

美国国家科学基金会推动量子信息研究的新举措

王 炼

(中国科学技术交流中心, 北京 100045)

摘要:美国国家科学基金会作为美国联邦政府资助基础研究的专门机构,多年来一直十分重视量子信息相关领域的研究,近年来连续推出项目措施推动量子信息的发展。本文主要梳理该基金会支持量子研究的整体情况和近年来的新举措,为我国制定量子信息发展战略和路线图提供参考。

关键词:美国;量子信息;基础研究

中图分类号:G327.712 **文献标识码:**A **DOI:**10.3772/j.issn.1009-8623.2018.05.001

量子信息技术是量子物理与信息科学交叉的新生学科。基于量子叠加、不可克隆等物理特性,量子信息技术可以突破现有信息技术的物理极限,在信息处理速度、信息安全性、信息容量及信息检验精度等方面将发挥极大作用,从而使下一代传感、计算、建模和通信技术更为准确高效。量子信息技术为信息科学的发展开拓了新原理、新方法,将在本世纪对人类社会产生深刻影响。

美国国家科学基金会(NSF)作为美国资助基础研究与教育的专门联邦机构,一直高度重视和支持量子领域基础研究。面对21世纪量子信息技术的爆发式发展和即将来临的下一量子革命,美国国家科学基金会充分认识到量子信息前沿技术是开启测向和测量学、量子模拟和量子计算等领域的关键因素,并试图通过前沿战略部署引导美国量子系统基础研究的多学科发展,为实现量子前沿技术奠定基础。本文主要梳理美国国家科学基金会资助量子信息基础研究的整体情况和最新举措,为国内量子领域战略规划和重大项目的制定提供参考。

1 美国国家科学基金会资助量子研究整体情况

美国国家科学基金会于2000年前后开始资助

高校与研究机构在量子信息领域的研究。2005年,美国国家科学基金会在数学与物理科学学部(MPS)下成立量子信息科学计划(QIS),主要支持量子理论和实验方案研究,探索新的量子应用,实现新型计算机范式或促进量子信息、传输和操纵的前沿发展。量子信息科学计划与工程学部(ENG)和计算机与信息科学学部(CISE)合作,支持量子领域的跨学科基础研究。美国国家科学基金会在量子信息科学领域的投入主要集中在以下4个方面^[1]。

(1)量子基础。即在广泛条件下增进对独特量子现象与经典物理系统之间联系的基本理解。该领域的研究包括产生和控制量子纠缠态并对其进行测量、理解并控制量子退相干、系统地研究量子算法的应用范围及其能提供的指数级加速优势、分析和理解量子多体状态的基本性质等。

(2)量子元素。重点加强科学家在单粒子和多粒子量子系统中测量、建模、控制和利用粒子量子特性的能力。该领域的研究旨在将控制量子现象的能力转化为构建量子系统组件的相关技术,包括在测量中利用量子叠加/纠缠/压缩、表征量子噪声并将其最小化、实现量子纠错并进行量化、开发高效的方法来生成和控制量子比特等。

(3)量子系统。设计和开发可控和可扩展的量

作者简介:王炼(1982—),女,硕士,主要研究方向为美国基础研究动态。

收稿日期:2018-04-15

子信息处理系统所需的硬件、软件和底层算法。该领域的研究包括明确量子器件的优点和局限性、开发稳定可控与低错误率的可扩展量子电路与系统、为量子传感计算和通信提供编程范例、为量子计算提供可快速进行原型设计和优化的测试平台、实现跨量子物理与经典物理边界的信息交换、深入研究量子算法的计算复杂性和可计算性等。

(4) 量子人才。美国国家科学基金会的使命之一便是支持科学与工程教育，培养科学、技术、工程、数学 (STEM) 及相关领域人才和师资力量。在量子信息领域，美国国家科学基金会大力培养新一代量子信息科学家、工程师和教育工作者，形成一支具有全球竞争力的跨学科人才队伍。

2 美国国家科学基金会推动量子信息研究的最新举措

近 10 年来，全球在量子信息理论和应用方面取得了显著进步。研究者们普遍估计，量子信息技术在不久的将来会实现质的突破，并可能引发下一场科学技术革命。美国更是将量子技术视作确保未来国家影响力的新前沿进行全面布局，其中美国国家科学基金会投入了大量资源进行量子物理基础理论、量子材料及量子计算研究，并加强量子领域青年人才的培养。

2.1 集成量子材料中心

2013 年，美国国家科学基金会投资 2 000 万美元资助创建集成量子材料中心 (Center for Integrated Quantum Materials, CIQM)^[2]，其战略目标体现在科学研究、知识转移和人才培养 3 个方面：一是基于石墨烯、拓扑绝缘体、金刚石氮空位中心等新型量子材料开发原子尺度器件和集成量子系统，为量子传感、量子通信和量子计算的实现铺平道路；二是将科学研究中的创新成果向市场转化；三是培养该领域青年人才队伍，为美国保持量子领域领导地位储备人才，并向公众普及量子科学知识，提高公众参与程度。

