

“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学 精品 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<sup>4</sup>He和液体<sup>3</sup>He超流相物理及量子固体(主要是固体<sup>4</sup>He和固体<sup>3</sup>He)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

林懋品，中国科学院大学首任校长，果效由浅至深，对教育事业贡献卓著。他热爱教育事业，对教育充满热情，坚持立德树人，注重培养学生的创新精神和实践能力，推动了中国科学院大学的快速发展。林懋品同志在担任中国科学院大学校长期间，始终坚持以人为本、质量至上、服务社会的原则，努力提升学校办学水平和影响力。他领导下的中国科学院大学，已经成为一所具有国际影响力的高水平研究型大学。

自 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

深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可.这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校.在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现.

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点，用创新的精神编写教材。五十年来，进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生，针对他们的具体情况编写教材，才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合，根据自己的科研体会，借鉴目前国外相关专业有关课程的经验，注意理论与实际应用的结合，基础知识与最新发展的结合，课堂教学与课外实践的结合，精心组织材料、认真编写教材，使学生在掌握扎实的理论基础的同时，了解最新的研究方法，掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材，既是教学一线教师长期教学积累的成果，也是学校五十年教学传统的体现，反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版，既是向学校五十周年校庆的献礼，也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。

孫建國

2008年8月

## 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<sup>4</sup>He 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<sup>4</sup>He 与液体<sup>3</sup>He 的超流动性、<sup>4</sup>He 和<sup>3</sup>He 的混合液及量子固体——固体<sup>4</sup>He 和<sup>3</sup>He 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<sup>3</sup>He 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, 这也是近来固氦研究的热门课题. 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.

第3篇为低温下固体的性质.我们仅选择低温物理研究的几个重要领域予以介绍.自旋玻璃是一种取向无序的自旋系统.随着温度的降低,磁矩之间的铁磁和反铁磁相互作用的竞争结果,最后冻结为自旋玻璃态,它不同于铁磁或反铁磁有序态,但却具有类似长程有序的合作行为,因而表现出许多特殊性质和规律.对它的研究将对其他类自旋玻璃体系和更多的复杂体系的理解有很大帮助.重电子金属是当前凝聚态物理和低温物理最重要的研究领域之一,它是强关联电子系统.由于Kondo相互作用和RKKY相互作用竞争的结果,重电子金属可能存在多种基态,如反铁磁、铁磁、超导、顺磁费米液体、非费米液体、绝缘体,因而为研究量子相变、非费米液体行为、非常规超导机制、超导与磁有序共存等重要基础凝聚态物理课题提供极好的研究对象.在本书初版发行后,国际上这一领域的研究有很大进展,在大量实验事实的基础上提出了不少新的机制、模型和物理解释.作者根据最新发表的学术论文及综述文章,在第二版的修订中重新写了这一章.书中一些观点和说法不一定是最终的结论,只反映目前研究的深度,仅供读者参考.低温下固体的比热是理解相变和低能激发态等性质的有力工具.本章对不同的元激发对比热的贡献作了较仔细的介绍.近年才在实验上实现金属中核自旋系统的自发有序.由于核自旋系统在极低温下与电子和晶格系统隔离,因而理论上计算较为简单,从而可检验理论,并对磁相互作用有更深入的了解.

本书的分工为:曹烈兆撰写第1、2、3、4和12章;阎守胜撰写第5、6、7、8章;陈兆甲撰写第9、10、11章。虽然作者对所写部分的内容做过一些研究工作,但毕竟涉及面很窄,所以大部分内容参考国外已有著作和原始文献。本书主要是为凝聚态物理的大学本科生和研究生写的,所以内容着重于基本原理的介绍和现象的理解,一些实验的细节和更深入的内容未多涉及,有兴趣的读者可参考每篇后列出的文献。

本书采用国际单位制(SI).但目前国际上还通用我们熟悉的其他单位.当在图表中出现非国际单位时,我们仅乘上一个系数,带来的不便之处望读者包涵.对书中可能出现的错误和不妥之处欢迎读者指正.

