

超材料前沿研究一周精选

2025 年 7 月 14 日-2025 年 7 月 20 日

索引:

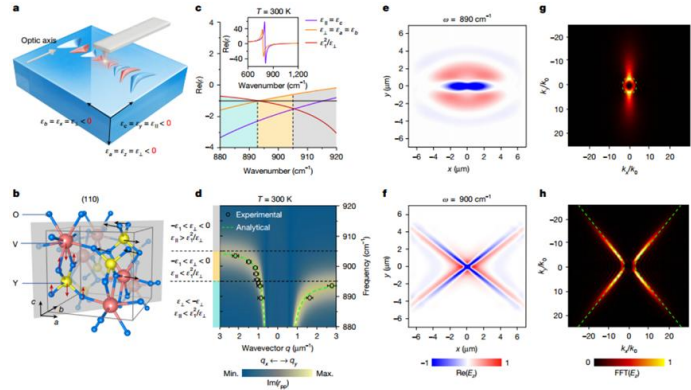
- 1、非双曲晶面上的长程双曲极化子
- 2、无序系统中的普适非厄米输运
- 3、莫尔时间光子晶体中的极窄带
- 4、利用液晶-纳米纤毛光子结构实现的可调控光学手性
- 5、各向异性层状材料角分辨偏振拉曼强度的定量预测
- 6、软体多稳态磁响应超材料
- 7、室温下范德华铁磁体中应变诱导的鲁棒斯格明子晶格
- 8、基于非绝热演化在经典力学中实验实现特殊酉操作

1、非双曲晶面上的长程双曲极化子

在纳米光学领域，双曲极化激元因其独特的光场压缩能力和强光-物质相互作用，一直是前沿研究的焦点。传统认知中，这类现象仅存在于双曲晶体——即介电张量分量符号相反的特定材料（如六方氮化硼、 α -三氧化钼等）。这些材料的光学响应被严格限制在固定的“Reststrahlen 频段”，且调控手段（如扭转堆叠、几何结构设计或异质构筑）往往复杂低效，严重制约了其在负折射、超透镜、极化激元化学等领域的应用潜力。更本质的局限在于，现有理论认为：双曲表面模式必须依赖于材料体相的双曲色散特性，这一固有认知将非双曲频段（介电分量同号）的研究长期排除在科学视野之外。

中国地质大学（武汉）戴志高教授与新加坡南洋理工大学胡光维的合作团队首次在非双曲晶体钒酸钇（ YVO_4 ）表面观测到长程双曲声子极化激元（hSPhPs），并实现了原位动态拓扑调控。该研究通过理论与实验的双重验证，彻底打破了“体相双曲性是表面双曲模式必要条件”的传统范式。团队发现，尽管 YVO_4 在 $800 - 950 \text{ cm}^{-1}$ 频段内介电分量 $\epsilon_{//}$ 与 $\epsilon_{\perp}$ 均为负值（体相无双曲性），但其（110）晶面的弱各向异性可支持特殊的表面电磁模式。通过求解麦克斯韦方程，他们证明：当满足条件 $-\epsilon_{//} < \epsilon_{\perp} < 0$ 且 $\epsilon_{//} < \epsilon_{\perp}^2 / \epsilon_{//}$ 时，表面极化激元沿 x 方向传播而被 y 方向禁止，形成空间双曲色散。纳米成像验证：利用散射式近场光学显微镜（s-SNOM），团队直接在 YVO_4 表面观测到双曲波前。在 890 cm^{-1} 频率下波前呈椭圆形，升至 900 cm^{-1} 时转变为清晰的双曲开口结构，开口角 α 随频率增加从 51° 缩小至 33° ，与理论预测完全一致。通过低温调控（ $300 \text{ K} \rightarrow 150 \text{ K}$ ），团队实现了极化激元的原位拓扑转变。在固定频率下（如 894 cm^{-1} ），降温可使波前从双曲态 $\rightarrow$ 渠化态（衍射自由传播） $\rightarrow$ 椭圆态连续演变。这种相变源于 VO_4 四面体与 Y 离子振动对非谐热运动的敏感性：温度降低使介电分量幅值增大，导致 hSPhPs 频谱蓝移，从而动态调制色散拓扑。低损耗长程传播：在 150 K 下，椭圆极化激元传播距离达 59 微米 （ 300 K 时为 28.6 微米 ），沟道化模式达 48.7 微米 ，远超传统双曲材料（如 hBN）。极化激元群速度最高达 $0.07665c$ （ 220 K ， 905 cm^{-1} ），比 $\alpha\text{-MoO}_3$ 等材料快两个数量级。温度可同时调制波长（ λ_p ）

