

1. 墨子巡天望远镜启用：全球光学时域巡测能力最强望远镜研制成功并投入天文观测

2023年12月26日，人民日报发布《这一年，我们的重大科技成就》。我校主导的研究成果“墨子巡天望远镜正式投入观测”入选国内2023年度重大科技成就。

墨子巡天望远镜是我校“双一流”学科平台建设项目。望远镜口径2.5米，采用国际先进的主焦光学系统设计和主镜主动光学矫正技术，具备大视场、高像质、高通光效率和宽波段等特点，安装在海拔4200米冷湖赛什腾山优良天文台址，能够每三个晚上巡测整个北天球一次，为目前世界光学时域巡天能力最强设备。

2023年9月17日，“墨子巡天望远镜首光仪式暨科学战略研讨会”在青海省海西州冷湖天文观测基地举行，中国科学院副院长、党组成员常进院士，中国科大校长包信和院士，上海交通大学景益鹏院士，海西州副州长张银廷，深空探测实验室常务副理事长吴艳华，中国科学院力学研究所所长罗喜胜、中国科学院紫金山天文台副台长吴雪峰等共同见证了墨子巡天望远镜首光照片发布。会议还围绕望远镜未来使用和如何加快实现天文领域更多原创突破等展开战略研讨。来自相关单位负责人与专家约100余人出席并参加了活动。中央广播电视总台《新闻联播》、《人民日报》等主流媒体和《自然》杂志等国内外媒体和期刊对墨子巡天望远镜强大的巡天能力进行了报道。

墨子巡天望远镜的制造过程中，中国科学技术大学、中国科学院紫金山天文台和中国科学院光电技术研究所等项目团队克服了新冠疫情、我校合肥微尺度物质科学国家研究中心被列入美国实体清单和青海冷湖台址海拔高等不利因素影响，集结优势力量，在大靶面主焦相机研制、数据处理分析管线开发、望远镜观测控制系统和圆顶建模仿真设计等方面突破了多项技术瓶颈：如攻克了2.5米大口径薄镜面主动光学技术，通过采用主动准直技术和主镜面形主动矫正技术，实现了主焦装置轴向定位误差在2微米以内，对主镜重力形变和热形变实时矫正，波前误差控制在6纳米以内；相当于一个标准足球场大的平面，起伏不超过1根头发丝的直径。自主完成国内首个大视场拼接CCD相机研制，成像靶面直径达到325毫米，像元数达到7.65亿，像面拼接平整度达到18微米，同时焦面还拼

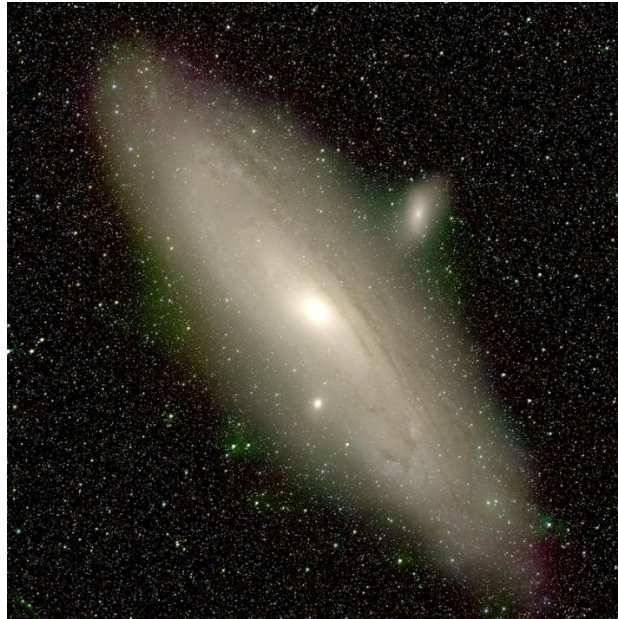
接了用于主动光学的波前传感器和用于导星的导星传感器，成为集科学成像、波前传感和导星为一体的‘三合一’相机，是国内面积最大、达到国际领先水平的CCD相机。

近年来，时域天文学在超新星宇宙学研究、引力波探测、系外行星搜寻、银河系中心超大质量黑洞探测等领域产出了一批重大科学成果，已经成为天文学和相关物理研究的重点突破方向。墨子巡天望远镜通过获取高精度位置和多波段亮度观测数据，可监测移动天体和光变天体，用于高效搜寻和监测天文动态事件，可以在高能时域天文、太阳系天体普查、银河系结构和近场宇宙学等领域取得突破性原始创新成果。望远镜将面向国家航天强国战略，开展太阳系近地天体等搜寻与监测研究，服务航天安全和深空探测战略需求。

2023年9月17日望远镜首光仪式以来，望远镜已经拍摄16500幅图像，获得原始科学数据总大小为26TB。项目团队正在对数据处理分析管线进行优化，并在黑洞潮汐撕裂恒星事件、伽玛暴、变星和小行星监测等领域取得了取得了一系列早期科学成果。墨子巡天望远镜的研制，推动了我校天文及相关学科的高水平发展；显著提升我国时域天文观测研究能力并达到国际先进水平。



墨子巡天望远镜首光仪式暨科学战略研讨会合影。



墨子巡天望远镜拍摄到的仙女座星系照片：目前世界上拍摄到的最大视场的仙女座星系高分辨率图像。

1. 2023年12月26日，人民日报发布《这一年，我们的重大科技成就》，“墨子巡天望远镜正式投入观测”入选国内2023年度重大科技成就
http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2023-12/26/nw.D110000renmrb_20231226_1-08.htm
2. 墨子巡天望远镜科学白皮书作为封面文章，发表于中国科学 Wang, T. and 61 colleagues 2023. Science with the 2.5-meter Wide Field Survey Telescope (WFST). Science China Physics, Mechanics, and Astronomy 66. doi:10.1007/s11433-023-2197-5
3. 2023年9月17日《新闻联播》：2.5米口径墨子巡天望远镜正式投入观测
<https://tv.cctv.com/2023/09/17/VIDEiJds8sjFuHK43CV9dvXz230917.shtml?spm=C31267.PXDaChrrDGdt.EbD5Beq0unIQ.3>
4. 2023年9月23日 Nature : 《China's powerful new telescope will search for exploding stars: The Wide Field Survey Telescope is the largest facility of its kind in the Northern Hemisphere》; <https://www.nature.com/articles/d41586-023-03013-6>

2. 揭示超大质量黑洞吸积辐射的新规律

我院天文学系蔡振翼副教授和王俊贤教授，通过研究大样本类星体的能谱，发现其超大质量黑洞吸积辐射的极紫外能谱形状与类星体本征亮度无关，推翻了该领域的传统认识，他们进一步发现类星体的平均极紫外能谱远比经典吸积盘理论预期更软，研究结果对经典吸积盘辐射模型给出了严重挑战，有力地支持了具有普遍盘风的吸积模型。该成果发表在《自然·天文学》期刊。



黑洞吸积盘示意图

类星体是一类非常明亮的河外天体，其中心的超大质量黑洞持续吞噬所处星系核心区域的气体。巨大的引力势在气体形成的吸积盘上得以释放，转化为热能和电磁辐射，使得星系核心异常明亮。类星体也因其超高的本征亮度而被称为宇宙中的“超级巨兽”。标准吸积盘理论表明，吸积盘产生著名的“大蓝包”辐射特征，理论预期峰值在极紫外波段。中心黑洞质量越大，理论预期吸积盘温度越低，极紫外能谱越软。观测上发现，越亮的类星体（黑洞质量越大）具有相对越弱的发射线（可由更软的极紫外能谱解释），即著名的 Baldwin 效应，也似与经典吸积盘理论模型一致。

蔡振翼副教授和王俊贤教授的研究直接聚焦于大样本类星体的光学-极紫外能谱，该项研究利用地面 SDSS 和空间 GALEX 的观测数据，控制极紫外探测不完备度的影响，发现类星体的平均极紫外能谱不依赖于本征亮度，不仅表明本征亮度差异无法解释 Baldwin 效应，还显著挑战了标准吸积盘理论预言。同时，作者给出了 Baldwin 效应的可能新物理起源：越明亮的类星体，其吸积盘热涨落越小，从而无法产生较多的发射线区云团。

通过改正探测不完备度及星系际介质吸收的影响，该研究还发现，类星体的极紫外平均能谱比所有前人的研究结果都更软，对标准吸积盘模型给出了进一步

严重挑战。这个超软的、不依赖于本征亮度的极紫外能谱很好地契合具有盘风的吸积盘模型预言，表明类星体中普遍存在盘风。

该项研究结果对深入理解大质量黑洞吸积物理、黑洞质量增长、宇宙再电离、宽线区物理起源、极紫外尘埃消光等诸多方面具有广泛影响。未来，中国巡天空间望远镜（CSST，<http://nao.cas.cn/csst/>）等具备紫外探测能力的卫星项目将极大提升人们对类星体诸多物理本质的认识。

