

量子系统的相干控制

1 研究背景及意义

（1）量子信息科学，包括量子通信、量子计算与模拟、量子精密测量等，已经成为物理学和信息科学最活跃的研究前沿之一。量子通信为迄今为止唯一被严格证明是无条件安全的通信方式，可以从根本上解决国防、金融、政务、商业等领域的信息安全问题。量子计算具有强大的并行计算和模拟能力，为人工智能、密码分析、气象预报、石油勘探、基因分析、药物设计等所需的大规模计算难题提供了解决方案，并可揭示量子相变、高温超导、量子霍尔效应等复杂物理机制。量子信息处理技术，还可实现对重力、时间、位置等的超高灵敏度量子精密测量，大幅度提升卫星导航、激光制导、潜艇定位、医学检测和引力波探测等的准确性和精度。

（2）由于量子信息科技的重要意义，国家高度重视该领域的发展。量子信息科技在确保信息安全、提高运算速度、提升测量精度等方面突破经典信息技术的瓶颈，为社会经济发展面临的若干重大问题提供了革命性的解决途径，极有可能成为保障国家战略安全和支撑国民经济可持续发展的重大技术创新。《国家中长期科技发展规划纲要（2006—2020）》将“量子调控研究”列入科技部4项“国家重大科学研究计划”之一，国家自然科学基金委也专门设立了“单量子态和精密测量”重大研究计划，中科院也实施了多个院知识创新工程重大项目 and 战略性先导科技专项。

（3）量子信息技术已成为我国极具特色的优势研究领域，特别是量子通信已成为我国为数不多的具有世界领先水平的尖端技术。近年来，中国科学技术大学相关团队的研究成果两次获得国家自然科学奖一等奖（2013和2015年），14次入选两院院士评选的年度“中国十大科技进展新闻”、3次入选 *Nature* 或 *Science* 杂志评选的年度“国际十大科技进展”、13次入选美国或英国物理学会评选的“国际物理学重大进展”。英国 *Nature* 杂志在专门报道中科大量子通信研究成果的长篇新闻特稿“数据隐形传输：量子太空竞赛”中指出：“在量子通信领域，中国用了不到10年的时间，由一个不起眼的国家发展成为现在的世界劲旅，将领先于欧洲和北美……”。英国著名科学杂志 *New Scientist* 则在报道中科大量子计算研究成果的特刊“中国崛起”中评论道：“中科大，因而也是整个中国，已经牢牢地在量子计算的世界地图上占据了一席之地”。

2 专项目标和主要工作内容

2.1 专项目标

专项的研究目标是：实现对量子比特的高精度制备和操控、高速传送以及有效探测，更多粒子的量子纠缠和更长的量子相干保持时间；实现12—18个量子比特的相干操纵；将发展起来的量子系统相干操纵技术应用于可扩展的量子通信、量子计算、量子模拟和量子精密测量等重要的研究方向；保持和扩大我国在量子科技领域

若干前沿研究方向的优势, 占领国际制高点。

2.2 专项主要工作内容

根据专项的核心科学技术问题, 设置“基于光与冷原子系统的量子物理与量子信息”“分子尺度体系的量子态及量子性质”“基于固态系统的量子物理和量子信息”3个项目, 每个项目下设若干研究课题, 大力发展可扩展的量子系统相干控制技术, 力争实现对量子比特的高精度制备和操控、高速传送以及有效探测, 更多粒子的量子纠缠和更长的量子相干保持时间, 将发展起来的量子系统相干操纵技术应用于可扩展的量子通信、量子计算、量子模拟、量子精密测量等重要的前沿研究方向。

(1) “基于光与冷原子系统的量子物理与量子信息”项目。研究课题包括: 高性能量子传输与量子探测、核心量子通信器件、多光子纠缠操纵、冷原子量子存储与量子模拟、基于半导体微纳结构的光学量子调控、光与冷原子量子信息与量子模拟理论研究。

(2) “分子尺度体系的量子态及量子性质”项目。研究课题包括: 分子体系的电子态和自旋态控制与输运性质研究、分子体系的光子态控制及量子相干行为研究、分子体系的量子设计与模拟。

(3) “基于固态系统的量子物理和量子信息”项目。研究课题包括: 半导体量子点的量子操纵及信息处理、集成光子量子处理器、基于固态节点的量子网络、基于自旋的固态量子计算研究。

