

量子世纪年

美国国家科学基金(NSF)对量子教育的支持方式研究

朱广天¹ 杨洁² 秦真科²(¹ 集美大学师范学院, 福建 厦门 361021; ² 华东师范大学教师教育学院, 上海 200062)

摘要 美国政府近年来通过行政命令和预算调整, 强化了在量子科学和量子教育方面的投入, 了解美国国家科学基金会(NSF)如何支持量子教育, 对我国应对全球科技竞争具有深远意义。本研究搜集了目前 NSF 所有在研的与量子教育相关的研究项目, 对这些项目的研究内容进行了分析。结果显示, 美国的量子教育研究覆盖了从基础教育到高等教育的全部学段, 研究重点已从“第一次量子革命”的物理理论教学转为面向“第二次量子革命”的量子信息实际应用教学, 并特别强调教育研究与量子信息劳动力市场的直接联系。

关键词 量子教育; 科研基金; 学科教学

STUDY ON THE SUPPORT METHODS OF THE NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (NSF) FOR QUANTUM EDUCATION

ZHU Guangtian YANG Jie QIN Zhenke

¹ Teachers College, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021;² College of Teacher Education, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract In recent years, the U. S. government has strengthened its investment in quantum science and education through executive orders and budget adjustments. Understanding how the National Science Foundation (NSF) supports quantum education is of profound significance for China to respond to global technological competition. This study has collected all current NSF-funded research projects related to quantum education and analyzed the content of these projects. The results show that quantum education research in the United States covers all levels of education from K-12 to universities. The focus of research has shifted from the physical theory teaching of the “first quantum revolution” to the practical application teaching of quantum information in the “second quantum revolution”, with particular emphasis on the direct connection between educational research and the quantum information labor market.

Key words quantum education; research funding; discipline-based education

近年来国际科技领域的竞争正日益加剧, 而量子科学正是这场科技竞赛的主赛道之一。2022年, 美国总统拜登签署了一份国家安全备忘录以及相关的行政命令, 旨在加强美国在量子科学领域的领先地位^[1]。2023年8月, 拜登政府进一步发布了新的行政命令, 对美国企业在量子计算、先

进半导体以及人工智能等敏感技术领域对中国的投资施加了限制^[2]。同时, 美国政府还将国家量子倡议咨询委员会(National Quantum Initiative Advisory Committee)从美国能源部划至白宫的直接管辖之下, 并批准增加了国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)在量子科学

收稿日期: 2023-12-23

基金项目: 全国教育科学“十四五”规划教育部青年课题(项目编号: EHA220569)。

作者简介: 朱广天(通信作者), 集美大学师范学院副教授, gtzhu@phy. ecnu. edu. cn; 杨洁, 华东师范大学副教授; 秦真科, 华东师范大学博士研究生。

引文格式: 朱广天, 杨洁, 秦真科. 美国国家科学基金(NSF)对量子教育的支持方式研究[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 3-9.

Cite this article: ZHU G T, YANG J, QIN Z K. Study on the support methods of the National Science Foundation (NSF) for quantum education[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(2): 3-9. (in Chinese)

和量子教育方面的预算支出。

在此背景下,深入了解 NSF 在量子教育领域如何为研究人员和教育者提供支持变得尤为关键,对于推动我国量子领域教育改革以应对全球科技竞争具有重要意义。本研究整理了目前 NSF 所有在研的与量子物理或量子信息教育相关的研究项目,并对其主要研究内容、目标教学对象、教育开展形式等方面进行了分析。

1 量子教育项目筛选方法

本研究中的“量子教育”所指的是在量子物理、量子信息、量子计算等领域的相关课程、培训、教育活动与教学研究^[3]。NSF 分为数学与物质科学、生命科学、地球科学、计算机与信息科学、工程、STEM 教育等多个学部,对量子教育的支持主要来源于数学与物质科学学部的物理方向(以下简称物理方向,代码 PHY)、计算机与信息科学学部(以下简称计算机学部,代码 CISE 或 CSE)、工程学部(代码 ENG),以及 STEM 教育学部(以下简称教育学部,代码 EDU)。为了筛选量子教育相关的项目,本研究对这四个学部的在研项目(Active Award)进行了检索。

