中国科大利用拓扑探针首次实现交错磁体原子尺度自旋成像

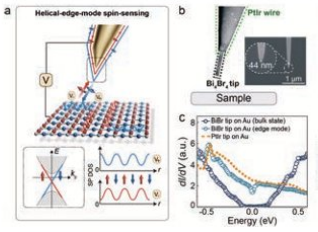


图1 基于一维螺旋边界态的原子尺度自旋探测

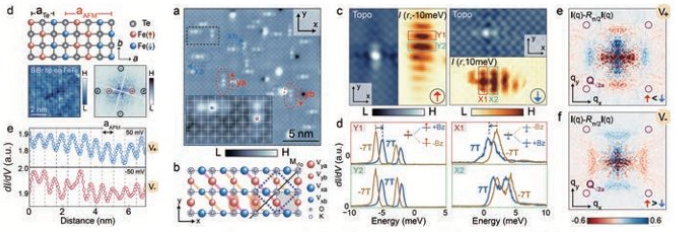


图2 KV_2Se_2O表面二维d波交错磁性的实空间与动量空间实验证据

本报讯 近日，中国科大物理学院陈仙辉教授、王震宇教授团队联合该校化学与材料科学学院向斌教授、香港科技大学刘军伟教授等合作者，将一类量子自旋霍尔绝缘体制备成扫描隧道显微探针，发展了原子尺度自旋探测的新方法。利用这一技术，研究团队实现了实空间原子成像、准粒子干涉成像和磁场响应谱学测量，为二维d波交错磁序提供了直接的实验证据。10月13日，题为“Atomic-scale spin sensing of a 2D d-wave altermagnet via helical tunneling”的研究论文，以加速文章预览（Accelerated Article Preview）形式在《自然》发表。

在原子尺度辨识自旋相关电子态，是研究量子材料中演生现象的重要手段。传统自旋分辨探针通常依赖于针尖末端的磁性原子修饰，其自旋态可能受到针尖与样品相互作用的影响，且往往需要外磁场的辅助。量子自旋霍尔体系的一维边界态具有螺旋特征：沿同一边界反向传播的电子携带相反的自旋。如果此类拓扑边界态主导量子隧穿过程，控制样品偏压的极性，进而改变隧穿电子的运动方向，原理上有可能获得不同的自旋选择性。此前，陈仙辉、王震宇团队在α－Bi_4I_4晶体的单层和双层台阶处均观测到稳定且纯净的一维螺旋边界通道，其层间杂化耦合极弱，为利用同族拓扑材料构筑边界态针尖提供了实验思路。

研究团队通过聚焦离子束微纳加工，将α－Bi_4I_4单晶制备成具有原子分辨能力的扫描隧道显微镜针尖，该探针仍呈现与螺旋边界态相符的谱学特征。为验证其自旋选择性，团队分别对Fe_yTe中的双共线反铁磁条纹和笼目磁体FeGe中的层间反铁磁序开展测量，前者的条纹对比随样品偏压极性反转，后者的层间对比则随磁场诱导的自旋重取向而显著变化。这些结果表明，边界态的自旋–动量锁定可以转化为随隧穿方向变化的自旋选择性，为原子尺度自旋探测提供了新的途径。

随后，团队将这一方法用于交错磁体候选材料KV_2Se_2O的研究。交错磁体的净磁化为零，但交换作用可以在不依赖自旋–轨道耦合的情况下产生强的能带自旋劈裂，且自旋极化随动量方向交替变化。这一特征与晶体对称性以及反向自旋子晶格密切相关。因此，如何同时辨识局域晶格结构与相关电子态的自旋特征，是验证交错磁序的关键。

在KV_2Se_2O表面，原子成像识别出具有$\sqrt{2}\times\sqrt{2}$周期的密度波调制以及两类由镜面对称联系的钒位点。对相反偏压极性的图像进行重构后，获得的实空间图案与棋盘状反铁磁序相一致。矢量磁场下的隧道谱测量发现，沿两个正交晶轴延展的准粒子激发呈现相反的能量移动，支持它们具有相反的自旋极化，并显示出以面外方向为主的磁响应。在具有动量空间分辨能力的准粒子干涉图样中，与X、Y能谷相关的两组正交散射特征具有不同强度，且其主导方向随偏压极性反转而旋转90°。非磁针尖及多类材料的对照实验进一步表明，实验所观察到的偏压反转行为难以被结构各向异性、局域应变或隧穿轨道选择性所解释，从而为d波对称性的自旋劈裂提供了坚实的实验证据。

