

# Бесконтактные измерения Элицура-Вайдмана

Лев Вайдман

The Raymond and Beverly Sackler School of Physics and Astronomy  
Tel-Aviv University, Tel-Aviv 69978, Israel

Опубликовано: [arXiv:0801.2777v1 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/0801.2777v1) 17 Jan 2008

Бесконтактные измерения, предложенные Элицуром и Вайдманом (БИЭВ-измерения)<sup>1</sup>, представляют собой квантово-механический метод обнаружения объекта, всякое взаимодействие которого с другими системами неизбежно приводит к его уничтожению (взрыву), не уничтожая его. Этим методом объект может быть обнаружен без его «ощупывания», т.е. без приближения к нему какой бы то ни было частицы.

Основная идея метода состоит в следующем. Тестирующая квантовая частица расщепляется в суперпозицию двух разделённых состояний. Одно из этих состояний опять расщепляется в суперпозицию двух других состояний, в то время как второе расщепляется в другую суперпозицию тех же исходящих состояний. Фазы различных частей суперпозиций настроены таким образом, что на одном из выходных путей возникает деструктивная интерференция. На этом пути устанавливается детектор. Такая система является готовым к работе БИЭВ-устройством.

Простейшее БИЭВ-устройство – это интерферометр Маха-Зендера (Рис. 1).

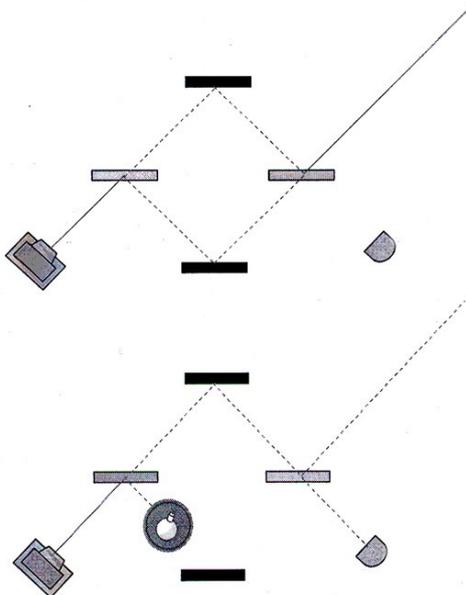


Рис. 1. Схема Элицура-Вайдмана  
а) если интерферометр пуст и правильно настроен, фотоны не достигают детектора.

б) если присутствует взрывающийся объект, детектор с вероятностью 25% обнаруживает фотон, посланный через интерферометр, и, когда это происходит, мы узнаём о наличии объекта внутри интерферометра не взрывая его.

Для его использования в качестве БИЭВ-устройства интерферометр Маха-Зендера должен быть расположен таким образом, что бы только одно из промежуточных состояний тестирующей квантовой частицы взаимодействовало бы с объектом. Если объект присутствует, то деструктивная интерференция нарушается и детектор может «кликнуть», объявляя тем самым, что объект присутствует. В этом случае никакого взрыва не происходит, так как частица может быть обнаружена только в одном месте. Частица также может быть «обнаружена» и объектом, так что в половине случаев объект взрывается. Вероятность обнаружения объекта в первой попытке равна одной четвёртой, так что эффективность метода низка, но обнаружив, что детектор сработал, можно утверждать с уверенностью, что объект присутствует.

БИЭВ-метод был улучшен с использованием эффекта Зенона [2] и вероятность взрыва может быть сделана как угодно малой. Однако, это требует большего времени: тестирующая квантовая частица должна пройти через область взаимодействия много раз. Простейшей реализацией этого улучшения на концептуальном уровне является прибор, состоящий из двух одинаковых полостей А и В, соединённых стенкой с высокой отражающей способностью (Рис.2).

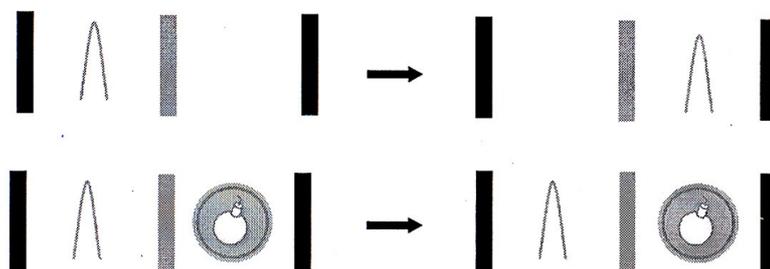


Рис.2. Схема Квиата с сотрудниками.

