

开启原子核“能量宝库”： 他们破解钼-93 能量释放难题

■本报记者 叶满山

如果把原子核比作一座微型“能量宝库”，那么“同核异能态”就是这座宝库中最特别的一种形式。它像一个被锁住的储能罐，封存着巨大能量，却偏偏难以自发释放。这种特殊的原子核激发态凭借较长的寿命和超高的能量密度，成为科学家眼中极具潜力的“能量载体”。

想象一下，要是找到“钥匙”，按需开启这个“宝库”，核电池就能实现超长续航，伽马射线激光就能精准作用于目标，甚至深空探测、电网调峰都能获得全新的能量解决方案。但几十年来，如何安全、快速地触发同核异能态的能量释放，一直是横亘在科研人员面前的难题。

中国科学院近代物理研究所研究员郭松、副研究员丁兵团队，用五六年时间瞄准钼-93的同核异能态，即钼-93m展开攻关，通过精准的实验数据揭开了能量释放的神秘面纱，澄清了学界长期存在的争议，为这座“能量宝库”找到了关键的“解锁密码”。相关论文近日发表于《物理评论快报》。

偶然结缘： 一场学术争论背后的探索之旅

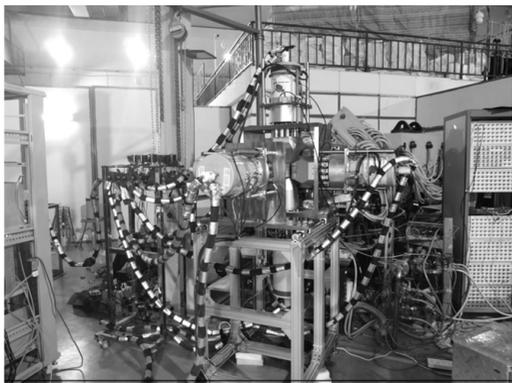
故事的开端，源于一次偶然的学术关注。多年前，郭松原本专注于另一项核结构研究。当时，他们对一个美国科研团队的一项物理成果提出质疑，准备撰写一篇文章。谁知南开大学教授吴远彬推荐的一篇文章，将他们的注意力引向了钼-93的同核异能态研究。

“本来只是想借鉴文章的写作格式，没想到看着看着就发现了问题。”郭松回忆道。这个美国团队声称在钼-93的同核异能态研究中，观测到了1%的能量释放概率，并认为这一现象源于“电子俘获致核激发(NEEC)”机制，即电子被原子核俘获后引发能量释放。而这篇理论文章则针对这一实验成果提出了质疑——从理论计算来看，这种机制的发生概率极低，根本无法达到其声称的水平。

这一矛盾让郭松团队产生了浓厚的兴趣。他们深入研究后，发现关于钼-93m能量释放机制的争议早已存在。一派以美国实验团队为代表，认为NEEC机制是主要驱动力，激发概率可达1%；另一派则通过更微观、更严谨的理论计算，得出激发概率仅为 10^{-11} 的结论。双方各执一词，谁也无法说服对方。

“虽然当时我们对这个领域的物理机制还不太熟悉，但实验方法和我们的研究是相通的。”丁兵补充道。通过仔细分析美国团队发表的实验数据，他们发现其在基底处理、数据解读等方面存在明显漏洞。基于多年的实验经验，团队判断这个争议背后一定隐藏着真相，而精准的实验验证或许能为这场争论画上句号。

就这样，一个原本为了借鉴写作格式的偶然之举，最终演变成一项持



高纯钼伽马探测器阵列。
中国科学院近代物理研究所供图

续五六年的研究。团队迅速调整方向，将钼-93的同核异能态作为研究焦点，一场跨越国界的学术探索正式启动。

在“噪声”中 捕捉微弱信号的艰难征程

要解开钼-93m的能量释放之谜，首先要克服实验装置的“水土不服”。团队的实验依托兰州重离子研究装置(HIRFL)的放射性束流线(RIBLL)展开，而这条束流线原本是为中能束流设计的，能量范围在每核子70至80兆电子伏，采用“弹核碎裂”机制产生束流。但钼-93的同核异能态具有较高的角动量，这种产生方式无法满足实验需求。

