

# 超材料前沿研究一周精选



2026年3月16日-2026年3月22日

索引:

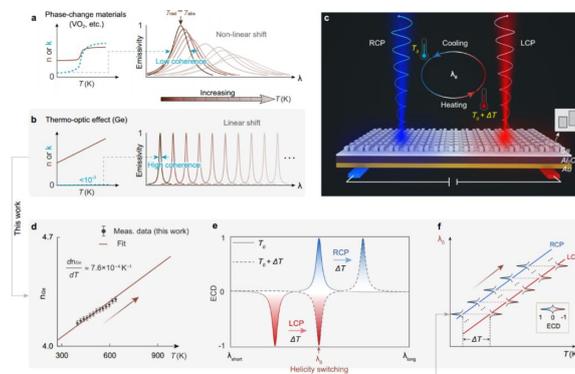
- 1、螺旋性可选择和光谱可调谐的手性热发射
- 2、通过三维光子质量涡旋工程实现的等离激元狄拉克涡旋激光器
- 3、量子几何不等式及其经典波验证
- 4、反常 Floquet 非阿贝尔拓扑绝缘体的实验观测
- 5、II 型双曲晶格中的空间与时空拓扑
- 6、边界散射和表面非晶化对 12 nm 聚合物晶体超高热导率的限制
- 7、键网络熵控制配位无序固体中的热传输
- 8、用于自旋高级太赫兹调控的全介质超光子学

## 1、螺旋性可选择和光谱可调谐的手性热发射

热辐射作为物质在绝对零度以上普遍存在的物理现象，传统黑体辐射因具有宽谱、非相干及非偏振特性，限制了其在红外隐身、热光伏及高分辨成像等先进光子学领域的应用。近年来，非局域超表面与热光子学的融合，使得热辐射在时间相干性、空间相干性及手性方面获得了显著提升。然而，现有热辐射器件多为静态结构，其发射的圆偏振态及波长均无法动态调控，难以满足高精度传感、圆二色光谱分析及偏振编码通信等应用对单一器件实现多维度光场调控的需求。为实现动态可重构的手性热辐射，通常需引入相变材料、液晶等主动介质，但这些材料在红外波段往往存在较大光学损耗，且其响应多局限于特定波长，限制了热辐射的相干性和调谐范围。因此，如何在单一器件中实现兼具高相干性、大动态范围及螺旋性可切换的圆偏振热辐射，仍是一项关键挑战。

近日，山东师范大学的韩张华教授、新加坡国立大学的仇成伟教授和泉州师范大学的吴平辉教授研究团队，提出并实验验证了一种基于非局域各向异性热超表面的新型热辐射调控平台，在单一器件中实现了中红外波段螺旋性可切换与波长可调谐的相干圆偏振热辐射。通过引入晶格扰动与镜面对称性破缺，该结构在金属-介质-半导体多层膜中激发出两对具有相反手性的高 Q 值准导模共振，其发射圆二色性可通过简单的几何参数实现从圆偏振到线偏振的连续调控。利用锗薄膜在红外波段显著的热光效应，仅通过温度变化即可实现发射波长约 100 nm 的连续调谐，并在此过程中完成发射圆偏振态的螺旋性反转。实验测得的发射圆二色性大于 0.8，品质因子超过 150，展示了优异的时间相干性与偏振选择性。该平台无需复杂的电极布线或外部机械驱动，仅依靠热激励即可实现手性热辐射的主动

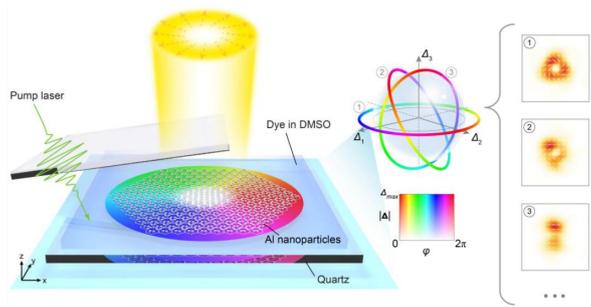
控制，为红外波段的手性光源提供了一种结构简洁、可晶圆级制备的解决方案。该工作所展示的螺旋性可逆切换与宽谱调谐能力，在圆二色性光谱分析、对映异构体识别、红外显示及自旋选择性热成像等领域具有重要应用前景。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-026-70825-1>