а) если полости пусты, фотон после  $N$  отражений полностью перемещается из левой полости в правую.

б) Если во второй полости присутствует объект, после таких же  $N$  отражений фотон останется в первой полости с вероятностью близкой к 1 для большого  $N$ .

Если поместить фотон в одну из полостей, развитие процесса после  $N$  отскоков переместит его в другую полость. В этот момент детектор отмечает наличие фотона в полости А. Это и будет готовым к работе прибором. Мы размещаем его таким образом, что бы областью взаимодействия взрывающегося объекта была полость В. Детектор будет кликать с вероятностью, близкой к 1. (Вероятность ошибки, которая приводит к взрыву объекта, это величина порядка  $1/N$ ). С уверенностью можно сказать, что клика не будет, если объект отсутствует.

Аналогичные настройки БИЭВ-устройства были предложены ранее Реннингером [3] и Диком [4]. Однако они не реализовали эффект, потому что в их анализах объект и контрольная частица поменялись местами. Они рассмотрели такой особенный случай, при котором ЭВ-контрольная частица изменяет своё состояние, в то время как ЭВ-взрывающийся объект (их измеряющее устройство) не меняет своё состояние вообще. Это был эксперимент с отрицательным результатом.

БИЭВ-метод может бесконтактным путём обнаружить не только взрывающиеся объекты, но и любые непрозрачные объекты. Однако осуществить такой эксперимент труднее. Для обнаружения взрывающихся частиц можно использовать вместо источника отдельных частиц слабый лазерный луч. Если срабатывание детектора происходит прежде, чем происходит взрыв, мы знаем что объект присутствует. Для непрозрачных объектов нам необходим источник отдельных частиц : если мы получаем клик, послав только один фотон, то мы знаем, что где-то внутри интерферометра есть непрозрачный объект и что он не поглотил ни одного фотона.

Одной из наиболее парадоксальных особенностей БИЭВ-измерений является то, что контрольная частица в некотором смысле никогда не проходит вблизи области взаимодействия. Как мы можем получить информацию о зоне, если через неё ничего не прошло и ничего из неё не вышло? Действительно, когда мы слышим клик, оповещающий о наличии объекта, никаких свидетельств о том, что контрольная частица находилась вблизи объекта, в нашем мире не существует.

Учитывая, что наши интуитивные представления о приличных связях в нашем мире основаны на законах физики, можно разрешить этот парадокс. Ведь эти законы описывают нашу Вселенную, которая включает много миров, в том числе и тот, в котором контрольная частица прошла через область взаимодействия (и там был взрыв). С этой точки зрения легко понять, почему БИЭВ-измерения не годятся для определения того, что область взаимодействия пуста. Так как не существует параллельного мира, в котором происходит взрыв, мы не можем утверждать, что область пуста, не пройдя через неё.

Теперь рассмотрим, что происходит, когда БИЭВ-устройство используется для обнаружения квантового объекта. Если волновая функция квантового объекта описывается пространственно таким образом, что только часть её накладывается на область взаимодействия, БИЭВ-устройство успешно определит его в этой области не изменяя его внутреннего состояния (не взрывая его). Импульс объекта при этой процедуре меняется. В этом отношении у БИЭВ-метода нет отличия от других неразрушающих измерений, проводимых в области взаимодействия. Поэтому термин «измерения без преобразования энергии», часто ассоциирующийся с БИЭВ-измерениями, не отражает уникальные способности БИЭВ-метода [6].

