

走近量子纠缠系列之一

薛定谔的猫

张天蓉*

2014-02-10收到

† email: tianrong1945@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20140407

本科普系列是想尽量使用通俗的语言，向公众介绍神秘奇妙的量子纠缠。要认识神秘的量子纠缠，首先要认识神秘的量子现象。不管学哪个行业，大概都听说过奇妙的量子现象。诸如测不准原理^[1]、薛定谔的猫^[2]之类，在日常生活中看起来匪夷所思的现象，却是千真万确存在于微观的量子世界中。

许多人将听起来有些诡异的量子理论视为天书，从而敬而远之。有人感叹说：“量子力学，太不可思议了，不懂啊，晕！”不懂量子力学，听了就晕，那是非常正常的反应。听听诺贝尔物理学奖得主、大物理学家费曼的名言吧。费曼说：“我想我可以有把握地讲，没有人懂量子力学！”^[3]量子论的另一创始人玻尔(Niels Bohr)也说过：“如果谁不为量子论而感到困惑，那他就没有理解量子论^[4]。”既然连费曼和玻尔都这样说，我等就更不敢吹牛了。因此，我们暂时不要奢望“懂得”量子力学。此一系列文章的目的是让我们能够多了解、多认识一些量子力学。也许不能“走进”，但却能“走近”。因为量子力学虽然神秘，却是科学史上最为精确地被实验检验了的理论，量子力学经历了100多年的艰难历史，发展至今，可说是到达了人

类智力征程上的最高成就。身为现代人，如果不曾了解一点点量子力学，就如同没有上过因特网，没有写过邮件一样，可算是人生的一大遗憾。

刚才提及量子现象时，说到了“薛定谔的猫”，我们的讨论可由此开始。

薛定谔(E. Schrödinger, 1887—1961, 图1)是奥地利著名物理学家、量子力学的创始人之一，曾获1933年诺贝尔物理学奖。在量子力学中，有一个最基本的描述原子、电子等微观粒子运动的薛定谔方程，就是以他而命名的。薛定谔生于维也纳，死于维也纳，但死后如愿被葬于阿尔卑巴赫(Alpbach)村，一个风景优美的小山村中。他



图1 薛定谔(摄于1933年)

的墓碑上刻着一个大大的量子力学中波函数的符号 ψ ，而在他曾经就学的维也纳大学主楼里，有一座薛定谔的胸像，那上面雕刻着著名的薛定谔方程： $i\hbar\psi = H\psi$

“薛定谔的猫”又是什么呢？它不是薛定谔家里的猫，而是薛定谔在一篇论文中提出的一个佯谬，也被称为“薛定谔佯谬”。薛定谔虽然创立了薛定谔方程，却非常不满意正统的哥本哈根诠释对波函数及叠加态的几率解释。于是，薛定谔便设计了一个思想实验，在这个实验中，他把量子力学中的反直观效果转嫁到日常生活中的事物上来，也就是说，转嫁到“猫”的身上，如此而导致了一个荒谬的结论。薛定谔想以此来嘲笑对手。

既然“薛定谔的猫”与叠加态有关，那么，首先我们需要了解，什么是叠加态？根据我们的日常经验，一个物体在某一时刻总会处于某个固定的状态。比如我说，女儿现在“在客厅”里，或是说，女儿现在“在房间”里。要么在客厅，要么在房间，这两种状态，必居其一。这种说法再清楚不过了。然而，在微观的量子世界中，情况却有所不同。微观粒子可以处于一种所谓叠加态的状态，这种叠加状态是不确定的。例如，电子有“上”、

* 张天蓉，女，美国德州奥斯汀大学理论物理博士，研究课题包括相对论、黑洞辐射、路径积分、激光等。退休前在美国加州Cadence公司任高级研究工程师。

“下”两种自旋本征态，犹如女孩可以“在”和“不在”房间。但不同之处是，女孩只能“在”或“不在”，电子却可以同时是“上”和“下”。也就是说，电子既是“上”，又是“下”。电子的自旋状态是“上”和“下”按一定几率的叠加。物理学家们把电子的这种混合状态，叫做叠加态。

