

中国科大首次观测到多体配对费能隙

本报讯 中国科大潘建伟、姚星灿、陈宇翱等人基于强相互作用的均匀费米气体，首次观测到了由多体配对产生的费能隙。这项研究首次确立了配对费能隙的存在，为高温超导机理中的电子预配对假说提供了支持，朝向理解高温超导机理迈出了重要一步，是利用量子模拟解决重要物理问题的一个范例。2月8日，该成果以《 μ 正费米气体中费能隙的观测和量化》为题发表在国际权威学术期刊《自然》。



图1. 图中头顶玉珠的两条鲤鱼，象征着一对自旋相反的费米子；龙门代表了超流相变和费能隙。鲤鱼跃过龙门，表明配对发生在超流相变温度以上。这种配对现象反过来又导致费能隙的出现。（制图：陈磊）

能隙的产生是超导的标志性现象。在常规超导体中，能隙存在于超导相变温度以下。随着铜氧化物高温超导体的发现，即使在超导相变温度以上，能隙仍然能够被观测到，这种现象被称为费能隙。费能隙的起源和性质可以为解答高温超导的机理问题提供关键线索。学术界普遍认为主要存在两种可能的费能隙机制：一是来源于超导相变温度以上的电子多体预配对；二是来源于在高温超导体中发现的多种量子有序相，例如反铁磁序、条纹序和配对密度波等。但由于真实的高温超导材料体系非常复杂，各种可能的机制来源相互竞争，一直无法明确究竟是何种机制在起作用。

强相互作用（ μ 正）极限下的超冷费米气体以其纯净性和可控性为费能隙的机理研究提供了一个理想的量子模拟平台。一方面，费米原子之间的强吸引相互作用为多体配对创造了有利条件；另一方面，该体系可以避免多种量子有序相之间的竞争。因此，能否在该体系中观测到费能隙，将成为对多体配对机制的决定性验证。然而，这一科学目标的实现面临着两项重大技术挑战，也是以往的工作一直未能取得突破的原因：首先，需要制备

高品质、密度均匀的 μ 正费米气体；其次，要在超冷原子体系中开发类似角分辨光电子能谱的测量技术。

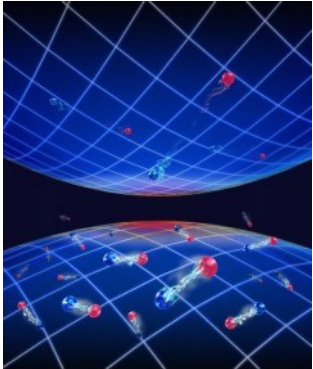


图2. 单粒子谱示意。连接和独立的小球分别代表费米海和单粒子，曲面间隙为费能隙。（制图：陈磊）

经过多年的艰苦攻关，研究团队建立了超冷锂-铷原子量子模拟平台，实现了世界领先的均匀费米气体的制备。研究团队还发展了大磁场的稳定技术，在约700G的磁场下，其短期波动优于 $25\mu\text{G}$ ，相对磁场稳定度接近 10^{-8} ，比以往国际上的最优结果提升了一个数量级以上。在该超稳磁场下，研究团队得以成功实现超冷原子动

量可分辨的微波谱学技术。在此基础上，研究团队系统地测量了不同温度下的 μ 正费米气体的单粒子谱函数，并成功观测到了费能隙的存在，为电子预配对假说提供了支持（如图2）。

该研究工作不仅推进了强关联多体系统的研究，也为完善多体理论提供了重要的实验依据。此外，该工作中发展的超冷原子量子调控技术为下一步研究其它重要的凝聚态物理现象，如单带超流、条纹相、FFLO超流等奠定了技术基础。《自然》杂志的审稿人一致认为，“这项工作解决了一个长期存在的重要物理问题，是量子模拟研究的里程碑进展。”

中国科大相关研究团队近年来在基于超冷原子的量子模拟方面开展了卓有成效的工作，已先后在《自然》和《科学》发表了10篇高质量论文。在前期技术积累的基础上，超冷原子量子模拟已经开始显现出揭示包括高温超导机理在内的复杂物理系统规律的显著效用，为在近期构建具备解决实际问题能力的专用量子模拟机铺平了道路。

斯威本科技大学胡辉和中国科大陈启瑾是该工作的理论合作者。（物理学院 合肥微尺度物质科学国家研究中心 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院）

我校在氧化物电子学领域取得重要成果

本报讯 日前，中国科大吴文彬教授、王凌飞教授团队与西北大学司良教授团队合作，成功制备了一种广谱高效的新型超四方相水溶性牺牲层材料 $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ ，可用于制备多种高质量自支撑氧化物薄膜。相关研究成果于1月26日以研究长文形式发表在期刊《科学》上。

