

超材料前沿研究一周精选

2025 年 6 月 3 日-2025 年 6 月 8 日

索引:

- 1、超光子学中陈数保护的平带边界态
- 2、用于石墨烯狄拉克带隙工程的太赫兹手性光子晶体腔
- 3、 WS_2 双层超表面中狄拉克能带的单向导向共振连续体
- 4、软钳制拓扑声子波导
- 5、低介电常数高导热声子晶体纳米纤维超材料薄膜
- 6、扭曲 MoTe_2 第二莫尔带中铁磁相的观察
- 7、本征轴子统计拓扑绝缘体
- 8、非厄米扭转双层石墨烯中的特殊魔角

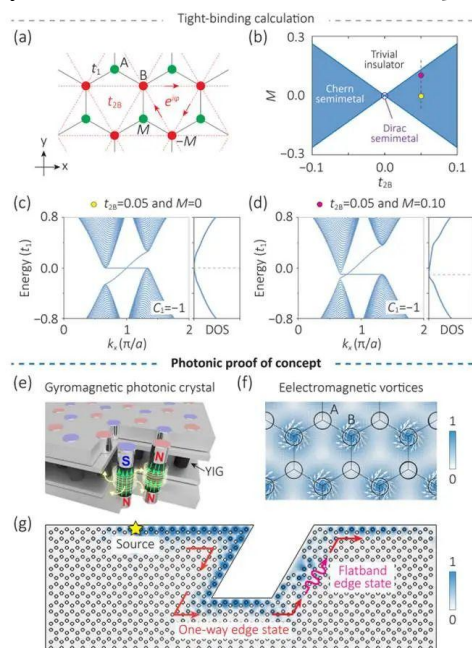
1、超光子学中陈数保护的平带边界态

拓扑光子学的发展揭示了光子系统中存在类似电子拓扑态的独特传输特性。传统拓扑绝缘体依赖于完整带隙来定义拓扑不变量并保护边界态。近年来，无带隙拓扑系统如陈金属、狄拉克半金属和外尔半金属因其新颖的物理现象（如平带边缘态、克莱因隧穿和增强的光-物质相互作用）受到广泛关注。狄拉克半金属（如石墨烯）在狄拉克锥附近展现出平带边缘态，但其拓扑性质受限于宇称-时间反演对称性，且陈数为零。一旦该对称性被破坏（如通过磁场或杂质），系统将打开带隙转变为绝缘体，导致平带态消失。陈绝缘体虽能实现单向传输的边缘态和非零陈数，但要求完全带隙。理论预言的陈半金属（Chern semimetal）有望融合狄拉克半金属的平带边缘态与陈绝缘体的非零陈数及单向边缘态，且在宇称反演对称性破缺下仍保持稳定。然而，其实现面临耦合机制复杂和设计理想化的挑战，尤其在光子系统中精确控制次近邻耦合以诱导拓扑相变极具难度。开发兼具平带特性、单向传输及鲁棒拓扑保护的光子平台，对推动慢光传输、拓扑激光和缺陷免疫器件应用具有重要意义。

近日，新加坡国立大学的仇成伟教授课题组与华南理工大学的李志远教授课题组等合作，通过理论模型与实验验证，首次在光子晶体中实现了陈半金属态。其核心机制是在单一子晶格（B 子晶格）内引入并控制次近邻耦合，同时保持最近邻耦合。理论分析表明，在特定参数条件下，系统虽无完整带隙，但具有明确非零陈数，并同时支持单向边界态（位于 A 型边界）和平带边界态（位于 B 型边界）。平带态附近的态密度趋近于零，有效抑制体态耦合，保障传输鲁棒性。实验上，采用钇铁石榴石（YIG）构建蜂窝状光子晶体，通过可编程磁场精确操控子晶格磁化：对 B 子晶格施加同向磁场诱导所需电磁涡旋（对应次近邻耦合效应），对 A 子晶格施加反向磁场以抵消涡旋并维持整体有效磁导率均匀，从而最小化宇称反演对称性破缺。实验观测到在特定频率处（9.55 GHz），A 型边缘实现单向传输（正向-反向传输差显著），B 型边缘则表现为平带局域态（双向传输对称）。通过构造 A-B-A 异质结，该研究进一步实现了光速的极端调控：随着 B 区（平带区）宽度增加，边缘态群速度显著降低，且传输效率未明显下降。该工作不仅为

