

Запутывание между фотонами, которые никогда не существовали одновременно

Э.Мегидиш и др. (Израиль)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1209.4191v1 [quant-ph] 19 Sep 2012

Entanglement Between Photons that have Never Coexisted

E. Megidish, A. Halevy, T. Shacham, T. Dvir, L. Dovrat, and H. S. Eisenberg

Racah Institute of Physics, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem 91904, Israel

PACS numbers: 03.67.Bg, 42.50.Dv

Роль порядка выполнения квантовых измерений во времени и пространстве, хотя и не является фундаментальной проблемой квантовой механики, но все же представляет собой определенную загадку. Одна часть квантовой системы, уже закончившая эволюционировать, может быть либо измерена сразу, либо сохранена для более позднего измерения, причем это не влияет на конечные результаты, несмотря на продолжающуюся эволюцию остальной части системы. Кроме того, нелокальность квантовой механики, как показывает феномен запутывания, применяется не только к пространственно разделенным частицам, но также и к частицам, разделенным во времени. В данной работе демонстрируются эти принципы благодаря генерации и полному описанию запутанной пары фотонов, которые никогда не существовали одновременно. Используя передачу запутывания (entanglement swapping) между двумя разделенными во времени фотонными парами, один фотон из первой пары запутывается с другим фотоном из второй пары. Первый фотон был зарегистрирован даже раньше, чем этот другой был создан. Наблюдаемые квантовые корреляции демонстрируют нелокальность квантовой механики в пространстве-времени.

Запутывание между пространственно разделенными квантовыми системами является одним из наиболее характерных результатов квантовой механики. Оно выражается в неклассических корреляциях между удаленными системами. Эйнштейн, Подольский и Розен заявили, что эти мгновенные корреляции приводят к появлению парадокса, демонстрирующего неполноту квантовой механики [1]. Только после осуществления эксперимента, предложенного Беллом [2, 3], нелокальная природа квантовой механики была признана повсеместно. Тем не менее, свойства запутывания все еще остаются загадочными для многих исследователей.

Во многих экспериментах в качестве квантовых частиц используются одиночные фотоны, поскольку ими легко манипулировать, и поскольку они сохраняют когерентность в течение долго времени. Общий метод генерации поляризации запутанных фотонных состояний состоит в использовании нелинейного оптического процесса параметрического преобразования с понижением частоты в диэлектрических кристаллах [4].

В этом процессе фотон накачки преобразуется в два низкоэнергетических фотона с сохранением энергии и импульса. С помощью этого метода возможно создание ярких высококачественных двухфотонных состояний в любом из

четырёх максимально запутанных состояний, известных также как состояния Белла. Для поляризованных состояний это состояния вида

$$\begin{aligned} |\phi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|h_a h_b\rangle \pm |v_a v_b\rangle), \\ |\psi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|h_a v_b\rangle \pm |v_a h_b\rangle), \end{aligned} \quad (1)$$

где $h_a(v_b)$ представляет собой горизонтально (вертикально) поляризованный фотон в пространственной моде a (b).

Фотоны также могут быть запутаны с помощью измерений проектирования на максимально запутанные состояния [5]. Измерения состояния Белла с линейными оптическими элементами требует пост-селекции. Они могут одновременно провести различие только между двумя из четырех состояний Белла [6, 7]. Полная проекция Белла может быть получена с помощью нелинейной оптики [8], гиперзапутывания [9, 10], вспомогательных фотонов [11–13] или одиночных фотонов с запутанным путем (path entangled single photons) [14]. Проекция Белла являются ключевыми ингредиентами при квантовом вычислении и в квантовых протоколах, таких как телепортация [15] и переключение запутывания (entanglement swapping) [16].

