

## Объяснение действия “квантового ластика” при отложенном выборе с помощью транзакционной интерпретации квантовой механики

Х. Фирн (США)

Реферат подготовил М.Х. Шульман ([shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru), [www.timeorigin21.narod.ru](http://www.timeorigin21.narod.ru))

---

arXiv:1501.00970v3 [quant-ph] 9 Jan 2015

A delayed choice quantum eraser explained by the transactional interpretation of quantum mechanics

H. Fearn ([hfearn@fullerton.edu](mailto:hfearn@fullerton.edu))

Physics Department, California State University Fullerton  
800 N. State College Blvd., Fullerton CA 92834

---

Данная статья объясняет действие “квантового ластика” при отложенном выборе (Kim et al., [1]) с помощью транзакционной интерпретации квантовой механики, предложенной Джоном Крамером [2]. Она умышленно изложена в простой математической форме, чтобы облегчить понимание транзакционного подхода, сделать ясным представление о том, как мгновенный “коллапс” волновой функции при измерении в определенный момент и определенном месте может быть заново интерпретирован как постепенный коллапс вдоль всего пути фотона и всего времени его движения от щели к детектору. Это оказывается возможным благодаря использованию запаздывающей “волны-предложения”, которая мыслится распространяющейся от щелей (точнее, от небольшой области с кристаллом, где происходит параметрическое преобразование с понижением частоты) к детектору, а также опережающей волны счетчика, распространяющейся от детектора к щелям. Главное здесь состоит в том, чтобы показать, как просто устроено транзакционное представление Крамера, и насколько более интуитивно при этом видится коллапс волновой функции. Устраняются также некоторые недоразумения, связанные с возможной ретро-причинной передачей информации. Квантовый ластик при отложенном выборе не связан с каким бы то ни было действием назад во времени. Данный подход дает в точности те же результаты, что и копенгагенская интерпретация.

Как известно, суть опытов с отложенным выбором, предложенных еще Уилером, состоит в том, что сигнальные фотоны, для которых соответствующие холостые фотоны *позже* несут информацию о выборе пути (which-path information), не обнаруживают интерференционной картины. Их темпы детектирования в точности такие же, как у коллапсировавших фотонов при путях с единственным отверстием. Сигнальные фотоны, для которых соответствующие им холостые фотоны не несут информацию о выборе пути, образуют невозмущенную интерференционную картину. Таким образом, интерференция на выходном детекторе происходит только для событий, в которых холостой фотон детектируется (*при этом позже, чем сигнальный фотон!*) с помощью вспомогательного детектора.

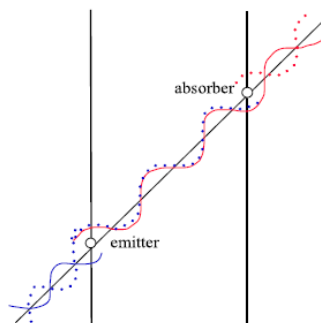
Наиболее известный эксперимент с отложенным выбором описан в работе Kim et al. [1] и использует источник фотонов, основанный на параметрическом преобразовании с понижением частоты (один входной высокочастотный фотон порождает два низкочастотных). Этот опыт выбран здесь всего лишь в качестве примера.

Транзакционная интерпретация квантовой механики была описана Джоном Крамером [2] обзорной статье 1986 года, а также в [14]. Это – способ простого и интуитивно ясного восприятия квантовых парадоксов, ЭПР [15], получения информации типа “который путь (which way)” и экспериментов с “квантовым ластиком”. К сожалению,

эта концепция не получила поддержки в научном сообществе, поэтому автору данной статьи хотелось бы донести ее до нового поколения физиков.

