

# 走近量子纠缠系列之四 帮倒忙的贝尔

张天蓉<sup>†</sup>

2014-09-28收到

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

DOI: 10.7693/wl20141108

上一讲中提到的约翰·惠勒(John Wheeler, 图1)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



图1 John Wheeler (1984年笔者摄于美国德克萨斯州立大学奥斯汀分校)



图2 John Stewart Bell(图片来自网络 <http://www.dipankarhome.com/>)

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。

惠勒不仅构想了“延迟选择实验”, 也是提出验证光子纠缠态实验的第一人。他在 1948 年提出, 由正负电子对湮灭生成的一对散射光子应该具有两个不同的自旋, 即如果一个为左旋, 另一个就应该是右旋。也就是说, 这一对光子互相纠缠。一年之后, 吴健雄和萨科诺夫成功地完成了这个实验, 证实了惠勒的预言, 生成了历史上第一对互相纠缠的光子。

物理理论是必须用实验来验证的, 这就是为什么诸如玻尔、爱因斯坦、惠勒这些大理论物理学家都非常热衷于提出一个又一个思想实验的原因。量子纠缠态近年来宏图大展, 也是以实验中的不断突破为基础。这个突破起始于英国物理学家约翰·斯图尔特·贝尔(John Stewart Bell, 图2), 他用著名的“贝尔不等式”将 EPR 佯谬中的思想实验推进到一个切实可行的物理实验。

贝尔于 1928 年出生在北爱尔兰的一个工人家庭, 那是玻尔和爱因斯坦索尔维会上首次开战后的第二年。也许这是上帝在冥冥之中派来的一个将来能够突破“玻爱世纪之争”僵局的使者吧。小时候的贝尔一头红发, 满脸雀斑, 为人诚实, 聪明好学, 长大后则迷上了理

论物理。他严谨多思, 意志顽强, 不屈不挠, 敢作敢当, 对疑难问题一头扎下去, 不弄个水落石出绝不罢休。

然而, 量子论的理论研究只是贝尔的业余爱好。他多年供职于欧洲高能物理中心(CERN), 做与加速器设计工程有关的工作, 与理论物理, 特别是量子论的理论基础的工作, 相距甚远。贝尔只能利用业余时间来研究理论物理。正是这一业余研究使贝尔留名于物理史。

我们再回到玻爱之争的顶峰——EPR 佯谬的问题上来。当时玻尔写文章回击了爱因斯坦等人的质疑, 世纪争论似乎平息了, 哥本哈根诠释成为量子论的正统解释。再说, 既然问题是出在两大巨头不同的哲学观上, 便引不起多少人的兴趣了。大多数科学家已经很少关心他们的争执。量子论的成功有目共睹, 科技革命的果实每个人都乐于分享, 每天早上太阳照样从东方升起, 谁也看不见波函数如何坍塌, 又有谁管那些微观世界中被理论物理学家们描述得神乎其神的奇怪的量子现象呢? 玻尔代表的量子论的正统解释也有其道理, 当我们没有去进行量子测量, 没有抓住薛定谔的猫之前, 讨论这只猫到底是死是活也许没有什么意义。反正只要在进行测量时, 能知道它是死的还是活的就行了!

当然，也总有那么一些脑袋停不下来的理论物理学家仍然在冥思苦想这个问题：应该如何解释量子论中诡异的相干性和纠缠性？在此，我们顺便用几句话简单总结一下前几讲中提到过的有关知识。相干性涉及光和粒子的波粒二相性，最简单的例子是双缝干涉实验；纠缠性是EPR论文中提出的，涉及多个粒子的量子纠缠态。这是了解量子论诡异性的两个不同层次。

双方的争执为什么三番五次总不能平息？关键问题是：爱因斯坦这边坚持的是一般人都具备的日常生活中得来的经典常识，玻尔一方却更执着于微观世界的观测结果。那么，既然爱因斯坦不同意玻尔的几率解释，有人就总想找出别的解释，既能照顾到爱因斯坦的“经典情结”，又能导出量子论的结论。这其中，支持度较多的有“多世界诠释”和“隐变量诠释”。

可以再借用薛定谔的猫来简述“多世界诠释”。持这种观点的人认为，两只猫都是真实的。有一只活猫，有一只死猫，但它们位于不同的世界中。当我们向盒子里看时，也就是说进行量子测量的时候，整个世界立刻分裂成它自己的两个版本。这两个版本在其余的各个方面都是全同的。唯一的区别在于，在其中一个版本中，原子衰变了，猫死了；而在另一个版本中，原子没有衰变，猫还活着。

惠勒、霍金、费曼、温伯格等都在一定程度上支持过“多世界诠释”。据一些简单的统计调查，支持“多世界诠释”的物理学家似乎越来越多。有人认为，它已经在逐渐代替“哥本哈根诠释”。但是，也有许多物理学家不喜欢它，包括爱因斯坦，有人诙谐地说：“我不能相信，

仅仅是因为看了一只老鼠一眼，就使得宇宙发生了剧烈的改变！”的确，量子力学只涉及到微观粒子的问题，要解释它，大可不必牵动整个宇宙！这其中的诡异性，恐怕比“哥本哈根诠释”，有过之而无不及。因此，我们也回避回避，暂时不在这里讨论它。

贝尔当初所热衷的，是“隐变量”的问题。

在前面的“玻爱之争”一讲中，我们用掷硬币的例子来说明“上帝掷骰子”与“人掷骰子”的区别。上抛的硬币，实际上是完全遵循确定的力学规律的，它之所以表现出随机性，是因为我们不了解硬币从手中飞出去时的详细信息。也就是说，我们放弃了一些“隐变量”：硬币飞出时的速度、角速度、方向、加速度……等等。如果忽略外界的影响，把这些隐变量全都计算进去，我们可以说上抛硬币掉回原处时的状态是在离开手掌的那一刻就决定了的！

