

# 超材料前沿研究一周精选



2026 年 1 月 17 日-2026 年 1 月 25 日

索引:

- 1、亚波长 I 型 Dirac 超表面中的超对称 Landau 能级
- 2、基于压电表面声波忆阻器的神经网络
- 3、通过磁场控制实现可变工作条件下的动态热管理
- 4、等离激元莫尔超晶格中的可扩展、可编程拓扑转变
- 5、利用超导相变的低温近场热二极管
- 6、一维玻色气体中连续极限下的 Stark 多体局域
- 7、基于 3D 打印双层超材料实现电磁波吸收-传输集成
- 8、等离子体自旋-扭转电子学拓扑晶格中强自旋-轨道耦合的观测

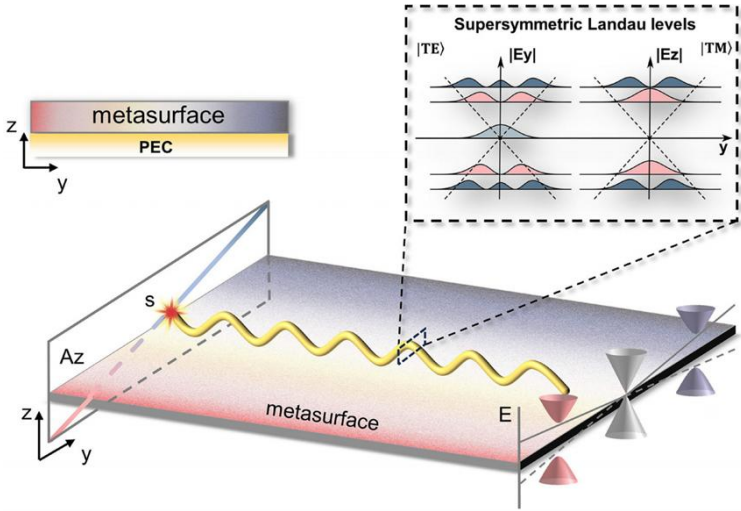
## 1、亚波长 I 型 Dirac 超表面中的超对称 Landau 能级

Dirac 方程作为相对论量子力学的核心理论之一，预言了无质量相对论性粒子在磁场中的独特量子化谱结构：其朗道能级随量子数  $(n)$  呈标度，并伴随手性零能模式 (CZM)，同时在两分量旋量之间体现出类似“超对称配对”的结构特征。在电子体系里，相关波函数结构往往受限于原子级尺度，对其空间分布进行直接、可控的实验表征与工程化调控始终具有挑战。在光子学中，六方光子晶体凭借狄拉克锥色散成为研究二维拓扑的重要平台：通过在原胞中选择性破缺空间反演或时间反演对称性，可实现陈绝缘体、能谷/自旋陈绝缘体等相；进一步引入局域非均匀形变（拉伸/压缩）还能模拟人工磁场并产生 CZM。然而，传统光子晶体依赖波长尺度的周期结构与长程耦合，难以实现深亚波长精度的拓扑工程；同时，Dirac 点附近的本征模通常空间强重叠，使得对“基态分量”的实验区分并不直观；此外三维结构与金属覆盖等工艺要求也增加了器件实现难度。

近年来，超表面作为由亚波长“超原子”构成的平面人工材料，为电磁波的局域调控提供了更高自由度：其通过等效介质与结构共振实现对振幅、相位与偏振的精细设计，在波束调控、聚焦、全息及表面波近场操控等方向展现出优势。但由于缺乏全局晶体对称性，传统超表面中“自然形成” I 型 Dirac 简并（态密度消失、近各向同性色散）并不常见，使得基于狄拉克点的拓扑操控在该平台上长期相对稀缺。

近日，复旦大学孙树林教授、马少杰研究员与周磊教授团队提出并实证了一种不依赖整体晶格对称性的方案：在电磁超表面表面波中实现 I 型 Dirac 简并点，其起源于纵向电共振与面外磁共振的耦合，从而将狄拉克物理推进到深亚波长尺

度。更关键的是，通过在空间上引入非均匀的局域对称性破缺，等效构造了与狄拉克简并态耦合的人工规范场，进而在微波频段实验观测到具有清晰模态结构的超对称 Landau 能级与手性零模式。此外，通过对规范场分布的可编程设计，团队进一步实现了对表面波的拓扑式操控，包括弯曲、聚焦与扩散等功能性传播行为，且实验结果与全波仿真高度一致。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