3 专项实施情况综述

专项取得了一系列具有重要国际影响的创新研究成果, 在 *Nature* (4篇)、*Science* (3篇)、*Nature Physics* (7篇)、*Nature Photonics* (9篇)、*Nature Nanotechnology* (4篇)、*Physical Review Letters* (89篇)、*Nature Communications* (23篇) 和 *Journal of the American Chemical Society* (20篇) 等相关领域国际顶尖学术期刊上发表研究论文 160 余篇。

研究成果得到国内外同行的高度评价, 多次被选作“封面标题”论文或“编辑推荐”论文, 多次被 *Nature* 及其子刊、*Science*、美国物理学会、欧洲物理学会、*PhysOrg* 等国际知名学术期刊或学会新闻网站进行专题报道。“可扩展量子信息处理获重大突破”系列研究成果入选两院院士评选的 2012 年“中国十大科技进展新闻”; “实现百公里自由空间量子隐形传态和纠缠分发”的研究成果入选 *Nature* 杂志评选的 2012 年度“十大科技亮点” (*Features of the Year*); “在国际上首次实现了亚纳米分辨的单分子光学拉曼成像”的研究成果入选两院院士评选的 2013 年度“中国十大科技进展新闻”; “利用测量器件无关量子密钥分发解决量子黑客隐患”的研究成果入选美国物理学会评选的 2013 年度“国际物理学重大进展” (*Highlights of the Year*); “量子通信安全传输创世界纪录”的研究成果入选 2014 年“中国十大科技进展新闻”; “多自由度量子隐形传态”的研究成果入选欧洲物理学会新闻网站 *Physics World* 评选的 2015 年度“国际物理学领域的十项重大突破”并名列榜首 (*Breakthrough of the Year*); “多光子纠缠干涉度量学”的研究成果获 2015 年度国家自然科学奖一等奖。此外, 专项组成员 2012 年被国际最权威物理学综述杂志 *Reviews of Modern Physics* 邀请撰写有关多光子纠缠操纵和量子通信综述论文, 是中国大陆科学家首次在该刊发表实验综述论文。

本专项的系列研究成果为中科院战略性先导科技专项“量子科学实验卫星”和国家发改委量子保密通信“京沪干线”技术验证及应用示范项目等国家重大科研项目 and 重大任务的顺利实施提供了核心技术保障。

4 代表性创新成果

4.1 超冷原子量子模拟领域取得重大突破

中国科学技术大学和北京大学相关研究人员组成的联合团队在国际上首次理论提出并实验实现超冷原子二维自旋轨道耦合的人工合成, 测定了由自旋轨道耦合导

致的新奇拓扑量子物性。这一关键突破将对新奇拓扑量子物态的研究、进而推动人们对物质世界的深入理解带来重大影响。该合作成果以研究长文的形式发表在国际权威学术期刊 *Science* 上。由于该工作“对研究超越传统凝聚态物理的奇异现象具有重大潜力”，*Science* 在同期的观点栏目专门配发了评论文章。

4.2 单分子科学取得系列重大进展

中国科学技术大学单分子科学团队董振超研究组长期致力于发展将扫描隧道显微镜高分辨静态表征和光学技术高灵敏动态探测相结合的联用系统，极大地丰富了测量和调控手段，拓展了测量极限，为单分子物理化学研究提供了新的机会。近年来，他们在单分子电致发光与拉曼散射方面取得了一系列重大突破。2013 年，研究组在国际上首次实现了亚纳米分辨的单分子光学拉曼成像，该成果将具有化学识别能力的空间成像分辨率提高到 1 纳米以下，对了解微观世界，特别是微观催化反应机制、分子纳米器件的微观构造，以及包括 DNA 测序在内的高分辨生物分子成像，具有极其重要的科学意义和实用价值，也为研究单分子非线性光学和光化学过程开辟了新的途径。*Nature* 杂志的三位审稿人都对该工作给予了高度评价，世界著名纳米光子学专家 Atkin 教授和 Raschke 教授在同期杂志的“新闻与观点”栏目以“光学光谱探测挺进分子内部”为题撰文评述了这一研究成果。2015 年，该小组又在国际上首次展示了紧邻的不同分子的实空间拉曼光谱识别，*Nature Nanotechnology* 审稿者称赞“这是一项非常令人惊讶的前所未有的工作，它实现了分析化学领域的终极目标之一，即在分子分辨水平上实现不同分子及其化学状态的识别”。

