

超材料前沿研究一周精选



2026 年 7 月 13 日-2026 年 7 月 19 日

索引:

- 1、截断光子
- 2、分形层次结构实现拓扑边界态的指数级扩展
- 3、非谐性驱动的声子粒子性到波动性传播转变导致 Tl_2AgI_3 中的超低热导率
- 4、异常热流与具有不确定因果顺序的量子奥托热机
- 5、具有广泛可重编程形变能力的数字智能超表面
- 6、交互式可寻址有机超器件
- 7、扭转双层 MoTe_2 中的分数拓扑绝缘体候选态
- 8、三聚体钨酸盐 $\text{Ba}_4\text{Ru}_3\text{O}_{10}$ 中的隐藏密度波不稳定性

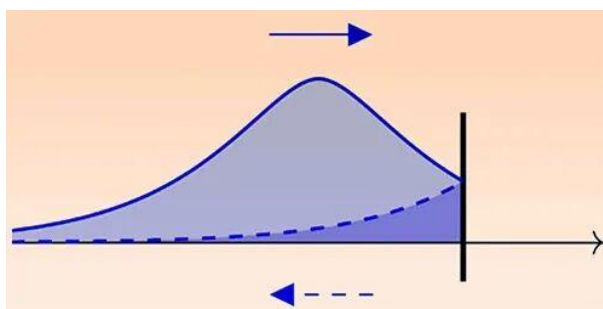
1、截断光子

光子作为基本粒子，无法被精确地分割成两半。然而，对于具有有限时间宽度的光脉冲，我们显然可以利用光学快门、快速调制器或动态边界等手段，对其时域波形进行截取。那么，当单光子波包被突然“截断”时，最终形成的究竟是怎样的量子态？这个看似简单的问题，长期以来却未得到系统回答。它不仅涉及单光子波包能否具有严格局域化的边缘，还关系到量子场论中局域态、因果性以及局域等效性等基本概念。

近日，挪威奥斯陆大学 Johannes Skaar 教授团队从量子场论出发，研究了单光子波包在反射过程中遭遇反射镜突然消失时的演化。研究人员设想，一个具有单一波峰的单光子波包由左向右传播并抵达反射镜。当波包的前沿已经被反射并开始向左传播，而其后续尚未到达镜面时，反射镜被迅速移除。按照经典波动图像，人们或许会认为，原始波包将被直接截断：已经反射的部分向左传播，尚未到达镜面的部分则继续向右传播。按照朴素的量子力学图像，也可能将其理解为光子处于向左传播与向右传播两种状态的叠加。然而，研究团队发现，量子场论给出的结果更为奇特：具有清晰截断边缘的波形一般不能由一个单光子态形成，而必须由包含不同光子数成分的多光子叠加态来描述。波形边缘越陡峭、越接近理想的瞬时截断，所涉及的高光子数成分就越显著。研究人员利用所谓的博戈留波夫变换对这一现象进行了建模；该变换源于移除反射镜后量子场模式随时间发生的改变。这种移除操作会对量子场产生作用力，从而从真空中提取出适量光子以形成足够清晰的边缘结构。若移除过程瞬时完成，预期光子数将趋于无穷大；但对于实验中可实现的缓慢移除场景，光子数则较为有限。该研究并不是简单地将单

光子波包分成两个部分，而是一个由动态边界、真空涨落和多光子产生共同参与的量子场演化过程。

相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上，并被选为 Featured in Physics。
(金梦成)



