

Простая альтернативная модель двойственной природы света и соответствующий *мысленный* эксперимент

Ф. Эно (Франция)

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

[arXiv:1407.2522v1](https://arxiv.org/abs/1407.2522v1) [quant-ph]

Simple alternative model of the dual nature of light and its *Gedanken* experiment

François Hénault

UMR 6525 H. Fizeau, Université de Nice-Sophia Antipolis
Centre National de la Recherche Scientifique, Observatoire de la Côte d'Azur
Parc Valrose, 06108 Nice – France

В настоящей статье представлена простая альтернативная модель двойственной природы света, основанная на сознательной инверсии оригинального утверждения П.А.М. Дирака: “Каждый фотон интерферирует только с самим собой. Интерференции между различными фотонами не бывает.” Такая инверсия подразумевает, что фотоны и кванты света должны рассматриваться как объекты разных классов, но сохраняли совместимость с известными результатами недавних экспериментов. Описан мысленный (*Gedanken*) эксперимент, потенциально способный проверить предложенную модель в однофотонном режиме и обсуждены его возможные результаты. Предлагаемая установка могла бы также быть использована для уточнения интерпретации принципа дополнительности.

1 ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с двойственной природой света, составляли загадку для большинства физиков в течение более чем ста лет, когда М. Планк и А. Эйнштейн ввели концепцию “квантов света”, позже названных фотонами. С этого момента свет стал рассматриваться либо как волна (классическая теория), либо как поток частиц, обменивающихся своей энергией и импульсом с электронами и атомами (квантовая электродинамика). Более того, согласно принципу дополнительности Н. Бора [1], невозможны физические эксперименты, демонстрирующие одновременно волновое и корпускулярное поведение света. Целью настоящей статьи является двойная задача: во-первых, предлагается простая альтернативная модель природы света, основанная на предположении, что фотоны и кванты света – это разные классы объектов; во-вторых, описан мысленный эксперимент, потенциально способный обеспечить проверку этой модели и уточнить современную интерпретацию принципа дополнительности.

2 МОДЕЛЬ

В наши дни в общем случае принято считать, что только квантовая электродинамика может обеспечить удовлетворительное объяснение природы света [2] в качестве волновой или корпускулярной. Однако некоторые ученые

сохраняют приверженность полуклассической модели, ассоциируемой с непрерывным электрическим полем и квантованными процессами поглощения и излучения [3]. В этом отношении предлагаемая здесь модель может рассматриваться как компромисс между обеими теориями, сохраняя представления о квантовой природе света и классической волне. Эта модель основана на следующих гипотезах:

- 1) Один квант света переносит наименьшую порцию световой энергии и не может интерферировать сам с собой.
- 2) Световые кванты могут быть разделены только пространственно, т.е. с помощью некоторого числа отверстий. Встречая диэлектрическую преграду, они либо отражаются от нее, либо проходят сквозь нее, но не то и другое сразу.
- 3) Световые кванты имеют волновую природу в том смысле, что они обладают фазой вдоль своей геометрической траектории и относительно прошлых событий (т.е. разделения в отверстиях и при прохождении/отражении на диэлектрических преградах).
- 4) Все световые кванты, испущенные при одном и том же электронном переходе в атоме (или в разных атомах) могут совместно интерферировать. Этот процесс интерференции регулируется установленными правилами пространственной и темпоральной (временной) когеренции (классической или квантовой).
- 5) При детектировании с помощью измерительного прибора комплексные амплитуды всех входящих квантов когерентно суммируются, и результирующая энергия (представленная в терминах числа фотонов) равна квадрату модуля полной комплексной амплитуды. Следовательно, число квантов света не обязательно должно равняться общему числу фотонов; фотоны и кванты света – это разные классы объектов.

Вторая и третья гипотезы необходимы для учета результатов экспериментов Гранжье, Роже и Аспека в однофотонном режиме [4]: используя двухфотонный радиоактивный каскад, они не наблюдали совпадения счетчиков с обеих сторон светоделителя (следовательно, фотон является частицей), но, когда на тех же светоделителях был построен интерферометр Маха-Цандера, оба выходных порта интерферометра показали типичную противоположность фазы, предсказываемую классической теорией интерференции. Однако наиболее неожиданные и необычные допущения – это, вероятно, первое и четвертое, буквально противоположные по отношению известному утверждению П.А.М. Дирака относительно возможности для фотона интерферировать только с самим собой, как написано в учебнике [5]:

“Suppose we have a beam of light consisting of a large number of photons split up into two components of equal intensity. On the assumption that the intensity of a beam is connected with the probable number of photons in it, we should have half the total number of photons going into each component. If the two components are now made to interfere, we should require a photon in one component to be able to interfere with one in the other. Sometimes these two photons would have to annihilate one another and other times they would have to produce four photons. This would contradict the conservation of energy. The new theory, which connects the wave function with probabilities for one photon, gets over the difficulty by making each photon go partly into each of the two components. Each photon then interferes only with itself. Interference between two different photons never occurs.”

