

# “延迟选择”没有延迟

——延迟实验简介与分析

王峰

(长沙理工大学物理与电子科学学院 湖南长沙 410004)

(收稿日期:2016-03-14)

**摘要:**延迟实验是惠勒提出的一个实验,它所展示的物理结论与人们之前的得到的物理规则格格不入:观测行为决定了观测之前发生的事情,时间上从古至今是一个整体.该实验充分彰显了量子力学中哥本哈根学派的思想,不仅引发一个科学问题还引发了一个哲学问题.“延迟选择”实验中,人们可以在事后以延迟的方式选择光子两条传播路径中的某一条,这和因果律相违背.但是如果继续以量子力学的基本假设去分析每个实验结果而不是用“定域实在论”去人为确定粒子的路径,就不会出现难以理解的“延迟选择”和“因果颠倒”.

**关键词:**延迟选择 因果律 量子力学基本假设

1979年,在普林斯顿纪念爱因斯坦诞辰100周年的专题讨论会上,惠勒提出了延迟实验的构想<sup>[1]</sup>.惠勒指出,观测者的观测行为决定了观测前已发生的事件——粒子路径的选择,从而可以进一步推出,过去已发生的事件是由发生之后的观测决定的,因果律因此受到挑战.

惠勒曾说:“没有什么能比尼耳斯·玻尔和阿尔伯特·爱因斯坦长达30年的对话更能让人看到这个主题的奇妙;也没有什么地方会遇到比所谓的‘延迟选择实验’更深入的问题”<sup>[2]</sup>.该实验是分光实验的推广,而分光实验是量子双缝实验的变形<sup>[1]</sup>.而量子双缝实验的探测结果本身就对实在论产生了巨大的挑战.

本文从牛顿对光的粒子说出发,逐步介绍实在论和因果律收到的一步冲击,同时简要介绍延迟实验中涉及的相关量子力学的知识,也就是延迟实验的相关背景知识.

## 1 牛顿光粒子说与托马斯·杨的光波动说

牛顿根据光的直线传播规律、光的色散现象,于1675年提出,光是一种粒子.

这种说法肯定了光像其他实物粒子一样的实在性,增强了人们对光的感性认识,而且解释了许多几

何光学现象,很快受到认可.而托马斯·杨于1801年提出的双缝实验,则表明,光是一种波<sup>[1]</sup>,具有波的干涉和衍射性质.之后麦克斯韦理论和赫兹的实验表明,光是一种电磁波<sup>[1]</sup>.光的波动说提出后,光的粒子性受到动摇,其实在性也遭到否定.直到人们意识到电磁波也是一种物质形态,才恢复光的实在性,但是光的粒子学说仍然未得到广泛接受.

## 2 爱因斯坦对光的波粒统一

1905年,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<sup>[3]</sup>,恢复了光的粒子说.而且,爱因斯坦认为光的粒子说与光的波动说都太过片面,它们分别强调了光的粒子属性和波动属性,既然光同时具有这两类属性,光为何不可既是粒子又是波呢?两者并不存在矛盾.

德布罗意受到爱因斯坦的启发,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<sup>[3]</sup>.在1927年的电子的晶格衍射实验中证实了电子的波动性<sup>[3]</sup>.至此,波粒二象都作为实在性的表现形式而被人们广泛接受.但是由此开拓出的量子力学再次挑战了人们对实在论的思考.

### 3 量子力学中实在性不再

既然电子有波动性,用电子做双缝实验,自然也出现了干涉条纹.但是其中的干涉机制却令人费解.如果说电子射过双缝时相互影响而导致最后出现干涉条纹,那么当电子逐个经过双缝就不会出现干涉条纹了,但事实是,即便是让电子逐个经过双缝,随着经过双缝电子数目的增加,屏幕上慢慢出现了干涉条纹.这只能说明,电子是自己和自己干涉.而屏幕上的条纹又说明电子的分布遵从某种概率分布,最后波恩提出的“概率波”诠释成功地说明了实验现象<sup>[3]</sup>.波恩认为,某时某刻,粒子不能确定地出现在某点,而是概率性地出现在各个可能出现的点位,而概率的分布为波的形式,粒子在某点处所拥有的概率波的波模正比于粒子在该点出现的概率.而电子的干涉行为实质上是电子的概率波所产生的结果,即粒子以概率波的形式同时经过两条缝,并以概率波的形式进行干涉和衍射.

