

专论

量子纠缠、贝尔不等式和量子信息^{*}

——2022年诺贝尔物理学奖解读

马雷 (华东师范大学物理与电子科学学院 上海 200241)

摘要 2022年诺贝尔物理学奖授予了阿斯佩克特等三位物理学家,以表彰他们利用纠缠态实验验证伪贝尔不等式,并开创了量子信息科学新领域的杰出贡献。本文描述了量子纠缠概念的由来,厘清了量子力学发展历史上的定域实在论、隐变量理论、空间非定域性以及贝尔不等式之间的脉络关系,并简要介绍了诺贝尔奖得主们在该领域所做的重要工作。最后,结合第二次量子革命兴起的新形势,阐述了上述研究工作的重要意义。

关键词 量子纠缠 贝尔不等式 定域实在论 隐变量 量子信息

文章编号 1002-0748(2023)1-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 A

2022年10月4日,2022年诺贝尔物理学奖授予法国物理学家阿斯佩克特(Alain Aspect)、美国物理学家克劳泽(John F. Clauser)和奥地利物理学家塞林格(Anton Zeilinger),以表彰他们“利用纠缠光子进行实验,证伪了贝尔不等式,并开创了量子信息科学新领域。”该方面的研究工作在最近几年曾多次被人们预测可能获得诺贝尔物理学奖,反映了学界对它的重视程度。此次终于不负众望,荣膺此席,亦是名至实归、意料之中的结果。

1 量子纠缠概念的由来

量子纠缠的现象引起人们的关注,始于1935年。在此之前的几年里,量子力学的理论框架虽然已经初步建立起来,但在其内涵的诠释上仍存在着较大的分歧。其中,以玻尔、海森堡、玻恩等人为代表的“正统”派(即被后人归纳为所谓的“哥本哈根学派”),他们的量子力学统计诠释学说已形成较为完整的体系,占据了主导地位。此外,以爱因斯坦、薛定谔、德布罗意等为代表的反对派,对“哥本哈根学派”的或然性、不确定性等非决定论观点提出了多方面的质疑。特别是在1927年与1930年,爱因斯坦与玻尔曾于索尔维会议上进行过两次著名的大论战,至今仍为世人所津津乐道。

1935年发生了两件事,一定程度上仍是前几年这两派争论的持续,却开始引起了人们对量子纠缠现象的关注。这一年,爱因斯坦、波多尔斯基(Podolsky)和罗森(Rosen)三人在他们所提出的EPR悖论中,曾讨论了相距很远的两个粒子^[1]。以双电子自旋关联态为例,若两个电子处于如下总自旋为零的自旋态上(设+、-分别为在 z 方向测得电子自旋的正负取值):

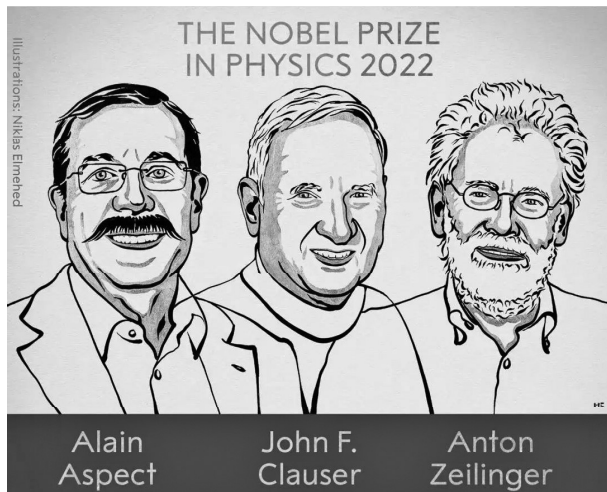


图1 2022年诺贝尔物理学奖得主

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

* 基金项目:本文受上海市重点课程建设项目及华东师范大学大夏学堂优质示范课程项目资助。

当两个电子相隔很远时,在随机测量两者之一的自旋 \approx 方向数值时,可知得到正负值的概率都是 $1/2$ 。但如果先测量其中一个电子,发现自旋取值为正,然后再测量另一个电子的自旋,发现它一定只能得到负值,反之亦然。也就是说,测量体系中的一部分子系统,也必然会引起另一部分子系统测量结果的改变,这种量子态就称为量子纠缠态。上面的模型也可以用其他方式构建,如利用光子的水平偏振态和垂直偏振态,可以制备纠缠光子偏振态,等等。

