

高温超导体中超导位相涨落:Nernst 效应研究

Phase Fluctuations in High- T_c Superconductors: Nernst Effect Study

许祝安/XU Zhu-an,朱增伟/ZHU Zeng-wei,沈静琴/SHEN Jing-qin

浙江大学物理系,杭州 310027

Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

[摘要] 高温超导体赝隙态具有许多反常的现象,与高温超导机理之间有密切联系,一直是研究的焦点。有理论提出在赝隙态存在预超导配对。能斯特(Nernst)效应测量探测到了超导转变温度 T_{c0} 以上温区一定范围内存在磁通涡旋激发,支持了赝隙态中存在有限的超导序参量振幅和强烈的位相涨落的图象,说明 T_{c0} 处的相变是由 Cooper 对之间长程位相关联的消失所驱动的。

[关键词] 高温超导体,赝隙,位相涨落,能斯特效应

[中图分类号] O511⁺.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)12-0033-04

Abstract: Many anomalous phenomena have been found in the pseudogap state of high- T_c superconductors, and a close relationship between pseudogap state and superconducting state has been proposed, which makes it a focus of interests. Theoretic models predict that preformed Cooper pairs can exist in the pseudogap state. Nernst effect measurements have detected vortex-like excitations in a certain temperature range above superconducting transition temperature, which strongly support that the pseudogap phase is characterized by finite pairing amplitude with strong phase fluctuations and imply that the phase transition at T_c is driven by the loss of long-range phase coherence.

Key Words: high- T_c superconductors, pseudogap, phase fluctuations, Nernst effect

CLC Number: O511⁺.4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)12-0033-04

1 引言

1986 年缪勒(Muller)和贝德诺兹(Bednorz)报道镧-钡-铜-氧体系具有 35 K 的高温超导性^[1],引发了一场全球的高温超导研究热潮。经过近 20 年的研究,铜氧化物超导体的最高超导临界温度在常压下达达到 138 K,在高压条件下已经达到 160 K 左右^[2]。高温超导体无论在强电应用和弱电应用上都取得巨大的进展。然而,高温超导机理仍然是个未解之谜,吸引着众多物理学家的注意。

现在通常说的高温超导体也就是铜氧化物超导体,均具有钙钛矿或由钙钛矿型结构畸变或衍生而成的结构^[3],其中铜、氧离子四方排列而成的铜氧(CuO_2)平面是对超导最重要的单元。铜氧化物超导体的母体是反铁磁绝缘体,通过掺杂在 CuO_2 平面上引入合适的载流子浓度而出现高温超导电性。由于 Cu 3d 电子之间强的关联效应,铜氧化物超导体的正常态不能简单地用朗道的费米液体理论来描述,而且存在着反铁磁涨落、电荷密度波、条纹相(stripe phase)等有序态与超导序竞争或共存。Orenstein 和 Millis 在 2000 年初曾在《科学》(Science)刊物上撰文指出^[4]:自旋与电荷的非匀质性,即所谓“条纹”(stripes);超导态的低温性质;位相相干与赝隙的起源;费米面及其在非超导态或正常态的各向异性,是在高温超导研究领域 4 个发展得特别快的前沿领域。其中关于赝隙的起源及其本性的研究更是与超导机理紧密联系在一起,一直是本领域的研究热点。

本文首先简短地介绍高温超导体的赝隙态,然后说明能斯特(Nernst)效应的测量是探测磁通涡旋运动的有效方法。对高温超导体的能斯特(Nernst)效应的研究结果表明在赝隙态测量到的反常 Nernst 信号可能来自一种类磁通涡旋激发,说明 T_c 以上存在着强烈的超导涨落,支持了赝隙态是预超导态的图象。

