



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 41

高温超导物理

(第二版)

韩汝珊 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 41

高温超导物理

(第二版)

韩汝珊 编著



北京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高温超导物理/韩汝珊编著. —2版. —北京:北京大学出版社, 2014. 12
(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-25147-8

I. ①高… II. ①韩… III. ①高温超导性—物理学 IV. ①O511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272375 号

书 名: 高温超导物理(第二版)

著作责任者: 韩汝珊 编著

责任编辑: 王剑飞

标准书号: ISBN 978-7-301-25147-8/O·1030

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014 出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 15 印张 280 千字

1998 年 9 月第 1 版

2014 年 12 月第 2 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 80.00 元



未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系”

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘 书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子亲身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任

中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

前 言

北京大学出版社为了慎重起见,邀请了多位专家对本书初稿作了评审.各位专家都对本书初稿给予了肯定,并希望本书能尽快出版.在这里本人要对他们表示感谢.《铜氧化物高温超导电性实验与理论研究》(韩汝珊主编,闻海虎、向涛副主编)作为一本研讨会报告文集于2009年出版,其在实验工作和理论研究上已涵盖了高温超导众多方面的重要问题,特别是反映了国内年轻工作者的成长及国家在大型实验研究装置上的投入和建设情况,年轻工作者作出了很多令国际同行瞩目的出色工作.该书受到了同行们的好评,认为是当年研究水平的如实记录,现已译成英文出版.

但是文集的形式无法采用统一的观点,只能按各篇文章的作者意愿进行阐述.为了克服这个缺憾,我们取用了区别于单带模型的两带模型,在准二维 CuO_2 平面中计入了氧离子的活跃性质,在全掺杂区采用统一的克拉默斯(Kramers)超交换相互作用进行理论分析,获得了与相图及相关实验吻合得超出预想的惊人结果.为了检验这个理论模型,我们查阅了尽可能多的文献,尚未找出与这个模型不相容的信息.我们将查找到的资料汇集成本书,衷心希望同行们提出补充、修改甚至批评意见.也是为达此目的,笔者将初稿寄给了几位专家请求指正,并欣慰地收到了他们的赞许和建议.根据专家的意见,我们认真考虑后进行了修改和补充,成为了现在的这本文稿.

有专家指出,高温超导电性是当代凝聚态物理中的核心问题.高温超导的研究,将对传统的经典理论提出挑战,将书写凝聚态物理新的篇章,但是高温超导研究又具有严峻的挑战性和艰巨性.自1986年高温超导电性发现近三十年以来,有众多的科学家投入到了高温超导研究中,其中不乏世界顶尖的物理学者,他们试图摘取这颗科学上的明珠.但迄今为止,高温超导机理仍然没有共识.与之相对应的是,高温超导的相关文献浩若烟海,有各种各样的实验手段和测量结果,有各种各样的理论模型,要理解和阅读所有这些文献显然是不可能的.这不仅容易使进入高温超导领域的新人感到迷惑,即使是长期浸淫于这个领域的学者,也很难保证跟踪所有的文献和理解这个领域所蕴涵的深刻物理问题.

也有专家指出:“该书作者在凝聚态物理和超导领域耕耘多年,具有深厚的物

理功底,对实验的把握尤其是对关键的物理问题有独到的见解,这对研究高温超导体这样一个纷繁复杂的体系是非常重要的。作者选取了一些关键的实验,着眼于普适的现象,聚焦于背后关键的物理问题,深入浅出,对研究生和研究人员系统地学习研究高温超导中面临的关键问题,很有益处和启发。”

有专家评论道:“高温超导领域,像这样从实验出发,理论和实验相结合的著作不多见。该书表述方式新颖,内容有创新。”

有专家自谦地说:“作为在超导领域工作多年的科技工作者,我自信浏览阅读了众多的文献,对一些问题也有自己的认识。但阅读了这份书稿后,我羞愧地发现,我竟然还是错过了那么多重要的文献。尤其是作者对实验现象背后的物理分析,非常深刻和贴切,使我不论在知识方面,还是在对问题的认识方面,都得到新的启迪和升华。这是一本难得的好书。我强烈推荐它能够得以出版,以促进我国的超导研究,使更多的人受益。”

