

# 波动 微粒二象性的直接实验检验<sup>\*</sup>

王笑君

关 洪

(华南师范大学物理系, 广州 510631) (中山大学物理学系)

**摘 要** 提出对波粒二象性及与之有关的玻尔互补性原理的可供验证的命题, 以最新的单光子态的两棱镜实验的结果为例, 介绍对波粒二象性的直接实验检验结果, 并以此为基础, 对提出命题的结论进行分析和讨论.

**关键词** 波动, 微粒, 二象性

**分类号** O 413

近二三十年来, 陆续完成了不少专门设计用来检验量子力学原理的实验<sup>[1]</sup>. 这几年又有了一些新的发展, 并且引起了国内物理学界的关注<sup>[2, 3]</sup>. 在这里, 我们谈一谈关于波动-微粒二象性以及与此有关的玻尔互补性的直接检验, 包括一般性的讨论和最近的进展.

## 1 波动-微粒二象性的浅显表述

过去长期被当做微观对象基本性质和量子力学概念基础的波动-微粒二象性, 简称波粒二象性, 实际上并没有一种统一的明确表述. 我们常常见到这样的陈述, 说光“一方面像波动, 另一方面又像微粒”, 或者“有时候像波动, 有时候像微粒.” 这些说法当然是不错的. 例如, 在光的双缝干涉实验的结果里, 一方面观察到的每一个事件, 都表现出电磁场能量 (和相伴随的动量) 的一份确定的损失, 体现了一种微粒、即光子的性质. 另一方面, 大量这样的事件的积累, 又显现出确定的衍射图样, 体现了一种波动的性质. 这就是所谓二象性的一个常见例子.

然而, 首先必须指出, 二象性里所讲的微粒性和波动性, 指的都是经典物理学里的微粒和波动. 在量子力学里对于电子, 和在量子光学里对于电子和光 (电磁场), 都建立了与经典物理学根本不同的精确描写方式. 在这些理论程式的所有基本假设和推论里, 并不出现波粒二象性. 因此, 我们认为, 在这个意义上, 波粒二象性不是量子理论里所必须含有的基本概念<sup>[1]</sup>.

其次, 我们既说上面的二象性陈述是“不错”的, 又说它们“不是必须”的. 这里面其实有一层深刻的哲学道理. 问题在于, 一般说来, 像上面所说的“有时……有时……”或者“一方面……另一方面……”那样的命题, 是很容易像我们刚才所做的那样“举例证实”, 却不可能举出任何反例来证明其为错误的. 因为, 这两种命题的意思, 都没有把一切

<sup>\*</sup> 收稿日期: 1998-01-15 王笑君, 男, 35岁, 讲师

情况包括在内, 即不是一种全面的论断. 换句话说, 如果发现了不属于上述命题涵盖的情况, 亦不能证明它们是不对的.

按照著名哲学家 K. Popper 提出的、得到普遍认可的观点, 科学理论的特点不在于它的可证实性, 而在于它的“可证伪性”(falsifiability), 即可被证明为不正确的性质<sup>[4]</sup>. 譬如, 关于宗教和哲学一类的观点, 例如上帝是否存在, 就是一个不可证伪的问题, 因而不属于科学范围内的问题. 因而, 当 Laplace 被拿破仑问到为什么他的《天体力学》一书里没有提到上帝时, 他的回答是: “陛下, 我不需要这个假设.”

综上所述, 我们觉得, 关于波粒二象性的上述浅显的表述, 不过是一种哲理性的观念, 或者一种形象化的说明, 不属于物理学理论的范围, 亦不存在实验检验的必要. 对于这种表述, 我们只说量子力学不需要这样的假设就够了.

最后还要指出的是, 在这种浅显表述里所讲的微粒性, 实际上不外是指最早由爱因斯坦在对光电效应的研究中提出的, 光在同物质相互作用时的量子性质, 这一点自然是无可争议的. 然而, 一般所讲的波粒二象性, 往往含有更深入的意义. 下面还是先用光的双缝干涉实验为例, 来做进一步的讨论.

## 2 波粒二象性和玻尔互补性

N. Bohr 在波粒二象性的基础上提出了他的“互补原理”. 但是, “Bohr 从未对‘互补性’这个术语给出过一个清楚明晰的定义.”<sup>[5]</sup> 他被认为在这个问题上讲得最明白的一句话是: “互补一词的意义是: 一些经典概念的任何确定应用, 将排除另一些经典概念的同时应用, 而这另一些经典概念在另一种条件下却是阐明现象所同样必需的.”<sup>[6]</sup> 至于这类互相排除的一对对经典概念, 则先后被 Bohr 指认为: 空时标示和因果要求, 坐标描写和动量描写, 以及波动图象和微粒图象等等. 我们在这里集中讨论的是最后的一对经典概念, 即波动性和微粒性.

