определяется ориентацией поляризатора [четверть фазы]).

Интерферометр наверху – системы Майкельсона, исключая то обстоятельство, что он использует *поляризационный* светоделитель (отражающий вертикальную поляризацию и пропускающий горизонтальную). Если в интерферометре нет никакого объекта, это абсолютно не влияет на состояние поляризации на входе, просто разбивая его на горизонтальную и вертикальную компоненты и добавляя их обратно в фазу. Пройдя N циклов, первоначально H-поляризованный свет поэтапно станет V-поляризованным.

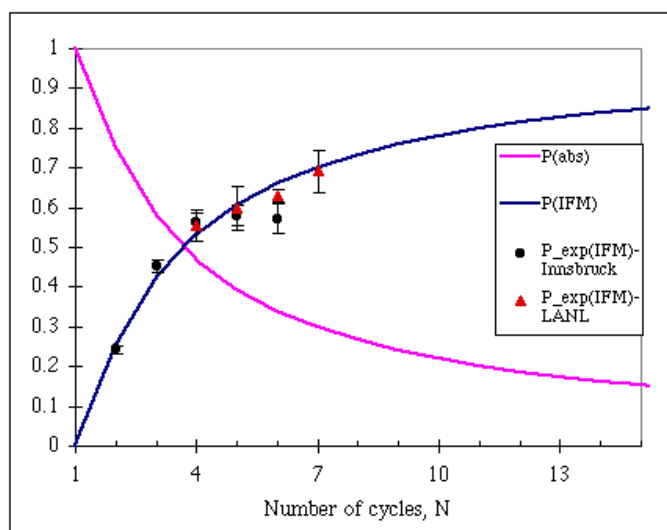
Если, с другой стороны, в интерферометре находится объект, блокирующий вертикально-поляризованный путь, то происходит описанное выше торможение вращения. *Не-*детектирование фотона в вертикальном пути приводит к коллапсу волновой функции, и потому фотон может оказаться только в горизонтальном «рукаве». После N циклов фотон по-прежнему имеет горизонтальную поляризацию.

Наконец, для определения поляризации мы должны изъять фотон из системы. В более продвинутой системе, которая сейчас конструируется, фотон будет изыматься из системы после точно заданного числа циклов. Для нынешнего эксперимента, однако, фотону

разрешается «просочиться» случайным образом. Зная, когда фотон был введен в систему, и время, необходимое для прохождения одного цикла, мы можем с помощью электроники изучать только те фотоны, которые прошли ровно N циклов в системе.



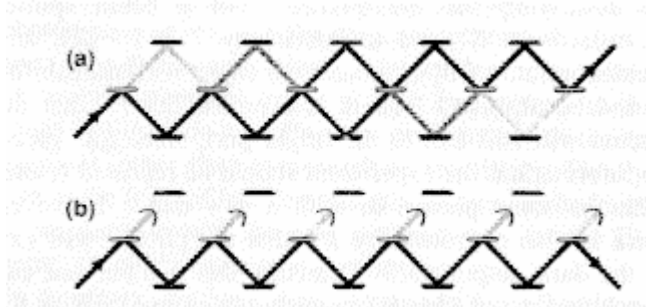
На графике показано разрешение во времени фотонов, выбрасываемых из интерферометра. Вертикальная ось – число фотонов, горизонтальная – время (относительно того, когда первый импульс был послан в систему). Величина горизонтальной оси соответствует длительности около 50 ns.



Теоретические кривые возможности осуществления бесконтактного измерения, и вероятности для объекта поглотить фотон. Данные последних экспериментов в Иннсбруке показывают, так же как самые последние данные LANL, что бесконтактное измерение происходит в 70% случаев.

