

超材料前沿研究一周精选



2026年6月8日-2026年6月14日

索引:

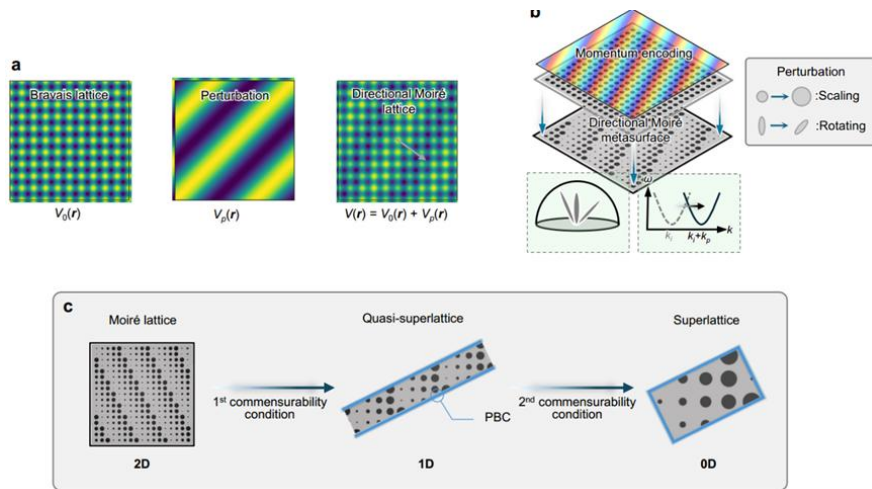
- 1、揭示动量编码超表面中隐藏的周期性
- 2、非互易相互作用的哈密顿描述
- 3、一维 Floquet 系统中五种局域化相的实验观测
- 4、阴离子孤对电子对最小晶格热导率的贡献
- 5、斯格明子晶格中位错的拓扑转变与弹性涌现：超越基特尔磁极类比
- 6、GaSe 中的范德华应变硬化和极大均匀伸长率

1、揭示动量编码超表面中隐藏的周期性

超表面是一类由亚波长人工结构单元组成的平面光学器件，能够在极薄尺度上调控光与物质的相互作用，并已广泛用于聚焦、全息成像、波束整形和复杂波前控制等领域。在传统理解中，超表面晶格既可以作为局域采样平台，将目标振幅或相位分布记录在每一个超原子上，也可以作为非局域耦合网络，通过晶格对称性支持布拉格散射、能带拓扑、连续谱束缚态以及谷选择效应等现象。然而，当空间变化的相位或几何扰动被用于编码面内动量时，编码周期和方向通常与底层晶格不匹配，使结构表现出全局非周期性。这种非周期特征使得结构虽然在局部保持一定规律性，但整体上难以定义统一且可计算的周期单元，因此常需依赖局域周期近似或极简化的整数倍超胞，限制了复杂动量编码超表面的严格分析和高效设计。

近日，韩国浦项工科大学的 Junsuk Rho 教授研究团队提出了一种通用几何框架，将动量编码超表面重新理解为由二维布拉菲晶格与一维周期扰动叠加形成的“方向性莫尔晶格”。通过引入角度匹配和长度匹配两步可公度条件，该研究揭示了看似非周期结构中隐藏的平移周期性，并将其压缩为紧凑的周期超晶格单元。基于这一超胞描述，原本连续而复杂的辐射通道可被离散为明确的衍射级次，从而区分目标衍射、零级透射、混叠通道和杂散通道。该方法不仅在局域相位梯度超表面中给出了与二维采样理论一致的动量分辨衍射结果，也被推广到具有自旋依赖 Rashba 动量的非局域光子晶体板，精确识别其超晶格条件和谷可寻址特性。进一步的纳米制备与角分辨圆二色性测量验证了谷模式在动量空间中的可控重定位。该研究为动量编码超表面的分析提供了无需近似的周期化钥匙，使复杂结构转化为可计算、可分类、可设计的超晶格平台，并为光学、声学、电子学和机械超材料中的莫尔物理与可编程波调控提供了新的设计范式。

