

## 走近量子纠缠系列之三：量子纠缠态

张天蓉<sup>†</sup>

2014-07-01 收到

<sup>†</sup> email: tianrong1945@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20140909

玻尔和爱因斯坦的第三次争论，本来应该发生在1933年的第七届索尔维会议上。但是，爱因斯坦未能出席这次会议，他被纳粹赶出了欧洲，刚刚风尘仆仆地到达美国，被聘为普林斯顿高等研究院教授。德布罗意和薛定谔出席了会议，但薛定谔没见到爱因斯坦暂时不想发言，德布罗意也不想单独与人辩论。这令玻尔大大松了一口气，会议上哥本哈根派唱独角戏，看起来量子论已经根基牢靠，论战似乎尘埃落定。

然而，爱因斯坦毕竟是个伟人，不是那么容易服输的。尽管他当时因战争而流离失所，未能参加索尔维会议，尽管到普林斯顿之后他的妻子身染重病，到了知天命年龄的爱因斯坦，仍然十分关注量子力学的进展，并更加深入地思考量子理论涉及的哲学问题。

笔者的老师和论文委员会成员之一的约翰·惠勒(John Archibald Wheeler)，曾经在一次聚会上，对笔者说过一段有关爱因斯坦的故事：1948年，普林斯顿的费曼在惠勒的指导下，完成了他的博士学位论文，他以惠勒早期的一个想法为基础，开创了用路径积分来表述量子力学的方法。当年，惠勒曾经将费曼的论文交给爱因斯坦看，并对爱因斯坦说：“这个工作不错，对吧？”又问爱因斯坦：“现在，你该相信量子论的正确性了吧！”爱因斯坦沉思了好一会儿，脸色有些灰

暗，怏怏不快地说：“也许我有些什么地方弄错了。不过，我仍旧不相信老头子(上帝)会掷骰子！”

再回到玻尔和爱因斯坦的第三次论战。当年的爱因斯坦，初来乍到普林斯顿，语言尚且生疏，生活不甚顺畅，因此，他不堪孤身独战，找了两个合作者，构成了一个被物理学家们称为不是十分恰当的组合。Boris Podolsky 和 Nathan Rosen 是爱因斯坦在普林斯顿高等研究院的助手。1935年3月，*Physics Review* 杂志上发表了他们和爱因斯坦共同署名的EPR论文。文章中描述了一个佯谬，之后，人们就以署名的三位物理学家名字的第一个字母命名，称为“EPR佯谬”<sup>[1]</sup>。

爱因斯坦等人在文中构想了一个思想实验，意为在现实中无法做，或难以做到，而使用想象力进行的实验。EPR原文中使用粒子的坐标和动量来描述由此思想实验而导致的所谓EPR佯谬，其数学表述非常复杂。后来，博姆用电子自旋来描述，就简洁易懂多了。EPR论文中涉及到“量子纠缠态”的概念。这个名词当时还尚未被爱因斯坦等3位作者采用。“纠缠”的名字是薛定谔在EPR论文之后不久，得意洋洋地牵出他那只可怖的猫时候，第一次提到的<sup>[2]</sup>。因此，我们首先解释一下，何谓量子纠缠态？

读者应该还记得我们解释过的“量子叠加态”。叠加态这个概念一直贯穿在这个系列文章中，从薛定

谔的猫，到双缝实验中似乎同时通过两条缝的单个电子，不都是这个匪夷所思的“叠加态”在作怪吗？不过，此文之前对叠加态的解释，都是针对一个粒子而言的。如果把叠加态的概念用于两个以上粒子的系统，就更产生出来一些怪之又怪的现象，那些古怪行为的专利，就该归功于既叠加又纠缠的“量子纠缠态”。

比如，我们考虑一个两粒子的量子系统。两个粒子组成的系统，不外乎两种情况：一种是两个粒子互不干扰和耦合，各自遵循自己的规律。这种情况下，整个系统的状态可以写成两个粒子的状态的乘积。而每个粒子的状态，一般来说，就自旋而言，是自旋 $|上\rangle$ 和自旋 $|下\rangle$ 按一定概率分布构成的叠加态。这种情况下的系统，可看作是由两个独立的单粒子组成，除了分别都具有叠加态的性质之外，没有产生什么有意思的新东西。另一类情况则非常有意思，那就是当两个粒子互相关联，整个系统的状态无法写成两个粒子状态乘积的时候。我们借用“纠缠”这个词来描述两个粒子之间的互相关联。也就是说，这种情形下，两个粒子的叠加态“互相纠缠”在一起，使得测量结果互相影响，即使是当两个粒子分开到很远很远的距离之时，这种似乎能瞬间互相影响的“纠缠”照样存在。

