

揭秘“诡异的超距作用”：探索量子纠缠的过去、现在与未来

甘骏晖¹ 冯达旋²

(1. 西澳大利亚大学物理、数学与计算学院物理系 6009; 2. 美国德雷塞尔大学)

回头来看,量子纠缠已然成为量子物质的核心特征——如此根本,甚至有人提出它可能构成时空的基础。然而,科学发展向来曲折迂回。在量子力学诞生后的前半个世纪里,物理学家主要专注于探索更高的能量尺度,致力于揭示微观物质的结构。唯有少数具远见卓识的思想者,真正洞察量子纠缠蕴含的革命性意义。

量子纠缠正成为引领量子技术革命的核心力量,并有望构筑下一代量子人工智能的基础。要理解这一现象,我们必须穿越历史的迷雾,探寻其起源与其惊人的回归。在这旅程中,我们不仅见证科学的进步,更迎来一个全新的世界观——其颠覆性堪比哥白尼提出日心说,或爱因斯坦重塑时空概念。

量子纠缠的意义远超发现某种新物质,它标志着一种深刻的范式转变。它揭示出自然界并非由孤立的个体构成,而是由错综复杂的关联网络编织而成。在这个视角下,实在不再是割裂的碎片,而是相互交织的整体,从中涌现出我们所认知的世界。

一、物质即波

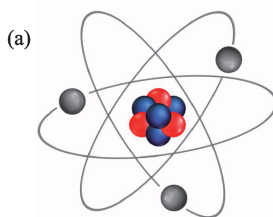
传统教科书常以微型太阳系类比原子结构——电子被描绘为粒子,在空旷的空间绕着原子核旋转。这一类比虽形象易懂,却未能揭示原子的量子本质。在量子力学框架下,电子并非以确定轨道运行,而是由三维的波函数所描述,这些波函数赋予空间每一点概率幅度,体现出不确定性原理的核心精神(图1)。

即使是先进的可视化模型,也只是对量子现实的近似表达。它们或许能提供直观的理解,但仍无法

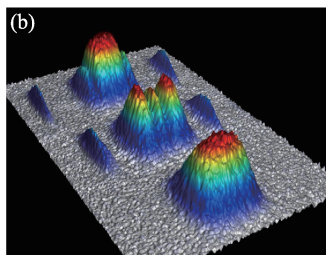
完整呈现电子的弥散性与概率性——那种在此处又在彼处的量子存在状态,远超经典图像所能捕捉。

人与其他物质一样,本质上是量子系统,其行为受波函数与概率幅度的支配,而非遵循纯粹的经典轨迹。人与原子之间的差异,并非源于物理原理的不同,而是体现在尺度与复杂性的层面。

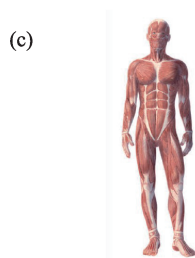
原子的波函数在空间中呈现弥散状态,可通过



将原子视为粒子是错误的!



原子是三维概率波!



人类亦为量子粒子,人类与原子的唯一差异在于概率波的延伸范围

图1

光谱学或干涉实验进行探测验证。宏观尺度下的人类,其集体波函数高度复杂且局域化,并因与环境持续而强烈的相互作用迅速退相干。这种退相干效应使人的量子态在技术上难以直接测量或操控,但这并不意味着人脱离量子力学的基本原则。

从根本上说,我们仍处于量子世界之中,只是我们的行为在宏观层面上表现出近似经典的稳定性。这种稳定性并非否定量子性,而是量子规律在大尺度、多粒子系统中自然涌现出的统计结果。

量子行为向经典行为的转变,并非发生在某个明确的边界,而是一种连续的渐变过程,受系统尺寸、温度以及与环境耦合强度等因素的共同影响。随着这些参数的变化,量子干涉效应逐渐减弱,经典描述便在宏观尺度上自然浮现。