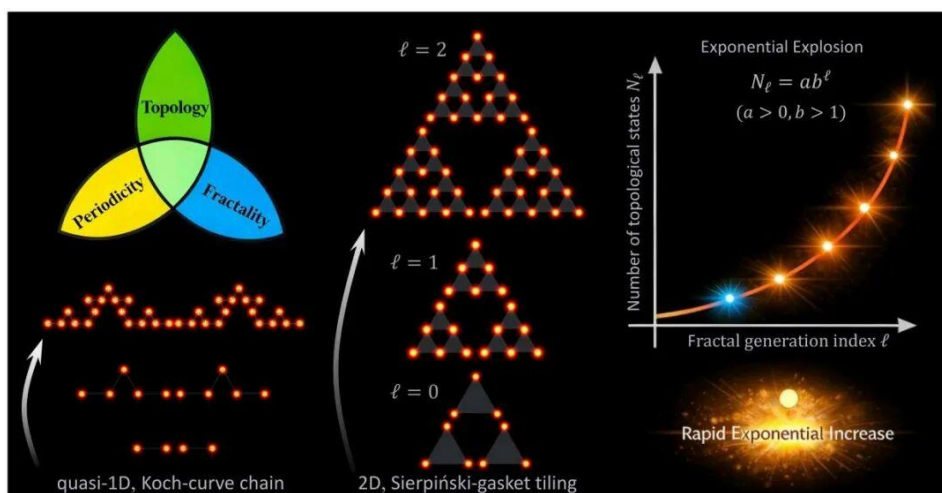
文章链接: <https://doi.org/10.1103/dc6l-zt6w>

2、分形层次结构实现拓扑边界态的指数级扩展

拓扑物态为实现抗缺陷的光传输、拓扑激光和高阶拓扑器件提供了重要基础。在传统周期晶格中，平移对称性使研究人员能够利用能带理论和体-边对应关系预测拓扑边缘态或角态，但简单晶胞所能支持的拓扑边界态数量通常较少且相对固定。另一方面，分形晶格具有自相似结构和丰富的层级特征，能够产生反常 Floquet 拓扑态、分形高阶拓扑态以及特殊的输运和局域化现象；然而，严格分形结构通常缺乏平移对称性和明确的体区，使布里渊区、能带拓扑以及常规体-边对应关系难以直接建立。如何在保留分形层级特征的同时恢复周期性，并进一步利用这种层级结构系统调控拓扑边界态的数量，是分形拓扑物理和拓扑光子学中的一个重要问题。

近日，南开大学 Hrvoje Buljan 教授和陈志刚教授团队构建了一类兼具周期长程有序和分形自相似层级的光子晶格，将不同代数的 Koch-curve 和 Sierpiński-gasket 分别作为准一维链和二维平铺晶格的周期晶胞。研究发现，在适当耦合参数下随着分形代数增加，晶胞内部可形成越来越多彼此独立的拓扑通道，使拓扑小带隙数量和拓扑边缘态或角态数量呈指数增长；边界态总数与拓扑小带隙数之间满足由反演对称性或三重旋转对称性决定的整数倍关系。研究团队利用多拓扑相理论对这些边界态进行了逐一计数，并在激光写入光子晶格中选择性激发和观测了不同带隙中的拓扑边缘态与高阶拓扑角态。该工作表明，分形层级不仅能够产生复杂的几何结构，还可作为设计多带隙、多边界态拓扑谱的有效工具，为在光子、声学、电路及合成维度平台中实现大规模、可编程的拓扑模式调控提供了新的思路。

相关内容发表于《Nature Communications》上。(金梦成)



