

[首页](#)[组织机构](#)[科学研究](#)[成果转化](#)[人才教育](#)[学部与](#)[首页 > 科研进展](#)

物理所等揭示铁基超导体超导涡旋中马约拉纳零能模的拓扑本质

2019-08-23 来源：物理研究所

铁基超导体超导涡旋中的马约拉纳零能模是当前人们关注的前沿问题。近日，中国科学院院士高鸿钧与美国麻省理工学院教授Liang Fu通力合作，在铁基超导体 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶样品中观察到马约拉纳零能模，反映了超导涡旋中马约拉纳零能模的拓扑本质。相关研究结果以长文 (Article) 形式于8月15日发表在《自然》(Nature) 杂志上，高鸿钧、Liang Fu、X. Zhang (IOP)、朱诗雨 (IOP)、Michal Papaj (MIT)、陈辉 (IOP)为共同第一作者。丁洪、高鸿钧、Li Xiang供了高质量的单晶。

在凝聚态物理系统中，马约拉纳零能模是束缚在拓扑缺陷上的拓扑非平庸的准粒子激发，是低维系统中的马约拉纳费米子在低维凝聚态物理系统中的类比。理论证明，马约拉纳零能模满足非阿贝尔统计，是实现容错拓扑量子计算的主要路径之一。

理论学家预测在多个体系中存在马约拉纳零能模，如 $5/2$ 填充的分数量子霍尔效应 (Pfaffian) (半导体纳米线、拓扑绝缘体、磁性原子链等等)。近十年来，人们在这些体系中多次观测到马约拉纳零能模，但异质结结构限制了实验观测的可信度，不利于相关性质的进一步研究。自2014年起，物理所面向国家重大需求，瞄准国际前沿，通过角分辨光电子能谱实验 (P. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. 105, 172601 (2014); X. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 121, 177201 (2018); X. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 121, 177201 (2018); X. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 121, 177201 (2018)) 和第一性原理计算 (Z.-J. Wang et al., Phys. Rev. B 92, 115119 (2015); X. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 121, 177201 (2018)) 在铁基超导体 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 中强拓扑绝缘体态与超导态可以共存，拓扑狄拉克表面态出现。这一材料有效避免了p波超导配对和异质结结构的困难，这为马约拉纳零能模的研究开辟了新天地。

2017年6月，高鸿钧/丁洪研究团队，利用高鸿钧研究组自主设计、集成组装的两台独立了 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶样品的超导涡旋，清晰地观测到了鲁棒的零能涡旋束缚态 (D. Wang, 束缚态是表面狄拉克电子超导配对诱发的马约拉纳零能模，而体态平庸电子对其形成没有贡献 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 中的马约拉纳零能模与其它高能束缚态之间有很大的准粒子能隙，使得实验大学、日本理化学研究所 (RIKEN) 等机构的独立研究团队所验证 (Q. Liu et al., Phys. Rev. (2019))。拓扑非平庸的铁基超导体很快引起了学术界的广泛关注，据不完全统计，在短短两年30多篇实验和理论文章聚焦铁基超导体“马约拉纳”相关物理。

虽然实验观测已经证明单一零能束缚态行为完全符合马约拉纳零能模的预期，但是之前的是，实验发现马约拉纳零能模只存在于部分超导涡旋中，这成了笼罩在“铁基马约拉纳载体复杂行为，直接论证马约拉纳零能模的拓扑本质，解明影响马约拉纳零能模存在或消失的微观理解马约拉纳零能模的性质、发展拓扑量子计算具有深远的意义。

自2018年7月开始，丁洪和高鸿钧进一步紧密合作，共同指导博士研究生孔令元、朱诗雨的束缚态进行了更加全面系统的研究。他们在高鸿钧研究组的居国际顶尖水平的极低温强磁场扫描隧道谱实验发现有两类超导涡旋共存于样品表面。马约拉纳零能模存在于拓扑涡旋中，同时 $\pm 2, \dots$ 其中 $n=0$ 是马约拉纳零能模) (图1)。与之相对应，在另一类平庸涡旋中没有马约拉 $n\Delta^2/E_F$, $n = \pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \dots$) (图2)。实验团队对这两类涡旋分别实现了35次和26)子化特征。涡旋束缚态在两类超导涡旋之间的半整数能级嬗移与马约拉纳零能模的出现紧密相Fu、博士研究生Michal Papaj 通过理论模拟发现，两类超导涡旋之间的半整数能级嬗移可以晶格区域中束缚态的集体行为，发现同一类涡旋总是成群出现，支持了狄拉克表面态不均匀(5 meV) 并且具有掺杂导致的本征不均匀性，强拓扑绝缘体态可能在部分区域被破坏，使得这些部，因此STM观测的超导涡旋呈现半整数能级序列的平庸行为。与之相反，在拓扑表面态保持态呈现整数能级序列的拓扑行为，这时马约拉纳零能模就是整数能级序列中的第0级束缚态 (束缚态所独有的能级序列空间分布特征，强烈地支持了马约拉纳零能模来源于狄拉克表面态拓扑涡旋不满足整数量子化特征：马约拉纳零能模看起来十分孤立，其余高能束缚态聚集在超导克点时，量子限域效应破坏了涡旋束缚态的等距分布。与此同时，马约拉纳零能模被很大的准一步预言，当费米能级恰好位于拓扑表面态的狄拉克点时，其他高能束缚态将会被全部压缩到束缚态。这时马约拉纳零能模处在最佳状态。这个结论暗示，未来发展电场效应可调控的超导涡

