

# 铁基超导的前世今生\*

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2014-04-22收到

<sup>†</sup> email: hqluo@aphy.iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140701

## Iron-based superconductivity, then and now

LUO Hui-Qian<sup>†</sup>

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**摘要** 高温超导机理被誉为凝聚态物理学前沿研究皇冠上的明珠，铁基超导的发现和研极大促进了人们对高温超导电性的理解。文章将简要回顾超导研究的历史和基本概念，介绍铜基高温超导研究的现状及困难，详述铁基超导的发现及其在高温超导研究中的关键桥梁作用，着重介绍中国科学家在铁基超导洪流中做出的重要贡献。

**关键词** 高温超导，铁基超导体，铜氧化物超导体

**Abstract** High temperature superconductivity is one of the unresolved problems at the cutting edge of condensed matter physics, stimulated greatly by the recent discovery and studies of iron-based superconductors. Here we briefly review the history and basic concepts of superconductivity, and the status of current research on copper-oxide high temperature superconductors. We will explain why iron-based superconductivity is so important as a key bridge between conventional and high temperature superconductivity, and remark, in particular, on the significant contributions from China.

**Keywords** high temperature superconductivity, iron-based superconductors, copper-oxide superconductors

自2008年凝聚态物理学领域掀起铁基高温超导研究热潮以来，铁基超导的科学研究已经步入第6个年头，发表的有关铁基超导研究论文已经数万篇。截止到2013年2月，全世界在铁基超导研究领域被引用数排名前20的论文中，9篇来自中国。铁基超导至今仍然是凝聚态物理基础研究的前沿科学之一，吸引了世界上诸多优秀科学家的目光。为什么铁基超导如此特别？它的发现对基础物理研究有着什么样的重要影响？中国人在铁基超导洪流中起到了什么样的角色？本文将为您逐一揭晓铁基超导的前世今生。

19世纪末20世纪初，人们在气体理论的指导下在实验室不断将各种气体液化，创下了一系列低温记录。直至1908年7月10日，荷兰莱顿大学的昂尼斯等人成功把最后一个“顽固的气体”——氦气液化，确立液氦沸点为4.2 K(热力学温标中，0 K对应着 $-273.2^{\circ}\text{C}$ ，4.2 K即相当于 $-269^{\circ}\text{C}$ )，从此开启了低温物理研究的新篇章(见图1)。1911年4月8日，昂尼斯等试图研究金属在低温下的电阻行为，当他们把金属汞降温到4.2 K时，发现其电阻值突然降到仪器测量范围的最小值( $10^{-5} \Omega$ )，即可认为电阻降为零(见图2)<sup>[1]</sup>。昂尼斯把这种物理现象叫做超导，寓意超级导电，他本人因液氦的成功制备和超导的发现获得

\* 本文部分内容发表在2014年《百科知识》第3期，此稿为完整版。

了1913年的诺贝尔物理学奖<sup>[2]</sup>。此后，人们又陆续发现了许多单质金属及其合金在低温下都是超导体，一些非金属单质在高压等特殊条件下也是超导体。在元素周期表中，除了一些磁性单质、惰性气体、放射性重元素和部分碱金属外，许多元素单质都是超导体<sup>[3]</sup>。1933年，德国物理学家迈斯纳通过实验发现，超导体存在其自身特性，和人们所猜想的理想金属导体(低温下电阻逐渐降为零)有很大的区别<sup>[4]</sup>。即超导体除了零电阻外，它还具有另一种独立的神奇特性——完全抗磁性。超导体一旦进入超导态，就如同武功大侠练就了“金钟罩、铁布衫”一样，外界磁场根本进不去，材料内部磁感应强度为零。判断一个材料是否属于超导体，必须同时具有零电阻和完全抗磁性这两个独立特征。利用零电阻的超导材料替代有电阻的常规金属材料，可以节约输电过程中造成的大量热损耗；可以组建超导发电机、变压器、储能环；可以在较小空间内实现强磁场，从而获得高分辨的核磁共振成像，进行极端条件下的物性研究，发展安全高速的磁悬浮列车等等。超导磁体在基础物理实验研究中有着不可替代的应用，例如，发现Higgs玻色子的欧洲大型强子加速器(LHC)的加速通道和探测器都大量采用了超导磁体；未来的能源明星国际热核聚变实验堆(ITER)依赖超导磁体约束核聚变以达到可控目的；在凝聚态物理和生物物理等相关仪器上超导磁体的应用更是比比皆有。但在日常生活中，超导体的声名可比半导体小多了，这是为何？一般来说，半导体在室温下就能用，但超导体往往需要非常低的温度环境(低于其超导临界温度)，这种低温环境需要依赖于昂贵的液氦或者其他低温设备来维持，这极大地增加了超导应用的成本。解决这一问题关键在于寻找更高临界温度的超导体，特别是室温超导体——这是所有超导研究人员的终极梦想。

除了寻找更高临界温度的超导材料之外，超导研究的物理学家同时担任着另一项重要科学任务——从微观层面解释为什么电子能够在固体材料中“畅行无阻”。包括爱因斯坦、玻尔和费曼等在内的世界上许多顶级聪明的物理学家都曾试

