

“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学  教材

低温物理学

第2版

曹烈兆 阎守胜 陈兆甲 编著



中国科学技术大学出版社

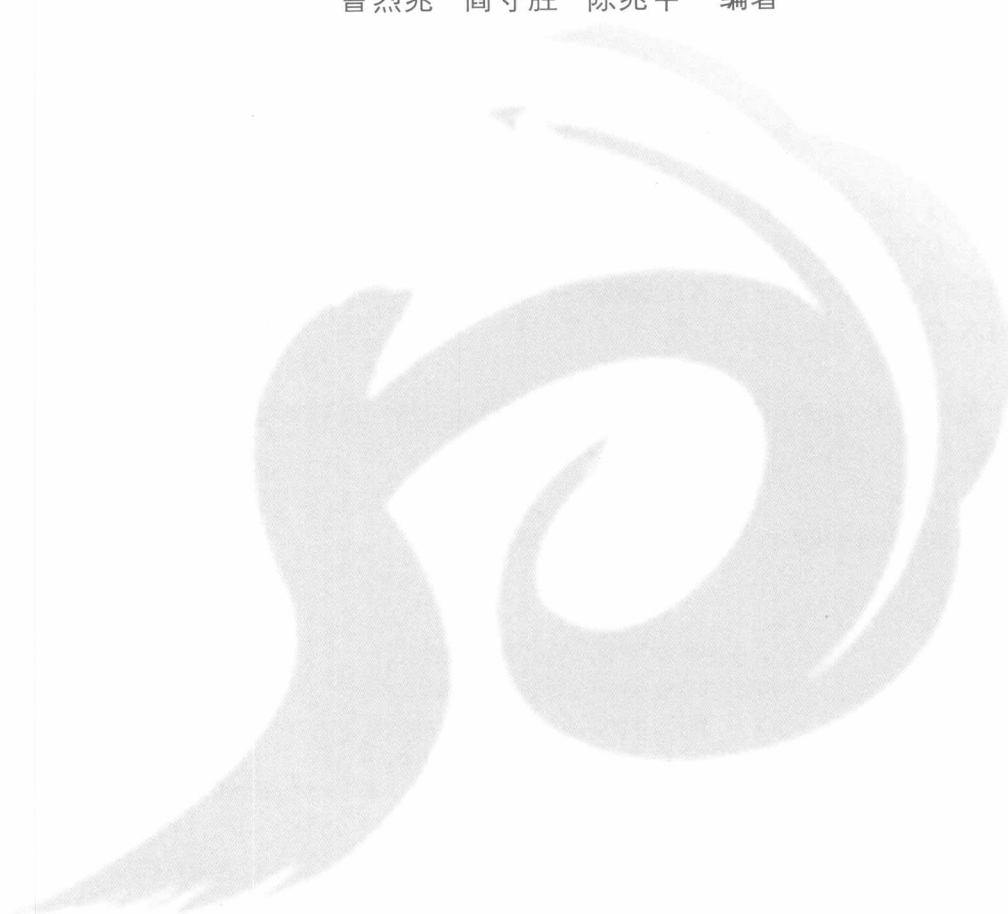


中国科学技术大学 **精品** 教材

低温物理学

DIWEN WULIXUE

曹烈兆 阎守胜 陈兆甲 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是在中国科学技术大学和北京大学研究生课程的讲义基础上撰写的. 全书覆盖了低温物理研究的主要领域, 共分 3 篇, 12 章. 第 1 篇(1~4)章讲述液体 ^4He 和液体 ^3He 超流相物理及量子固体(主要是固体 ^4He 和固体 ^3He)中的量子现象; 第二篇(5~8 章)为介观物理, 包括无序体系中的电子, 扩散区物理, 弹道输运以及单电子现象; 第 3 篇(9~12 章)介绍低温下固体物理的几个重要研究领域, 包括自旋玻璃、重费米子体系和核磁有序以及低温比热.

本书可作为低温物理的研究生和高等学校物理系高年级学生的教学参考书, 也可供从事低温物理、凝聚态物理的科研人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

低温物理学/曹烈兆, 阎守胜, 陈兆甲编著. —2 版. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. 7

(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

ISBN 978-7-312-02261-6

I. 低… II. ①曹…②阎…③陈… III. 低温物理学—高等学校—教材
IV. O51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 144236 号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址: 安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026

网址: <http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 710×960 1/16 印张: 29.75 插页: 2 字数: 566 千

1999 年 1 月第 1 版 2009 年 7 月第 2 版 2009 年 7 月第 2 次印刷

印数: 3001—5500 册

定价: 49.00 元

总 序

2008 年是中国科学技术大学建校五十周年. 为了反映五十年来办学理念和特色, 集中展示教材建设的成果, 学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列. 在各方的共同努力下, 共组织选题 281 种, 经过多轮、严格的评审, 最后确定 50 种入选精品教材系列.