专家们还提出了一些重要的修改和补充意见,例如有的建议要在全书书写风格上统一规范;有的建议将本书第一版中的重要部分予以保留,而不是只介绍最新进展,以便学生阅读,特别是新入门的学生阅读;有的建议增加与高温超导相关的其他物性部分的内容;等等。

笔者在上述意见的基础上作了认真的考虑,进行了相应的修改和补充,完成了目前的十章文稿,除了尽力做到统一规范和增加相关物性内容外,增加了第一版中阐述物理重要概念的实验和理论部分,使得本书增加了约三分之二的版面,并专门增加了第九章阐述理论概念,虽然该章有些内容与前面一些章节重复,还是尊重专家的意见自立一章,以使读者阅读时在理论和概念上保持一贯性。

实际上,这本书是无法写结束语。在结束本书的写作之际,高温超导研究仍在迅速发展之中,我们既难以把已经取得的进展完全反映在本书之中,更难以把新近的成果及时吸收进来。在前面各章中概要地介绍了高温超导铜氧化物物理性质的诸多方面结果,但仍然很难回答两个基本问题:导致配对凝聚的机制是什么?配对前后的电子状态是怎样的?不能回答这两个问题,就更难回答实际上很重要的另一个问题:是否可能获得更高的临界温度(T_c)乃至室温量级的新超导体?它如实地反映着高温超导电性研究的总体阶段和水平。显然要回答这些根本问题,必须做更多的工作,包括实验、理论及计算研究,企图很快地回答它们是相当困难的,笔者对此做了一些探索将另文发表。

回想自1911年发现超导电性到1986年发现高温超导电性这七十多年间,人们以平均每年不到0.3 K的速度改变着 T_c 的纪录,并在此期间花费了46年才孕育出Bardeen-Cooper-Schrieffer(BCS)理论。而自高温超导发现的十年间, T_c 曾以每年多于10 K的速度在增长,并揭示出众多的反常奇异性质,向传统凝聚态物理

学提出了严重的挑战. 人们对固态物质的认识因之发生了重大的改变.

自 1986 年开始的高温超导新纪元, 恰恰是从 BCS 判据的相反极端开始的. 按照 BCS 的思路, 新的超导材料应从(费米能处) 高态密度、更强的电子-声子相互作用的好金属中去寻找. 高温超导却是低载流子的坏金属, 在其中有很强的电子-电子相互作用. d 波超导电性的确立, 使多数人相信高温超导电性的微观机制与 BCS 超导体应有很不同的本源和机制, 应有不同的高 T_c 的判据. 目前的高温超导研究也许只能说是处于初级阶段, 人们在微观机制上尚未达成共识, 更谈不上在预言未来高温超导材料研究的走向上达成共识.

基础性研究及应用研究始终没有停止过. 人们希望对已有高 T_c 材料的深入认识包括对全相图的统一认识上的突破, 会对人们找寻新的高 T_c 材料有更多的启示.

本书只想强调高温超导电性研究的基础研究方面. 它作为凝聚态物理及相关领域的带动学科, 其巨大作用是很难估量的. 当代凝聚态理论权威、诺贝尔物理学奖获得者安德森(P. W. Anderson)及施里弗(J. R. Schrieffer)在他们 1991 年的一篇重要文章^①中指出: “我们正在重写凝聚态物质的教科书, 将增加卷二, 正如 BCS 曾经是目前已扩展至 13 个数量级的温度区域的新类型物理学的曝光一样, 或许我们会成为揭开物理学又一巨大进展的见证人.”

我们正在努力工作, 在区别于单带模型的基础上构建新的模型, 让它与更多的实验事实吻合; 本书的目标正是企图收集构建包含氧元素的 CuO_2 两带准 2D 模型, 以符合随组分按相图多次相变的尽可能多的重要实验事实, 为构建新模型打下坚固的实验基础.

高温超导实验研究仍在继续, 本书难免有遗漏, 衷心欢迎提出补充、修改和批评.

韩汝珊

2014 年 11 月 14 日

^① P. W. Anderson, J. R. Schrieffer, Phys. Today June, 55(1991).