Протокол переключения запутывания запутывает два удаленных фотона без какого-либо взаимодействия между ними. Каждый из двух фотонов принадлежит вначале к одной из двух независимых запутанных фотонных пар (например, фотоны 1 и 4 из запутанных пар 1-2 и 3-4). Два других фотона (2-й и 3-й) проектируются с помощью измерения на состояние Белла. В итоге первые два фотона (1-й и 4-й) становятся запутанными даже при том, что они могут быть удалены один от другого. Переключение запутывания является центральным принципом, используемым в квантовых повторителях [17], задачей которых является перекрыть ограничивающий эффект потери фотонов при квантовой коммуникации на большом расстоянии. Предшествующие демонстрации переключения запутывания [18] и многокаскадного переключения запутывания [19], запутанных фотонов, которые были разделены пространственно, но не во времени, т.е. все фотоны, которые были запутаны, существовали и подвергались измерению в течение одно и того же периода времени.

В данной работе демонстрируется, что время, в течение которого осуществляются квантовые измерения, и порядок их выполнения, не оказывает влияния на результат квантовомеханического эксперимента при запутывании двух фотонов, которые существуют в разные времена. Это достигается тем, что вначале создается одна фотонная пара и сразу измеряется фотон 1 (см. рис. 1).

Фотон задерживается до того, как создается вторая пара (3-4), и фотоны 2 и 3 проектируются на базис Белла. Когда фотон 1 измеряется в некотором базисе, он не “знает”, что будет создан фотон 4 и в каком базисе он будет измерен. Тем не менее, фотоны 1 и 4 квантово скоррелированы несмотря на тот факт, что они никогда не сосуществовали одновременно. Возможность для двух фотонов, которые никогда не перекрывались во времени, быть запутанными, обсуждалась теоретически для системы атомов и фотонов [20]. Недавно переключение запутывания было продемонстрировано с использованием эксперимента с отложенным выбором, где все четыре фотона были созданы одновременно, но фотоны 1 и 4 измерялись до того, как осуществлялся выбор, с запутыванием их или нет [21, 22].

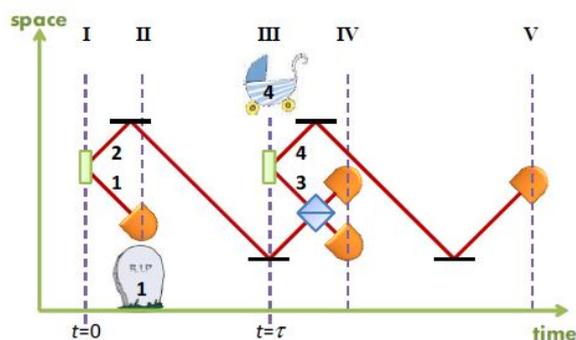


Рисунок 1. Временная диаграмма.

(I) Рождение фотонов 1 и 2. (II) Детектирование фотона 1. (III) Создание фотонов 3 и 4. (IV) Проектирование Белла для фотонов 2 и 3. (V) Детектирование фотона 4.

Сценарий разделения во времени и в пространстве, который мы представляем, нужно сравнить со стандартным случаем двух частиц запутанного состояния, где частицы разделены только пространственно. В этом случае стандартного запутывания измерение над любой из двух частиц одновременно изменяет физическое описание другой. Этот результат Эйнштейн назвал “призрачным действием на расстоянии (spooky action at a distance)”.

В представленном здесь сценарии измерение последнего фотона влияет на физическое описание первого фотона в прошлом, даже до того, когда это измерение было выполнено. Таким образом, “призрачное действие” управляет прошлым системы. Другая возможная точка зрения состоит в том, что измерение первого фотона немедленно определяет будущее физическое описание последнего фотона. В этом случае, воздействие оказывается на будущее части системы, которая еще не была создана.