“弹核碎裂就像炮弹高速飞行时撞向原子核，损失部分核子后继续前进。这种方式产生的束流角动量较低，很难形成我们需要的同核异能态。”郭松解释道。经过反复研讨，团队决定采用“熔合蒸发反应”机制，即让两个原子核低速碰撞并融合，形成复合核后蒸发部分核子，从而布居目标核的高角动量态。但这种产生方式产生的能量仅为每核子五六兆电子伏，与束流线的设计初衷相差甚远，一系列难题随之而来。

第一次实验的核心目标是“探路”，团队特意选择了氦-86作为束流材料、碳-12作为靶材，尽可能降低实验难度。但即便如此，挑战依然超出预期。由于束流能量过低，束流线上没有对应的监测设备，研究人员只能“盲调”——不知道束流是否存在、强度如何，完全依靠后期数据反馈判断。更棘手的是，低能束流带来的本底干扰极强，束流纯度不足1%，就像在嘈杂的人群中寻找一个微弱的声音，难度极大。

“第一天调了一整天，什么信号都没看到，心里没底。”对于当时的场景，丁兵仍历历在目。在焦急的等待中，他们终于在实验启动后的几个小时，观测到预期的特征衰变曲线，这才稍稍松了口气。

为了解决在束本底干扰问题，团队

创新性提出了“时空分离”策略。他们利用束流传输过程中的距离和墙体阻隔，让束流在35米长的传输线中运行，天然屏蔽掉大部分反应初期产生的伽马射线本底。“我们通过时空分离，大幅提高了测量的准确度。”郭松说。

在第二次实验中，团队进一步升级方案，核心是提高束流能量和纯度。他们将束流能量提升至十几兆电子伏每核子，同时解决了高熔点材料的束流制备难题。钼-93的氧化物熔点高达三四千摄氏度，无法直接用于束流制备。团队联合中国有研科技集团有限公司，通过化学方法将其转化为熔点仅600摄氏度的氟化物，成功解决了这一关键问题。

靶材方面，团队改用氦气靶替代传统固体靶。为了提高氦气密度，需要用液氮将其冷却至低温，但氦气穿透力极强，靶体频繁漏气，研究人员每天都要反复补气，才能确保实验持续进行。

实验过程中的意外更是“家常便饭”。第二次实验初期，团队为了监测束流位置，在束流线中间加装了一个位置探测装置，没想到这个装置竟然阻挡了90%以上的束流，导致前3天完全没有获得有效数据。“我们一开始估计它只会阻挡10%的束流，没想到影响这么大。”郭松无奈地说。在紧急拆除这个装置后，实验才得以正常推进。

数据分析阶段同样充满挑战。第一次实验中，能量谱在运行六七个小时后突然漂移，2兆电子伏以上的信号全部偏移到其他通道，团队只能手动修正刻度系数。第二次实验中，面对“似有似无”的信号峰，他们反复调整飞行时间、能量信号等参数，对比碳膜、铅膜、金膜3种不同靶材的实验结果，最终通过交叉验证锁定了关键数据——铅膜中钼-93m的能量释放概率约为十万分之二，碳膜中约为百万分之五。

这组数据与离子-离子非弹性散射的理论预测高度吻合，却远高于NEEC机制的理论预期，清晰地证明了钼-93m在固体材料中减速时，能量释放主要由

离子间碰撞驱动，而非美国团队所说的NEEC机制。

澄清争议后的 科学价值与未来航向

当最终的实验结果浮出水面时，团队成员如释重负。五六年的坚守、两次实验的反复验证、无数次的数据分析，他们用扎实的实验数据，为这场持续多年的学术争议画上了圆满的句号。

“我们的结果出来后，那些基于美国团队实验数据开展的理论研究，就不再需要强行提高概率去贴合实验了。”郭松介绍。此前，部分理论研究为了匹配1%的激发概率，尝试了各种方法调整模型参数，但始终无法合理解释。而团队的实验数据明确了能量释放的主要机制，为理论研究提供了可靠的参考基准。

