

观点和展望

超导能隙振荡: 到底来自配对密度波还是拆对散射?

殷嘉鑫^{1)†} 王强华²⁾

1) (南方科技大学物理系, 深圳 518055)

2) (南京大学物理学院, 固体微结构物理国家重点实验室, 南京 210093)

(2024 年 6 月 6 日收到; 2024 年 7 月 4 日收到修改稿)

早在 1965 年, 于渌先生发表在《物理学报》的经典理论工作就指出: 超导能隙在磁性杂质周围会产生微弱的周期性振荡. 近十年来, 一系列高分辨率的扫描隧道显微实验观测到超导体内能隙在空间中的微弱振荡行为并指认为配对密度波. 据此情况, 李东海等理论学者近期指出, 在多种情况下, 杂质拆对散射构成的干涉效应也会导致能隙在空间形成周期性振荡. 我们讨论这两种观点的对立与统一, 以及它们和实验的联系.

关键词: 超导, 配对密度波, 扫描隧道显微镜**PACS:** 74.25.Jb, 74.55.+v, 74.62.En**DOI:** 10.7498/aps.73.20240807

1 配对密度波与拆对散射的对立与统一

超导是一种神奇的宏观量子态, 超导材料表现有零电阻和完全抗磁性. 一般认为形成这种量子态, 首要的微观机理是要使得材料费米能处的电子形成两两配对, 配对电子的动量相反, 即配对电子的波矢为零^[1]. 这种情况下, 配对序参量不会呈现出波动特性, 衡量配对电子束缚能的超导能隙在空间中呈现均匀分布. 20 世纪 60 年代初, 理论学家 Fulde P, Ferrell R A 和 Larkin A I, Ovchinnikov Y N 预言在磁场作用下, 配对电子的总动量不为零, 呈现出有限波矢^[2,3]. 这种超导态就会呈现出波动的特性, 称为配对密度波态或者“FFLO”态. 在“FFLO”态中, 超导能隙在空间中会呈现出周期为 $2\pi/Q$ 的振荡 (图 1(a)), 其中, FF 态是平面波形式的配对密度波, $\Delta(\mathbf{r}) = \Delta_0 e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}}$, 而 LO 是驻波形式的配对密度波, $\Delta(\mathbf{r}) = \Delta_0 \cos(\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r})$. 近十几年间, 随着扫描隧道显微技术的发展与测量精度的提高, 学者们逐渐在多种超导量子材料中观测到了超导能隙在空间中的微弱振荡行为 (振荡幅度占能隙

平均值的 5% 左右)^[4-12], 并指认为类比于“FFLO”态的配对密度波.

同样在 20 世纪 60 年代初, 我国理论学者于渌在国内有限的科研条件下发现了超导体内磁性杂质的拆对行为, 即超导能隙内形成局域束缚态^[13]. 这项工作在国际上被广泛认为是超导领域内的经典之作. 于渌先生的论文附录中详细推导了能隙在杂质周围的周期性振荡行为 (图 1(b)), 并指出了这种变化的量级在 $1/15$ (图 2). 这在当时来看确实是一个可以忽略的小量, 然而却与当前实验观测到的能隙振荡幅度的数量级吻合. 近期, 李东海等^[14]则进一步指出了在多种情况下 (包括磁性杂质、非磁性杂质、相位变化的超导序参量、磁性超导体等), 多个杂质的拆对散射形成干涉后可以形成全局的能隙的周期性振荡. 这样的振荡行为可能不涉及相位调制, 并区别于配对密度波.

量子世界中, 对立往往隐喻着统一. 上述两种振荡机制的确又有着深刻的联系. 例如, “FFLO”态中引入的磁场是明确破坏时间反演对称性的^[2,3]; 磁性杂质也是因为明确破坏了时间反演对称性, 从而破坏超导电性, 并产生局域束缚态和能隙振荡^[13];

† 通信作者. E-mail: yinjax@sustech.edu.cn

当超导材料存在自发性的时间反演对称性破缺时, 非磁性杂质也可破坏超导并激发出能隙振荡^[14]. 因此, 配对密度波与拆对散射似乎都与时间反演对称性破缺有着统一的内禀联系. 进一步, 二者在关联体系内甚至可能存在着混合: 当杂质拆对散射在某个特定波矢特别强且呈现发散趋势时, 往往也意味着此处费米面的失稳, 有可能在相同波矢涌现出丰富的密度波态.

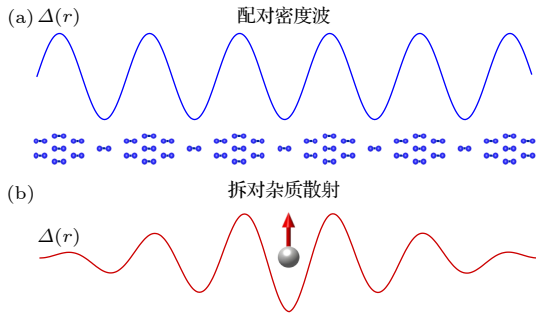


图 1 配对密度波 (a) 与拆对杂质散射 (b) 造成的超导能隙振荡

Fig. 1. Superconducting gap modulations induced by pair density waves (a) and pair-breaking scatterings (b).