总结一下，什么是叠加态呢？就好比是说，女儿“既在客厅，又在房间”，这种日常生活中听起来逻辑混乱的说法，却是量子力学中粒子所遵循的根本之道，不是很奇怪吗？聪明的读者会说：“女儿此刻‘在客厅’或‘在房间’，同时打开客厅和房间的门，看一眼就清楚了。电子自旋是上，或是下，测量一下不就知道了吗？”说得没错，但奇怪的是，当我们对电子的状态进行测量时，电子的叠加态不复存在，它的自旋坍缩到“上”，或是“下”，两个本征状态的其中之一。听起来好像和我们日常生活经验差不多嘛！但是，请等一等！我们说的微观行为与宏观行为之不同，是在于观测之前。即使父母不去看，女儿在客厅或房间，已成事实，并不以“看”或“不看”而转移。而微观电子就不一样了：在观察之前的状态，并无定论，是“既是……，又是……”的叠加状态，直到我们去测量它，叠加状态才坍缩成一个确定的状态(本征态)。这是微观世界中量子叠加态的奇妙特点。

尽管量子现象显得如此神秘，量子力学的结论却早已在诸多方面被实验证实，被学术界接受，在各行各业还得到各种应用，量子物理学对我们现代日常生活的影响无比巨大。以其为基础产生的电子学革

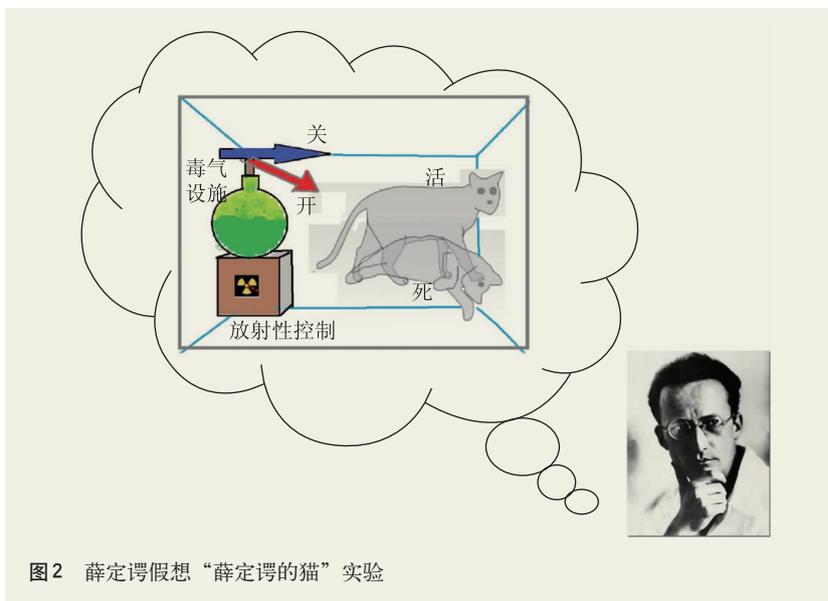


图2 薛定谔假想“薛定谔的猫”实验

命及光学革命将我们带入了如今的计算机信息时代。可以说，没有量子力学，就不会有今天所谓的高科技产业。

如何解释量子力学的基本理论，仍然是见仁见智，莫衷一是。这点也曾经深深地困扰着它的创立者们，包括伟大的爱因斯坦。微观叠加态的特点与宏观规律如此不同，物理学家(例如薛定谔)也想不通。于是，薛定谔在1935年发表了一篇论文，题为《量子力学的现状》，在论文的第5节，薛定谔编出了一个“薛定谔的猫”的理想实验，试图将微观不确定性变为宏观不确定性，微观的迷惑变为宏观的佯谬，以引起大家的注意。果不其然！物理学家们对此佯谬一直众说纷纭、争论至今。