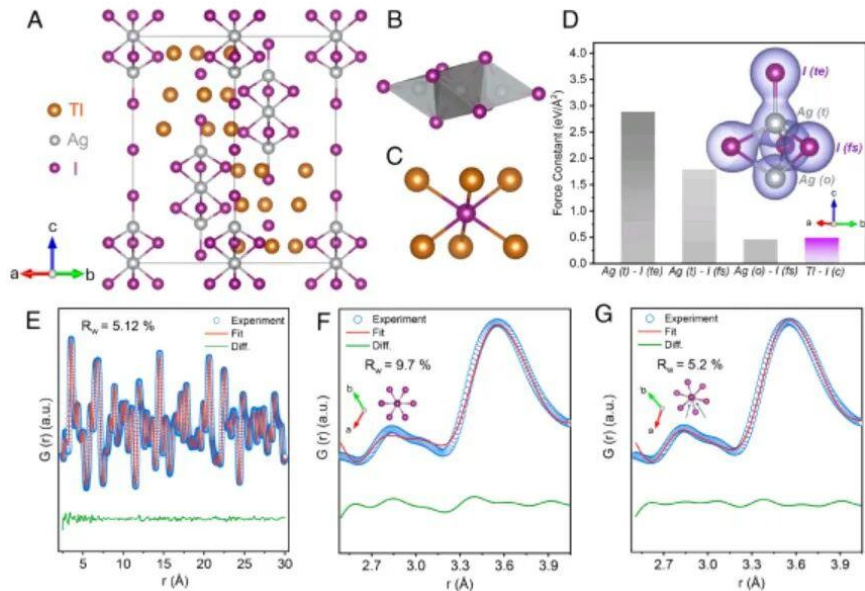
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-75412-y>

3、非谐性驱动的声音粒子性到波动性传播转变导致 Tl₂AgI₃ 中的超低热导率

近年来，随着人工智能芯片、航天器件、热电能源转换和极端环境电子器件的快速发展，人们对超低热导率材料的需求日益迫切。材料的导热能力主要由晶格振动（声子）决定，传统理论认为，在晶体中，声子通常像“粒子”一样携带热量并传播；而在玻璃等无序材料中，由于结构高度无序，声子无法自由传播，只能依靠局域振动之间的“波动耦合”传递能量。因此，晶体对应“粒子型”导热，玻璃对应“波动型”导热，一直是热输运领域的经典认知。然而，近年来越来越多研究发现，一些具有超低热导率的晶体既不像理想晶体，也不像传统玻璃，而是处于两者之间的特殊状态，其导热机制远比经典声子气体模型复杂。如何在保持晶体有序结构的同时，实现类似玻璃的极低热导率，并揭示其中声子输运机制的转变规律，已经成为热输运研究领域最具挑战性的前沿科学问题之一。这不仅关系到新一代热电材料、隔热材料的发展，也有助于建立统一描述晶体与无序体系热输运的新理论框架。

近日，印度贾瓦哈拉尔·尼赫鲁先进科学研究中心 Kanishka Biswas 教授团队设计并合成了一种零维金属卤化物 Tl₂ AgI₃，通过同步辐射 X 射线对分布函数（X-PDF）、拉曼光谱、低温热输运测试、第一性原理计算、分子动力学（AIMD）以及线性化 Wigner 输运理论（LWTE）等实验与理论相结合的方法，系统揭示了其异常热输运机制。研究发现，该材料由孤立的 (Tl₆ I)⁵⁺ 和 (Ag₃ I₈)⁵⁻ 结构单元组成，面共享多面体引起的阳离子排斥满足 Pauling 第三定律，从而诱导 Ag 原子产生局域动态畸变，而 Tl 原子则表现出强烈的“rattling（摇摆）”振动。这两种局域结构动力学共同产生大量低频非谐光学声子，并与声学声子发生强烈杂化，显著增强声子散射，使材料室温晶格热导率降至约 0.18 W · m⁻¹ · K⁻¹，达到目前已报道无机卤化物中的最低水平之一。更重要的是，研究团队发现随着温度升高，Tl₂ AgI₃ 中的声子平均自由程不断缩短，当跨越 Ioffe - Regel 极限后，热输运机制由传统的“粒子型声子传播”逐渐转变为“波动型声子相干隧穿”，并在约 175 K 发生粒子—波动转变，这是晶体材料中极为罕见且获得实验验证的现象。LWTE 计算准确再现了实验结果，证实高温下相干热导率

逐渐超过粒子热导率，经典声子气体模型失效，而波动相干成为主导热输运机制。该工作首次从晶体结构设计角度揭示了零维结构约束、局域非谐振动与声子局域化协同驱动粒子—波动声子跨越的物理图像，为设计兼具晶体有序性和玻璃态超低热导率的新型热绝缘材料提供了全新的理论基础和材料设计策略。相关内容发表于《Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1073/pnas.2521353123>