该项研究得到中国科技部国家重点研发计划、国家自然科学基金委、双一流建设青年创新重点基金、中国载人航天工程和唐仲英基金会等资助。

Cai, Zhen-Yi and Wang, Jun-Xian

A universal average spectral energy distribution for quasars from the optical to the extreme ultraviolet

Nature Astronomy, 7, 1506 (2023)

DOI: 10.1038/s41550-023-02088-5

3. 实现超越海森堡极限精度的量子精密测量

我院郭光灿院士团队在量子精密测量的研究中取得重要进展。该团队李传锋、陈耕等人与香港大学同行合作，利用量子不确定因果序实现了超越海森堡极限精度的量子精密测量。研究成果 2023 年 5 月 1 日发表在《自然·物理》上。

量子精密测量致力于把量子力学原理运用到各种测量任务中以实现超过经典极限的测量精度。海森堡极限被认为是利用量子方法和资源所能达到的最终极限。之前国际上曾有一些工作声称超越了海森堡极限，然而这些工作利用了非线性效应或者包含了含时的哈密顿量，引起了广泛讨论，最终被理论上证明在以能量等作为规范化资源定义的前提下仍然会遵循海森堡极限。

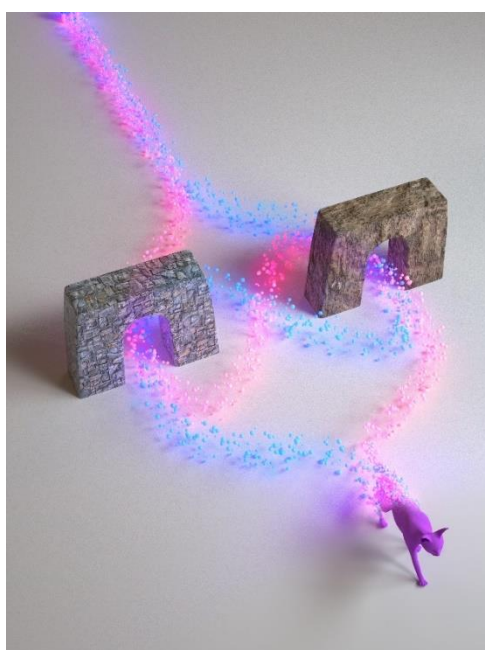


图 1: 量子不确定因果序的示意图。蓝色和红色路线经过两个门的时序不同且处于量子叠加态。

近年来，学术界提出一种新的量子结构，即量子不确定因果序。量子力学的叠加原理不仅允许不同量子本征态之间的叠加，也允许两个事件处于两个相反时序的量子叠加上（如图 1 所示）。这样一种新型的量子资源已经被证实可以在特定的量子计算和量子通信任务中提供优势，然而此前工作都是基于离散变量体系，未能直接应用于量子精密测量任务中。

李传锋、陈耕等人设计了一种全新的杂化（hybrid）量子装置，即用一个离散量子比特控制光子两组连续变量的演化时序，实验实现了不确定因果序，从而

实现了对演化产生的几何相位的超海森堡极限的精密测量，即测量的不确定度 δA 反比于独立演化过程的次数 N 的平方 ($\delta A \propto 1/N^2$)。实验结果表明，这种新方法在实验演示的范围内获得了对确定因果序方法理论上的最高测量精度，即海森堡极限 ($\delta A \propto 1/N$ ，图 2 中的蓝色虚线) 的绝对优势，实验结果逼近了理论上的超海森堡极限 (图 2 中的红色实线)。

该实验使用单个光子作为探针，不存在光子间的相互作用，且单次测量所需要的能量不超过单个光子的能量，从而实现了首个在规范化资源定义下超越海森堡极限的实验工作。实验实现的相对于确定因果序方法的提升可以直接转化为在实际测量任务中的现实优势。

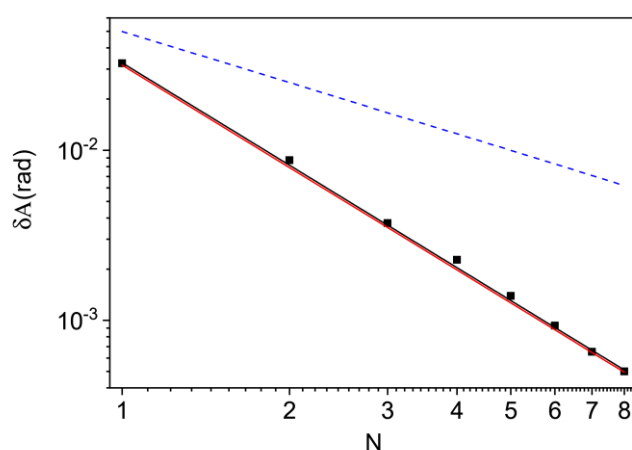


图 2: 实验的测量精度。黑色方点为 N 个独立演化过程的实验测量精度，红色实线为不确定因果序方法的超海森堡极限 ($\delta A=1/N^2$)，蓝色虚线为确定因果序方法的最高精度，即海森堡极限 ($\delta A=1/N$)。

该实验对不确定因果序和量子精密测量的理解均带来了重要影响。该工作得到了科技部、国家基金委、中国科学院、安徽省、中国科学技术大学的资助。

Peng Yin, Xiaobin Zhao, Yuxiang Yang, Yu Guo, Wen-Hao Zhang, Gong-Chu Li, Yong-Jian Han, Bi-Heng Liu, Jin-Shi Xu, Giulio Chiribella, Geng Chen, Chuan-Feng Li & Guang-Can Guo

Experimental super-Heisenberg quantum metrology with indefinite gate order

Nature Physics volume 19, pages 1122–1127 (2023)

DOI: 10.1038/s41567-023-02046-y

4. 中国科大成功实现最大规模的 51 比特量子纠缠态制备

我院潘建伟、朱晓波、彭承志等组成的研究团队与北京大学袁晓合作，成功实现了 51 个超导量子比特簇态制备和验证，刷新了所有量子系统中真纠缠比特数目的世界纪录，并首次实现了基于测量的变分量子算法的演示。该工作将各个量子系统中真纠缠比特数目的纪录由原先的 24 个大幅突破至 51 个，充分展示了超导量子计算体系优异的可扩展性，对于多体量子纠缠研究、大规模量子算法实现以及基于测量的量子计算具有重要意义。相关研究成果于 2023 年 7 月 12 日在线发表在国际学术期刊《自然》杂志上。

量子纠缠是量子力学中最神秘也是最基础的性质之一，同时也是量子信息处理的核心资源，是量子计算加速效应的根本来源之一。多年以来，实现大规模的多量子比特纠缠一直是各国科学家奋力追求的目标。自 1998 年人们首次利用核磁共振系统实现 3 比特 GHZ 态的制备开始，真多体纠缠态的制备成为包括光子、离子阱、NV 色心、中性原子及超导量子比特等各种物理系统规模化扩展的重要表征手段。其中，超导量子比特具有规模化拓展的优势，在近年来发展迅速。我国科学家在超导量子比特多体纠缠制备方面取得了一系列重要成果，自 2017 年起先后完成了 10 比特、12 比特、18 比特的真纠缠态制备，不断刷新超导量子计算领域的纠缠比特数目纪录。

然而，更大规模的真纠缠态制备要求高连通性的量子系统、高保真的多比特量子门操作、以及高效准确的量子态保真度表征手段。高连通性保证了大规模量子态生成的可能性，避免了因缺陷和连通性不足限制量子态规模；通过高保真量子门才能够将量子比特连接起来形成高保真的多体量子纠缠态；而高效的量子态表征是克服随比特数指数级增长的量子态规模复杂度、进行量子态保真度准确估计的重要保证。这些要求对量子系统的性能、操控能力以及验证手段提出了很高的要求，使此前真纠缠比特的规模停留在约 20 个量子比特的水平。

