

**墨子杰出博士后、中心优秀博士后暨
2014 年度中心杰出研究生奖获得者 简介**

量子信息与量子科技前沿协同创新中心

二〇一五年一月

墨子杰出博士后简介

汪涛，墨子杰出博士后 (Micius Research Fellow)，男，1986 年 12 月出生。2008 年 7 月于中国科学技术大学获学士学位，2014 年 10 月于中国科学院大学获博士学位，同年在中国科学技术大学开始进行博士后研究工作，从事态-态反应动力学的研究。曾获得中国科学院院长特别奖 (2014 年)、大连化物所-延长石油奖学金一等奖 (2014 年)、量子信息与量子科技前沿协同创新中心杰出研究生奖 (2013 年) 等奖励。已取得的主要研究成果如下。

1、分波共振态的观测。

分波是量子散射过程中具有特定总角动量的散射态。化学反应本质上是一个散射过程，可以看作一系列分波的总和。在过渡态区域，分波描述了反应体系的转动情况，包含了反应过渡态最细致的动力学信息。但是，在化学反应中由于能量展宽等原因，来自多个分波的贡献往往叠加在一起，即使完全量子态分辨的交叉束实验测量的微分截面也是不同分波叠加后的平均值，无法分辨单个分波的结构。张东辉研究员基于高精度势能面的量子动力学计算，从理论上提出，在较高的实验分辨率下，有可能在 $F+HD \rightarrow HF+D$ 反应的产物 $HF(v'=2)$ 的某些转动态布居随碰撞能变化的曲线中，观测到振荡结构。这一振荡结构的根源是该反应中的分波共振，可以作为检测势能面过渡态区域的准确程度的更精细的手段，此前还从来没有人曾在实验上明确地观测到化学反应的分波共振结构，这是非常具有吸引力的理论预言，同时在实验上也是很大的挑战。我们通过把两个分子束源同时冷却到液氮的温度下，使实验的能量分辨率到达了前所未有的水平，最终在转动态分辨的后向微分散射截面随碰撞能变化的曲线中观测到振荡结构，与理论预期几乎完全一致。这是首次在实验上直接观测到化学反应中的分波共振态，同时也证明了对于这一反应，理论计算所用的势能面具有极高的精度 [Science 327, 1501 (2010)]。

2、四原子反应动力学研究。

在分子反应动力学研究中， $\text{OH}+\text{H}_2\rightarrow\text{H}_2\text{O}+\text{H}$ 反应被认为是四原子反应的典型范例。我们在实验上测量了其同位素反应 $\text{OH}+\text{HD}\rightarrow\text{H}_2\text{O}+\text{D}$ 的微分散射截面以及后向微分截面随碰撞能变化的曲线，都与理论计算吻合。该项工作是分子反应动力学的一个重要里程碑，首次在四原子反应中，理论和实验的微分截面达到很好的符合，证明了这一体系量子散射计算已经能够精确地模拟四原子反应[**Science 333, 440 (2011)**]。

3、振动激发对化学反应的影响。

在许多重要的燃烧、大气、星际化学反应过程中，振动激发的反应物分子广泛存在并扮演了重要的角色。分子振动对化学反应有何影响的问题，一直以来受到人们的关注。在过去几十年中，氢分子参与的反应，例如 $\text{H}/\text{F}/\text{Cl}/\text{OH}+\text{H}_2$ ，在动力学领域被认为是基准的模型反应而被广泛研究。通过研究氢分子的振动激发对这些基准反应的影响，比较基态和激发态的氢分子在反应中的区别，将能够极大的加深我们对化学反应的理解。国际上有很多研究组曾尝试用拉曼激发的方法制备振动激发的氢分子，但激发效率很低，无法满足分子束实验的要求。通过调研，我们发现氢分子激发效率难以提高的根源在于，分子束中的氢分子具有极窄的拉曼谱线，而商业化激光器的波长稳定性不够、激光线宽过宽，在以往的拉曼激发中，只有极小一部分的激光是有效的。

汪涛等人负责研制了一套窄线宽（单纵模）、高脉冲能量的激光系统，能够产生 630 - 700nm 的单纵模脉冲激光，线宽小于 0.006 波数，中心波长的稳定性在 0.003 波数以内，单脉冲能量最高可达 60mJ。利用该激光系统，能够将 HD 分子高效地从基量子态($v=0, j=0$)激发至振动激发态($v=1, j=0$)，激发效率超过 90%，首次验证了美国斯坦福大学 Richard Zare 小组提出的相干拉曼激发方法，证实了相干拉曼激发理论的正确性及实验的可行性[*J. Phys. Chem. Lett.* 4, 368(2013)]。接下来，我们研究了振动激发的 HD 分子与 F 原子的反应动力学，发现有着相

同总能量、仅初始反应物量子态不同的体系有着完全不同的反应途径；这表明分子的振动激发不仅提供能量，也能开启新的反应通道，使我们能观察到在基态反应中所无法观察到的共振现象，并以第一作者身份发表于《科学》杂志[**Science 342, 1499 (2013)**]。在进一步的振动激发的 HD 分子与 Cl 原子的反应体系中，我们首次发现了这个体系中的反应共振态，进一步的分析表明，这个现象的产生是由于在振动激发的反应体系中，由于在反应过渡态化学键的软化作用，使得原本的势垒会变成势阱，能束缚住一些量子态，这也暗示着，在振动激发的反应体系中，量子共振将是一种很普遍的现象[**Science 347, 60 (2015)**]。

汪喜林，墨子杰出博士后（**Micius Research Fellow**），男，2006年6月于南京大学获学士学位，2011年12月于南开大学获博士学位，博士学位论文被评为南开大学和天津市优秀博士学位论文，同年在中国科学技术大学开始进行博士后研究工作，主要从事量子信息技术实验研究。曾获得教育部自然科学一等奖（2013年，第四完成人）、教育部博士研究生学术新人奖（2010年）、中国光学学会王大珩高校学生光学奖（2011年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下：

- 1、在国际上首次实现单光子多自由度量子隐形传态。

量子隐形传态是指将量子态由 A 地传输到 B 地而不需要传递量子态的载体本身，是量子信息最经典的方案之一，在量子通信和众多量子计算方案中发挥着关键作用，对其研究已经成为量子信息领域非常重要的课题。1997 年，科学家首次利用线性光学系统实验演示了量子隐形传态，引起了科学界的巨大轰动，文章发表至《自然》杂志，被评为“百年物理学 21 篇经典论文”。从此之后，众多科学家在诸如线性光学系统、冷原子、离子阱、超导线路、量子点和掺杂金刚石等多个量子系统中实现了量子隐形传态。然而，迄今为止，所有的实验演示均局限于单个自由度。众所周知，一个物体具有多个自由度，相应地，若要完整实现一

个物体的量子隐形传态，必须在多个自由度上展开相关研究。因此，实现多自由度量子隐形传态成为一个最基本的挑战。我们大胆迎接这一挑战，基于线性光学系统，选取极化和轨道角动量两个自由度为研究对象，搭建了 6 光子 11 比特实验平台，在国际上实现了单光子多自由度量子隐形传态，此项工作以第一作者身份被《自然》杂志接受[Nature, to appear (2015)]。由于该工作在量子信息和量子光学领域的重大意义，被审稿人称赞为“当前量子光学和量子信息领域最前沿的成果”、“从基本概念上将量子隐形传态提升到一个新的水平，必然会引起广泛关注，开创一个新的研究方向”。

2、系统研究矢量光场的生成及新效应。

在攻读博士学位期间，围绕矢量光场和光子轨道角动量，开展了系统研究，授权发明专利 1 项，发表 SCI 论文 16 篇（第一作者 5 篇），SCI 引用 310 余次，第一作者论文单篇最高引用 110 余次。在国际上首次理论预言并实验验证了一类新型光学轨道角动量，此项工作以第一作者身份发表于《物理学评论快报》[Phys. Rev. Lett. 105, 253602 (2010)]，获中国光学重要成果奖。该成果在光学轨道角动量与矢量光场两个重要领域建起了一座桥梁，打破了光偏振不能作用于各向同性材料的观念，激发了具有轨道角动量其它种类波的生成，有助于诸多光学系统功能的拓展和新奇的应用。

