

# 超材料前沿研究一周精选



2026年6月22日-2026年6月28日

索引：

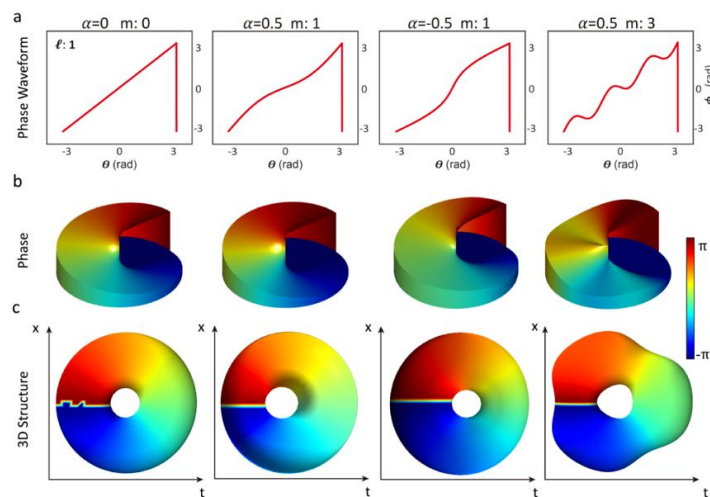
- 1、结构化横向轨道角动量晶格中的时空通量呼吸与拓扑雕塑
- 2、声子晶体中的拓扑槽
- 3、由人工 SU(2) 规范场诱导的声学非阿贝尔拓扑绝缘体
- 4、链滑动振动模式控制非晶材料中的玻色子峰和声子异常
- 5、非局域 Metaspire：一种具有解耦机械模式的可扩展弹性材料平台
- 6、通过挤压诱导的对称性破缺来增强非互易性
- 7、通过色散工程抑制宽带辐射传热
- 8、基于无模型超表面神经网络的计算空间构建

## 1、结构化横向轨道角动量晶格中的时空通量呼吸与拓扑雕塑

自光轨道角动量概念提出以来，结构光已成为调控光场自由度的重要方向，并在光通信、量子信息和超快光学中展现出广阔潜力。传统空间轨道角动量模式已经发展出丰富的矢量涡旋和拓拓扑纹理，而时空光学涡旋则进一步把相位奇点嵌入空间一时间平面，使光场携带横向轨道角动量。然而，现有时空涡旋通常依赖均匀螺旋相位生成，所得波包多表现为旋转对称的“刚体”环形结构，其轨道角动量往往被视为单一标量性质。这样的范式虽然保证了全局拓扑荷守恒，却遮蔽了局域相位梯度、能流分布和角动量密度之间更细腻的动力学关系。相比自然界中大量具有非均匀旋转和对称性破缺的涡旋系统，时空光学涡旋的内部结构调控仍显不足，因此亟需一种能够在保持全局拓扑不变量的同时，对局域时空能流进行可编程雕刻的新方法。

近日，上海理工大学的范广宇教授研究团队通过对光场谱域方位相位进行非线性映射，打破传统时空光学涡旋的旋转对称性，构建了非均匀时空光学涡旋及其多瓣状横向轨道角动量晶格。研究表明，局域相位梯度的周期性变化会诱导群速度各向异性，使能量流在不同方位扇区中交替压缩与扩展，形成时空通量呼吸现象；与此同时，整体相位绕转仍被严格保持，说明剧烈的局域重构可以与全局拓扑保护共存。实验和模拟进一步证明，调制深度可控制晶格对比度，调制频率可决定亮瓣数量，从而实现对超快波包内部几何结构、能流和角动量密度的确定性设计。基于拓扑荷与晶格对称阶数两个相互独立的自由度，该研究还展示了高维自由空间信息编码与解码，为大容量光通信、强场物理、时空拓扑光子学以及高维量子纠缠提供了新的结构光平台。

