

超材料前沿研究一周精选



2025 年 11 月 10 日-2025 年 11 月 16 日

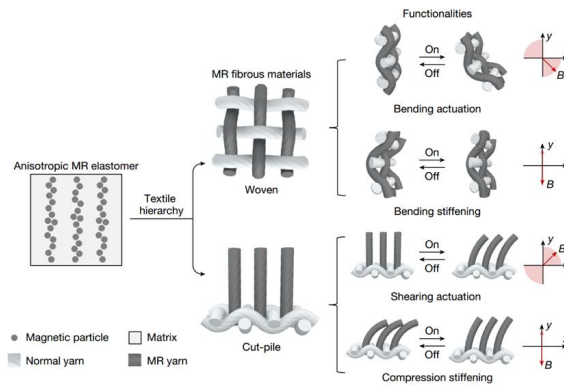
索引:

- 1、矢量刺激响应型磁流变纤维材料
- 2、动态轴子绝缘体的多光子光谱学研究
- 3、电调控合成两能级系统中的光子拓扑准粒子
- 4、手性声学声子与石英中赝角动量守恒
- 5、碲的非线性手性热电霍尔效应的观测
- 6、电磁一体化辐射-散射可重构智能超表面
- 7、返回 Thouless 泵浦的实验观察

1、矢量刺激响应型磁流变纤维材料

智能纤维材料能够在外界刺激下实现可逆驱动或调节机械性能，在智能纺织品、软机器人和可穿戴技术中具有广阔应用前景。目前，多数研究集中于对标量刺激（如电压、温度、湿度和离子浓度）响应的纤维材料，但这些材料往往缺乏方向可控性和功能多样性。磁流变材料作为一种典型的智能材料，可在磁场作用下可逆改变其流变与力学特性，但其发展受限于基质刚性、高磁场强度需求以及硬磁纤维在纺织集成中的困难，如磁化模式不稳定、制造精度低和磁相互作用干扰。因此，亟需开发一种兼具方向响应能力、柔性及安全性的新型纤维材料。

近日，香港理工大学的陶肖明教授、蒲俊宏研究助理教授研究团队通过集成多层级纤维结构与磁性调控模型，开发出具有矢量响应特性的磁流变纤维材料。采用低密度聚乙烯与羰基铁颗粒复合，通过熔融纺丝与高速拉伸工艺，实现了直径 57 微米、颗粒含量达 70% 的高性能磁流变纤维的规模化制备。这些纤维进一步被组装成具有同心螺旋结构的纱线，在磁场方向与强度调控下表现出显著的弯曲驱动与刚度调节能力。研究还构建了编织与割绒两种结构的磁流变织物，实现了包括弯曲、剪切、线性运动在内的多种驱动模式，以及弯曲与压缩状态下的刚度调控，其弯曲力矩密度达 $6.5 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，刚度可调范围高达 30 倍。在应用层面，该材料被用于开发多种智能纺织品原型：一种主动通风织物可通过磁场调控实现湿度管理；一种集成式自适应抓取装置能够安全抓持形状与刚度各异的物体；一种轻量无线触觉手套可模拟不同织物的硬度与光滑度，提供真实的触觉反馈。该研究不仅实现了刺激响应纤维从标量控制向矢量控制的跨越，还展示了其在个性化穿戴、人机交互与软体机器人中的广泛应用潜力，推动了智能纺织品从实验室走向实用化的发展进程。该文发表于《Nature》。（刘梦洋）