与群速度（vg）。例如在 894 cm^{-1} 处，降温使波长显著增加，而群速度在 150 K 时提升至 $0.06293c$ 。该研究将双曲纳米光学从“双曲晶体”的束缚中解放出来，证明表面模式设计可独立于体相光学响应。团队进一步验证 4H-SiC 等其他非双曲材料同样支持该效应，凸显了机制的普适性。温度调控提供了一种无需微纳加工的原位动态手段，为负折射器件、片上超透镜、极化激元互联等应用开辟了新路径。相关内容发表于《Nature》上。（张琰炯）

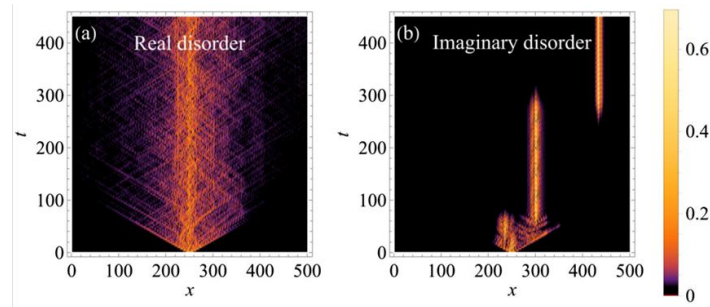


文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09288-1>

2、无序系统中的普适非厄米输运

凝聚态物理中，安德森局域化理论为理解无序系统中波传播提供了完整的理论体系。该理论的核心在于揭示了两个相互印证的基本特征：从静态角度看，系统本征态呈现空间指数局域化；从动态角度看，则表现为波包扩散的完全抑制。这种“谱-动力学对应”关系在厄米系统中具有普适性，其典型表现就是无序晶体中电子态的局域化导致系统在低温下呈现绝缘特性。然而，随着非厄米物理的蓬勃发展，传统安德森局域化理论正面临新的挑战。近年来，研究者们通过系统探索非厄米与无序的相互作用，不仅成功观测到非厄米安德森相变、拓扑安德森绝缘体等新奇量子现象，并在多体局域化等前沿领域取得重要突破，这些进展极大地丰富和拓展了人们对量子输运过程的认识。特别是，最新研究揭示了一个突破传统认知的重要现象：在具有随机增益或损耗的非厄米系统中，虽然系统本征态仍然保持着严格的指数局域化特征，但波包却能够通过一种独特的“量子跳跃”机制实现有效传播。这种反常输运行为最显著的特征体现在其标度关系上——波包传播距离与时间呈现出既不同于经典弹道输运也区别于常规扩散行为的特殊依赖关系。深入的理论分析表明，这一现象的物理本质源于非厄米系统特有的复能谱结构，其中虚部能谱的统计特性在决定系统动力学行为方面起着决定性作用。