Другие схемы

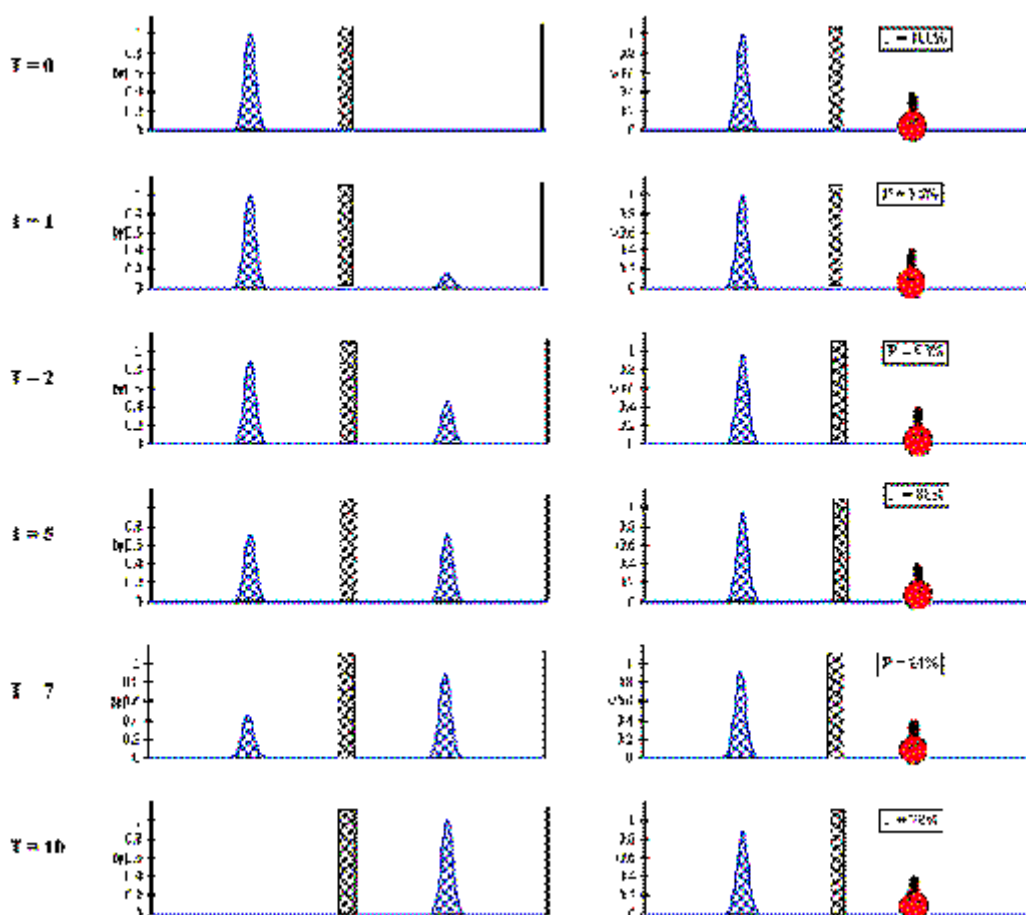
Для простоты сконцентрируемся только на нескольких простых системах. Однако техника бесконтактных измерений может быть фактически использована в любой двухуровневой системе. Как другой пример, рассмотрим серии связанных совершенных интерферометров Маха-Цандера, где отражательные способности светоделителей $R = \cos^2(\pi/(2N))$, и N – число светоделителей (см. фиг. ниже в (a)).



В этом случае фотон, сначала падающий на нижнюю часть цепи интерферометров, проходя цепь, постепенно оказывается в верхней ее половине. Действительно, при величине R , -указанной выше, после прохождения N интерферометров фотон окажется в верхней половине цепи. То есть, можно с уверенностью сказать, что фотон покинет цепь из N интерферометров через верхний порт.


Когда в верхней части находится объект, это тормозит эволюцию света – он как бы попадает в капкан в нижней части (как на рис. (b) выше). Для N интерферометров возникает вероятность $P = [\cos^2(\pi/(2N))]^N$, что фотон попадет на нижний порт, в то время как без объекта эта вероятность была равна 0.

Как в примере с квантовым эффектом Зенона, где мы смогли цепь элементов преобразовать в цикл, в котором те же элементы участвуют снова и снова, так же мы можем поступить и здесь, хотя результат может выглядеть немного иначе. Рассмотрим теперь две идентичные полости, которые слабо связаны с помощью зеркала с отражающей способностью $R = \cos^2(\pi/(2N))$. Если запустить фотон в одну из полостей, например, в левую, то со временем этот фотон окажется в другой полости. После $N/2$ циклов фотон с равной вероятностью может оказаться в любой из этих полостей, а после N циклов он может быть только в правой полости (если продолжать эксперимент, то еще после N циклов фотон опять окажется в левой полости). Заметим, что этот процесс аналогичен связанным колебаниям двух слабо связанных маятников.



С другой стороны, если в правой полости находится поглощающий объект, он будет препятствовать возникновению описанных «колебаний» фотона от одной полости к другой. В каждом цикле будет существовать небольшая вероятность того, что фотон поглотится объектом (что просто задается связью $T = 1-R$). Но если этого *не* случается, волновая функция фотона коллапсирует обратно в начальную полость, и мы все начинаем

с начала. Тогда в конце N циклов у фотона есть вероятность R^N остаться в левой полости (и вероятность $1 - R^N$, что фотон будет поглощен объектом). Если устремить число циклов N к бесконечности (это, конечно, легче написать на веб-странице, чем сделать в реальности), то фотон *всегда* останется в начальной полости.

Любопытно, что похожий метод эксперимента по бесконтактным измерениям, где используется лишь *одна* полость, нам предложили, например, проф. Ямамото (Стенфордский университет) и Хароши (Высшая нормальная Supérieure в Париже). Они рассматривают чрезвычайно тонкую полость, настроенную так, чтобы пропускать свет лишь определенной длины волны (заметим, что это означает: полоса частот падающего света должна быть меньше толщины полости). Если полость пуста, свет просто пройдет ее насквозь (но только после того, как пройдет достаточно времени, чтобы возник эффект резонансной интерференции; время это, в основном, такое же, как время *ring-down* полости ). Но если в полости находится поглотитель, то падающий свет будет, в основном, отражен первым зеркалом с высокой отражательной способностью. Увидев, прошел ли свет или отразился, мы сможем сказать, пуста полость или нет.

