

太阳高能粒子高速晚到，为理解激波加速过程提供线索 中国科大在太阳高能粒子加速和传播方面取得重要进展

本报讯 地球和空间科学学院郭静楠教授和汪毓明教授领衔的国际研究团队，在太阳高能粒子加速和传播方面取得重要进展，相关成果发表在《国家科学评论》上。该研究报道了10个逆向速度色散（IVD，即高速晚到）的太阳高能质子事件，认为激波扩散加速过程将质子束缚并加速到几十MeV是造成这一现象的主要原因，挑战了传统的图像，也为直接探测粒子实际加速过程打开了新的诊断窗口。

基于欧洲航天局Solar Orbiter搭载的高能粒子探测器在离太阳1AU以内的距离处发现了多起逆向速度色散事件（IVD）；更高能的质子反而更晚到达。研究团队系统梳理了Solar Orbiter 2022年至2024年的观测，对其中3个证据最完备的事件做了深入分析。分析发现，大约以2MeV能量为界，低于2MeV的能量粒子展现出传统的速度色散结构，但高于2MeV的能量粒子展现出清晰的逆向速度色散特征。研究团队利用速度色散分析法（VDA）求得正常色散粒子共

同释放的时刻与传播路径，并在充分考虑粒子的加速机制和加速过程等因素后，迭代出依赖能量的粒子释放时间，获得高能粒子的逆向色散结构。

团队认为，逆向色散可由扩散激波加速机制来解释：粒子在激波上下游反复散射并多次跨越激波面，能量逐级提升，因此到达更高能量需要更长的加速时间，表现为能量越高、释放越晚。因此，高能逆向色散粒子可视为较低能量正常色散粒子（即“种子”粒子）进一步加速的产物。

团队基于扩散激波加速的理论推导，从加速粒子的能谱指数反演得到了激波的压缩比，并推得激波上下游速度等无法直接观测的物理参数。团队继续利用激波参数计算了扩散激波加速的时间尺度，定量推导出粒子能量如何随加速时间而增加，且与观测推断的释放时间趋势一致。进一步结合观测结果和加速理论，团队反推出激波加速中粒子的平均自由程。深入

研究的三个示例事件均得到了相同量级的平均自由程，进一步支撑了扩散激波加速可能是主导逆向色散现象的解释。

该研究系统深入地分析了Solar Orbiter观测的1AU以内的10个高能粒子逆向色散事件，创建了逆向速度色散分析方法，定量给出了随粒子能量变化的释放时刻与加速时长；并进一步运用扩散激波加速机制，创新性地反演出激波的压缩比、上下游速度。首次从观测事件中反演出扩散激波加速的时间尺度和加速时的粒子平均自由程等关键物理参数；建立了从可直接观测到的逆向速度色散结构，诊断不可直接观测的激波加速区域物理条件的新方法。

中国科大郭静楠教授、Daniel Pacheco博士、汪毓明教授为共同通讯作者，博士研究生李昶为第一作者，合作者还包括奥地利格拉茨大学的Manuela Temmer教授、德国基尔大学的丁浙一博士和Robert F. Wimmer-Schweingruber教授。

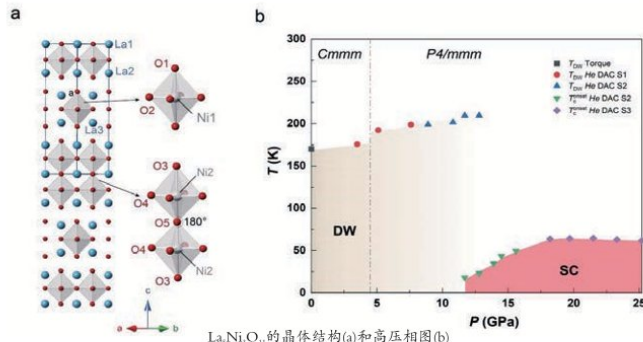
（地球和空间科学学院 科研部）

中国科大超导研究团队在镍基高温超导体研究中取得重要进展

本报讯 合肥微尺度物质科学国家研究中心、物理学院陈仙辉研究团队与上海前物质科学研究所曾桥石研究组、安徽大学陈伟研究组合作，近日在混合Ruddlesden-Popper（RP）结构镍酸盐La₂Ni₂O₇和La₂Ni₂O₆中发现了高压诱导的高温超导电性，该新结构超导体的发现拓展了镍基高温超导体材料家族，为高温超导机理研究提供了一个新的材料体系。相关成果9月5日发表在《自然·物理》上。

