

高温超导铜氧化物中间隙氧占位的分形结构

在包含有过渡金属的复杂氧化物中,许多材料表现出奇特的物理性质.从微观角度看,其起因在于:在低温下电子结成团队,以致于材料的性质由电子的集体行为(而非单电子行为)决定.对传统半导体材料来说,通常要求生长出几乎完美的晶体.我们今天蓬勃发展的信息产业正是建立在各类半导体优质晶体的基础之上.然而,对过渡金属氧化物来说,高质量晶体的制备决非易事.其中的困难除了元素种类多以外,还有一个氧元素在晶格中的占位问题.鉴于在高温超导铜氧化物中,氧含量和氧占位对超导转变温度 T_c 有重要影响,最近,来自意大利罗马 Sapienza 大学的 Fratini 等使用新近发展的“扫描同步辐射 X 射线微衍射”技术,对高温超导 $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ 中的间隙氧进行了直接观察.他们的单晶样品尺寸相当大($\sim 1\text{mm}$),令人惊奇的是,在 $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ 的间隔层($\text{La}_2\text{O}_{2+y}$ 层),氧对晶格间隙的填充呈现出分形(fractal structures)的特征.

这里的所谓分形是指:在 $\text{La}_2\text{O}_{2+y}$ 层,间隙氧所形成的花样,在不同的尺度上表现出自相似性.具体说,如果我们将 1mm 样品的任意一个局部($1\mu\text{m}$ 量级)放大,观察间隙氧分布的细节,所看到的图像与此前在样品整体剖面上看到的图像显得极为相似.如果没有附加的尺度标记,我们不可能从图形花样的几何结构识别出图像所对应的绝对尺寸. Fratini 等给出的图像毫无疑问地展示了间隙氧占位花样的自相似性.虽然类似的分形现象我们在自然界其他的地方(例如,古瓷器表面上的细小裂纹)也曾见到过,但晶体缺陷能够实现如此完美的自组织,应该说是第一次看到. Fratini 等的实验还展示了分形自组织对超导电性的影响:分形越是完善(即自相似性得以维持的尺度越大), T_c 越高.这一结果暗示:分形自组织现象可能与高温超导铜氧化物中电子的量子临界特性,即尺度不变性(scale-invariance)有关.

Fratini 等的 X 射线单晶衍射仪安装在欧洲同步辐射加速器近旁,光源照射样品形成的光斑尺寸约为 $1\mu\text{m}$.倒晶格空间的衍射斑图像被记录,然后将其转换到实空间.逐步放大的观察表明,与间隙氧纳米尺度超晶格有序相对应的衍射峰,其幅值以及空间分布随观察空间的范围变化,并且衍射峰强度的几率分布遵从某种幂定律关系.按照非线性动力学,后者是“存在不依尺度而变的分形结构”之独特判据.在观察之前,样品被加热到 370K 的高温,接着施行退火,在此温度下,其中的掺杂氧不会逃逸.随后实施液氮淬火,以便间隙氧的位置冻结.

对于凝聚态物理学家来说,目前还没有一种理论来解释 Fratini 等所观察到的分形现象.超导 Cooper 对形成的空间尺度是几个纳米,在 T_c 以下,所有的 Cooper 对凝聚到单一量子态.问题是,为什么配对机制会对晶体中无序的微妙变化如此敏感呢?

(戴闻 编译自 *Nature*, 2010, 466:825,841)

利用核共振的电磁引起的透明性

利用原子能级的量子控制对光与物质相互作用进行操控的技术对光学有着深远的影响. 这种操控技术有很多应用, 包括少数光子水平上的非线性光学, 慢光, 无反转的激光以及光量子信息处理. 实现这种操控的关键技术是电磁引起的透明性. 在多能级原子中, 能级跃迁之间的量子干涉可以使一个不透明的介质在原子共振附近成为透明的. 随着高亮度加速器驱动光源(如贮存环 X 射线激光)的出现, 将光学量子操控技术扩展到 X 射线区成为很有吸引力的课题.

德国的物理学家使用穆斯堡尔同位素铁-57(两能级系统)的 14.4keV 核共振技术观察到硬 X 射线区的电磁引起的透明性. 实验中使用了两块厚度为 2nm 的铁-57 薄片, 夹在两块铂镜之间, 两铂镜相距 45nm, 所形成的空腔可以维持 X 射线驻波. 一块铁-57 片放在驻波的峰位处, 另一块放在波谷处. 放在波峰处的铁-57 的上面能级相对于放在波谷处铁-57 的上面能级有一个位移, 这种状况使铁-57 核像一个三能级系统, 在激发态有两个退化的能级.(其中一个可以考虑做亚稳态). 他们用 DESY 的同步辐射装置 PETRA III 产生的 14.4 keV X 射线注入空腔中, 当使 X 射线先通过放在波峰的铁片然后再通过放在波谷的铁片时, 发现大量 14.4keV X 射线被反射回来, 这是铁-57 核的共振散射造成的. 而反之, 当使 X 射线先通过波谷处的铁片然后再通过波峰处的铁片时, 反射的 X 射线明显减少. 这意味着, 这两个铁片对于 14.4keV X 射线成为透明的. 电磁引起的透明性及其应用可以移植到核共振领域, 建立核的量子光学场. 对 X 射线的操控技术还可能将辐射应用于量子信息系统.

(树华 编译自 *Nature*, 2012, 482:199—203)