

# PHYSICAL REVIEW LETTERS

Том 74

12 июня 1995

Номер 24

## Бесконтактные измерения\*.

Поль Квят, Харальд Вайнфуртер, Томас Герцог и Антон Цайлингер.

Институт экспериментальной физики, Университет Инсбрука,  
Техникштрассе 25, в 6020 Инсбрук, Австрия.

Марк Касевич.

Факультет физики Стэнфордского университета, Стэнфорд, Калифорния  
94305

(Поступила в редакцию 19 сентября 1994)

Нами показано, что удостовериться в присутствии объекта можно, в некотором смысле не взаимодействуя с ним. Мы многократно, но не строго надежно, определяли присутствие объекта, который подавлял когерентную эволюцию пробного фотона, наблюдавшуюся несмотря на то, что фотон отсутствовал. Доля «бесконтактных» взаимодействий может как угодно близко приближаться к 1. Мы провели предварительную демонстрацию некоторых из этих идей, используя единичные фотоны в интерферометре Майкельсона.

Одним из наиболее часто упоминаемых различий между классической и квантовой механикой является то, что в первом случае возмущение системы при наблюдении можно сделать произвольно малым, в то время как во втором процесс измерения существенно возмущает систему. Тем не менее, Реннингер использовал понятие "отрицательно-результативных измерений", чтобы описать *ненаблюдаемость* особого вида при таком измерении квантовой системы, которое по внешнему виду систему не возмущает [1]. Понятие «бесконтактного» квантового измерения затем было рассмотрено Диком, который проанализировал изменение атомной волновой функции, произведенное *нерассеившимся* фотоном, испущенным атомом [2]. Элицур и Вайдман расширили эти идеи таким образом, что присутствие объекта изменяло интерференцию фотона, даже несмотря на то, что у фотона и объекта не было необходимости взаимодействовать [3]. Максимально достижимая эффективность в схеме Элицура-Вайдмана составляет 50 %.

Мы предложили усовершенствованный метод, где доля бесконтактных

измерений может быть сколь угодно близка к 1 [4]. В новой версии, которая может рассматриваться как применение дискретной формы квантового эффекта Зенона, предложено когерентно повторяющееся исследование области, возможно содержащей объект. В качестве промежуточного шага мы использовали однофотонное состояние, получаемое от спонтанного параметрического преобразования с понижением частоты для экспериментальной демонстрации принципа бесконтактного измерения.

Первоначальное предложение Элицура и Вайдмана заключалось в том, чтобы использовать интерферометр, расположенный так, что взаимодействующий фотон (или любая другая интерферирующая частица) будет с определенностью проходить через данный порт вывода, называемый «ярким». Таким образом, в отсутствие какого-либо объекта в пределах интерферометра, фотон никогда не будет обнаружен в "темном" регистрационном порту. Наличие поглощающего (или, в более общем смысле, не пропускающего квант) объекта в одном из плечей полностью изменяет возможные результаты, разрушая интерференцию. Для светоделителя с отражательной способностью  $R$  (и пропусканием  $T = 1 - R$ ), любой падающий фотон будет взаимодействовать с объектом с вероятностью  $R$  и будет поглощен. Существует вероятность  $R^2$ , что фотон по-прежнему будет выходить на яркий порт; поскольку это не дает никакой информации, эксперимент должен повториться либо с тем же фотоном, либо с новым. Однако, существует также вероятность  $RT$  того, что фотон выйдет к темному регистрационному порту. Обнаружив этот фотон, можно утверждать, что объект определенно находится в одном из плечей интерферометра, хотя фотон не мог взаимодействовать с ним. Чтобы сделать аргумент более драматичным, Элицур и Вайдман предположили, что объект мог бы быть ультрачувствительной бомбой, детонирующей при поглощении единственного фотона.

Взаимодополняемость единственного кванта является существенной для вышеупомянутого метода: в случае отсутствия объекта она проявляет волновой характер падающего света, что позволяет нам устанавливать через деструктивную интерференцию условие, при котором фотон никогда не использует темный выход; в присутствии объекта утверждает неделимость кванта, что обеспечивает взаимную исключительность возможных исходов.

