

## Самоинтерферирующие часы как источник информации типа “который путь”

Й. Маргалит и др. (Израиль)

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

---

arXiv:1505.05765v1 [quant-ph] 21 May 2015

### A self-interfering clock as a “which path” witness

Yair Margalit, Zhifan Zhou, Shimon Machluf\*, Daniel Rohrlich, Yonathan Japha, and Ron Folmany ([folman@bgu.ac.il](mailto:folman@bgu.ac.il))

Department of Physics, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva 84105, Israel  
(Dated: May 22, 2015)

\*Present address: Van der Waals-Zeeman Institute, University of Amsterdam, Science Park 904, 1090 GL  
Amsterdam, The Netherlands

---

Экспериментально демонстрируется новая парадигма интерферометрии: самоинтерферирующие часы.

Двухщелевая интерферометрия квантов, таких, как фотоны и электроны, заметно фигурировала в дебатах Эйнштейна – Бора относительно непротиворечивости квантовой теории [1, 2]. Фундаментальный принцип, возникающий из этих дебатов – вначале связанных с принципом неопределенности – это то, что информация типа “который путь” относительно квантов, проходящих через щели, блокирует их интерференцию. Кульминацией этих дебатов явилось утверждение Эйнштейна, что часы, испускающие фотон в точно заданный момент времени, будучи взвешены на пружине для измерения их массы и энергии, могли бы ускользнуть от действия принципа неопределенности. Еще Бор показал, что гравитационное красное смещение часов вводит достаточную неопределенность в момент эмиссии, чтобы удовлетворять принципу неопределенности.

Квантовая механика не может полностью описать самоинтерферирующие часы в гравитационном поле. Если пути часов через интерферометр имеют различные высоты, то общая теория относительности предсказывает, что часы должны “тикать” медленнее вдоль пути с меньшей высотой. Однако время в квантовой механике является глобальным параметром, которая не может отличаться для разных путей. В стандартной интерферометрии (см., например, [5]), разница в высоте двух путей влияет на их относительную фазу и сдвигает их интерференционную картину; но в интерферометрии часов дифференциал времени между путями дает информацию типа “который путь”, разрушая видимость интерференции [6]. Отсюда следует, что в то время, как стандартная интерферометрия может тестировать ОТО [7 – 9], интерферометрия часов исследует взаимодействие между ОТО и квантовой механикой. Например, потеря видности из-за лага собственного времени должна быть свидетельством вклада гравитационных эффектов в декогеренцию и возникновение классического мира – мира событий, таких, как результаты измерений – что предсказывали R. Penrose [10], L. Diosi [11] и другие.

В эксперименте авторов атомные часы – атомы в суперпозиции внутренних состояний – проходят через атомный корпускулярно-волновой интерферометр. Часы расщепляются на два пространственно разделенных волновых пакета, и наблюдается интерференционная картина со стабильной фазой, показывающая, что расщепление является когерентным, т.е. что часы одновременно находятся в двух местах одновременно. Затем часы – волновые пакеты запускаются с разным темпом времени. Запутывание между временем часов и их путем дает информацию типа “который путь”, которая влияет на видность самоинтерференции часов. Напротив, в стандартной интерферометрии время не может давать информацию типа “который путь”.

Демонстрируется, что видность интерференционной картины, образованной тысячами самоинтерферирующих часов (атомов в конденсате Бозе – Эйнштейна) зависит от (имитированного) дифференциала собственного времени между рекомбинирующими волновыми пакетами каждых часов. Дифференциал времени, или лаг имитируется за счет искусственного ускорения “тиков” одного пакета относительно другого. Хотя используемы часы не являются достаточно точными, чтобы чувствовать эффекты СТО или ОТО, они способны продемонстрировать, что в соответствии с предложениями Zych et al. [6] учет дифференциала времени влияет на видность картины самоинтерферирующих часов.

Этот первый, доказывающий принципиальные основы, эксперимент может иметь далеко идущие последствия для изучения времени и общей теории относительности, а также их связи с фундаментальными квантовыми явлениями, такими, как декогеренция и коллапс волнового пакета.

