

超材料前沿研究一周精选

2025 年 3 月 24 日-2025 年 3 月 30 日

索引:

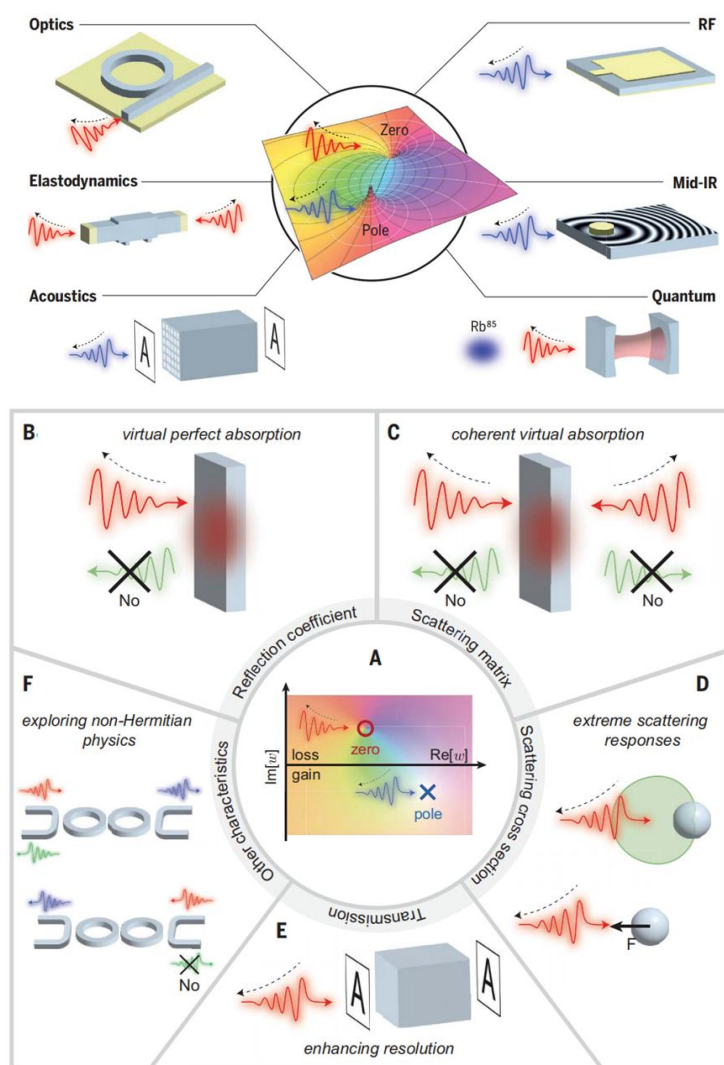
- 1、光子学和波物理学中的复频率激发
- 2、大气湍流中光学纽结的稳定性
- 3、非厄米系统中基于远场辐射的贝里曲率观测
- 4、扭曲异质结中剪切极化激元的精准调控
- 5、拓扑声流控系统
- 6、双曲极化子介导的电致发光和能量转移
- 7、铁磁 Weyl 半金属中磁涨落引起的反常霍尔效应
- 8、莫尔界面中二维拓扑极性结构的观测与调控

1 光子学和波物理学中的复频率激发

近日，纽约城市大学 Andrea Alù教授团队在《Science》上发表综述论文，系统性地综述了光子学中复频率激发的基本原理、研究进展及其在各类波动调控系统中的广泛应用前景。传统波动系统中，激发模式通常对应实频率，其演化表现为稳定的周期性振荡。然而，在开放、非守恒或非厄米系统中，波动激发常常呈现复频特征，即频率具有非零虚部，导致波动在振荡的同时伴随指数衰减或增长。这类复频激发不仅出现在具有增益与损耗的非厄米结构中，也广泛存在于时间调制系统、拓扑边界态、非互易系统等新型平台中，代表了一类被长期忽视但物理意义深远的波动模式。