Доля измерений, которые могут быть бесконтактными  $\eta$ , для системы без потерь даётся выражением:

$$\eta = \frac{P(det)}{P(det) + P(abs)} \quad (1)$$

где  $P(det)$  является вероятностью обнаружения присутствия объекта, и  $P(abs)$  является вероятностью, что фотон поглощен объектом. В случае, рассмотренном выше,  $\eta = RT / (RT + R) = (1 - R) / (2 - R)$  и стремится к верхнему пределу 50 %. Мы подчеркиваем, что с точки зрения единственного события, успешное измерение означает *полностью* бесконтактное измерение (в

том смысле, что фотон не поглощен абсолютно поглощающим объектом), хотя вероятность такого измерения составляет всего  $1/2$ .

Теперь мы представим различные методы, которые в принципе позволяют довести долю бесконтактных измерений до значения, произвольно близкого к единице. Рассмотрим композицию на рис. 1. Единичный фотон через нижний левый порт вводится в последовательность связанных интерферометров Маха-Цандера. Отражательная способность каждого из  $N$  светоделителей выбрана так, что

$$R = (\cos(\pi/2N))^2,$$

и относительные фазы между соответствующими путями в верхних и нижних половинах равны нулю. Как видно из рис. 1 (а), результат состоит в том, что амплитуда фотона подвергается последовательному перемещению от низких к высоким половинам интерферометров. Эта когерентная эволюция света от одной стадии до другой является здесь существенной. После  $N$  стадий фотон будет определенно выходить «вверх» после заключительного светоделителя.

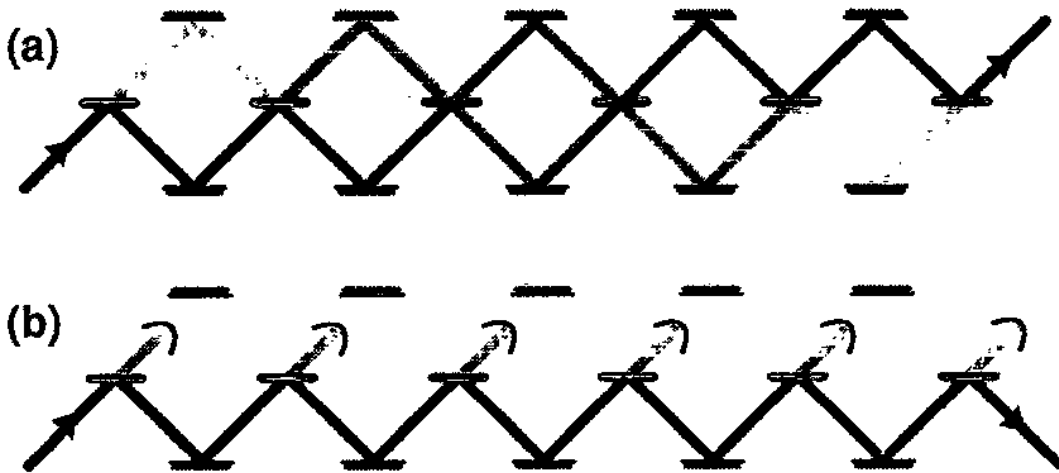


Рис. 1. Принцип когерентного повторного исследования: (а) единичный фотон последовательно переходит из нижней левой в верхнюю правую часть системы. После  $N$  стадий, где  $N$  зависит от отражательной способности светоделителя, фотон будет определенно выходить через «верхний» порт последнего светоделителя. (б) Введение детекторов предотвращает интерференцию. На каждой стадии состояние спроектировано назад в нижнюю половину системы, если соответствующий датчик не «сигналил». После всех этапов есть большой шанс ( $2/3$ , как показано на примере), что фотон теперь выйдет через «нижний» порт последнего светоделителя, что указывает на наличие детекторов.

На рис. 1 (b) мы вставили в верхнюю половину системы ряд датчиков (все они, взятые вместе, составляют "объект" для этой композиции), которые контролируют свет на каждой стадии. Теперь на каждом лучевом делителе есть только маленькая вероятность того, что фотон изберет верхний путь и запустит датчик, и большая вероятность

$$P = (\cos(\pi/2N))^2$$

что он вместо этого продолжит двигаться по более низкому пути. *Несрабатывание* каждого датчика проецирует состояние на нижнюю половину, и весь процесс повторяется [5]. Ясно, что вероятность того, что фотон в данный момент находится в нижнем выходе после всех  $N$  этапов, это как раз вероятность того, что он может быть отклонен каждым светоделителем:

$$P = \left(\cos \frac{\pi}{2N}\right)^{2N} \quad (2)$$

которая в пределе больших  $N$  становится  $P = 1 - \pi^2 / 4N + O(N^{-2})$ . Конечно, вероятность того, что один из датчиков является спусковым крючком, так же дополняет (2), и тогда для систем без потерь  $\eta = P$ . (Рис.2). Таким образом, уже для  $N \geq 4$  есть больше чем 50%-ая вероятность проведения бесконтактного измерения, превосходящая предел оригинальных конфигураций Элицура-Вайдмана. Когда число стадий становится очень большим, эффективность схемы приближается к 100 %. С той точки зрения, что каждый из этапов движения фотона изменяет эволюцию волновой функции и, тем самым, препятствует изменению состояния, наша схема может рассматриваться как применение дискретной формы квантового эффекта Зенона [4,6].

Расширенная версия рис. 1 была представлена в педагогических целях. Используя две идентичных "впадины", слабо связанные делителем луча с высокой отражательной способностью, можно реализовать практическое осуществление эксперимента, в котором поглотитель - единственный объект (например, ультрачувствительная бомба Элицура-Вайдмана; см. рис. 3). Фотон введен в левую впадину в момент времени  $T = 0$ . Для хронометражных целей важно, чтобы длина волнового пакета фотона была короче, чем глубина впадины в течение всей длительности эксперимента. Для светоделителя с отражательной способностью  $\cos^2(\pi / 2N)$  и при отсутствии какого-либо поглотителя, фотон будет определенно локализован в правой впадине на время  $T_N = N \cdot T$  (время периода), благодаря интерференционным эффектам. Поэтому детектор, помещенный в левую впадину, за время  $T_N$  не будет подавать сигнал. Однако, в присутствии поглотителя или рассеивателя в правой впадине, волновая функция фотона непрерывно проецируется обратно на левую впадину. Делая связывание впадин слабее (т.е. увеличивая отражательную способность светоделителя), и

увеличивая число  $N$ , можно уменьшить вероятность того, что фотон когда-либо покинет первую впадину, если во второй присутствует объект, и детектор, находящийся в левой впадине, будет практически всегда срабатывать за время  $T_N$ .

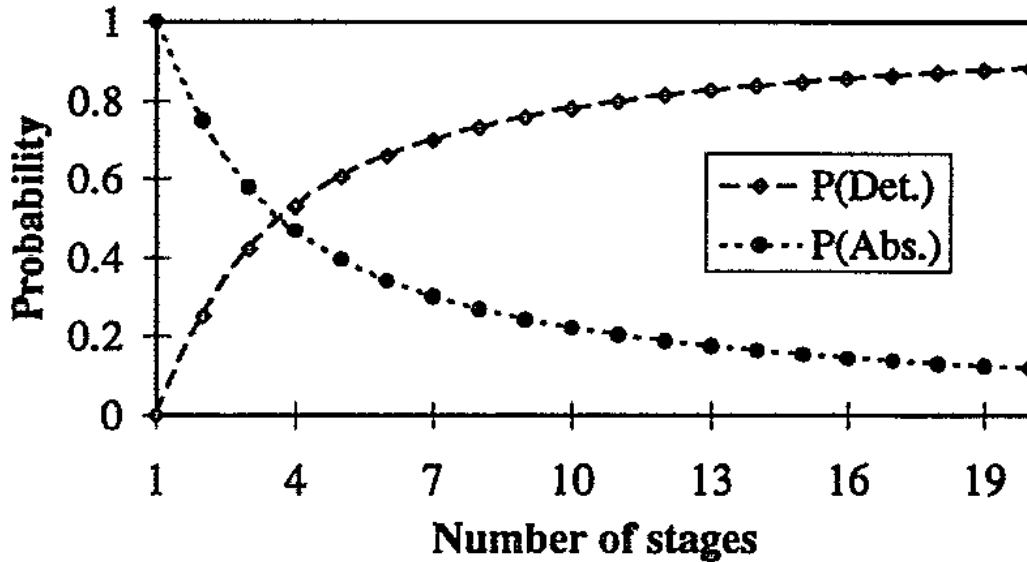


Рис. 2. Вероятность  $P(\text{det})$  бесконтактных измерений и вероятность  $P(\text{abs})$  того, что фотон поглощен, то есть некий внутренний датчик сработал, для падающего фотона в установке на рис. 1 (b), как функция общего количества стадий, при условии идеальности оптических компонентов системы.