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所.作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统.同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中.五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变.正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才.

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步

序 言

本书第二版在 1999 年出版的第一版基础上作了些修改和增删. 每篇的改动在各篇内容介绍的后面给出.

低温物理学作为物理学中的重要分支始于 20 世纪初. 荷兰物理学家 Kamerlingh Onnes 于 1908 年液化了氦气, 并在 1911 年发现了超导现象. 此后超导电性一直是低温物理研究的活跃领域. 另一方面, 液体 ^4He 的超流相变也于 1927 年被发现. 从此超导电性和超流动性的研究互相促进、相得益彰, 成为低温物理研究的两大领域. 鉴于超导电性的中文著作已有几个版本出版, 本书将不涉及超导电性内容.

本书的第 1 篇介绍量子液体——液体 ^4He 与液体 ^3He 的超流动性、 ^4He 和 ^3He 的混合液及量子固体——固体 ^4He 和 ^3He 的基本性质和理论描述. 液氦和固氦的原子间相互作用相对较弱, 它们很纯净, 一直是凝聚态物理研究的模型多体系统, 有助于对强相互作用体系复杂行为的了解, 对元激发描述、相变理论的建立和量子统计理论的验证起着重要的作用.

第二版的修改中删去了 2.8.1 和 2.8.2 节, 加了 2.9 节——超流 ^3He 的 Josephson 效应, 这是第一版中没有涉及的, 是近几年做出的实验结果. 在第四章中删去了 4.5.3 中部分内容, 增加了 4.5.5 小节——扭摆的实验, 这也是近来固氮研究的热门课题. 4.6 节重新改写了, 增加了新的研究成果.

20 世纪 80 年代初随着科学技术的发展和微加工技术的进步, 加上不难获得的极低温条件, 又出现了一个新的学科领域——介观物理. 它所研究的体系尺度介于微观尺度和宏观尺度之间. 由于它在基础研究上的重要性, 以及涉及电子器件尺寸进一步减小的下限, 新型电子器件出现的可能性, 从而具有重要的应用背景, 受到人们广泛关注. 本书在第 2 篇中介绍了介观物理研究的内容. 从人们对无序电子体系的认识出发, 讲述了介观物理出现的物理背景, 并介绍了弱局域电性, 普适电导涨落, 正常金属环中的持续电流, 弹道输运区, 量子点接触的电导量子化等新的物理现象. 并讨论了基于库仑阻塞的单电子隧穿现象.

本书 1999 年版中讲述的是介观物理入门所需的基本知识和概念, 第二版在行文和解说方面作了一些修改, 使之更准确易懂一些. 内容方面未做增添, 相反地删去了相对而言并不那么重要、且用较少的文字难于讲得清楚明白的 8.3.2 小节. 对很多新的发展, 读者可参阅近期的评述文章.

目 次

总 序	(i)
-----------	-------

序 言	(Ⅲ)
-----------	-------

第 1 篇 量子液体和量子固体

第 1 章 液体 ⁴ He 的超流动性	(3)
--------------------------------------	-------

1.1 ⁴ He 相图和 λ 相变	(3)
--	-------

1.2 液体 He I 和液体 He II	(8)
-----------------------------	-------

1.2.1 粘滞系数和超流动性	(9)
-----------------------	-------

1.2.2 热导	(11)
----------------	--------

1.2.3 热-机械效应	(11)
--------------------	--------

1.2.4 比热	(13)
----------------	--------

1.3 二流体模型和 He II 的性质	(13)
----------------------------	--------

1.3.1 二流体模型	(13)
-------------------	--------

1.3.2 流体动力学方程	(14)
---------------------	--------

1.3.3 热-机械效应	(15)
--------------------	--------

1.3.4 第二声波	(16)
------------------	--------

1.3.5 粘滞系数	(20)
------------------	--------

1.3.6 ρ_n 的直接测量	(21)
----------------------------	--------

1.3.7 热传输	(22)
-----------------	--------

1.3.8 热流动量	(24)
------------------	--------

1.4 液体 He II 中的元激发和 Landau 理论	(27)
-------------------------------------	--------

1.4.1 液体 He II 的热力学性质	(32)
-----------------------------	--------

1.4.2 二流体模型的导出	(34)
----------------------	--------

1.4.3 液体 He II 中的耗散过程	(37)
-----------------------------	--------

1.4.4 色散曲线的实验和理论研究	(41)
--------------------------	--------

1.5 液体 He II 中的波函数——Feynman 理论	(43)
--------------------------------------	--------

