

对双缝干涉实验和延迟选择实验中单光子的探讨

陈军利

西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年8月7日; 录用日期: 2022年8月30日; 发布日期: 2022年9月8日

摘要

在著名的双缝干涉实验中, 存在着单光子同时通过两个狭缝的困扰, 在分光延迟实验中, 存在单光子路径和因果关系的困扰, 本文通过对不同情况下单光子含义的分析, 认为造成这些问题的实质是对单光子的理解问题, 传统意义上的单光子(能量 hf)是能量为 h 的 f 个波包, 我们将一个波包作为光的一个基本单元, 则我们传统意义上发射一个光子, 其实是发射了 f 个波包, 我们把一个波包理解成一个光子, 这些困扰就都不存在了。我们将传统意义上的单光子比作一滴水, 一个波包就相当于水分子, 水在空气中会气化成水分子, 传统意义上的一个光子在空间也会分散成微小的波包, 水分子在空间的运行路径我们看不到, 同样的, 光的波包我们也不能确定它的运行路径。本文还对传统意义上的单光子实验做了预测, 当发射一个传统意义上的单光子时, 如果降低单光子的检测能量, 就在分光实验的两路上都能检测到光子, 这样就能够证实传统意义上的单光子是否可分, 是否是真正的单光子。

关键词

光子, 双缝干涉实验, 延迟选择实验

Discussion on the Implications of Single Photon in Double Slit Interference and Delay Selection Experiments

Junli Chen

School of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 7th, 2022; accepted: Aug. 30th, 2022; published: Sep. 8th, 2022

Abstract

In the famous double-slit interference experiment, there is a problem that a single photon passes through two slits at the same time. In the splitting delay experiment, there is a problem of single-photon path and causality. In this paper, through the analysis of the meaning of single photon in different situations, it is believed that the essence of these problems is the understanding of single photons. A single photon (energy hf) in the traditional sense is f wave packets with energy h . We take a wave packet as a basic unit of light, then we traditionally mean when a photon is emitted, it actually emits f wave packets. We understand a wave packet as a photon, and these troubles do not exist. We compare a single photon in the traditional sense to a drop of water, a wave packet is equivalent to a water molecule, water will be vaporized into water molecules in the air, and a photon in the traditional sense will also be scattered into tiny wave packets in space. We cannot see the running path of molecules in space, and similarly, we cannot determine the running path of the wave packet of light. This paper also predicts the single photon experiment in the traditional sense. When a single photon in the traditional sense is emitted, if the detection energy of the single photon is reduced, the photons can be detected on both paths of the spectroscopic experiment, which can confirm the whether the single photon in the traditional sense is separable and whether it is a real single photon.

Keywords

Photon, Double Slit Interference Experiment, Delayed Choice Experiment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 近代光是波还是粒子之争

牛顿根据光的直线传播规律、光的色散现象，于 1675 年提出光是由光源向四面八方发射的微粒子组成。这种说法解释了许多几何光学现象。惠更斯在 1678 年提出了光的波动学说，1800 年托马斯·杨发现了光的干涉现象以及光的偏振现象，还提出光的颜色是由光波波长不同所致，他在 1807 年提出的双缝干涉实验，表明光具有干涉和衍射性质，光是一种波。欧拉、菲涅耳支持波动理论，泊松完善了菲涅耳的数学证明。1845 年，法拉第首次发现了光和电、磁的关系。1865 年，麦克斯韦确定光是一种电磁波，它的波速等于光速。二十多年后，赫兹用实验证实了电磁波的存在。光的电磁理论能够说明光的传播、干涉、衍射、色散、散射、偏振等许多现象。1905 爱因斯坦结合相对论与普朗克的能量量子化学说提出了“光子”的概念，以此解释了光电效应，爱因斯坦认为光既是粒子又是波，两者并不矛盾。德布罗意于 1924 年提出了“构成世间万物的各种粒子都具有波粒二象性”的观点，在 1927 年的电子晶格衍射实验中得到了证实。至此，光的波粒二象性都作为实在性的表现形式而被人们广泛接受。

