

发现“会呼吸”的引力透镜效应

他们给暗物质天体发“身份证”

■本报记者 冯丽妃

宇宙中约 85%的物质是人们看不见也摸不着的暗物质，它不发光、不吸收光，却通过引力牢牢“拉住”了星系和星系团。然而，历经数十年探索，尽管科学家知道暗物质就在那里，却仍未直接“抓到”其真身。

近日，韩国高等研究院博士后杨星宇、北京师范大学博士后陈坦与中国科学院院士、宁波大学校长蔡荣根合作，首次提出振荡玻色星会产生一种“会呼吸”的引力透镜效应，为捕捉暗物质提供了一种独一无二的观测“时间指纹”。相关成果发表于《物理评论快报》。

给暗物质天体发“身份证”

目前，探测暗物质主要有两种策略：一是粒子物理途径，通过对撞机和地下实验室直接探测，寻找暗物质粒子本身；二是天文引力途径，通过星系旋转曲线、引力透镜等引力效应推断暗物质的存在与分布。

引力透镜是天文学家探测暗物质的重要工具。但长久以来，天文学界在利用这种方式追踪暗物质时，所考虑的透镜模型几乎都是静态的——透镜天体的形态和质量分布不随时间变化。现在，科学家首次提出，如果暗物质由超轻的实际量玻色子，如轴子或类轴子粒子构成，它们可以在引力作用下凝聚成一种叫作“振荡玻色星”的致密天体。

振荡玻色星有一个关键特征——由于没有守恒荷来维持构型稳定，其内部时空和物质分布会持续发生相干振荡，像心脏一样周期性地膨胀和收缩。这类天体也被称为“振荡子”，其振荡频率与玻色子质量紧密相关，寿命可达宇宙年龄。

我国蜂群无人机首次实现台风过境全程立体观测

本报讯(记者高雅丽)随着台风“红霞”逐渐逼近,自7月24日起,中国气象科学研究院专项气象保障技术研究中心联合深圳市国家气候观测台,在位于深圳市大鹏半岛的中国气象局粤港澳大湾区低空经济无人航空气象保障野外科学试验基地,首次采用蜂群无人机观测方式,针对台风登陆全过程开展高频率、多维度观测试验。

这是我国首次将蜂群无人机技术应用于台风过境全程观测。试验持续同步获取台风过境前后低空温度、湿度、风场、湍流等关键气象参数的垂直廓线观测资料,以及无人机飞行姿态、航迹偏移、电量功耗等运行参数,系统探索极端气象条件下无人机安全飞行的气象约束边界。

试验负责人、中国气象科学研究院研究员郭建平介绍,本次蜂群无人机低空观测采用中时级高频立体探测模式,全程跟踪台风过境全过程,可有效补齐近海低空观测短板,为提升台风强度研判、风雨落区预报精准度提供关键实况数据支撑。

产教教融合 打通育人“最后一公里”——山东科技大学探索地方高校新工科人才培养模式

■本报记者 廖洋 通讯员 许浩

“有没有对口实习经历?接触过产线实操吗?”这是工科应届生求职时经常遇到的提问。一边是集成电路、高端装备等产业人才缺口大,企业求贤若渴;一边是大量毕业生缺少一线实训机会,困在经验不足的求职困境里。人才供给与产业需求出现明显错位。

“想要化解供需矛盾,关键在于打通人才培养的‘最后一公里’。”近日,山东科技大学党委书记王君松对《中国科学报》表示,“产业需要实战型人才,高校就要打破校产壁垒,推动教育、科技、人才同向发力,培养真正能够即插即用、扎根产业的新工科人才。”

近年来,立足新工科建设,山东科技大学深耕产教融合、科教融汇,依托校企订单班、产业课题攻关、科研成果教学转化等举措,推动课堂对接产线、科研瞄准真实需求,探索适配区域发展的地方高校人才培养新路。