“Предположим, что у нас есть световой пучок, содержащий большое число фотонов, расщепленный на две компоненты равной интенсивности. Предполагая, что интенсивность пучка связана с вероятным числом фотонов в нем, мы должны получить половину фотонов в каждой компоненте. Если эти двум компонентам дать теперь интерферировать, то мы должны потребовать от фотона из одной компоненты способности интерферировать с фотоном из другой. Иногда эти два фотона взаимно уничтожат друг друга, а иногда будут порождать четыре фотона. Это противоречило бы закону сохранения энергии. Новая теория, связывающая волновую функцию с вероятностью для одного фотона, позволяет преодолеть эти трудности за счет разрешения фотону частично входить в обе эти компоненты. Тогда каждый фотон интерферирует только сам с собой. Не бывает интерференции между двумя различными фотонами.”

Заключительная гипотеза, очевидным образом выведенная из закона сохранения энергии, накладывает ограничения на ситуацию, в которой фотоны и кванты света рассматриваются как эквивалентные частицы. Но можно также себе представить, что различные кванты света могут интерферировать совместно без противоречия с законом сохранения энергии, который справедлив только для фотонов. Иными словами, это заключительное утверждение должно быть инвертировано следующим образом: “каждый световой квант интерферирует только с другим световым квантом. Не бывает интерференции одиночного светового кванта с самим собой.” Далее, уже было указано, что наша современная интерпретация сентенции Дирака не должна пониматься слишком ограничительно [6], поскольку интерференция между разделенными лазерными или атомными источниками света теперь принимается в качестве возможной и неоднократно осуществлялась (см., например, [7 – 9]). Кроме того, инвертированное знаменитое утверждение Дирака остается совместимым с недавними версиями исторического эксперимента Юнга с двумя щелями, где было отмечено:

- Интерференционная картина остается без изменения, когда щели поочередно маскируются в противофазе [10].
- Она также не изменяется, когда оптические лучи, испущенные источником отдельно в каждое отверстие, тщательно отделяются (baffled) один от другого [11]
- Наконец, она может сохраниться при преобразовании с понижением частоты от инфракрасной к видимой области спектрального диапазона, осуществляемом с помощью двух или более нелинейных оптических частотных преобразователей [12].

Но, возможно, наиболее многозначительное указание содержится в астрономических изображениях, систематически получаемых уже в течение 20 лет космическим телескопом Хаббл. Два примера таких изображений приведены на рис. 1, где показаны эффекты дифракции, возникающие в плечах телескопа от яркого света ближних звезд, тогда как тусклый фон далеких звезд или галактик не влияет на интерференционные явления при одном и том же времени экспозиции (следует отметить, что лабораторные эксперименты с лазерами приводят к тем же эффектам, см. главу 7 в [3]). Это заставляет думать, что множество световых квантов может интерферировать между собой, и что этот феномен должен исчезать по мере того, как их имеется все меньше и меньше: здесь снова гипотеза Дирака переходит в противоположную.

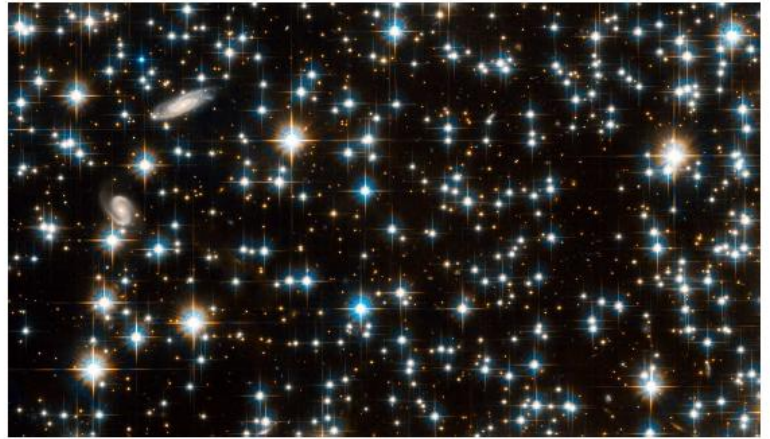


Рисунок 1: Изображения шаровых звездных скоплений M4 (слева) и NGC 6791 (справа), полученные с помощью космического телескопа Хаббл (Hubble Space Telescope). Credits NASA/H. Richer (University of British Columbia) and NASA/ESA/Digitized Sky Survey/L. Bedin (STScI).