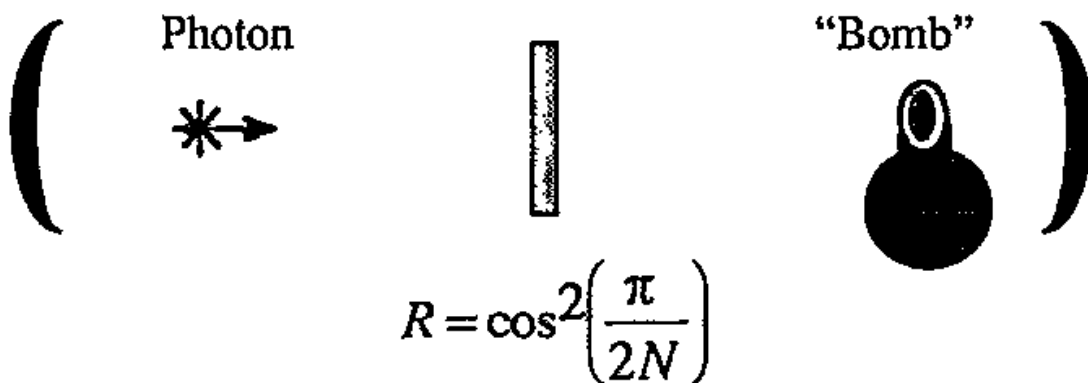


Рис. 3. Одно из предложений высокоэффективной системы бесконтактных измерений. В отсутствие объекта в правой впадине фотон, первоначально находящийся в левой впадине, с уверенностью можно будет найти в правой впадине после  $N$  циклов (где  $N$  зависит от точного значения отражательной способности светоделиителя). С объектом внутри правой впадины фотон будет найден в левой впадине на  $N$ -ом цикле с вероятностью более чем 50% для  $N > 4$ .

Предполагается, что длины впадин идентичны.

Итак, вероятность бесконтактных измерений может быть сделана сколь угодно близкой к 100%.

Следует отметить, что объект не обязательно должен быть классическим устройством, но может быть атомом, например, сильно связанным световым полем в правой полости системы на рис. 3. Предположим, что, если атом находится в состоянии А, фотон в правой впадине будет с уверенностью поглощен [7], переводя атом в состояние В - это и есть аналог детонирования "бомбы". Предположим далее, что из В атом быстро (за время, меньшее одного периода в полости [5]) переходит к устойчивому состоянию С. Если атом не будет первоначально в состоянии А, то в течение  $N$  циклов фотон, первоначально находившийся в левой впадине, "переплещется" полностью в правую впадину. Обнаружение фотона в *левой* впадине после  $N$  циклов дает определенную информацию о том, что атом был в состоянии А, не возбуждая его.

При рассмотрении бесконтактных измерений квантового объекта, надо быть осторожным, чтобы отличить настоящую работу от продолжающихся в настоящее время усилий, направленных на осуществление квантовых неразрушающих (QND) измерений [8]. В последнем случае делается попытка произвести очень точные измерения некоторого свойства квантовой системы (например, числа фотонов в пучке) при необходимости введения помех в сопряженную переменную (то есть, в фазу света). В отличие от QND, который является *рассеивающей* техникой, наш *поглощительный* метод не может различить, присутствует ли один объект, или более чем один, — в обоих случаях для эффекта необходим "коллапс".

Любопытной особенностью нового предложения, также возможно относящейся к практической реализации высокоэффективных бесконтактных измерений, является то, что она позволяет использовать классический импульс со средним числом фотонов  $n > 1$  [9]. Вероятность поглощения одного из фотонов равняется  $1 - \eta^n$ , и вероятность эта может быть сделана произвольно маленькой для  $\eta$ , достаточно близкой к 1. Отметим, кстати, что это невозможно в более простой схеме Элицура-Вайдмана, где  $\eta \leq 0.5$ .