2 赝隙态与位相涨落

高温超导体由于载流子浓度不高,电子间的关联作用很强,其正常态不符合 Fermi 液体理论的预言,正常态和超导态的性质有很多方面不同于常规超导体^[5]。空穴型的铜氧化物超导体都有着如图 1 所示的电子态相图,其横坐标 p 为通过化学掺杂引入的载流子浓度,常简称为掺杂浓度。当掺杂浓度 $p=0$ (未掺杂),即高温超导体的母体,在奈耳温度 T_N 以下它是反铁磁的 Mott 绝缘体。由于 Cu 离子的 d^9 电子构型,铜氧面上的每个铜原子贡献 1 个未成对的 d 轨道电子,因此,按照能带论,未掺杂的超导体母体应该是金属。但是由于 d 轨道电子之间存在很强的短程库仑相互作用,d 电子被定域在各个格点附近,不能自由移动,所以事实上它们都是具有长程反铁磁序的 Mott 绝缘体。随着空穴掺杂浓度 p 增加(对于 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $p=x$),反铁磁转变温度 T_N 迅速下降,金属性质逐渐产生。大约在 $p=0.02$,长程反铁磁序被破坏,但短程的反铁磁涨落仍然存在,体系逐渐演变为自旋玻璃态。大约在空穴掺杂浓度 $p=0.05$ 左右系统就进入超导相,并在 $p_{qs}=0.15$ 左右超导

收稿日期:2005-11-14

基金项目:国家杰出青年科学基金资助课题(10225417)

作者简介:许祝安,男,杭州市浙大路 38 号浙江大学,教授,主要从事高温超导体和强关联电子体系的物性研究;

E-mail: zhuan@zju.edu.cn

临界温度 T_c 达到最大,一般称该掺杂浓度为最佳掺杂。在最佳掺杂的左边或右边,超导转变温度都下降, T_c 与 p 的关系曲线像钟形。通常把相图中 $p < p_{opt}$ 的区域称为欠掺杂区 (underdoped regime), $p > p_{opt}$ 的区域称为过掺杂区域 (overdoped regime)。在欠掺杂区,还发现在 T_c 以上还存在着另外一条线 T^* , 对应着赝隙的打开。所谓赝隙 (pseudogap, PG), 即不完全的能隙,在费米面上有些区域出现能隙(在此区域的电子不参与导电),而在另一些区域费米面仍旧保留着,费米面态密度受到了部分的抑制。在过掺杂区,大约在 $p=0.25$ 处 T_c 下降为零,体系的性质类似于通常金属(称为类 Fermi 液体)。

对于相图中的不同区域的特性,现在已经比较确定的是:①在 $p \sim 0$ 区域,当 $T < T_N$ 时是绝缘的反铁磁体,理论上可以用 Hubbard 模型或者 t-J 模型等描述;②在超导态 ($T < T_c$), 超导电子对仍是自旋单重态的,但其超导波函数具有 d 波对称性,超导序参量在某些位置有节点(nodes),在节点处超导序参量的振幅 $\Delta=0$;③在欠掺杂区域,在 T_c 以上就有 1 个赝能隙打开,表明这里存在某种有序。在欠掺杂区域,不同的探测手段在 T_c 以上可以得到 2 个不同的特征温度 T^* , 所以有人还认为 2 个特征温度分别对应于自旋自由度和电荷自由度上的赝能隙,也有的认为它们分别对应于“条纹”序和自旋能隙等等。

赝隙现象可以认为是所有空穴型的铜氧化物超导体的一个普遍特征。不同的测量手段,例如核磁共振 NMR、光电导、角分辨率光电子谱 ARPES、电阻率温度关系、Hall 角温度关系等都能发现在 T_c 以上的赝隙打开。赝隙不仅在自旋激发谱上而且在电荷激发谱上都存在。关于赝隙的综述文章可以参见文献[6]。现在一般认为,在欠掺杂区 T^* 远高于 T_c , 随着掺杂空穴浓度的增加而单调降低,并逐渐靠近 T_c ; 超导能隙和赝隙都是各向异性的,具有“节点”或“节段”(nodal arc)。