内 容 简 介

自从1986年初J. G. Bednorz和K. A. Müller发现临界温度 T_c 高于30 K的铜钡铜氧化物超导材料以来,人们不断提高临界温度 T_c ,目前已达的最高纪录是 $\text{HgBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ 的133 K,加压下可达160 K.作者在物理领域耕耘多年,累积了有关高温超导物理机制的实验和理论的大量文献.本书以此为基础选取了最新进展的重要结果和关键实验,并对其中包含的物理内涵进行了详细和深刻的分析,试图找到高温超导体的共性本质特征.

从实验出发,理论和实验相结合的著作并不多见.本书材料确凿可靠,对问题的看法清晰、深刻,表述新颖、有创新,具有较高的学术水平.特别值得提出的是,本书按照专家评审的意见和建议,保留了在第一版中对超导物理机制概念和理论相关部分的精辟阐述,使得本书的内容既对广大的物理同行有一定的启迪,也有助于青年学者特别是初学者系统的学习、参考.

目 录

第一章 引言	(1)
参考文献	(9)
第二章 高温超导铜氧化物晶体结构的特点与相图	(10)
2.1 层状结构及两种结构单元	(10)
2.2 CuO_2 双(多)层的特殊结构	(12)
2.3 载流子与相图	(13)
2.4 关于相图的补充	(15)
参考文献	(27)
第三章 正常态的反常特性、电子间的电荷关联及实空间局域配对	(29)
3.1 概述	(29)
3.2 电子谱	(32)
参考文献	(55)
第四章 自旋关联、磁性及与超导共存	(58)
4.1 磁有序与自旋动力学概述	(58)
4.2 超导区超导磁性共存	(72)
参考文献	(84)
第五章 空穴态、电荷转移隙和正常态反常以及费米面的特征	(87)
5.1 引言	(87)
5.2 光电子谱的实验结果	(95)
5.3 与其他技术测量的费米面的比较	(115)
5.4 小结	(115)
5.5 新近研究进展	(116)
5.6 空穴配对的实验依据	(120)
参考文献	(124)
第六章 正常态反常及费米面(费米包)随掺杂的演进	(127)
6.1 正常态许多属性反常	(127)
6.2 非常规费米液体行为的分析研究	(140)

6.3	首次给出没有残存费米弧的完整空穴包信息的实验	(144)
6.4	反常霍尔效应与斜错散射的分析	(145)
6.5	2007年的两个实验	(147)
6.6	残存部分费米弧的不完整和不确定的费米包的研究	(148)
6.7	k_F 点的精确确定	(149)
6.8	关于多隙的争论	(152)
6.9	下潜费米面	(152)
6.10	欠掺杂、最佳掺杂和过掺杂样品中谱权重演进的比较	(155)
	参考文献	(157)
第七章 超导态的反常特性		(159)
7.1	概述及常规BCS图像的修正	(159)
7.2	电子热容	(161)
7.3	穿透深度 $\lambda(T)$ 反常及新同位素效应	(163)
7.4	相干长度及 H_{c2} 反常	(165)
7.5	微波响应及红外响应	(166)
7.6	热导率	(169)
7.7	核自旋点阵弛豫率反常	(171)
7.8	角分辨光电子谱关于超导态的研究	(171)
7.9	非s波对称性的证据	(177)
7.10	同位素效应	(180)
7.11	电声耦合的效应及其他吸引机制	(181)
7.12	两分量超导电性的证据	(184)
7.13	补充两分量超导电性的证据	(185)
	参考文献	(187)
第八章 补充磁激发		(189)
8.1	隙隙区隐藏的磁激发工作简介	(190)
8.2	这个磁激发分支至今仍被忽视	(193)
	参考文献	(195)
第九章 相关理论概念简介		(196)
9.1	微观模型	(196)
9.2	多带模型的关联参数	(203)
9.3	反铁磁绝缘体 La_2CuO_4	(205)
9.4	非常规费米液体行为的分析研究	(209)

9.5 小结	(212)
参考文献	(217)
第十章 结束语	(220)
参考文献	(222)

