

探索 EPR 佯谬和量子纠缠

——2022 年诺贝尔物理学奖

■文 / 薛 鹏

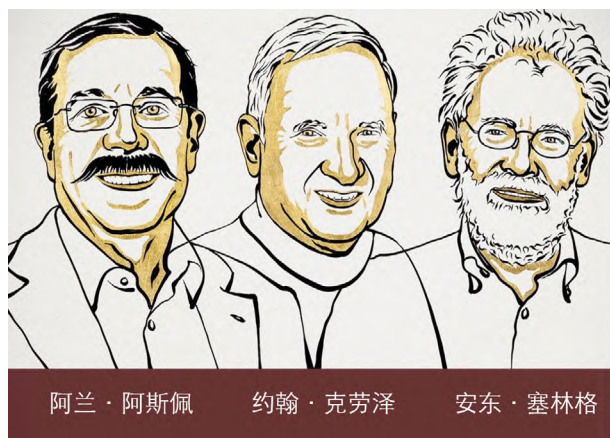
一场量子力学领域旷日持久的论战，一个意义深远的不等式的提出，一群包括 2022 年诺贝尔物理学奖得主在内的前赴后继投身实验的物理学家，这一切推动了对量子力学根基完备性的证明，引领了量子信息学的发展。

2022 年诺贝尔物理学奖授予法国物理学家阿兰·阿斯佩 (Alain Aspect)、美国物理学家约翰·克劳泽 (John Clauser) 和奥地利物理学家安东·塞林格 (Anton Zeilinger)。早在 2010 年，这 3 位物理学家因“在量子物理学基础上的基本概念和实验贡献，特别是一系列贝尔不等式验证”获得沃尔夫奖 (Wolf Prize)。沃尔夫奖被认为是诺贝尔奖的风向标。他们利用纠缠光子通过实验验证了贝尔不等式在微观世界中不成立，证明了量子力学的完备性，引领并推动了量子信息这一学科的发展，他们的获奖是众望所归。

3 位诺贝尔物理学奖得主的工作动机是解释量子力学的佯谬。所谓“佯谬”是指从量子力学的基本原理出发推导出一个看似十分荒谬的结果。如果人们能用实验证实这个结果确实是对的，那么“佯谬”就会变成合理的量子力学特性；如果实验能否定这个结果的真实性，那么此“佯谬”将导致对量子力学的某种修正。

量子纠缠是“鬼魅般的超距作用”吗

在 20 世纪 30 年代，犹太裔物理学家阿尔伯特·爱因斯坦 (Albert Einstein) 和哥本哈根学派的代表尼尔斯·玻尔 (Niels Bohr) 进行了关于量子力学的理论基础及哲学思想方面的一系列争论。实际上，正因为这两位大师的不断论战，量子力学才在辩论中发展成熟起来。爱因斯坦一直对量子力学及以玻尔为代表的哥本哈根学派对量子力学的诠释持怀疑态度，他



2022 年诺贝尔物理学奖获得者
(来源: Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach)

提出了一个又一个思想实验，试图证明量子力学是不完备的。直到他们逝世之后，这场论战仍在物理学界继续进行。

爱因斯坦的思想实验中最为著名的一个就是 EPR 佯谬 (Einstein-Podolsky-Rosen paradox)。该佯谬由爱因斯坦和他在普林斯顿高等研究院的助手鲍里斯·波多尔斯基 (Boris Podolsky)、纳森·罗森 (Nathan Rosen) 共同提出。当然，当时这 3 位提出者并不会认为这是佯谬。之后，人们就以 3 位物理学家姓氏的首字母命名这个佯谬，即“EPR 佯谬”。