## 2、通过三维光子质量涡旋工程实现的等离激元狄拉克涡旋激光器

光的振幅、偏振与相位调控在超分辨成像、自由空间光通信、全息和量子信息等领域具有重要意义。尽管空间光调制器、超表面和光子集成电路等方法已可产生可设计的结构光，但通常依赖严格的波前整形、精密光路对准和外部照明，限制了系统的小型化、可扩展性与集成能力。拓扑光子学通过直接利用微纳腔中的本征模来调控辐射特性，为结构光产生提供了新途径。其中，狄拉克涡旋腔因可支持束缚于涡旋核心、频率稳定钉扎于带隙中部的拓扑零维模式而备受关注，并已在近红外和中红外实现激光发射。然而，可见光波段的狄拉克涡旋腔仍受限于高折射率材料缺乏和纳米加工精度要求，同时现有拓扑腔在输出光场强度、偏振等复杂性质的灵活设计上也存在不足。等离激元纳米结构凭借强散射、深亚波长局域和丰富对称性调控能力，为实现复杂拓扑激光发射提供了很有前景的新平台。近日，香港中文大学的管君教授团队，提出并实现了一种基于三维光子质量项设计的等离激元狄拉克涡旋拓扑激光器，可同时调控发射光场的强度分布与偏振态。作者在铝纳米颗粒构成的蜂窝晶格中，通过对元胞结构施加畸变，引入有效光子质量项，从而打破双狄拉克锥筒并诱导能带反转。进一步地，研究构建了由径向位移、方位位移和颗粒尺寸组成的三维参数空间，用于灵活设计质量涡旋分布。通过将畸变元胞按角向绕转方式排布，首先实现了具有C3对称性的等离激元狄拉克涡旋腔，其远场辐射表现为三叶矢量光束；随后通过调节颗粒尺寸打破反演对称性，抑制特定方向的谷间耦合，数值上获得了具有空间变化偏振和非对称强度分布的复杂远场光束。结合有机染料增益介质后，实验实现了单模激射，并获得了包括矢量光束、线偏振光束及非均匀能量分布复杂偏振态在内的多种激光输出。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）

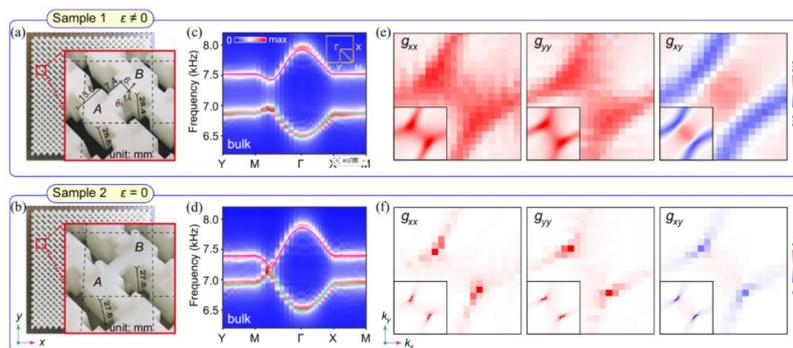


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-70833-1>

### 3、量子几何不等式及其经典波验证

揭示量子物质中的几何性质，是现代凝聚态物理学持续关注的重要主题。从数学上看，量子态的局域几何结构可由规范不变的量子几何张量 (quantum geometric tensor, QGT) 表征。其中，虚部对应广为研究的贝里曲率，用以刻画参数空间中几何相位的局域变化；过去数十年来，贝里曲率已被证明对理解诸多宏观量子现象至关重要，例如阿哈罗诺夫 - 玻姆效应、反常霍尔效应，以及能带拓扑中的陈数表征和整数量子 (反常) 霍尔效应。相比之下，QGT 的实部即量子度规，描述的是无限接近量子态之间的规范不变量子距离。近年来，量子度规在多种复杂量子现象中展现出重要作用，包括超流体刚度、轨道磁化率、分数量子陈绝缘体以及非线性光与物质相互作用等。特别值得注意的是，量子度规的一些积分量往往受到拓扑不变量的下界约束。因此，如何测量量子度规并揭示其物理效应，已成为量子几何研究中的前沿问题。围绕这一方向，研究者已在冷原子光学晶格、强耦合激子 - 光子微腔、金刚石氮空位中心、超导量子电路以及晶体固体材料等多类平台中提出并发展了相应方案。

