

研究实现马约拉纳零能模与Yu-Shiba-Rusinov束缚态间的可逆转变

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/13148.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

马约拉纳费米子是意大利物理学家马约拉纳预言的一种反粒子为其本身的奇特基本粒子。寻找马约拉纳费米子是高能物理领域的一大研究热点，然而科学家却始终未能找到该粒子存在的确切证据。在固体材料中，在特定的拓扑缺陷上存在着与马约拉纳费米子具有类似性质的准粒子，该准粒子的产生湮灭算符满足自共轭关系，因此被称为马约拉纳零能模。马约拉纳零能模符合非阿贝尔统计，其编织操作是实现容错拓扑量子计算的主要路径之一。

自2017年以来，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心高鸿钧/丁洪联合研究团队在铁基超导体系列材料中展开了深入合作。他们利用自主设计组装的多台独立的极低温强磁场扫描隧道显微镜 (STM)

联合系统对马

约拉纳零能模进行了系统研

究。2017年，他们首次在铁基超导体 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶表面的磁通涡旋中观察到了纯净的马约拉纳零能模 (D. Wang et al., Science 362, 333

(2018))。该结果被复旦大学、日本理化学研究所 (RIKEN)、美国伊利诺伊大学、南京大学等机构的独立研究团队所验证。随后，高鸿钧/丁洪联合研究团队针对马约拉纳零能模只存在于部分磁通涡旋这一现象进行了深入研究，发现这是

由于 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶表面化学势的不均匀导致强拓扑绝缘体态可能在部分区域被破坏，出现局域的表面拓扑表面态缺失 (L. Kong et al., Nature Phys. 15, 1181

(2019))。更进一步，他们还在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶拓扑表面的磁通涡旋中观察到了马约拉纳零能模的近量子化平台 (S. Zhu et al., Science 367, 189

(2020))，为 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶

表面的磁

通涡旋中马约拉纳

零能模的存在提供了强有力的证据。

此外，他们还在 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

单晶表面的磁通涡旋中观测到了马约拉纳零能模，将马约拉纳零能模的研究拓展到了铁磷基超导家族 (W. Liu et al., Nature Commun. 11, 5688 (2020))。

这个马约拉纳平台也对具有拓扑非平凡带结构的超导体缺陷激发的基本理解提出了新的挑战，并

为在不同物理条件下创造马约拉纳零能模提供了新的可能性。通常，超导体上具有两大类缺陷态：磁性杂质诱导的具有自旋极化的Yu-Shiba-Rusinov

(YSR)束缚态和磁场诱导的磁通涡旋内的Caroli-de-Gennes-Matignon (CdGM) 束缚态。2015年，殷嘉鑫等人在中科院物理所研究员潘庶亨和丁洪的指导下，利用极低温高分辨率STM在铁基超导体 $\text{Fe}_{1+x}(\text{Te}, \text{Se})$ 中处于间隙位置的单个铁杂质上发现鲁棒的零能束缚态 (J. Yin et al., Nature Phys. 11, 543

(20

15))

，但之后一

直缺乏对这个零能束缚

态的进一步理解。近期，有理论工作认为，当

$\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶中的间隙铁原子与基底的交换相互作用足够强时，交换相互作用和自旋轨道耦合会产生一个等效磁场，在Fe原子附近诱导出量子反常涡旋

(QAV)，由于 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶的拓扑表面态的存在，在QAV中可以产生马约拉纳零能模。

最近，高鸿钧研究团队（范朋、钱国健、陈辉等人）与丁洪团队（杨发枝等人）和美国波士顿学院教授汪自强进一步

合作，他们利用极低温强磁场扫描隧道显

微镜，对 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶表面单个铁原子上的束缚态进

行了系统研究。他们在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶表面低温沉积单个铁原子，并在铁原子上观测到了YSR束缚态和零能模

