超材料前沿研究一周精选

2025 年 8 月 4 日-2025 年 8 月 10 日

索引：

1、时间平移对称性破缺超表面中共振的光调控

2、光激发声学密钥：随机纳米复合材料构建的物理不可克隆函数

3、基于可重构热屏障的三维光流体控制

4、量子 Kelvin-Helmholtz 不稳定性引起的稳定奇异分数斯格明子自旋织构

5、利用壳晶格超材料中的螺旋位错获得高效稳定的电催化剂

6、双层石墨烯中子态揭示的四分之一和半填充量子霍尔态及其拓扑序

7、时变强耦合和磁振子模诱导的时间衍射

8、由单斜晶系超表面中的手性平带驱动的圆偏振热辐射间的强相互作用

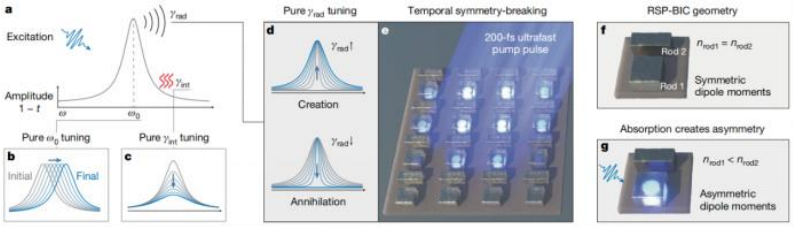
1、时间平移对称性破缺超表面中共振的光调控

主动纳米光子学正快速发展，为全息成像、量子通信和光学计算等新兴技术提供了重要支撑。尤其是由亚波长间距纳米谐振器组成的主动超表面，已成为光场调控的有力平台，广泛应用于波束偏转、光学开关、全息、可调透镜、可编程表面以及手性和偏振控制等领域。共振系统的可调性可通过改变三类基本参数实现：共振波长（ω_0）、本征损耗（γ int）和辐射损耗（γ rad）。现有研究主要集中在调节 ω_0 和 γ int：前者实现光谱位置移动，后者调节阻尼强度，两者都会影响特定波长下的共振幅值。然而，由于 Kramers－Kronig 关系将折射率实部 n（主导 ω_0）与虚部 k（主导 γ int）紧密联系，这两种方式均难以实现单一模式的真正开关。理论与实验均表明，只有直接调控模式与辐射连续体的耦合（γ rad），才能在亮态与暗态间切换：γ rad=0 时模式与远场完全解耦（关闭），γ rad>0 时被激活（打开）。这种能力对光通信、信号处理和光学滤波等应用具有变革意义，可最大限度减少光谱串扰并避免额外损耗。

然而，主动调控 γ rad 极具挑战，单纯改变折射率往往无效。在被动超表面中，γ rad 的控制近年来通过对称性保护的连续体束缚态（SP-BIC）得以实现，即通过几何对称性的破坏被动调节 γ rad。但迄今主动 SP-BIC 研究几乎都局限于调控 ω_0 或 γ int，未能充分利用其对 γ rad 的独特调节潜力。早期尝试因材料本征损耗过大而限制了 Q 因子的变化，尽管近期有理论提出基于干涉的泵浦方案来提升 Q 因子，但实现 γ rad 的任意调控及 Q 因子“开-关”转换仍未实现。

近日，慕尼黑大学 Andreas Tittl 教授与莫纳什大学 Stefan A. Maier 教授团队提出，通过共线超快光学泵浦在超表面中引入时间平移对称性破缺，可实现对 γ rad 的主动调控，从而在亚皮秒尺度上创造或消除高 Q 共振。实验中，泵浦光激