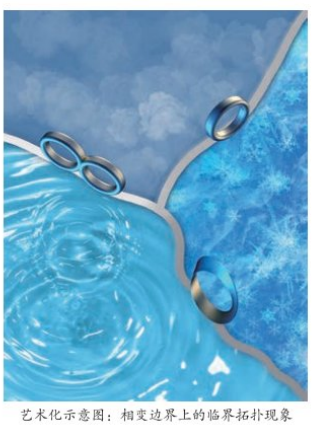
综合原子晶格结构、与反铁磁序一致的实空间图样、准粒子激发态的磁场响应和随偏压反转的动量空间散射各向异性，研究团队获得了相互印证的实验结果。结合理论分析和对比实验，所有结果支持了KV_2Se_2O表面层的二维d波交错磁序。此外，该工作展示了拓扑量子材料作为物态测量探针的潜力：拓扑边界态不仅可以被观测，还可以用于探测其他材料的自旋相关电子态。这一方法有望应用于二维磁体和莫尔材料，为研究其原子尺度自旋特征提供新的方法和技术。

中国科大博士生王竹莹、喻水康、肖晓宇和香港科技大学博士生程呈恺为共同第一作者；陈仙辉、王震宇、刘军伟和向斌教授为共同通讯作者。中国科大高阳、牛谦教授及中国科学院物理研究所王志俊研究员等也参与了相关工作。研究团队感谢中国科大李亚萍在微纳加工方面的技术支持。（物理学院 科研部）

中国科大发现临界拓扑现象

本报讯 近日，中国科大联合香港大学、东方理工大学、苏州大学在拓扑与量子物理前沿做出重大发现。中国科大蒋建华教授团队与香港大学张霄教授、东方理工大学余雪佳教授、苏州大学孔泽霖博士等合作，利用声子晶体系统首次观测到无能隙临界拓扑态，实现了从零到一的突破。该工作以“Experimental observation of critical topology”为题，于10月7日发表在《自然》上。

拓扑物理和量子物理是现代物理的关键前沿领域。二者的结合产生了拓扑物态、拓扑相变等丰富的物理现象。长期以来，人们普遍认为有限的能隙是产生拓扑物态的基本条件。近年来，一些理论提出了无能隙的临界拓扑态的概念，并预言了一些系统，可以出现传统拓扑理论无法描述的无能隙临界拓扑态。然而，这些概念和理论始终没有被实验证实，因此一直游离在主流拓扑物理之外。



艺术化示意图：相变边界上的临界拓扑现象

联合团队基于独特的声子测量方式（2024年由蒋建华教授团队提出），实现了对纠缠熵和纠缠谱的测量。由于临界拓扑态不具有能隙，传统理论和实验方法都无法测量和表征系统的拓扑性质。而纠缠谱不受是否存在能隙的限制，几乎成了表征临界拓扑态的唯一可靠方法。利用这一方法，联合团队实现了对临界拓扑态的测量和表征，并发现了拓扑导致的多临界现象（multicriticality），提升了对相变和临界现象的深刻认识。此外，之前对临界拓扑态的理论研究主要集中在一维系统中，二维及更高维的系统几乎没有研究。联合团队通过拓扑声子晶体设计，实现了二维系统的临界拓扑态，并在实验中直接观测到其存在，因此成功地将临界拓扑态扩展到了二维系统中。

值得一提的是，虽然半金属也是无能隙拓扑态，半金属的拓扑必须定义在有能隙的希尔伯特子空间中，因此和临界拓扑态存在本质的区别。此项研究明确地表明拓扑物理可以出现在无能隙的希尔伯特空间，对应的拓扑边界态构成一种连续谱中的拓扑局域态（topological BICs），在光学和声学系统中具有重要的应用价值。在基础科学层面，临界拓扑态表明量子临界点（quantum critical points）可能具有拓扑特性（简而言之，量子相变也可以具有拓扑特性），甚至可以用拓扑指标来分类量子临界点，从而深化对相变和临界现象的理解。

林志康博士、王立威博士、孔泽霖博士为论文共同第一作者，蒋建华教授、张霄教授和余雪佳教授为论文共同通讯作者，浙江大学林海青院士、香港大学周光博士等也有重要贡献。

（苏州高等研究院 科研部）

中国科大实现硫脲介导的氧杂环丁烷一步氧硫交换

本报讯 近日，中国科大张海军特任教授课题组与傅尧教授课题组合作，在四元杂环骨架精准编辑方面取得新进展。研究团队发展了一种硫脲介导的一步骨架编辑策略，实现氧杂环丁烷向硫杂环丁烷的直接转化，为优势杂环之间的高效互换和杂原子效应的快速评估提供了新的合成工具。相关成果于10月12日发表在《自然·合成》上。