近日，清华大学汪忠教授团队建立了非厄米无序系统中波传播的普适标度理论，揭示了三个关键发现：(1) 输运过程的时空演化完全由系统虚部态密度的渐近行为主导；(2) 标度指数仅由体系维度和无序类型决定，展现出惊人的普适性；(3) 在弱无序极限下，系统会自发趋于统一的标度形式。这一理论不仅完美解释了已有实验现象，更预测了全新的动力学相。值得注意的是，该理论虽然与经典的莫特变程跳跃理论在数学形式上存在相似性，但其物理机制却具有本质区别。在莫特理论中，温度倒数的角色在此被时间变量所替代，这一对应关系为理解非厄米量子动力学提供了全新的视角。相关内容发表于《Physical Review Letters》。（金梦成）

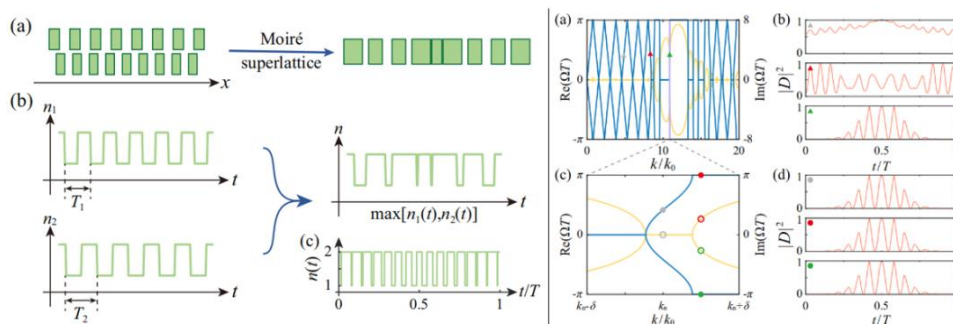


文章链接: <https://doi.org/10.1103/z9ml-3mwb>

3、莫尔时间光子晶体中的极窄带

莫尔超晶格为光子晶体的设计提供了新的自由度,在光场调控、纳米激光器、可调谐光学孤子等波操纵领域开辟了新机遇。传统光子晶体通过空间周期性折射率调制实现光场调控,而其时间维度上的对应物——光子时间晶体正成为当前研究的前沿热点。这类新型材料体系在空间上保持均匀性,却在时间维度实现周期性调制,展现出独特的物理特性。与空间光子晶体在能量轴上形成带隙的机制不同,光子时间晶体通过时间调制引发时间折射波与时间反射波的量子干涉效应,从而打开动量带隙。这种时间调制打破了系统的时间平移对称性(导致能量不守恒),使得其中的 Floquet 模式表现出非厄米系统特有的指数增长或衰减行为。这自然引发了人们对空间莫尔超晶格的时间对应物——莫尔光子时间晶体的研究兴趣。例如,空间莫尔超晶格支持群速度为零的平带并导致空间局域化模式。而根据时空对偶性,时间维度的莫尔结构应当能够产生具有超大群速度的极窄能带和时间局域化模式,这一新颖构想为相关研究指明了新方向。

近日,上海交通大学陈险峰教授和袁璐琦教授团队通过叠加两种不同周期的折射率调制,构建出时间维度上的莫尔光子晶体。这种新型结构在动量空间产生极窄能带,支持具有时间局域特性的模式,并展现出周期性自重构的脉冲行为。团队系统研究了能带结构的可调性,发现通过调控时间调制参数可以灵活控制这些特性。研究中还发现的特殊锁模机制为开发可调脉宽锁模激光器提供了新思路,而极窄能带带来的增强传感效应也为精密测量开辟了新途径。这项研究首次将莫尔图案引入光子时间晶体领域,为时变系统中的波调控带来了全新视角。相关内容发表于《Physical Review Letters》。(金梦成)