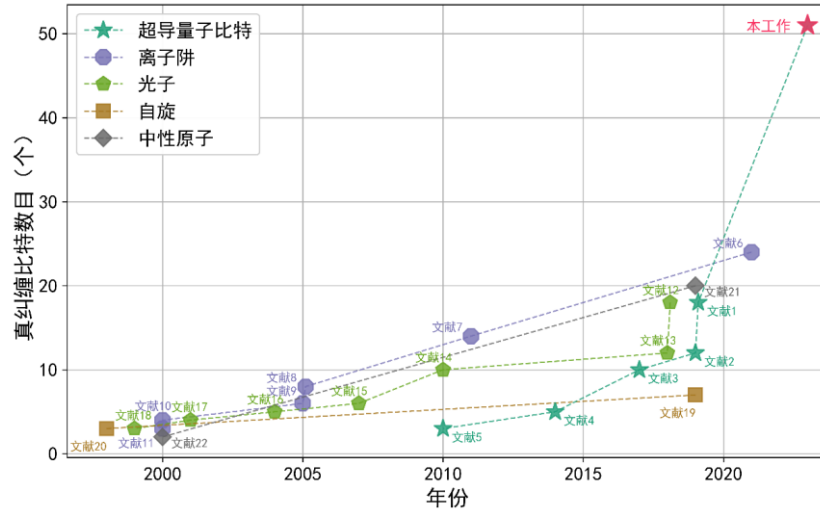


图 1 量子真纠缠态比特数目的发展历史。

研究团队在前期构建的“祖冲之二号”超导量子计算原型机的基础上，进一步将并行多比特量子门的保真度提高到 99.05%、读取精度提高到 95.09%，并结合研究团队所提出的大规模量子态保真度验证判定方案，成功实现了 51 比特簇态制备和验证。最终 51 比特一维簇态保真度达到 0.637 ± 0.030 ，超过 0.5 纠缠判定阈值 13 个标准差。这一结果将各个量子系统中真纠缠比特数目的纪录由原先的 24 个大幅突破至 51 个，充分展示了超导量子计算体系优异的可扩展性。在此基础上，研究团队通过结合基于测量的变分量子本征求解器，开展了对于小规模扰动平面码的本征能量的求解，首次实现了基于测量的变分量子算法，为基于测量的量子计算方案走向实用奠定了基础。

本研究工作得到了科技部、安徽省、上海市、自然科学基金委和中科院等的资助。

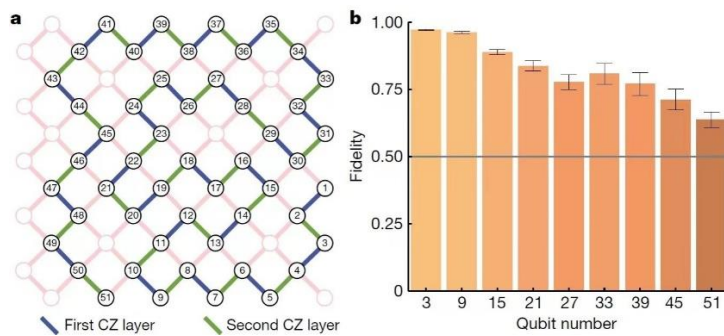


图 2 利用“祖冲之二号”完成的 51 比特一维簇态制备的线路及量子态保真度结果。

2013年7月17日，习近平总书记视察中国科学院时提出“四个率先”目标要求。习近平总书记高度关心量子科技发展，提出“要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性，加强量子科技发展战略谋划和系统布局，把握大趋势，下好先手棋。”十年来，中国科学技术大学科研团队认真落实总书记对量子科技的指示要求，潜心研究、刻苦攻关，取得了一系列具有国际影响力的重大原创成果。未来，中国科学技术大学将积极发挥国家战略科技力量主力军的作用，聚焦量子通信、量子计算、量子精密测量等世界科技前沿方面，突破重大科学问题和关键核心技术，努力抢占科技制高点，为实现高水平科技自立自强贡献力量。

论文链接: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06195-1>

Sirui Cao, Bujiao Wu, Fusheng Chen, Ming Gong, Yulin Wu, Yangsen Ye, Chen Zha, Haoran Qian, Chong Ying, Shaojun Guo, Qingling Zhu, He-Liang Huang, Youwei Zhao, Shaowei Li, Shiyu Wang, Jiale Yu, Daojin Fan, Dachao Wu, Hong Su, Hui Deng, Hao Rong, Yuan Li, Kaili Zhang, Tung-Hsun Chung, ...Jian-Wei Pan

Generation of genuine entanglement up to 51 superconducting qubits

Nature volume 619, pages738–742 (2023)Cite this article

DOI: 10.1038/s41586-023-06195-1

5. 物理系在新型笼目晶格材料研究中取得系列进展

笼目晶格材料由于其特殊晶体结构，在电子能带上往往具有弱色散的平带、高态密度的范霍夫奇点以及类石墨烯的狄拉克型线性色散，从而使得材料可以表现出多种奇特的宏观物理性质。近期，一种新型准二维层状笼目金属材料 AV_3Sb_5 ($A=K, Rb, Cs$) 激发了科研人员的极大兴趣。多种量子有序态在该材料体系中被发现，包括超导、电荷密度波、配对密度波、电子液晶相等。这些电子序的微观成因以及相互关系对于理解该体系中的奇异量子现象至关重要。中国科大物理系陈仙辉院士、何俊峰教授、王震宇教授和乔振华教授等合作对上述问题展开研究，揭示了笼目材料中的超导机理、竞争序和多体相互作用等现象，这一系列进展发表在《自然-物理》、《自然-通讯》和《物理评论快报》上。

理论上，笼目材料中的超导和电荷密度波都可能与电子结构中的范霍夫奇点密切相关。在电子结构中，范霍夫奇点连接了空穴型与电子型能带，是能带结构中的鞍点，可以产生发散的电子态密度。一方面，范霍夫奇点附近巨大的电子态密度能够引起电子结构强烈的不稳定性，从而可能成为驱动电子有序态形成的源泉（如超导、电荷密度波）；另一方面，范霍夫奇点处同时存在空穴型与电子型导电，可以形成一种等效的电子吸引作用，从而导致非常规配对机制的超导。何俊峰课题组依托陈仙辉院士团队与乔振华课题组以及北理工、中科院物理研究所等国内外研究人员合作，在一种新型笼目超导体 ($CsV_{3-x}Ta_xSb_5$, $x\sim 0.4$) 中发现位于费米能级的范霍夫奇点，并揭示了其与超导之间的关系。该研究成果发表在 *Nature Communications* 上，中国科大为论文的第一单位。

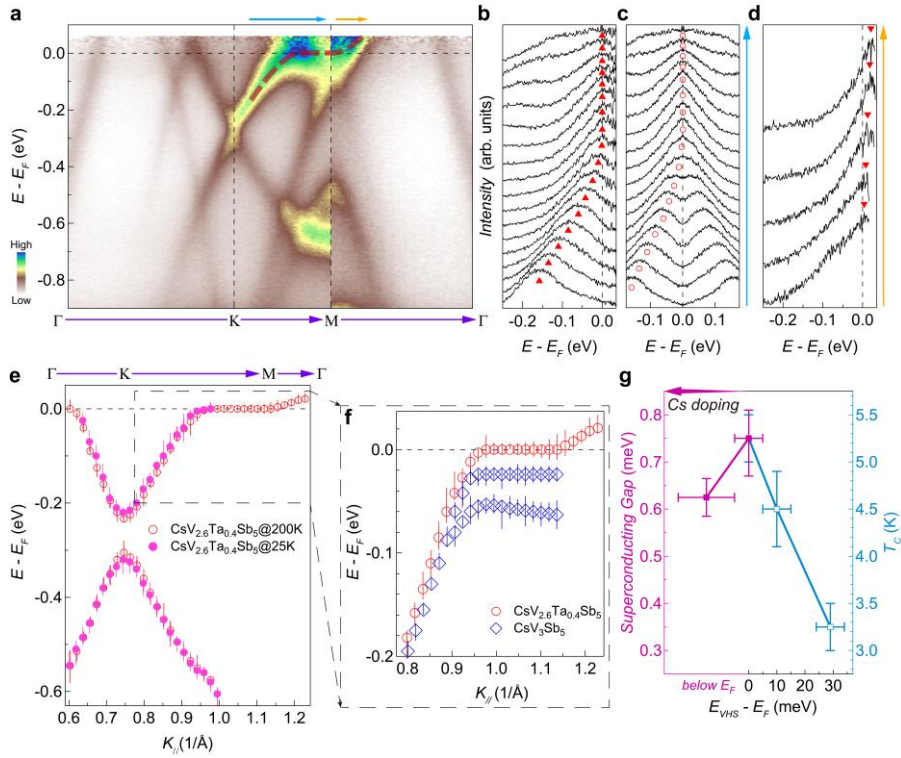


图 1: $\text{CsV}_{3-x}\text{Ta}_x\text{Sb}_5$ 的范霍夫奇点

在此基础上，为了理解笼目金属中的竞争序，研究人员与国内外合作者对新型 Ti 基笼目金属材料 CsTi_3Bi_5 展开了探索，并与 AV_3Sb_5 ($A=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) 体系进行对比研究，揭示了晶格不稳定性对于笼目金属中电荷密度波的重要作用。此外，研究人员还通过低温 X 射线衍射和不同偏振的角分辨光电子能谱测量，对 CsTi_3Bi_5 中可能存在的电子向列相的成因进行了探索。该成果发表在 *Physical Review Letters* 上，被选为“封面文章”，中国科大为论文的第一单位。