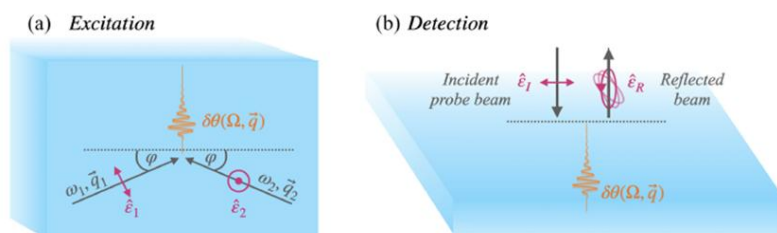


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09706-4>

2、动态轴子绝缘体的多光子光谱学研究

轴子粒子最初在高能物理中被提出，用以解决强相互作用中的电荷-宇称（CP）问题，被视为一种与轴向 $U(1)$ 对称性相关的 Nambu - Goldstone 玻色子。如今，轴子被认为是暗物质的有力候选者，可用于解释宇宙中的物质-反物质不对称。虽然在粒子物理中尚未发现真实轴子，但理论预言其凝聚态对应物可能存在于某些三维材料中，如 Weyl 半金属与拓扑绝缘体。轴子场的存在可通过其特征性的磁电响应识别，即修改后的 Maxwell 方程形式——轴子电动力学，它引发异常霍尔效应、磁导率及拓扑磁电效应等。在强关联体系中，轴子场还可产生非线性集体激发，与电磁场耦合形成动态磁电效应。例如，在具有电荷密度波（CDW）序的 Weyl 半金属中，轴子模式对应于 CDW 相位的集体振荡；而在反铁磁拓扑绝缘体中，轴子角随自旋波激发可在 0 至 2π 间连续变化。尽管这些体系为研究轴子物理提供了可控平台，但由于其非线性耦合特性，实验识别仍具挑战。现有探测手段多依赖强磁场下的线性扰动或压磁测量，仅揭示平衡响应，难以表征轴子动力学，因此亟需发展新的全光学探测方法来实现直接观测。

近日，加利福尼亚大学洛杉矶分校的 Olivia Liebman、Jonathan B. Curtis、Ioannis Petrides、Prineha Narang 团队，提出了一种全光学泵浦 - 探测实验方案，用于验证和表征三维绝缘体体系中轴子场的瞬态动力学行为。该方法完全依赖光学手段，无需电接触，能够在时域内直接观测轴子场的演化特征。研究表明，非线性拉曼过程可激发出随入射电磁场几何构型变化的轴子场动态振荡。这种振荡会在材料的极化和磁化响应中产生可观测信号，从而可通过时间分辨克尔旋转光谱技术进行检测与分析。该方案突破了以往依赖静态或线性响应的局限，实现了对轴子集体模的直接探测，为研究强关联拓扑物态的非线性动力学提供了新思路。通过多光子和量子光谱学手段，有望揭示新的关联量子物质相，并推动基于轴子电动力学的光学与量子信息技术的发展。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



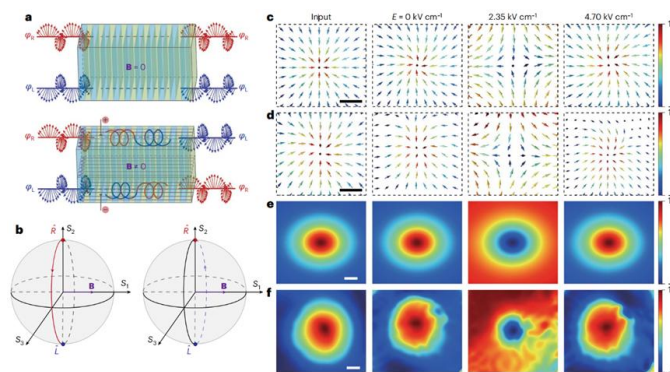
文章链接: <https://doi.org/10.1103/3zkg-95b3>

3、电调控合成两能级系统中的光子拓扑准粒子

拓扑准粒子可视为二维或三维矢量场,其矢量取向在空间或时空中连续渐进变化,由携带非平凡拓扑相位的正交空间或时间模式相干叠加而成,从而同时融合自旋角动量与轨道角动量,在实空间与时间域中呈现丰富的拓扑结构。这类拓扑结构为信息编码与处理提供了全新的自由度。典型例子包括磁性斯格明子和霍普夫子等电子自旋纹理:它们源于自旋-轨道耦合,并可在外加电场和磁场作用下被精细操控,展现出斯格明子霍尔效应、拓扑相变以及斯格明子-反斯格明子对的产生与湮灭等现象。这些受控拓扑效应构成了拓扑器件与拓扑计算的基础。

在光子体系中,多种拓扑现象已被证实,这为结构化光操控与应用提供了机遇。基于偏振与相位奇点的光场工程,研究者已经在傍轴与非傍轴条件下构造出由电磁场、自旋(赝自旋)矢量、斯托克斯参量以及坡印廷矢量表征的光子拓扑准粒子。然而,与磁性粒子不同,光子本身电中性,难以通过外加电场或磁场直接驱动,从而限制了对光子拓扑准粒子的高效场控和不同拓扑态之间的可编程转换。开发实现不同光子准粒子间非平庸跃迁的场控方法,对于在光子器件中利用其独特拓扑特性具有重要意义。

