

量子十问之四

“薛定谔猫”为什么会自然死亡？

郭光灿[†]

(中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

2018-09-12收到

[†] email: gguo@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190106

凡是学习《量子力学》的学生，都必须学会求解薛定谔方程，人类一百多年来也一直在求解各种各样的薛定谔方程，并开发出激光、半导体、核能等新技术，造福人类近一个世纪。薛定谔正是因为创建量子力学时所作巨大贡献荣获了诺贝尔物理学奖。但其后来如同爱因斯坦一样，对量子力学有诸多质疑，1935年他发表了著名的薛定谔猫佯谬，质问客观世界是否存在可以区分的量子态的叠加。

如图1所示，小盒子装有放射性源，设其半衰期为一个小时，即一小时后有一半概率放射出一个粒子，根据量子力学叠加原理，一小时后空间将处于有一个粒子(记为 $|1\rangle$)，和没粒子(记为 $|0\rangle$)的叠加态：

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

如果有粒子，盒子的机关会被打开，于是铁锤就会掉落下去，打破装有毒气的瓶子，此时毒气会将密封于笼子里的猫毒死，当然如果小盒子未放出粒子，这只猫仍然活着。那么，一个小时后，这只猫究竟是活的还是死的？按照量子态叠加原理推演下来，猫也应当处在半概率是活，半概率是死的叠加态上，这只半死半活的猫就是历史上著名的“薛定谔猫”。尽管它已有八十多岁，迄今依然是人们津津乐道的话题。

薛定谔提出这个佯谬本意是想

问，宏观世界是否存在与微观世界一样可区分态的叠加态？现实世界为何只看到要么死，要么活的猫，从未看到这只半死半活的猫？可见这里的关键词是“死”和“活”这两种可区分状态，“猫”只是用于形象地表征这个物理命题而已，采用猫呀狗呀都一样。

兴许猫恰好是薛定谔本人的宠物，他便拿它来说事，或许薛定谔讨厌猫，故意使它处在半死半活的难堪状态上处罚它，但无论如何，他不经意地就让这只猫扬名天下！所以不要太在意“猫”，只关注“死”“活”。

谈到宏观可区分的量子态，人们自然会想到《量子光学》里的相干态 $|\alpha\rangle$ 。相干态是最接近于经典的量子态，理想的激光就是相干态，而且当其平均光子数很大时，相干态的量子效应便可忽略不计，可被视为经典电磁波。因此在寻找“薛定谔猫”制备的方案，人们多数采用相位差为 π 的两个相干态的叠加作为“猫态”的候选者。这类方案已被实验所验证，最先是在原子尺度上制备这类“猫态”，其后又在宏观尺度上也制备成功。因此“薛定谔猫”确

实如量子力学所预言的那样，在宏观世界里是存在的。

“薛定谔猫”可以生存，但是在现实世界中我们却观察不到这种叠加态，只能观察到确定的状态——“猫”要么死，要么活，仅有一种状态。这就是所谓的宏观实在性，即自然客体的宏观可区分状态总是确定的。

以玻尔为首的哥本哈根学派做了如下传统的诠释：我们只能通过测量才能确知“猫”处在什么状态，而测量会破坏被测的量子态，其结果是“活猫”和“死猫”的叠加态会塌缩到它们两者之一的确定态。换句话讲，现实自然界的宏观实在性是人类对量子客体测量引起的所谓“波包塌缩”所造成的。

玻尔认为，只有测量之后看到的才是真实存在的，测量之前的量子世界是虚拟的，不真实的。正是测量决定了薛定谔猫是死还是活的命运。“测量”究竟发生了什么？迄

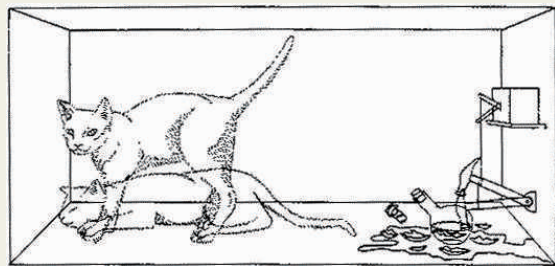


图1 薛定谔于1935年提出的有关猫生死叠加的著名思想实验示意图

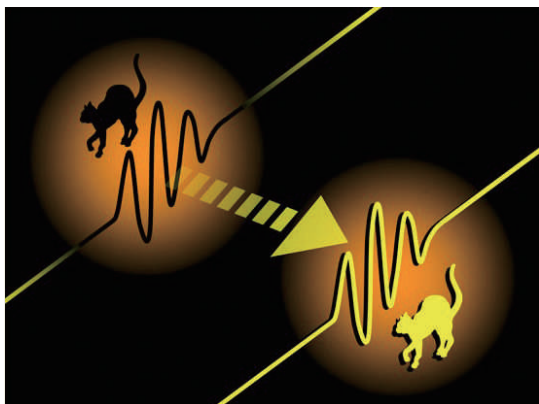


图2 薛定谔猫(图片来源于网络)

今人们还远未搞清楚!