О том, что возможно в будущем

Прежде чем перейти к описанию новых идей (и следовательно, применить к ним экспертные оценки), не решусь сказать слишком много. Однако читатель заслуживает того, чтобы знать, что ждет впереди. Естественно, однажды начав обсуждать бесконтактные измерения «нормального» объекта, мы должны рассмотреть варианты таких экспериментов. Например, что произойдет, если объект полупрозрачен? Оказывается, описанные выше схемы в этом случае не работают (ведь они опираются на коллапс волновой функции, который, в свою очередь, происходит лишь тогда, когда фотон вообще не поглощается). Однако существуют возможности улучшения методов измерений и даже использования их для проведения сверхчувствительных измерений оптической плотности.

Другая очень интересная область исследований связана с квантовым объектом, т.е. с таким объектом, который может быть в суперпозиции «здесь» и «не здесь». Таким примером может быть атом в атомном интерферометре, который одновременно присутствует в обоих «плечах» прибора. Другой пример – недавняя демонстрация Винеландом и др. отдельного иона, который в ловушке сосуществует в двух разнесенных точках пространства. Если такие системы оценивать с помощью схемы бесконтактных измерений, то две подсистемы – квантовый объект и «допрашивающий» свет – запутываются. Действительно, хотя мы это здесь не обсуждали, при существенно большом N метод бесконтактных измерений работает даже для состояний, когда в интерферометр попадает не один, а несколько фотонов или производится слабый классический импульс. Объединяя такой вход (слабый классический импульс, например) с квантовым объектом в интерферометре, можно передать квантовую суперпозицию второго на первое. Другими словами, можно создать суперпозиции «сгустков» фотонов – например, подготовить импульс света в среднем из 20 фотонов, где все фотоны были бы горизонтально или вертикально поляризованы, и еще до измерений сделать так, чтобы эти фотоны не имели определенной поляризации. Такое своеобразное состояние было бы новейшим примером кошки Шредингера.

Наконец, сейчас мы изучаем распространение описанных выше методов для получения двумерных изображений объекта. В качестве простого примера можно сделать *на месте* пленку конденсата Бозе-Эйнштейна, не взорвав его, так как очень малое число фотонов на самом деле в конечном итоге поглощается ультрахолодными атомами конденсата. (Говоря практически, однако, последние далекие от резонанса методы Кеттерли и др. могли бы быть более... практически.)

В заключение отмечу, что не совсем ясно, какими еще будут чудесные приложения принципа бесконтактных измерений, но уверенно можно сказать, что все еще не открыты некоторые очень интересные физические явления.⁶

Перевод П.Р.Амнуэля

Примечания публикатора:

¹ Оригинал статьи «Interaction Free Measurements» размещен на сайте Университета Иллинойса: <http://physics.illinois.edu/people/kwiat/interaction-free-measurements.asp> (пересмотрено 1.4.2009). Авторство установлено по ссылке в Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Elitzur%E2%80%93Vaidman_bomb-tester

² Это объяснение основано на копенгагенской интерпретации корпускулярно-волнового дуализма. При такой интерпретации возникает принципиальный вопрос: ОТКУДА ФОТОН ЗНАЕТ, КАК ЕМУ СЕБЯ ВЕСТИ - ВОЛНОЙ ИЛИ ЧАСТИЦЕЙ - ДО ТОГО, КАК ОН ПРОЙДЕТ ПЛЕЧИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА? Многомировое объяснение не вызывает этого вопроса, поскольку в многомирии фотон всегда частица.

³ С корпускулярной точки зрения это означает, что не при каждом включении лазерного диода даже один фотон попадал в измерительную схему.

⁴ Вероятно, автор имеет в виду относительное число фотонов (долю фотонов в достаточно большой серии экспериментов), покидающих измерительную схему после соответствующего оси абсцисс времени пребывания в интерферометре. В противном случае это не вполне понятное утверждение. Выше [см. прим. 3] автор утверждал, что входной импульс содержал не более одного фотона.

Данная экспериментальная зависимость является графическим отражением диссипации перепутанной квантовой системы, а именно – системы, являющейся суперпозицией ВСЕХ возможных вариантов состояний интерферометра с находящимся в нем фотоном (различаются эти системы числом циклов циркуляции фотона). В экспериментах, описываемых П. Квяттом, каждый элемент суперпозиции содержит ОДИН фотон. Было бы крайне интересно найти такие экспериментальные условия, при которых элементы перепутанной квантовой системы содержали бы значительное количество частиц. Можно предположить, что такие системы должны обнаруживаться в специфических химических реакциях.

⁵ Переводчик не обнаружил в доступных словарях подходящего для данного контекста перевода этого термина.

⁶ В целом статья, описывающая эксперименты по бесконтактным измерениям автором, который впервые их осуществил, безусловно интересна и хорошо дополнит материалы по эвереттической интерпретации БИЭВ, представленные на нашем сайте МЦЭИ.

Публикатор – Ю.А.Лебедев

Поступила 31.10.10