Письма в ЖЭТФ, том 105, вып. 7, с. 464 – 465 © 2017 г. 10 апреля

# Комментарий к статье "Парадокс разрывных траекторий фотонов в составном интерферометре Маха–Цендера при их "слабом измерении" (Письма в ЖЭТФ 105(3), 136 (2017))

*Л. Вайдман*[1)]

*Школа Физики и Астрономии Раймонд и Беверли Саклера, Тель-Авивский университет, 69978 Тель-Авив, Израиль*

Поступила в редакцию 15 февраля 2017 г.

DOI: 10.7868/S0370274X17070116

В недавнем письме [1] Г.Н. Николаев рассмотрел эксперимент, проведенный Danan и другими [2], который продемонстрировал "прошлое фотона", определенного как слабый след, оставленный фотоном, найденным в определенных состояниях до и после прохождения через интерферометер. Этот эксперимент уже широко обсуждался в литературе [3–23], но Николаев добавил новые соображения, которые показывают "предельно ясно", что эксперимент может быть полностью объяснен традиционной волновой теорией света или квантовой теорией, предполагающей непрерывные траектории фотонов. Он утверждает, что прерывистый след во внутреннем интерферометре появился из-за неподходящего способа его наблюдения, и что недостающие части этого следа могут быть выявлены с помощью модификации схемы исходной установки.

В этом комментарии я утверждаю, что модификация, предложенная Николаевым, неверна, и что первоначальный эксперимент правильно демонстрирует разрывный след фотонов в составном интерферометре Маха–Цендера.

Конечно, нет никаких разногласий о возможности объяснения результатов эксперимента [2], используя классические уравнения электромагнитных волн. Это было сделано в самой оригинальной работе, где также было дано объяснение в рамках стандартной квантовой теории. Однако объяснение требовало анализа запутанных состояний с измерительным устройством и не было основано на непрерывности траекторий фотонов. В стандартной квантовой теории не вводится понятие фотонной траектории. Вайдман [24] дал определение прошлого квантовой частицы как места, где она оставляет слабый след, и эксперимент [2] обнаружил этот след.

Прямое наблюдение слабого следа требует внешнего измерительного устройства и механизма, который принимает запись устройства во внимание только при условии успешного последующего измерения частицы [8]. Такой эксперимент, однако, очень сложен – смотрите недавние результаты работы Steinberg [25] – и обычно в экспериментах по слабым измерениям измерительный прибор является дополнительной степенью свободы самой частицы. Поэтому устраняется необходимость использования механизма, контролирующего совпадение результатов. В эксперименте [2] запись локального слабого следа, т.е. малого сдвига направления света из-за поворота внутренних зеркал, происходит внутри интерферометра, а чтение результатов осуществляется вне интерферометра, на четырехсегментном фотодетекторе. Это удалось осуществить благодаря тщательной разработке эксперимента, который гарантировал, что смещение направления света в области слабого измерения приводит к сдвигу выходного пучка света одинаковым образом для всех возможных путей к детектору. Без этого свойства сигнал на детекторе не дает достоверной индикации слабого следа внутри интерферометра.

В [1] Николаев утверждает, что эксперимент не показал сигнала, соответствующего наличию фотона в точке $E$, по причине неподходящей конструкции. Автор указывает, что модуляция поляризации света в точке $E$ приведет к наблюдаемому сигналу, если двулучепреломляющая пластина и поляризатор будут добавлены в одном из плеч внутреннего интерферометра. Однако такая модификация Николаева нарушает достоверность эксперимента, поскольку приводит к различным преобразованиям модуляции поляризации в точке $E$ в сигнал на детекторе в зависимости от пути луча в интерферометре.

Нужно отметить, что подобное поведение было ранее замечено в [26]. Введение оборачивающей призмы в одно из плеч внутреннего интерферометра приводит к чувствительности к углу зеркала в точке $E$. Луч, проходящий через оборачивающую призму,

1)e-mail: vaidman@post.tau.ac.il

реагирует обратным образом на изменение направления луча в точке $E$, нарушая необходимое свойство одинаковости реакций для всех возможных путей.