量子物理学家戴维·玻姆 (David Bohm) 作为爱因斯坦思想的继承人，在 1952 年引入了“隐变量”概念，在 EPR 佯谬包含的局域实在论的基础上形成

了一个完全决定性的理论——局域隐变量理论，试图替代量子力学理论。在玻姆的思想实验中，对于量子纠缠的描述是A、B为自旋1/2的粒子，初始总自旋为零。假设粒子有两种可能的自旋，分别是 $|上\rangle$ 和 $|下\rangle$ ， $|上\rangle$ 和 $|下\rangle$ 为描述微观系统状态的矢量，那么，如果粒子A的自旋为 $|上\rangle$ ，粒子B的自旋便一定是 $|下\rangle$ ，才能保持总体守恒，反之亦然。这时我们说，这两个粒子构成了量子纠缠态。无论两个粒子A和B相距多远，它们应该永远是 $|上\rangle|下\rangle$ 关联的。假设分别由观察者爱丽丝和鲍勃对两个粒子进行测量。当爱丽丝对A进行测量时，A的叠加态便在一瞬间坍缩了，如坍缩成了 $|上\rangle$ ，因为守恒的缘故，B就一定要为 $|下\rangle$ 。但是，此时A和B之间已经相隔非常遥远，B为什么能够做到一定坍缩为 $|下\rangle$ 呢？除非存在一种超距瞬时的信号，使A粒子和B粒子之间能及时地“互通消息”。超距作用与相对论中光速不可超越相违背，于是就构成了佯谬。

“微观粒子之间存在某种超越时空的量子纠缠，而基于这种纠缠，对某个粒子的作用将会瞬时地影响另一个粒子。”爱因斯坦认为这种现象是绝不会出现的，爱因斯坦讽刺其为“幽灵般的超距作用”（spooky action at a distance），相信“量子力学是不完备的”，粒子之间的这种纠缠行为是因为“隐变量”在起作用。玻尔则认为量子世界是非局域的，这个超距离作用必定存在，量子力学是完备的。

贝尔不等式的提出及检验

约翰·贝尔（John Bell）是欧洲核子研究中心的理论物理学家，专攻于加速器设计和粒子物理研究，关于量子力学基本问题的研究只是他的业余爱好，他自称是爱因斯坦的追随者。1964年，贝尔推导出有关EPR佯谬的一个不等式，即贝尔不等式。如果这个不等式成立，隐变量存在；反之，隐变量则不存在，即量子力学是完备的。科学家用物理实验对贝尔不等式进行检验，旨在测试量子力学理论与局域隐变量理论哪个正确。

1969年，当时还是美国哥伦比亚大学研究生

的克劳泽与迈克尔·霍恩（Michael Horne）、阿布纳·希莫尼（Abner Shimony）、理查德·霍尔特（Richard Holt）一起，通过CHSH不等式（以4人姓氏首字母命名），将贝尔在1964年提出的数学定理转化为一个非常具体的实验预测。1972年，已经是博士后的克劳泽和研究生斯图尔特·弗里德曼（Stuart Freedman）一起完成了第一次贝尔实验。他们使用钙原子级联跃迁产生纠缠光子对进行实验。但是，由于光子对产生效率极低，测量时间长达200 h，导致测量精度被质疑，实验被认为存在测量漏洞。两个纠缠光子之间距离较短，因此也存在局域性漏洞。所谓测量漏洞是指因为探测器效率不是100%，所以可以理解为探测到的粒子都违背贝尔不等式，而没有探测到的粒子是不违背的。局域性漏洞是指纠缠粒子之间的关联时间应超越光速，对一个粒子探测得到结果，另外一个粒子的结果也就瞬间得到，但是如果两个粒子之间距离不够长，就不足以证明通过光速传播的时间是远远长于实验上得到另一个光子结果的时间，就存在局域性漏洞。另外，实验中两个光子的测量基是固定的，而不是在两组基中随机选择的，这在当时也是被人诟病的一点。验证不等式，我们通常会计算违背量除以其标准差，对不等式的违背以多少个标准差来衡量。这个实验对贝尔不等式的违背仅达到6个标准差。

1981年和1982年，阿斯佩及其合作者进行了一系列实验，提高了测量精度，减小了测量漏洞。阿斯佩也是第一个设计避免局部性漏洞实验的人。在第一个实验中，他们使用双激光系统激发钙原子，产生纠缠光子对，改善了纠缠光子源，验证了广义贝尔不等式，对不等式的违背达到6个标准差。第二个实验使用双通道方法，提高光子利用率，测量精度大大提高，关闭了测量漏洞，对不等式的违背达到46个标准差。第三个实验最为重要，这个实验关闭了局域性漏洞。他们进一步改进了实验装置，使两个纠缠光子相隔约12 m远，这样即使信号以光速在它们之间传播，也要花上40 ns的时间。实验装置能够在纠缠对离开它的源后切换测量设置。当光子到每个偏振器的距离为6 m时，偏振器旋转的时间不超过20 ns。声光器件可以在比20 ns更短的时间尺度上，