发载流子调制谐振器材料，原理依托提出并实现的恢复对称性保护 BIC（RSP-BIC）。该态虽几何不对称，但在特定波长下偶极矩完全抵消，使 γ rad 接近零。团队设计的单元由长度和宽度不同的两根硅棒组成，在 RSP-BIC 条件下偶极矩相等；而在其他波长或偏振下，两根棒则呈现各自独立的 Mie 模式。通过选择性激发其中一根棒的 Mie 模式，可降低其折射率，打破偶极平衡，从而精确调节 γ rad。瞬态吸收实验显示，在接近 RSP-BIC 条件时， γ rad 可被超快精准调控，实验实现了共振的锐化、展宽、创造与消除，调控效果取决于结构几何和泵浦能量，而对 γ int 的影响可忽略。相关内容发表于《Nature》上。（金梦成）



文章链接：https://doi.org/10.1038/s41586-025-09363-7

2、光激发声学密钥：随机纳米复合材料构建的物理不可克隆函数

随着数字安全威胁升级，硬件安全需求日益迫切。物理不可克隆函数(PUF)利用物理随机性生成防伪密钥，但传统电子 PUF 存在环境敏感、易受攻击、工艺复杂等局限，难以满足柔性可穿戴设备需求。新型材料基 PUF 通过调控纳米复合材料、掺杂效应或晶界分布等本征随机性，在简化工艺的同时确保安全性。这类 PUF 可采用旋涂、自组装等简易方法制备，具有成本低、可扩展等优势。然而其发展仍面临两大瓶颈：一是随机比特数与器件数量正相关，阵列扩展时信号对比度难以维持；二是依赖电极读取会限制空间分辨率，阻碍器件微型化。这些结构性和扩展性挑战亟待创新架构突破。

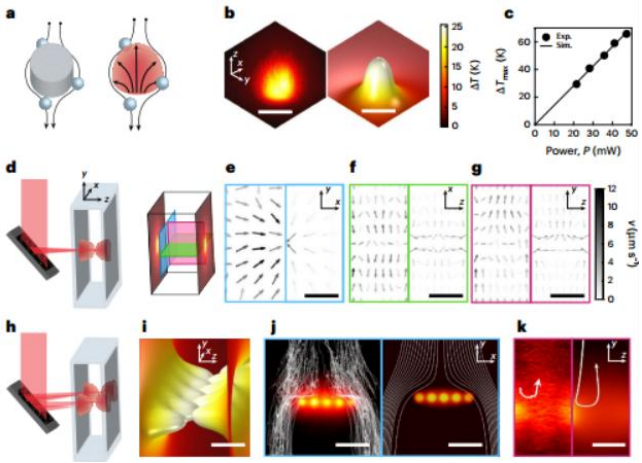
近日，汉阳大学的 Hocheon Yoo 和成均馆大学的 Byullee Park 团队，创新性地开发了一种基于光声效应的物理不可克隆函数（PA-PUF）技术，通过激光激发 CuO/SnO_2 纳米复合材料产生独特的超声波信号来生成加密密钥。与传统电子 PUF 不同，该技术完全摆脱了电极限制，利用光热转换原理直接在材料内部产生随机响应，实现了 49.54%的均匀性、49.69%的器件间汉明距离和 0.983 的熵值等近乎理想的加密性能。实验表明，该系统每秒可采集约 1 万像素点的响应图案，不仅能稳定工作在柔性基底和人体皮肤等复杂表面，更能有效抵御机器学习攻击。这种无电极、高安全性的设计方案突破了传统 PUF 在微型化和环境适应性方面的限制，为可穿戴设备等新兴应用领域提供了可靠的硬件安全解决方案。相关内容发表于《Nature Communications》上。（刘帅）

文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-025-62747-1

3、基于可重构热屏障的三维光流体控制

微流控技术因其在微小尺度上对流体和颗粒的精准操控能力，已成为化学合成、药物开发和单细胞研究等领域的重要工具。传统微流控系统依赖物理屏障（如微柱阵列）实现流体导向、混合或分选，但这些固定结构缺乏动态调整能力，难以应对复杂多变的实验需求。尽管已有研究尝试通过气动阀、电渗流或热流变效应等方案提升灵活性，但这些方法往往受限于响应速度慢、空间分辨率低或需要复杂的外部设备。如何在无需改造流体成分或依赖笨重仪器的前提下，实现高精度、快速响应的动态微流控操控，一直是该领域的核心挑战之一。