近年来，研究人员发展出一类新的实验策略：通过构造特定波形的激发信号，使其在时间域中呈现出等效的“虚部频率行为”，从而无需依赖有源材料也能实现对增益、损耗、临界耦合等非厄米效应的模拟与调控。这一思路不仅推动了诸如损耗补偿、增强传感、无源系统中的 PT 对称破缺等现象的实验验证，还带来了如无空间梯度下实现光牵引力、超分辨成像、光-物质耦合实时调控等新型功能的实现路径。通过将复频激发引入成熟平台，研究者可以在不改动材料本体的情况下，实现系统功能与性能的大幅跃升。

利用复频激发及其引发的波-物质相互作用的研究进展，为超材料与波动调控带来了全新机遇，特别是在非厄米波动现象领域。未来研究方向将聚焦于更高效的复频激发信号构造方法、与现有光电子系统的深度融合、以及跨学科场景下的应用拓展。新兴平台如超表面、极化子材料、光机械系统以及拓扑绝缘体等，为研究复频激发在强非线性、强光-物质耦合以及具备内在鲁棒性的系统中行为提供了广阔舞台。在这些系统中，借助激发波形调控的有效增益与损耗机制，可能会对波-物质相互作用的研究、应用与控制方式带来根本性转变。随着理论发展与实验实现之间的进一步衔接，复频激发有望成为未来技术创新的重要推动力，其影响将超越光子学与波动物理，扩展至量子计算、生物医学工程与传感、成像以及能量收集等多个关键领域。相关内容发表于《Science》上。（金梦成）



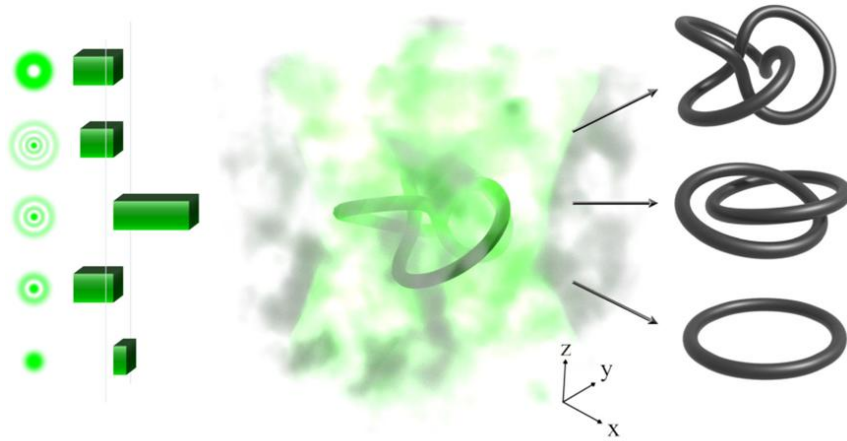
文章链接: <https://doi.org/10.1126/science.ado4128>

2 大气湍流中光学纽结的稳定性

曾经主要在抽象数学或理论物理中考虑的拓扑概念,如相位奇点、极化或能量流、拓扑结构、超振荡和自旋轨道相互作用,现在正进入经典和量子光学领域。纽结是一个在自然界中广泛存在的概念,可以定义为一个圆在三维欧几里得空间中的嵌入。在光学中,通过叠加贝塞尔光束并沿纵向追踪相位奇点轨迹,在非傍轴区域预测了光学中的纽结解。后来,通过将特定数学纽结的 Milnor 多项式扩展到相位和极化域中的拉盖尔-高斯基,获得了孤立的纽结场。但现实微扰物理介质中的光学纽结行为在很大程度上仍未被探索。

近日,杜克大学的 N. M. Litchinitser 教授团队从理论上和实验上研究了光学纽结在大气湍流中的行为,并在传统拓扑不变量的背景下讨论了它们的拓扑稳定性。由于与湍流的相互作用,最初未受扰动的光束的拓扑结构(特别是三叶形结)可以通过一系列由于复杂介质中出现的附加模式之间的多重串扰而发生的分解和重连事件。作为这些过程的结果,最初的三叶纽结可能会失去一个奇点线交叉点,转变为 Hopf 链,或者如果失去另一个交叉点,它可以进一步转变为非纽结结构。有趣的是,以前在超流涡旋的背景下研究了涡旋结的类似重联事件,超流