这项研究的科学价值远不止于此。在实验层面，它改变了同核异能态研究的传统范式——此前依赖“阻停激发”的实验思路被证实难以奏效，学界开始转向离子阱、储存环等新装置，探索在共振条件下观测NEEC现象的可能性。

在天体物理领域，该成果提供了关键的实验参数，为理解恒星内部、等离子体等极端环境中的核反应行为提供了可靠支撑。“天体环境的温度极高，原子核可能处于激发态，我们的实验数据能帮助理论学家更准确地模拟这些过程。”丁兵解释道。

在应用前景方面，虽然核电池、伽马射线激光等技术的落地仍需时日，但这项研究为相关探索指明了方向。同核异能态作为高能密度储能载体，若能实现可控释放，将有望应用于电网调峰、深空探测等领域。“比如，在电网负荷低谷时，将多余能量用于激发同核异能态储能；负荷高峰时，触发能量释放补充电力。这可能是未来的一个重要应用方向。”郭松表示。不过，他强调，当前研究仍处于基础阶段，还需要进一步明确NEEC机制的发生条件和概率，才能推动技术落地。

“在投稿过程中，我们虽然收到了美国团队的20多个质疑问题，但通过详细的数据分析和严谨的论证，最终赢得了审稿人的认可。”郭松笑着说。从偶然关注到深入攻关，从“盲调”探索到精准测量，郭松、丁兵团队用好奇心驱动探索，用协作破难题，用坚持赢得突破。他们的研究不仅解答了一个困扰学界多年的科学疑问，更在原子核物理与原子分子物理的交叉领域开辟了新的研究方向。

未来，团队将继续聚焦等离子体环境或电子-离子碰撞等新方向，在探索微观世界奥秘的道路上稳步前行，努力解锁原子核“能量宝库”的更多潜能。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1103/kt5-6fcl>

发现·进展

中国科学院微生物研究所等

发现宠物鸚鵡 可能让主人“发烧”

本报讯(记者冯丽妃)近日,中国科学院微生物研究所研究员毕玉海团队与航空总医院主治医师李真真等合作,对发生在北京的两起独立的宠物鸚鵡致人患肺炎事件进行了病原学、流行病学及临床病理学调查,揭示了鸚鵡热病原体从宠物鸚鵡到人的传播链条,强调了在城市环境中加强病原体监测的重要性。相关研究发表于*HLife*期刊。

2022年4月和8月,北京两名居住在不同区域、无任何交集的女性患者先后因流感样症状和肺炎入院。流行病学调查显示,两人在出现症状前均购买了宠物鸚鵡,且这些鸚鵡到家后不久便出现了精神萎靡、羽毛蓬松、呼吸困难等症状,并最终死亡。患者症状在鸚鵡发病后出现,胸部CT显示了典型的感染性肺炎特征。然而,致病“元凶”一度扑朔迷离。

面对常规检测的局限性,团队采用宏转录组高通量测序技术,在两名患者的痰液及病死鸚鵡的组织中和拭子中,均检测到大量鸚鵡热病原体特异性序列,且未发现其他潜在致病病原体。鸚鵡热病原体是一种胞内寄生菌,虽然主要引起鸟类疾病,但也具备跨物种传播给人类的能力,可导致“鸚鵡热”。人类感染后通常表现为发热、肌痛、干咳等流感样症状,严重的可发展为肺炎甚至脑膜炎。

为了进一步确认,团队设计了针对鸚鵡热病原体的巢式PCR引物,并在患者和鸚鵡样本中扩增出了目标片段。系统发育分析显示,从患者和鸚鵡样本中组装出的ompA基因序列完全一致,且均属于Lineage II谱系,与一株源自澳



虎皮鸚鵡。 研究团队供图

大利亚鸚鵡的菌株亲缘关系最近,从分子层面证实了病原体由患病鸚鵡直接传播给人类。

此外,对病死鸚鵡肺组织进行的组织病理学检查发现存在明显的肺气肿、浆液性渗出及炎性细胞浸润等鸚鵡热病原体感染特征。研究提示,随着城市居民饲养宠物鸟类的增加,鸚鵡热的潜在传播风险不容忽视。