2 实验上的区分

目前发表的大多数论文把已有的实验数据都解释成配对密度波. 如此是否准确, 成为领域内值得深思的问题. 我们从扫描隧道显微谱学技术和理论层面对这个难题进行一些抛砖引玉的剖析. 在实验中, 扫描隧道显微镜一般是对超导样品的某一个小的区域进行能隙的谱学成像, 对实空间数据傅里叶变换后得到能隙振荡的波矢. 另一种测量方法是利用超导针尖与超导样品实现约瑟夫森隧道结, 对约瑟夫森电流或者是约瑟夫森零能电导峰进行空

间成像, 再对实空间数据进行傅里叶变换后得到所谓配对电子密度振荡的波矢. 值得注意的是, 这里配对电子密度并不直接对应于超流密度, 而是一个唯象局域波函数的密度, 实则经过严格推导后对应于超导能隙的一个复杂函数^[15], 近似与能隙大小的平方值成比例. 这样, 约瑟夫森扫描隧道显微镜测量到的信号仍然是超导能隙的空间振荡行为, 并不能被夸大认为是通常意义上的配对电子超流密度的波动. 这样, 两种实验方法实则都是测量超导能隙振荡行为, 我们也无法用后者严格区分配对密度波和拆对杂质散射.

拆对杂质散射机理一般要求存在杂质或者晶体缺陷, 而配对密度波则是发生在不依赖杂质的纯洁晶格中电子结构的行为. 因此, 实验中如果在没有杂质或缺陷的干净区域测量到能隙振荡, 则很大可能是来自配对密度波. 实验中如果只在杂质或缺陷附近测量到能隙振荡, 而在干净区域振荡消失, 则很大可能是拆对散射; 在这种情况下, 振荡信号在倒空间中一般呈现弧形或者圆形结构, 部分反映出费米面的几何. 当测量到的能隙振荡在杂质附近出现, 且在倒空间结构呈现为点状信号时, 则既可能来自配对密度波, 又可能来自能带结构中态密度比较大的点状区域 (hot spot) 间的散射 (杂质拆对散射), 亦或是二者的混合.

在这种最难的情况下, 如果信号真的是来自纯净的配对密度波, 在理论上有可能利用博戈留波夫 (Bogoliubov) 费米面 (如文献^[16]) 对配对密度波的存在进行确认. 在有限动量配对下, 超导能隙并不严格在所有费米波矢打开在费米能, 在某些动量位置, 超导能隙打开在费米能旁边, 这样会有残留的费米面形成博戈留波夫费米面. 博戈留波夫费米面在动量空间的几何形状应当与配对电子的波

当 $r \gg \xi_0$ 时, 可将积分限延至 $(0, \infty)$, 则

$$\frac{\delta\Delta(\mathbf{r})}{\Delta_0} = \frac{b2m}{r^2} (V' \cos 2k_F r - \sin 2k_F r) \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\xi_0}{r}} e^{-\frac{2r}{\pi\xi_0}}. \quad (I.9)$$

当 $r \ll \xi_0$ 时, $\cos 2kr$ 等可提出积分限, 有

$$\frac{\delta\Delta(\mathbf{r})}{\Delta_0} = \frac{b2m}{r^2} \ln \frac{2\omega}{\Delta_0} (V' \cos 2k_F r - \sin 2k_F r). \quad (I.10)$$

估计在一个原胞边上能隙的变化

$$\left| \frac{\delta\Delta(r_0)}{\Delta_0} \right| \approx \frac{1}{3} \frac{V}{\varepsilon_F} \frac{1}{1+V'^2} r_0 k_F.$$

其中 $r_0 k_F = \sqrt{\frac{9\pi z}{4}}$, $V' = \frac{V}{\varepsilon_F} \frac{3\pi z}{4}$, z 是价电子数, 若设 $\frac{V}{\varepsilon_F} = \frac{1}{5}$, $z = 3$, 则 $\left| \frac{\delta\Delta(r_0)}{\Delta_0} \right| \approx \frac{1}{15}$, 这确是一个小量.

图 2 于渚对磁性杂质周围能隙振荡的推导与量级估算, 节选自文献^[13]

Fig. 2. Results on superconducting gap modulations near the magnetic impurities by Lu Yu from Ref. ^[13].

动波矢有着严格的倒空间-实空间对应关系. 如果探测到这样的对应关系, 则可以锁定配对密度波起源. 值得注意的是, “FFLO”意义下的配对密度波都是针对可以局部定义的配对序参量而言的. 在许多强关联系统中, 由于局域库仑排斥, 配对更可能发生在近邻键上. 这种情况下, 配对密度波与谱学能隙或约瑟夫森电流的关系更为复杂, 值得在理论和实验上进一步厘清. 但这种复杂性不影响利用博戈留波夫费米面来判断配对密度波的准确性, 因此后者具有更好的通用性优势. 近期, 我们利用以上原则在笼目超导材料 KV_3Sb_5 和 CsV_3Sb_5 中用 (约瑟夫森) 扫描隧道显微镜对两种类型的能隙振荡进行了初步的区分, 并尝试把来自配对密度波的振荡和可能存在的博戈留波夫费米面进行联系^[17], 希望对深刻理解两种机制的区别和联系起到推动作用.

