

超材料前沿研究一周精选



2026年5月25日-2026年5月31日

索引:

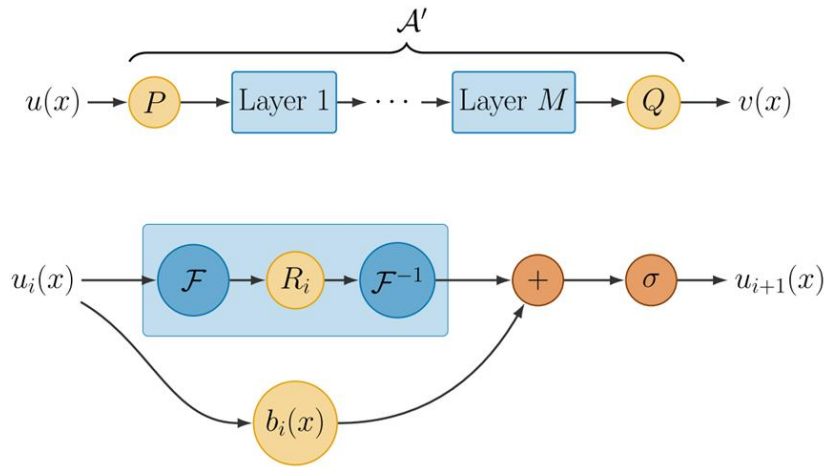
- 1、傅里叶神经算子用于周期驱动量子系统动力学预测
- 2、基于介电超表面的全息激光发射
- 3、揭示机械超材料中的孤子碰撞
- 4、铁电性和声子手性耦合
- 5、多重超声能量捕获彩虹手性朗道能级的实现
- 6、超材料增强近场辐射传热
- 7、阿贝尔态隐藏子群问题中的量子态对称性学习
- 8、受狢狢启发的软体机器主动变形骨架

1、傅里叶神经算子用于周期驱动量子系统动力学预测

周期驱动量子系统是研究非平衡量子态和 Floquet 工程的重要平台,可用于实现时间晶体、Floquet 拓扑物态以及高保真量子调控等新奇现象。然而,对于含相互作用的多体量子系统,其动力学模拟面临显著挑战:一方面,Hilbert 空间维度随系统尺寸指数增长,使得精确对角化方法很快失效;另一方面,周期驱动过程中纠缠快速增长,也限制了张量网络等传统数值方法的适用范围。因此,如何在有限计算资源或有限实验测量窗口内,高效重构和预测 Floquet 量子系统的动力学,成为非平衡量子物理和近中期量子计算研究中的重要问题。

近日,美国康奈尔大学 Zihao Qi 教授、Christopher Earls 教授与加州州立大学 Yang Peng 教授联合团队将傅里叶神经算子(Fourier Neural Operators, FNOs)引入周期驱动量子系统研究,为非平衡量子动力学提供了一种高效、精确且可扩展的数据驱动分析框架。与传统神经网络不同,FNO 学习的是函数空间之间的映射;同时,由于其在傅里叶空间中进行参数化,能够自然捕捉周期驱动系统中的时间相关性,并对时间离散化方式具有较弱依赖。团队通过三种互补的学习范式验证了 FNO 的多功能性:重构有效弗洛凯哈密顿量、预测局域可观测量的期望值以及学习量子信息传播规律。与精确数值方法相比,FNO 在各项任务中均展现出卓越的准确性并实现显著加速。此外,FNO 还具备传统方法无法比拟的优势——例如无需哈密顿量信息即可从部分测量数据推导出所有局域可观测量;还能超越训练数据提供的时间窗口进行外推,获取可能超出相干时间范围的可观测量及算符传播动力学信息。通过采用空间局部基函数,团队证明 FNOs 的计算成本仅随系统规模呈多项式增长。该研究结果证实 FNO 是一种多功能且可扩展的计算框架,能够无缝整合数值模拟与实验数据,并为从近期量子计算机的测量数据中提取有