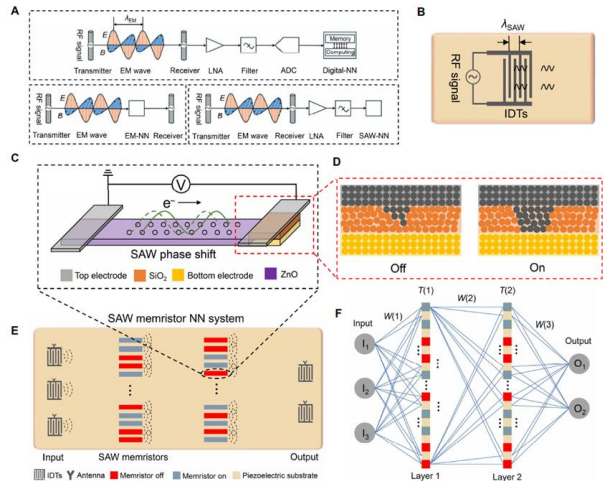
文章链接: <https://doi.org/10.1103/k8br-gsfq>

## 2、基于压电表面声波忆阻器的神经网络

人工智能（AI）与无线射频（RF）技术（如 6G）的深度融合，正显著推动物联网，尤其是边缘设备向更智能、更高响应性的方向发展。该融合使射频信号能够在边缘侧实现实时处理与分析，从而降低对云端计算的依赖，并在时延、隐私保护和能效方面展现出明显优势，对智能手机、智能机器人、自动驾驶、无人机、智能家居及可穿戴健康设备等亟需即时数据决策的应用尤为关键。然而，基于传统数字硬件的射频信号机器学习处理仍面临严峻挑战：射频信号本质上为模拟电磁波，数字处理需频繁进行模数转换，显著增加时间和功耗开销；同时，冯·诺依曼架构中存储与计算单元分离导致大量数据搬运，进一步限制系统能效。近年来，模拟波计算通过将“感知 - 存储 - 计算”一体化，为突破上述瓶颈提供了新路径，其中包括基于电磁波的衍射神经网络。然而，电磁波波长较长、器件体积大，且可编程单元易失、系统集成复杂，难以满足紧凑型边缘应用需求。相比之下，表面声波忆阻器神经网络利用亚微米级波长的声学传播及非易失忆阻调控，实现紧凑、高效且可编程的射频信号处理平台，展现出面向边缘智能应用的独特优势。

近日，南方科技大学王中锐教授、汪青教授、于洪宇教授团队提出了一种新型压电表面声波（SAW）忆阻器，通过将非易失性  $\text{Ag}/\text{SiO}_2$  忆阻器与声电效应驱动的 SAW 相位调制器集成，实现对表面声波相位的可编程调控。通过施加偏置电压并切换忆阻器的导通状态，可有效调制  $\text{ZnO}$  调制层中的载流子迁移速度，从而实现声波相位调制与可调传输系数。在此基础上，构建了基于 SAW 忆阻器的物理神经网络：输入叉指换能器通过逆压电效应激发表面声波，作为网络输入层神经元；声波在压电基底上传播并经过忆阻器单元完成相位调制，对应网

络隐藏层；调制后的信号最终由输出换能器通过正压电效应读出。通过向量分类任务验证了该系统的计算能力，实验分类准确率达到 91.7%。相比功能等效的电磁波神经网络，该体系在器件尺寸上实现了五个数量级的缩减，并较传统数字系统降低了约 37 倍能耗，为面向边缘智能的高效射频信号处理提供了新方案。相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



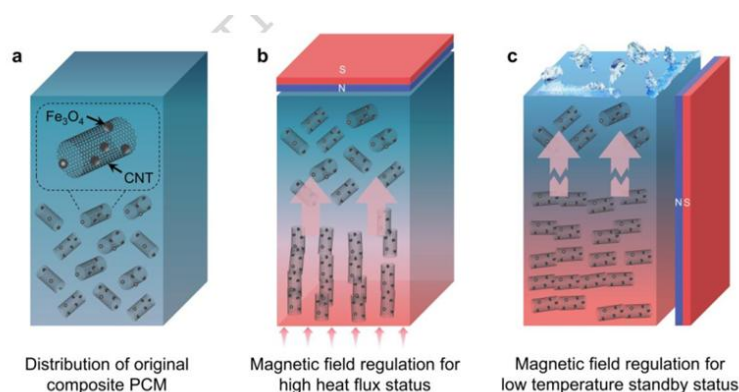
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adx6227>