该文章发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



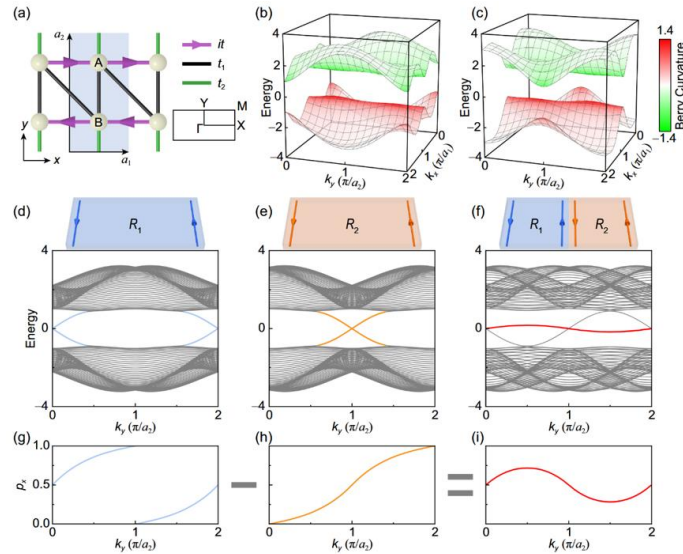
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-74644-2>

## 2、声子晶体中的拓扑槽

拓扑态因其对缺陷和无序具有天然鲁棒性，被视为波动信息处理、信号传输与信息存储的重要候选平台。其中，陈绝缘体中的手性边界态能够沿样品边界单向传播，并受到体拓扑性质保护，仿佛一条难以被反向散射打断的单行波轨道。然而，这种鲁棒传播也带来了新的限制：信息载体虽然稳定，却不易在指定位置暂停、捕获或按需释放。对于实际拓扑器件而言，仅有无损传输并不足够，进一步实现局域能量存储、可编程路由以及拓扑信息编码，需要一种能够在保持拓扑保护的同时，将传播态转化为局域态的机制。已有反手性传输和彩虹捕获等方案提供了部分思路，但在陈绝缘体中，具有相同陈数的不同拓扑畴之间是否仍能产生非平凡界面态，仍是值得探索的问题。

近日，武汉大学的刘正猷院士、柯满竹教授、陆久阳教授研究团队，提出并实验实现了一种“拓扑槽”结构，用于对声子晶体中的手性拓扑态进行空间捕获和受控释放。其核心思想是构造两个具有相同陈数但存在界面极化失配的拓扑畴。传统观点认为，相同陈数界面不会产生净手性界面态，但该研究表明，极化差异仍可诱导位于体带隙中的非手性局域界面态，并使原本沿边界传播的手性模式被转化为受保护的局域模式。实验在双层声子晶体中实现了这一机制，通过声腔和耦合管网络模拟声学陈绝缘体，并测量了体态、边界态和界面态谱。实验还直接可视化了三种狭槽构型：释放状态下的外边界单向传播、中间状态下的内部环形循环，以及闭合狭槽中的局域捕获。该结果拓展了陈体系中弱拓扑和界面极化的物理图像，也为拓扑波控制、信息存储、选择性释放和多平台波器件设计提供了新的路径。

该文章发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/vf18-1kh7>

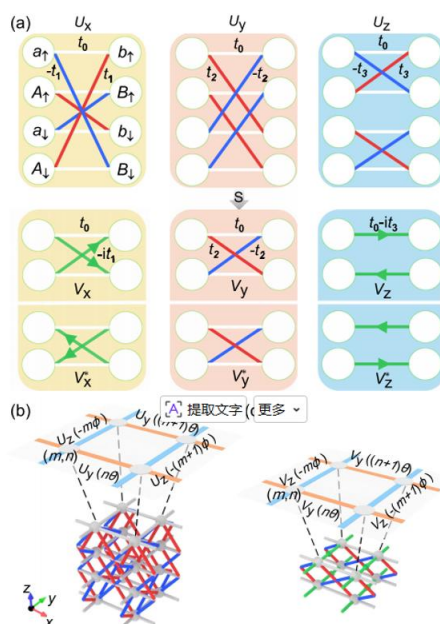
### 3、由人工 SU(2) 规范场诱导的声学非阿贝尔拓扑绝缘体

人工规范场能够构建出具有抗干扰信息传输能力的拓扑物理体系。这类场在拓扑物理中被称为贝里曲率，其性质取决于关联群的阿贝尔（交换）或非阿贝尔（非交换）特性。自凝聚态拓扑物理被发现以来，大多数系统都是基于阿贝尔特性的 U(1) 规范场构建的。目前，科学家已成功在冷原子、光子和声学等不具固有电子特性的系统中构建了人工阿贝尔规范场，并实现了四极子拓扑绝缘体等新型物质拓扑相。这些探索不仅深化了其与电磁学的联系，更为革新传统器件设计提供了稳健的拓扑保障。

