

## 关于定域性原理的另一判决性实验

谭天荣

青岛大学 物理系青岛 266071

ttr359@126.com

**内容提要:** 法国物理学家 G.洛查克已经指出: 贝尔不等式来自经典概率论, 因此, 上世纪关于贝尔不等式的实验, 只不过再一次显示量子力学概率不同于经典概率, 与定域性原理无关。本文提出一个判定量子力学中的“远程相互作用”观念与相对论的“定域性原理”孰是孰非的新实验。考虑一个连续地发射成对电子的电子源, 让每一对电子都精确地朝相反的方向运行, 从而形成相向运动的两个电子束。现在, 让这两束电子各自经历一个双缝衍射过程, 使得其中的一束的电子通过某一条缝当且仅当其配偶通过对应的缝, 让右边的双缝同时打开而左边的双缝轮流打开, 则从左边的双缝衍射实验我们能间接地知道右边的每一个电子经过的是哪一条缝。按照定域性原理, 右边的双缝衍射实验的干涉条纹不会消失, 而按照量子力学, 则会消失。我预言这一实验将取得有利于定域性原理的结果。[Academia Arena, 2010;2(1):60-64]. (ISSN 1553-992X).

**关键词:** 贝尔不等式; 经典概率论; 定域性原理; G.洛查克; 双缝衍射过程

### 1. 引言

大家知道, 量子力学中的“远程相互作用”观念与相对论的“定域性原理”相矛盾, 而上世纪爱因斯坦与玻尔关于“EPR 关联”的一场“世纪之争”正是围绕这一矛盾展开的。到了 60 年代, 贝尔用他提出的“贝尔不等式”表现“定域性原理”, 并证明这一不等式与量子力学的“自旋相关公式”不能同时成立, 从而提出一个判决性实验, 将这场“世纪之争”孰是孰非诉诸实验。实验的结果是量子力学的“自旋相关公式”成立而“贝尔不等式”不成立。虽然人们对于这一实验结果是否表明“定域性原理”不适用于微观世界的意见还有分歧, 但总的趋势是人们相信在这场“世纪之争”中, 坚持量子力学的玻尔战胜了坚持定域性原理的爱因斯坦。

上世纪 70 年代, 法国物理学家 G. 洛查克[1,2]证明, “贝尔不等式”其实只不过是经典概率论的一个结论, 与“定域性原理”无关。虽然这一结论并未受到应有的重视, 但它实际上已经证明, 当年关于“贝尔不等式”的实验并没有判定关于“世纪之争”谁胜谁负的问题。

本文提出另一关于“EPR 关联”的“世纪之争”的判决性实验。

### 2. 量子退相干

美国著名的物理学家费曼断言: “双缝衍射实验包括了量子力学中的唯一的奥秘。”而双缝衍射实验令人困惑之处在于, 实验没有出现人们期望的结果:

A. 双缝同时打开时的衍射图形, 是双缝轮流打开时的两个衍射图形的迭加。

为了说明命题 A 不成立这一出人意料的实验事实, 人们提出了“量子退相干”的理论。关于这一理论, 费曼在《费曼物理学讲义 III》一书中曾经构思了如下理想实验: 如果在电子的双缝衍射实验中加上一个光源, 放置在第一块隔板的后面的两条窄缝之间, 使我们“看得见”每一个通过电子到底通过的是第一条缝还是第二条缝, 则屏上的衍射图形就失去干涉条纹。如果移去光源, 则又会重新出现干涉条纹。一般地说, 所谓“量子退相干”就是指由于“观测”而导致的相干性消失的现象。

“量子退相干”原是为了说明命题 A 不成立而提出的一种“假说”，但哥本哈根学派的大师们立刻兴趣盎然地把它作为一种“效应”来解释。

波尔的“互补原理”对“量子退相干”作了如下解释：微观物体的运动具有粒子与波的双重属性，但在同一实验中二者是相互排斥的。在电子的双缝衍射实验中，测量粒子通过哪一条缝强调了电子的粒子属性，与粒子性互补的波动性便被排除了，从而导致干涉条纹的消失。

