

What is the pairing mechanism behind high-temperature superconductivity?

高温超导体的电子配对机制

李涛

中国人民大学物理学系, 北京 100872

E-mail: litao_phys@ruc.edu.cn

2016-02-01 收稿, 2016-02-03 修回, 2016-02-03 接受, 2016-03-02 网络版发表

国家自然科学基金(11174364)和中国人民大学研究基金资助

摘要 高温超导体中的电子配对机制是高温超导机理研究中一个重要的课题. 经过近30年的研究, 人们已经逐步取得了磁性关联是导致高温超导体电子d-波配对驱动力的共识. 但是如何从这一共识出发理解高温超导体的复杂物理性质, 尤其是与欠掺杂区域的赝能隙现象相关联的一系列反常物理性质, 仍然是一个重大的挑战. 解决这个问题的关键在于理解强关联效应导致的高温超导体电子的巡游-局域二元性.

关键词 高温超导体, 配对机制, 赝能隙, 磁性涨落

超导是一种重要的宏观量子现象, 电子波函数的量子刚性是超导的根本原因. 电子配对以及电子对的相干凝聚是实现这一量子刚性的一种重要方式. 自1957年BCS配对理论提出以来, 它一直是理解超导现象的基础. 尽管非电子配对机制也有可能导致电子体系的量子刚性, 但到目前为止, 这些机制还未得到实验的支持.

超导电子配对机制的研究分为驱动机制和配对形式研究这两个相互关联的方面. 高温超导体发现不久, 人们已经通过磁通量子化从实验上证明高温超导体的超导态存在电子配对. 与传统BCS超导体不同, 高温超导体的电子配对被普遍认为来源于非电-声子相互作用机制. 关于这一点最直接的证据来自于准粒子散射率的测量. 实验发现, 在超导临界温度上下, 高温超导体中准粒子的散射率存在显著差异^[1]. 这种差别表明造成准粒子散射的主要原因不是其与声子的耦合, 而是与某种电子体系自身的集体激发的相互作用. 同时, 电子的配对将对这种集体模式产生显著的反馈.

反铁磁涨落被认为是高温超导体中造成准粒子散射的最重要的集体模式. 高温超导体的超导相来

自于在反铁磁绝缘母体相上的载流子掺杂. 大量实验证据表明, 高温超导体的超导态中仍然存在显著的反铁磁涨落, 而且该涨落的行为在超导相变发生前后有显著的差别. 这其中最为典型的表现是高温超导体超导态出现的共振中子峰现象. 我们可以采用BCS理论框架定性地理理解反铁磁涨落导致的超导配对^[2,3]. 按照这一理论, 超导能隙函数 Δ_k 需要满足如下形式的自洽方程:

$$\Delta_k = -\sum_{k'} \Gamma(k-k') \frac{\Delta_{k'}}{2E_{k'}}$$

其中 $\Gamma(q)$ 代表由反铁磁涨落传递的有效相互作用, 它正比于体系的自旋极化率 $\chi(q)$, 并且在 $q=Q=(\pi, \pi)$ 处达到极大. $E_k = \sqrt{\epsilon_k^2 + \Delta_k^2}$ 是超导准粒子的激发能量. 根据这一方程, 要形成稳定的电子配对, Δ_k 与 Δ_{k+Q} 需要具有相反的符号. 在实空间中, 这意味着电子配对发生在最近邻格点之间, 而非发生在同一格点上. 如果进一步考虑高温超导体费米面的形状, 那么d-波配对将是唯一的选择. 目前, 大量实验明确无误地证明高温超导体的电子配对具有d-波形式^[4]. 这对交换反铁磁涨落的电子配对机制是一个强有力的支持.