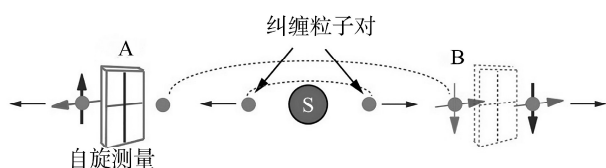


图 2 EPR 纠缠粒子对的测量示意图

1935 年发生的另一件事,是薛定谔提出了一个理想化的实验问题,即所谓的“薛定谔猫”悖论。薛定谔把一个可能发生衰变的量子态(用 1 、 0 分别代表是否发生衰变的量子态)通过一种极端的设置,与猫的“活”“死”两种宏观现象状态关联在一起:

$$|\psi\rangle = \alpha |0, \text{活}\rangle + \beta |1, \text{死}\rangle$$

薛定谔指出:“通过相互作用,两个态(作者按:指粒子态和‘猫态’)发生了纠缠”。这恐怕是“量子纠缠”(quantum entanglement)一词最早的来源^[2]。

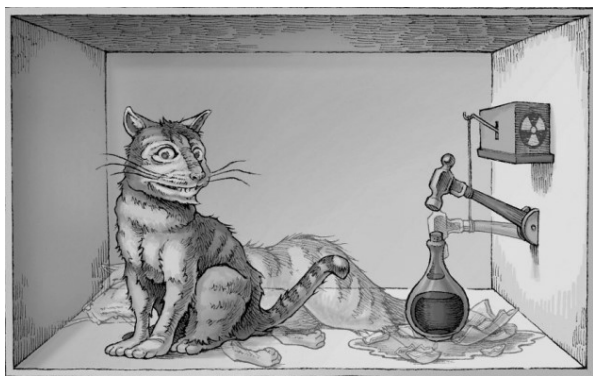


图 3 著名的薛定谔猫悖论示意图

1957 年,玻姆(David J. Bohm)和阿哈罗诺夫(Yakir Aharonov)在实验上验证了量子纠缠态的存在。

2 定域实在论、隐变量理论与贝尔不等式

1935 年的 EPR 一文认为,量子世界的理论应具有实在论与定域性这两个要素,否则就是不完备

的,这就是所谓的定域实在论观点。实在论是指物理量的观测应与测量无关,这与“哥本哈根学派”的量子力学统计诠释是针锋相对的;定域性是指一处的测量不会影响到他处的性质,其进一步的解释将涉及微观世界的因果性问题。由狭义相对论的光速不变原理得知,任何物体运动或信号传播的速度都不可能超过真空中的光速。那么,从两个事件是否具有因果关系来看,若两个事件发生的空间距离小于其时间间隔乘以光速,即物理学中所称的类时间隔,它们之间有存在因果关系的可能性(当然也有可能全无关系),被称为空间定域性(locality)事件。反之,若两个事件发生的空间距离大于其时间间隔乘以光速,即物理学中所称的类空间隔,可以认为这两个事件之间不会存在因果关系,就被称为空间非定域性(nonlocality)事件。所以,从微观因果性的角度而言,空间非定域性主要是指超过光速的“超距作用”。

玻姆在 1952 年提出了隐变量的理论,把在量子力学中的非决定论因素归于额外的变量,即隐变量,认为在隐变量存在的条件下,客观世界仍是满足实在性的。如果这个理论还满足定域性,就称为定域性隐变量理论(即满足 EPR 一文所认为的定域实在论条件)。1964 年,英国物理学家贝尔(John S. Bell)在定域性隐变量存在的前提假设下,导出了一个关于在各个方向进行量子测量的关联函数的普适性不等式,即著名的贝尔不等式^[3]:

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

贝尔不等式是由定域性隐变量理论导出的一个必要性结果,如果它成立,仅表明定域性隐变量有存在的可能性;但若它不成立,则表明定域性隐变量一定不存在。而量子力学的理论结果是违反贝尔不等式的。因而,验证贝尔不等式是否成立,成为判别量子力学与定域性隐变量理论何者正确的试金石。其后半个世纪的时间里,一批批科学家们前赴后继,投身于贝尔不等式的理论和实验研究,使得其成为物理学最有活力的研究方向之一。

1969 年,美国的克劳泽等人将贝尔不等式推广到量子纠缠态系统,得到了一个与贝尔不等式等价的新不等式,被称为 CHSH 不等式。1972 年,克劳泽等首先在实验上得到了违背贝尔不等式的结果,但是这个实验存在着一些漏洞和局限,如在隐变量的实在性、定域性的实现等方面的实验设置上并不能令人满意。1982 年,来自法国的阿斯佩克特在实

验上实现了一定程度上的定域性。在他们的实验中,光子在到达每个仪器之前,每个测量光子偏振的装置的方向随机改变,他们确定地观察到了违反贝尔不等式的结果^[4]。阿斯佩克特的这次实验结果,在验证贝尔不等式的系列实验中具有决定性的地位,这也使得他成为此次三位获奖者之首位的关键。自上世纪末至今,后续进行的一系列实验,又相继补上了定域性漏洞和探测漏洞,奥地利物理学家塞林格所领导的研究组发挥了重要的作用,完成了其中的多个实验。

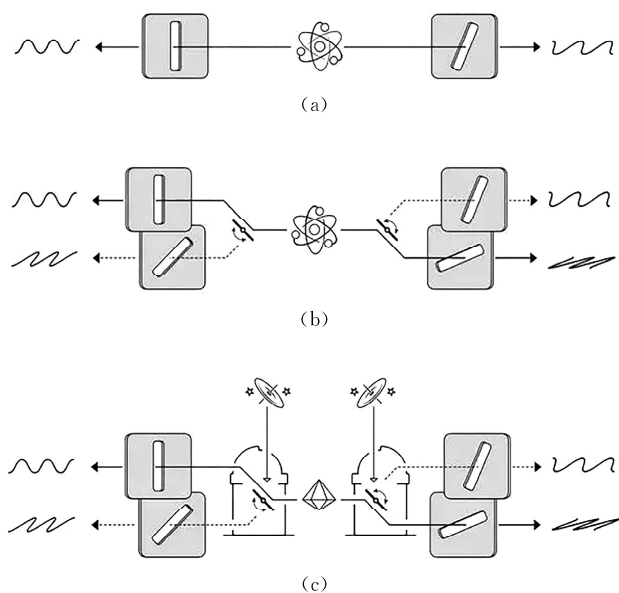


图 4 三位诺贝尔奖得主们关于贝尔不等式的主要验证方案示意图

此次获奖的三位物理学家无疑是验证贝尔不等式的系列实验中的最杰出贡献者(令人感到遗憾的是这一研究方向的开创者约翰·贝尔已于 1990 年不幸去世,无缘获奖),他们工作的主要意义在于否定了定域性隐变量的存在。有人认为是量子力学全面压倒了隐变量理论,取得了最后胜利,笔者认为这种说法并不准确。贝尔不等式的违反仅仅是证明了实在论与空间定域性不能同时成立,但仍不能排除满足空间非定域性的隐变量存在的可能性。

以两粒子纠缠态为例,对其中一个粒子进行测量,会导致该粒子的量子态发生坍缩,由于粒子间的纠缠关系,进而会导致另一个粒子也会发生坍缩(称为关联坍缩)。从第一个粒子的坍缩,到第二个粒子的关联坍缩,这两个事件之间是空间定域性的?还是空间非定域性的?目前的相关实验情况表明,它们之间极有可能是同时发生的,显然是超光速的超