在前期的研究中，中国科大研究团队对Ruddlesden-Popper结构的镍酸盐开展了系列工作。研究团队成功在常压下合成了具有四方结构的La₂Ni₂O₇和La₂Ni₂O₆，并进行了压力下的输运测量，结果表明高压下的超导电性与常压下的密度波转变有非常重要的关联。四方结构的La₂Ni₂O₇和La₂Ni₂O₆在常压下由于没有密度波转变，在高压下也没有表现出超导电性。而在常压下具有密度波转变的正交结构La₂Ni₂O₇和La₂Ni₂O₆在高压下均表现出超导电性。这一发现表明密度波转变而非结构相变是镍基材料在压力下出现超导电性的一个重要先决条件，该研究结果对镍基超导机理的理解和理论研究提供了重要思路。

在上述工作的基础上，研究团队又进一步探索了更加广泛的Ruddlesden-Popper相镍酸盐材料。La₂Ni₂O₇是一种特殊的杂化镍酸盐，其结构由La₂Ni₂O₇和La₂Ni₂O₆层交替堆叠而成，常压下表现出密度波转变，转变温度在170K左右。中国科大研究团队通过系统的高压电输运研究，



发现随着压力的逐步增加，常压下的密度波转变温度呈现出逐渐升高的行为，并且基本不受压力诱导的正交-四方结构相变（约5GPa左右）的影响。在压力升高到约12GPa时密度波相突然消失，并伴随着超导电性的出现，表明压力诱导了一个密度波相与超导相的一级相变。当压力进一步升高至约21GPa时，该体系展现出最佳的超导转变，其零电阻超导转变温度T_c达到54K。与此同时，研究团队通过高压抗磁性测量在最佳压力附近观察到近斯奈德线，超导相分数高达70%，表明其超导电性为体超导。继La₂Ni₂O₇和La₂Ni₂O₆之后，混合Ruddlesden-

Popper结构高压下的超导电性的发现，不仅为镍基高温超导体家族增添了新的成员，也进一步证明了双层钙钛矿结构（RNiO₂）是重要的高温超导结构单元，为研究镍基材料中的高温超导机理提供了新的材料体系。

合肥微尺度物质科学国家研究中心特聘研究员石孟竹与上海前物质科学研究所副研究员彭帝为文章的共同第一作者，陈仙辉教授、吴涛教授和上海前物质科学研究所曾桥石研究员为文章的共同通讯作者。

（合肥微尺度物质科学国家研究中心 物理学院 科研部）

中国科大提出广义Neumann定理 为传统铁电与分数量子铁电建立统一理论框架

本报讯 郭光灿院士团队何力新研究组取得突破，提出了广义Neumann定理，统一解释了传统铁电与分数量子铁电（FQFE），修正了长期以来在铁电材料研究中的经典理论。这一成果为理解和调控铁电性质提供了全新思路。相关成果9月9日发表在《物理评论快报》上。

在本研究中，何力新教授与博士生虎鸿升提出了广义Neumann定理，首次建立了一个能够同时涵盖传统铁电与分数量子铁电的统一理论框架。传统的Neumann定理判断晶体是否允许出现铁电极化的数学形式为： $R_p = p$ ，其中R表示晶体的对称操作，p表示电偶极矩。按照这一关系，只有当电偶极化在晶体所有对称操作下保持不变时，铁电性才可能存在。这一定理长期以来被视

