

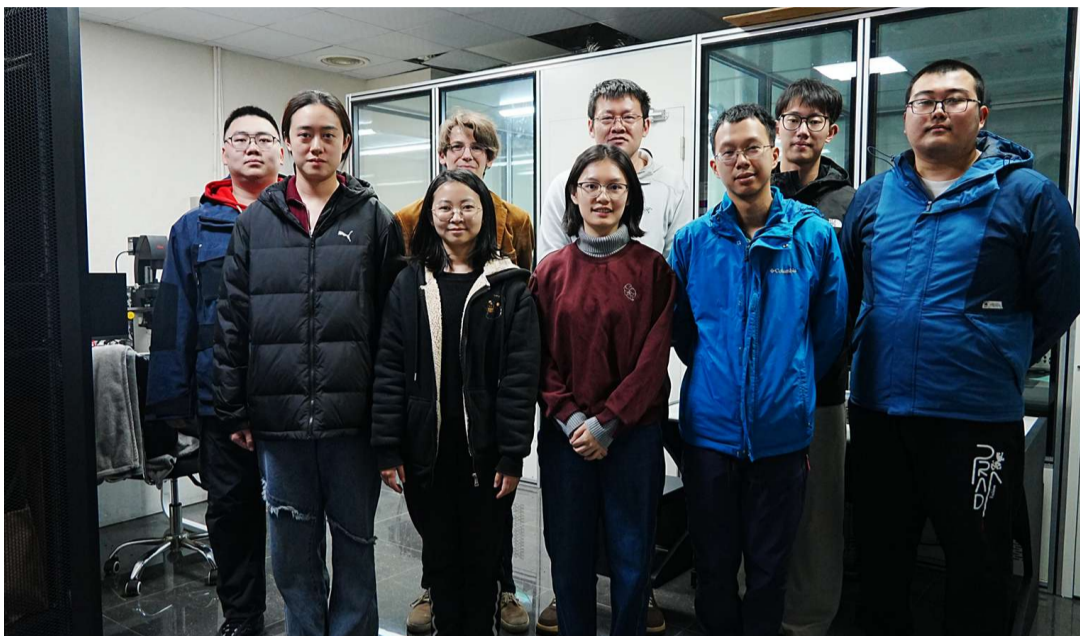
# 复旦团队在《自然》发表“造物”新范式

北京时间2026年4月1日，复旦大学物理学系、应用表面物理国家重点实验室谭鹏教授与合作者于以“Dual-symmetry-guided assembly of complex lattice”为题，在《自然》(Nature)联合发表研究成果，提出一种全新的“对偶对称性引导(Dual-symmetry-guided, DSG)”设计范式。这一发现打破了“复杂材料组装必须依赖复杂基元”的传统认知，为利用多种物理和化学技术手段制备光子晶体、超导材料等复杂对称性材料与器件提供了新的思路。

## “大道至简”，打破晶格复杂结构传统认知

晶格结构是物质微观世界的“骨架”，决定了材料的宏观性能。研究如何设计并自发形成具有特定对称性的复杂晶格，是理解物质规律和开发前沿功能材料的关键。然而，传统观念认为，要产生复杂对称结构，必须设计极度复杂的相互作用，如方向性化学键或各向异性颗粒形状。这类思路实验条件苛刻，且易使粒子“卡壳”，难以形成高质量晶格。

谭鹏团队跳出传统路径，从几何对称性中汲取灵感，提出“对偶对称性引导”(DSG)新范式。该策略在结合光镊技术的二维胶体实验和分子动力学模拟中得到验证，成功实现了9种复杂阿基米德晶格的自组装，并



