

· 研究进展 ·

“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划结题综述

姜向伟¹ 倪培根^{1*} 董国轩¹ 向涛² 孙昌璞³
薛其坤⁴ 李金柱⁵ 张慧琴³ 解思深²

(1. 国家自然科学基金委员会 数理科学部, 北京 100085; 2. 中国科学院 物理研究所, 北京 100190;
3. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100193; 4. 清华大学, 北京 100084;
5. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 本文介绍了“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划的立项背景、总体科学目标、总体布局、实施思路及总体完成情况,并概述了该领域下一步发展的建议。

[关键词] 重大研究计划;单量子态;单光子;单原子;单分子;综述

单量子态研究是凝聚态物理、原子分子物理及光物理等学科中极具挑战性的前沿领域。单量子态主要研究对象包括单个电子态、单个原子态、单个分子的振动态/转动态、单个光子态、超导宏观量子效应和原子的波色—爱因斯坦凝聚体等等。研究对象的广泛性意味着单量子态研究具有很大难度和挑战性。实验上要求仪器具有极高的能量分辨率、动量分辨率、时间分辨率和空间分辨率等等,理论上要求模型更准确、更普适,计算方法更精致、更有效。为了把单量子态测量得更精准,并消除热涨落的影响,必须要把体系降到极低温。对单量子态的响应,往往信号很弱,要把它们放大到一般仪器能够探测的灵敏度,还需要加载很严苛的调控外场,如强磁场。研究单量子态的动态过程,需要飞秒甚至高达阿秒的时间分辨。单量子态研究所需的极端实验技术几乎代表了人类探测和调控自然界的最高能力。

1 立项实施情况

1.1 立项背景

二十世纪初量子力学的建立,奠定了描述微观系统状态的理论基础。量子态是微观体系的基本物理状态,由波函数和能量、角动量、自旋等一组量子数来表示,是电子、光子、原子、分子及其聚集体中各种准粒子的表现形式。微观体系的量子态不仅反映

了微观体系的定态特性,而且它在外场下的变化规律反映了体系的动态特性。量子态的运动满足薛定谔方程,可通过波函数的振幅和位相等基本物理量来刻画。量子态随时间的演化、对外场的响应等是物理测量的基本内涵。

基于量子力学,人们对微观世界运动规律的认识不断加深,极大地推动了现代科学和技术的发展。但是,我们目前对微观运动规律的认识在很大程度上还带有模糊性,特别是对单量子态还缺乏精密定量的检测。这不仅影响了以量子力学为核心的当代物理学的发展,而且也影响了与之交叉的其他学科的发展。近年来,随着实验精度和技术控制能力的不断提高,人们可以构筑和直接探测单量子态的物理特性,这方面研究及其与信息、材料、能源和化学的交叉融合有可能引发重大的科学突破。

单量子态是指量子体系中的单光子、单电子、单原子、单分子、聚集体中的准粒子等单粒子量子态,以及聚集体中多粒子凝聚所形成的宏观量子态(如玻色—爱因斯坦凝聚态、超导或超流量子态)等。对单量子态探测,要消除多量子态的混合以及环境涨落的影响,直接对单粒子量子态和宏观量子态等进行高精度的精密探测。进一步结合理论,我们能深刻理解和掌握量子态的特性和量子过程的基本规律,在此基础上发展新的量子器件构筑技术和量子

收稿日期:2019-03-19;修回日期:2019-03-25

* 通信作者,Email:nipg@nsfc.gov.cn

探测手段,可以大大提升我国基础研究的水平,解决我国信息和能源技术实现跨越式发展的一些重大需求问题,所以单量子态的研究具有非常重要的科学价值和重大的应用前景。

1.2 总体科学目标

单量子态研究是微观量子物理研究的前沿,也是一个极具挑战性的研究方向。该重大研究计划希望通过纯化的单量子态系统的制备和精密的探测,消除多量子态的混合以及环境涨落的影响,更好地认识微观量子现象和规律。不同于侧重应用性的基础性研究,这个项目更加强调新思想、新技术和新方法的发展,强调各种极端条件和极高探测精度的实现,为未来的能源、信息和材料科学的发展和运用提供科学的依据和支撑。

单量子态的制备,需要对量子态进行纯化,需要有极低温、超高真空、强磁场等极端实验条件和精密的材料制备和实验控制。同时,对单量子态物理量进行测量得到的信号通常很弱,必须有很高的测量精度才能将其检测出来,而且单量子态存在的时间往往很短,并且高度局域化,需要发展高空间分辨和高时间分辨的技术。因此,单量子态的探测与相互作用研究,要求在实验上能够从时间、能量、空间等多个方面对研究对象进行高分辨、高灵敏的探测。在时间上需达到飞秒的分辨率,以实现波函数随时间演变规律和动力学过程的直接观测和控制;在空间上需达到原子尺度的分辨率,以实现波函数的空间分布的精确测量和控制;在能量上需达到亚毫电子伏的分辨率,以实现相邻能级上量子态的分辨、以及对量子态之间纠缠的精密探测。