С целью генерации последующих фотонных пар в хорошо определенные моменты времени использовался импульсный лазер, обеспечивающий накачку источника одиночных запутанных поляризованных состояний, работающего на основе параметрического преобразования с понижением частоты [4]. Это вероятностный источник, поэтому существует вероятность генерации двух пар, каждая пара из одного из двух последовательных импульсов, разделенных периодом τ лазера. Четырехфотонное состояние есть

$$|\psi^-\rangle_{a,b}^{0,0} \otimes |\psi^-\rangle_{a,b}^{\tau,\tau} = \frac{1}{2} (|h_a^0 v_b^0\rangle - |v_a^0 h_b^0\rangle) \otimes (|h_a^\tau v_b^\tau\rangle - |v_a^\tau h_b^\tau\rangle), \quad (2)$$

где нижние индексы – маркеры пространственной моды, а верхние индексы – маркеры времени для фотона. С целью проектирования второго фотона на первую пару и первого фотона второй пары на состояние Белла, первый задерживается на τ с помощью линии задержки. Та же задержка применяется ко второму фотону второй пары, и результирующее состояние может быть переупорядочено и записано в виде

$$\begin{aligned}
|\psi\rangle_{a,b}^{0,\tau} \otimes |\psi\rangle_{a,b}^{\tau,2\tau} = \frac{1}{2} (&|\psi^+\rangle_{a,b}^{0,2\tau} |\psi^+\rangle_{a,b}^{\tau,\tau} \\
&- |\psi^-\rangle_{a,b}^{0,2\tau} |\psi^-\rangle_{a,b}^{\tau,\tau} \\
&- |\psi^+\rangle_{a,b}^{0,2\tau} |\psi^-\rangle_{a,b}^{\tau,\tau} \\
&+ |\psi^-\rangle_{a,b}^{0,2\tau} |\psi^+\rangle_{a,b}^{\tau,\tau}). \quad (3)
\end{aligned}$$

Когда два фотона, относящиеся к периоду времени τ (фотоны 2 и 3), проектируются на любое состояние Белла, первый и последний фотоны (1 и 4) коллапсируют также в то же самое состояние, и происходит переключение запутанности. Первый и последний фотоны, между которыми нет каких-либо корреляций, становятся запутанными.

Согласно этому описанию, привязка по времени каждого фотона есть просто дополнительный маркер для различения между различными фотонами, и время, когда каждый фотон измеряется, не влияет на конечный результат. Первый фотон из первой пары (фотон 1) измеряется даже раньше, чем создается вторая пара (см. рис. 1). После создания второй пары происходит Белл-проекция, и только после этого и новой задержки регистрируется последний фотон из второй пары (фотон 4). Переключение запутывания создает между первым и последним фотонами корреляции, нелокальные не только в пространстве, но и во времени.

Квантовые корреляции наблюдаются только апостериори, после завершения измерения всех фотонов.

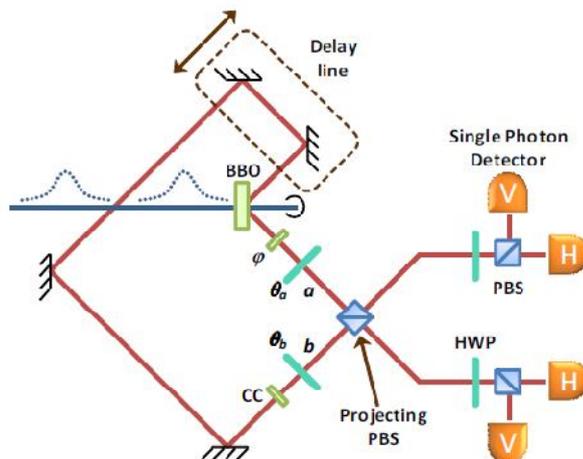


Рисунок 2. Экспериментальная установка

Delay line – линия задержки; BBO – кристалл $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$; Single Photon Detector – детектор одиночных фотонов; Projecting PBS – проектирующий поляризационный светоделитель; HWP – полуволновая пластинка.

Чтобы полностью характеризовать состояния первого и последнего фотонов, требуется томография квантового состояния [24]. Ее результаты показаны на рис. 3. Из него следует, что хотя один фотон измеряется еще перед тем, как второй фотон создается, наблюдается полная квантовая корреляция при измерении матрицы плотности двух фотонов на основе проектирующего измерения. В этом проявляется нелокальность квантовой механики не только в пространстве, но также и во времени.