该文章发表在《Nature Communications》。（刘梦洋）



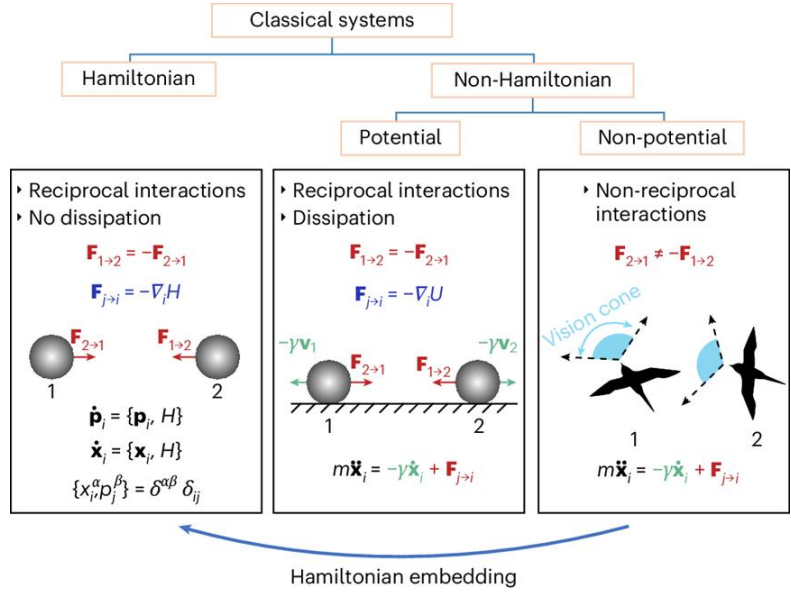
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-74150-5>

2、非互易相互作用的哈密顿描述

在许多物理与生物系统中，个体间的相互作用无法由单一的两体势能函数导出，且普遍不满足牛顿第三定律，即具有非互易性。典型的例子包括流体中沉降颗粒的流体动力学相互作用、活性胶体通过化学浓度场的耦合，以及鸟群、鱼群基于“视觉锥”的集体运动。在这类系统中，A 对 B 的作用力与 B 对 A 的作用力既大小不相等方向也不相反，因此无法定义一个全局的、与路径无关的势能函数。这导致传统的统计力学方法（如蒙特卡洛模拟）和基于辛结构的哈密顿动力学方法（如正则变换）难以直接应用。

近日，德国马克斯-普朗克复杂系统物理研究所的 Ricard Alert 教授、Marin Bukov 教授及其合作者，提出了一种通过构建约束哈密顿嵌入来描述非互易相互作用的通用框架。具体而言，研究者为原始系统的每个自由度引入一个辅助自由度，并设计了一个互易的、具有辛结构的哈密顿量。通过施加一个在动力学下自动保持的镜像约束（例如，要求辅助自旋与原始自旋始终反向），该哈密顿量产生的动力学能够精确重现原始的非互易朗之万方程。团队以具有视锥相互作用的耗散 XY 自旋模型为例，验证了该框架的有效性。结果表明，基于该约束哈密顿量设计的蒙特卡洛模拟，无论是系统达到的非平衡稳态，还是呈现出持续振荡的非稳态行为，均与原始朗之万动力学的模拟结果高度一致。更重要的是，该构造所引入的辛结构使研究者能够将哈密顿量工程的成熟方法拓展至非互易系统：通过调节周期性（弗洛凯）驱动的振幅，团队成功实现了对方形晶格中自旋相互作用各向异性调控，可在特定驱动参数下有效抑制某一方向上的相互作用，从而实现从二维晶格到一维链的维度交叉。总体而言，该研究为将统计力学与哈密顿动力学拓展至非互易系统开辟了新途径。