第一章 引言

1986年第一个铜氧化物高温超导体 (high temperature superconductor, HTSC) 的发现所掀起的研究热潮至今已持续了近三十年. 在这个遍及全球的热潮中, 研究所涉及领域的广度、触及问题的深度, 都是近几十年来少见的. 浩瀚的研究结果分散在上百次会议、数百种杂志的几万篇文献中. 各种专著, 包括各类专题性的综述, 已逾千种. 但是, 适合于学生用的教材尚不多见, 特别是在国内更不多见. 已有的一些, 大多也只是涉及早期的研究成果. 笔者在 1998 年以前, 在各种场合下, 以“高温超导研究新进展”为题, 作过多次演讲, 并以此为基础撰写了一本专题性的教科书, 名为《高温超导物理》(第一版). 十多年来, 这本书受到了同行的普遍欢迎. 最近, 笔者荣幸地受约编写第二版, 作为国家出版基金项目“中外物理学精品书系”之一. 写第二版, 与第一版一样, 有相当的难度, 主要是因为研究还在迅速地进行中, 还没有一个取得共识的统一的理论解释. 在撰写第一版时, 笔者以核心物理问题为主线, 从众多物性的不同侧面, 希望较为深入地揭示高温超导体向传统凝聚态物理学提出的挑战, 使读者从实验中逐步地把握住传统的物理概念和理论是怎样失效的. 笔者希望不拘泥于实验技巧的细节, 能把实验中包含的物理本质介绍出来; 希望不过多地借用数学, 能把物理图像突显出来. 使读者能尽快地进入高温超导研究的前沿领域, 更快地触及问题的核心方面. 写这样一本书的难度是显而易见的. 今天, 自 1998 年以来, 近十多年 HTSC 实验研究的巨大进展, 如材料质量的明显提高、仪器分辨本领的重大改进、原位同步多项物性的测量以及新的实验技术的应用等, 给出了许多重要的结果.

特别是 2007—2008 年以来几个重大的冲击, 如: 费米面(包)的显露、超导态及温度在 T_c 以上残留的局域配对、磁关联与超导的共存与共生等, 使得许多主流派物理学家(例如: N. E. Hussey, S. Chakravarty, S. R. Jullian 等, 详见后面的介绍)发出惊呼! 同时, 广大物理学工作者逐渐地集中于思考: 如此巨量的高质量实验是否已经提供出, 类似于低温超导的“同位素效应”的同样的核心实验? 或者说我们应该把精力集中于寻求关键的实验启示.

物理学实验是第一性的. 高温超导电性机制一定是要建立在实验整体的基础之上. 回顾二十多年机制研究所走过的道路, 我们需要认真的反思. 笔者认为二十多年来直至今天的瓶颈状况, 我们主要是应该摆脱普适化分析的思路. 任何特殊的体系都有其个性, 了解其本质特性也应该基于对该体系的特殊性质的收集、分析和

归纳,从更广范围的视角、从更普适的属性出发对特殊性作预言是不可能成功的。

高温超导体有许多令人吃惊的性质.从发现高温超导现象至今二十多年的研究热潮中,在继续寻找更高 T_c 值的新材料的同时,人们已经在确证、充实及理解那些奇特的现象上花费了巨大的力量.这个课题任务是极其重大的,因为强电子关联效应和强的磁耦合效应似乎是最关键的部分.人们必须找出某种确定的方式来修正 BCS 理论甚至朗道费米液体理论,以便说明这众多的奇异的反常性质.几十年来,朗道-费米液体理论(Laudau theory of Fermi liquid)和 BCS 理论曾不断地被证明对一些非常广泛的材料而言是正确的.然而,在高温超导体面前它们受到了严重的挑战.这种情况迫使人们必须发展这些理论,使它们能更综合地包容进电子之间的强相互作用.近来,人们开始认识到非费米液体概念不是好的出发点,非费米液体与费米液体共存的方式才是正确的出发点.这是克拉默斯(Kramers)超交换作用的二体行为所要求的,即:既有一定巡游性的空穴,也有较强的在位库仑相互作用和磁超交换作用.忽略氧上的空穴的单带模型不是好的出发点.可以肯定,高温超导体超导态及正常态中的反常性质必定会使人们对固体的认识发生重大的改变.