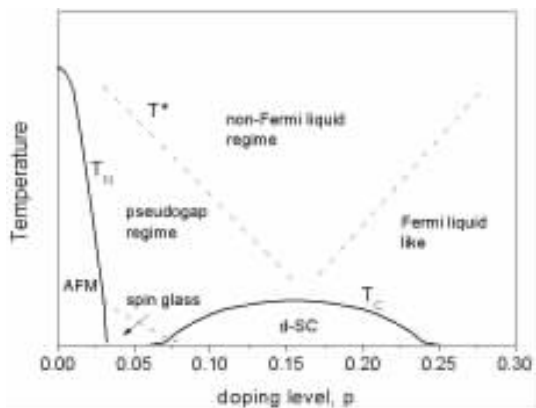


图 1 高温超导体的模型电子相图

Fig.1 The typical electronic phase diagram of high- T_c superconductors

目前理论上存在着各种各样对赝能隙的解释,根据赝隙与超导电性之间的关系,总的来说可以把理论解释归纳为两大类。第一类理论,认为赝隙相是超导相的先驱,超导发生在赝隙的基础上。例如,Emery 和 Kivelson^[7]认为,在远高于 T_c 的 T^* 温度,Cooper 对就开始形成,由于磁通涡旋激发破坏了 Cooper 对之间的长程位相关联,直到 $T=T_c$ 才形成长程相相干,出现 Meissner 态和零电阻。由于高温超导体的超流密度很低,而且 CuO_2 具有准二维特性,所以他们认为超导序参量的位相涨落特别重要,是位相的长程关联决定了超导转变温度 T_{c0} 。第二类理论认为赝隙与超导电性之间没有直接的联系,赝隙来自其它某种有序基态或者涨落,比如 AFM 涨落、电荷密度波(CDW)、条纹相(stripes)等等,与超导序共存或相互竞争。在第二类图象中具有“量子临界”现象,在零温度下在某个掺杂浓度 p_c 存在着量子临界点(QCP)。

Emery 和 Kivelson^[7]提出,超导能隙 Δ 和位相刚度 (phase stiffness) 是决定超导序的 2 个重要能量尺度,前者代表了电子形成 Cooper 对束缚态的能力,后者代表了超导态承载超流的能力。在常规超导体中,超流密度很大,即位相刚度很大,超导转变温度只决定于超导配对形成的温度 ($T_c^{\text{MF}} \sim \Delta$),在超导 Cooper 对形成的同时即建立了 Cooper 对之间的位相关联。而在高温超导体中,超流密度很低,相应的位相刚度也低。对于二维超导系统,Emery 和 Kivelson^[7]给出超导位相相干性消失的温度: $T_c^0 \sim \hbar^2 n_s(0) d / m^*$, 这里 d 是层间距离, $n_s(0)$ 为 $T=0$ 时的超流密度, m^* 为 Cooper 对的有效质量。 T_c^0 定量地代表了位相刚度。在欠掺杂区域,由于超流密度很低, T_c^0 小于平均场的转变温度 T_c^{MF} , 所以实际的超导转变温度 T_c 决定于 T_c^0 。他们认为在赝隙态,即 $T < T^*$, 局域的 Cooper 对开始形成,磁通涡旋激发破坏了它们位相的关联,长程位相关联在更低的温度 T_c^0 才开始建立,超导转变温度 $T_c = T_c^0$, 所以在欠掺杂区域实际的超导转变温度 T_c 与掺杂浓度成正比。在过掺杂区域, T_c^0 大于平均场的转变温度 T_c^{MF} , 所以实际的超导转变温度 T_c 决定于 T_c^{MF} , 而 T_c^{MF} 随掺杂浓度增加是单调下降的, T_c 在过掺杂区域是随掺杂浓度增加而下降的。这个图象与图 1 中 T_c 与掺杂浓度的变化关系是一致的。Uemura 小组^[8]利用 μ 子自旋弛豫 (μSR) 的方法证实超导转变温度 T_c 在欠掺杂区与 $n_s(0)/m^*$ 成正比,即所谓的 Uemura scaling, 是对 Emery 和 Kivelson 提出的预超导理论的重要支持。