探索费米子与玻色子系统中的拓扑相提供了新平台，还为设计抗干扰慢光波导、可重构拓扑器件及高效光互连技术开辟了新途径。

该研究成果发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



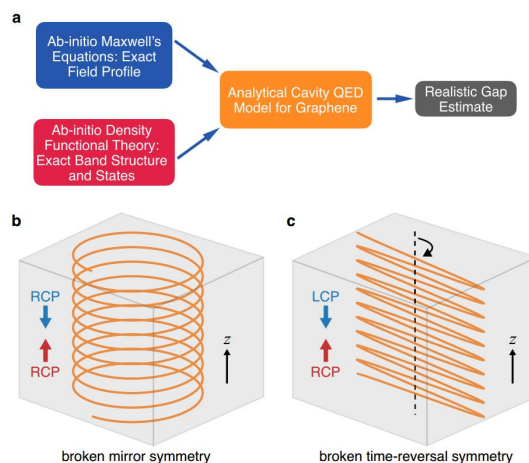
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.223806>

2、用于石墨烯狄拉克带隙工程的太赫兹手性光子晶体腔

在传统认知中，材料的基态性质由其内禀的晶体结构和电子排布决定，光场仅作为探测手段。然而，近年来的研究颠覆了这一观念：即使在外加激发源的热平衡状态下，材料也能在强光场（尤其是空腔真空电磁场）的作用下呈现出全新的量子相。这一现象背后的关键是“光场-物质强耦合”，它可以通过真空虚光子与材料内部共振模式的强耦合，实现对材料电子结构的重构，诱导如带隙打开、量子霍尔态破缺、金属-绝缘体转变等前所未见的凝聚态相变。尤其令人兴奋的是，当耦合光场具有圆偏振特性时，能够有效打破时间反演对称性（TRS），从而诱导拓扑能带结构。这一机制类似于 Floquet 物理中通过周期驱动实现拓扑态的路径，但无需外加激发源，仅靠腔内虚光子即可。这一设想推动了对“手性腔体”的广泛探索，特别是在太赫兹（THz）频率范围内的手性光子晶体（chiral photonic-crystal cavities, PCCs），其共振频率与多种低能激发模式高度匹配，是研究真空诱导拓扑态的理想平台。然而，迄今为止，实现“打破时间反演对称性”的高质量手性腔体仍面临材料选择受限、器件品质因数不足以及场强不均等瓶颈。如何构建同时具备强手性、低损耗、高均匀性的 THz 腔体，成为凝聚态腔量子电动力学研究的关键难题。

来自美国 Rice 大学 Junichiro Kono 教授课题组构建出一种新型的 THz 手性光子晶体腔体，并利用该腔体实现了石墨烯中 Dirac 点处带隙的有效打开。该研究巧妙引入轻掺杂的半导体材料 InSb 作为磁等离子体媒介，在仅需 0.2 T 小磁场条件下即可实现对圆偏振光的非互易传输，从而在腔体中形成方向相关的手性电场。研究者在传统一维光子晶体结构中，通过将非磁性缺陷层与左右对称 InSb 层组合，构建出四种腔体设计，最终优化出一种品质因数高达 427、椭圆率（电场圆

