

走近量子纠缠——上帝掷骰子吗？

1900年，普朗克的论文打开了潘多拉的盒子，释放出‘量子’这个妖精。那年，刚从瑞士的苏黎世工业大学毕业的爱因斯坦，21岁，正在四处奔波，焦头烂额地找工作，15岁的玻尔还只是哥本哈根一个顽皮的中学生。谁也料不到，这两个年轻人在十几年后成为了物理界的两大巨擘，而且，在量子理论的基本思想方面，两人巅峰对决，展开了一场一直延续到他们去世的旷世之争。

玻尔与爱因斯坦的量子之争可以概括为一个著名的问题：上帝掷骰子吗？要解释清楚这个量子论中的哲学问题，我们首先介绍一下著名的杨氏双缝干涉实验。

杨氏双缝实验比量子论的历史还要早上100年。当初的法国物理学家托马斯·扬用这个简单实验挑战牛顿的微粒说，证明了光的波动性。原始的实验装置异常简单，这实验的影响却波及了几百年。托马斯·扬用经过一个小孔的光作为点光源，点光源发出的光穿过纸上的两道平行狭缝后，投射到屏幕上。然后，观测者可以看到，屏幕上形成了一系列明暗交替的干涉条纹。干涉是波特有的现象，因此，实验中出现的干涉条纹是光的波动性强有力的证明（见图1(a)）。

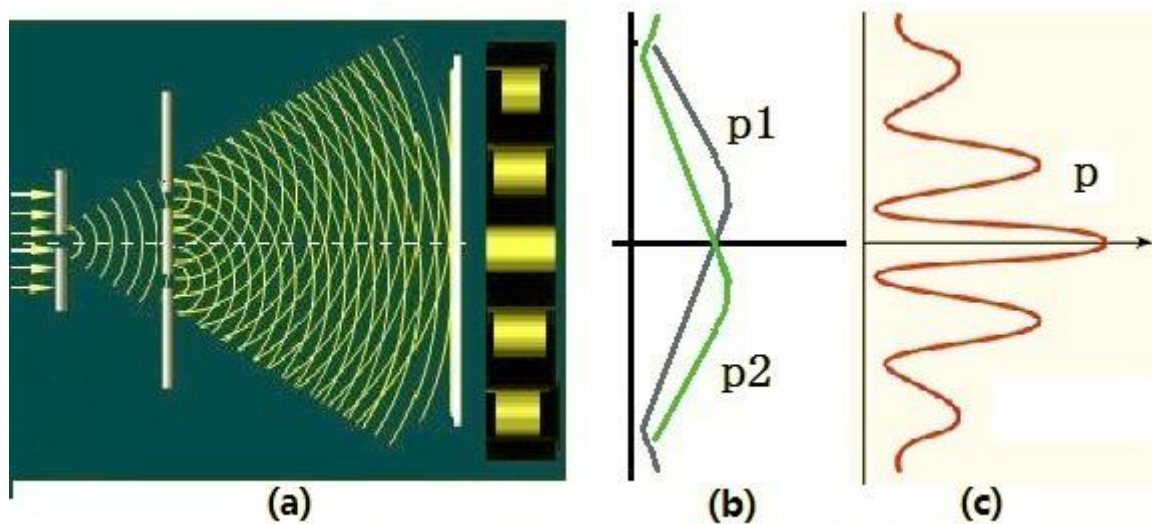


图1：双缝干涉实验-水波（或光波）

2002年，《物理世界》杂志评出十大经典物理实验，‘杨氏双缝实验用于电子’名列第一名。费曼认为，杨氏双缝电子干涉实验是量子力学的核心，“包括了量子力学最深刻的奥秘”。

读者应该还记得我们在本文的第一节提到过的量子力学中神秘的‘叠加态’。电子双缝实验证实了电子叠加态的存在。那么，这个实验是如何相关于量子力学？又如何揭示了量子力学中最深刻的奥秘？实验中哪儿出现了神秘的叠加态？这个实验与‘上帝掷不掷骰子’又有什么关系？这些都是需要澄清的问题，且听我们慢慢道来。

首先，为什么说双缝实验中的干涉条纹是波的特征呢？让我们简单说明一下条纹的形成。

再看图 1(a)，点光源发出的光，作为一种波，抵达狭缝。根据惠更斯原理，波面上的每一点都是一个子波源。因此，经过两条狭缝之后的波，可看作是位于两条狭缝处的子波源所发出的两列波的叠加。‘波的叠加’意味着‘振幅的叠加’：如果两列波到达同一位置时，振动方向相同，叠加后振幅增大；反之，如果振动方向相反，互相抵消，使得叠加后振幅减小。因为叠加后的振动在不同位置的增大或抵消，便形成了屏幕上明暗相间的干涉条纹。（图 1(a) 右边的图案）