实现对单量子态在时间、空间、能量和动量的精准探测和控制,是当前国际上单量子态研究的一个趋势,更是我国基础研究面临的一个极大挑战。为了解决这个问题,该重大研究计划围绕新技术新方法的发展、新现象新机理的发现、单量子态的纯化与构筑开展了深入的研究工作,实现了以下总体科学目标:

(1) 开拓发展了新的精密测量方法和手段,通过对单量子态的精密检测,进一步检验和丰富了量子力学的基本问题,从微观本质上加深了对物理、化学、信息、材料等领域中的基本量子现象和机理的深入理解。通过对不同单量子态及其相互作用的研究,发现了若干新奇量子效应,为信息处理和能源环境等领域中重大新技术的应用奠定了物理基础,为国民经济的跨越式可持续发展和国家安全提供了

基础性和前瞻性的科学技术储备。

(2) 通过对单量子态及其相互作用的精密测量和理论研究,提出了有原创性的学术思想,形成了一些新概念、新方法和新技术,有望在未来引领我国在信息、材料、环境和能源等领域的重大技术发展。逐步形成了具有国际影响的学派,造就了一支高水平、结构合理的研究队伍,提升了我国在国际上的科学竞争力和学术地位。

(3) 通过该重大研究计划的实施,解决了国家在若干精密实验技术方面的急需,部分解决了某些关键技术依赖于进口的局面,培养了一批精于实验科学的优秀青年学者。

1.3 总体布局和实施思路

对光子、电子、原子分子、凝聚态乃至人工原子系统中的量子态和量子效应的研究,是现代物理学研究的基础、着力点和前沿,是学科交叉研究的科学源泉。

“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思想,围绕单量子态的检测及其相互作用的核心科学问题开展创新性基础研究,加强顶层设计,不断凝练科学目标,积极促进学科交叉,培养创新人才,力争在单量子态的检测及其相互作用重点方向上实现跨越式发展,形成单量子态检测及其相互作用研究领域的创新理论与方法,取得一批有重大国际影响的创新性成果、提升我国在量子态体系研究领域的自主创新能力,支撑国家相关计划项目和技术的发展。

根据项目的科学目标,该重大研究计划按三个阶段实施。

第一阶段为启动和重点支持阶段(2009—2011年):重点布局,探索制备单量子态体系的新技术与方法,发展单量子态的精密检测技术,掌握单量子态演化的基本规律,研究量子态与环境以及量子态之间的相互作用,为下一阶段项目的集成与升华奠定坚实的人才和研究基础。

第二阶段为集成升华阶段(2011—2014年):在总结前一阶段研究成果的基础上,进一步凝练科学问题,突出重点,发挥前一阶段优势项目的潜力,加强课题之间的直接合作,加强研究手段和研究成果的集成与升华,提高研究计划的整体水平,完成总体资助工作。

第三阶段为交流与总结阶段(2015—2018年):对已资助项目加强管理,注重项目的交流与研讨,及

时总结取得的经验和成果。基于该重大研究计划取得的成果和建立的人才队伍,对未来的研究方向和发展战略进行梳理和研讨,完成重大研究计划的结束评估工作。

在项目的实施过程中,为保证高质量地完成各个阶段的目标,采取了行之有效的措施。强化指导专家组“顶层设计、学术指导”的职能,强化重点和集成,整合与集成相近学术方向的研究团队,形成具有统一目标的项目群,体现“总体把握、整体推进、科学布局”的思想。把人才培养放到重要地位,通过项目的实施培养出一批高水平的青年学术骨干,在单量子态探测研究领域形成了优秀的学术团队,为我国在量子科技领域的发展积蓄人才。每年组织全体项目组成员的年度学术交流会和多次分专题学术交流会,展示进展、交流思想、促进交叉和整体发展,强化项目群的交流与合作。针对发展中出现的新现象,适时聚焦关键问题和方法。根据国内外发展状况和项目进展,适时调整资助侧重点。重视对非共识探索项目的遴选,对有独特学术思想,同行评议意见分歧较大,专家组部分专家认为值得探索的申请,给予培育和支持。

单量子态的检测及其相互作用研究需要建立在综合性交叉科学研究基础之上,需要高精度极端精密技术的交叉结合,因此,项目实施涉及的学科多、人员分布广,在计划的实施过程中,通过项目群和适度提高资助强度的方式,聚集不同学科和领域的研究队伍,围绕单量子态的检测及其相互作用所涉及的重大科学问题开展研究,为在不同领域的科技人员提供基础研究的平台和学科交叉研究与交流的环境,以实现计划项目的不断提炼和升华,促进源头创新思想的产生,达到集成升华的目的。

