

普通物理学教程丛书

热 学

李洪芳 编著

复旦大学出版社



普通物理学教程丛书

热学

李洪芳 编 著

复旦大学出版社

(沪)新

期 限 表

请于下列日期前将书还回

责 任

责任校对 马金室

热 学

李洪芳 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 崇明红卫印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 17 字数 501,000

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-309-01314-X/O·136

定价: 16.00 元

内 容 提 要

本书是复旦大学《普通物理学教程丛书》中的一种，是作者在复旦大学物理系多年使用的热学讲义的基础上经不断修改、补充而成的。

全书共分九章。第一章介绍热力学系统的微观结构、第二、三、四章介绍热力学的四个基本定律和熵的产生原理，第五章介绍热力学系统平衡态的分子运动理论及布朗运动；第六章介绍气体中输运现象的宏观规律和微观解释，第七章介绍液体的基本性质及其表面现象，第八章介绍结晶体、非晶体和准晶体的基本性质，第九章介绍气、液、固三相转变的基本规律，在附录中介绍了目前最新的一些基本物理常数及获得低温的主要方法。全书内容丰富、图文并茂，便于自学。书中精选的例题、习题和思考题与课程内容配合密切、很有特色。

本书可作为高等学校物理类各专业的热学教材或主要教学参考书，亦可供各有关专业的教师、学生和科技工作者参考。

前 言

这套“普通物理学教程丛书”，是我们以历年来在复旦大学物理类专业教学中使用的讲义为基础，经过补充修订、编写而成的。多年来，在我校担任物理课教学的许多同志，曾努力结合教学实践，对普通物理学教材作出了改进。实践表明，这些改进对提高教学质量是有重要作用的。这套丛书的编写也可以说是我们对这些共同的努力所作的一点总结。

普通物理学是很成熟的课程，通行的优秀教材不少；而且很久以来已形成了传统的格式，框架结构已相对地稳定，改变的余地似乎不多。但是教学是创造性的工作，每一位教师的讲课都反映了他本人对所教内容的体会、理解，有他自己的讲授方法，会给听课的学生以不同的感受。教材的编写，集中地体现了这些方面不同的风格。正如在绘画、音乐等艺术创作中，同一题材在不同作者手里总是反映出不同的个性特点一样。近几年，各类物理教材的出版，比过去繁荣得多，这不仅为教师提供了更多的选择余地，而且也加强了教学经验的交流，有力地促进了教学的改进和教学质量的提高。我们这套教材在复旦大学出版社的支持下陆续出版，我们认为也是一个学习交流的机会，使我们能把仅在自己学校里实践过的点滴经验，拿到同行老师们和广大读者中来，争取得到大家的帮助、指正，使它们逐步改进和完善。

总的说来，我们在编写过程中力求做到：

1. 重点放在基本概念和基本原理的清楚阐述上。在阐述方法方面，力求由物及理，揭示明确的物理图像（不回避使用学生已学过的数学工具，但在运用新的数学工具时，要特别注意不掩盖物理内容的实质），引导学生注意建立这些原理的实践基础，提高运用它们解决物理问题的兴趣和能力，而不停留在仅仅钻研原理本身。

2. 基本保持传统框架，适当更新题材，注意横向联系。物理学的

发展和学科之间的沟通渗透。为普通物理学教学提供了大量新题材和新问题。适当地反映这些情况,使学生能在更广泛的意义上理解物理学的基本内容,是当前物理学教学发展的趋势和要求。在考虑内容更新的同时,也要注意普通物理学课程在物理学教学全局中的位置,注意与其他课程有恰当的分工和衔接。

3. 注意启发学生的思考。使他们对一些问题萌生进一步探讨的兴趣,而不满足于接受现成的知识。

4. 运用近年来物理学教学研究的成果,适当加强过去教学中某些较为薄弱的环节。

5. 适合不同方面的需要。除了供普通物理学课程教材之用外,也可以给教师、学生和其他读者作参考书。书中用小号字排印的内容和一部分附录就是为这方面的需要而补充的。

当然,就这几方面,我们也深感不容易做好,希望与读者共同切磋,力求继续改进。

这套教材是从集体教学经验中产生的。但各册由不同的作者分头编写,独立成书,因而也反映了各自的教学特点,没有企求整齐划一。前人主张“转益多师”。在科学发展的新形势下,对大学生来说,更有这样的需要。从这一意义上说,让各部分教材保持各自的特点,也许不是没有积极意义的。