(图1)。通过对具有零能模的Fe原子做空间依赖的扫描隧道谱 (dI/dV谱)，发现零能模随空间变化不发生劈裂，并且在零能模附近有呈整数量子化能量分布的束缚态 (图2)，这符合量子极限下拓扑磁通涡旋内CdGM束缚态呈整数量子化分布的特点。通过对零能模进行变温测试，发现零能模消失温度为4 K，与磁通涡旋中马约拉纳零能模的行为一致

(图2)。在高场下，零能模不劈裂且半峰宽保持不变，显示出其在磁场下的稳定性

(图2)，与YSR束缚态在磁

场下劈裂的现象有显著不同。上述结果为 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶表面铁原子处QAV及马约拉纳零能模的存在提供了强有力的证据。

更进一步，研究人员在Fe原子正上方连续可控地改变针尖与Fe原子的距离，从而有效改变Fe原子和基底的交换相互作用，以此成功实现了YSR束缚态与马约拉纳零能模的可逆转变 (图3)。并且，他们多次观测到当QAV和磁场诱导的磁通涡旋距离很近时，马约拉纳零能模因互相耦合而产生劈裂，并且劈裂的宽度随二者距离的进一步靠近而变大 (图4)。

该研究工作利用极低温强

磁场扫描隧道显微镜，深入系统地研究了 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶表面铁原子上马约拉纳零能模的空间分布、温度和磁场依赖，揭示了其拓扑性质，观测到QAV和磁场诱导磁通涡旋内马约拉纳零能模的相互作用，提供了QAV和马约拉纳零能模存在的有力证据，并进而通过针尖操纵实现了YSR束缚态与马约拉纳零能模的可逆转变。

该研究为进一步研究马约拉纳零能模的相互作用和编织开辟了新的路径，对未来拓扑量子计算起到了推动作用。相关结果于3月1日在线发表在Nature Communications上 (Nat. Commun. 12, 1348 (2021))。范朋、杨发枝、钱国健、陈辉为共同第一作者，高鸿钧、汪自强和丁洪为共同通讯作者