集成量子材料中心主要依托哈佛大学建设，美国国内合作机构包括霍华德大学、麻省理工学院和波士顿科学博物馆，利用哈佛大学的纳米级系统中心、霍华德大学的纳米科学和工程设施以及麻省理工学院的材料科学和工程中心，在新型范德华异质

结构、新拓扑晶体、拓扑保护量子比特以及工程固态量子发射器量子网络 4 个领域开展研究。集成量子材料中心还邀请来自 IBM、英特尔、西北大学、加州大学圣芭芭拉分校、伊利诺伊大学香槟分校和德国路德维希大学的成员组成外部咨询委员会，为中心发展提供指导。

在知识转移方面，集成量子材料中心制作专门的创业主题视频并向所有中心参与者开放，向学生和教师展示如何通过商业技巧短期课程以及与经验丰富的企业家接触来推动技术商业化；与其大学技术开发办公室的成员密切合作，确定潜在知识产权及相关许可证；与巴斯夫公司就石墨烯、与 Element Six Ltd. 和 Epitaxial Technologies 公司就钻石生长展开合作。

除合作机构外，集成量子材料中心与哥伦比亚大学、布鲁克海文和桑迪亚国家实验室共同设立了研究者访问计划，构建量子材料研究机构网络，促进科学家间的经验交流及研究合作。此外，中心还为波士顿地区和华盛顿特区的四年制大学和社区大学提供量子研究和教育服务，吸引身为弱势群体的学生参与中心的研究项目。波士顿科学博物馆则为公众提供量子及电子学相关知识，为向公众传播科学新思想和新发现提供良好的途径。

2.2 推进工程领域通信量子信息研究

2016 年，美国国家科学基金会提出面向 2050 年的十大设想 (10 Big Ideas)，以展望未来基础科学探索，推动美国国家科学基金会长期研究议程发展，确保人类不断从基础研究成果中获益。十大设想之一便是实现“量子跨越式发展——引领下一代量子革命”，具体目标是解决有关量子行为和量子系统操作的基本问题，探索和开发量子材料，推动量子通信、计算、传感和模拟领域的发展^[3]。

为具体落实和推动量子跨越式发展，美国国家科学基金会的新兴前沿与多学科活动办公室 (EFMA) 正式启动“推进工程领域通信量子信息研究项目” (Advancing Communication Quantum Information Research in Engineering, ACQUIRE)。新兴前沿与多学科活动办公室于 2015 年由工程学部设立，其目标是及时对新兴领域给予战略支持，同时资助多学科教育和设施项目。新兴前沿与多学科活动办公室下的旗舰计划是新兴前沿领域研究与

创新计划 (EFRI), 主要探索发现具有变革性思想的科研项目, 以满足国家需求并应对社会重大挑战。2016 年 8 月, 在新兴前沿领域研究与创新计划框架下, 美国国家科学基金会工程学部、计算机与信息科学和工程学部以及数学和物理学部密切合作, 共同投入 1 200 万美元启动首批 ACQUIRE 项目, 重点支持量子通信的跨领域研究, 开发利用预定量子态光子作为数据加密方式的系统, 验证可靠的量子通信链接, 打造高度安全的未来型网络, 见表 1。

长期以来, 科学家一直致力于研究如何编码

出能够远距离通过光纤电缆传输信息的光子, 并通过量子纠缠现象实现量子密钥分发, 从而加密数据信息, 保证通信安全。但目前, 这种通信系统只能在极低温度环境下, 通过体积庞大、耗能极高的设备实现。然而, 量子物理和光学材料的基本理论知识及纳米级光子集成的最新进展已推动通信系统达到量子水平。首批 ACQUIRE 项目的 6 个跨学科团队由来自麻省理工学院、加州大学、耶鲁大学等 15 个科研机构组成, 探求解决在芯片上设计量子通信系统的重大挑战, 目标是开

表 1 ACQUIRE 项目清单^[4]