在双缝干涉实验中, 不能确定到达检测屏的每一个光子是从哪一条狭缝通过的. 在这种情况下, 干涉图样的观察结果呈现出经典波动的性质, 并且, 这种性质排除了单个光子是一个经典粒子的可能性. 此外, 如果在两条狭缝附近安上附加的适当检测装置, 就有可能确定穿过挡板的每一个光子, 是从哪一条狭缝通过的. 不过, 由于受到附加检测装置的影响, 通过的光必定失去了原来的相干性, 干涉图样就不再出现. 在这种情况下, 路径确定的观察结果呈现出经典微粒的性质, 并且这种性质又排除了单个光子是一个经典波的可能性. 以上两种情况分别给出波动图象和微粒图象, 这就是 Bohr 的互补性的一个常用的例子. 这里说的“情况”, 指的是从相干光的光源, 通过一套仪器布置, 到达最终的检测装置, 这样的全过程.

于是, 我们可以把 Bohr 的互补性陈述为:

(1) 在一些情况下, 观察到的是光的波动性, 并且此时将排除光的粒子性; 在另一些情况下, 观察到的是光的微粒性, 并且此时将排除光的波动性.

但是, 根据前面的讨论我们知道, 这种形式的陈述不是一种全面的论断, 因而不属于可证伪的科学理论的命题. 那么, 为了得到可供验证的命题, 我们将 (1) 修改补充为:

(2) 在任何情况下, 观察到的或者是光的波动性, 或者是光的微粒性.

这一命题又包含了以下两种意思:

(3) 不存在既不能用光的波动性来理解, 又不能用光的微粒性来理解的情况.

(4) 不存在既呈现出光的波动性, 又呈现出光的微粒性的情况.

(3) 和 (4) 都是可以“证伪”的科学命题. 特别是命题 (4), 更体现了前面所引 Bohr 原话中两种情况互相“排除”这一层含义. 于是, 只要找到了 (3) 或 (4) 的一个反例, 就可以证明互补性命题 (2) 为不正确.

从 20 世纪后期发展起来的量子光学理论知道, 光或电磁场可以处在许多种不同的量子状态, 例如黑体辐射那样的热平衡状态 (热光), 接近于激光的相干态, 以及光子数本征态等等. 而且, 光的多数量子状态, 并不能同它的经典状态取得对应. 显然无可指望, 在 20 世纪初叶提出的二象性或互补性那样的, 依靠经典物理学概念来对光学过程做出的解释, 也会适用于光的一切量子状态.

事实上, 早在 70 年代就在实验上发现了光的反群聚 (antibunching) 效应, 后来又发现了光的压缩态 (squeezed state, 或译“挤压态”) 等全新的非经典状态, 它们必须采用量子化的电磁场理论来描写, 不可以用经典的波动或者微粒的概念来解释. 所以, 在这个意义上, 这些光的全量子状态的发现, 已经给出了命题 (3) 的一些反例, 互补性命题 (2) 已经遭遇到难以克服的困难. 可是, 互补性的更明显的困难来自运用单光子状态所做的实验, 它直接给出了命题 (4) 的一个反例. 下面, 我们对这一实验作一介绍.

### 3 单光子态的两棱镜实验

理论分析指出, 对于像光的双缝干涉那类的普通干涉实验, 干涉图样和经过路径这两种结果, 的确是不可兼得的. 过去也有一些实验, 试图用一种特别的实验布置, 同时得到干涉和路径 (即波动性和微粒性的信息). 不过那只是一种折衷的情况, 如同在测不准关系的限制下, 利用“最小不确定度”的状态, 所给出的两方面都有些含糊的结果. 要想同时得到明晰的波动性和微粒性的显现, 必须另辟蹊径, 设计新的实验.

1991 年, Ghose 等提出的单光子态两棱镜实验, 就是这样的一个实验<sup>[7]</sup>. 其中关键的部件是一对倒置的等边直角三角形棱镜, 中间隔开一条可调整宽度的缝隙. 入射光沿第 1 块棱镜直角边的法线方向投入, 到达斜边后便会发生全反射, 朝另一条直角边的法线方向射出. 此外, 当两块棱镜之间的缝隙宽度小于入射光的波长时, 会有显著部分的光穿透缝隙, 再沿原入射方向透过第 2 块棱镜射出. 这种穿透的效应, 在经典电磁学理论里是容易理解的; 因为电磁波即使受到全反射, 也能以一定的深度透入除了理想导体以外的第 2 种介质的表面. 而在量子理论里, 这是一种典型的“势垒穿透”问题. 无论如何, 它都是一种波动性的效应.

实验需要测量的是: 反射和穿透这 2 支分束的光子到达探测器的计数率  $P_R$  和  $P_T$ , 以及这 2 种光子到达符合探测器的计数率  $P_C$ . 运用光的量子化的基本公式不难证明, 对于单光子态入射光来说, 符合  $P_C$  必定等于零, 亦即是完全的反符合<sup>[7]</sup>. 那么, 在这样的布置下, 如果既接收到反射光, 又接收到穿透光, 就体现了入射光的波动性; 如果这两部分光子到达时间的  $P_C$  为零 (即反符合率等于 1), 则很好地同时体现了单光子态的微粒性.