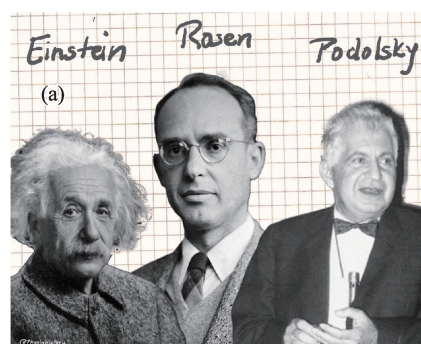
人类正处于这一过渡带的中间区域——我们的体量过大,热噪声过强,无法维持稳定的量子叠加态。然而,从构成角度来看,我们与原子、电子并无本质区别,皆由相同的量子构件组成。只是由于与环境的持续交互,我们的量子态迅速退相干,呈现出近似经典的行为模式。

因此,我们所感知的实在,并非脱离量子规律,而是这些底层量子定律在宏观世界中的粗粒化显现——一种由统计平均与环境影响共同塑造的近似图景。

二、EPR

爱因斯坦的名字常与能量-质量等式和光电效应联系在一起——后者为他赢得了诺贝尔奖。这些早期成就无疑具有划时代的意义,但与他晚年的思想深度相比,或许仍显稚嫩。长期以来,广义相对论被视为他科学生涯的巅峰之作。然而,从后见之明来看,1935年发表的EPR论文(与波多尔斯基和罗森合著)正日益显现为他智力遗产的真正高峰(图2)。

这篇论文是爱因斯坦对量子力学基础问题多年沉思的结晶,它对当时主流哥本哈根诠释提出了大胆而持久的挑战。EPR论文并非仅是物理史上



里程碑: EPR 论文(1935)——纠缠思想的起点



Spukhafte Fernwirkung, 即诡异的超距作用
量子粒子间的概率重叠虽极其微小,却永不为零。
正是这种非零特性,使得它们能在联合态中保持纠缠关联

图2

的一段插曲,它是一部文化杰作,堪比巴赫的《赋格艺术》、梅西安的《时间终结四重奏》或伯格曼的《第七封印》。它体现了爱因斯坦成熟而深邃的哲学立场,是他思想的结晶,对实在本质的追问至今仍在塑造物理学的轮廓。

在纠缠、非定域性与信息论日益成为现代物理核心的今天,EPR的思想回响愈发清晰——它不仅是对量子世界的质疑,更是对科学方法与实在观的深刻反思。

量子纠缠这一概念源自1935年阿尔伯特·爱因斯坦、鲍里斯·波多尔斯基与内森·罗森合著的开创性论文《量子力学对物理现实的描述能否视为完备?》,即著名的EPR论文。在这篇文章中,三位作者对量子力学的基础提出了深刻质疑:尽管该理论在实验上取得巨大成功,其描述可能仍不完整。

他们设计了一个思想实验:两粒子在相互作用后进入纠缠态,其各自的波函数——即描述量子态的数学结构——不再独立存在,而是融合为一个不可分割的联合波函数。这统一态编码了粒子之间的非局域关联,即使它们在空间上分离,这种关联

仍然持续存在。

引人注目的是,这种关联无论距离多远都能瞬间显现,无需任何经典信号的传递。对一个粒子的测量会立刻确定其纠缠伙伴的状态。这一现象虽然完全符合量子力学的数学形式,却与经典局域性原则相冲突——而局域性正是爱因斯坦相对论的核心,强调任何影响都不能超越光速传播。对此,爱因斯坦深感困扰,并将其称为 *Spukhafte Fernwirkung*,即“诡异的超距作用”。他虽然承认量子力学在预测上的非凡成功,但在哲学立场上始终坚持局域性与实在论,认为必须存在一个更完整的理论框架,才能真正调和这些原则与观测结果。

EPR 论证的一个关键环节在于:当两粒子处于纠缠态时,它们的位置呈现出完美的相关性,而动量则表现为完美的反相关性。这意味着,只要测得其中一个粒子的位置,就能立刻推知另一个粒子的位置;同样,测得一个粒子的动量,也能立即确定其伙伴的动量。