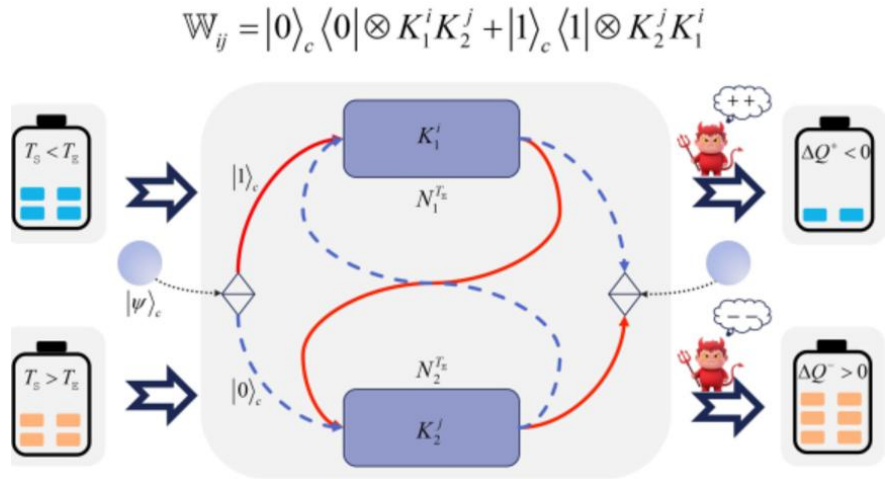
4、异常热流与具有不确定因果顺序的量子奥托热机

经典热力学认为，热量总是自发地从高温物体流向低温物体，这一规律构成了热机、制冷机等各种能量转换装置的理论基础。然而，在微观量子体系中，量子叠加、量子相干和量子测量等效应使热传输呈现出与经典世界截然不同的特性。其中，“不定因果序（Indefinite Causal Order, ICO）”近年来受到广泛关注。传统物理过程中，不同事件的发生顺序是确定的，而在量子世界中，两个过程的先后顺序可以处于量子叠加态，即事件“A先于B”和“B先于A”能够同时存在，这种现象通常通过量子开关（Quantum Switch）实现。近年来，研究人员进一步将这一概念引入量子热力学，希望借助因果序叠加突破传统热力学极限，实现更加高效的量子热机和量子制冷。

近日，曲阜师范大学满忠晓教授联合意大利巴勒莫大学 Rosario Lo Franco 教授、香港大学 Giulio Chiribella 教授团队提出，当两个热化过程以量子开关实现的不定因果序作用于一个量子体系时，即使体系初始温度高于两个热源，也能够从低温热源中吸收热量，实现违反经典直觉的反常热流（Anomalous Heat Flow）。基于这一发现，研究人员进一步设计了一种全新的量子 Otto 循环，使热机能够一边输出机械功，一边完成制冷，突破了传统 Otto 循环只能充当热机或制冷机单一角色的限制。理论分析表明，这种异常现象来源于量子相干控制下热化过程之间的干涉效应，而不会违反热力学第二定律。更重要的是，研究团队进一步证明，这种反常热流并非不定因果序独有，而是可以通过一种具有确定因果序的等效量子线路完全复现，从而澄清了近年来关于“不定因果序能够赋予热机本质热

力学优势”的争议，为量子热力学领域建立了更加清晰的理论框架。在实验方面，团队搭建了基于自由空间光学平台的量子开关系统，以光子的偏振和路径自由度分别编码工作体系和控制比特，成功模拟了反常热流及新型量子 Otto 循环，实验结果与理论预测高度一致。该工作首次系统揭示了反常热流、量子热机和因果序之间的内在联系，不仅深化了人们对量子热力学基本规律的认识，也为未来利用量子相干调控能量流动、设计新型量子热机和量子制冷器提供了重要理论基础，同时展示了量子开关在自由空间光学实验平台上的独特实现优势，为量子信息与量子能量技术的融合发展开辟了新的研究方向。