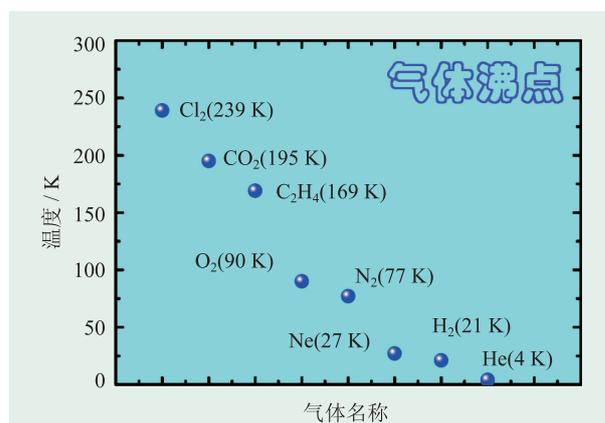


图1 各种气体的沸点

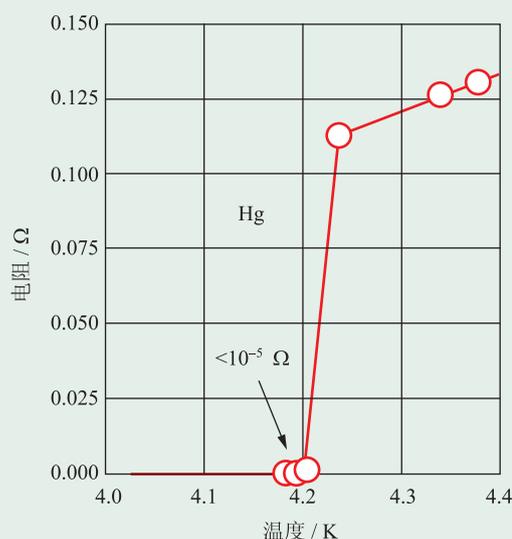


图2 金属汞的电阻在4.2 K突然降为零

图完成这个任务，然而他们都失败了。在超导发现46年之后的1957年，常规金属超导微观理论被美国三名物理学家成功建立，这个理论以他们的名字(巴丁、库珀、施里弗)命名为BCS理论<sup>[5]</sup>。BCS理论认为，常规金属合金中的自由电子除了人们熟知的库仑排斥作用外，还可以间接地产生一种较弱的吸引相互作用。因为固体材料中的原子总是在平衡位置附近不停地热振动，原子核和其内部电子构成带正电的原子实会对“路过”带负电的电子存在吸引相互作用，因此后一个路过的电子将“感受”到前一个路过的电子造成的“印记”，即它们之间存在一种间接相互作用，其媒介就是周期排列的原子产生的热振动能量量子——声子。如果两个电子运动方向相反(动量相反)，

那么它们各自与周围原子实的相互作用就可以等效为它们之间存在一种弱的吸引相互作用，就像冰面上两个舞者互相抛接球一样，这种作用力导致材料中的电子两两配对。配对后的电子对又叫库珀对，如果所有库珀对在运动过程中保持步调一致，那么配对电子即便受到运动阻碍也会彼此消，使得整个配对的自由电子群体都可以保证能量损失为零，从而实现零电阻状态。尽管BCS理论如此美妙地用“电子配对、干活不累”的创意解决了常规金属合金超导机理问题，但其创新大胆的思想却迟迟难以被人们所接受，直到多年后被实验所证实才于1972年被颁发诺贝尔物理学奖<sup>[2]</sup>。作为唯一获得两次诺贝尔物理学奖的巴丁，早在1956年因发明了半导体晶体管而获奖，在半导体和超导体两大领域做出了巨大的科学贡献<sup>[2]</sup>。有了理论指引，更高临界温度的超导体似乎已经可以“按图索骥”，然而，兴奋的实验物理学家只在Nb<sub>3</sub>Ge合金中找到了23.2 K的超导，历时60余年的超导探索之路，如同乌龟踱步一样，路漫漫其修远(见图3)<sup>[6]</sup>。何处是曙光？凝聚态理论物理学家再次无情地泼了一大瓢冷水——

他们基于BCS理论框架计算出，所有的金属合金超导体临界温度存在一个40 K的理论上限，称作麦克米兰极限。这是因为金属原子实热振动这个中间媒介的能量存在上限，要获得高于40 K的超导电性，就会导致原子构成的周期晶格最终融化<sup>[7]</sup>。40 K，离300 K附近的室温似乎遥遥不可及。但，这会是一个无法逾越的障碍吗？

幸运的是，实验物理学家并没有因此放弃梦想，他们一直在努力。直到今天，新的超导材料正在不断被人们所发现。研究表明，绝大部分非磁性金属单质在足够低温度下都可以超导，这些单质炼成合金，临界温度将更高，它们统称为“金属合金超导体”；一些金属化合物中电子尽管显得“很笨重”(电子有效质量很大)，也能实现超导，被归为“重费米子超导体”；C<sub>60</sub>和碱金属的化合物，甚至一些有机材料，也是超导体，被划为“有机超导体”；更令人欣喜的是，许多往往被认为导电性能很差的金属氧化物(如钛氧化物、铋氧化物、铋氧化物、钇氧化物、钴氧化物等)也是超导体<sup>[6, 7]</sup>。超导，几乎无处不在地存在于各种形式单质和化合物中！既然“条条大路通

超导”，物理学家开始了更大胆的探索，他们在通常认为是绝缘体的铜氧化物陶瓷材料中寻找可能的超导电性。自1986年开始，曙光终于破雾而出。位于瑞士苏黎世的IBM公司的两名工程师柏诺兹和缪勒在La-Ba-Cu-O体系中发现可能存在35 K的超导电性<sup>[8]</sup>。尽管临界温度尚未突破40 K，但是35 K已经是当时所有超导体临界温度的新纪录，为此柏诺兹和缪勒获得了1987年的诺贝尔物理学奖。一场攀登超导巅峰之战由此拉开帷幕，其中不乏中国人和华人科学家的身影。1987年2月，美国休斯顿大学的朱经武、吴茂昆研究组<sup>[9]</sup>和中国科学院物理研究所的赵忠贤研究团队分别独立发现，在Y-Ba-Cu-O体系中存在90 K以上的临界温度，超导研究首次成功突