这种现象似乎暗示着纠缠粒子之间在“共享”测量结果,仿佛存在某种超越经典极限的瞬时联系。它在形式上完全符合量子力学的预测,却隐含着一种超距影响的意味,似乎违背了相对论所坚持的原则——任何作用或信息都不得以超光速传播。

爱因斯坦更深层的忧虑,并不仅仅在于量子力学预测的奇异性,而在于其背后的本体论含义。如果所谓的“诡异作用”真的是在时空内部发生的过程,那么它必然涉及信息的瞬时传输,这与相对论的基本原则直接冲突。为了保持一致性,他不得不设想:这些相关性或许并非源自时空中的某种传播,而是来自一种超越时空常规框架的更深层机制。

这一思路凸显了爱因斯坦批判的深度。他的质疑不仅仅针对量子力学的概率性描述,更是直指其对物理实在本质的理解。他担心,如果量子力学仅仅停留在统计与预测层面,而无法揭示独立于观测的实在结构,那么它就无法称得上是一个完整的理论。

爱因斯坦最尖锐的批判,正是针对量子力学内

部的张力:纠缠粒子之间的完美相关性,根本无法用任何经典机制加以模拟。科普作品常用“远隔的一对袜子”作比喻——若知一只左脚袜,另一只必然是右脚袜。然而,这种类比在量子层面并不成立。

量子粒子在被测量之前,并没有确定的属性,它们的状态并非“隐藏着的既定结果”,而是处于一种叠加态:多种可能性同时存在,并以不同概率幅度共存。只有在测量发生时,叠加才“坍缩”为具体结果。

量子系统的固有概率性始终令爱因斯坦感到不安。他拒绝以“超决定论”来化解矛盾,因为那意味着彻底放弃自由与因果的意义。而若接受量子力学的标准诠释,就必须承认:粒子在被测量之前并没有确定的状态。换言之,粒子不同于一双袜子——袜子在抽屉里时已然是左脚或右脚,而量子粒子在观测之前却没有固有身份,只存在于叠加的可能性之中。

这种观点与爱因斯坦的哲学立场格格不入。他是实在论的坚定拥护者,坚信物理实在独立于观察而存在。正如他那句广为流传的名言所表达的:“无论你是否看它,月亮始终在那里。”

爱因斯坦在私人通信或德语文章中,确实常用“Wirklichkeit”来指涉“实在”,而不是“Realität”。Wirklichkeit 在德语哲学传统中(康德、黑格尔等)通常译为“实在”,强调“实际存在的东西”而非单纯的“现象”。在他与薛定谔、玻尔的争论中,爱因斯坦坚持“物理理论应该描述客观实在(Wirklichkeit)”,这就是所谓的“实在论”立场。

基于这一立场,爱因斯坦得出结论:量子力学虽在经验上取得了非凡成功,却依然是不完备的理论,无法全面刻画物理实在的本质。当时,他与量子力学拥护者之间的争论多停留在哲学层面,因为缺乏可行的实验手段来加以检验。与此同时,科学界的注意力集中在原子弹研发与亚原子结构的探索上,几乎无人有余力重新审视量子基础问题。

直到数十年后,随着实验技术的进步,量子纠缠的研究才重新焕发生机。贝尔定理的提出与后

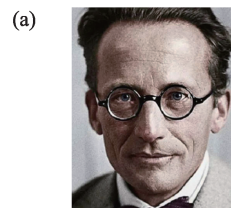
续实验的验证,使得EPR所引发的争论从哲学思辨走向了实验物理的核心舞台,也为现代量子信息科学奠定了基石。