### 3、通过磁场控制实现可变工作条件下的动态热管理

在电子设备特别是在航空航天、电池模块和电动汽车等领域的热管理中，由于环境操作条件的动态变化，设备的热稳定性和可靠性面临巨大的挑战。这些设备常常会因遭遇高温循环、材料老化、性能衰退以及热疲劳等问题，导致热管理系统（TMS）无法有效应对。这些系统需要高效的热传递机制，以应对不断变化的热负载，确保设备的持续稳定运行。相较于传统的热管理方法，基于相变材料（PCM）系统的研究逐渐成为一种新的解决方案。相变材料利用其固液转变过程中吸放热的特性，可以有效地缓解温度波动，达到热负载平衡。然而，PCM 的热传导率较低，使得其在高性能电子系统中的应用受限，尤其在极端环境和动态负载条件下，PCM 传统的增强策略往往缺乏足够的适应性。因此，如何开发出能够在动态操作条件下调节热传递性能的热管理系统成为了一个亟待解决的问题。

为了解决这一挑战，西安交通大学的王秋旺教授和褚雯霄教授课题组提出了一种基于磁场调控的动态热管理方案，通过精确控制纳米颗粒的聚集结构来调节热传递性能，从而实现对热阻的动态调节。课题组采用了磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 碳纳米管（CNT）复合纳米粒子，这些粒子与 n-十三烷相变材料（PCM）结合，形成了一种具有可调节热传递特性的复合材料。通过外部磁场的作用，纳米颗粒在 PCM 基质中的聚集结构可以根据需要动态调整，这种调节通过改变磁场的方向，控制纳米颗粒的聚集方向，进而影响热传递路径的热阻。研究表明，通过这种动态调节机制，复合 PCM 的有效热阻可以实现 1.8 倍的变化，使得材料在不同的热负载条件下能够表现出更优的热管理性能。在实验中，课题组通过调节磁场角度，在电子组件的动态负载下，成功地将温度波动减少了 10.8° C。此外，利用这种动态热阻调节机制，研究团队还开发出了一种可重构的热管理框架，使得该复合材料能够在不同工作状态下表现出灵活的热控制特性。这一成果不仅为高性能电子系统在极端操作条件下的热管理提供了新的解决方案，还为其他领域，如航空航天、电动汽车

等的热管理技术开辟了新的方向。研究成果发表在《Nature Communications》上，（张琰炯）。



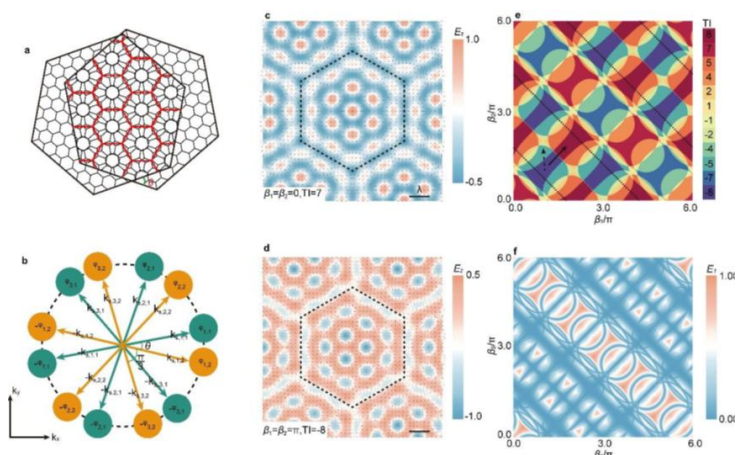
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-68715-7>

#### 4、等离激元莫尔超晶格中的可扩展、可编程拓扑转变

拓扑转变（TTs）描述不同拓扑态之间的转化，在电子学、光子学与量子体系中具有基础意义；传统研究多从动量空间能带出发，拓扑能带理论推动了基础物理并支撑低能耗器件发展，同时实空间拓扑结构（如斯格明子）也为高密度存储、量子计算与结构光调控提供新路径。然而现有体系往往受限于材料本征性质或固定结构，难以实现可扩展、可编程的动态调控，成为研究与应用的关键瓶颈。莫尔超晶格通过周期结构的相对位移或旋转引入高度可调自由度，自扭转双层石墨烯以来已揭示非常规超导、量子反常霍尔效应与可控磁性等突破，并拓展至等离激元、流体与声学平台，呈现非平庸色散、复杂矢量场与类斯格明子拓扑特征；尤其等离激元莫尔超晶格可支持任意大的拓扑不变量，为实现大范围、可编程拓扑转变提供了理想平台。