为“铁电性的基本原则”。在本研究中，研究人员提出了广义Neumann定理： $R_p = p + Q$ ，其中Q是整数量子的电偶极矩。当Q=0时，这一定理退化为传统形式；而在更一般的情形下，它能够自然解释分数量子铁电性的存在。

基于这一推广定理，研究人员系统分析了全部32个晶体点群，找到了所有可能存在的分数量子铁电形式，并通过高通量计算，发现有大量此前被认为不可能出现铁电性的材料，其实都允许铁电极化的存在。更重要的是，其中许多材料的极化不仅存在，而且能够翻转，具有潜在的实际应用价值。文章以HfZnN₂材料为例，研究了其面内分数量子极化可通过与面外极化耦合实现翻转的路径和势垒。

广义Neumann定理为传统铁电与分数量子铁电建立了统一的理论框架，不仅为分数量子铁电的起源提供了简洁清晰的物理图像，也奠定了坚实的理论基础，被认为有望改写铁电研究的教科书。分数量子铁电性为铁电家族开启了新的篇章，由此发现了大量此前未被认识的铁电材料，进一步拓展了铁电效应的内涵。由于目前对这些材料的研究仍然有限，它们很可能展现出许多传统铁电材料所不具备的独特性质，因此具有广阔的探索前景和重要的应用潜力。

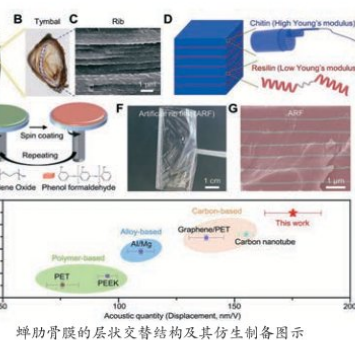
虎鸿升为本文第一作者，何力新为通讯作者。（量子网络安徽重点实验室 物理学院 中国科学院量子信息和量子科技创新研究院 科研部）

中国科大仿“蝉肋骨”造出高性能声学换能器

本报讯 苏州高等研究院仿生界面材料科学国家重点实验室程群峰教授课题组与中国科学院理化技术研究所李明珠研究员团队合作在仿生限域组胺及声学换能器应用研究领域取得重要突破，相关成果9月10日发表在《科学进展》上。

开发综合性能优异、适用于高性能声学换能器的薄膜材料，是当前面临的重要技术挑战。针对该问题，本研究解析了蝉发声器官——蝉肋骨膜的结构与性能关系，并据此仿生制备出可用于声学换能器的高性能仿生薄膜。

研究发现，蝉肋骨膜中弹性蛋白层与硬几丁质交替排列的结构是其优异声学性能的关键：硬几丁质有效承担机械负荷，软质层则通过大变形能力延缓裂纹扩展。基于这一机理，研究团队采用层层交



替涂层限域构筑与界面交联策略，成功制备出具有仿生蝉肋骨膜结构的有机复合薄膜。在限域条件下，聚合物分子链之间的缠结作用显著增强，使该仿生薄膜同时具备高拉伸强度、韧性和耐疲劳性能。这些特性使其能够兼顾高效率输出与长期稳定的声传播性能，其基本共振频率和振幅均优于现有商业化薄膜。该研究为设计高性能声学换能器提供了全新的思路。

中国科大苏州高等研究院毛佳俊、严佳、王梓宇和何鹏为论文的共同一作，通讯作者为苏州高等研究院程群峰教授和中国科学院理化技术研究所李明珠研究员，苏州高等研究院为论文第一单位。

（苏州高等研究院 仿生界面材料科学国家重点实验室 纳米科学技术学院 科研部）

本报讯 9月5日，我国在西昌卫星中心使用长征三号丙运载火箭/远征一号上面级，成功将试验二十九号卫星发射升空。该卫星主要用于空间环境探测及相关技术试验。中国科大工程科学学院微米复合材料研究所和国家纳米科学中心微米复合材料团队联合为该卫星的多个光学构件表面（包括复杂异形遮光罩、柔性可展开结构、精密光学支撑结构及热控薄膜等）研发制备了大面积纳米复合超黑材料，将大幅提升卫星空间环境探测能力。

