量子信息技术发展态势与规划分析*

唐　川**　房俊民　王立娜　张　娟
（中国科学院成都文献情报中心，成都 610041）

摘　要：量子信息技术被认为是最具颠覆性的关键性新兴技术之一。近几年，主要国家密集出台重大发展战略与规划布局量子信息，世界知名企业纷纷投入重金抢占发展先机，同时，量子信息成为了国际著名智库、咨询机构、媒体的热议话题。种种迹象表明，量子信息技术正在加速从实验走向产业化，其战略意义正在不断提升，其变革未来科技、国家安全、国防军事、产业经济等领域的潜在能力备受关注。本文剖析了量子信息技术的发展历程、重点领域、主要发展趋势与国际发展动向，并针对我国情况提出了相关建议。

关键词：量子信息；发展趋势；国际动向；发展措施
中图分类号：G350　　**文献标识码**：A　　doi：10.16507/j.issn.1006 - 6055.2017.09.001

Current Status and Future Trends of Quantum Information Technology*

TANG Chuan**　FANG Junmin　WANG Lina　ZHANG Juan
(Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Quantum information technology is regarded as the one of the most disruptive emerging technologies. In recent years, major countries are rushing to release significant strategies and plannings on quantum information technology; leading figures in industry are pouring funds to gain a quantum advantage; think tanks and consultation institutions are making a quantum buzz. As evidences indicating, the transition of quantum information technology from laboratories to industries is accelerating. Its strategic significance is improving, and its potential power to revolutionize science and technology, national security, defense, economy and industry is attracting much attention. In the paper, the evolution, primary areas, major trends and international momentum were analyzed and discussed. Suggestions for China to develop quantum information technology were proposed.

Key words: quantum information; future trends; international momentum; development measures

1　引言

量子信息技术是量子力学与信息科学等学科相结合而产生的新兴交叉学科[1]，以量子力学基本原理为基础，利用量子系统的各种特性（如叠加性、纠缠性、非局域性和不可克隆性等）对信息进行编码、计算和传输，可超越现有信息技术系统的经典极限[2]。其主要研究与应用方向包括量子通信、量子计算、量子探测与精密测量等。

量子信息技术的相关设想自 20 世纪七八十年代被提出后[3]，一直作为前沿、交叉领域处于基础研究探索阶段。近几年，美国、欧盟、英国、中国等主要科技强国先后出台了若干量子信息国家发展战略与政策规划，积极布局量子信息；谷歌、IBM、微软等世界知名企业纷纷投入重金，或与世界一流科研院所合作，或积极招兵买马，抢占量子信息发展先机；量子信息还成为了美国国家研究理事会、高德纳、“技术评论”等国际著名智库、咨询机构、媒体的热议话题。以上种种迹象表明，一些量子信息技术正在加速从实验室研究走向产业化应用，其在变革未来科技、国家安全、国防军事、产业经济等方面的潜在颠覆性力量正在显现。

2 量子信息科技正在迎接“第二次量子革命”

作为目前备受关注的颠覆性、战略性技术，量子信息技术经历了从重大科学发现到重大技术突破的长期演进，其中 20 世纪初的“第一次量子革命”为量子信息技术奠定了量子力学的科学基础，而目前量子信息技术的兴起与发展构成了“第二次量子革命”的核心内容。

20 世纪初，一小部分科学家们围绕当时令所有科学家都十分困扰的黑体辐射和以太问题进行探索，发现并建立了量子力学。量子力学是研究微观粒子结构、相互作用和运动规律的科学[4]，源于普

2017-04-24 收稿，2017-09-01 接受，2017-09-05 网络发表
* 四川省软科学研究计划（2017ZR0037），中国科学院文献情报能力建设专项子项目“发现与跟踪颠覆性技术的情报学方法研究”资助
** 通讯作者，E-mail：tangc@clas.ac.cn

朗克在 1900 年提出的能量量子假说,在随后的近 30 年内,玻尔、海森堡、薛定谔、狄拉克、爱因斯坦等一大批物理学家共同构建了量子理论及量子力学的科学体系,这期间所取得的一系列科学突破所构成的巨大变革被许多学者称作“第一次量子革命”[5-7]。与经典物理相比,量子力学有很多显著不同的特性,比如非决定论、量子干涉、不确定性原理、量子态叠加和量子纠缠。这些特性与人们熟知的经典物理大相径庭,更是对直观生活经验的巨大颠覆。

可以说,“第一次量子革命”从根本上改变了经典科学世界的图景,深化了科学认知,使得人们对微观世界的运动规律有了基本正确的、革命性的理解[7],帮助科学家认识了超导性、超流体性等奇特的物理性质。同时,“第一次量子革命”还带动了许多对人类生活带来巨大影响的颠覆性和关键技术突破,例如在电流的量子属性得到揭示后,晶体管与集成芯片相应而生,并由此开启了信息时代;在通信、医疗等领域获得广泛应用的激光与核磁共振也是量子力学的产物;量子力学还被用于研制原子时钟,可进一步提高信息的传输速度和 GPS 的准确性[7]。总而言之,带来这些成果的“第一次量子革命”改变了世界面貌,成为社会跨越发展的基石和动力[8]。

然而,“第一次量子革命”也留下了一些未解之谜,如爱因斯坦等在 1935 年提出的 EPR 佯谬[8]。科学家对这些问题开展了持续探索,通过理论和实验验证了量子力学的正确性,更加深入地认识和掌握了量子纠缠、量子态叠加等量子特性。