三、薛定谔的猫

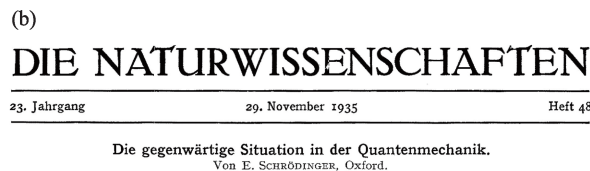
尼尔斯·玻尔——哥本哈根诠释的坚定拥护者——与阿尔伯特·爱因斯坦——量子理论最尖锐的批评者之一——之间的持久争论,核心在于一个深刻的哲学与物理问题:量子态的概率叠加究竟是实在的存在,即叠加态本身就是自然的存在方式,抑或仅仅反映了我们对自然描述的不完备,从而表现为认识论上的不确定?对玻尔而言,这个问题在物理学框架内是无意义的。他坚持认为,物理属性在被测量之前并不具有确定数值;而测量过程必须借助经典仪器,并以经典语言加以描述,从而将一系列可能性收缩为单一而确定的结果。

在EPR论文发表后不久,薛定谔提出了著名的“活死猫”思想实验(图3)。玻尔坚持认为,量子与经典之间在描述上存在分界,测量过程标志着系统由不确定转向确定。然而,近几十年的实验进展逐渐模糊了这条界限。研究者已能将量子效应扩展至更大尺度的系统,包括复杂分子,甚至提出对病毒或水熊虫等生物进行量子实验的设想。这一趋势迫使人们提出更为尖锐的问题:宏观实体——乃至人类自身——是否也可能处于量子叠加态?

宏观纠缠是否存在?薛定谔是最早通过思想实验认真探讨这一问题的人之一。1935年EPR论文发表后,他在与爱因斯坦的德语通信中使用了“Verschränkung”(即“纠缠”)一词,并在同年发表的论文中正式引入这一概念,用以描述EPR式系统的非经典相关。同年,他提出了著名的‘猫’实验:一只猫被置于密封盒中,旁边的量子装置以50%的概率释放毒气,由单个放射性原子的衰变触发。根据量子论,在开盒之前,整个系统处于叠加态,猫既活又死。这个悖论鲜明地凸显了量子不确定性与经典直觉之间的张力,尤其在宏观层面上更显荒诞。



在EPR论文发表不久之后,薛定谔又写了一篇论文。他描述了一只活着和死了的猫



Verwaschenheit nicht. Die austretende Partikel wird, wenn man anschaulich deuten will, als Kugelwelle beschrieben, die nach allen Richtungen und fortwährend vom Kern emaniert und einen benachbarten Leuchtschirm fortwährend in seiner ganzen Ausdehnung trifft. Der Schirm aber zeigt nicht etwa ein beständiges mattes Flächenleuchten, sondern blüht in einem Augenblick an einer Stelle auf — oder, um der Wahrheit die Ehre zu geben, er blüht bald hier, bald dort auf, weil es unmöglich ist, den Versuch mit bloß einem einzigen radioaktiven Atom auszuführen. Benutzt man statt des Leuchtschirms einen räumlich ausgedehnten Detektor, etwa ein Gas, das von den α -Teilchen ionisiert wird, so findet man die Ionenpaare längs geradliniger Kolonnen angeordnet¹, die rückwärts verlängert das radioaktive Materiekörnchen treffen, von dem die α -Strahlung ausgeht (C.T.R. Wilsonsche Bahnpuren, durch Nebeltröpfchen sichtbar gemacht, die auf den Ionen kondensieren). Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllemaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem Gergesschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, daß die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiften haben. Die ψ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr (die lebende und die tote Katze) (s. v. v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.

Das Typische an diesen Fällen ist, daß eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden läßt. Das hindert uns, in so naiver Weise ein „verwaschenes Modell“ als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen. An sich enthielte es nichts Unklares oder Widerspruchsvolles. Es ist ein Unterschied zwischen einer verwaschten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.

¹ Zur Veranschaulichung kann Fig. 5 oder 6 auf S. 375 des Jg. 1927 dieser Zeitschrift dienen; oder auch Fig. 1, S. 234 des vorigen Jahrganges (1934), da sind es aber Bahnpuren von Wasserstoffkernen.

(Fortsetzung folgt.)

