

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

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/6547.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！

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。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，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心研究员丁洪、中科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 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶样品上发现了伴随马约拉纳零能模出现的涡旋束缚态能级序列半整数嬗移，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19日发表在《自然-物理学》(Nature Physics)杂志。孔令元 (IOP)、朱诗雨 (IOP)、Michal Papaj (MIT)、陈辉 (IOP)为共同第一作者。丁洪、高鸿钧、Liang Fu为共同通讯作者。美国布鲁克海文国家实验室Genda Gu提供了高质量的单晶。

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，其产生湮灭算符满足自共轭关系，因此可以被近似看作真实宇宙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任意子统计规律，多个马约拉纳零能模的交换编织操作可以产生大量简并基态(量子比特)，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 state)、手性p波超导体、BCS超导体/非平庸能带异质结(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了马约拉纳零能模的迹象，然而不稳定的p波超导配对以及复杂的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，物理所的联合研究团队首创了铁基超导体拓扑非平庸能带结构的研究方向。通过角分辨光电子能谱实验 (P. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. 105, 172601 (2014); X. Shi et al., Sci. Bull. 62, 503 (2017); P. Zhang et al., Science 360, 182 (2018)) 和第一性原理计算 (Z.-J. Wang et al., Phys. Rev. B 92, 115119 (2015); X.-X. Wu et al., Phys. Rev. B 93, 115129 (2016))，研究团队证明了高温铁基超导体 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 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“自赋”的全能隙超导现象。高温超导电性和拓扑能带结合于单一材料有效避免了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的He-3极低温强磁场扫描隧道显微镜(STM)联合系统精确测量了 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 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 et al., Science 362, 333 (2018))。进一步实验分析表明，该零能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(在较高温度下反而对其有破坏作用)。由于样品的强关联性质， $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 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，使得实验团队直接观测到了高纯度的马约

拉纳零能模。随后这个结果被复旦大学、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. X 8, 041056 (2018); T. Machida et al., Nat. Mater. 18, 811 (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,在短短两年时间内(2018年,2019年),预印本文库(arXiv)先后贴出了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,但是之前的实验不能直接论证其准粒子激发的拓扑非平庸本质。而且最不幸的是,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”上空的一朵乌云。深入全面研究FeTe_{0.55}Se_{0.45}涡旋束缚态的复杂行为,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机制,是证实超导涡旋中的马约拉纳零能模的必由之路,对妥善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、朱诗雨和博士陈辉等在前期工作的基础上对FeTe_{0.55}Se_{0.45}超导涡旋中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显微镜(STM)联合系统上开展实验研究工作,通过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,同时伴有整数量子化能级序列的涡旋束缚态($E_n = n \Delta^2 / EF$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 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纳零能模,且其涡旋束缚态能级序列呈现半整数行为($E_n = n \Delta^2 / EF$, $n = \pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \dots$)(图2)。实验团队对这两类涡旋分别实现了35次和26次重复观测,涡旋束缚态的统计分布表现出鲜明的整数或半整数量子化特征。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连,反映了马约拉纳零能模的拓扑本质。麻省理工学院教授Liang 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被拓扑表面态的不均匀分布所解释。实验团队随后测量了选定涡旋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分布的理论预期。由于Fe(Te,Se)自旋轨道耦合能隙较小(~ 20 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,使得这些区域的(001)表面上拓扑表面态缺失,拓扑表面态移动到材料内部,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,在拓扑表面态保持完好的区域上,由于狄拉克表面态的参与,拓扑涡旋中涡旋束缚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(图4)。实验团队还在拓扑涡旋中观测到了狄拉克表面态诱导涡旋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超导准粒子的结论(图3)。研究团队还进一步发现,存在一部分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能隙附近。理论模拟显示,在拓扑涡旋中当化学势十分接近狄拉克点时,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粒子能隙强烈保护,有利于减小准粒子中毒效应的影响。理论进一步预言,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超导能隙边缘,马约拉纳零能模是超导能隙内唯一允许的涡旋束缚态。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旋系统对实现拓扑量子计算具有十分重要的意义。

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能模的相关因素,提出了铁基超导体超导涡旋中马约拉纳零能模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。2)涡旋拓扑相变会交换拓扑与平庸相。3)体态准粒子会减弱马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。4)强磁场下多个马约拉纳零能模之间的杂化会导致零能模劈裂。

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涡旋束缚态的全局行为建立联系，不仅进一步证明了铁基超导体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)，而且为证明其他凝聚态物理系统中的马约拉纳零能模提供了新的思路。该工作得到科技部(2015CB921000, 2015CB921300, 2016YFA0202300)、国家自然科学基金委 (11234014, 11574371, 61390501)和中科院(XDB28000000, XDB07000000)的支持。

图1 拓扑涡旋束缚态能级序列整数量子化，马约拉纳零能模是整数序列的第0级束缚态

图2 平庸涡旋束缚态能级序列半整数量子化

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)中只有第一级束缚态呈现实心分布。拓扑涡旋的独特性质是由于狄拉克表面态参与导致的。

图4 狄拉克表面态诱导的半整数能级嬗移，体现了马约拉纳零能模的拓扑非平庸本质。

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

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