引用格式: 李涛. 高温超导体的电子配对机制. 科学通报, 2016, 61: 1148-1150

Li T. Pairing mechanism of the high temperature superconductors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1148-1150, doi: 10.1360/N972016-00147

而另一方面,在d-波超导配对状态下,BCS相干因子将会加强体在反铁磁波矢上的磁性涨落,并在超导能隙以下形成共振峰^[5].具体地,自旋涨落对应的BCS相干因子具有如下形式:

$$C(k, q) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_k \epsilon_{k+q} + \Delta_k \Delta_{k+q}}{E_k E_{k+q}} \right).$$

在费米面上,若 $\Delta_k \Delta_{k+q} < 0$,则动量为 q 的自旋涨落将受到加强.这种超导反馈效应现在已经成为检验非常规超导体配对形式的一种重要手段.

因此,尽管交换反铁磁涨落并非高温超导体电子配对唯一可能的机制,但无疑是理论预言最为丰富、得到实验验证最为全面的配对机制.同时,这一机制的研究也为理解其他非电-声子机制的超导体体系,如铁基超导体、重费米子超导体的超导机理积累了重要的经验.然而,这并不表明关于高温超导体配对机制的研究已经终结.高温超导体是一个强关联电子体系.因此,关于高温超导体磁性关联和超导电性的讨论都应该建立在关联电子的基础之上.BCS理论虽然可以定性解释高温超导体电子配对的d-波特征,但是由于其弱关联的本质,并不能提供高温超导体物理行为完整的描述,尤其是不能描述与赝能隙现象相关的一系列物理行为.这里涉及两个关键的物理问题,即如何理解高温超导体中电子所表现出的巡游-局域二元性,以及如何在这一前提下理解高温超导体中磁性关联和超导的相互关系.

高温超导相图中的赝能隙区按照温度可以大致分为上赝能隙区和下赝能隙区两部分.在上赝能隙区,大量实验表明体系中的反铁磁涨落随着温度下降逐渐加强,而布里渊区其他区域的磁性涨落则相应地受到抑制^[6].更进一步的分析表明,这种磁性涨落在动量空间的重新分布行为可以近似地看作一个局域磁矩系统的量子临界行为^[7],但很难从巡游电子图像加以理解.这意味着局域磁矩的高能涨落将稳定地存在于掺杂后的高温超导体中.这一预言最近

得到了RIXS实验强有力的支持^[8].这些实验发现,高温超导体母体材料中的高能自旋波可以稳定地存在于掺杂后的高温超导体中,即使体系已经远离磁性有序区域并且已经表现出典型的准粒子巡游行为,且这些高能自旋涨落模式的色散关系和积分权重几乎与掺杂浓度无关.这种局域磁矩行为和巡游电子行为共存的电子二元性向高温超导机理研究提出了重要的挑战,同时也极有可能是高温超导体赝能隙区一系列反常物理行为的根源,例如费米弧现象^[9]、两个能隙尺度现象^[10]、高能kink现象^[11]等.在下赝能隙区,磁性涨落权重随温度下降逐渐由低能向高能转移,且这一趋势在整个布里渊区基本一致^[12].磁性涨落在频率空间的这种重新分布的一个自然起源是超导配对对于磁性涨落的反馈作用.这一反馈作用的存在是高温超导配对机制区别于传统电-声子相互作用机制的最显著的特征.但是如何在上述电子巡游-局域二元性的框架下理解这种反馈作用及其物理后果,以及更加一般地理解高温超导体中超导与反铁磁之间的相互关系,至今仍然是一个未解决的问题.

局域磁性涨落区别于巡游磁性涨落的一个重要特征是前者满足局域自旋的求和规则.这一求和规则在共振价键理论中得到了自然的体现.之前的研究工作表明,共振价键理论可以同时描述高温超导体电子的局域磁矩行为和巡游电子行为,因此它是描述高温超导体超导配对机制以及超导与反铁磁相互关系问题的一个可行的出发点^[13-15].但是在共振价键理论框架下如何就上述物理问题进行可控的计算目前仍然是一个没有完全解决的问题.