丛书的出版得到校内外许多同志的大力支持、帮助,谨在此表示衷心的感谢。

复旦大学物理系普通物理学教研组

1985年4月

作者的话

本书是以1984年以来作者编写和使用的“热学”讲义为基础,结合多年来的教学经验、特别是近年来教学改革实践修改而成的。在编写本书的过程中,我们以《普通物理教程丛书》的编写原则为指导思想,并且广泛参阅和借鉴了国内外有关的优秀教材、书籍、资料及最新科研成果。

“热学”和其他普通物理基础课程一样,它的基本内容比较成熟,结构也较稳定。但由于热学研究对象是包含大量原子、分子或其他粒子的热力学系统,它包含的基本概念、基本定律和基本理论,不但是物理学各分支学科的理论基础,而且也越来越成为化学、生物、工程技术学科,甚至社会科学的理论基础;而随着科学技术的发展,人类对物质世界的研究又日益深入到高温、高压、高真空和深低温等极端条件下的各个领域。物理学和其他有关学科各个领域中出现出的新现象和新规律,使与之有关的热学理论由平衡态向非平衡态、由线性向非线性方向迅速发展。这不仅为热学内容的充实和更新创造了条件,而且也为编写新的热学教材提出了更高的要求。

基于以上的认识,本书对基本内容的安排作了仔细的调整。从总体上看,我们按照学生的认识过程和学习规律,先介绍宏观理论,后讲述分子运动的微观理论,再讨论它们的应用,显得层次清楚、经纬分明。但同时我们又十分注意这两种理论之间的内在联系。为此,我们在介绍宏观理论之前,先详细介绍热力学系统的微观结构,原子、分子论的发展历史,使学生从研究对象的复杂结构上理解和体会两种理论的内在联系,在介绍热力学过程和基本定律时,又可以尽量给以微观解释;在讲述了分子运动论后再反过来讨论热力学第二定律和熵的统计意义,从而使宏观理论和分子运动论的介绍,既有层次又不割裂、相辅相成,便于学生学习、理解和掌握。

本书对基本概念、基本定律和基本原理的阐述,力求从实验事实出发,把物理理论建立在坚实的实验基础上。注意建立和应用各种物理模型来研究、分析、综合实验事实,总结出物理概念和定律。尤其注意对同一实验现象,用精确程度不同、方法简繁不一的物理模型来处理,将所得结果与实验进行比较,以着重培养学生分析问题、解决问题和获取知识的能力。

本书对基本概念,基本定律和基本理论的表达和描写,既力求系统、严密和正确,又注意在通俗易懂、明白清楚上下功夫。其中有些内容的处理和叙述,反映了我们在教学中的一些看法、体会和心得。全书精选了相当数量的例题、习题和思考题。这些例题,不但有利于学生理解和掌握课程内容,了解和掌握解题的有关技巧和方法,而且也是课程内容的扩展,是本书的一个重要组成部分。

根据教材内容,反映与热现象有关的新知识、新概念和新理论,是目前教学改革和教学研究的一个重要课题。本书总结了我们近年来在这方面的研究成果和成功经验。我们选择的这些内容,不仅希望给学有余力的学生提供更多的“余粮”,也希望为教师的教学留下更宽广的余地;不但希望为学生扩大眼界、丰富知识、提高学习兴趣创造一定条件,也希望为他们今后进一步学习新的专业知识和理论课程架设桥梁。

处理好与后继课程,特别是和热力学与统计物理课程的关系,也是我们十分注意的问题之一。随着科学技术的发展和教学改革的深入,普通物理的热学和理论物理的“热统”,它们的内容和形式都将得到更新和发展,有些重要内容的重复和交叠是不可避免的,也是必要和有益的。但是对这些内容的处理方法、要求和阐述的深广程度应有所不同。这对加强这两门课程之间的联系和衔接将是有利的。

本书尽量引用最新的数据资料,如(ITS-90)国际温标、国际科学联合会理事会科技数据委员会(CODATA)推荐的基本物理常数数据。书中所用物理量的单位均采用国际单位制。

蔡怀新、贾起民、郑广垣等教授参加了本书大纲的讨论;贾起民教授、蔡怀新教授仔细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见;杨莉敏同志绘制了全书插图;钟万蘅和沈启舜副教授曾参加原讲义的编写工作。

在此表示衷心的感谢。在本书的出版过程中,复旦大学出版社,特别是林溪波副编审给予了有力的帮助。林先生认真负责、一丝不苟的工作作风,是提高本书质量的一个重要保证;他还在本书内容、单位和符号等的统一方面作出了重要贡献。在此作者深表感谢!在这里我们还要感谢复旦大学的领导,尤其是教务处的领导,没有他们的支持和帮助,本书的出版也是很困难的。

对那些自1984年以来使用过本讲义的各系教师和学生,作者表示深切的谢意。他们在教学中对讲义提出的许多宝贵意见,已在本书的编写过程中得到了充分的考虑。还应指出,在教学和本书的编写过程中,作者曾就许多问题向校内外的同行、专家请教和讨论,对他们以及其他一些朋友的支持和帮助,作者表示由衷的感谢!

