

「自然」：「悟空」巡天，发现宇宙射线加速能量极限的电荷依赖规律

本报讯 近日，“悟空”号首席科学家常进院士领导的国际科学团队在宇宙射线观测研究方面取得重要成果。研究团队基于“悟空”号九年的在轨观测数据，首次直接观测到质子、氦、碳、氧及铁五种宇宙线原子核能谱存在统一的软化转折结构，并发现宇宙射线加速能量极限的电荷依赖规律，为揭开宇宙射线起源之谜提供了重要线索。相关研究成果于4月29日发表在《自然》上。

“悟空”号是中国科学院空间科学先导专项首发星，也是我国首颗空间天文卫星，主要通过空间高能宇宙射线进行直接观测而间接寻找暗物质粒子。卫星于2015年底发射，已在轨平稳运行超过10年，下载了约185亿个高能粒子数据。与国际同类空间高能粒子探测设备相比，“悟空”号覆盖能段宽、能量测量准、粒子鉴别能力强，在万亿至千万亿电子伏特能区（电子伏特是能量单位，记作eV；可见光光子的能量约为1eV）具有独特的优势。

“悟空”号国际合作组基于9年的观测数据，完成了质子、氦、碳、氧和铁五种丰度最高的宇宙线原子核能谱特征分析。首次直接观测到它们在能谱段存在共同且显著的“鼓包”状结构。其中碳、氧和铁的测量最高能量较以往提升近10倍，这是上述高能段能谱新特征得以被观测的关键。研究结果同时表明，能谱“鼓包”被观测到的位置正比于粒子电荷，并以超过99.9999%的置信水平排除了正比于粒子质量的假说。

“悟空”号的本次结果与其他对宇宙射线大尺度各向异性观测相结合，表明地球附近区域存在重要的宇宙射线加速源，该源的贡献在~15TV（15万亿伏特）处占主导，多种粒子能谱中统一的软化转折结构对应了源的加速能量上限。“悟空”号的这一观测，首次对20世纪60年代提出的粒子加速模型给出直接证据，为理解宇宙射线起源问题做出了重要贡献。

此项成果由我校与中国科学院紫金山天文台、近代物理研究所、高能物理研究所以及瑞士日内瓦大学、意大利多家研究机构共同完成。其中，科大团队是DAMPE国际合作组内的平行分析团队。物理学院黄光顺教授、张云龙教授和魏逸丰副教授团队围绕碳、氧、铁三种宇宙线原子核展开了持续深入的研究，作出了突出贡献。该团队在合作组中率先开展了碳和氧宇宙线分析，相关工作也是武利波（现为深空探测实验室副研究员）的博士论文课题。铁是原初宇宙线中丰度最高的重原子核，容易碎裂且电荷分辨难度大，孙浩然、莫宇和陈沛东三位博士生就此开展了系统性攻关，大大加速了合作组内不同分析小组结果的收敛。

该研究得到了国家自然科学基金委、科技部、中国科学院的大力支持。“悟空”号的载荷核心分系统BGO量能器由原核探测与核电子学国家重点实验室研制。自2009年起，该实验室作为重要成员参与了卫星工程前期论证和研制工作，并完成了地面原理样机研制。2012年“悟空”卫星工程正式立项后，该团队攻克了“BGO晶体大动态范围读出”关键技术难题，成功研制了BGO量能器。2015年暗物质粒子探测卫星科学合作组正式成立，该实验室师生在科学合作组中承担了重要任务，深入参与“悟空”卫星在轨探测和数据数据分析工作。一系列重要物理成果的顺利产出，也充分印证了该团队研制的BGO量能器性能优异、质量可靠。

（粒子科学与技术中心 近代物理系 物理学院 科研部）

中国科大等实现量子比特结构的精确刻画

近日，中国科学技术大学邵夏、孙亮亮、周祥与电子科技大学王子竹、宁波大学张成杰、常州工业职业技术学院李顺合作，针对独立量子比特间的量子关联，发展了一种强有力的非线性分析框架，实现了对这类量子比特结构的精确刻画，并揭示了其在量子信息任务中的关键应用。相关研究成果日前发表于《物理评论快报》。

研究团队从不确定性关系出发，推导出了一组量子比特间的贝尔型关联与制备一测量型关联特有的约束条件，精确描述了这类关联所构成集合的精细结构，建立了器件参数与量子关联的明确对应。具体而言：其一，相较于现有凸方法，该框架可精确刻画关联集合的非凸特性——这正是有限量子系统关联的标志性特征；其二，基于该框架提出的“基于关联的设备推断”协议，实现了从一般关联统计中推断乃至唯一确定仪器参数，突破了传统自测对极值关联的依赖；其三，利用推断出的设备信息可直接优化纠缠探测方案，经优化后部分设备关联亦可用于认证量子纠缠，为纠缠检测提供了新视角。（原载于《人民日报》2026年4月29日 记者 徐婧）