该研究发表于《Nature Physics》。（金梦成）



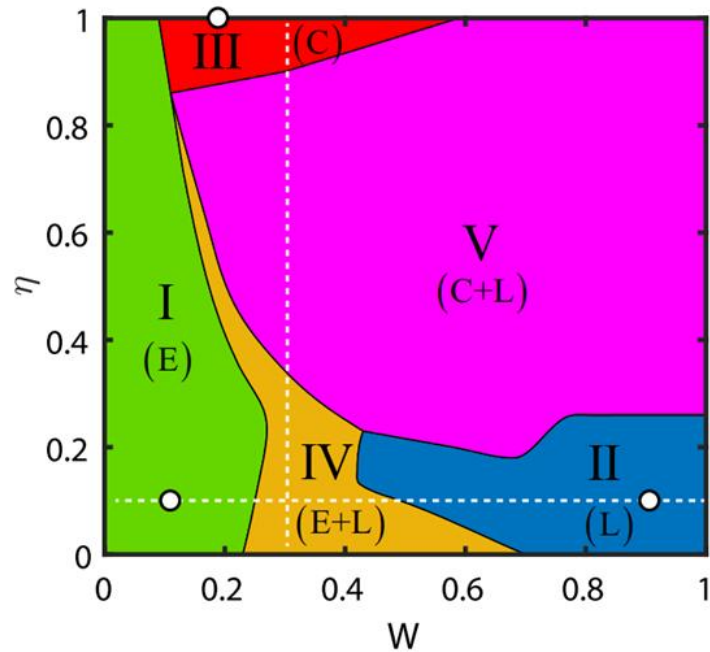
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-026-03317-0>

3、一维 Floquet 系统中五种局域化相的实验观测

在安德森局域化理论中,对于一维及二维系统中的任意有限非关联无序与最近邻跃迁,所有本征态均呈现指数局域化。然而,在三维及准周期系统中,行为更为丰富:随着无序度增强,能谱中会形成迁移率边缘,用以分隔局域态与扩展态。在这些临界能量处,波函数展现出多重分形特征及异常动力学行为,其性质既不同于局域态,也不同于扩展态。近年来的研究揭示了一种范式转变:临界行为可能主导整个扩展能谱区域,甚至覆盖整个能谱,从而形成所谓的临界相。更广泛地,理论上已预测存在复杂的混合相,其中临界态、扩展态与局域态共存,并由新型迁移率边缘加以分隔。这些以多重分形波函数和奇异连续谱为特征的临界区与混合相区域,显著丰富了安德森局域化的理论体系。尽管安德森局域化及其相变已在多种实验平台上被广泛观测,但针对临界态及其相关新相的系统性实验研究仍十分有限。其主要原因之一在于,在有限尺寸晶格中,尤其是在通过波函数结构区分扩展态、局域态与临界态方面,存在显著的技术困难。近期理论进展表明:当一维系统中准周期跃迁振幅呈现出非均匀分布的零点时,可诱导出临界态,这反映了能谱的奇异连续本质。这一发现直接建立了准周期算子理论与局域化物理之间的桥梁,并为临界相及混合相的实现提供了具体机制。

近日,南方科技大学范靖云教授、Jiankun Zhu 教授、王玉成副研究员团队在一个完全可控的光子平台上,成功构建了适用于自旋-1/2 粒子、具有非公度位点势及自旋旋转的一维准周期 Floquet 晶格模型。该架构实现了对所有模型参数的位点级控制,并能全面调控激光脉冲动力学的时空特性,从而直接观测到由非均匀分布零点所诱导的临界行为。通过实验,该团队首次观测到五种不同的局域化相:扩展相、局域相、非均匀分布零点受限临界相、扩展-局域混合相,以及非均匀分布零点受限临界-局域混合相。每种相态均通过其独特的动力学特征得以明确识别。与此同时,一项基于超导量子比特系统的同步实验也报道了临界态的观测结果,进一步彰显了临界现象实验实现研究日益增长的重要性。

该研究成果发表于《Physical Review Letters》。(金梦成)



