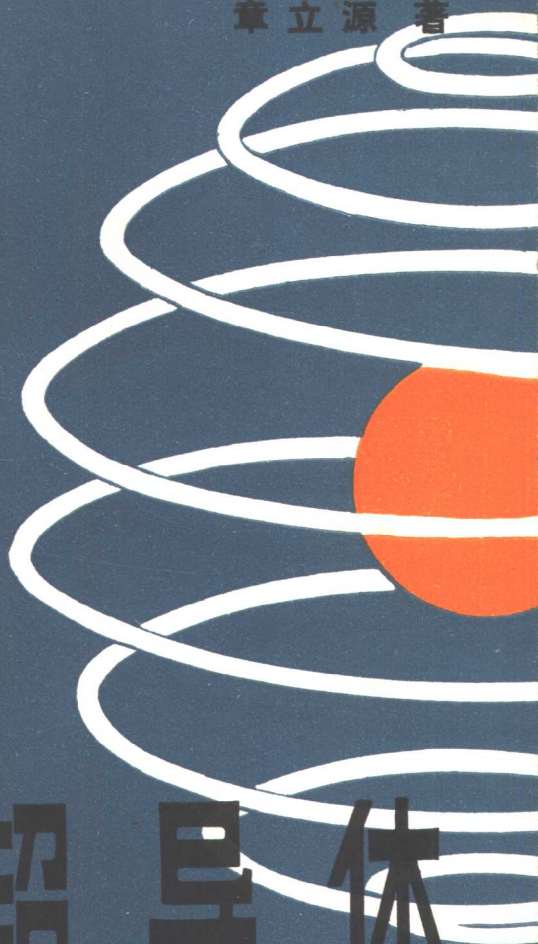


物理学
基础
知识
丛书

章立源 著



超导体

(修订本)

科学出版社



超 导 体

章立源 著

科 学 出 版 社

1 9 8 9

内 容 简 介

本书介绍了超导体的发现、特性及超导电微观理论的建立。近一两年,超导体在实验和理论方面取得飞跃进展,在国际上形成超导热。1987年的诺贝尔物理学奖也颁发给了研究超导卓有成就的物理学家。1988年超导材料的研制又有新的突破,并进入应用阶段。

在原书基础上,作者增补了超导体的最新发展。

本书可供具有中等文化程度的科技人员、干部、学生及教师阅读。

超 导 体

(修订本)

章 立 源 著

责任编辑 姜淑华

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳区门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1982年2月第一版 开本:787×1092 1/32

1989年3月第二次印刷 印张:4 5/8

印数:7,101—9,540 字数:101,000

ISBN 7-03-000636-4/O·171

定价: 2.00 元

代 序

1978年8月,中国物理学会在庐山召开年会,不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用,建议中国物理学会与科学出版社合作,编辑出版一套《物理学基础知识丛书》,有计划有系统地普及物理学的基础知识和物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此,中国物理学会理事会进行了认真讨论,积极热情地支持了这一建议,于是,就在风景绮丽的庐山,在中国物理学会和科学出版社的共同主持下,正式成立了本丛书的编委会,讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划,正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律,物质的结构及其相互作用,它是许多科学技术的基础。从本世纪开始,物理学经历了极其深刻的革命,从宏观发展到微观,从低速发展到高速,由此诞生了量子物理学和相对论,并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来,物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就,不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用,使人类掌握了新的能源;半导体科学技术的发展,导致了计算技术和自动控制系统的革命,激光的出现焕发了经典光学的青春;凝聚态物理学的发展,使人们不断创造出许多性能大大提高的材料……;因此,向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展,乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的

目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖，风格多样，勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动，深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照，陆学善等同志的热情赞助和关怀。美国加州大学热斐尔学院院长吴家璋教授应邀积极参加编委会工作。并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

〈物理学基础知识丛书〉编委会

前 言

1911年卡末林·昂尼斯首次发现超导电现象。自那以后，半个多世纪以来超导电性问题引起了各国科学家的广泛兴趣。超导电性的本质是什么？能否广泛应用？这是许多人所关心的。1957年巴丁、库柏、徐瑞弗三位美国物理学家建立了超导电微观理论，解决了超导电性的本质。这样，人们对于物质导电机机构的了解就出现了一个飞跃。这个成功来之不易，实际上是各国科学家经过长期努力共同结晶，在回顾这一发展时，我们可以看到，这个飞跃是在摆脱了正常导体导电机机构的框框，引入了全新的概念——库柏电子对——以后才得以实现的。这一点值得我们记取不忘：科学的发展总是在不断克服原有的旧东西，以更精确、更丰富的新概念替代和完善旧观念而前进的。在目前，使用超导线制成的超导磁体已有较多的应用。超导隧道效应在各方面的应用发展相当快。超导计算机也取得了极大的进展。过去，由于使用超导体需要很低的温度，这就限制了它的广泛应用。因此，超导体的应用究竟能达到什么程度，还要取决于能否制成更具有实用价值的超导新材料。