距作用效应,即空间非定域性事件。这样的空间非定域性现象在量子测量、量子纠缠中比比皆是,表明在微观粒子体系,空间非定域性效应是广泛存在的。因此,满足空间非定域条件的隐变量的存在,也并非是一件不可能的事情。

因此,贝尔不等式的证伪实验,确实是量子力学对定域性隐变量理论的胜利,但对隐变量理论则还只是一个阶段性的胜利,空间非定域性隐变量存在的可能性尚未被完全排除。对于爱因斯坦曾经有过的那句名言:“我不相信上帝会掷骰子”,目前仍然无法下最后结论:上帝究竟是玩,还是不玩骰子!最终谜底的揭开,还有赖于科学家们在今后的艰苦探索与努力。

3 量子纠缠对于量子信息的作用

关于贝尔不等式的研究也表明,量子纠缠等反直观性质不仅是量子力学的重要特征,而且是一种全新的、超越经典物理范畴的、但尚未应用的宝贵物理资源;特别是,量子纠缠是可控的,可以用来处理和传输量子信息。这一点在之后导致了量子信息学的产生。

量子信息主要包含量子计算与量子通信两个方面(笔者曾在本刊 2016 年第 12 期与 2017 年第 3 期分别撰文对量子通信与量子计算做过简介),以及量子精密测量、量子仿真、量子人工智能等一系列相应的新兴研究方向。量子计算是一种通过对量子信息单元(量子比特)进行操控的新型计算模式,执行量子计算的设备被称为量子计算机。由于量子态的可叠加特性,量子信息单元可处于多种可能的叠加状态,从而使量子计算机的并行计算能力大大超越经典计算机。自上世纪八十年代初美国物理学家费曼提出量子计算机的设想,不久英国的多伊奇设计了量子图灵机的概念,到九十年代肖尔(Shor)算法和格罗弗(Grover)算法的问世,极大地推动了量子计算的研究,相继出现了利用线性量子光学、腔量子电动力学、离子阱、量子点、超导约瑟夫森结、里德堡原子等实现量子计算的方案,使量子计算成为备受关注的研究方向。

除量子计算外,量子通信也取得了重要进展,量子相干叠加和量子纠缠也是众多量子通信方案的核心,特别是量子密码术(quantum cryptography)与量子隐形传态(quantum teleportation)技术。上世纪八十年代,相继出现了基于光子偏振态的 BB84 协议、B92 协议,以及基于量子纠缠态的 E91 协议等

量子密码分发方案,并在实验上得到实现。量子隐形传态是量子力学在量子通信领域的最惊人的应用之一,本内特等人于 1993 年提出利用纠缠态作为信息通道,实现了量子信息态的远距离传送。1997 年,塞林格组首次完成了量子隐形传态实验^[5],次年又在实验上完成了纠缠交换。当时,潘建伟院士作为塞林格的博士生,是上述两次实验的主要贡献者之一。量子信息科学的研究迅速走热,并走入了大众视野,与量子隐形传态的实验实现有着很大的关系。

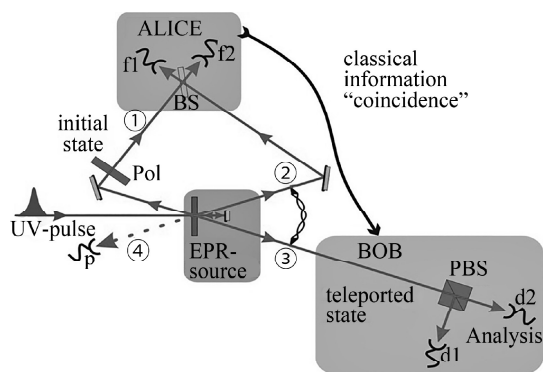


图 5 1997 年塞林格组利用光子纠缠态完成的量子隐形传态示意图

近年来,量子信息技术又有了令人瞩目的新进展。在量子计算方面,谷歌公司在 2019 年推出了 53 个量子比特的基于超导量子纠缠机制的“悬铃木”量子计算原型机。我国的潘建伟院士团队于 2020 年成功构建了 76 个光子的量子计算原型机“九章”,并于次年进一步构建了 113 个光子的“九章二号”量子计算原型机。2021 年,潘建伟院士团队还利用超导材料,构建了可编程的 62 量子比特原型机“祖冲之”,不久改进为 66 量子比特的“祖冲之二号”。