近日，武汉大学邱春印教授团队提出了一类新的量子几何不等式，建立了 QGT 实部与虚部之间的全局联系，并通过声学超材料实验实现了验证。具体而言，作者将量子态映射到布洛赫球面上，证明了动量空间任意一维闭合回路上的富比尼 - 斯图迪量子距离  $d_{FS}$  与贝里相位  $\phi_B$  之间满足全局不等式  $d_{FS} \geq \phi_B$ 。更为重要的是，当该闭合回路在布洛赫球面上对应一条大圆时，不等式取等号；这一特殊情形对应于非平凡能带拓扑结构。实验上，研究团队构建了两类基于腔 - 管结构的二维声学超材料体系，分别对应具有手征对称性和破缺手征对称性的情形。通过对本征态的精确测量，作者成功提取了完整的量子几何信息，并在经典声学平台上验证了上述量子几何不等式，实验结果与理论预测高度一致。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。

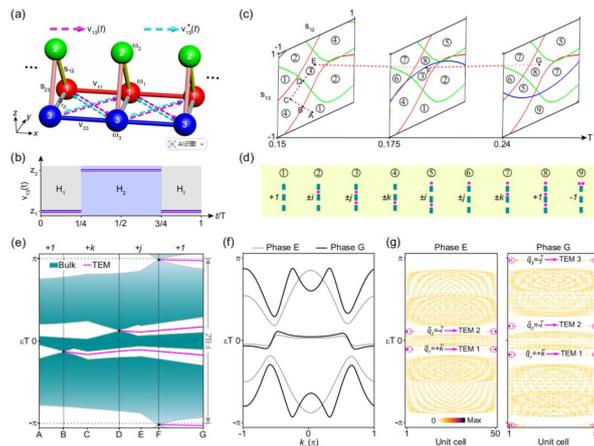


文章链接: <https://doi.org/10.1103/8312-ntt5>

#### 4、反常 Floquet 非阿贝尔拓扑绝缘体的实验观测

超越传统阿贝尔拓扑能带理论的非阿贝尔拓扑相,近年来受到越来越广泛的关注。周期性驱动的引入进一步拓展了这一研究方向,理论上预言了多种新型多能隙 Floquet 拓扑相,例如由非阿贝尔 Floquet 编织诱导的反常欧拉相、狄拉克弦相,以及具有多重体一边对应关系的弗洛凯非阿贝尔拓扑绝缘体 (Floquet non-Abelian topological insulators, FNTIs)。然而,尽管 Floquet 阿贝尔拓扑系统已在多种实验平台中得到实现, Floquet 非阿贝尔拓扑现象此前始终缺乏实验观测。这主要是因为现有平台面临两方面关键挑战:其一,难以实现具有方向选择性的实时动态耦合;其二,难以准确追踪驱动所诱导的复杂多能隙相互作用及其拓扑响应,而这两点恰恰是验证非阿贝尔 Floquet 拓扑相存在的核心前提。