对于光的性质和双缝干涉实验，分光实验和惠勒延迟选择实验，许多前辈和学者给出了不同的解释 [1]-[8]，这里不做论述。本文的观点在具体描述每一种实验的同时给出。

光波，通常是指电磁波谱中的可见光。它的频率范围在 $3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$ Hz 之间，真空中的波长约为 400~760 nm。光在真空中的传播速度为 $c = 3 \times 10^8$ m/s，是自然界中物质运动的最快速度。光

波是横波，其中电场强度 E 和磁感应强度 B (或磁场强度 H) 彼此相互垂直，并且都与传播方向垂直。

2. 双缝干涉实验

物理学中，干涉是两列或两列以上的波在空间中相遇时发生叠加或抵消从而形成新波形的现象。两列波在同一介质中传播发生重叠时，重叠范围内介质的质点同时受到两个波的作用。若波的振幅不大，此时重叠范围内介质质点的振动位移等于各个波动所造成位移的矢量和，这为波的叠加原理。若两波的波峰(或波谷)同时抵达同一地点，两波在该点同相，干涉波会产生最大的振幅；若两波之一的波峰与另一波的波谷同时抵达同一地点，干涉波会产生最小的振幅。两束光发生干涉后，干涉条纹的光强分布与两束光的光程差/相位差有关：当相位差为周期的整数倍时光强最大；当相位差为半周期的奇数倍时光强最小。

双缝干涉实验[9] [10] [11]是著名光学实验。在 1807 年，托马斯·杨第一次描述了双缝干涉实验：把一支蜡烛放在一张开了一个小孔的纸前面，这样就形成了一个点光源。现在在纸后面再放一张纸，不同的是第二张纸上开了两道平行的狭缝。从小孔中射出的光穿过两道狭缝投到屏幕上，就会形成一系列明、暗交替的条纹，这就是现在众人皆知的双缝干涉条纹。

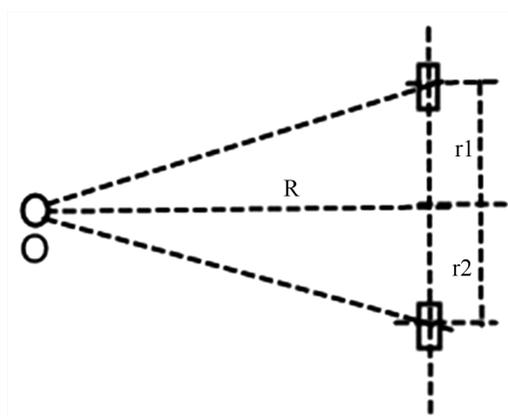


Figure 1. Double slit interference experiment

图 1. 双缝干涉实验

分析：图 1 中，一般波的波动函数 $y = A \sin(\omega x + \phi)$ ，公式中 $\omega x + \phi$ 为相位，反映振幅 y 所处的状态。 ω 为角速度，控制波的周期。 ϕ 为 $x = 0$ 时的相位称为初相；反映在坐标系上则为图像的左右移动。对于同一个光源，这里最大振幅 A 和频率 ω 都是一样的，唯一不同的是，由于光波是横波，随着两波之间的距离不同，波的相位会发生变化，波的幅度也会发生变化，这里相位的变化与两缝隙之间的距离 $\Delta r = r_1 + r_2$ 有关。间距 Δr 的两个波，相位上相差 $\Delta \Phi$ 。平行的单色光投射到一个有两条狭缝的挡板上，狭缝相距很近，平行光的光波会同时传到狭缝，但是它们的相位相差 $\Delta \Phi$ ，它们就成了两个振动情况总是相同的相干波源，因此平行光在挡板后面的空间相互叠加，就发生了干涉现象。当单色光经过双缝后，在屏上产生了明暗相间的干涉条纹。