薛定谔在同一年写给爱因斯坦的信中,用“纠缠”(德语: Verschränkung)来描述“鬼魅般的远距作用”



封闭盒内:猫如同量子粒子,可同时处于“生”与“死”的叠加态



开盒瞬间:叠加态坍塌,猫的命运才被确定为“活”或“死”

图3

在写给爱因斯坦的信中,薛定谔使用“Verschränkung”(纠缠)来描述量子系统的非经典相关;而爱因斯坦则称之为“鬼魅般的超距作用”。至于为何必须有“盒子”,其意义在于划定量子系统与外部观察者的界限。在哥本哈根诠释下,盒子强调了猫的命运在观测之前并不确定——只有开盒的那一刻,叠加态才坍缩为确定的结果。若无盒子,悖论便失去了锋芒。正是这种观察者与系统的分离,突出了量子不确定性的奇异内涵,尤其在宏观尺度上更具震撼力。

四、吴-沙克诺夫实验

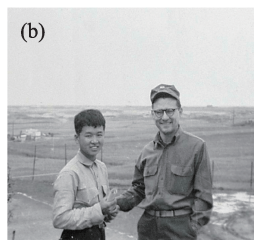
宏观纠缠的设想远远超出当时实验的能力,对薛定谔的同时代人而言几乎不可想象。这种处境颇似牛顿在《自然哲学的数学原理》中虽已洞见微积分的威力,却因无穷小方法的争议而未能公开阐述。量子纠缠亦是如此——它在理论上意义深远,却在随后的数十年间饱受质疑。即便在微观层面,粒子纠缠的概念也长期被许多物理学家视为可疑,他们怀疑这并非真实的非局域关联,而只是理论上的奇异推演。由于缺乏有力的实验证据,“纠缠”在当时的主流文献中鲜有出现,往往被当作哲学奇谈,而非严肃的物理事实。

科学史上的伟大突破,往往源于胆识与远见。吴健雄,这位年轻的华裔物理学家,曾师从奥本海默。她在哥伦比亚大学普平大楼的地下实验室开展了一项开创性的实验,后来被视为量子物理的重要基石。与研究生欧文·沙克诺夫(Irving Shaknov)合作,她首次在实验中观测到光子纠缠的存在。这一成果不仅确立了她在现代物理中的关键地位,也成为她作为 20 世纪最具影响力科学家之一的重要遗产(图 4)。

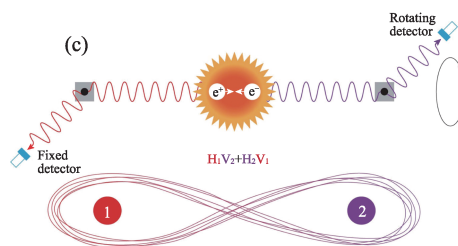
1946 年,物理学家约翰·惠勒提出设想:电子与正电子湮灭时会产生一对方向相反的伽马光子,它们的偏振应当呈现量子力学所预测的相关性。以此为理论基础,吴健雄与她的研究生欧文·沙克诺夫(Irving Shaknov)于 1949 年在哥伦比亚大学完成



吴健雄



沙克诺夫(右)



EPR 后 15 年,首个光子纠缠实验

图 4

了一项里程碑式实验。实验结果首次提供了光子纠缠的实验证据,并与量子力学的预言高度一致。距离 EPR 悖论的提出仅仅十五年,吴-沙克诺夫实验便成为历史上首个光子纠缠的观测记录。更值得注意的是,这一成果甚至早于吴健雄后来更为人熟知的“宇称不守恒”实验数年。遗憾的是,尽管她在这两个领域都作出了开创性贡献,吴健雄却始终未能获得诺贝尔奖。

五、贝尔不等式

从某种视角看,约翰·贝尔堪称 20 世纪后半叶最重要的物理学家之一。他兼具数学的严谨、物理的洞察与哲学的敏锐,这种跨界的深度在科学史上极为罕见。若说爱因斯坦的物理贡献如同毕加索的艺术——革新根基、广受瞩目——那么贝尔的成就则更像杜尚:他并不满足于延续既有范式,而是直接质疑根基,挑衅主流假设,迫使科学界重新正