意义的物理信息提供直接指导。
相关内容发表于《PRX QUANTUM》上。（金梦成）



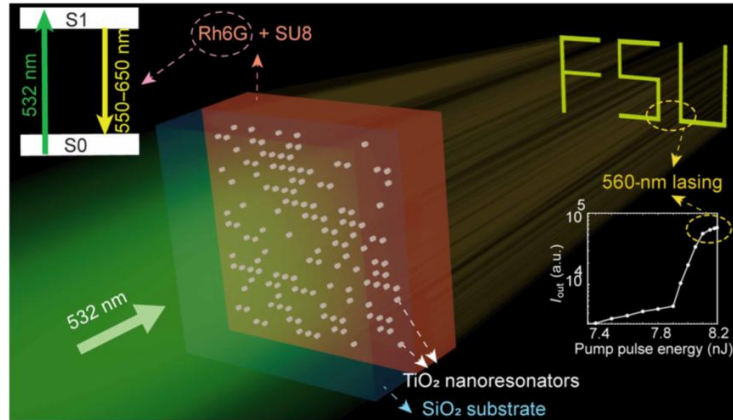
文章链接: <https://doi.org/10.1103/2tt3-yndr>

2、基于介电超表面的全息激光发射

纳米光子学中，发展兼具光产生与空间波前调控功能的超紧凑激光源仍具挑战，并对增强现实、光场显示、衍射神经网络和医学诊疗具有重要意义。超表面可调控波前，结合增益材料后可发光并整形光场，但自发辐射相干性有限，难以形成复杂干涉图案。相比之下，激光工作模式可建立良好相位关系，实现高精度全息波前调控。现有激光超表面多只能产生简单定向光束；外腔或 VCSEL 集成方案又存在体积大、对准复杂、外置整形受限等问题。将超表面嵌入激光腔内虽可调控阈值、波长和偏振，但单一超表面内同时实现激光产生与任意全息整形仍少有探索。近期 q-BIC 超表面激光虽实现全息图案，但角度范围小、依赖偏振且对加工精度敏感。

近日，耶拿大学 Ayesheh Bashiri 团队提出了一种具有全息激光输出的发光超表面系统，该系统由二元结构超表面与增益介质集成而成，能够在单个器件中同时实现相干光的产生以及对输出激光发射的精确光束整形。通过这种设计方法，即使为了实现全息编码而在结构中引入一定无序，器件仍能保持稳定而可靠的激光性能。凭借紧凑的超薄结构、较低的激光阈值和宽视场特性，该系统为产生按设计需求定制的结构化激光发射提供了一个优异平台，并在微型化光学系统中展现出重要应用潜力。（刘帅）

相关工作发表在《Science Advances》上。



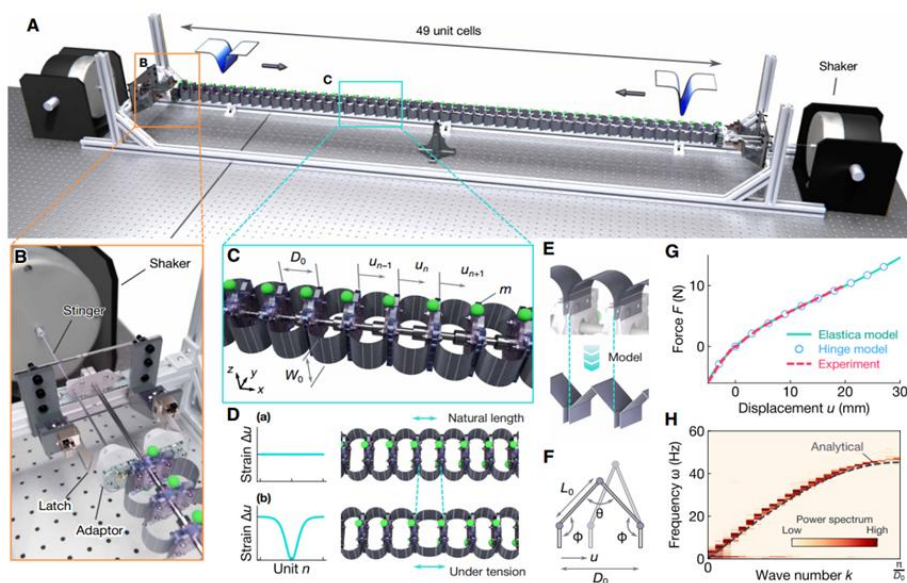
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aea7345>