自支撑氧化物薄膜是指一种去除衬底后依旧保持单晶特性的低维量子材料，兼具关联电子体系的多自由度耦合特性和二维材料的结构柔性。这类材料具有超弹性、挠曲电性和显著的磁弹效应等，有望诱导传统外延氧化物薄膜中不具备的新奇量子衍生现象和功能特性。同时，由于摆脱了单晶衬底的刚性束缚，自支撑氧化物薄膜易于实现与硅基半导体、二维范德瓦尔斯材料以及柔性高分子材料的集成，在开发超薄柔性电子器件方面表现出巨大的应用潜力。

多年来，自支撑氧化物薄膜的主流制备方法是基于水溶性牺牲层的外延生长、剥离和转移技术。然而，目前国际上普遍使用的 $\text{Sr}-\text{Al}-\text{O}$ 基水溶性牺牲层与目标氧化物薄膜之间不可避免的晶格失配和应力弛豫会导致高密度界面缺陷的形成，进而在水辅助剥离和转移过程中诱发高密度裂纹的产生，显著影响自支撑氧化物薄膜的结晶性和完整性，并导致相应功能特性的退化。因此，如何抑制微裂纹的形成，获得大面积、高结晶性的自支撑氧化物薄膜是推动这一研究领域进一步发展的关键科学问题。

针对上述问题，研究团队深入探索 $\text{Sr}-\text{Al}-\text{O}$ 基水溶性牺牲层薄膜的激光分子束外延生长窗口，通过精细的薄膜生长控制发现了一种新型水溶性牺牲层材料 $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 。系统的实验表征和第一性原理计算展现了其诸多优异性质：首先，双轴应变下的 $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$

薄膜具有四方结构对称性，与多数 ABO_3 钙钛矿材料可以形成高质量共格外延生长，抑制了界面处缺陷的形成和水辅助剥离过程中的裂纹产生，显著提升了自支撑氧化物薄膜的结晶性和完整性。研究团队验证了晶格常数在 $3.85\sim 4.04$ 埃区间的一系列钙钛矿氧化物薄膜的剥离效果，发现从 $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 牺牲层上剥离的自支撑薄膜中无裂纹区域可以扩展到毫米级，比目前已报道的同类自支撑薄膜样品大 $1\sim 3$ 个数量级，且其结晶性和功能性可以与单晶衬底上生长的高质量外延薄膜相当。其次， $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 薄膜的激光分子束外延生长窗口与多数钙钛矿氧化物薄膜兼容，制备工艺具有普适性。研究团队还进一步发现 $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 独特的原子结构导致其具有很高的水溶性，显著缩短了水辅助剥离过程的时间，提升了自支撑氧化物薄膜的制备效率。

新型水溶性牺牲层 $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 的

发现为制备高结晶性、大面积自支撑氧化物薄膜提供了一种高效且普适的实验手段。这一发现突破了自支撑氧化物薄膜在完整性和结晶性方面的瓶颈，为该领域的发展注入了新的动力，既有望推动自支撑氧化物薄膜新奇量子物态的进一步发掘，也可以提升这一体系在低维柔性电子学器件方面的应用潜力。审稿人对该工作给予高度评价，认为“对于（自支撑氧化物薄膜）这一正迅速发展的研究领域内的科学家们而言，这无疑是一个有趣的工作”“章等人的工作具有从多个方面对氧化物电子学领域形成广泛影响的潜力”。

我校合肥微尺度物质科学国家研究中心中心章金凤（博士研究生）、王傲（硕士研究生），中国科学院物理研究所林挺（博士研究生），西北大学王晓超（硕士研究生）为本文的共同第一作者；我校王凌飞教授、吴文彬教授与西北大学司良教授为本文的共同通讯作者。

（合肥微尺度物质科学国家研究中心）

中国科大合作在原位同步辐射的催化研究中取得进展

本报讯 近日，中国科大国家同步辐射实验室姚涛教授团队与华中科技大学夏宝玉教授团队和新西兰奥克兰大学王子运博士合作，综合利用多种同步辐射原位技术，在质子交换膜（PEM）二氧化碳转换机制的研究中取得重要进展，相关研究成果于2月1日发表在国际权威学术期刊《自然》上。

开发各种碳中和技术对于解

决能源与环境问题具有重要意义。基于PEM技术的电催化二氧化碳转化（ CO_2RR ）由于可生产高附加值化学品和燃料并可以大电流、长时间稳定工作，是实现工业化碳转换较有前景的方式之一。而利用同步辐射大科学装置的多种先进表征技术研究催化剂在服役状态下的结构演变和反应机理，对于开发酸稳定的碳转换催化剂和膜电极系统具有重要的

科学意义和应用价值。

研究人员利用再生铅催化剂（ r-Pb ）在宽pH范围内取得了较高的 CO_2RR 活性，在2.2 V压下、连续工作5200小时的条件下产生甲酸的法拉第效率超过93%，电流密度达到 600 mA/cm^2 。

