

量子信息革命引领未来科技革命

乔笑斐, 路昊明, 高策

山西大学科学技术史研究所, 太原 030006

摘要 作为全球瞩目的新兴战略技术焦点, 量子信息技术已经在量子计算与量子通信等领域取得了突破性进展。从科学史的角度来看, 量子信息革命与发生在20世纪的第1次量子革命在原理和内涵等方面存在着显著区别, 对未来的科技发展战略也有着直接影响。梳理了量子纠缠与量子信息技术的演变历程, 分析了量子信息技术在科学、技术、哲学等多个层面的革命性特征, 总结了量子信息革命对未来科技战略及科学发展模式的意义与启示。

关键词 量子信息; 量子革命; 大科学; 科技战略

2022年10月4日, 瑞典皇家科学院宣布2022年诺贝尔物理学奖授予阿兰·阿斯佩(Alain Aspect)、约翰·克劳泽(John F. Clauser)和安东·蔡林格(Anton Zeilinger)^[1], 以表彰他们在“纠缠光子实验、验证贝尔不等式的违反和开创量子信息科学”做出的先驱性贡献。从爱因斯坦等提出试图证明量子力学不完备的EPR佯谬, 到贝尔不等式的提出与历次实验检验, 再到量子信息技术引发第2次量子革命, 以量子纠缠为基础的一系列研究已经显示出重大且深远的影响。

21世纪以来, 以量子通信、量子计算为代表的

量子信息科学得以建立, 开启了从经典技术迈进量子技术的新量子时代。量子信息革命的革命性表现为3个方面: 首先, 以量子计算、量子通信为代表的量子技术和产业已经初步建立, 并对未来科技产业造成革命性影响; 其次, 量子技术的发展将进一步推动基础科学的发展, 如量子力学的本质、量子引力等, 推动新的科学革命, 进而推动哲学观念的变革; 最后, 在科技战略层面, 基于量子信息革命的巨大潜力, 可能成为继芯片竞争之后的又一科技战的竞争焦点, 需要在国家层面进一步全面、深度进行布局。

收稿日期: 2022-10-28; 修回日期: 2023-01-12

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(16ZDA113, 19ZDA038); 山西省社会经济统计科研课题(KYZH[2022]007); 山西省哲学社会科学规划课题(2022YJ011)

作者简介: 乔笑斐, 副教授, 研究方向为物理学哲学、物理学史, 电子信箱: qxf@sxu.edu.cn; 路昊明(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为物理学史, 电子信箱: luhaoming1997@163.com

引用格式: 乔笑斐, 路昊明, 高策. 量子信息革命引领未来科技革命[J]. 科技导报, 2023, 41(3): 81-88; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.03.009

1 量子纠缠实验助推量子信息革命

1935年,爱因斯坦、鲍里斯·波多尔斯基(Boris Podolsky)和纳森·罗森(Nathan Rosen)提出了著名的EPR佯谬^[2],即量子力学中一种“反常”的量子非定域性现象与定域实在论相违背。EPR佯谬受到物理学界的广泛讨论,这种量子非定域性现象被埃尔温·薛定谔(Erwin Schrödinger)命名为量子纠缠^[3],而定域隐变量理论作为一种量子力学的潜在解释,其是否成立便成为学界争论的焦点。

1964年,约翰·贝尔(John S. Bell)提出了著名的贝尔不等式^[4],将EPR佯谬从思想实验引向实验验证。根据贝尔不等式,如果存在隐藏变量,则测量结果之间的相关性将不会超过某个值,这就可以通过实验的方式来检验量子特性究竟是由定域隐变量决定的,还是由非定域的量子纠缠所导致。

由于贝尔不等式中的两比特系统不易于实验检验,1969年,克劳泽、迈克尔·霍恩(Michael A. Horne)、阿布纳·希芒尼(Abner E. Shimony)和理查德·霍尔特(Richard A. Holt)在贝尔不等式的基础上提出了CHSH不等式^[5],使得更适合实际操作的实验成为可能。