课程跟着产业走 培养贴着岗位育

芯片行业新技术、新工艺更新迭代速度快,传统高校人才培养模式普遍存在教学内容滞后、实践平台不足、应用场景脱节等共性问题。而半导体行业高精度、高投入、高风险的特殊属性,使得企业更倾向高薪聘用成熟技术人才,不愿承接学生短期实训实训,进一步压缩了应届生的实践成长空间。

如何精准培育“芯”人才,破解这一核心矛盾?山东科技大学电信学院院长陈达介绍,山东科技大学推行校企“订单班”定向培养模式,将人才培养全过程与产业实

研究发现,振荡会使玻色星天然携带一条随之脉动的“径向焦散线”。当远方恒星的视线恰好穿过这条焦散线的活动范围时,恒星的透镜成像每半个振荡周期就会产生一次剧烈的亮度变化和位置摆动,所有信号都与玻色星自身的“呼吸”节奏相位锁定,构成一组独一无二的“时间指纹”。

“这种呼吸节奏‘指纹’,其他天体都无法模仿。”杨星宇说。黑洞会吞噬穿过其内部的临界光线,普通恒星由于不透明而直接阻挡光线,稳态的复标量玻色星则不具备振荡的焦散线。因此,一旦在时域巡天中捕捉到这类周期性信号,就为暗物质致密天体的存在提供了有力证据。即便未能探测到,也可以借此对这类天体在暗物质中所占的比例给出严格的观测约束。

“这种‘正反两面都能用’的特性,使这项研究对暗物质寻踪具有独特的推动意义。”杨星宇说。

一项“纯理论”研究背后

研究团队估算,在合理参数范围内,现有天体测量和高频次测光巡天可探测的振荡玻色星事例达百万量级。

作为一项“纯理论”研究,它不需要大型天文观测设备,全部解析推导、数值计算均依托普通工作站完成,其中不乏“拦路虎”。

如何处理含时空度规下的光线偏折是最大的难题。振荡玻色星的时空度规是随时间周期变化的,不像史瓦西黑洞那样有一个静态、解析的偏折角公式。研究者需要先求解爱因斯坦-克莱因-戈登场方程得到玻色星振荡的时空度规,再追踪

每一条光子轨迹计算偏折角,最后建立透镜方程来分析焦散结构。这个链条中每一步都有技术难点。

突破来自两个方面。一是他们找到了一个经过验证的折拐幂律插值公式,能够以解析形式精确描述偏折角对时间和最近趋近距离的依赖关系,避免了全数值拟合的繁琐。二是他们意识到焦散线的周期性胀缩是振荡玻色星的普遍特征。这个物理发现让他们把注意力集中在焦散穿越导致的观测效应上,最终梳理出了一整套相位锁定的可观测信号。

这项研究从最初构思到论文正式被接收,整个周期长达一年半。这是3位论文作者通力合作的结果:杨星宇提出振荡玻色星周期性焦散穿越透镜效应原创构想,主导推导、计算与论文撰写;陈坦长期从事引力透镜研究,协助进行透镜方程搭建与焦散结构解析;蔡荣根把关研究方向,提供学术指导。三人通过线上线下讨论紧密协作,层层校验理论逻辑,保障研究严谨、完整。

国际上,玻色星作为暗物质候选者的研究已有数十年历史,但过往研究主要集中在玻色星的构成、稳定性和引力波辐射等方面。在引力透镜方向,早期研究计算过静态玻色星的透镜效应,但未曾涉及含时焦散结构。近年来,随着Gaia等高精度天体测量卫星、时域巡天项目的蓬勃发展,利用透镜效应探测暗物质致密天体成为一个快速增长的前沿方向。在此背景下,这项研究填补了把“时间维度”引入引力透镜研究的空白。

国际审稿人评价该思路“有趣且极具原创性,新颖且富有洞察力”,成果可推广至更广泛的暗物质模型,普适价值突出——这一透镜现象不仅限于论文讨论

的实际量场,还可以“自然地出现在其他暗物质场景中”。

一名青年学者的成长

谈起科研之路,杨星宇表示,自己的成长离不开蔡荣根的引领。2016年初,当时在北京师范大学物理学系读大三的他,入选中国科学院面向全国高校举办的本科生科研项目,蔡荣根成为他的指导老师。2017年,他进入中国科学院理论物理研究所开始硕博连读,在该所研究员蔡荣根的指导下深入研究,直到2022年获得博士学位。