陈伟，墨子杰出博士后（Micius Research Fellow），男，1989 年 2 月出生。2009 年 7 月于中国科学技术大学获学士学位，2014 年 8 月于美国田纳西大学获博士学位，博士期间长期在美国哈佛大学和中国科学技术大学进行交流与合作研究。2014 年 8 月起在中国科学技术大学开始进行博士后研究工作，主要从事低维材料的生长及其功能性研究。曾获得田纳西大学 Chancellor's Honors（2014 年）学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

1、生长石墨烯单晶的理论研究。

在理论上解释了石墨烯生长中晶界的形成机制,并首次提出了有效消除晶界以生长大面积石墨烯单晶的动力学过程,此项工作以**第一作者身份**发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 109, 265507 (2012)**]。这一工作提出的想法随后在实验上被证明是非常有效的。

2、二硫化钼的功能性研究。

理论研究了单层二硫化钼与金属衬底界面的性质,提出了使用具有不同功函数的金属来调控二硫化钼的电学以及化学性质的有效方法,此项工作以**第一作者身份**发表于《纳米快报》[**Nano Lett. 13, 509 (2013)**]。这一工作为以低维材料为基础的纳米电子器件的设计提供了理论基础,对提高二硫化钼的催化效率,探索新型催化剂起到了指导性作用。

3、二维复合材料的理论研究。

与美国田纳西大学、中科院物理所、北京大学等研究机构的同行合作,理论与实验结合,揭示了弱的范德瓦尔斯力与强的界面化学键在决定生长过程中二维材料相对于衬底晶格的取向时所起的关键协同作用,此项工作以**共同第一作者身份**发表于《美国科学院院刊》[**Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 111, 16670 (2014)**]。这一工作提出了更强的界面相互作用反而导致更差的空间相对取向的一个违反直觉的例子,丰富了二维材料非平衡生长的基本概念,也有助于推进范德瓦尔斯异质结以及复合材料在未来器件中的应用。

4、低维材料的多层生长研究。

运用多尺度模拟方法研究低维材料的多层生长,理论上建议了生长大面积双层石墨烯的方法,并提出了“反 Ehrlich-Schwoebel 势垒效应”的概念,此项工作以**第一作者身份**发表于《物理评论 B》[**Phys. Rev. B (in press)**]。

逯鹤, 墨子杰出博士后 (Micius Research Fellow), 男, 1985 年 2

月出生。2007年7月于山东师范大学大学获学士学位，2013年6月于中国科学技术大学博士学位，主要从事基于线性光学的量子信息处理的实验研究。曾获得研究生国家奖学金（2012年）、中科院院长奖学金（2013年）等学术奖励。2013年7月进入中国科学技术大学从事博士后研究工作。主要从量子计算和量子模拟的实验研究。博士后进站以来作为项目负责人主持承担科研项目三项：国家自然科学基金青年基金，中国博士后面上基金和中国科学技术大学青年创新基金。主要负责完成以下工作。

1、在国际上首次完百公里量级量子隐形传态和量子纠缠分发。

量子通信被认为是世界上最安全的通信手段，而量子态隐形传输和纠缠分发，是实现远距离量子通信和分布式量子网络必不可少的环节。逯鹤与其合作者研发了一套高亮度的四光子纠缠源，亮度比之前提高了1个数量级，由此纠缠源在国际上首次实现了97公里量子隐形传态和纠缠分发，此项工作以共同第一作者身份发表于《自然》[**Nature 488, 185-188 (2012)**]。该成果一经发表，立即引起了学术界的广泛关注。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《科学新闻》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《新科学家》杂志以“隐形传输记录触发全球保密量子网络”为题进行了报导。《自然》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”。《自然》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《自然》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。

2、在国际上首次实现可容错薛定谔猫态。

薛定谔猫态是量子信息处理中具有重要作用的一类态。由于量子比特不可避免的与环境发生耦合，随着比特数目增加，薛定谔猫态纠缠品质会呈指数下降，这大大限制了薛定谔猫态在量子计算、量子精密测量等量子信息处理任务中的应用。逯鹤与合作者利用级联编码的方式，用两个光子比特编码一个逻辑比特，制备了一个三逻辑比特的级联猫态，通过实验观察级联猫态与普通猫态在不同噪声影响下各自的纠缠演化特性，演示了编码猫态在噪声影响下具有的显著优越性。由于其天然的高容错性，级联猫态可被广泛应用于大尺度的量子网络中，如三人密码协议，量子密钥共享等。同时，这种制备级联猫态的方法可扩展到任意比特数，甚至可能达到宏观级别，实现多年来的研究热点——宏观纠缠。此项工作以第一作者身份发表于《自然·光子学》[**Nature Photonics 8, 364-368 (2014)**]。

3、贝尔不等式的优化。

对于多体纠缠系统而言，寻找最优纠缠目击者或者贝尔不等式是判定纠缠的重要工作。一般来说，不等式违背越大，被认为可以更容易的判定纠缠。逯鹤及其合作者从统计角度出发，在考虑实验误差的情况下，在理论和实验两方面证明最优不等式并不是违背越大越好，需要考虑标准偏差。此项工作以实验方面第一作者身份发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 104, 210401 (2010)**]。

在此基础上，作为主要参与者参与了八光子薛定谔猫态实验制备[**Nature Photonics 6, 225-228 (2012)**]，欧美多家知名科技媒体，包括欧洲物理学会、美国麻省理工学院技术评论、美国物理学家组织、大众科学、英国 ZDNet 网站等分别对其进行了专题报道。

作为主要参与者参与了关联空间的一次性量子计算[**Nature Photonics, 5, 117-123 (2011)**]；可编程对易量子门的实验实现[**Phys. Rev. Lett. 105, 120402 (2010)**]；器件无关的量子纠缠验证[**Phys. Rev. Lett. 112, 140506 (2014)**]；图态的贝尔不等式验证[**Phys. Rev. A. 82, 042334 (2010)**]。

中心优秀博士后简介

李兆凯，中心优秀博士后（**QIQP Excellent Postdoctor**），男，1989年出生，2003年考入中国科学技术大学少年班，于2007年获学士学位，2014年在中国科学技术大学获博士学位，同年开始博士后研究工作，主要从事基于核自旋的量子计算与量子模拟实验研究。曾获得中科院朱李月华优秀博士奖学金（2012年），中科院院长优秀奖（2014年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

1、完成了 32 自旋量子多体系统的量子模拟。

现阶段量子计算与量子模拟研究的一个重要限制是实验室环境中比特数目的限制。李兆凯等成功实现了新型量子模拟技术，极大地减少了量子模拟中对量子比特数的要求。他们使用基于 5 个原子组成的核磁共振量子计算平台，成功研究了一个 32 粒子组成的微观系统的基本性质。这一压缩方法利用了原微观系统的特殊性质，消除了量子模拟过程中不必要的冗余计算量，使得所需的量子比特数进一步指数级地减少，从而在实验中成功实现。使用同样的手段，1000 个粒子的微观系统也仅需 10 个量子比特就可以进行研究，这表明研究特定微观系统的研究难度将极大地降低，为当前技术水平下实现对蛋白质，DNA 等大型分子的研究奠定了坚实的基础。此项工作以**第一作者身份**发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 112, 220501 (2014)**]，并被选为当期的编辑推荐(Editors' Suggestion)亮点文章。

2、完成了多项量子算法的实验工作。

这些成果均从实验上完成了不同的量子计算与量子模拟任务，验证了相应算法设计的准确性与可靠性，为量子信息的最终实用化积累了实验经验。如 (1)求解量子系统基态能级的实验工作，此项工作以**第一作者身份**发表于《科学报告》[**Scientific Reports 1, 88 (2011)**]。申请人将量子相位估计算法与经典算法结合，在核磁共振量子处理器上实验演示了基态问题的求解，验证了该算法的加速特性；(2)完成了求解线性方