中国科大实现拓扑孤子精准调控与精密探测

本报讯 近日，我校单分子科学团队利用基于扫描探针的“多合一”综合表征技术，结合在位表面合成技术，通过共轭并五苯聚合物单链端基修饰，实现了非平庸与平庸两相畴界面处拓扑孤子态的可控引入，并揭示了一维拓扑孤子态的零能电子态和振动态，以及畴界两侧电子能带反转的空间分布特征。相关研究成果发表在《国家科学评论》上。

拓扑孤子是拓扑学上非平庸与平庸两相之间具有移动性的畴界，是高电导掺杂聚合物的主要载流子。作为天然具有复杂相互作用的准粒子，拓扑孤子可衍生出自旋-电荷分离与分数电荷等新奇物理效应，具有重要研究价值。然而，实验上在单条聚合物中同时稳定拓扑迥异的两个相从而实现拓扑孤子极具挑战性。

针对上述挑战，王兵、马传哲在前基于银单晶衬底与共轭聚合物之间电荷转移实现极化超晶格的基础上，采用几乎没有电荷转移的Au（111）衬底，并通过共轭并五苯聚合物单链端基修饰，可控地调制共轭链和累积烯烃桥键，实现其中平庸相（EBPP）与非平庸相（CBPP）的调控，从而在两相畴界引入拓扑孤子态（图a,b）。进一步利用新发展的扫描探针多域物态探测技术，STM谱学表征给出了空间高度离域的孤子态（零能态）存在的直接证据（图c），并利用TERS表征揭示了具有化学键分辨的孤子态中退简并的多重振动模式

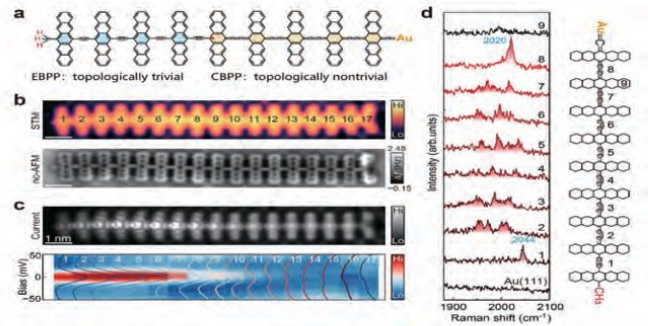


图. 共轭聚合物单链工程调控实现拓扑孤子的可控引入，并结合扫描探针“多合一”表征技术，证实拓扑孤子的零能电子态与多重简并振动模的空间高度离域特征。

和空间分布特征（图d），证实了40年来难以实验直接验证的理论预言。

该工作基于表面精准合成与扫描探针综合性表征相结合的技术，实现了在非平庸与平庸两相畴界引入拓扑孤子，并在实验上确认了拓扑孤子的离域电子态和振动态特征，为理解其载流子行为提供了微观依据，对未来基于拓

中国科大揭示半导体表面位点特异的化学键成键和非绝热传能机制

本报讯 近日，蒋彬教授课题组在半导体表面的非绝热动力学理论方面取得重要进展，相关研究成果发表在《美国化学会志》上。

相比金属表面，半导体由于具有有限带隙，其电子态能与耗散机制更加复杂，使得相关问题更具挑战性。近年来，实验在Ge（111）-c（2×8）重构表面观测到氢原子散射

过程中的显著非绝热效应：当入射能量超过表面带隙时，散射氢原子的能量损失呈现出明显的“双峰分布”，并表现出位点选择性特征。然而，传统基于Born-Oppenheimer近似的绝热动力学模拟以及基于电子摩擦理论的动力学模拟均无法对此现象给出合理解释。

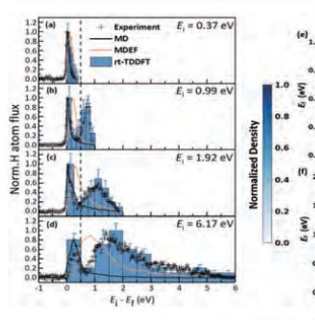


图. 理论模拟与实验动能损失以及散射角分布对比。

在此背景下，研究团队应用实时含时密度泛函理论（rt-TDDFT）与Ehrenfest动力学相结合的第一性原理方法，实现了对电子与原子核运动耦合过程的“实时”模拟。该方法能够在原子运动过程中同步描述电子结构演化，从而捕捉复杂的非绝热动力学行为。研究结果在氢原子平均动能损失以及散射角分布等方面均与实验观测高度一致，成功再现了实验中观测到的双峰能量损失特征。进一步分析表明，这一双峰结构来源于氢原子在重构表面不同Ge原子位点上的“位点选择性”碰撞行为：当氢原子与Ge表面的rest atom发生碰撞时，会形成瞬态Ge-H键，并触发超快的跨位点电子转移过程，从而产生显著的能量激发和较大的能量损失；而当氢原子与adatom相互作用时，尽管同样存在瞬态成键过程，但几乎不发生电子转移和电子激发，因此仅表现出较小的能量损失。这些结果表明，rt-TDDFT方法能够有效描述不同位点上化学键形成过程中显著不同的超快电子-核运动耦合动力学，为理解半导体表面非绝热能量传递机制提供了关键理论依据。