根据上述 Emery 和 Kivelson 提出的预超导理论,在赝隙态应该存在局域的动态的 Cooper 对,也即某种超导残余,赝隙实际上就是超导能隙。这种观点引起了实验物理学家的极大兴趣,并努力来寻找这种超导残余的实验证据。Orenstein 小组^[9]对 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) 超导体所作的高频 (100 GHz~600 GHz) 电导率实验显示 T_c 以上存在着短寿命的涡旋激发。他们发现,在 T_c 以上,位相关联的特征时间迅速变短,但用很高的频率 (600 GHz) 仍可探测到幸存的位相刚度。他们的结果说明动态的磁涡旋通激发在 T_c 以上是确实存在的, 是对 Emery 和 Kivelson 提出的预超导理论的一个重要实验证据。下面将要介绍的 Nernst 效应测量则是证实存在 T_c 以上存在磁通涡旋激发的另外一个重要实验。

3 能斯特效应的定义和测量方法

能斯特 (Nernst) 效应是磁电效应的一种。当在金属或半导体样品的纵向方向 (x -方向) 施加一个温度梯度,在其垂直方向 (z -方向) 施加一个外磁场,则在横向的 y -方向可以测量到一个电场 E_y , 称这个效应为 Nernst 效应。能斯特效应的系数 ν 定义为:

$$\nu = \frac{E_y}{B_z (-\nabla T_x)} \quad (1)$$

对于层状的高温超导铜氧化物,一般可认为电导率等物理参数在 ab 平面内是各向同性的,即电导率满足 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma$, 佩尔帖 (Peltier) 电导率满足 $\alpha_{xx} = \alpha_{yy} = \alpha$, 等等。在 Nernst 效应测量中,由电导率和 Peltier 电导率 α 的定义可得到沿 x 和 y 方向的电流应满足下面的方程:

$$J_x = \sigma E_x - \sigma_H E_y + \alpha (-\partial_x T) = 0 \quad (2a)$$

$$J_y = \sigma_H E_x + \sigma E_y + \alpha_{yx} (-\partial_x T) = 0 \quad (2b)$$

式中 $\sigma_H = \sigma_{yx}$ 为 Hall 电导率, α , α_{yx} 分别为佩尔帖电导率的对角和非对角分量。由方程 (2b) 可得

$$E_y = \frac{\alpha_{yx} \partial_x T - \sigma_H E_x}{\sigma} \quad (3)$$

由于 (3) 式分子中两项相消,正常载流子的能斯特电压 E_y 非常小。在式 (2a) 中忽略小量 $\sigma_H E_y$, 可得泽贝克 (Seebeck) 系数 S 与佩尔帖电导率 α 之间的关系:

$$S = \frac{E_y}{-\partial_x T} = \frac{\alpha}{\sigma} \quad (4)$$

把(4)式代入(3)式,最后得到能斯特系数为:

$$\nu = \frac{E_y}{(-\partial_x T)B} = \left(\frac{\alpha_{ys}}{\sigma} - S \tan\theta \right) \frac{1}{B} \quad (5)$$

式中 $\tan\theta = \sigma_H/\sigma$ 为 Hall 角。可见,在一般的单带载流子的金属中,由于 Hall 电流和 Peltier 的非对角项几乎相互抵消,能斯特系数特别小。Sondheimer 在 1948 年即已证明,如果 Hall 角 θ 不依赖于能量,则这两项可以完全抵消^[10]。在铜氧化物超导体的正常态, ν 大约为 10^{-8} V/KT 的量级,而 $(S \tan\theta)/B$ 大约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ V/KT,可见这两项抵消是较完全的^[11]。