文章链接: <https://doi.org/10.1103/6msd-mdw4>

4、阴离子孤对电子对最小晶格热导率的贡献

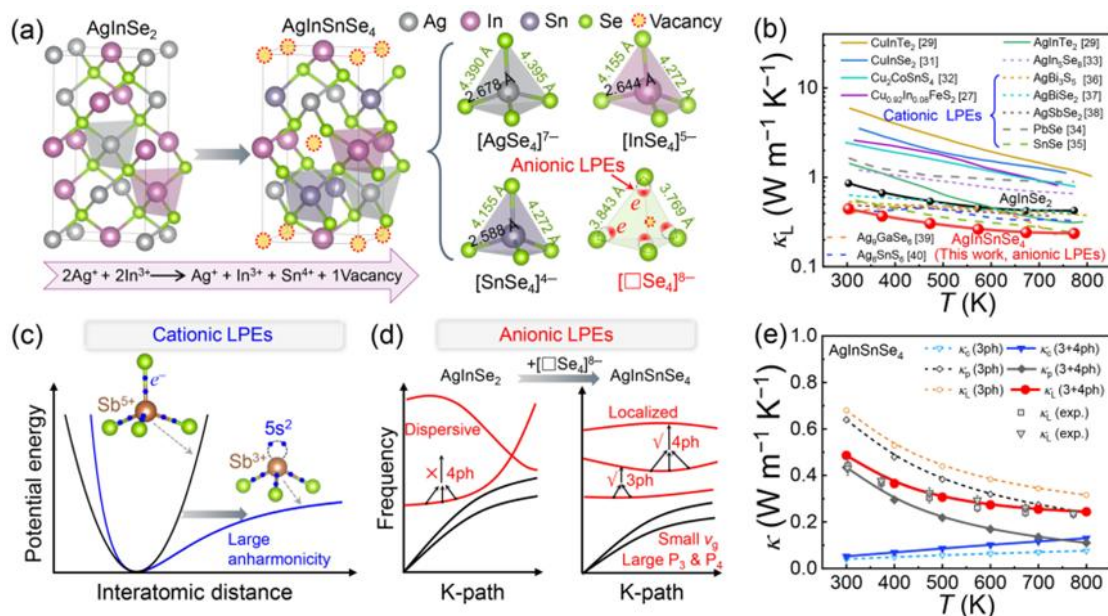
热导率是决定材料导热能力的关键物理参数,对热电能源转换、芯片热管理、热障涂层以及极端环境隔热材料等领域具有重要意义。近年来,随着微电子器件集成度和功率密度不断提高,如何有效调控声子输运、实现超低晶格热导率(κ_L)已成为凝聚态物理和材料科学的重要研究方向。研究发现,液态原子行为、低频光学声子模式以及孤对电子效应等机制均能够显著抑制热输运。其中,阳离子孤对电子(Lone-Pair Electrons, LPEs)由于能够引起局域结构畸变和增强晶格非简谐性,被广泛认为是实现低热导率的重要策略。然而,这种机制通常依赖于 Sb^{3+} 、 Bi^{3+} 、 Ge^{2+} 等具有 ns^2 电子构型的特定阳离子,使其适用范围受到明显限制。特别是在高对称晶体结构中,由于晶格规整、声子传播效率较高,实现接近理论极限的超低热导率仍面临巨大挑战。因此,探索突破传统孤对电子理论框架的新机制,建立更具普适性的低热导率材料设计原则,对于开发新一代热电材料和深入理解声子输运规律具有重要科学价值。

近日,福州大学罗中振教授和邹志刚教授研究团队突破了传统“阳离子孤对电子降低热导率”的认知框架,首次提出并验证了“阴离子类孤对电子

(Anionic Lone-Pair-Like Electrons)”调控声子输运的新机制。研究人员通过阳离子缺位交叉取代策略,在高对称金刚石类化合物 $AgInSnSe_4$ 中成功引入Se原子上的类孤对电子态,使材料在773 K下实现仅 $0.23 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 的超低晶格热导率,达到同类金刚石结构材料中的领先水平。理论计算和实验表征表明,这些局域化电子云显著削弱了长程Se-Se相互作用以及Ag-Se化学键强度,从而诱导形成高度局域化、近乎平坦的光学声子谱。与传统孤对电子通过增强晶格非简谐性抑制热输运不同,该机制主要通过降低声子群速度并显著扩大三声子和四声子散射相空间,实现对粒子型声子输运的强烈抑制。进一步分析发现, $AgInSnSe_4$ 中的光学声子几乎失去传播能力,热输运逐渐由波动型相干输运主导,从而呈现出不同于传统晶体材料的弱温度依赖关系。研究团队还发现,这种阴离