3. 单光子双缝干涉实验

如果采用单光子做实验，在发射若干次后，投射面依然会形成明暗交替的干涉条纹。经典的解释是量子光学中态叠加和波函数坍缩形成的，比较难于理解，这里涉及光子的含义问题。

分析：1901 年，德国物理学家普朗克找到了与实验相符的在热平衡下的绝对黑体辐射谱的能量分布

律。这规律的基础是假定物质发出光和吸收光具有不连续的特性，并且假定光为一个一个有限部分—光子[12][13][14][15][16]发出或吸收能量。1905年爱因斯坦提出光子[17]（光量子）是电磁辐射的载体，光子无法静止，没有静止质量，光在真空中的传播速度是光速，并具有能量、动量、相对论质量。与其他量子一样，光子具有波粒二象性：光子能够表现出经典波的折射、干涉、衍射等性质；光子只能传递量子化的能量，其能量 ε 是和光的频率 f 成正比的，并且可用下列等式表示 $\varepsilon = hf$ ，这里 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，是普朗克常数，这里 f 是频率，由此公式我们可以理解为，传统的光子是传输了 f 个完整波包的一段波，如图 2 所示。光是电磁波谱中人眼可以感知的部分，一般人的眼睛可以感知的电磁波的频率在 $380 \sim 750 \text{ THz}$ ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)，即 $(3.8 \sim 7.5) \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，波长在 $780 \sim 400 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)，即 $(4 \sim 7.8) \times 10^{-7} \text{ m}$ 之间，传统意义上的光子能量为 hf ， hf 段波的总长度为： $(1.52 \sim 5.85) \times 10^8 \text{ m}$ ，在某种程度上，我们可以把波的长度看成光子的直径，这个直径也太大了。

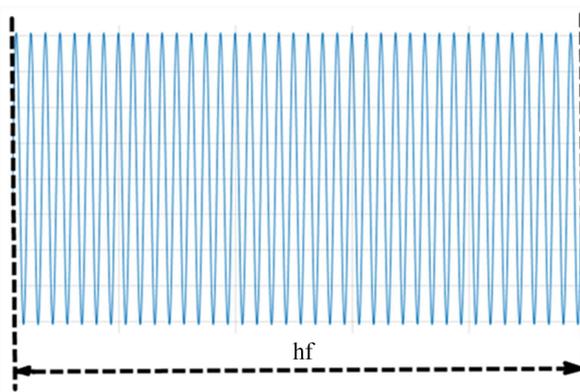


Figure 2. Photons in the traditional sense

图 2. 传统意义上的光子

现在我们再来看看基本粒子中的光子：基本粒子是组成各种各样物体的基础，基本粒子要比原子、分子小得多，现有最高倍的电子显微镜也不能观察到。质子、中子的大小，只有原子的十万分之一。而轻子和夸克的尺寸更小，还不到质子、中子的万分之一。光子(photon)是传递电磁相互作用玻色子，其大小约为： 10^{-16} m ，根据光是波的特性，我们可以将基本粒子中的光子理解为沿波峰前进的微粒子，如图 3 所示。为了不致混淆，我们将基本粒子中的光子叫作“微光子”。它是传递电磁相互作用的基本粒子，是一种规范玻色子，而在量子场论中光子被认为是电磁相互作用的媒介子。