。美国布鲁克海文国家实验室研究员顾根大提供了高质量的单晶样品。该工作得到了国家自然科学基金委、科技部和中科院的支持。

论文链接

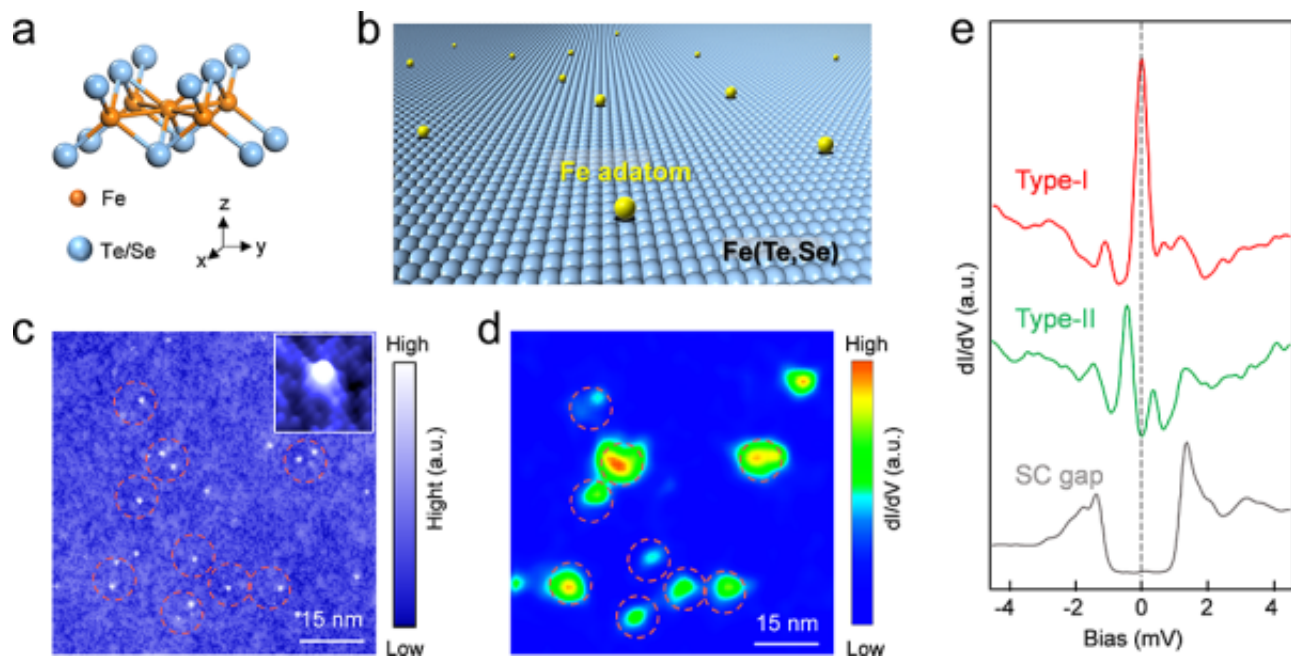


图1 FeTe_{0.55}Se_{0.45}单晶表面沉积单原子铁示意图和铁原子上两种束缚态