Преобразование энергии важно для модификации БИЭВ-метода Пенроузом [5], которая преследует другую цель: мы должны выбирать между объектами, которые взрываются всякий раз, как только прикасаются к их «спусковому крючку» и фальшивкой, где «спусковой крючок» расположен на

объекте, который не взрывается. Фальшивка работает как зеркало в интерферометре Маха-Зендера, который производит деструктивную интерференцию на своём детекторе. Исправное взрывное устройство не может служить зеркалом и, таким образом, детектор может кликнуть, оповещая, что объект не является фальшивкой. Пенроуз, объясняя суть БИЭВ-метода, называет его *контрафактуальным* [7]: объект является причиной клика детектора потому, что он мог бы взорваться, но не взорвался. Это и есть происхождение термина «контрафактуальных вычислений» [8,9] для квантового компьютера, который выдаёт результат, не производя расчёта. Отметим, тем не менее, что, так как мы не можем установить отсутствие объекта БИЭВ-методом, у нас не может быть контрафактуальных вычислений для всех возможных результатов [10].

При БИ-методе Пенроуза, когда детектор кликает, мы можем, как и прежде, утверждать, что контрольная квантовая частица не находится вблизи взрывного объекта. Однако когда для обнаружения квантового объекта используется БИЭВ-устройство, клик детектора не утверждает, что квантовая контрольная частица не присутствует в зоне взаимодействия. Может быть, что вся волновая функция от контрольной частицы проходит через зону взаимодействия. Это происходит, когда наблюдаемый квантовый объект является «контрольной частицей» БИЭВ, определяющей наличие оригинальной контрольной частицы. Такая ситуация известна как парадокс Харди [11]. Это соображение показывает, что утверждение, будто БИЭВ-метод определяет местонахождение квантовых объектов в зоне взаимодействия, строго говоря, неверно. Но ограничение минимально: всякий, заметивший местоположение объекта (а не суперпозицию состояний локализации) после оповещения БИЭВ-методом о его местонахождении, обнаружит, что метод не ошибся.

Было проведено много экспериментов с применением БИЭВ-метода. Оригинальная БИЭВ -схема была впервые применена в лаборатории Квиатом с сотрудниками [2]. Позднее Квиат с сотрудниками так же провели испытания своей улучшенной схемы, которая сочетает настройки ЭВ с эффектом Зенона [12], достигнув эффективности около 70%. Технические проблемы усложнили дальнейшее улучшение. Не просто настроить оптическую полость и очень трудно поместить фотон в первую полость в определенный момент для начала процесса.

Когда целью является практическое применение БИЭВ-метода, лучшим подходом является установка Поля и Павичича [13], которая по существу является интерферометром Фабри Перо, изображенным на Рис. 3.

Там только одна полость, содержащая почти 100% отражающие зеркала, настроенные так, чтобы быть прозрачными, если она пуста. Однако, если внутри полости находится объект, они становятся почти 100% отражателями, позволяющими найти объект, не взрывая его. У метода есть концептуальный недостаток, заключающийся в том, что фотон может быть отражен даже если полость пуста. Таким образом, обнаружение отраженного фотона не может гарантировать наличие объекта со 100% уверенностью. Но этот недостаток не

имеет значения для реальных экспериментов, т.к. шум установки обычно сильнее.

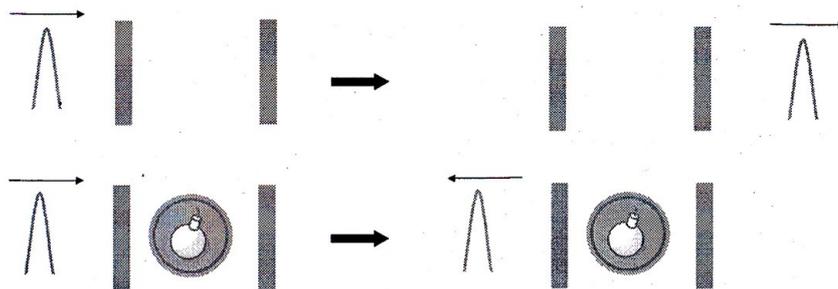


Рис.3.

Схема Пола и Павичича.

- а) Если полость пуста, фотон проходит через него с очень большой вероятностью.  
 б) Если объект присутствует в полости, фотон отражается с очень большой вероятностью.

Этот метод был впервые применен в лаборатории Цегая и др. [14] и недавний эксперимент дал эффективность 88% [15]. Этот метод имеет потенциал повышения эффективности за счет улучшения неуправляемого клапана обработки квантовой информации [16].