视量子哲学的核心难题。

20 世纪中叶,物理学的主流焦点集中在亚原子结构与基本粒子的对称分类上,量子场论与标准模型逐渐成为时代的智识潮流。相比之下,量子力学的基础性问题——尤其是爱因斯坦与玻尔之间的哲学争论——在 20 世纪 60 年代已被许多人视为“过时”或“与前沿研究无关”。然而,约翰·贝尔却逆流而上,以非凡的清晰与勇气重新审视这些被忽视的根本问题。

贝尔提出了一个关键问题:如果世界遵循经典物理的“局域实在论”,那么粒子间的相关性必须满足某些数学不等式——这就是贝尔不等式。

- 局域性:物理影响不能超越光速传播,不存在“鬼魅般的超距作用”。

- 实在性:物理属性在测量之前就具有确定的数值。

贝尔证明:任何满足局域实在论的理论都必须遵守这些不等式。然而,量子力学的预测却会违反它们。随后的实验也确实显示,自然界并不遵循局域实在论。换言之,量子纠缠展现出非局域的相关性,挑战了经典因果与独立实在的假设。

贝尔定理的意义在于,它将长期停留在哲学层面的争论转化为可检验的实验问题。它不仅是一个数学结论,更是一场概念上的革命:要么自然界本质上是非局域的,要么“实在”在测量之前并不确定。无论哪种答案,都足以动摇经典物理赖以建立的根基(图 5)。

贝尔本人在生前并未因这一贡献获得应有的

奖赏。然而,随着时间推移,他的工作不仅催生了量子信息科学的兴起,也在 2022 年诺贝尔物理学奖的颁发中得到最终印证——这一奖项授予了阿兰·阿斯佩、约翰·克劳瑟和安东·塞林格,以表彰他们通过实验验证了贝尔不等式的违背,并开创了量子信息学的新纪元。

回顾来看,贝尔的遗产不仅在于技术推动,更在于概念启迪。他提醒科学界:澄清物理学的根基并非奢侈的哲思,而是科学进步不可或缺的必要条件。

贝尔不等式以简洁而深刻的数学形式,揭示了量子世界与经典直觉之间的根本冲突。它不仅回应了爱因斯坦对量子力学完备性的质疑,更将抽象的哲学辩论转化为可检验的实验问题。由此,贝尔定理为 21 世纪量子科技的崛起奠定了坚实的哲学与实验双重基础。

六、21 世纪的纠缠

今逢量子力学发现百年。回顾其真义,或不仅在于解释氢原子光谱、揭示粒子结构——尽管这些奠定了现代物理的基石。从未来文明的眼光看,或许在 24 世纪,人类会认为量子最深远的遗产,是对量子纠缠的揭示。

纠缠展现了量子粒子间全新的关联方式——悖逆经典直觉,却成为先进计算与信息处理的核心资源。纠缠粒子仿佛在进行一种超越空间的“非局域对话”,无论相隔多远,依然保持深层联系。这一现象挑战了局域性的常规理解,或许终将重塑我们对时空的认识。

ON THE EINSTEIN PODOLSKY ROSEN PARADOX*

J. S. BELL†

Department of Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin

(Received 4 November 1964)

$$1 + P(\vec{b}, \vec{c}) \geq |P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})|$$

图 5 任何满足局域实在论的理论都必须遵守这些不等式,实验显示自然界并不遵循局域实在论

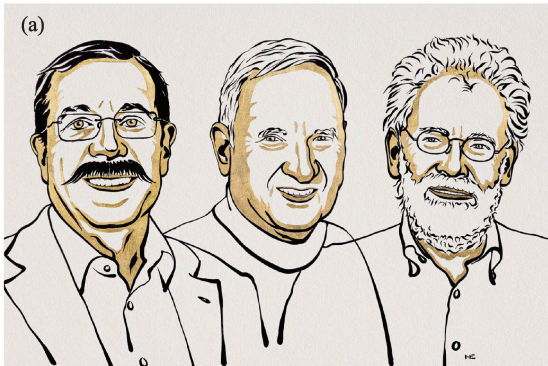
光子纠缠实验的开展,使得贝尔不等式被实验证实为可被违背,从而驳斥了经典隐变量理论,确认了量子力学固有的概率性。为表彰这一奠基性的贡献,2022 年诺贝尔物理学奖授予阿兰·阿斯佩、约翰·克劳瑟与安东·蔡林格,理由是:“表彰他们在纠缠光子实验、贝尔不等式检验以及量子信息科学开创方面的贡献。”(图 6)