1.4 项目集成与学科交叉情况

该重大研究计划定位在单量子态的探测及相互作用,集成了各种超高时间、空间、能量分辨的精密探测手段和超高真空、极低温、强磁场、超高压等极端条件,融合了物理、化学、信息、材料、能源等多学科的知识和方法,所涉及的核心科学问题自身就具有鲜明的学科交叉特征。单量子态探测及相互作用的研究所取得的成果,特别是由此建立起来的新技术和新方法,为物理、化学、信息、材料、能源等众多学科的发展提供了新的研究手段,进一步促进了交叉学科的发展。

该重大研究计划坚持以科学问题为导向,对进展快、特色明显的研究领域和方向进行集中支持。针对科学前沿,着眼重大突破,部署了“振动激发态分子的反应动力学研究”“拓扑绝缘体的研究”“超导量子态的精密测量”和“单光子灵敏检测、精密光谱测量及微纳结构中光子调控”4个集成项目。针对未来器件物理,着眼国家需求,部署了“集成化固态量子比特的探测和相干操纵”“单分子乃至亚分子尺度的量子态研究”“面向量子模拟、量子随机行走的微纳结构光子芯片研究”“微腔与单量子点耦合单光子发射量子相干探测及器件制备”和“量子点操控的单光子探测和圆偏振单光子发射”5个集成项目。针对新奇量子现象,着眼领域总体布局,部署了“复合量子结构中的拓扑量子态与电子纠缠研究”“基于原子与原子和原子与光子相互作用体系的单量子态实验研究”和“低维材料中尺寸、界面及压力效应下宏观量子态的探测与相互作用研究”3个集成项目。此外还部署了“液氮温区 FeSe 界面超导体的探索”“金属氧化物的界面和表面激子及其与吸附分子的相互作用探测”“振动激发态分子的表面散射动力学研究”和“单分子光量子态的动态检测与调控”四个再集成项目,在前期集成基础上,进一步加强凝练,以期获得重大突破。

该重大研究计划在具体课题组织以及后续的项目集成方面,尤其是在单量子态的构筑、新现象与机理的研究、新技术方法的发展上始终强调学科的交叉融合,并达到了有学科深度的实质性交叉的目的。在该计划实施过程中,重视对交叉性强的科学问题的凝练,重视促进学科交叉的新技术新方法的创新与发展,特别是在融合交叉学科各种优势技术的实验平台建设,针对具体科学问题,重视组织不同学科的研究队伍,采用不同的实验方法和技术手段,理论与实验相结合,形成实质性的多学科交叉研究。此外,开展了广泛的学术交流,促进了学科交叉。除了每年一次项目组全体成员的学术交流会,还组织专题研讨会,每次会议都由从事相关研究的物理、化学、信息、材料等领域的研究人员参加研讨和交流,促进了项目组成员之间以及与项目组外研究人员的交叉合作。

2 总体完成情况

该重大研究计划实施期间(2009—2017年),共

资助项目 107 项,其中战略研究项目 4 项,重点支持项目 26 项,集成项目 16 项,培育项目 61 项。参研人员共发表学术论文 2 359 篇,其中包括国际期刊 2 273 篇,国内期刊 48 篇,国内、国际会议论文 38 篇,SCI 收录 2 306 篇。在 *Science*(19 篇)、*Nature*(3 篇)、*Nature* 子刊(66 篇)、*Physical Review Letters*(99 篇)、*Physical Review X*(15 篇)、*Journal of the American Chemistry Society*(10 篇)、*Advanced Materials*(22 篇)、*Proceedings of National Academy of Sciences of United States of America*(12 篇)等国际著名期刊发表论文 300 多篇。单篇论文他引最高 1 024 次,单篇他引超过 500 次的论文 10 篇,单篇他引超过 100 次的论文 50 篇。授权国内专利 68 项,授权国际专利 3 项。获得国家自然科学一等奖 2 项,国家自然科学二等奖 11 项,国家技术发明二等奖 2 项,未来科学大奖(物质科学奖)1 项,何梁何利基金科学与技术成就奖 2 项,何梁何利基金科学与技术进步奖 3 项,求是杰出科学家奖 1 项,求是杰出科技成就集体奖 1 项,中国科学院杰出科技成就奖 1 项;在该计划实施期间,专家指导委员会成员或项目承担人中有 7 人当选中国科学院院士。项目承担人中有 11 人获得国家杰出青年科学基金项目,17 人获得优秀青年科学基金项目,10 人成为创新研究群体项目学术带头人,6 人成为国家重大科研仪器研制项目(部门推荐)负责人,4 人成为“长江学者奖励计划”特聘教授,9 人成为国家“万人计划”科技创新领军人才,5 人成为“长江学者奖励计划”青年学者。组织国际会议 51 次,国内会议 42 次;在国际重要学术会议做特邀报告 463 次,在国内重要学术会议做特邀报告 206 次。