1.5.1 声子的波函数	(44)
--------------------	--------

1.5.2 高能量激发态的波函数	(45)
------------------------	--------

2.3	液体 ^3He 的超流相	(101)
2.4	超流 ^3He 的基本实验性质	(104)
2.4.1	相变性质	(105)
2.4.2	比热	(106)
2.4.3	磁化率	(108)
2.4.4	核磁共振	(110)
2.4.5	持续流实验与临界速度 v_c	(112)
2.4.6	超流 ^3He 的二流体性质	(114)
2.5	超流 ^3He 的理论	(116)
2.5.1	液体 ^3He 中的配对相互作用	(116)
2.5.2	超流态的波函数	(119)
2.5.3	自旋单一态($S=0$)	(119)
2.5.4	三重态配对($S=1$)	(120)
2.6	理论与实验的比较	(122)
2.6.1	相图	(122)
2.6.2	比热	(123)
2.6.3	磁化率	(123)
2.6.4	核磁共振	(124)
2.6.5	各向异性的超流密度	(126)
2.6.6	粘滞系数	(127)
2.6.7	超流 $^3\text{HeA}_1$ 相	(127)
2.6.8	声的传播	(128)
2.7	^3HeA 相中的织构	(133)
2.8	超流 ^3He 中的涡线	(137)
2.9	超流 ^3He 的约瑟夫逊(Josephson)效应	(138)
2.9.1	Josephson 效应和超流弱连接	(138)
2.9.2	压强和质量流的测量	(140)
2.9.3	超流 Josephson 振荡	(143)
2.9.4	质量流和相位的关系	(145)
2.9.5	Shapiro 阶梯	(147)
2.9.6	DC SQUID	(150)
第3章	^3He - ^4He 混合液	(155)
3.1	^3He - ^4He 混合液的相图	(155)

3.2	^3He 在超流 ^4He 中的稀溶液	(157)
3.2.1	比热和磁化率	(158)
3.2.2	^3He 溶质原子在 $^4\text{He II}$ 中的渗透压	(159)
3.2.3	热冲效应和 ρ_n 的测量	(161)
3.2.4	稀溶液的理论——把 ^3He 溶质原子看成一种激发类型	(162)
3.3	稀溶液的动力学性质	(163)
3.3.1	粘滞系数 η_n	(163)
3.3.2	热导率 K	(164)
3.3.3	自旋扩散系数 D	(165)
3.3.4	一声和二声	(166)
3.4	液体 He II 中的离子	(167)
3.5	气凝硅胶中的 ^3He - ^4He 混合液	(169)
第4章	量子固体	(172)
4.1	固氮的相图	(172)
4.2	晶体中的量子效应	(173)
4.3	固体 ^3He 中的核磁有序	(175)
4.3.1	核自旋的交换相互作用	(175)
4.3.2	固体 ^3He 的高温性质	(177)
4.3.3	固体 ^3He 中的核磁有序相变	(185)
4.3.4	有序相的磁结构	(187)
4.3.5	有序相的热力学性质	(188)
4.3.6	磁有序理论	(190)
4.4	量子固体中的杂质准粒子和空位	(193)
4.4.1	杂质准粒子——杂质子	(194)
4.4.2	杂质子和声子的相互作用	(195)
4.4.3	^4He 晶体中的空位	(197)
4.4.4	^3He 晶体中的空位	(198)
4.5	固体 ^4He 中空位超流动态的实验探索	(201)
4.5.1	塑性流实验	(202)
4.5.2	传统的超流实验方法	(203)
4.5.3	超声实验	(204)
4.5.4	热力学测量	(205)
4.5.5	扭摆的实验	(206)

4.6 氮晶体的表面现象	(208)
4.6.1 粗糙转变(roughening transition)	(208)
4.6.2 粗糙表面动力学, 晶化波	(213)
4.6.3 光滑表面动力学	(214)
参考文献	(217)