作者  
2007年冬

总序	.....	( i )
序言	.....	( iii )
第 1 篇 量子液体和量子固体		
第1章 液体 <sup>4</sup> He 的超流动性	.....	( 3 )
( 1.1 ) 1.1.1 <sup>4</sup> He 相图和 $\lambda$ 相变	.....	( 3 )
( 1.1 ) 1.1.2 液体 He I 和液体 He II	.....	( 8 )
( 1.2 ) 1.2.1 粘滞系数和超流动性	.....	( 9 )
( 1.2 ) 1.2.2 热导	.....	( 11 )
( 1.2 ) 1.2.3 热-机械效应	.....	( 11 )
( 1.2 ) 1.2.4 比热	.....	( 13 )
( 1.3 ) 1.3.1 二流体模型	.....	( 13 )
( 1.3 ) 1.3.2 流体力学方程	.....	( 14 )
( 1.3 ) 1.3.3 热-机械效应	.....	( 15 )
( 1.3 ) 1.3.4 第二声波	.....	( 16 )
( 1.3 ) 1.3.5 粘滞系数	.....	( 20 )
( 1.3 ) 1.3.6 $\rho_n$ 的直接测量	.....	( 21 )
( 1.3 ) 1.3.7 热传输	.....	( 22 )
( 1.3 ) 1.3.8 热流动量	.....	( 24 )
( 1.4 ) 1.4.1 液体 He II 中的元激发和 Landau 理论	.....	( 27 )
( 1.4 ) 1.4.2 液体 He II 的热力学性质	.....	( 32 )
( 1.4 ) 1.4.3 二流体模型的导出	.....	( 34 )
( 1.4 ) 1.4.4 液体 He II 中的耗散过程	.....	( 37 )
( 1.4 ) 1.4.5 色散曲线的实验和理论研究	.....	( 41 )
( 1.5 ) 1.5.1 液体 He II 中的波函数——Feynman 理论	.....	( 43 )
( 1.5 ) 1.5.2 声子的波函数	.....	( 44 )
( 1.5 ) 1.5.3 高能量激发态的波函数	.....	( 45 )

1.5.3	Feynman 和 Cohen 的波函数	(47)
1.6	Bose - Einstein 凝聚	(48)
1.6.1	London 理论	(48)
1.6.2	Bogoliubov 理论	(49)
1.6.3	理论的进一步发展	(50)
1.6.4	Bose 凝聚的实验观察	(51)
1.7	旋转中的液氦和量子化涡线	(56)
1.7.1	旋转中的液体 He II	(57)
1.7.2	转动液体 He II 的实验性质	(59)
1.7.3	涡线和环流量子化	(60)
1.7.4	环流量子化的实验验证	(63)
1.7.5	涡旋线列阵的实验观察	(65)
1.7.6	涡旋线与热激发的相互作用	(66)
1.7.7	超临界范围和湍流	(66)
1.7.8	临界速度	(67)
1.8	氦膜和多孔介质中的液氦	(68)
1.8.1	静态氦膜的厚度	(69)
1.8.2	吸附等温线	(73)
1.8.3	流动氦膜	(76)
1.8.4	第三声和第四声	(78)
1.8.5	不饱和氦膜	(81)
1.8.6	高压下多孔介质中液氦的超流动性	(84)
1.8.7	单层氦膜	(85)
第2章	液体 <sup>3</sup> He 的超流动性	(87)
2.1	正常液体 <sup>3</sup> He 的性质	(87)
2.1.1	正常液体 <sup>3</sup> He 的比热	(89)
2.1.2	正常液体 <sup>3</sup> He 的核磁化率	(90)
2.1.3	正常液体 <sup>3</sup> He 的输运性质	(91)
2.2	Landau 费米液体理论	(92)
2.2.1	理想费米气体的性质	(93)
2.2.2	Landau 费米液体理论	(95)
2.2.3	零声	(99)
2.2.4	Landau 理论的进一步发展	(100)

2.3 液体 <sup>3</sup> He 的超流相	(101)
2.4 超流 <sup>3</sup> He 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 <sup>3</sup> He 的二流体性质	(114)
2.5 超流 <sup>3</sup> He 的理论	(116)
2.5.1 液体 <sup>3</sup> He 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 <sup>3</sup> HeA <sub>1</sub> 相	(127)
2.6.8 声的传播	(128)
2.7 <sup>3</sup> HeA 相中的织构	(133)
2.8 超流 <sup>3</sup> He 中的涡线	(137)
2.9 超流 <sup>3</sup> He 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 <sup>3</sup> He- <sup>4</sup> He 混合液	(155)
3.1 <sup>3</sup> He- <sup>4</sup> He 混合液的相图	(155)