偏振度) 近乎完美、且缺陷层为 Si 基底的“Design II”结构。在理论层面, 作者建立了完整的“从第一性原理到腔量子电动力学”的多尺度建模流程: 首先通过 DFT 计算获得石墨烯能带与跃迁矩阵元; 然后将其嵌入腔体场分布解(Maxwell 方程) 中, 最终构建出 tight-binding 图景下的量子耦合模型。该模型显示, 在 Dirac 点附近由于线性色散引发的光-物质相互作用增强, 可在腔体模式频率为 0.42 THz、模式体积约为常规值的 10% 下, 实现约 1 meV 的拓扑带隙打开。更令人期待的是, 研究表明, 通过进一步缩小腔体模体积(例如引入纳米天线结构或结合超表面谐振子), 该带隙有望进一步提升至数 meV, 甚至在高频模式下突破 10 meV。这一真空场诱导的带隙具有明确的量子拓扑意义, 有望推动石墨烯等二维材料在无需外加驱动的前提下实现量子反常霍尔态(Chern insulator), 为未来低功耗拓扑电子器件的研发提供了新路径。该工作不仅展示了一种高效设计 TRS 破缺 THz 腔体的新范式, 也构建了一个连接凝聚态物理、量子光学和第一性原理计算的完整理论实验框架。”相关内容发表在《Nature Communications》(张琰炯)。

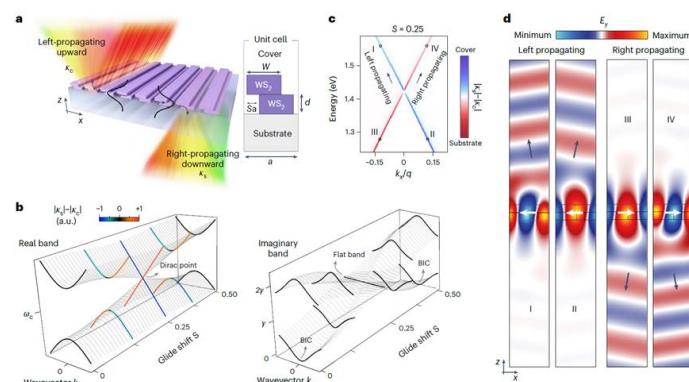


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60335-x>

3、WS₂ 双层超表面中狄拉克能带的单向导向共振连续体

薄膜谐振器和超表面中受限的离散光子态通过其泄漏辐射与自由空间连续体相互作用。对泄漏波特性的操控构成了各种光学应用的关键自由度, 例如品质因数 (Q) 工程以及光检测和测距。先前在超表面中产生单向辐射发射的方法基于微妙的共振配置, 这些配置会在相反方向上引起相长干涉和相消干涉。例如, 惠更斯超表面中的米氏共振配置可以通过共存电偶极子和磁偶极子之间的干涉产生单向辐射。另一个例子是垂直非对称谐振光栅中偶然出现的连续体束缚态(BIC), 它可以诱发单向导引谐振(UGR)。这些离散 UGR 特性从根本上意味着窄带宽操作, 这可能会限制实际器件。此前曾观察到宽带非对称辐射, 但其背后的基本原理尚不清楚。因此, 宽带单向性的工程设计仍然是一个悬而未决的挑战。近日, 高丽大学的 Su-Hyun Gong 和汉阳大学 Jae Woong Yoon 团队, 提出并通过实验证明了在滑移对称双层超表面中连续激发 UGR, 将这种现象称为单向导频谐振连续体(连续体-UGR)。两个相同的波导光栅层之间的横向滑移主要决定了特征带拓扑结构, 并导致单向泄漏辐射持续存在于几乎整个导模带结构中, 从而在能谱中形成连续体-UGR。这种达到单向性的宽带非对称辐射现象的根源在于狄

拉克带的形成。作者采用二氧化钨（WS₂）来制作双层超表面。作为一种范德华材料，二氧化钨能够实现稳定的干转移法，有效地堆叠具有相同光栅层并实现所需的横向滑动位移。通过角度分辨透射和光致发光(PL)光谱测量，观察到单向辐射的整体形态，这与理论模型非常吻合。该工作为单向发射和吸收的现有窄带约束提供了一个基本的解决方案。相关工作发表在《Nature Nanotechnology》上。（刘帅）



