

· 科技评述:2022 年诺贝尔奖评述 ·

2022 年诺贝尔物理学奖:量子纠缠

王向斌^{1*} 潘建伟^{2*}

1. 清华大学 物理系,北京 100084

2. 中国科学技术大学 近代物理系,合肥 230026

[摘要] 量子纠缠是今年诺贝尔物理学奖的核心科学内容。量子纠缠不但成功应用于量子力学基础检验,更是量子信息科学的基础资源,而量子信息科学的蓬勃发展又使得量子纠缠的重要性得到学术界的广泛认可。今年的诺贝尔物理学奖适逢其时,将为量子信息科学进一步深化发展发挥巨大的推动作用。

[关键词] 量子纠缠;贝尔不等式;量子信息

DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.06.003

2022 年诺贝尔物理学奖的核心科学内容是量子纠缠。三位该领域的先驱,Alain Aspect、John Clauser 和 Anton Zeilinger 因“用纠缠光子进行实验、确立贝尔不等式的违被以及开创量子信息科学”而获得本年度诺贝尔物理学奖。量子纠缠不但是量子力学基础检验的关键载体,更是量子信息科学的核心资源。下文从量子力学基础出发,介绍 2022 年度诺贝尔奖工作的背景和科学意义、量子信息学科的现状,以及量子纠缠在其中扮演的核心角色。

1 2022 年诺贝尔奖的背景与科学意义

量子力学是迄今为止人类描述微观世界规律最成功的科学理论,但量子力学的基本原理并不符合人们已经习惯了的来自经典世界的直觉。比如,根据经典直觉,一个粒子物理量的值,比如一个光子的极化方向,在对极化进行测量前应该是已经确定了的,和是否执行测量无关;同时,对一个粒子的测量结果,不能以超光速的方式影响另一个粒子的测量结果,这就是爱因斯坦所坚持的“定域实在性”。然而,按照量子力学的预言,微观粒子物理量的值在测量前可以是完全不确定的,同时即使是相距遥远的两个纠缠粒子,对其中一个粒子的测量可以瞬间决定对另一个粒子的测量结果,这即是“量子力学非定



王向斌 清华大学教授,济南量子技术研究院院长。主要从事量子通信理论研究,是实用化量子保密通信主要方法——诱骗态方法的主要提出者之一。于 2016 年和 2018 年为实用化量子密钥分发先后提出了 4 强度优化协议理论和“发送/不发送”双场协议理论,获得广泛实验应用,有力地推动了兼顾安全和实用的远距离量子保密通信的发展。



潘建伟 中国科学技术大学常务副校长、教授,中国科学院院士,发展中国家科学院院士,中国科学院量子信息与量子科技创新研究院院长。主要从事量子光学、量子信息和量子力学基础问题检验等方面的研究。潘建伟教授是国际上量子信息实验研究领域的开拓者之一,利用量子光学手段,他在量子调控领域取得了一系列有重要意义的研究成果。

域性”。在爱因斯坦看来,量子纠缠的这种性质是“遥远地点之间的诡异互动”,定域实在性与量子力学理论的冲突,成为爱因斯坦与玻尔的世纪之争的焦点。

进一步,1935 年爱因斯坦与两位年轻的合作者在一篇论文中引入了一类量子纠缠态并给出了强烈违反直觉的结果,试图质疑量子力学理论的完备性^[1]。爱因斯坦当时引入量子纠缠态的属性,本意

收稿日期:2022-12-14;修回日期:2022-12-15

* 通信作者,Email: xbwang@mail.tsinghua.edu.cn; pan@ustc.edu.cn

是想通过这个看起来诡异的关联结果来显现量子力学违反直觉,然而后续的研究发现,正是量子纠缠提供了验证量子力学正确性的实验方法和具体的标准。1964年,英国物理学家 John Bell 提出了著名的贝尔不等式^[2]。以贝尔不等式为代表的后续理论,给出了判别定域实在性的量化标准:任何定域实在性理论必须满足这个不等式;而依据量子力学理论,量子纠缠态的计算结果可以明显违反这个不等式。这就意味着,只要拥有量子纠缠,就可以通过实验来判别定域实在性和量子力学非定域性孰是孰非了。值得指出的是,在贝尔不等式提出之前的1950年,华人科学家吴健雄就通过正负电子湮灭产生的光子对极化关联首次观测到了量子纠缠^[3]。

此后,科学家们通过长期的努力,不断地发展了对量子纠缠态的制备、操作和测量等一系列技术。自20世纪70年代以来,基于对量子纠缠的操纵,科学家开展了大量贝尔不等式的实验检验工作,今年的三位获奖者在这一过程中发挥了先驱性的作用。1972年,John Clauser 等首次实现了贝尔不等式的违背实验,但是在这个实验里,对两个粒子的测量尚未做到类空间隔^[4]。1982年,Alain Aspect 等实现了类空间隔测量的贝尔不等式违背,但测量方向的选择是预先设定的,仍然不能完全符合贝尔不等式的理论假设^[5]。1998年,Anton Zeilinger 等实现了随机快速切换测量方向的实验,关闭了以往贝尔不等式实验的漏洞^[6]。此后,更加精确的贝尔不等式检验实验被陆续实现,实验结果已经越来越明确地支持量子力学。