以下是“薛定谔的猫”的实验描述：把一只猫放进一个封闭的盒子里，然后把这个盒子连接到一个装置，其中包含一个原子核和毒气设施(图2)。设想这个原子核有50%的可能性发生衰变。衰变时放射出一个粒子，这个粒子将会触发毒气设施，从而杀死这只猫。根据

量子力学的原理，未进行观察时，这个原子核处于已衰变和未衰变的叠加态，因此，那只可怜的猫就应该相应地处于“死”和“活”的叠加态。非死非活，又死又活，状态不确定，直到有人打开盒子观测它。

实验中的猫，可类比于微观世界的电子(或原子)。在量子理论中，电子可以不处于一个固定的状态($|上\rangle$ 或 $|下\rangle$)，而是同时处于两种状态的叠加($|上\rangle$ 和 $|下\rangle$)。如果把叠加态的概念用于猫的话，那就是说，处于叠加态的猫是半死不活、又死又活的。

量子理论认为：如果没有揭开盖子，进行观察，薛定谔的猫的状态是“死”与“活”的叠加。此猫将永远处于同时是死又是活的叠加态。这与我们的日常经验严重相违。一只猫，要么死，要么活，怎么可能不死不活、半死半活呢？别小看这一个听起来似乎荒谬的物理思想实验(gedankenexperiment，想象的实验)。它不仅在物理学方面极具意义，在哲学方面也引申了很多



图3 舞台剧《薛定谔的女朋友》演出时的剧照(左)和海报(右)

的思考。

谈到哲学，聪明的读者又要笑了，因为在古代哲学思想中，不乏这种似是而非、模棱两可的说法。这不就是辩证法的思想吗？你中有我，我中有你，一就是二，二就是一，合二而一，天人合一，等等，如此而已。此话不假，因此才有人如此来比喻“薛定谔的猫”：男女在开始恋爱前，不知道结果是好或者不好，这时，可以将恋爱结果看成好与不好的混合叠加状态。如果你想知道结果，唯一的方法是去试试看，但是，只要你试过，你就已经改变了原来的结果了！

无论从人文科学的角度如何来诠释和理解“薛定谔的猫”，人们仍然觉得量子理论听起来有些诡异。有读者可能会说：“你拉扯了半天，我仍然不懂量子力学啊！”还好，刚才我们已经给读者打了预防针，不是吗？没有人懂量子力学，包括薛定谔自己在内！薛定谔的本意是要用“薛定谔的猫”这个实验的荒谬

结果，来嘲笑哥本哈根学派对量子力学、对薛定谔方程引进的“波函数”概念的几率解释，但实际上，这个假想实验使薛定谔站到了自己奠基的理論的对立面上，难怪有物理学家调侃地说道：“薛定谔不懂薛定谔方程！”

薛定谔不仅对量子力学有巨大的贡献，他还写过一本生物学方面的书和许多科普文章。1944年，他出版了《生命是什么》^[5]一书。此书中薛定谔自己发展了分子生物学，提出了负熵的概念，他想通过物理的语言来描述生物学中的课题。之后发现了DNA双螺旋结构的瓦森(James D. Watson)与克里克(Francis Crick)都表示曾经深受薛定谔这本书的影响。

据说薛定谔在科学上的这些成就与他的私生活还有着紧密的联系。薛定谔应该具有超凡的个人魅

力，一生风流倜傥，女友无数。他的风流故事甚至诱发了现代舞台剧编导、纽约剧作家马修韦尔斯的灵感，写出了一部名为《薛定谔的女朋友》的舞台剧(图3)。这部舞台剧是关于爱、性和量子物理学的另类浪漫喜剧。剧中的女主人公是位很不一般的神秘女人，正是她极大地激发了薛定谔的灵感，使得他在之后的一年内，接连不断地发表了六篇关于量子力学的主要论文，并提出了著名的薛定谔方程。因此，在享受量子力学带给我们辉煌灿烂的科技成果的今天，我们或许也应该感谢这位神秘女郎的贡献。