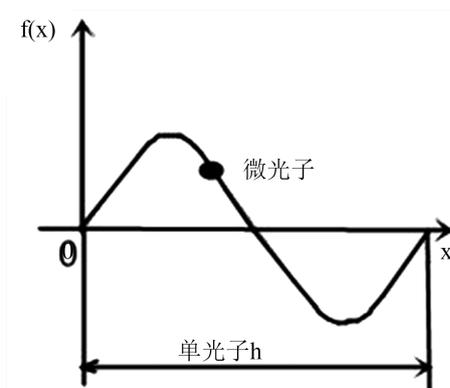


Figure 3. Micro photons and single photons

图 3. 微光子和单光子

图 3 中，对于能量的传递来说，波的一个完整的周期应该是最小单位，设定一个完整周期的波为一个光子，光子传递的能量为 h ，对于不同频率的波，单位时间 1 s 内传递了 f 个完整波包，也就发出了 f 个光子。单位时间 1 s 传递的能量为 hf ，这里 f 代表频率。传统意义上的光子相当于这里的一组 h 个光子，在某种意义上，光子直径也就是波长，可见光的波长为： $(4\sim 7.8) \times 10^{-7}\text{ m}$ 也就是说一个光子的直径为： $(4\sim 7.8) \times 10^{-7}\text{ m}$ 。这里弱弱的问一下，传统意义上的光子能量为啥非要是单位时间 1 s 的能量， 0.01 s 行不行，一个周期行不行？事实上，单位时间 1 s 并没有特定的意义。一般情况下，光对其它物质的作用取决于光的波长。光的粒子性表现在：处在光波中的物质，固有频率和光波波长相近时的共振。

通过上面分析可以看出：双缝干涉实验中，发射一个光子，实际上是单位时间内，发射了 f 个完整的波包，如果一个波包作为一个光子，实际上已经发射了 f 个光子。 f 个一组的光子，我们根本不能确定每一个光子从哪个缝通过，光子通过双缝后，形成干涉也就是正常现象，当发射多组光子后，靶面上形成干涉条纹就是很正常的现象。

4. 分光实验

分光实验：爱因斯坦改装迈克尔孙莫雷光行差实验装置，把双缝实验改成了分光实验，该实验和双缝实验物理意义一致(双缝实验探究粒子从哪条缝穿过，分光实验探究光子在哪条路径上传播)。图 4 中，光子从光源 s 发出，遇到一个镀银的半透镜 A ，按经典理论，则光波分成两半，各占 50% 。如果按量子力学分析，则光子反射和透射的几率各占一半。分成两半的光波或几率各半的光子经 $M1$ 、 $M2$ 两个反射镜反射，在 b 处汇聚。此时没有图中的半透镜 B ，在 b 处放置两个方向的光子探测器 $R1$ 、 $R2$ 。对于单光子来说，则如 $R1$ 响，表明单光子来自路径 1，如 $R2$ 响，表明单光子来自路径 2。探测器每响一次，完成一次测量。按照经典理论，光子或反射，经路径 1 到达 b 处；或透射，经路径 2 到达 b 处。在某一个确定的时刻，光子必然处于某一条轨道的某一个位置上。但是我们不知道它究竟在哪个轨道上。可以通过测量进行反推。

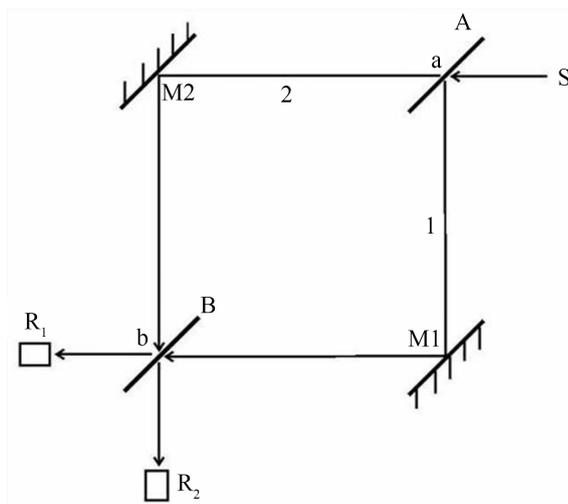


Figure 4. Spectral and delayed selection experiments

图 4. 分光和延迟选择实验

分析：通过第 2 节的分析，我们知道，传统意义上发射一个光子，其实是发射了 f 个能量为 h 的一组单光子。就目前技术，还不可能发射一个能量为 h 的单光子，目前常用的单光子光电探测器有：1) 光电倍增管(PMT)单光子探测器；2) 雪崩光电二极管(APD)单光子探测器；3) 真空雪崩光电二极管(VAPD)