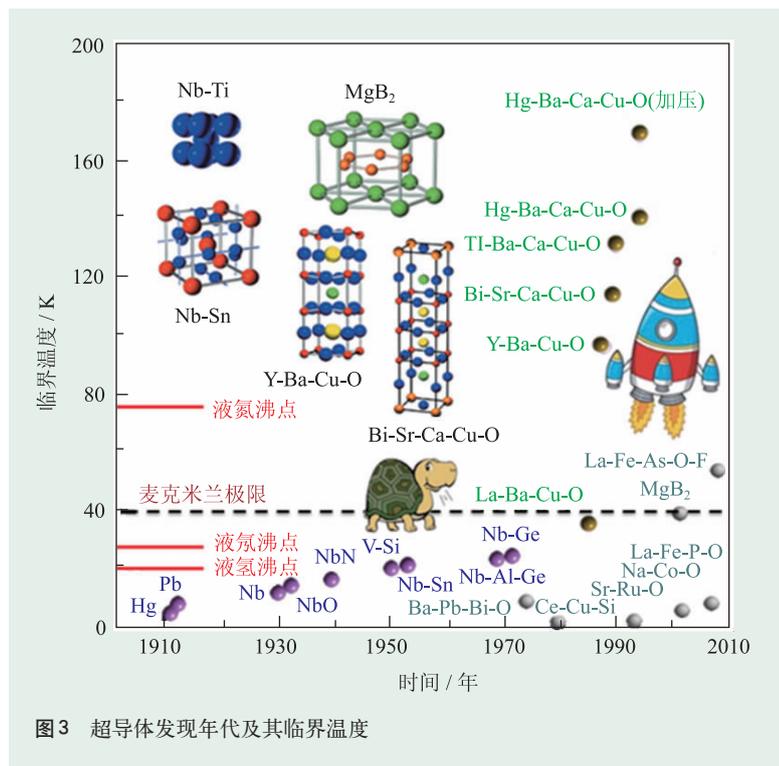


图3 超导体发现年代及其临界温度

破了液氮温区(液氮的沸点为 77 K)<sup>[10]</sup>。采用较为廉价的液氮将极大地降低超导的应用成本,使得超导大规模应用和深入科学研究成为可能,赵忠贤研究团队也因此获得 1989 年国家自然科学一等奖。之后的十年内,超导临界温度记录以火箭般速度往上窜,目前世界上最高临界温度的超导体是 Hg-Ba-Ca-Cu-O 体系(常压下 135 K,高压下 164 K),由朱经武研究小组于 1994 年创下(见图 3)<sup>[11]</sup>。由于铜氧化物超导体临界温度远远突破了 40 K 的麦克米兰极限,被人们统称为“高温超导体”(这里的高温,实际上只是相对金属合金超导体较低的临界温度而言)。铜氧化物高温超导家族具有多个子成员,按元素划分有汞系、铊系、铋系、钇系、镧系等;按照载流子形式可以划分为空穴型和电子型两大类;按照晶体结构中含有的 Cu-O 面层数可以划分为单层、双层、三层和无限层等。随着实验研究的铺开,人们很快认识到,铜氧化物高温超导体(或称铜基超导体)不能用传统的 BCS 超导微观理论来描述。要获得如此之高的临界温度,仅仅依靠原子热振动作为中间媒介形成配对电子是远远不够的。进而,人们发现重费米子超导体、有机超导体和某些氧化物超导体均不能用 BCS 理论来描述,尽管电子配对

的概念仍然成立,但是如何配对、配对媒介和配对方式却千奇百怪。不能用传统 BCS 理论描述的超导体又被统称为“非常规超导体”,区别于可以用 BCS 理论描述的“常规超导体”,也就是说,所有的高温超导体都属于“非常规超导体”<sup>[12]</sup>。有意思的是,2001 年日本科学家在二硼化镁(MgB<sub>2</sub>)材料中发现 39 K 的超导电性<sup>[13]</sup>,后来该材料被证实为常规超导体,目前为止发现的临界温度最高的常规超导体,距离 40 K 的上限仅一步之遥。之所以能达到如此高的临界温度,是因为这种超导材料中有多种类电子都参与了超导电子配对,又被叫做多带超导体(见图 4)。既然是常规超导体,40 K 的麦克米兰极限也同样适用于二硼化镁,十余年来,物理学家在 MgB<sub>2</sub> 中无论怎么掺杂或者加压,都无法突破这个“紧箍咒”<sup>[14]</sup>。由此可见,寻找到一种 40 K 以上的高温超导材料是何其困难!

高温超导体的发现在当时沉闷的超导研究领域响起一阵春雷,人们对超导未来的发展满怀期待。然而现实总是残酷的,似乎触手可及的室温超导之梦停滞在 164 K 这个世界纪录上,再也难以往上挪动半步。人们试图在液氮温区大规模推广高温超导强电应用技术时,发现它实际上“中

