

高等学校试用教材

热学教程

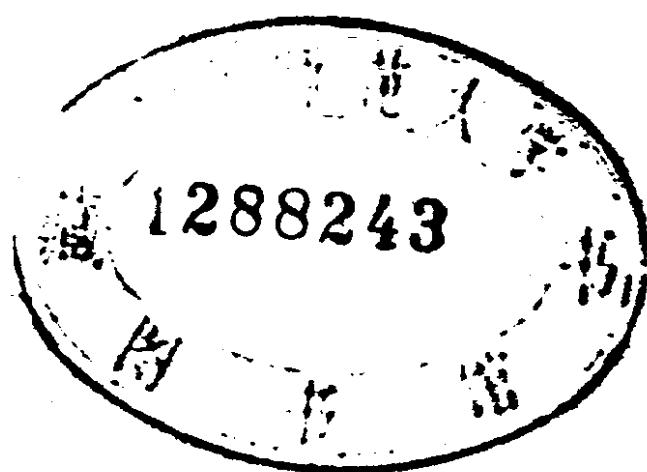
黄淑清 聂宜如 申先甲 编

高等教育出版社

高等学校试用教材

热 学 教 程

黄淑清 聂宜如 申先申 编



高等教育出版社

1985

内 容 简 介

本书系编者在北京师范学院讲授热学课程时所用讲义的基础上, 根据1980年新订高等师范院校《热学》教学大纲补充修订而成。

本书对热学的基本内容和基本定律, 采用先宏观后微观的描述方式, 作了较深入细致的分析, 并附有较多的思考题和习题。全书包括温度和理想气体状态方程、热力学第一定律、热力学第二定律、气体分子运动论、气体内的输运过程、实际气体、固体、液体和相变等方面的内容。

本书可作为高等学校物理专业试用教材, 亦可供有关专业的师生和中学教师参考。

高等学校试用教材

热 学 教 程

黄淑清 聂宜如 申先甲 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市朝阳京辉印刷厂印装

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 11.75 字数 280,000

1985年6月第1版 1985年6月第1次印刷

印数 00,001—15,200

书号 13010·01050 定价 2.40 元

前 言

本书是我们在北京师范学院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。

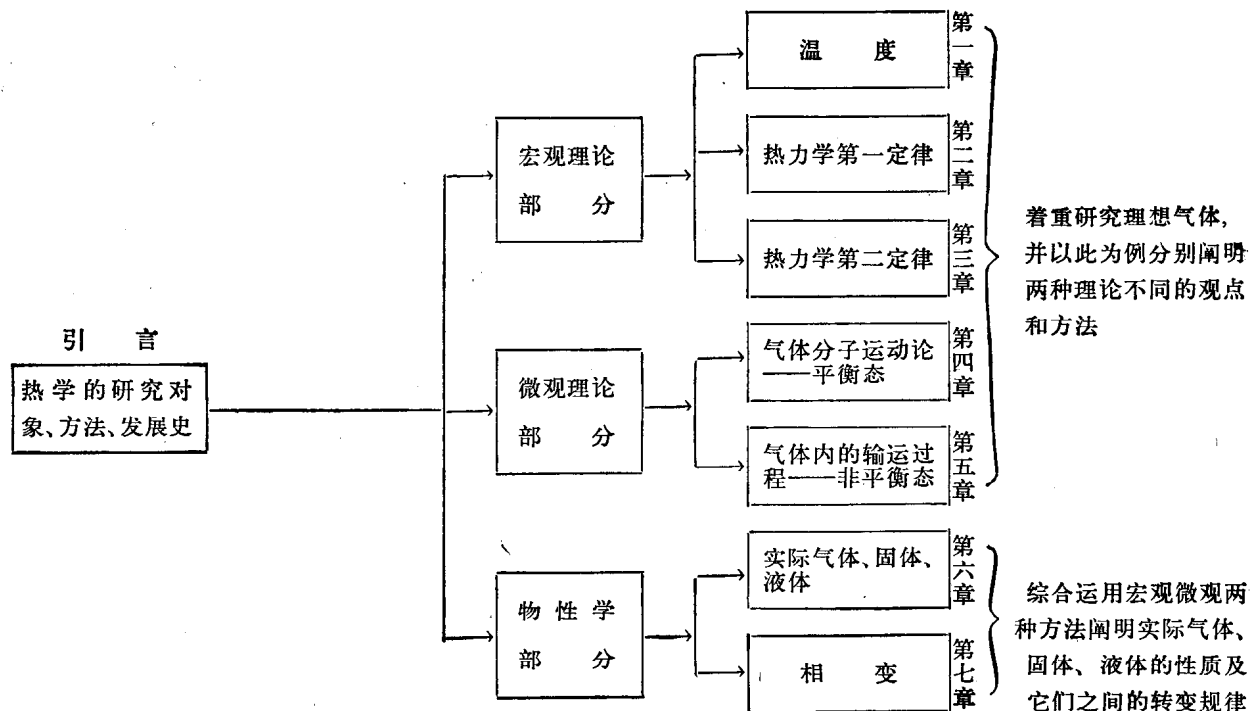
一些兄弟师范院校的教师对本书初稿提出了不少修改意见;参加审稿会的北京师范大学(主审)、内蒙古师范大学、西北师范大学、河北师范大学、天津师范大学物理系的教师又对本书修改稿进行了认真细致的审阅,提出了不少宝贵意见;本院物理系孙念台、李申生先生审阅了本书部分内容;佟盛勋、李荫乔先生以及校内外许多其他教师对本书的出版工作给予了大力支持。对于以上各方面的热情帮助,编者在此表示衷心的感谢。