对于教育学部的在研项目,如果该项目在摘要中提到了 Quantum(量子),有很大概率该研究会与量子教育相关。因此我们的筛选策略是直接检索 NSF 教育学部项目摘要中检索关键词“Quantum”,并逐项人工检验,去除了其中一项仅包含短语“a quantum leap”但实际研究内容与量子物理无关的项目(本意为量子跃迁,在文中用来描述变化很大),总计纳入研究的教育学部量子教育项目数为 39 项。

对于物理方向、计算机学部和工程学部的在研项目,我们采用了多轮筛选的方法。首先在项目标题中检索关键词“Education”(教育)、“Student”(学生)或“Teach(教学)”等词,选出与物理教育、计算机教育和工程教育直接相关的项目,然后在摘要中检索“Quantum”,筛选出与量子教育相关的项目。同时,由于标题长度有限,为了避免遗漏重要的量子教育研究项目,我们又对这三个学部包含“Quantum”关键词的在研项目进行了摘要检索,选取的检索词为“Curriculum”(课程)、“Course”(课)、“Teach”(教学)、“K-12”(12 年级以下)、“Undergraduate”(本科)等与教育教学直接相关的单词,对同一篇摘要中多次出现这些检

索词的项目进行了人工检验,确认该项目是直接研究量子相关内容的教育教学,还是在研究量子科学的过程中将相关内容间接的引入到教学中。例如,在物理方向我们初筛出 38 个项目在摘要中较多的提到了教育或教学等词汇,逐一分析研究内容后,确定了 14 项研究与量子教育直接相关,而其余 24 项为间接相关。多所学校合作研究的同一个 NSF 项目可能有多个项目号,本研究在处理数据时已将这些合作研究合并为一项。最终纳入本文研究的 NSF 各学部量子教育相关项目的数量如表 1 所示,其中初筛的项目数量标记于括号中。

表 1 量子教育在 NSF 各学部的在研项目数量

教育学部 (EDU)	物理方向 (PHY)	工程学部 (ENG)	计算机学部 (CSE)
35 项 (初筛 39 项)	14 项 (初筛 38 项)	2 项 (初筛 12 项)	2 项 (初筛 10 项)

2 NSF 量子教育项目研究内容

我们将纳入分析的 99 个 NSF 量子教育项目的摘要提取出来,逐项分析了这些项目的研究内容,以下根据学部的不同分别展开讨论。

2.1 教育学部项目

在 NSF 教育学部资助的 39 项量子教育项目中,有 18 项由本科教育项目资助的(代码 DUE),有 12 项是由研究生教育项目资助的(代码 DGE),有 3 项是由“正式与非正式学习研究(代码 DRL)”资助的,有 6 项是由 STEM 卓越平等计划(代码 EES)资助的。从这些项目的摘要内容来看,由 DUE 或 DGE 资助的量子教育的项目也并非只是只针对本科生或只针对研究生设计课程,许多项目都涉及到本科和研究生两阶段课程,也有多个项目针对 K-12 阶段的学生和教师开设了科技活动或量子内容培训。具体而言,有四个项目明确提到了要对 K-12 阶段的教师开展量子物理或量子信息方面的教学培训,这四个项目的立项时间、资助金额和面向的学段如表 2 所示。

在研究内容方面,NSF 教育学部的资助项目中有一类是为少数族裔为主的高校专门开设的 STEM 卓越平等计划(Equity for Excellence in STEM, EES),这一类的量子教育项目实际上是以量子方面的科学研究为主,在项目负责人开展科

表 2 NSF 教育学部资助的 K-12 量子教育教师培训项目

立项题目	立项时间	资助金额(美元)	面向学段
Preparing Secondary Teachers and Students for Quantum Information Science 针对量子信息科学的中学教师与学生培训研究	2022	998448.00	高中
Quantum Education for Students and Teachers 面向学生与教师的量子教育研究	2022	1499999.00	8~12 年级
Industries of the Future Research Experience for Preservice Teachers in STEM Settings 在 STEM 环境中为预备教师提供面向未来产业的研究经验	2022	500000.00	高中
Quantum Teaching and Learning in Elementary Classrooms 小学课堂中的量子教学与学习研究	2023	299769.00	小学