程组的量子算法[Phys. Rev. A. 89, 022313(2014)], 利用量子计算机, 实现了对线性方程组求解这一过程的指数级加速。

陈耕, 中心优秀博士后 (QIQP Excellent Postdoctor), 男, 1983年6月出生。2005年7月于中国科学技术大学获学士学位, 2010年7月于该校获博士学位, 同年在该校开始进行博士后研究工作, 主要从事量子通信技术的实验研究。获得国家自然科学基金和中国博士后基金支持。已取得的主要研究成果如下。

1、在国际上首次实验验证了普适量子测量中的信息提取平衡关系。

量子测量中的不确定关系是整个量子力学最重要的基础之一。海森堡最初提出的不确定关系是基于量子测量精度和测量对系统带来的扰动这两个对立统一的物理量, 但是这个关系在2012年被证明是可以被违背的。我们证明的不确定关系是从信息论的角度出发, 考虑了测量获得的信息和测量后的系统可恢复性, 对于二维的系统, 这个不确定是第一个量子测量中的等式关系。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论 X》[Phys. Rev. X 4, 021043 (2014)]。

2、在国际上首次实验中发现了量子点中的极化子现象。固体中的激子和光学声子的耦合产生的准粒子被称为极化子 (polaron)。这种准粒子由固体物理学家提出后, 一直没有在实验上观察到。我们在研究半导体量子点的荧光性质时发现了反常的光谱移动, 经过进一步的实验验证可以确定为量子点中的 polaron 现象。本人完成了该工作的实验部分, 发表在 Europhys. Letters 90 37004(2010);

3、首次提出了用量子点实现超纠缠的实验方案。

用量子点实现纠缠光源是近些年来一个热点方向, 但是量子点中的精细结构劈裂引入的消相干, 是这个方向难以完全解决的一个关键问题。该方案反其道行之, 利用这种精细结构劈裂提出产生色纠缠和偏振纠缠

的超纠缠实验方案。此项工作以第一作者身份发表于《欧洲物理快报》**[Europhysics Letters 89, 44002 (2010)]**。

此外，在博后工作期间，本人参与了 973 项目中量子光源的制备工作，利用单个半导体量子点成功制备出高性能的高维单光子源和双光子源。利用该量子光源，课题组进行了一系列诸如普适量子测量中的信息提取平衡关系验证，量子惠勒延迟实验等有国际影响力的工作。本人还将相关实验技术总结，申请了相关专利[专利号:201310589730.5, 201310641893.3]。

徐凭，中心优秀博士后（**QIQP Excellent Postdoctor**），女，1987 年 7 月出生。2006 年 7 月于中国科学技术大学获学士学位，2012 年 7 月于中国科学技术大学博士毕业，同年在该校开始进行博士后研究工作，主要基于多光子量子纠缠展开实验研究并担任科学应用系统副主任设计师工作。已取得的主要研究成果如下。

在国际上首次实现了测量器件无关的量子纠缠验证。测量器件无关的量子纠缠验证（MDIEW）在不基于测量设备完美的前提下，能够给出了验证纠缠的方法。基于相应的理论工作，与合作者首次设计并完成了测量设备无关的量子纠缠验证实验，此项工作以第一作者身份发表于《物理评论快报》**[Phys. Rev. Lett. 112, 140506 (2014)]**，并获得编辑推荐(Editors' Suggestion)。该实验成功解决了量子纠缠验证中的探测隐患，从而极大地提高了量子纠缠验证的正确性，也是多光子纠缠技术的应用展示。是量子密码学技术在量子物理里面的一个重要应用，大大提高了实际系统中纠缠检验的正确性。

作为实验参与者参与了对任意噪声免疫的薛定谔猫态制备实验**[Nature Photonics 8, 364 (2014)]**。该实验采用光子级联编码的方式实现了对于任意噪声都具有高容错率的薛定谔猫态，朝着实现大尺度量子网络乃至宏观纠缠态迈出了重要一步。

此外作为主要参与者参与了一系列多光子纠缠实验工作,包括国际上首次实现了百公里量子隐形传态以及纠缠分发实验[Nature 488, 185 (2012)];首次成功实验制备了八光子薛定谔猫态[Nature Photonics 6, 225 (2012)];首次利用非团簇态实现了基于测量的量子计算[Nature Photonics 5, 117 (2011)];首次基于四光子六量子比特团簇态实现了量子受控非门[Phys. Rev. Lett. 104, 020501 (2010)];首次制备了超纠缠十量子比特薛定谔猫态[Nature Physics 6, 331 (2010)];首次基于四光子六量子比特图态实现了 Bell 不等式测量[Phys. Rev. A 82, 042334 (2010)]。这些成果被应用于对量子力学基本特性的验证,并且为量子计算以及量子通信提供了可实用化的技术手段。

李宏伟, 中心优秀博士后 (QIQP Excellent Postdoctor), 男, 1984 年 12 月生。2006 年 7 月于解放军信息工程大学获学士学位, 2012 年 11 月于中国科学技术大学获博士学位, 2013 年 3 月在该校开始进行博士后研究工作, 主要从事量子密码安全性分析和设备无关量子随机数研究。曾获得教育部技术发明一等奖 (个人排名第四)(2013), 中国科学院院长优秀奖(2013), 中国科学技术大学求是研究生奖(2012)等学术奖励, 2012 年受邀在中国密码年会做大会报告。共发表论文 40 余篇, 被引频次 290 余次。目前, 主持国家和省部级科研项目 5 项。已取得的主要研究成果包括如下。

- 1、在国际上首次提出半设备无关量子随机数方案并分析了其一系列基本性质。

基于量子维度目击不等式所表征的非局域性,首次提出了半设备无关随机数扩展方案,该方案的随机性仅依赖于设备的维度,而对量子态的具体制备和测量不作任何限制。同时首次证明了设备无关和半设备无关方案的等价特性,并分析了半设备无关方案中存在的有偏向随机数输出等一系列基本性质。以第一作者身份发表 3 篇论文 [Phys. Rev. A 84,

034301 (2011); Phys. Rev. A 85, 052308 (2012); Phys. Rev. A 87, 020302(R) (2013)], 以通讯作者发表 1 篇论文[Phys. Rev. A 90, 022322 (2014)]。

2、在国际上首次提出基于 CHSH 不等式的测量设备无关量子密钥分发方案。

我们首次提出了基于 CHSH 不等式的测量设备无关量子密钥分发方案，该方案的安全性仅依赖于量子态制备在 2 维的希尔伯特空间，且量子态制备和测量设备之间是独立的。该方案对测量设备无关协议的量子设备要求进行了最大程度的弱化，且实验上不存在探测器漏洞问题。以第一作者身份发表 1 篇论文 [Phys. Rev. A 89, 032302 (2014)]，以通讯作者发表 1 篇论文[Phys. Rev. A 90, 034302 (2014)]。

3、对量子密码协议和实际系统的安全性分析开展了一系列的工作。

在国际上首次提出了一类被动量子密码系统的攻击方案并实现了实验验证。实验实现了参考系无关量子密钥分配实验等。同时，分析了实际系统中的调相损耗、调相误差和密钥有限长等非理想参数对系统安全性的影响。以第一作者或者共同第一作者发表了 7 篇论文[Quantum Information & Computation, Vol. 10, No. 9-10 0771-0779 (2010); Vol. 11, No. 11-12 0937-0947(2011), Optics Communication 282 4162-4166 (2009); 284 889-892 (2011), Chin. Phys. B Vol. 20, No. 10 100306 (2011). Sci Sin-Phys Mech Astron, 42: 1237–1255 (2012), Scientific Reports 4 : 3617 (2014 共同第一作者)]。

研究成果获得了国内外学者的广泛关注和引用。同时，作为主要成员参与建设了国际首个量子政务网等项目，这些成果被应用于国内多个重要单位，提高了相关单位的信息安全技术保障能力。