3.2	$^3\text{He}$ 在超流 $^4\text{He}$ 中的稀溶液	(157)
3.2.1	比热和磁化率	(158)
3.2.2	$^3\text{He}$ 溶质原子在 $^4\text{He}\text{II}$ 中的渗透压	(159)
3.2.3	热冲效应和 $\rho_n$ 的测量	(161)
3.2.4	稀溶液的理论——把 $^3\text{He}$ 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 $\eta_n$	(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 $\text{He}\text{II}$ 中的离子	(167)
3.5	气凝硅胶中的 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 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 $^3\text{He}$ 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 $^3\text{He}$ 的高温性质	(177)
4.3.3	固体 $^3\text{He}$ 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	$^4\text{He}$ 晶体中的空位	(197)
4.4.4	$^3\text{He}$ 晶体中的空位	(198)
4.5	固体 $^4\text{He}$ 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)
<b>第2篇 介观物理</b>	
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)

6.2.2 简单的理论估算	(257)
6.2.3 经典自平均行为的消失	(258)
6.2.4 温度的影响	(258)
6.2.5 移动一个杂质原子的效果	(259)
<b>6.3 非定域效应</b>	(260)
6.3.1 磁场反向的非对称电导	(261)
6.3.2 电压涨落随样品长度的变化	(264)
6.3.3 几个演示实验	(264)
<b>6.4 正常金属环中的持续电流</b>	(266)
6.4.1 理想的一维金属环	(267)
6.4.2 与实际体系相关的一些理论结果	(269)
6.4.3 实验状况	(271)
<b>第7章 弹道输运及绝热输运</b>	(273)
<b>7.1 半导体二维电子气和电子波导</b>	(273)
7.1.1 半导体二维电子气	(273)
7.1.2 加垂直磁场的电子波导	(275)
<b>7.2 量子点接触</b>	(277)
7.2.1 电导量子化	(277)
7.2.2 电子束的准直	(279)
7.2.3 相干电子束聚焦	(281)
<b>7.3 电子波导的四端电阻</b>	(283)
<b>7.4 边缘通道和绝热输运</b>	(286)
7.4.1 边缘通道	(286)
7.4.2 量子化纵向电导	(289)
7.4.3 非理想电极	(290)
7.4.4 量子点接触	(291)
<b>第8章 单电子现象</b>	(294)
<b>8.1 库仑阻塞效应</b>	(294)
8.1.1 库仑阻塞(Coulomb blockade)	(294)
8.1.2 电流偏置的单结	(295)
8.1.3 Cooper 对隧穿, Bloch 振荡	(298)
8.1.4 电压偏置的单结	(299)
<b>8.2 双结体系和简单的单电子器件</b>	(299)

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

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)

9.6.4 CrFeMn 合金磁阻曲线的启示	(361)
9.7 自旋玻璃的类型	(362)
9.7.1 RKKY 型自旋玻璃	(362)
9.7.2 非晶合金自旋玻璃	(364)
9.7.3 半导体自旋玻璃	(365)
9.8 类自旋玻璃行为与复杂体系	(367)
<b>第10章 重电子金属</b>	<b>(370)</b>
10.1 重电子金属及其基态	(370)
10.1.1 重电子金属的发现	(370)
10.1.2 重电子金属的主要物理性质	(371)
10.1.3 Hill 极限	(375)
10.1.4 重电子金属的基态	(376)
10.1.5 Kondo 相互作用与 RKKY 相互作用	(376)
10.1.6 Kondo 点阵模型	(378)
10.1.7 Dual 模型	(378)
10.2 重费米子超导体	(379)
10.2.1 Ce 基化合物重费米子超导体	(379)
10.2.2 U 基化合物重费米子超导体	(382)
10.2.3 重费米子超导体的能隙函数和序参量	(384)
10.2.4 重费米子超导体的配对机制	(385)
10.2.5 超导与磁有序共存	(386)
10.3 磁有序基态重费米子系统	(390)
10.3.1 反铁磁基态	(390)
10.3.2 铁磁基态	(392)
10.4 非费米液体重费米子系统	(396)
10.4.1 非费米液体与量子临界点	(396)
10.4.2 CeCu <sub>5.9</sub> Au <sub>0.1</sub> 的非费米液体特性	(397)
10.4.3 CeNi <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> 的非费米液体特性	(399)
10.4.4 NFL 重费米子超导体	(399)
10.5 其他类型重费米子系统	(399)
10.5.1 费米液体基态重费米子系统	(399)
10.5.2 Kondo 绝缘体	(400)

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 $\tau_1$ 和自旋-自旋弛豫时间 $\tau_2$	(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 银和铑的核磁有序	(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 在银和铑中负温度的获得	(445)
12.4.5 铑的核磁有序实验	(447)
12.5 其他金属中的核磁有序实验	(449)
12.5.1 $\text{AuIn}_2$ 和 $\text{PtFe}_x$ 的核磁实验	(449)
12.5.2 $\text{PrNi}_5$ 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)