研的过程中为本科生或研究生提供研究机会,并将相应的研究内容融入到量子相关的课程教学中。因此我们将其划分为量子教育的间接研究,而其余各项目为针对量子教育的直接研究。

在针对量子教育的直接研究项目中,有一项属于教育政策方面的研究,探索如何采用三年本科加两年硕士的 3+2 模式加速培养半导体和量子科学方面的专业人才^①;有一项是关于半导体行业工程师培训与认证的项目;有两项是教育技术与物理教学的结合,例如利用 VR/AR 学习物理相关知识以及利用 3D 建模学习化学反应过程,其中涉及了部分量子知识;有四项是 STEM 领域涉及多个学科的教学研究,其中包含了量子相关的内容。其他的 27 个项目则是专门针对量子物理或量子信息等相关内容进行教育研究,这部分项目所具体涵盖的量子科学内容如表 3 所示。

2.2 物理学部项目

NSF 物理方向所资助的量子教育项目中,有六项是关于量子相关的教育教学研究,如表 4 所示。这六个项目中,有一个是 2023 年立项的教育政策方面的项目,“量子信息科学与工程的教育格局:引导教育创新以支持量子职业发展路径”。该项目指出,量子科学将在计算、通信和传感方面带来重大改进,现有的劳动力数据无法适应量子相关行业快速扩张的需求,需要更为详细和全面的量子劳动力分析,并需要将这些知识传播给现有和未来的量子信息工程的教育者和开发者。而另

表 3 专门针对量子相关课程教学的 NSF 教育项目
涵盖内容分类

涵盖内容	内容说明	立项数量
量子物理教学	研究量子物理内容的教学,对应的课程为大学物理(非物理专业)和量子力学(物理专业)	4
量子计算教学	量子计算与量子加密等内容的专业课教学	3
量子信息教学	量子信息与量子通信方面的专业课教学	8
量子信息技术培训	与“量子信息教学”不同,本项是针对量子信息研究的从业者所开展的技术培训(如研究生或工程师)	8
量子器件	针对量子传感器等量子器件的课程或实验教学	4

外五个项目则是从课程教学方法、学习工具开发、实验平台建设等不同角度开展的量子教育研究。

值得注意的是,上面的这六个项目中,有一个叫做“本科研究经验基地”(Research Experience for Undergraduates Site, REU Site)。这是 NSF 物理方向拨出专项资金给承担项目的高校,供每所高校每年资助 10 位左右的学生深度参与到相关的物理研究中。例如表 4 中我们列出的由蒙大拿州立大学承担的“量子与材料物理学”本科研究

① 项目名称“An accelerated 3+2 pathway to BS and MS degrees in Semiconductor Manufacturing and Quantum Science disciplines”,NSF 项目号 2322670,立项时间 2023 年。

表 4 NSF 物理方向资助的量子教育直接相关项目

立项题目	立项时间	资助金额(美元)	面向学段
Education Landscape for Quantum Information Science and Engineering: Guiding Education Innovation to Support Quantum Career Paths 量子信息科学与工程的教育格局:引导教育创新以支持量子职业发展 路径	2023	369722.00	教育政策
Preparing Students for the Second Quantum Revolution Using Research- Validated Learning Tools 使用基于研究的学习工具帮助学生应对第二次量子革命	2023	498945.00	本科
Quantum Simulation with Classical Optics 利用经典光学开展量子模拟(实验)	2023	249994.00	高中/本科
An Ultracold Atom Platform for Quantum Hydrodynamics Research and Undergraduate Training in Quantum Technology 超冷原子平台在量子流体动力学研究与量子技术本科教育中的应用	2022	249241.00	本科
Connecting Spins-First Quantum Mechanics Instruction to Quantum Infor- mation Science “自旋优先”量子力学教学与量子信息科学的关联研究	2020	347901.00	本科/研究生
REU Site: Quantum and Materials Physics 本科研究经验基地:量子与材料物理学	2020	300000.00	本科

经验基地项目,每年会资助 8 名本科生在暑期参与 10 周的量子项目研究。而除了这个直接命名为“量子与材料物理学”的项目之外,目前 NSF 物理方向还有八个在研的本科研究经验基地项目中专门提到了开展量子科学方面的研究(表 5),这八个项目也在本研究中被划分为量子教育的直接相关项目。