3、揭示机械超材料中的孤子碰撞

孤子因其能够以稳定形态携带局域能量传播而成为非线性科学中的重要研究对象,广泛存在于流体、光学、等离子体以及凝聚态体系中。孤子最独特的性质之一是碰撞后的“粒子式”行为,即在相互作用后仍保持原有形状和速度,仅产生相位偏移。对这种碰撞动力学研究不仅有助于理解非线性波传播机制,也为光通信、信息处理以及新型计算架构的发展提供了理论基础。近年来,机械超材料的发展推动了机械体系中非线性波研究的兴起,其中应变软化结构能够支持与传统压缩孤子不同的稀疏孤子。尽管这类波动在波导、冲击缓释和能量收集等领域展现出应用潜力,但已有研究主要集中于孤子的产生与传播过程,对于孤子碰撞及相位偏移等核心特征的实验研究仍十分有限。

近日,韩国首尔大学的 Jinkyu Yang 教授研究团队构建了一种低耗散一维机械超材料平台,通过高精度全场测量实现了稀疏孤子碰撞过程的直接观测。研究首先建立了应变软化晶格模型,并利用多尺度展开推导出连续介质极限下的 Boussinesq 方程,获得孤子的解析解及碰撞后的相位偏移表达式。在实验中,研究者成功产生并观测了单个稀疏孤子的稳定传播行为,其传播速度和波形与理论预测及数值模拟结果高度一致。进一步地,通过双端激励实现了对称和非对称两类孤子迎头碰撞实验。结果表明,碰撞后的孤子能够保持原有波形和传播速度,仅表现出与振幅相关的相位偏移,展现出典型的孤子弹性碰撞特征。实验测得的相位偏移规律与理论模型及数值模拟均吻合良好,验证了所建立理论框架的有效性。该研究不仅首次系统揭示了机械超材料中稀疏孤子的碰撞动力学和相位偏移机制,也为利用机械孤子实现波动逻辑器件、非常规计算以及可编程信息处理提供了实验基础。

该研究发表于《Science Advances》。(刘梦洋)



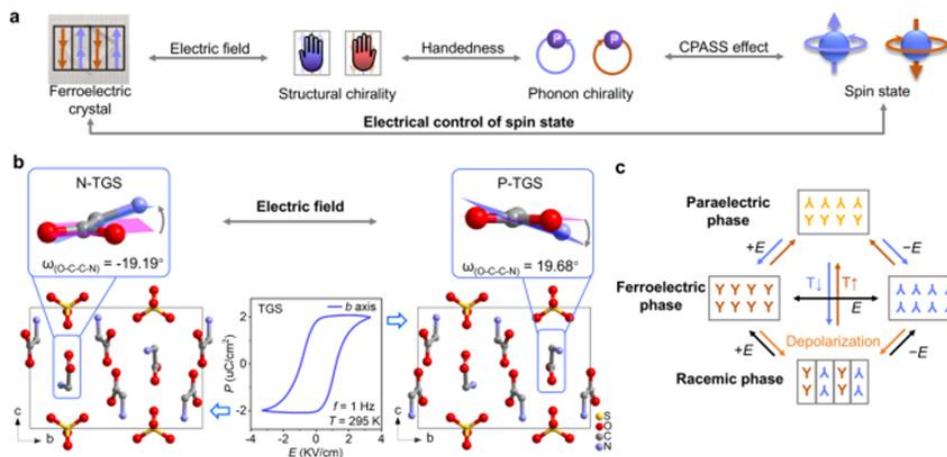
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aeb0489>