近日,山东师范大学陈险峰教授、蔡阳健教授和付神贺教授团队提出并实验证实了一种电可控“赝磁场”方案,可在合成两能级系统中有效驱动光子拓扑准粒子演化。该体系将两个正交偏振分量视作赝自旋上、下态,通过光子准粒子与电光晶体的相互作用构建出形式上等价于自旋-1/2体系的两能级平台。研究表明,赝磁场的幅度与方向可在三维参数空间内灵活调控,从而精确控制拓扑准粒子在参数空间中的演化轨迹,实现不同光学 skyrmion 与 hopfion 之间的可逆转换。同时,工作中清晰揭示了几何相在这一演化过程中的关键作用,展示了几何相驱动的拓扑态重构机制,为拓扑准粒子动力学提供了新的物理视角。该成果显著推进了场控光子拓扑准粒子的研究,为面向拓扑信息处理、类自旋光子比特操控以及新型光子器件的实现奠定了重要基础。相关内容已发表于《Nature Photonics》。(金梦成)

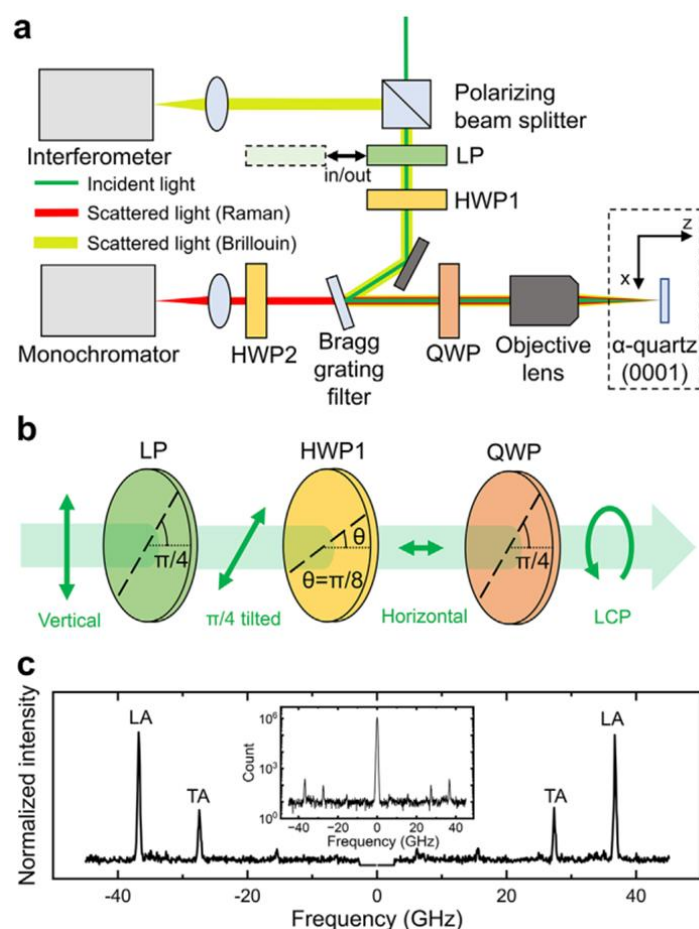


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-03074-6>

4、手性声学声子与石英中赝角动量守恒

近年来的理论与实验研究逐渐揭示出一个更深层的事实：声子也可以具有“手性”，即存在内禀的旋转方向和角动量，这一类被称为“手性声子”（chiral phonon）。手性声子不仅携带与原子质量旋转相关的角动量，还包含由相位缠绕产生的“赝角动量”（pseudoangular momentum, PAM）。这种独特的量子属性使手性声子成为连接晶格动力学、电子自旋与能流耦合的新纽带，为理解多种新奇量子效应打开了窗口。然而，尽管手性光学声子（chiral optical phonon）已被实验证实，其在多种二维材料和体相晶体中的存在已得到光谱学观测，但手性声学声子（chiral acoustic phonon）这一更基础、频率更低的激发形式，长期以来却未被直接探测。与光学声子不同，声学声子携带的能量极低、波矢范围窄、信号极弱，使得其手性特征的实验识别几乎成为光谱技术的空白。如何在实验上直接观测到声学手性声子的存在，并揭示其与光子相互作用中的角动量守恒规律，成为凝聚态物理与自旋热电子学领域亟待解决的核心问题。