研究者表示,对于不明原因的社区获得性肺炎患者,特别是具有宠物鸟类接触史的病例,应将鸚鵡热病原体纳入诊断范畴。同时,他们呼吁开发和推广经过认证的标准化诊断试剂盒,以便在临床实践中更快速、准确地识别该病原体,从而有效防控这一人兽共患病在城市环境中传播。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.hlife.2026.02.001>

华东理工大学

开发新型准一维 钙钛矿单晶材料

本报讯(见习记者江庆龄)华东理工大学清洁能源材料与器件团队开发了一种新型准一维钙钛矿单晶材料,并成功与薄膜晶体管背板可靠集成,用于高分辨率X射线成像,为调控结构尺寸和框架连接性实现灵敏稳定X射线探测提供了新思路。相关研究成果近日发表于《德国应用化学》。

X射线探测在医学成像、安检、工业无损检测和科学研究等领域有着广泛应用。金属卤化物钙钛矿是制备低成本、高性能X射线探测器的潜在候选材料。然而,钙钛矿材料难以同时实现抑制离子迁移和保持载流子传输的性能,限制了高能X射线探测的发展。因此,迫切需要在原子尺度上对钙钛矿结构进一步工程化,实现离子-电子传输的解耦,从而开发出兼具高灵敏度与高稳定性的X射线探测器。

团队进一步利用该材料组装了X射线探测器。在高温、高电场等严苛工况条件下,探测器表现出优异的操作稳定性。此外,通过将准一维钙钛矿与薄膜晶体管背板进行可靠集成,团队实现了高分辨X射线成像示范应用。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/anie.202524500>

中国科学院过程工程研究所等

新能源电池循环利用信息平台 上线“固废信息模块”

图展示合规处置企业分布,支持资质在线核验,助力企业安全、高效匹配处置方案。

在应用场景上,该模块可辅助动力电池生产企业在工艺设计阶段规划减废,在日常运营中快速建立合规台账;帮助废旧电池回收利用企业评估不同工艺的环境表现,并匹配合规的末端处置渠道;为环保咨询与服务机构提供全流程方案设计与风险评估的数据支撑;助力政府与园区管理部门掌握区域固废基数与处置能力,提升监管精准性。

“固废信息模块”的上线将促进新能源电池领域固废管理数据贯通、信息共享、协同治理。未来,平台将持续迭代,增加数据源接入,进一步强化对锂电产业绿色转型和循环经济体系建设的支撑能力,促进我国新能源产业绿色可持续发展。

不再穿透人体,信号“沿衣而行”

■本报记者 王昊昊 通讯员 董飞

长期以来,可穿戴设备的信号都要“穿过”高损耗的人体组织。人体的水分含量高、结构复杂、运动频繁,这些因素都会让电磁信号在人体表面迅速衰减、散射,甚至淹没在噪声中。

湖南师范大学科研人员联合中国科学院大学、新加坡国立大学的研究者,研制出一种全新的拓扑服装,将电磁信号“锁定”在衣物表面,即使被弯折、拉伸或存在人体活动,信号依然能够稳定传输,“沿衣而行”无需穿透身体。相关成果近日发表于《自然-电子》。

一个长期困扰“逼”出的灵感

拓扑物理就像一项“交通规则”,能确保电流、光路等某种状态即使遇到局部干扰或道路弯曲,也能保持稳定通行,而不会轻易消失或改变。目前,拓扑物理最主流的应用是制造更稳定、低能耗的电子和光电器件等。

“人体其实是无线通信最不友好的环境之一。”论文通讯作者、湖南师范大学副教授刘柱说,在此之前,还没有人将拓扑物理应用到人体传感网络研究。此次研究的灵感,其实来自一个长期困扰。

几年前,刘柱和论文第一作者、中国科学院大学特任教授李志鹏,共同在论文通讯作者之一、新加坡国立大学教授仇伟课题组开展研究。彼时,他们进行人体传感网络研究时,总被一个老问题挡住去路,那就是如何在体表建立一个稳定、低功耗、抗干扰、可扩展的体域网。