相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



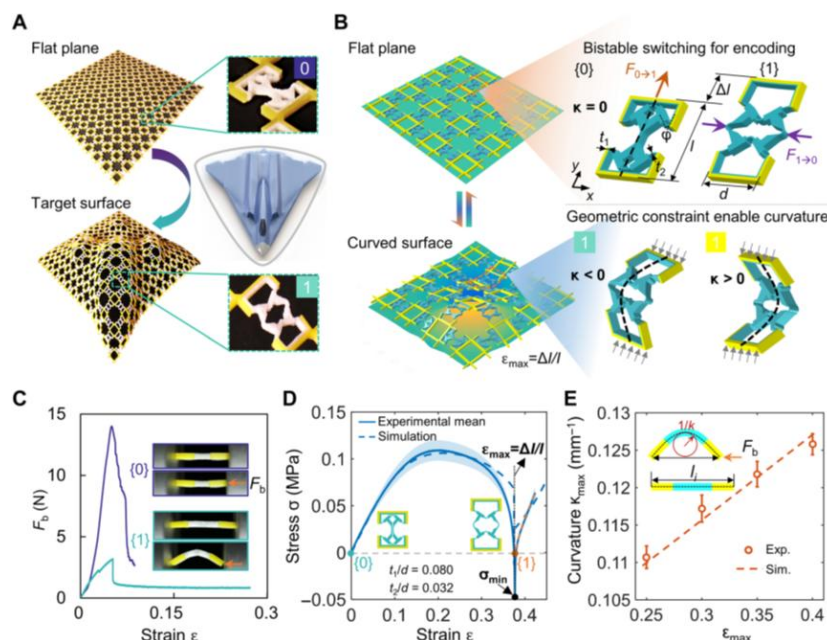
文章链接：<https://doi.org/10.1103/sx1m-pdhz>

5、具有广泛可重编程形变能力的数字智能超表面

表面形变能够动态调控依赖几何形状的物理功能，是航空结构、软体机器人以及可重构机械、光学、生物医学、热学和电学界面的重要基础。许多应用不仅要求大幅或连续变形，还需要在大量不同形貌之间快速、精确切换，以实现气动、力学及波—物质相互作用的确定性调控。然而，传统一体成形、增材制造和离散单元组装方法通常存在可实现形态有限、响应缓慢或单元间耦合强等问题。智能材料与外场驱动虽可产生复杂三维形貌，但其微结构通常在制造时固定，且材料本构、微结构演化与外场分布之间存在复杂非线性耦合，使控制输入与目标形貌之间缺乏直接映射。双稳态或多稳态单元具有可切换且稳定的构型，为数字编码形变提供了基础，但现有结构仍面临相邻单元耦合、初始构型非平面及缺乏自锁等限制。因此，实现单元独立切换、数字状态与表面形貌确定性映射以及稳定锁定，是大规模可编程表面形变的核心挑战。

近日，西安交通大学刘益伦教授、覃华松副教授团队，提出一种可重编程的数字智能超表面，将数字智能范式引入表面重构领域。该超表面由双稳态单元组成的晶格构成，单元通过数字编码在不同稳定状态之间发生突跳转换，从而产生局域本征应变场；这些应变场与晶格整体的运动学相容性共同作用，可塑造复杂且可重编程的三维形貌。首先，作者阐明了曲率产生与保持的力学机制，并定量分析结构参数如何调控局部形状。随后，作者证明，可实现表面的复杂度和多样性会随单元数量呈指数增长，从而体现该数字智能超表面广泛的可重编程能力。此外，引入条件生成对抗网络（cGAN），建立机器学习辅助的逆向设计框架，实现从目