涡旋的动力学由 Gross-Pitaevskii 方程控制，并且观察了这种结构随时间的拓扑演变，直到最初的结解完全失效。纽结场可以进一步被认为是未来通信系统、计量和传感应用中潜在的信息载体。这项研究结果可能对其他物理系统也很重要，例如玻色-爱因斯坦凝聚体、流体和量子光学等。相关内容发表于《Nature Communications》上。（刘帅）



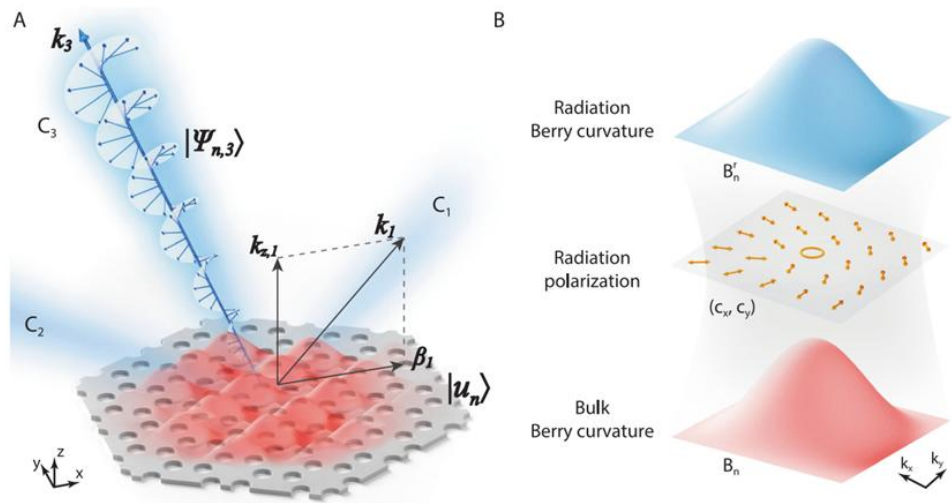
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57827-1>

3 非厄米系统中基于远场辐射的贝里曲率观测

拓扑物理学的核心在于通过不变量揭示物质的内在特性，其中贝里曲率作为描述能带局部几何性质的关键量，在凝聚态、光子学和声学系统中具有重要地位。贝里曲率与陈数等全局拓扑不变量直接相关，但其观测长期面临挑战——波函数的拓扑信息通常深藏于系统内部，传统方法需通过强测量手段（如霍尔漂移、Aharonov - Bohm 干涉）间接获取，可能显著干扰系统本征态。尽管已有研究尝试利用光与物质的强相互作用将拓扑特征映射至外部可观测量，但如何在弱扰动条件下直接提取贝里曲率仍是未解难题。近年来，开放光子系统因辐射损耗与外界环境耦合的特性，为拓扑信息的提取提供了新思路：逃逸光子携带的远场极化信息可能成为连接体态波函数与外部观测的桥梁。然而，极化场几何特征与体态拓扑之间的内在关联尚未明确，如何从远场极化中重构贝里曲率仍需理论与实验的双重突破。

近日，北京大学的彭超教授课题组与日本京都大学的 Susumu Noda 教授合作，提出了一种非厄米系统中体态拓扑与远场辐射几何的对应理论，并通过实验验证了基于极化测量的贝里曲率直接观测方法。理论上，研究证明了在辐射场平滑且无额外振幅涡旋的条件下，远场极化矢量与体态波函数的双正交基存在几何对应关系，使得辐射贝里曲率可近似等于体态贝里曲率。针对蜂窝晶格光子晶体平板，研究设计了一种对称性可调的非厄米二能级子系统，其狄拉克点附近因辐射损耗形成非平庸能隙，并伴随贝里曲率的局域分布。实验上，通过电子束光刻与等离子刻蚀技术制备了不同孔半径差异的样品，结合角度分辨偏振测量系统，成功捕获了远场斯托克斯参数的空间分布。结果显示，对称性破缺导致极化场从半整数拓扑荷的涡旋结构退化为手性相反的圆形极化分布，与理论预测的贝里曲率演化高度吻合。进一步积分贝里曲率获得的几何相位与陈数表明，该方法可定量验证谷陈数的非平庸性。此外，研究指出多辐射通道联合测量可扩展至多能级系统，