杨星宇回忆,蔡荣根一直强调,做理论物理研究要多交流、多合作,要有国际视野。博士毕业后,他听从建议前往韩国高等研究院深造。

在韩国高等研究院这几年,杨星宇主要聚焦于暗物质的引力探针,包括用引力波探测自相互作用暗物质、用引力透镜探测超轻暗物质形成的玻色星等,与当地同行建立了稳定的合作关系。

他表示,这项工作只是开端,后续有多个自然延伸方向。其一,拓宽暗物质模型研究边界,纳入带自耦合类轴子、超轻矢量玻色子等候选粒子,探究不同模型下差异化的焦散结构与观测信号;其二,联合观测领域科研人员,依托现有时域巡天数据库开展周期性透镜信号搜寻,把理论预言变成真正的天文发现;其三,跳出光学引力透镜研究范畴,探索振荡玻色星对引力波的调制作用,挖掘含时引力透镜在引力波天文学中的应用潜力。

相关论文信息:
<https://doi.org/10.1103/6w3p-8ym2>

发现·进展

中国科学院金属研究所

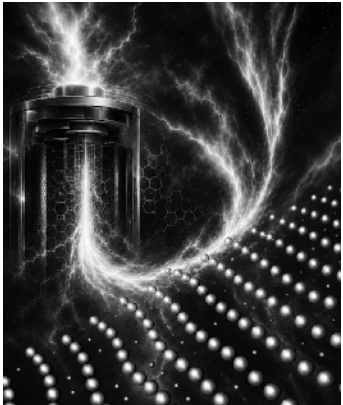
研究揭示极端条件下电池材料失效机制

本报讯(记者张楠 通讯员刘言)钴酸锂是消费电子电池中最重要的正极材料之一,把它的充电电压从目前商用的约4.4伏特(V)提升到5V,被认为是打开高能量密度电池大门的关键一步。借助原子级超分辨成像技术,中国科学院金属研究所研究员王春阳团队给材料内部拍下一张张“逐原子特写”,首次完整捕捉到钴酸锂在5V极端电压下的全程“内伤演变图谱”。这项发现日前在线发表于《美国化学会志》,刷新了学界对电池失效的传统认知。

研究发现,当电压达到5V时,钴酸锂的整个晶体骨架并非静止不动,而是像一块被猛烈扭曲的金属板——全域晶格变形率先爆发,包括面内剪切变形,好比一副整齐的扑克牌被推成歪歪扭扭的“乱码堆”;此外还出现非剪切变形,局部晶格像波浪一样弯曲、扭折,直接诱发晶内微裂纹萌生。

更关键的是,这些力学变形与晶格失氧相互“勾结”,在表面形成一种多层“夹心式”退化结构。这层“夹心”既阻挡锂离子重新嵌入,又加剧应力集中,最终启动加速失效的链条。

看清“病灶”后,团队提出协同调控策略:支柱型掺杂,即在晶格中引入镁离子,像给大楼结构加装钢支撑,增强层状骨架抵抗变形的能力;含硫物种表面稳定,即用硫元素稳住近表面氧结构,



极端高压下钴酸锂原子尺度失效机制的示意图。中国科学院金属研究所供图

相当于给材料涂上“防晒膜”,抑制失氧和表面退化。

验证结果显示,普通商业钴酸锂在5V高压下循环10圈后容量只剩67.73%,而镁/硫共掺杂的样品容量保持率飙升到83.93%。

这项研究首次将正极材料失效的“元凶”从表面化学扩展到体相力学,说明在超高压下力学稳定性与化学稳定性同等重要。这一新视角不仅为下一代高压钴酸锂优化指明方向,也为所有层状氧化物正极材料提供了通用的设计思路。