2016 年，该小组在纳腔等离激元物理化学研究方面再获重大进展，他们利用纳腔等离激元增强的亚纳米空间分辨的电致发光技术，在国际上首次实现在单分子水平上对分子间偶极耦合的直接成像观察，从实空间上展示了分子间能量转移的相干特征。*Nature* 杂志的审稿

人认为，“这项工作开辟了研究分子间相互作用的新途径”“对于许多研究领域——从分子间相互作用的基础研究到捕光体系和量子光学等实际应用，都具有广泛的影响和重要的意义”。*Nature* 在同期发表的“新闻与观点”栏目中以“耦合分子的特写镜头”为题，对这一物理化学领域的重要进展进行了专门介绍和报道。

4.3 首次实现多自由度量子体系隐形传态

中国科学技术大学潘建伟院士及其同事陆朝阳、刘乃乐等组成的研究团队在国际上首次成功实现多自由度量子体系的隐形传态。*Nature* 杂志以封面标题的形式发表了这一研究成果，这是自 1997 年国际上首次实现单一自由度量子隐形传态以来，科学家们经过 18 年的努力在量子信息实验研究领域取得的又一重大突破，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。

Nature 杂志审稿人高度评价该工作：“绝对新颖、重要，处于当前量子光学和量子信息领域的最前沿，可以认为是一个伟大的成就”“在 1997 年单个自由度量子隐形传态实验实现的 18 年之后，这个工作从基本概念上将量子隐形传态提升到了一个新的水平”“非常有趣，意义重大，且具有极其苛刻的技术难度”。由于该成果的重要性，*Nature* 杂志专门邀请国际知名量子光学专家 Wolfgang Tittel 教授在同期的“新闻视角”栏目撰文评论：“该实验实现为理解和展示量子物理的一个最深远和最令人费解的预言迈出了重要的一步，并可以作为未来量子网络的一个强大的基本单元”。该论文发表后，第一时间受到了美国 *Science News* 和欧洲物理学会网站 *Physics World* 等多家国际媒体的报道，称“该工作不仅为提升量子力学基础问题的理解迈进了关键一步，也将在未来量子计算机的研制中扮演重要角色”。

4.4 室温大气下测得首个单分子顺磁共振谱

中国科学技术大学杜江峰院士领衔的研究团队将量子技术应用于单个蛋白分子研究，在室温大气条件下获得了世界上首张单蛋白质分子的磁共振谱。该研究不仅将磁共振技术的研究对象从数十亿个分子推进

到单个分子，并且“室温大气”这一宽松的实验环境为该技术未来在生命科学等领域的广泛应用提供了必要条件，使得高分辨率的纳米磁共振成像及诊断成为可能，有望实现从单分子的更深层次来探索生命和物质科学的机理，对于物理、生物、化学、材料等多个学科领域具有深远的意义。该成果在国际同领域引起了很大反响，得到美国化学会、德国马普所等广泛的新闻报道。*Science* 杂志将该工作选为当期亮点并配以专文报道，盛赞其“实现了一个崇高的目标”，评价“此工作是通往活体细胞中单蛋白质分子实时成像的里程碑”。此前，杜江峰团队在纳米尺度核磁共振技术、单核自旋磁共振谱学和成像方面取得的一系列重要进展为上述研究奠定了基础。

4.5 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

增加安全通信距离、提高安全成码率和提高现实系统的安全性是开发实用性量子密钥分发最重要的 3 个目标。潘建伟研究团队围绕上述 3 个目标开展原创性研究，取得了一系列国际领先的研究成果。

2013 年，研究团队在国际上首次实现测量设备无关的量子密钥分发，彻底解决了所有针对探测系统的黑客攻击。*PRL* 以新闻发布的形式向科技界新闻媒体重点推介了该工作，包括美国 *Science* 杂志、美国物理学会下属网站 *Physics* 和英国的著名新闻刊物 *The Economist* 在内的多家欧美科技新闻媒体都对此工作进行了专题报道。