既然笼目金属中存在超导态以及与超导竞争的电荷密度波和电子向列相等，那么一个自然的问题是这些有序态和材料中的哪些多体相互作用有关。陈仙辉院士、王震宇教授等人利用准粒子相干散射成像技术对钛掺杂的笼目超导体 $\text{Cs}(\text{V}, \text{Ti})_3\text{Sb}_5$ 进行了系统的研究。对电子色散和准粒子寿命的全面分析发现，电-声子耦合效应会导致笼目晶格能带上出现单向的电子自能修正，从而使得电子色散和电子低能动力学出现强烈的二度对称特征。变温研究揭示电子向列相是电子关联效应和声子共同作用所形成的电子相干态，并与超导存在着竞争关系。该成果发表在 *Nature Physics* 上，中国科大为论文的第一单位。

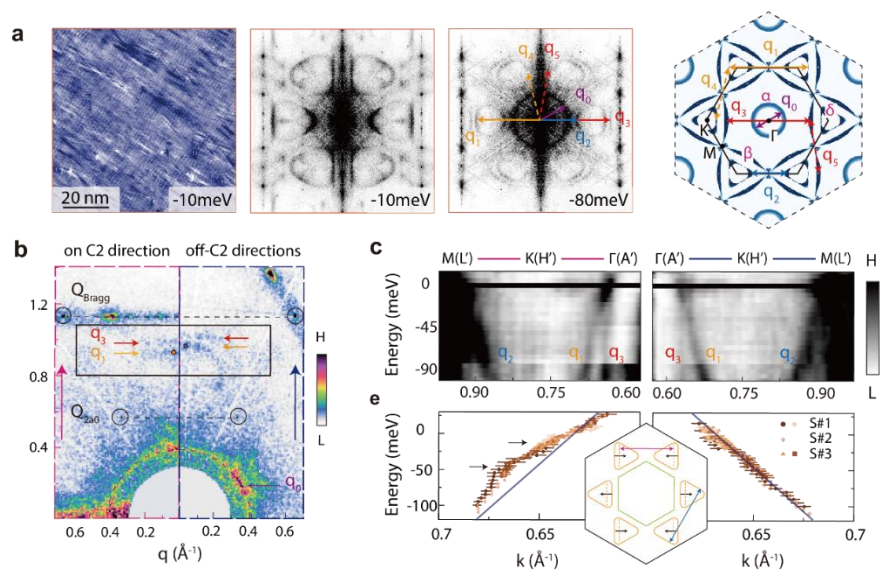


图 2. 笼目超导中的准粒子相干散射图像与笼目能带上的单向电声子耦合

以上三项工作得到了国家自然科学基金委、科技部、中国科学院、安徽省引导项目、中央高校基本科研业务费专项资金以及中国科大科研启动经费等资助；得到了斯坦福同步辐射光源、伯克利先进光源以及合肥光源的支持。

Yang Luo, Yulei Han, Jinjin Liu, Hui Chen, Zihao Huang, Linwei Huai, Hongyu Li, Bingqian Wang, Jianchang Shen, Shuhan Ding, Zeyu Li, Shuting Peng, Zhiyuan Wei, Yu Miao, Xiupeng Sun, Zhipeng Ou, Ziji Xiang, Makoto Hashimoto, Donghui Lu, Yugui Yao, Haitao Yang, Xianhui Chen, Hong-Jun Gao, Zhenhua Qiao, Zhiwei Wang, Junfeng He, “A unique van Hove singularity in kagome superconductor $\text{CsV}_{3-x}\text{Ta}_x\text{Sb}_5$ with enhanced superconductivity”.

Nature Communications 14, 3819 (2023)

Bo Liu, Min-Quan Kuang, Yang Luo, Yongkai Li, Cheng Hu, Jiarui Liu, Qian Xiao, Xiquan Zheng, Linwei Huai, Shuting Peng, Zhiyuan Wei, Jianchang Shen, Bingqian Wang, Yu Miao, Xiupeng Sun, Zhipeng Ou, Shengtao Cui, Zhe Sun, Makoto Hashimoto, Donghui Lu, Chris Jozwiak, Aaron Bostwick, Eli Rotenberg, Luca Moreschini, Alessandra Lanzara, Yao Wang, Yingying Peng, Yugui Yao, Zhiwei Wang, Junfeng He, “Tunable van Hove Singularity without Structural Instability in Kagome Metal CsTi_3Bi_5 ”.

Physical Review Letters 131, 026701 (2023)

Ping Wu, Yubing Tu, Zhuying Wang, Shuikang Yu, Hongyu Li, Wanru Ma, Zuowei Liang, Yunmei Zhang, Xuechen Zhang, Zeyu Li, Ye Yang, Zhenhua Qiao, Jianjun Ying, Tao Wu, Lei Shan, Ziji Xiang, Zhenyu Wang, Xianhui Chen, “Unidirectional electron-phonon coupling in the nematic state of a kagome superconductor”.

Nature Physics 19, 1143-1149 (2023)

6. 中国科大发现细菌游动鲁棒性的系列新机制

我院张榕京、袁军华课题组在细菌运动机制的研究中取得重要进展，发现细菌游动鲁棒性的系列新机制：对外界环境变化的鲁棒性机制，以及游动模式的鲁棒性机制。相关成果分别发表在《Science Advances》[Science Advances 9, eadi6724 (2023)]及《Phys. Rev. Lett》[Phys. Rev. Lett. 130, 138401 (2023)]上。

细菌的运动对于其生存和感染宿主至关重要。由细菌鞭毛旋转驱动的游动是细菌最为典型的运动机制。鞭毛马达对其承受的力学负载非常敏感。以往普遍认为细菌在自由液体环境游动时，鞭毛马达工作在高负载区域。课题组研究发现，细菌在自由液体环境游动时，鞭毛马达实际上在低负载区域工作，马达内的定子数为满态的一半(图 1)。这种定子数半满的状态使细菌能够根据外部条件动态调节定子数量。课题组测量了含不同数量鞭毛的鞭毛束的旋转速度，发现当鞭毛数量为 3 个或更多时，转速随鞭毛数量的变化保持恒定，这表明细菌游动对鞭毛数量的变化具有鲁棒性。课题组进一步设计了微流控实验，结果发现，当外部环境液体的粘度突然增加时，鞭毛束的转速迅速下降，然后逐渐恢复，这表明细菌的游动对外部负载条件的变化具有鲁棒性。课题组用动态定子数调节的机制定量地解释了这两种鲁棒性。因此，细菌在自由液体环境游动时，其鞭毛马达实际上在低负载区域工作，马达内的定子数为半满，这使得细菌能根据外部条件动态调节定子数量，从而赋予细菌游动对外界环境变化的鲁棒性。

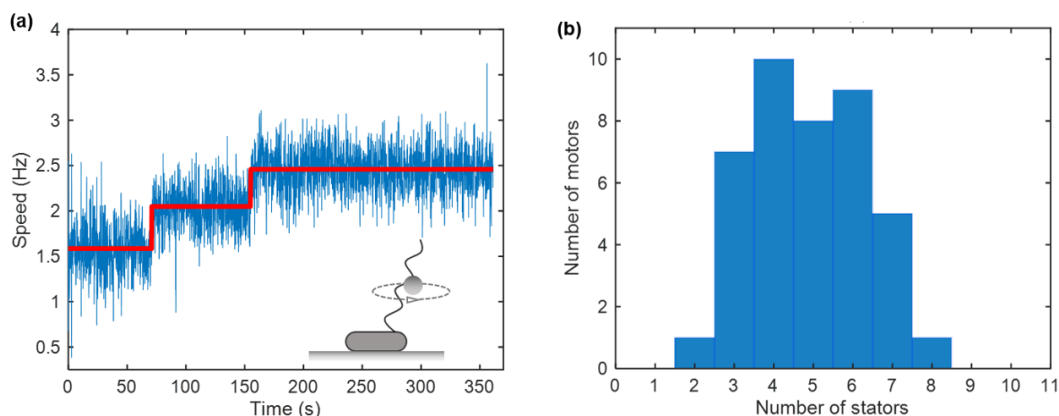


图 1. (a) 马达复活实验。在零时刻突然增加马达负载，发现马达转速一步一步增加，说明初始时马达定子数未满足。 (b) 实验测量的细菌在自由液体环境游动时，鞭毛马达内定子数统计分布，发现平均定子数为满态（11 个）的一半。

此外，课题组通过流场单分子施力技术，精确测量活细菌鞭毛钩的抗弯刚度，发现了细菌游动模式的鲁棒性机制。大肠杆菌通过调节其鞭毛马达的转向、以交替“直线游动 \leftrightarrow 原地翻滚”的方式进行随机行走探索环境。鞭毛钩是推动细菌游动的鞭毛的重要组成部分，其力学性质对鞭毛实现正常功能至关重要。在大肠杆菌等周身多鞭毛细菌中，鞭毛钩必须足够柔软，这样当鞭毛马达逆时针转动时，鞭毛钩可以弯曲，使得多根鞭毛丝在细菌胞体的一端形成连贯旋转的鞭毛束；另一方面，鞭毛钩也必须足够刚性，这样当马达顺时针转动时，鞭毛束可以散开，使得细菌原地翻滚以改变游动方向。在本研究中，课题组发展了流场单分子施力技术(图 2)，结合弹性杆力学模型，精确测量了活细菌鞭毛钩在顺时针和逆时针转向下的抗弯刚度，阐明了鞭毛钩如何实现这一双重功能：鞭毛钩在顺时针转向下变硬，顺时针转向下弯曲刚度是逆时针下的两倍。这使得多鞭毛细菌实现了鲁棒的“直线游动 \leftrightarrow 原地翻滚”运动能力。