团队合影

实习记者 胡新鹏 摄

推广到了具有8、10、12重旋转对称性的二维非周期准晶结构中，证明了DSG策略的有效性和普适性。

研究成果为复杂晶格材料制备提供了全新设计思路，可高效引导目标结构生成，降低制备难度、提升结构质量，在二维材料、胶体体系等领域具有广阔应用前景。

## 利用对偶性质，实现复杂晶格自组装

这项突破性发现的背后，是团队长达六年的探索。初期，团队采用传统模板制备，却因大量

粒子“卡”在错误位置导致结构不完整。团队转而尝试减少固定点，逐渐发现许多复杂晶格存在内在“对偶性”——可分解为两组互为对应的子点阵，掌握其一即可还原整体。

几何对偶性在物理上表现为两个子晶格具有相似的哈密顿量结构。团队发现，只需稀疏锚定其中一个低对称性子晶格，剩余自由颗粒在纯各向同性相互作用下，便能自发、精准填补到互补位置，重构出宏观复杂晶格。“这让我们从被动‘试错’转向主动‘设计’。”论文共同第一作者、博士生孙雯思

说，“只需精确引导一半，另一半通过动力学自发完成，大幅降低了难度与成本。”

DSG策略还通过减少锚定点为颗粒保留连通的“自由体积”，如同内部“高速公路”，实现高效缺陷弛豫。数值模拟证明，即便在强锚定下，系统仍能完成晶格的自组装与自我修复。

## 多学科交叉合作，拓展材料设计新边界

这项研究被《自然》审稿人评价为一项“优雅的工作”。其“优雅”之处，正在于用极简的物

理原理，驾驭了极复杂的结构生成，揭示了微观相互作用简单性与宏观结构复杂性之间的深层联系。

研究提出的DSG架构不依赖特定体系，具有普适推广价值。从软物质胶体到纳米光子晶格均可应用，甚至可通过分层策略从二维平面推广至三维结构。它借助物理、化学等多种技术手段，为制备功能丰富的复杂材料和器件开辟了全新航道。

多学科交叉为团队注入灵感。对偶性本质是几何与图论在物理中的应用，而胶体体系与合成方法又紧密关联化学。目前，团队正尝试运用AI，在所有可能的材料衬底中自动筛选出最优结构，进一步提升设计效率。他们希望将对偶对称性策略与动力学研究相结合，探索其对无序复杂体系动力学行为的调控能力，将这一设计范式推广至三维复杂晶格以及其他类型的准晶结构。

“相信随着这一范式的推广，它在复杂功能材料的可控制备中将发挥越来越重要的作用。”团队期待，该成果的应用前景不局限于物理领域，而是为二维材料、胶体体系等领域开辟全新路径。

论文链接：<https://www.nature.com/articles/s41586-026-10364-3>

本报记者 邓晗 殷梦昊

## 复旦发现巨大非线性谷霍尔效应

近日，复旦大学微纳电子器件与量子计算机研究院沈健/何攀研究团队在量子物理前沿领域取得重要突破。团队成功观测到巨大的非线性谷霍尔效应，并提出了全新的量子器件概念。相关成果以“Observation of giant nonlinear valley Hall effect”为题，在线发表于国际学术期刊《自然·物理》(Nature Physics)。

传统电子学中，载流子高密度传输伴随显著能耗与发热，成为芯片性能提升的核心瓶颈。为突破这一限制，科学家将目光投向“谷电子学”。在动量空间中，“谷”是电子的能量极值点，被视为一种新自由度。通过操控谷自由度传输信息，有望构建低能耗、高性能的新一代信息技术。其中，“谷霍尔效应”能令不同能谷的载流子横向反向偏转，在净电荷为零时产生纯谷流，犹如为信息传输开辟专用通道。

研究团队首次在实验中观测到理论预言的非线性谷霍尔效应。与传统线性响应不同，该效应呈现显著的二次方及高阶幂次关系。团队在石墨烯/六角氮化硼莫尔超晶格中，利用非局

域电学谐波测量技术，探测到显著的非局域二次谐波电压信号。数据显示，信号与驱动电流呈二次方关系，并在狄拉克点附近发生符号反转。尤为重要的是，其响应强度在狄拉克点附近远超传统线性谷霍尔效应，实现了性能跨越式提升。

团队进一步揭示该效应源于新颖的零阶外禀机制，并成功观测到非线性逆谷霍尔效应。研究人员创造性提出“谷整流器”新器件概念。该器件可将交流电或电磁辐射高效转化为直流谷流，实现对微观量子态的精准调控。成果填补了非线性谷传输领域的实验空白，为开发更高效、可控的量子功能器件奠定了坚实基础。