海森堡则用他的“测不准关系”对“量子退相干”作了如下解释：根据测不准关系，准确知道某一电子垂直于路径方向的位置，意味着不能准确知道该电子垂直于路径方向的动量，从而造成屏上干涉条纹的消失。

根据海森堡的上述观点，费曼把测不准关系表成：

B. 不可能设计出一种仪器，它能在双缝衍射实验中确定电子到底是经过哪一条缝，而同时又不扰动干涉图案。

费曼还说：“测不准原理以这种方式‘保护’着量子力学，……量子力学就以这样的冒险而又准确的方式继续存在着”。

那么，“量子测量”是怎样导致“退相干效应”的呢？量子物理学家们对这一问题的有分歧，他们的解释可大致分成两种类型。

在《量子力学的数学基础》一书中，冯·诺伊曼提出了或许是最早的测量理论，其中有一个命题

C. 观察者在测量终结时看到仪器指针的读数，是导致被测量的对象从不确定状态过渡到确定状态的决定性因素。因此，如果不提到人类意识，就不可能表述一个完备的、前后一贯的量子力学的“测量理论”。

按照这一命题，“主观的介入”乃是量子退相干的根本原因，换句话说，量子相干性消失，归根结底是由于“人眼的一瞥”。

德国物理学家吉·路德维希则持的相反的观点，他拒绝“感觉”、“知识”和“意识”等用语出现在物理学中，并且把宏观仪器看成一个处于热力学亚稳态的宏观系统，把测量理解为宏观仪器受到微观系统的扰动向热力学稳态演化。因此，测量不再是“客体与主体之间的一个不可分的链环”，而是一个“微观系统与一个宏观系统之间的一个不可分的链环”。

意大利物理学家丹内里、朗格和普洛斯佩里在路德维希的工作的基础上建立了一种精致的测量理论，简称为 D-L-P 理论。按照这种理论，测量之所以导致量子态相干性的消失，是被观测的微观系统自身经历的一个具有“各态历经”特征的过程，并不需要“人眼的一瞥”。

在路德维希的工作的基础上建立另一种的测量理论是“退相干理论”，它把测量过程中量子态相干性的消失理解为由于“量子纠缠”而导致的一个动力学过程，即使观察者不在场也照样发生，其中仪器只不过起着“记录”的作用。

那么，能不能用实验来判定上述各种观点孰是孰非呢？

让我们回到费曼的关于“观察电子”导致干涉条纹消失的理想实验。在这个实验中，我们满可以只放置上光源却不观察电子，如果实验的结果仍然出现干涉条纹，则测量过程要求“主观的介入”，如果不再出现干涉条纹，则测量过程不要求“主观的介入”。这是一个理想的判决性实验。

费曼本人没有对这一问题给出确切的回答。他一方面说：“也许这是由于点上光源而把事情搞乱了？……我们知道，光的电场作用在电荷上时会对电荷施加一个作用力。所以也许我们应当预期运动要发生改变。不管怎样，光对电子有很大的影响。在试图跟踪电子时，我们改变了它的运动。也就是说，光对电子的反冲足以改变其运动，……这就是为什么我们不再看到波状干涉效应的原因。”按照这种作用机制，只要点上光源，不论我们观察不观察电子，干涉条纹都会消失。可另一方面，费曼又说：“当我们观察电子时，它们在屏上的分布没有干涉条纹；当我们不观察电子时，它们在屏上的分布有干涉条纹。”照这么说，即使点上光源，只要我们不观察电子，干涉条纹就不会消失。

尽管如此，费曼的自相矛盾的回答并不妨碍我们借助于费曼的理想实验来判断路德维希的观点与冯·诺伊曼的观点孰是孰非，真正的困难在于如下事实：电子太小，我们不能在光的照耀下跟踪它。因此，还须作一些技术上的改进，费曼的这个理想实验才能实现。在这里，我提出一个建议。