同时,随着信息科学技术的发展及相关问题的浮现,科学家们开始意识到“量子纠缠”等量子力学的奇妙特性可在信息通信和处理过程中发挥重要作用,于是巴内特、贝尼奥夫和费曼等[7]在 20 世纪 70~80 年代相继提出了将量子力学应用于信息科学的开创性设想。他们与后来的研究者们一起奠定了量子通信和量子计算的基础,并研发出各种先进的现代科学技术去制备、检测、调控量子体系,将量子力学从“观测”、“解释”阶段推动进入了“调控时代”,从而开启了一个崭新的发展时期[9]。

相较于经典信息技术,量子信息技术具有许多迥异特性,例如:经典信息技术以比特(bit)作为信息单元,经典比特只能处于 0 或 1 的状态,并且复制和探测经典信息不会改变其状态;量子信息技术的信息单元量子比特(qubit)是两态量子系统的任意叠加态,量子信息不可克隆,若对其进行复制或探测则会改变其量子态[8,10]。近年来,经典信息技术在经典物理极限的制约下面临的瓶颈问题已十分尖锐,例如:量子遂穿效应、散热问题等令芯片微缩化进程难以延续,使得计算能力的提升难以满足飞速发展的需求,并导致全球半导体产业遵循多年的“摩尔定律”被打破[11];数据中心对能源的巨大需求已成为能源可持续发展的重要问题,美国数据中心在 2014 年共消耗了 700 亿千瓦时电力,占全美年度总能耗的 2%[12];现有信息系统存在难以消除的巨大安全隐患,从伊朗核电站遭“震网”病毒攻击,到美国“棱镜”计划对各国政府的恣意监听,再到乌克兰 70 万家庭因恶意软件遭遇大规模停电,国家安全、经济产业、社会民生等已因信息安全问题遭受了难以估量的损失。

利用量子力学基本原理和量子调控技术,量子信息技术可突破信息技术的经典极限,例如量子计算机计算能力极强且能耗极低,量子通信可提供无条件安全的通信方式,量子精密测量可提供极高的敏感性和测量精度。因此,量子信息在近年得到了大力推动并取得了快速突破,而这一进程被越来越多的科学家和政府机构视为“第二次量子革命”[13-17]。这次革命预计将在量子通信、量子计算、量子仿真等领域实现突破,并成为解决信息、能源、环境、医学等领域重大挑战的有力手段[18]。

3 量子信息技术的重点领域与主要发展方向

受益于量子调控技术的进步,量子信息技术的研究与应用在近 20 年内不断取得突破[19]。目前量子信息技术的重点领域与主要发展趋势有:

3.1 量子保密通信走向大规模应用

借助单光子不可分割、不可克隆的特性和测不准原理,量子通信技术相比传统通信技术在安全方面有着压倒性优势,第三方无法监听、探测而不被发现。量子通信内涵很广泛,涉及量子保密通信、量子隐形传态、量子密集编码等多个领域,其中量子保密通信目前已经从实验室演示走向大规模实用化和产业化阶段,正在引领量子通信朝着高速率、远距离、网络化的方向快速发展。瑞士 IdQuantique、美国 MagiQ Technologies 和 Qubitekk、法国 Smart Quantum、澳大利亚 Lagnon Quintessence Labs 等公司的量子密码相关产品已上市出售。我国量子保密通信

“京沪干线”在 2017 年 9 月正式开通。这些都标志着量子保密通信开始进入大规模实用阶段。

对此,欧美已经制定了多项规划。2013 年,美国 Battelle 公司联合瑞士 ID Quantique 公司提出商业化的广域量子通信网络规划,计划建造环美国的万公里量子通信骨干网络,为谷歌、IBM、微软、亚马逊等公司的数据中心之间提供量子通信服务;2015 年 11 月,英国《量子技术路线图》提出在 5 年内实现点对点量子保密通信的商业化,并在 10 年后实现全面的量子保密通信;2016 年 3 月,欧盟《量子宣言》明确将在 5 年内重点发展量子中继器和点到点量子保密通信,在 5 ~ 10 年内重点发展城际量子网络和量子信用卡,并在 10 年后重点实现具有加密和监听检测功能的量子中继器,还将通过融合量子通信与传统通信来构建安全的泛欧互联网。

不过目前量子通信在增加安全通信距离、提高安全成码率和提高现实系统安全性三方面还面临重大挑战。当前的量子通信设备仅可实现 200 ~ 300 公里的点对点通信,无法通过现有光纤网络长距离传递量子信号;量子密钥的成码率随着距离呈指数衰减,有待提高;此外,虽然量子通信的安全性已得到概念性证明和基于物理模型的严格的数学证明,但实际的量子通信系统由于不能完全满足物理模型的一些假设条件从而存在缺陷,依然容易被窃听者攻击。

综合以上因素,可预计未来量子通信技术的实际应用将分三步走:首先,通过光纤实现城域量子通信网络;然后,通过量子中继器实现城际量子通信网络;最终,通过卫星中转实现可覆盖全球的广域量子通信网络。随着量子保密通信技术的产业化和广域量子通信网络技术的逐渐成熟,预计量子通信有望在 10 年内实现大规模应用,届时将满足军事、国防、金融、政务、能源等高端市场的信息安全需求,并与传统通信融合发展,为信息化社会提供基础的安全服务和更可靠的安全保障。