近日,武汉大学邱春印教授团队利用声学平台,首次实现了高难度的 Floquet 非阿贝尔拓扑绝缘体实验。该团队通过电路驱动的动态耦合策略,成功构造出反常 FNTI 相,其体拓扑电荷虽为平庸的  $q=+1$ ,却在三个能隙中同时出现拓扑边缘模;同时还实现了一个对比 FNTI 相,其拓扑电荷为  $q=\pm j$ ,其中  $\pi$  能隙内的拓扑边缘模完全消失。通过对零阶与高阶谐波信号的联合表征,研究人员清晰分辨了相应的准能谱结构和拓扑边缘模分布,从而明确验证了这两类 FNTI 的存在。更为重要的是,研究团队还在反常 FNTI 与其驱动序列互换对应体所形成的畴壁处,观测到了独特的拓扑界面模响应。这一结果进一步揭示了多能隙 Floquet 系统中非阿贝尔动力学的独特性质,也直接体现了驱动时序在非阿贝尔拓扑中的关键作用。该工作首次在实验上实现了 Floquet 非阿贝尔拓扑绝缘体,并直接观测到拓扑界面模,填补了驱动多能隙系统中非阿贝尔动力学从基础理论到实验验证之间的重要空白,深化了人们对非平衡拓扑物理的理解。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW X》。



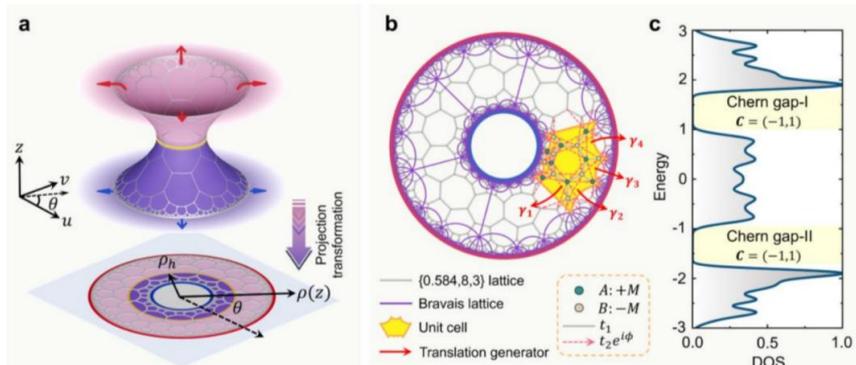
文章链接: <https://doi.org/10.1103/qn87-bm33>

#### 5、II 型双曲晶格中的空间与时空拓扑

近年来,双曲晶格作为一种离散化的负曲率非欧几里得空间,为拓扑物理从欧几里得空间向非欧几里得空间的拓展开辟了新的方向。然而,既有研究大多局限于

传统 I 型双曲晶格，并主要关注单一外边界处的静态空间拓扑态。相比之下，涉及多边界空间相互作用以及动态演化过程的拓扑现象，例如拓扑态的动态转移、非厄米相变等，尚未得到充分探索。近期发现的 II 型双曲晶格，因其同时具有外边界和内边界，为研究上述多边界动态拓扑效应提供了理想的平台。然而，相关理论预测的实验实现一直受制于严苛且复杂的耦合要求。与此同时，在时空拓扑方面，现有的时间与空间晶体的研究主要集中在具有单一空间维度和时间维度的欧几里得时空，更高维度的双曲时空及其伴生的新颖时空拓扑态仍是完全未开垦的领域。

近日，南方科技大学的高振副教授研究团队系统地探索了 II 型双曲晶格中的空间拓扑与时空拓扑。通过将著名的 Haldane 模型映射至 II 型双曲晶格，研究在实验上利用电路平台成功构建了 II 型双曲陈绝缘体，并直接观测到外边界与内边界上具有相反手性的简并手性边界态。进一步地，通过动态调控单通道中相向传播的手性边界态之间的耦合，该研究实验展示了从反宇称时间对称破缺相到准奇点演化过程中的任意比例动态转移。在此基础上，通过精确设计双通道调制下脉冲的转移比例，研究者构建了一种新型 (2+1) 维双曲时空晶体，其空间陈拓扑与时间卷绕数拓扑相互交织，从而形成了一种独特的时空拓扑弦态——该态在空间上被限制在外边界与内边界，在时间上则局域于时间界面。该工作不仅将拓扑物理的研究范畴从静态的空间拓扑拓展至动态的时空拓扑，也为双曲拓扑态的动态调控以及未来紧凑、高效的拓扑光子器件（如拓扑激光器、光频梳）的发展奠定了新的基础。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