本书的目的是为了使具有高中程度的读者能对超导电性问题有一个初步了解。本书对问题的叙述完全是定性的、初步的，不作数学推导。许多问题都不求深入展开。

要求深入学习超导电性问题的读者则需要阅读其它有关书籍。

美国加州大学热斐尔学院院长吴家璋教授对本书初稿提出了许多宝贵意见，作者在此致以谢意。

章 立 源

1980年夏于北京

目 录

代序

前言

第一章 超导的发现.....	(1)
一、奇异的低温世界, 超导与超流	(1)
二、超导体是完全导体吗?	(8)
三、对超导未来的畅想	(14)
第二章 揭开超导之谜 I ——二流体模型	(17)
一、从超导体的电子比热谈起	(17)
二、二流体模型	(20)
三、以二流体模型为基础说明超导的几个实验事实	(25)
四、超导体电动力学	(28)
第三章 揭开超导之谜 II	(30)
一、同位素效应	(30)
二、超导能隙	(33)
三、时机已经成熟	(36)
四、电子-晶格相互作用	(38)
五、库柏电子对	(45)
六、超导基态—— $T = 0\text{K}$ 的超导体	(49)
第四章 第二类超导体	(54)
一、第二类超导体, 奇妙的磁通线格子	(54)
二、界面能	(57)
三、混合态究竟是怎么回事?	(62)
四、磁通量子	(65)
五、不可逆磁化曲线, 非理想的第二类超导体	(67)

六、非理想第二类超导体的临界电流	(69)
第五章 超导隧道结	(75)
一、微观粒子的“穿山”本领	(75)
二、 <i>NIS</i> 结中的隧道效应	(78)
三、 <i>SIS</i> 结中的隧道效应	(82)
四、约瑟夫森隧道电流效应	(86)
五、磁场对直流效应的影响	(89)
六、微波照射下结的 <i>I-V</i> 特性	(91)
七、超导结的各种形式	(92)
第六章 千方百计提高超导临界温度	(94)
一、超导临界温度能够提高吗?	(94)
二、激子超导电性	(96)
三、金属氢	(102)
四、 T_c 与晶体结构、组分的关系	(104)
五、高压强下的超导电性	(113)
六、关于生物超导体	(115)
第七章 超导应用及其展望	(117)
一、超导磁体	(117)
二、超导隧道效应的应用	(126)
第八章 1986年以来超导材料的新进展	(131)
结束语	(138)

第一章 超导的发现

一、奇异的低温世界，超导与超流

这里要给大家介绍的超导电性是在低温条件下物质所表现出来的奇异特性之一。在日常生活中一提到低温，人们往往会想到千里冰封万里雪飘的北国风光，在我国北方度过了童年时代的人们更会浮想起许多愉快的儿时往事：玻璃窗上美丽的冰花图案、雪球激战、白雪老人……。我们也会想到人类的老祖先曾经和漫长严寒的冰期作过多少万年的艰苦斗争啊！然而，劳动创造了世界的文明和财富。经过漫长的历史岁月，人们早已战胜了普通的冰雪低温。在现代除了探索地球南北极大自然的奥秘外，摆在物理学家面前的一个任务已经是向更低的温度进军了。那么，这个低温是指什么呢？我们不妨重温一下从上世纪末开始的有意义的一段历史插曲。