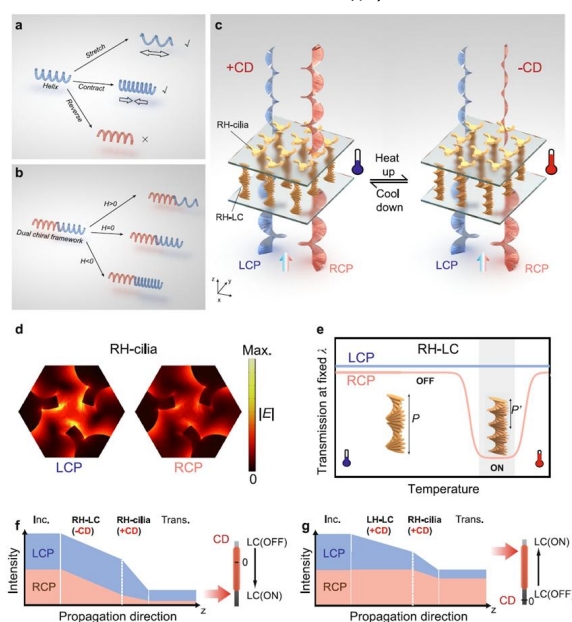


文章链接: <https://doi.org/10.1103/4lqd-z567>

4、利用液晶-纳米纤毛光子结构实现的调控光学手性

手性微纳结构或分子通常能够产生光学手性响应，其中圆二色性（CD）是典型特征，表现为结构对左旋和右旋圆偏振光（CPL）响应的差异。过去十年，研究者开发了多种手性超材料，并将其应用于生化传感、手性全息成像、信息加密等领域。强手性响应通常依赖复杂的三维纳米结构，而纳米剪纸技术作为新兴纳米制造方法，通过将二维图案转化为三维扭曲结构，有效增强了 CD，并具备动态调控光振幅与相位的能力，适用于显示与雷达系统。然而，其结构变形受限于几何形状，难以实现大范围且可逆的手性调控。为突破这一限制，引入有源光学材料成为可行路径。液晶，尤其是胆甾相液晶，因其分子可自组装为螺旋结构，形成对圆偏振光具有选择性的光子带隙，成为理想候选材料。在外界物理场作用下，其螺旋结构可重构，实现带隙漂移与透射率的连续调控。但传统胆甾相液晶器件难以实现手性反转，且分辨率受限，导致像素尺寸较大。综上所述，当前人工手性结构在几何设计和调控能力方面仍存在瓶颈，亟需新策略以满足现代光学系统对动态、高性能光调控的需求。

近日，北京理工大学的汪洋教授、李家方教授团队和南京大学陈鹏副教授团队、皇家墨尔本理工大学的林瀚副教授团队合作，提出了一种双手性框架，通过集成纳米纤毛结构与胆甾相液晶单元，实现了圆二色性的动态放大与反转调控。这些具备强手性响应与圆偏振光子带隙的精巧结构，借助高效的纳米剪纸与自组装方法实现于可见光区域。该框架突破了传统纳米剪纸结构的物理限制，提供了超越胆甾相液晶分辨率的调控能力。在此基础上，作者还展示了一种热调谐金属透镜，实现了对圆偏振光的聚焦态切换。上述结构设计、制备方法及其功能演示，表明该双手性框架在未来的光通信、显示、传感等领域具有广阔应用前景。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



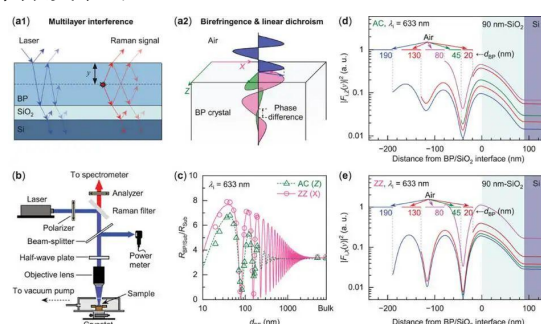
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61982-w>

5、各向异性层状材料角分辨偏振拉曼强度的定量预测

各向异性层状材料（ALMs）因其低对称性的晶体结构呈现出独特的方向选择性。以黑磷（BP）、 ReX_2 （ $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ ）、 GeSe_2 和 Td-WTe_2 为代表的 ALMs 表现出具有显著各向异性的光学响应以及声子相关性质，使其在偏振敏感的光电探测器、