相比之下，非阿贝尔拓扑学由于能显著拓展理论框架与现象，正受到日益关注。在自然界中，介导强、弱相互作用的非阿贝尔规范场需要更多内部态与非交换的矩阵值规范势。随着技术发展，此类场已在冷原子、光学及量子电路中被成功构建，并观测到非阿贝尔阿哈罗诺夫-玻姆效应和杨单极子等物理现象。然而，以往实现的场并非动量空间中的贝里曲率，无法形成非平凡的能带隙，因而难以实现非阿贝尔拓扑绝缘体。尽管近年来有理论提出通过构建非阿贝尔磁布里渊区来实现它，但受限于复杂的矩阵耦合效应，实验落地一直未能实现。

近日，南开大学刘慧副教授，程化教授，陈树琪教授团队提出了一种在声子晶体中构建人工 SU(2) 规范场的方案，该方案利用层自由度来实现复矩阵值耦合。通过将此方案应用于非阿贝尔霍夫施塔特模型，在声子晶体中实现了非阿贝尔拓扑绝缘体，该模型形成了非阿贝尔磁布里渊区并产生非平凡的拓扑能隙。实验中，在狭窄的拓扑能隙内观测到一对具有相反自旋的边界态，这些态由动量空间中的人工 SU(2) 规范场诱导产生。团队进一步表征了它们的特性——包括沿布洛赫球特定平面发生的自旋旋转与翻转现象——这些特征均体现了非阿贝尔规范场的独特性质。

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

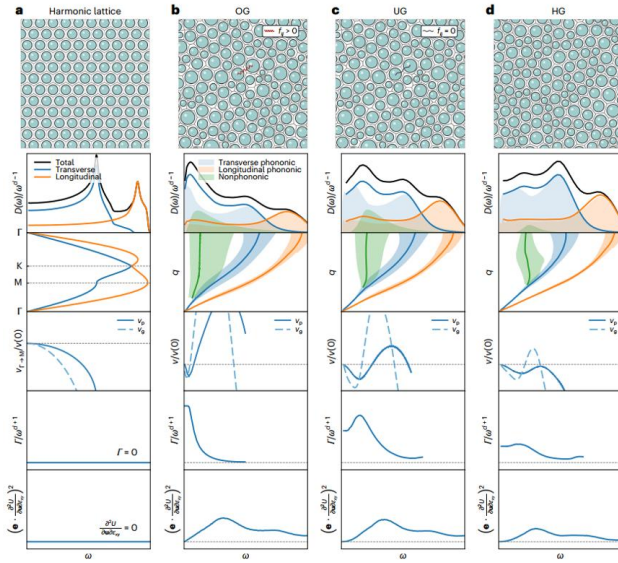


文章链接: <https://doi.org/10.1103/wjh8-t1vd>

#### 4、链滑动振动模式控制非晶材料中的玻色子峰和声子异常

非晶材料广泛存在于玻璃、高分子、金属玻璃和无序固体中，其热学、力学和声学性质长期以来都表现出与晶体截然不同的异常行为。其中最具代表性的现象之一就是“玻色峰”：在太赫兹频率附近，非晶材料的振动态密度相较德拜理论出现额外增强。这一异常不仅与低温热容峰、热导率平台等经典玻璃态现象密切相关，也反映了无序结构中声子传播、局域振动和非仿射响应之间的深层耦合。然而，玻色峰的微观起源一直存在争议。过去几十年中，学界提出了弹性非均匀性、准局域振动模式、链状运动、边际稳定性、声子散射等多种解释，但始终缺乏能够区分不同机制的直接证据。尤其是准局域模式是否就是玻色峰的根源，还是只影响更低频的力学响应，一直是非晶物理领域悬而未决的核心问题。厘清这一问题，不仅有助于理解玻璃态材料的基本物理，也将为调控非晶材料的热运输、声学衰减和力学稳定性提供新的理论基础。