参考文献

- [1] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R 1957 *Phys. Rev.* **108** 1175
- [2] Fulde P, Ferrell R A 1964 *Phys. Rev.* **135** A550
- [3] Larkin A I, Ovchinnikov Y N 1965 *Sov. Phys. JETP* **20** 762
- [4] Hamidian M, Edkins S D, Joo S H, et al. 2016 *Nature* **532** 343
- [5] Du Z Y, Li H, Joo S H, Donoway E P, Lee J, Séamus Davis J C, Gu G D, Johnson P D, Fujita K 2020 *Nature* **580** 65
- [6] Chen H, Yang H T, Hu B, et al. 2021 *Nature* **599** 222
- [7] Liu X, Chong Y X, Sharma R, Davis J C S 2021 *Science* **372** 1447
- [8] Zhao H, Blackwell R, Thinel M, et al. 2023 *Nature* **618** 940
- [9] Liu Y Z, Wei T C, He G Y, Zhang Y, Wang Z Q, Wang J 2023 *Nature* **618** 934
- [10] Aishwarya A, May-Mann J, Raghavan A, Nie L M, Romanelli M, Ran S, Saha S R, Paglione J, Butch N P, Fradkin E, Madhavan V 2023 *Nature* **618** 928
- [11] Gu Q, Carroll J P, Wang S Q, Ran S, Broyles C, Siddiquee H, Butch N P, Saha S R, Paglione J, Séamus Davis J C, Liu X L 2023 *Nature* **618** 921
- [12] Agterberg D F, Séamus Davis J C, Edkins S D, et al. 2020 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **11** 231
- [13] Yu L 1965 *Acta Phys. Sin.* **21** 75 (in Chinese) [于渌 1965 物理学报 **21** 75]
- [14] Gao Z Q, Lin Y P, Lee D H 2023 arXiv: 2310.06024 [cond-mat.supr-con]
- [15] Ambegaokar V, Baratoff A 1963 *Phys. Rev. Lett.* **11** 104
- [16] Jin J T, Jiang K, Yao H, Zhou Y 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 167001
- [17] Deng H B, Qin H L, Liu G W, et al. 2024 *Nature* DOI: 10.1038/s41586-024-07798-y

VIEWS AND PERSPECTIVES

Superconducting gap modulations: Are they from pair density waves or pair-breaking scattering?

Yin Jia-Xin^{1)†} Wang Qiang-Hua²⁾

¹⁾ (Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

²⁾ (National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(Received 6 June 2024; revised manuscript received 4 July 2024)

Abstract

In his seminal work published in *Acta Physica Sinica* in 1965, Yu Lu pointed out that the superconducting gap exhibits weak modulations near the pair-breaking magnetic impurity in a superconductor. In the past ten year, a series high-resolution scanning tunneling microscopy works reported weak superconducting gap modulations in certain superconductors and explained these phenomena as pair density waves. In line with Yu Lu's discovery, Lee D H et al. pointed out that in many cases, the interference effect of pair-breaking scattering can also lead to superconducting gap modulations in space. We will discuss the distinction and unification of these two kinds of mechanisms, as well as their relevance to recent experimental observations.

Keywords: superconductivity, pair density waves, scanning tunneling microscopy

PACS: 74.25.Jb, 74.55.+v, 74.62.En

DOI: 10.7498/aps.73.20240807

† Corresponding author. E-mail: yinjax@sustech.edu.cn



超导能隙振荡：到底来自配对密度波还是拆对散射？

殷嘉鑫 王强华

Superconducting gap modulations: Are they from pair density waves or pair-breaking scattering?

Yin Jia-Xin Wang Qiang-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 157401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240807

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240807>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钪基笼目超导体

Kagome superconductors

物理学报. 2022, 71(11): 118103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220891>

低维材料中的电荷密度波

Charge density waves in low-dimensional material

物理学报. 2022, 71(12): 127103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220052>

InGaAs(110)解理面的扫描隧道谱的理论诠释

Theoretical explanation of scanning tunneling spectrum of cleaved (110) surface of InGaAs

物理学报. 2021, 70(19): 196801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210419>

用于扫描隧道显微镜的低噪声前置电流放大器

Low-noise preamplifier for scanning tunneling microscope

物理学报. 2024, 73(13): 130702 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240560>

二维范德瓦耳斯材料的超导物性研究及性能调控

Two-dimensional van der Waals: Characterization and manipulation of superconductivity

物理学报. 2022, 71(18): 187401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220638>

FeSe/SrTiO₃高温超导体中的电子条纹相

Stripe phase in high- T_c superconductor FeSe/SrTiO₃

物理学报. 2022, 71(12): 127304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220118>