

高等学校教材

热学教程

(第二版)

黄淑清 聂宜如 申先甲 编

高等教育出版社

0551/7=2

1994

高等学校教材

热 学 教 程

(第二版)

黄淑清 聂宜如 申先甲 编

高等教育出版社

内容提要

本书系在第一版的基础上修订而成,作者在修改过程中对内容作了适当调整,增加了阅读材料及有关物理学史的内容。本书共包括七章:温度、热力学第一定律、热力学第二定律、气体动理论、气体内的输运过程、非理想气体固体液体、相变。每章后附有习题,书末附有习题答案、主要物理量表及参考书目等。

本书可作为高等学校物理专业热学课程的教材,也可供有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热学教程/黄淑清等编. —2版. —北京:高等教育出版社,
1994.12 (2007 重印)

ISBN 978 - 7 - 04 - 004919 - 0

I. 热… II. 黄… III. 热学 - 教材 IV. 0551

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 12205 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京北苑印刷有限责任公司	畅想教育	http://www.widedu.com
		版 次	1990 年 2 月第 1 版
开 本	850 × 1168 1/32		1994 年 12 月第 2 版
印 张	13.375	印 次	2007 年 12 月第 14 次印刷
字 数	330 000	定 价	12.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 4919 - 00

再 版 前 言

我们编著的高等学校试用教材《热学教程》，自1985年由高等教育出版社出版以来，先后被不少综合大学和师范院校物理专业选作教科书。在使用过程中，广大师生既肯定了原书在体系结构、内容安排等方面的优点，也发现和指出了原书存在的一些缺点和不足之处。特别是随着高等学校物理教育改革的深入发展和现代科学技术的飞速进步，对原书进行修改是势在必行的。应国家教委高等学校理科物理教学指导委员会和高等教育出版社的要求，我们在广泛征求使用单位意见的基础上，对原书作了必要的修改。

修订稿在体系设计、内容安排、重点难点处理和论述方法上，保持了原书的基本特色。在修改中我们注意联系中学教学改革和物理教学的需要，突出师范教育的特点；有选择地增加了一些富有教育意义的物理学史资料，并结合现代科学技术发展的状况，适当补充了一些热学理论研究进展和实际应用的知识。这些改进目的在于提高这部教材的科学水平和教学效果。修改中对原书的部分内容作了适当的删减、压缩、修订和调整；根据教学要求和学生自学的需要，适当增加了一些阅读材料；对一些重要概念、定律和具体知识的叙述，进行了修正；并按照新的规定，对所用的物理学单位和名词作了规范化的修订。通过这些修改，使全书的论述更加精练、准确和流畅。

在这次修订工作中，三位作者的分工如下：

黄淑清：第一、二、三、四、五章的内容修改和文字润色；全书的统稿。

聂宜如：第六、七章的内容修改和文字润色；全书阅读材料（第二章除外）的编写。

申先甲:全书物理学史资料的增补编写.

在修改过程中,我们得到了国家教委高等学校理科物理教学指导委员会副主任梁绍荣教授、北京大学包科达教授、高等教育出版社钟金城编审、黄元铭编辑以及河北大学、山东师大、广西师院、鞍山师专和我校有关教师的积极支持和热情帮助.特别是主审包科达先生对修订稿进行了逐章逐节的认真审阅,提出了许多具体、中肯的修改意见.在此一併表示感谢!

作 者

1994.1. 于北京首都师范大学

前 言

本书是我们在北京师范学院^①历年使用的热学讲义的基础上,按1980年全国高等师范院校物理专业热学教学大纲修改补充而成的.考虑到热学课是学生在学完机械运动知识之后接触到的第一门讲述非机械运动的课程,本书强调了热运动与机械运动的区别;统计规律性与力学规律性的区别,以使学生认识物质运动形态的多样性和各自所遵从的规律的特殊性.在教学顺序上,采取了先讲述宏观理论后讲述微观理论的作法,使其符合学生由现象到本质的认识过程,并使学生由原有的用宏观观点处理问题的思维习惯改变到用微观观点处理问题有一个思想准备阶段.为了便于使读者掌握每章的要点和各章知识之间的联系,在每章开始有内容提要.章末附有习题、思考题.思考题主要是引导学生深入钻研重要的物理概念,不能代替复习提纲的作用.