4、铁电性和声子手性耦合

近年来,手性声子作为一种携带角动量和圆偏振特征的晶格振动模式,正在成为凝聚态物理、声子学和自旋电子学领域的重要前沿。与普通声子不同,手性声子不仅能够传递热量和晶格振动能量,还可以通过电子-声子耦合向电子自旋转移角动量,从而为实现声子调控自旋、热流驱动自旋流等新型功能提供可能。过去,手性声子主要在具有固定结构手性的材料中被观测到,其手性由晶体本身的“左手”或“右手”结构决定,难以在器件中实现可逆调控。然而,真正面向应用的声子或自旋器件,需要一种能够被外场、特别是电场直接操控的手性自由度。铁电材料由于具有可翻转的自发极化和破缺反演对称性,天然具备通过电场调控结构对称性的能力。若能将铁电极化、结构手性与手性声子耦合起来,就有望实现“电场—手性—声子—自旋”的连续调控链条,为低功耗、可集成的手性声子器件和自旋电子器件提供全新路径。

近日,美国北卡罗来纳州立大学 Xiaotong Li、Jun Liu、Dali Sun 团队联合波特兰州立大学 Yi Xia 等,以经典分子铁电体三甘氨酸硫酸盐(TGS)为对象,首次实验展示了铁电性与手性声子之间的可逆耦合。TGS 晶体在铁电相中具有可由外加电场翻转的极化方向,同时其分子构型和结构手性也会随之反转。研究人员通过电场极化切换晶体手性,并利用原位时间分辨磁光克尔效应测量发现,Ag/TGS 界面处的克尔旋转信号会随着外加电场方向发生可逆反转,说明手性声子携带的角动量及其诱导的自旋积累可被电场控制。进一步实验表明,在中心对称的顺电相中,手性声子信号完全消失;而在消旋铁电态中,信号强度随局域铁电畴分布变化,体现出净手性的可调性。圆偏振拉曼光谱和第一性原理计算进一步证实,正、负极化 TGS 中存在相反方向的分子圆周振动,即相反手性的光学声子。该工作建立了从铁电极化到结构手性、再到手性声子和自旋响应的电控耦合机制,推动手性声子从“静态观测”走向“主动操控”,为未来铁电基声子器件、自旋器件和手性量子态调控提供了重要实验基础。

相关内容发表在《Nature Communications》(张琰炯)。



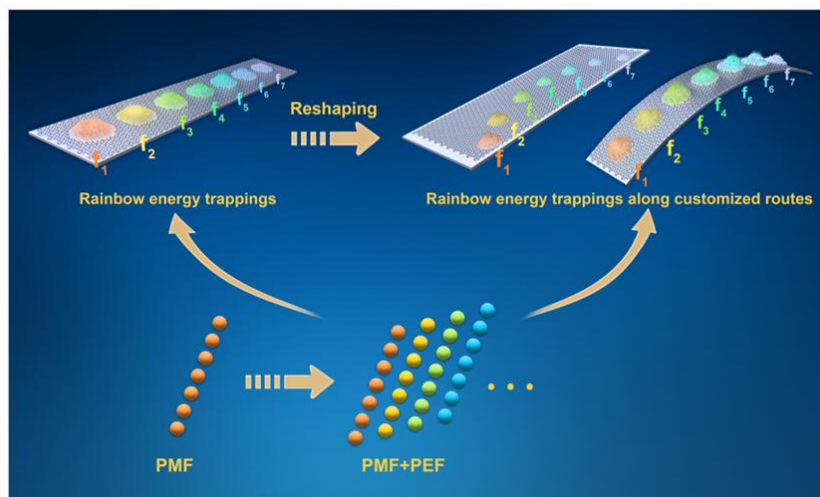
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-73317-4>

5、多重超声能量捕获彩虹手性朗道能级的实现

朗道能级是凝聚态物理中的经典概念，其揭示了电子在磁场作用下形成离散能级和局域化态的规律，并为量子霍尔效应和拓扑绝缘体等重要研究方向奠定了基础。近年来，研究者通过构造人工赝磁场，将朗道物理拓展至光学、声学和弹性波等经典波动体系。已有研究实现了能够局域波能量的平坦朗道能级以及具有传播能力的手性朗道能级，并进一步提出彩虹朗道能级概念，使不同频率的波在不同空间位置实现分离与聚集。然而，已实现的彩虹朗道能级大多依赖平坦朗道能级，缺乏传播能力，而兼具传播特性与频率分离能力的彩虹手性朗道能级尚未得到实验验证，尤其在弹性波体系中的实现仍然缺失。