爱因斯坦等三人在他们提出的



图1 玻尔和爱因斯坦(摄于1925年)

思想实验中,描述了一个不稳定的大粒子衰变成两个小粒子(A和B)的情况,两个小粒子分别向相反的两个方向飞出去。假设粒子有两种可能的自旋,分别是 $|上\rangle$ 和 $|下\rangle$ ,那么,如果粒子A的自旋为 $|上\rangle$ ,粒子B的自旋便一定是 $|下\rangle$ ,才能保持总体守恒,反之亦然。这时我们说,这两个粒子构成了量子纠缠态。

两个粒子A和B朝相反方向飞奔,它们相距越来越远,越来越远……。根据守恒定律,无论相距多远,它们应该永远是 $|上\rangle|下\rangle$ 关联的。两边分别由观察者Alice和Bob对两个粒子进行测量。根据量子力学的说法,只要Alice和Bob还没有进行测量,每一个粒子都应该处于某种叠加态,比如说, $|上\rangle$ 、 $|下\rangle$ 各为50%概率的叠加态。然后,如果Alice对A进行测量,A的叠加态便在一瞬间坍缩了,比如,坍缩成了 $|上\rangle$ 。现在,问题就来了:既然Alice已经测量到A为 $|上\rangle$ ,因为守恒的缘故,B就一定要为 $|下\rangle$ 。但是,此时的A和B之间已经相隔非常遥远,比如说几万光年吧,按照量子力学的理论,B也应该是 $|上\rangle$ 和 $|下\rangle$ 各一半的概率,为什么它能够做到总是选择 $|下\rangle$ 呢?除非A粒子和B粒子之间有某种方式及时地“互通

消息”?即使假设它们能够互相感知,那也似乎是一种超距瞬时的信号!而这超距作用又是现有的物理知识不容许的。于是,这就构成了佯谬。因此,EPR的作者们洋洋得意地得出结论:玻尔等人对量子论的几率解释是站不住脚的。

爱因斯坦最得意的时刻,莫过于难倒了玻尔这个老朋友!他洋洋自得地倒在躺椅上,双脚架在前方的矮茶几上,将左手握的烟斗叼在口里,瞪着一对孩童般天真的大眼睛,像是不经意地望着身旁略显困惑的玻尔,见图1。

不过,此一时彼一时!这时的玻尔,已经知己知彼、老谋深算。他深思熟虑之后,很快就明白了,立刻上阵应战。玻尔知道,爱因斯坦的思路完全是经典的。爱因斯坦总是认为有一个离开观测手段而存在的实在世界。这个世界图像是和玻尔代表的哥本哈根派的“观测手段影响结果”的观点完全不一致的。玻尔认为,微观的实在世界,只有和观测手段连起来讲才有意义。在观测之前,谈及每个粒子的自旋是 $|上\rangle$ 或 $|下\rangle$ 没有任何意义。另一方面,因为两个粒子形成了一个互相纠缠的整体,只有波函数描述的整体才有意义,不能将其视为相隔甚远的两个分体,既然只是协调相关的一体,它们之间无需传递什么信息!因此,EPR佯谬只不过是表明了两派哲学观的差别:爱因斯坦的“经典局域实在观”和玻尔一派的“量子非局域实在观”的根本区别。

当然,哲学观的不同是根深蒂

固、难以改变的。爱因斯坦绝对接受不了玻尔的这种古怪的说法,即使在之后的二三十年中,玻尔的理论占了上风,量子论如日中天,它的各个分支高速发展,给人类社会带来了伟大的技术革命,爱因斯坦仍然固执地坚持他的经典信念,反对哥本哈根对量子论的诠释。

为了加深对纠缠态的理解,我们再用如图2所示的掷骰子的例子进一步说明两个粒子的“纠缠”。纠缠着的粒子,就像从图2那个机器中发射出来的骰子。这儿用骰子来比喻叠加态中的粒子。我们这个能发射成对骰子的机器很特别,这些成对的骰子分别朝两条路(这儿所谓的“路”到底是什么,铁管?空气?我们也不予考究)射出去,互相分开越来越远;并且,每个骰子在其各自的路径上不停地随机滚动,它的数值不定,是1—6中的一个,每个数值的几率为六分之一。图中也用Alice和Bob来代表两个不同的观察者,如果Alice和Bob在相距很远的地方分别观察这两路骰子,会得到什么结果呢?