3 МЫСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

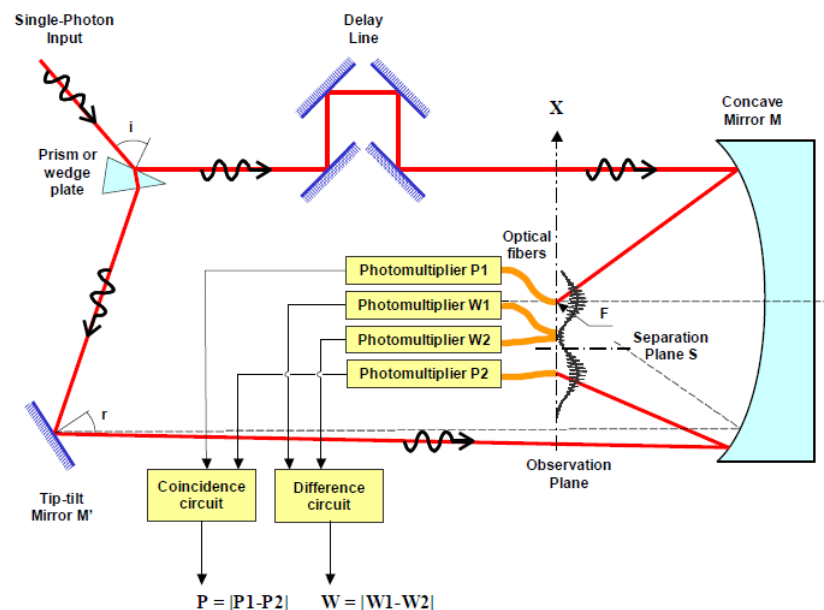


Рисунок 2: Принципиальная схема предлагаемого *мысленного* эксперимента

Хотя модель, основанная на допущениях 1 – 5 раздела 2, может показаться упрощенной и наивной, возможно описать мысленный эксперимент, чтобы подтвердить или опровергнуть ее. Принципиальная схема такого эксперимента приведена на рис. 2. Схема содержит источник одиночных фотонов (Single-Photon Input), призму (Prism), разделяющую пучок на две части, а также две пары фотоумножителей (P1, P2 и W1, W2). Первая пара измеряет интенсивности в точках максимума двух разделенных пучков, а вторая – в общей точке минимума. Выходы P1 и P2 соединены по схеме совпадения и измеряют корреляцию, выходы W1 и W2 – по схеме разности и измеряют антикорреляцию результатов (буква P обозначает частицы/particles, а буква W – волну/wave). P1 и P2 несут

“корпускулярную” информацию о выборе пути частицы $|P1 - P2|$, тогда как W1 и W2 измеряют видность (visibility) интерференции $W=|W1 - W2|$.

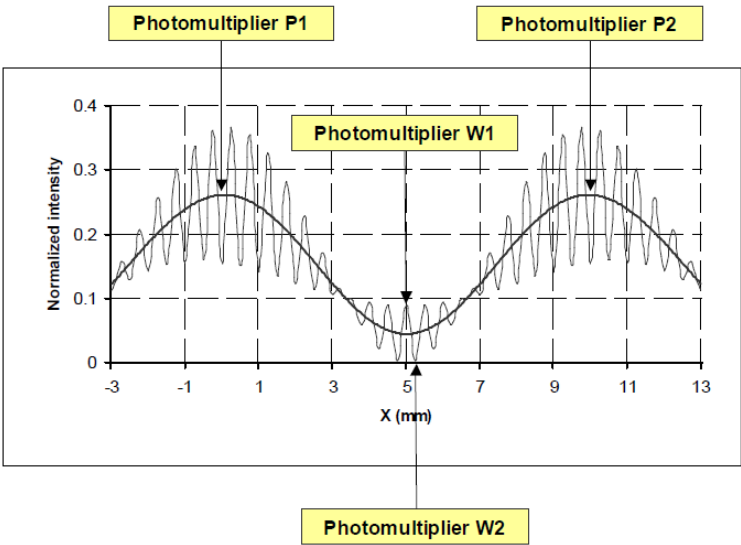


Рисунок 3: Расположение датчиков четырех оптических волокон в плоскости наблюдения распределения интенсивности, выявляющее наличие интерференционной картины (тонкая линия) или ее отсутствия (жирная линия). Кривые интенсивности нормированы так, чтобы их максимумы равнялись 1 при идеальном наложении пучков.