1972年,克劳泽与斯图尔特·弗里德曼(Stuart Freedman)合作完成了首个贝尔不等式检验实验^[6],其结果以6个标准偏差违反了贝尔不等式,意味着量子力学的预言是正确的,而定域隐变量的假设与物理系统的实际行为并不一致,但此实验存在定域性漏洞(locality loophole),采用的测量方式也不是随机选择的^[7]。此后几年间,又有多个小组进行了相关实验,其中以阿斯佩在1981—1982年的实验最为著名。阿斯佩与菲利普·格兰杰(Philippe Grangier)等合作者对克劳泽实验的装置和设计进行了改进^[8-9],最终发现了对贝尔不等式超过40个标准差的惊人违反^[10],以极高的可信度验证了量子力学的正确性^[11],但并没有真正关闭定域性漏洞^[12]。

1998年,蔡林格与格雷戈尔·韦斯(Gregor Weihs)、托马斯·詹尼温(Thomas Jennewein)等合作者在阿斯佩实验的基础上做了进一步改进,在更严格的意义上关闭了定域性漏洞^[13],其结果依然违反

了贝尔不等式,任何形式的定域隐变量理论都无法描述量子力学。蔡林格的另一项重要成就是与桑杜·波佩斯库(Sandu Popescu)的团队分别于1997年独立完成了量子隐形传态(quantum teleportation)的实验验证^[14-15],此理论由查尔斯·本内特(Charles H. Bennett)等于1993年提出^[16]。量子隐形传态以量子纠缠为基础,能够实现量子信息的远程传输,在量子通信和量子计算中发挥着重要作用^[17]。后来,蔡林格还参与了由诺贝尔物理学奖得主安东尼·莱格特(Anthony Leggett)提出的关于非定域隐变量理论的莱格特不等式^[18]的检验工作,实验结果是量子力学违反了莱格特不等式^[19],这意味着定域实在论与非定域实在论都无法描述量子力学,试图通过改造量子力学使之与经典物理学进行融合的努力都以失败告终^[20]。

20世纪90年代,随着量子隐形传态、量子不可克隆原理(quantum no-cloning theorem)、量子密码学(quantum cryptography)、量子密钥分配(quantum key distribution)、量子比特(quantum bit)、量子逻辑门(quantum logic gate)、多依奇-乔萨算法(Deutsch-Jozsa algorithm)、肖尔算法(Shor's algorithm)、格罗弗算法(Grover's algorithm)等理论的日益成熟,杰拉德·密尔本(Gerard J. Milburn)对量子信息技术的前景进行了详细描述^[21-23],并与乔纳森·道林(Jonathan P. Dowling)于2003年一起提出了“第二次量子革命”的概念^[24]。

21世纪以来,以量子纠缠为基础的量子信息技术从科学理论走向了实际应用,在量子通信、量子计算、量子精密测量等领域取得了许多重要成就,第2次量子革命正在如火如荼地进行着。近年来,量子计算原型机“九章”使中国实现了“量子优越性”^[25]，“墨子号”量子科学实验卫星先后于2017年和2022年实现了地空与地表的1200 km量子纠缠及量子隐形传态^[26-27],中国正在成为第2次量子革命的领跑者^[28]。

2 量子信息技术革命性的表现

在探讨量子信息革命即第2次量子革命之前,

首先有必要对第1次量子革命进行阐述,在此基础上进一步比较二者的区别和联系。

2.1 不彻底的第1次量子革命

第1次量子革命发生在20世纪初,开始于解释黑体辐射实验的理论尝试,并产生了一系列全新的概念。第1次量子革命的革命性包括3个方面:首先是人类观念的变革,量子力学本质上的随机性彻底颠覆了牛顿的机械决定论,给人类思维方式带来了极大冲击;其次是对技术和生产力的变革,催生了很多应用——原子弹、激光、半导体、原子钟、芯片、核磁共振成像、超导磁体、发光二极管、电子显微镜、光纤通信、固态硬盘、计算机、手机等;最后,彻底革新了人类的生产关系,例如,原子弹的发明彻底改变了国家之间的竞争格局,半导体产业极大推动了世界经济的发展。