近日，深圳大学的杜路平教授团队，提出将等离激元莫尔超晶格作为一种可编程平台，用于实现光学斯格明子的大范围拓扑转变。通过在六角对称光学体系中精确调控倏逝波的相位分布，可动态重构斯格明子晶格及其对应的拓扑态；当两个此类晶格叠加形成莫尔超晶格后，体系在晶格离散对称性的约束下展现出高度可编程的拓扑调控能力，使拓扑空间得到前所未有的扩展。理论结果表明，在不同莫尔角下，体系可在整数与半整数拓扑不变量之间发生拓扑转变，其取值范围可从 $\pm 8$  扩展至 $\pm 19$  乃至 $\pm 58$ ，并遵循排除  $3/2$  整数倍的不变量选择定则，揭示了实空间拓扑量化受对称性约束的内在机制。实验上，作者在特定莫尔角条件下直接观测到预测的拓扑转变行为，验证了理论模型的正确性。同时，本研究还揭示了斯格明子拓扑转变与能带拓扑相变之间的内在联系，为结构光调控、拓扑光子计算及高维信息处理提供了新的物理平台。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



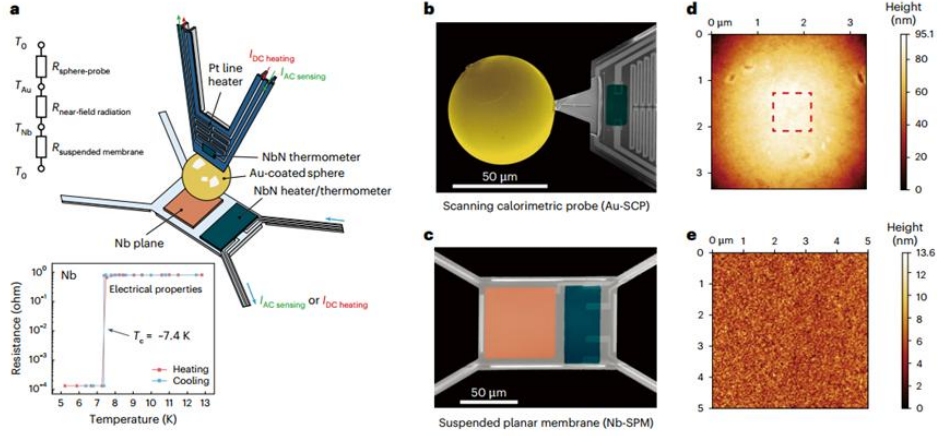


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-68635-6>

## 5、利用超导相变的低温近场热二极管

随着量子技术的发展，低温环境下的热管理问题变得越来越重要。量子计算机和其他超导设备依赖于高精度的热调节机制，以确保它们在极端低温下的稳定运行。然而，现有的热管理技术在极低温（例如液氮温度）下的效能有限，尤其是在纳米尺度的热传递方面。近年来，研究者发现超导材料在低温下的热传导性质可以通过超导相变调节，这为开发新型热管理装置提供了新的方向。特别是在近场辐射热传输（RHT）领域，随着物体间距离的减小，热流的传输效率可能会超出传统的远场黑体辐射极限，这为超导相变材料提供了一个理想的应用场景。基于这一现象，如何在纳米间隙中调节热流，成为研究的重点。

由密歇根大学 Edgar Meyhofer & Pramod Reddy 团队和斯坦福大学范汕涸院士团队携手科研团队共同开展的这项研究，提出并验证了一种利用超导相变实现的低温近场热二极管技术。课题组首先设计了一个精密的实验装置，通过微加工技术制造了扫描热量探针（Au-SCP）和悬挂平面膜（Nb-SPM）两种设备，能够在液氮温度下对纳米尺度间隙中的热传输进行精确测量。研究人员使用这两个设备系统，成功地实现了对金（Au）和铌（Nb）材料之间辐射热传输的控制。当铌材料从正常金属相转变为超导相时，团队发现其辐射热传输被大约抑制了 20 倍。这一发现展示了超导相变对热流的强烈影响，并证明了超导材料在纳米尺度热调节中的潜力。更重要的是，课题组利用这一超导相变效应，成功实现了一个基于铌的低温热二极管，其热流整流比（即热流方向的控制能力）高达 70%。这一实验结果为量子材料中热传输的研究提供了新的实验方法，同时也为超导器件的热管理技术发展开辟了新的道路。课题组的实验成果表明，通过精确控制超导相变温度和能隙，可以开发出适应不同工作条件的热开关和二极管，进一步推动了超导材料在热管理领域的应用。相关内容发表于《Nature Nanotechnology》上。（张琰炯）



