

量子力学的随机性并没有被实验推翻

张文卓

(中国科学院量子信息与量子科技创新研究院/中国科学技术大学上海研究院 201315)

近日,一则名为“薛定谔的猫终于有救了,Nature 研究首次观测到量子跃迁过程”的新闻报道刷屏。诸如“耶鲁大学实验推翻量子力学随机性”“爱因斯坦又蒙对了”等等标题党纷纷出现,仿佛战无不胜的量子力学一夜之间阴沟翻船一样,很多文青纷纷哀叹宿命论又回来了。然而,事实真的如此?还是报道偏差歪曲了论文本意?

1. 什么是量子力学随机性?

咱们先搞懂量子力学的随机性说的是什么,再看看这篇论文做了什么。

根据数理双修的大师冯·诺依曼的总结,量子力学有两个基本的过程,一个是按照薛定谔方程确定性地演化,另一个是因为测量导致的量子叠加态随机塌缩。薛定谔方程是量子力学核心方程,它是确定性的,跟随机性无关。那么量子力学的随机性只来自于后者,也就是来自于测量。

这个测量随机性正是让爱因斯坦最无法理解的地方,他用了“上帝不会掷骰子”这个比喻来反对测量随机性,而薛定谔也假想了测量一只猫的生生死死叠加态来反对过它。

但是无数的实验证实,去直接测量一个量子叠加态,它的结果就是随机出现在其中一个本征态上(概率为叠加态中每个本征态的系数模平方),这就是量子力学最重要的测量问题。为了解决这个问题,诞生了量子力学多个诠释,其中主流的三个诠释为哥本哈根诠释、多世界诠释和一致历史诠释。

哥本哈根诠释认为,测量会导致量子态塌缩,即量子态瞬间被破坏,随机投影到一个本征态上;多世界诠释觉得哥本哈根诠释太玄了,于是就搞了个更玄的,认为每一次测量就是世界的一次分裂,所有本征态的结果都存在,只是互相完全独立(正交),干扰不到对方,我们只是随机地恰好在某一个世界当中;一致历史诠释引入了量子退相干过程,解决了从叠加态到经典概率分布的问题。但是在选择哪个经典概率上,还是回到了哥本哈根诠释和多世界诠释的争论。

从逻辑上看,多世界诠释和一致历史诠释的结合对解释测量问题似乎是比较完美的,多个世界组成一个总的叠加态,即保留了“上帝视角”的确定性,又保留了单一世界视角的随机性。但物理学是以实验为准的科学,这些诠释预言了同样的物理结果,相互之间不可证伪,那么物理意义就是等价的,所以物理学界还是主要采用哥本哈根诠释,即用塌缩(collapse)这个词代表测量量子态的随机性。

2. 耶鲁大学的论文说了什么?

那么我们再看看耶鲁大学这篇 Nature 论文^①做了什么。先铺垫一个量子力学知识,那就是量子跃迁是一个量子叠加态完全按照薛定谔方程演化的确定性过程^②,即在基态 $|G\rangle$ 上的概率幅按照薛定谔方程连续地转移到激发态 $|E\rangle$ 上,再连续地转移回来,形成一个振荡(频率称为拉比频率),它属于冯·诺依曼总结的第一类过程。

这篇论文测量的就是这样一个确定性的量子跃迁,所以得到确定性结果毫无意外。文章的卖点在于,怎样不让这个测量破坏掉原本的叠加态,或者怎样让量子跃迁不会因突如其来的测量而停止。这个并不是多么神秘的技术,而是量子信息领域目前广泛应用的一种“非破坏测量”方法。

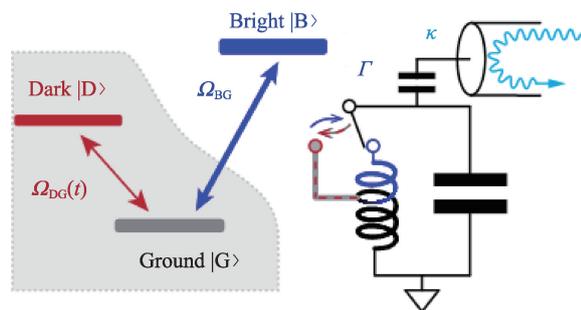


图1 (图片来源: *Nature* 570, 200-204 (2019))

我们来看这篇 *Nature* 论文里的实验用到的能级图,是一个三能级系统, $|G\rangle$ 是基态, $|D\rangle$ 是一个激发态,称为暗态(不易受影响的态), $|B\rangle$ 是亮态(易操作的态)。这个实验用的是超导电路人工构建的三能级系统,信噪比相比真实的原子能级还要差很多。

实验用到的非破坏测量技术,就是把原本基态 $|G\rangle$ 的粒子数(这个实验用的是超导电流)分出一点点,让它和 $|D\rangle$ 形成叠加态,同时 $|G\rangle$ 剩下的粒子数继续和 $|B\rangle$ 叠加,这两个叠加态几乎是独立的,互相影响很小。通过微波强度控制两个跃迁拉比频率,就能让概率幅在 $|B\rangle$ 接近 1 时,在 $|D\rangle$ 上也接近 1。这时测量 $|G\rangle$ 和 $|B\rangle$ 的叠加态,会发现粒子数塌缩在了 $|B\rangle$ 上面。此时尽管 $|G\rangle$ 和 $|D\rangle$ 的叠加态即使没有塌缩,也能知道概率幅都在 $|D\rangle$ 上面,如果再测量 $|G\rangle$ 和 $|D\rangle$ 的叠加态结果就是粒子数塌缩在了 $|D\rangle$ 上。所以测量 $|G\rangle$ 和 $|B\rangle$ 的叠加态本身还是个引起随机塌缩的测量,但这个测量对于 $|G\rangle$ 和 $|D\rangle$ 的叠加态来说却有一定概率可以不引起叠加态的塌缩,但是能够知道 $|G\rangle$ 和 $|D\rangle$ 的叠加态演化到什么程度了,这就成为了相对 $|G\rangle$ 和 $|D\rangle$ 叠加态的非破坏测量。