子类孤对电子现象并非 AgInSnSe_4 所独有，在 PbTe 、 PbSe 、 SnTe 、 Bi_2Te_3 、 Sb_2Te_3 以及四面体矿物 $\text{Cu}_{1-2}\text{Sb}_{4-3}\text{S}_{1-3}$ 等多种含有阳离子空位的材料体系中均存在类似特征，表明其具有广泛的普适性。该工作首次将孤对电子调控声子运输的概念从阳离子拓展至阴离子体系，揭示了一种与传统非简谐机制本质不同的超低热导率形成机理，为发现和设计新型低热导率材料提供了全新的理论框架和普适设计原则。

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



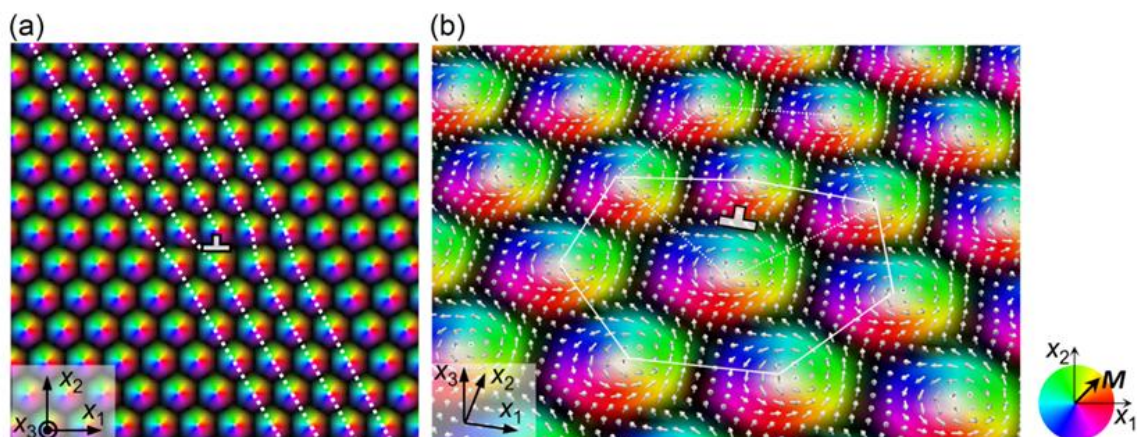
文章链接: <https://doi.org/10.1103/2pdy-5c6k>

5、斯格明子晶格中位错的拓扑转变与弹性涌现：超越基特尔磁极类比比

磁斯格明子是一类具有拓扑保护特征的可形变准粒子，因其涌现电磁场、高速低功耗驱动能力以及在赛道存储、逻辑器件和类脑计算中的应用潜力而受到广泛关注。随着斯格明子概念从磁体系扩展到声学、光学和极性体系，磁斯格明子与极性斯格明子常被视为磁畴与电畴在拓扑准粒子层面的对应物。然而，不同于传统连续畴结构，斯格明子可以作为离散“粒子”自组织形成晶格，并在其中产生位错、空位和晶界等缺陷。类似原子晶体，位错不仅影响晶格旋转、熔化和冻结等集体行为，也决定晶格的长程应变场与力学响应。但由于斯格明子本身并非刚性原子，而是可发生显著形变的拓扑纹理，其位错核心结构以及传统弹性理论是否仍然适用，仍是理解斯格明子晶格力学的关键问题。

近日，日本京都大学的 Takahiro Shimada 教授和 Kohta Kasai 博士研究团队通过相场模拟考察了 MnSi 薄膜中磁斯格明子晶格的位错结构及其随磁场和温度的变化。结果表明，位错通常形成二维三角晶格中典型的 5-7 配对结构，其中五配位斯格明子收缩，七配位斯格明子则显著拉伸。在较低磁场和温度下，七配位斯格明子可发生强烈伸长，并由单个斯格明子转变为两个半斯格明子，中间由条纹相连接，从而导致位错核心分裂和局域晶格重构。这种核心区域的拓扑重排展现了斯格明子晶格相较普通原子晶体更柔软、更富层次的缺陷容纳方式。更重要

