

Р. Вигнер и др. (Германия, США)

Квантовая интерференция и запутывание фотонов, не перекрывающихся во времени

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru)

arXiv:1102.1490v1 [quant-ph] 8 Feb 2011

Quantum interference and entanglement of photons which do not overlap in time

R. Wiegner¹ (ralph.wiegner@physik.uni-erlangen.de), C. Thiel¹, J. von Zanthier¹, и G. S. Agarwal²

¹Institut für Optik, Information und Photonik, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany

²Department of Physics, Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA

Compiled February 9, 2011

Обсуждается возможность квантовой интерференции и запутывания фотонов, которые существуют в различные интервалы времени, т.е. когда один фотон регистрируется еще до создания другого. Соответствующая двух-фотонная функция корреляции, как теоретически показывается, нарушает неравенства Белла.

© 2011 Optical Society of America
OCIS codes: 000.2658, 260.3160, 270.0270

Когерентная суперпозиция состояний, квантовая интерференция и запутывание – это понятия, лежащие в основе квантовой физики и играющие ключевую роль в фундаментальных исследованиях, как и в потенциальных приложениях. До настоящего времени типовая экспериментальная установка для наблюдения высших гармоник интерференции предусматривает работу с фотонными парами (формируемыми в результате преобразования с понижением частоты – PDC – в нелинейных кристаллах), последовательно посылаемыми на светоделитель [1-3]. При таком подходе Hong-Ou-Mandel (НОМ) двух-фотонная интерференция [1] наблюдалась для двух фотонов с идентичными спектральными характеристиками, пространственными и поляризационными модами, измеренными в период их когерентности [4]. НОМ двух-фотонная интерференция была продемонстрирована также с некоррелированными фотонами. Эти фотоны могут создаваться независимыми или даже несопоставимыми источниками типа двух PDC-источников [5], двух атомов [6], ионов [7], полупроводниковых квантовых точек¹ [8] или квантовых точек или PDC-источников, интерферирующих с когерентным или термальным источником [9, 10].

Перекрывание во времени отдельных фотонов в светоделителе не является фундаментальным условием наблюдения двух-фотонной квантовой интерференции, скорее важна неразличимость соответствующих двух-фотонных амплитуд [11-15]. Например, Franson предложил двух-фотонный интерферометр,

¹ Квантовая точка (quantum dot) – наночастица из полупроводникового материала, погружаемая в клетку или организм для решения различных экспериментальных задач, например, для работы с мечеными протеинами (Oxford American Dictionary).

где два фотона, одновременно испущенных двух-фотонным источником, направляются к детекторам по двум пространственно разделенным траекториям [13,14]. Поскольку предполагается, что источник испускает два фотона в один и тот же (хотя точно и неизвестный заранее) момент, то для достижения неразличимости возникающих двух-фотонных амплитуд требуется синхронное детектирование и идентичность длины оптических путей отдельных фотонов. Это усиливает квантовую интерференцию даже при наличии между ними задержки, намного превышающей период когерентности отдельного фотона (в первом порядке) [13, 14].

В настоящей публикации мы обсуждаем другой двух-фотонный интерферометр, в котором фотоны испускаются независимыми источниками единичных фотонов (SPS) [16]. При регистрации фотонов в дальней зоне (in the far field) и с учетом предположения, что каждый детектор регистрирует в точности один фотон, возникают две двух-фотонные амплитуды, отличающиеся по фазе и обе дающие когерентный вклад в двух-фотонный сигнал [17-19]. Поскольку мы предполагаем, что источники являются некоррелированными, то в этом случае нельзя сформулировать требование к моменту эмиссии отдельного фотона. Тогда возникает вопрос, какие требования должны предъявляться к моментам эмиссии и детектирования обоих фотонов, чтобы обеспечить неразличимость между двух-фотонными амплитудами и возможность наблюдения двух-фотонной интерференции.

Ниже мы показываем, что при одинаковых SPS-источниках для такого интерферометра не существует таких требований. В частности, мы показываем, что индивидуальные оптические пути двух фотонов не только могут отличаться длиной их индивидуальной когерентности, но и время задержки между их регистрацией может превосходить время пролета фотонов до детекторов.

Это эквивалентно утверждению, что двух-фотонная интерференция может наблюдаться даже тогда, когда два фотона существуют в различные интервалы времени, т.е. когда один фотон регистрируется еще до того, как другой испускается. Мы также показываем, что такой двух-фотонный сигнал может нарушать неравенства Белла [20] В формулировке Клаузера и Хорна (CH74) [21]. С учетом предшествующего утверждения это подразумевает, что запутывание двух фотонов может существовать даже тогда, когда периоды их существования не перекрываются во времени.