【图 1(c) 表示的是光波在屏幕上的强度分布。我们看到的曲线 p 是一条上下振动的图像，这对应于明暗相间强度变化的干涉条纹】

如上所述，图中的(a)和(c)说明的都是‘双缝实验’的情形，图(b)又是什么呢？那是两次‘单缝实验’的结果。如果将一条狭缝遮住，就可以分别作两次单缝实验，我们发现，这两次单缝实验的结果都没有条纹，单缝实验光强度的分布，即波动振幅的平方，分别由(b)中的曲线 p_1 和 p_2 表示。

我们再次研究(b)、(c)中的曲线： p_1 、 p_2 是单缝实验的强度分布， p 是双缝实验的强度分布。显然， p 并不等于 p_1 、 p_2 的简单叠加，事实上，它是单缝实验的振幅叠加后的平方。这是波动的特点，也是干涉条纹的来源。

如果用粒子来作双缝实验，会产生什么结果呢？读者会说：是用粒子，不是波，那就得不到干涉条纹了。答得很对，但是，不要忘了，我们的所谓粒子，有两种，除了经典意义下的粒子外，还有一种量子力学中的行为古怪的粒子。因此，我们遵循费曼设计的实验，对比一下水波、子弹和电子分别通过双缝时的不同行为。

水波的情况刚才已经说明过了，由图 1 表示。下面的图 2 则是用子弹（经典粒子）进行双缝实验的结果。

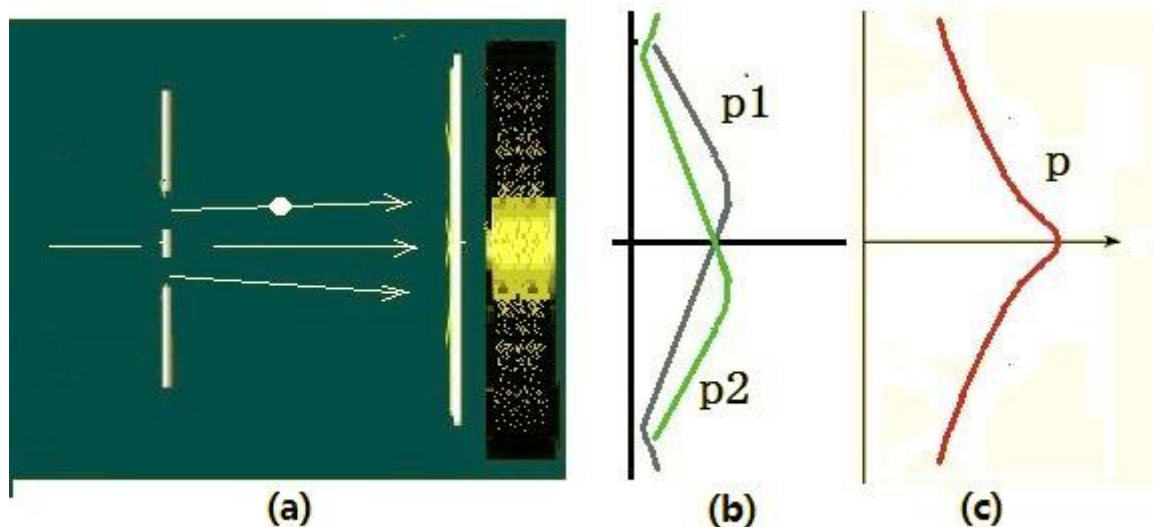


图2：双缝干涉实验-子弹

设想用一挺机关枪向狭缝扫射（图 2(a)），子弹的发射服从经典概率统计规律。我们假设：一粒一粒发射出来，而又穿过狭缝到达了屏幕的子弹中，50%的几率是通过第一条缝而来，50%的几率通过第二条缝而来。假设每个打到屏幕上的子弹形成一个亮点的话，发射一定数目的子弹之后，在屏幕上就有了一个亮点聚集而成的图像（图 2(a) 右）。我们从实验结果发现：这个图像不同于波动的情形，它不是明暗相间的干涉条纹，而是从中心到两边，亮度逐渐下降的图像，如图 2(c) 的曲线 p 所示。