众所周知,对于第 II 类超导体的混合态来说,外磁场以涡旋线的方式穿透样品。如图 2 所示,当沿 x 方向建立一个温度梯度时,则未被钉扎的磁通涡旋线在热驱动力作用下从热端向冷端运动。而运动的磁通涡旋将产生一个与其运动方向垂直的 Josephson 电场,即:

$$E = -\nu \times B \quad (6)$$

这里 ν 为磁通涡旋运动的速度。当外加磁场沿 z 方向时,磁通涡旋在温度梯度的热驱动力作用下沿 x 方向运动,在 y 方向就产生一个横向电场 E_y ,通常称之为磁通涡旋的 Nernst 效应。严格地说,这个 E_y 不等同于通常载流子的能斯特效应。磁通涡旋的 Nernst 信号比通常载流子的 Nernst 信号大得多。这个磁通涡旋的 Nernst 电场的大小与磁通涡旋的数目(正比于外磁场)及其运动速度 ν 成正比。无论在传统的 II 类超导体^[12-13]或高温超导体的混合态中均已观测到比正常态大得多的磁通涡旋能斯特效应^[14-15]。所以说,Nernst 效应测量是探测磁通激发的有效方法。

当 $T > T_c$,外场将均匀地穿透样品,磁通涡旋消失,超导体表现为一般导体,磁通涡旋的能斯特效应也应该消失,只应剩下很小的正常载流子的贡献。然而,对于铜氧化物高温超导体来说,我们下面将介绍的结果却与上述预想大相径庭。在 T_c 以上,尽管迈斯纳态被强的位相涨落破坏,但仍然存在短寿命的分立涡旋(严格地说,应称之为类涡旋激发)。它们沿温度梯度方向的运动可感应出能够探测到的能斯特电压。

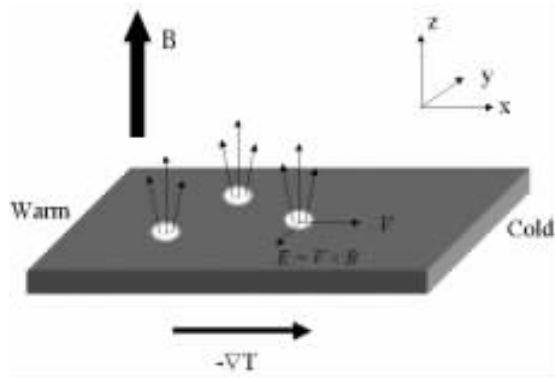


图 2 超导体中的磁通涡旋激发的 Nernst 效应示意图
Fig.2 Vortex excitation Nernst effect in superconductors

在能斯特效应测量中利用一个微小的电阻加热器对样品的一端加热以产生一个稳定的沿 x -方向的温度梯度,所加外磁场垂直铜氧化物超导体的导电平面(x, y)平面,一边扫描磁场一边利用 Keithley 纳伏数字电压表记录 y -方向的 Nernst 电压。为了消除横向电极不对称引起的误差,将正向磁场时与反向磁场时读取的横向电压之差除以 2 作为 Nernst 电压信号。磁场扫描的速率大约为 0.4 T/min,温度梯度约为 5 K/cm。样品的温度梯度一般由两个铬-康铜热电偶组成的差分热电偶测量。

4 Nernst 效应的测量结果和讨论

早在高温超导体发现不久,就有人报道了高温超导体混合态的 Nernst 效应结果^[14-15]。早期的报道只关注 T_c 以下的磁通流动引起的 Nernst 信号,其结果与常规超导体相比并无本质的差异。正是 2000 年初 Ong 小组首次对 LSCO 单晶样品在赝隙态存在类磁通涡旋激发引起的 Nernst 信号的报道才引起人们重新注意到 Nernst 效应测量对探测超导位相涨落的重要性^[11]。