Дирак в работе [18] в 1938 году выдвинул идею опережающих волн в классической электродинамике и, с ее помощью, вывел соотношение для радиационного торможения ускоряющейся заряженной частице. Дирак ввел опережающие волны, поскольку это допускалось релятивистским волновым уравнением, но не дал физического объяснения, откуда они берутся. Позже, в 1945 и 1949 г.г. Уилер и Фейнман [19] опубликовали пару статей, в которых изложили теорию поглотителя и попытались ответить на вопрос о происхождении опережающих волн, поставленный Дираком. Дополнительным стимулом было устранение энергии самодействия электрона, это удалось лишь частично. Тормозное излучение может быть получено без самодействия, но поляризация вакуума все еще представляла проблему (требовалась перенормировка заряда). Все это могло быть разрешено только за счет отказа от идеи “точечного” заряда. Фейнмановская диссертация включала подход с интегралами по траекториям для нерелятивистской квантовой механики, с помощью которых описывались правила квантования *прямого межчастичного взаимодействия* в теории поглотителя [20].

Чтобы между двумя частицами – излучателем и поглотителем – произошло взаимодействие, Крамер выдвинул гипотезу, что излучатель должен послать “волну-предложение (offer wave)”. Такая волна должна быть наполовину опережающей и наполовину запаздывающей, расходящейся по всевозможным направлениям в поисках поглотителя, с которым могло бы произойти взаимодействие (см. рисунок). Опережающая встречная волна должна распространяться назад во времени, точно вдоль того же пути, что и исходная запаздывающая волна-предложение (она комплексно сопряжена с ней). В одном пространственном направлении (см. рисунок) опережающая встречная волна выявляет частицу-излучатель, таким образом, происходит конструктивная интерференция между частицами. В другом пространственном направлении опережающая встречная волна выявляет частицу-поглотитель, причем точно в тот же самый момент времени, когда излучается запаздывающая волна-предложение. Это позволяет опережающей волне от поглотителя точно подавить опережающую волну там, где расположен излучатель. Аналогично, запаздывающая волна от излучателя подавит запаздывающую волну от поглотителя там, где расположен поглотитель. Только запаздывающая волна от излучателя и опережающая волна от поглотителя вдоль соединяющего их пути суммируются благодаря суперпозиции, не подавляя одна другую. Эти волны и формируют взаимодействие между частицами.



Плоская волна транзакции между частицами излучателя (emitter) и поглотителя (absorber). Черные вертикальные линии представляют собой мировые линии частиц. Волны от излучателя показаны сплошными линиями, волны от поглотителя показаны точками. Запаздывающие волны как от излучателя, так и от поглотителя показаны красным цветом, а опережающие волны – синим. Красные запаздывающие волны направлены вправо вверх, а синие опережающие волны – влево вниз. Заметим, что вдоль пути между излучателем и поглотителем волны складываются конструктивно, но перед излучателем и за поглотителем – деструктивно интерферируют.

Согласно точке зрения автора статьи, транзакционная интерпретация объясняет коллапс волновой функции в эксперименте Кима его “распределенностью” вдоль всего пути от места излучения (щелей) до детектора, т.е. тем, что он происходит не мгновенно. При этом транзакционная интерпретация отвергает возможность любого распространения сигналов назад во времени, поскольку опережающая встречная волна от детектора должна распространяться назад на все расстояние до щели, чтобы фотон (от щели) мог пройти все нужное расстояние. Теперь выбор не является отложенным, так как фотон *знает*, где он завершит свое движение, поскольку опережающая волна, идущая назад во времени, подтверждает взаимодействие, или “рукопожатие (handshake)”, как установил Крамер.

Опережающие волны являются естественным решением для релятивистских волновых уравнений. Чтобы их использовать в нерелятивистском случае, следует подумать о *паре* уравнений Шрёдингера – одному для некоторой волновой функции, а другого для комплексно сопряженной к ней волновой функции, которая и исполняет роль опережающей волны. Это имеет смысл, если представлять себе уравнение Шрёдингера как квадратный корень из релятивистского уравнения Клейна-Гордона.