本书第一至第三章由申先甲执笔,第四、五章及第六章§1、§2由黄淑清执笔,第六章§3至第七章由聂宜如执笔.全书由黄淑清统稿并选编习题、思考题.

一些兄弟师范院校的教师对本书初稿提出了不少修改意见.参加审稿会的北京师范大学(主审)、内蒙古师范大学、西北师范大学、河北师范大学、天津师范大学物理系的教师又对本书修改稿进行了认真细致的审阅,提出了不少宝贵意见.本院物理系孙念台、李申生先生审阅了本书部分内容;佟盛勋、李荫乔先生以及校内外许多其他教师对本书的出版工作给予了大力支持.对于以上各方面的热情帮助,编者在此表示衷心的感谢.

^① 现为首都师范大学

由于受编者水平所限,本书定会有不少缺点和错误,恳请广大
教师和读者批评指正。

编 者

1984.8

目 录

本教程内容体系示意图

引言	1
§ 0-1 热学的研究对象	1
§ 0-2 热力学系统的宏观描述和微观描述	2
§ 0-3 热学发展简史	4
第一章 温度	9
§ 1-1 平衡态 状态参量	9
§ 1-2 热力学第零定律和温度	12
§ 1-3 温标的建立	17
§ 1-4 理想气体状态方程	31
第一章思考题	42
第一章习题	43
第二章 热力学第一定律	47
§ 2-1 热力学系统的过程	47
§ 2-2 功	50
§ 2-3 内能 热量 焦耳热功当量实验	55
§ 2-4 热力学第一定律	62
§ 2-5 理想气体的内能、热容和焓*	67
§ 2-6 热力学第一定律对理想气体几种典型过程的应用	73
§ 2-7 循环过程	90
§ 2-8 技术上的循环实例	96
阅读材料:判断理想气体任意准静态过程吸热、放热的方法及其 计算	104
第二章思考题	108
第二章习题	110
第三章 热力学第二定律	118

§ 3-1 热力学第二定律	118
§ 3-2 实际宏观过程的不可逆性	123
§ 3-3 卡诺循环	130
§ 3-4 卡诺定理	135
§ 3-5 热力学温标	143
§ 3-6 熵与热力学第二定律	148
§ 3-7 自由能	161
阅读材料:氨吸收制冷	162
第三章思考题	163
第三章习题	165
第四章 气体动理论	169
§ 4-1 分子动理论的基本观点	169
§ 4-2 分子力	180
§ 4-3 理想气体的压强	185
§ 4-4 温度的微观实质	199
§ 4-5 气体分子按速率分布的实验测定及速率分布的数学 表述	204
§ 4-6 麦克斯韦速率分布律	209
§ 4-7 麦克斯韦速度分布律	217
§ 4-8 玻耳兹曼分布律 重力场中微粒按高度的分布	221
§ 4-9 能量按自由度均分定理	226
§ 4-10 理想气体的内能和摩尔热容	232
§ 4-11 气体动理论与热力学定律	238
阅读材料:围绕“热寂说”的争论	247
第四章思考题	250
第四章习题	251
第五章 气体内的输运过程	256
§ 5-1 气体分子的平均自由程	257
§ 5-2 粘滞现象的宏观规律及其微观解释	262
§ 5-3 热传导现象的宏观规律及其微观解释	269