针对这一长期难题，东京大学的 Hajime Tanaka 教授团队，通过二维和三维普通玻璃、超均匀玻璃以及去内应力玻璃的数值模拟，系统分解了声子与非声子振动模式，发现玻色峰并非主要源于传统认为的四极型准局域模式，也不能简单归因于弹性非均匀性，而是来自声子与“弦滑动振动模式”的强共振耦合。研究表明，准局域模式主要出现在低频区，主导非仿射力学响应和瑞利散射；而在玻色峰频率附近，真正起关键作用的是具有偶极特征的弦滑动模式。这类模式表现为一串粒子沿局域软方向发生协同滑动，两端粒子承担主要体积形变，并能与太赫兹频率声子发生频率匹配，从而产生强烈声子散射、声速软化和振动态密度增强。更重要的是，即便在缺少准局域模式和明显弹性非均匀性的超均匀玻璃、去内应力玻璃中，玻色峰仍然存在，直接证明准局域模式并非玻色峰的必要条件。该研究由此提出“弦—声子共振”这一统一图像，解释了非晶材料中玻色峰、声子衰减和声速异常的共同来源，为长期争议的玻璃振动异常问题提供了新的微观机制，也为未来设计低热导、高阻尼或特殊声学性能的非晶材料提供了重要思路。相关内容发表于《Nature Materials》上。（张琰炯）

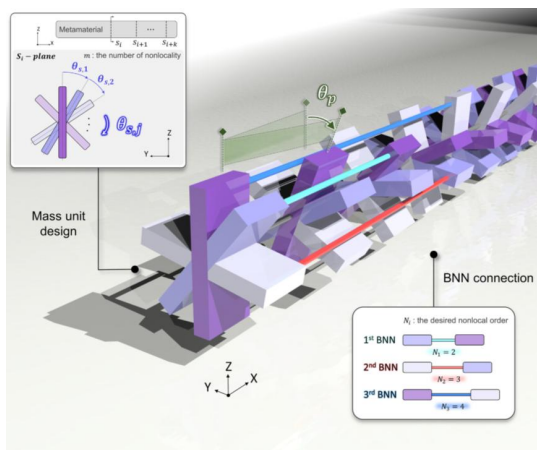


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02592-9>

## 5、非局域 Metaspire: 一种具有解耦机械模式的可扩展弹性材料平台

超材料通过人工亚波长结构实现了天然材料难以具备的动态响应，如带隙、反向传播和平带。近年来，非局域性因其特殊波动物理受到关注，非局域超材料可通过近邻与远距离单元的相互作用，产生类似量子体系中 roton 和 maxon 的异常色散。已有研究利用超近邻耦合（BNN）实现了可调非局域色散，并拓展到弹性和声学体系。然而，现有结构通常依赖侧向连接来避免几何重叠，难以同时实现多阶非局域耦合，也不利于二维、三维扩展。更重要的是，这类非对称连接会引起纵向、扭转和弯曲等弹性模式耦合，掩盖非局域色散特征。因此，构建一种兼具可扩展性和模式解耦能力的非局域弹性超材料平台仍是关键挑战。

近日，首尔大学 Joo Hwan Oh 教授研究团队，提出了一种基于 Metaspire 结构的非局域弹性超材料设计范式。不同于传统侧向连接方法，该平台通过顺序旋转机制引入面对面连接，在避免几何重叠的同时抑制弹性模式耦合，从而解决可扩展性和模式耦合两大问题。研究表明，仅调节单元的周期序列角和取向角，即可构建复杂的多阶非局域耦合系统，并可扩展至一维、二维和三维结构。数值模拟和实验结果验证了该平台在纵向波和扭转波中的模式解耦特性，同时揭示了 BNN 耦合诱导的 roton 和 maxon 行为，以及非点式对称性导致的弯曲波能带粘连现象。该平台为可重构、多功能弹性波调控器件提供了新的设计基础。相关工作发表在《Advanced Materials》上。（刘帅）