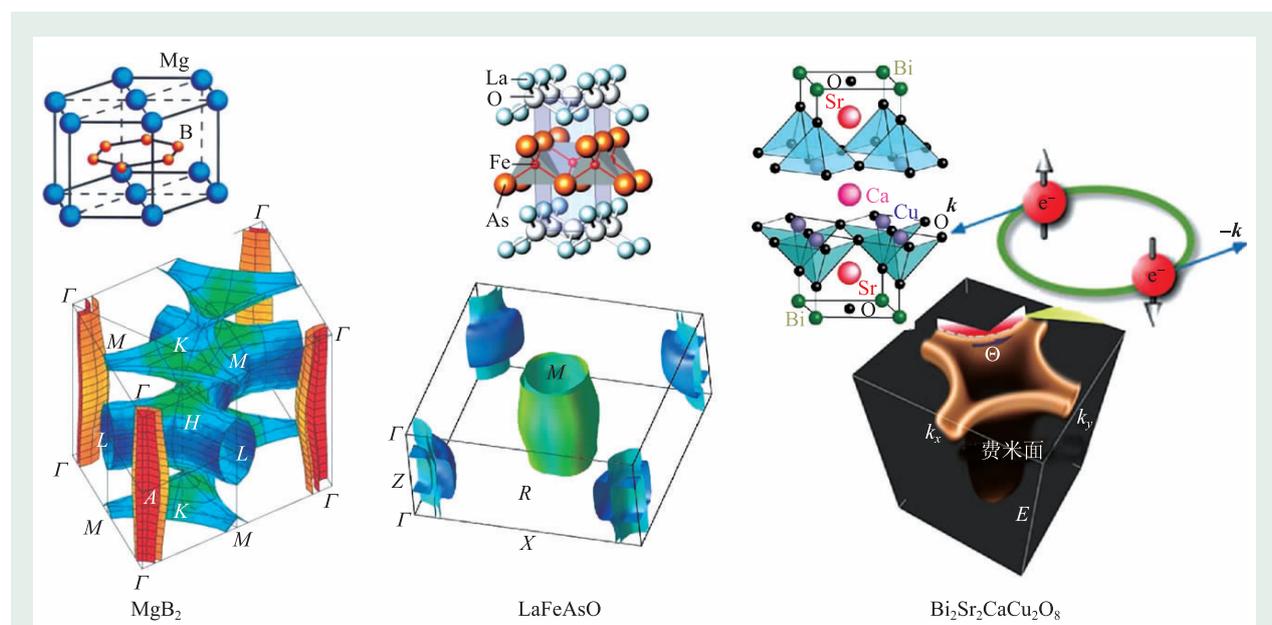


图4 二硼化镁、铁基超导、铜基超导材料的典型结构和费米面

看不中用”。本质为陶瓷材料的铜氧化物在力学性能上显得脆弱不堪、缺乏柔韧性和延展性，在物理上其临界电流密度太小，容易在承载大电流时失去超导性而迅速发热。科学家们经过 20 余年的工艺努力，铜氧化物超导线圈虽然已开始步入市场，但绝大部分超导强电应用还停留在常规金属合金超导体上。不过塞翁失马焉知非福，铜基超导的弱电应用近些年来发展迅速，已经成为超导应用的一大分支<sup>[15]</sup>。利用铜基超导材料制备成的超导量子干涉仪是目前世界上最灵敏的磁探测技术，也是超导量子比特的基本单元，未来世界可能出现以超导比特为单元的量子计算机——一种基于量子力学原理的高速计算机。而用铜氧化物超导薄膜制备的超导微波器件正在走向商业化和市场化，您正在使用的 3G 或 4G 手机，其通讯基站就很可能用到了具有高信噪比的超导滤波器，这些高性能微波器件在军事设备、卫星通讯、航空航天等领域同样大有用武之地。由于铜基超导体在非常规超导体中最为特殊，因此也具有非常重要的基础研究价值，高温超导电性的微

观机理，成为凝聚态物理学皇冠上的明珠之一。挑战远远比想象中的困难，人们发现高温超导体里很多新奇物理现象可能超出了目前物理学理论体系所能理解的范畴，其中最为麻烦的就是，这类材料中电子之间存在很强的相互关联效应，成为强关联体系。经过近 30 年的奋斗，人们对铜基超导体取得共识的研究结论寥寥无几，更多的是充满争议和困惑。用理论来指导寻找更高临界温度的超导体，近乎痴人说梦，而实验物理学家只能凭经验和感觉来大海捞针。

2008 年 3 月 1 日—5 日，活跃在超导研究最前沿的一群中国科学家齐聚在中国科学院物理研究所，参加“高温超导机制研究态势评估研讨会”，探讨迷惘的高温超导研究未来之路，试图甄别铜基高温超导研究的突破点。此时，中国科学院物理研究所的超导实验室和极端条件实验室与远在合肥的中国科学技术大学已悄然走在了超导研究变革的前沿。2008 年 2 月 23 日，日本西野秀雄研究小组报道了在氟掺杂的 LaFeAsO 体系中存在 26 K 的超导电性<sup>[16]</sup>。中国科