如果这个三能级系统只有一个粒子,那么塌缩在 $|B\rangle$ 上的粒子数为 1 时,塌缩在 $|D\rangle$ 和 $|G\rangle$ 上的粒子

数为零。但这个三能级系统是用超导电流人工制备出来的,相当于有很多电子可用。当一些电子塌缩在 $|B\rangle$ 上之后,仍然有一些电子处于 $|D\rangle$ 和 $|G\rangle$ 的叠加态。所以多粒子系统也保证了这个非破坏测量实验可以进行。这和冷原子实验非常类似,即大量原子具备相同的能级系统,叠加态的概率可以反映在相对的原子数上。

3. 上帝依然掷骰子

用一句话总结,这篇 *Nature* 论文里用了实验技巧去非破坏测量一个确定性过程,主动避开了能导致这个过程出现随机结果的测量,一切都符合量子力学预言,对量子力学的测量随机性没有任何影响。所以爱因斯坦没猜对,上帝依然掷骰子。

这篇 *Nature* 论文只是又一次验证了量子力学的正确,为什么会引起这么大的误解? 这里我不得不吐槽一下。这与作者们在摘要和引言里立的错误靶子脱不了干系。估计是为了制造大新闻,他们找到了玻尔在 1913 年提出的量子跃迁瞬时性的想法做靶子^③,但这个想法早在 1925 年海森堡方程和 1926 年薛定谔方程提出(也就是量子力学正式建立)之后就被否定了,他们在论文里也明确说了实验其实验证了薛定谔关于跃迁是连续确定演化的观点。把玻尔搬出来,很可能是为了营造一个和爱因斯坦对立的效果,延续世纪论战,多博取关注。但是在量子跃迁这个问题上,是玻尔最早的想法错



图2 玻尔(左)和爱因斯坦(右)(图片来源: Wikimedia Commons)

了,海森堡和薛定谔对了,不关爱因斯坦什么事。

这篇论文的英文报道^④的作者是 Phillip Ball,他尽管写过很多优秀的科学新闻,但这次大概是碰到了知识盲点,整个报道写的故弄玄虚,没抓到重点,还把海森堡拉去陪玻尔一起给瞬时跃迁背锅(莫非不知道海森堡方程和薛定谔方程实质等价?)。然后中文媒体翻译过来,其他自媒体再自由发挥一通,就变成了科学传播的“车祸现场”。

笔者几年前在丹麦 Aarhus 大学物理系做博士后时(Aarhus 物理系是大概一百年前从哥本哈根大学物理系——即现在的玻尔研究所分出来的,这样算也能和玻尔扯上点渊源),也做过一个监视超冷原子相变的量子非破坏测量实验,但是不敢像耶鲁这个团队这样立靶子,文章后来发在了的影响因子很普通的 JPB。笔者认为量子技术既然瞄准的是第二次信息革命,未来的应用才决定其价值,而不应

该沾染为了发顶级期刊而哗众取宠的风气。这样做即使一时受到关注,但很快还是会被历史埋没。

参考文献

- ① Z. K. Mineev, et. al., To catch and reverse a quantum jump mid-flight, Nature 570, 200-204 (2019)
- ② 一般的高等量子力学教材中都有专门的章节讲怎么用含时薛定谔方程描述量子跃迁,在量子光学教材中有更细节的光与二能级原子相互作用的半经典模型,光学 Bloch 方程,全量子 J-C 模型等,无一例外都属于含时薛定谔方程。
- ③ N. Bohr, On the constitution of atoms and molecules. Part I. Binding of electrons by positive nuclei. Phil. Mag. 26, 1-25 (1913).
- ④ <https://www.quantamagazine.org/quantum-leaps-long-assumed-to-be-instantaneous-take-time-20190605/>

(本文转自:科普中国-科学辟谣, <https://piyao.kepuchina.cn/>)



科苑快讯

人工智能帮助瘫痪病人用意念“写字”

利用想象力的力量,研究人员使完全瘫痪的病人与外界交流的速度提高了将近1倍。

那些被“禁锢”的人——因中风或神经系统疾病而完全瘫痪的病人——难以与人交流,甚至连一句话都说不出来。

将电极植入参与运动的大脑部位,使一些瘫痪病人能够移动光标,通过他们的思想选择屏幕上的字母。用户每分钟可以输入39个字符,而这仍比自然手写慢3倍。

在新的实验中,一位颈部以下瘫痪的志愿者想象自己移动手臂写出字母表上的每个字母。这种大脑

活动有助于训练一种被称为神经网络的计算机模型来翻译指令,追踪他想象中的笔尖的预定轨迹以创造字母。

最终,计算机以每分钟66个字符的速度读出志愿者想象的句子,准确率约为95%,研究小组在美国神经科学学会(Society for Neuroscience)的年会上做了报告。

研究人员期望可以通过更多练习提高输入速度。随着技术的完善,他们也将利用自己的神经记录更好地理解大脑是如何计划和协调好精细运动的。

(高凌云编译自2019年10月23日 www.sciencemag.org)