

物理所等在铁磷基超导家族中发现马约拉纳零能模平台

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/11865.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！

近几年来，在拓扑非平庸的铁基超导材料中研究马约拉纳零能模是凝聚态物理学家关注的前沿问题之一。近期，中国科学院院士、中科院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心研究员高鸿钧团队和物理所研究员丁洪团队、北京师范大学教授殷志平团队、美国麻省理工学院教授傅亮团队合作，在自掺杂的双层铁基超导体 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

单晶样品上，发现了拓扑非平庸的狄拉克表面态，并在超导涡旋中观察到了伴随整数量子化能级序列的涡旋束缚态的马约拉纳零能模。相关研究成果发表在*Nature*

communications

上。刘文尧（IOP）、曹路（IOP）、朱诗雨（IOP）和孔令元（IOP）为论文的共同第一作者，高鸿钧和丁洪为论文的共同通讯作者。殷志平提供了能带计算，浙江大学教授曹光早提供了高质量的单晶样品，傅亮提供了理论模拟。

在凝聚态物理学的材料体系中，存在被拓扑缺陷所束缚的其产生湮灭算符满足自共轭关系的拓扑非平庸的准粒子激发，通常被称为马约拉纳零能模。理论证明，马约拉纳零能模满足非阿贝尔任意子统计规律，对多个马约拉纳零能模进行交换编织操作能够形成量子比特，是实现容错拓扑量子计算的最可行方案之一。近年来，物理学家设计出多种产生马约拉纳零能模的方案，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）。然而，p波超导体在测量上的不确定性、异质结方案的复杂结构，为马约拉纳零能模的研究和未来应用带来阻碍。因此，寻找一种具有拓扑非平庸性质、较高本征超导温度和较强电子关联的单一材料以作为马约拉纳束缚态的载体，是进一步探索马约拉纳零能模性质和构建拓扑量子比特的关键。

2017年

，丁洪研究组

与日本东京大学合作，利用

超高分辨角分辨光电子能谱，证实了 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶中拓扑表面态的存在（P. Zhang et al. *Science* 360, 182

(2018)）。同时，高鸿钧/丁洪联合团队在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶样品的超导涡旋中，观测到了干净的零能准粒子激发，这被认为是马约拉纳零能模的信号（D. Wang et al. *Science* 362, 333 (2018)），引起了物理学家们对拓扑非平庸的铁基超导体系的关注。

2019年8月，高鸿钧团队与丁洪团

队进一步合作，发现 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

中存在马约拉纳零能模的磁通涡旋，其束缚态表现出半整数位的量子化能级嬗移（L. Kong et al.

Nature Physics 15, 1181

(2019))，该研究澄清了

马约拉纳零能模的拓扑本质。研究人员在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$

单晶中观测到了磁通涡旋中马约拉纳零能模的近量子化电导平台特征，证实了Fe (Te, Se) 涡旋中存在马约拉纳零能模。2018年至今，学界陆续在其他的铁硫基超导材料中发现了马约拉纳零能模的信号，如 (Li, Fe) OHFeSe (Qin Liu et al. *PHYSICAL REVIEW X* 8, 041056 (2018)) 和 Fe (Te, Se) 薄膜 (X.-L. Peng et al. *PHYSICAL REVIEW B* 100, 155134 (2019))。然而，Fe (Te, Se) 近亲家族需要依靠原子替换掺杂来保证拓扑非平庸性质或超导电性，这不可避免地在材料中引入体态不均匀性，导致Fe (Te, Se) 近亲体系的超导涡旋在产生马约拉纳零能模过程中存在不确定性。这种材料本征的不均匀性减弱了铁硫基超导体作为马约拉纳零能模载体在拓扑量子计算领域中实际应用的可能。因此，发现一种体态均匀同时具有拓扑非平庸性质的高温铁基超导材料具有重要意义。

和铁硫基超导家族相比，铁基超导材料中的另一大家族——铁磷基超导体的结构更丰富，超导转变温度普遍更高。已有理论计算证明了拓扑非平庸性质在铁基超导家族中广泛存在 (P. Zhang et al. *Nature Physics* 15, 41-47(2019))。在此基础上，丁洪团队对铁磷基超导材料开展了大范围调研，最终发现1144型铁基超导体中的 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

是可能的理想马约拉纳零能模载体。 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

结构与122体系铁基超导体类似，通过自掺杂效应，在带来高温超导电性的同时避免了体态不均匀性的引入；自掺杂打破了晶格c方向上的滑移镜面对称性，使能带在kz方向上折叠。殷志平团队对此进行了DFT+DMFT计算，证明了该能带折叠可产生非平庸的拓扑能带反转与表面态；丁洪团队利用上海光源

的同步辐射角分辨光电子能谱，观测到了

清晰的 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

体态能带，并在表

面碱金属掺杂的样品上看到了狄拉克

型能带，证明了 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

中拓扑表面态的存在 (图1)。随后，丁洪团队与日本东京大学进行合作，利用高分辨的激光角分辨光电子能谱，精确测量了体态能带与拓扑表面态能带的超导能隙 (图2)。为进一步确认 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

可产生马约拉纳零能模，丁洪团队与高鸿钧团队合作，利用其极低温强磁场STM/S联合系统，对 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

进行了全面研究。通过扫描隧道谱实验，在零场下，研究人员得到了均匀的超导能隙谱，其能隙大小与角分辨光电子能谱得到的结果一

致，证明了 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

本身体态的均匀性 (图1)。通

过引入外磁场，研究人员在 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

的超导涡旋中发现了马约拉纳零能模的存在，同时伴有整数量子化能级序列的涡旋束缚态。傅亮团队利用狄拉克表面态诱导涡旋束缚态的简单模型，结合实验观测得到的超导能隙和化学势等物理参数，重

现了实验中拓扑涡旋束

缚态独有的能级序列空间分布特征，证明了Ca

KFe_4As_4 的马约拉纳零能模来源于其表面态超导准粒子 (图3)。

该研究有机结合了能带计算、角分辨光电子能谱、扫描隧道显微镜和理论模型模拟，重演了马约拉纳零能模在拓扑非平庸铁基超导体的超导涡旋中构建的机制；第一次在铁磷基超导家族中证明

了马约拉纳零能模的存在； $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ 作为一个具有体态均匀性和较高超导温度（ $T_c=35\text{ K}$ ）的马约拉纳零能模载体，为未来马约拉纳零能模的研究和拓扑量子计算的探索提供了重要平台。研究工作得到国家自然科学基金委、科技部、北京市科学技术委员会和中科院战略性先导科技专项的支持。

[论文链接](#)

图1. $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ 中的能带计算与拓扑狄拉克表面态的观测

图2.超导态的测量

图3.在 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$
中观测到的能级序列整数量子化的拓扑涡旋束缚态，以及每个能级的涡旋束缚态的波函数空间分布

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