杰出研究生奖获得者简介

李星星，男，1988年4月出生。2010年6月于中国科学技术大学获学士学位，之后留在该校继续攻读博士学位，研究方向为自旋电子学材料和太阳能利用材料的理论设计。曾获得硕士研究生国家奖学金（2012年）、郭永怀奖学金（2013年）、量子信息与量子科技前沿协同创新中心杰出研究生奖（2013年）、中国科学院朱李月华优秀博士生奖（2014年）、博士研究生国家奖学金（2014年）等学术奖励。取得的主要研究成果如下。

1、首次提出双极磁性半导体的概念。

自旋电子器件基于电子自旋进行信息的传递、处理与存储，具有目前传统半导体电子器件无法比拟的优势。如何实现用电场调控载流子自旋取向是一个关键性的科学问题。为解决此问题，我们在概念上提出了一种新型的自旋电子学材料，即双极磁性半导体，此项工作以**第一作者身份**发表在《纳米尺度》[**Nanoscale 4, 5680 (2012)**]。此类材料具有特殊的能带构造，通过它的电流不仅可以达到完全的自旋极化，而且载流子的自旋取向可以简单地通过加门电压的方法直接进行调制。基于这一概念，设计了多种双极磁性半导体体系，以**第一作者身份**发表在 **Phys. Chem. Chem. Phys. 15, 15793 (2013)**; **J. Mater. Chem. C 1, 7197 (2013)**; **J. Am. Chem. Soc. 136, 11065 (2014)**]; 以**第二作者身份**发表在 **Appl. Phys. Lett. 104, 172403 (2014)**。

2、半金属磁性材料的理论设计取得新进展。

半金属磁性材料由于可以提供完全自旋极化的载流子，被视为构建自旋电子器件的理想材料。为使自旋电子器件能在常温下工作，半金属磁性材料必须具有高于室温的铁磁居里温度、较宽的半金属能隙，以及显著的磁各向异性性能，至今人们还没有找到同时满足这些条件的磁性材料。我们基于 LaMnAsO 和 LaZnAsO 两种已经存在的物质，设计了一种新的层状合金材料 La(Mn_{0.5}Zn_{0.5})AsO。这是一种与传统“1111”型铁基

超导体同构的反铁磁半导体材料。通过在该材料的 $[\text{LaO}]^+$ 层进行电子掺杂 (H/F 替换 O^{2-} 元素)、或者空穴掺杂 ($\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$ 替换 La^{3+} 元素), 可以诱导该材料从反铁磁半导体转变成铁磁半金属。理论预测新材料的居里温度可达 600 K (50%浓度 H 掺杂) 与 475 K (25%浓度 Ca 掺杂), 半金属能隙可达 0.74 eV。同时, 该体系的准二维结构赋予材料极高的磁各向异性, 其理论预测值比目前已获得的半金属材料高一至两个数量级。这一工作为制备具有室温半金属磁性材料指出了明确的方向, 有望对自旋电子器件的研究与应用产生重要的影响。此项工作以第一作者身份发表于《美国化学会志》[*J. Am. Chem. Soc.* **136**, 5664 (2014)]。

3、提出光解水制氢的新机制。

用太阳光分解水制氢, 为人类提供清洁燃料, 被视为化学的圣杯。水分解是吸热反应, 传统理论要求光催化剂的能隙至少要大于反应吸热 (1.23eV), 因而占太阳光能量近一半的红外光无法被吸收用来分解水制氢。我们首次提出利用具有内禀电偶极矩的二维纳米催化剂, 可突破传统理论对催化剂能隙的限制, 用红外光也可以分解水产生氢气。这种催化剂存在偶极内电场, 吸附在催化剂两个表面上的水分子会感受到不同的静电势, 从而导致两个表面上水的氧化还原电势变得不再相同。如果氧化和还原分别发生在不同的表面, 催化剂受到的能隙限制原则上将不再存在。在这一新的光解水机制中, 不仅紫外光和可见光, 红外光也可以用来促使水分解产生氢气。另外, 这种催化剂的光激发是一个电荷转移过程, 电子和空穴分别产生在两个不同的表面, 催化剂固有偶极电场有效促进了光生电子空穴对的空间分离, 并做功帮助水分解产生氢气。基于这一机制, 我们设计了一种双层氮化硼纳米体系, 其两个表面分别用氢和氟修饰。理论计算与模拟表明这是一种有效的红外光催化分解水体系。这一工作大大扩展了太阳能转化为化学能中可利用的太阳光频谱范围, 有望对未来新能源技术的发展产生重要影响。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论快报》[*Phys. Rev. Lett.* **112**, 018301 (2014)]。

英国物理学会 (IOP) 的物理世界网站, 自然中国(Nature China), Motherboard, Dailyfusion, 光明日报, 科技日报等多家媒体都发专文对此成果进行了介绍和评价。

4、其他工作。

设计了一种基于 BN 纳米片的新型非金属可见光光解水催化剂, 以第一作者身份发表在《科学报道》杂志[**Sci Rep. 3, 1858 (2013)**]; 设计了一种二维铁磁半导体 CrXTe_3 ($\text{X} = \text{Si, Ge}$) 纳米片, 以第一作者身份发表在 **J. Mater. Chem. C 2, 7071 (2014)**。

秦维, 男, 1988 年 5 月出生。2011 年 7 月于中山大学物理科学与工程技术学院获学士学位。2011 年至今在中国科学技术大学硕博连读, 从 2012 年夏开始进入微尺度物质国家实验室进行研究工作, 主要从事低维量子体系的拓扑超导相变及奇异超顺磁现象的理论研究。曾获得研究生国家奖学金 (2012 年)。已取得的主要研究成果如下。

1、在理论上提出了通过磁性原子掺杂拓扑绝缘体和超导体界面以实现手征拓扑超导体的方案, 这一工作拓展了实验上观测马约拉纳费米子的材料体系, 从而为实现拓扑量子计算提供了新的可能的平台。此项工作以第一作者身份发表在《物理评论快报》杂志[**Phys. Rev. Lett. 113, 266806 (2014)**]。

2、受相关实验研究组的启发, 在理论上提出了一种核壳模型, 解释了在超顺磁纳米颗粒中观测到的奇异低温顺磁再入现象, 否定了之前提出的比较模糊的量子超顺磁概念。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论 B》[**Phys. Rev. B. 90, 224416 (2014)**]。

杨天罡, 男, 1986 年 12 月出生。2009 年 7 月于大连理工大学获学士学位, 2009 年底至今在大连化学物理研究所分子反应动力学国家重点实验室硕博连读进行研究工作, 主要从事态态分子反应动力学实验研

究。已取得的主要研究成果如下。

1、在国际上首次探测到 $\text{Cl}+\text{HD}(v=1)$ 体系存在共振现象，并发现此类共振广泛存在于化学反应中。

在 $\text{Cl}+\text{HD}$ 反应体系中，迄今为止还没有相关存在化学反应共振态的报导。我们延续之前的工作，用我们自制的拉曼振动激发激光系统结合高分辨的交叉分子束装置，研究了高效振动激发的 HD 分子和 Cl 原子的反应散射过程，在实验上首次探测到了 $\text{Cl}+\text{HD}(v=1)$ 体系存在共振现象，并与精确的量子动力学计算结果符合很好，理论进一步证实该反应共振态的存在，并指出由于反应物 HD 的振动激发，过渡态区域 $v_{\text{DCI}}=2$ 的绝热势能曲线明显被“软化”，使得该绝热势能曲线过渡态区域形成明显势阱。在反应进行中，主要是沿着该绝热势能曲线进行，因而该势阱中所产生的一些准束缚态，起着调控化学反应的进程的作用，因此该化学反应显现出明显的化学反应共振特征。此项工作以第一作者身份发表在《科学》杂志[**Science 347, 60 (2015)**]。

