

冻结的量子箭：量子芝诺效应

(北京量子信息科学研究院 马彦俊、于海峰 编译自 Margaret Harris. *Physics World*, 2025, (5): 31)

为庆祝2025国际量子科学与技术年, *Physics World* 将聚焦一系列“怪异”的量子效应。在它们面前, 连量子叠加和量子纠缠都几乎显得平凡无奇。在该系列的首篇文章中, Margaret Harris 将目光投向量子芝诺效应。

想象一下你是一个量子系统。具体来说, 你是一个不稳定的量子系统——如果放任不管, 会很快从一个状态(我们称其为“清醒”)迅速衰变到另一个状态(“睡眠”)。但每当你要进入“睡眠”时, 总会有干扰: 或许是手机的消息提示音, 或许是一个好奇的孩子不断提问。无论是什么, 它都会把你从清醒—睡眠的叠加态中拽出, 让你恢复清醒。由于这种干扰发生的速度比你入睡更快, 你会一直保持清醒, 仿佛被一连串干扰(即量子术语中的“测量”)冻结在了原地。

这种反复测量将一个不稳定的量子系统“冻结”在一个特定状态的现象被称为量子芝诺效应(图1)。它得名于古希腊哲学中的一个悖论, 最早由科学通才图灵和冯·诺依曼在20世纪50年代提出雏形, 但是直到1977年才被物理学家 Baidyanath Misra 和 George Sudarshan 完整阐述。

此后, 研究人员已经在数十种量子系统上观测到了这一现象, 包括离子阱、超导磁通量子比特和光腔中的原子。但是量子芝诺效应表面上的普遍性并不能掩盖其内在的奇异性。对量子系统来说, “测量”这一简单的举动为何会对系统的行为产生深远的影响?

被观察的量子锅

“初次接触时, 你会觉得这非常神奇, 因为它真正展示了量子力学中测量对系统的影响,” 德国埃尔朗根-纽伦堡大学的物理学家 Daniel Burgarth 说, 他曾从事量子芝诺效应的理论研究。

研究冷原子量子芝诺效应的英国伯明翰大学的实验物理学家 Giovanni Barontini 对此表示赞同。“它没有经典的类似物”, 他说, “我可以一直观察一个经典系统做某件事, 它会继续做下去。但量子系统真的会‘在意’自己是否被观测”。

对于一个世纪前为量子力学奠定基础的物理学家而言, 测量与结果之间的任何关联都是一块绊脚石。几位科学家试图绕过这一难题, 例如: 玻尔和海森伯将观察者在量子波函数坍缩中的作用形式化; 德布罗意和玻姆引入新的“隐”变量; 甚至休·埃弗雷特提出了“多世界”理论, 假设每次测量都会创造新宇宙。

但这些解决方案都未能完全令人满意。事实上, 测量问题似乎如此难以解决, 以至于下一代大多数物理学家都选择对其避而远之, 转而倾向于一种有时被描述为“闭嘴计算”的研究方法——这种描述并非总是带有贬义。

如今的量子物理学家则不同。

Barontini 将其称为“测量效应的神化”, 他们并未将这一现象视为需要克服的障碍或可忽略的琐事, 而是在做一件几乎没有前辈能想象到的事: 他们正将量子芝诺效应转化为有用的工具。

噪声管理

为了理解通过测量“冻结”量子系统的实用价值, 可以考虑量子系统中的量子比特。许多量子算法首先将量子比特初始化为所需状态, 并将其保持在该状态, 直到需要执行计算为止。问题在于, 量子系统很少能保持在设定的状态。事实上, 它们出了名地容易在受到环境的微小干扰(噪声)时失去量子特性(退相干)。“遗憾的是, 每当我们构建量子计算机时, 都必须将它们嵌入现实世界, 而现实世界只会带来麻烦,” Burgarth 说。

量子科学家有许多应对环境噪声的策略。其中一些策略是被动的, 例如使用稀释制冷机冷却超导量子比特, 以及利用电场和磁场将离子和原子量子比特悬浮在真空中。不过, 也有一些是主动的策略。实际上, 这些主动策略涉及诱使量子比特保持在其应处的状态, 而避免进入不应处的状态。