瑞士苏黎世联邦理工学院 Falko Schmidt 与 Romain Quidant 团队联合合作，提出了一种基于光热效应的可重构微流体边界技术。该团队利用结构光照射微流腔内的金纳米棒涂层表面，通过光热转换产生局部温度梯度，诱导热渗透、热泳和自然对流等多重效应，在流体中形成动态的“虚拟屏障”。这些屏障不仅能模拟传统物理结构的功能（如分流、合并或捕获颗粒），还可通过实时调节光场实现毫秒级重构，例如动态切换导向屏障角度以控制颗粒运动路径，或调整激光功率精确调控捕获颗粒的垂直位置。研究团队进一步展示了该技术在颗粒分选中的应用：通过设计周期性光热柱阵列，模拟确定性侧向位移（DLD）装置，成功实现了不同尺寸颗粒（4 μ m 与 6 μ m）的高效分离。实验与模拟结果高度吻合，验证了该方法的可靠性。值得一提的是，该系统在标准水溶液中即可运行，无需外接流体泵，且温度梯度可覆盖 20 μ m 至 50 μ m 的腔室高度，展现了广泛的适用性。此项工作的核心突破在于将光热调控的灵活性与微流控的精确性结合，为化学合成、芯片实验室和微生物学研究提供了全新的自适应工具。此次成果为其实验室在光流体操控领域的又一里程碑。相关内容发表于《Nature Photonics》上。(张琰炯)

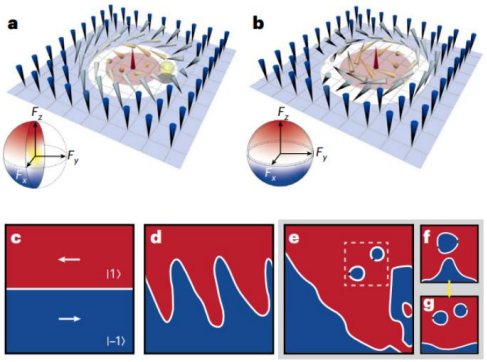


文章链接：https://doi.org/10.1038/s41566-025-01731-z

4、量子 Kelvin-Helmholtz 不稳定性引起的稳定奇异分数斯格明子自旋织构

拓扑缺陷（如孤子、涡旋和斯格明子）作为非平凡激发态，其整数拓扑荷在凝聚

态物理与量子系统中具有重要研究价值。然而，当序参量场存在奇异点时，拓扑荷的计算与缺陷分类面临显著挑战。尽管理论预言了超流体 3He-A 相和自旋玻色-爱因斯坦凝聚体中存在奇异非线性激发态，但实验观测长期缺失，且其稳定性机制尚未明确。传统拓扑理论要求场连续，但奇异点可打破旋转对称性，导致分数拓扑荷的出现。Kelvin-Helmholtz 不稳定性（KHI）作为经典流体界面失稳的普适机制，在量子多体系统中可诱导拓扑缺陷的生成，但受限于涡旋阵列的快速耗散与实验实现难度，量子 KHI 的普适性及其与奇异拓扑激发的关联尚未验证。近日，韩国科学技术院的 Jae-yoon Choi 和 Se Kwon Kim 研究团队与日本大坂市立大学的 Hiromitsu Takeuchi 合作，利用自旋为 1 的 7Li 强铁磁超流体，通过调控二次塞曼能制备单磁畴壁，并施加磁场梯度诱导反向流形成连续涡旋片，成功实现量子 KHI 的普适区域。实验观测到涡旋片界面演化为经典颤指模式，并在非线性阶段从指尖发射磁液滴。结合自旋分辨密度测量与物质波干涉技术，证实磁液滴为偏心分数斯格明子（EFS），其自旋纹理具有半整数拓扑荷和偏心反铁磁奇异点，且满足修正的 Mermin-Ho 关系。该研究首次发现整数斯格明子可自发分裂为两个 EFS，并证明 EFS 在 2 秒内保持动力学稳定，其寿命显著高于整数斯格明子。这一结果不仅验证了经典与量子 KHI 的普适性关联，还为拓扑量子系统中奇异缺陷的分类提供了新范式。奇异分数斯格明子的稳定存在拓展了非线性拓扑动力学的认知框架，为量子湍流、自旋玻璃态及信息存储器件的设计开辟了新路径。该研究成果发表于《Nature Physics》。（刘梦洋）