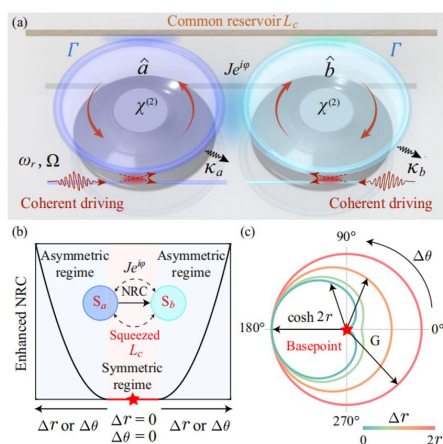


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.73822>

## 6、通过挤压诱导的对称性破缺来增强非互易性

非互易性能够实现能量的单向流动,从而有效抑制反向传播的噪声,在量子信息科学中发挥着关键作用。为了克服传统基于磁光效应的局限性,学界已提出非线性、有效规范场及光力学相互作用等多种相干性方案。除这些相干方法外,近期研究还利用能量损耗在多通道间诱导干涉,以实现能量的单向传输。值得注意的是,将系统与共同储能器耦合,使相干动力学与耗散动力学相互作用,可在宽频带内产生可控的非互易相互作用。这种由耗散效应引发的非互易性,在隔离器、环形器及量子电池中展现出巨大的应用潜力。

近日,郑州大学陈刚教授、苏石磊教授与湖南师范大学景辉教授团队深入研究了压缩效应能否增强耗散诱导的非互易耦合(NRC),并揭示了其背后的物理机制。基于一个通用框架,研究团队推导出了有效的NRC理论,证明压缩效应带来的增强效果并非普遍适用,而是由系统压缩参数之间的对称性破缺所触发。这一发现为强NRC效应的实验实现提供了重要指导,并降低了对压缩强度的苛刻要求。与以往基于线性干涉的方案不同,该方法中的非互易性源于可控的耗散耦合,并被证明能以指数级提升量子电池和光学隔离器的性能。研究表明,该机制从根本上重塑了内部能量流动路径,从而催生出传统方法无法实现的新现象与新应用。该研究成果发表于《Physical Review Letters》。(金梦成)



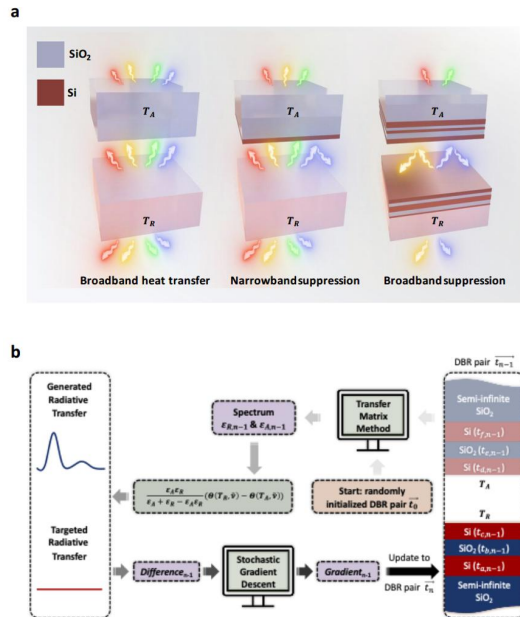
文章链接: <https://doi.org/10.1103/kh36-7z76>

## 7、通过色散工程抑制宽带辐射传热

与增强热辐射相比，抑制热辐射是一项更加困难的任务。目前最常见的方法依赖金属反射层，例如铝膜等材料利用其宽频反射特性阻挡热辐射传播。但在电子器件、光电系统以及热电模块等场景中，金属层往往会引入电学短路、电磁干扰和材料兼容性问题，因此并非理想选择。另一方面，利用介质材料构建分布式布拉格反射镜（DBR）等光子结构虽然能够实现高反射率，却受到著名的 Bode-Fano 极限约束：反射带宽越宽，反射性能越难进一步提升；而若追求更高性能，则必须牺牲工作带宽。这种“性能—带宽”之间的根本矛盾长期制约着非金属热辐射抑制技术的发展。如何在不依赖金属材料的前提下，实现宽频带、高效率、超薄化的热辐射抑制，一直是热管理和热光子学领域的重要科学挑战。

