亮点

发现极端量子极限下的分立磁通态

侯兴元¹, 单磊^{1,2*}

1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 信息材料与智能感知安徽省实验室, 合肥 230601;

2. 安徽大学杂化材料结构与功能调控教育部重点实验室, 合肥 230601

*联系人, E-mail: lshan@ahu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-27; 接受日期: 2021-10-09; 网络出版日期: 2021-10-21

国家自然科学基金(编号: 12074002, 11804379)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2017YFA0302904, 2018YFA0305602)、安徽省领军人才团队项目(2019-16)和山东省基金重大基础研究项目(编号: ZR202105280001)资助

摘要 第II类超导体中的磁通态一直是超导研究领域的热点之一, 利用扫描隧道谱的方法, 人们通常可以观测到具有半整数倍分立能级的磁通束缚态. 最近, 研究人员发现在极端量子极限下, 磁通附近的准粒子态密度出现Friedel振荡调制, 并导致磁通束缚态的分立能级偏离于通常情况下的预期. 该结果对更精确地认知第II类超导体中的磁通态提供了重要的实验和理论支持.

关键词 铁基超导体, 磁通态, 扫描隧道谱, 量子极限**PACS:** 74.50.+r, 74.25.Qt, 73.20.At

第II类超导体具有负的表面能, 当外加磁场超过下临界场时, 磁场会以量子化磁通的形式进入到超导体内部, 使得准粒子激发束缚在磁通芯子区域, 形成一种特殊的量子受限体系. 1964年, 理论物理学家Caroli等人^[1]假设磁通芯子附近的超导能隙函数随空间线性变化, 预言了磁通束缚态具有分立的能量 $E_\mu = \pm \mu \Delta^2 / E_F$, $\mu = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$, 其中 Δ 是超导能隙, E_F 是费米能. 但是, 在大多数超导体中 $E_F \gg \Delta$, 导致这些分立能级的间距很小, 有限的测量温度下热激发会使得能级之间进一步弥散融合, 在扫描隧道谱上表现为零偏压电导峰偏离磁通中心即迅速劈裂. 近年来人们发现某些铁基超导体具有较小的费米能量 E_F , 磁通束缚态能级间距较大, 通过扫描隧道谱的方法能够比较容易地

探测出来. 比如铁基超导体 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$, 部分磁通的芯子里面具有上述半整数Caroli-de Gennes-Matricon (CdGM)束缚态^[2]. 当然, 作为一种表面拓扑缺陷, $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 的磁通中还可以形成马约拉纳零能模, 从而出现整数倍的分立能级^[3].

最近, 一类具有双 Fe_2As_2 层的新型自掺杂铁基超导体 $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$ 被发现, 其双层结构与铜氧化物高温超导体(如 Bi2212 , YBCO 等)非常类似^[4]. 超导临界温度 T_c 约为33.5 K, 尽管受Pauli顺磁极限的限制, 其上临界场也高达70 T^[5]. 比热等测量表明该体系与其他铁基超导体类似, 也具有多带超导性质^[6]. 角分辨光电子能谱实验发现该材料具有双层耦合导致的能带劈裂, 超导能隙在不同费米面上的分布存在明显差异^[7].

引用格式: 侯兴元, 单磊. 发现极端量子极限下的分立磁通态. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 117432

Hou X Y, Shan L. Exploring vortex bound states under extremely quantum limit (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 117432, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0270

中子散射实验发现 $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$ 的自旋共振模与铜氧化物超导体具有相似的色散关系, 为研究高温超导机理提供了新的平台^[8].

近日, 南京大学闻海虎教授研究团队^[9]利用极低温扫描隧道显微镜对该样品开展了系列研究工作, 发现 $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$ 表面态密度主要由 Γ 点附近的某个空穴型费米面所贡献, 费米能 E_F 仅约24 meV, 超导能隙约4.3 meV. 较大的超导能隙和较小的费米能满足了量子条件 $T/T_c \ll \Delta/E_F \sim k_F \xi_0$, 因此能够观察到清晰的磁通束缚态特征, 但束缚态能量之比为1:1.6:2.3:2.8, 明显偏离了CdGM理论所预言的1:3:5:...^[10]. 为了解实验结

果与经典理论的偏差, 他们通过自洽求解s波超导体Bogoliubov-de Gennes方程来计算磁通束缚态. 证实在极端量子极限下, 即 T/T_c 与 $k_F \xi_0$ 的比值极其小, 自洽求解的超导能隙具有类似tanh函数叠加一个Friedel振荡的形式, 从而导致束缚态能量偏离半整数关系, 与实验观测结果相吻合.