电影银幕把我们带进了十九世纪末。字幕告诉我们当时的一些科学新闻：

1895年，一向曾被视为“永久气体”的空气被液化了！

1895年在大气中发现氦气。

1898年杜瓦第一次把氢气变成了液体氢，又一个“永久气体”被征服了。

请看在一个大气压下这些原以为是“永久气体”的液化点。

空气 -192°C 。

氢气 -253°C 。

在液空、液氢的基础上，已经进入零下 259°C 的低溫区！可是，还不能液化氦气。

影片解说员告诉我们说：在上一世纪中叶，人类对于热现象规律的研究正经过了一个动人心弦的时代。经瓦特改进的蒸汽机在十九世纪已在工业上得到广泛应用，使工业发生了飞跃进展。与此同时，由于生产上对蒸汽机效率提出了越来越高的要求，就促使人们对有关物质热性质、热现象的规律作深入的研究，从而，推动了热学实验的发展。在大量科学实验的基础上建立了热力学第一定律（即能量转化及守恒定律），这里大家当然记得焦耳在热功当量实验工作中所作的杰出贡献，紧接着，开尔文就注意到焦耳工作的结果与法国工程师卡诺所建立的热机理论之间有矛盾^①，循此建立了热力学第二定律。本影片所写的十九世纪末正是在热力学这两个基本定律建立之后，热的分子运动学说也取得了相当成功的发展的时代，可以想见，人们是怀着怎样的热情注意到这些基础学科的发展正不断使热力工程、物性研究、气液相变、化学反应以及低溫领域等方面取得多么有效的进展啊！当然，越是看到这些理论的成功，也就越促使有心人更加审慎地以各种工作去进一步检验这些理论和假说。在这巨大历史洪流中，低溫领域的宽广前景展现在人类面前，人们的足迹踏进了溫度越来越低的范围。看！为了进入更低溫区，许多科学家正在向使氦气液化的目标前进……。

影片再现了当时的荷兰莱登实验室。在卡末林·昂尼斯

^①限于篇幅，本书对此不进一步说明了，有兴趣的读者可以参考李椿、章立源等著《热学》，第六章，1978年版（人民教育出版社）。

教授(图 1—1)的领导下, 这个实验室进行着有关气体液化和低温下物性方面的研究。

莱登实验室是当时为实现液化氮而工作的一个集体。我们看到实验室的成员都在紧张地工作着, 他们建立了各种先进的低温设备。……



图 1-1

1908年的一天, 历史性的日子终于来到

了, 这一天的实验工作是从早晨五点半开始一直作到夜间九点半。全体实验室工作人员都坚守在各自的工作岗位上, 他们是多么渴望看到人类从没有看到过的液化氮啊! 可是, 氮气能够液化吗? 大家都在担心着。墙上的挂钟滴嗒滴嗒地响个不停, 时间在一秒一秒地消逝。人们屏住了呼吸, 全神贯注地注视着液化器。终于在下午六点半, 人类第一次看到了它, 氮气被液化了!

初看时还有点令人不相信是真的, 液氮开始流进容器时不太容易观察得到^①, 直到液氮已经装满了容器, 事情就完全肯定了, 当时测定在一个大气压下, 氮的沸点是4.25K^②。

卡末林·昂尼斯教授把这个令人振奋的消息告诉了卓越

①因为液氮的光折射率和气体相近, 所以不太容易看清楚容器中的氮液面。

②这里用的是热力学温度, 它的单位为开尔文, 简写为K, 热力学温度 T (K)与摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 的关系是: $t = T - 273.15$ 。

的范德瓦尔斯教授。昂尼斯表示，是范德瓦尔斯的气体液体理论使他决心把液化气体的工作坚持下去进行到底的。莱登实验室所有的人都异常兴奋，奔走相告互相祝贺，欢笑的声音传向全世界。

莱登实验室全体工作人员乘胜前进快马加鞭，继续日以继夜的工作着。他们了解，如果降低液氮上的蒸汽压，那么随着蒸气压的下降，液氮的沸点也会相应降低（减压降温法）。这样，他们在当时获得了 $4.25\text{K} \sim 1.15\text{K}$ 的低溫。

当然，在无边无际的宇宙里，按我们的标准来看许多物质是处于极低溫状态的，但是在地球上，人类以自己的智慧和劳动踏入了从未进入的奇异低溫世界。人们有理由为此感到自豪，同时也期待着，在这个低溫世界里会看到怎样的新天地啊！

大家知道随着溫度的降低，金属的导电率会变大（电阻率的倒数叫导电率）。莱登实验室的人们观察到在这么低的溫度区，一些金属的电导显著增加。进而在1911年他们揭开了人类研究超导电现象的第一页。一天，当他们正在观察低溫下水银电导变化的时候，在 4.2K 附近突然发现：水银的电阻消失了！这是真的吗？他们简直不相信自己的眼睛了。然而，多次反复的实验向我们展示了图1-2的结果。这个图的横座标是溫度，纵座标是在该溫度下的水银电阻与 0°C 水银电阻之比。看！在 4.2K 附近，水银的电阻比值从 $1/500$ 下降到小于百万分之一。请注意，这个下降是突然发生的。莱登实验室当时估计，在 1.5K 时电阻比小于十亿分之一。毫无疑问，水银在 4.2K 附近，进入了一个新的物态，其电阻实际变为零①。对这种具有特殊电性质的物质状态，他们定名为

①以现在的观测而论，超导体即使有电阻的话，它的电阻率也远小于 10^{-11} 欧姆·厘米。请读者注意铜在 0°C 的电阻率为 1.6×10^{-8} 欧姆·厘米。