在量子通信方面,我国也取得了非常突出的成就。2016 年,潘建伟院士的研究团队研制并发射了世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”,2022 年还利用墨子号卫星实现了 1 203 千米的量子纠缠分发,并且观察到了贝尔不等式的违反。2017 年,世界首条远距离量子保密通信干线——“京沪干线”正式开通。2018 年,潘建伟院士团队又与塞林格研究组合作,将纠缠光子对分配到中国与奥地利两地。获得本次诺奖的三位科学家与我国相关学术机构与团队有着密切的交往与合作,我国科学家的研究成果也为本次诺奖的获得提供了坚实的基础。在诺贝尔奖的官方介绍中,曾大量引用了潘建伟院士团队的成

果与贡献,其中包括三篇论文是在“墨子号”发射之后,中国科学家们做出的相关工作。

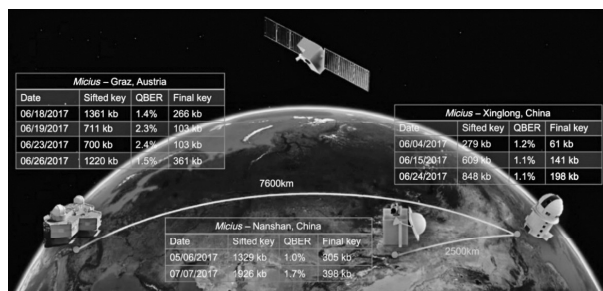


图 6 2018 年潘建伟院士团队与塞林格组合作完成的中国-奥地利量子纠缠分发示意图

4 从第二次量子革命兴起的视角看本次诺奖工作的意义

在上个世纪,人们基于量子力学的原理,成功地研制了晶体管、激光、核反应堆等器件或技术;之后,又开发了电脑、手机、光纤、互联网等,人类社会由此进入了信息时代。这个过程,即第一次量子革命,大大加快了物质文明的发展进程,使人类社会发生了前所未有的变化。随着贝尔不等式的检验和量子纠缠等问题的研究进展,极大推动了单量子实验新技术与理论的发展,还引出了具有重大意义的研究方向,即将单量子操控技术运用于量子计算等问题的研究。在此基础之上,产生了量子信息科学与技术,并引领最近三十年来物理科学与技术及其相关领域的发展,拉开了第二次量子革命的序幕^[6]。第一次量子革命给我们提供了支配物理现实的新规则。在第二次量子革命中,我们将采用这些新规则,并利用它们开发崭新的技术,特别是在未来几十年中可能出现的量子技术,包括:量子信息技术、量子机电系统、相干量子电子学、量子光学和相干物质技术,等等。阿斯佩克特在给贝尔的量子哲学的论文集第二版所写的序言中,也提出了第二次量子革命的概念。在文中,他特别强调了单量子操控技术和相关理论发展的重要性,并对第二次量子革命产生的背景和将来的重要影响做了深入的分析。

进入 21 世纪以来,人们已经意识到,量子技术与信息技术将发生深度融合,从而对未来人类社会的发展产生不可估量的影响。世界各主要国家,都在积极地布局量子信息科学和技术的研究,并着力推动其技术应用。