“我们试了很多方法,效果都不理想。”刘柱回忆,反复尝试后,团队终于在

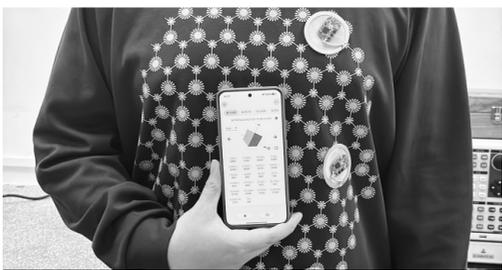
一次查阅文献时找到灵感。“我们在一份物理文献中关注到拓扑绝缘体的谷霍尔拓扑边界态。它是一种受拓扑保护的边界波传输模式,异常稳定。”

大家随即设想,既然拓扑绝缘体有边界导通的特性,能不能将其用于连接人体中的多个传感器?顺着这个思路,团队历时两年逐步获得突破。

“最大的挑战在于,传统的拓扑光子结构都是基于硅片等硬质基底设计的,而我们需要的能随衣物弯曲、拉伸的柔性系统。”刘柱说。第一步是长达一年的数值计算,在仿真世界中验证理论的可行性。紧接着是更富挑战的实验材料探索。团队尝试过柔性的罗杰斯板材、柔性PCB电路板,但要么柔性不足,要么加工工艺难以匹配服装。最终,他们将目光投向了一种既有导电性又像布料一样柔软、可裁剪的材料——金属导电织物。

如何将微米级精度的拓扑结构“印刷”到大面积的导电布上?“加工、集成等问题,都是很磨人的工程挑战。”刘柱介绍,团队最终将谷霍尔拓扑光子晶体单元嵌入柔性织物,并通过拼接不同拓扑相模块,在衣物表面自然形成拓扑边界态。

简单来说,他们先将拓扑结构单元像“印花”一样制作在导电织物上,然后将具有不同拓扑特性的模块像拼布一样拼接起来。关键在于,不同模块交界处会形成一种名为“拓扑边界态”的物理状态。它就像在布料上刻画出一条隐形的、专为电磁波铺设的“信息高速公路”,即使衣物被弯折、拉伸,甚至在人体运动过程中,信号依然能够稳定传输。



实时测得的拓扑服装数据。
王昊昊/摄

信号“沿衣而行”,省电且稳定

这件拓扑服装的性能如何?实验结果显示,在真实人体穿着条件下,相比传统无线通信方案,拓扑服装的片上信号传输效率提升了30至40分贝,相当于提高了3个数量级以上。更重要的是,这种提升并非依赖提高发射功率,而是源于拓扑态对散射和缺陷的天然免疫能力。

“这意味着我们可以用更低的功耗实现更稳定的通信。”刘柱说,这对未来无电池或超低功耗可穿戴设备非常关键。

为了验证系统的实际应用潜力,团队将多个传感节点分布在人体不同位置,并结合机器学习算法,用于心率、呼吸等生命体征监测。在跑步、行走等动态场景下,系统依然能够稳定工作,心率信号的信噪比提升超过两个数量级,测量精度显著优于传统单点传感方案。

应用场景方面,这种基于拓扑边界态的体域网,有望在远程健康监测、康复医疗、人机交互及高安全性个人通信等领域发挥作用。由于信号被限制在衣物表

面传播,天然具备更强的抗窃听能力,为数据安全提供了新的物理层保障。

“比如,在竞技体育中,它有望分布式监测运动员全身肌肉和生理状态;在远程医疗中,为居家老人提供舒适、长期的健康监测;其高安全性的短距离通信特性,也可用于特殊场景下的可靠人机交互。”李志鹏说。

目前,团队正围绕拓扑服装的舒适性、耐用性、成本和大规模生产等问题开展进一步研究,助力实验室样品尽快转化为实际应用的产品。

“当衣服不仅能穿,还能‘思考’和‘通信’,它就不再只是被动的载体,而成为人体与外界的重要接口。”刘柱表示,这项研究的意义不只是拓扑服装性能的提升,更重要的是证明了拓扑物理不只存在于理想化的实验平台,也可以在复杂、柔软、不断变化的实际环境中发挥作用,让抽象的拓扑概念以“穿在身上”的方式走进真实应用场景。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41928-025-01516-w>