场效应晶体管及热电器件中备受瞩目。当薄层厚度减小到原子级时，ALMs 的电子能带、电子-光子/电子-声子耦合及光学各向异性随层数显著变化；而在数十纳米以上的厚层中，其体能带可与介电基底形成光学微腔，增强光-物质相互作用。因此，全面理解 ALMs 薄层从原子级厚度到体极限范围内电子-光子与电子-声子相互作用中的内禀各向异性效应，对于推动其在光电子学中的应用至关重要。角分辨偏振拉曼（ARPR）光谱通过改变入射与散射光的偏振矢量，成为研究 ALMs 各向异性的常用工具。然而，近年来对 ALMs 的研究表明，其 ARPR 强度强烈依赖于薄层厚度、激发光波长及介电环境，难以用传统晶体对称性定义的拉曼张量解释，其原因被归结为双折射、线性二色性与多层干涉共同导致的深度依赖的偏振与场强变化。如何在无需经验拟合的前提下，定量预测从单原子层到体极限的 ARPR 行为，仍是该领域亟待突破的核心难题。

近日，中国科学院半导体研究所的林妙玲、谭平恒研究员团队以 BP 和 Td-WTe₂ 为模型体系，研究了 ALMs 中的拉曼散射过程，并定量预测了其在 SiO₂/Si 基底上从原子级薄层到体极限范围内的 ARPR 强度分布。利用实验测得的复折射率参数，该团队考虑了“空气/ALMs/SiO₂/Si”多层结构中的双折射、线性二色性和多层干涉效应，并对薄层内部的光传播过程进行了严格建模。研究团队引入了用于描述 ALMs 拉曼散射的内禀拉曼张量（ R_{int} ），并计算了有效拉曼张量 R_{eff} 随 ALMs 薄片厚度与 SiO₂ 层厚度的依赖关系，从而无需任何拟合参数即可定量预测其在任意 SiO₂/Si 基底上的 ARPR 强度分布。该工作为预测 ALMs 薄片 ARPR 强度的挑战提供了一个全面的框架，推进了对 ALMs 薄片拉曼散射和光学各向异性的理解。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（侯玥盈）



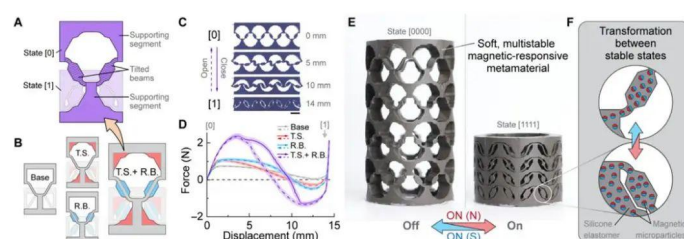
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202506241>

6、软体多稳态磁响应超材料

磁驱动软材料在生物医学和软体机器人领域具有重要应用价值，因其能实现无线驱动，尤其适用于人体内部复杂受限环境。现有磁驱动软结构虽在可变形性方面取得进展，但在无持续能量输入下维持目标几何构型仍面临巨大挑战，特别是在不可预测的机械、化学或热应力环境中。多数现有结构依赖持续磁场、温度或光调制来保持变形状态，限制了其在植入式或可摄入设备等长期应用场景的可行性。此外，为追求稳定性，以往的多稳态设计常需引入相对高模量材料或刚性部件，易导致应力集中，增加组织损伤风险。因此，开发一种完全由软材料构成、兼具磁驱动变形能力和本征多稳态特性的结构，对于实现安全可靠的可重构生物医学器械和适应复杂环境的软体机器人至关重要。