需要注意的是,尽管第1次量子革命可以说彻底改变了世界面貌,成为社会跨越发展的基石和动力,但是这场革命并不彻底,其根本原因有2点。首先,第1次量子革命其本质上是一场量子物质革命,只涉及对原子、电子和光子的操作式应用,并没有全面利用量子力学的规律,如叠加态、量子纠缠等。其次,第1次量子革命遗留下了很多基础性问题没有解决,包括:(1) 测量问题,即观测者在测量中的地位问题;(2) 微观和宏观的分界问题,即经典和量子的界限在哪里? 宏观叠加态如何制备? 其交界处是否有新的物理学?(3) 量子纠缠,即如何理解量子非定域性的本质问题? 定域或非定域的隐变量理论存在吗?(4) 量子力学与相对论的融合,即如何将2个理论结合为大一统理论?(5) 违背因果性,即如何解释量子力学对因果关系的违背?(6) 量子诠释问题(量子力学的完备性问题),即如何将量子力学作为一个整体进行完备的诠释?

2.2 量子信息革命引领新的技术革命

第1次量子革命用了100年时间将人类社会引进繁荣的信息时代^[29-30]。始于21世纪的第2次量子革命是在第1次量子革命的基础上,进一步迈入量子信息时代。相比于传统的信息时代,量子信息在原理、内涵、价值等方面有着显著的提升。

首先,第2次量子革命是实现量子客体直接

操控并利用量子力学的根本性规律的彻底革命。激光、半导体等一系列技术仍然遵从经典物理学,这些器件仅在一些特定情况下涉及量子力学规律对于电子和光子等基本粒子的应用,不仅无法实现对单个粒子的直接操控,而且没有涉及量子纠缠、非定域性和不可克隆性等量子基础特性。过去基于量子力学原理的技术仅提供了相较于经典框架内极大幅度的技术性能提升,而在小型化、微型化的技术发展趋势下,经典计算机随着芯片的尺度越来越小,小到纳米尺度之下时量子效应将越来越明显,不得不转向量子计算机的开发,也就是说技术进一步的发展在设计上必须基于量子原理。

其次,与过去相比,人类不再是量子世界的被动观察者,而是可以设计、操作、传输、干预到量子态,实现通过对量子世界操控而改变人类的生活。过去,人类凭借量子力学的规律能够很好地理解和解释微观世界,如可以解释元素周期表,但不能主动设计人造原子^[31];可以解释金属和半导体的行为,但对操纵它们的行为却无能为力。而随着第2次量子革命的发展,人类正在积极地运用量子力学来改变物理世界的量子面貌。例如可以主动设计并制造新的人造原子,使之具有预先选择的电子和光学特性;还可以创造自然界中不存在的量子相干或纠缠物质和能量的状态,这些新的人造量子态具有新的灵敏度和非定域等相关特性,在计算机、通信系统、传感器和紧凑型计量装置的发展中有广泛的应用^[24]。

最后,第2次量子革命已经经历了漫长的理论准备,拥有巨大的技术潜力,目前还无法预知第2次量子革命能够带来的全部应用。20世纪上半叶出现的普朗克公式、光电效应、玻尔原子模型、波粒二象性、矩阵力学、波动力学、不确定性原理、不相容原理、量子电动力学、费曼路径积分等量子力学理论为1947年的晶体管、1960年的激光器、1973年的核磁共振成像和1989年的平板电脑等一系列应用做了铺垫。电子计算机技术与原子能技术、航天技术成为了第3次工业革命的核心,人类从电气时代进入信息时代。而在第1次量子革命后期阶段,尤其是自1982年的阿斯佩实验以来,量子纠缠、量

子不可克隆原理、量子隐形传态、量子密码学、量子比特、量子算法共同为第2次量子革命做了铺垫。相较于第1次量子革命跨越半个世纪的应用技术发明周期而言,目前仍处于第2次量子革命的初期阶段,但量子通信和量子计算领域的突破性成就已展现出量子信息技术的重大价值,其应用前景十分广阔,还有许多未知的应用有待进一步的技术创新。