总之,高温超导体配对机制的关键困难在于理解掺杂莫特绝缘体背景上的反铁磁与超导之间的关系.这一个问题是目前凝聚态物理中一个重大的未解决问题.共振价键理论是解决这一问题的一个可能途径.

参考文献

- 1 Bonn D A, Dosanjh P, Liang R, et al. Evidence for rapid suppression of quasiparticle scattering below T_c in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Phys Rev Lett*, 1992, 68: 2390-2393
- 2 Scalapino D J. The case for $d_{x^2-y^2}$ pairing in the cuprate superconductors. *Phys Rep*, 1995, 250: 329-365
- 3 Kampf A P. Magnetic correlations in high temperature superconductivity. *Phys Rep*, 1994, 249: 219-351
- 4 Tsuei C C, Kirtley J R. Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 969-1016
- 5 Fong H F, Keimer B, Anderson P W, et al. Phonon and magnetic neutron scattering at 41 meV in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 316-319

- 6 Takigawa M, Reyes A P, Hammel P C, et al. Cu and O NMR studies of the magnetic properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.65}$ ($T_c=62$ K). *Phys Rev B*, 1991, 43: 247–257
- 7 Sokol A, Pines D. Toward a unified magnetic phase diagram of the cuprate superconductors. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 2813–2816
- 8 Tacon M Le, Ghiringhelli G, Chaloupka J, et al. Intense paramagnon excitations in a large family of high-temperature superconductors. *Nat Phys*, 2011, 7: 725–730
- 9 Norman M, Ding H, Randeria M, et al. Destruction of the Fermi surface in underdoped high- T_c superconductors. *Nature*, 1998, 392: 157–160
- 10 Tacon M Le, Sacuto A, Georges A, et al. Two energy scales and two distinct quasiparticle dynamics in the superconducting state of underdoped cuprates. *Nat Phys*, 2006, 2: 537–543
- 11 Valla T, Kidd T E, Yin W G, et al. High-energy kink observed in the electron dispersion of high-temperature cuprate superconductors. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 167003
- 12 Rossat-Mignod J, Regnault L P, Vettier C, et al. Neutron scattering study of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ system. *Phys C*, 1991, 185: 86–92
- 13 Li T, Yang F. Variational study of the neutron resonance mode in the cuprate superconductors. *Phys Rev B*, 2010, 81: 214509
- 14 Yang F, Li T. Theory of the quasiparticle excitation in high- T_c cuprates: Quasiparticle charge and nodal-antinodal dichotomy. *Phys Rev B*, 2011, 83: 064524
- 15 Pei J, Liao H, Li T. On the high energy spin excitations in the high temperature superconductors: An RVB theory. 2013, arXiv:1305.4834

Pairing mechanism of the high temperature superconductors

LI Tao

Department of Physics, Renmin University of China, Beijing 100872, China

The pairing mechanism of the high temperature superconductors is one of the most important issues in the study of the high temperature superconductivity. After the intensive investigation in the past three decades, it is now commonly accepted that the d-wave pairing in the high temperature superconductors is driven by the exchange of the antiferromagnetic spin fluctuation in the system. However, an open problem remains: how to understand the complex phase diagram of the high temperature superconductors, especially the anomalous behaviors related to the pseudogap phenomena in the underdoped regime. The key to the answer of this question lies in the local-itinerant dualism of the electron in these systems.

high temperature superconductors, pairing mechanism, pseudogap, magnetic fluctuation

doi: 10.1360/N972016-00147



李涛

1996年在中国科技大学物理学系获得凝聚态物理硕士学位(本硕连读), 1999年在北京大学物理学系获得凝聚态物理博士学位. 1999~2005年在清华大学高等研究中心从事研究工作, 从2005年起为中国人民大学物理学系教授. 主要研究领域为强关联电子体系的基础理论研究, 重点关注高温超导微观机理和量子磁性理论研究. 在高温超导的共振价键理论和量子自旋液体的理论研究和数值模拟方法方面取得一系列成果, 在国际主流期刊发表约40篇论文.