Для начальной демонстрации принципа бесконтактного измерения мы выполнили эксперимент с использованием коррелированных пар фотонов, полученных через спонтанное параметрическое преобразование с понижением частоты. Как теперь хорошо известно, можно приготовить превосходное приближение к однофотонному состоянию Фока, используя хорошо измеряемое время и корреляцию импульса таких пар [10], в которых по детектированию одного из фотонов, «триггера», можно с уверенностью определять существование сопряженного фотона. Использование такого однофотонного состояния гарантирует одинаковость возможных результатов в данном цикле [9]. В нашем эксперименте (рис. 4) преобразования с понижением частоты пар

фотонов были произведены в кристалле  $\text{LiIO}_3$ , накачанном светом с длиной волны 351 нм от ион-аргонного лазера; пары фотонов с длиной волны 702 нм отбирались с использованием ирисовых диафрагм и 5 нм (FWHM) интерференционных фильтров. Мы направляли один фотон из каждой пары на триггерный детектор  $D(t)$ , а другой - на интерферометр Майкельсона, выходной порт которого контролировался детектором  $D(\text{темный})$ . Все датчики были оснащены лавинными фотодиодами, управлявшимися методом Гейгера.

Управление интерферометром происходит в области «светлой бахромы» – разница в длинах пути всегда меньше  $3\mu m$ . Фаза корректируется пьезоэлектрически (и стабилизируется независимым юстировочным гелий-неоновым лазером с системой обратной связи), чтобы получить минимальное число срабатываний детектора  $D(\text{темный})$ , т.е., чтобы почти все фотоны выходили из интерферометра через входной порт. Остальные срабатывания детектора  $D(\text{темный})$  составляют фон или шум нашей измерительной схемы, являясь результатом размытости видимой интерференционной бахромы (в свою очередь происходящей от неидеальности оптических элементов и несовершенного юстирования).

Используя поворотное зеркало, мы могли отклонить световой поток от одного плеча интерферометра к детектору  $D(\text{obj})$  таким образом, чтобы реализовать конфигурацию «объект внутри» (здесь мы определяем «объект» как зеркало + детектирующая система). В данном цикле была зарегистрирована синхронность величин  $S(\text{темный})$  (между  $D_T$  и  $D(\text{obj})$ ), поскольку зеркало неоднократно вставлялось и перемещалось [Рис. 5 (а)]. Светоделитель в нашем интерферометре имел пять облицованных секций, каждая с различной отражательной способностью. Таким образом, горизонтально переводя светоделитель в его плоскости, мы могли легко выбрать между процентным соотношением отражательной способности (измеряя непосредственно преобразованные с понижением частоты фотоны) 54 %, 43 %, 33 %, 19 %, и 11 %.

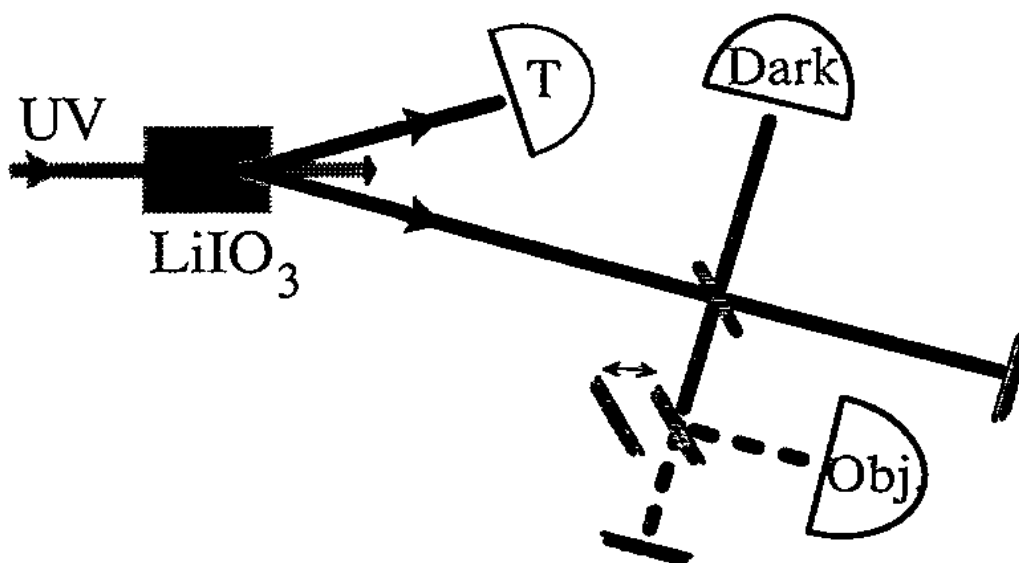


Рис. 4. Схема эксперимента с непосредственным преобразованием с понижением частоты фотона, демонстрирующая принцип бесконтактного измерения.