该计划实施中始终遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路,围绕物理与信息、化学和材料交叉领域的科学前沿开展创新性研究。通过加强顶层设计,不断凝练科学目标,积极促进学科交叉。围绕单量子态体系的构筑、单量子态特性及其精密探测、量子态与环境以及量子态之间的相互作用三个关键科学问题,开展了系统和深入的研究工作,在新现象新机理的发现、新技术新方法的发展、单量子态体系的纯化与构筑等方面取得重大进展,圆满完成了项目制定的研究计划,实现了预定的科学目标。项目实施以来,获得了一批原创性和集成创新性的成果,其中部分达到国际先进水平,填补了国内空白,提升了源头创新能力和基础研究水平。

2.1 单量子态新现象、新理论、新概念研究进展

通过发展分子束中 HD 分子的单量子态制备技术,结合理论预测和实验验证,发现新的量子分波共振态^[3-5]。针对单个中性分子的电致发光及其发光特性的控制问题,通过调控纳腔等离激元的共振模式,首次实现纳米分子结的电致“禁阻之光”^[6]。发展了光催化与扫描隧道显微镜相结合的实验技术,揭示了光催化分解水的微观机理^[7]。发展了铁基超导体密度泛函理论 LDA+Gutzwiller 方法,为高温铁基超导研究提供了理论计算方法^[8]。发现铁基超导体新的能隙结构^[9],挑战了铁基超导电子配对的主流理论,对于建立正确的理论具有重大的意义。利用自主研发的基于真空紫外激光同时具有自旋分辨和角分辨功能的光电子能谱系统,首次直接从实验上证实拓扑绝缘体自旋—轨道锁定现象^[10]。理论预言并首次实验观测到磁性拓扑绝缘体中的量子反常霍尔效应^[11,12](见图 1),打开了实现无磁场下量子霍尔效应的大门。基于第一性原理的路径积分分子动力学方法,揭示了水的核量子效应^[13],澄清了学术界长期争论的氢键的量子本质。在室温高纯金刚石 N—V 色心单电子自旋体系中首次观测到单电子反常退相干效应^[14]。

2.2 单量子态的新技术和新方法研究进展

发展了 STM 与拉曼光谱技术相结合的探针增强拉曼散射技术(TERS),在国际上首次实现亚纳米分辨的单分子拉曼成像^[15](见图 2),突破了光学成像手段中衍射极限的瓶颈,将具有化学识别能力的空间成像分辨率提高到一个纳米以下。基于国内自主研制的深紫外非线性晶体,研制出国际首台基于深紫外激光的自旋分辨角分辨光电子能谱系统,创造了自旋分辨光电子能谱仪能量分辨率的世界最高纪录。通过选取金刚石单自旋作为磁量子探针,利用自主发展的高阶动力学解耦实验技术,把探针灵敏度提高两个数量级,发展了自旋量子干涉仪的新颖探测方法,率先实现单分子磁共振探测^[16-20]。发展了超高分辨的分子束散射技术,使实验分辨率和灵敏度比传统分子束散射技术高两个数量级,达到国际上交叉分子束实验的最高能量分辨率,使实验探测和发现单量子分波共振态成为可能。发展了氧化物分子束外延生长与高分辨原位电子结构测量技术,提出基于单量子态量子效应的原型器件的可行方案。以上研究使我国在能谱和光谱研究实验技术方法方面进入了国际先进行列。