近日，韩国标准科学研究院量子技术研究所 Changsoo Kim 研究员与 Chanyong Hwang 研究员，首次通过布里渊光散射（Brillouin light scattering）直接观测到手性声学声子的存在，并揭示了其遵循的 PAM 守恒定律。这一工作为理解晶格手性与角动量守恒之间的量子关联提供了实验证据，也为基于手性声子的新型自旋热电与量子信息器件奠定了物理基础。研究团队以具有天然手性的 α -石英（ α -quartz）晶体为模型体系，通过控制入射光的圆偏振方向（左旋 LCP 与右旋 RCP）以及晶体的手性（P3121 与 P3221），系统测量了声学与光学声子的布里渊和拉曼散射谱。结果发现，在右手型石英中，当入射光的偏振由左旋切换为右旋时，横向声学声子（TA 模）的频率会发生约 252 MHz 的分裂，而纵向声子（LA 模）保持不变；在左手型晶体中，这一分裂方向则完全相反。这种能级双重结构（energy doublet）正是手性声学声子存在的直接证据，且其频率差与理论计算结果（约 250 MHz）高度吻合。更为重要的是，团队进一步通过系统的光子-声子相互作用分析，发现声学声子在三重旋转对称晶体中严格遵循伪角动量守恒定律：在斯托克斯（Stokes）与反斯托克斯（anti-Stokes）散射过程中，入射光与散射光的角动量变化与手性声子携带的伪角动量呈一一对应关系，从而揭示了光子螺旋性与晶格手性之间的量子耦合机制。该研究不仅首次实验证实了手性声学声子的存在，还系统阐明了其与光学声子在手性守恒规律上的统一性，为“手性声子驱动自旋选择效应”和“角动量热输运”等新兴方向提供了坚实依据。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）