为探索非厄米拓扑景观提供了普适性框架。这一成果不仅揭示了逃逸光子携带体态拓扑信息的物理机制，也为弱测量条件下拓扑表征开辟了新途径，对拓扑光子器件设计与量子材料研究具有重要参考价值。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



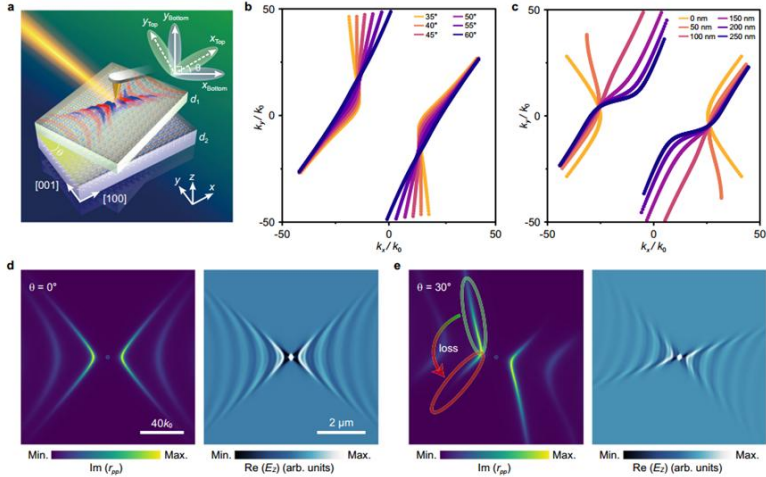
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58050-8>

4 扭曲异质结中剪切极化激元的精准调控

极化激元（Polaritons）作为光与物质耦合的准粒子，在纳米光子学领域展现出革命性潜力。其中，双曲极化激元（Hyperbolic Phonon Polaritons, HPhPs）因其独特的双曲型等频色散特性，能够突破衍射极限，实现亚波长尺度的光操控，在超分辨成像、片上光路集成等领域备受关注。然而，传统双曲极化激元的传播对称性限制了其在非对称光场调控中的应用。近年来，低对称性晶体（如单斜晶系的 β -Ga₂O₃、CdWO₄）中涌现的双曲剪切极化激元（Hyperbolic Shear Polaritons, HShPs）为解决这一难题提供了新思路。HShPs 通过非正交声子共振打破传播对称性，展现出轴向色散、非对称损耗分布和强局域场增强等特性。然而，天然材料的晶体对称性固定、调控手段有限，阻碍了 HShPs 的实际应用。二维范德华材料（如 α -MoO₃）因其层间弱耦合、可堆叠性和外场响应能力，成为设计人工调控 HShPs 的理想平台。如何通过结构工程实现动态可调的剪切极化激元，成为该领域亟待突破的挑战。

近日，同济大学物理科学与工程学院江涛教授、程鑫彬教授团队联合美国纽约市立大学先进科学研究中心 Andrea Alù 院士，首次在正交晶系的二维材料 α -MoO₃ 中通过层间扭曲和厚度调控实现了双曲剪切极化激元的精准操控，并集成石墨烯栅极实现动态重构，为可编程纳米光子器件奠定了关键技术基础。研究团队提出“扭曲工程”策略：通过堆叠双层 α -MoO₃ 并引入可控扭转角（ θ ），在不破坏单层晶体对称性的前提下，诱导出等效单斜性（Effective Monoclinicity），从而激发 HShPs。理论分析表明，扭转角通过打破面内镜像对称性，引发等频色散曲线的轴向倾斜与非对称损耗分布。实验上，团队利用红外近场光学显微镜（s-SNOM）观测到 HShPs 的传播波前随 θ 增大从对称双曲型（ $\theta = 2^\circ$ ）逐渐转变为高度非对称的剪切波（ $\theta = 46^\circ$ ），其剪切因子（Shear Factor）从 0.11 提升至 0.47，品质因子（Q 因子）同步提高近三。注意的是，层间厚度差异进一