针对这一难题，来自纽约城市大学 Andrea Alù 教授团队联合霍尼韦尔国际公司（Honeywell International）开展合作研究提出了一种基于“色散工程超表面（Dispersion-Engineered Metasurfaces）”的全新热辐射抑制策略，与传统思路不同，研究团队并未试图构建一个覆盖整个热辐射波段的宽带高反射结构，而是利用逆向设计与随机梯度下降（SGD）优化算法，同时设计两组具有互补色散特性的非周期 DBR 超构表面，使两者在整个热辐射频段内的共振模式彼此错开，从而形成“热不兼容”状态，最大程度抑制两表面之间的辐射耦合。具体而言，研究人员采用非晶硅（a-Si）和二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）交替堆叠形成多层介质结构，通过算法自动优化每层厚度，使系统能够在 500 - 3000 cm<sup>-1</sup> 的热辐射主要频段内产生多个相互错位的反射窗口。实验结果表明，仅由 7 层介质薄膜构成的优化超构表面体系即可实现优异性能：基于角分辨热发射测量得到的结果显示，其辐射热交换相较于熔融石英基准样品降低约 82%；采用自主搭建的高真空电学替代辐射计进行直接测量后，辐射热交换仍降低约 62.5%。更重要的是，该结构总厚度仅为微米量级，远低于传统绝热屏蔽方案，同时在 320 - 500 K 温度范围内保持稳定性能，对加工误差和工作环境变化均表现出良好的鲁棒性。研究团队进一步证明，该方法突破了传统 Bode-Fano 极限对于连续带宽的限制，实现了一种全新的“带宽无关”热辐射工程设计范式。

研究成果发表在《Nature Communications》上，（张琰炯）。

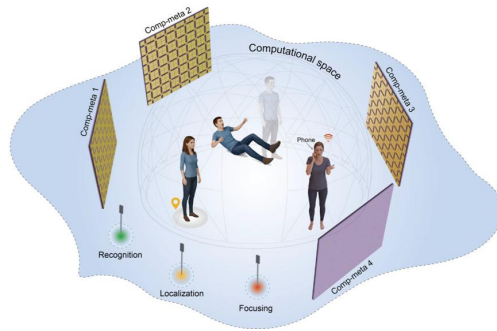


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-74805-3>

## 8、基于无模型超表面神经网络的计算空间构建

随着泛在智能对硬件性能需求的提升,物理神经网络因可直接利用波传播、干涉、多路径耦合和非线性响应等物理过程完成计算与学习,受到广泛关注。相比传统数字计算,其具有高并行、低延迟和高能效优势,并已应用于实时成像、波前调控、自适应感知和时空模式识别等领域。然而,大规模可训练物理神经网络在实际环境中仍面临关键挑战:复杂波相互作用使物理参数与计算行为难以建立稳定对应关系,导致可微模型或数字孪生难以准确构建。现有方法多依赖反向传播、外部优化或预标定响应,限制了原位自主学习。因此,亟需发展基于直接物理测量的原位无模型学习新范式。

近日,浙江大学的陈红胜教授、钱超研究员团队、洛桑联邦理工学院 Romain Fleury 教授团队合作,提出“计算空间”概念,将开放物理环境本身赋予计算智能,使其能够通过内禀电磁动力学直接完成计算与学习。研究利用多个计算超表面构建高度耦合的波基计算空间,并发展无模型、全前向学习框架,可直接从物理扰动和可测响应中提取零阶梯度,无需解析梯度或数字孪生。实验中,作者在自由空间区域周围布置四个计算超表面,实现了复杂散射环境下的自适应电磁聚焦、字母和数字模式识别,以及人体位置定位。其中,字母和数字识别准确率分别达到 97% 和 99%。与传统局限于孤立器件或预设结构的物理神经网络不同,该计算空间将学习和推理分布到整个环境中,使计算从空间耦合的物理相互作用中自发产生,为可扩展、自演化的物理智能提供了新平台。相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-74554-3>  
(来源: 两江科技评论)