为了厘清 r-Pb 催化剂在 CO_2RR 反应中的真实活性结构，研究人员发展并自研了适用X射线吸收光谱的膜电极 CO_2RR 原位装

置，分别在合肥光源软X射线磁性圆二色线站（BL12B）和北京光源XAFS线站（1W1B）开展了离线和原位表征，原位X射线吸收谱技术发现 r-Pb 在 CO_2RR 的还原电位下发生了由 Pb/PbSO_4 向 Pb/PbCO_3 的动态结构演变，金属态 Pb 与 PbCO_3 在还原电位下一定比例的共存是最终产生甲酸高选择性和活性的关键因素。研究人员进一步基于合肥光源原位红外

本报讯 近日，中国科大周蒙教授课题组与清华大学王泉明教授团队合作，在溶液中实现了金属团簇 $>99\%$ 量子产率的近红外发光，并揭示了其三重态发光机制，解决了这一方向的难题。相关研究成果于1月19号发表在期刊《科学》上。

近红外发射的金纳米团簇在生物领域具有潜在的应用价值，但这些团簇的近红外发光量子产率（PLQY）通常较低（ $<10\%$ ）。在此，研究人员通过铜掺杂合成 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 团簇，发现其在室温无氧溶液中表现出 $>99\%$ 的PLQY。近100% PLQY团簇的成功制备有助于进一步开发高近红外发光量子产率的金属团簇。

研究人员合成了 $\text{Au}_{22}(\text{BuPhC}\equiv\text{C})_{18}(\text{Au}_{22})$ 及其铜掺杂对应团簇 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6(\text{BuPhC}\equiv\text{C})_{11}(\text{Au}_{16}\text{Cu}_6)$ ，并研究了其光物理性质。单晶X射线衍射结果分析表明 Au_{22} 和 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 具有相似的结构。对这两个团簇进行基本的发光性质表征发现， Au_{22} 的发光峰位于690nm， $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 的发光峰位于720nm。在空气条件下用绝对法测得 Au_{22} 和 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 的PLQY分别为9%和95%，在无氧溶液中通过绝对法和相对法测得 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 的PLQY均达到100%。时间相关单光子计数测得 Au_{22} 和 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 的发光寿命分别为485ns和1.64 μs 。

通过瞬态吸收光谱进一步研究其激发态动力学发现，两种团簇的发光态均来自于三重激发态（ T_1 ），且在飞秒瞬态吸收光谱中观察到了不同的动力学过程。在380nm激发下， Au_{22} 表现出148 ps的上升过程，而 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 表现出0.5ps的快速下降过程。通过三重态敏化实验证明，这两个过程可以归属于 $\text{S}_1\rightarrow\text{T}_1$ 的系间窜跃（ISC）。由于铜掺杂使得 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 具有更小的 ΔE_{ST} ，因此显著加快了其ISC的速率，最终 $\text{Au}_{16}\text{Cu}_6$ 展现出接近100%的PLQY。

清华大学史宛琪（博士研究生）和中国科大合肥微尺度物质国家研究中心曾琳琳（硕士研究生）为该文共同第一作者，中国科大周蒙教授、清华大学王泉明教授为论文的共同通讯作者。

（合肥微尺度物质科学国家研究中心）

谱学技术（BL01B），基于自研原位红外装置，采用 ^{13}C 同位素标记的 $^{13}\text{CO}_2$ 开展了 CO_2RR 的原位红外研究，发现 PbCO_3 表面的气态 CO_2 会首先经过表面活化过程进入 PbCO_3 晶格，再由晶格中的C转换成最终的 HCOOH 产物，结合DFT理论计算揭示了 r-Pb 催化剂的固相动态转变诱导晶格碳活化和 CO_2 转化机理。

中国科大国家同步辐射实验室姚涛教授、华中科技大学夏宝玉教授、新西兰奥克兰大学王子运博士为本论文的共同通讯作者。（核科学技术学院）

○近日，中国科大潘建伟、陈宇翱、戴汉宁等组成的研究团队，成功研制了万秒稳定性和不确定度均优于 5×10^{-18} （相当于数十亿年的误差不超过一秒）铯原子光晶格钟。根据公开发表的数据，该系统不仅是当前国内综合指标最好的光钟，也使得我国成为继美国之后第二个达到上述综

合指标的国家。该成果对未来实现远距离光钟比对、建立超高精度的光频标基准和全球性光钟网络奠定了重要的技术基础。相关成果于发表于国际计量领域重要学术期刊《计量学》。

○中国科大中国科学院微观磁共振重点实验室杜江峰、荣星等人在单自旋体系中系统研究了

科研简讯

对称性与高阶非厄米奇异点结构的关系，并成功观测到了一类高阶非厄米奇异点结构，相关研究成果于1月15日在线发表在《自然·纳米技术》上。

○1月19日，超级陶瓷装置

（STCF）国际顾问委员会首次会议在中国科大召开。STCF是我国主导的新一代GeV能区高亮度正负电子对撞机，有望在正反物质不对称、强子内部结构、奇特态物质和新物理探索等前沿领域取得重大突破。目前，在安徽省、合肥市和中国科大的联合支持下，项目正在开展关键技术攻关。

中国科大合作研究在金属团簇发光领域取得突破