针对这一问题，同济大学的祝捷教授、陈亚枫副教授和香港理工大学的苏众庆教授研究团队设计了一种基于弹性超材料的超声器件，通过对单元结构几何参数进行空间梯度调控，同时构建面内赝磁场和赝电场，实现了彩虹手性朗道能级的形成。实验结果表明，不同频率的超声波能够在器件内部不同位置被选择性俘获，从而实现多路复用的超声能量分离与处理。与传统拓扑彩虹器件主要依赖边界态或角态局域能量不同，该方案实现了体内区域的大面积能量聚集和输运。进一步地，研究通过重新设计参数分布，实现了沿预设弧形路径传播的彩虹能量俘获，并在弯曲结构中验证了该机制的稳定性和鲁棒性，展现出较高的结构适应能力和路径可编程性。该成果不仅丰富了朗道能级及人工规范场相关研究，也为多频超声分束器、并行波信息处理器、集成弹性电路以及能量收集器件的发展提供了新的设计思路。

该研究发表于《Advanced Functional Materials》。（刘梦洋）

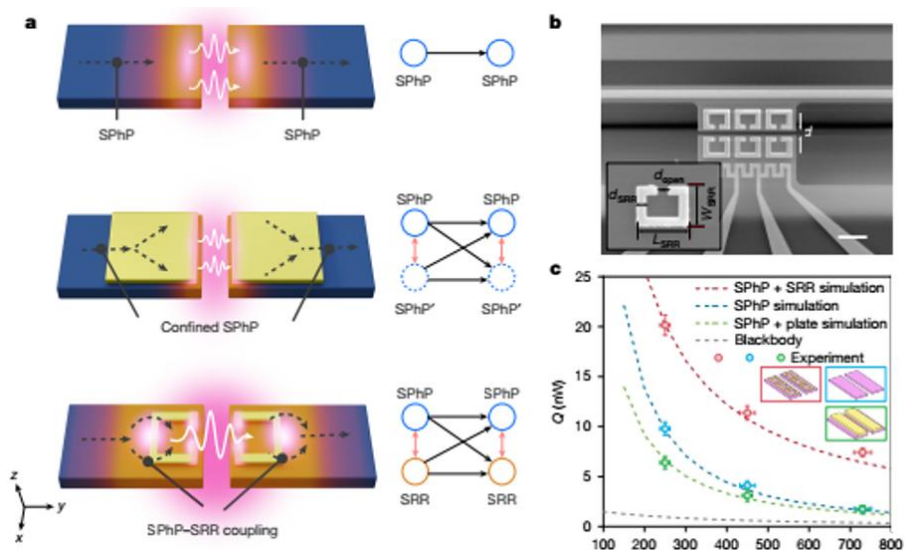


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.76042>

6、超材料增强近场辐射传热

热辐射是自然界最基本的能量传递方式之一，在能源转换、热管理、红外探测和气候科学等领域具有重要意义。通常情况下，两个物体之间的辐射换热受到黑体辐射极限的限制；但当二者间距缩小到小于热辐射特征波长的近场范围时，倏逝波、表面声子极化激元和表面等离激元等电磁模式可以跨越纳米间隙发生隧穿，使辐射换热强度远超远场黑体极限。过去，人们已在极性介电材料、掺杂半导体和金属等体系中观测到显著的近场辐射增强，但这些实验主要依赖材料本征极化激元。相比之下，超材料由亚波长人工结构单元组成，能够按需设计电磁共振模式，被理论认为可以进一步调控甚至增强近场辐射换热。然而，由于纳米间隙制备、微弱热流测量以及模式耦合验证都极具挑战，超材料增强近场辐射换热长期缺乏直接实验证据。因此，如何利用人工光学结构主动调控热辐射能量交换，成为近场热辐射、纳米光子学和热管理领域的重要前沿问题。