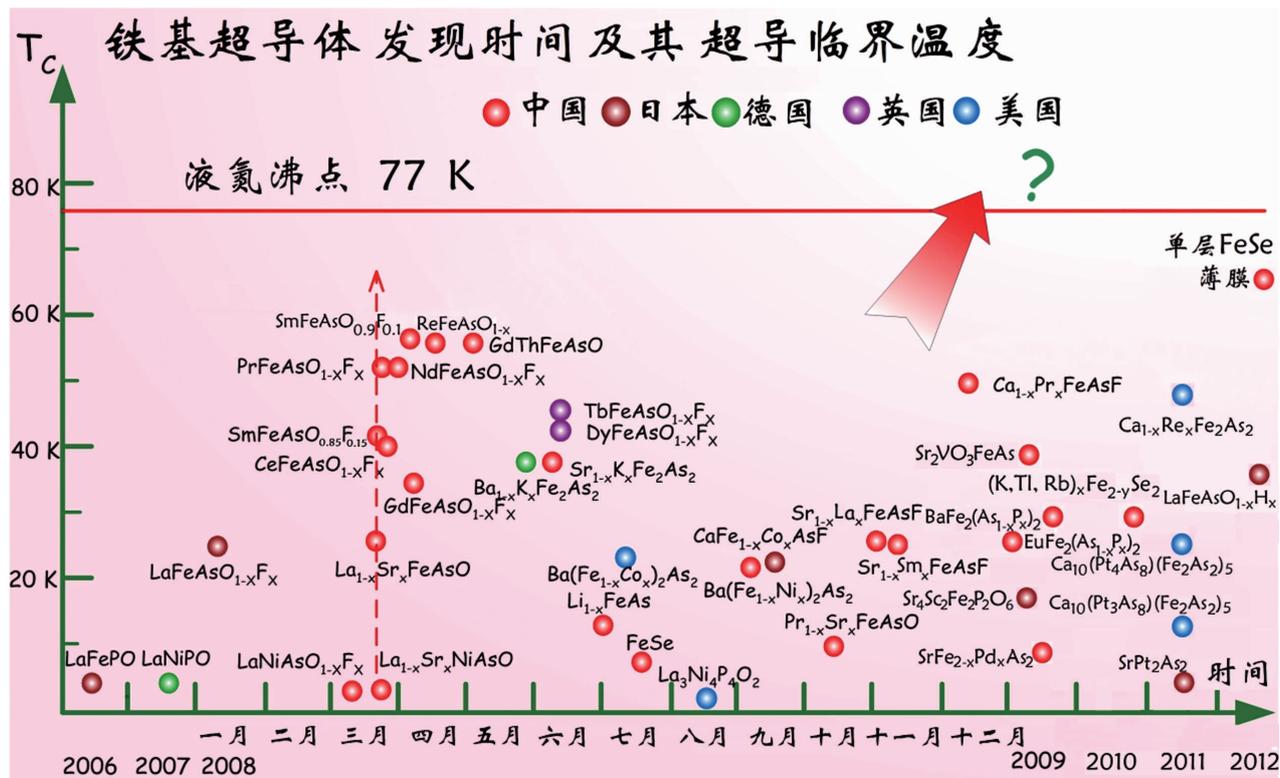


图5 铁基超导体发现时间及其超导临界温度

学家在得知消息的第一时间里合成了该类材料，并开展了物性研究，其中中国科学院物理研究所和中国科学技术大学的研究人员采用稀土替代方法获得了一系列高质量的样品，惊喜地发现其临界温度突破了40 K，优化合成方式之后可以获得55 K的高临界温度<sup>[17]</sup>。新一代高温超导家族——铁基高温超导体就此诞生，这一次从新超导体发现到临界温度突破麦克米兰极限仅仅用了不到三个月的时间，新的超导记录几乎以天为单位在不断更新。在随后几年里，新的铁砷化物和铁硒化物等铁基超导体不断被发现，典型母体如 LaFeAsO、BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>、LiFeAs、FeSe 等，这些材料几乎在所有的原子位置都可以通过不同的掺杂而获得超导电性，其中大量铁基超导体由中国科学家所发现(见图5和图6)<sup>[18]</sup>。根据铁基超导材料基本组合规则(碱金属或碱土金属+稀土金属+过渡金属+磷族元素+氧族元素)，粗略估计其家族成员数目有3000多种，现今发现的体系不过是其中九牛一毛，真可谓是迄今为止最庞大超导家族。铁基高温超导体的发现无疑为当时几近低迷的高温超导研究注入了一股前所未有的“强心剂”，已逾百年的超导研究从此焕发

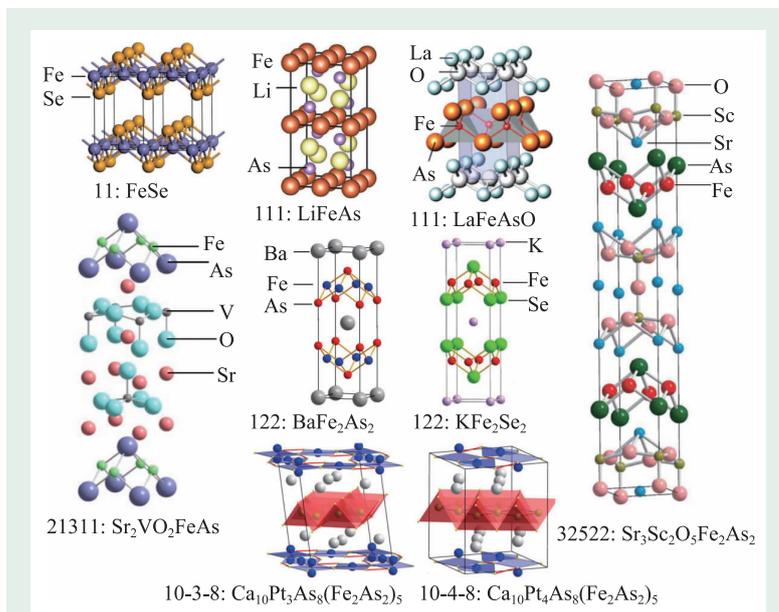


图6 已发现的铁基超导典型母体结构

了新一轮的青春活力。作为继铜基超导体之后的第二大高温超导家族，铁基超导体具有更加丰富的物理性质和更有潜力的应用价值。它和铜基超导体存在“形似而神不似”关系，晶体结构、磁性结构和电子态相图均非常类似(见图7)；但是它从电子结构角度又属于类似二硼化镁那样的多带超导体(见图4)；其母体更具有金属性，和具有绝缘性的铜氧化物母体截然不同(铜氧化物仅在掺杂后才出现金属性)；目前已经确认电子配对概念仍然适用，在配

了新一轮的青春活力。

作为继铜基超导体之后的第二大高温超导家族，铁基超导体具有更加丰富的物理性质和更有潜力的应用价值。它和铜基超导体存在“形似而神不似”关系，晶体结构、磁性结构和电子态相图均非常类似(见图7)；但是它从电子结构角度又属于类似二硼化镁那样的多带超导体(见图4)；其母体更具有金属性，和具有绝缘性的铜氧化物母体截然不同(铜氧化物仅在掺杂后才出现金属性)；目前已经确认电子配对概念仍然适用，在配