单光子探测器，不管使用哪种探测设备，我们还无法检测一个能量为 h 的单光子。未加半透镜 B 时，发射单光子，此时发射的是一组光子，一组光子通过半透镜 A 后分成 2 个路径，理论上两路光子数应该相等，但是对于大量的微观粒子，做到数量完全相等是不可能的，总会出现一路多一点，一路少一点，这样到达检测点的光子数量也是不完全相等的，如果总的发射能量为 E_0 ，那么一路传递的能量会大于 $1/2E_0$ ，另一路则小于 $1/2E_0$ ，这时候，如果检测器设置的检测能量大于 $1/2E_0$ 小于 E_0 ，则只能一个检测器检测到信号。

预测：如果把探测器调节为能够检测 $1/4E_0$ ，则发射传统意义上的一个光子，2 个探测器会出现同时检测到光子的情况，对此希望爱好物理实验的朋友们验证。

5. 分光干涉实验

如上 [图 4](#)，在两探测器之前放置另一个半透镜 B ，来自路径 1 或路径 2 的光子在 b 处干涉。调整光程差，可以使达到探测器 R_1 的干涉光因反相而相消，同样方法可使达到探测器 R_2 的干涉光同相而相加，实验显示，如果不放第二块半透镜 B ，测量结果表明，光子只是走过其中一条路线 1 或 2 到达 b 处。如果放置第二块半透镜 B ，测量结果表明，光子同时走过两条路线 1 与 2 到达 b 处，并发生干涉。于是，传统观念认为放还是不放第二块半透镜 B ，会影响光子路线的选择。即我们的测量方式对被测量的事件产生了不可挽回的影响。

分析：上面 3、4 节的分析说明，传统意义上发射一个光子，其实是发射了 f 个能量为 h 的一组单光子，这时候光子肯定是通过两路到达 b ，只是不加 B 时，光子不会形成干涉，加了 B 之后，两路才会形成干涉而已。

爱因斯坦认为，一个光子不可能同时走两条路线。通过本文分析，爱因斯坦是完全正确的。惠勒应用玻尔的话“任何一种基本量子现象只在其被记录之后才是一种现象”，我们是在光子上路之前还是途中来做出决定，这在量子实验中是没有区别的。更精确地说，光子在通过第一块透镜到我们插入第二块透镜这之间“到底”在哪里，是一个无意义的问题！这话可以这样理解：传统意义上发射一个光子，其实是发射了 f 个能量为 h 的一组单光子，能量为 h 的光子实在太小，我们根本不能确定具体一个光子通过了那一条路径，当没有插入半透镜 B 时，由于我们的检测问题，只有一个检测器检测到光子，当插入第二块 B 半透镜后，我们让它干涉的时候就会形成干涉条纹。

6. 惠勒延迟选择实验

“延迟实验”[18][19]是由爱因斯坦的同事约翰·惠勒提出的，1979 年为纪念爱因斯坦诞辰 100 周年而在普林斯顿召开了一场讨论会，会上约翰·惠勒提出了“延迟实验”的构想，指出我们可以“延迟”电子的决定，使得它在已经实际通过了半透镜 A 之后，再来选择究竟是通过了一条路径还是两条路径。如果我们根据电子的速度，当确定光子已经通过半透镜 A 之后，再确定是不是要在终点处插入半透镜 B ，结果当判断光子已经通过半透镜 A 后，再插入半透镜 B ，形成的干涉现象。有的实验还在光子通过 A 后，再在路径 1 上半透镜 B 之前加一个挡板，这时不形成光的干涉现象，表现为光的粒子性。