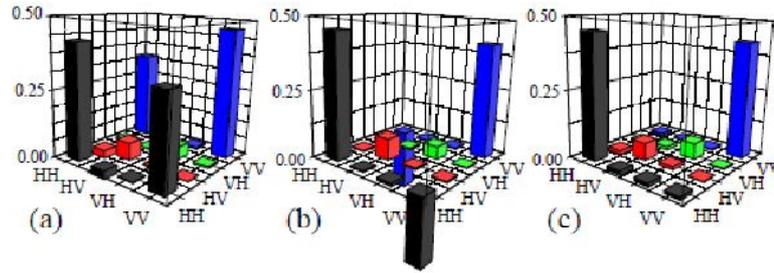


Рисунок 3. Действительные части матриц плотности первого и последнего фотонов:

- (a) когда два средних фотона проецируются на состояние $|\phi^+\rangle$,
 (b) когда два средних фотона проецируются на состояние $|\phi^-\rangle$,
 (c) когда проекция ошибочна из-за неразличимости во времени.

Ссылки

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935).
 [2] J. S. Bell, Physics 1, 195 (1964).
 [3] A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, Phys. Rev. Lett. 47, 460 (1981).
 [4] P. G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko, and Y. H. Shih, Phys. Rev. Lett. 75, 4337 (1995).
 [5] H. Weinfurter, Europhys. Lett. 25, 559 (1994).
 [6] L. Vaidman and N. Yoran, Phys. Rev. A 59, 116 (1999).
 [7] N. Lutkenhaus, J. Calsamiglia, and K.-A. Suominen, Phys. Rev. A 59, 3295 (1999).
 [8] Y.-H. Kim, S. P. Kulik, and Y. Shih, Phys. Rev. Lett. 86, 1370 (2001).
 [9] J. T. Barreiro, T. C. Wei, and P. G. Kwiat, Nature Physics 4, 282 (2008).
 [10] C. Schuck, G. Huber, C. Kurtsiefer, and H. Weinfurter, Phys. Rev. Lett. 96, 190501 (2006).
 [11] Z. Zhao, A.-N. Zhang, Y.-A. Chen, H. Zhang, J.-F. Du, T. Yang, and J.-W. Pan, Phys. Rev. Lett. 94, 030501 (2005).
 [12] P. Walther and A. Zeilinger, Phys. Rev. A 72, 010302(R) (2005).
 [13] W. P. Grice, Phys. Rev. A 84, 042331 (2011).
 [14] D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy, and S. Popescu, Phys. Rev. Lett. 80, 1121 (1998).
 [15] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. 70, 1895 (1993).
 [16] M. Zukowski, A. Zeilinger, M. A. Horne, and A. K. Ekert, Phys. Rev. Lett. 71, 4287 (1993).
 [17] H.-J. Briegel, W. Dur, J. I. Cirac, and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. 81, 5932 (1998).
 [18] J.-W. Pan, D. Bouwmeester, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, Phys. Rev. Lett. 80, 3891 (1998).
 [19] A. M. Goebel, C. Wagenknecht, Q. Zhang, Y.-A. Chen, K. Chen, J. Schmiedmayer, and J.-W. Pan, Phys. Rev. Lett. 101, 080403 (2008).
 [20] R. Wiegner, C. Thiel, J. von Zanthier, and G. S. Agarwal, Opt. Lett. 36, 1512 (2011).
 [21] A. Peres, J. Mod. Opt. 47, 139-143 (2000).
 [22] X.-S. Ma, S. Zotter, J. Kofler, R. Ursin, T. Jennewein, C. Brukner, and A. Zeilinger, Nature Physics 8, 480 (2012).
 [23] E. Megidish, T. Shacham, A. Halevy, L. Dovrat, and H. S. Eisenberg, Phys. Rev. Lett. 109, 080504 (2012).
 [24] D. F. V. James, P. G. Kwiat, W. J. Munro, and A. G. White, Phys. Rev. A 64, 052312 (2001).
 [25] P. J. Mosley, J. S. Lundeen, B. J. Smith, P. Wasylczyk, A. B. U'Ren, C. Silberhorn, and I. A. Walmsley, Phys. Rev. Lett. 100, 133601 (2008).