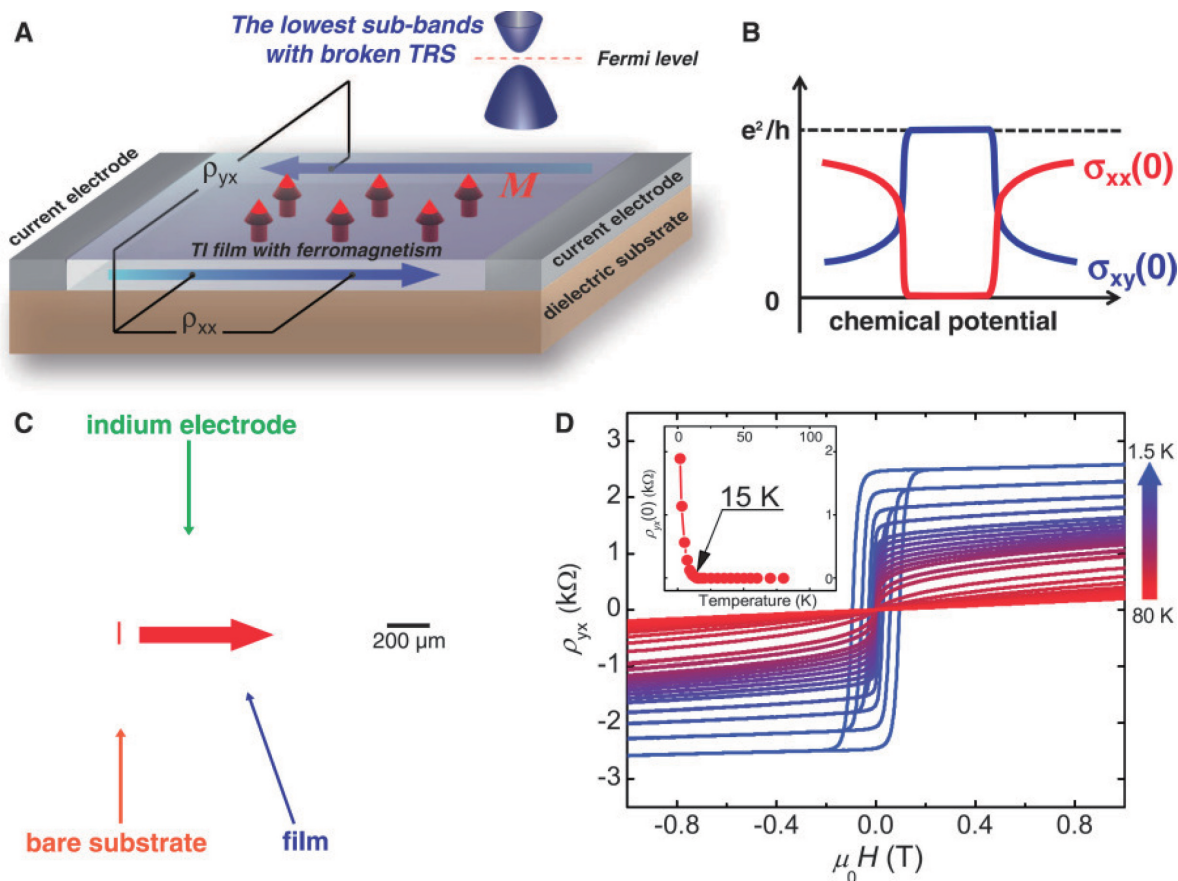


图 1 发现磁性拓扑绝缘体中的量子反常霍尔效应^[12]

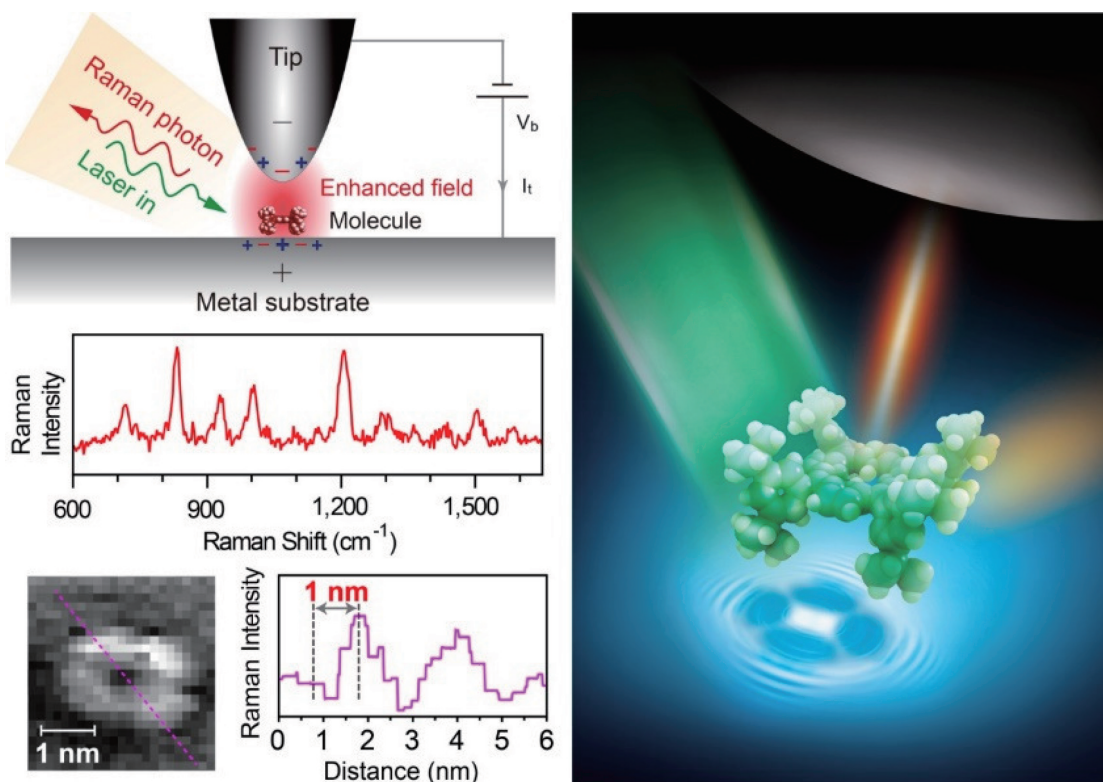


图 2 亚纳米分辨的单分子拉曼光谱成像^[15]