标表面形貌到数字状态编码的自动映射。最后，作者揭示了“形貌—力学—功能”之间的耦合关系：通过曲率编程，可同时调节结构刚度和承载能力，从而拓展至辅助医疗器械、可变形飞机机翼等应用。该工作构建了一种基于数字编码和力学驱动的数字智能材料平台，为智能可编程表面的实际实现提供了新的技术路径。相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



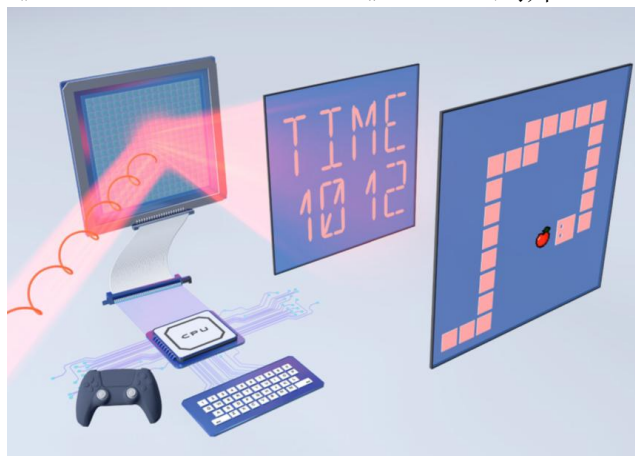
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aef3895>

6、交互式可寻址有机超器件

超表面能够利用超薄亚波长结构调控光的振幅、相位和偏振，是实现紧凑型光场控制的重要平台。随着动态显示、波束调控和可编程光学的发展，超表面正由静态器件向主动可寻址超器件转变。现有液晶、氧化铟锡及外部空间光调制器等方案已实现一定程度的动态调控，但一维电寻址限制了独立像素数量、阵列扩展性及复杂光场所需的空间自由度；外部混合调制系统也不利于紧凑化和片上集成。有机导电聚合物可通过低电压氧化还原反应，对折射率和吸收进行大幅、可逆调制，并能共形包覆纳米天线，减少液晶体系中的像素串扰。然而，已有导电聚合物超表面多局限于近红外波段或一维寻址，因此，可见光波段高密度、像素级独立控制的二维有机超表面仍是亟待解决的问题。

近日，斯图加特大学的刘娜教授团队，展示了一种工作于可见光波段的二维交互式可寻址有机超器件。通过将超薄聚苯胺（PANI）局部集成到等离激元纳米天线上，构建了以二维阵列排布、可独立切换的电光超表面像素。每个像素均通过平面化的氧化铟锡（ITO）扇出电极网络实现独立寻址，从而简化电路布线并有利于器件集成。该超器件能够在亚伏工作电压下实现毫秒量级的切换，同时具有可忽略的电串扰以及阵列范围内均匀的电化学响应。通过将其集成到闭环电子反馈系统中，该平台可把用户输入转换为像素级驱动信号，从而实现实时交互式全息操作。基于这一架构，作者进一步展示了系统级可编程功能，包括实时字符显示和交互式全息游戏。这项为实现完全可寻址的二维有机超光学器件提供了一条有前景的技术路径，并为紧凑型、用户交互式光子系统的发展奠定了基础。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-75757-4>