本书是一本反映我校普通物理热学教学成果的集体创作。但由于修改时间较紧、作者水平有限,因比错误和疏漏之处在所难免,恳请广大同行、专家和读者给予批评和指正。

李 洪 芳

1993年9月于复旦大学

目 录

前 言	1
作者的话	3
第一章 热力学系统	1
§ 1.1 物质的原子、分子结构	1
一、物质的原子、分子结构	1
二、分子的热运动	5
三、原子量和分子量	6
四、摩尔和摩尔质量	6
五、阿伏伽德罗常数	6
§ 1.2 分子之间的相互作用	7
一、分子间的相互作用	7
二、分子相互作用模型	8
三、分子的对心碰撞与有效直径	13
§ 1.3 物态与相	14
一、物态	14
二、相	15
§ 1.4 热力学系统	17
一、热力学系统和外界	17
二、热力学系统的分类	17
§ 1.5 热力学系统的平衡态	19
一、平衡态	19
二、非平衡态	20
§ 1.6 热力学系统的描述	22
一、宏观描述和状态参量	22
二、状态图	24

三、微观描述	26
思考题	26
第二章 热力学第零定律与温度	28
§ 2.1 热力学第零定律与温度	28
一、热力学第零定律	29
二、温度	29
§ 2.2 温标	30
一、华氏温标、摄氏温标和经验温标	30
二、理想气体温标和气体温度计	33
三、热力学温标	36
四、摄氏、华氏和兰氏温标的新定义	36
五、国际温标(ITS-90)	38
§ 2.3 状态方程	40
一、状态方程	40
二、压缩系数、膨胀系数和压强系数	41
三、理想气体的状态方程	42
四、热学中的单位	45
§ 2.4 理想气体的压强和温度的微观解释	49
一、理想气体模型	49
二、理想气体的压强公式	49
三、温度的微观意义	55
§ 2.5 非理想气体的状态方程	58
一、CO ₂ 气体的等温线	58
二、范德瓦耳斯气体状态方程	60
三、翁纳斯方程	65
§ 2.6 水的三相点和几种温度计	67
一、水的三相点	67
二、铂电阻温度计	68
三、光学温度计	70
四、热电偶温度计	71
思考题	73
习题	74

第三章 热力学第一定律	77
§ 3.1 热力学过程	77
一、热力学过程	77
二、非静态过程	79
三、准静态过程	80
§ 3.2 功	82
一、准静态过程中与体积有关的功	83
二、热力学中其他形式的功	85
三、热力学中功的一般表示式	88
§ 3.3 热量和热量的传递	90
一、关于热量概念的历史发展	90
二、热量的传输	93
三、例题	99
§ 3.4 热力学第一定律	101
一、内能	101
二、热力学第一定律的数学表述	104
§ 3.5 热容和焓	106
一、热容和比热	106
二、焓	107
§ 3.6 理想气体的内能、焓和比热	109
一、焦耳定律	109
二、理想气体的内能和焓	111
三、 C_p 与 C_v 的关系	112
四、例题	113
§ 3.7 理想气体的多方过程	114
一、等容过程	114
二、等压过程	115
三、等温过程	115
四、绝热过程	116
五、多方过程的一般表示	117
六、例题	119
§ 3.8 循环过程、热机及致冷机的工作原理	125

一、循环过程	125
二、热机的工作原理及效率	126
三、致冷机的工作原理和致冷系数	128
四、热泵	131
五、例题	131
§ 3.9 卡诺循环	137
一、卡诺循环	137
二、卡诺热机的效率	138
三、例题	140
§ 3.10 内燃机的理想循环	142
一、奥托循环	142
二、狄塞尔(Diesel)循环	144
§ 3.11 逆斯特令循环	146
一、理想逆斯特令循环	146
二、往复式斯特令致冷机简介	147
§ 3.12 焦耳-汤姆逊效应	149
一、节流过程	149
二、焦汤系数	151
思考题	153
习题	155

第四章 热力学第二定律和熵

§ 4.1 热力学第二定律	162
一、与热现象有关的几个例子	162
二、热力学第二定律的表述	164
三、克氏表述与开氏表述等效性的证明	167
§ 4.2 可逆过程与不可逆过程	168
一、可逆过程与不可逆过程的定义	169
二、可逆过程与不可逆过程举例	169
三、不可逆过程之间的联系	171
四、产生不可逆过程的因素	175
§ 4.3 卡诺定理和热力学温标	176
一、可逆与不可逆循环	176