在上述系统工作的基础上，研究团队总结整理了现有实验和理论中发现的影响马约拉纳零出现或消失的整体相图 (图5)。主要的影响因素有：1) 拓扑表面态存在与否决定涡旋类型

约拉纳零能模的实验信号，其中升温会增加热激发准粒子数目，趋近相变点会减小准粒子能隙。

这项系统研究工作是对之前工作的完善和扩展，开创性地将马约拉纳零能模的拓扑本质与超导涡旋中出现的鲁棒零能模是拓扑非平庸的准粒子激发（马约拉纳零能模），而且为证明其得到科技部(2015CB921000, 2015CB921300, 2016YFA0202300)、国家自然科学基金委 (11XDB07000000)的支持。

文章链接

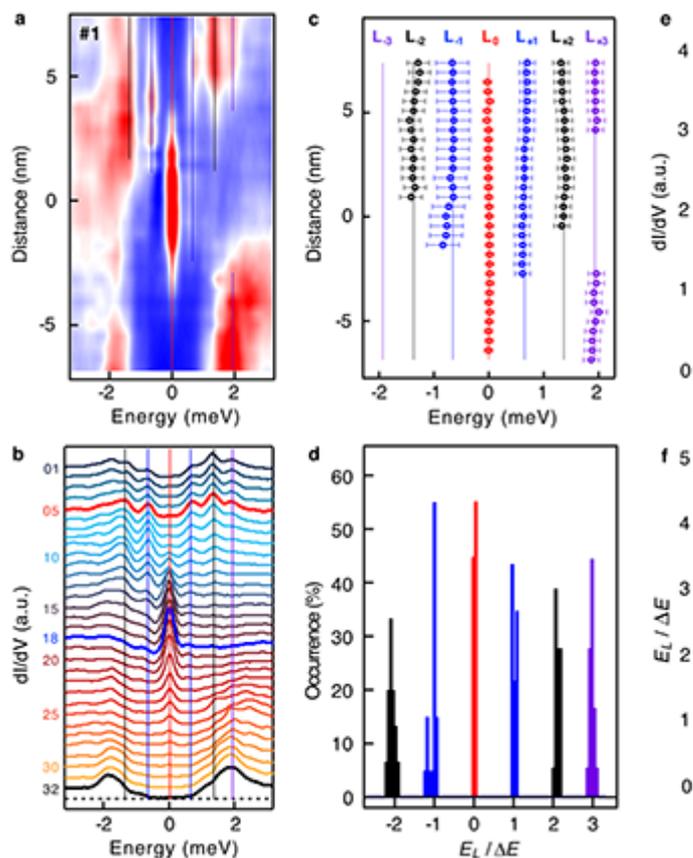


图1 拓扑涡旋束缚态能级序列整数量子化，马约拉纳零能

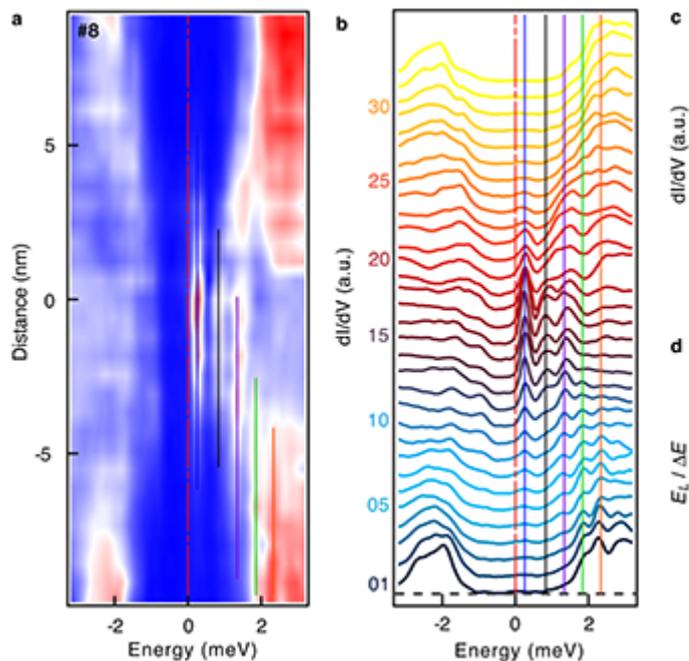