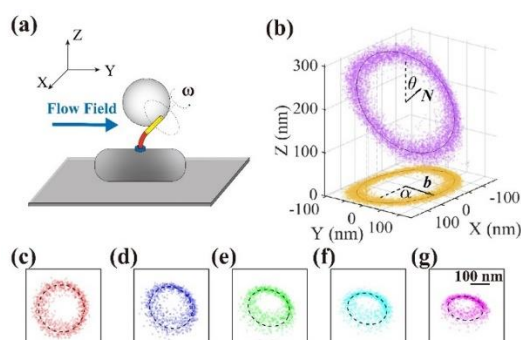


图 2. (a) 流场单分子施力示意图。细菌粘在玻璃片上，红色代表鞭毛钩，黄色代表切短的鞭毛丝，白球代表 0.5 微米直径的微珠，标记于鞭毛丝以观测鞭毛马达转动。(b) 微珠在三维空间的圆形旋转轨迹（紫色）投影到二维观测平面时为椭圆（黄色）。(c-g) 通过椭圆的偏心率可以测量不同流场力下鞭毛钩的弯曲角。

在自然界中存在种类丰富的鞭毛细菌，鞭毛钩的力学性质在各种鞭毛细菌的不同运动模式中起着关键作用，比如课题组之前在极性单鞭毛细菌-铜绿假单胞菌中发现的 wrap 游动新模式[PNAS 119, e2120508119 (2022)]，就是由其鞭毛钩足够柔性的抗弯刚度实现的。课题组这里发展的精确测量鞭毛钩力学性质的方法，可以方便地用于其它种类细菌的测量中。本研究结果对于理解细菌运动机制和设计新型微纳机器人具有重要意义。

上述研究得到了国家自然科学基金委及科技部基金的支持。

相关论文：

Flagellar motors of swimming bacteria contain an incomplete set of stator units to ensure robust motility.

Y. Niu, R. Zhang, J. Yuan

Science Advances 9, eadi6724 (2023)

<http://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adi6724>

Differential Bending Stiffness of the Bacterial Flagellar Hook under Counterclockwise and Clockwise Rotations.

X. Zhang, C. Zhang, R. Zhang, J. Yuan

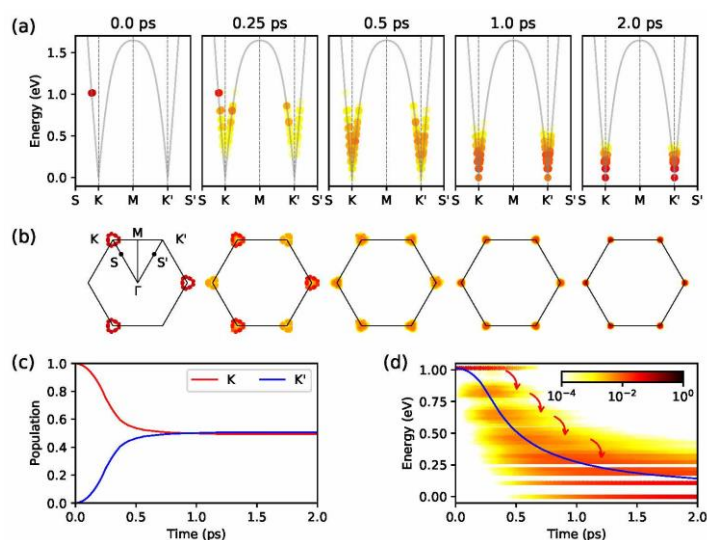
Phys. Rev. Lett. 130, 138401 (2023)

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.130.138401>

7. 中国科大发展在动量空间载流子动力学与激子动力学领域取得进展

中国科学技术大学物理学院物理系赵瑾教授、郑奇靖副教授在自主知识产权的计算软件 Hefei-NAMD 中实现了针对动量空间载流子动力学实时演化的第一性原理计算方法，该成果以“Ab initio Real-Time Quantum Dynamics of Charge Carriers in Momentum Space”为题，发表在 Nature Computational Science 上。

固体材料中的载流子动力学是凝聚态物理中的重要问题，决定了光电、光伏、谷电子学、自旋电子学等器件的效率，从时间、空间、能量和动量等多个维度来理解和研究载流子动力学一直是科学家们追求的目标。然而，在以往的第一性原理非绝热分子动力学模拟中，由于人们使用绝热基组，不同 \mathbf{k} 点的非绝热耦合等于零，无法直接模拟动量空间 (\mathbf{k} 空间) 的载流子动力学过程。在本论文中，赵瑾、郑奇靖团队通过在简谐近似下将电子态波函数用透热基组展开，将电声耦合矩阵元直接引入哈密顿量，用以代替之前从分子动力学计算出发得到的非绝热耦合矩阵，从而在 Hefei-NAMD 中实现了动量空间 real-time 载流子量子动力学的模拟 (方法简称 NAMD_ \mathbf{k})。与过去的非绝热分子动力学方法相比，NAMD_ \mathbf{k} 方法不需要使用超胞进行分子动力学计算，只需要利用单胞计算电声耦合即可，大幅度降低了计算量。另外，这种方法除了可以模拟电子/空穴在动量空间的动力学过程，还可以得到载流子弛豫过程中声子激发的信息，从而为光致相变以及光催化的研究提供有力的工具。



图一 石墨烯材料中动量空间热电子弛豫动力学 (Zheng et al. Nature Computational Science 2023)

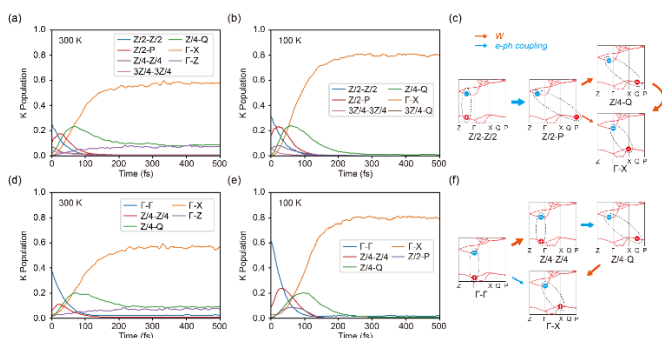
在本文中他们用最新发展的方法研究了石墨烯材料热电子弛豫的动力学过程。他们发现石墨烯中的热电子弛豫存在一个 0.2 eV 的激发阈值，当热电子初始激发能量大于 0.2 eV 时，无论是热电子能量弛豫还是 K-K' 的谷间散射，发生的时间尺度都在皮秒量级，此时电子耦合的是能量较高的光学支声子；当激发能小于 0.2 eV 时，电子只能与较低能量的声学支声子耦合，能量弛豫与谷间散射的时间尺度都会加长到纳秒量级。本工作为研究材料中的载流子在动量空间中的动力学行为提供了有力的工具，也为研究光致相变、光催化提供了可能的技术手段。

之后，赵瑾教授、郑奇靖副教授进一步基于 Hefei-NAMD 研究了锐钛矿 TiO₂ 中的亮-暗激子转化的动力学过程，揭示了多体效应在其中起到的重要作用。最近，该成果以“Ultrafast many-body bright-dark exciton transition in anatase TiO₂”为题，发表在 Proc. Natl. Acad. Sci. 上。

激子是凝聚态体系中电子和空穴以库伦相互作用束缚在一起的准粒子，以其与光的相互作用性质可以分为亮激子和暗激子，亮激子可以直接与光耦合，对于

物质的光吸收非常重要，而暗激子由于有相对较长的寿命在量子信息、玻色-爱因斯坦凝聚、以及能量转化领域有很重要的应用。在本工作中，我们利用准确包含多体效应的 GW + real-time BSE 方法研究了锐钛矿 TiO₂ 材料中亮-暗激子转化的动力学过程。锐钛矿 TiO₂ 有很好的光吸收性质，可以在光激发的条件下产生亮激子。同时，由于材料具有间接带隙的性质，亮激子最终弛豫到带边形成暗激子。

在单粒子图像下，这种亮-暗激子的转化主要由电声耦合导致。然而，当考虑了激子中的多体效应，即电子-空穴的相互作用，他们发现激子的转移出现了新的通道，导致亮-暗激子的转移时间尺度提升了数倍，亮激子在 100 fs 左右的时间内转化为暗激子。在这个转化过程中，激子的多体效应起到了关键作用。



图二 Anatase TiO₂ 材料中亮暗激子转化动力学 (Wang et al. Proc. Natl. Acad. Sci., 2023)