量子芝诺效应就是这样一种“把戏”。“其原理是我们对系统施加一连串的扰动, 实际上每次扰动都会使量子比特发生旋转,” Burgarth

DOI: 10.7693/wl20250609

CSTR: 32040.14.wl20250609

解释道,“你在旋转这个系统,而实际上环境却想让它朝相反方向旋转。”他补充说,随着时间的推移,这些相反方向的旋转会相互抵消,通过将系统“冻结”在特定状态来保护它免受噪声干扰。

量子态工程

尽管噪声缓解很有用,但这并不是 Burgarth 和 Barontini 最感兴趣的量子芝诺效应应用。他们一致认为,真正的价值在于所谓的量子态工程,这比单纯阻止量子系统衰变或旋转要复杂得多。

这种额外复杂性的根源在于,真实的量子系统——就像真实的人类一样——通常拥有不止两种可用状态。例如,一个人可被允许的“清醒”状态集合(我们不妨称之为清醒的希尔伯特空间)可能包括做晚餐、洗碗和打扫浴室等状态。量子态工程的目标是限制这种状态空间,使系统只能占据特定应用所需的状态。

至于量子芝诺效应是如何做到这一点的,Barontini 通过引用芝诺最初提出的经典悖论来进行解释。公元前5世纪,埃利亚(Elia)的哲学家芝诺提出了一个基于在空中飞行的箭的悖论。如果你在这支箭飞行过程中的任何一个可能的瞬间去观察它,你会发现,在那个瞬间,它是静止不动的。然而不知为何,这支箭仍然在移动,这是怎么回事呢?

Barontini 解释说,在量子版本中,观察这支箭会将其冻结在原地,但这并非唯一发生的现象。“最有趣的是,如果我看向某个地方,箭就无法到达我注视的位置,”他说,“它将不得不绕道而行,必须改变轨迹以避免我的视野范围。”