类似于波动双缝实验，我们也可以分别将狭缝之一关闭，对另一个开缝做两次子弹单缝实验，实验结果的两条亮度分布曲线由图 2(b) 中的 p_1 、 p_2 表示。比较图 1(b) 和图 2(b)，不难看出，子弹单缝实验结果与水波单缝实验结果是相同的。然而，两种情形的双缝实验结果完全不同。子弹双缝实验的结果 p ，是两个单缝实验结果 p_1 和 p_2 的简单叠加，这是由概率的叠加性决定的。

总结以上所述，水波的双缝实验结果是相干叠加，体现水的波动性；子弹的双缝实验结果是非相干叠加，体现子弹的粒子性。如果我们用电子（或是光子及其它微观粒子）来作实验，结果又将如何呢？

我们可以类似于子弹的情形，用电子枪将电子一个一个地朝着狭缝发射出去。如图 3 所示：

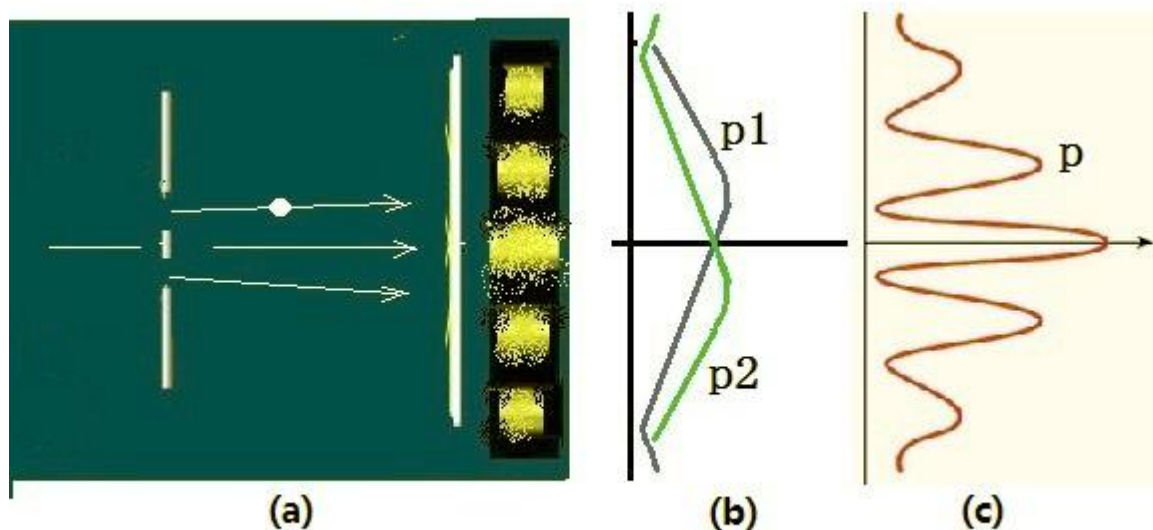
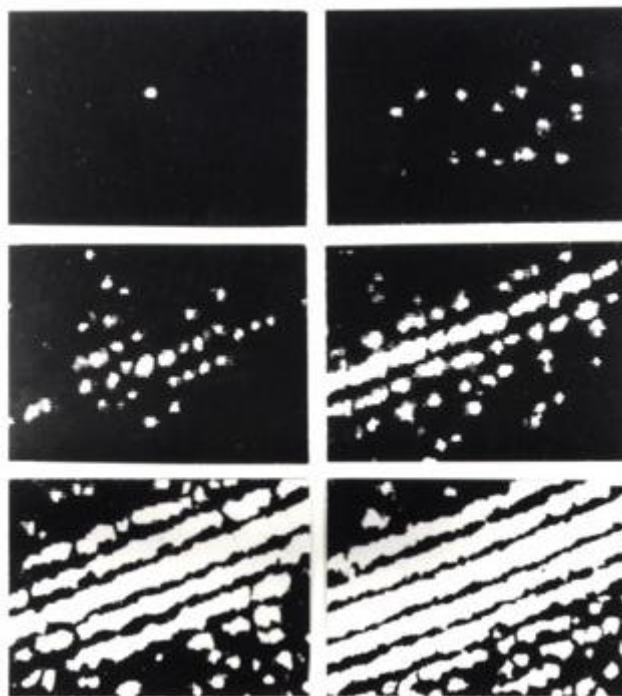