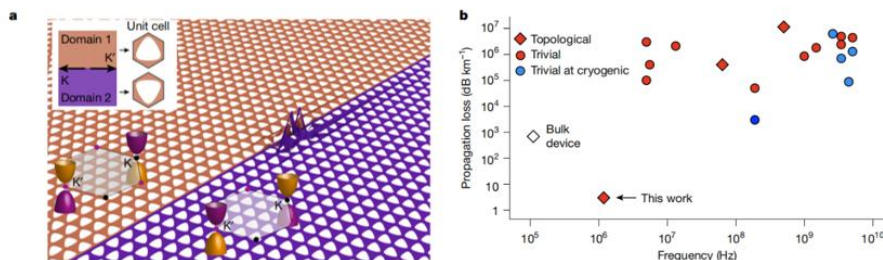
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41565-025-01945-w>

4、软钳制拓扑声子波导

声子是固体或液体中声波的基本激发，相较于光子和电子，声子具有传播速度低、易于在材料中强限制、对电磁干扰免疫等特性。这些优势使其成为构建芯片级声子电路的理想信息载体，有望实现高效、紧凑且稳健的经典与量子信息传输与处理。在过去十余年中，研究者广泛探索从超声（约 20 kHz - 100 MHz）到高声频（约 100 MHz - 10 GHz）范围内的低损耗声子波导，但其传播损耗长期维持在 $\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ （即 $10^5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ）以上，严重制约了相关器件的实用化。近年来，拓扑物理的引入为声子波导注入了新活力。通过构建特定人工晶格结构，可在材料中实现类自旋霍尔或谷霍尔效应，形成受拓扑保护的边缘态。这些边缘声子模不仅具备较强的方向性，还在结构弯折等扰动下表现出显著的反散射抑制特性，极具应用潜力。然而，此类波导的本征损耗仍偏高，且缺乏对反向散射行为的高精度定量测量。

为解决这一挑战，研究团队引入“高应力稀释耗散”策略，特别结合“软钳制”机制，即通过指数衰减的模式分布降低能量在高损耗区域的集中，从而有效抑制材料弯曲与辐射损耗。这一机制此前已推动机械谐振器品质因子突破 10^4 ，在量子光力学和电力学领域取得广泛应用。

近日，哥本哈根大学 Albert Schliesser 教授团队首次将拓扑边缘态与软钳制原理相结合，展示了二者在物理机制上的天然耦合关系。通过在高应力氮化硅薄膜中构建具有谷霍尔拓扑特性的人工晶格，研究团队实现了室温下传播损耗低至 $3 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 的超声波导，其性能已接近超导微波波导甚至光纤水平。超低损耗进一步使得团队得以利用高分辨率超声谱，对波导中一个包含 120° 锐角弯折的结构实现精确反射率测量。实验表明，声子以高达 99.99% 的概率绕弯传播，反散射概率仅为 1.1×10^{-4} ，充分验证了该结构中拓扑保护与软钳制协同抑制散射损耗的显著效果，相关内容发表于《Nature》上。（金梦成）