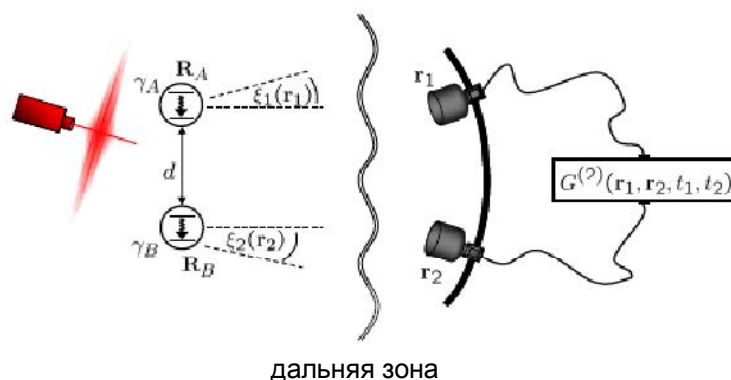


Рисунок 1. Схема эксперимента: Два фотона испускаются двумя независимыми источниками (SPS) единичных фотонов A и B, расположенных в точках R_A и R_B , с постоянными распада γ_A и γ_B , соответственно. Фотоны регистрируются в моменты времени t_1 и t_2 в точках r_1 и r_2 в дальней зоне излучения источников SPS. Сигналы обоих детекторов окажутся коррелированными.

С целью доказательства сделанных утверждений авторы теоретически анализируют работу установки, представленной на рис. 1, и приходят к заключению, что в опытах с ней может быть обеспечен двух-фотонный интерференционный сигнал с видностью $V = 100\%$ для пары фотонов, периоды существования которых вообще не перекрываются во времени (рис. 2). Они также приходят к выводу, что тот же результат может быть получен не только для источников фотонов на независимых атомах, но и для источников на ионных ловушках, квантовых точках или одиночных молекулах.



Рисунок 2. Схематическое изображение сценария, согласно которому первый рассеянный фотон регистрируется раньше, чем излучается второй фотон. В этом случае нет общего периода времени существования двух фотонов.

Ссылки

1. C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987).
2. Y. H. Shih and C. O. Alley, Phys. Rev. Lett. 61, 2921 (1988).
3. P. G. Kwiat et al., Phys. Rev. Lett. 75, 4337 (1995).
4. M. Zukowski, A. Zeilinger, M. A. Horne, A. K. Ekert, Phys. Rev. Lett. 71, 4287 (1993).
5. R. Kaltenbaek et al., Phys. Rev. Lett. 96, 240502 (2006).
6. J. Beugnon et al., Nature 440, 779 (2006).
7. P. Maunz et al., Nature Physics 3, 538 (2007).
8. E. B. Flagg et al., Phys. Rev. Lett. 104, 137401 (2010).
9. T. B. Pittman and J. D. Franson, Phys. Rev. Lett. 90, 240401 (2003).
10. A. J. Bennett et al., Nature Physics 5, 715 (2009).
11. P. G. Kwiat, A. M. Steinberg, and R. Y. Chiao, Phys. Rev. A 45, 7729 (1992).
12. T. B. Pittman et al., Phys. Rev. Lett. 77, 1917 (1996).
13. J. D. Franson, Phys. Rev. Lett. 62, 2205 (1989).
14. A. Cabello et al., Phys. Rev. Lett. 102, 040401 (2009).
15. X.-M. Jin, C.-Z. Peng, T. Yang, and Y. Deng, ArXiv: 1005.0802.
16. L. Mandel, Phys. Rev. A 28, 929 (1983).
17. C. Skornia et al., Phys. Rev. A 64, 063801 (2001).
18. C. Thiel et al., Phys. Rev. Lett. 99, 133603 (2007).
19. R. Wiegner, C. Thiel, J. von Zanthier, G. S. Agarwal, Phys. Lett. A 374, 3405 (2010).
20. J. S. Bell Physics 1, 195 (1964).
21. J. F. Clauser, M. A. Horne, Phys. Rev. D 10, 526 (1974).
22. G. S. Agarwal, Quantum Optics, Springer Tracts in Modern Physics (Springer, Berlin, 1974), Vol. 70.
23. M. Lax, Phys. Rev. 172, 2 (1968).
24. R. Glauber Phys. Rev. 130 2529 (1963).
25. H. Paul, Rev. Mod. Phys. 58, 209 (1986).