Barontini 继续说道,通过塑造

这种“视野范围”,物理学家可以塑造系统的行为。作为例子,他引用了 Serge Haroche 的研究——他与另

一位著名的量子芝诺效应实验家 David Wineland 共同获得了2012年诺贝尔物理学奖。

被观察的量子锅

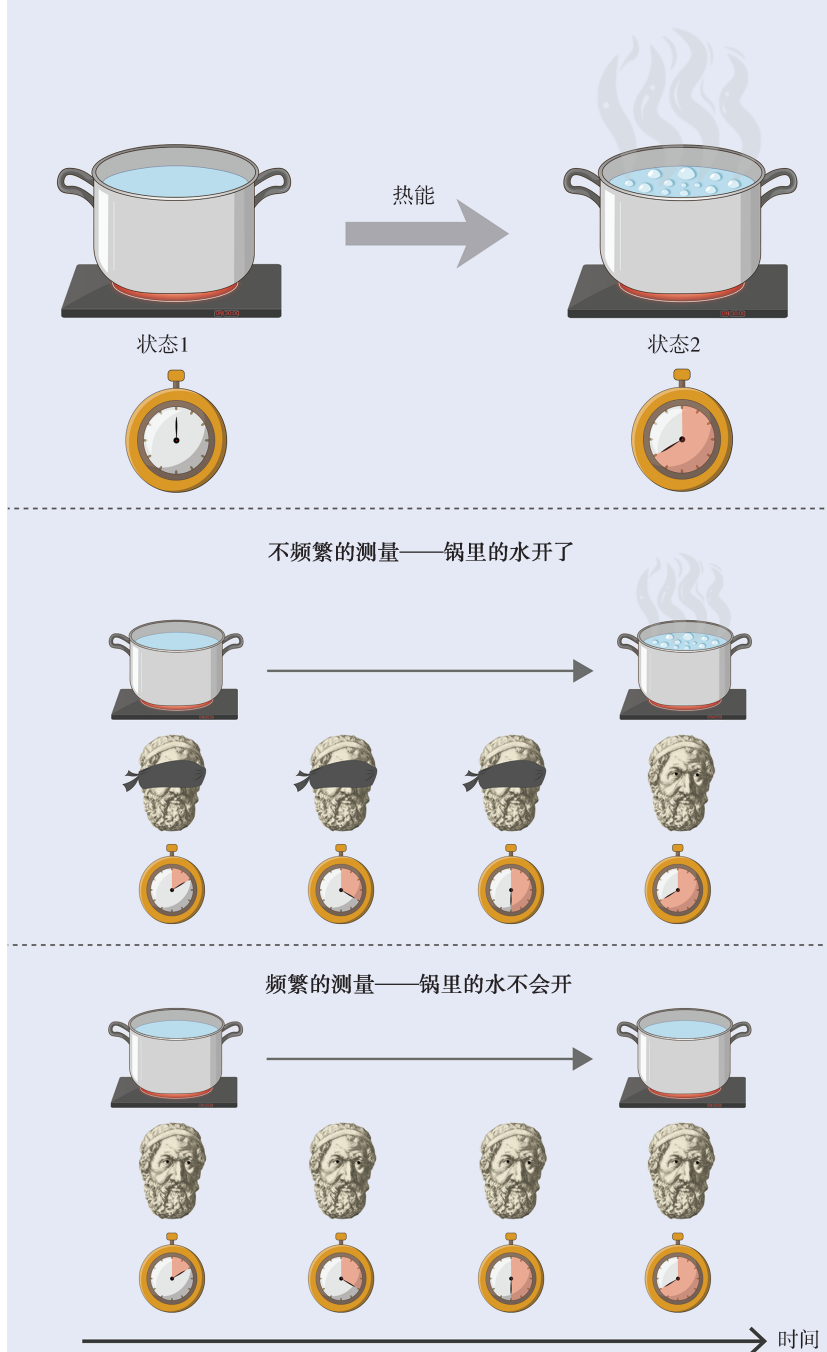


图1 对普通的、经典状态下的一锅水加热,会使它以相同的速度从状态1(未沸腾)演化到状态2(沸腾),无论是否有人在观察它。然而,在量子世界里,如果不对一个系统进行观察,它通常会从一种状态演化到另一种状态(蒙眼芝诺),但通过反复频繁的测量,它可以被“冻结”在原地(睁眼芝诺)