分析：上面 3~5 节的分析说明，传统意义上发射一个光子，其实是发射了 f 个能量为 h 的一组单光子，这时光子肯定是沿两条路径到达半透镜 B ，即就是通过时间判断，光子经过 A 透镜后，再决定加不加 B ，和上面的分析是一样的。这时不加半透镜 B ，则光子不形成干涉现象，如果加半透镜 B ，就形成干涉现象。有的实验在 B 之前加一个挡板，这时只有一路光子到达 B ，当然不会形成干涉现象。我们加不加半透镜 B 对过去光子的路径没有任何影响。也不存在“我们的测量方式对被测量的事件产生了不可挽回的影响”等问题。

7. 结论

通过以上分析, 我们可以看到, 造成双缝干涉实验和分光延迟实验中, 单光子路径的问题, 因果关系问题, 实质是对单光子的理解问题, 如果我们把传统意义上的单光子(能量 hf)理解成一组光子, 将单光子定义为一个周期 T 的光波, 则我们传统意义上发射一个光子, 其实是发射了一组 f 个能量为 h 的单光子(f 个波包)。我们把传统意义上的单光子比作一滴水, 一个波包就相当于水分子, 一滴水在空气中会气化成水分子, 传统意义上的一个单光子在空间也会分散成微小的波包, 水分子在空间的运行路径我们看不到, 同样的, 光的波包我们也不能确定它的运行路径。这样理解就不存在单光子路径问题了, 也不存在延迟选择的因果关系问题了, 双缝干涉实验和分光延迟实验中, 反映的玄学和神秘诡异现象就根本不存在了。

参考文献

- [1] 闵春宗. 双缝干涉的研究[J]. 北华大学学报: 社会科学版, 1995(5): 31-33.
- [2] 曾柱石. 双粒子双缝干涉实验与态叠加原理[J]. 大学物理, 1996, 15(10): 41-43.
- [3] 于莹, 李哲. 关于电子双缝实验的探讨[J]. 沈阳工业大学学报, 2000, 22(1): 76-78.
- [4] 田松. 延迟选择实验及其引发的实在问题[J]. 自然辩证法研究, 2004, 20(5): 41-44.
- [5] 洪贤良. 对电子双缝实验的一种解释[J]. 技术物理教学, 2004, 12(3): 25-26.
- [6] 赵国求. 量子力学曲率解释与双缝实验[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2005, 17(4): 60-64.
- [7] 刘世明. 杨氏双缝干涉实验的波函数解释[J]. 河南科学, 2008, 26(6): 652-653.
- [8] 王峰. “延迟选择”没有延迟[J]. 物理通报, 2016, 35(7): 126-129.
- [9] 陈美纯, 张军朋. 托马斯·杨与杨氏双缝干涉实验[J]. 物理教师: 高中版, 2010(6): 29-31.
- [10] 余招贤. 杨氏双缝干涉实验的历史演变[J]. 求知导刊, 2018(34): 158-160.
- [11] 苗俊辉, 耿菊平. 杨氏双缝干涉实验中光的相干叠加与非相干叠加问题[J]. 河北师范大学学报, 1996(1): 47-48.
- [12] 于荣金. 光子学及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 1995(4): 16-22.
- [13] 张鹏飞, 周金运. 单光子探测器及其发展[J]. 传感器世界, 2003, 9(10): 6-10.
- [14] 张雪皎, 万钧力. 单光子探测器件的发展与应用[J]. 激光杂志, 2007, 28(5): 13-15.
- [15] 黄志洵. 论单光子研究[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2009, 16(2): 1-11.
- [16] 吴青林, 刘云, 陈巍, 等. 单光子探测技术[J]. 物理学进展, 2010, 30(3): 296-306.
- [17] Einstein, A. (1905) Über einem die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, **17**, 132-148. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>
- [18] Scully, M. and Drul, K. (1982) Quantum Eraser: A Proposed Photon Correlation Experiment Concerning Observation and “Delayed Choice” in Quantum Mechanics. *Physical Review A*, **25**, 2208-2213. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.25.2208>
- [19] 王莉, 崔占涛, 朱浩. 《大学物理》下册[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 220-224.