### 3. 一个新的判决性实验

考虑一个连续地发射成对电子的电子源，让每一对电子都精确地朝相反的方向运行，从而形成相向运动的两个电子束  $R$  与  $R'$ 。现在，让  $R$  中的电子通过一个开有双缝的隔板  $L$ ，落在某一可以探测电子位置的屏上。同时，又让  $R'$  中的电子飞向一个与  $L$  极对称的另一隔板  $L'$ 。这个隔板只有一条缝  $S$ ，而且当且仅当某一电子  $e$  越过  $L$  的第一条缝时，它在  $R'$  中的配偶  $e'$  会越过缝  $S$ 。这样，从  $e'$  是否越过缝  $S$  我们就间接地知道  $e$  通过的是  $L$  的哪一条缝。下面，我们把这个实验记作  $T$ 。

对于电子束  $R$ ，实验  $T$  是一个双缝衍射实验。让  $L$  上的双缝同时打开，如果观察者跟踪  $R'$  的每一个电子，看它是否通过缝  $S$ ，则观察者就间接地知道电子束  $R$  的每一个电子经过的是哪一条缝，从而命题  $B$  要求：

D. 如果观察者跟踪  $R'$  的电子，则干涉条纹将消失。

那么，如果实验条件不变，只是观察者不再跟踪  $R'$  的电子，干涉条纹会不会消失呢？

按照命题  $C$ ，由于没有观察者的跟踪，对  $R'$  的电子的测量就少了“人眼的一瞥”这一决定性的最终环节。在这种残缺不全的测量过程中，该电子不会从“不确定状态”过渡到“确定状态”，从而屏上的干涉条纹不会消失。因此，按照冯·诺伊曼的意见，实验  $T$  的结果将是：

E. 只有观察者跟踪  $R'$  的电子，干涉条纹才会消失；如果观察者不跟踪  $R'$  的电子，干涉条纹就不会消失。

而按照路德维希的意见， $R$  在屏上的干涉条纹会不会消失，只与客观的实验条件有关，与观察者是否知道  $R'$  的电子的行为无关。于是从命题  $D$  得出结论：

F. 不论观察者跟踪不跟踪  $R'$  的电子，干涉条纹都会消失。

这是  $D-L-P$  理论与“退相干理论”的所期待的结论。

无论实验  $T$  出现结果  $E$  还是出现结果  $F$ ，命题  $D$  都成立，即：如果观察者跟踪  $R'$  的电子，则干涉条纹将消失。而干涉条纹的消失，则起源于对电子束  $R'$  中的电子的观测，只不过对于不同的测量理论，被观测的电子将经历不同的过程。对于冯·诺伊曼测量理论来说，它是最终由于“人眼的一瞥”而导致的一个从不确定状态过渡到确定状态的过程；对于  $D-L-P$  测量理论来说，它是由于被观测的电子自身的“各态历经”而导致的一个统计力学过程；对于“退相干理论”来说，它是由于“量子纠缠”而导致的一个动力学过程。

如果命题 D 成立，则从实验 T 可以知道到底是冯·诺伊曼测量观点正确还是路德维希的观点正确，但不能判定 D-L-P 理论与“退相干理论”孰是孰非。

另一方面，命题 D 要求 R' 的电子与其 R 中的配偶有某种“非定域关联”，因此，按照爱因斯坦的定域性原理，命题 D 不成立，即：

G. 不论观察者跟踪不跟踪 R' 的电子，干涉条纹都不会消失。

如果实验果真出现这样的结果，则从实验 T 可以在一个双缝衍射实验中确定电子到底是经过哪一条缝，而同时又不扰动干涉图案，从而命题 B 不再成立。按照费曼的意见，量子力学的大厦将会因此而倒塌。由此可见，实验 T 可以取代上世纪关于贝尔不等式的实验，在量子力学和定域性原理中二者择一的判决性实验。