本工作揭示半导体材料中激子动力学中多体效应的作用机制，对设计基于激子的光电器件和能源材料有重要的意义。

两项工作都是 Hefei-NAMD 程序的重要进展（程序主页：<https://hefeinamd.org/>）。自 2016 年起，利用该软件发表的学术论文已超过 150 篇。本工作受到基金委、科技部、中国科学院等单位的支持。

8. 首次实现基于碳化硅中硅空位色心的高压原位磁探测并大幅增强单个碳化硅自旋色心的荧光亮度

我院郭光灿院士团队李传锋、许金时、王俊峰等人与中国科学院合肥物质科学研究院固体所高压团队刘晓迪研究员等合作，在国际上首次实现了基于碳化硅中硅空位色心的高压原位磁探测，该技术在高压量子精密测量领域具有重要意义。研究成果 2023 年 3 月 23 日发表在《自然·材料》。

高压技术已经广泛应用于许多领域，包括物理学、材料科学、地球物理和化学。特别是压力下高临界温度超导体的实现，引起了学术界的极大关注。然而一直以来，原位高分辨率的磁测量是高压科学研究的难题，并制约着高压超导抗磁行为和磁性相变行为的研究。传统的高压磁测量手段，如超导量子干涉仪难以实现金刚石对顶砧中微米级样品的弱磁信号的高分辨率原位探测。为了解决这一关键核心难题，金刚石 NV 色心的光探测磁共振技术已被用于原位压力诱导磁性相变检测。然而，由于 NV 色心具有四个轴向，并且其电子自旋的零场分裂是温度依赖的，不利于分析和解释测量得到的光探测磁共振谱。

针对高压磁探测的难题，研究组加工了碳化硅对顶砧（又称为莫桑石对顶砧），然后在碳化硅台面上利用离子注入产生浅层硅空位色心，并利用浅层色心实现高压下的原位磁性探测。碳化硅中的硅空位色心只有单个轴向，由于电子结构的特殊对称性，该色心电子自旋的零场分裂是温度不敏感的，能够很好地避免金刚石 NV 色心在高压传感应用中的问题。研究组首先刻画了硅空位色心在高压下的光学和自旋性质，发现其光谱会蓝移，而且其自旋零场分裂值随压力变化很小（0.31 MHz/GPa），远小于金刚石 NV 色心的变化斜率 14.6 MHz/GPa。这将有利于测量和分析高压下的光探测磁共振谱。在此基础上，研究组基于硅空位色心光探测磁共振技术观测到了钕铁硼磁体在 7 GPa 左右的压致磁相变，并测量得到钕钡铜氧超导体的临界温度-压力相图。实验装置和实验结果如图 1 所示。该实验发展了基于固态色心自旋的高压原位磁探测技术。碳化硅材料加工工艺成熟，可大尺寸制备并且相对金刚石有很大的价格优势，该工作为磁性材料和新型超导体高压性质的刻画提供了一个优异的量子研究平台。

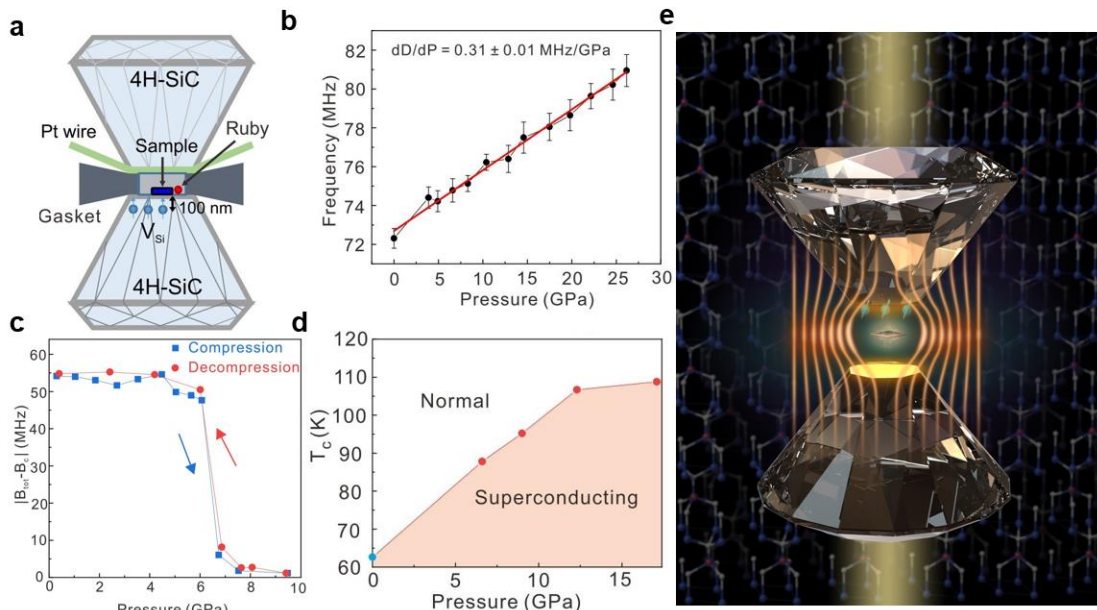


图 7：实验结果和示意图。 图 **a** 碳化硅对顶砧和浅层硅空位色心探测磁性样品示意图；**b** 硅空位色心零场劈裂随压力的变化关系；**c** 钕铁硼材料的磁性相变探测；**d** 钇钡铜氧超导材料的 T_c - P 相图；**e** 基于碳化硅中硅色心实现高压原位磁探测的示意图。

继而，研究组在单个碳化硅自旋色心荧光增强的研究中取得新进展：通过成功利用表面等离子激元大幅增强了单个碳化硅双空位 PL6 色心的荧光亮度，并利用共面波导的特性大幅提高了自旋操控效率。这项技术成本低、无需复杂的微纳加工工艺，且不影响色心的相干性质，对于发展基于碳化硅自旋色心的量子应用具有重要意义。研究成果 2023 年 5 月 8 日发表在《纳米快报》。

固态自旋色心是用于量子信息处理的重要体系，其荧光亮度是迈向实用化量子应用的重要参数。通过与固态微纳结构耦合来实现自旋色心的荧光增强是一种常用的方法。人们已经提出并实现了多种不同的方案，包括加工固体浸润透镜、纳米柱、牛眼环、光子晶体微腔和光纤腔等。然而，这一方向依然存在许多具有挑战性的问题需要解决，例如色心自旋性质容易受到复杂微纳加工过程的影响，以及色心与微纳结构之间难以对准等。

研究组独辟蹊径，利用等离子激元实现碳化硅中自旋色心的荧光增强。研究组通过化学机械抛光等工艺制备出厚度约 10 微米的碳化硅薄膜，并利用离子注入技术在薄膜中制备近表面（约 15 纳米）的双空位色心。随后将薄膜翻转，利用范德瓦尔斯力将其粘贴在镀有共面金波导的硅片上，由此使得近表面色心与金波导的距离落在表面等离子激元的作用范围内，进而增强色心荧光。

研究组在之前的工作中首次发现碳化硅中单个双空位 PL6 色心在室温下具有与金刚石 NV 色心相媲美的发光亮度和自旋读出对比度[Natl. Sci. Rev. 9, nwab122 (2022)]。在本项工作中，使用数值孔径 0.85 的物镜，利用表面等离子激元的增强效应，实现了单个 PL6 色心亮度 7 倍的增强；进一步使用数值孔径 1.3 的油镜，色心荧光每秒可超过 1 百万个计数。研究组还利用反应离子刻蚀工艺调控薄膜厚度，从而精确控制近表面色心与共面波导的距离，研究最佳作用范围。除了产生表面等离子激元，共面金波导还可用来高效辐射微波，从而大幅提高自旋操控效率。相比传统微波辐射方式，共面波导使单个 PL6 色心的拉比频率在相同微波功率下提升了 14 倍。实验装置与结果如图所示。

研究组还深入研究了荧光增强机制。通过使用三能级模型拟合自相关函数，以及测量非共振激发荧光寿命，研究组不仅验证了表面等离子激元是通过提高色心能级的辐射跃迁速率来增强荧光亮度，而且发现在作用距离逐渐缩小的过程中，表面等离子激元的淬灭效应会导致色心荧光亮度发生衰减。