的是，尽管核心结构发生明显改变，其远场应变分布仍与传统 Volterra 位错弹性理论高度一致；这与极性斯格明子晶格中由于准粒子形变导致弹性理论失效的情况形成鲜明对比。能量分析进一步指出，该形变主要由 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用与交换相互作用之间的竞争驱动。该研究揭示了磁斯格明子晶格中“拓扑核心重构”与“长程经典弹性”可以并存，也说明长期被类比的磁畴与电畴在拓扑准粒子晶格层面存在本质差异。该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



文章链接：<https://doi.org/10.1103/4rww-4tsc>

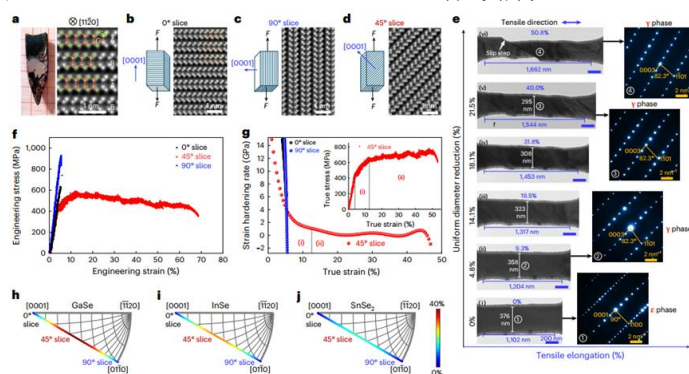
6、GaSe 中的范德华应变硬化和极大均匀伸长率

二维范德华半导体因兼具优异的光电性能、柔性特征和丰富的量子物性，被认为是下一代柔性电子器件、可拉伸光电子器件和智能传感系统的重要候选材料。近年来，以 GaSe、InSe、SnSe₂ 等为代表的层状硫属化物在电子学、光电子学、信息存储及能源器件等领域展现出广阔应用前景。然而，与其快速发展的功能应用相比，这类材料的力学性能研究仍面临重要挑战。传统认知认为，范德华材料层间仅依靠弱范德华作用结合，虽然能够表现出优异的弯曲塑性和压缩塑性，但在拉伸条件下往往容易发生脆性断裂，难以实现类似金属材料中的应变硬化和大均匀塑性变形。尤其是在室温条件下，单晶范德华材料几乎不具备显著的均匀拉伸延展能力，其塑性变形机制与传统金属完全不同：强共价键限制了位错运动，高能垒抑制了层内滑移，而缺乏晶界和位错缠结等传统强化机制，又使材料在屈服后迅速发生局部失稳和颈缩。因此，如何突破范德华材料“高功能、低延展”的固有认知，实现兼具高强度、大塑性和应变硬化能力的新型二维半导体，一直是国际材料学界关注的重要科学问题，也是柔性电子器件工程化应用面临的关键瓶颈。

近日，重庆大学周小元教授、张斌副研究员联合南方科技大学韩晓东教授首次在 GaSe 单晶中发现了范德华材料中大均匀拉伸塑性与显著应变硬化现象。通过自主研发的原子分辨原位力学实验平台（ARMEI），研究人员设计了相对于[0001]晶向倾斜 45° 的特殊加载方式，成功激活(0001)层间范德华剪切滑移机制，使 GaSe 在室温下获得超过 40% 的均匀拉伸延伸率和超过 70% 的极限拉伸应变，创造了同类范德华半导体材料迄今最优的拉伸性能纪录。进一步结合原子分辨透射电子显微镜观测、第一性原理计算和分子动力学模拟，研究团队揭示了其背后的物理机制：在拉伸过程中，相邻范德华层之间发生交替式层间滑移，引发 ϵ -GaSe

向 γ -GaSe 的相变，并形成独特的受限滑移路径。这种“交替层间滑移—相变强化”协同机制有效避免了应力局域化和早期颈缩，同时促进位错相互作用和持续应变硬化，从而实现前所未有的大均匀塑性变形。研究还发现，该机制不仅存在于 GaSe 中，在 InSe 和 SnSe₂ 等多种范德华硫属化物中同样能够实现类似的应变硬化和高延展行为，表明其具有广泛的普适性。

相关内容发表于《Nature Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02614-6>

(来源: 两江科技评论)