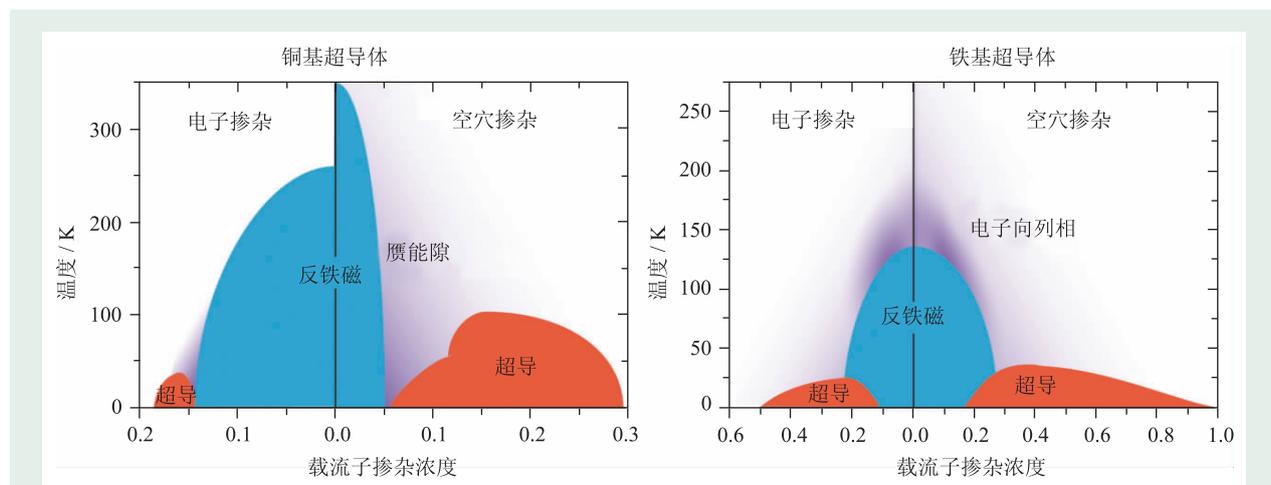


图7 铜基超导体和铁基超导体具有类似的电子态相图

对媒介上可能和铜基超导体类似，但配对方式却更接近于传统金属超导体<sup>[19]</sup>。总体来说，铁基超导体更像是介于铜基超导体和传统金属超导体之间的一个桥梁，使得人们有可能从已知的常规超导机理“摸着桥梁过河”到原本模糊不堪的铜基高温超导机理(见图4)。通过多年来在铜基超导研究中的经验和技能积累，在铁基超导发现之后，有关超导的实验技术和理论基础研究进度相比铜基超导当年已是大大加速，目前6年来的研究成果几乎可以和铜基超导近30年以来的研究成果相匹敌，在某些方面甚至超越了之前高温超导研究的认识，高温超导微观机理的研究遇到了前所未有的良好契机。在应用方面，铁基超导体由于其金属性，更加容易被加工成线材和带材，而其可承载的上临界磁场/临界电流和铜基超导体相当，甚至有可能更优越。当然，制备铁基超导材料大部分情况下需要砷化物和碱金属或碱土金属，具有较强的毒性同时又对空气异常敏感，这对材料制备工艺和使用安全方面提出了更高的要求。在超导的弱电应用方面，铁基超导还处在刚刚起步阶段，相对已经趋于成熟的铜基超导弱电应用还有很大差距。从材料角度来说，铁基超导体更具有灵活多变性，这让高温超导的研究空间大大得到了拓展，许多实验现象也可以在不同体系中进行比照研究，从而得出更加普适的结论。如前所述，几乎在铁基母体材料中的任何一个原子位置进行不同价位甚至同价位的元素掺杂都可以实现超导电性，不同体系材料的超导电性随外界压力演变也有所不同。更有趣的是，日本科学家还发现，用各种酒泡过的母体材料也可以超导，真是“醉翁之意不在酒，在乎超导之间也”！<sup>[20]</sup>铁基超导体的发现极大地鼓舞了超导材料探索者的信心，正如发现二硼化镁的日本科学家豪言：“我相信世界上所有材料都有可能成为超导体，只要达到足够多载流子或足够强的压力或足够低的温度等外界条件，就有希望实现超导！”(例如，按照BCS理论推断，如果金、银、铜等单质超导，其临界温度已非常接近绝对零度。)

在含铁的化合物中寻找高温超导电性本身

就是一件突破常规的事情，因为通常认为铁离子带有磁性，会极大地破坏超导。出乎意料的是，在铁砷化物母体中掺杂磁性离子(如钴和镍)反而会诱发超导电性，铁基超导的发现证明，磁性和超导其实完全可以“和平共处”，新超导体的发现往往就在打破常规之处。在2001年科学家发现无磁性的单质铁在高压下也会出现超导电性。令人惊讶的是，2008年之前发现的含铁的合金或化合物超导材料有10余种之多，从这个角度来说，铁基超导一点都不稀奇！不过，新超导体的发现确实需要机遇、运气和长期经验积累，日本的西野秀雄原先并不是研究超导的，他的研究组一直致力于寻找透明导电氧化物材料，早在2000年左右就开始寻找LaCuSO、LaMnPO等类似结构的导电材料，并于2006年意外发现LaFePO材料中存在3 K左右的超导电性<sup>[21]</sup>，之后意识到LaFeAsO化合物中同样可能存在超导电性，通过掺杂氟，他们才获得了26 K的新超导体。关于铁基超导还有几个有趣的史实。德国科学家W. Jeitschko的研究组从1977年到1995年一直在研究与LaFePO具有类似结构的化合物，他们陆续合成了铁磷化物、钴磷化物和钨磷化物等。到了2000年，具有同样晶体结构的稀土—铁砷化物也被成功制备，遗憾的是，他们没有进一步用氟替代掺杂，与新超导体的发现只能擦肩而过<sup>[22]</sup>。更令人感慨的是，在后来发现具有BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>类似结构的铁基超导体(如EuFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>、KFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>、RbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>、CsFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>、BaNi<sub>2</sub>As<sub>2</sub>、SrNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub>等)早在上世纪70—90年代就有相关报道，只是因为它们临界温度太低，一直不被人们所注意或者想当然地认为它们也属于常规超导体。相比之下，西野秀雄等人准确地把握住了机会，一举发现了铁基超导体，并在他们发表的头两篇论文中均引用了德国科学家的成果。中国科学家们敏锐地注意到了这几篇重要的引文，并在第一时间利用稀土替代效应和高压迅速合成材料方法成功突破了麦克米兰极限，让铁基超导成为第二大高温超导家族，从而在极短的时间内吸引了全世界凝聚态物理学家的目光。