化学与材料科学学院、化学国家高层次人才培养中心博士生史佳龙为该论文的第一作者，蒋彬教授为通讯作者。

（化学与材料科学学院 精准智能化学国家重点实验室 科研部）

扑聚合物的纳米电子学、自旋电子学及量子信息处理具有重要意义。

中国科大博士生王政亚、李宇楠，以及李斌副教授、王佳宁博士为该论文的共同第一作者。中国科大王兵教授、合肥国家实验室马传哲研究员为论文共同通讯作者。（合肥微尺度物质科学国家研究中心 新基石实验室 科研部）

中国科大揭示胶质母细胞瘤恶性细胞群落空间结构及促癌新机制

本报讯 近日，生命科学与医学部瞿昆教授、唐发辉教授课题组与附属第一医院神经外科程传主任合作，成功创建了迄今为最大规模的胶质母细胞瘤（GBM）单细胞和空间组学图谱，系统解析了GBM肿瘤微环境细胞群落的空间分布、互作和时空演化规律。相关研究成果发表在《自然·神经科学》上。

胶质母细胞瘤（GBM）是成人中最常见、恶性程度最高的原发性脑肿瘤，具有高度复杂的细胞组成，并表现出显著的异质性。尽管已有研究鉴定了微环境中的特定细胞类型及其相互作用，但仍缺乏对肿瘤组织中不同细胞的空间组织方式及其协同作用机制的系统性刻画，而这对于实现GBM的精准诊断与治疗具有重要意义。

研究团队基于100例原发性GBM患者的大样本队列，整合空间转录组、单细胞转录组测序（scRNA-seq）、单细胞染色质可及性测序（scATAC-seq）、空间蛋白染色及Patch-seq等多组学数据，系统构建了GBM细胞群落的空间结构与互作全景图谱。通过对单细胞与空间转录组数据进行整合分析，团队鉴定出4种在细胞组成、基因表达及细胞互作模式上具有保守特征的细胞群落，并将其定义为“细胞群落”（Cellular Community, 简称CC）。

具体而言，研究鉴定出两类在功能状态与空间分布上显著不同的间充质样（MES-like）肿瘤细胞亚群—MES-Hyp与MES-Ast。其中，MES-Hyp与肿瘤相关巨噬细胞（TAM）亚群TAM5-GPNMB在CC-1群落中共定位，并通过释放VEGF-A等分子诱导TAM表型转变，进而促进肿瘤发展；而MES-Ast则与血管细胞在CC-2群落中共定位，通过释放TGF-β2促进肿瘤血管重塑。此外，通过细胞互作分析，Patch-seq实验，研究还发现神经元在CC-3群落中与少突胶质前体细胞样（OPC-like）肿瘤细胞直接形成突触连接，将GBM微环境中细胞

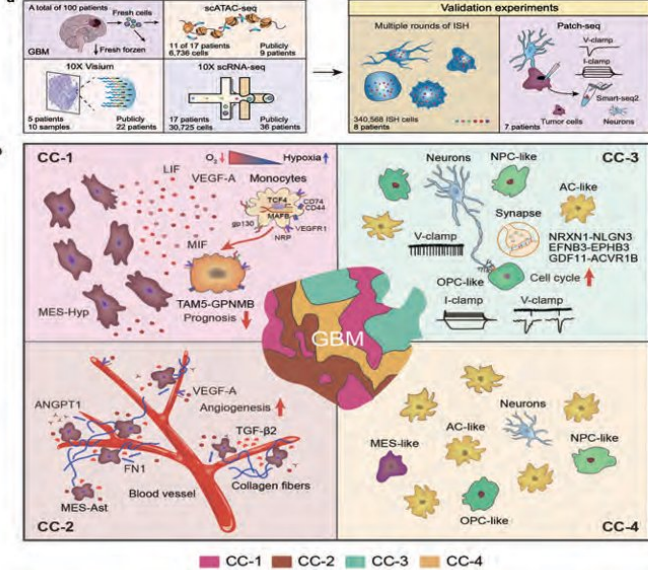


图. 多组学解析GBM细胞群落（简称CC）的组成、互作和空间分布。

间的互作精度推广到了细胞亚型层面。

上述研究整合多种前沿单细胞组学技术，通过生物信息学、肿瘤学与神经生物学的深度交叉，系统刻画了GBM微环境中的恶性细胞群落的空间分布、互作和时空演化规律，极大地拓展了对GBM微环境的认知。该研究充分体现了学科交叉在现代生物医学研究中的重要价值。未来，研究团队将进一步推进单细胞空间

转录组成像技术及相关算法的发展，并应用于基础研究及临床转化，为GBM等重大疾病的诊断和治疗提供新的技术手段和理论依据。

该研究由瞿昆教授、唐发辉教授、程传主任、李守斌博士共同指导并担任通讯作者，副研究员林俊、博士生陈春鹏为共同第一作者。（生命科学与医学部 附属第一医院 基础医学院 科研部）