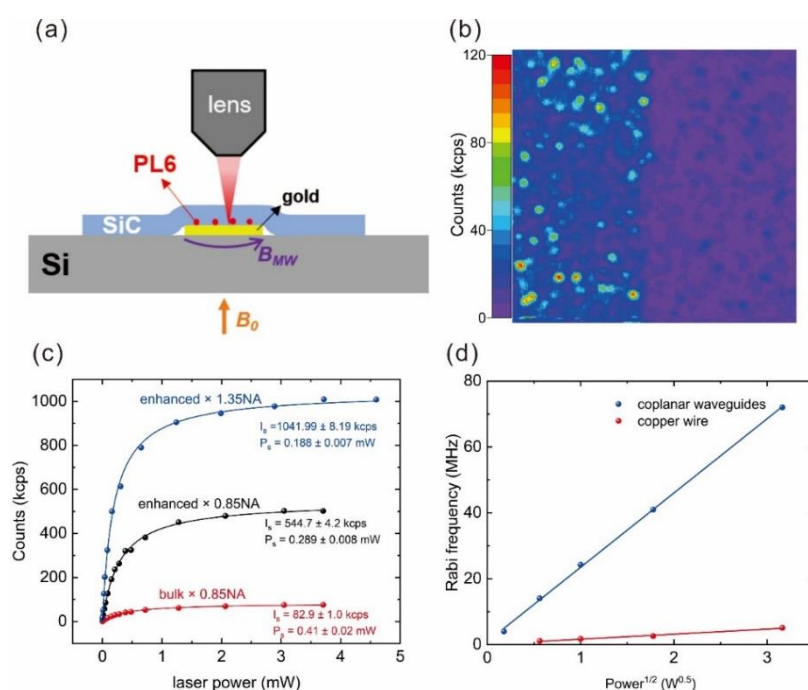


图 8 实验装置与结果图。 **a** 基于表面等离子激元增强的器件示意图；**b** 存在等离子激元增强（左）与无增强（右）区域的共聚焦荧光扫描对比图；**c** 被等离子激元增强后的单个 PL6 色心与块材中未增强的单个 PL6 色心的饱和荧光计数对比图；**d** 使用金波导和铜导线在不同微波功率下测得的拉比振荡频率对比图。

该工作首次实现了碳化硅薄膜中近表面自旋色心荧光的等离激元增强。共面金波导制备简单，无需复杂的增强结构与对准工艺，并且该方法也适用于碳化硅中其他自旋色心的荧光增强。这项技术将有力推动碳化硅材料在量子领域的应用。

本系列工作得到了科技部、国家自然科学基金委、中国科学院、安徽省和中国科学技术大学的资助。

Jun-Feng Wang, Lin Liu, Xiao-Di Liu, Qiang Li, Jin-Ming Cui, Di-Fan Zhou, Ji-Yang Zhou, Yu Wei, Hai-An Xu, Wan Xu, Wu-Xi Lin, Jin-Wei Yan, Zhen-Xuan He, Zheng-Hao Liu, Zhi-He Hao, Hai-Ou Li, Wen Liu, Jin-Shi Xu, Eugene Gregoryanz, Chuan-Feng Li, Guang-Can Guo

Magnetic detection under high pressures using designed silicon vacancy centres in silicon carbide

Nature Materials 612, 489-494 (2023)

DOI: 10.1038/s41563-023-01477-5

Ji-Yang Zhou, Qiang Li, Zhi-He Hao, Wu-Xi Lin, Zhen-Xuan He, Rui-Jian Liang, Liping Guo, Hao Li, Lixing You, Jian-Shun Tang, Jin-Shi Xu*, Chuan-Feng Li*, and Guang-Can Guo

Plasmonic-Enhanced Bright Single Spin Defects in Silicon Carbide Membranes

Nano Lett. 23, 10, 4334–4343 (2023)

DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00568

9. 中国科大在钙钛矿 LED 研究中取得系列进展

金属卤化物钙钛矿是新一代的明星半导体材料，它具有吸收系数高、光学带隙易于调节、电子空穴迁移率高、载流子扩散长度长、缺陷容忍度高等优异的光电特性。这使得钙钛矿材料在太阳能电池，LED，X 射线探测器等领域都具有非常广阔的应用前景。其中，金属卤化物钙钛矿 LED 具有良好的导电性，在较低电压下能够实现很高的发光亮度，是下一代节能照明的理想之选。我院肖正国教授课题组在钙钛矿 LED 研究中取得了多项重要进展，并在国际权威期刊上发表了多篇论文。

目前，基于多晶薄膜的钙钛矿 LED 的外量子效率 (EQE) 已经超过 20%，可以媲美商用有机 LED (OLED)。但是，近年来报道的绝大多数高效率钙钛矿 LED 器件的寿命在数百到数千小时不等，仍远落后于 OLED。离子移动，载流子注入不平衡，运行过程产生的焦耳热等因素都会影响器件稳定性。单晶中缺陷较少，离子移动将被大大抑制。基于此，肖正国教授课题组利用空间限制法在衬底上原位生长钙钛矿单晶，通过调控生长条件，引入有机胺和聚合物，有效提升了晶体质量，从而制备出高质量的 $\text{MA}_{0.8}\text{FA}_{0.2}\text{PbBr}_3$ 薄单晶，薄单晶的内量子效率达到了 89.4%，缺陷浓度为 $7.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ，比多晶薄膜低了五个数量级。以薄单晶作为发光层制备的钙钛矿单晶 LED 器件的 EQE 达到 11.2%，亮度超过 86000 cd/m^2 ，寿命高达 12500 h，初步达到商业化门槛，成为稳定性最好的钙钛矿 LED 器件之一。(图 1)。该工作于 2023 年 2 月 27 日发表在了国际权威期刊《Nature Photonics》上[1]。文章发表后，科学网、中国新闻网、中国青年网等媒体进行了相关报道 (图 2)。

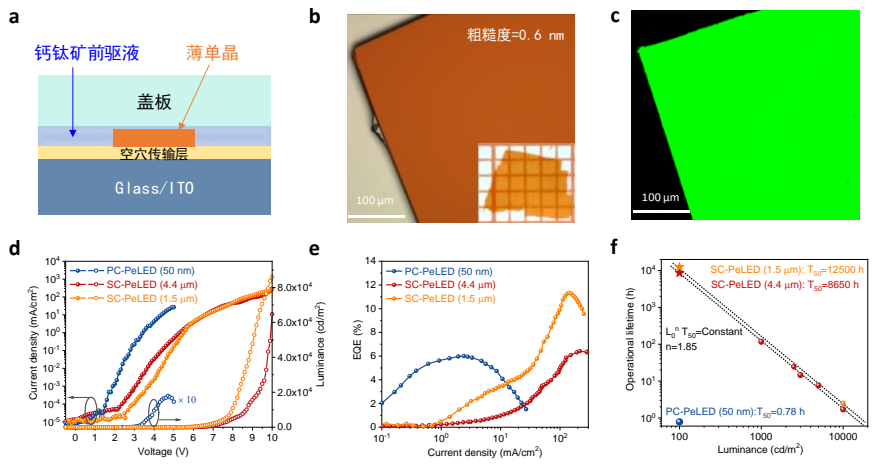


图 1: a. 夹层溶液法生长单晶示意图。b,c. 薄单晶的光学显微镜照片(b)及荧光照片。d-f. 单晶钙钛矿 LED 与多晶钙钛矿 LED 的 JV 曲线 (d), EQE (e) 与稳定性 (f)。



图 2: 论文发表后多家媒体进行了相关报道

柔性 LED 更具艺术性，应用范围广，是未来 LED 照明的趋势。由于柔性衬底不是完全平坦的，在柔性衬底上沉积均匀的大面积钙钛矿薄膜仍然具有挑战性。近期，肖正国教授课题组报道了通过喷墨打印制备大面积柔性钙钛矿 LED 的方法。通过利用亲水性聚合物材料作为衬底提高浸润性、溶剂工程调节液滴的流体动力学等方法，成功在柔性衬底上打印出表面平整、发光均匀、光电性能优异的钙钛矿薄膜。在此基础上，肖正国教授课题组首次实现了大面积均匀电致发光的红光，绿光，蓝光柔性钙钛矿 LED。此外，还展示了具有红、绿、蓝三种不同发光颜色的大面积图案化的钙钛矿 LED。这项工作于 2023 年 11 月 28 日发表在了国际权威期刊《Advanced Materials》上[2]。

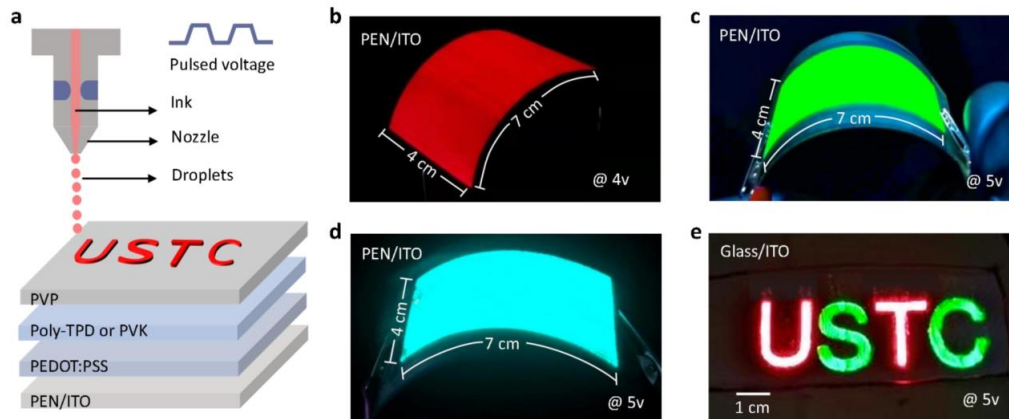


图 3: a. 喷墨打印钙钛矿 LED 的器件结构。b-d. 红光 (b)、绿光 (c) 及天蓝光 (d) 的大面积柔性钙钛矿 LED 的电致发光照片。e. 大面积图案化的钙钛矿 LED 的电致发光照片。