二、卡诺定理	177
三、卡诺致冷机的致冷效能	180
四、热力学温标	181
五、内能与焓的微分表达式	184
六、例题	189
§ 4.4 熵和热力学第二定律的数学表述	191
一、克劳修斯不等式	192
二、熵和热力学第二定律的数学表述	195
§ 4.5 熵增加原理	198
一、熵的计算	198
二、熵增加原理	203
三、 T - S 图	207
四、例题	209
§ 4.6 能量退化原理	213
一、最大功原理	213
二、能量退化原理	214
§ 4.7 热力学第三定律	218
一、关于绝对零度的概念	218
二、热力学第三定律	218
§ 4.8 负温度	220
一、核自旋系统	220
二、负温度	221
三、负温度状态下的热力学定律	222
* § 4.9 熵的产生	227
一、多元开放系统的热力学第二定律	227
二、熵流和熵产生	239
三、熵守恒方程	239
* § 4.10 最小熵产生原理	230
一、线性不可逆过程中“力”和流的关系	230
二、最小熵产生原理	234
思考题	237
习题	239

第五章 热力学系统平衡态的分子运动理论	243
§ 5.1 几率的基本概念	243
一、伽尔顿板实验	243
二、几率的基本概念	245
§ 5.2 二项式分布	248
一、二项式分布	248
二、理想气体分子在空间的最可几分布	251
三、伽尔顿板实验的定量分析	252
四、无规行走问题	254
§ 5.3 麦克斯韦分布律	258
一、速率分布函数	258
二、麦克斯韦速度分布律	263
三、用麦克斯韦分布律求平均值	268
四、例题	271
§ 5.4 麦克斯韦分布律的实验验证	277
一、分子束	277
二、斯特恩实验	278
三、葛正权实验	279
四、密勒与库士实验	280
五、例题	282
§ 5.5 玻耳兹曼分布律	283
一、气体分子在重力场中按高度的分布	283
二、玻耳兹曼分布律	284
三、粒子按能级的分布	286
四、粒子数反转及负温度	287
五、例题	289
§ 5.6 能量按自由度均分定理	290
一、自由度	290
二、能量按自由度均分定理	292
三、理想气体的内能及热容量	293
四、经典理论的缺陷和量子理论的定性解释	296
§ 5.7 布朗运动	299

一、爱因斯坦对布朗运动的理论解释	300
二、朗之万方程	303
三、佩兰实验	305
四、例题	307
§ 5.8 噪声	309
一、散粒噪声	310
二、热噪声	311
§ 5.9 第二定律的微观解释和熵的统计意义	312
一、热力学几率	312
二、玻耳兹曼假设	316
三、熵的统计意义	317
思考题	319
习题	322
第六章 气体中的输运现象	326
§ 6.1 气体分子的平均自由程	326
一、分子的碰撞和碰撞截面	326
二、分子的碰撞频率和平均自由程	328
三、分子按自由程的分布	331
四、例题	333
§ 6.2 分子的碰壁数与余弦定律	385
一、分子碰壁数	335
二、余弦定律	337
三、平均碰撞距离	338
四、例题	388
§ 6.3 气体的扩散	340
一、气体扩散的宏观规律	340
二、稳定扩散的微观解释	344
§ 6.4 粘滞现象	346
一、粘滞现象的宏观规律	346
二、气体粘滞现象的微观解释	347
三、例题	350
§ 6.5 气体中热传导的微观解释	352

§ 6.6 热流逸现象	435
一、压强较高($\lambda \ll d$)	355
二、压强较低($\lambda \gg d$)	355
三、热流逸现象	356
§ 6.7 分子辐射力现象	357
思考题	359
习题	360
第七章 液体	363
§ 7.1 液体的种类	363
§ 7.2 液体的压缩性和热膨胀	365
一、液体的压缩性	365
二、液体的热膨胀	366
三、压缩系数 κ 和膨胀系数 α 之间的关系	368
§ 7.3 液体的热容量	369
§ 7.4 液体的微观结构	371
一、液体分子的排列情况	371
二、液体分子的热运动	372
三、液体分子间的作用	372
四、径向分布函数	375
§ 7.5 液体的输运性质	376
一、扩散	377
二、粘滞性	379
三、热导系数	380
§ 7.6 液体的表面张力	381
一、表面张力	381
二、自由能	384
三、影响表面张力的因素	386
四、表面张力的微观分析	387
五、例题	389
§ 7.7 弯曲液面内外的压强差	392
一、球形液面下的附加压强	392
二、任意弯曲液面内外的压强差	394