序号	项目名称	科研机构	首席科学家	资助期	资助金额
1	基于纠错半导体量子比特的可扩展量子通信	麻省理工学院	Dirk Englund	2016 年 10 月— 2020 年 9 月	200 万美元
2	集成量子通信传输点	华盛顿大学	Kai-Mei Fu	2016 年 9 月— 2020 年 8 月	200 万美元
3	基于芯片的量子信息应用异构平台开发	哥伦比亚大学	Alexander Gaeta	2016 年 8 月— 2020 年 7 月	207 万美元
4	可扩展的集成量子光子互联	罗切斯特大学	Qiang Lin	2016 年 9 月— 2020 年 8 月	210 万美元
5	用于光纤量子通信的微芯光子器件	加州大学 圣地亚哥分校	Shayan Mookherjea	2017 年 1 月— 2020 年 12 月	200 万美元
6	电信波长量子中继器的集成钠光子固态 存储器	耶鲁大学	Hong Tang	2016 年 10 月— 2020 年 9 月	200 万美元
7	利用离子芯片和集成光子学开发可扩展的 量子网络	马里兰大学	Edo Waks	2017 年 8 月— 2021 年 7 月	200 万美元
8	利用集成于手性光子电路的固态发射器 开发的确定性光子图形状态转发器网络	弗吉尼亚 理工学院	Dominique M. Dagenais	2017 年 10 月— 2021 年 9 月	200 万美元
9	用于安全通信的芯片级 高维纠缠和量子存储模块	加州大学 洛杉矶分校	Chee Wei Wong	2017 年 10 月— 2021 年 9 月	200 万美元

发能在常温、低能耗状态下在光纤网络中实现与纠缠量子互动的芯片。2017 年, 美国国家科学基金会又追加支持 3 个新项目。每个 ACQUIRE 团队资助期为 4 年, 资助额度 200 万美元。一旦成功, ACQUIRE 团队的成果将使安全高效的量子通信硬件变为现实, 并推动量子传感和量子计算的进步。

2.3 推动量子领域会聚研究

2017 年 4 月, 美国国家科学基金会发布致同行书, 征集量子飞跃、数据革命、北极探索和人

类 - 技术前沿 4 个“十大设想”研究领域的具体项目^[4]。其中量子飞跃领域由数学和物理学部以及工程学部共同支持, 具体项目包括: 组织暑期学校, 为量子信息科学培养一批知识、技能及合作能力全面发展的跨学科人才; 寻求量子领域跨行业活动建议, 通过促进导师、学生和非学术伙伴之间的合作, 鼓励科学和工程在不同部门(包括但不限于学术界、工业界、国家实验室和私人基金会)之间的融合; 组织在量子领域推进融合研究的研讨会等。项目征

集获得学术界积极反应，最终4个项目获得美国国家科学基金会支持。

2.3.1 实用全连接量子计算机项目

该项目由圣菲研究所（Santa Fe Institute）承担，旨在开发全连接物理量子位的实用级量子计算机（Practical Fully-Connected Quantum Computer Challenge, PFCQC）^[5]，其目标是实现一种功能性的量子信息处理系统，包括协同设计的算法、软件、控制元件、物理架构、连接器及设备制造能力。PFCQC项目将采取整合硬件、软件及应用程序的联合设计方式，成立一个互动式创意实验室，汇集物理学、计算机科学、信息科学等多领域专家进行合作，以确定开发实用全连接量子计算机的研究范畴及所面临的挑战，提出一系列解决方案，并开展实际的合作项目研究，最终开发和运行全连接实用级量子计算机的新兴技术。PFCQC项目的资金总额为500万至1500万美元。如果条件成熟，参与者可联合提交完整的研究项目申请书，美国国家科学基金会将选出1~2个项目在2018年财年予以资助，总资助额度不超过300万美元。

2.3.2 量子科学暑期学校

该项目每年精选美国各地的研究生参加暑期学校，由来自量子研究各领域经验丰富的跨学科团队，通过直接演示、辅导讲座、互动讨论等方式，为学生指导与量子革命相关的多个领域的知识，通过沉浸式教育让下一代量子领域科学家理解“量子飞跃”的原则、方法和目标；促进各领域科学家间的交流互动，不断激发量子领域跨学科新思维。该项目由约翰霍普金斯大学承担，美国国家科学基金会提供5年的支持，总预算不超过70万美元。

2.3.3 研讨会：量子飞跃中的跨领域连接

该项目由芝加哥大学分子工程研究所承担，通过定期组织由大学首席科学家、企业伙伴和研究生参与的量子信息科学和工程网络（QISE-NET）研讨会，探索新的、更有效的方式推动研究机构和企业融合；建立密切的大学-企业合作关系，促进具有市场潜力的量子技术的商业化；在企业导师指导下培养研究生实践能力，为学生就业、创业及企业雇用人才提供机会。项目资助期为4年，总预算150万美元。

2.3.4 研讨会：安全通信的量子要素

该项目由弗吉尼亚理工学院承担，汇集各领域

研究人员探讨量子通信领域当前的主题和趋势，以及基于量子现象的安全、可扩展通信模式的发展。参与者来自化学、材料科学、工程学、物理学和量子信息等各融合学科，总结该领域的当前发展状况及遇到的挑战。项目资助期为1年，资助额度为10万美元，鼓励弱势群体和少数群体成员参加。