2、国际上首次实现 HD 分子 91% 的振动激发效率，首次实现 $\text{F}+\text{HD}(v=1)$ 交叉分子束实验研究。

在星际化学和大气化学中参与反应的分子不会单一的布居到振转基态，而是会有相当多的反应物分子处于振转激发态，研究振动激发态分子参与的化学反应动力学具有实际意义。要研究振动激发反应动力学，从实验上讲我们首先遇到的挑战就是如何高效制备处于特定振动激发态的氢分子。传统的红外单光子吸收和受激拉曼技术由于受到自发辐射效应和相干布居返回效应的限制，理论激发效率小于 50%，实际能达到的效率更低。我们使用自行搭建的一套窄线宽、高脉冲能量的激光系统，利用斯塔克诱导的绝热拉曼通道 (SARP, Stark-Induced Adiabatic Raman Passage) 技术，成功地将分子束中的 HD 分子从振动基态 ($v=0, J=0$) 转移至激发态 ($v=1, J=0$)，激发比例超过 90%，实验结果以第二作者身份发表于 *J. Phys. Chem. Lett.* 2013, 4, 368-371。以此为基础，随

后我们将振动激发的 HD 分子用于交叉分子束研究。在 F+HD($v=1$)反应体系中，我们实验上得到了全振转态分辨的态态微分散射截面，并观测到了一个只能由振动激发分子才能引起的反应共振。相关实验结果发表于《科学》杂志[**Science 342, 1499 (2013)**]

为了得到一个化学反应全部的动力学信息，更多我们以前研究过的基态反应需要更深一步的研究。例如我曾参与的四原子反应 OH+HD [Science. 333(6041):440-2(2011)] ， OH+D₂ [Faraday Discuss 157:101-11(2012)]，以及三原子反应 F+H₂ [J. Phys. Chem. Lett 5, 3049-3055 (2014)]等，目前正在进行激发态动力学的研究，相信进一步的工作可以丰富这些体系的动力学图像。

赵宋焘，男，1989年11月出生。2012年6月中国科学技术大学获学士学位，2012年至今在中国科学技术大学微尺度国家实验室硕博连读进行研究工作，主要从事功能材料理论设计与模拟方面的研究。曾获得研究生国家奖学金（2014年）等学术奖励。已取得的主要研究成果为：理论设计出了无需电子掺杂，具有本征二维电子气（2DEG）的复合材料。证明了单层 Ca₂N 材料的可剥离性和稳定性，二维 Ca₂N 的额外电子在实空间上会远离其阳离子骨架分布，表现出典型二维电子气的结构和性质特征；同时创新性地提出利用石墨烷对单层 Ca₂N 进行封装，设计出了稳定存在的二维电子气系统。此项工作以第一作者身份发表于《美国化学会志》[**JACS 136, 13313 (2014)**]。

季思聪，男，1989年5月出生。2009年6月于中国科学技术大学获学士学位，2009年至今在中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室量子物理与量子信息部进行研究工作，主要从事基于玻色体系的人造规范势和自旋轨道耦合的研究。曾获得国家奖学金（2014年）、中国科学院朱李月华优秀博士生奖（2014年）等学术奖励。已取得的

主要研究成果如下。

1、在国际上首次实验测量了自旋轨道耦合玻色气体有限温度情况下的相图。

凝聚态物理中存在很多复杂但却有趣的强关联多体相互作用体系，例如高温超导、分数量子霍尔效应等等，但很难理论上直接进行求解，妨碍了人们对这类物理问题的深入理解和应用。基于超冷原子的量子模拟通过人工合成等效的量子体系，利用易于观测的超冷原子在等效体系中的演化来模拟传统强关联体系中复杂的电子行为，为人类对某些重大凝聚态物理机制的理解开辟了捷径，在业内被认为是目前理解和解决诸多复杂物理系统和物理机理的最有力的手段。在潘建伟、陈帅教授的带领下，我们成功实现了玻色气体中的自旋轨道耦合，并准确观测到了自旋轨道耦合效应带来的 BEC 转变温度的影响。在此基础上，观测到了有限温度情况下磁性平面波相与非磁性条纹相的相变过程，并利用磁化率的统计分布确定了相变曲线，完整的描绘了自旋轨道耦合玻色气体的相图。此项工作以**第一作者身份和封面标题的形式**发表于《自然·物理学》[**Nature Physics 10, 314 (2014)**]，也标志着我国在冷原子量子模拟领域达到了新的高度。此文发表后在冷原子权威会议 ICAP 中得到业内专家的广泛关注和高度肯定。

2.完成了对自旋轨道耦合凝聚体的集体激发模式和激发态稳定性的测量。

集体激发模式的实验通过观测凝聚体在自旋轨道耦合条件下光阱中的振荡性质验证了自旋轨道耦合对光阱中的原子简谐运动的破坏，及 Kohn 定理的违背。并在实验上观测到了与原子团运动相伴的自旋分量的振荡，并与 sum-rule 理论相互印证，该成果以发表在《物理评论快报》上[**Phys. Rev. Lett. 109, 115301 (2012)**]。

激发态稳定性的实验研究中通过对缀饰态上一些亚稳态或者激发态的寿命测量，详细研究了其衰变行为。将原因归结为两个方面，

一是单粒子在非简谐势阱中的运动行为，第二是两体碰撞散射，并详细分析了不同情况下两种因素的主导地位。为一些理论构造自旋轨道耦合系统提供了实验依据，该成果发表在《物理评论 A》上[Phys. Rev. A, 97, 011601(R) (2013)]。

陈沛侃，男，1987年10月出生。2009年6月于中国科学技术大学获学士学位，2009年至今在中国科学技术大学微尺度物质国家实验室光与冷原子量子物理和量子信息研究部，硕博连读进行研究工作，主要从事多光子量子纠缠操纵及光量子计算的实验研究。曾获得求是研究生奖学金（2014年）、中国科学技术大学物理学院第四季研究生学术论坛报告一等奖（2013年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

在国际上首次实现 C-GHZ 态的制备。传统的 GHZ 态作为一种重要的纠缠态资源，在量子精密测量、容错量子计算和量子网络等领域扮演了不可或缺的角色；但由于在噪声环境中，纠缠度随着粒子数的增加呈指数衰减，大粒子数的 GHZ 态制备一直是一项挑战。2011年，Fröwis, F. 和 Dür, W 提出了 C-GHZ 态的概念。C-GHZ 态不仅继承了 GHZ 的优良特性，同时还具备更普适的抗噪声特性。我们首次在实验上制备了以六光子图态编码的三逻辑比特 C-GHZ 态，通过观察 C-GHZ 态在噪声环境中的演化，我们证明 C-GHZ 态确实比传统 GHZ 态能容忍更大的噪声。此项工作以并列第一作者身份发表于《自然·光子学》[**Nature Photonics 8, 364 (2014)**]。C-GHZ 态的成功制备使得宏观尺度下制备 GHZ 态成为可能，这在传统的 GHZ 态看来，几乎是不可能的任务；同时 C-GHZ 态也开辟了实现量子增强测量的一条新的道路，我们的方案也能应用于大尺度的、基于光纤的量子网络和多粒子的量子密钥分发方案中。

魏宇佳，女，1986年10月出生。2009年7月于福建师范大学获学

士学位，2009 年至今在中国科学技术大学微尺度物质国家实验室量子物理和量子信息部进行研究工作，主要从事基于自组装半导体量子点量子信息方面的实验研究。曾获得中国航天科技集团公司 CASCI 二等奖（2014 年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

首次系统地研究了温度对量子点相干性质的影响。发现量子点和环境声子相互作用导致拉比频率重整化，并且首次观测到量子点共振荧光线宽几乎不随着温度变化，此发现对于量子点在量子信息领域应用中的有着重要意义。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 113, 097401 (2014)**]。之后通过绝热快速通道的方法在量子点中实现了收集效率不受激发光功率影响的单光子源。用此方法产生的单光子二阶关联函数小于 0.3%，光子全同性优于 97.9%的，是到目前为止不可分辨性最好的单光子源。这种稳定的高品质的单光子可以用于产生多光子纠缠态，对实现线性光学量子计算提供了坚实的基础，此项工作以共同第一作者身份发表于《纳米快报》[**Nano Lett. 14 (11), 6515 (2014)**]。