步放大了剪切效应。当顶层厚度 (d_1) 与底层 (d_2) 不匹配时, 垂直方向的镜像对称性被打破, HShPs 的传播方向与局域场分布可通过 d_1/d_2 比例精细调节。例如, 在 $\theta = 60^\circ$ 、 $d_2 = 170\text{ nm}$ 时, d_1 从 80 nm 增至 255 nm , 剪切因子呈现先增后减的趋势, 验证了“超薄异质结增强耦合, 过厚层抑制剪切”的理论预测。研究成果发表在《Nature Communications》上。(张琰炯)



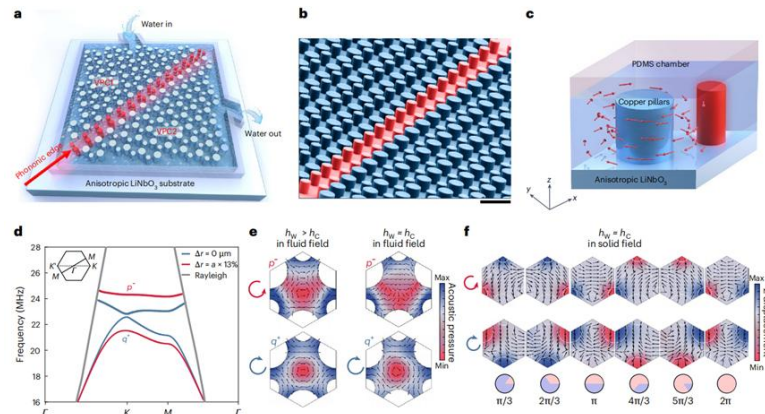
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58197-4>

5 拓扑声流控系统

拓扑波动材料最初源于凝聚态物理, 其研究目标是模拟电子的赝自旋结构。由于其非平凡的拓扑不变量, 这类材料展现出沿边缘稳健传播的特性, 能够抵抗缺陷、无序和后向散射。然而, 关于赝自旋结构本身的物理图像及其在多场景下的应用潜力仍有待深入挖掘。近年来, 石墨烯中的电子涡旋已被实验观测, 其流型与流体动力学模型高度相似, 引发了关于将电子谷态拓扑现象“类比”引入流体系统的研究热潮。通过将拓扑波动材料与微流控技术结合, 研究人员尝试以流体中的示踪粒子为“探针”, 实现原子尺度电子行为的可视化类比, 例如谷流旋涡与电子拓扑电流的映射。这为理解拓扑态跃迁、赝自旋纹理提供了新的三维可视手段。在实际应用方面, 具拓扑特性的水基液体系统为生命科学领域带来了新机遇。研究表明, 谷态的手性(顺/逆时针)可调控流体中生物颗粒的同步旋转, 并形成以 DNA 及其分子间作用为基础的“微观生物宇宙”。相较于传统声波模式因能量散失而操控能力受限, 拓扑边缘态因能量局域性更适合操控纳米尺度生物颗粒, 已在光学系统中展现出增强发射的优势, 在声子学领域亦具潜力。不过, 将拓扑效应引入微流控芯片仍面临挑战: 包括谷自旋强度尚缺乏深入研究、声场与流体间耦合机制复杂, 以及基底晶体结构对边缘态影响不易控制。

近日, 美国杜克大学的 Tony Jun Huang 教授和 Steven A. Cummer 教授, 联合哈佛医学院的 Luke P. Lee 教授, 首次构建了一种片上集成的拓扑声流控系统。该系统依托于声子谷态、非线性流体动力学与基底晶体结构之间在微流控环境中的复杂耦合机制。研究中, 团队在 128° Y-cut 锂铌酸锂芯片上激发表面声波 (SAWs), 并通过固-液界面将谷态有效耦合至上方流体层。借助流体中的示踪粒子, 研究人员成功将谷态可视化为谷流旋涡, 并演示了具有手性特性的涡旋结构, 实现了粒子的后向免疫运输。实验还发现了因弹性谷自旋密度增强而形成的顺时针与逆时针谷涡旋阵列。此外, 研究揭示了由谷自旋与非线性流体动力学耦