2.3 量子信息革命引领新的科学革命与哲学革命

2014年,《Nature》杂志发表纪念贝尔定理提出50周年的评论:揭开“量子谜团”!这标志着量子力学发展的一个全新的起点^[32]。第1次量子革命并没有澄清量子论的本质,更多是将理论转化为技术,而第2次量子革命不仅要继续发展量子技术,更重要的是追问“为什么”,要对量子力学的基础困境给出解答。相比于第1次量子革命,人类对量子力学有了更加深刻的认识,但是目前并未颠覆和突破第1次量子革命。因此,复旦大学物理学系教授施郁称之为“继续量子科学革命”(continuous quantum revolution):“量子革命一直在持续地发生,并将继续下去。量子力学基本原理还有未完全解决的问题”^[33]。目前,各类量子纠缠实验的实现,已经大大加深了人类对量子力学本质的认识,代表性的有以下5点。

1) 对定域性和实在性的挑战。实验结果显示贝尔不等式和CHSH不等式的违背,否定了爱因斯坦的定域实在论,但是究竟是定域性错了,还是实在性错了,又或是两者都错了,还没有定论^[34]。实验显示,莱格特不等式的违背意味着非定域实在也被证伪,综合起来是在量子力学中证伪了实在论。尽管量子力学的非定域非实在性质仍未定论,但是也足以对传统哲学构成极大的挑战。

2) 消弭微观与宏观的界限。1935年,薛定谔提出了著名的“薛定谔的猫”思想实验,深刻揭示了微观和宏观现象的冲突。对此,哥本哈根学派认为存在2个割裂的系统,即宏观系统服从经典定律,而微观系统遵循量子定律,被称为“海森堡切割”(Heisenberg cut)。1970年,理论物理学家迪特·泽(H. Dieter Zeh)提出了量子退相干(quantum decoherence)的概念^[35],由于与环境的作用导致系统

的量子特性消失,从而解释了微观和宏观并无明晰界限。物理系统的大小本身并不能排除量子效应,激光、玻色-爱因斯坦凝聚态、超导体和极低温下的超流都依赖于宏观量子效应。

3) 对形式逻辑推理的挑战。Hardy定理是理论物理学家卢西安·哈迪(Lucien Hardy)于1992年提出的一种研究贝尔非定域性的“无不等式方法”,使用弱测量技术研究偏振光子的相互作用^[36-37]。实验结果表明,Hardy佯谬也证伪了定域隐变量理论。Hardy佯谬中,可以构造出3个几率P1、P2和P3,当设定这3个几率都为0时,那么按照经典逻辑推理(定域隐变量理论),一定可以推出P4为0。但是,根据量子力学却可以推出非0的几率P4,对于两比特偏振光子,最大可达约0.09^[38]。从这个意义上说,量子力学突破了经典物理学中无懈可击的逻辑推理。

4) 虚数实在性的证明。2022年1月,中国科学技术大学教授潘建伟团队利用超高精度超导量子线路实现确定性纠缠交换,以超过43个标准差的实验精度证明了实数无法完整描述标准量子力学,确立了复数的客观实在性^[39]。杨振宁曾将包含复数的相位因子概括为20世纪物理学3大主旋律之一^[40]。最初,虚数引入量子力学时仅被视为数学工具,到20世纪70年代物理学家们才发现相位因子贯穿了整个20世纪物理学的发展——从德国物理学家赫尔曼·外尔(Hermann Weyl)引入规范理论^[41-42],到杨振宁与罗伯特·米尔斯(Robert Mills)发展规范场^[43],再到弱电统一理论和粒子物理学标准模型的建立。另外,阿哈罗诺夫-玻姆效应(Aharonov - Bohm effect)和贝里相位(Berry phase)的研究揭示了量子系统的整体性、非定域性和空间拓扑性质^[44-45]。种种迹象表明,虚数以及由其构成的相位因子深刻揭示了量子力学的本质,是探索量子本质的一条重要线索,但目前还未引起足够重视。

5) 对传统物质观的挑战。目前物理学家对于物质世界本原的探求已经深入时空背景,从经典的物质实体走向量子化的信息实体。2006年,美国物理学家塞斯·劳埃德(Seth Lloyd)从量子信息的视角出发,提出了“万物源于量子比特”(it from qu-

bit)^[46]。不久,英国物理学家弗兰克·克洛斯(Frank Close)指出:“物理学家的一个普遍共识是:万物包括时空矩阵等等来源于量子真空(quantum vacuum),沸腾的真空为理解自然万物创生于虚空——量子泡沫(quantum foam)提供了深刻的含意。”^[47]在黑洞研究中,物理学家也尝试将量子纠缠引入,以破解黑洞信息悖论^[48]。总之,未来假如存在一个统一理论的话,量子纠缠和量子信息一定是占据核心地位的,这也必将为传统的物质观带来革命性变革。