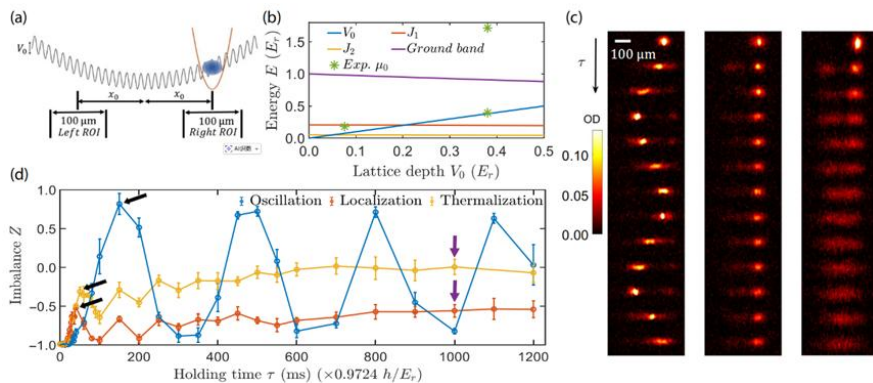
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41565-025-02112-x>

## 6、一维玻色气体中连续极限下的 Stark 多体局域

多体局域化已成为量子物理中的重要研究课题，挑战了传统热力学的基本假设，并引发了广泛的研究兴趣。这一现象可以打破遍历性，在相互作用的体系中阻止热化过程。传统的多体局域化通常伴随随机无序势的引入；而斯塔克多体局域化则是通过梯度势替代随机无序势来实现。这一研究表明，随机无序并非多体局域化的必要条件，极大地推动了无序和有序条件下多体局域化的研究。

当前的研究多集中在紧束缚模型中，如伊辛链和哈伯德模型。这些模型中的粒子被视为在晶格上的占据态，相邻晶格之间有有限的跃迁或耦合。尽管这种紧束缚模型在周期性势场问题中非常有效，但在一些实际系统中，粒子间的长程耦合不可忽视，这使得紧束缚近似不再适用。因此，超越紧束缚近似的研究显得尤为重要。然而，由于数值计算的复杂性，讨论连续极限下的模型仍然面临重大挑战，这使得多体局域化能否在这些系统中发生成为一个未解之谜。

近日，粤港澳大湾区量子科学中心胡嘉仲教授和清华大学陈文兰副教授联合团队，在一维玻色气体的连续极限条件下实现了 Stark 多体局域化。这一研究超越了传统紧束缚模型，局域化现象发生在没有随机无序的背景谐波势阱中，势能梯度有效阻止了热化过程。与以往的研究不同，团队的发现表明，增大的梯度并不总是导致更强的局域化，反而在这个连续相互作用系统中观察到了复杂的相变现象。此外，还观察到，通常与较高碰撞率和热化率相关的高初始密度，竟然能诱发更强的局域化效应。我们还发现，系统在某些情况下出现了零压缩性和低密度涨落的密度平台，这可能与预热化过程中的绝缘体行为相关。相关内容发表于《PRX QUANTUM》上。（金梦成）