合诱导的拓扑压强纳米阱，可显著增强边缘态的声能聚集，实现对微粒甚至 DNA 分子级别的高精度操控。同时，实验还发现该系统中的边缘态带宽受基底晶体取向影响显著，表现出与极化谷态相似的方向依赖性。相关内容发表于《Nature Materials》上。并且新加坡南洋理工大学张柏乐教授以“拓扑声学在微流控中的新突破”为题在 Nature Materials 杂志上对该研究进行了总结、评价与展望。（金梦成）



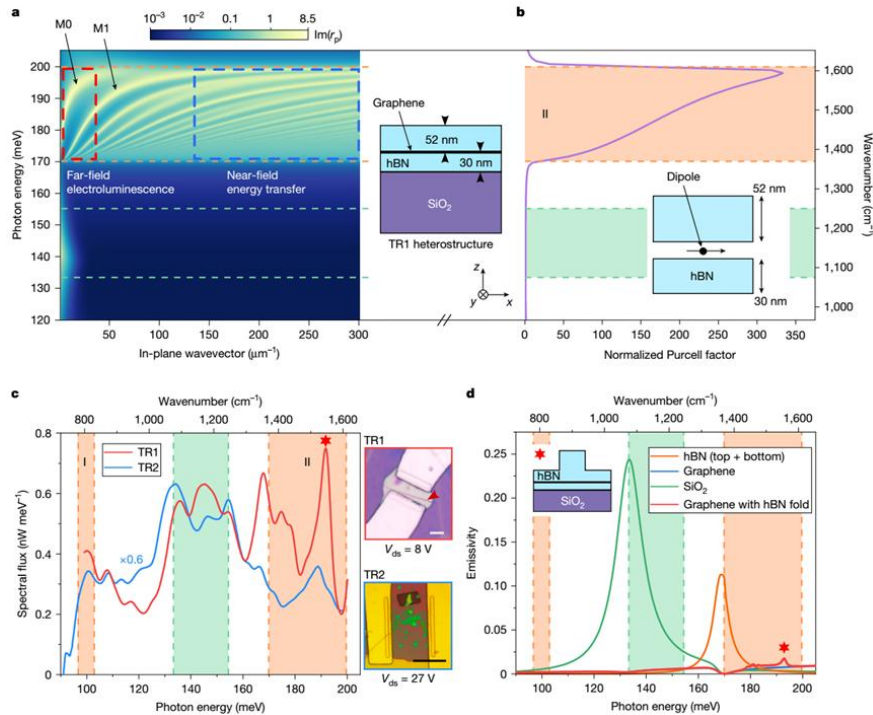
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02169-y>

6 双曲极化子介导的电致发光和能量转移

在现代光电技术领域，如何提高光与物质的相互作用效率一直是科学家们关注的核心问题。光子和电子之间的能量转换在光电探测、光通信和量子信息处理中发挥着关键作用。然而，传统的光电材料在亚波长尺度上的光场调控能力有限，难以在纳米级别实现高效的光子-电子相互作用。因此，近年来，极化激元（polaritons）成为了研究热点。极化激元是一种由光子与物质集体振动态（如声子、等离子体振荡或激子）耦合形成的准粒子，其独特的亚波长局域性和强光场增强效应，为突破传统光电转换的物理极限提供了新的思路。其中，超材料中的超极化激元（hyperbolic polaritons）因其超高的光子密度和非局域性特征，被认为是未来高效光电器件的重要候选者。近年来，六方氮化硼（hBN）因其在中红外波段的超极化激元特性，受到了广泛关注。hBN 是一种天然的双轴各向异性材料，其极化激元可以在极小的体积内强烈局域化，从而极大提高光与物质的相互作用强度。这种特性使其在红外探测、超分辨显微成像以及光热转换等领域具有广阔的应用前景。然而，如何利用这些特性来增强光电转换效率，并在实际器件中加以实现，仍然是一个亟待解决的难题。