3 量子信息革命对未来科技战略的启示

量子信息革命不仅引领了技术、科学和哲学的变革,对未来的科技政策发展也具有启发意义,新的大科学模式正在兴起。

3.1 旧大科学模式的终结

20世纪科技政策的核心特征被称为“大科学”模式,其核心特征可概括为“大组织、大机器、大政治”。二战时的曼哈顿计划充分显示了基础研究可以改变历史进程,并转化为军事力量,这为欧洲和美国的战后科学政策奠定了框架。

1945年,美国科技管理体系的奠基人万尼瓦尔·布什(Vannevar Bush)发布《科学——无止境的前沿》报告,提出“基础研究是技术进步的引领者”^[49],直接推动了美国将大科学战略定为国家战略,并建立了政府买单、大规模投入基础科学,进而促进技术创新的“科技发展的线性模式”,科学史家斯图尔特·莱斯利(Stuart W. Leslie)将其称为“军工-工业-科学综合体”^[50]。其中,大科学最典型的代表是大型粒子加速器,其曾一度成为美苏科技战竞争的焦点,更高的能量、更大的规模成为追求的目标^[51]。多年间,大科学极大地推动了关于自然世界理论知识的进步,并带来了互联网等附带技术应用。但随着苏联解体,美国最大的加速器项目超导超级对撞机(superconducting super collider)于1993年停止建设,传统的大科学模式落下帷幕。虽然现在各国仍在积极建设大科学装置,但是以举国之力进行竞争的时代已经结束。

一方面,冷战时期的大科学模式并没有充分满足技术创新的需要。历代大型粒子加速器使得众多粒子物理实验得以完成并多次获得诺贝尔奖的青睐,但是大型加速器能够直接创造的市场价值却是有限的,有着重要应用价值的往往是小型加速器。另一方面,以物质研究为代表的基础物理学在标准模型完成以后基本处于迷茫状态。理论物理学家萨拜因·霍森菲尔德(Sabine Hossenfelder)认为“停滞”的原因“不在于实验,而是在于理论物理学家的大量错误预测”^[52]。在21世纪以来的无数个粒子物理学实验中,有意义的结果很少,人们对暗物质和暗能量仍然知之甚少,也没有发现新的粒子、新的维度、新的对称性,这种“停滞”与量子信息科技的蓬勃发展形成了鲜明对比。

在第3次科技革命中创造最多经济价值的当属电子计算机技术,其中的大多数成果基于的是以量子力学和凝聚态物理学为代表的小团队创新。例如著名的贝尔实验室(Bell Labs),诞生了晶体管、激光器、C语言、C++语言、UNIX操作系统、太阳能电池、发光二极管、数字交换机、电荷耦合器件、电子数字计算机、蜂窝移动通信设备等众多重大发明。事实上,基础研究对于长远的科学发展和技术进步确实起着至关重要的作用,物质结构研究以外的许多基础研究可谓百花齐放,从半导体、激光、计算机、纳米材料,到量子通信、量子计算、量子精密测量,量子力学展现了充分的潜力。

3.2 新大科学模式的兴起

与冷战时期相比,当前整个世界科学政策的首要目标在于:通过前沿科技的发展,进而促进经济增长,其核心是市场逻辑主导的。实际上,大科学模式并未终结,只是发生了转变,需要将科研重点放在一些更有价值的领域,例如芯片和量子信息。两次量子革命及其发展模式特点对比见表1。

对于中国而言,美国正在主导一场针对中国的“技术战”,首当其冲的就是以芯片为核心的高科技领域。此时,市场逻辑已经失效,中国必须进一步建立以国家力量为主导的新型大科学模式,对应于旧大科学模式的“军工-工业-科学综合体”,新型大科学模式为“产业-技术-科学综合体”。布什的