首先,他们如果只看自己这一边的观测数据,每个人都是得到一连串的1到6之间的随机序列,每个数字出现的几率大约等于六分之一,这丝毫不令人奇怪,这正是我们单独多次掷一个骰子时的经验。但是,当Alice和Bob将他们两人的观测结果拿到一起来比较的话,就会看出点奇怪之处了:在他们同时观测的那些时间点,两边的骰子所显示的结果总是互相关联的(这种情况下,关联意味着“相等”),如果Alice看到的结果是6,Bob看到的也是6;如果Alice看到的结果是4,Bob看到的也是4……

量子力学中的纠缠态,就和上

面例子中的一对骰子的情况类似。换言之，量子纠缠态的意思就是，两个粒子的随机行为之间，发生了某种关联。上面例子中的关联是“结果相同”，但实际上也可以是另外一种方式，比如说，两个结果相加等于7：如果Alice看到的结果是6，Bob看到的的就是1；如果Alice看到的的结果是4，Bob看到的的就是3……。只要有某种关联，我们就说这两个粒子互相纠缠。

刚才谈到过的约翰·惠勒，曾经与玻尔和爱因斯坦在一起工作过，被人称为“哥本哈根学派的最后一位大师”。惠勒也是“黑洞”一词的命名者。学物理的也许记得他和他两个学生合写的那部大块头著作：《引力论》(Gravitation)。此书洋洋洒洒1279页，拿起来像块大砖头，是一部既学术严谨又风格诙谐的巨著。

惠勒是在2008年96岁高龄时去世的。难能可贵的是，90多岁高龄的他还在继续思考量子力学中的哲学问题。去世后，人们发现他的本子上还留有95岁时写下的物理研究笔记。

惠勒对量子论的贡献非同一般。上世纪80年代初期，笔者在德州奥斯汀大学时，有幸与惠勒博士在一起工作，并准备和翻译当时他去中国访问的讲稿，那篇讲稿是基于他的一篇文章*Law without Law*，后来，此讲稿由中国科学技术大学的方励之编著，1982年出版，取名为《物理学和质朴性——没有定律的定律》<sup>[3]</sup>。

也许正是在晚年时思考了太多有关量子力学的哲学问题，惠勒在谈话中经常会冒出几句哲理深奥的话语，刚才说的演讲稿的标题就是一例：《没有定律的定律》。此外，

他还说过“没有质量的质量”、“没有规律的规律”等意味深长的妙句，发明了“黑洞”、“真子(geon)”、“量子泡沫”等使人遐想联翩的科学名词。记得惠勒曾引用玻尔的话说，“任何一种基本量子现象只在其被记录之后才是一种现象”，其意思正代表了哥本哈根派的观点！

在笔者1983年对惠勒教授的一次访谈中，重视教育的惠勒谈到了玻尔当年的研究所及他个人的一些教育理念<sup>[4]</sup>。惠勒说：“……早期的玻尔研究所，楼房大小不及一家私人住宅，人员通常只有5个，但玻尔却不愧是当时物理学界的先驱，叱咤着量子理论的一代风云。在那儿，各种思想的新颖和活跃，在古今的研究中是罕见的。尤其是每天早晨的讨论会，既有发人深思的真知灼见，也有贻笑大方的狂想谬误，既有严谨的学术报告，也有热烈的自由争论。然而，所谓地位的显赫、名人的威权、家长的说教、门户的偏见，在那斗室之中，却没有任何立足之处”。“没有矛盾和佯谬，就不可能有科学的进步。约丽斑驳的思想火花往往闪现在两个同时并存的矛盾的碰撞切磋之中。因此我们教学生、学科学，就得让学生有‘危机感’，学生才觉得有用武之地。否则，学生只看见物理学是一座完美无缺的大厦，问题却没有了，还研究什么呢？从这个意义上

来说，不是老师教学生，而是学生‘教’老师。”

“对爱因斯坦来说，古怪的并协性完全不可接受。”谈到玻尔和爱因斯坦的量子力学之争时，惠勒说，“很难再找到其他先例能和这场论战相比拟，它发生在如此伟大的两个人之间，经历了如此长久的时间，涉及如此深奥的问题，却又是在如此真挚的友谊关系之中……”。