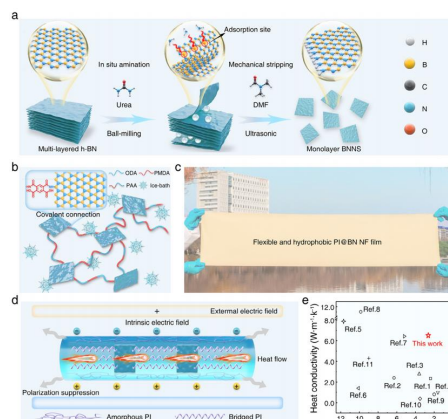


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09092-x>

5、低介电常数高导热声子晶体纳米纤维超材料薄膜

在半导体器件向高密度、集成化、三维堆叠演进的背景下,传统平面硅技术面临物理极限的挑战,3D 异质集成成为电子封装技术的重要发展方向。然而,这一进程也对材料性能提出了严苛要求:既要具备良好的电绝缘性以减少寄生电容,又要拥有高热导率以有效释放热量。遗憾的是,现有低介电常数材料往往伴随低热导率,严重限制了其在高性能微电子器件中的应用。为此,构建兼具“低介电常数+高热导率”的高性能绝缘材料体系成为当前材料科学的热点难题。聚酰亚胺 (PI) 因其优异的热稳定性与可调介电性能,被广泛用作微电子基底材料,而六方氮化硼 (h-BN) 作为一种典型的二维高导热材料,也被寄予厚望。已有研究尝试将其复合以构建三维导热网络,但存在填料分散性差、界面热阻大、宏观可控性弱等诸多问题。此外,传统加工工艺难以实现纳米尺度上的结构有序排列,进一步阻碍了热量的定向传输。因此,如何在分子层面调控聚合物链与无机填料的排列,实现“有序热通道”与“无序电响应”协同,是该领域亟需突破的技术瓶颈。

近期,东华大学纺织学院闫建华教授团队,提出了一种基于“无机诱导有机结晶”的声子晶体纳米纤维超材料 (phononic crystal nanofiber metamaterial) 构筑策略,成功研制出兼具低介电常数 (2.63) 与高热导系数 (6.51 W/m·K) 的柔性薄膜材料。该研究以氨基改性 BN 纳米片 (BNNS) 为导热骨架,通过球磨-原位接枝工艺提升其在聚酰亚胺前驱体 PAA 中的分散性与界面结合力。在电纺过程中,通过剪切与电场诱导,促使聚合物链实现有序排列,同时在热处理过程中 BNNS 诱导 PI 结晶,在纳米尺度内形成晶态 PI “桥梁”连接无机片层,构筑类似声子晶体结构的导热路径,从而显著增强声子振动传递效率。值得注意的是,纤维表面的非桥联 PI 保持无定形状态,有效抑制了偶极排列,维持了材料的低极化响应和低介电特性。这一“有序-无序”协同策略在提高热导率的同时成功避免了介电性能劣化的常见问题。研究团队还进一步结合 XRD、DSC、FTIR、TEM 等多种手段系统验证了纳米结构与晶化行为的演变机理,借助分子动力学与第一性原理计算揭示了分子链有序度、电子结构调控与介电响应之间的内在联系。此外,该薄膜还展现出优异的各向异性热导特性,在平面方向表现出晶体级别的热传输能力,而在垂直方向则保持热绝缘特性。该特性使其在微处理器散热片、热界面材料、微带线等场景中均表现出卓越的热管理效能。CPU 负载测试显示,该材料制成的导热垫可使处理器温度较传统导热硅脂降低 2 - 3° C,且在持续高强度运算中保持稳定。这项成果不仅为下一代高性能集成电路材料开发提供了理论支持和技术范式,也为柔性电子、5G 通信等领域中的热-电协同调控提供了可行的解决方案。相关内容发表于《Advanced Materials》上。(张琰炯)

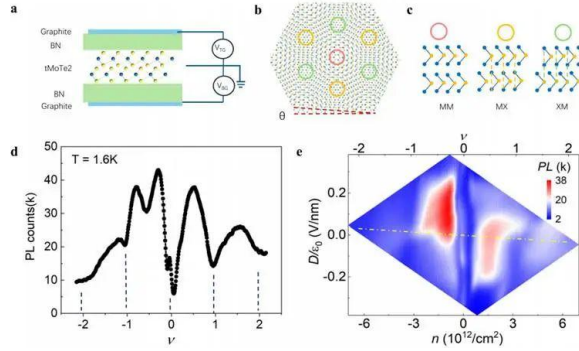


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202502146>

6、扭曲 MoTe₂ 第二莫尔带中铁磁相的观察

莫尔超晶格中的平带与强电子关联效应为探索新奇量子物态提供了独特平台,包括莫特绝缘体、超导性和拓扑态等。在扭曲双层二碲化钼 (tMoTe₂) 体系中,第一莫尔能带内已观察到整数和分数量子反常霍尔效应,分别对应于每个莫尔原胞填充一个空穴及其特定分数填充。当第二莫尔能带完全空穴填充时,特定扭转角下的 tMoTe₂ 也表现出量子自旋霍尔绝缘体行为。理论上预测,高莫尔能带中可能同时存在拓扑态与铁磁 (FM) 态,但此类物态的实验证据仍属空白。理解更高莫尔能带中的关联物理,尤其是时间反演对称性破缺态的存在与否,对拓展强关联拓扑物态的研究范畴具有重要意义,也是当前二维量子材料领域的核心挑战之一。