相关论文信息:
<https://doi.org/10.1021/jacs.6c04958>

南方科技大学

新技术可监测数百个单纳米颗粒电化学反应

本报讯(记者刁雯雯)近日,南方科技大学材料科学与工程系副教授钟锦辉团队开发出一种傅里叶变换宽场电化学高光谱成像技术(FT-WEHI),并实现了对数百个单纳米颗粒电化学反应过程的原位、高通量、同步监测。两项研究成果分别发表于《高端科学仪器》和《美国化学会-纳米》杂志。

研究团队将基于平移模块的相同脉冲编码系统(TWINS)与高速二维相机相结合,构建了FT-WEHI。该方法通过扫描TWINS中的楔形晶体改变两束散射光之间的时间延迟,并持续在相机上进行宽场成像和记录,再经傅里叶变换重建每个空间位置的散射光谱,实现了在极短时间内同时对大量单纳米颗粒光谱测量的目的。

与传统技术相比,FT-WEHI能在宽视场内同步获取大量随机分布纳米颗粒的二维空间图像和光谱信息,显著提升了单颗粒电化学研究的实验效率。该技术可

以在光致发光光谱、暗场散射光谱、透射/吸收光谱和拉曼光谱等多种光谱测量模式下切换。FT-WEHI在光致发光和暗场散射模式下获得的光谱的峰位、峰形和线宽与商用光谱仪所获得的光谱高度吻合。

研究表明,FT-WEHI可持续地以8秒的间隔获取一个完整的高光谱数据立方体,并在一次实验中同步记录数百个单纳米颗粒的暗场散射光谱变化。相较于传统电化学方法的整体电流变化,该方法能够为每个单颗粒构建类似线性伏安曲线的“光学伏安图”,从而直接在单颗粒尺度上分析反应进程。此外,研究团队还阐明了纳米颗粒形貌对电化学反应路径的重要影响,以及FT-WEHI对单颗粒电化学结构演变的解析能力。

相关论文信息:
<https://doi.org/10.1016/j.jasi.2026.100023>
<https://doi.org/10.1021/ac-snano.6c08462>

南方医科大学珠江医院等

新型“液体活检”多组学模型让肝癌早筛更准更早

本报讯(记者朱汉斌)近日,由南方医科大学珠江医院教授潘明新团队联合国内多家临床中心及燃石医学成功构建并验证了一款基于液体活检的多组学早期检测(MOED)模型,通过联合检测血液中游离DNA(cfDNA)甲基化标志物与甲胎蛋白(AFP),实现了肝细胞癌的高灵敏度、高特异性早期筛查,尤其在极早期肝癌检出方面取得突破。相关成果发表于《生物医学中心内科学》。

团队采用的是一种“组织溯源-血液验证-机器学习”的递进策略。首先从肝癌组织及癌旁、肝硬化、正常肝等多种非癌对照组织中,筛选出384个肝细胞癌特异性甲基化差异区域,继而经血浆样本验证和机器学习算法优化,最终锁定101个高价值甲基化标志物。这些标志物不仅能有效区分肝癌与非癌对照,还能将极早期(0期)肝癌从慢性肝病背景中精准识别。

研究交出3组有力的验证数据。内部验证集:在95.7%的高特异性下,模型总体敏感性达88.8%。独立外部验证集:总体敏感性高达91.9%,特异性达98.4%,0期肝癌检出率提升至83.3%,意味着影像学难以发现的微小早期病灶也能被有效预警。社区高危人群前瞻性验证:其间确诊的14例肝癌中,MOED成功检出13例,敏感性92.9%,特异性90.6%,阴性预测值高达99.7%,若检测结果为阴性,受检者一年内罹患肝癌的概率极低。

潘明新表示,该MOED模型仅需一管外周血,全程无创、操作简便,无需依赖复杂影像设备。下一步,团队将扩大前瞻性队列随访规模,并开展多中心随机对照试验,推动其早日转化为临床常规检测项目。

相关论文信息:
<https://doi.org/10.1186/s12916-026-05032-2>