现在，爱因斯坦等人提出的EPR佯谬，是否也是因为我们忽略了某些隐变量的原因呢？贝尔在感情上更偏向爱因斯坦，相信爱因斯坦的观点：既然两个互相纠缠的粒子，当它们被测量仪器观测到的那一刹那，是不可能瞬时超距地传递信息的，那么，它们被测量时候的状态，就应该是在它们产生之时，或者说互相分开的那一刻，就已经决定了。这就和我们掷硬币的情形类似，随机性来源于我们尚未认识的某些隐变量，而不是像玻尔所认为的那样，后来被观测的那一刻，才临时随机选择而坍塌成某个量子态的！因此，贝尔下决心要用实际行动来支持伟人爱因斯坦，要研究这其中潜藏着

的隐变量！

可是，他一开始就碰到了高手。早在1932年，冯·诺依曼(J. Von Neumann, 图3)在他的著作《量子力学的数学基础》中，为量子力学提供了严密的数学基础，其中捎带着做了一个隐变量理论的不可能性证明。他从数学上证明了，在现有量子力学适用的领域里，是找



图3 J.Von Neumann (图片来自网络  
[http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_von\\_Neumann](http://en.wikipedia.org/wiki/John_von_Neumann))



图4 Grete Hermann(图片来自网络  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Grete\\_Hermann](http://en.wikipedia.org/wiki/Grete_Hermann))

不到隐变量的!

冯·诺依曼何等人物啊!天才神童,计算机之父。这位数学大师一言既出,二十年内量子论的隐变量理论无人问津。还好,当贝尔在60年代碰到这堵高墙的时候,前面已经有人为他开路:美国物理学家戴维·玻姆(David Bohm)在50年代的工作,为冯·诺依曼的隐变量不可能性证明提供了一个实际的反例。而且,玻姆还将原来EPR论文中非常复杂的测量位置和动量的实验,简化成了测量“电子自旋”的实验。

顽强的贝尔虽然是“业余”理论物理学家,却有“敢摸老虎屁股”的精神。他仔细研究了冯·诺依曼有关“隐变量不可能性证明”的工作后,找出了大师在数学和物理的交接之处,有一个小小的漏洞。

冯·诺依曼在他的证明中,用了一个假设:“两个可观察量之和的平均值,等于每一个可观察量平均值

之和”。但是,贝尔指出,如果这两个观察量互为共轭变量,也就是说,当它们满足量子力学中的不确定性原理的话,这个结论是不正确的。

这儿可以插入一段有趣的历史。贝尔是在1964年才指出冯·诺依曼的错误的。其实,早在1935年,有一个鲜为人知的德国女数学家格雷特·赫尔曼(Grete Hermann, 1901—1984,图4)就指出了天才数学大师的这点失误。格雷特·赫尔曼是享有“代数女皇”之称的著名数学家艾米·诺特(Emmy Noether)在哥根廷大学的第一个学生。她早期对量子力学的数学哲学基础作了重要的贡献。1935年,格雷特在一篇文章中提出对冯·诺依曼有关“隐变量不可能性证明”的驳斥。但遗憾的是,格雷特·赫尔曼的文章长期被忽略。即使贝尔1964年提出冯·诺依曼有关隐变量问题的错误之后,也没有人想到当年格雷特·赫尔曼的那篇文章。又过了10年,直到

1974年,格雷特·赫尔曼的原文已经发表了将近四十年之后,才被另一位数学家Max Jammer发掘出来,为这位默默无闻的数学家正名。由此一事,充分显示了名人威力之强大。

第二次世界大战开始后,格雷特·赫尔曼积极参与了反纳粹组织的各种活动。后来几十年,她也不再涉猎数学和物理,而将她的人生兴趣转向了政治,此是与主题无关的后话。

确认了数学大师的这个错误之后,贝尔探索隐变量的道路畅通了。于是,他开始构想他的理论,以此来支持他的偶像爱因斯坦,企图将量子物理的图像搬回到经典理论的大厦中!不过,他万万没料到,他最终是帮了爱因斯坦的倒忙,反过来证明了量子力学的正确性!首先,在下一讲中,我们稍微用点简单的数学,扼要地说明贝尔是如何得到他的著名的不等式的。

### 新型磁强计实现原子尺度的结构分辨



核磁共振在物理、生物及化学材料等领域具有重要的应用,而当前实现单分子核磁共振是此领域的一大挑战。中国科学技术大学杜江峰研究组及其合作者利用掺杂金刚石中氮-空位(NV)固态单电子自旋量子干涉仪,成功在室温大气环境下实现了单核自旋对的探测及其原子尺度的结构分析。具体而言,作者将动力学解耦序列作用在NV上,成功探测到距离其约1 nm处的单 $^{13}\text{C}$ - $^{13}\text{C}$ 对,刻画出两个核自旋的相互作用,并且以原子尺度分辨率解析出自旋对的空间取向。封面图为NV探针观测到金刚石中两个共键的 $^{13}\text{C}$ 原子的艺术化表现,其中NV在绿色激光激发下会发射荧光(右下的发光格点),蓝色原子即为同位素碳原子 $^{13}\text{C}$ 。更多信息请参考*Nat. Phys.*, 2014, 10: 21。

(中国科学技术大学 石发展、杜江峰、王国燕、周荣庭 供稿)