氧杂环丁烷和硫杂环丁烷是现代药物化学中两类重要的四元杂环骨架，二者仅相差一个杂原子（氧与硫），却常表现出显著不同的理化性质和生物活性。然而，传统上获取这两类结构需要完全独立的合成路线，严重制约了对其构效关系的系统比较。现有氧杂环丁烷向硫杂环丁烷的转化策略依赖于预官能化编辑逻辑，需先将氧杂环丁烷转化为二溴化物中间体，再通过分子间环化引入硫原子，操作繁琐且底物适用范围受限。

针对这一挑战，研究团队提出一种机制上区别于现有方法的直接杂原子交换策略。该策略以硫脲作为硫转移试剂，在路易斯酸催化下通过“开环–重排–关环”的级联过程，一步完成氧杂环丁烷向硫杂环丁烷的转化，无需任何预官能化步骤。与现有方法相比，该策略操作简便，具有广泛的底物适用范围和优异的官能团兼容性，成功应用于多种复杂生物活性分子的后期骨架编辑。团队还通过系统的实验机理验证结合DFT计算，充分阐明了这一级联过程的反应路径。

论文共同第一作者为中国科大硕士生罗立科、特任副研究员刘德光，通讯作者为傅尧教授、张海军特任教授。

（精准智能化学全国重点实验室 化学与材料科学学院 科研部）

中国科大在《自然综述·化学》发表锂介导合成氨综述文章

本报讯 近日，中国科大化学与材料科学学院、精准智能化学全国重点实验室李少锋特任教授团队在《自然综述·化学》在线发表综述文章。文章聚焦锂介导氮还原反应（Li–NRR）中的固体电解质界面（SEI），系统总结了SEI形成、动态演变及其功能，并提出融合工况/原位与多尺度非原位表征的研究框架，为深入理解和精准调控锂介导合成氨过程中的动态反应界面提供了新的思路。

该综述从时间和空间两个维度系统梳理了适用于Li–NRR界面研究的先进表征方法，重点讨论如何将工况/原位动态观测、多尺度结构分析与定量产物检测相结合，从而建立SEI结构、界面反应过程与合成氨性能之间的构效关系。

文章系统总结了掠入射X射线散射、拉曼光谱、傅里叶变换红外光谱、中子反射以及工况电化学质谱等动态表征技术，并结合冷冻电子显微镜、飞行时间二次离子质谱、X射线光电子能谱及滴定分析等多尺度分析手段，讨论了不同技术在解析SEI组成、空间分布、动态演变以及反应产物来源等方面的优势与局限。通过不同时间尺度和空间尺度表征手段的协同，可更加全面地揭示Li–NRR过程中SEI的形成与演变规律，并进一步理解其对反应选择性和稳定性的影响。

文章进一步指出，未来Li–NRR界面研究需要由“观察和表征界面”逐步走向“理解并可预测地设计界面”。这需要发展具有更高时间和空间分辨率的工况表征技术，建立可量化、可比较的SEI结构与功能构效关系，并将界面化学与电解液、电极和反应器设计相结合，从而为高效、稳定及规模化的锂介导合成氨提供理论基础和研究工具。

中国科大硕士生石硕奇和北京化工大学博士生王震昊为论文的共同第一作者，中国科大李少锋特任教授、丹麦科技大学IbChorkendorff教授、中国科大/安徽工业大学曾杰教授、北京化工大学邱介山教授为共同通讯作者。

（化学与材料科学学院 精准智能化学全国重点实验室 科研部）

中国科大实现离子阱量子存储器和光纤网络的高效互联

本报讯 中国科大潘建伟、张强等与济南量子技术研究院郑名扬等，在紫外波段离子阱存储器和通信光纤的高效量子互联方面取得重要进展。研究团队成功实现393nm至1550nm的高效率、低噪声量子频率转换（QFC，Quantum Frequency Conversion），刷新了该波段量子频率转换效率与噪声水平的国际纪录，为可扩展量子网络中因禁离子节点的远程互连提供了关键技术。10月13日，相关成果发表在《物理评论快报》上。

研究团队从准相位匹配底层原理出发，一方面建立畴缺陷相位扰动致效率下降的定量理论模型，并通过定量分析验证理论模型。另一方面，团队揭示了短波长泵浦下QFC过程与泵浦光自发参量下转换（SPDC）噪声过程的反向调谐特性，据此提出短波泵浦SPDC噪声抑制方法，实现对泵浦光噪声的大幅抑制。基于以上创新方法，团队构建了393nm至1550nm的高效率低噪声QFC模块，端到端效率达28.8%，泵浦光噪声抑制至35个/秒。与此前研究工作相比，效率提升约30倍，噪声降低逾两个数量级，创造了该波段量子频率转换的新纪录。

