

LK-99的局限和意义

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译, 若未达意, 请查阅[原文](#)

LK-99室温超导之谜

高丽大学的科研团队最近宣布, 他们合成了一种名为LK-99的室温超导材料, 在400K(127°C)高温常压下表现出超导特征。世界各地的科学家都在尝试复制、验证这种可能是划时代的超导材料。很多团队宣称无法复制, 有些团队仅在微小的样品中观察到某些超导特性。还有很多学者持怀疑或否定态度。据报道, 马克斯·普朗克研究所合成的单个LK-99晶体不具备超导特征。LK-99究竟是不是超导材料? 是什么原因导致了观察结果如此差异? 此外, 令人费解的是为什么LK-99样品表现出超导特征的大多数尺寸较小。同样令人困惑的是单个LK-99晶体中观察不到超导特征。现有《[低温和高温超导统一理论](#)》中提出的[电子通道理论](#)可以为您揭密。

BCS理论面临的挑战

超导现象通常用经典BCS理论来解释。然而, 这一理论无法解释40K以上的高温超导现象。BCS理论的前提是假设形成电阻的Drude模型是正确的。在Drude模型中, 假设电阻是自由移动的电子与导体晶格之间的碰撞引起的, 如图1所示。每次碰撞都会损耗部分电子能量, 成为电阻。

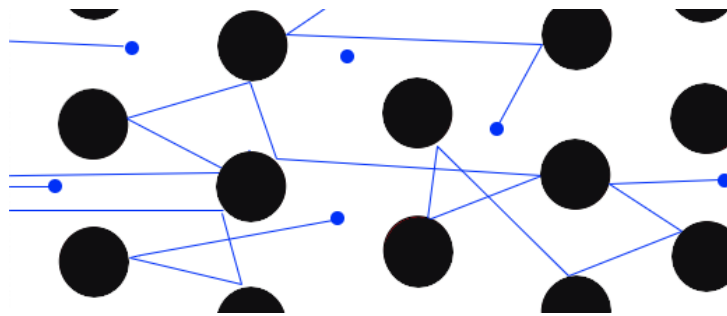


图1, Drude电阻模型

BCS理论认为在低温条件下, 电子会通过吸引周围的原子核形成局部正电荷高密区, 间接吸引其它电子形成电子对。成对的电子相对稳定, 在导体中移动时减少了碰撞而避免能量损耗, 降低电阻, 成为超导。然而, 当温度升高时, 导体中电子、原子振荡加剧, 超过40K时会破坏电子对的形成。按照BCS理论高温条件下无法形成超导。然而, 40K以上, 甚至更高温度都可以观察到超导现象。那么, 问题出在哪里?

按照Drude模型假设的逻辑, 高密度材料应该具有更高的电阻率。随着围压增加, 导体中分子密度加大, 碰撞机会变多, 应该导致更高的电阻率。然而观察结果恰恰相反: 电阻率与压力是负相关的。而且, 高压下很多材料的电阻率都降到了零, 成为超导, 即便温度很高也能实现。因此, Drude模型认为电阻是由碰撞引起的可能是一个错误的假设。这也许是BCS理论局限性的根源。

电子通道理论

大道至简，电子通道理论的原理非常简单。电子通常被束缚在原子内部，往往不能在分子之间自由移动。分子之间的空间并非真空，而是充满着由原子核和电子产生的电场。在这样的电场里，带负电荷的电子是不可以自由运动的。要在导体中产生电流，需要给电子提供能量将其提升到分子之间的共享高能轨道。获得能量的高能电子可以沿着分子之间的共享轨道(或通道)移动，穿梭在不同分子之间形成电流。如图2所示，这些共享通道可以被视为串通分子间电子通道。

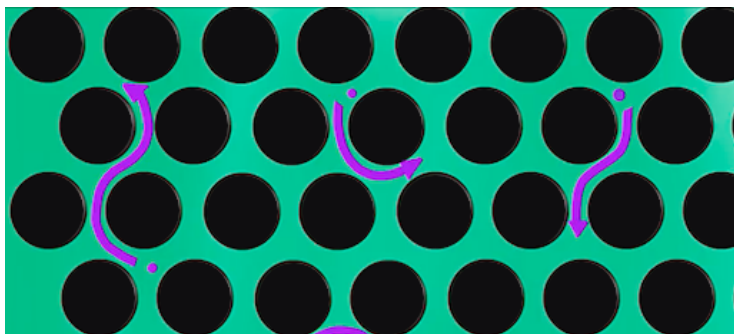


图2, 电子通道模型

偶尔，一些高能电子会脱离电子通道，回落到电子空穴中，释放出部分之前吸收能量，形成电阻。所以，电阻并非Drude模型中假设的自由电子撞击造成的。我们观察到的导体发热现象实际上是电子向低能级跃迁时以光子形式释放的之前吸收的部分能量。