Прямое измерение слабого следа с использованием внешнего измерительного прибора покажет результаты, наблюдаемые в [2]. Фотон оставляет след не только на непрерывном пути $C$, но и отдельно, во внутреннем интерферометре, который включает в себя зеркала $A$ и $B$.

Действительно, эксперимент [2] может быть полностью объяснен с помощью интерференции классических электромагнитных волн. Его также можно объяснить с помощью запутанной волновой функции фотона и измерительного устройства (являющимся поперечным импульсом фотона в эксперименте [2]). Если кто-то задаст вопрос о том, где была квантовая частица, понимая под этим места, где она оставила локальные следы, то нет лучшего предложения для ответа, чем простой критерий перекрытия прямо и обратно эволюционирующих волн формализма вектора двух состояний [27].

Данная работа была частично поддержана Израильским Научным Фондом (грант # 1311/14) и Германо-Израильским Фондом Научных Исследований и Разработок грант (# I-1275-303.14).

---

1. Г. Н. Николаев, Письма в ЖЭТФ **105**, 136 (2017).
2. A. Danan, D. Farfurnik, S. Bar-Ad, and L. Vaidman, Phys. Rev. Lett. **111**, 240402 (2013).
3. Z. H. Li, M. Al-Amri, and M. S. Zubairy, Phys. Rev. A **88**, 046102 (2013).
4. L. Vaidman, Phys. Rev. A **88**, 046103 (2013).
5. L. Vaidman, Phys. Rev. A **89**, 024102 (2014).
6. P. L. Saldanha, Phys. Rev. A **89**, 033825 (2014).
7. L. Fu, F. A. Hashmi, Z. Jun-Xiang, and Z. Shi-Yao, Chin. Phys. Lett. **32**, 050303 (2015).
8. A. Ben-Israel, L. Knips, J. Dziewior, J. Meinecke, A. Danan, H. Weinfurter, and L. Vaidman, Chin. Phys. Lett. **34**, 020301 (2017).
9. V. Potoček, and G. Ferenczi, Phys. Rev. A **92**, 023829 (2015).
10. L. Vaidman, Phys. Rev. A **93**, 017801 (2016).
11. H. Salih, Frontiers in Physics **3**, 47 (2015).
12. L. Vaidman, A. Danan, D. Farfurnik, and S. Bar-Ad, Frontiers in Physics **3**, 48 (2015).
13. K. Bartkiewicz, A. Černoch, D. Javurek, K. Lemr, J. Soubusta, and J. Svozilík, Phys. Rev. A **91**, 012103 (2015).
14. L. Vaidman, Phys. Rev. A **93**, 036103 (2016).
15. K. Bartkiewicz, A. Černoch, D. Javurek, K. Lemr, J. Soubusta, and J. Svozilík, Phys. Rev. A **93**, 036104 (2016).
16. M. Bula, K. Bartkiewicz, A. Černoch, D. Javurek, K. Lemr, V. Michálek, and J. Soubusta, Phys. Rev. A **94**, 052106 (2016).
17. F. A. Hashmi, F. Li, S-Y. Zhu, and M. S. Zubairy, J. Phys. A **49**, 345302 (2016).
18. L. Vaidman, arXiv:1610.04781 (2016).
19. Z.-Q. Wu, H. Cao, J.-H. Huang, L.-Y. Hu, X.-X. Xu, H.-L. Zhang, and S.-Y. Zhu, Optics Express **23**, 10032 (2015)
20. R. B. Griffiths, Phys. Rev. A **94**, 032115 (2016).
21. L. Vaidman, Phys. Rev. A (to be published), arXiv: 1610.07734 (2017).
22. B. E. Y. Svensson, Found. Phys. **45**, 1645 (2015).
23. A. Ben Israel and L. Vaidman, Found. Phys. doi:10.1007/s10701-017-0017-x (2017).
24. L. Vaidman, Phys. Rev. A **87**, 052104 (2013).
25. M. Hallaji, A. Feizpour, G. Dmochowski, J. Sinclair, and A. M. Steinberg, Nat. Phys. doi:10.1038/nphys.4040 (2017).
26. M. A. Alonso and A. N. Jordan, Quantum Stud.: Math. Found. **2**, 255 (2015).
27. Y. Aharonov and L. Vaidman, Phys. Rev. A **41**, 11 (1990).