近日,新加坡南洋理工大学高炜博教授课题组与武汉大学吴冯成教授课题组等合作,在 tMoTe₂ 的第二莫尔能带中首次观测到铁磁相的存在。通过反射磁圆二色谱 (RMCD) 技术,在填充因子 $\nu \approx -2.4$ 至 -2.58 范围内 (即每个莫尔原胞约 2.4 至 2.58 个空穴) 检测到清晰的磁滞回线,这是铁磁序的直接实验证据。此铁磁相展现出双重可调性:一方面,其磁性强弱和居里温度随掺杂水平变化,在 $\nu \approx -2.58$ 处居里温度达到 3.5 K;另一方面,垂直方向施加的位移场可有效抑制该铁磁相,其行为与第一莫尔能带 $\nu = -1$ 处的铁磁相类似。理论计算基于 Hartree-Fock 近似,成功复现了在 $\nu \approx -3$ 至 -2.2 以及 -1.6 至 -1 填充区间内面外铁磁相的能量优势,并揭示了 $\nu = -2.5$ 处的金属性铁磁态能带结构,其中自旋 (能谷) 极化的第二能带被空穴部分占据,驱动了观测到的铁磁性。该发现首次在实验上证实了扭曲过渡金属二硫族化物更高莫尔能带中存在时间反演对称性破缺态,突破了该领域此前主要聚焦于第一莫尔能带的局限。更重要的是,第二莫尔能带作为实现非阿贝尔拓扑态的理论候选平台,其铁磁序的发现及可调控性为在该能带中探索更丰富的关联拓扑物态 (如分数量子反常霍尔态和非阿贝尔任意子态) 奠定了实验基础,同时为理解莫尔系统中能带指数与关联效应、拓扑序之间的复杂相互作用提供了新视角。该研究成果发表于《Nature Communications》。(刘梦洋)

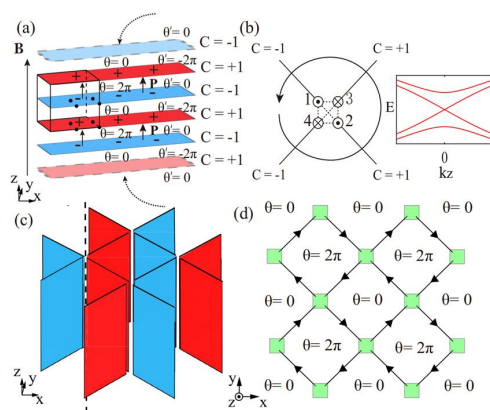


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59691-5>

7、本征轴子统计拓扑绝缘体

拓扑绝缘体 (TIs), 包括拓扑晶体绝缘体 (TCIs), 是指在不破坏其保护对称性的前提下无法与原子极限态实现绝热连接的能带绝缘体。这类体系在纯净条件下的拓扑分类已被多种理论框架系统地建立。对于由局域对称性保护的 TIs, 即使引入无序扰动, 只要该扰动不破坏对称性, 其拓扑分类通常仍保持不变。令人惊讶的是, 近期研究发现, 即便无序扰动打破了保护对称性, 只要系统在统计平均意义上仍保持该对称性, 某些 TIs 依然可展现出拓扑稳健性。这类现象被进一步概念化为“统计拓扑绝缘体”(STIs), 指的是一类由无序绝缘体组成的系综, 其边界态因平均对称性而无法被局域化。尽管 STIs 展现出独特的边界性质, 当前所有已知的 STI 实例仍可在保持精确对称性的前提下被绝热连接到纯净体系, 因此被称为“外源型”STIs。与 STI 密切相关的概念是“平均对称性保护拓扑态”(ASPTs), 这是在考虑多体相互作用背景下对 STI 概念的自然延伸。近期理论进展首次确认了“本征”ASPT 的存在——即无法被绝热连接至任一纯净、有能隙且对称的体系的拓扑相。