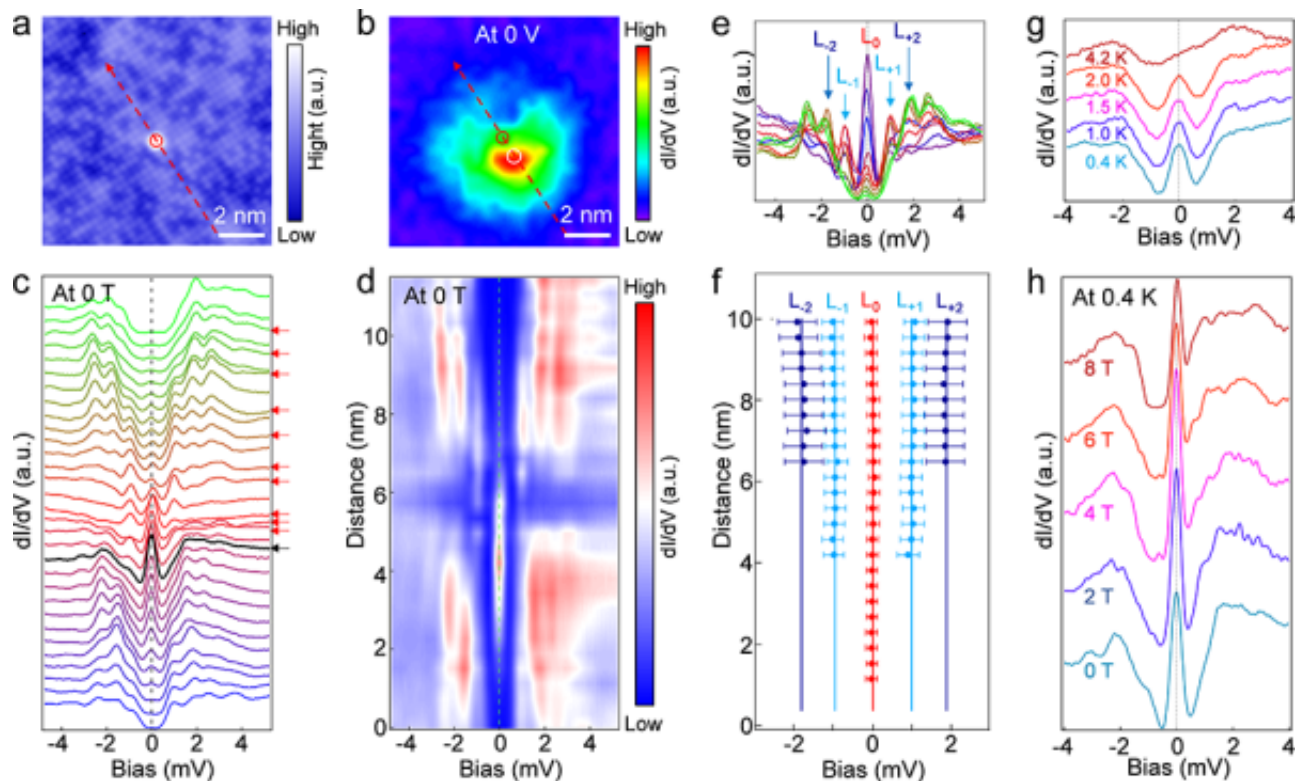


图2 铁原子上零能峰的空间、温度和磁场依赖

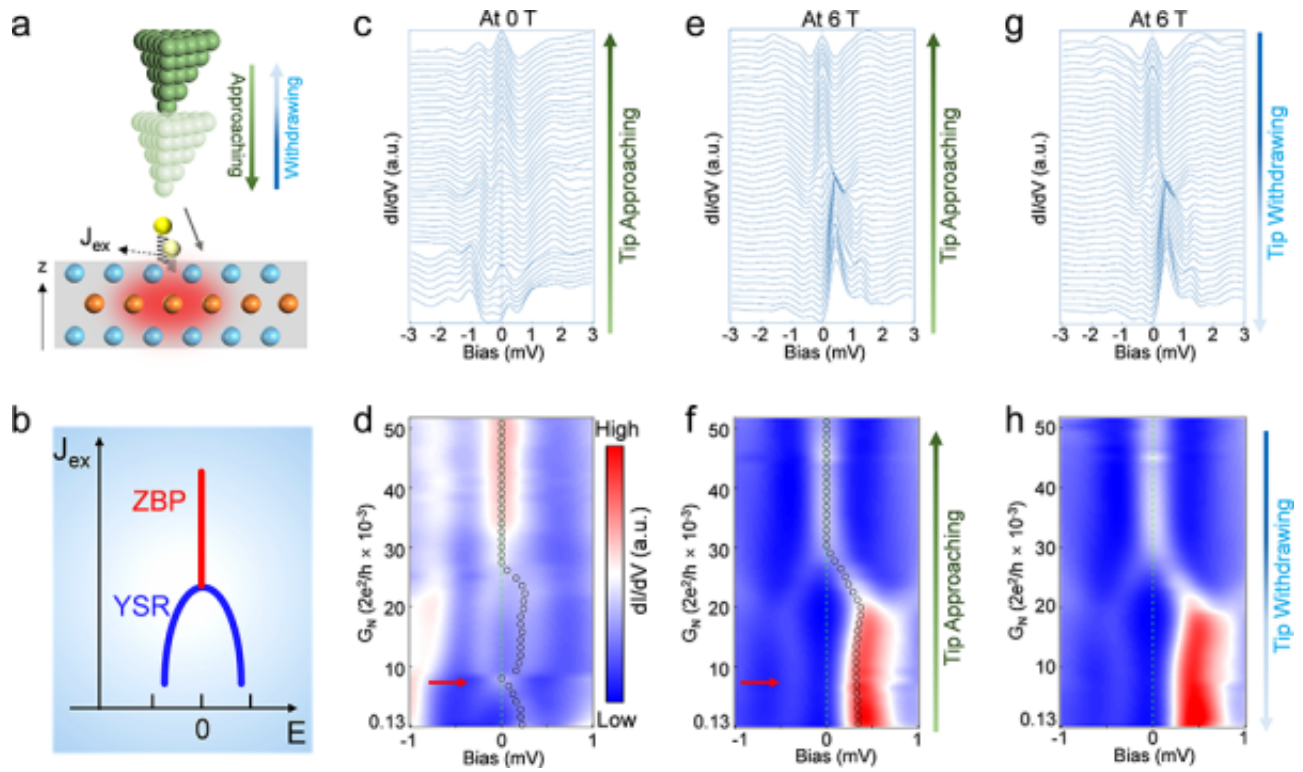


图3 通过STM针尖操纵实现YSR束缚态和马约拉纳零能模的可逆转变