概率波解释了许多量子现象,得到各个实验的证实,由此存在于人们心目中数千年的实在性思想得到彻底颠覆.这一思想得到许多哥本哈根学派科学家的支持,如其中一个就是玻尔,他就“上帝是否是在掷骰子”和爱因斯坦争论了数十年.

### 4 哥本哈根的得寸进尺——延迟选择实验

爱因斯坦坚信无论是光子还是其他粒子的实在性,在实在性受到量子力学的颠覆后,爱因斯坦所认同的因果律再次受到延迟实验冲击.而提出者惠勒正是与他争论了一辈子的玻尔的学生.1979年,在普林斯顿纪念爱因斯坦诞辰100周年的专题讨论会上,惠勒提出了延迟实验的构想.

在介绍延迟实验前,先介绍分光实验.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<sup>[1]</sup>,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).

如图1所示的实验装置及光子路径<sup>[4]</sup>,光子经过一块半透片后,分别各有一半的概率透射和反射,

进而通过不同的两块反射器反射,最后射入两个探测器当中的1个.光子最后必定被两个探测器之一探测,“所有此类 which way 实验总是迫使光子从两路传播的叠加态坍缩向两路之一传播的态.结果就是总是发现半透镜片后光子只沿两路之一传向对应的探测器”<sup>[4]</sup>.

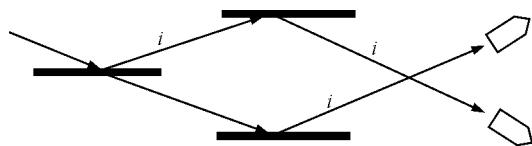


图1

再看图2所示实验<sup>[4]</sup>,和图1所示实验不同,该实验放入了第2个半透片.光子经过第2个半透片后,我们便不能再判断光子的路径.按照量子力学的观点,光子是以概率波的形式同时从两条路径传播,对于传向上面探测器的光子的概率幅有两路,上面一路经过3次反射,带来3次相位跃迁,故对于概率幅有  $i^3 = -i$ ,下面一路经过1次反射故有  $i$ ,两者在半透片处相加相消;对于到达下面探测器的光子,他们的概率幅都经历两次反射,相加同号相长,所以导致下面的探测器探测到了全部光子,而上面的探测器没有探测到光子<sup>[4]</sup>.

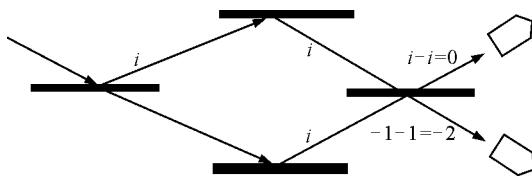


图2

基于爱因斯坦的分光实验,惠勒提出了延迟实验的构想.

惠勒提出的延迟实验有第3种情况,装置开始没有放第2个半透片,当光子穿过第1个半透片之后再放入第2个半透片,最后的实验结果是只有下面探测器接收到了光子.按照“定域实在论”的观点,从第1个实验结果来看,光子在穿过第1块半透片后会选择一条传播路径,现在,加上第2块半透片后又说光子从两条路径同时传播,这样看来,人们可以在事后以延迟的方式选光子同时沿两条路径传播.这就称作“延迟选择”,该实验称做“延迟实

验”<sup>[4]</sup>.

惠勒在自传中说:“技术进步跟上了理论,使它变成真正的实验. Marylan 大学 Carroll A lley, Oleg Jakubowicz 和 William Wickes 于 1984 年——在实验室的实验台上,不是在棒球场上——演示了这个实验.”<sup>[5]</sup>

在延迟实验中,并没有限制实验装置的距离,理论上讲即使第 1 块分光片和接收器相距几万光年也不会影响实验结果,而观察者的行为可以影响之前很久就已发生的事件,甚至是宇宙早期发生的事件.有人在宇宙尺度上进行了相关实验,已进行的延迟实验证明了名为 0957 + 561A 和 B 的两个类星体实际上是 1 个类星体的两个像<sup>[6]</sup>,其实验机理与分光束实验一致.