除了本章中讨论的 14 个与量子教育直接相关的项目,NSF 物理学科还有许多量子科学相关的科研项目在摘要中着重强调了其研究过程与研究结果将会用于支持量子教育工作。例如,在一项名为“控制空间量子相关性以增强量子网络”(Control of Spatial Quantum Correlations for Enhanced Quantum Networks)的 NSF 职业成就奖(NSF Career Award)项目中,项目主持人就提到要将量子网络研究与教育计划相结合,通过让本科生积极参与研究以及在本科教学实验室中引入量子光学实验,来发展学生的问题解决能力,同时,该项目也将通过让高中教师参与学习量子光学的演示实验,为普通公众提供教育推广机会。其余的项目也从不同的物理内容层面,将科学研究与教育相结合。

2.3 工程学部与计算机学部项目

NSF 的工程学部(ENG)和计算机学部(CSE)都有关于量子教育的项目,本文在这里一并讨论。工程学部与计算机学部各有两个项目与量子教育直接相关,具体如表 5 所示。

工程学部的是两项教师研究经验基地项目(Research Experience for Teachers,RET)。这一类项目是由 NSF 提供资金支持 K-14 教师(包含 K-12 学校和社区大学)在暑期开展真实的工程与信息领域研究,提高这些教师在工程与信息领域的学科知识,并将他们的研究经验转化为课堂活动和课程,以拓宽他们的学生对相关领域的认识和参与。工程学部与量子教育直接相关的两个教师研究基地项目分别是“促进俄克拉荷马州半导体教育的芯片设计教师体验项目”和“电子束光刻系统在量子工程与纳米科学研究、教育和培训中的应用”。除此之外,工程学部还有多个设计和开发量子器件的项目在摘要中提到了会开设相关的课程并纳入本科生参与项目。

计算机学部的两个量子教育方面的项目,一项研究利用虚拟现实技术帮助学生理解量子信息中的叠加、测量、纠缠等概念,另一项研究则将开发量子计算与信息安全方面的课程,供本科生与

表 5 NSF 工程学部与计算机学部资助的量子教育直接相关项目

立项题目	立项时间	资助金额(美元)	面向学段
RET: Chip Design Experiences for Teachers to Stimulate Semiconductor Education in Oklahoma 教师研究经验基地:促进俄克拉荷马州半导体教育的芯片设计教师体验项目	2018	537678.00	高中/本科
RET: Acquisition of an Electron Beam Lithography System for RET: Quantum Engineering and Nanoscience Research, Education and Training 教师研究经验基地:电子束光刻系统在量子工程与纳米科学研究、教育和培训中的应用	2023	600000.00	高中/社区学院
Advancing Quantum Education by Adaptively Addressing Misconceptions in Virtual Reality 通过虚拟现实中的迷思概念解决推进量子教育	2023	201404.00	本科
Experiential Learning Platform and Curricular Modules for Quantum Computing Security and Privacy Education 用于量子计算安全与隐私教育的体验学习平台和课程模块	2023	299999.00	本科

研究生学习。除此之外,计算机学部的在研项目中,还有八个项目既在标题中提到了“Education”(教育)或“Teaching”(教学),又在摘要中提到了量子。但是在对摘要内容进行人工复核时发现,这八个项目主要是开发相关的数据可视化设备或计算集群,用于科研与教学开展,量子是其列出的可处理的数据内容之一(如量子化学),因此这些项目未被列为量子教育的直接研究项目。

3 美国量子教育研究特点与趋势

通过对 NSF 资助的量子教育相关项目进行逐条分析,本研究总结了美国当前量子教育研究的几个主要特点与趋势:

3.1 教学内容主要针对第二次量子革命

量子科学的发展可以分为“第一次量子革命”和“第二次量子革命”两个阶段^[4]。“第一次量子革命”发生在 20 世纪初,主要内容是量子力学的基础理论建立。而正在进行的“第二次量子革命”着重于利用量子现象(如量子纠缠和量子叠加)进行信息处理和通讯,将引发诸如量子计算机、量子安全通信、高精度量子传感器等多个领域的技术突破。从研究的趋势看,美国的量子教育正从“第一次量子革命”的量子力学基础理论教学转向“第二次量子革命”的实际应用与培训。如前文表 3