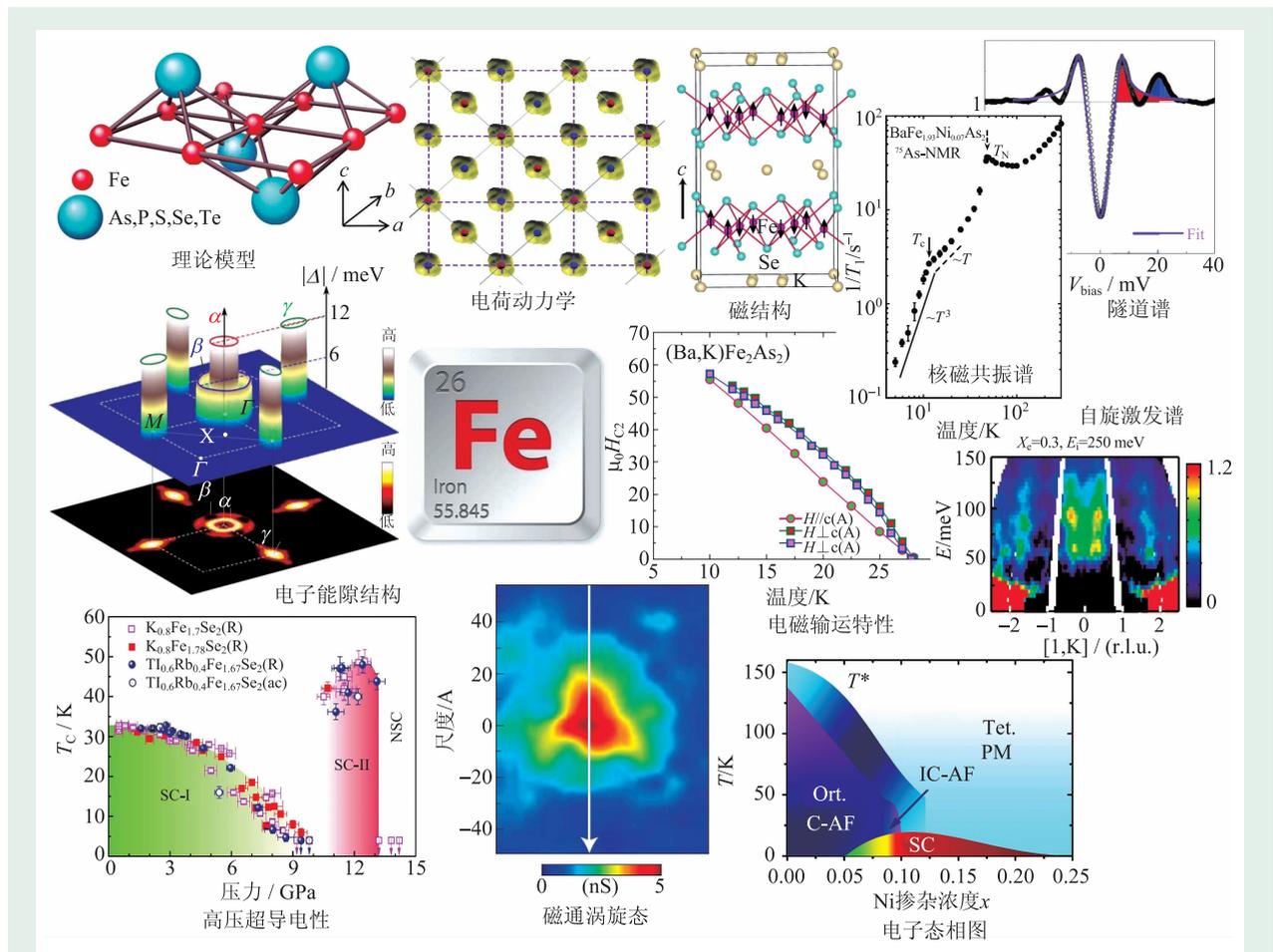


图8 中国科学家在铁基高温超导机理研究中取得的代表性进展

令人值得赞赏的是，中国科学家在铁基超导研究洪流中，不仅仅局限于新超导材料的发现和临界温度的提升，这个研究群体从材料、实验、理论和应用等四大方面都取得了世界瞩目的前沿成果。在已发现的十余种铁基超导体中，中国科学家独立发现了4种<sup>[18, 19]</sup>，在铁基超导发现后的短短三个月内就确立了块材临界温度的最高纪录55 K<sup>[17]</sup>，通过高压条件在同一材料中发现了新的高温超导相<sup>[23]</sup>，在优先获得高质量样品的基础上，率先对铁基超导材料的电磁热输运特征<sup>[24]</sup>、内部电子结构<sup>[25]</sup>、超导能隙分布<sup>[26]</sup>、电荷动力学<sup>[27]</sup>、磁通涡旋态<sup>[28]</sup>、磁结构<sup>[29]</sup>和自旋动力学<sup>[30]</sup>等关键物理特性开展了深入研究，取得了一系列深受国际同行赞赏的重要成果；在理论上成功预言了铁基超导的多种物理特性并提出可能的高温超导微观模型<sup>[31]</sup>；在应用方面，成功利用铁基材料获得