文献[11]称对 Sr 含量 x 从 0.05 到 0.17 的 LSCO 单晶样品的 Nernst 效应进行了系统的测量。在 T_c 以下,Nernst 信号 $E_y/\nabla T$ 与磁场的关系是非线性的,这是混合态的磁通涡旋的特征。磁场较小时样品中的磁通被钉扎而不能运动,故能斯特电压为 0;当磁场 H 大于磁通熔化场 H_m 以后,磁通涡旋开始运动,涡旋线的数目也成比例地增加,故 $E_y/\nabla T$ 急剧增加。但在很高磁场下涡旋线携带的熵随磁场增加而减小,涡旋线的运动速度随之减小,由公式(6)可知 E_y 将减小。这两个效应相互竞争,使得 $E_y/\nabla T$ 随磁场的变化是非线性的,在某一磁场 H^* 下出现峰值。非常惊奇的是,即使在 $T > T_{c0}$ 的一定温度范围内,能斯特信号仍然较大。例如,对于 $x=0.10$ 的欠掺杂 LSCO 单晶样品($T_{c0}=28$ K),在远高于 T_{c0} 的正常态,背景的能斯特信号随温度变化很小。随着温度的下降,类磁通涡旋激发引起的能斯特信号大约在 140 K 开始出现,并逐渐增加,在接近 T_{c0} 时急剧增加。从 T_{c0} 到 140 K 这么大的温度区域中存在反常大的能斯特信号(或称剩余能斯特信号),说明在此区域存在着类涡旋激发。我们定义能斯特系数开始偏离正常态值的温度点为 T_{onset} ,该特征温度对应着类磁通涡旋的出现。 T_{onset} 一般小于赝隙的打开温度 T^* ,但在一定的掺杂范围内与 T^* 成正比。

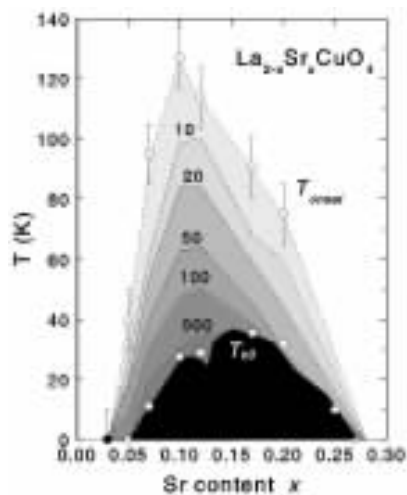


图 3 LSCO 样品的 T_{onset} 随 Sr 掺杂 x 的变化关系,同时还画出了剩余 Nernst 信号($\nu - \nu_n$)的等高线。

数字代表 Nernst 信号的数值。
Fig.3 Plot of T_{onset} versus Sr content (x) for LSCO. Contour plot of ($\nu - \nu_n$) versus x is also shown.

图 3 给出了从欠掺杂到略过掺杂的 LSCO 样品的 T_{onset} 随 Sr 掺杂 x 的变化关系,同时还画出了剩余 Nernst 信号($\nu - \nu_n$)的等高线,这里 ν_n 代表正常态的背景 Nernst 系数。该结果也可以参见文献[16]。在这里我们着重指出的是 T_{onset} 随 Sr 掺杂浓度 x 的变化与赝隙打开的温度点 T^* 随 x 的变化相一致,说明两者之间存在着联系,也强烈地暗示 T_c 以上的这种类磁通激发与赝隙之间存在关联。如果按照预配对的理论模型^[7]所设想的,赝隙打开对应于出现预超导配对,即超导序参量的振幅 $|\psi| \neq 0$,但由于

大量的涡旋激发破坏了这些超导 Cooper 对之间的位相关联,不能形成长程位相相干,因而在 $T_c < T < T^*$ 温区内没有 Meissner 效应,也没有出现零电阻。而能斯特效应正好对涡旋激发特别敏感,探测到了 T_c 以上的这种涡旋激发,这是上述的预超导配对的图象的一个强有力的实验证据。