3.2 量子计算研发进入关键期

与传统计算机相比,量子计算机具有天然的量子并行计算能力,能够应对传统方法根本无法或难以解决的问题,可令计算能力实现质的飞跃。量子计算可快速破译现有密码体系,对现有的以数学为基础的密钥体系(RSA 体系)形成整体颠覆;可对海量数据进行实时分析处理,有效解决高性能、大数据计算问题,有效提升研发效率,为气象预报、石油勘探、药物设计等所需的大规模计算难题提供解决方案,揭示高温超导、量子霍尔效应等复杂物理机制,为先进材料制造和新能源开发奠定科学基础。

最近两年,各国及各大企业开始争先恐后布局量子计算,反映量子计算机的研制已经到了一个关键时期。一旦量子计算成熟,将摧毁现有信息安全体系,并成为先进计算、大数据分析、人工智能等领域所依赖的工具。然而,当前还没有证据显示量子计算能够在可预见的时间内达到这样的成熟度。量子计算的研究重心依然是量子比特等基本组成单元;小规模、专用的量子计算是下一步发展目标;大规模、通用量子计算机尚待时日,量子计算机的算法与软件仍需突破。

1)量子比特沿多条路径发展,量子退火已商用。目前,量子计算机的研制重点在其最基本的组成单元——量子比特,主要通过 5 条利用不同材料和技术原理的路径来构建,包括超导回路、囚禁离子、硅量子点、拓扑量子比特和钻石空位。每种方案都面临很多挑战,例如超导回路和硅量子点的连贯性和一致性仍不足,其冷冻装置仍需改善,而囚禁离子则需要更快的逻辑门、更紧凑的激光和光纤。据多方面预计,未来的量子计算机很可能是一种混合系统,不同类型的量子比特在不同任务中扮演不同的角色,例如由超快的超导体回路进行运算,然后由更稳定的囚禁离子来存储结果。

此外,目前还有一类基于量子退火算法的特殊量子计算已进入商业市场,该类型的量子计算机利用了量子隧穿效应,可用于解决一些特殊问题,由加拿大 D - Wave 公司在 2011 年 5 月正式推出。具有 1000 个量子比特的量子退火计算机已被谷歌和 NASA 用于研究量子计算和人工智能,该系统在解决某些问题上比传统计算机过程快了 1 亿倍。具有 2000 个量子比特的量子退火计算机也已在 2017 年正式进入市场。

2)小规模、专用量子计算方面有望在 5 ~ 10 年内实现。2014 年,斯诺登透露美国国家安全局(NSA)正在秘密研制用于破解密码的量子计算机,而 NSA 在 2015 年表示必须立即采取行动对抗量子计算的威胁,欧洲电信标准研究院(2015 年)和美国国家标准技术研究院(2016 年)也分别启动了后量

子时代加密技术的标准化计划。

美国国家科学技术委员会(2016 年 7 月)预计[20],未来 5 年内有望实现几十个量子比特、可供早期量子计算机科学研究的系统;欧盟在 2016 年提出计划,在 5 ~ 10 年内研制出用具有超过 100 个物理量子比特的、能够处理相关化学和材料科学难题的专用型量子计算机;谷歌也在 2016 年 9 月提出“量子霸权”计划,预计可在近两年研制出具有 50 个量子比特的量子计算机。

3)通用量子计算与量子软件研发依然任重道远。可实用的通用量子计算机至少需要具备 1000 个量子比特,同时需要与之匹配的量子软件。2016 年,IBM 和美国马里兰大学分别研制出具有 5 个量子比特的量子计算系统。在量子算法和软件方面,目前真正有代表性的量子算法主要有可用于密码破译的 Shor 算法和可用于大数据和云计算的 Grove 量子搜索算法,虽然近年来量子随机游走、量子模拟、求解线性方程组等多种量子算法研究也取得了一些重要进展,但是距离通用量子计算的要求仍有着巨大差距。

目前,多方已着力推动通用量子计算的先期研发。2015 年 12 月美国情报高级研究计划局(IARPA)宣布资助 IBM 开发通用量子计算机;美国陆军研究实验室(2015 年)提出在 2030 年前实现初级阶段的通用量子计算;欧盟(2016 年)计划在 5 年内开发出新的量子算法和能执行技术相关算法的小型量子处理器,并预计通用量子计算机可能会在 2035 年之前建造出来。

近年来量子计算已取得较多重要进展,原则上研制通用量子计算机已不存不可逾越的障碍,但技术上的实现却面临严重的困难,主要包括:量子计算的物理实现,需提高量子系统中相干操控的能力,实现更多量子的纠缠;研究新的量子算法,增强现有量子算法的实用性和扩展性。

3.3 量子传感等技术将进入商用阶段

除了引人注目的量子通信与量子计算,量子信息技术还在量子传感、量子精密测量、量子成像等多个方向取得了全面发展,可实现对重力、时间、位置等的超高灵敏度测量,并大幅提升卫星导航、潜艇定位、医学检测、引力波探测等技术的准确性和精度。量子成像技术能获取更清晰的图像,可提高地面、卫星和无人机的情报监视和侦察能力,而量子传感能以极高精度实现导航和定位功能,大幅提高军事设备在 GPS 拒止环境下的导航和探测能力。这些量子信息技术可在很大程度上替代传统信息技术,特别是在国防、电信、金融、医疗等对精度、性能、可靠性要求较高的应用领域。

1)在量子传感方面,美国陆军利用激光冷却原子的方法实现了在量子传感器领域的突破(2013 年 7 月),大幅提高了 GPS 拒止环境下的导航和探测能力。欧盟(2016 年)计划 5 年内研制出针对医疗护理、地质调查等应用的量子传感器;5 ~ 10 年内研制出针对汽车、建筑等大规模应用的量子传感器,以及手持量子导航设备;10 年后将量子传感器集成到更多的消费者设备中。英国(2015 年)计划在 5 ~ 10 年内实现量子引力传感器、量子梯度传感器、量子电磁传感器、量子惯性传感器等量子传感器的商业化。