针对这一挑战，法国巴黎文理大学的 Emmanuel Baudin 教授课题组，成功探索了利用超极化激元增强电致发光（electroluminescence）和能量传递的新机制，设计了一种创新型的 hBN-二维材料复合结构，该结构能够在纳米尺度内形成高局域化的光场，从而大幅提高光子与电子之间的能量交换效率。实验结果表明，该体系不仅能够有效增强电致发光强度，还能够实现能量的远距离传输，这对于未来的光通信和红外探测技术具有重要意义。具体而言，研究团队发现，当电流通过该异质结时，hBN 内部的超极化激元模式能够与电子-空穴复合过程相耦合，从而显著增强发光效率。此外，这种结构还展现出独特的能量传递特性，即可以在远超衰减长度的距离上传输光子能量，为非接触式光电器件的研发提供了新的思路。为了深入理解该体系的物理机制，研究团队结合实验观测与理论计算，揭

示了超极化激元在电致发光过程中扮演的关键角色。进一步的理论分析表明，hBN 的双轴各向异性结构赋予了其超强的光子局域能力，使得电子-光子的耦合效率相比传统材料提高了数倍。这一研究不仅为超极化激元在光电器件中的应用奠定了基础，也为开发新型的高效光电转换材料提供了新的方向。相关内容发表于《Nature》上。（张琰炯）



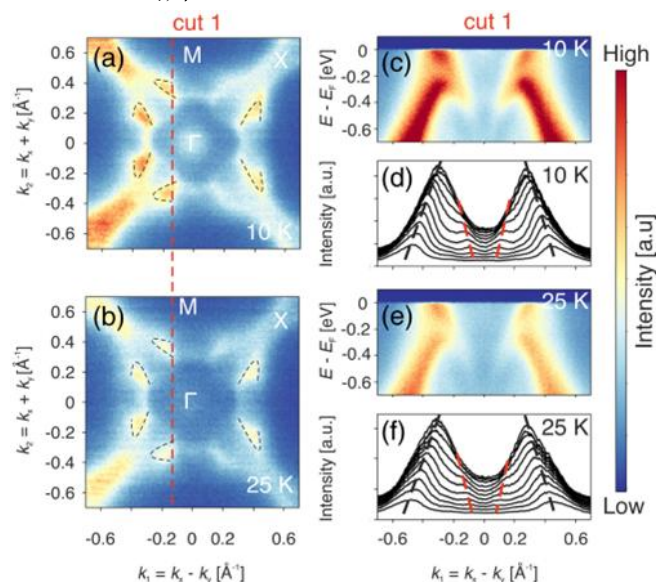
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08627-6>

7 铁磁 Weyl 半金属中磁涨落引起的反常霍尔效应

内禀反常霍尔效应(AHE)，其特征是在没有外部磁场的情况下具有横向霍尔电导，作为电子系统中时间反转对称性破缺(TRSB)和拓扑特征的探针，已经获得了极大的关注。在铁磁性 Hall 半金属中，小磁场(B)的固有反常霍尔电导率与 B(外加磁场(H)和磁化强度(M)之和)成正比。因此，H 和 B 的温度依赖性用作预期反常霍尔电导率的估计值。然而，这种间接的方法会模糊所观察到的 AHE 是固有的还是由施加的磁场引起的。区分这两种情况很困难，因此使许多实验的解释变得复杂。铁磁性(FM) Weyl 半金属 PrAlGe 的案例为解开这些效应提供了一个独特的机会。PrAlGe 是一种很好表征的拓扑铁磁体，稳定在非中心对称结构中。由于反转对称性的破坏，Weyl 点有望在所有温度下持续存在。通过利用温度作为控制参数，可以精确地在铁磁状态(具有 TRSB)和顺磁状态(没有 TRSB)之间切换，允许系统地探索 AHE 对磁序的依赖，有效地区分内在和外部贡献。