近日，美国卡内基梅隆大学 Sheng Shen 课题组联合斯坦福大学范汕洄院士课题组，设计了一种共面纳米热测量器件，在两片悬空 SiN 薄膜之间构筑数百纳米真空隙，并在薄膜表面精确制备面对面对准的金分裂环谐振器（SRR）超材料结构。实验结果表明，相比裸 SiN 薄膜器件或覆盖普通金膜的器件，引入 SRR 超材料后，近场辐射热流可实现约 2 至 4 倍增强，并达到黑体极限约 20 倍。进一步的电磁模拟和耦合模理论分析表明，这一增强并非简单来自金属结构本身，而是源于 SRR 等离激元共振模式与 SiN 薄膜中表面声子极化激元之间的强耦合。研究团队还利用纳米傅里叶变换红外光谱直接观测到 SRR 模式与 SiN 声子极化激元之间的反交叉特征，进一步验证了强耦合机制。该工作首次从实验上证明了超材料可以有效增强并操控近场辐射换热，为热光伏能量转换、红外探测、辐射冷却和纳米尺度热管理提供了新的设计思路。相关内容发表于《Nature》上。（张琰炯）

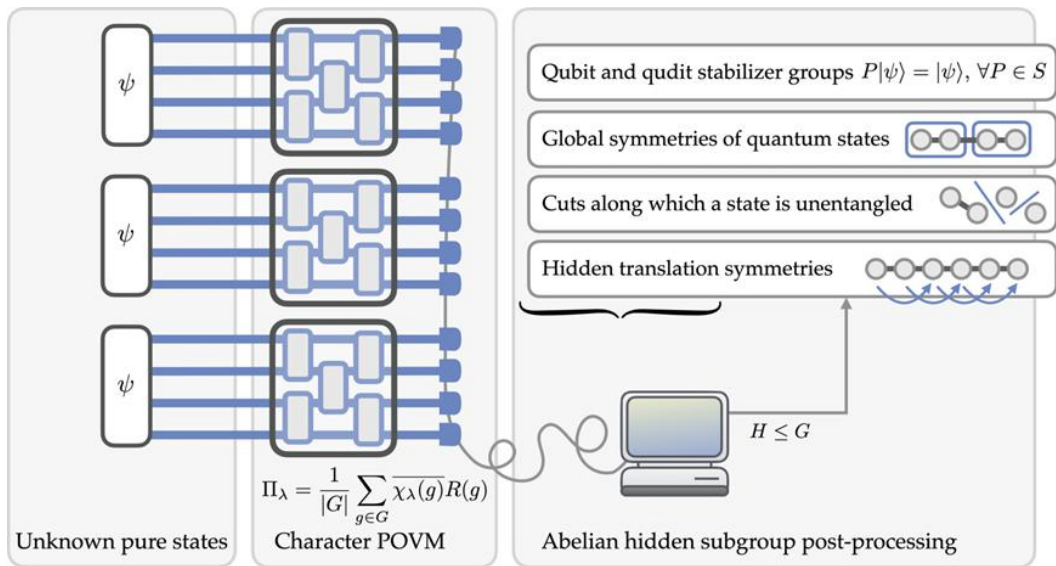


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10595-4>

7、阿贝尔态隐藏子群问题中的量子态对称性学习

对称性是现代物理中的核心概念之一，不仅决定了经典与量子系统中的守恒律，也为量子多体物态、拓扑相、量子纠错和量子算法设计提供了统一语言。在量子信息科学中，许多重要任务都可以归结为对隐藏结构的识别。例如，量子纠错码依赖稳定子结构，量子多体相常由对称性加以区分，而量子算法中的隐藏子群问题则为 Shor 算法等重要成果提供了数学基础。因此，如何从未知量子态中高效提取其对称性信息，成为量子态学习、量子性质测试和量子算法研究中的重要问题。传统隐藏子群问题通常假设隐藏结构编码在某个函数或 oracle 中，而在量子态学习中，对称性则直接体现在态本身的不变性上：若某些群操作作用于量子态后保持其不变，这些操作便构成该态的隐藏对称子群。由此产生的“状态隐藏子群问题”（State Hidden Subgroup Problem, StateHSP）为量子态对称性学习提供了新的理论框架，也在量子学习理论与传统隐藏子群算法之间建立了联系。近日，德国柏林自由大学 Jose Carrasco 教授团队聚焦于量子学习问题，其目标在于识别未知量子态所蕴含的隐藏对称性。