Все возможные результаты этого эксперимента сведены в табл. 1:

Базовый принцип	Ожидаемый результат для P	Ожидаемый результат для W	Научная школа
Фотоны – это частицы в чистом виде	P всегда равно 1	W всегда равно 0	Представления Ньютона
Фотоны представляют собой только кванты света, интерферирующие совместно	P всегда равно 1	W всегда равно 0	
Фотоны – это волна в чистом виде, которая может быть разделена и не может быть локализована	P всегда равно 0	W всегда равно 1	Уравнения Максвелла
Фотон может быть частицей или волной, но не в одно и то же время	$P^2 + W^2 < 1$		Принцип дополнительности Бора
Фотон – это одновременно и частица, и волна	P всегда равно 1	W всегда равно 1	“Волна-пилот” де Бройля и Боба

Таблица 1: Возможные результаты *мысленного* опыта в однофотонном режиме

Ссылки

- [1] N. Bohr, "The quantum postulate and the recent development of atomic theory," *Nature* 121, p. 580-590 (1928).
- [2] A. Zeilinger, G. Weihs, T. Jennewein, M. Aspelmeyer, "Happy centenary, photon," *Nature* 433, p. 230-238 (2005).
- [3] See for example chapters 7, 8, 12 and 24-26 in *The nature of light: What is a photon?*, C. Roychoudhuri, A. F. Kracklauer and K. Creath Eds. (CRC Press, 2008).
- [4] P. Grangier, G. Roger, A. Aspect, "Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences," *Europhysics Letters* 1, p. 173-179 (1986).
- [5] P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4th edition, p. 9-10 (Oxford Univ. Press, 1958).
- [6] R. J. Glauber, "Dirac's famous dictum on interference: One photon or two ?" *American Journal of Physics* 63, p. 12 (1995).
- [7] R. L. Pfleegor, L. Mandel, "Interference of independent photon beams," *Physical Review* 159, p. 1084-1088 (1967).
- [8] F. Louradour, F. Reynaud, B. Colombeau, C. Froehly, "Interference fringes between two separate lasers," *American Journal of Physics* 61, p. 242-245 (1993).
- [9] U. Eichmann, J. C. Bergquist, J. J. Bollinger, J. M. Gilligan, W. M. Itano, D. J. Wineland, M. G. Raizen, "Young's interference experiment with light scattered from two atoms," *Physical Review Letters* 70, p. 2359-2362 (1993).
- [10] C. Wykes, "Interference of light beams modulated in anti-phase," *Optical and Quantum Electronics* 5, p. 163-174 (1973).
- [11] D. L. Alkon, "Either-or two-slit interference: Stable coherent propagation of individual photons through separate slits," *Biophysical Journal* 80, p. 2056-2061 (2001).
- [12] D. Ceus, A. Tonello, L. Grossard, L. Delage, F. Reynaud, H. Herrmann, W. Sohler, "Phase closure retrieval in an infrared-to-visible upconversion interferometer for high resolution astronomical imaging," *Optics Express* 19, p. 8616-8624 (2011).
- [13] S. S. Afshar, E. Flores, K. F. McDonald, E. Knoesel, "Paradox in wave-particle duality," *Foundations of Physics* 37, p. 295-305 (2007).
- [14] D. Greenberger, A. Yasin, "Simultaneous wave and particle knowledge in a neutron interferometer," *Physics Letters A* 128, p. 391-394 (1988).
- [15] B. G. Englert, "Fringe visibility and which-way information: an inequality", *Phys. Rev. Lett.* 77, p. 2154-2157 (1996).
- [16] Y. Kim, R. Yu, S. P. Kulik, Y. Shih, M. O. Scully, "Delayed choice quantum eraser," *Physical Review Letters* 84, p. 1-5 (2000).