在《物理学和质朴性》讲稿中，惠勒提到他在1979年为纪念爱因斯坦诞辰100周年的普林斯顿讨论会上，提出的所谓“延迟选择实验”(delayed choice experiment)。这个“延迟选择实验”，是我们讨论过的“电子双缝干涉”实验的一个令人吃惊的新版本。在新构想中，惠勒戏剧化地将实验稍加改变，便可以使得实验员能在电子已经通过双缝之后，作出“延迟决定”，从而改变电子通过双缝时的历史！惠勒曾经用一个龙图来说明这一点。这个

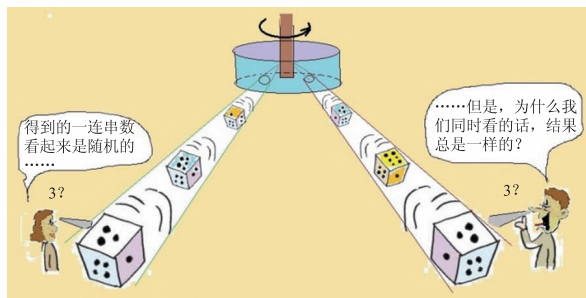


图2 纠缠的骰子

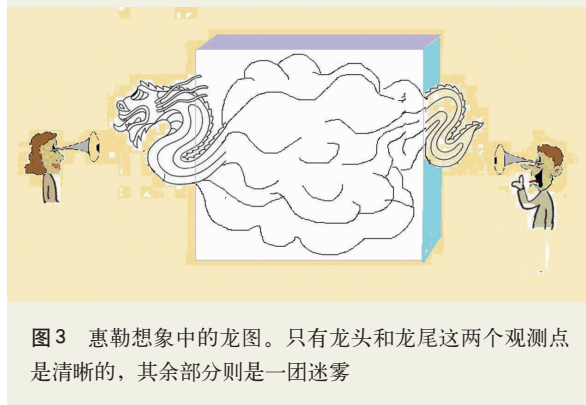


图3 惠勒想象中的龙图。只有龙头和龙尾这两个观测点是清晰的，其余部分则是一团迷雾



龙图也可以用费曼的路径积分观点来理解：龙的头和尾巴对应于测量时的两个点，在这两点测量的数值是确定的。根据量子力学的路径积分解释，两点之间的关联可以用它们之间的所有路径贡献的总和来计算。因为要考虑所有的路径，因此，龙的身体就将是糊里糊涂的一

片(图3)。

在惠勒的“延迟选择实验”构想提出5年后，马里兰大学的卡洛尔·阿雷(Carroll O Alley)实现了这个延迟选择实验，其结果和玻尔一派预言的一样，和爱因斯坦的预言相反！后来，慕尼黑大学的一个小组也得到了类似的结果。

惠勒提出“延迟选择实验”时，已经到了1979年。我们先回到1964年。出于捍卫爱因斯坦EPR论文的初衷，追寻爱因斯坦之“实在论”之梦，另一位杰出的英国物理学家，约翰·斯图尔特·贝尔(John Stewart Bell)，带着他的“贝尔不等式”，潇洒登场。

参考文献

[1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Phys. Rev., 1935, 47: 777  
 1935, 23: 807—812; 823—828; 844—849  
 [2] Schrödinger E. Naturwissenschaften, [3] 方励之. 物理学和质朴性——没有定律的定律. 安徽科学技术出版社, 1982  
 [4] 张天蓉. 科学学与科学技术管理, 1985, (2): 19



**OVC EXPO 2014**  
 第11届“中国光谷”  
 国际光电子博览会暨论坛  
 2014年11月6-8日 武汉国际博览中心

世界光谷 全球共享

### 一张图读懂武汉光博会

**世界光谷** World Optics Valley



世界级光纤光缆生产基地  
 中国领先光电器件研发生产基地  
 中国领先激光产业基地

**国际交流** International Communication



- 俄德美英等16个境外展团参展
- 德国展览委员会推荐展会
- 亚洲ACP合作伙伴
- 香港SMT CHINA研讨会主办单位
- 澳大利亚ATIC合作伙伴
- 美国OFC合作伙伴
- 英中协会合作伙伴

**研发先锋** R&D Pioneer

58

所高等  
院校

71

个国家级  
科研院所

700

多个技术  
开发机构

**光博11年** OVC EXPO 11th

从产业、研发到市场,世界光谷,邀您共享

30000名专业观众      50000㎡展出面积




第11届“中国光谷”国际光电子博览会暨论坛组委会

官网预登记 经组委会确认 即送展会期间住宿 [www.ovcexpo.com.cn](http://www.ovcexpo.com.cn)

参观热线: **027-87115259** 参展热线: **027-87115260**

微信扫一扫  
马上有房住

