

光的不对称路径干涉实验

----光的本性的判决性实验

梅晓春

(福州原创物理研究所)

内容摘要 本文提出一个光的不对称路径干涉实验，该实验设计的关键在于在同一实验条件下如果将光视为波和粒子会得出不同的结果，从而可以在实验上排除波粒二象性，显示微观粒子的波和粒子概念哪一个更本质的。

关键词 光的干涉，波粒二象性，量子力学解释

微观物体的波粒二象性是现代物理学中最令人感到困惑的现象，至今未能得到合乎逻辑的解释。目前大多数人似乎已经习惯于它，承认微观物体具有二象性，即是波又是粒子。然而波弥散于整个空间，粒子只占有很小的体积，波与粒子这两种图象在逻辑上是无法相容的。为了解释波粒二象性，波尔提出互补原理，认为对于微观粒子而言，波和粒子的图象是互补的。实验也充分表明在某些条件下微观物体显示出波动性，在另外一些实验条件下显示出粒子性，是波还是粒子取决于不同实验条件的选择。由于这两类实验条件不能同时存在，似乎在表面上回避了波粒二象性的矛盾。然而问题并没有这样简单，波粒二象性涉及到量子力学解释的本质问题，只要认为对微观粒子而言波和粒子的概念在逻辑上是对等的，现有量子力学解释中存在问题可能将永远无法消除。

本文提出一个光的不对称路径干涉实验，该实验设计的关键在于在同一实验条件下如果将光视为波和粒子会得出不同的结果，从而可以在实验上排除波粒二象性，显示微观粒子的波和粒子概念哪一个更本质的。这个实验还可以用来证明一个光子同时从双缝穿过进行自我干涉是不可能的。

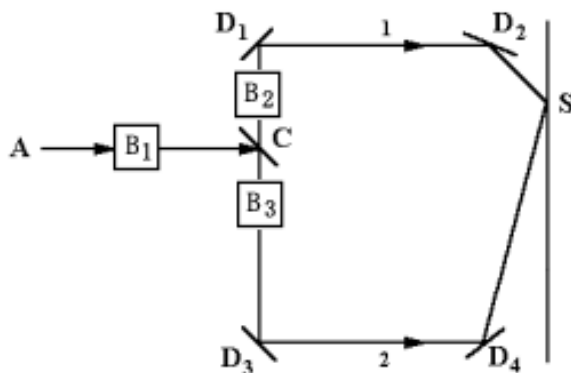


图 1. 光的不对称路径干涉实验

如上图所示，设 A 是光源， B_1 、 B_2 和 B_3 是三个性能相同的高速光开关（如可用泡克斯盒），它能快速地切断或接通光路， C 是分光镜， D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 是反光镜， S 是屏。从 C 到 B_2 和 B_3 的距离相等且可以任意，例如 0.1 米。从 B_2 经由 D_1 和 D_2 到 S 的光路 1 的长度是 4 米，从 B_3 经 D_3 和 D_4 到 S 的光路 2 的长度是 7 米，二者的光程差 $L_1 = 3$ 米。在开始时将三个光开关都打开，使光能连续地通过。选

择合适的激光，如氮氛激光做光源，使其相干长度 $L_2 > 3$ 米。连续光经分光镜后分成两路运动，最后在屏上叠加，形成干涉条纹。然后令光开关 B_1 开始运转，将连续光切成光脉冲，光开关 B_2 和 B_3 仍处于打开状态使脉冲光连续通过。选择合适的光开关使其打开的时间间隔为 $\Delta t_1 = 10^{-8}$ 秒，在这段时间内光通过的距离是 $L_3 = c\Delta t_1 = 3$ 米。再选择光开关的闭合时间为 $\Delta t_2 > 10^{-8}$ 秒，在这段时间内光通过的距离是 $L_4 = c\Delta t_2 > 3$ 米。这样就可以使沿路径 2 运动的第一个光脉冲完全到达屏上后，沿路径 1 运动的第二个光脉冲才开始到达屏上，前后两个光脉在屏上就不产生不叠加。

现在来分析结果。如果假设光本性是一种连续的波，当光开关 B_2 和 B_3 打开时，光开关 B_1 开始运转，经过光开关 B_1 作用后连续波变成脉冲波，其波列最大的长度均不超过 3 米。故当脉冲光波经分光镜作用分成二个波后，沿光路 1 传播的光波的尾部到达屏时，沿光路 2 传播的光波的前锋尚在半路上，两路光波不能在屏上叠加，无法形成干涉，在屏上形成的仅是两列波的衍射条纹的简单叠加。这种结果实际上是经典光学的一般结果，似乎没有什么值得奇怪。

但是如果假设光的本性是粒子，则光开关 B_1 仅对光子起阻挡作用，要么让光子通过，要么挡住光子（实际上是使光子偏离原来的路径转移到其他方向）。对于已经通过光开关的光子，其基本性质不被光开关的运转所影响，也就是说光子的波长、能量、偏振等所有性质都不变。已知光的相干长度公式为 $L_2 = \lambda^2 / \Delta\lambda = h^2 c / \Delta E$ ， E 是光子的能量。对于已经通过光开关的光子，光的单色性（波长或能量）不变，故 $\Delta\lambda$ 和 ΔE 不变，相干长度也不变。因此如果光开关没有运转时的光子是相干光，则光开关运转后通过开关的光子仍是相干的，干涉条纹不变。实际上大量的实验已经表明，对于光的双缝干涉，只要满足相干条件，不论光是连续光还是脉冲光，甚至光子是一粒一粒地发出（单光子干涉），对于光的干涉条纹都没有影响。也就是说如果假设光的本性是粒子，光开关运转后屏上的干涉条纹不变。