21 世纪仅过四分之一,纠缠已成为量子科技的根本支撑——推动了量子计算、量子通信与量子传感的发展。尤其在自由空间量子通信方面,进展尤为显著:

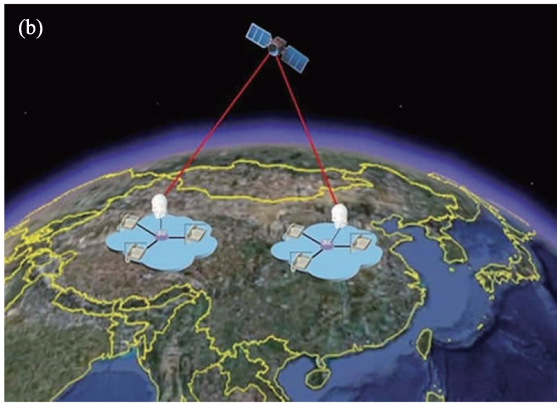
- 2017 年:中国“墨子号”卫星实现了超过 1200 千米的纠缠分发,成为全球里程碑。
- 2025 年:中国科大潘建伟团队进一步突破,将量子通信距离扩展至约 1.3 万千米,标志着全球量子网络迈出关键一步。

就在完成本文的当晚,2025 年的诺贝尔物理学奖授予约翰·克拉克、米歇尔·德沃雷以及约翰·马丁尼斯,以表彰他们证明了宏观尺度上的量子力学效应,为量子技术的发展奠定了基础,如量子计算机和量子传感器(图 7)。

量子计算的根本是量子纠缠,量子纠缠的源头是吴健雄在 1949 年的实验,而吴健雄做实验的原因是爱因斯坦 1935 年的 EPR 文章。



Nobel Prize in Physics 2022
纠缠实验与诺贝尔奖



量子纠缠: 量子科技的根本

图 6

纠缠不仅是量子力学最奇异的特征之一,更是未来量子科技的基石。它让我们重新理解“关系”在物理中的地位:

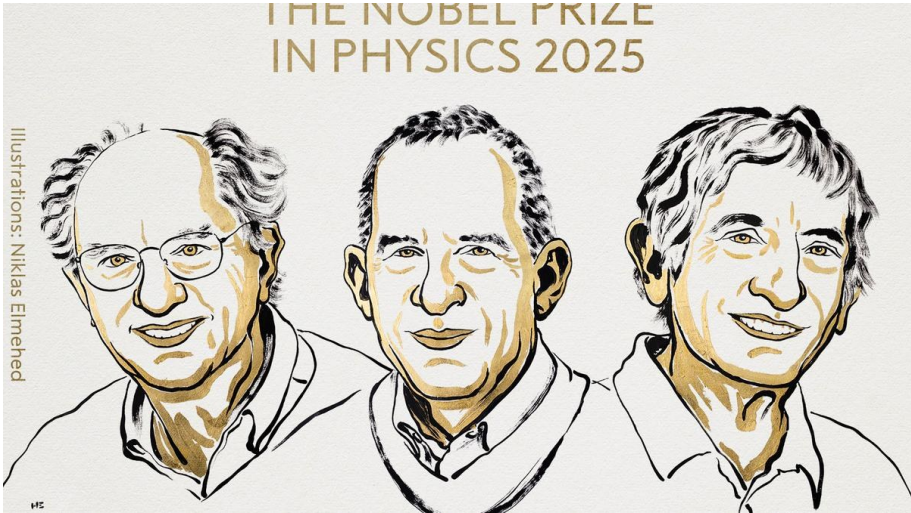


图 7 量子计算与诺贝尔奖

昔人筑起巨大的加速器，
在至微的尺度里，
在高能的碰撞中，
追寻真理的微光。

在我看来，宇宙更像一曲交响乐。
光子轻快如弦，
星辰舞动如音符，
引力低沉如鼓，
量子纠缠，
跨越时空如和声。

纠缠自然恒久，
如同惯性自然长存，
宇宙无为，却自圆满，
我亦无为，而得自足。

参考文献

- [1] Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* *Physical Review*, 47(10), 777-780.
- [2] Schrödinger, E. (1935). *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*. *Die Naturwissenschaften*, 23, 807-812.
- [3] Wu, C. S., & Shaknov, I. (1950). *The angular correlation of scattered annihilation radiation*. *Physical Review*, 77(1), 136-136.
- [4] Kam, C.-F., Zhang, C.-N., & Feng, D. H. (2024). *Chien-Shiung Wu's trailblazing experiments in particle physics*. *Physics Today*, 77(12), 28-35.
- [5] Bell, J. S. (1964). *On the Einstein Podolsky Rosen paradox*. *Physics Physique Fizika*, 1(3), 195-200.
- [6] Yin, J., Cao, Y., Li, Y.-H., Liao, S.-K., Zhang, L., Ren, J.-G., Cai, W.-Q., Liu, W.-Y., Li, B., Dai, H., Li, G.-B., Lu, Q.-M., Gong, Y.-H., Xu, Y., Li, S.-L., Li, F.-Z., Yin, Y.-Y., Jiang, Z.-Q., Li, M., ... Pan, J.-W. (2017). *Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers*. *Science*, 356(6343), 1140-1144.
- [7] Pan, J., Peng, C., Liao, S., et al. (2025). *Real-time quantum key distribution between a microsatellite and mobile ground stations*. *Nature*, 619, 112-118.

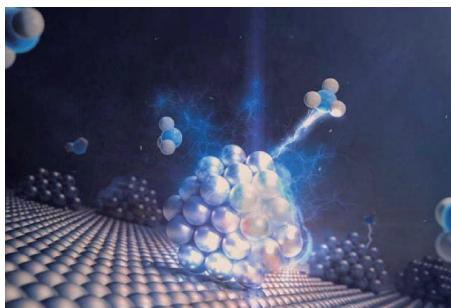
科苑快讯

科学家解开催化的秘密

明尼苏达大学(University of Minnesota Twin Cities)研究人员现在已经证明,催化中的电子共享可以通过他们发明的一种称为等电位电子滴定法(Isopotential Electron Titration, IET)的技术直接测量。这一发现将显著降低燃料、化学品和材料的生产成本。这项工作的细节发表在开放获取期刊《美国化学学会核心科学》(ACS Central Science)上,研究结果阐明了金、银和铂等贵金属在催化方面如此有效的原因,并为创造新一代催化材料提供了指导。

当分子接近催化剂表面时,它们与催化金属(在这种情况下是金、银或铂)共享电子,从而使分子稳定,从而发生所需的反应。这个概念已经被理论化了一个多世纪,但对这些微小的、高度相关的电子百分比的直接测量从未被直接观察到。

IET 现在可以作为实验描述新催化剂配方的工具,这将使研究人员能够更快地筛选和发现理想的催化物质。IET使我们能够测量与催化剂表面共享的电子的比例,甚至低于1%,比如铂上的氢原子。一个氢原子在铂催化剂上结合时只放弃0.2%的电子,但正是



这个很小的百分比使得氢在工业化学制造中发生反应成为可能。随着合成催化剂的纳米技术的出现,结合机器学习探索和利用大数据集的新工具,工程师们已经确定了大量新的催化材料。

工业新催化技术的基础一直是基础研究,分数电子分布的新发现为理解催化剂建立了一个全新的科学基础,这将在未来几十年推动新能源技术的发展。

(高凌云编译自2025年10月7日 SciTechDaily网站)