3 启示

2016年7月22日，美国联邦政府公布美国国家科学和技术委员会（NSTC）发布的《推进量子信息科学：国家挑战与机遇》报告^[6]。报告总结分析了量子信息科学的应用前景，以及美国在该领域发展所面临的挑战和机遇，并呼吁联邦政府将量子信息科学作为投资的优先事项，推动政产学研通力合作以确保美国在该领域的领导地位，增强国家安全与经济竞争力。

报告指出，尽管美国在量子信息科学领域硕果累累，但仍然面临一系列的挑战。首先，研究机构内部及相互之间壁垒重重，缺乏沟通和合作；其次，缺乏量子信息科学领域的专业教育，除物理专业外，几乎没有其他院系深度开展量子力学课程教育；第三，量子信息科学面临技术与知识转移问题；第四，量子信息科学的发展受制于量子材料的制造能力。不难看出，美国国家科学基金会在量子信息领域的最新举措积极应对美国国家科学和技术委员会报告所提出的挑战，制定有针对性、有限期的战略投资计划以及具体可衡量的目标，力图打破机构内部壁垒、增强学科间的融合贯通、培养下一代量子领军人才、促进量子技术的转移与普及、大力增强在量子材料领域的基础研究，多管齐下解决量子信息科学发展道路上的障碍，极力保持美国在量子信息科学上的领先优势^[7]。

我国尽管属于后来者，但起点高、进展快，在量子信息应用研究某些方面已经达到世界先进水平，如2012年建成世界上规模最大的46节点量子通信试验网、发射“墨子号”量子科学实验卫星以及中国科学技术大学在量子计算机方面取得突破等。尽管在量子信息领域的个别点上，我国科研机构已取得了重要研究成果，具有一定的国际地位，但应该意识到我国与美国及欧洲主要国家之间仍然存在差距。面对国际上量子信息快速发展的势头并

借鉴美国及其他发达国家近期举措，我国应加大对量子信息科学的投入，整体布局、精心筹划，力争在下一量子革命的国际竞争中抢占制高点：

(1) 加强顶层设计，制定并发布国家量子信息发展战略及路线图，形成对各机构、各计划的统筹指导，实现机构间协调及资金的合理配置。

(2) 促进跨学科融合，建立包括物理、数学、计算机科学、工程学在内的综合性系统框架，融会不同领域专业知识，推动量子基础科学发现及创新转化。

(3) 强调产学研协作，促进高校、研究机构与龙头企业的合作，充分发挥企业在量子信息技术突破和产业化进程中的作用。

(4) 兼顾多种技术路径。量子信息研究在总体上依然处于起步阶段，应重视和支持多种技术路径探索以及各技术路径所涉及的技术工具、材料和制造设备，避免技术误判。注重人才培养，通过跨学科方式培养优秀的硕士和博士研究生，形成适应量子科技前沿领域多学科交叉需求和具有国际化视野的顶尖创新型人才。■

参考文献：

[1] 乔健. 量子信息科学最新发展态势及美国应对措施 [J].

全球科技经济瞭望, 2017, 32 (11-12): 15-20.

- [2] Harvard University. Quantum information science and technology[EB/OL]. [2018-04-08]. <http://ciqm.harvard.edu/overview3.html>.
- [3] National Science Foundation. 10 Big Ideas for future NSF investments[EB/OL]. [2018-04-09]. https://www.nsf.gov/about/congress/reports/nsf_big_ideas.pdf.
- [4] National Science Foundation. NSF invests \$ 12 million in quantum technologies for secure communication[EB/OL]. [2018-04-09]. https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=189436.
- [5] National Science Foundation. Ideas lab: practical fully-connected quantum computer challenge[EB/OL]. [2018-04-09]. https://www.nsf.gov/pubs/2017/nsf17548/nsf17548.htm#pgm_desc_txt.
- [6] National Science and Technology Council. Advancing quantum information science: national challenges and opportunities[EB/OL]. [2018-04-10]. https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Quantum_Info_Sci_Report_2016_07_22%20final.pdf.
- [7] National Science Foundation. Dear colleagues letter: growing convergence research[EB/OL]. [2018-04-10]. <https://www.nsf.gov/pubs/2018/nsf18058/nsf18058.jsp>.

New Measures Taken by U.S. National Science Foundation in Promoting Quantum Research

WANG Lian

(China Science and Technology Exchange Center, Beijing 100045)

Abstract: As the major federal budget source for basic research, the National Science Foundation (NSF) of the U.S. has been supporting quantum related research for decades, and has issued a series of new measures and programs to advance its development. This paper depicts the general picture of NSF's effort in quantum information science as well as its most recent endeavors, in a bid to provide references for the formulation of strategic plan and policies in China.

Key words: United States; quantum information; basic research