所示,在 NSF 教育学部专门针对量子相关课程教学的在研项目中,27 个项目中有 23 个项目是明确关于量子信息、量子计算、量子器件(量子传感器)等方面的课程与教学研究。

NSF 长期以来对物理教育研究和科学教育研究进行了大量资助^[5]。我们也可以通过量子教育领域的专家所获得的 NSF 资助项目情况发现量子教育趋势的变化。例如,Chandralekha Singh 教授是匹兹堡大学物理与天文学院教授,学科教育研究中心主任,曾任美国物理教师协会主席,长期从事量子力学教育的研究^[6,7]。她在 2000 年开始,陆续获得了六项 NSF 量子教育项目,之前的项目主要是研究如何利用基于物理教育研究的教学方法和教学工具提升学生对于量子力学基础知识的理解。而她 2023 年最新获批的项目则是“使用基于研究的学习工具帮助学生应对第二次量子革命”。作为量子教育领域的资深专家,她的研究内容一定程度上也可以反映美国量子教育的最新动向。

3.2 面向量子信息产业的劳动力需求

我们对量子教育项目摘要中的词汇进行了词频分析,词汇云图如图 1 所示。由于在筛选项目时,筛选条件之一就是在摘要中含有文本“Quantum”,所以在词汇云图里我们剔除了 Quantum 这个词。值得注意的一个词汇是出现在云图上方的



图 1 NSF 量子教育项目词汇云图

“Workforce”(劳动力)。在本研究初步筛选得到的 99 个量子教育相关项目中,“劳动力”一词在 45 个项目中共出现了 95 次。

人们往往认为“量子”只是专家学者们需要研究的学术内容。但实际上,要推动量子科研转化和商业应用,形成一个更为全面和多元的量子技术生态系统,必须建设多层次的人才队伍。而NSF量子教育项目中多次出现的“劳动力”一词,说明美国政府和研究机构已经意识到量子科技形成规模产业需要有大量的人才输入。前文提到的《量子信息科学与工程的教育格局:引导教育创新以支持量子职业发展路径》(Education Landscape for Quantum Information Science and Engineering: Guiding Education Innovation to Support Quantum Career Paths)的NSF项目,就是要从“量子信息领域劳动力知识与技能需求分析”“向开展量子教育的教师与学校传递劳动力需求分析结果”“全面调查美国的量子信息教育开展情况”三个方面展开工作,将量子教育与劳动力市场直接连接,扩大美国的量子信息教育覆盖范围,满足量子信息领域的劳动力需求。

3.3 在量子科学研究项目中强调教育工作

除了本文中列出的这些与量子教育直接相关的项目之外,还有大量的 NSF 量子科学研究项目中强调了科学研究与教育教学的结合。例如前文中提到的 NSF 职业成就奖是一项为期 5 年的特别资助,该奖项旨在表彰有潜力成为各学科领军

人才的优秀青年教授，是 NSF 为青年学者颁发的最高荣誉奖项，某种程度上可以类比为国内的“优青项目”。在对 NSF 物理学科的项目初筛后，本研究发现，几乎所有的 NSF 职业成就奖项目都会在摘要中强调项目负责人和团队将会开展与项目相关的教育教学工作。这些与科研项目相关的教学工作形式多样，既有面向本科生与研究生开展的课程与实验教学，也有面向学校所在地的中小学的教师培训和学生实践工作，还有联合博物馆等机构开展的面向公众的科研成果介绍与科普公众。

科研项目不仅能推动科学和技术的发展,还可以为教育提供丰富的内容和实践场景。通过科研项目,教师和学生能够直接参与到最前沿的研究中,这种参与经验可以极大地提高教学质量和学生的实践能力。同时,科研项目还可以作为一个平台,连接不同层次和领域的教育参与者,包括本科生、研究生、中小学教师和学生,甚至是普通公众。这种多元化的教育教学活动能够让更多人受益,实现科学的普及和推广。