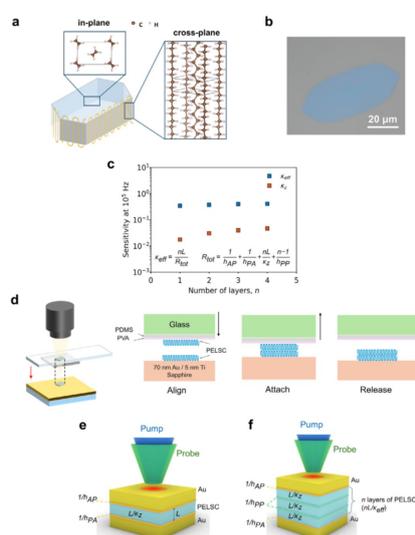
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-70706-7>

## 6、边界散射和表面非晶化对 12 nm 聚合物晶体超高热导率的限制

传统认知中，聚合物是优异的电绝缘材料，却往往是“热的差生”。常规聚合物的热导率通常仅为  $0.1 - 0.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，远低于无机晶体材料，这种低热导严重限制了其在高功率电子器件中的应用。过去十余年，研究者通过拉伸取向、提高结晶度等方法，使聚乙烯纤维的热导率突破  $50 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，证明“塑料也能像金属一样导热”。然而，这些成果主要集中在沿链方向的“面内”传热；对于实际器件中更为关键的“厚度方向”（cross-plane）热传导，尤其是在纳米级薄膜结构中，其传热机制与极限性能始终缺乏实验验证。

近日由浙江大学李寒莹教授与 ZJU-UIUC Institute Wee-Liat Ong 教授围绕“纳米级聚合物单晶的本征厚度方向热导率”这一核心问题，构建了一套巧妙的多层单晶堆叠策略，成功突破了频域热反射 (FDTR) 技术在超薄样品中的灵敏度瓶颈。他们利用自主发展的自种子法制备出厚度仅  $11.6 \pm 0.3 \text{ nm}$ 、横向尺寸达数十微

米的高质量聚乙烯层状单晶，并通过无损转移技术实现多层精确堆叠，从而将“不可测”的单层热导率转化为“可解耦”的等效热阻问题。实验结果显示，12 纳米厚聚乙烯层状单晶的厚度方向热导率达到  $4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ （范围  $2 - 17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ），这是目前纳米尺度绝缘介电薄膜中报道的最高数值之一。这一数值比普通半结晶聚乙烯高出一个数量级，却仍远低于理论完美晶体值。为揭示其物理机制，团队进一步结合非平衡分子动力学与基于第一性原理的声子 Wigner 输运方程计算，系统分析了声子边界散射与表面无定形区的作用。研究发现，在  $12 - 15 \text{ THz}$  频率区间内的高频声子原本是体相晶体的主要热载体，但在  $12 \text{ nm}$  厚度下，边界散射成为主导机制，显著压制其贡献；同时，晶体表面约  $10\% - 25\%$  的折叠链无定形区域进一步降低了有效热导率，使实验值与理论完美晶体之间出现差距。通过在模拟中引入不同密度的表面“环形链”结构，研究团队成功再现实验结果，首次在原子尺度上建立了“表面微结构—声子散射—宏观热导率”之间的定量联系。该工作不仅证明超薄聚合物晶体可以在保持优异电绝缘性能的同时实现显著的热输运能力，也为通过分子设计调控纳米尺度热管理性能提供了清晰路径。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）