汤艳琳，女，1987 年 6 月出生。2009 年 7 月于中国科学技术大学获学士学位，2009 年至今在中国科学技术大学微尺度物质科学国家实验室硕博连读进行研究工作，主要从事量子密钥分发安全性实验研究。曾获得 2013 年协同创新中心优秀研究生奖的二等奖和 2014 年求是奖等。已取得的主要研究成果如下。

1、国际上首次理论提出并实验演示了对相位非随机化量子密钥分发系统的攻击。

对量子密钥分发 (QKD) 系统的安全性研究一直是 QKD 工作的核心内容。QKD 现实系统如果不满足安全性假设就容易受到量子黑客攻击，主要包括对源和测量端的攻击。对于非单光子源的相位随机化安全性假设是否必要，一直没有明确的结论。我们基于一套典型的诱骗态

QKD 系统，利用其泄露的相位信息，理论研究了该系统的安全成码率上限在很大范围内都小于相位随机化后的成码率下限，并根据这理论方案，随后进行了相应的攻击演示，证明了利用相位信息可以成功攻击相位非随机化的诱骗态 QKD 系统。该工作证明了相位随机化在提取安全密钥过程中的重要性。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论 A》[**Phys. Rev. A 88, 022308 (2013)**]。

2、在国际上首次实现 200 公里的测量器件无关量子密钥分发实验。

量子黑客攻击主要集中在现实 QKD 系统的测量端，而 2012 年加拿大的 H. K. Lo 小组提出了测量器件无关的量子密钥分发协议，可以完美解决所有针对探测系统的攻击。2013 年，我们小组和加拿大的 Tittel 小组分别在国际上首次实验实现了测量器件无关的量子密钥分发，被美国物理学会《物理》杂志 (Physics) 选为 2013 年度国际物理学领域的十一项重大进展。然而这些前期实验结果的传输距离仅为 50 公里左右，严重限制了该技术在实用化广域量子通信网络中的应用。为了进一步验证该系统的实用前景，我们通过发展高速独立激光干涉技术，结合中科院上海微系统所自主研发的高效率、低噪声超导纳米线单光子探测器，将该协议的安全距离突破至 200 公里，并将成码率提高了 3 个数量级。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 113, 190501 (2014)**]，被审稿人评论为“实用量子密钥分发的重要里程碑 (a significant landmark for practical qkd)”和“物理和技术上的重大进展 (important achievement overall in the physics and technology)”，并被《物理评论快报》选为“编辑推荐 (Editors' Suggestion)”论文，欧洲物理学会下属网站《物理世界》(Physics World) 也以“安全的量子通信传输到远距离 (Secure quantum communications go the distance)”为题进行了报道。

袁骁，男，1990 年 9 月出生。2012 年 7 月于北京大学获学士学位，

2012 年至今在清华大学交叉信息研究院硕博连读进行研究工作，主要从事量子信息和量子密码的理论和实验研究。曾获得光华奖学金（2013, 2014 年）、百度奖学金（2013 年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

首次参与实现了测量设备纠缠验证的实验。测量设备无关的思想最初是在量子密码学里面提出来的。目的是为了解决关于测量设备的安全隐患。测量设备无关还可以应用到量子信息的其他领域，例如量子纠缠验证，量子私密分享，量子随机数产生等等。测量设备无关的量子纠缠验证（MDI-EW）提供了一种可信度更高的验证纠缠的方法，在不假设测量仪器的前提下，保证了纠缠验证的正确性。MDI-EW 方案需要精确地准备额外的两个辅助量子态，加上原有需要验证的量子态，在最简单的情况下，MDI-EW 的实验需要 6 光子态的操作，而这一点是有很高的技术要求的。我们设计了 MDI-EW 的实验方案，并完成了第一个 MDI-EW 的实验验证。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论快报》[Phys. Rev. Lett. 112, 140506(2014)]。由于实验难度大，用到 6 光子纠缠，而理论上首次解决了设备无关的纠缠验证方案，因此文章被选为编辑推荐。此工作对将来量子信息中的纠缠验证和测量设备无关实验都提供了理论和实验基础，具有很高的科研以及实用价值。此工作的后续工作发表与会议 PIERS Proceedings, 2014, 1730 – 1734，其中申请人为第一作者。对于以后的工作，首先可以对 MDI-EW 的方案进行改进，减少对辅助量子态的依赖；其次，可以把其思想应用到其他量子信息的领域，例如量子层析，量子私密分享，量子计算等等。另外，我们可以将设备无关（DI）的思想应用到量子信息中，例如设计 DI-EW，从而极大地减少实验堆装置的依赖程度。这对于将来量子信息技术的实现都是有极大帮助的。

孔熙，男，1989 年 3 月出生。2009 年 7 月于中国科学技术大学获

学士学位，2009 年至今在中国科学技术大学合肥微尺度物质科学实验室硕博连读进行研究工作，主要从事基于掺杂金刚石体系的氮-空位（以下简称为 NV）单电子自旋相关研究。在此期间致力于 NV 单自旋的光学探测磁共振量子调控及其在灵敏磁探测领域应用的实验研究，相关实验成果相继发表在 *Nature Physics* (1 篇), *Nature Communications* (2 篇), *Physical Review Letters* (1 篇) 等杂志上。作为骨干完成了国际一流技术水平的光学探测磁共振及弱磁探测实验平台的搭建工作，并实验实现了利用 NV 探针进行灵敏磁探测，为后续完成的 *Nature Physics*, *Nature Communications* 等多项高水平科研成果奠定了技术基础。曾获得国家奖学金（2013 年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

1、在国际上首次实现了单核自旋分辨率的核磁共振。

传统的自旋磁共振的测试对象受限于传统的探测方式是含有百亿个以上相同自旋的系综样品。在室温大气环境下，磁共振技术一直未能推进到纳米甚至原子尺度。我们选取了 NV 固态单自旋作为探针，基于此体系单自旋态制备成量子干涉仪，将微观自旋体系产生的弱磁信号转为干涉仪的相位，从而实现高灵敏度的信号检测，首次实现了体外单核自旋分辨率的核磁共振，此项工作以并列第一作者身份发表于《自然·通讯》 [*Nature Communications* **5**, 4703 (2014)]。在进行该实验期间还利用最优控制的方法实现了高精度的量子比特操控并发表在 [*New Journal of Physics* **16**, 093022 (2014)]。

2、观测量子热库的反常退相干效应。

由于环境会对量子系统发生耦合干扰，使得系统的相干性不可避免地流失。这一在量子信息处理极为重要的效应，被称为退相干。根据经典的噪声理论，噪声越强，系统的退相干越快。然而随着当代量子科学的发展，相对于中心自旋体系，外界环境的尺度已经越来越小。在这种情况下，必须要采用基于量子力学的模型来处理退相干效应。我们利用动力学解耦技术消除经典噪声，在金刚石 NV 体系中观测到反常的退相

干效应，此项工作以并列第一作者身份发表于《自然·通讯》[**Nature Communications 2, 570 (2011)**]。进一步的利用动力学去耦方法提高相位估计算法测量精度以及相干保持量子门的实验工作分别发表在[Euro. Phys. Lett 95 60005 (2011), Phys. Rev. Lett. 109, 070502 (2012)]。

3、探测单核自旋对及对其进行原子尺度的结构分析。

我们利用 NV 单电子自旋量子干涉仪探测微观单核自旋对体系产生的弱磁信号，以及使用多脉冲动力学解耦技术和外加磁场来有效抑制环境噪声，成功实现了室温大气环境下单核自旋对的探测及其原子尺度的结构分析，并以共同作者身份发表在《自然物理》杂志[Nature Physics, 10, 21-25 (2014)]。该工作表明动力学解耦技术结合单自旋探针是单分子结构解析和谱学分析的有力工具，可帮助我们在纳米甚至原子尺度获取物质组成和结构信息，为物理生物等各领域开展微观研究提供新的方法。