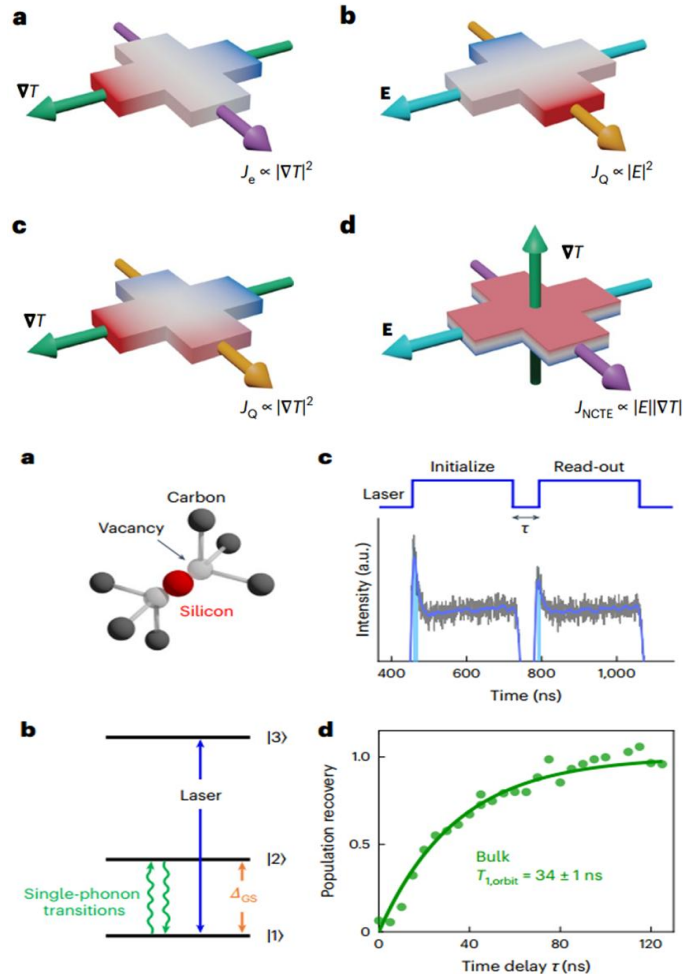


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202511289>

5、确的非线性手性热电霍尔效应的观测

传统的热电效应,如塞贝克效应(Seebeck effect)和能斯特效应(Nernst effect),通常描述的是温度梯度与电流之间的线性响应关系。然而,近年来理论物理学的进展指出,在缺乏反演对称性的“手性材料”中,电荷与热流之间可能存在一种全新的非线性热电耦合机制。这种“非线性热电效应”意味着,电压或温度梯度不再仅仅与输入的电流或热流成正比,而可以呈现出更高阶的响应,反映出电子能带结构的量子几何特性。特别地,理论预言在某些具有拓扑能带的手性晶体中,反演对称性破缺将导致 Berry 曲率偶极矩(Berry curvature dipole)的出现,从而产生“拓扑非线性热电效应”。这一新奇的物理过程不仅与基础的量子几何学紧密相关,也为开发能量整流、热管理、热能收集等前沿技术提供了新思路。手性材料的独特性在于其结构与镜像无法重合,常表现出自旋选择输运、手性声子、轨道单极子等一系列奇特量子现象。理论研究曾预言多种非线性热电效应,例如非线性能斯特效应、非线性 Ettingshausen 效应、非线性热霍尔效应等,但迄今为止这些效应大多停留在理论层面,缺乏直接的实验验证。尤其是所谓的“非线性手性热电霍尔效应”(Nonlinear Chiral Thermoelectric Hall Effect, NCTE Hall Effect)——即在无磁场条件下,由温度梯度与电场的叉积诱导出垂直电流或电压的现象——被认为是手性体系中最具代表性的量子热电响应之一。然而,

由于其信号极为微弱、测量要求苛刻，这一效应的实验观测一直未能实现。近日，日本理化学研究所（RIKEN）新兴物质科学中心（CEMS）的 Tetsuya Nomoto 研究员团队首次在实验上实现了手性碲（tellurium）中非线性手性热电霍尔效应的观测。研究团队选用具有螺旋链结构的手性半导体——单晶碲（Te）作为模型体系。碲的晶体结构沿 c 轴方向呈现右手或左手螺旋，天然具备反演对称性破缺特征，是探索手性热电效应的理想材料。研究人员利用物理气相传输法（PVT）生长出高质量的右手与左手 Te 单晶，设计了能同时施加温度梯度与交流电流的五端测量系统，实现了对 NCTE 霍尔电压（ V_H ）的高灵敏检测。实验结果显示，当温度梯度与电流方向互相垂直时，沿 c 轴方向会产生数量级为微伏（ μV ）的横向电压信号，其大小与温度梯度及电流强度均呈线性关系，完全符合理论模型中 $J_{NCTE} = \sigma NCTE (E \times -\nabla T/T)$ 的预言。当研究者将晶体的手性反转（即由右手型换为左手型）时，测得的 NCTE 霍尔电压符号也随之反转——这清晰地证明了该效应与晶体手性直接相关，揭示了热电响应可由“手性自由度”调控的新物理机制。为了排除测量伪信号的可能性，团队还在非手性材料铋（Bi）和锗（Ge）上进行了对照实验，均未观测到类似的霍尔电压，进一步证实了该效应的手性起源。理论计算方面，基于密度泛函理论与弛豫时间近似的预测结果与实验值在数量级上相符，表明该非线性响应确为量子几何效应的体现。这项成果不仅首次在无磁场、时间反演对称的体系中验证了 NCTE 霍尔效应的存在，也为未来利用手性体系开展量子几何调控热电性能、发展非线性热电器件提供了坚实的实验基础。相关内容发表于《Nature Physics》上。（张琰炯）

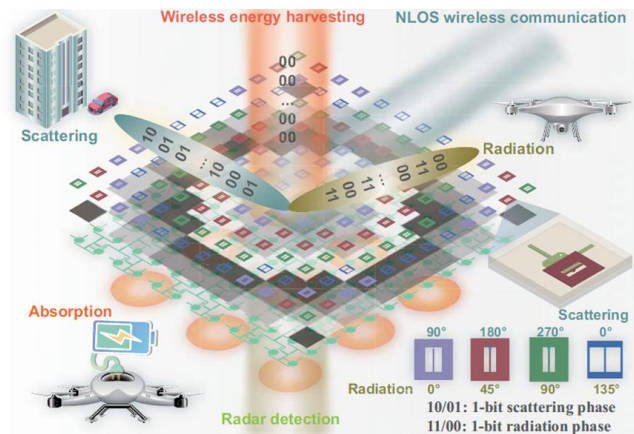


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-03073-7>

6、电磁一体化辐射-散射可重构智能超表面

6G 无线通信技术旨在实现万物互联，但现有系统受资源限制，难以满足高速率、低时延和高可靠性的需求。毫米波技术虽拓展了 6G 的潜力，却带来传播损耗大、盲区多等问题。可重构智能超表面（RIS）因低成本、低损耗和可编程特性成为提升网络性能的重要手段。RIS 由亚波长谐振单元组成，通过 PIN 二极管或变容二极管动态调控反射/透射波的幅度和相位，实现波束赋形，广泛应用于无线通信、能量传输和定位等领域。然而，为满足 6G 对通信与感知一体化的需求，RIS 需同时具备辐射与散射调控能力。现有 RIS 多集中于散射控制，辐射控制仍依赖复杂的可编程相控阵，导致结构复杂、损耗高、极化单一。尽管部分研究尝试融合辐射与散射模式，但存在相位量化精度低、极化不可控等问题，亟需一种低成本、高精度、可实现多极化的辐射-散射一体化 RIS 硬件新范式。