## Ссылки

- [1] N. Bohr, “Discussions with Einstein on epistemological problems in atomic physics”, in Albert Einstein: Philosopher-Scientist, ed. Paul A. Schilpp (New York: Tudor Pub. Co.), 1951, pp. 201-41.
- [2] Y. Aharonov and D. Rohrlich, Quantum Paradoxes: Quantum Theory for the Perplexed (Weinheim: Wiley-VCH), 2005, Sect. 2.4.
- [3] “General relativity turns 100”, Special issue, Science 347, March 2015.
- [4] “Foundations of quantum mechanics”, Special issue, Nat. Phys. 10, April 2014.
- [5] R. Colella, A. W. Overhauser and S. A. Werner, “Observation of gravitationally induced quantum interference”, Phys. Rev. Lett. 34, 1472 (1975).
- [6] M. Zych, F. Costa, I. Pikovski and C. Brukner, “Quantum interferometric visibility as a witness of general relativistic proper time”, Nat. Comm. 2, 505 (2011).
- [7] S. Dimopoulos, P. W. Graham, J. M. Hogan, and M. A. Kasevich, “Testing general relativity with atom interferometry”, Phys. Rev. Lett. 98, 111102 (2007).
- [8] H. Muntinga et al., “Interferometry with Bose-Einstein condensates in microgravity”, Phys. Rev. Lett. 110, 093602 (2013).
- [9] C. C. N. Kuhn, et al., “A Bose-condensed, simultaneous dual-species Mach-Zehnder atom interferometer”, New J. Phys. 16, 073035 (2014).
- [10] R. Penrose, The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics (New York: Oxford U. Press), 1989, Chap. 6.
- [11] L. Diosi, “Gravity-related wave function collapse: mass density resolution”, J. Phys.: Conf. Ser. 442, 012001 (2013).
- [12] Supplementary Material
- [13] S. Machluf, Y. Japha and R. Folman, “Coherent Stern-Gerlach momentum splitting on an atom chip”, Nat. Comm. 4, 2424 (2013).
- [14] Between these two well understood bounds the “which path” information or distinguishability [16] (D), and visibility (V), should obey the relation  $D^2 + V^2 \leq 1$ .

- [15] P. D. D. Schwindt, P. G. Kwiat and B.-G. Englert, "Quantitative wave-particle duality and nonerasing quantum erasure", *Phys. Rev. A* 60, 4285 (1999).
- [16] V. Jacques et al. "Delayed-choice test of quantum complementarity with interfering single photons", *Phys. Rev. Lett.* 100, 220402 (2008).
- [17] S.-Y. Lan et al., "A clock directly linking time to a particle's mass", *Science* 339, 554 (2013).
- [18] W. P. Schleich, D. N. Greenberger and E. M. Rasel, "Redshift controversy in atom interferometry: representation dependence of the origin of phase shift", *Phys. Rev. Lett.* 110, 010401 (2013).
- [19] S. Peil and C. R. Ekstrom, "Analysis of atom-interferometer clocks", *Phys. Rev. A* 89, 014101 (2014).
- [20] Lee Smolin, *Time Reborn* (Mariner Books), 2014.
- [21] W. K. Wootters and W. H. Zurek, "Complementarity in the double-slit experiment: quantum nonseparability and a quantitative statement of Bohr's principle", *Phys. Rev. D* 19, 473 (1979).
- [22] B.-G. Englert, "Fringe visibility and which-way information: an inequality", *Phys. Rev. Lett.* 77, 2154 (1996).
- [23] An example of an external variable as a measure of time appears in Y. Aharonov and D. Rohrlich, *op. cit.*, Sect. 8.5.
- [24] M. M. Dos Santos et al., "Towards quantum gravity measurement by cold atoms", *J. Plasma Phys.* 79, 437 (2013).
- [25] G. Amelino-Camelia et al., "Constraining the energy-momentum dispersion relation with Planck-scale sensitivity using cold atoms", *Phys. Rev. Lett.* 103, 171302 (2009).
- [26] D. E. Bruschi et al., "Testing the effects of gravity and motion on quantum entanglement in space-based experiments", *New J. Phys.* 16, 053041 (2014).
- [27] G. Rosi et al., "Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms", *Nature* 510, 518 (2014).