2)在量子成像方面,美国陆军实验室进行了距离 2.33 千米的红外量子成像测试(2013 年),在低光和气流紊乱情况下获取了非常清晰的图像;英国约克大学开发出了一种量子成像技术(2015 年),可利用微波和光波束间的量子关联效应来检测癌细胞、隐形飞机等低反射率的物体,并计划(2015 年)在 5 年内将量子成像技术用于国防和环境监控等领域,在 5 ~ 10 年内应用于医学成像领域。

3)在原子钟方面,美国国家标准与技术研究院采用冷原子实现了当前最高精度的原子钟(2014 年);英国(2015 年)计划 5 年内实现可用于国防、电信、金融产业的精准定时与导航器件,并在 5 ~ 10 年内开发出具备与现有国家一级标准时钟同等精度的第二代时钟,如冷原子或晶格钟。

4 国际竞争态势与各国发展战略规划

随着量子信息技术所蕴含的巨大潜力日益显现,各国在此领域的竞争开始白热化,美国、欧盟、英国、日本、中国等分别将量子信息技术提升至国家战略高度。

4.1 国际竞争日趋激烈

自 2000 年以来,世界主要科技强国与地区逐步加大了对量子信息的科研资助力度。主要科技强国与地区在 2015 年对量子信息的年度研发投入共计约 15 亿欧元(表 1,荷兰经济部统计)[21]。此外,世界科研机构围绕量子信息科技的科研活动也日趋活跃。2000 ~ 2015 年间,全球有关“量子信息”、“量子计算”和“量子通信”的科研论文年发文量分别增长了约 12 倍、6 倍和 4 倍(图 1,美国国家科学技术委

员会统计)[22]。其中,许多世界一流研究机构在不断取得高水平研究成果。2011 ~2015 年间,哈佛大学等 15 所科研机构在顶级学术期刊(影响因子大于 10)上发表了 328 篇量子信息相关论文(表 2,荷兰经济部统计)[21]。

表 1　2015 年各国对量子信息的研发投入[21]

国家/地区	年度经费(亿欧元)
欧盟	5.50
美国	3.60
中国	2.20
加拿大	1.00
澳大利亚	0.75
日本	0.63
新加坡	0.44
韩国	0.13

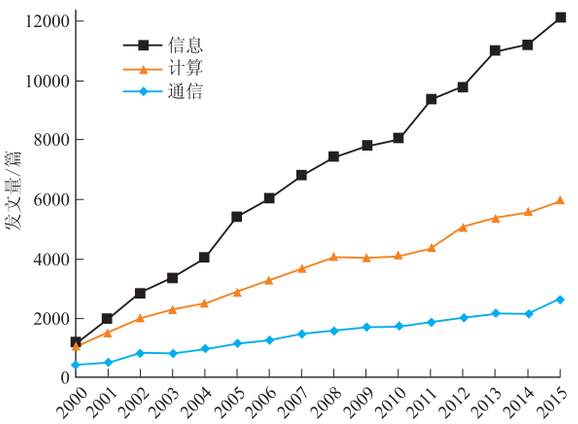

图 1　全球量子信息科研论文发文量[22]

表 2　量子信息高水平论文[21]

排名	发文机构	国家	发文量
1	哈佛大学	美国	34
2	加州大学圣塔芭芭拉分校	美国	33
3	斯坦福大学	美国	25
4	普林斯顿大学	美国	23
5	代尔夫特理工大学	荷兰	22
6	东京大学	日本	22
7	马里兰大学	美国	21
8	加州大学伯克利分校	美国	21
9	麻省理工学院	美国	21
10	苏黎世联邦理工学院	瑞士	21
11	中国科学技术大学	中国	20
12	昆士兰大学	澳大利亚	19
13	日本理化研究所	日本	16
14	SLAC 国家加速器实验室	美国	15
15	法国国家科研中心	法国	15

在专利申请方面,各国也展开了竞逐。美国在量子计算方面的专利申请量遥遥领先,中国则在量子密码方面大幅领先,而中美两国在量子传感器方面实力相当。此外,日本、英国、加拿大、德国等国家在各个方面的专利申请都有不俗表现[23]。

表 3　2015 年各国量子信息技术专利申请[21]

量子计算		量子密码		量子传感器	
国家	申请量	国家	申请量	国家	申请量
美国	295	中国	367	美国	105
加拿大	79	美国	233	中国	104
日本	78	日本	100	德国	25
英国	36	英国	50	日本	18
中国	29	马来西亚	31	英国	12
澳大利亚	26	韩国	27	加拿大	6
德国	22	德国	24	以色列	6
韩国	11	法国	15	法国	5
以色列	9	澳大利亚	14	奥地利	3
芬兰	7	加拿大	11	韩国	2
		意大利	11	俄罗斯	2

在各国政府纷纷布局量子信息的同时,产业界也掀起了进军量子信息的浪潮。IBM 在 2014 年将量子芯片列为其 30 亿美元研发计划的重点之一[24];谷歌先后联合大学和美国宇航局开展量子计算研究,并在 2016 年提出“量子霸权”计划[25];微软已将量子信息作为其最大的研发投入领域,并选择最前沿的拓扑物理作为其研制量子计算机的主攻方向;另有一批专注于量子信息的新兴企业正在快速成长。