表1 2次量子革命特点对比

	第1次量子革命		第2次量子革命
起始时间	20世纪		21世纪
主导国家	美国、欧洲、苏联		中国、美国、欧洲
基本特征	物质时代	信息时代	量子信息时代
基础理论	核物理、粒子物理	量子力学	量子纠缠
核心应用	原子弹、核能	激光、半导体	量子计算、量子通讯、量子精密测量
管理模式	大科学+大团队	小科学+小团队	大科学+小团队, 跨学科复杂协作
发展模式	线性模式: 科学引导技术发展		科学-技术-产业深度融合、互相推动
投资主体	政府	企业	政府+企业
目标导向	冷战竞争, 国家安全	技术进步, 经济发展	经济、技术、产业、教育协同发展, 探索量子科学与哲学, 构建科技创新体系

“科学引导技术发展”的线性模式已不再适用,如今科学-技术-产业已经深度融合,需要国家-企业-高校几个研究主体的深度融合。中国在芯片领域的劣势,很大程度上是由于在芯片领域基础科学、技术积累、产业联合3个方面均处于弱势的结果。中国必须进一步建立以国家力量为主导的新型大科学模式。在大力支持基础研究的同时,相关政策也要随时代变化进行必要调整,围绕国家发展规划和未来产业布局,合理优化科研投入与项目分配。中国在量子信息领域的前瞻部署已经取得显著成效,但在国际关系变化复杂的情况下,中国未来需要长期应对美国对华“技术战”并及时调整自身的科技创新制度^[53],集中力量发展优势领域^[54]。

另外,传统大科学研究的“大团队、大项目”管理模式也需要进一步优化,精细化协作体系或将成为新趋势。如中国科学院院士、中国科学院高能物理研究所所长王贻芳就大力提倡在中国科学院高能物理研究所推行“矩阵式管理制度”,有效避免课题负责人制在大科学研究中的低效问题^[55]。以往的大科学项目往往离不开大预算、大团队、大装置、大合作;而如今在芯片和量子信息领域,涉及大量的开放性、细分领域是无法提前规划的,需要小团队精细化、协同化合作,以细化任务、分组指挥的方式提升科研效率。

因此,应当探索建立将大科学的国家战略优势与小团队的细化分工体系相结合的新型大科学模式,将芯片和量子信息等前沿科技纳入国家未来发

展战略,充分发挥自身优势推动创新,加快、抓紧掌握核心技术与发展机遇,加大人才培养力度,在量子信息革命的浪潮中奋勇前进、继续领跑。

4 结论

量子信息革命是中国科技发展的重大历史机遇,对于中国科技发展有着重要意义。正如中国科学院院士薛其坤所说:“第2次量子革命是我国几百年来第1次有能力有基础全面介入和参与的一次技术革命,是中华民族在伟大复兴进程中的一次重大机遇”^[56]。在3次工业革命和第1次量子革命中,中国始终在学习和追赶西方,原创性核心技术不足,而目前中国的量子信息科技已处于世界第一方阵,在此基础上应当再接再厉,加大量子科技人才培养力度。量子信息技术有望与人工智能、机器人技术成为第4次工业革命的重要引擎^[57-58],推动人类从信息时代跨入量子信息时代。中国正在实现从世界科技革命的落伍者、学习者、追赶者向创新者、贡献者、引领者的重大转变^[59]。

参考文献(References)

- [1] The Royal Swedish Academy of Sciences. Press release: The Nobel Prize in Physics 2022[EB/OL]. (2022-10-04) [2022-10-13]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/>.
- [2] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?