图2 平庸涡旋束缚态能级序列半整

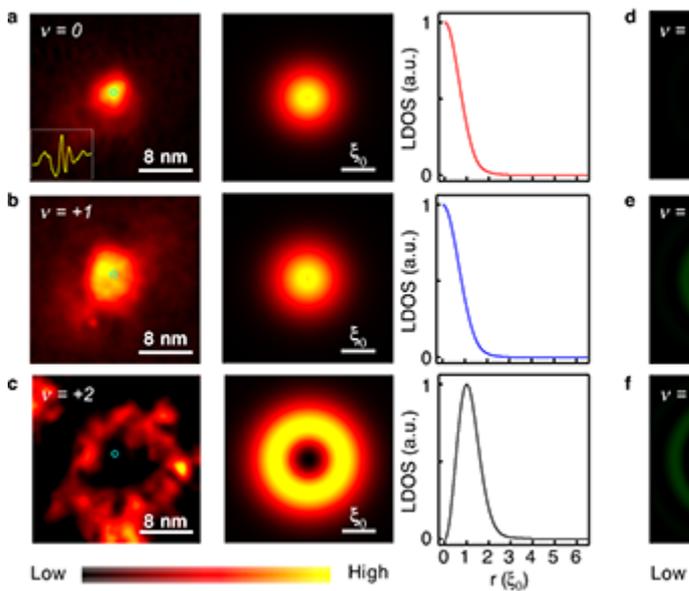


图3 拓扑涡旋（左）中前两级涡旋束缚态的波函数呈现实心分布，而平庸涡旋（右）中只有表面态参与导致的。

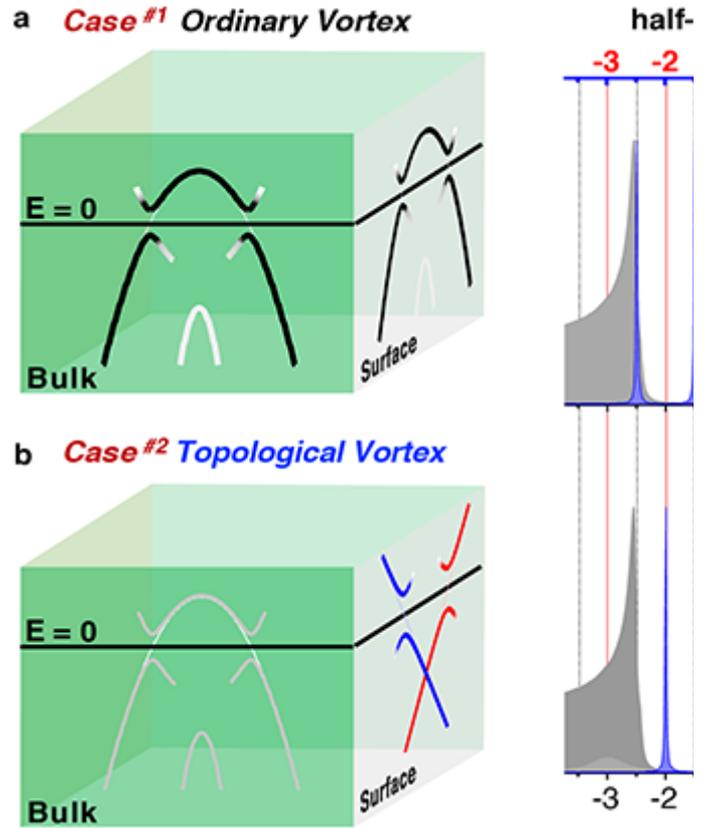


图4 狄拉克表面态诱导的半整数能级嬗移，体现了马约拉

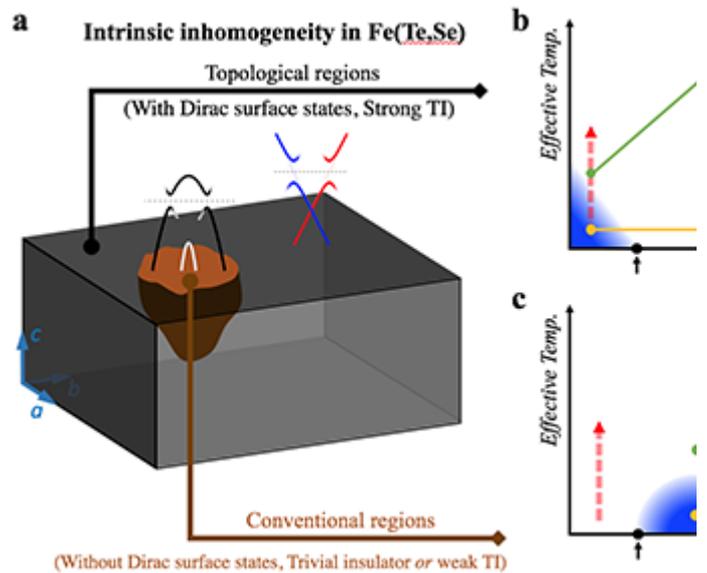


图5 超导涡旋中马约拉纳零能模存在或

上一篇： “超导直流输电/输气一体化能源管道” 原理样机研制成功

下一篇： 中国科大在超冷分子量子调控领域取得进展

© 1996 - 2019 中国科学院 版权所有 京ICP备05002857号 京公网安备110402500047号

联系我们 地址：北京市三里河路52号 邮编：100864