实验上实现的量子芝诺动力学过程

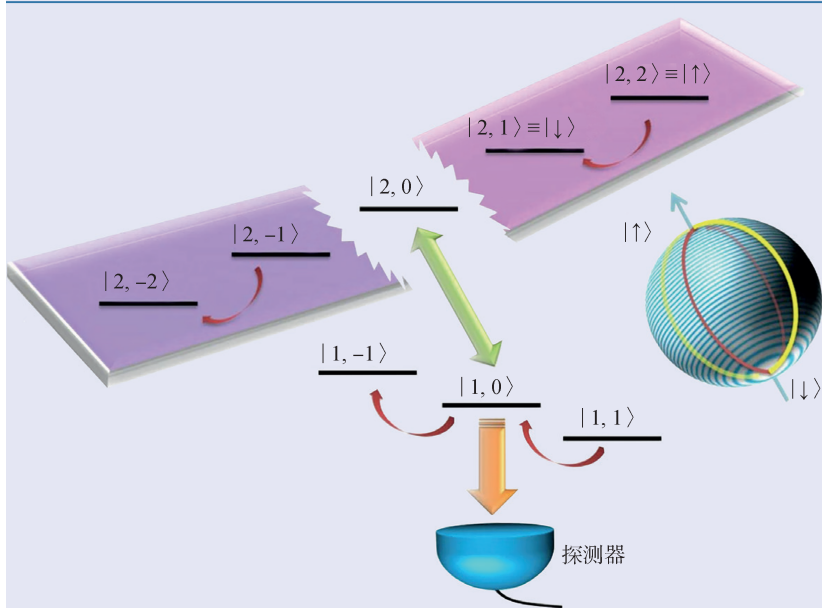


图2 超冷 ^{87}Rb 原子群的能级结构，在由 $F=2$ 超精细基态的5个自旋方向给出的5能级希尔伯特空间中演化。施加其上的射频电磁场(红色箭头)可以把临近量子态耦合在一起并且允许原子在不同态之间跃迁。一般而言，最初处于 $|F, m_F\rangle = |2, 2\rangle$ 态的原子会在这个态和其他4个 $F=2$ 态之间循环往复，这一过程被称为拉比振荡。但是，通过引入“测量”——此处显示为与 $|1, 0\rangle$ 态和 $|2, 0\rangle$ 态之间跃迁共振的激光束(绿色箭头)——Smerzi和同事们极大地改变了系统的动力学特性，迫使原子在 $|2, 2\rangle$ 态和 $|2, 1\rangle$ 态之间振荡(在右侧所谓的布洛赫球上表示为向上和向下的箭头)。额外的一束激光(橘黄色箭头)和探测器被用来监测系统随时间的演化

2014年，Haroche及其在法国巴黎高等师范学院的同事试图控制所谓“里德伯原子”内电子的动力学行为。在这类原子中，最外层电子与原子核的结合非常弱，可以占据多个高激发态中的任意一个。

研究人员利用微波场将51个这样的高激发里德伯态分成两组，然后向系统施加射频脉冲。通常情况下，这些脉冲会导致电子在态之间跃迁。然而，微波场提供的持续“测量”意味着，尽管电子可以在每组态内部移动，但无法从一组跃迁到另一组。它被困住了，或者更准确地说，它处于一种被称为薛定谔猫态的特殊量子叠加态中。

仅仅限制一个电子的行为，这

听起来可能并不是非常令人兴奋。但在这项实验以及其他实验中，Haroche及其同事们证明了，施加这样的限制会产生一系列不寻常的量子态。这就好像是告诉一个系统它不能做什么，反而迫使它去做一堆其他的事情，就如同一个拖延者为了逃避打扫浴室而去做晚饭和洗碗一样。“这确实丰富了你的量子工具箱，”Barontini解释道，“你能够生成一种纠缠态，这种纠缠态比你用传统方法所能生成的其他量子态的纠缠程度更高，或者从方法学角度来说更有用。”

那么，测量究竟是什么？

除了生成有趣的量子态外，量

子芝诺效应还在揭示量子测量的本质方面提供了新见解。事实证明，就量子芝诺效应而言，“测量”的构成问题出人意料的宽泛。2014年，意大利佛罗伦萨大学 Augusto Smerzi 领导的物理学家团队巧妙地证明了这一点。他们的研究表明，只需用共振激光照射量子系统(图2)，就能产生与更复杂的“投影”测量相同的量子芝诺动力学效应。在该实验中，投影测量涉及以针对特定原子跃迁定制的频率向系统施加成对激光脉冲。“可以说，几乎任何事物都会引发芝诺效应，”Burgarth说，“这是一种非常普遍且易于触发的现象。”

其他研究拓宽了我们对测量所能发挥作用的理解。虽然量子芝诺效应利用重复测量将量子系统“冻结”在特定状态(或者至少减缓其从一种状态到另一种状态的演化过程)，但也有可能采取相反的做法，即利用测量来加速量子态的转变。这种现象被称为量子反芝诺效应，而且它有其自身的应用领域。例如，它可以加快量子化学中的反应速度。

在过去约25年的时间里，人们做了大量的研究工作，旨在弄清楚普通的量子芝诺效应在何处结束，而量子反芝诺效应又从何处开始。一些系统既可以呈现出芝诺动力学特性，也能呈现出反芝诺动力学特性，这取决于测量的频率以及各种环境条件。而另一些系统似乎更倾向于表现出其中的一种特性。

但无论最终证明哪种效应(芝诺效应或反芝诺效应)最为重要，量子芝诺效应的研究绝不是停滞不前的。在芝诺提出其悖论约2500年后，他的思想后继者们仍在对其苦思冥想。