

---

# 7年攻关登《自然》：材料基因解密高温超导机理

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/17415.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

7年攻关登《自然》：材料基因解密高温超导机理。1986年，德国科学家贝特诺茨和美国科学家缪勒发现，铜氧化物陶瓷材料在较高温度下出现了超导现象，这被称为是科学发展的重大突破。他们也因此获得1987年的诺贝尔物理学奖。

高温超导为什么会出现在，背后的机理是什么？近30余年，世界各地的科学家都在奋力寻找，超导性的确切机制仍然难以破解。

中国科学院物理研究所研究员金魁团队与合作者组成国际团队，历时7年进行系统实验，利用材料基因工程连续组分外延薄膜与匹配的跨尺度表征技术获得了奇异金属散射（线性电阻斜率 $A1$ ）与高温超导转变温度（ $T_c$ ）之间的普适物理规律（ $A10.5 \sim T_c$ ）。相关成果于2月17日发表于《自然》杂志。

## 从奇异金属中寻找答案

超导自诞生至今已有110年的研究历史，早期的超导研究集中在传统金属及合金中，其超导转变温度通常较低（ $< 30\text{ K}$ ）。在超导转变温度之上，超导体处于正常态，跟普通金属性质相似。

超导转变温度即临界温度，物质在进入超导状态的温度，此时物质的电阻率为0，具有完全抗磁性。

1957年，科学家构建了以声子为媒介的电子配对（库伯对）图像，从而首次建立了超导微观理论，成功地解释了传统金属及合金中的超导电性。

1986年发现的铜氧化物超导家族出现了高温超导现象，随后的科学家们不断在更高温的状态下发现超导现象，其超导转变温度在常压下最高到达了135 K，且已有的实验结果证实高温超导体中同样存在电子配对。

但高温超导机理经过30多年研究仍未达成共识，成为凝聚态物理研究中的跨世纪难题。究其原因，高温超导体系的复杂性使得研究者对决定其转变温度的重要物理量实验认识仍然不足，尚不能启发理论突破。论文通讯作者金魁告诉《中国科学报》。

随着研究不断深入，越来越多的证据表明，高温超导机理的奥秘可能存在于产生超导的正常态当中。

---

金魁解释，对铜氧化物超导体来说，当温度升至超导转变温度以上，其电阻率与温度呈线性关系，这也被称为奇异金属行为，是高温超导体正常态中最为不正常的特性。

而奇异金属行为的机理起源同样尚未可知，已有实验结果表明，奇异金属与高温超导相辅相成。

这表明高温超导和奇异金属这两个看似无关的物理效应密切相关，这为我们解开高温超导机制的谜团提供了一条重要线索。中国科学院院士、论文作者之一物理所研究员向涛说。

从量变到质变

要找到量化联系，先得找到两者之间的定性关联。

2008年，金魁前往美国马里兰大学作博士后。他遇到了两位导师，分别是材料工程和高温超导研究的国际顶尖学者。

他将材料工程和高温超导研究融合，希望能从一类关键高温超导体系 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  (LCCO) 中找到答案。LCCO是唯一覆盖全超导掺杂区的电子型高温超导体系，但只能以单晶薄膜的形式稳定存在。

经过3年的努力，在2011年，金魁获得了系列高质量单组分LCCO超导单晶薄膜，并与合作者首次获得完整的电子掺杂铜氧化物过掺杂区域相图，这一成果在《自然》杂志上发表。

这张相图，帮助金魁发现了奇异金属散射率 $A_1$ 与超导转变温度 $T_c$ 的关系是正相关，这也就暗示着奇异金属态与高温超导存在某种内在联系。然而受组分控制精度需要达到约百分之一的限制，使用传统的单点研究模式难以得到足够数量的高精度数据，难以获取两者之间的定量化规律。

2012年是金魁作博士后的最后一年，他想回国后继续发展新一代高效率材料基因技术，并融入高温超导之中，以此研究定量化规律。这个想法跟导师们商量时，导师们摇摇头，觉得非常难。

然而，回到中科院物理所超导国家重点实验室的金魁还是决定拼一把。他带领团队针对高温超导材料特点，发展了高通量制备与跨尺度快速表征技术。2017年，他们首次利用组合激光分子束外延技术在1平方厘米单晶衬底上成功制备出具有连续化学组分梯度的单一取向LCCO高通量薄膜。

在此基础上，结合团队发展的从毫米到微米的跨尺度结构和输运表征技术，将物性分辨率提升两个数量级（至万分之一），从而精确地确定了量子临界组分 $x_c$ 。通过国际合作在美国劳伦斯伯克利国家实验室同步辐射光源完成微米量级的X射线结构分析。

传统实验方法三年时间只有个别数据点，而基于新一代全流程高通量实验，团队成功在数月时间积累足够数量的可靠数据，并首次观察到了超导转变温度 $T_c$ 、相对掺杂组分 $(x-x_c)$ 与奇异金属散射率 $A_1$ 三者之间的定量化规律  $T_c \sim (x-x_c)^{0.5} \sim A_1^{10.5}$ 。

论文另一通讯作者、美国马里兰大学教授Takeuchi说：我们能够证明，人们可以控制并连续跟踪化合物的组成，而这种材料中成分的高精度控制从未被证明过。

材料基因技术对高温超导研究究竟有怎样的优势？

---

金魁表示，材料的高通量制备与表征技术，可以在相图空间实现参量的线扫描甚至面扫描，可快速建立可靠的高温超导高维相图和高温超导关键参量数据库，并从中提取重要的统计物理规律，也就是从量变到质变的突破。

### 开辟研究范式

更重要的是，从LCCO中获得的 $T_c \sim A^{10.5}$ 规律可推广至空穴型铜氧化物、铁基超导体、有机超导体等非常规超导体系，具有普适性，这也表明了奇异金属态与非常规超导态有共同的驱动因素。

金魁表示，推进材料基因计划与超导研究的深度交叉融合，开创了独具特色的高通量超导研究范式，将在构建高维精确相图、突破高温超导机理、推进超导材料实用化等方面发挥不可替代的作用。

两名国际审稿人高度评价该研究，连续组分外延薄膜与匹配的跨尺度表征技术加速高温超导定量物理规律探索的新型研究范式是tour de force（绝技）。

研究也得到了理论的解释和支持。理论物理学家、中科院物理所研究员胡江平是共同通讯作者，他表示，发现的标度关系将超导配对强度与载流子的扩散过程联系起来，这是所有理论推理或模型中的一个特殊目标，即使我们还不清楚是否可以从之前提出的理论模型和配对机制（如反铁磁自旋涨落）中获得这种关系。

在铜氧化物超导体发现30多年后，仍然缺乏确切证据来解释其背后的机制。精确的定量标度规律值得特别关注。论文作者、中国科学院院士赵忠贤说。

铜氧化物超导体中还有更多的谜团。研究团队将继续使用组合方法系统地追踪它们，探索产生高温超导电性的其他关键因素。（来源：中国科学报韩扬眉）

相关论文信息：<http://doi.org/10.1038/s41586-021-04305-5>

版权声明：凡本网注明来源：中国科学报、科学网、科学新闻杂志的所有作品，网站转载，请在正文上方注明来源和作者，且不得对内容作实质性改动；微信公众号、头条号等新媒体平台，转载请联系授权。邮箱：shouquan@stimes.cn。

作者：赵忠贤等 来源：《自然》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

---

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发