近日，苏黎世大学的 Ola Kenji Forslund 教授团队报道了一项关于铁磁转变的霍尔电阻研究。与以前的研究一致，在有序状态下观察到了内禀霍尔效应，这是从零场外推得出的。作者证明在顺磁相中也发现了类似的外推响应。 μ 子自旋弛豫 (μ +SR) 测量表明不存在短程磁序或畴形成，排除了铁磁有序温度以上的 TRSB。在存在短程磁序或畴形成的情况下， μ +SR 光谱通常表现出高度松弛的高斯函数之和或指数项的组合。然而， μ +SR 结果没有显示这些特征，数

据与动态顺磁波动的存在一致。相反，在存在强铁磁波动的情况下施加磁场可以引起有限磁化，这是近距离平均场转变的直接结果。这反过来又产生了有限的零场外推霍尔效应。因此，可以证明外推的 AHE 不是 TRSB 的明确指标。该研究建立了一个准确解释反常霍尔测量的框架。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（刘帅）



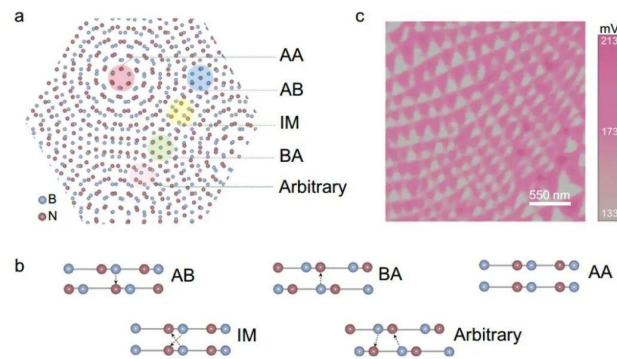
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.126602>

8 莫尔界面中二维拓扑极性结构的观测与调控

铁电材料因具备电场调控下的极化反转特性，在非易性存储与类脑器件等领域展现出重要应用前景。近年来，铁电体中的拓扑极性结构因其独特的电荷分布不连续性和极化涡旋、磁子等奇异物理现象成为研究热点。然而，这类结构的形成依赖于电能、弹性能、梯度能间的微妙平衡，通常需通过复杂氧化物超晶格或异质结实现，其厚度缩减与动态调控面临显著挑战。一方面，钙钛矿氧化物薄膜的临界厚度限制了超薄器件的开发；另一方面，电场或应变驱动下的拓扑结构非易失性操控仍存在技术瓶颈。以二维范德华材料为基础的滑动铁电体为此提供了新思路——其层间电荷转移特性天然形成极化不连续性，并通过莫尔界面实现原子级极性织构，但如何直接观测并调控此类二维拓扑极性纹理仍是亟待解决的科学问题。

近日，电子科技大学刘富才教授、刘庆副教授课题组与南方科技大学林君浩教授课题组、复旦大学李文武教授课题组等合作，通过结合高分辨横向压电力显微镜（LPFM）与扫描透射电子显微镜（STEM），首次在扭转双层氮化硼（t-BN）的莫尔界面中观测到原子级厚度的布洛赫型半子拓扑极性结构。研究表明，扭转角调控的莫尔超晶格通过层间电荷重分布诱导面内与面外极化耦合，形成周期性连接的三角域网络。其中，AB/BA 堆叠域中心呈现面外极化，而相邻域间过渡区域因中间（IM）堆叠对称性破缺产生面内极化，二者共同构成具有涡旋特征的极性纹理。通过优化压电力显微镜的信噪比与抗串扰策略，研究团队重构了面内压电响应矢量场，证实半子结构的拓扑绕数与理论预测一致。进一步实验表明，莫尔周期随扭转角减小而增大（ 0.09° 至 0.028° 对应 160~505 nm 周期），且机械应力可通过原子力显微镜探针直接扩展拓扑纹理区域，实现非易失性调控。与电场

调控相比，应力驱动的剪切滑移机制有效避开了 AA 堆叠位点对畴壁迁移的钉扎效应，为高密度可重构器件设计提供了新途径。该成果不仅揭示了二维范德华材料中极化与晶格的强耦合机制，还为探索拓扑相变、非线性电磁响应等基础物理现象及新型存储器、量子器件奠定了实验基础。本研究发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58105-w>
(来源: 两江科技评论)