以上研究得到国家自然科学基金委、科技部、中科大人才团队项目以及中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

[1] Wenjing Chen, Zongming Huang, Haitao Yao, Yan Liu, Yihan Zhang, Zhijian Li, Hongmin Zhou, Peng Xiao, Tao Chen, Haiding Sun, Jinsong Huang & Zhengguo Xiao*

Highly bright and stable single-crystal perovskite light-emitting diodes

Nature Photonics 17, 401-407, 2023

DOI: 10.1038/s41566-023-01167-3

[2] Hui Liu, Guangyi Shi, Rashid Khan, Shenglong Chu, Zongming Huang, Tongfei Shi*, Haiding Sun*, Yaping Li, Hongmin Zhou, Peng Xiao, Tao Chen* & Zhengguo Xiao*

Large-Area Flexible Perovskite Light-Emitting Diodes Enabled by Inkjet Printing

Advanced Materials 2309921, 2023

DOI: 10.1002/adma.202309921

10. 中国科大实现“九章三号”光量子计算原型机

我院潘建伟、陆朝阳、刘乃乐等组成的研究团队与中国科学院上海微系统所、国家并行计算机工程技术研究中心合作，成功构建了 255 个光子的量子计算原型机“九章三号”，再度刷新了光量子信息的技术水平和量子计算优越性的世界纪录 [PRL 131, 150601 (2023)]。科研人员设计了时空解复用的光子探测新方法，构建了高保真度的准光子数可分辨探测器，提升了光子操纵水平和量子计算复杂度。根据公开正式发表的最优经典精确采样算法，“九章三号”处理高斯玻色取样的速度比上一代“九章二号”提升一百万倍。“九章三号”在百万分之一秒时间内所处理的最高复杂度的样本，需要当前最强的超级计算机“前沿”（Frontier）花费超过二百亿年的时间。这一成果进一步巩固了我国在光量子计算领域的国际领先地位。

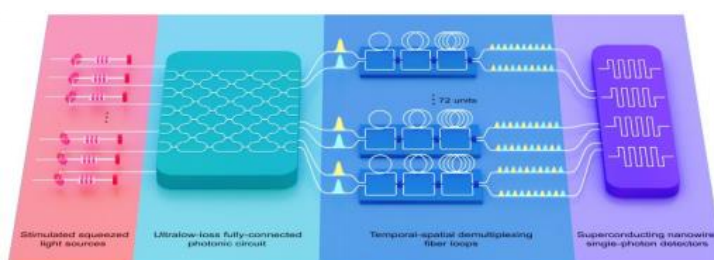


图 1：实验装置示意图

量子计算是后摩尔时代的一种新的计算范式，它在原理上具有超快的并行计算能力，可望通过特定量子算法在一些具有重大社会和经济价值的问题方面相比经典计算机实现指数级别的加速。因而，研制量子计算机是当前世界科技前沿的最大挑战之一。

为此，国际学术界制定了三步走的发展路线。其中，第一步是实现“量子计算优越性”，即通过对近百个量子比特的高精度量子调控，对特定问题的求解展现超级计算机无法比拟的算力，这标志着 40 年前 Feynman 等人的梦想成为现实。“量子计算优越性”实验还可用于检验计算科学的“扩展的丘奇—图灵论题”。同时，在此过程中，发展出可扩展的量子调控技术，为具备容错能力的通用量子计算机的研制提供技术基础。

2019 年,美国谷歌和加州大学发布了 53 比特“悬铃木”超导量子计算处理器,宣称用 200 秒求解的随机线路采样问题需要超级计算机一万年时间求解。然而,这一宣称随后受到了中国科学家的挑战,改进后的经典算法使得超算上的计算时间从一万年缩短到数十秒,快于“悬铃木”量子处理器。

2020 年,中国科大团队成功构建 76 光子的“九章”光量子计算原型机[Science 370, 1460 (2020)],首次在国际上实现光学体系的“量子计算优越性”,并克服了谷歌实验中量子优越性依赖于样本数量的漏洞。2021 年,中国科大团队进一步成功研制了 113 光子的可相位编程的“九章二号”[PRL 127, 180502 (2021)]和 56 比特的“祖冲之二号”量子计算原型机[PRL 127, 180501 (2021)],使我国成为唯一在光学和超导两种技术路线都达到了“量子计算优越性”的国家。

在这个“量子计算优越性”战略高地,国际竞争呈现出白热化。位于加拿大多伦多的 Xanadu 公司与美国国家标准与技术研究院合作,采用与“九章”光量子计算原型机相同的高斯玻色取样路线,在 2022 年发布了 216 光子的“极光”量子处理器,在国际上第二个实现了光学体系“量子计算优越性”。

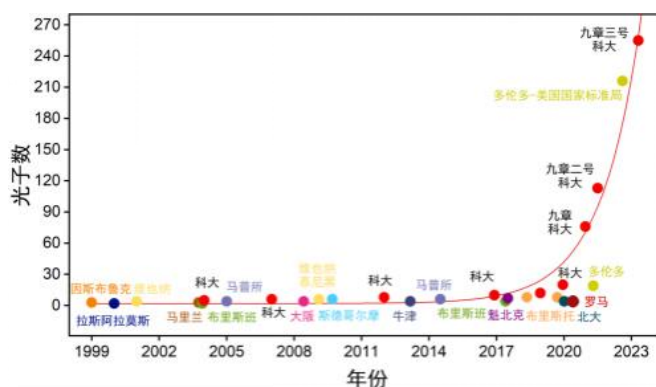


图 2: 光量子计算的国际竞争态势

中国科大团队在理论上首次发展了包含光子全同性的新理论模型,实现了更精确的理论与实验的吻合;同时,发展了完备的贝叶斯验证和关联函数验证,全面排除了所有已知的经典仿冒算法,为量子计算优越性提供了进一步数据支撑。在技术上,研制了基于光纤时间延迟环的超导纳米线探测器,把多光子态分束到不同空间模式并通过延时把空间转化为时间,实现了准光子数可分辨的探测系统。这一系列创新使得研究团队首次实现了对 255 个光子的操纵能力,极大地提升了

光量子计算的复杂度，处理高斯玻色取样的速度比“九章二号”提升了一百万倍。在激烈的国际竞争角逐中，“九章三号”的实现进一步巩固了我国在光量子计算领域的国际领先地位。

进一步，在构建“九章”系列光量子计算原型机的基础上，中国科大研究团队揭示了高斯玻色取样和图论之间的数学联系，完成对稠密子图和 Max-Haf 两类具有实用价值的图论问题的求解，相比经典计算机精确模拟的速度快 1.8 亿倍 [PRL 130, 190601 (2023)]。此外，又在国际上首次演示了无条件多光子量子精密测量优势 [PRL 130, 070801(2023)]。

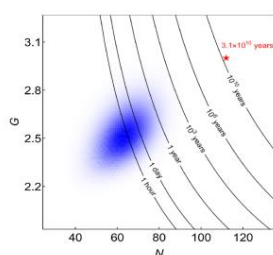


图 3：九章三号的计算复杂度需要花费超级计算机的时间。

量子计算优越性的研究是一个复杂而富有挑战性的工作，量子计算硬件与经典算法之间存在着长期竞争。研究人员期待这项工作一方面能够激发更多关于经典算法模拟的研究工作，另一方面有助于逐步解决量子计算研究中的各种科学和工程挑战。

上述项目受到了安徽省、上海市、科技部、中国科学院和基金委的支持。

Yu-Hao Deng, Yi-Chao Gu, Hua-Liang Liu, Si-Qiu Gong, Hao Su, Zhi-Jiong Zhang, Hao-Yang Tang, Meng-Hao Jia, Jia-Min Xu, Ming-Cheng Chen, Jian Qin, Li-Chao Peng, Jiarong Yan, Yi Hu, Jia Huang, Hao Li, Yuxuan Li, Yaojian Chen, Xiao Jiang, Lin Gan, Guangwen Yang, Lixing You, Li Li, Han-Sen Zhong, Hui Wang, Nai-Le Liu, Jelmer J. Renema, Chao-Yang Lu, and Jian-Wei Pan

Gaussian Boson Sampling with Pseudo-Photon-Number-Resolving Detectors and Quantum Computational Advantage

Phys. Rev. Lett. 131, 150601 – Published 10 October 2023