- [J]. *Physical Review*, 1935, 47(10): 777–780.
- [3] Schrödinger E. Discussion of probability relations between separated systems[J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1935, 31(4): 555–563.
- [4] Bell J S. On the einstein podolsky rosen paradox[J]. *Physics Physique Fizika*, 1964, 1(3): 195–200.
- [5] Clauser J F, Horne M A, Shimony A, et al. Proposed experiment to test local hidden-variable theories[J]. *Physical Review Letters*, 1969, 23(15): 880–884.
- [6] Freedman S J, Clauser J F. Experimental test of local hidden-variable theories[J]. *Physical Review Letters*, 1972, 28(14): 938–941.
- [7] 苏洪轶, 陈景灵. 贝尔不等式——2022年度诺贝尔物理学奖解读[J]. *科学通报*, 2022, 67(36): 4326–4331.
- [8] Aspect A, Grangier P, Roger G. Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem[J]. *Physical review letters*, 1981, 47(7): 460–463.
- [9] Aspect A, Dalibard J, Roger G. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 49(25): 1804–1807.
- [10] Aspect A. Closing the door on Einstein and Bohr's quantum debate[EB/OL]. (2015–12–16) [2022–10–13]. <https://physics.aps.org/articles/v8/123>.
- [11] Zeilinger A. Testing Bell's inequalities with periodic switching[J]. *Physics Letters A*, 1986, 118(1): 1–2.
- [12] 施郁. 量子纠缠之路:从爱因斯坦到2022年诺贝尔物理学奖[J]. *自然杂志*, 2022, 44(6): 455–465.
- [13] Weihs G, Jennewein T, Simon C, et al. Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(23): 5039.
- [14] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, et al. Experimental quantum teleportation[J]. *Nature*, 1997, 390(6660): 575–579.
- [15] Boschi D, Branca S, De Martini F, et al. Experimental realization of teleporting an unknown pure quantum state via dual classical and Einstein–Podolsky–Rosen channels[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(6): 1121.
- [16] Bennett C H, Brassard G, Crépeau C, et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein–Podolsky–Rosen channels[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(13): 1895.
- [17] 苏晓琴, 郭光灿. 量子隐形传态[J]. *物理学进展*, 2004 (3): 259–273.
- [18] Leggett A J. Nonlocal hidden-variable theories and quantum mechanics: An incompatibility theorem[J]. *Foundations of Physics*, 2003, 33(10): 1469–1493.
- [19] Gröblacher S, Paterek T, Kaltenbaek R, et al. An experimental test of non-local realism[J]. *Nature*, 2007, 446 (7138): 871–875.
- [20] 黄政新. 贝尔和莱格特不等式的实验检验与实在论[J]. *自然辩证法通讯*, 2013, 35(4): 1–7.
- [21] Milburn G J. *Quantum technology* (Frontiers of science) [M]. Sydney: Allen & Unwin, 1996.
- [22] Milburn G J. *Schrodinger's machines: The quantum technology reshaping everyday life*[M]. New York: William Hazen Freeman and Company, 1997.
- [23] Milburn G J. *The Feynman processor: Quantum entanglement and the computing revolution*[M]. Sydney: Allen & Unwin, 1998.
- [24] Dowling J P, Milburn G J. *Quantum technology: The second quantum revolution*[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2003, 361(1809): 1655–1674.
- [25] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. *Science*, 2020, 370 (6523): 1460–1463.
- [26] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1140–1144.
- [27] Li B, Cao Y, Li Y H, et al. Quantum state transfer over 1200 km assisted by prior distributed entanglement[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(17): 170501.
- [28] 新华社. 中国领跑第二次“量子革命”[EB/OL]. (2016–08–17) [2022–10–14]. <http://news.cctv.com/2016/08/16/ARTIiMe6oUH3QoY8eIqXPYYN160816.shtml>.
- [29] 郭光灿. 量子十问之十 第二次量子革命究竟要干什么[J]. *物理*, 2019, 48(7): 464–465.
- [30] 布鲁克海文国家实验室量子优越性联合设计中心. The second quantum revolution[EB/OL]. (2021–10–12) [2022–10–15]. <https://www.bnl.gov/quantumcenter/research.php>.
- [31] Ashoori R C. Electrons in artificial atoms[J]. *Nature*, 1996, 379(6564): 413–419.
- [32] Editorials. *Quantum*[J]. *Nature*, 2014, 510(7505): 312.
- [33] 施郁. 继续量子科学革命[N]. *光明日报*, 2017–05–25 (13).
- [34] BIG Bell Test Collaboration. Challenging local realism with human choices[J]. *Nature*, 2018, 557(7704): 212–216.
- [35] Zeh H D. On the interpretation of measurement in quantum theory[J]. *Foundations of Physics*, 1970, 1(1): 69–76.
- [36] Hardy L. Quantum mechanics, local realistic theories, and Lorentz-invariant realistic theories[J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(20): 2981–2984.
- [37] Hardy L. Nonlocality for two particles without inequalities for almost all entangled states[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(11): 1665–1668.
- [38] 陈景灵. 量子力学那些事:量子纠缠、量子导引、贝尔非定域性 [EB/OL]. (2018–06–08) [2022–10–15]. <https://>