将光子切换到设备的两个不同分支（两组测量基）。然而，由于装置复杂，只达到5个标准差的违背。

1998年，塞林格团队在严格的局域性条件下测试贝尔不等式，他们利用现在最常用到的非线性晶体中参量下转换产生的纠缠光子对，纠缠光子对之间的距离可以被拉开达到400 m，进一步关闭了局域性漏洞，对不等式的违背达到30个标准差，实验结果具有决定意义。

在此之后的很多年里，大家之所以还在持续利用各种各样的纠缠例子对验证贝尔不等式，是因为之前实验还不完美，仍存在漏洞。2015年，荷兰代尔夫特理工大学的罗纳德·汉森（Ronald Hanson）研究组报道了他们在金刚石色心系统中完成的验证贝尔不等式的实验。要避免局域性漏洞，只需把两个金刚石色心放置在相距1.3 km的两个实验室。利用纠缠光子对和纠缠交换技术，他们实现了金刚石色心电子之间的纠缠。两个色心直接用光通信所需时间大概4.27 ms，而完成一次实验的时间为4.18 ms，比光通信时间少90 ns，解决了局域性漏洞。此外，色心的测量效率高达96%，测量漏洞也被堵上了，实现了无漏洞地验证贝尔不等式的实验，在96%的置信度（2.1个标准差）上支持量子理论，从而证伪了局域的隐变量理论。


随后，林登·沙姆（Lynden Shalm）带领的美国国家标准与技术研究院（NIST）的研究团队和塞林格在维也纳的团队也分别利用纠错的光子对完成了无漏洞的贝尔不等式的验证。维也纳团队的实验中两个光子的距离是30 m，而NIST的实验中两个光子的距离超过100 m。两个小组都使用了高效光子探测器来排除探测漏洞。他们利用一个非线性晶体将泵浦光子转换为两个纠缠光子来制备光子对。两个光子被送往不同的探测装置，每个探测装置由一个高效单光子探测器和其前面的可通过新型随机数产生器来调节偏振方向的偏振片构成。他们分别得到了11个和7个标准偏差的违背量。

如果这两个漏洞都被堵上，还有一个漏洞就是自由意志。在实验过程中需要选择测量基，也有人认为测量基的选择受到意识的影响而产生漏洞。于是就诞生了所谓的大贝尔实验（the Big Bell

Test）。2016年，大贝尔实验展开，召集到世界各地超过10万名志愿者。在实验中，所有志愿者都需要基于个人的自由意志不断地进行选择，在过关游戏中快速随机地按下0或者1，形成二进制随机数，12 h内持续产生每秒逾1 000 bit的数据流，全部记录在互联网云端，并被实时和随机地发放给分布在世界各地的相关研究团队，用以控制这些研究团队的贝尔不等式检验实验。大贝尔实验相信人类拥有真正的自由意志，通过大量参与者的自由意志，大贝尔实验在更广泛的范围内关闭自由选择漏洞，否定爱因斯坦的定域性原理。

量子纠缠应用前景广阔

这3位科学家获得诺贝尔物理学奖实至名归。就像诺贝尔物理学委员会主席说的那样，获奖者对纠缠态的研究已经超越了解释量子力学的基本问题。这么说是因为以3位物理学家的研究为基础，量子纠缠已经在很多物理体系中被实验证实并且加以利用。例如，在我们实验室中，激光经过非线性晶体会产生自发参量下转换过程，一个泵浦光子就会分裂成一对光子，满足相位匹配条件。这一对光子就处于某一个特定的纠缠态上。这两个光子无论相距多远，比如一个留在我们实验室，一个用墨子号卫星发送到太空，只要我们测量得知我们实验室中光子的状态，不需要对另外一个在遥远太空的光子做任何操作，都可以瞬间获知它的状态。

量子纠缠是一种非常重要的物理资源：应用于量子保密通信，使我们获得更加安全高效的通信方式；应用于量子计算，使我们拥有传统计算机不可比拟的强大算力的量子计算机；应用于量子精密测量，使我们拥有精度更高的测量方式；等等。

薛鹏，北京计算科学研究中心教授，国家杰出青年科学基金获得者，从事量子信息和量子光学的基础研究工作，致力于利用量子行走实现普适的量子信息处理平台。