

超声测量证实铜基超导体中一个长期找寻的相变

(清华大学物理系 张广铭 编译自 Johanna Miller. *Physics Today*, 2013, (8): 12, 原文详见

<http://ptonline.aip.org>)

铜氧化物高温超导体发现至今已过25年,但该材料的许多方面仍然充满着挑战。超导机理仅仅是其中的一个谜,在超导转变温度 T_c 之上,铜基超导体表现出了许多目前的凝聚态理论无法解释的、错综复杂的实验现象。最大的谜团之一是“赝能隙”的本源。“赝能隙”在铜基超导体的相图中占据很大一片区域(见图1),电荷载流子的状态非常类似于超导态,但是材料的电阻仍然很大。目前存在两种可能的解释:一种认为赝能隙代表材料逐步进入超导态的过渡区;另一种认为赝能隙态是一种不同于超导态的特殊物态。近期的实验支持了后一种观点,但是,作为确凿的证据,赝能隙刚刚出现时的热力学相变特征却难以找寻。

近期,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的A. Migliori小组发现了赝能隙出现时热力学相变的特征。利用共振超声谱探测技术,科学家们测量了两个铜基超导体单晶的弹性刚度随温度的依赖关系,这是一个基本的热力学参数。弹性刚度随温度变化的曲线在赝能隙出现时其导数发生跳变。这一实验结果不仅对理解赝能隙而且对铜基超导体相图中其他部分都有重要意义。

小心“赝能隙”

铜基超导体家族涵盖了众多晶体结构和组分,包括Y-Ba-Cu-O,

La-Sr-Cu-O。所有这些材料都拥有 CuO_2 平面,超导就发生在这个平面。但是,作为材料的母体,如 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$,不仅不超导,甚至都不导电。由于每一个晶格上的铜原子都有一个未配对的电子,这些电子之间有很大的排斥作用,以至每一个电子都被锁在各自的位置。

通过改变材料的组分至 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$,可以在 CuO_2 平面上加入或移走一些电子。在这些电子或空穴掺杂的样品中,载流子可以自由地从一个Cu原子跳跃到另一个Cu原子。在足够低温下,它们形成Cooper对,然后凝聚成超流体。在图1中,存在一个对应最高 T_c 的掺杂浓度;小于最佳掺杂浓度的区域称为欠掺杂区,赝能隙就出现在欠掺杂区。

在普通的金属中,载流子会形成连续的能谱,可以用无穷小的能量激发电子。相反,超导态是一种集体激发现象,改变一个电子的状态需要打破Cooper对,并对其他所有电子态重组。重组电子态需要能量,该能量就是激发能谱中的能隙。在铜基超导体中,由于材料是各向异性的,能隙大小依赖方向,也就是说,在某些方向,电子容易获

得动量而激发。

在欠掺杂的铜基超导体中,在 T_c 之上,能隙在某些方向上依然存在,直到很高的温度才消失。这个温度依赖于掺杂,称为 T^* 。一种解释为,在 T_c 至 T^* 之间观察到的能隙是材料逐步进入超导态的过渡区。随着温度的降低,Cooper对在温度为 T^* 时形成,但直到 T_c 时才形成相干的超导凝聚体。有些实验远在 T_c 之上确实发现了载流子配对的痕迹,但没有在 T^* 出现。

赝能隙也可被认为是对称性有别于邻近物相的一种特殊物态。数千个实验都曾设法寻找对称性变化的证据,但所有实验未能给出一致的结果。理论学家也在思考何种形

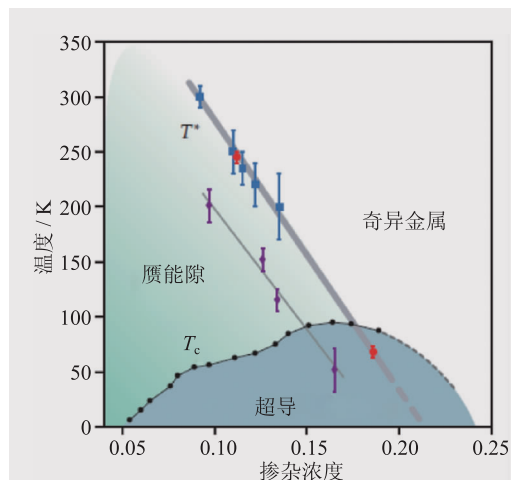


图1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ 超导相图, x 决定空穴掺杂浓度。中子散射测量给出的磁有序出现的温度(蓝色点); Kerr效应测量给出的有序出现的温度(粉色点);共振超声谱测量给出的热力学相变温度(红色点)