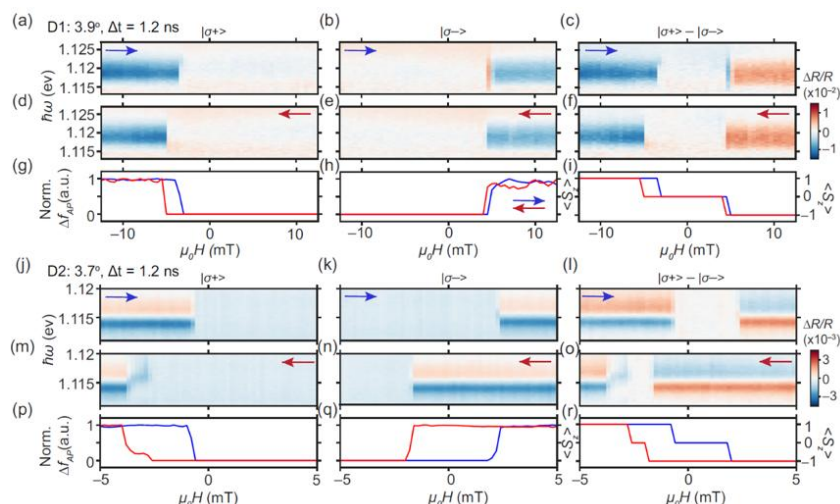
7、扭转双层 MoTe₂ 中的分数拓扑绝缘体候选态

分数陈绝缘体（fractional Chern insulator, FCI）及其所对应的分数量子反常霍尔效应，近年来在扭转双层 MoTe₂ 等莫尔体系中得到实验发现，这是拓扑量子物态研究领域的重要进展，同时也实现了无需外加磁场即可获得的分数量子霍尔晶格模型。在这类体系中，拓扑性质与强电子关联协同作用，使得部分填充的平坦陈带能够自发破坏时间反演对称性（time-reversal symmetry, TRS），并解除谷简并。对于扭转双层 MoTe₂ 的第一陈带，TRS 自发破缺发生在空穴填充范围 $-1.3 < \nu < -0.4$ 内。值得关注的是，在非磁性区与磁性区的边界处，实验上观测到 $\nu = -4/3$ 关联态，其填充数恰好为最稳定的 $\nu = -2/3$ FCI 的两倍。理论上，两个分别位于相反 K 谷、具有相反手性的 $\nu = -2/3$ FCI 可组成保持 TRS 的分数拓扑绝缘体（fractional topological insulator, FTI），但计算同时表明该态较为脆弱。 $\nu = -4/3$ 态的磁响应及其可能的 FTI 性质成为目前实验和理论研究关注的方向。

近日，哥伦比亚大学的朱晓阳教授课题组利用圆二色性（circular dichroism, CD）瞬态反射谱研究了不同扭转角的双栅扭转双层 MoTe₂ 器件，发现 $\nu = -4/3$ 关联态具有异常的 Ising 反铁磁行为，其磁性特征与 FTI 候选态一致。在零磁场下， $\nu = -4/3$ 处的 CD 信号为零，表明该态不存在净磁化；施加 -6mT 的面外磁场后，仅一种圆偏振探测下出现显著吸引极化子共振，说明空穴转变为谷极化分布。进一步磁场扫描显示，在扭转角为 3.9° 和 3.7° 的器件中，该体系依次经历 K-谷极化、K+与 K-谷等占据以及 K+谷极化三个状态。状态之间的转变发生在约 $2\text{--}6\text{mT}$ 的极低磁场下，并伴随突变和磁滞，说明其为一级相变。该行为未出现在其他关联填充态中，体现出明显的扭转角选择性。相互作用连续模型的精确对角化

（exact diagonalization）计算进一步表明，非极化态与部分谷极化态之间的能量差小于 1meV ，解释了极弱磁场即可驱动相变的原因。综上，该团队实验发现了一个保持 TRS 的 FTI 候选态，但其最终确认仍需先进输运与成像测量建立量子化螺旋边缘模式。该工作为在莫尔平坦陈带中寻找 FTI 提供了新的实验依据，也明确了后续实验需关注的主要问题。