该工作很好地建立了满足极端量子条件的、干净的s波超导体的磁通态能级规律, 表明在此条件下磁通束缚态能量可以显著偏离通常得到的半整数能级, 磁通态密度可以表现出Friedel振荡, 对深入理解第II类超导体中的磁通态提供了重要的实验和理论支持.

参考文献

- 1 Caroli C, de Gennes P G, Matricon J. Bound Fermion states on a vortex line in a type II superconductor. *Phys Lett*, 1964, 9: 307–309; Kramer L, Pesch W. Core structure and low-energy spectrum of isolated vortex lines in clean superconductors at $T \ll T_c$. *Z Physik*, 1974, 269: 59–64; Klein U. Density of bound states in a vortex core. *Phys Rev B*, 1990, 41: 4819–4822
- 2 Chen M, Chen X, Yang H, et al. Discrete energy levels of Caroli-de Gennes-Matricon states in quantum limit in $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$. *Nat Commun*, 2018, 9: 970, arXiv: 1709.09401
- 3 Wang D, Kong L, Fan P, et al. Evidence for Majorana bound states in an iron-based superconductor. *Science*, 2018, 362: 333–335, arXiv: 1706.06074; Kong L, Zhu S, Papaj M, et al. Half-integer level shift of vortex bound states in an iron-based superconductor. *Nat Phys*, 2019, 15: 1181–1187, arXiv: 1901.02293
- 4 Wang Z C, He C Y, Wu S Q, et al. Superconductivity in $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$ with separate double Fe_2As_2 layers. *J Am Chem Soc*, 2016, 138: 7856–7859
- 5 Wang T, Zhang C, Xu L C, et al. Strong Pauli paramagnetic effect in the upper critical field of $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 227412, arXiv: 1910.04374
- 6 Wang T, Chu J N, Feng J X, et al. Low temperature specific heat of 12442-type $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$ single crystals. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 297412, arXiv: 1903.09447
- 7 Wu D, Hong W, Dong C, et al. Spectroscopic evidence of bilayer splitting and strong interlayer pairing in the superconductor $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$. *Phys Rev B*, 2020, 101: 224508, arXiv: 2001.04082
- 8 Hong W, Song L, Liu B, et al. Neutron spin resonance in a quasi-two-dimensional iron-based superconductor. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 117002, arXiv: 2005.06146
- 9 Duan W, Chen K, Hong W, et al. Single-particle tunneling spectroscopy and superconducting gaps in the layered iron-based superconductor $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$. *Phys Rev B*, 2020, 103: 214518, arXiv: 2102.08785
- 10 Chen X, Duan W, Fan X, et al. Friedel oscillations of vortex bound states under extreme quantum limit in $\text{KCa}_2\text{Fe}_4\text{As}_4\text{F}_2$. *Phys Rev Lett*, 2020, 126: 257002, arXiv: 2102.12150

Exploring vortex bound states under extremely quantum limit

HOU XingYuan¹ & SHAN Lei^{1,2*}

¹ *Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;*

² *Key Laboratory of Structure and Functional Regulation of Hybrid Materials of Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, China*

The vortex state of type-II superconductors is vital for both fundamental physics and applications. Earlier research works have revealed discrete vortex-bound states near a vortex core with half-integer energy levels. Most recently, the energy levels under an extremely quantum limit were observed in an iron-based superconductor, which are considerably modified through the Friedel-like oscillation of superconducting order parameter, thus deviating from the traditional law. These results highlight a general understanding of the vortex core state in type-II superconductors.

iron-based superconductor, vortex states, scanning tunneling spectroscopy, quantum limit

PACS: 74.50.+r, 74.25.Qt, 73.20.At

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0270](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0270)