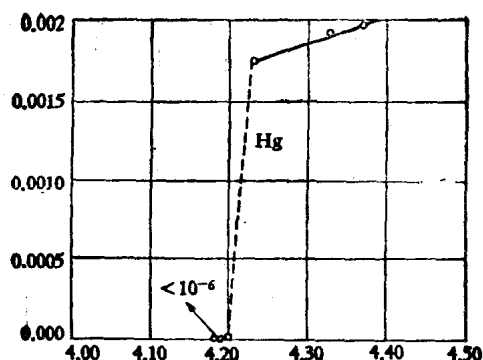


图 1-2

超导态。而把电阻发生突然变化的温度称为超导临界温度(今后以 T_c 表示)。随后,他们又发现了其它许多金属有超导现象。如锡,约在3.8K时变为超导态……。

还是在1911年,昂尼斯教授在实验中被另一件新鲜的现象吸引住了,大家通常都知道物体热胀冷缩的现象,但是昂尼斯当时的实验表明,当液氦温度降低到2.2K附近时,液氦不但停止了收缩,反而开始膨胀了。其后他们把约在2.2K以上性质表现正常的液氦叫He I,把在这温度以下表现反常的液氦叫He II。

银幕上印出了1930年的字样。这已经是过了十九年以后的莱登实验室了,开色姆等人发现了一个更怪的现象,实验室仪器中有些非常小的空隙或很细的毛细管,在温度稍高时本来连液态He I甚至气态氦都完全通不过去,可是当温度降低到约2.2K以下时,He II居然轻易地通过去了!

1932年开色姆等人又报道了He I与He II间比热有突变(见图1-3),图1-3的实验曲线形状很像希腊字母 λ 。所以称为 λ 相变。 λ 相变就是指从He I向He II的过渡,称该相变点温度为 λ 点。

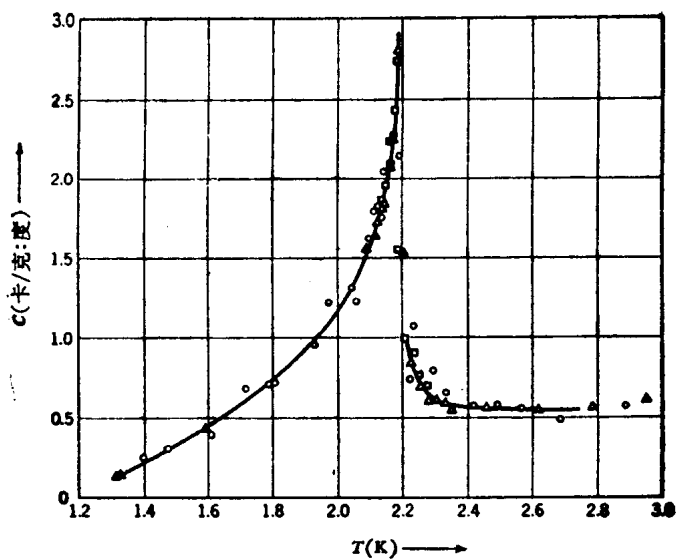


图 1-3

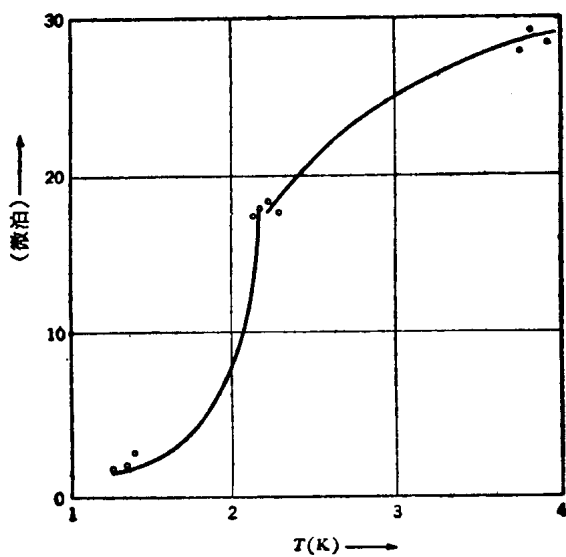


图 1-4

1938年开色姆等人测量了液氮的粘滞系数，实验结果如图1-4所示。在 λ 点以下液氮的粘滞性随温度下降而迅速减小^①。

影片最后显示了两个物理实验。第一个实验是把两块很平的玻璃表面压在一起使中间造成一个很窄的缝隙($\sim 10^{-6}$ — 10^{-7} 米)，而He II竟能以每秒几厘米的速度流过这缝隙。另一个实验是，把一个空杯子放到He II中，当He II和杯子底部接触后，He II就自动爬行上去，形成一薄层爬行膜，爬行膜可以顺着杯子表面爬进杯内，杯内液面逐渐上升，最后杯内、外液面居然相平了。