3.4 研究类型与教育对象覆盖广泛

NSF 资助的量子教育研究项目所涉及的教育研究内容非常广泛:有关于如何加快培养量子信息产业劳动力的教育政策研究;有关于量子教育与 AR/VR 教学结合的教育技术;有关于量子物理基础内容教学的研究;有关于量子信息和量子计算等专门内容的研究;有量子理论课程设计,有量子实验平台搭建,等等。这些研究内容覆盖了量子教育的各个方面,说明美国正试图通过立体而全方位的量子教育研究来支撑其量子信息产业的建设。

同时,这些量子教育项目覆盖了小学、中心、社区学院、本科、研究生等全部学段,面向的对象既包含了这些学段的学生,也包含了从事一线教学的中小学教师和社区学院教师,同时也有针对量子信息等领域从业者的技术培训项目。美国的量子教育正从单纯的面向大学以上层面的学生,扩展到面向全体学生与公众。另外,在大多数量子教育项目的摘要中,项目负责人都会专门提到要面向科学弱势群体(如女性和少数族裔)的开展教育,增加量子教育的覆盖度,也扩展未来量子科学和技术从业者的多样性。

4 结语

综上所述, NSF 资助的量子教育项目体现出美国的量子教育正从基础量子力学理论教学转向为“第二次量子革命”的实际应用教学研究, 强调量子教育与量子信息劳动力市场的直接联系。教育对象不仅局限于高等教育, 还覆盖了从小学到研究生所有学段。这些趋势显示美国正全面地推动量子科技和教育的发展。

近年来我国对量子科学研究非常重视, 各级科研基金的资助力度很大, 但是对于量子教育方面的直接支持还略显不足。目前对于量子教育的直接支持多来自于高校自身, 例如华东师范大学在学校层面设立了一项人文社会科学交叉融合项目对量子教育进行研究(批准号 2021JQRH014), 华东师大的物理与电子科学学院拨款开发了真实的本科量子实验演示装置, 等等。但在国家层面的基金支持上, 仅有一项与中学量子物理教学直接相关的全国教育科学规划课题青年项目——“基于‘干涉’主题的高中生量子论和相对论科普课程开发研究”(批准号 EHA220569), 自然科学基金并没有量子教育的相关立项。为了提升国家在科技竞争中的可持续发展能力, 希望各级基金能够更加重视量子教育, 对相应的教育教学研究给予支持。

参 考 文 献

- [1] Memorandum on Improving the Cybersecurity of National Security, Department of Defense, and Intelligence Community Systems[EB/OL]. 2022. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/01/19/memorandum-on-improving-the-cybersecurity-of-national-security-department-of-defense-and-intelligence-community-systems/>
- [2] Executive Order on Addressing United States Investments in Certain National Security Technologies and Products in Countries of Concern[EB/OL]. 2023. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2023/08/09/executive-order-on-addressing-united-states-investments-in-certain-national-security-technologies-and-products-in-countries-of-concern/>
- [3] 王思悠, 朱广天. 物理教育研究中的量子力学教学研究简述[J]. 物理与工程, 2020, 30(6): 48-55, 60.
WANG S Y, ZHU G T. A brief introduction to the researches on quantum mechanics teaching and learning in physics education research[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(6): 48-55, 60. (in Chinese)
- [4] 华东师范大学量子思维项目组. 量子思维宣言[J]. 哲学分析, 2021, 12(5): 160-168.
The Team of Quantum Thinking Led by East China Normal University. The manifesto of quantum thinking[J]. Philosophical Analysis, 2021, 12(5): 160-168 + 199. (in Chinese)
- [5] 张萍, LIN D, 徐祯. 2011—2020 年间美国国家科学基金对物理教育研究领域资助情况分析[J]. 中国科学基金, 2022, 36(3): 7.
ZHANG P, D. Lin, XU Z. Analysis of funding for physics education research by the national science foundation of the United States between 2011 and 2020[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(3): 7. (in Chinese)
- [6] MARSHMAN E, SINGH C. Framework for understanding the patterns of student difficulties in quantum mechanics[J]. Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res., 2015, 11(2): 020119.
- [7] ZHU G, SINGH C. Surveying students' understanding of quantum mechanics in one spatial dimension[J]. American Journal of Physics, 2012, 80(3): 252-259.