第2篇 介观物理

第5章 无序体系中的电子	(225)
5.1 Anderson 局域和迁移率边	(225)
5.1.1 Anderson 局域	(225)
5.1.2 Mott 迁移率边	(227)
5.1.3 一维和二维情形	(229)
5.2 局域化的标度理论	(230)
5.2.1 早期的工作	(230)
5.2.2 标度理论	(231)
5.3 弱局域化	(234)
5.3.1 相干背散射	(234)
5.3.2 弱局域化磁阻	(237)
5.3.3 自旋-轨道散射和磁散射	(238)
5.3.4 介观尺度	(241)
5.3.5 电子-电子相互作用	(242)
5.4 Landauer-Büttiker 公式	(243)
5.4.1 两端单通道情形	(243)
5.4.2 接触电阻	(245)
5.4.3 两端多通道情形	(246)
5.4.4 多端情形	(247)
第6章 扩散区物理	(249)
6.1 Aharonov-Bohm (AB)效应	(249)
6.1.1 $h/2e$ 周期磁阻振荡的观察	(250)
6.1.2 单环中 h/e 周期的磁阻振荡	(251)
6.1.3 Aharonov-Casher 效应及其他	(253)
6.2 普适电导涨落	(254)
6.2.1 实验观察	(254)

8.2.1 电压偏置的双结系统	(300)
8.2.2 双结系统的 I - V 特性	(301)
8.2.3 I - q_0 关系, 电荷宇称效应	(303)
8.2.4 旋转门器件和单电子泵	(304)
8.3 半导体微结构体系中的库仑阻塞	(306)
参考文献	(311)

第3篇 低温下固体的性质

第9章 自旋玻璃	(317)
9.1 金属中的局域磁矩	(317)
9.1.1 孤立原子的磁矩	(317)
9.1.2 金属中的“磁性杂质”	(318)
9.1.3 准束缚态	(318)
9.1.4 局域磁矩形成的条件	(319)
9.2 自旋玻璃转变	(322)
9.2.1 RKKY 相互作用	(322)
9.2.2 自旋冻结	(324)
9.2.3 受挫与无序	(325)
9.3 对称破缺和遍历破缺	(327)
9.3.1 自旋玻璃转变的特点	(327)
9.3.2 遍历破缺和平均场描述	(330)
9.3.3 自旋玻璃的序参量	(331)
9.4 自旋玻璃的物理特性	(333)
9.4.1 冻结温度以上的实验结果	(334)
9.4.2 冻结温度附近的实验结果	(337)
9.4.3 远低于冻结温度的实验结果	(341)
9.5 自旋玻璃的动力学	(343)
9.5.1 时间坐标轴上的实验窗口	(344)
9.5.2 时效	(348)
9.6 再入自旋玻璃	(358)
9.6.1 再入现象	(358)
9.6.2 磁有序状态与 Arrott 图	(359)
9.6.3 形成再入自旋玻璃的几种模型	(360)

• xii •

第 11 章 低温比热	(402)
11.1 引言	(402)
11.2 晶格比热	(403)
11.2.1 晶格振动模式	(403)
11.2.2 声子谱	(404)
11.2.3 德拜温度和德拜函数	(405)
11.2.4 定容比热 c_V 和定压比热 c_p	(407)
11.2.5 非晶固体的声子比热	(407)
11.3 电子比热	(409)
11.3.1 电子比热系数	(409)
11.3.2 低温下电子比热的增强效应	(411)
11.3.3 合金的电子比热, 刚带模型	(412)
11.4 磁比热	(413)
11.4.1 磁子比热	(413)
11.4.2 磁集团比热	(415)
11.4.3 稀磁合金的磁比热	(416)
11.4.4 自旋涨落的比热贡献	(417)
11.4.5 Kondo 杂质的磁比热	(418)
11.5 反常比热	(419)
11.5.1 Schottky 比热	(419)
11.5.2 合作现象引起的反常比热	(422)
第 12 章 核磁有序	(424)
12.1 核磁有序的原理	(424)
12.1.1 简单金属中自发核磁有序的相互作用	(425)
12.1.2 自旋-晶格弛豫时间 τ_1 和自旋-自旋弛豫时间 τ_2	(426)
12.2 核磁有序的实验方法	(427)
12.2.1 核制冷的实验装置	(427)
12.2.2 温度的测量	(428)
12.3 铜的核磁有序	(429)
12.3.1 多晶样品的磁化率测量	(429)
12.3.2 单晶样品的磁化率测量	(429)
12.3.3 中子衍射实验	(431)
12.3.4 理论计算的自旋结构	(435)

12.4	银和铯的核磁有序	(438)
12.4.1	银的核磁有序实验	(438)
12.4.2	理论计算的自旋结构	(442)
12.4.3	中子衍射实验	(443)
12.4.4	在银和铯中负温度的获得	(445)
12.4.5	铯的核磁有序实验	(447)
12.5	其他金属中的核磁有序实验	(449)
12.5.1	AuIn_2 和 PtFe_x 的核磁实验	(449)
12.5.2	PrNi_5 的核磁有序	(455)
12.5.3	其他 Pr 化合物的核磁有序实验	(457)
参考文献		(459)