近日，美国莱斯大学的江雍舜助理教授研究团队设计并制备了一种完全由软硅胶和钕铁硼磁性微粒复合而成的多稳态超材料，通过引入梯形支撑段和增强梁，该

结构克服了传统全软双稳态设计中难以维持变形状态的局限，实现了高能量势垒。这种几何设计约束了梁的弯曲行为，显著提升了压缩和拉伸方向上的能量势垒，使超材料能在移除驱动磁场后稳定保持[0]（初始）和[1]（变形）两种构型。该材料可通过非均匀磁场实现状态间的快速可逆转换，更重要的是，其多稳态特性具有高度可编程性：通过调整单元梁的厚度比、角度和增强比，能精确调控能量势垒大小，从而实现不同单元或单元行对特定磁场强度的选择性响应。这种设计赋予了材料卓越的环境鲁棒性，作为概念验证，该研究展示了其多样化应用潜力：包括可在受限空间内磁控重构的发光组件、实现复杂弯曲运动的执行机构，以及无需持续磁场即可稳定工作的无线驱动阀门和蠕动泵。相较于依赖持续磁场的传统磁驱动软结构或需要高模量材料的早期多稳态设计，该全软多稳态磁响应超材料在生物安全性、环境适应性及功能可持续性方面具有显著优势，为下一代可重构植入器械、可摄入医疗设备及灾害响应机器人提供了新平台。该研究发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



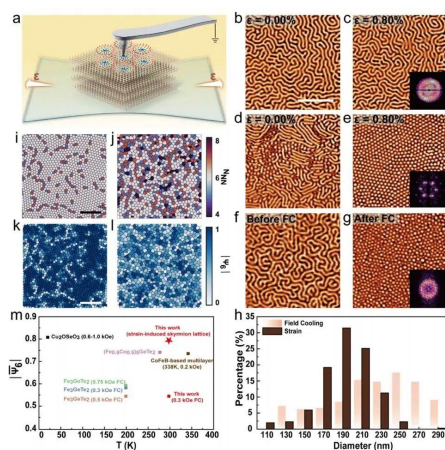
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adu3749>

7、室温下范德华铁磁体中应变诱导的鲁棒斯格明子晶格

拓扑磁性斯格明子作为非平庸的纳米级自旋结构，因其在低功耗自旋电子器件中的潜在应用价值备受关注。传统斯格明子调控依赖外部磁场、电流或激光脉冲，存在能耗高且操作复杂的问题。尽管应变工程被视为一种高效调控手段，二维范德华（vdW）材料因其弱基底相互作用导致应变传递效率低下，且多数铁磁体系的居里温度低于室温，严重制约了实际应用。此外，现有方法难以在无外场条件下实现室温稳定的有序斯格明子晶格，尤其缺乏满足柔性电子器件需求的鲁棒解决方案。因此，开发一种基于应变调控的室温稳定、无外场斯格明子晶格生成技术，成为推动柔性自旋电子学发展的关键挑战。

近日，武汉大学的刘胜院士、于霆教授研究团队与南洋理工大学的刘政教授课题组等合作，通过将室温二维铁磁体 Fe_3GaTe_2 置于柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯基底，结合预退火与应变调控，首次实现了无外场诱导的斯格明子晶格。研究揭示了预退火温度与应变的协同作用机制：预退火促使材料表面析出 FeTe_2 层，破坏晶格对称性并增强 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用（DMI）；施加非均匀拉伸应变进一步调控 DMI 强度，能够显著降低斯格明子成核能垒。通过原位应变磁力显微镜观测发现，扫描探针的微弱杂散场即可触发迷宫磁畴向有序六方晶格的转变，晶格尺寸均匀且具备短程序列特征。该斯格明子晶格展现出卓越的鲁棒性；相较之下，传统场冷法制备的斯格明子呈无序分布，尺寸分散且键序参数较低。理论分析表明，应变通过增强 DMI 和抑制偶极相互作用，使体系进入 DMI 主导态，而晶格内斯格明子的耦合效应进一步提升了整体稳定性。此项工作为开发低功耗柔性自旋存储与逻辑器件提供了新材料平台和技术路径。