4.2　多国制定量子信息发展战略规划

1)美国:全方位发展量子信息技术

美国是最早将量子信息技术列入国家战略、国防和安全研发计划的国家,近几年来更是加速了相关布局。

美国国防部“2013 ~2017 年科技发展五年计划”(2012 年)将“量子信息和量子调控”列为六大颠覆性的基础研究领域之一[26];美国国家科学基金会(NSF,2016 年)将“下一代量子革命”确立为未来六大科研前沿之一[27],并斥资 1200 万美元资助量子保密通信技术研究;此外,美国还在“国家纳米技术计划”(2000 年)和“材料基因组计划”(2011 年)中布局了许多量子信息技术支撑技术,“国家战略计算计划”(2015 年)更是将量子信息技术作为核心目标之一[28]。

2016 年 7 月,美国白宫总统科学技术顾问委员会发布报告《推进量子信息科学:国家的挑战与机遇》[29],呼吁加大投入,以快速、全面推进量子信息技术的研究与应用。总统科学技术顾问委员会还成立了“量子信息科学跨机构工作小组”,专注于量子信息科学基础研究、基础设施、技术人才、知识产权等问题,同时将重点培育量子信息技术产业。目前,美国各联邦政府机构对量子信息技术的资助力度约为每年 2 亿美元。

2)欧盟:10 亿欧元瞄准四大方向

早在 20 世纪 90 年代,欧盟就意识到量子信息技术的巨大潜力,并持续对量子信息技术研究给予了重点支持。近年来,欧盟首先启动了量子通信技术标准化研究(2008 年 9 月),然后通过《量子信息处理和通信:欧洲研究现状、愿景与目标战略报告》(2010 年)提出未来十年内重点发展量子中继和卫星量子通信,实现 1000 公里量级的量子密钥分配。欧洲空间局计划到 2018 年在国际空间站与地面站之间建立自由空间量子通信链路,并实现绝对安全的空间量子密钥全球分发。

在以上基础上,欧盟委员会在 2016 年 3 月发布《量子宣言》[30],呼吁欧盟及成员国推动量子通信、量子模拟、量子传感和量子计算这四方面的短中长期发展,实现原子量子时钟、量子传感器、城际量子网络、量子模拟器、量子互联网和通用量子计算机等重大技术的突破与应用。欧盟随后确定将投入 10 亿欧元开展量子技术旗舰计划,以推动以上目标的实现。

3)英国:积极提升量子信息技术的战略地位

英国也是较早开展量子信息技术研发的国家,近年来英国政府已把量子信息技术提升到了影响未来国家创新力和国际竞争力的重要战略地位。

英国政府在 2013 年宣布投资 2.7 亿英镑设立英国“国家量子技术计划”[31],同时成立国家量子技术战略顾问委员会。根据该计划,英国工程和物理科学研究理事会于 2014 年 11 月投资 1.2 亿英镑建立国家量子技术网络中心(由 17 家大学和 132 家公司组成,下设量子传感与测量中心、量子传感与成像中心、量子计算与模拟中心、量子通信中心等),以及一些培养高级人才的博士培训中心;英国创新委员会也开展了一系列活动以推动企业探寻量子技术的商业前景。

2015 年,英国先后发布《国家量子技术战略》[32]和《量子技术路线图》[33],提出通过开展 10 年期计划支持各界联合推动英国量子技术生态系统发展,发展量子研究基础设施,培养量子技术人才队伍,在 10 年内逐步实现量子系统组件、量子原子钟、量子传感器、量子通信、量子增强影像等一大批量子信息技术的商业化应用,并计划在 20 年内实现量子计算的商业化。2016 年 11 月,英国发布《量子时代:技术机遇》报告[34],进一步明确将推动原子钟、量子成像、量子传感和测量、量子计算和模拟以及量子通信领域的研发与商业化。

4)日本:重点推进量子通信技术研发与应用

日本政府和科技界一贯重视量子科技领域的研发攻关,2010 年 10 月就在东京建成了 6 节点城域量子通信网络,近年来还将量子技术视为本国占据一定优势的高新科技领域进行重点引导和发展。早在 2003 年,日本总务省量子信息和通信研究促进会就提出以新一代量子信息通信技术为对象的长期研究战略,计划在 2020 ~ 2030 年间建成利用量子加密技术的绝对安全和高速的量子信息通信网;2010 年,日本国家情报通信研究机构启动了一个长期支持计划,计划在 2020 年实现量子中继,到 2040 年建成极限容量、无条件安全的广域光纤与自由空间量子通信网络;日本内阁府与科学技术振兴机构 2016 年推出的“日本颠覆性技术创新计划”支持了一项名为“利用量子网络连接量子人工脑的先进知识社会基础的实现”的项目,计划重点突破量子人工大脑、量子仿真、量子保密网络。

5)澳大利亚、加拿大等国:各有布局

澳大利亚、加拿大等国也先后加入量子信息技术竞赛。其中,澳大利亚多年来一直集中发展硅基量子计算机,澳大利亚政府继 2015 年 12 月宣布出资 2600 万澳元助力新南威尔士大学研制量子计算机后,又在 2016 年初成立硅基半导体量子计算国家实验室;加拿大国家科研理事会在 2014 年启动“量子光学传感与安全”项目,同时加拿大航天局等多个政府机构联合支持了“量子加密与科学卫星”项目;同样,德国、意大利、奥地利、新加坡等国也分别布局了各自的量子信息战略与计划。