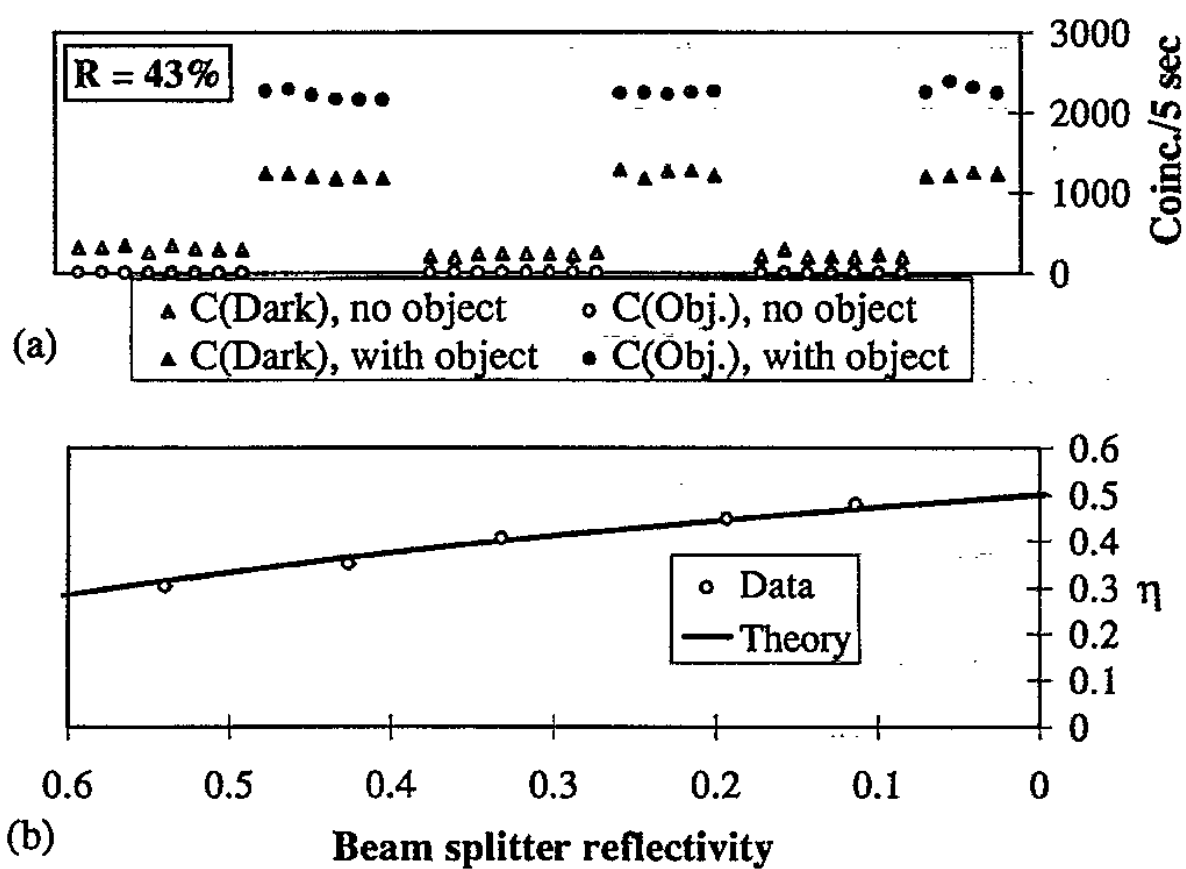


Рис. 5. (a) Типичные экспериментальные результаты для бесконтактного



измерения. Отражательная способность светоделителя для этого набора данных составляет 43 %. (b) Наблюдаемые и теоретические значения для показателя качества  $\eta$  в схеме интерферометра Майкельсона, как функция отражательной способности светоделителя.

Для получения на основе экспериментальных данных показателя качества, определенного уравнением (1), надо принять во внимание конечность эффективности обнаружения. С целью «доказательства принципа» нашего эксперимента, было удобно уравнивать коэффициенты полезного действия датчиков D(темный) и D(obj) [11]; в этом случае мы можем заменить P (det) и P (abs) в (1) на C(темный) и C (obj) соответственно. Экспериментальные результаты для пяти значений отражательной способности нашего светоделителя сравнены с теоретическим предсказанием на рис. 5 (b).