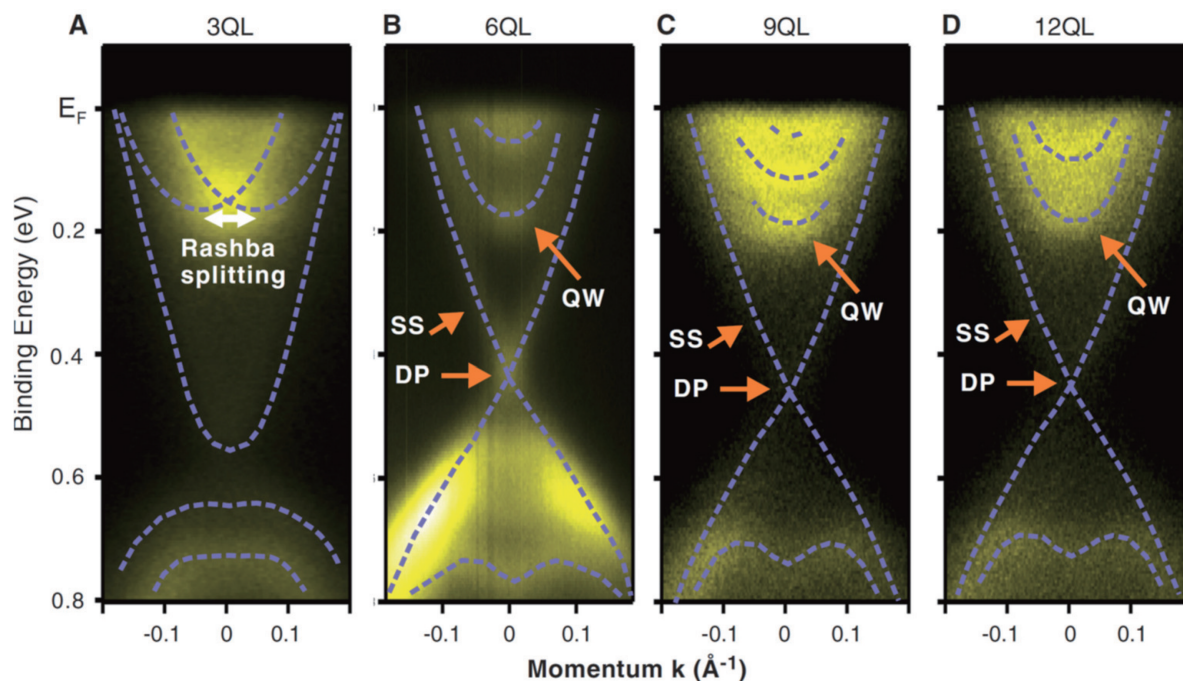


图3 发现拓扑绝缘体与超导态的共存^[21]

2.3 单量子态体系的纯化与构筑研究进展

利用分子束外延手段首次成功地在超导衬底上生长出界面原子级清晰且电接触非常好的拓扑绝缘体异质结构,实现了拓扑绝缘体与超导态的共存^[21],为探寻 Majorana 费米子提供了一个极具潜力的实验平台。研究了超导量子比特的高精度调控和退相干,通过利用几何相和动力学解耦延长了退相干时间,首次观测到几何相的量子干涉,实现了量子比特的探测和相干操作^[22]。针对强关联电子体系是否存在边缘态效应的问题,发现锰氧化物的铁磁金属边缘态及其超敏量子调控^[23, 24]。揭示了拓扑绝缘体的量子输运性质,在超薄拓扑绝缘体薄膜中首次明确观测到安德森局域化,并发现莫特变程跃迁的强局域输运行行为只在超薄膜中出现,间接证明了表面态电子的拓扑保护^[25]。运用基于金刚石压砧的高压低温综合实验技术,发现拓扑绝缘体在高压下的超导转变^[26]。理论预言了新的二元三维拓扑绝缘体,通过磁性分子合成了低维近藤晶格。研发出国际上首个铌酸锂基可扩展光量子芯片^[27],实现了单芯片纠缠光子的高效产出、高速电光调制及相应信息处理功能。利用量子相变确定性制备出高品质双数态,创造了当时确定性制备量子纠缠粒子数的世界纪录^[28]。