§ 5-4 扩散现象的宏观规律及其微观解释	272
§ 5-5 三种输运现象的讨论及理论与实验结果的比较	275
阅读材料 I: 理想气体的内部压强	279
阅读材料 II: 远离平衡态的非平衡态过程研究工作简介	281
第五章思考题	284
第五章习题	285
第六章 非理想气体 固体 液体	287
§ 6-1 范德瓦耳斯方程	287
§ 6-2 非理想气体的内能 焦耳-汤姆孙效应	296
§ 6-3 晶体的宏观特征及微观结构	305
§ 6-4 晶体中粒子的结合力和结合能	313
§ 6-5 晶体中粒子的无规则运动 固体的热容和热膨胀	319
§ 6-6 液体的微观结构 液晶简介	326
§ 6-7 液体的表面张力	332
§ 6-8 弯曲液面下的附加压强	340
§ 6-9 毛细现象及毛细管公式	347
第六章思考题	351
第六章习题	353
第七章 相变	356
§ 7-1 相和相变的一般概念	356
§ 7-2 蒸发与沸腾 饱和蒸气压	359
§ 7-3 二氧化碳实验等温线 液气二相图	368
§ 7-4 范德瓦耳斯等温线	376
§ 7-5 克拉珀龙方程	381
§ 7-6 临界温度很低的气体的液化 低温	385
§ 7-7 固液相变 固气相变 三相点	390
§ 7-8 实际物质的 $p-V-T$ 曲面	399
阅读材料: 物质的第四态和第五态简介	402
第七章思考题	403
第七章习题	404

习题答案	406
附录	411
I. 本书主要物理量的国际单位制名称及代号	411
II. 热学常用单位换算	412
参考书目	413

引 言

§ 0-1 热学的研究对象

生活和生产中的大量实践表明,当物体的冷热程度发生变化时,物体的大小、聚集状态、力学性质和电学性质等也将发生变化.例如,物体受热后体积膨胀;水冷却到一定程度会变成冰;钢件经过热处理硬度会变化;导线受热后电阻会增大等等.这些与物体冷热程度有关的物理性质及状态的变化,统称为**热现象**.宏观物质(由大量微观粒子如分子、原子或离子所组成的系统)以热现象为主要标志的这种运动形态称为**热运动**^①.科学研究结果表明,宏观物质的热运动实质上就是组成这物质的大量微观粒子的无规则(机械)运动在总体上所表现出的一种运动(非机械运动)形态.宏观物质的以上这些热性质和热运动规律及其应用等,是热学研究的基本内容.热学是物理学的一个重要组成部分

在自然界发生的实际过程中,热运动与机械、电磁、化学等等其他运动形态之间存在着广泛和深刻的内在联系.例如当车刀切削金属工件时工件会变热,擦在皮肤上的酒精挥发时,皮肤会感觉冷,在氢和氧化合成水的化学反应中,伴随着放热现象,等等.这都表明,在自然界发生的实际过程中,热现象和其他现象往往是相伴

^① 在一般教材中,“热运动”一词有两种含义:一种是作为宏观物质的一种运动形态来使用的(如谈到宏观物质的热运动与其他运动形态之间的转化时所用到的那样);另一种是作为构成宏观物质的微观粒子的运动形态(无规则的位置移动)来使用的.本教材中提到的热运动指第一种含义,在用于第二种含义时直接使用“分子无规则运动”一词.

而生的.特别值得指出的是,在实际过程中,经常发生着各种运动形态之间在一定条件下的相互转化.例如,通过摩擦,可以实现机械运动向热运动的转化;而通过燃料在内燃机气缸内的燃烧,产生高温高压气体膨胀做功,则又实现了热运动向机械运动的转化;电流通过电阻丝时电阻丝发热,从而实现了电磁运动向热运动的转化;而在温差电堆中,则实现了热运动向电磁运动的转化.热运动和其他运动形式之间的相互转化,构成了热学研究的另一个重要基本内容.

综上所述,热学是以物质的热运动以及热运动与其他运动形态之间的转化规律为其研究对象的一门学科.热学理论在热机的研制,化学、冶金、气象学的研究,以及原子核反应堆的设计上,都有重要的应用.

§ 0-2 热力学系统的宏观描述和微观描述

一、热力学系统

在研究物理现象时,人们通常只注意某一物体或物体系,并想像地把它同周围的物体隔离开来.在热学中,我们把这一被确定为研究对象的物体或物体系叫做热力学系统,简称系统.在系统边界外部,与系统发生相互作用,从而对系统的状态直接产生影响的物质叫做系统的外界.根据系统与外界相互关系的不同,可对系统进行分类:与外界既不交换物质又不交换能量的系统叫做孤立系统;与外界不交换物质,但可交换能量的系统叫做封闭系统;与外界既交换物质又交换能量的系统叫做开放系统.