如果自然界的宏观实在客体果真如玻尔所言是人类实施测量所造成的后果,那就意味着“人类”诞生在自然界之先,这怎么可能呢?人类只不过是自然界演化中在特殊时间和特殊空间中的特定产物而已,玻尔的诠释显然本末倒置。此外,任何客观实在客体都是由分子、原子、电子等微观粒子构成的,那么虚拟、不真实的微观世界怎么构造出真实的宏观世界呢?哥本哈根学派也无法自圆其说!

宏观世界存在的“薛定谔猫”是人们在实验室里采用特殊方法制备出来的,这种人造的“薛定谔猫”寿命不长,环境的消相干效应会最终使它因量子相干性消失而自动衰变为经典的猫,即要么死要么活的确切状态。“消相干”会杀死薛定谔猫,这是否表明,宏观实在性就是环境的消相干造成的?不完全对!

所有人为制备的量子系统都会饱受环境的消相干效应的破坏,如不采取有效的措施抵制这种消相干的影响,这些量子系统最后都会演化成经典系统。那么自然界是否存

在有环境消相干效应无法摧毁的量子系统呢?确实有。我们知道,任何宏观客体都是由分子、原子、电子等微观粒子构成的,这些遵从量子力学规律的微观粒子是真实的,绝不是如哥本哈根学派所说的那样是虚拟的。宏观客体中的这些微观粒子组份是量子系统,它们在环

境中依然保持着量子特性,并不会因消相干被破坏掉,原因何在?其根源在于这些微观量子系统中存在着很强的内在相互作用,粒子之间的强耦合远远大于环境的消相干作用(即退耦合作用),因此微观量子系统的量子性能够牢固地保持住。

人造的量子系统会死亡,而自然生成的量子系统却能永存。这就是自然界本来的状况。宏观客体遵从经典理论,具有宏观实在性,其结构单元却是量子客体,遵从量子理论,两者和谐地融合为自然客体。人们迄今已成功建立经典理论和量子理论,能分别正确地描述经典世界和量子世界,但还无法完整地描述自然界(量子力学与相对论并不融合),原因在于我们还没有研究清楚量子世界与经典世界之间的界限,究竟是什么物理机制使得量子世界能自动地演化为经典世界。

如何判断一个物理客体是经典的还是量子的?2003年诺贝尔物理学奖获得者 Anthony Leggett 教授与合作者 Anupam Garg 教授为此提出所谓“Leggett—Garg 不等式”(下称 LG 不等式)。凡是满足此不等式的物理客体属于经典世界,具有处

于确定状态的宏观实在性;若违背 LG 不等式,则属于量子世界,遵从量子态叠加原理。

为研究这个问题,我们可以借用“薛定谔猫”来帮忙。首先采用量子光学相干态人为地制造出一只“薛定谔猫”,并采取保护措施保护这只“猫”不被环境消相干杀死。当然,在实验上可以运用 LG 不等式来识别这只“猫”确实是“量子”的(即实验结果若违背 LG 不等式,就证实它是量子叠加态)。然后,在实验上设法使“猫”逐渐胖起来(即增大相干态的平均光子数),一直胖到 LG 不等式不再被违背,这时“薛定谔猫”便死掉了,变为经典猫,它处在死或活的确切状态上。这便找到了经典与量子的界限。特别要强调,实验中“薛定谔猫”之死,既不是环境的他杀,也不是测量引起波包塌缩导致,而是“猫”变胖后的自然死亡。

当然,我们还需要设计更多的这类使“薛定谔猫”自然死亡的实验,最终从实验上搞清楚量子世界自发演化到经典世界究竟有哪些机制。一个可能采取的实验方案是,采用质量很小的客体来制备“薛定谔猫”,然后逐渐增大质量,直至猫自然死亡为止。从而确认质量、引力是否是量子过渡到经典的机制。一旦能在实验上搞清楚“量子—经典”过渡的机制,就可以在薛定谔方程中加上体现这个机制的相互作用项,从而可能将量子理论与经典理论融合起来。因此,研究“薛定谔猫”为什么会自然死亡成为探索量子世界奥秘的重要抓手之一。