2014 年，研究团队将测量设备无关的量子密钥分发安全通信距离拓展至 200 公里，并将成码率提高了 3 个数量级，创造了新的世界纪录。该工作被 *PRL* 审稿人评论为“实用量子密钥分发的重要里程碑”和“物理和技术上的重大进展”，被 *PRL* 选为“编辑推荐”文章，欧洲物理学会网站 *Physics World* 以“安全的量子通信传输到远距离”为题进行了报道。

2016 年，研究团队与清华大学、中科院上海微系统所、济南量子技术研究院等单位合作，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，极大地推动了兼顾安全和实用的远距离光纤量子通信的发展。该成果得到 *PRL* 审稿人的高度评价，称赞“该实验为量子密钥分发和量子通信最远传输记录”“是一个杰出的成就”“打破 BB84 协议下单光子源的传输终极极限”，成果被 *PRL* 选为“编辑推荐”文章，美国物理学会网站 *Physics* 对此项成果进行了报道。

4.6 实现百公里量级自由空间量子隐形传态与纠缠分发

中国科学技术大学潘建伟院士及其同事彭承志、陈宇翱等人，与中科院上海技术物理所王建宇、光电技术所黄永梅等人组成的联合研究团队，在国际上首次成功实现了百公里量级的自由空间量子隐形传态和纠缠分发，通过地基实验坚实地证明了实现基于卫星的全球量子通信网络的可行性。该成果以封面标题的形式发表在 *Nature* 杂志上。

欧洲物理学会新闻网站以“物理学家宣布新的量子态隐形传输记录”为题进行了特别报道。美国 *Science News* 杂志更以“量子隐形传输的巨大飞跃”为题进行了专题报道，文中写道“研究进展使得基于卫星覆盖全球的、实用化的远距离量子通信网络更为接近现实”“为基于卫星的量子通信、远距离的量子力学基本检验铺平了道路”。英国 *New Scientist* 杂志以“隐形传输记录触发全球保密量子网络”为题进行了报道。*Nature* 杂志几位审稿人对该成果给予了高度评价，称之为“来自于潘建伟小组的另一个英雄的实验工作”“有望成为远距离量子通信的里程碑”。*Nature* 杂志还在该论文发表前向各大科学新闻媒体发布了题为“通向全球化量子网络”的新闻稿，并同时在 *Nature* 杂志的当期封面上发布“量子隐形传态跨越了百公里鸿沟”的封面标题。

4.7 可扩展容错性量子计算的重大突破：在世界上首次实现拓扑量子纠错

中国科学技术大学潘建伟院士及其同事陈宇翱、刘乃乐等人组成的研究团队与澳大利亚和加拿大的研究人员

合作，将拓扑量子计算和量子纠错理论结合在一起，利用具有拓扑性质的八光子簇态，在世界上首次成功实现了拓扑量子纠错。该项研究成果以长文的形式发表在纪念“计算机之父”图灵诞辰100周年的 *Nature* 杂志上，这是量子信息领域以中国为第一单位发表在 *Nature* 杂志上的首篇长文。

对于该成果实现的目前所有已知的量子计算方案中拥有最高容错率的拓扑量子纠错方案的实验证明，*Nature* 杂志的几位审稿人给予了高度评价，称之为“非常重要的原理性实验，一个艰苦卓绝的英雄主义的量子光学实验”“实验的完成是完美而极具挑战性的”“对拓扑纠错这一当前量子信息处理最引人注目的范例中关键一环的实验验证”。为此，*Nature* 专门发布了“*Press Release*”，并邀请著名量子光学专家 James Franson 教授在“新闻视角”栏目撰文对这个工作进行了介绍。

5 结语

量子信息领域正在不断地形成新的科学前沿，激发革命性的科技创新，带来信息技术领域的飞跃发展。同时，量子信息领域中所取得的研究成果正越来越多地成为物质科学、能源科学、生命科学等领域技术创新的源泉。正如习近平总书记2013年7月在中科院考察工作时指出的：“科学家们开始调控量子世界，这将极大推动信息、能源、材料科学发展，带来新的产业革命”。

“量子系统的相干控制”B类战略性先导科技专项的实施，对于我国牢牢把握量子信息及相关前沿研究领域的发展方向、保持和增强量子技术和产品的先进性、有效应对国际竞争等方面，具有重大的现实意义和深远影响，也必将为我国综合科技实力提升、国民经济的发展和社会进步作出重要贡献。

（依托单位：中国科学技术大学）