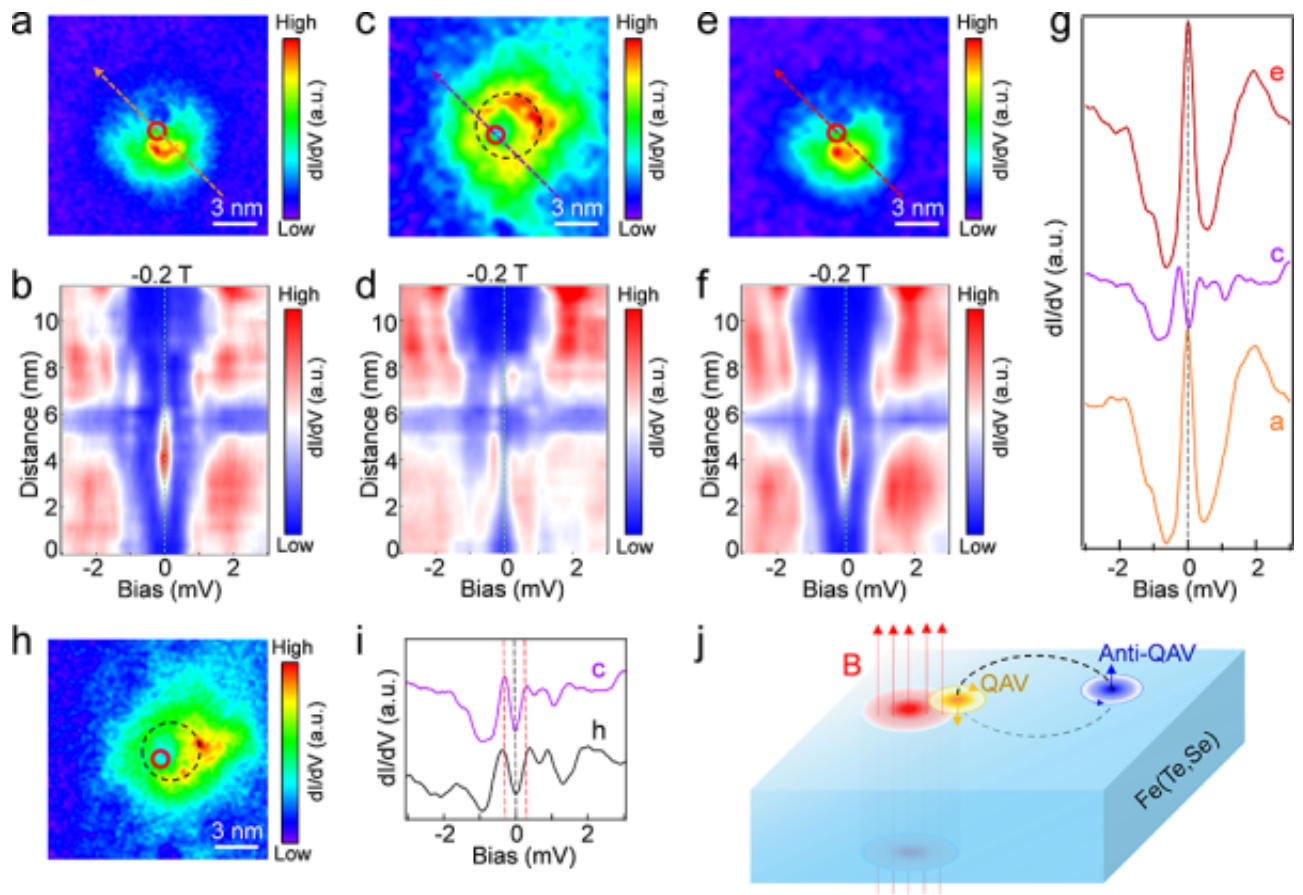


图4 QAV和磁场诱导的磁通涡旋内马约拉纳零能模之间的相互作用

研究团队单位：物理研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发