总之,该重大研究计划的实施在单量子态探测

及相互作用的关键基础科学问题方面取得了一批有国际影响的研究成果,实现了包括量子反常霍尔效应和铁基高温超导等的重大科学突破,发展了国际先进的精密测量方法和技术,使我国在单量子态研究方面整体走在国际前列。该计划凝聚了相关领域的科研人才,培养和造就了一批核心骨干和优秀学术团队,这为我国今后在量子科技革命的竞争中奠定了人才基础。该计划在研究队伍与人才培养方面获得了如下几个方面的成绩:

(1) 培养了一批优秀的学术带头人,形成了优秀的学术团队。在学术前沿领域做出在国际上有重大影响的工作,个别优秀人才获得了国家三大科技奖励,专家指导委员会成员或项目承担人中7人成为中国科学院院士,在资助的中青年学者中有部分杰出青年基金获得者、长江特聘教授和国家“万人计划”科技创新领军人才等(具体数据见前文所述)。

(2) 通过集成项目,突破了研究部门和研究方向的限制,形成了一批交叉学科的研究平台和有实质性合作的优势团队,协同攻关核心科学问题,促进了多学科交叉耦合,增强了跨学科方向的协同创新能力,支撑了我国单量子态探测及其相互作用研究的可持续发展。

(3) 该计划培养了大批研究生并输送到相关院校和科研单位,吸引了一批年轻学者加入相关领域

的研究,培养了一批有潜力的优秀青年学术骨干,为我国的单量子态探测及相互作用领域研究的可持续发展奠定了人才基础。

3 发展建议

总而言之,“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划充分发挥了基础研究的引领作用。自2009年该重大研究计划立项以来,我国科学家奋力拼搏,无论是在量子材料的可控制备、精密实验技术的发展、理论方法的拓展,还是重大科学问题的解决都取得了长足进步。在单量子态的研究中,我国在若干方向实现了引领,甚至主导了这些方向的发展。凝聚和培养了一批从事基础研究的科研人员和团队,扩大了重大研究计划的影响。根据重大研究计划的实施经验总结,我们提出下一步发展的建议如下:

(1) 长期重点支持实验技术和理论方法的发展,建立以技术指标和计算分析能力为主要目标的引导机制,引导实验技术和理论方法方面的研究,在以后的部署和实施中牢固树立“工欲善其事、必先利其器”的观念。

(2) 重视高质量量子材料的制备、精密加工、精密探测的相关技术、方法研究与设备的研发。支持若干以应用为目标的关键量子材料的研发项目,通过挑战性科学研究从根本上提高量子材料的制备和构筑水平,解决若干“卡脖子”的材料问题和技术问题。

(3) 针对相对明确的重大科学问题,进行后续高强度资助,进一步加强对量子材料和量子计算领域的资助,保持我国在该领域取得的优势,从政策和资金安排上做长期保障,建立不唯论文数量、不唯影响因子、不唯热点的科学评价体制。

(4) 通过机制体制创新,建立科学研究和人才培养共融的机制。如通过项目的执行和评估情况,建立推荐各种人才计划的通道,侧重扶持年轻人,提供宽松的、潜心研究的科研环境。

致谢 该重大研究计划实施9年过程中成果显著,特在此向所有对该计划做出贡献的参研人员表示衷心的感谢和最诚挚的敬意! 指导专家组、管理工作和秘书组在重大研究计划实施过程中付出了辛勤的工作,再次表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会数学物理科学部. “单量子态的探测及相互作用”重大研究计划实施规划书(内部报告).
- [2] 国家自然科学基金委员会数学物理科学部. “单量子态的探测及相互作用”重大研究计划总结报告、成果报告、战略研究报告(内部报告).
- [3] Dong WR, Xiao CL, Wang T, et al. Transition-state spectroscopy of partial wave resonances in the F+HD reaction. *Science*, 2010, 327(5972): 1501—1502.
- [4] Wang T, Chen J, Yang TG, et al. Dynamical resonances accessible only by reagent vibrational excitation in the F+HD → HF + D reaction. *Science*, 2013, 342(6165): 1499—1502.
- [5] Yang T, Chen J, Huang L, et al. Extremely short-lived reaction resonances in Cl+HD(v=1)→DCI+H due to chemical bond softening. *Science*, 2015, 347(6217): 60—63.
- [6] Dong ZC, Zhang XL, Gao HY, et al. Generation of molecular hot electroluminescence by resonant nanocavity plasmons. *Nature Photonics*, 2010, 4(1): 50—54.
- [7] Tan SJ, Feng H, Ji YF, et al. Observation of photocatalytic dissociation of water on terminal Ti sites of TiO₂(110)-1×1 surface. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(24): 9978—9985.
- [8] Wang GT, Qian Y, Xu G, et al. Gutzwiller density functional studies of FeAs-based superconductors: structure optimization and evidence for a three-dimensional Fermi surface. *Physical Review Letters*, 2010, 104(4): 047002.
- [9] Zhang Y, Yang LX, Xu M, et al. Matsunami M, Kimura S, Feng DL, Nodeless superconducting gap in A_xFe₂Se₂ (A = K, Cs) revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy. *Nature Materials*, 2011, 10(4): 273—277.
- [10] Xie ZJ, He SL, Chen CY, et al. Orbital-selective spin texture and its manipulation in a topological insulator. *Nature Communications*, 2014, 5: 3382.
- [11] Yu R, Zhang W, Zhang HJ, et al. Quantized anomalous Hall effect in magnetic topological insulators. *Science*, 2010, 329(5987): 61—64.
- [12] Chang CZ, Zhang JS, Feng X, et al. Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator. *Science*, 2013, 340(6129): 167—170.
- [13] Guo J, Lu JT, Feng YX, et al. Nuclear quantum effects of hydrogen bonds probed by tip-enhanced inelastic electron tunneling. *Science*, 2016, 352(6283): 321—325.