我国高度重视量子信息科学和技术的研究。自 2016 年起,我国设立了有关的国家重点研发计划重

点专项,支持量子信息技术领域的研究。2020年10月16日,习总书记在主持中共中央政治局关于量子科技研究和应用前景的学习时曾指出:“量子科技发展具有重大科学意义和战略价值,是一项对传统技术体系产生冲击、进行重构的重大颠覆性技术创新,将引领新一轮科技革命和产业变革方向。”“要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性,加强量子科技发展战略谋划和系统布局,把握大趋势,下好先手棋。”如前所述,近年来我国在量子信息领域取得了具有重要国际影响力的研究成果,突破了一系列关键核心技术。总体而言,我国在量子通信方面处于国际领先地位,在量子计算方面与发达国家处于同等水平,有望在已然兴起的第二次量子革命中抢占先机。

围绕着量子纠缠与贝尔不等式的相关研究工作,最初起源于对量子力学基本问题的解释,其研究成果昭示了量子力学对定域实在论的胜利,对于人们认识自然的本质迈出了可喜的一步,具有标志性的意义。另一方面,它也开启了量子信息科学的研究之门,进而促进了量子技术向各学科进行融合交叉的进度,具有广泛的技术应用前景。可以认为,该项工作在物理学发展史上将会起到承上启下的作用,对未来整个科学技术发展的影响也难以估量。正如诺贝尔物理学奖委员会主席安德斯·伊尔巴克所言:“越来越清楚的是,一种新型的量子技术正在

出现,我们可以看到,获奖者在纠缠态方面的工作重要性,而这甚至超过了关于量子力学解释的基本问题。”

通过对本次诺奖研究工作的了解,再次让人们深刻地体会到:原创性基础研究是推动科学技术发展的动力,是引领新一轮科技革命和产业变革的源头。对于我们从事物理教学的教育工作者而言,鼓励学生的原创性思想,培养学生的批判性思维能力,以造就在新形势下满足国家和社会需求的创新型人才,是一个非常紧迫的任务。

参考文献

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? [J]. *Physical Review*, 1935, 47(10):777.
- [2] E. Schrödinger. Discussion of probability relations between separated systems [J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1935, 31:555.
- [3] J. S. Bell. On the Einstein Podolsky Rosen paradox [J]. *Physics Physique Fizika*, 1964, 1(3):195.
- [4] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers [J]. *Physical Review Letters*, 1982, 49(25):1804.
- [5] D. Bouwmeester, J. W. Pan, K. M. Eibl, H. Weinfurter, and A. Zeilinger. Experimental quantum teleportation [J]. *Nature*, 1997, 390:575.
- [6] 文小刚, 物理学的第二次量子革命[J]. *物理*, 2015, 44(4):6.

(上接第 13 页)

联立表达式④⑤可以得到:

$$v_0 \sin \varphi = v_1 \sin[180^\circ - (15^\circ + \varphi)] \leq v_2$$

整理之后可得:

$$\sin(15^\circ + \varphi) \leq \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{2} \quad \text{⑥}$$

显然人要追上艇,须满足 $v_1 > v_0$, 故由位置 A 的速度矢量三角形可知: $\varphi > 82.5^\circ$, 因此由表达式⑥可知: $\varphi \geq 135^\circ$ 。

再由表达式④即可得到人要追上汽艇,风吹汽艇的速度 v_0 须满足:

$$v_0 \leq \frac{v_2}{\sin(180^\circ - \varphi)} \leq \frac{v_2}{\sin 45^\circ} = 2\sqrt{2} \text{ km/h}$$

4 结束语

发展学生的物理核心素养贯穿于物理教学活动

的全过程中,而习题课的教学只是这个过程的其中之一。习题课对提升学生的物理学科核心素养的作用不言而喻,但是要发挥好习题课的功能与价值就需要教师明确习题课的目标,把握习题课的导向,注重习题课与学生思维发展与认知能力的关联,使习题课不仅仅讲解怎么做题,更要让学生能够举一反三地解题。作为教师,要关注学生对习题解法的质疑与创新,引导学生勤于思考、勇于探索,从而使习题课成为提升学生物理学科核心素养的重要方式与途径。

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)[S]. 北京:人民教育出版社,2020. 5:55—56.
- [2] 廖伯琴. 普通高中课程标准(2017年版)教师指导·物理[M]. 上海:上海教育出版社,2019. 11:144.