图3：双缝干涉实验-电子

电子单缝实验的结果如图 3 中的 (b)，曲线 p_1 、 p_2 与水波和子弹时一致。然而，电子双缝实验的结果 p 却是与水波的一样，出现了干涉条纹！

这个结果令经典物理学家们感到意外，因为，实验中的电子，和机枪发射子弹一样，是由电子枪一个一个发射出去的。因为在经典物理中，我们认为电子是粒子。既然是粒子，它的宏观轨道行为，应该和子弹没有实质的差别。双缝实验时，虽然两条缝都是打开的，但是每一个电子，应该象一个子弹那样，只能通过其中的一条缝到达屏幕。这样，结果就应该和子弹的结果一样，应该属于非相干叠加。

实验观察结果也显示，电子的确是像子弹那样，一个一个到达屏幕的，如下图所示，对应于到达屏幕的每个电子，屏幕上出现一个亮点。随着发射的电子数目的增加，亮点越来越多，越来越多……。当亮点多到不容易区分的时候，接收屏上显示出了确定的干涉图案。这是怎么一回事呢？这干涉从何而来？从电子双缝实验，我们会得出一个貌似荒谬的结论：一个电子同时通过了两条狭缝，然后，自己和自己发生了干涉！



让我们运用量子论的概念，来理解电子这种不同寻常的非经典行为：实验中的电子同时穿过了两条狭缝，不就是相似于我们在第一节中说过的：‘电子处于一种叠加态，既在位置 A，又在位置 B’ 的情形吗？作为量子论中的叠加态粒子，每个电子（或光子）真是像孙悟空一样，有分身术，一个孙大圣到了两条狭缝处，就变成了两个大圣，同时穿过了两条狭缝！然后，两个真假孙悟空又自己跟自己打起来了！争斗的结果，有可能是双赢，变出一个大孙悟空，打得屏幕上异常明亮；也有可能两败俱伤，真假悟空全死光，那时，就对应于屏幕上暗淡的地方。

因此，双缝实验的结果表明：电子的行为既不等同于经典粒子，也不等同于经典波动，它和光一样，既是粒子又是波，兼有粒子和波动的双重特性，这就是波粒二象性。

读者也许会说：每个电子到底是穿过那条狭缝过来的，我们应该可以测量出来呀。不错，物理学家们也是这样想的。于是，他们便在两个狭缝口放上两个粒子探测器，以判定真假孙悟空到底走的那一边？然而这时，奇怪的事又发生了：两个粒子探测器从来没有同时响过！那好呀，这说明还是只有一个孙悟空，并没有分身。实验者感觉松了口气，刚刚想思考思考这干涉条纹的事，回头一看屏幕，咦？哪有什么干涉条纹呀。物理学家们反复改进、多次重复他们的实验，却只感到越来越奇怪：无论我们使用什么先进测量方法，一旦想要观察电子到底通过哪条狭缝？干涉条纹便立即消失了！也就是说，

假孙悟空太狡猾了，他好像总能得知我们已经设置了抓他的陷阱，便隐身遁形不露面。悟空不用分身术，没有真假大圣间的战争，战场上也就没有了叠加和死伤，一切平静，实验给出经典的结果：和子弹实验的图像一模一样！后来，物理学家们给这种“观测影响粒子量子行为”的现象，取了一个古怪的名字，叫做：“波函数坍塌”。就是说：量子叠加态一经测量，就按照一定的概率，塌缩到一个固定的本征态，回到经典世界。而在没有被测量之前，粒子则是处于‘既是此，又是彼’的混合叠加不确定状态。因此，我们无法预知粒子将来的行为，只知道可能塌缩到某个本征态的概率。

以上解释使用的基本上是以波尔为代表的哥本哈根学派对量子理论的诠释。换言之，孙悟空具有分身而同时穿过两个洞的本领。但是，你无法得知他这功夫究竟是怎么回事，他绝不让你看到他玩分身术的详情，他只让你知道几个概率，上天派他到人间来掷骰子！

爱因斯坦不同意哥本哈根派的诠释，生气地说：“玻尔，上帝不会掷骰子！”

玻尔一脸不高兴：“爱因斯坦，别去指挥上帝应该怎么做！”

几十年后的霍金，看着历年的实验记录，有些垂头丧气地说：“上帝不但掷骰子，他还把骰子掷到我们看不见的地方去！”

上帝掷骰子吗？尽管以上霍金之言给出肯定的答案，但似乎至今仍然是个悬而未决的问题。