按照这一原理可以推测：导体的电阻率与分子间距成正相关。如图3(A)所示，分子间距较大时，要产生电流，需要给电子提供更多的能量来提升电子进入分子间的高能电子通道。当这些电子回落到电子空穴时也会释放、消耗更多之前吸收的能量，表现出较高的电阻率。在超导中，分子间距足够小，如图3(B)所示，以至于部分外围价电子轨道与电子通道相交。因此，这些价电子可以直接进入电子通道，在分子之间穿梭形成电流，实现零电阻。

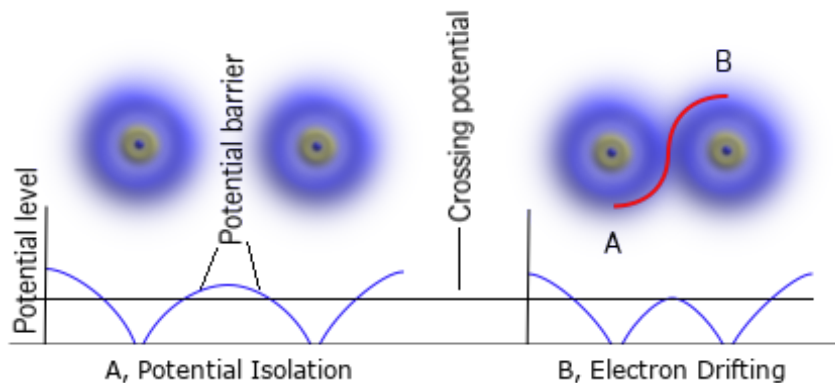


图3, 导体(A)与超导(B)分子间距对比

这就解释了为什么在高压下能够实现超导。即便温度很高也可以通过施加足够的压力使原子和分子间距缩小而实现超导。低温超导实际上也是同样的机制。随着温度降低，电子会退回到较低的轨道，原子和分子体积缩小，如图4(A)所示，从而降低了分子间的排斥力。这时，相对恒定的大气压变得更为显著，压缩分子间距，从而产生类似高压超导的压力效应。

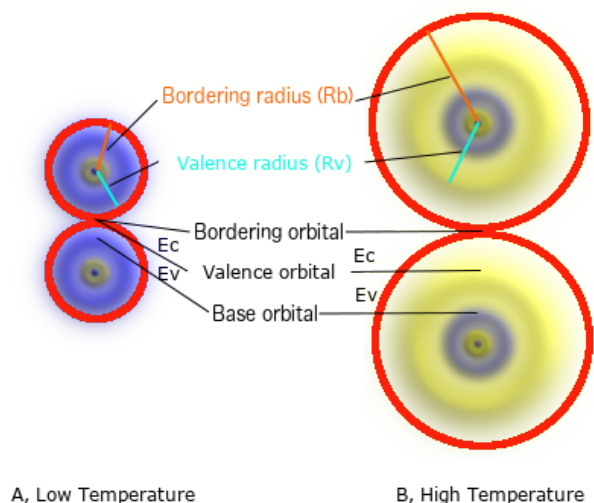


图4, 低温(A)与高温(B)电子轨道对比

反之, 当温度升高时, 电子变得活跃, 经常跃迁到高能轨道。如图4(B)所示, 原子和分子体积增大, 增加分子间的排斥力, 扩大分子间距。在相对恒定的大气压下, 这时分子间的排斥力占据优势, 导致分子间距的增长速度比电子轨道的扩张速度更快, 使得电子轨道落后并远离电子通道, 超导功能随之丧失。不仅如此, 随着温度继续升高, 分子间距进一步增加, 导体体积膨胀, 电阻率也随之继续增高。因此, 电子通道理论统一了导体电阻、低温和高温超导机制。

总而言之, 分子间距随着温度压力的变化导致电阻率随之改变, 超导现象只是这一趋势的必然结果。也就是说, 在足够的压力下, 任何物质都可以进入超导状态。然而, 大部分材料在地表环境的温度压力条件下不宜形成超导。很多星球内部的高压环境应该提供超导形成条件。这些超导体中的电流可能是导致行星包括地球磁场的形成机制。地磁场超导成因假说, 是另一个话题, 感兴趣的读者可以参阅结尾提供的参考文献。

合成室温超导

电子通道理论的优势不仅在于它能够解释电阻和超导的统一机制, 更重要的是它为合成超导材料提供了可操作的实用指南。理解超导的微观本质, 寻找室温超导的探索不再是一种随机的尝试, 而是成为了一项有蓝图的工程。其关键就在于压缩分子间距。下面几点指导原则将大大缩小室温超导的搜索范围:

- 合成超导应该充分利用分子吸引力来抵消排斥力。通过特定分子结构产生的引力, 将某些分子紧密地聚集在一起, 从而迫使价电子轨道外缘与电子通道相交重合。
- 电负性 (electronegativity) 在选择合成超导元素中起着至关重要的作用。避免选择电负性极强的元素, 它们会强烈束缚电子。选择电负性相近的元素可以避免此类问题。
- 避免过于复杂的化合物, 因为它们有可能破坏电子通道的连通性。就像大多数绝缘材料一样, 高度复杂的分子很容易产生绝缘区域, 阻断电子通道的连通。
- 原子大小不均的化合物或合金容易导致原子间受力不均, 增加部分原子间产生局部挤压的可能性。受压缩的原子之间容易形成超导区。

LK-99的局限和意义

有些研究团队在LK-99样品中观察到类似超导的特性。许多研究人员将电阻率的降低归因于样品中存在Cu₂S等杂质。然而，Cu₂S是一种电阻率明显高于铜的半导体，用它来解释观察到的抗磁性有些牵强。有些人将观察到的磁悬浮归因于Cu₂S的弱铁磁特性。然而，铁磁性物体通常具有两个相反的磁极，这些磁极可以吸引或排斥磁场的北极。因此，当外部磁场上下反转时，观察样品也应该翻转。这种现象很容易观察到。然而，[华中科技大学](#)视频中演示的悬浮却没有表现出这一现象。一个更合理的解释是，这些观察现象有可能与LK-99晶体结构造成的局部超导特性有关。下面就这种特性展开讨论。

如图5所示，LK-99晶体结构类似于一个六棱柱，其外围由Pb原子和PO₄结构形成框架，围绕着由Pb和O原子组成的内圆柱。通过用较小的Cu原子取代部分外围Pb原子，拉近周围原子，使晶体外缘半径减小，导致内圆柱的原子受到挤压，如图5(A)所示。理论上，这种挤压可以使内部的Pb和O原子更加靠近，导致这些原子的价电子轨道外缘被压进它们之间的电子通道中。结果，内圆柱的Pb和O原子之间形成超导区。

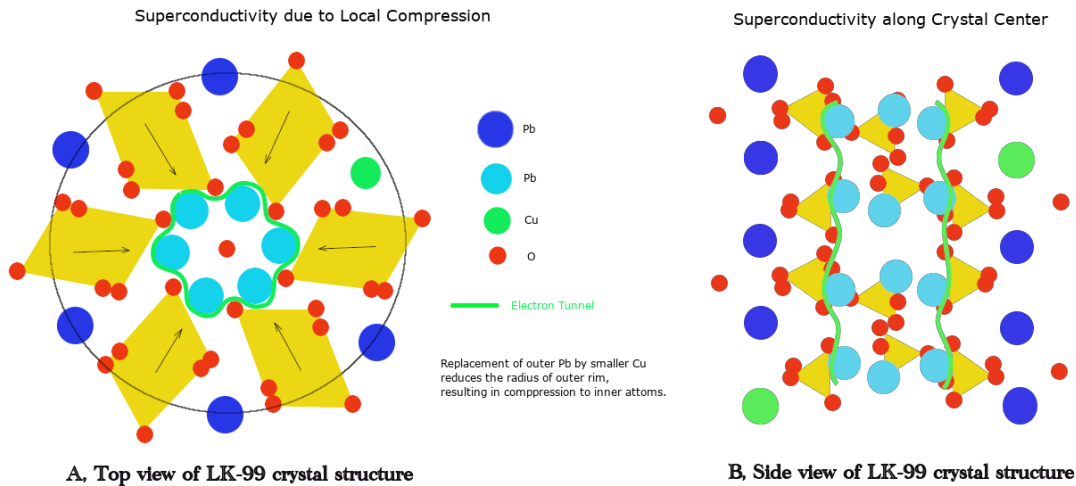


图5, LK-99晶体结构, 展示压缩内部原子间实现超导机制

然而，如图5(B)所示，LK-99的超导功能局限在晶体内部的一维通道，限制了电流方向的自由度。可以将每个LK-99晶体想象成一小段绝缘导线，一个不尽完美的LK-99样品可以理解成一堆随机堆放的小导线。虽然部分导线可能碰巧首尾相连形成回路，但大部分导线是不联通的。这种超导材料的质量是无法保证的。部分LK-99样品可能表现出超导特征，而大部分可能没有超导功能。当受到外加的磁场时，有联通回路的部分超导体内可以产生回旋电流对抗外加磁场、试图悬浮，而非超导部分则屈服于重力。有超导功能的晶体有可能分布不均，集中在样品的局部区域。这就解释了为什么超导特征在小型LK-99样品中更为明显。典型超导特征，例如迈斯纳效应和磁通钉扎现象，通常在超导成分含量丰富的样品中才能观察到。而LK-99样品中超导成分的比例较小，因此很难观察到那些典型超导特征，这解释了[高丽大学](#)和[华中科技大学](#)视频中观察到的微弱或部分抗磁性。