我们这个短短的历史镜头就到此结束吧！

自1908年以来，人类度过了八十年了。人们在低温世界里发现了许多奇异的现象，其令人神往之处不亚于南北极的冰天雪地，有胜于宇宙中的低温，因为在这里人们可以控制实验室条件，细心地观察新的事物。在现代，液氮致冷的低温技术仍是低温

^①现在已经弄明白，He II中有两种流体，正常流体和超流。正常流体有粘滞性，超流无粘滞性。两种流体的比例随温度而变，当温度降至0K附近时，He II中几乎全是超流成分了。

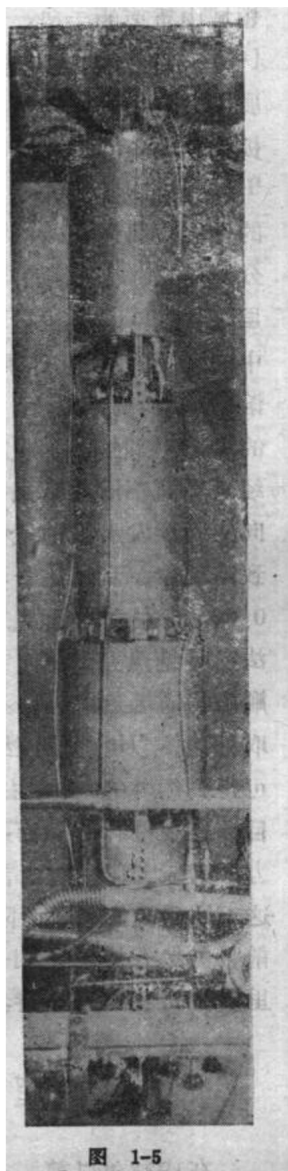


图 1-5

领域中重要的手段，大量的实验工作离不开氦液化器（图1-5）。当然，在这几十年的岁月里，低温技术不断在取得新进展。大气中的氦主要是氦的同位素 ${}^4\text{He}$ ，但人们发现其中有极少量的氦的同位素 ${}^3\text{He}$ （约占百万分之一），在一个大气压下 ${}^3\text{He}$ 的沸点是3.20K，使 ${}^3\text{He}$ 液化再减压降温就可得到约0.3K的低温。另外在0.86K以下，人们发现 ${}^3\text{He}$ 与 ${}^4\text{He}$ 的混合液体分成两层，上层是液 ${}^3\text{He}$ 溶有少量 ${}^4\text{He}$ （叫富 ${}^3\text{He}$ 相或浓相），下层是液 ${}^4\text{He}$ 溶有少量 ${}^3\text{He}$ （称为稀相）。当温度降低时，液 ${}^3\text{He}$ 中能溶解的 ${}^4\text{He}$ 很快降为零，而即使接近0K在液 ${}^4\text{He}$ 中也能溶解约6.4%的 ${}^3\text{He}$ 。若设法把下层液体中溶解在液体 ${}^4\text{He}$ 中的 ${}^3\text{He}$ 不断抽走，那么，为了保持平衡，上层的 ${}^3\text{He}$ 液体就要经过界面不断向下层扩散，这与纯 ${}^3\text{He}$ 液体中的 ${}^3\text{He}$ 原子不断向空间蒸发而被抽气机抽走相似，可产生降温效应，叫稀释致冷现象。利用这一现象，人们作成稀释致冷机，达到了0.005K左右的低温。最低可达到0.002K。还有一种降温方法，叫绝热去磁法，在绝热的条件下，减小外加磁场会导致顺磁物质温度降低，也可对原子核进行绝热去磁，还可以采取把液体 ${}^3\text{He}$ 绝热压缩为固体 ${}^3\text{He}$ 的方法，用这些手段一般可得到约0.001K左右的低温。不断向极低温区开拓的工作目前还在进行。然而，不要忘记热力学中早已总结出来的热力学第三定律。它断言，不可能使一个物体冷到0K。当然，这不妨碍我们可以无限地趋向0K，探索新奥秘，广阔的低温前景仍然有待于我们一步一步地进行漫长的旅行。低温世界里多少奇花异卉有待我们年青一代去发现和利用啊！

二、超导体是完全导体吗？

在1933年以前，人们从零电阻现象出发，一直认为超导