此项成果发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）

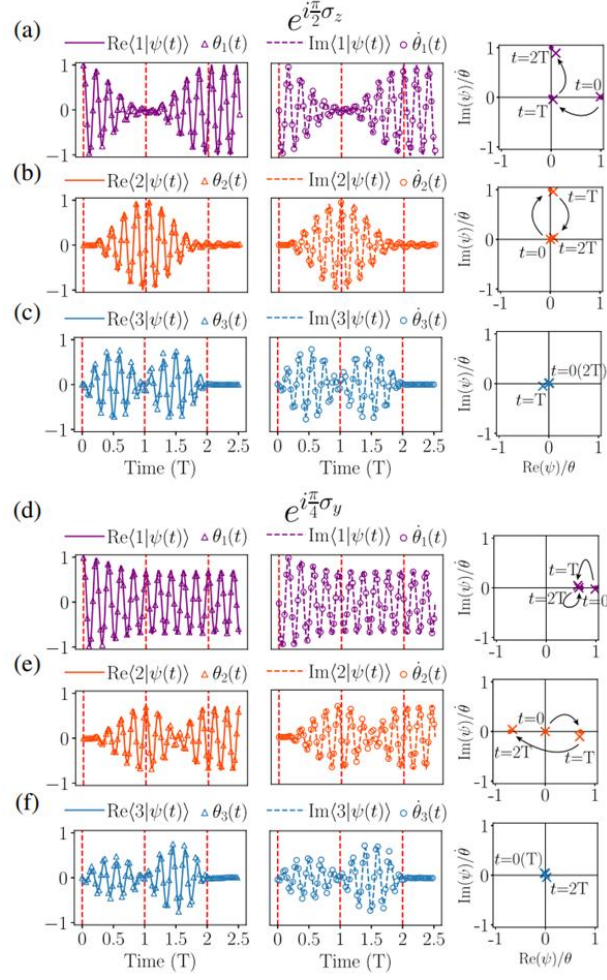


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202505977>

8、基于非绝热演化在经典力学中实验实现特殊酉操作

微观世界的物理现象丰富多样且极为复杂，实验上往往难以直接观测与操控。因此，量子模拟技术应运而生，其利用更易控制的量子系统来模拟复杂的量子现象，已在现代量子物理中发挥着重要作用。这些模拟通常依赖于对量子单元进行精确的 $SU(N)$ 操控。近年来，人工构建的经典波动系统已在模拟多种量子力学现象方面展现出显著潜力。然而，量子系统与经典系统之间仍存在一些被普遍认为是根本性、难以逾越的差异。其中一个典型例子便是遵循特殊酉群（special unitary groups）动力学的系统，例如由 $SU(2)$ 描述的电子自旋，以及由 $SU(3)$ 描述的基本粒子色荷对称性等。

近日，香港浸会大学马冠聪教授课题组在经典系统中成功实现了通用的 $SU(2)$ 和 $SU(3)$ 操作。他们聚焦于单粒子量子系统的动力学演化。该研究采用了一种非绝热演化的方法来控制耦合弹簧-质量振子系统的动力学，该演化路径已被证实可实现通用量子逻辑。具体地，该方法将 $SU(N)$ 演化编码在系统某一子空间中，通过调控该子空间内态的非绝热全同性演化，并对多个振子之间耦合进行时间调制，成功实现了 $SU(N)$ 操作。该协议完全基于系统的几何演化，不积累任何动力学相位；与此同时，非绝热特性允许快速操作，有效降低了耗散与噪声的影响。该研究为在经典系统中研究和模拟量子现象开辟了新路径。相关成果以“Experimental Realization of Special-Unitary Operations in Classical Mechanics by Nonadiabatic Evolutions”为题发表在期刊《Physical Review Letters》上（张甜）。



文章链接: <https://doi.org/10.1103/24zr-pl3m>
 (来源: 两江科技评论)