迄今为止高温超导材料是人们研究过的最复杂的材料之一.需要纯度和均匀度都非常高的高质量大单晶,以便研究它们的一些各向异性的本征属性.我们将抛开研究工作的先后顺序,着重介绍反映重要基本问题的新实验现象.由于篇幅所限,有时不能详细描述这些现象和问题的细节,只能强调结果的物理内涵,强调它们与特殊机制的内在联系.

众所周知,二十多年来,有很多物理学家、化学家和材料学家,在高质量的样品上获得了较为一致的结果,肯定了高温超导铜氧化物具有许多不寻常的性质,并且认识到这些是由电子电荷之间以及自旋的自由度之间的复杂的相互作用造成的.为了弄清楚这些性质,人们已经动用了可能动用的实验手段.应该说,成果是巨大而辉煌的.从理论角度而言,由于上述相互作用的复杂性,困难是显而易见的.虽然统计物理学中有许多有用的方法,如可以利用各种微扰模型进行理论分析和计算研究,但时至今日,对于全部的物理现象和超导微观机制,人们尚未能给出明确的统一说明.理论的进展是步履艰难的.值得强调的是,理论物理学家在此期间付出了巨大的努力,并提出许多新方法、新思想和新概念,以致可以从某些实验现象预言其他实验结果.尽管这里所说的新思想和新概念远未达到共识,所提供的物理图像远未达到和谐统一,但是,它们是那样地新颖,解释某些现象的前景是那样地诱人,与实验研究的关系是那样密切相连.虽然,它们中的一些在低维、强关联等领域中已有了几十年的历史,只是在近期被重新发展并赋予了新的内涵,但它们中的大多数,是新提出的.它们大大地丰富了物理学的思想宝库.由于目前分歧很大,特别

是,笔者认为许多理论模型缺乏与实验整体的协调的关联,因此在本书第二版中将舍弃所有的理论模型的介绍,只是着重介绍了与这个特殊体系所显现的独特性质相关的实验结果.

超导电性是 1911 年由卡末林·昂内斯(Kamerlingh-Onnes)在莱顿(Leiden)实验室发现的.这是他在该实验室首先将氦气(He)成功液化之后不久发生的事情.他先是在纯汞(Hg)金属中实现的,很快又扩展到铅(Pb)及其他材料.当温度降至一个临界温度 T_c ,电阻率突然消失,即使是小心地增加杂质,增加散射,也无法阻止电阻率的消失.在纯样品中,这个电阻率的消失是突然的,且是“完全”的.人们可以安排一个环路超流,例如在一个超导 Pb 环中,可以连续几个月观察不到电流值的下降!现在已经知道周期表中的金属大约超过一半都有超导现象.它们的 T_c 最高的是铌(Nb),为 9.25 K.这就是在 1911 年液氦出现以前,无法观察到超导现象的原因.超导现象出现后,在超导体内没有电阻,内部电场强度 E 必定为零.根据法拉第(Faraday)定律 $\int E dl = -\partial\phi/\partial t$,超导体应该俘获着固定数量的磁通 ϕ ,并且当在样品上加有磁场时,屏蔽电流必定在表面流动,阻止该磁场进入体内.这些预言很快被证实.当外加磁场增加时,在表面上流动的屏蔽超流也要增加.这个过程有个上限.对于第一类超导体,当达到热力学临界磁场 B_c 时,超流被完全地破坏,该金属进入了正常态,温度下降,热力学临界磁场升高.超导体还有一个临界电流 J_c .超流电流达到这个值时,超导体进入正常态.对于简单的超导体,有所谓的西尔斯比(Silsbee)定则: $J_c = 2r\pi B_c/\mu_0$, r 是超导体的孔径,电流在表面产生临界场.1927 年迈斯纳(Meissner)指出:在超导体中不存在泽贝克(Seebeck)电位,即没有热电效应.热容在 T_c 处有跃变,正常态是线性热容($\propto T$),超导态时跃至 T^3 ,超导转变时没有潜热.热容表现出的行为特征是一类包含有序化过程的高级相变所共有的,例如居里(Curie)温度处的铁磁相变.这个信号,连同其他一些信号,提示人们:超导电性源自一组电子在低于 T_c 时凝聚成为一类新的高度有序的量子态.由于某种理由,它负载的电流不能被常规的散射改变;它们不携带熵,没有热电效应.因此,1934 年有人提出了二流体模型,即将电子分为两部分:一部分是正常流,负载着熵并被置于散射中;另一部分是超流凝聚体,没有负载熵,不被散射所影响.这个模型并未假设正常流中的电子完全像正常态中那样(在后来的微观理论中也不是这样的),而是根据“经验”假设,正常流的自由能不是正比于正常电子的百分数 f_n ,而是正比于 $\sqrt{f_n}$,这样就能够拟合超导态中电子热容的数据.这个模型的预言被随后的 Sn 中测量穿透深度实验定性地证实了.二流体模型只是一个近似的图像,使用时要特别小心.