测量LK-99样品的电阻更具挑战性。只有当测试电极恰巧触及到超导晶体连成的不间断超导通道时，才有可能检测到零电阻。否则，测量结果会表现出各种不同电阻特征，具体取决于测量样品的特定部位。如果使用开尔文桥测量，需要四个电极连接流经样品的三段电路，测点选择会更难。东南大学团队的测量结果可能是样品不同部分的质量不均，导致电流路径中的一

段晶体直到110K(-163°C)才出现零电阻。这也可能解释了为何在单个LK-99晶体中有时未能检测到超导性。如果测量设置未能准确捕捉到超导路径，超导性就可能无法显现出来。

即便这样的局部超导也是基于能用Cu够精确置换铅磷灰石中的部分Pb原子才能实现。铅磷灰石含有许多Pb原子，精确置换特定的Pb原子并非易事。高质量LK-99超导材料的合成需要精确控制晶体的生长过程，这是一项极具挑战的任务。把握不当还有可能诱发次生杂质，如Cu₂S。这也让部分学者质疑LK-99观察结果的可信度。而合成完美的单个LK-99晶体反而不具备超导特性，这是因为LK-99超导性仅限于一维路径，不提供电子流动的循环路径。这些因素凸显了LK-99质量难以控制的固有特征。如果杂质问题尚可以通过优化制成工艺来解决，而一维局部超导的局限性是难以克服的结构性问题。其本质源于上一节指出的大分子电子通道联通问题。因此，LK-99并不代表前面概述的超导工程原理的最佳实施方案，而是恰恰应该避免的。

这种各向异性超导特征在II型超导体中很常见，导致超导在不同方向磁场影响下的差异反映。例如，铜酸盐超导体通常表现出类似钙钛矿的结构，其特征是扭曲的、缺氧的多层排列。超导通常发生在这些化合物中交替的CuO₂层。其临界温度会随着CuO₂层数的增加而升高。譬如，在YBCO这样的超导体中，超导性也主要发生在CuO₂层上。尽管这种超导的联通性也会在晶边界处被破坏，然而，YBCO超导的二维性质使其比LK-99的一维超导更加稳定可靠。

电子通道从理论上为我们揭示了超导形成的微观机制，指明实现超导的关键在于压缩分子间距。LK-99的合成方式部分实施了电子通道理论提出超导工程指导原则：就是通过调整分子结构，利用分子引力抵消排斥力，压缩分子间距，从而避免对外部压力的依赖，实现超导。尽管LK-99有诸多局限性，然而，还是具有划时代的意义。它改变了室温超导合成的工程理念。以前的超导研究重点是利用外部压力来克服分子排斥力，压缩分子间距。LK-99另辟新径，避免了对外部压力的依赖，标志着室温超导发展的一个新时代。

此外，实施分子压缩这一目标的方法和途径不是唯一的。按照上一节中概述的工程原理，应该可以设计出更好方案，合成更加优质的超导材料指日可待。

深入探讨

本文的观点对于部分读者最大挑战是放弃对现有知识体系中传统电阻模型的执着。很多人对传统模型深信不疑，以至于百年来很少有人质疑。这也许是阻碍我们理解超导形成机制，迟迟无法合成室温超导的根源。本文用通俗的科普语言希望能够满足人们对了解超导的热情。文中略过或简化了很多理论细节。下面是这方面探讨的相关文献。欢迎感兴趣的仁人志士不吝赐教。希望我们的讨论能够提升人类对自然的认知，早日合成室温超导，造福人类。

版本更新

- 08/28/2023: 本文在斯坦福初始发布
- [11/02/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, PDF
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, PDF
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, PDF
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, PDF

相关文献

- [热力学中的错误概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [布朗运动的原动力 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [温度是分子平均动能的标志吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [绝对零度的本质 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [能量转换三角 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [热膨胀是由于粒子振动引起的吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [超流体不是流体 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [为什么相变温度保持恒定 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [摩擦为何会产生热量? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [简明熵概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [熵可以减少 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [回归原理 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [金属中是否存在自由电子海? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [电子通道: 导体超导统一论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [低温和高温超导统一理论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [LK-99的局限和意义 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [地球磁场超导起源说 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [关于质量的本质问题 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [从万有引力定律到广义相对论的演化 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [爱因斯坦质能方程的最简单推导 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [如何理解相对论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [数学并非科学 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [潮汐能并非可再生能源 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)