了很高的临界电流密度和高质量的超导薄膜(见图8)<sup>[32]</sup>。不仅如此，中国科学家还和国际同行开展了广泛合作研究，从近些年超导相关的国际会议就可以看出，中国和华人科学家已经成为铁基超导研究的主力军。近几年来，国际上一些著名研究组由于种种原因渐渐淡出铁基超导研究领域，但中国科学家们一直在不懈努力推进铁基超导的相关研究，并取得了许多令人鼓舞的进展。2010—2012年，一大类新的铁基超导体系 $A_{1-x}Fe_{2-x}Se_2$  (A为碱金属等)被中国科学家发现，其奇异的物理特性对现有的铁基超导理论模型提出了挑战<sup>[33]</sup>。2011—2013年，中国科学家发现一类具有和铁基材料相同结构的 $Li(Zn,Mn)As$ 、 $(Ba,K)(Zn,Mn)_2As_2$ 等稀磁半导体<sup>[34]</sup>。2012—2014年，中国科学家还发现，高温超导其实并不需要太复杂的结构，只需在特殊基片上生长薄薄一层FeSe原子层就可以

实现 60 K 以上的高温超导<sup>[35]</sup>, 这说明另一种模式——界面超导也可能实现高温超导电性, 而且这种高温超导电性既可以类比于常规超导体界面超导效应, 又可以类比于铜基超导的若干物理特性<sup>[36]</sup>。随着越来越多的铁基超导重要研究成果来自中国, 中国科学家已经走在了引领国际超导研究潮流的先锋队伍当中, 我们完全有理由相信, 未来的高温超导研究中, 一定会有更多的惊喜来自中国。正如美国《科学》杂志报道的一样, “中国如洪流般不断涌现的研究结果标志着在凝聚态物理领域, 中国已经成为一个强国。” 2008 年铁基超导被多家媒体评为世界十大科学进展之一, 中国铁基超导研究团队获得了 2009 年度“求是杰出科学成就集体奖”和 2013 年度国家自然科学一等奖, 这些奖项的获得极大地鼓舞了铁基超导相关科研人员的信心。

从 1911 年发现常规金属超导体, 到 1957 年 BCS 超导微观理论建立, 常规超导机理的解决之路走了漫长的 46 年。如今, 距离 1986 年高温超导体的发现已近 30 年, 随着 2008 年铁基超导的发现, 高温超导机理研究开始步入加速前进的状态, 人们普遍相信距离建立高温超导微观理论的目标已不远。在新超导材料探索方面, 几乎每一年度都会有多个新超导材料被发现, 尽管绝大部分临界温度都低于 40 K, 但其中展现出的新奇物性值得人们细细研究, 诸如铁基超导这样“意料之外、情理之外”的惊喜也可能将会再次诞生。谁也无法否认, 在不久的将来, 室温超导这个终极梦想也许会被实现甚至得到广泛应用。到那时, 我们生活的世界将出现翻天覆地的变化, 其中来自中国科学家们的贡献将永远值得我们铭记。

## 参考文献

- [1] Onnes H K. Leiden Comm., 120b, 122b, 124c (1911)
- [2] 诺贝尔奖官方网站 <http://www.nobelprize.org/>
- [3] 超导科普网站 <http://www.superconductors.org/>
- [4] Meissner W, Ochsenfeld R. Naturewissenschaften, 1993, 21: 787
- [5] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R. Phys. Rev., 1957, 108: 1175
- [6] 张裕恒. 超导物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997. 1—40
- [7] 章立源. 超越自由: 神奇的超导体. 北京: 科学出版社, 2005. 16—20
- [8] Bednorz J G, Müller K A. Z. Phys. B, 1986, 64: 189
- [9] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 908
- [10] 赵忠贤, 陈立泉, 杨乾声等. 科学通报, 1987, 32: 412
- [11] 周午纵, 梁维耀. 高温基础研究. 上海: 上海科学技术出版社, 1999. 200—220
- [12] Goll G. Unconventional Superconductors. German: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [13] Buzea C, Yamashita T. Supercond. Sci. Technol., 2001, 14: R115
- [14] Wilke R H T, Bud'ko S L, Canfield P C *et al.* Superconductivity in MgB<sub>2</sub>, in High Temperature Superconductors (edit by R. Bhattacharya and M. P. Paranthaman). Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010
- [15] 网站 <http://www.supraconductivite.fr/fr/index.php>.
- [16] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M *et al.* J. Am. Chem. Soc., 2008, 130: 3296
- [17] Ren Z A, Lu W, Yang J *et al.* Chin. Phys. Lett., 2008, 25: 2215
- [18] Wen H H. Adv. Mater., 2008, 20: 3764
- [19] Stewart G R. Rev. Mod. Phys., 2011, 83: 1589
- [20] Deguchi K, Mizuguchi Y, Kawasaki Y *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2011, 24: 055008
- [21] Kamihara Y, Hiramatsu H, Hirano M *et al.* J. Am. Chem. Soc., 2006, 128: 10012
- [22] Quebe P, TerbÄuchte L J, Jeitschko W. J. Alloys and Comp., 2000, 302: 70
- [23] Sun L L *et al.* Nature, 2012, 483: 67
- [24] Yuan H Q, Singleton J, Balakirev F F *et al.* Nature, 2009, 457: 565
- [25] Ding H *et al.* EuroPhysics Letters, 2008, 83: 47001
- [26] Zhao L *et al.* Chin. Phys. Lett., 2008, 25: 4402
- [27] Hu W Z, Dong J, Li G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 101: 257005
- [28] Shan L *et al.* Nature Physics, 2011, 7: 325
- [29] de La Cruz C *et al.* Nature, 2008, 453: 899
- [30] Wang M *et al.* Nature Commun., 2013, 4: 2874
- [31] Hu J P. Phys. Rev. X, 2012, 2: 021009; 2013, 3: 031004
- [32] Ma Y W *et al.* arXiv: 1403.6704, 1309.7618, 1302.4855 and 1302.4583
- [33] Ying T P, Chen X L, Wang G *et al.* Sci. Rep., 2012, 2: 426
- [34] Jin C Q, Deng Z, Zhao K *et al.* Nature Communications, 2011, 2: 422; 2013, 4: 1442
- [35] Wang Q Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2012, 29: 037402
- [36] Zhou X J, Liu D F, He S L *et al.* Nature Communications, 2012, 3: 931; Nature Materials, 2013, 12: 605