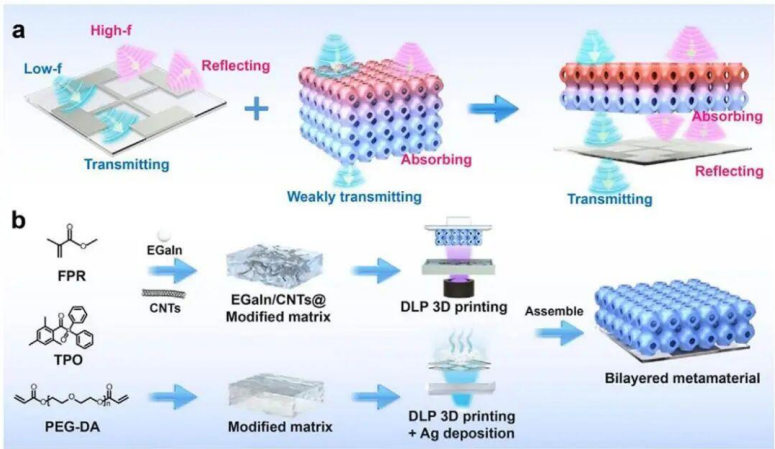


文章链接: <https://doi.org/10.1103/ygdy-hrgj>

### 7、基于 3D 打印双层超材料实现电磁波吸收-传输集成

电磁波按需控制以实现吸收与传输功能的集成,在民用通信与军事隐身领域具有重要意义。这种集成能力可在保证带内信号高质量传输的同时,有效吸收带外干扰而非反射,从而减少二次电磁污染,并显著降低雷达散射截面,提升在双站与多站雷达系统中的低可探测性。然而,吸收所需的高损耗与传输所需的近零损耗在电磁特性上存在本质矛盾,传统方法往往难以兼顾,导致集成设计面临带宽受限、厚度过大或性能折衷等挑战。因此,开发能够在超薄结构中同时实现宽带选择吸收与高效传输的新型材料与结构成为当前研究的关键课题。

近日,西北工业大学的孔杰教授研究团队提出一种基于 3D 打印的双层超材料结构,旨在突破吸收与传输之间的传统权衡。该结构顶层采用具有 Schwarz-P 周期极小曲面的介电吸收层,由碳纳米管与共晶镓铟复合光固化材料构成,通过梯度孔隙设计实现良好的阻抗匹配与宽带吸收;底层则集成频率选择表面作为反射滤波器,低频带内信号可透射,高频带外波被反射回吸收层进行二次耗散。经过材料配比优化与结构参数设计,该双层材料综合带宽与厚度性能均优于已报道的频率选择性吸收结构。该设计通过阻抗匹配优化、导电损耗与界面极化损耗的协同机制,以及频率选择表面层的频谱管理作用,在超薄尺寸下成功融合了电磁波的传输与吸收功能,为低可探测天线罩、智能通信系统等应用提供了新的解决方案。本研究成果发表于《Advanced Functional Materials》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202531190>

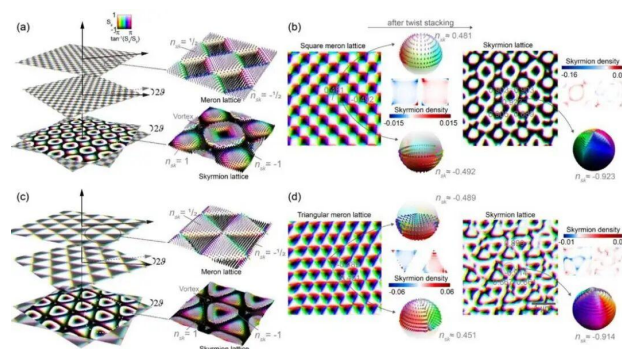
### 8、等离子体自旋-扭转电子学拓扑晶格中强自旋-轨道耦合的观测

扭转电子学通过调控二维材料双层间的相对扭转角度形成莫尔超晶格,为调控电子学与材料物性提供了全新平台。该领域已从石墨烯体系扩展至多种范德瓦尔斯材料、力学系统、声学晶格及磁性材料,并在光学领域展现出调控光场局域、拓扑极化激元、平带现象与涡旋光束生成等重要潜力。近年来,拓扑自旋光子学在表面等离激元平台上实现了多种拓扑准粒子的构建,例如斯格明子与半子等自旋纹理结构。然而,如何进一步引入扭转自由度并实现光自旋轨道耦合的强调控,仍是一个具有挑战性的前沿课题。

近日,深圳大学的袁小聪教授、张强助理教授、石鹏副教授和新加坡南洋理工大



学的申艺杰助理教授研究团队，在理论及实验上证实，在满足特定旋转与平移对称性的条件下，通过叠加两个拓扑自旋晶格并引入可控扭转角，可形成莫尔自旋超晶格。研究利用总角动量作为额外的调控自由度，在特定扭转角下实现了实空间斯格明子晶格、半子团簇等多种拓扑准粒子构型，并观察到四层分形图案及固有的慢光效应，这些现象在传统等离子体系统中难以实现。该体系中的强自旋-轨道耦合表现为自旋角动量密度的局域分布与贝里曲率密切相关，且慢光效应的产生与莫尔超晶格中局域涡旋-反涡旋通量的形成及光学超振荡效应相关联。此项工作不仅拓展了扭转光子学的内涵，还为基于角动量的光通信、高容量光学存储、手性光-物质相互作用及原子尺度光操控等应用提供了新的自由度与物理基础。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-68629-4>  
 (来源: 两江科技评论)