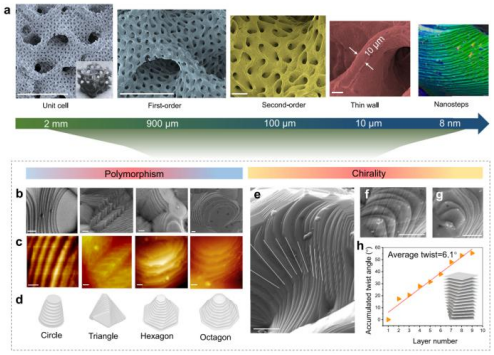
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41567-025-02982-x

5、利用壳晶格超材料中的螺旋位错获得高效稳定的电催化剂

电催化可在温和条件下实现绿色能源转换与废水处理，其中硝酸盐还原反应（NO_3 RR）能同步去除 NO_3^- 并合成氨（NH_3）。但工业级 NO_3 RR 需承受大电流、高温等苛刻条件，而传统电催化剂通过粘合剂负载于多孔载体，易引发界面机械稳定性差、焦耳热等问题。虽无粘合剂的自支撑催化剂可改善界面结合，仍难根除异质界面缺陷。3D 打印技术通过一体化制造有望解决该问题，但现有研究依赖后处理工艺暴露活性位点，无法兼顾多尺度集成。螺位错作为晶体线缺陷，能剪切晶格并持续生成新生长层，兼具促进外延生长与构建纳米结构的优势。其诱导的晶格应变还可调控电子结构，增强反应中间体吸附，从而提升催化活性。这一特性为开发兼具机械稳定性和高效催化的 3D 打印超材料提供了新思路。

近日，香港中文大学的 Xu Song、香港城市大学的 Johnny C. Ho 和香港大学的 Yang Lu 团队，提出了一种基于螺位错调控的三维（3D）打印策略，用于实现超材料催化剂的可扩展集成制造。具体而言，通过在 3D 打印过程中引入螺位错，

实现了三维宏观结构与手性表面纳米结构的同步合成，从而有效消除了传统异质界面问题。此外，弯曲空间中位错增殖产生的强应变效应，通过促进 NO_3^- 吸附并降低 NO_3^- 向 NH_3 转化的能垒，显著提升了本征催化活性。最终，具有高位错密度的 FeCoNi 双尺度壳格超材料实现了 95.4%的法拉第效率、20.58 mg h^{-1} cm^{-2}的 NH_3 产率，以及超过 500 小时的长期稳定性。结合流通式电解槽与酸吸收装置，成功制备出 NH_4Cl 肥料产品。本研究为 3D 打印技术在催化领域的应用开辟了新途径。相关内容发表于《Nature Communications》上。（刘帅）



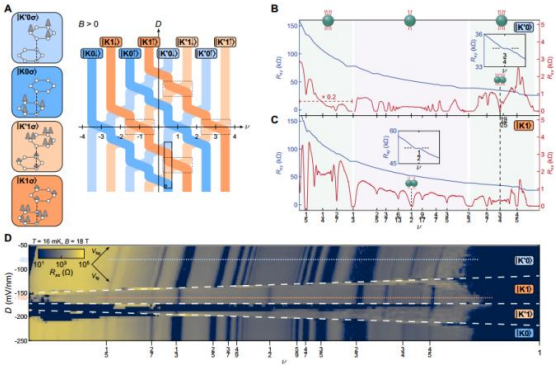
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-025-62489-0