- [14] Huang P, Kong X, Zhao N, et al. Observation of an anomalous decoherence effect in a quantum bath at room temperature. *Nature Communications*, 2011, 2: 570.
- [15] Zhang R, Zhang Y, Dong ZC, et al. Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced Raman scattering. *Nature*, 2013, 498(7452): 82–86.
- [16] Staudacher T, Shi F, Pezzagna S, et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopy on a (5-nanometer)³ sample volume. *Science*, 2013, 339(6119): 561–563.
- [17] Mueller C, Kong X, Cai JM, et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopy with single spin sensitivity. *Nature Communications*, 2014, 5: 4703.
- [18] Shi FZ, Kong X, Wang PF, et al. Sensing and atomic-scale structure analysis of single nuclear spin clusters in diamond. *Nature Physics*, 2014, 10(1): 21–25.
- [19] Wang PF, Yuan ZH, Huang P, et al. High resolution vector microwave magnetometry based on solid-state spins in diamond. *Nature Communications*, 2015, 6: 6631.
- [20] Shi F, Zhang Q, Wang PF, et al. Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions. *Science*, 2015, 347(6226): 1135–1138.
- [21] Wang MX, Liu CH, Xu JP, et al. The coexistence of superconductivity and topological order in the Bi₂Se₃ thin films. *Science*, 2012, 336(6077): 52–55.
- [22] Tan XS, Zhang DW, Zhang ZT, et al. Demonstration of geometric Landau-Zener interferometry in a superconducting qubit. *Physical Review Letters*, 2014, 112(2): 027001.
- [23] Du K, Zhang K, Dong S, et al. Visualization of ferromagnetic metallic edge state in Manganite strips. *Nature Communications*, 2015, 6: 6179.
- [24] Zhang K, Du K, Liu H, et al. Manipulating electronic phase separation in strongly correlated oxides with an ordered array of antidots. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(31): 9558–9562.
- [25] Liao J, Ou YB, Feng X, et al. Observation of Anderson localization in ultrathin films of three-dimensional topological insulators. *Physical Review Letters*, 2015, 114(21): 216601.
- [26] Zhang JL, Zhang SJ, Weng HM, et al. Pressure-induced superconductivity in topological parent compound Bi₂Te₃. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(1): 24–28.
- [27] Jin H, Liu FM, Xu P, et al. On-chip generation and manipulation of entangled photons based on reconfigurable Lithium-Niobate waveguide circuits. *Physical Review Letters*, 2014, 113(10): 103601.
- [28] Luo XY, Zou YQ, Wu LN, et al. Deterministic entanglement generation from driving through quantum phase transitions. *Science*, 355(6325): 620–623.

Review of Major Research Plan on “Detection and Interaction of Single Quantum States”

Jiang Xiangwei¹ Ni Peigen¹ Dong Guoxuan¹ Xiang Tao² Sun Changpu³
Xue Qikun⁴ Li Jinzhu⁵ Zhang Huiqin³ Xie Sishen²

(1. *Department of Mathematical and Physical Sciences, National Science Foundation of China, Beijing 100085;*

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

3. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100193;

4. Tsinghua University, Beijing 100084; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In this paper, the background, scientific objectives, layout, implementation and academic management, as well as the overall outcome of the Major Research Plan “Single Quantum State Detection and its Interaction” are reviewed. The suggestions of future development in the relative fields are provided.

Key words Major Research Plan; single quantum state; single photon; single atom; single molecule; review