基于近期提出的 StateHSP 框架，团队重点研究阿贝尔群，并开发出一种高效的量子算法——该算法利用广义傅里叶采样方法来识别任意隐藏对称子群。团队在三个具体应用中验证了该方法的广泛适用性：包括学习 (i) 量子比特与量子位稳定子群、(ii) 量子态非纠缠的切割路径，以及 (iii) 隐藏平移对称性。通过这些应用实例，团队证实了贝尔采样和贝尔差分采样等经典量子学习方法本质上都是傅里叶采样的特例。研究结果充分展现了 StateHSP 框架在基于对称性的量子学习任务中的广阔潜力，并提供了更易于在近场量子设备上实现的实验方案。

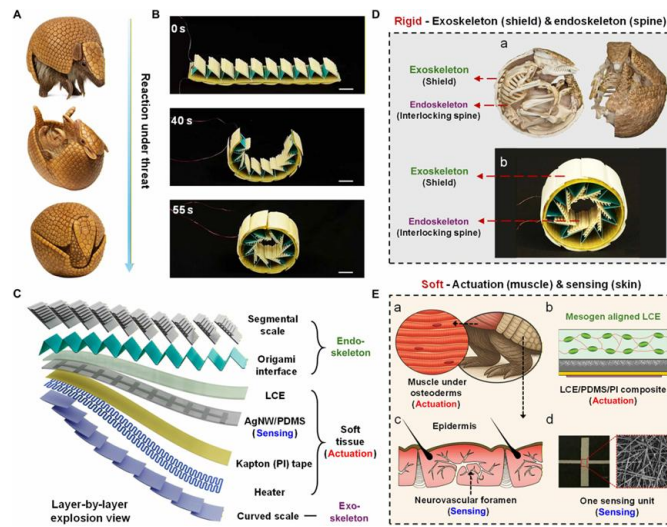
相关内容发表于《PRX QUANTUM》上。（金梦成）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/6frk-891j>

8、受犰狳启发的软体机器主动变形骨架

软体机器涵盖柔性电子、软体机器人和可变形超材料，能够实现大幅、可逆的变形与重构，是智能系统的重要发展方向。然而，其柔顺性往往削弱了机械防护能力，使其在冲击、穿刺、磨损等外部威胁下较为脆弱，尤其限制了其在太空探索、搜救和可穿戴防护等极端环境中的应用。受生物防御机制启发，研究者发展了多种仿生防护结构，如珍珠层复合材料、牙釉质陶瓷和分段甲胄结构，以平衡柔性与其强度。但现有系统多依赖被动增强，缺乏感知—驱动闭环和主动变形能力。相比之下，鱼、蛇和三带犰狳等生物能将刚性鳞甲、骨骼支撑与刺激响应形变相结合，在运动与防御之间快速切换，为主动变形防护软体机器提供了重要启发。近日，北卡罗来纳州立大学朱勇教授团队，受犰狳卷曲防御策略启发，作者提出了一种形变互锁防护模块（MIPM）。该结构不同于传统依赖刚性鳞片覆盖的被动防护系统，而是将贴合曲面的外骨骼与仿异关节脊柱的分段内骨骼结合，实现外部包覆和变形触发的内部承载支撑。同时，集成柔性传感元件和液晶弹性体驱动层，使结构能感知外部威胁并通过局部焦耳热实现可编程弯曲。MIPM 可完成卷曲、滚动和抓取等多种形变，在保护脆弱物体免受穿刺、冲击和集中载荷损伤的同时，还能在危险地形中运动和逃逸。该工作将自适应形貌、实时反馈和骨骼协同防护集成于一体，为新一代主动防护软体机器提供了仿生设计范式。（刘帅）相关工作发表在《Science Advances》上。



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aed2516>
 (来源: 两江科技评论)