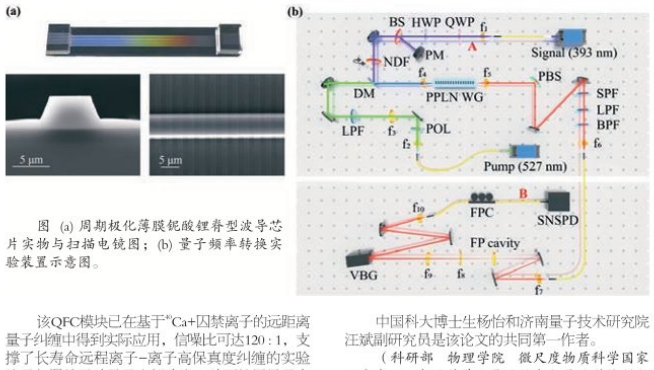


图 (a) 周期极化薄膜铌酸锂脊型波导芯片实物与扫描电镜图；(b) 量子频率转换实验装置示意图。

该QFC模块已在基于$^{40}Ca^+$因禁离子的远距离量子纠缠中得到实际应用，信噪比可达120∶1，支撑了长寿命远程离子–离子高保真度纠缠的实验演示与器件无关量子密钥分发，为可扩展量子中继和广域量子网络奠定了关键器件基础。

中国科大博士生杨怡和济南量子技术研究院汪斌副研究员是该论文的共同第一作者。

（科研部 物理学院 微尺度物质科学国家研究中心 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院）

中国科大揭示人类如何重塑北半球地表侵蚀过程

本报讯 近日，中国科大地球和空间科学学院周鑫教授课题组基于北半球213个湖泊沉积记录，采用统一方法进行校正，并定量重建了全新世（约11,700年以来，即约11.7 ka）土壤侵蚀的演变过程，揭示了气候与人类活动在塑造地表过程中的角色转换。该研究成果发表在《地球科学评论》上，为理解人类世地表过程转型提供了关键定量证据。

本研究基于流域–湖泊物质平衡原理，综合考虑湖泊面积、沉积物压实作用、外源物质比例等变化参数，将湖泊中保存的沉积物反演为流域尺度的土壤侵蚀速率，有效降低了以沉积速率作为代用指标所带来的不确定性，重建了更可靠的侵蚀速率序列。

在此基础上，研究团队引入可解释机器学习模型（XGBoost–SHAP），系统分析了土壤侵蚀对气候变化和人类活动的响应。研究团队发现，在自然状态下，全新世土壤侵蚀与自然环境变化表现出紧密耦合：亚洲季风增强期对应侵蚀增强，季风减弱期侵蚀相应减弱；欧洲植被覆盖度增加期侵蚀降低，植被退化期侵蚀加剧。在人类扰动区，土壤侵蚀变化在晚全新世开始快速增强。研究识别出人类活动对欧洲、亚洲和北美洲土壤侵蚀产生显著影响的起始时间分别为3.4 ka、3.1 ka和0.4 ka，这一时间序列与全球不同区域农业发展和土地开垦的历史高度吻合。定量计算显示，3.0 ka以来，人类活动使欧洲和亚洲的土壤侵蚀强度分别较自然背景值增加了73.1%和117.6%。机器学习分析进一步证实，在人为扰动区，人为土地覆盖变化已取代气候成为控制侵蚀变化的首要因子；而在自然区，降水或气温仍是主导因素。

该研究首次定量重建了北半球尺度上全新世土壤侵蚀的变化过程，揭示了人类活动已成为不同区域土壤侵蚀增强的主导力量。研究指出，重建的自然背景侵蚀速率可为现代水土保持提供参考基线，有助于区分自然侵蚀与人为加速侵蚀，为制定科学合理的土壤流失阈值提供历史依据。研究同时强调，未来应进一步将过程模型与湖泊沉积记录相结合，以更精细地重建流域尺度上“侵蚀–输移–沉积”的完整过程，为评估气候变化与人类活动背景下的未来侵蚀风险提供更可靠的科学支撑。

中国科大地球和空间科学学院博士后赵宏飞为本论文第一作者，周鑫教授为通讯作者，合作者包括华东师范大学何洪鸣教授等。

（地球和空间科学学院 科研部）