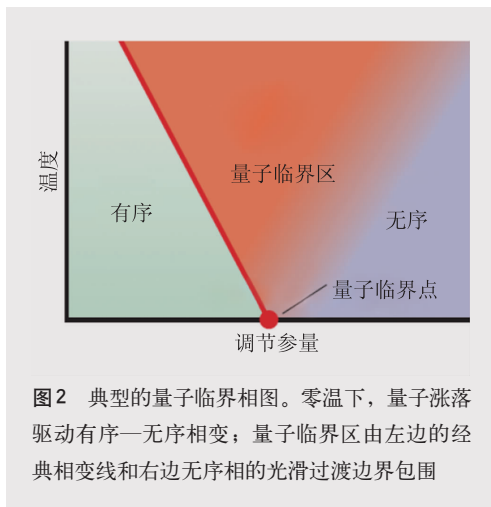


图2 典型的量子临界相图。零温下，量子涨落驱动有序—无序相变；量子临界区由左边的经典相变线和右边无序相的光滑过渡边界包围

式的隐藏序可以导致赝能隙的出现，同时又难以被实验探测到。美国加州大学河畔分校的C. Varma提出了一种大胆而有争议的理论，设想在CuO₂单胞上，依次存在互为反向旋转的电流，并形成有序的轨道磁矩。假设这些旋转电流大小相同，整体的磁化强度为零，晶体的平移不变性也未被改变。

有关赝能隙态磁有序的实验证据最早出现在2006年。法国科学家P. Bourges小组利用极化中子束作铜基超导体的散射实验，测量散射中子自旋翻转的比率。在赝能隙出现的温度 T^* 处，他们在每一个样品中都观测到自旋翻转的中子比率突然增加，表明磁有序的出现。相应的数据点在图1中由蓝色点标出。两年后，斯坦福大学的A. Kapitulnik小组利用极化光束作铜基超导体的散射实验。在赝能隙区，他们发现极化光的极化角发生了一个微小的、可分辨的偏转，称为极化Kerr效应。该效应当时也被解释为磁有序出现的特征，相应的数据以粉色点标在图1中。

共振超声谱

如果赝能隙代表一个真正的物

相，那它的边界不仅一定有对称性的改变，而且还应有诸如比热陡然反常的热力学特征。但是，晶体材料的比热主要由晶格振动贡献，对仅由电子结构导致的相变难以探测。共振超声谱可以非常灵敏地探测到固体热力学性质：把晶体放在两个传感器之间，一个驱动晶体产生振动，另一个测量晶体的响应。扫描驱动频率就会测出晶体固有的共振频谱。根据晶体的大小、形状和共振频率，计算出晶体的弹性常数。弹性常数是晶体自由能的导数，从而给出其热力学性质。

洛斯阿拉莫斯国家实验室的A. Migliori教授，早在20年前就开辟了将共振超声谱应用于凝聚态物理，特别是高温超导体中的相变研究。但是，他们发现，研究赝能隙态的相变在技术上尤其具有挑战：超高质量的铜基超导体单晶不到一个立方毫米，小于通常用于共振超声测量的晶体尺寸。他们设计了一个具有较好的震动分离、低声功率和较小的晶体与传感器之间接触力的灵敏实验装置。他们对欠掺杂和过掺杂的YBa₂Cu₃O_{6-x}两个样品进行了测量。对每一个样品，共振超声谱都给出了准确的超导转变温度 T_c ，对应于万分之几的共振频率的跳跃；同时还首次观测到共振频率连续，但其导数在某一温度有突变，对应的数据以红色点标在图1中。

对欠掺杂的样品，该相变温度与赝能隙出现的温度及中子散射的结果相一致，但不同于Kerr效应测量结果。由此，Migliori等人认为，他们观测到了赝能隙区的相边界。

更为重要的是，对过掺杂的样品，转变温度小于 T_c 。这样的相变不可能作为进入超导态的过渡区，因为相变点两边都已经是超导态了。因此，Migliori等人认为，在 T^* 出现的赝能隙代表一个特殊物态，并与超导相边界交叉；外推到 $T^*=0$ 的更高掺杂浓度时将给出一个所谓的量子临界点。

量子临界

量子临界性在凝聚态物理中是一个相当复杂的现象。它源于在零温下，当改变除温度以外的参量时，系统基态的相变。不同于熟知的热涨落导致的有序—无序相变，量子相变由零点涨落驱动。零点涨落在系统中产生纠缠的斑图，在临界点，所有的纠缠斑图渗透到整个体系，纠缠扩展至任意长空间范围，系统的波函数不再是一个简单形式。

量子临界性的影响可扩展至有限温度，如图2所示，只要纠缠的特征尺度超过de Broglie热波长，量子涨落就会主导整个系统。由于de Broglie热波长随热涨落增加而减小，所以量子临界区随温度增加变宽。比较图1和图2，在铜基超导体中，载流子浓度对应调节参量，赝能隙区为有序态，旁边的奇异金属区构成量子临界区。超导相被包括在量子临界区内，这表明量子临界性成为理解高温超导机理的一种令人兴奋的可能性。

洛斯阿拉莫斯国家实验室的研究组的共振超声测量，已经确认赝能隙打开时存在热力学相变，但到目前为止，他们尚未给出有关对称性改变的任何信息。接下来的实验就是在磁场下进行共振超声测量。无论赝能隙态是否为磁有序态，它对外磁场的响应将为人们提供重要线索。