

量子信息和量子技术白皮书 (合肥宣言)

一、概述

上世纪初量子力学的建立是人类历史上最重大的科学革命之一,催生了半导体、激光、核能、超导、核磁共振、和全球卫星定位系统等重大技术的发明,推动人类在信息、能源、材料和生命等科学领域获得了空前的发展,已经从根本上改变了人类的生活方式和面貌,促进了物质文明的巨大进步。自上世纪九十年代以来,量子调控技术的巨大进步使得人类可以对微观粒子的量子状态进行主动的精确操纵,从而诞生了以量子信息技术为代表的这一新兴的领域。量子信息技术,包括量子通信、量子计算、量子精密测量等,可以在确保信息安全、提高运算速度、提升测量精度等方面突破经典技术的瓶颈。鉴于此,2019年9月15日至20日,新兴量子技术国际会议the International Conference on Emerging Quantum Technology (ICEQT2019)在合肥召开,来自中国、美国、英国、法国、俄罗斯、德国、奥地利、瑞士、澳大利亚、加拿大等国的著名研究机构和大学的包括多名诺贝尔物理学奖获得者、沃尔夫物理学奖获得者在内的约500余位专家参会。与会学者讨论了量子信息技术的发展与未来,并达成一系列共识,现总结如下。

二、量子通信

量子通信是量子信息科学的重要分支,它是指利用量子比特作为信息载体来进行信息交互的通信技术。量子通信有两种最典型的应用方式:量子密钥分发和量子隐形传态。量子密钥分发可以提供原理上无条件安全的通信手段,是首个从实验室走向实际应用的量子信息技术。量子隐形传态可以用来传输任意未知的量子态,同时也是是远距离量子密钥分发所需的量子中继的重要环节。

量子通信是迄今唯一的安全性得到严格证明的通信方式。量子通信的无条件安全是指,在量子密钥传输过程中,窃听者无法做到既偷看又不留下痕迹,这是由量子力学基本原理保证的。在全球学术界三十余年的共同努力下,目前,结合“测量器件无关量子密钥分发”技术和经过精确标定、自主可控光源的量子通信系统已经可以提供现实条件下的安全性。

量子通信不是要替代经典通信方式,而是通过在经典通信中使用量子密钥以提升通信安全性,同时量子通信的规模化应用也需要与经典通信技术相融合。发展量子通信技术的终极目标是构建广域量子通信网络体系,广泛认可的发展路线是:通过光纤实现城域范围内的量子通信网络,通过中继分段传输实现城际量子通信网络,通过卫星中转实现数千公里甚至是全球化的量子通信。

在目前技术条件下,国际上广泛采用可信中继作为实现远距离量子通信的阶段性解决方案,同时积极发

展量子中继技术为下一阶段做准备。量子卫星作为自由空间可信中继,也得到了高度重视和积极推进。当前,在中国量子保密通信“京沪干线”和“墨子号”量子卫星的带动下,包括美国、欧洲在内的世界主要国家和地区也纷纷部署建设远距离光纤量子网络,并提出量子卫星计划。在可见的未来,通过卫星和地面光纤网络形成天地一体的广域量子通信网络具有高度的可行性。

量子通信技术的规模化应用还需要在现实条件下安全性测评的基础上,构建标准体系。目前,国际电信联盟 (ITU) 在上海首次召开量子信息技术国际研讨会并围绕量子通信标准化进行专题讨论,中国提出制定量子密码安全的国际评估标准的构想已经获得国际标准化组织 (ISO) 批准、欧洲电信标准化协会 (ETSI) 等也正在开展QKD有关的标准化工作。

三、量子计算

量子计算利用量子叠加和干涉等原理进行量子并行计算,可以在特定问题上相对于经典计算提供指数级加速,为若干大规模计算难题提供了解决方案。量子计算机广义上包括通用量子计算机和专用量子模拟机。