5 我国量子信息的发展态势

我国较早进入了量子信息技术研究领域,多年来在量子通信和量子调控方面取得了较大成果。目前在量子信息研发投入和专利申请量方面仅次于美国,论文产出方面则位居世界第一[35]。可以说,我国在量子技术研发方面有很好的科研积淀,总体位于全球前列,并在量子通信方面处于全球领先水平。我国量子信息技术的发展有以下特点:

1)在量子密钥分发的实用化方面已跻身世界前列。多年来,我国科学家在发展可实用量子通信技术方面开展了系统性的深入研究。2012 年,我国科研团队在安徽合肥建成国际首个规模化的城域量子通信网络,节点数达到了 46 个,远超国际同类网

络,标志着大容量的量子通信网络技术已经取得了关键性突破;2015 年 3 月,中国科学技术大学(以下简称中科大)在国际上首次成功实现多自由度量子体系的隐形传态,打破了从 1997 年以来只能传输基本粒子单一自由度的局限,为发展可扩展的量子计算和量子网络技术奠定了坚实的基础;2016 年 8 月,由中科院主持研发的世界首颗“量子科学实验卫星”成功发射,在世界上首次实现卫星和地面之间的量子通信,并构建了天地一体化的量子保密通信与科学实验体系;我国还计划发射更多卫星,到 2020 年实现亚洲与欧洲的洲际量子密钥分发,届时联接亚洲与欧洲的洲际量子通信网也将建成;2016 年 11 月,中科大等单位在国际上首次实现超过 400 公里抵御量子黑客攻击的测量设备无关量子密钥分发,推动了兼顾安全和实用的远距离光纤量子通信的发展;2016 年 12 月,中科大在国际上率先实现 10 光子纠缠,多粒子纠缠操纵作为量子信息处理基本能力的核心指标,能够系统性地应用于量子通信、量子计算等多个研究方向,一直是国际角逐的焦点;2016 年底,总长 2000 余公里、连接北京、上海等多个城市的量子保密通信京沪干线初步全线贯通,成为世界第一条量子通信保密干线。

以上成果和进展有助于我国在量子通信技术实用化整体水平上保持和扩大国际领先地位,实现国家信息安全和信息技术水平跨越式提升,推动我国在量子科学前沿领域取得重大突破。

2)政府相关部门高度重视并大力支持,促进我国量子通信技术快速发展。从 2001 年开始,科技部“973”计划、“863”计划、国家自然科学基金重点项目、中科院知识创新工程重大项目以及“十二五”专项规划为量子信息技术研究提供了持续支持。2005 年,量子调控成为国家重大研究计划的内容,到目前这一计划已经执行了十余年,为我国量子通信等方面提供了重要的技术支撑。

2016 年 2 月,科技部启动实施国家重点研发计划,量子调控与量子信息被列为重点专项之一;2016 年 3 月,《第十三个五年规划纲要》把量子通信列为战略性产业重点推进,将极大推动量子通信军用、民用大规模建设和应用;此外,中科院、安徽省等机构与地区正在积极筹建量子信息国家实验室,以便有效汇聚和吸引顶尖科技力量,从而进一步提升我国在全球量子信息领域的科研实力与产业竞争力。

3)量子信息产业化进程快速推进。在我国,量子信息产业的相关准备工作正在快速推进。阿里云与中科院于 2015 年 7 月在上海联合创立量子计算实验室,共同开展在量子信息科学领域的前瞻性研究;2015 年 10 月,阿里云与中科院联合发布量子加密通信产品,标志着全球互联网迈入量子时代;2015 年 11 月,中航工业与中国科大共建量子技术研发中心;2015 年 12 月,中国量子通信产业联盟成立,由中国科学院国有资产经营有限责任公司牵头,中科大、科大国盾、阿里巴巴、中国铁路网络有限公司、中兴通讯、北方信息技术研究所等单位组成;2016 年 8 月,“墨子号”量子科学实验卫星成功发射,引起了产业界和投资界的极大关注。

6 我国量子信息面临的挑战及相关建议

从量子传感、量子测量,到量子通信、安全加密和到量子计算,量子技术毫无疑问是对未来高密度和高安全性信息的发现、采集、传输、处理、分析、可视化,乃至智能化处理的全信息链和全产业链技术,具有无可争议的颠覆性和战略性技术特征,应该说,怎么重视都不过分。然而,在过去的科技竞争中,我国曾多次发生占据先机却后劲不足的状况。如何在现有基础上抓住“第二次量子革命”的机遇,是我们应当认真思考的问题,尤其需要认清当前我国量子信息技术面临的挑战并研究应对策略。

6.1 发展量子信息面临多重挑战

许多量子信息技术的实现已不存在不可逾越的理论障碍,但在技术实现上还面临着较多困难,包括尚未掌握制备、保持和操控宏观尺度量子客体的有效办法[36]。这是全球量子信息科研团体所共同面临的科技难题,而我国还在研发布局、资源调配、机构制度、产业进程、人才培养等方面面临诸多挑战。

1)研发布局亟需完善。与量子通信方面的突出表现相比较,我国在量子计算、量子软件、量子模拟、量子精密测量、量子传感、量子成像等方面的研究力量还较弱,目前整体落后于欧美国家,恐将导致我国在国际量子信息的长远竞争中处于被动地位。

2)资源调配待优化。发展量子信息技术需要高投入,而过去很长一段时间内,各国普遍存在研发投入不足且缺乏稳定性的问题。随着各国政府纷纷将量子信息技术作为优先领域开展竞赛,先期的经费不足问题可能演化为如何有效调动各方资金、实现最优配置的问题。当前,政府科研基金机构对量子信息技术的资助与量子信息技术多学科交叉、快