复旦大学何攀青年研究员、博士生张敏以及香港理工大学博士后曹晋为共同第一作者。复旦大学何攀青年研究员、香港理工大学杨声远教授、复旦大学肖聪青年研究员及沈健教授为共同通讯作者。

论文链接：<https://www.nature.com/articles/s41567-026-03221-7>

来源：微纳电子器件与量子计算机研究院

## 屈前辉团队揭示ZAC通道激活新机制

锌离子(Zn<sup>2+</sup>)是人体内含量第二丰富的过渡金属离子，在细胞生长、增殖以及神经调节等多种生理过程中发挥重要作用。在特定脑区，突触释放的锌离子通过调控多种配体门控与电压门控离子通道，对维持正常的神经元回路功能起着重要作用，其稳态失衡与帕金森病、阿尔茨海默病、癫痫等多种神经系统疾病密切相关。Cys-环受体(CLR)超家族是一类五聚体配体门控离子通道，介导乙酰胆碱、5-羟色胺、GABA和甘氨酸等经典神经递质的快速突触传递。锌激活通道(ZAC)是CLR超家族中一个独特且尚未被充分研究的成员，与其他家族成员序列同源性较低(<20%)，生理和病理意义尚不明确。ZAC蛋白可分布于人胎期大脑、脊髓、胰腺、胎盘等部位，在成年个体中则集中表达于参与认知、意识和情绪等功能的海马区、纹状体、杏仁核及丘脑。由于ZAC在大鼠、小鼠模式动物中不表达，限制了对它的生物学功能研究。针对常见的锌配位残基(如组氨酸、半胱氨酸、谷氨酸和天冬氨酸)进行的广泛突变，未能

显著影响Zn<sup>2+</sup>诱导的ZAC信号传导。因此，ZAC如何受Zn<sup>2+</sup>调控的机制仍不清晰。

2026年3月31日，复旦大学生物医学研究院/附属耳鼻喉科医院屈前辉课题组与哥本哈根大学Anders A. Jensen教授、中科院物理所朱洪涛研究员合作，在《细胞·发现》(Cell Discovery)上发表了题为“Structural basis of human zinc-activated channel (ZAC) signaling and modulation”的研究论文，首次系统解析了人源ZAC在静息、锌离子激活及小分子抑制状态下的高分辨率结构，为理解这一非典型CLR受体的功能奠定了重要基础。

研究团队通过冷冻电镜技术，成功捕捉ZAC在无配体、部分及完全锌离子结合状态下的三维结构，并进一步解析其与两种拮抗剂结合的复合物结构。研究发现，ZAC亚基胞外结构域界面氨基酸Phe67、Arg88、Tyr176和Glu194可预形成一个弱相互作用网络，而Zn<sup>2+</sup>通过与芳香残基Phe67和Tyr176形成“阳离子-π”作用，增强ZAC通道的电导性。电生理功能实验表明，破坏该

相互作用显著阻断锌离子对ZAC的激活程度。同时F67W、Y176W突变体保留对Zn<sup>2+</sup>响应效果，揭示了该作用网络中芳香残基的可替代性。

此外，研究还揭示了两种拮抗剂的抑制机制：选择性拮抗剂TTFB通过嵌入跨膜区直接阻塞离子通道；而非选择性拮抗剂d-筒箭毒碱则采用“双位点”结合模式，既竞争锌离子结合界面，也进入通道孔内部，从而高效抑制通道活性。

研究还聚焦于人群中高频存在的功能变异体ZAC<sup>A192</sup>，从结构上阐明其功能减弱的机制：该变异破坏了原本由T152构建的亚基间关键相互作用网络，影响信号从结合位点向通道门的传递效率。

这项工作不仅为理解ZAC这一非典型受体提供了关键结构基础，揭示了其独特的激活与抑制机制，也为未来针对ZAC的相关药物研发提供了重要的理论依据和结构蓝图。

论文链接：<https://www.nature.com/articles/s41421-026-00878-5>

来源：生物医学研究院