二、热力学系统的宏观描述与微观描述

在物理学中,通常根据物质层次的不同而把物理现象分为宏

观现象和微观现象。宏观现象一般是指由大量微观粒子组成的系统在总体上所表现出来的现象,如气体的膨胀,物质的聚集态的转变等;微观现象一般是指原子、分子等微观粒子所发生的现象,如分子的运动,分子间的碰撞等。描述系统宏观性质的物理量称为宏观量,如物体的温度、压强、热容等;描述粒子微观性质的物理量称为微观量,如分子的质量、分子的速度等。宏观现象与微观现象是紧密联系着的。

热现象是一种宏观现象,但可以从宏观和微观两种不同的观点着眼,采用不同的方法加以研究。所谓宏观观点,是从系统的宏观总体上来观察和考虑问题。用宏观量来描述系统状态的方法叫做宏观描述。微观观点则是从组成宏观物体的大量分子的运动和相互作用着眼来考虑问题。例如在经典物理中,只要给出所有每个粒子的运动状态(可用微观量坐标 q_i 和动量 p_i 表示, $i = 1, 2, \dots, N$, N 是系统包含的粒子的总数),就可确定系统的总体状态。用大量的微观量来描述系统状态的方法叫做微观描述。

三、热学的宏观理论与微观理论

根据对热学系统描述方法的不同,形成了热学的两种理论:宏观理论与微观理论,即热力学和统计物理学。热力学不涉及物质的微观结构,只是根据由观察和实验所总结出来的宏观热现象所遵循的基本定律,用严密的逻辑推理方法,研究系统的热学性质,这是关于热现象的宏观理论。统计物理学则是从物质内部的微观结构出发,即从组成物质的分子、原子的运动和它们之间的相互作用出发,依据每个粒子所遵循的力学规律,用统计的方法阐明系统的热学性质,认为系统的宏观性质是大量微观粒子无规则运动的平均效果,宏观量是微观量的统计平均值。热力学所得到的结果,并不依赖于统计物理学所不得不做出的各种简化的假设,因而一般是精确和可靠的,可以用来验证微观理论的正确性;但是由于热力

学没有深入到现象的微观运动机理中去,无法阐明诸如压强、温度、内能、熵等这些宏观量的深刻含义.统计物理学则深入到热现象的本质,从分子运动出发求出宏观观测量的微观决定因素,这就弥补了热力学的缺陷.但由于统计物理学方法需从特定的微观模型出发讨论问题,而这种模型是简化的,因而理论得出的结果也往往是近似的.总之,热力学和统计物理学在对热现象的研究上各具所长,又各有不足,用这两种方法研究热学,正好互为补充,相辅相成.正如美国物理学家托尔曼(R. C. Tolman, 1881—1948)所说^①:“以较为抽象的统计力学来对热力学作出了完满的解释,这是物理学的最大成就之一.此外,由于统计力学的研究更带有根本性,因而它可能使普遍的热力学原理得到极为重要的补充.”

本教程先介绍研究热学的宏观方法,然后介绍微观方法.

§ 0-3 热学发展简史

火的利用可以追溯到久远的古代,古人在生活和生产中早已接触到许多热现象.但是,由于生产和认识水平的限制,在很长时期内,人们对热的本质只有一些初浅的想法.在古代,对于热现象的本质曾产生过两种不同的看法.古希腊米利都学派的阿那克西曼德(Anaximander, 约公元前 611—547)把火看作是与土、水、气并列的一种元素,它们都是由某种原始物质形成的世界四大主要元素.爱非斯的赫拉克利特(Heraclitus, 约公元前 550—475)更认为火是一切自然现象的统一的基础,他认为整个世界的过去、现在和未来“永远是一团永恒的活火”.后来,西西里岛的恩培多克勒(Empedocles, 约公元前 500—430)明确提出四元素学说,认为万物

^① 转引自 R. 瑞斯尼克、D. 哈里德著,郑永令等译:《物理学》第一卷第二册 p. 672. 科学出版社,1980 年.