速发展等特点还未实现最优匹配,例如量子信息技术研究特别需要跨学科团队、多首席科学家团队以及长期资助(通常 5 年以上),但目前大部分经费都无法根据这些特点进行调配。此外,在产学研合作项目中,对技术转化等配套环境的重视不足,无法有效促进研究成果的产业化。

3)机构制度需调整。由于量子信息技术是一门新兴的交叉学科,大部分大学和科研院所并未将量子信息技术作为一个独立的学科来对待。因此,这些机构的管理制度与快速发展的量子信息技术在资源分配、人员聘用、职位晋升等方面的需求并不匹配。此外,从事量子信息技术研究的科学家往往分散在物理、应用物理、计算机、数学、工程、化学等不同院系,导致其在所属院系属于少数派和边缘角色,难以争取到所需的资源和人才。

对于跨机构的量子信息合作项目,科研人员还面临更多的机构之间的制度隔阂,需要争取各个机构领导的同意,并且因其项目几乎不可能与各个机构的战略计划都保持一致,因而难以获得其所在机构的重视。

4)产业化进程应加快。虽然近年来私营企业对量子信息技术的投资在显著增加,但目前我国量子信息技术的研发力量依然主要集中在学术界,少量来自政府机构和产业机构,产生的专业知识与技术还难以被转化为高技术产品。以量子通信专利为例,中国在 2010 年后的申请量快速增长,目前已是全球第一[37],但申请主要来自学术机构,而申请了相关专利的产业机构中,大部分又是依赖于国家主导的量子通信网络基础设施工程的大型企业。由此可见,目前中国量子通信产业技术仍由国家主导,产业化进程需加快。

6.2 全力迎接“第二次量子革命”的措施建议

1)制定和实施量子信息国家战略。从国家网络安全与信息化的角度,将量子信息技术作为国家必须优先发展的战略目标,制定国家战略作为总体规划来指引、协调各方行动,加强在量子信息重点方向的科研布局,聚焦重点任务有效配置资源,开展集成攻关,以实现重大突破。

2)创新跨部门、跨领域协作机制。在围绕量子信息技术开展重大任务的同时,设立隶属于党中央、国务院的高层次指导委员会,探索跨部门、跨领域的创新协作机制,破除机构制度藩篱,协调全国来自物理、数学、信息科学、计算机科学等领域的大学、研究所、企业等科技力量广泛开展多学科交叉合作与协作,保持对量子信息科技人才基础队伍的培养,推动量子信息基础研究和应用研究的持续开展,实现量子信息技术的颠覆性创新。

3)构建多方位配套机制,加速量子信息产业化。建立面向量子信息技术的产、学、研技术合作与转化机制,保证政府部门、科研机构、产业机构、科技智库良性互动。政府部门可吸引优秀企业参与量子信息技术重大科研项目,以将科研成果转化到量子计算芯片、量子通信网络等产品和基础设施中;并采取专项引导基金等措施,鼓励中小型企业积极参与技术研发,特别是研制纠缠光子源、单光子探测器等多种量子应用所需要的关键器件,为量子信息技术产业提供创新活力。科技智库可持续对整个量子信息技术领域进行扫描监测,评估研发进展与产业化趋势,为政府部门调整战略、科研机构布局研发、产业机构进军市场提供参考依据和决策支持。

4)培养和吸引优秀人才。目前科技强国都很重视量子信息技术人才的培养和竞争,我国在量子通信方面拥有以潘建伟团队为代表的世界一流团队,但在量子计算、量子传感等方面还缺乏足够优秀的人才,特别是国际一流的领军人才,因此需要多方面壮大我国量子信息所需的人才队伍。首先应当强化自我“造血”能力,在高等教育中加强量子信息所需的跨学科人才的培养,在相关学科设立量子信息课程,特别是量子物理和计算科学等学科应该联合起来,培养一批年轻的科研人才,以及未来的产业应用人才;另一方面可加大投入力度和优化人事制度,例如针对量子信息理论和技术、硬件和软件的工作特点制定最适合的人才考核制度,吸引留学人才回国和外籍专家来华。

参考文献

[1] Inter-agency Working Group on Quantum Information Science of the Subcommittee on Physical Sciences, The National Science and Technology Council. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities[EB/OL]. 2016-07-26. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Quantum_Info_Sci_Report_2016_07_22%20final.pdf.

[2] 郭光灿. 量子信息科学——一个令人惊奇的新兴领域[J]. 中国科学院院刊,2007,22(1):57-60.

[3] DEUTSCH D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer[J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1999, 400(1818): 97-117.