Здесь мы представили только самые простые схемы, предполагающие полностью поглощающие "объекты" и системы без потерь. Ситуация, как мы обсуждали ранее [12], становится намного более сложной, когда эти предположения ослаблены. Например, случай полупрозрачного объекта едва ли можно считать бесконтактным взаимодействием, поскольку фотон, проходящий *сквозь* объект, в общем случае приобретает фазу. Пагубные влияния потерь зависят от того, где они происходят; например, равные потери в обоих конечных зеркалах в схеме на рис. 3, не влияют на ход эксперимента, разве только вызывают необходимость его повторения. Наконец, потери из-за низкой эффективности детектора могут быть гораздо менее проблематичными во вновь предложенных схемах по сравнению со схемой Элицура-Вайдмана, поэтому  $\eta$  может быть близко к 1.

Таким образом, в нашем интерферометре Майкельсона мы продемонстрировали экспериментальное бесконтактное измерение, для которого  $\eta$  почти 1/2. Однако, если использовать методику когерентно повторяющихся слабых тестов, то эта доля может быть сделана сколь угодно близкой к 1. Ясно, что есть много методов для достижения столь высокой эффективности тестов: благодаря изоморфизму систем с двумя состояниями, возможно использовать эти техники на любых двухуровневых схемах.

Например, в [4] мы рассматриваем основанную на поляризации систему, где объект запрещает пошаговое вращение поляризации фотона. Мы выполнили предварительный эксперимент этого типа и смогли обнаружить *чувствительный к поляризации* объект (то есть, поляризационный светоделитель) с  $\eta$  равным 2/3. В настоящее время проводятся эксперименты для демонстрации прогресса высокоэффективных бесконтактных измерений *любого* неприкосновенного объекта, основанные на обсуждаемых здесь схемах.

Эта работа была поддержана австрийским Фондом Науки (FWF), проект номер S065/02, и американским Национальным научным фондом, грант номер RNY92-13964. Один из нас (П. Г. К.) был поддержан FWF Постдокторского

Источники и примечания

[1] M. Renninger, Z. Phys., 158, 417 (1960).

[2] R.H. Dicke, Am. J. Phys. v. 49, 925 (1981)

[3] A. Elitzur and L. Vaidman, Found. Phys., v. 23, 987 (1993);  
L. Vaidman, Quant. Opt. 6, 119 (1994).

[4] P.G. Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger, and M. A. Kasevich, in *Fundamental Problems in Quantum Theory: A Conference Held in Honor of Professor John A. Wheeler*, Annals of the New York Academy of Sciences, v. 755 (New York Academy of Sciences, New York, 1995).

[5] Конечно, при рассмотрении классических объектов или датчиков нет никакой когерентности между возможностями, что фотон поглощен первым, вторым, и т.д. Однако, ниже, когда мы рассматриваем *квантовые* объекты, важно, что различные измерения являются взаимно не связанными.

[6] B. Misra and E. C. G. Sudarshan, J. Math. Phys., (N.Y.), v. 18, 756 (1977); A. Peres, Am. J. Phys. v. 48, 931 (1980); G.S. Agarwal and S.P. Tewari, Phys.Lett. A v.185, 139 (1994).

[7] S. Haroche and D. Kleppner, Phys. Today, v. 42, №. 1, 24 (1989).

[8] См., например, обзор J.F. Roch *et al.* [Appl. Phys. B, v. 55, 291 (1992)].

[9] Даже если число фотонов за импульс неопределенно, из-за их когерентного состояния можно все-таки утверждать, что никакое взаимодействие не имело место, поскольку у "бомбы" есть прекрасное свойство: невзрыв бомбы этим импульсом подразумевает отсутствие взаимодействия. С другой стороны, если используется импульс точно  $n$  фотонов, и все  $n$  обнаружены, то мы знаем, что ни один из них не был поглощен объектом.

[10] C. K. Hong and L. Mandel, Phys. Rev. Lett., v. 56, 58 (1986).

[11] Регулировкой фотодиода эффективности были уравнены в пределах 0.06 %. Хотя собственная эффективность обнаружения лавины для фотодиода составляет приблизительно 40 %, для достижения высокой четкости было необходимо выбрать (с помощью ирисовых диафрагм) только малую долю фотонов, сопряженных с теми, которые достигают триггерного детектора, давая чистую эффективность только 2 %.

[12] P.G. Kwiat, H. Weinfurter, A. Zeilinger, and M.A. Kasevich (в печати).

**\* Перевод Дмитрия Карасёва, МГТУ им.Н.Э.Баумана**

**Редакторы перевода Ю.А.Лебедев и П.Р.Амнуэль**

**Поступила 18.04.10**