近日, 北京大学宋志达教授团队最近首次提出并理论验证了一类真正“本征”的统计拓扑绝缘体其在纯净体系中不具备对应态。通过实空间拓扑晶体构造, 该团队发现了一种“轴子型”STI, 其平均轴子角 $\theta = \pi$, 受平均 C4T 对称性保护, 且满足 $(C4T)^4=1$ 。尽管精确的 C4T 对称性会反转轴子角 θ 的符号, 从而似乎可以保护 $\theta=0$ 或 π 的 Z2 拓扑分类。研究证明当 $(C4T)^4=1$ 时, $\theta = \pi$ 的状态在纯净极限下无法实现。因此, 该轴子 STI 无法与任意能带绝缘体绝热连通, 具有“本征”特征。为具体展示该本征 STI, 研究团队构建了一个具有相应对称性与无序的晶格模型, 并通过数值计算揭示其相图结构。结果表明, 轴子 STI 相处于一个金属相包围之中, 并与常规能带绝缘体以及 Anderson 绝缘体相分离, 明确体现出其拓扑相的独立性与本征性。此外, 研究进一步指出, 即便在考虑电子-电子相互作用后, 该 STI 的拓扑特征仍保持稳定。这一发现不仅拓展了统计拓扑态的理论范畴, 也为实现本征晶体 ASPT 提供了首个具体的模型构造与实现路径。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。(金梦成)

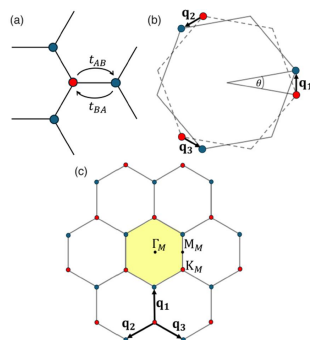


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.226601>

8、非厄米扭转双层石墨烯中的特殊魔角

自首次实验发现以来，扭转双层石墨烯（TBG）因其近乎平坦的能带成为研究强关联绝缘体和超导体等奇异量子相的理想平台。这些量子相受电子相互作用主导，并可通过掺杂和磁场调控。在魔角附近，费米速度趋近于零，能带平坦性源于莫尔布里渊区中能带拓扑与对称性的相互作用。耗散和环境耦合引入非厄米（NH）效应，影响电子态寿命，甚至诱导新现象。为研究此类效应，可借助双正交量子力学，其中 NH 哈密顿量主导系统动力学。NH 效应在拓扑物质中已展现出融合点、异常体边界对应等特性，近期亦扩展至相互作用狄拉克材料。然而，TBG 平带中的 NH 影响尚未充分探索。

近日，圣玛利亚理工大学的 Vladimir Juričić 团队，在此开发了一种简单的非厄米（NH）型旋转双层石墨烯（TBG），通过考虑两个 NH 石墨烯单层的相对旋转，非厄米性编码于平面内最近邻跳跃振幅的不平衡性中。值得注意的是，通过将 Bistritzer-MacDonald 方法推广到 NH 系统，研究人员发现了异常的魔角，其中能带结构从纯实部变为纯虚部，从而呈现出具有无限寿命的平能带。在这两个能带之间，能带保持平坦状态，并出现一个厄米魔角，此时能量的虚部最大，这与非耗散纯厄米 TBG 中通常的魔角相对应。研究人员提出了一种具有增益和损耗的光学晶格装置，可以验证理论预测。这些结果证明了开放系统中平带的稳健性，为进一步研究此类 NH 莫尔带中的耗散效应、电子拓扑和相互作用奠定了基础。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/dl59-v17v>

（来源：两江科技评论）