6、双层石墨烯中子态揭示的四分之一和半填充量子霍尔态及其拓扑序

分数量子霍尔效应中的偶分母填充态，因其潜在的非阿贝尔拓扑序和应用于容错量子计算的前景，已成为凝聚态物理研究的核心课题之一。然而，此类态的确切拓扑序长期存在争议，这种争议源于多种奇异量子态的激烈竞争。近期在不同半导体和范德瓦尔斯材料中观测到的半填充平台暗示了多样化的非阿贝尔相，但其起源尚未明确。双层石墨烯因其独特的能带结构以及可通过位移场精细调控的相空间，为研究复合费米子的配对机制和拓扑序提供了理想平台。特别是在该体系中，先前研究未能观测到 $\nu=-3/2$ 和 $\nu=1/2$ 的关键半填充态，也未在四分之一填充或更高阶偶分母填充下发现“下一代”量子霍尔态，阻碍了对偶分母态系统行为的完整理解及拓扑序的普适性确认。

近日，以色列魏茨曼科学研究所的 Yuval Ronen 研究团队利用超净双层石墨烯异质结构、高透明电极及超低噪声测量技术，首次观测到四个四分之一填充量子霍尔态以及先前缺失的半填充态，并通过解析其 Levin-Halperin 子态约束了它们的拓扑序。研究证实半填充态仅出现在第一激发朗道能级，而四分之一填充态则严格限定在零能朗道能级。通过子态分析，$\nu=-3/2$ 和 $\nu=1/2$ 态被识别为反 Pfaffian 非阿贝尔序，填补了半填充平台序列，并揭示出在跨越 N=1 能级交叉点时拓扑序呈现反 Pfaffian 与 Pfaffian 交替出现的周期性规律，表明能级间耦合在决定拓扑序中起主导作用。对于四分之一填充态，子态证据结合自旋极化测量，支持其可能为非阿贝尔反 Pfaffian 序或阿贝尔反(331)序。这一发现凸显了复合费米子配对模式的竞争。此外，研究首次在双层石墨烯中观测到“下一代”奇分母态和偶分母态，这些强关联态超越了弱相互作用复合费米子图像的解释范畴。此项工作不仅为偶分母态拓扑序的识别提供了普适性框架，揭示了轨道指数对配对通道的选择性作用，还首次在单一体系中通过静电手段实现了对复合费米

子配对与整数量子霍尔态形成两种竞争机制的观测与操控，极大地拓展了对强关联拓扑物态的理解边界。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



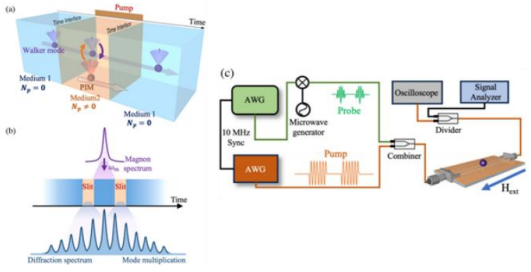
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-025-62650-9

7、时变强耦合和磁振子模诱导的时间衍射

时变介质，即物理属性随时间变化的材料，因其在波动调控方面展现出独特优势，近年来受到高度关注。与传统波动物理依赖空间结构（如反射镜、透镜、孔径）破坏空间平移对称性不同，时变介质通过打破时间平移对称性，实现了包括时间反射、时间折射和时间衍射在内的一系列新奇波动现象。基于时变介质的调控手段不受材料维度限制，甚至能在亚周期尺度展现独特功能，现已拓展到原子、光子、电子和声子等多个领域，并推动了新型增益、多模整形、超快开关等前沿应用。

磁振子作为材料中自旋波的能量量子，具备在绝缘体中高效携带信息的能力，并有望作为低损耗的波动计算和量子混合系统的关键元件。然而，时变磁振子学的发展长期受限于缺乏对磁振子色散的高效快速调控。近期，泵浦诱导磁振子模式（PIM）的发现为实现时变磁振子系统提供了理想平台。PIM 因其磁矩小，可对极弱微波磁场（纳特斯拉级）做出灵敏响应。