可见对于这种光的不对称路径干涉，我们在理论上无法判定实验结果，光开关作用后原先的干涉条纹是否会消失只能由实验来判定。如果实验表明光开关运转后干涉条纹不变，则光的本性是粒子性的，光的波动就是一种表象的行为。如果实验表明光开关运转后干涉条纹消失，则光的本性应是连续波，光的粒子性就变成一种表象的行为。在此实验结果中光和粒子的概念是不对等的，二者只能取其一，在逻辑上不存在二象性。

我们还可以用以上实验来证明一个光子同时从双缝穿过进行自我干涉是不可能的。按目前被普遍接受的看法，每个光子都可以被看成一系列波。经过分光镜后单光子被分成两列波，沿两条路径运动，最后两波在屏上干涉，重新合成为一个光子，完成单光子的自我干涉。在实验中我们可以将光束减弱到光子是一粒一粒地从光源发出，且第一粒光子到达屏上后再发出第二粒光子。如果每个光子都是一列波，自由光子就是自由平面波，其波列长度为无限长。对于非自由光子，波列长度有限。上述实验中的光子非自由光子，由于在三个光开关都打开时相干光，而相干长度一般被认为就是波列长度，故可以认为波列长度大于 3 米。然后让光开关 B_1 始终处于打开状态、 B_2 和 B_3 同步运转，即二者同时打开同时关闭。因此单个光子的波经过分光镜被分成两个波列后，每个波列又被切成长度等于或小于 3 米的短波列。同样地由于两条路径不相等，沿路径 1 运动的短波列与沿路径 2 运动的短波列在屏上不重叠，就无法重新合成一个完整的光子。结果就意味着光开关 B_2 和 B_3 同步运转后一个光子将分裂成两个或多个碎片落在屏上，而不是一个完整的光子。然而这是不可能的，可以肯定的是，不论最后屏上的干涉条纹是否消失，光开关 B_2 和 B_3 运转后在屏上每次观察到的仍只能是单个完整的光子。这结果说明单个光子不可能同时被分成两列波沿两条路径运动，只能沿两条路径中的一条到达屏上，也就等于说一个光子同时从双缝穿过进行自我干涉是不可能的。在现有的单光子双缝干涉问题的讨论中，由于采用的基本上是等路径，就不存在这个问题，或实际存在的矛盾被隐藏。可见目前的单光子双缝干涉实验是需要重新寻找解释的，

单光子的双缝自我干涉不是光波通过两条路径运动后的叠加形成的。

实际上由美国马里兰大学史砚华等人完成的光的“鬼干涉”实验⁽¹⁾显示,在没有光波叠加的地方也会出现干涉条纹。干涉条纹被认为是由光子间的纠缠相互作用而产生。这个现象表明相干波在空间的叠加不是产生光的干涉的必要条件,在合适的环境和相互作用条件下,光波在空间没有叠加时也会产生干涉。这与本文实验结果的预测是一致的。可以说光波的干涉是大量光子与环境以及粒子间相互作用后的统计平均结果。当环境与相互作用不同时(如单缝和双缝的不同,存在一条路径和两条路径的不同),产生的结果也就不同(如单缝衍射和双缝干涉图象的不同)。在解释光波的干涉现象时,如果考虑粒子与环境的相互作用,我们就不考虑波的叠加。如果考虑波的叠加,我们就不考虑粒子与环境以及粒子间的相互作用。这两种图象在一般的情况下是等价的,但在一些特殊情况下可能不等价,如“鬼干涉”和本文的实验。对于光的干涉问题,相互作用描述的图象是更一般、更本质的。

由以上讨论我们就可以预言,当光开关 B_2 和 B_3 打开光开关 B_1 开始运转后,屏上干涉条纹不变,说明光的本性是粒子性的。实际上众所周知微观粒子的波是一种几率波,不是通常经典意义上的连续分布的物质波。应该看到在几率波概念中,微观粒子的本质是粒子性的。只是大量粒子在空间的几率分布,或对单个粒子长时间运动过程的统计平均,才具有波的分布性质。对于单个粒子的瞬时行为而言,谈论其波动性是没有意义的。实际上波是一个宏观概念,粒子是一个微观概念,二者是不能直接等同的。就如对单个宏观粒子而言,谈论其温度和压强没有意义,温度和压强概念只有对于由大量粒子组成的宏观系统才有意义。同样只有对由大量微观粒子组成的系统,以及对单个微观粒子长时间运动过程的统计平均,谈论其波动性才有意义。因此光的波动性是可以粒子的统计分布的观念来合理解释的,但光的粒子性却无法用波的概念来合理解释。目前量子力学中用波包崩塌的图像来说明光的粒子性,这种图像无法进行定量描述,实际上是非科学的。

关于波粒二象性的本质,关于微观粒子的波动性是属于单个粒子还是属于大量粒子的统计平均,以及关于量子力学是描述单个粒子还是描述系综,是量子力学解释问题中的最基本问题。以上实验结果可以对这些基本问题的解答提供线索,有助于我们了解微观世界的本质。

参考文献

(1)D.V.Strekalov, A.V.Sergienko, D.N.Klyshko, and Y.H.Shih, Phys. Rev. Lett., 1995, 74:3600.