薛定谔在《生命是什么》一书中也认真探讨过男女关系，认为女人是红色，男人是紫色，男人创造的灵感来自于女人。也许这是薛定谔当年的真实感受，也由此而传为美谈。但如今我们从物理学和历史的角度来看待这个问题，薛定谔1926年奠定了量子力学基础的几篇论文，是建立在雄厚的经典力学和数学基础之上的，绝不可能仅仅是某个神秘女友激发了薛定谔天才的想象力和灵感的结果。

综上所述，薛定谔建立了微观世界中粒子的波函数所遵循的薛定谔方程。但后来，薛定谔不同意哥



图4 叠加态引发的思考

本哈根派对波函数的解释，因而设计了“薛定谔的猫”的思想实验。用薛定谔自己的话来说，他要用这个恶魔般的装置让人们闻之色变。薛定谔说：“看吧，如果你们将波函数解释成粒子的几率波的话，就会导致一个既死又活的猫的荒谬结论。因此，几率波的说法是站不住

脚的！”

这只猫的确令人毛骨悚然，相关的争论一直持续到今天。连当今伟大的物理学家霍金也曾经愤愤地说：“当我听说薛定谔的猫的时候，我就想跑去拿枪，干脆一枪把猫打死！”^[6]

在宏观世界中，既死又活的猫

不可能存在，但许多实验都已经证实了微观世界中叠加态的存在。总之，通过“薛定谔的猫”，我们认识了叠加态，以及被测量时叠加态的坍塌。叠加态的存在，是量子力学最大的奥秘，是量子现象给人以神秘感的根源，是我们了解量子力学的关键。

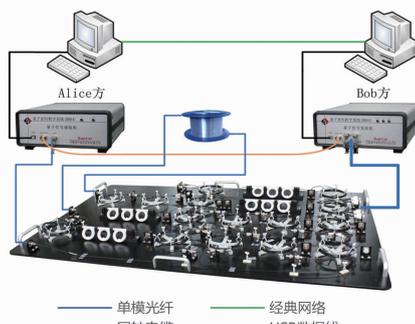
参考文献

- [1] Heisenberg W. Zeitschrift für Physik, 1927,43: 172
- [2] Schrödinger E. Naturwissenschaften, 1935,23:807-812,823-828,844-849
- [3] Feynman R. The Character of Physical Law,1965. chapter 6(Probability and Uncertainty — the Quantum Mechanical View of Nature),p.129
- [4] John G. In Search of Schrödinger's Cat. Toronto: Bantam Books,1984,p.5
- [5] Schrödinger E. What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell, 1944. Based on lectures delivered under the auspices of the Dublin Institute for Advanced Studies at Trinity College. Dublin, in February 1943
- [6] In a conversation with Timothy Ferris (4 April 1983), as quoted in The Whole Shebang (1998) by Timothy Ferris, p. 345



QKDedu-S 量子密码教学科研系统

▶ 系统组成



— 单模光纤 — 经典网络
— 同轴电缆 — USB数据线

▶ 组件清单

名称	数量
QKDedu-T量子信号发射机	1
QKDedu-R量子信号接收机	1
QKDedu-P光学调试平台	1
光纤盘	1
同轴电缆	1
网线	1
可选配件	
PC (Windows XP以上操作系统)	2

QEPS小型纠缠源系统

▶ 系统组成



▶ 技术指标

泵浦光功率 (mW)	100
偶然符合计数率 (Hz)	<10
单路光子亮度 (cps.)	>100k
纠缠光子对亮度 (cps.)	>10k
H, V偏振对比度	>25:1
P, N偏振对比度	>7:1
Bell不等式破坏程度	S>2.3
可见度	92%

提供最专业的量子通信设备
物理专业：探测器、小型纠缠源、高亮纠缠源、多光子纠缠等。
通信专业：BB84教学科研系统、B92教学科研系统、可商用的量子通信保密网络。

地址：合肥市创新产业园D3楼
电话：400-885-0929
0551-65333590

销售：13395515356
13395515359
邮编：230088

传真：0551-65368589
邮箱：feng.liu@quantum-info.com
网址：http://www.quantum-info.com