罗智煌，男，1986年1月出生。2010年7月于安徽大学获学士学位，2010年至今在中国科学技术大学近代物理系自旋磁共振实验室硕博连读进行研究工作，主要从事基于核磁共振体系的拓扑相和拓扑量子相变的实验研究。已取得的主要研究成果如下。

在国际上首次实现不同拓扑序间的绝热跃迁实验。强关联体系中存在一种不能由朗道对称破缺理论描述的奇特的物质序，即拓扑序。这种序具有一些有趣的性质，如具有保护性的基态简并度，准粒子分数统计和拓扑纠缠熵等。拓扑序不但在凝聚态物理中具有重要意义，而且有可能在容错量子计算方面提供潜在的应用。然而，除了分数量子霍尔效应外，在其他体系下实验观测依然是件艰难的任务。我们首次在核磁共振体系上模拟 Wen-plaquette 自旋晶格模型，并且利用具有规范不变性的非局域的 Wilson loop 算符实验探测两种不同拓扑序间的绝热跃迁。另外，我们也通过态重构技术测量了拓扑序的纠缠性质。该工作不仅为

进一步研究更复杂的量子系统提供了实验工具,同时也验证了绝热制备拓扑序的可行性,为下一步构建拓扑量子存储做好了准备。该项工作以学生第一作者身份发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 113, 080404 (2014)**], 并获得了国内外学术同行的高度评价。审稿人认为“这是在最小量子系统尺寸下的有趣的和令人兴奋的第一次演示实验”,“该工作在量子模拟一类当前有着广泛兴趣的拓扑系统的发展上呈现出新的重要一步”,“将会引起研究量子模拟和实现拓扑量子态的人们的广泛兴趣”。

孙凯, 男, 1988 年 11 月出生。2012 年 7 月于中国科学技术大学获学士学位, 2012 年至今在中国科学技术大学中科院量子信息重点实验室硕博连读进行研究工作, 主要从事基于光学系统的量子信息和量子模拟的研究。曾获得优秀博士生国家奖学金(2014 年)和航天科工一等奖学金 (CACSI) (2014)等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

1、在国际上首次逻辑严谨地实验实现了 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 操控。

在量子纠缠现象中, EPR 操控是介于纠缠和 Bell 非局域性之间的一种新的概念, 它丰富了量子非局域性的内容。实现 EPR 操控比实现量子纠缠更为困难, 但比违背 Bell 不等式容易。EPR 操控为量子信息的处理以及实现量子操控提供了新的方法和思路。在实验上, 我们基于 All-Versus-Nothing 判据, 并考虑到实验误差后对此判据进行了补充完善, 利用纠缠光逻辑严谨地实现了 EPR 操控。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 113, 140402 (2014)**], 并以新闻特写的形式被报道在物理网站上(phys.org)。

2、利用光学量子模拟器模拟了 Landau-Zener 模型并验证了 Kibble-Zuruk 机制。

Landau-Zener 模型和 Kibble-Zuruk 机制均是描述物理相变的理论, 前者描述了二能级系统中一种最简单的含时相变过程, 后者是用于解

释宇宙大爆炸模型中非平衡相变后形成拓扑缺陷的理论模型。在实验中，基于 Mach-Zender 干涉仪，我们构建了一种简易的光学量子模拟器单元，将九个模拟器单元串联起来组成了一个较为复杂的量子模拟器，并且达到了很高的保真度。利用这种模拟器我们模拟了 Landau-Zener 模型的动力学演化过程，并且验证了 Kibble-Zuruk 机制的正确性。相关实验结果发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett. 112, 035701 (2014)**]。审稿人认为此量子模拟器“具有极高的干涉可见度”，给出的实验结果“以令人惊讶的精度与理论结果一致”，并且认为“他们的工作会激发量子光学领域对非平衡量子相变动力学的兴趣”。该成果在发表之前提交在了学术网站 [arxiv.org\(arXiv:1301.2752\)](https://arxiv.org/abs/1301.2752)，不久即被 Zurek 引用在庆祝 T. W. B. Kibble 八十寿辰的综述性文章中 ([arXiv:1310.1600](https://arxiv.org/abs/1310.1600))并被给予了积极评价。

3、在缺乏系统和环境之间反馈的条件下，国际上首次实验实现了量子关联的恢复。

量子关联是量子信息的重要研究内容。研究表明，由于量子比特与其所在的非马尔可夫量子环境存在着反馈作用，其量子关联性可以恢复，这是量子系统的特点。但在经典环境中，即普通的马尔可夫环境，量子关联与经典噪声不存在反馈效应，量子关联会渐渐消失，即消相干。我们在实验上首次证明即使在缺乏系统与经典环境之间反馈的条件下，量子关联也可以恢复。这为量子系统中环境与系统所扮演的角色提出了新的观点和认识。相关成果发表于《自然·通讯》[**Nature Communications 4, 2851 (2013)**]。

4、利用白光进行弱测量实现了对相位的精密估计。

随着对弱测量的深入研究，人们开始将其应用于量子精密测量中并取得了丰硕的成果。我们在实验中使用白光这一经典的热光场，经过测量虚部的弱值对量子相位进行了精密的估计，并将精度提高的阿秒量级。该成果发表于《物理评论快报》[**Phys. Rev. Lett., 111, 033604 (2013)**]。

此方法不同于传统的干涉测量法，也不同于用量子光源的相位测量法，它利用实参数空间的微小扰动会引起共轭空间巨大变化这一基本物理规律，将实参数空间的微小物理效应放大到对应的共轭空间中，再对放大的虚部弱值进行测量，从而实现对微小变量的精密测量。该方法成本低廉，为量子技术的实用化奠定了基础。

周经纬，男，1988年6月出生。2010年7月于中国科学技术大学获学士学位，2010年至今在中国科学技术大学微尺度国家实验室硕博连读进行研究工作，主要从事基于固态自旋的量子信息处理的实验研究。曾获得国家奖学金（2014年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

1、在国际上首次实现了由 Landau-Zener 隧穿形成的 Rabi 振荡。

Landau-Zener 隧穿和拉比振荡都是两能级系统最基础的量子现象。理论研究表明，多次 Landau-Zener 隧穿可以形成拉比振荡。国际上的研究小组分别在量子点体系、超导比特、cooper-pair boxes 等中观测到了多次 LZ 隧穿并形成干涉条纹，但是由于这些物理体系中存在较强的退相干，上述拉比振荡从未在实验上直接观测到。2011年我们在金刚石氮—空穴体系中，实现了单电子体系 Landau-Zener 隧穿 [Phys. Rev. X, 1, 011003 (2011)]。之后利用同位素富集的样品和快速微波调制技术，成功地在实验上实现了由 Landau-Zener 隧穿形成的拉比振荡。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论快报》[Phys. Rev. Lett. 112, 010503 (2014)]。区别于传统的弱场（固定频率）驱动的拉比振荡，我们通过快速调制频率的微波场来操纵电子自旋，实现了单个电子自旋的 LZ 隧穿。进一步的，我们通过理论计算与实验观测发现，这种新型的拉比振荡可以有效抑制驱动场引入的噪声，从而为实现精密操控提供了一种新颖的手段。上述实验结果对于研究 LZ 隧穿和拉比振荡的相关物理现象提供了重要的实验依据。

2、完成了基于耦合力学振子的精密位移测量。

将金刚石 NV 色心自旋与纳米机械振子耦合，从而实现远距离 NV 之间的纠缠，是实现可扩展的固态自旋量子计算的潜在途径之一。这方向研究的首要一步是要实现对微观机械振子本身运动状态的精确测量。最近我们提出并实验演示了一种全新的灵敏位移测量手段，利用自建的弱力探测实验平台，室温下成功实现了现有手段无法直接探测的纳米机械振子运动状态的测量。该方法为针对如何降低位移探测引入的额外力噪声，以及如何探测纳米尺度的机械系统的振动这两个当前力探测领域的关键问题，提出了一条全新的解决思路。该实验工作发表在《物理评论快报》杂志[**Phys. Rev. Lett. 110, 227202 (2013)**]。