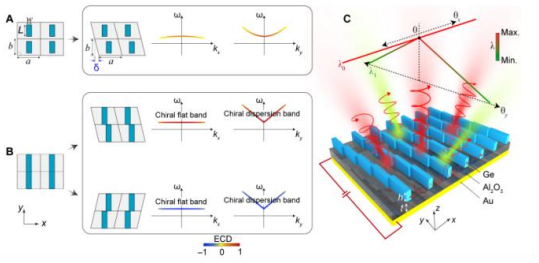
近日，中国科学院姚碧霖教授，陆卫教授和山东大学柏利慧教授团队基于 PIM 首次实现了磁振子模式的时变强耦合，并观测到磁振子模式的时间衍射。实验中，YIG 小球内 PIM 的快速生成与消失导致其与 Walker 模式（WM）之间的耦合强度在微波泵浦脉冲的前沿上升、后沿下降。研究团队自主开发了时间分辨频率梳光谱技术，有效克服了短时尺度下的频谱采样难题，并消除了脉冲串扰。借助该技术，团队捕捉到由时变 PIM-WM 强耦合引发的磁振子色散突变，揭示了磁振子介质中“时间界面”的形成。PIM 的存在与否对应着介质在时间上的两种状态，时间界面的出现进一步构成“时间缝隙”，从而导致磁振子模式的时间衍射和谱宽展宽。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上，并被选为 Editors’ Suggestion。（金梦成）



文章链接：https://doi.org/10.1103/jc1c-k311

8、由单斜晶系超表面中的手性平带驱动的圆偏振热辐射间的强相互作用

传统热辐射通常具有宽带、全向和非偏振的特性，这是由于热涨落随机取向导致的。然而，近年来，研究人员通过人工结构实现了具有窄带宽、高方向性和特定自旋态（如圆偏振）的热辐射，这些特性在红外传感、辐射冷却和热光伏等领域具有重要应用前景。尤其是在中红外波段，圆偏振热辐射能够用于生物分子检测和药物异构体区分，但其高时空相干性和高圆二色性（ECD）的实现一直是一个挑战。过去的研究虽然通过复杂结构（如多层介质或三维倾斜刻蚀）实现了圆偏振热辐射，但其性能（如 Q 因子和 ECD）仍有提升空间。此外，如何在保持高相干性的同时提高大尺寸超表面的信号收集效率，也是一个亟待解决的问题。
山东师范大学韩张华教授团队与澳大利亚国立大学的 Yuri Kivshar 教授团队合作，提出了一种基于单斜晶格非局域超表面的新型圆偏振热辐射器研究团队基于 Z 形平面单斜面元表面展示了具有高热圆偏振色散的超高速时间、空间和自旋相干热发射现象。该设计实现了元表面独特的鞍形色散，其在广泛的波矢范围内表现出对 k 值具有鲁棒性和可持续性的超高 Q 值。值得注意的是，该装置可以通过沿 y 方向旋转空间滤波器来实现宽谱调谐，并且还可以通过控制温度实现近 400 nm 的光谱扫描。此外，热发射的自旋切换也能够轻松实现。当热发射器作为振动圆偏振光谱分析的源时，这些展示的特性为诸如手性分子指纹检索等应用提供了重要的支持。这种简单的平面结构在 Γ 点附近的广泛波矢范围内能够实现高手性响应，而无需使用传统的多层或复杂的倾斜蚀刻技术来实现仅在单个 k 点支持手性响应的准基模相干结构。因此，该研究工作确立了热辐射控制的新标准，并为手性光学领域的研究开辟了新的途径。此外，单斜设计不仅提供了鞍形的共焦点输出，还使得利用简单的几何结构能够实现线偏振和椭圆偏振的热辐射，并且能够扩展到任何波长范围，无需复杂的光学元件，为偏振热辐射控制的进一步发展铺平了道路。相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）



文章链接：https://doi.org/10.1126/sciadv.adw0986
（来源：两江科技评论）