## 5 延迟实验引发的问题与讨论

延迟实验不仅包含了量子力学中的“粒子究竟在那条路径上传播”的问题,还得出“事后的观测可决定事情的发展”这一因果颠倒的结论,该实验是对实在论和因果律的双重否定.不仅自然科学家对此颇感兴趣,还有不少哲学研究人员参与该问题的分析与讨论.

实验中的光子,在没有接触到第 2 块半透镜时,无论身处在第 1 个实验装置中(没有第 2 块半透镜)还是身处在第 2 个实验装置中,光子的行为应当一致,即选择一条路径或是同时沿两条路径传播.相同条件下研究对象有相同行为,此为稳定性假设.从古至今的所有物理实验均基于该假设.而延迟实验则看上去和稳定性假设相矛盾.对此,一些研究人员试图用玻尔的量子整体观点来解释.

首先,该观点不否定稳定性假设,但是,光子在第 1 个实验装置中和第 2 个实验装置中在接触到第 2 块半透片前所处的物理条件并不相同,因为,在量子世界中,研究对象、实验装置以及观测者都是一个整体,其中一者改变则整个物理体系全部改变.所以,在延迟实验中,未放入第 2 块半透片时,光子处于一个物理环境下,放入第 2 块半透片的瞬间光子跃迁到了另一个物理环境下(即使光子没有接触到

第 2 块半透片),光子的行为也发生了改变,由此产生了延迟实验中的实验结果.但这一说法和先前诸多物理学家和哲学家坚持的还原论相矛盾.还原论认为只要第 2 块半透片没有影响到光子,那么光子在两套实验装置中的所处的物理环境一致,有一致的物理行为(选择一条传播路径或者沿两条路径传播).而延迟实验的提出者惠勒则强调了时间的整体性,他认为,从古至今,是一个整体,今人的决定可以影响先前已发生的事件,可以决定已发生的事件的产生的结果.并且他强调观测和记录对已发生事件的影响,他和玻尔都认为只有被记录的基本量子现象才可称之为现象.

## 6 “延迟实验”并未延迟——实验简析

我们看对第 1 个实验的分析,“所有此类 which way 实验总是迫使光子从两路传播的叠加态坍缩想两路之一传播的态”.而根据量子力学的观点,被探测到时量子态才坍缩<sup>[2]</sup>,因此并不能依据观测结果推测光子来自哪一个路径,如在上面的 1 个探测器中探测到光子,并不能以此断定光子走的是该探测器前面箭头所示路径(如果可以说明光子过了第 1 个半透片路径就已经坍缩或是被探测之前的传播途中就已经坍缩).坍缩成什么态不说明之前以此态传播,目前没有任何证据.其情况应和图 2 的情况相同,同时从两条路径传到探测器,然后坍缩.而后出现所谓的“延迟选择”,是建立于用“定域实在论”分析第 1 个实验的结果,即依据某一个探测器探测到的光子来确切地推论该光子的确定路径,这又是和量子力学的态叠加原理是矛盾的.综上所述,所谓的“延迟实验”并没有违背因果律,而是在第 1 个实验中人们用经典的想法逆推量子过程导致的“违背因果律”的错觉.

## 7 关于电子双缝的类似实验

对于电子双缝也是如此.

设有双缝  $a, b$ (图 3),按照量子力学的观点,当电子射向双缝时,那些能够穿过缝的电子,是以波函数的形式同时沿路径 I 和 II(图 3 中虚线)传播的.