到了 20 世纪 50 年代,人们认识到超导体可根据超导相-正常相界面的界面能的符号分为两点.人们在 1940 年以前研究了的纯元素超导体几乎全是第一类超导

体,它们的界面能是正的.当外加磁场达到 B_c 时,第一类超导体显示出可逆的一级相变,有潜热.人们在 30 年代就已知道超导合金常常在体内俘获磁通,显示出较大的磁滞后;并外加磁场比由热容给出的 B_c 高很多时,仍然是超导的.多年来人们对此一直未弄明白.直到 50 年代,金兹堡-朗道(Ginzberg-Landau)提出了新的唯象学理论,使人们可以计算超导体的行为.通过计算人们发现超导体内序参数在空间分布上是逐点有很大变化的,从而清楚了这些合金是简单的第二类超导体,界面能是负的.在这些材料中,当外加磁场低于 B_c 时,精细分立的量子化磁通涡旋进入材料体内,并当外加磁场远高于 B_c 后,仍能保持着稳定.这种状态被称为混合态.如果这些涡旋线被各种缺陷钉扎住,第二类超导体可以在很高的磁场中负载很大的超流,大大地超过 Silsbee 定则所要求的数值,就是这个原因使得人们能够发展各种高场磁体.

20 世纪 70 年代期间,人们发现具有 A15 结构的过渡金属化合物是很“强”的第二类超导体,可耐受高达 20 T 的磁场.但直到 1986 年,对于超导转变温度,人们一直相信 BCS 的论断:超导电性不可能在 30 K 以上的温度出现.当 Bednorz, Müller 发现 LaBaCuO 的超导转变温度为 36 K 时,可以想像人们是多么激动.接下来, T_c 的记录不断地被刷新,直到 135 K 以上.它们都是在钙钛矿结构铜氧化物中发现的.这些超导体都可以由绝缘母化合物掺入少量的特殊杂质得到.这些超导体在正常态是金属,但是电阻率很高,载流子浓度不高,电子间的关联很强.它们的超导态和正常态的性质有许多反常,与常规超导体的性质相差很大.人们经过二十多年的研究,尚未取得共识.作为第二版笔者希望从特殊性的视角为取得共识作出贡献.

思考的线索笔者应该着眼于:特殊铜氧化物家族体系中的普适性特征——它们在实验中的显现则更应受到重视.在没有对超导机制取得共识之前,对实验数据的分析和解释存在着基本困难.采用一些模型或常规理论概念是不得已的,但是仅仅是作为参照物.不同组有不同的参照,这往往是争论的背景原因.但是有些实验虽与配对机制不直接关联,但是它们是生成正确机制的土壤,故第二版将一改前一版的特色风格,以铜氧化物高温超导家族“特殊的普适实验”作为本书的重点内容.特殊性容易辨别,普适性尚待补充.

这里将几个代表性的“惊呼”重复于下,以彰显理论界受到的冲击和挑战.

第一个惊呼是 N. E. Hussey 在强关联电子系统国际会议上的发言^[1.1]. 其文章的标题是《强关联电子给朗道理论以重击》.他在摘要中说道:朗道引入有活力的准粒子概念到费米液体理论中,该理论已被普遍地应用在普通金属中.在高能物理中正常出现的粒子或准粒子湮灭也出现在固体物理常规实验室中.如费米弧片段,占据态体积减小,且不满足求和规则(注:卢京格尔(Luttinger)定理),可作为违反朗