总之,利用量子纠缠对贝尔不等式的实验检验,否定了人们习以为常的定域实在性,人们不得不接受一个全新的观念:微观粒子物理量的值可以是不确定的,在对其进行测量之前,原理上都无法得知测量结果是什么,即是一种内禀的随机性!这是对理解自然界的一场深刻革命。巧妙的是,利用这种内禀的随机性,立即可以产生在信息安全领域的应用:利用量子纠缠的测量结果关联,可以在通信双方产生一组密钥;如果在密钥的产生过程中存在窃听(即对粒子状态的测量),测量会导致粒子状态的确定,从而使得随机性降低,就无法违背贝尔不等式,因此一切窃听行为都可以通过对贝尔不等式的检验来发现,从而规避窃听以保证密钥的安全^[7]。

2 量子纠缠与量子信息

在进行量子力学非定域实验检验的过程中,对包括量子纠缠在内的量子状态的精确操纵技术得以系统性地发展,由此逐步形成了一个具有巨大应用前景的新兴研究领域:量子信息科学。量子信息科学的主要应用包括量子通信、量子计算、量子精密测量等,可望在信息传输安全、提高计算能力、提升测量精密等方面突破经典信息技术的极限,因此,从其诞生起就得到了世界主要国家的重视。可以说,正是由于量子信息技术的迅猛发展,量子纠缠的重要地位日益清楚显现,促使这一领域的开创性工作得到了学术界的高度肯定。例如,2022年诺贝尔物理学奖的科学背景报告以很大篇幅论述量子通信,包括现有的两种具体的量子通信形式:量子隐形传态和量子密钥分发,以及学术界对于如何拓展纠缠分发及量子通信的距离所做出的努力。

值得指出的是,该科学背景报告也较为详细地介绍了中国科学家的贡献。例如报告中写到:“这一途径(即自由空间量子通信)由潘建伟所领导的团队利用由中国在2016年发射的‘墨子号’量子科学实验卫星率先实现”^[8,9]。此后一整段文字介绍中国团队基于“墨子号”量子卫星量子纠缠分发的工作:“潘和他的同事们基于卫星完成了相隔1200公里的地面两点的量子纠缠分发……”^[10]。科学背景报告还比较详细地介绍了量子通信领域的其他重要成果,包括量子态隐形传态、量子纠缠交换等,这是量子中继技术的基础。所有这些将对未来的基于量子中继和卫星节点的广域量子通信网络发挥关键作用。

毫无疑问,包括我国“墨子号”量子卫星在内的近年来量子信息科学领域的系列重要突破,有力促进了人们对量子纠缠的科学意义和应用价值的深入了解。从这个角度而言,尽管基于贝尔不等式的量子力学基础检验实验从20世纪70年代就已经开始,时隔多年的诺贝尔奖并非迟到的奖励,而是量子信息技术飞速发展背景下的适逢其时的画龙点睛之笔。

3 中国的量子信息研究

在国家的前瞻性支持下,中国科学家在量子信

息领域取得了多项举世瞩目的重大突破。在量子通信方面,我国现场商用光纤无中继量子密钥分发的安全距离达到创纪录的 500 公里,成功实施“墨子号”量子卫星和量子保密通信“京沪干线”等工程化项目,构建了世界首个天地一体化广域量子通信网络的雏形。这些成就标志着我国在量子通信的研究和应用水平上处于国际领先地位。在量子计算方面,我国已完成所有重要物理体系的研究布局,成为包括欧盟、美国在内的三个具有完整布局的国家(地区)之一。近年来,我国“九章”光量子计算原型机和“祖冲之二号”超导量子计算原型机先后实现“量子计算优越性”,使得我国成为目前唯一在两种物理体系都达到这一里程碑的国家,牢固确立了量子计算研究的国际第一方阵地位。在量子精密测量领域,我国迅速缩小了与欧美发达国家的差距,在时间标准、自主导航、量子雷达等方向上达到了国际先进或领先水平。

总的来说,尽管我国的量子信息研究起步较晚,但在国家的高度重视和广大科技工作者的努力攻关下,已经实现了从跟踪、并跑到部分领跑的历史性飞跃。

参考文献

- [1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?. *Physical review*, 1935, 47(10): 777.
- [2] McWeeny R. On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Advances in Quantum Chemistry*, 2000, 36: 365—384.
- [3] Wu CS, Shaknov I. The angular correlation of scattered annihilation radiation. *Physical Review*, 1950, 77(1): 136.
- [4] Freedman SJ, Clauser JF. Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 1972, 28(14): 938—941.
- [5] Aspect A, Dalibard J, Roger G. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 1982, 49(25): 1804—1807.
- [6] Weihs G, Jennewein T, Simon C, et al. Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions. *Physical Review Letters*, 1998, 81(23): 5039—5043.
- [7] Ekert AK. Quantum cryptography based on Bell's theorem. *Physical Review Letters*, 1991, 67(6): 661—663.
- [8] Liao SK, Cai WQ, Liu WY, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution. *Nature*, 2017, 549 (7670): 43—47.
- [9] Ren JG, Xu P, Yong HL, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation. *Nature*, 2017, 549(7670): 70—73.
- [10] Yin J, Cao Y, Li YH, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science*, 2017, 356 (6343): 1140—1144.

The Nobel Prize in Physics 2022: Quantum Entanglement

Xiangbin Wang^{1*} Jianwei Pan^{2*}

1. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084

2. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract Quantum entanglement is the key scientific content of the Nobel Prize in Physics 2022. Quantum entanglement has been not only successfully applied to the test of quantum foundations, but also the fundamental resource of quantum information science. The rapid development of quantum information science in recent years has, in turn, made the importance of quantum entanglement widely recognized by the academic community. The Nobel Prize in Physics 2022 will play a significant role in promoting the further development of quantum information science.

Keywords quantum entanglement; Bell inequality; quantum information

(责任编辑 吴征天 张强)

* Corresponding Author, Email: xbwang@mail.tsinghua.edu.cn; pan@ustc.edu.cn