Применение БИЭВ-метода для обнаружения полупрозрачных объектов [17,18,19] с трудом подходит под прямое определение бесконтактного измерения в том смысле, что фотоны не проходят вблизи частицы, но такие методики достигают очень важной практической цели, поскольку мы «видим» объект, значительно снизив его облучение, и это позволяет проводить измерения на хрупких объектах.

Бесконтактные измерения Элицура-Вайдмана являются одним из «квантовых парадоксов». Это задача, которая не может быть осуществлена в области классической физики, но может быть выполнена в рамках квантовой теории. Прогресс экспериментальных демонстраций метода показывает, что у него есть потенциал для практического применения.

Эта работа частично поддерживается европейской комиссией в рамках Объединенного Проекта Применения Кубитов (QAP) финансируются ISI директором по контракту №015848 и гранту 990/06 Израильской научной организации.

<sup>1</sup> БИЭВ – русскоязычная аббревиатура (Бесконтактные измерения Элицура-Вайдмана), соответствующая английской EVIFM (Elitzur-Vaidman Interaction-Free Measurement), употребляемой в оригинале.

Источники

- [1] A.C.Elitzur, and L.Vaidman, *Found. Phys.* **23**, 987 (1993).
- [2] P.Kwiat, H.Weinfurter, T.Herzog, A.Zeilinger, and M.Kasevich, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4763 (1995).
- [3] M.Renninger, *Z.Phys.* **136**, 251 (1953).
- [4] R.H. Dicke, *Am. J. Phys.* **49**, 925 (1981).
- [5] R.Penrose, *Shadows of the Mind*, p. 240 (Oxford University Press, Oxford, 1994).
- [6] L.Vaidman, *Found. Phys.* **33**, 491 (2003).
- [7] Penrose, R. (1994) *Shadows of the Mind*. Oxford: Oxford University Press.
- [8] G.Mitchison and R. Jozsa, *Proc. Roy. Soc. (Lond) A* **457**, 1175 (2001).
- [9] O.Hosten, M.T.Rakher, J.T. Barreiro, N.A.Peters, and P.G.Kwiat, Counterfactual quantum computation through quantum interrogation, *Nature*, **439**, 949, (2006).
- [10] L.Vaidman, Impossibility of the counterfactual computation for all possible outcome, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 160403 (2007).
- [11] L.Hardy, Quantum mechanics, local realistic theories, and Lorenz-invariant realistic theories, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2981 (1992).
- [12] P.G.Kwiat, A.G.White, J.R.Mitchell, O.Nairz, G.Weih, H.Weinfurter, and A.Zeilinger, High-efficiency quantum interrogation measurements via the quantum Zeno effect, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 4725 (1999).
- [13] H.Paul and M.Pavičić, Nonclassical interaction-free detection of objects in a monolithic total-internal-reflection resonator *J.Opt.Soc.Am. B* **14**, 1275 (1997).
- [14] T.K.Tsegaye, E.Goobar, A.Karlsson, G.Bjork, M.Y.Loh, K.H.Lim, Efficient interaction-free measurements in a high-finesse interferometer, *Phys. Rev. A* **57**, 3987 (1998).

- [15] N.Namekata and S.Inoue, High-efficiency interaction-free measurements using a stabilized Fabry-Perot cavity, *J.Phys. B* **39**, 3177 (2006).
- [16] M.Pavičić, Nondestructive interaction-free atom-photon controller-NOT gate, *Phys. Rev. A* **75**, 032323 (2007).
- [17] J.S.Jang, Optical interaction-free measurements of semitransparent objects, *Phys. Rev. A* **59**, 2322 (1999).
- [18] G.Mitchison and S.Vassar, Absorption-free discrimination between semitransparent objects, *Phys. Rev. A* **63**, 032105 (2001).
- [19] H.Azuma, Interaction-free measurements with an imperfect absorber, *Phys. Rev. A* **74**, 054301 (2006).

Перевод Павла Попова, МГТУ им.Н.Э.Баумана  
Авторизован 31.12.08 г  
Редактор перевода Ю.А.Лебедев