实现通用量子计算机需要满足基本的DiVincenzo条件,包括:(1)可定义量子比特,(2)量子比特有足够的相干时间,(3)量子比特可以初始化,(4)可以实现通用的量子门集合,(5)量子比特可以被读出。实现大规模的量子计算机,以上基本量子操作需要超过特定的容错阈值,并通过构建量子逻辑比特进行可扩展的容错量子计算。目前通用量子计算机的实现,除了基于量子门线路的方法,还包括基于哈密顿量的绝热量子计算,及拓扑量子计算等,它们的计算能力是相互等价的。

在达到通用量子计算所需的量子比特数目、量子容错界限等方面的技术要求之前,可以实现专用的量子模拟器,即用可控的量子系统去模拟真实的多体量子系统,这在实现难度上低于通用量子计算机。专用量子模拟器可以解决经典计算机无法胜任的、物理机制尚不清楚的若干重要量子多体问题,包括凝聚态物理、高能物理以及材料科学、化学等学科的多个核心难题,探索其中蕴含的微观机制。

要构建一台真正具有通用计算能力的量子计算机,仍需要长期的努力。与会专家一致认为,为了领域的健康长期发展,除了要在基础研究领域做好操纵精度、可容错之外,规模化、实用性的量子计算研究可以沿如下路线开展。第一个阶段是实现“量子优越性”或称“量子称霸”,即量子模拟机针对特定问题的计算能力超越经典超级计算机,这一阶段性目标可在近期实现;第二个阶段是实现具有应用价值的专用量子模拟系统,可在组合优化、量子化学、机器学习等方面发挥效用;第三个阶段是实现可编程的通用量子计算机,能在经典密码破解、大数据搜索、人工智能等方面发挥巨大作用。实现通用可编程量子计算机还需要全世界学术界的长期艰苦努力。

目前,国际上正在探索的量子计算的物理系统包括离子阱、超导量子线路、超冷原子、极化分子、线性光学、金刚石色心、硅²⁹中的电子或核自旋等。

四、量子精密测量

鉴于量子调控与量子信息技术的快速发展,正如2018年第26届国际计量大会上通过的关于用量子化方法定义国际单位制的决议,计量标准将进入“量子时代”。这将全面提高七个基本物理量(长度、质量、时间、电流、温度、物质的量和发光强度)的测量精度,并可广泛用于授时、导航、医学检测、乃至包括引力波探测在内的基础物理检验。

得益于量子效应,量子精密测量能在诸如时间、重力、磁场、成像、遥感等领域,提供比现有技术更高的测量灵敏度、精度和速度。例如,利用超稳激光和光晶格技术实现的高精度光原子钟、采用超稳频率梳的精准时频传输、借助于原子态量子叠加性实现的高灵敏度原子干涉仪、利用高灵敏探测或纠缠光子态实现的量子成像和遥感、在量子标准下实现测量的固态人造量子传感器等。量子精密测量技术将在下一代时间基准、精确导航、基本物理常数测量、粒子探测、核磁共振成像、远程目标识别、全球地形测绘、引力波或暗物质的感应探测等广泛领域发挥重要作用。

随着物联网的发展,对量子精密测量的需求也日益攀升,也为具备更卓越性能的量子传感器全面超越现有经典技术提供了良机。与会专家一致认为,此领域应该进一步努力发展包含超稳激光和频率梳、超冷原子、纠缠/单光子、金刚石色心、超导量子器件等多种精密测量技术,以期在未来实现更高性能的量子精密测量。

五、促进国际合作

量子信息的蓬勃发展源于量子力学的好奇心驱动和基础研究,并在不断地推动和扩展这一领域。同时,在量子信息方面发展的日益先进的技术,反过来,也为探索量子力学新的物理前沿提供了新的工具。显然,在新兴量子技术的每一个阶段,都需要强调基础研究的重要性。

如同上一世纪的量子革命一样,第二量子革命也必将带来人类物质文明的巨大飞跃。鉴于这些新兴的前沿科技将给整个人类社会带来福祉,与会专家一致认为,在未来的历史长河中,推进量子信息技术的发展是全球学术界的共同责任,建立全球性的合作来共同推动该领域的发展是必要的,而不应该各自关起门研究。为此,应加强不同国家间科学家的合作与交流,在基础研究和共性技术方面尤为如此。