## Ссылки

- [1] Y-H Kim, R. Yu, S. P. Kulik and Y. H. Shih, “ A delayed choice Quantum eraser”, arXiv:9903047 [quant-ph] (1999).
- [2] J. G. Cramer, “The transactional Interpretation of quantum mechanics”, Rev. Mod. Phys. 58, 647 (1986).
- [3] R. P. Feynman, R. Leighton and M. Sands, The Feynman lectures of Physics, Vol. III, Addison Wesley, Reading (1965).
- [4] See Wheeler’s “Delayed choice”, in Quantum Theory and Measurement, edited by J. A. Wheeler and W. H. Zurek, Princeton Univ. Press (1983). See also experimental verification by Jacques et al. arXiv:610241 [quant-ph] (2006).
- [5] M. O. Scully and Kai Druhl, “Quantum Eraser: A proposed quantum correlation experiment concerning observation and ‘delayed choice’ in quantum mechanics”, Phys. Rev. A25, 2208 (1982).
- [6] M. O. Scully, B-G Englert and H. Walther, “Quantum optical tests of Complementarity”, Nature 351, 6322 (1991). See also “Quantum optical Ramsey Fringes and Complementarity”, Appl. Phys. B54, pp 366–368 (1992).
- [7] M. O. Scully and M. S. Zubairy, Quantum Optics, Cambridge University Press (1997) p223.
- [8] U. Eichmann, J. C. Bergquist, J.J. Bollinger, et al. “Young’s Interference Experiment with light scattered from two atoms”, Phys. Rev. Letts. 70 (16) p2359–2362 (1993).
- [9] W. Holladay, “A simple quantum eraser”, Phys. Letts. A183(4), pp280–282 (1993). See also, M. Devereux, “Testing Quantum eraser and reversible quantum measurement with Holladay’s simple Experiment”, J. of Phys: Conference series 462 012010 (2013).
- [10] T. J. Herzog, P. G. Kwiat, H. Weinfurter and A. Zeilinger, “Complementarity and the quantum eraser”, Phys. Rev. Letts. 75, (17) 3034 (1995).
- [11] P. G. Kwiat, A. M. Steinberg & R. Y. Chiao, “Observation of a quantum eraser; A revival of coherence in a two-photon interference experiment”, Phys. Rev. A45, 7729 (1992).
- [12] Xiao-Song Ma et al. ( Zeilinger’s group), “Quantum erasure with causally disconnected choice”, PNAS 110 (4) pp1221-1226 (2013).
- [13] See for example <http://www.youtube.com/watch?v=u9bXoIOFAB8> There are other animations discussing the philosophy of the experiment online.
- [14] J. G. Cramer, “An overview of the Transactional Interpretation of Quantum Mechanics”, Int. J. of Theo. Phys. 27, 227 (1988).
- [15] R. E. Kastner and J. G. Cramer, “Why Everettians Should Appreciate the Transactional Interpretation”, arXiv: 1001.2867 [quant-ph].
- [16] J. G. Cramer, “A Transactional Analysis of Interaction Free Measurements”, Found. of Phys. Letts. 19 pp63-73 (2006), also arXiv: 0508102 [quant-ph].
- [17] J. G. Cramer, “The quantum Eraser”, Analog Science Fiction/Fact Magazine, June, 1998; <http://www.npl.washington.edu/AV/altvw90.html>