相关工作发表于《PHYSICAL REVIEW X》上。（侯玥盈）

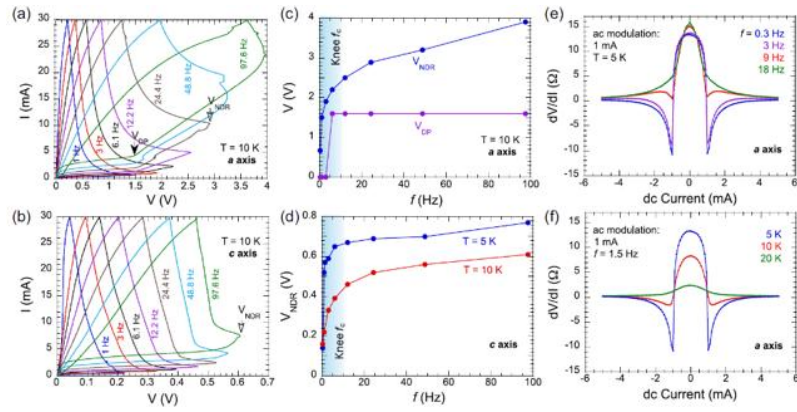
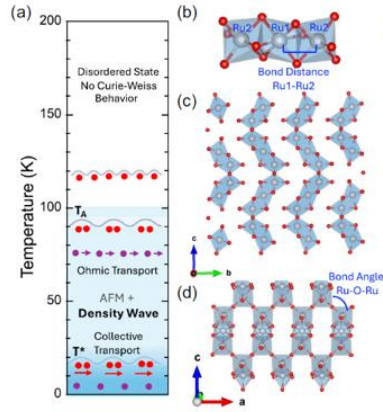


文章链接: <https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/bvrb-z4hj>

8、三聚体钌酸盐 Ba₄Ru₃O₁₀ 中的隐藏密度波不稳定性

集体电荷密度波 (charge density wave, CDW) 是电子自组织的一种重要形式, 通常出现在低维、弱关联材料中。相比之下, 强关联过渡金属氧化物更倾向于形成磁性或莫特局域化, 因此, 在其中实现滑动集体电荷运输的实例极为少见。在强关联氧化物中寻找密度波类不稳定性, 有助于深入理解电子重构与磁性之间的相互交织。三聚体钌酸盐 Ba₄Ru₃O₁₀ 此前主要被视为反铁磁绝缘体, μ 子自旋旋转和中子散射实验已证明其在约 105 K 以下形成低自旋 $S=1$ 的反铁磁有序。然而, 该体系的磁转变温度对磁场不敏感, 并且低温下存在纯磁性模型无法解释的非线性输运行为。因此, Ba₄Ru₃O₁₀ 中的电子、结构和输运响应, 成为研究隐藏在反铁磁相中的密度波不稳定性的的重要手段。

近日, 科罗拉多大学博尔德分校的曹刚教授课题组结合结构表征、磁化率、磁化强度、热容以及温度、方向和频率依赖的电输运测量, 研究 Ba₄Ru₃O₁₀ 并发现了一个与反铁磁共存、具有强钉扎集体电子模式的隐藏密度波不稳定性。该不稳定性分两个阶段发展: 在 $T_A=100$ K 附近, 晶胞体积、Ru-Ru 原子间距离和 Ru-O-Ru 键角均出现异常, 磁化率、热容和电阻率也发生变化, 但 T_A 在 14 T 磁场下仍保持不变, 证明该转变是与晶格耦合的部分电子重构, 而非单纯的自旋驱动有序。温度低于 $T^* \sim 20$ K 时, 电阻率对电流高度敏感, 电流-电压 (I-V) 曲线同时出现明确的去钉扎阈值和负微分电阻 (negative differential resistance, NDR) 阈值, 且具有显著的方向与频率依赖, 表明集体模式受到异常强烈的钉扎。由于 T^* 附近没有新的热容或磁化率异常, 它代表了集体输运显现的交叉温度, 而非相变过程。此外, 仅 3% 的 Ir 替代 Ru 即可使所有非线性特征消失, 进一步证明其内禀且脆弱的电子起源。该工作表明, Ba₄Ru₃O₁₀ 是一种罕见的强关联体系, 其中存在一种与反铁磁性相互交织的、被强钉扎的集体电子模式。相关工作发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。(侯玥盈)



文章链接: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/ntfh-mk9d>
 (来源: 两江科技评论)