丁冬生，男，1987 年 2 月出生。2010 年 7 月于安徽师范大学获学士学位，2010 年至今在中国科学技术大学中科院量子信息重点实验室硕博连读进行研究工作，主要从事基于原子系统的高维量子信息的实验研究。曾获得三星奖学金（2012 年）、博士生学术新人奖（2012 年）、国家奖学金（2013 年）、王大珩光学学生奖（2013 年）、量子信息与量子科技前沿协同创新中心杰出研究生奖（2013 年）、中科院院长特别奖（2014 年）等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

1、在国际上首次实现单光子图像的量子存储实验。

存储携带高维信息的光子可以有效地提高光子携带的信息量和网络的通信容量，到目前为止存储携带高维信息的单光子一直都没有实现。基于我们的物理体系，我们利用原子系综并在具有空间结构的光脉冲存储方面所取得系列进展，此项工作以第一作者身份发表于《物理评论 A》[**Phys. Rev. A. 87, 013835 (2013)**; **Phys. Rev. A. 87, 013845 (2013)**; **Phys. Rev. A. 87, 053830 (2013)**]。基于这些进展，我们利用一个原子系综产生标记单光子源并编码图像，利用另外一个原子系综存储单光子，首次实现携带图像的单光子的量子存储。此项工作以第一作者身份发表于《自

然·通讯》[**Nature Communications 4, 2527 (2013)**], 并得到审稿人的高度评价:“这是一项令人印象非常深刻的工作, 它为快速发展的量子存储研究制定了一个非常高的标准。事实上作者可以将这项工作分成两篇论文, 但作者将这项工作中所展示的单光子的产生、存储、释放及轨道角动量的操控等方面的技术能力结合在一起, 代表了量子技术发展中一个令人激动的分水岭。这项工作将在量子信息和量子原子光学领域产生重大影响, 也应该是其它物理领域读者非常感兴趣的工作。因而我非常高兴地推荐它的发表, 并且期待作者做出更多的工作。”在此文章发表之前我们该研究成果在正式发表前曾提交到学术网站 **arxiv**, 立刻引起人们的广泛关注 (**arxiv: 1305:2675**): MIT 的 **TechnologyReview** 网站以“第一个存储单光子形状的量子存储器在中国揭开面纱”为题进行了积极评价, 副标题为:“世界上第一个可以存储单光子空间结构的量子存储器在中国诞生”。随后多家网站进行了转载和评述。同时这项工作被 **Nature Photonics** 以标题“**Spatial memory**”作为 **research highlights** 重点推荐。

2、在国际上首次实现轨道角动量纠缠的存储实验。

轨道角动量光又称为涡旋光, 因为这种光模式可以实现高维通讯。若将这种光学模式应用于量子通讯领域, 可以实现高维的量子通讯网络, 明显增加量子通讯速率。在实验中, 我们利用一团原子系综实现轨道角动量纠缠的制备, 再用另外一团原子实现纠缠的存储。实验结果以第一作者身份被 **Physical Review Letters** 接受。我们首次实现了轨道角动量纠缠的存储, 为以后高维量子网络奠定了基础。此外我们在单光子的高维态也做了相关的工作, 此项工作以第一作者身份发表于《物理评论 A》[**Phys. Rev. A 90, 042301 (2014)**]。

3、在国际上首次实现铷原子上转换探测器。

目前用于探测红外波段的红外敏感探测器价格昂贵, 探测效率低。而红外探测又在生物探测, 夜视, 化学成像等领域都具有很大的应用。不管从科研的角度还是从以后的市场需求, 探索红外敏感探测器都具有

很大的研究意义。我们基于简易的铷原子蒸汽池，实验上首次实现了上转换的铷探测器，把红外波段的图像成功地转换到了可见波段，并用可见光探测器探测。此项工作以第一作者身份发表于《物理评论 A》[**Phys. Rev. A. 86, 033803 (2012)**]，文章在发表之前曾提交到学术网站 arxiv，立刻引起人们的广泛关注 (arxiv: 1203.6132)：MIT 的 TechnologyReview 网站以“直接把红外光转成可见光的铷探测器”为题进行了积极评价。此后还利用这样的转换系统做出一系列的工作 Phys. Rev. A. 85, 053815 (2012). Optics Letter 37, 3270 (2012). Journal of Modern Optics 59, 1768-1771 (2012)。

马稳龙，男，1990 年 10 月出生。2010 年 7 月于北京科技大学获理学学士学位，2010 年至今在中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室硕博连读进行研究工作，主要从事固态量子计算和低维量子结构物理的理论研究。期间分别于 2012 年 8 月至 10 月、2013 年 1 月至 5 月、2013 年 9 月至 2014 年 3 月应邀到香港中文大学访问。曾获得中科院半导体所所长奖学金（2013 年）、量子协同创新中心优秀研究生一等奖（2013 年）。已取得的主要科研成果如下。

1、在理论上首次提出利用自旋比特退相干来探测核自旋体系的多体关联。

量子计算的核心是利用量子力学中的相干性，而量子比特与环境的耦合导致的退相干是实现量子计算的主要阻碍之一。但是近些年的研究发现，量子比特的退相干过程包含了环境中的重要信息，因此可以作为一种探测环境性质的有效手段。在此基础上，我们与香港中文大学刘仁保教授合作，在理论上首次提出利用自旋比特的退相干来探测纳米核自旋体系的多体关联，并被英国伦敦大学 John. J. L. Morton 教授的实验组在 Si:P 系统中验证，此项工作以第一作者身份发表于《自然·通讯》[**Nature Communications 5, 4822 (2014)**]。这一重要发现不仅是自旋退

相干理论研究的一个突破进展,而且为探测纳米尺度体系中的多体过程提供了一种可能方案,并可能在鉴定分子结构和固体缺陷性质方面获得重要的应用。

2、在理论上发现电场调控石墨烯量子点的电子结构和磁性的显著效应。

石墨烯量子点是近年来被广泛研究的新型半导体量子点,由于石墨烯的弱自旋轨道耦合和低核自旋浓度,使得石墨烯量子点的电子相干时间较长,在未来的量子计算中有广泛的应用前景。我们主要研究了外场对石墨烯量子点电子结构和磁性的调控,发现了两个显著的效应:(1)我们利用平均场近似下的 Hubbard 模型研究了电场对三角形 zigzag 边界的石墨烯量子点中磁性的影响,发现了石墨烯量子点的磁矩可以通过外加电场精确调控,此项工作以第一作者身份发表于《物理评论 B》[Phys. Rev. B 86, 045449 (2012)];(2)我们从理论上证明石墨烯量子点中的带隙可以通过对量子点的不同部分施加相反电势能来调节,此项工作以第一作者身份发表于《应用物理快报》[Appl. Phys. Lett. 100, 163109 (2012)]。我们的理论发现对于石墨烯量子点在量子计算、电子器件和光电器件的应用上有一定价值。

白帅,男,1987年5月出生。2010年6月于郑州大学获学士学位,2010年至今在中科院上海技术物理研究所第二研究室量子通信课题组进行研究工作,主要从事空间机动平台下的二维光电转台捕获与跟踪技术研究。曾获得上海技术物理研究所研究生奖学金一等奖(2014年)等学术奖励。已取得的主要研究成果如下。

首次提出了利用 ATP 终端的跟踪数据进行外推预测的重捕获方法。利用改进的有限记忆滤波器对 ATP 跟踪数据进行预测,并在实验室内完成模拟捕获实验,在 5s 内的预测精度优于 0.1° ,此方法对于星地量子通信及激光通信链路在中断后的快速恢复有着重要意义。此项工作以

第一作者身份发表于《光学快报》[**Opt. Express 22, 22 (2014)**]。参与 XX-2 星地量子通信星载 ATP 终端的研制, 并发现利用质心和角度数据对捕获系统的速度进行约束, 可以有效提高扫描捕获在弱光条件下的鲁棒性。设计了旋转变压器精度测试平台和粗跟踪动态性能测试平台, 并以第一或第二发明人身份申请发明专利三项, 实用新型专利一项。