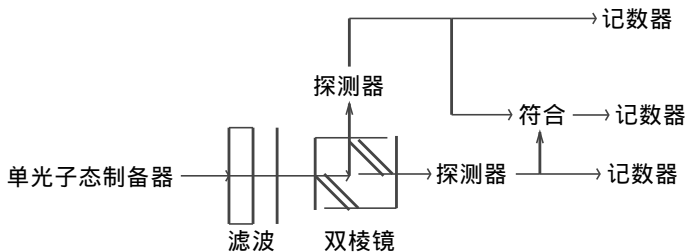


图 1 单光子态两棱镜实验布置

Mizobuchi 等很快完成了单光子态的两棱镜实验, 得到了肯定的结果. 入射的单光子源, 是用参数化的下转换技术所产生的光子对取得的. 实验在低计数率时观察到完全的反符合, 表现出接收到的每一个光子只属于一条确定路径的经典微粒的性质. 实验还测量了反射透过计数率的比率  $P_R/P_T$  随缝隙宽度的变化, 即透过率随着缝隙的减小而增长, 明显地表现出经典波动的性质. 他们由此得出的结论是: “我们的反符合实验支持量子光学的预言, 即是说光同时表现出经典的波动和微粒的图象. 这是与二象性原理的通常解释相矛盾的.”<sup>[8]</sup>

## 4 讨 论

上述结果发表以后, 引起了大家的注意, 亦展开了一些不同意见的讨论<sup>[9,10]</sup>. 我们认为, 过去用半透镜做的类似的反符合实验, 因为其中固定比率的半透过性质, 亦可以用某种微粒模型来解释, 并不是波动所特有的性质. 而现在两棱镜的透过率由于其随缝隙宽度而变的规律, 虽然仍旧不如干涉现象那么典型, 到底也可以算是波动性的一种表现. 按照上述对 Bohr 互补性陈述所做的修改补充, 则应当说, 单光子态的两棱镜实验确实给出了陈述 (4) 的一个反例.

Bohr 的互补原理, 原来是对干涉型实验的分析为基础的. 现在越出了干涉现象的范围, 结果就出现了毛病. 而事实上, 量子力学里的干涉效应不一定指坐标空间中的条纹图样, 甚至是指任何作为某个可控制的物理参数的函数而产生的一系列规则振荡. 这样看来, 在非坐标 (例如自旋) 空间中的参量干涉效应中, 还有可能进一步找到 Bohr 互补性陈述 (4) 的另一些反例.

最后, 单光子态的两棱镜实验是否完全驳倒了一般的波粒二象性或者互补原理了呢? 当然不会! 我们的观点是: 一方面, 它们都不是一些可以“证伪”的物理原理, 而只是一些试图运用经典概念去理解微观现象的形象化观念; 另一方面, 它们也是可以不断修改补充, 而不一定要坚持一成不变的. 例如, 波粒二象性的拥护者现在依然可以说, 新的实验发现了二象性的新形式, 即波动性和微粒性同时并存的形式, 从而保住了这种古老观念的延续.

与此同时, 对于波粒二象性和玻尔互补性的观念, 大多数接受了以量子力学、量子光学和量子电动力学为代表的当代量子理论的物理学家, 则可以更加理直气壮地宣告: “我们不需要这个假设.”

## 参 考 文 献

- 1 关洪. 对光的本性的新认识. 物理, 1988, 17: 149
- 2 刘全慧, 王鑫. 氢原子相干态研究的进展与启示. 物理, 1996, 25: 605
- 3 王笑君, 关洪. 关于光量子本质的新实验的解释. 华南师范大学学报, 1997 (4): 81
- 4 Popper K R. 猜想与反驳—科学知识的增长. 傅季重, 等译. 上海: 上海人民出版社, 1986
- 5 Jammer M. 量子力学的哲学. 秦克诚译. 北京: 商务印书馆, 1989. 111
- 6 Bohr N. 原子论和自然的描述. 郁韬译. 北京: 商务印书馆, 1964. 9
- 7 Ghose P, Home D, Agarwal G S. An experiment to throw more light on light. Phys Lett (A), 1991, 153: 403
- 8 Mizobuchi Y, Ohtak Y. An“ experiment to throw more light on light”. Phys Lett(A), 1992, 168: 1
- 9 Ghose P, Home D. Wave-particle duality of single-photon states. Found Phys, 1992, 22: 1435
- 10 Ghose P, Home D. The two-prism experiment and wave-particle duality of light. Found Phys, 1996, 26: 943

## Direct Experimental Test to the Wave-Particle Duality

*Wang Xiaojun\**    *Guan Hong*

**Abstract** The meanings of principle of complementarity in quantum mechanical system are discussed. Some suggestion to experiments testing for wave-particle duality is proposed, and problems involved in the wave-particle duality are approached.

**Keywords** wave, particle, duality

---

\* Department of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510631, China