进一步对其它铜氧化物超导体予以 Nernst 效应测量,也都给出了与 LSCO 体系类似的结果^[16-17]。例如,对 Bi-2212 单晶样品在不同的气氛(氧气或氮气)和不同的压力下热处理,可以得到从过掺杂到欠掺杂的一系列 Bi-2212 样品。我们的研究发现,与 LSCO 的结果类似,在 T_{00} 以上的很宽一段温度区域存在着类磁通激发的 Nernst 信号。对 LSCO、Bi-2201 和 2212、以及 YBCO 等众多空穴型高温超导体体系的 Nernst 效应测量,都一致地发现 T_c 以上存在着类涡旋激发导致的剩余 Nernst 信号,说明这是空穴型高温超导体一个普遍特性。而且,类磁通涡旋激发的 Nernst 信号仅出现在相图中超导相所在的掺杂范围内 ($0.05 \leq x \leq 0.25$),这更加说明类磁通涡旋激发的 Nernst 信号确实与超导电性紧密联系在一起,不太可能是一些与超导无关的激发(例如 AFM 涨落、Stripes 涨落、CDW 涨落等)所引起的。

我们和 Wen 小组进一步合作测量了欠掺杂和最佳掺杂的 LSCO 单晶样品的 Nernst 信号随磁场 H 与 c -轴方向夹角的变化关系,证实了类磁通激发是严格的平面内激发^[18]。当磁场与 c -轴方向夹角为 θ ,Nernst 电场 $E_y = \alpha \nabla T H \cos\theta$ 。一般而言,因子 α 也与夹角 θ 有关,所以 Nernst 电场并不会严格地与 $H \cos\theta$ 成正比。只有当系统是各向同性的或者类磁通激发是严格二维的时候, E_y 才与 $H \cos\theta$ 成正比。我们的实验发现,在 $T > T_{00}$ 时,类磁通激发的 Nernst 电场 E_y 严格与 $H \cos\theta$ 成正比,但高温超导体又是强烈各向异性的,这说明类磁通激发具有严格的二维特性。

在隙相中存在类涡旋激发的事实有力支持地支持了隙相相是超导相的前驱的假说。另一方面,Weng 等人基于自旋-电荷分离的 RBV 图象对 T_{00} 以上的剩余 Nernst 信号提出了另外一种解释^[19]。在他们的 t - J 模型的相弦理论中,在 $T_c < T < T_v$ 温度区域,热激发的 spinon 破坏了位相关联,导致一种以存在自由 spinon vortex 为特征的新相,称为自发涡旋相(spontaneous vortex phase)。特征温度 T_v 对应于 holon 的凝聚,也即配对序参量的振幅的开始不为 0,与自旋隙温度紧密相连。Nernst 效应正是这种自发涡旋相的一个内秉特征,在 T_c 以下位相关联建立起来,超导电性出现,这时 spinon vortex 也变成通常的磁通涡旋。在这个图象中,spinon vortex 不是通常意义的磁通涡旋激发,隙态中也不存在涨落的 Cooper 对,但是隙态跟超导态仍然是密切关联的,是出现超导态所需要的。

5 结论

总之,LSCO 等空穴型高温超导体的能斯特效应实验所发现的 T_{00} 以上的类磁通涡旋激发,从一个全新的角度反映了高温超导体的微妙,暗示强烈的超导体位相涨落是隙态的一个重要特征,为理解高温超导现象提供了帮助。对隙态区的类涡旋激发的理解,除了预超导配对模型外,其它物理图象,如基于电荷-自旋分离的图象 spinon vortex 等,也在理论学家的探讨之中。无论如何,Nernst 效应探测到的类涡旋激发对理解高温超导电性是一个

十分关键的因素。

参考文献 (References)