研发团队提出了宏观有序、微观无序的吸波材料多孔结构设计思想，结合碳纳米材料本征强吸收和多孔结构提升吸波效能，利用梯度调控与光学陷阱效应，协同实现减反增透、多重反射与散射增强，研制出紫外-可见-近红外波段吸光率高达99.6%的纳米复合超黑材料。同时，研究团队通过界面力学设计显著提高了多级界面强度，协同保障结构在极端载荷条件下的力学稳定性和在极端环境下的长效服役性能，进而发展了百平方米级工程化制备技术，获得了轻质强韧、高效吸波的复合材料体系。该材料的综合性能优于国内外航天领域现役同类产品，吸光率和技术成熟度均超过美国宇航局纳米技术路线图相关指标。经独立第三方检测，材料全面满足广角吸收、高频振动、高速冲击、质量损失、紫外老化、冷热循环等卫星发射和空间极端环境应用要求。

据悉，这已是纳米复合超黑材料近五年第5次成功应用于国产卫星。在前期应用基础上，本次任务是中科院和国家纳米中心团队在工程化大面积纳米复合超黑材料应用方面取得的又一突破性进展。同时，这也是该团队研发的纳米复合柔性超黑薄膜首次应用于空间卫星，标志着该材料技术在系列化、工艺性、均一性、可靠性、稳定性等实用性能方面实现显著提升。具有极限吸光特性的纳米复合超黑材料在抑制杂散光、黑体辐射等空天探测领域有着非常广阔的应用前景。（工程科学学院）

近年来，如何在复杂环境中实现稳定高效的物理世界与数字世界交互，是智能物联网、虚拟现实与未来信息安全领域亟需解决的核心问题。近日，中国科学技术大学沈涛教授团队报道了一类基于新型手性限域组胺材料的圆偏振光发射器，能够在环境串扰影响下实现高可靠度的物理-数字链接。相关成果发表在《科学进展》上。

传统的光学识别和编码主要依赖光的强度和波长，在实际环境中容易受到杂散光和背景光的干扰，存在信息识别精度下降、编码容量受限等问题。圆偏振光因其在自然界中无相同背景光源，具有显著的抗干扰优势。与传统光学编码方法相比，圆偏振光能够提供偏振态这一更高维度的物理属性，有效提高信号的清晰度与可靠性。然而，要制备兼具高圆偏振发光性能、稳定性以及可加工性的材料体系，并实现相关应用，仍然是该领域面临的一个重要挑战。

为解决这一问题，研究团队提出了原位固化螺旋组装策略，结合开发的自动化合成与实时监控平台，实现了新型手性限域组胺材料的普适制备。该材料在紫外光诱导聚合后形成稳固的分子螺旋排列微球，展现出优异的手性光学性能和良好的可加工性。研究人员将合成的材料在基底中随机分布，构筑了一系列偏振光发射器，用于唯一、可靠的信息识别与认证。结果表明，器件展现出接近理论极限的比特均匀性、唯一性和可靠性，在远场与近场条件下均能实现稳定识别和信息认证。特别是由于引入了圆偏振发射，其编码容量较传统光学发射大幅提升，增强了抵御暴力破解、建模攻击或外部篡改的能力。

该类发射器可以直接在木材、曲面金属甚至芯片等表面集成，实现在复杂环境中的远程识别-近场认证。相关材料与器件在智慧城市、物联网、增强现实和信息安全等领域展示应用潜力，有望为未来构建高度安全、低干扰的人工智能-物理-数字耦合提供新范式。

中国科学技术大学化学系博士生张铭江、博士后赵珊珊和少年班学院本科生李金形为文章的第一作者，沈涛教授为通讯作者。（原载于中安在线、中安新闻客户端 2025年9月12日 记者 汪乔）

中国科大构建圆偏振光学映射器件