[4] 孙昌璞. 量子力学若干基本问题研究的新进展[J]. 物理,2001,

30(5):310-316.
[5] MOLDOVAN D. Quantum Revolution and Rethinking the "Eternal Truths" of the Economic Science[J]. Review of Economic & Business Studies,2015,8(2):151-156.
[6] BULLETIN C. Quantum revolution[EB/OL]. 2010-11-01. http://cds. cern. ch/record/1302294? ln = zh_CN
[7] CASSIDY D C. Heisenberg, Uncertainty and the Quantum Revolution [J]. Scientific American,1992,266(5):106-112.
[8] DAN C M, MARINESCU G M. Classical and quantum information [M]. Burlington:Academic Press,2012:1713-1722.
[9] NIELSEN M A, CHUANG I L. Quantum Computation and Quantum Information[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2010.
[10] DESURVIRE E. Classical and Quantum Information Theory[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1988.
[11] WALDROP M M. The chips are down for Moore's law[J]. Nature, 2016,530(7589):144-144.
[12] YEVGENIY S. Here's How Much Energy All US Data Centers Consume[EB/OL]. 2016-06-27. http://www. datacenterknowledge. com/archives/2016/06/27/heres-how-much-energy-all-us-data-centers-consume/.
[13] 文小刚. 物理学的第二次量子革命[J]. 物理,2015,44(4):261-266.
[14] ASPECT A. From Einstein, Bohr, Schrödinger to Bell and Feynman: A New Quantum Revolution? [M]. Basel: Springer International Publishing,2016.
[15] DOWLING J P, MILBURN G J. Quantum Technology: The Second Quantum Revolution [J]. Philosophical Transactions, 2003, 361 (1809):1655-1655.
[16] The European Commission. quantum manifesto[EB/OL]. 2016-05. http://qurope. eu/system/files/u7/93056_Quantum% 20Manifesto _WEB. pdf.
[17] JUNIOR O F. Dissidents and the Second Quantum Revolution. In: The Quantum Dissidents[M]. Heidelberg:Springer,2015.
[18] Nature News. Quanundrum[EB/OL]. 2014-06-18. https://www. nature. com/news/quanundrum-1. 15415.
[19] BENNETT C H, DIVINCENZO D P. Quantum information and computation[J]. Nature,2000,404(1):247-255.
[20] The National Science and Technology Council. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities[EB/OL]. 2016-07-22. https://www. whitehouse. gov/sites/whitehouse. gov/files/images/Quantum_ Info _ Sci _ Report _ 2016 _ 07 _ 22% 20final. pdf.
[21] Ministry of Economic Affairs, Netherlands. Global developments Quantum Technologies[EB/OL]. 2015-05. https://connect. innovateuk. org/documents/11487824/26842605/Global + Developments + in + Quantum + Technology/.
[22] The National Science and Technology Council. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities[EB/OL]. 2016-07-26. https://www. whitehouse. gov/sites/whitehouse. gov/files/images/Quantum_ Info _ Sci _ Report _ 2016 _ 07 _ 22% 20final. pdf? dm_i = 1ZJN,4EWQL,E29ED1,G8R8I,1.
[23] COSTELLO J. Chinese Efforts in Quantum Information Science: Drivers, Milestones, and Strategic Implications[EB/OL]. 2017-03-16. https://www. uscc. gov/sites/default/files/Panel% 20I_John% 20Costello. pdf.
[24] RACHEL C. IBM spends $3 billion to push the far future of computer chips[EB/OL]. 2013-10-28. http://spectrum. ieee. org/semiconductors/devices/the-status-of-moores-law-its-complicated.
[25] JACOB A. Google's plan for quantum computer supremacy[EB/OL]. 2016-08-31. https://www. newscientist. com/article/mg23130894-000-revealed-googles-plan-for-quantum-computer-supremacy/.
[26] Committee on Science, Technology, Engineering, and Mathematics Workforce Needs for the U. S. Department of Defense and the U. S. Defense Industrial Base. Report of a Workshop on Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Workforce Needs for the U. S. Department of Defense and the U. S. Defense Industrial Base[EB/OL]. 2012. https://www. nap. edu/read/13318/chapter/5.
[27] France A Córdova. NSF Ideas for Future Investment[EB/OL]. 2016-05-06. https://www. nsf. gov/attachments/137508/public/nsf_future_investments. pdf.
[28] The White House. National Strategic Computing Initiative[EB/OL]. 2015-07-29. https://obamawhitehouse. archives. gov/sites/default/files/microsites/ostp/nsci_fact_sheet. pdf.
[29] The Committee on Science and Committee on Homeland and National Security, The National Science and Technology Council. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities[EB/OL]. 2016-07. https://www. whitehouse. gov/sites/whitehouse. gov/files/images/Quantum_Info_Sci_Report_2016_07_22% 20final. pdf.
[30] The European Commission. Quantum Manifesto[EB/OL]. 2016-03. http://qurope. eu/system/files/u567/Quantum% 20Manifesto. pdf.
[31] HM Treasury. 2013 Autumn Statement[EB/OL]. 2013-12-05. https://www. gov. uk/government/topical-events/autumn-statement-2013.
[32] Innovate UK. National strategy for quantum technologies[EB/OL]. 2015-03-23. https://www. gov. uk/government/publications/national-strategy-for-quantum-technologies.
[33] Innovate UK. A roadmap for quantum technologies in the UK[EB/OL]. 2015-09. https://www. gov. uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/470243/InnovateUK_QuantumTech_CO004_final. pdf.
[34] Government Office for Science. The quantum age: technological opportunities[EB/OL]. 2016-11-03. https://www. gov. uk/government/uploads/system/uploads/attachment _ data/file/564946/gs-16-18-quantum-technologies-report. pdf.
[35] Government Office for Science. The Quantum Age: technological opportunities[EB/OL]. 2016-11-03. https://www. gov. uk/government/uploads/system/uploads/attachment _ data/file/564946/gs-16-18-quantum-technologies-report. pdf.
[36] 郭光灿. 量子信息引论[J]. 物理,2001,30(5):286-293.
[37] LEWIS A M, KRÄMER M, TRAVAGNIN M. Quantum Technologies: Implications for European Policy[EB/OL]. 2016-05-31. http://www. osa. org/getattachment/8380ea42-c347-4e8e-add7-591b8174f654/Quantum_Technologies_Implications_for_European_Po. aspx. pdf.