- [1] BEDNORZ J G, MULLER K A. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system [J]. Z. Phys. B: Con Mat, 1986, 64: 189-193.
- [2] CHU C W, GAO L, CHEN F, HUANG, et al. Superconductivity above 150 K in $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8.48}$ at high pressures [J]. Nature (London), 1993, 365: 323-325.
- [3] 梁敬魁,车广灿,陈小龙.高 T_c 氧化物超导体体系的相关性和晶体结构 [M].北京:科学出版社,1994.
- [4] ORENSTEIN J, MILLIS A J. Advances in the physics of high-temperature superconductivity [J]. Science, 2000, 288: 468-474.
- [5] 韩汝珊.高温超导物理[M].北京:北京大学出版社,1998.
- [6] TIMUSK T, STATT B. The pseudogap in high-temperature superconductors: an experimental survey [J]. Rep Prog Phys, 1999, 62: 61-122.
- [7] EMERY V J, KIVELSON S A. Importance of phase fluctuations in superconductors with small superfluid density [J]. Nature (London), 1995, 374: 434-437.
- [8] UEMURA Y J, LUKE G M, STERNLIEB B J, et al. Universal correlations between T_c and n/m^* (carrier density over effective mass) in High- T_c Cuprate superconductors [J]. Phys Rev Lett, 1989, 62: 2 317-2 320.
- [9] CORSON J, MALLOZZI R, ORENSTEIN J, et al. Vanishing of phase coherence in underdoped $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8.48}$ [J]. Nature (London), 1999, 398: 221-223.
- [10] SONDHEIMER E H. The theory of the galvanomagnetic and thermomagnetic effects in metals [J]. Proc R Soc London Ser A, 1948, 193: 484-512.
- [11] XU Z A, ONG N P, WANG Y, et al. Vortex-like excitations and the onset of superconducting phase fluctuation in underdoped $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ [J]. Nature (London), 2000, 406: 486-488.
- [12] VIDAL F. Low-frequency ac measurements of the entropy flux associated with the moving vortex lines in a low- k type-II superconductor [J]. Phys Rev B, 1973, 8: 1982-1993.
- [13] HUEBENER R P, SEHER A. Nernst effect and flux flow in superconductors. I. niobium [J]. Phys Rev, 1969, 181: 701-709.
- [14] HAGEN S J, LOBB C J, GREENE R L, et al. Flux-flow Nernst effect in epitaxial $YBa_2Cu_3O_7$ [J]. Phys Rev B, 1990, 42(10): 6 777-6 780.
- [15] ZEH M, RIHC, KOBER F, et al. Nernst effect in superconducting Y-Ba-Cu-O [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64 (26): 3 195-3 198.
- [16] WANG Y, XU Z A, KAKESHITA T, et al. Onset of the vortexlike Nernst signal above T_c in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ and $Bi_2Sr_{2-y}La_yCuO_6$ [J]. Phys Rev B, 2001, 64 (22): 224 519.
- [17] ONG N P, WANG Y. Vorticity, phase stiffness and the cuprate phase diagram [J]. Phys C, 2004, 408-410: 11-15.
- [18] WEN H H, LIU Z Y, XU Z A, et al. Two-dimensional feature of the Nernst effect in normal state of underdoped $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ single crystals [J]. Europhys Lett, 2003, 63: 583-589.
- [19] WENG Z Y, MUTHUKUMAR V N. Spontaneous vortex phase in the bosonic resonating valence bond theory [J]. Phys. Rev. B, 2002, 66: 094509.

(责任编辑 胡春华)

·读者·作者·编者·

我社承办年度“中国基础研究十大新闻”评选工作

11月20日,由国家科技部基础研究管理中心和中国科协学会学术部共同主办的2005年“中国基础研究十大新闻”评选活动启动,科技导报社负责承办此项活动的具体组织、管理工作。开展该项活动旨在广泛宣传我国基础研究取得的成果,扩大基础研究的影响,激发广大科技工作者的科学热情和奉献精神,促进全社会对基础研究的理解、关心和支持。“中国基础研究十大新闻”的当选新闻,从本年度在科技期刊、报纸上报道的,由我国科学家在国内取得的基础研究领域的重大研究进展新闻中评选产生。《科技导报》2006年第2期将公布2005年“中国基础研究十大新闻”评选结果。(本刊编辑部)