- tech.sina.com.cn/d/i/2018-06-08/doc-ihcscwxa1601413.shtml.
- [39] Chen M C, Wang C, Liu F M, et al. Ruling out real-valued standard formalism of quantum theory[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(4): 040403.
- [40] 杨振宁. 20世纪理论物理学发展的主旋律[J]. *品牌与标准化*, 2009(2): 53-56.
- [41] Weyl H. Eine neue erweiterung der relativitätstheorie[J]. *Annalen der Physik*, 1919, 364(10): 101-133.
- [42] Weyl H. Electron and gravitation[J]. *Zeitschrift für Physik*, 1929, 56: 330-352.
- [43] Yang C N, Mills R L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance[J]. *Physical Review*, 1954, 96(1): 191-195.
- [44] Aharonov Y, Bohm D. Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory[J]. *Physical Review*, 1959, 115(3): 485-491.
- [45] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [46] Lloyd S. Programming the universe: A quantum computer scientist takes on the Cosmos[M]. New York: Alfred Abraham Knopf, 2006: 175.
- [47] Close F. Nothing: A very short introduction[M]. Oxford: Oxford University Press, 2009: 106.
- [48] Almheiri A, Marolf D, Polchinski J, et al. Black holes: Complementarity or firewalls[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2013, 2013(2): 1-20.
- [49] 范内瓦·布什, 拉什·D. 霍尔特. 科学: 无尽的前沿[M]. 崔传刚, 译. 北京: 中信出版集团, 2021: 66-80.
- [50] Leslie S W. The Cold War and American science: The military-industrial-academic complex at MIT and Stanford[M]. New York: Columbia University Press, 1993.
- [51] 乔笑斐, 路昊明. 苏联和美国在粒子物理领域的交流、合作与竞争[J]. *自然辩证法通讯*, 2022, 44(10): 56-64.
- [52] Hossenfelder S. The present phase of stagnation in the foundations of physics is not normal[EB/OL]. (2018-11-19) [2022-10-15]. <http://backreaction.blogspot.com/2018/11/the-present-phase-of-stagnation-in.html>.
- [53] 刘露馨. 美国科技战略的变革及前景[J]. *现代国际关系*, 2021(10): 37-45.
- [54] 吕凤先, 刘小平, 贾夏利. 近二十年美国量子信息科学战略中基础研究的政策部署和重要进展[J]. *世界科技研究与发展*, 2022, 44(1): 12-24.
- [55] 王贻芳. 适应大装置建设需求 探索矩阵式管理模式[N]. *中国科学报*, 2022-10-12(1).
- [56] 徐立京. 量子科技革命是重大历史机遇——对话中国科学院院士、南方科技大学校长薛其坤[N]. *经济日报*, 2021-01-17(12).
- [57] 翟冬冬. 量子计算: 第四次工业革命的引擎[N]. *科技日报*, 2018-01-10(8).
- [58] 王正汉. 量子计算机: 下一轮工业革命的引擎[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2021(7): 38-43.
- [59] 胡鞍钢, 任皓. “复兴号”背后的科技强国梦[N]. *人民日报海外版*, 2017-06-26(1).

Quantum information revolution leads the future revolution of science and technology

QIAO Xiaofei, LU Haoming, GAO Ce

Institute for History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract As a focus of emerging strategic technologies attracting global attention, quantum information technology has made breakthroughs in the fields of quantum computing and quantum communication. From the perspective of the history of science, quantum information revolution is significantly different from the first quantum revolution that occurred in the 20th century in terms of principle and connotation, and it also has a more direct impact on the future development strategy for science and technology. This study introduces the development history of quantum information technology, analyzes the revolutionary characteristics of quantum information technology from multiple aspects, and summarizes the influence and enlightenment of the quantum information revolution on future technology strategies and scientific models.

Keywords quantum information; quantum revolution; big science; strategy for science and technology ●



(责任编辑 王丽娜)