- [18] P. A. M. Dirac, “Classical theory of radiating electrons”, Proc. Roy. Soc. Lon. A167, 148 (1938).
- [19] J. A. Wheeler and R. P., Feynman, “Interaction with the absorber as a mechanism of radiation”, Rev. Mod. Phys. 17 157 (1945).
- [20] R. P. Feynman, “Space–Time Approach to Non–Relativistic Quantum mechanics”, Rev. Mod. Phys. 20 (2), pp367–387 (1948).
- [21] P. C. W. Davies “Extension of Wheeler–Feynman quantum theory to the relativistic domain I. Scattering processes”, J. Phys. A4, 836–845 (1971).
- [22] P. C.W. Davies, “Extension of Wheeler–Feynman quantum theory to the relativistic domain II. Emission processes”, J. Phys. A 5, 1025–1036 (1972).
- [23] F. Hoyle and J. V. Narlikar, Ann. Phys. (N. Y.) 54, 207 (1969) and *ibid* 62, 44 (1971).
- [24] Paul L. Csonka “Advanced Effects in Particle Physics”, Phys. Rev. 180, 1266-1281 (1969).
- [25] Nick Herbert, *Faster than Light; Superluminal Loopholes in Physics 77–97*, A Plume book, Penguin Group, New York (1989).
- [26] J. G. Cramer, “The Arrow of Electromagnetic Time and the Generalized Absorber Theory”, Found. of Phys. 13 (9), 887–902 (1983).
- [27] J. G. Cramer, “The Plane of the Present and the New Transactional Paradigm of Time”, in chap 9 of the book *Time and the instant* by R. Drurie ed. Clinamen Press, UK (2001). Also arXiv: 0507089 [quant-ph].
- [28] J. G. Cramer, “The quantum Handshake”, Analog Science Fiction/Fact Magazine, Nov 1986; <http://www.npl.washington.edu/AV/altvw16.html>
- [29] Ruth E. Kastner, *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press (2013).
- [30] R. E. Kastner, “The Possibilist Transactional Interpretation and Relativity”, arXiv:1204.5227 [quant-ph]. See Kastner’s webpage for more papers and interesting details. <http://transactionalinterpretation.org>
- [31] J. G. Cramer, Private communication.
- [32] E. J. Galvez, et al., “Interference with correlated photons: Five quantum mechanics experiments for undergraduates”, Am. J. Phys. 73 (2) pp127-140 (2005).
- [33] G. Di Giuseppe et al., “Entangled-photon generation from parametric down-conversion in media with inhomogeneous nonlinearity”, Phys Rev. A66, 013801 (2002).
- [34] P. W. Milonni, H. Fearn and A. Zeilinger, “Theory of two-photon down-conversion in the presence of mirrors”, Phys. Rev. A 53, (6) 4556-4566 (1996).
- [35] J. G. Cramer and Nick Herbert, “An Inquiry into the Possibility of Nonlocal Quantum Communication”, arXiv: 1409.5098 [quant-ph].
- [36] G. Jaeger, M. A. Horne and A. Shimony, Phys. Rev. A48, 1023–1027 (1993).
- [37] J. E. Hogarth, “Considerations of the Absorber Theory of Radiation”, Proc. Roy. Soc. A267, 365-383 (1962).
- [38] F. Hoyle and J. V. Narlikar, “A new theory of gravitation”, Proc. Roy. Soc. Lon. A282, 191 (1964).
- [39] F. Hoyle and J. V. Narlikar, “On the gravitational influence of direct particle fields”, Proc. Roy. Soc. Lon. A282, 184 (1964). See also “A conformal theory of gravitation”, Proc. Roy. Soc. Lon. A294, 138 (1966).
- [40] F. Hoyle and J. V. Narlikar, *Action at a distance in Physics and Cosmology*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, (1974).
- [41] J. Schwinger, “Particles and Sources”, Phys. Rev. 152 (4) 1219–1226 (1966). See also Schwinger’s 3 books on Source theory. *Particles, Sources and Fields*, Vol I, II, III. Advanced books program, Perseus books, Reading MA (1998).
- [42] Silvan S. Schweber, “The sources of Schwinger’s Green’s functions”, PNAS 102 (22) 7783-7788 (2005)
- [43] P. W. Milonni, *The Quantum Vacuum An Introduction to Quantum Electrodynamics*, Academic Press, New York 1994. See p474.
- [44] J. Schwinger, L. L. DeRaad Jr., and K. A. Milton, “Casimir effect in dielectrics”, Ann. Phys. (New York) 115 1 (1978).