近日，西安电子科技大学的李龙教授团队，提出一种电磁一体化辐射-散射可重构智能超表面（RIS）。该设计构建了简洁灵活的辐射-散射超原子框架，可实现任意极化与相位的超原子设计。辐射-散射超原子由辐射贴片与 3 dB 耦合器组成，其中贴片负责极化特性，耦合器控制相位与幅度。通过在耦合器上加载两枚 PIN 二极管，可实现 1-bit 辐射与 1-bit 散射相位调控。在贴片上加载不同电容后，设计了四种具有不同初始相位的辐射单元，首次实现了四种初始辐射与散射相位的一体化设计。由此构成的阵列能有效抑制量化误差导致的栅瓣，提高效率，并在无需多目标优化算法的情况下实现高性能波束扫描。此外，通过在耦合器上加载两枚变容二极管和一枚 PIN 二极管，可实现连续相位调制，并揭示了圆极化下超原子的辐射-散射特性，体现了框架的高灵活性与多功能性。最后，制作了一个 12×12 线极化 1-bit 辐射-散射 RIS 样机，验证了其波束赋形与非视距通信性能，为下一代无线通信提供了统一的通信与感知硬件平台。相关工作发表在《National Science Review》上。（刘帅）



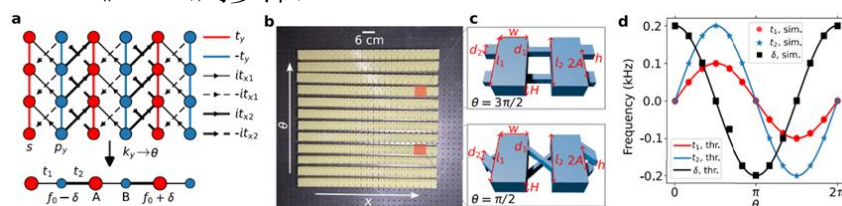
文章链接: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf470>

7、返回 Thouless 泵浦的实验观察

Thouless 泵浦是拓扑物相中的基本输运机制，描述了在哈密顿量绝热循环演化下电荷的量子化输运，其泵浦电荷由系统的陈数决定，具有拓扑保护性。该现象

已在多个物理平台中得到验证。近年理论研究提出了“返回 Thouless 泵浦”的新机制：当整个布里渊区的陈数为零时，通过将其划分为子布里渊区，每个子区可承载非零陈数，导致体极化在半个周期内从 0 演化为 1，后半周期返回 0。这一行为与“精细拓扑绝缘体”密切相关，其 Wannier 函数具有多细胞特征，无法绝热变形至单胞内，且拓扑性质较为脆弱。尽管理论已对这类物相展开深入探讨，但由于实现模型通常涉及长程与复值跳跃，其实验观测一直面临挑战，成为当前拓扑物态研究中的一个重要开放问题。

近日，新加坡南洋理工大学的张柏乐教授、香港中文大学的薛昊冉助理教授和香港大学的赵宇心副教授研究团队，通过引入合成维度，设计了一系列一维声学晶体，构建出等效的二维精细拓扑绝缘体。通过精确调控谐振腔的耦合通道，实现了仅含最近邻实值跳跃的简化模型。实验通过测量声学能带及波函数，观察到体极化随参数演化呈现先增后减的返回特性，直接验证了返回 Thouless 泵浦。研究还通过特定规范构造出对称的多细胞 Wannier 函数，证实了精细拓扑的非局域特征。此外，实验观测到由子布里渊区陈数保护的无能隙边界模：上下半布里渊区具有相反陈数，导致边缘出现一对反向传播的手性模式，体现了独特的体边对应关系。该实验不仅首次在声学平台上实现了返回 Thouless 泵浦与精细拓扑绝缘体，也为探索更复杂的晶体对称性保护拓扑物相、非厄米精细拓扑以及多模波导与信号复用等潜在应用提供了理想的研究平台。该文章发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64671-w>

（来源：两江科技评论）

