

短程自旋波：高温超导的潜在机理

——该自旋波第一次被显示存在于超导铜氧化物完整的掺杂相图中

自从 25 年前高温铜氧化物超导体被发现后,理论和实验物理学家一直都在努力理解超导现象背后的机理.该机理是否与传统超导体的机理相似,即一个弱的相互吸引作用就可以将玻色束缚态中的费米电子聚集在一起,然后凝聚成超流体?抑或需要一个全新的基础理论来解释高温超导现象?

在巴丁-库珀-施里弗(BCS)理论所解释的传统超导体中,电子在晶格声子作为一种媒介所产生的相互作用下聚集并配对.每个电子通过与正价原子核的库仑吸引而跟声子谱耦合在一起,结果是在电子之间存在着一种相互吸引作用.这种吸引力虽然很弱,但如里昂·库珀所示,该弱作用力足以能形成电子束缚态.

BCS 理论并不是声子媒介相互作用的专利,其他的激发也可以用作“配对胶水”.虽然直到现在声子都被普遍认为存在于所有铜氧超导中,但是声子媒介相互作用看似并不足以导致高温超导.而如今,由 Bernhard Keimer 所领导的研究团队(马克斯-普朗克固体物理研究所)提供了一个令人信服的不同的机理:电子的配对由一种叫顺磁子的短程自旋波的媒介调制形成.

探寻自旋波

超导铜氧化物存在于非超导反铁磁绝缘体的延续上.“掺杂”意指载流子(电子或空穴)的浓度;未掺杂或者低浓度掺杂的铜氧化物在低温下具有长程反铁磁序.在更多掺杂的超导铜氧化物中长程序被分解,但一些短程有序却能够保持下来.

虽然短程有序仍可以支撑自旋波,但它会受到抑制.就如同卵石掉入粘滞的泥水坑所激起的涟漪.一般来说,长程自旋波被称作磁子,而被抑制的磁子被叫作顺磁子.实验已经知道,电子可以和自旋波耦合,并且有理论指出,如果顺磁子存在于一个较宽能量范围的话,他们可以产生必要的吸引相互作用并诱导出超导特性.然而足够强的顺磁子至今从未在完整掺杂的系列铜氧化物内观察到.

Keimer 曾一直致力于利用非弹性中子散射来研究铜氧超导体中的磁激发.这项技术对与反铁磁母体材料非常靠近的强欠掺杂铜氧化物的研究已探测出一个宽泛的顺磁子谱.这些顺磁子的能量集中在 30—70meV.而对于其他的铜氧超导体来说,这样的顺磁子却需要增强一个量级或更多的能量才能够产生超导特性.

X 射线的视觉

Keimer 在研究一个与超导非相关的课题(钛氧化物的轨道激发)时,他认识到由 Giacomo Ghiringhelli 和 Lucio Braicovich 所引导的目前正在快速发展的一个实验方法:共

振非弹性 X 射线散射(RIXS).通过利用 RIXS,他们成功地观察到了未掺杂的反铁磁绝缘铜氧化物内的磁子激发谱.随后他们与 Keimer 及其同事 Mathieu Le Tacon 合作来探讨该方法是否也能应用到超导铜氧化物上.

这些研究者把视线聚集于一系列的超导铜氧化物——从未掺杂母体到过掺杂的超导体,并观察不同能量的激发态.无论哪个超导材料,他们都能观察到一个与未掺杂铜氧化物母体中的磁子强度相当的顺磁子激发.图 1 显示出两个极端掺杂量的例子.

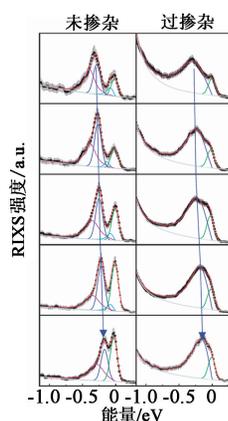


图 1 共振非弹性 X 射线散射(RIXS)揭露出未掺杂和过掺杂铜氧化物中的磁激发或自旋波.从固体样品中散射出的 X 射线光子激发出量子波,它们可以通过光子的能量及动量转移来获得.从上至下的 5 个小图表明不同的散射角,由此来获得不同的动量转移.图中的蓝色箭头显示磁激发同时出现在未掺杂和过掺杂样品中(见《物理》网刊彩图)

事实上,Keimer 说,“这些磁激发比我们想象的要强许多”.他同时又解释,最大的挑战是获取足够低能量的激发,并和中子散射实验结果相对比,由此证明他们探测的是相同的激发态.通过选择适当的散射结构来尽可能降低弹性散射背底,他们最终获得了几个和中子散射交叠的数据点.

临界温度

Keimer 及其同事的研究结果显示,顺磁子存在于一个完整的不同掺杂的超导铜氧化物家族内,并具备足够的强度来调制超导特性.这事实上是在重点讨论顺磁子是否可以作为铜氧超导的配对胶水.然而完全理解顺磁子和超导临界温度的关系还有很长的路要走.Keimer 及其同事通过利用能应用到传统超导体上的 Eliashberg 强耦合理论,计算得出过掺杂铜氧化物的临界超导温度和实际值相差 2 倍.这也是该理论在传统超导体上所能达到的精度.Keimer 解释道,铜氧超导体的材料化学性质以及其强关联电子的物理性质非常复杂.期待一个单一的实验方法来解决所有的问题是幼稚的.而可喜的是,在过去的 20 年,相关证据在稳定不断地积聚着.

(瑞士保罗谢尔研究所 周克瑾 编译自 Johanna Miller. *Physics Today*, 2011, (9): 13, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)