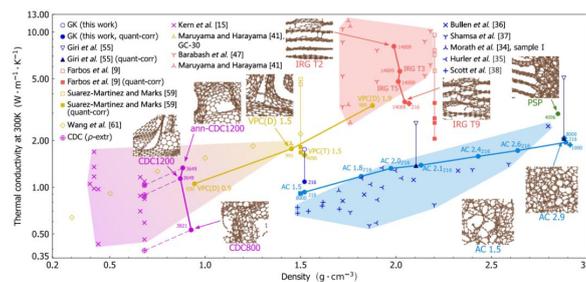


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202520085>

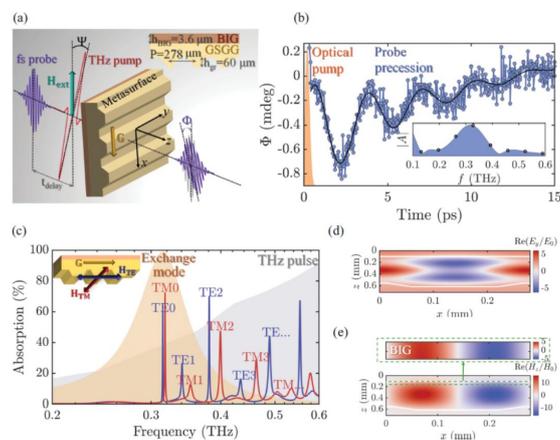
## 7、键网络熵控制配位无序固体中的热传输

近年来，如何理解“结构无序”对材料热输运的影响，成为凝聚态物理与材料科学领域的核心问题之一。以碳材料为例，从热导率不足  $1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  的纳米多孔碳，到超过  $2000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  的石墨烯与金刚石，其热输运能力跨越四个数量级。这种巨大差异源自原子尺度的键合方式与拓扑结构差异，但长期以来，学界尚缺乏一个统一的、可预测的结构—热导率关系理论。传统研究往往聚焦某一类具体材料，例如无定形碳、辐照石墨或多孔碳，却难以在不同类型的无序固体之间建立普适规律。特别是在“配位无序固体”（coordination-disordered solids）中，原子配位数与键网络拓扑高度复杂，如何定量描述“无序程度”，并将其与宏观热导率建立直接联系，一直是理论难题。为此，研究者近年来引入 Wigner 输运理论与机器学习势函数等先进工具，试图从量子统计与振动态耦合出发，重新审视无序固体中的热传导机制。

近日，美国哥伦比亚大学的 Michele Simoncelli 教授课题组利用机器学习高精度高斯近似势（GAP）与 Wigner 热输运方程，系统计算了 23 种不同类型的无序碳同素异形体的热导率，涵盖无定形碳、辐照石墨、不同孔隙率碳材料及碳化物衍生碳等多个类别。研究发现，热导率在这些材料中可变化一个数量级以上，而这种变化并非简单由密度决定，而是由原子键网络的拓扑异质性主导。团队通过将固体分解为局域原子环境（LAE），并利用基于同调理论的 H1 条形码刻画原子环结构分布，定义了“键网络熵”BNE。更关键的是，他们证明 BNE 随环境尺度  $n$  的增长率  $BNE(n)/n$  是一个强有力的无序度量参数，其数值与材料的热导率/密度呈显著负相关关系（Spearman 相关系数达-0.947）。从微观机制上看，键网络熵的增加会导致振动态密度（VDOS）平滑化，即原本尖锐的振动峰被展宽和抑制，这种“谱平滑”正对应于无序引起的声子散射增强与平均自由程缩短。通过构建显式无序玻璃（EDG）与扰动无序晶体（PDC）之间的理论映射，作者进一步将 Wigner 输运理论与 Kittel “声子液体”模型统一起来，从严格的量子框架中推导出无序限制下的声子平均自由程与传播长度尺度。研究不仅为理解无序固体中的热输运建立了从原子拓扑到宏观热导率的定量桥梁，也为超电容器材料结构优化及核反应堆中辐照石墨的可靠性评估提供了理论工具。该工作表明，键网络熵可作为调控热性能的核心自由度，为能源材料与极端环境结构材料设计提供了全新的理论路径。相关内容发表于《Physical Review X》上。（张琰炯）



说，这种超光子学结构不仅能够增强太赫兹场与自旋体系的耦合，还能在空间方向上更灵活地塑造自旋响应，为超快、自主可控的自旋操纵提供了新的物理手段。该工作表明，介质超表面可作为太赫兹频段自旋调控的重要平台，为自旋电子学、磁振子学以及量子计算等当前热点领域提供了广阔的发展机会。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/h2fr-t1sr>  
 (来源: 两江科技评论)