在缝  $a$  的中间  $A$  处放 1 个探测器,即便在  $A$  处、在  $t$  时刻探测到电子,我们仍然无法确定电子沿路径 I 传播,而只是说明电子在传播的过程中在  $t$  时刻它的路径自由度在  $A$  处坍缩(如果  $A$  处是实行破坏性测量),即只在探测时坍缩到某一个态,而不能说明之前是否以此态运行.如果我们因探测而认定电子的传播路径,实际上是在承认电子在发射出去的一瞬间在路径自由度上就已经坍缩,或者在被探测之前就已经坍缩,这和量子力学基本假设是相悖的.

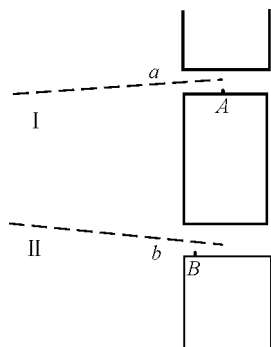


图 3

我们假设在缝  $b$  中、比  $A$  更靠近电子发射器的  $B$  处放一个能实行非破坏测量的探测器,那么按照

(上接第 114 页)

的是:只有同时具备准确性、针对性、指导性、激励性、多样性、交互性等特征的教学反馈才能对教与学起到应有的促进作用<sup>[5]</sup>.反馈不仅仅是教师与学生言语上的交流,更是行为思想上的交流,教师的一个反馈或许会引起学生思想行为上的巨大变化,而且在交流的过程中学生会重新认识自我,逐渐实现积极的自我评价.而学生能够进行积极的自我评价才是从根本上体现学生的主体地位.

#### 4 结语

学生认知需要的错误定位,是学生学习倦怠产生的根本原因.要解决学生物理学习倦怠问题,就需要引导学生实现由学习的类似缺失性需要到成长性需要的过渡.在物理教学中首先要真正落实“从生活走进物理,从物理走向社会”的物理教学理念,这是学生转变认知需要的基础.其次转变教师对待自主探究的态度,使自主实验探究过程不仅体现学生的

量子力学的观点,即便在  $B$  处探测到了 1 个电子,那么接下来仍然有可能在  $A$  处探测到该电子(理想情况下可以只发射 1 个电子).显然我们不能说我们在  $A$  处的探测“改变了电子的路径”,在坍缩之前,电子都是以波函数同时在两条路径上传播的.

综上所述,无论是分光实验还是双缝实验,当我们探测到光子或者电子的时候,如果都能继续以量子力学的基本假设去分析结果而不是用“定域实在论”去人为确定粒子的路径,就不会出现难以理解的“延迟选择”和“因果颠倒”.

#### 参考文献

- 1 田松.延迟选择实验及其引发的实在问题.自然辩证法研究,2004,20(5):42~44
- 2 John A Wheeler. At Home in the Universe,1994.112
- 3 曾谨言.量子力学.北京:科学出版社,2013.8~9,16~17,19~20,30~31
- 4 张永德.量子信息物理原理.北京:科学出版社,2006.8~9
- 5 John A Wheeler and Kenneth Ford, Geons, Black Holes and Quantum Foam,1998.337
- 6 惠勒.物理学和质朴性.合肥:安徽科学技术出版社,1982.11~12

主体地位,更能在探究过程中构建知识体系,掌握学习方法,在主观上减小学生的学习强度.最后实施有效教学反馈,引导学生进行积极的自我评价,根本上实现学生自主的同时,缓解学习压力.最终实现认知需要的顺利过渡,从根本上解决学生物理学习倦怠问题.

#### 参考文献

- 1 (美)马斯洛著.动机与人格.许金声译.北京:华夏出版社,1987
- 2 李晓文,张玲,屠荣生.现代心理学.上海:华东师范大学出版社,2003(3):26~27
- 3 于琨.以需求理论视角分析中学生学习倦怠的产生.山西师大学报(社会科学版),2010(5):118~120
- 4 申盼龙.浅谈“从生活走进物理,从物理走向社会”.教育课程研究,2015(7):160
- 5 钟根良.“延迟判断”教学策略在物理课堂中的应用.物理教学探讨,2012(5):9~11
- 6 彭豪祥.有效教学反馈的主要特征.中国教育学刊,2009(4):54~57