#### 4. 我的预言

综上所述，实验 T 可能出现 E、F 或 G 三种结果。按照量子力学，将出现结果 E 或 F。其中结果 E 表明冯·诺伊曼的测量理论正确而结果 F 表明路德维希的测量理论正确；而按照定域性原理，则将出现结果 G。我预言：实验 T 肯定会出现结果 G，除了“定域性原理”以外，再补充一个论据：从费曼关于退相干现象的阐述我们看到，问题起源于实验事实 A。人们认为：这一实验事实表明经典概率论的全概率公式不适用于微观世界，但晚期的费曼提出了新的观点：

“虽然在量子力学诞生以前，人们没有使用过以概率幅迭加为基本原理的概率论，但这一套做法并不违背概率论的数学结构。譬如，表示命题 A 的概率公式的失效并不意味着概率论里关于相互排斥的事件的条件概率相加的普遍定律不再成立。因为，事实上，上式右边的两个概率是在两条缝轮流打开的条件下的概率，而其左边的概率则是两条缝同时打开的条件下的概率。条件不相同，本来就没有理由把该式看作是概率论的一个结论。只有在经典物理学的粒子观念支配下，认为粒子只可能通过某一条缝，而这时它所没有通过的另一条缝是否开放，不会对它的行为有什么影响。只有在这种假定下，才可能把该式右边的两个概率当成两个相互排斥的事件的概率，因而遵从上式的相加规则。

“因为在量子力学中起作用的是概率幅的迭加，从而产生了干涉效应，概率迭加规则就不再成立。由此可见，上式的失效只能说明经典粒子概念的失效，并不说明概率论中的普遍定律不再成立。”

在这里，费曼已经指出双缝衍射实验并未否定经典概率论的全概率公式，但仍然保留了量子力学的基本观点：“电子的运动不是轨道运动。”在我看来，从实验事实 A 并不能得出这一结论，这一事实仅仅表明电子通过某一条缝的运动与另一条缝的启闭有关。从电磁学的角度来说，这一现象不难理解：电子自己有一个固有电磁场，开启或关闭另一条缝，将会改变这个电磁场的边界条件，从而间接改变电子的运动。按照这种机制，在实验 T 中，R 的电子在屏上的干涉条纹肯定不会因为观察者跟踪 R' 的电子而消失。实验 T 可以有各种变形，例如用“电子通过斯特恩革拉赫装置的不同通道”来取代“电子通过不同的缝”，这样，被观测的物理量就不再是电子的位置而是电子的自旋。或许，这种观测电子自旋的实验更容易实现。我在等待大自然的裁决。

#### 参考文献

[1]Lochak G. Has Bell's Inequality a General Meaning for Hidden-Variable Theories? [J]. Foundations of Physics, 1976, 6 (23).

[2]Lochak G. De Broglie's Initial Conception of de Broglie Waves [A]. Diner S et al. (ads.) The WaveParticle Dualism [M]. D. Reidel Publishing Company, 1984.

## Another Judgment Experiment about Locality Principle

Tan Tianrong

Qingdao University, Physics Department, Qingdao, 266071

ttr359@126.com

**Abstract:** France physicist G. Lochak has pointed out that Bell's inequality results from classical probability theory, and thereby the experiments about Bell's inequality in 20 century only another indication that quantum probabilities are different from classical probabilities; which has nothing to do with locality. Herein, a new experiment for judging if locality is true in micro processes is provided. Consider a source that emits pairs of electrons and two electrons of each pair fly off in opposite directions accurately, so that two beams facing each other are formed. Now, let each one of the above beams undergo a double slit diffraction process respectively, such that an electron in one beam passes through one slit if and only if its mate passes through the corresponding slit. Let the right two slit open simultaneously, while the left two slit open in turn. Then, we can know indirectly which slit a right electron passes through from the action of its mate. According to locality, the diffraction pattern in right ought to be unchanged while on the basis of quantum mechanics it must vanish. I predict that the result of this experiment will be favorable to locality. [Academia Arena, 2010;2(1):60-64]. (ISSN 1553-992X).

**Keywords:** Bell's inequality; classical probability theory; locality; G. Lochak; double slit diffraction process.

11/5/2009