都是由土、水、火、气四种元素在数量上不同比例的配合组成的。这种学说与我国殷周之际产生的五行说很相似，五行说认为金、木、水、火、土是构成世界万物的五种基本元素，称为五行。在这些学说中，都把火当作自然界的一个独立的基本要素。另一种观点则把火看作是一种物质运动的表现形式。中国古代提出的元气说，就认为热(火)是物质元气聚散变化的表现。古希腊学者柏拉图(Plato, 公元前 427—347)认为火和热现象本身就是摩擦和碰撞引起的，“但这就是运动”。

17 世纪以后，不少人根据摩擦生热现象，认为热是一种特殊的运动。英国的唯物主义哲学家弗兰西斯·培根(Francis Bacon, 1561—1626)在归纳大量经验事实的基础上断言热的实质就是物体内部微粒的运动。这个观点影响了许多哲学家和自然科学家，逐渐出现了一些定性的分子运动假设。玻意耳(Robert Boyle, 1627—1691)认为热是“物体各部分发生的强烈而杂乱的运动”；^①笛卡尔(René Descartes, 1596—1650)把热看作是物质粒子的一种旋转运动；胡克(Robert Hooke, 1635—1703)用显微镜观察了火花，认为热“是一个物体的各个部分的非常活跃和极其猛烈的运动”；牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)也指出物体的粒子“因运动而发热”。到 1738 年，伯努利(Daniel Bernoulli, 1700—1782)则从气体分子与器壁碰撞的概念导出了玻意耳定律。18 世纪 40 年代，罗蒙诺索夫(Ломоносов, 1711—1765)明确提出了热是物质内部分子运动的表现以及气体分子运动是无规则的重要思想。但是总的说来，热的运动学说当时由于还缺乏精确的实验根据，尚未形成科学的理论。

18 世纪中叶以后，系统的计温学和量热学的建立，使热现象的研究走上实验科学的道路。当时，由于各种物理现象的相互联系尚未被揭示出来，还由于化学的进展以及形而上学思想的影响，大

^① 引自 John Tyndall, *Heat a mode of Motion*, 6 th Edition, p. 33.

多数物理学家以孤立的、片面的观点看待事物. 所以就用一种臆想的特殊物质——热质来解释自然界的冷热变化. 1798 年和 1799 年, 伦福德 (Count Rumford, 1753—1814) 和戴维 (H. Davy, 1778—1829) 先后以金属钻削实验和两块冰在真空容器中摩擦融化的实验, 对热质说进行了反驳.

19 世纪 40 年代, 德国医生迈耶 (Robert von Mayer, 1814—1878)、德国物理学家和生理学家亥姆霍兹 (H. Helmholtz, 1821—1894)、英国律师格罗夫 (W. R. Grove, 1811—1896)、丹麦物理学家柯尔丁 (L. A. Colding, 1851—1888) 等先后通过不同的研究途径确定了热力学第一定律, 即能量守恒定律. 特别是英国物理学家焦耳 (James Prescott Joule, 1818—1889) 所做的测定热功当量的大量精确实验 (§ 2-3), 给予了热力学第一定律以坚实的实验基础.

1824 年, 法国青年工程师卡诺 (Sadi Carnot, 1796—1832) 研究了理想热机的效率问题. 在热力学第一定律建立以后, 德国物理学家克劳修斯 (R. E. Clausius, 1822—1888) 和英国物理学家开尔文 (Kelvin, 即 W. Thomson, 1824—1907) 重新分析了卡诺的工作, 各自独立地发现了热力学第二定律. 它的基本内容是: 涉及到热现象的过程是不可逆的. 在把两个基本定律应用到各种具体问题的过程中, 找到了反映物质各种性质的相应的热力学函数.

1850 年前后, 物理学界普遍认识到了热现象和分子运动的联系, 分子动理论得到飞跃的发展. 很多学者先后在分子动理论方面做了大量的工作. 克劳修斯、麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879)、玻耳兹曼 (Ludwig Boltzmann, 1844—1906) 的工作为分子动理论奠定了基础. 克劳修斯运用统计方法正确地导出了玻意耳定律, 得到了气体的压强和分子的平均平动动能成正比, 而分子的平动动能又正比于绝对温度等基本认识. 他还首先引进分子运动自由程的概念. 麦克斯韦最先得到了分子速度分布律 (1859). 玻耳兹曼则进一步在速度分布律中引进重力场 (1868). 这