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

本教程内容体系示意图



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 热学的宏观理论和微观理论	2
§ 0-3 热学发展简史	3
第一章 温度	8
§ 1-1 平衡态 状态参量	8
§ 1-2 温度和温标	12
§ 1-3 物态方程 理想气体状态方程	27
第一章思考题	37
第一章习题	37
第二章 热力学第一定律	41
§ 2-1 热力学系统的过程	41
§ 2-2 功	44
§ 2-3 内能	48
§ 2-4 热量	51
§ 2-5 热力学第一定律	54
§ 2-6 理想气体的内能、热容和*焓	58
§ 2-7 热力学第一定律对理想气体的应用	64
§ 2-8 循环过程 卡诺循环	80
§ 2-9 技术上的循环	90
第二章思考题	98
第二章习题	100
第三章 热力学第二定律	108
§ 3-1 热力学第二定律	108
§ 3-2 实际宏观过程的不可逆性	113
§ 3-3 卡诺定理	121
§ 3-4 热力学温标	126

* § 3-5 熵与热力学第二定律·····	132
* § 3-6 自由能·····	141
第三章思考题·····	142
第三章习题·····	143
第四章 气体分子运动论 ·····	147
§ 4-1 分子运动论的基本观点·····	147
§ 4-2 分子力·····	153
§ 4-3 理想气体的压强·····	159
§ 4-4 气体分子按速率分布的实验测定及速率分布的数学表述·····	170
§ 4-5 麦克斯韦速率分布律·····	176
§ 4-6 温度的微观解释·····	184
* § 4-7 麦克斯韦速度分布律·····	189
§ 4-8 玻耳兹曼分布律 重力场中微粒按高度的分布·····	194
§ 4-9 能量按自由度均分定理·····	198
§ 4-10 理想气体的内能和摩尔热容·····	203
§ 4-11 分子运动论与热力学定律·····	209
第四章思考题·····	214
第四章习题·····	215
第五章 气体内的输运过程 ·····	220
§ 5-1 气体分子的平均自由程·····	220
§ 5-2 粘滞现象的宏观规律及其微观解释·····	226
§ 5-3 热传导现象的宏观规律及其微观解释·····	233
§ 5-4 扩散现象的宏观规律及其微观解释·····	235
§ 5-5 三种输运现象的讨论及理论与实验结果的比较·····	238
第五章思考题·····	242
第五章习题·····	243
第六章 实际气体 固体 液体 ·····	246
§ 6-1 范德瓦尔斯方程·····	246
§ 6-2 实际气体的内能 焦耳-汤姆逊效应·····	254
§ 6-3 晶体的宏观特征及微观结构·····	265
§ 6-4 晶体中粒子的结合力和结合能·····	273

§ 6-5 晶体中粒子的无规则运动 固体的热容和热膨胀·····	279
§ 6-6 液体的微观结构 液晶简介·····	286
§ 6-7 液体的表面张力·····	291
§ 6-8 弯曲液面下的附加压强·····	298
§ 6-9 毛细现象及毛细管公式·····	305
第六章思考题·····	309
第六章习题·····	310
第七章 相变 ·····	313
§ 7-1 相变的一般概念及一级相变的特点·····	313
§ 7-2 蒸发与沸腾 饱和蒸气压·····	315
§ 7-3 二氧化碳实验等温线 液气二相图·····	324
§ 7-4 范德瓦尔斯等温线·····	332
§ 7-5 克拉珀龙方程·····	337
§ 7-6 临界温度很低的气体的液化 低温·····	341
§ 7-7 固液相变·····	345
§ 7-8 固气相变 三相点·····	349
§ 7-9 实际物质的 p - V - T 曲面·····	352
* § 7-10 物质的第四态和第五态简介·····	355
第七章思考题·····	356
第七章习题·····	357
习题答案 ·····	359
附录 ·····	363
I. 本书主要物理量的国际单位制名称及代号·····	363
II. 热学常用单位换算·····	363
参考书目 ·····	365

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、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。宏观物体(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,宏观物体的热运动实质上就是组成这物体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。热学就是研究宏观物体热运动规律的学科,它是物理学的一个重要组成部分。

在各种实际的自然过程中,热运动与机械、电磁、化学等等其他的运动形态之间存在着广泛和深刻的内在联系。例如当炮弹、飞机等物体在空气中移动时,物体会变热,它周围的空气也会热起来。空气在传播声波时,其冷热程度将发生变化,这又会反过来影响声波的传播速度。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,在实际的自然过程中,热现象和其它现象往往是相伴而生的。特别值得指出的是,在实际过程中,经常

^① 在一般教材中,“热运动”一词有两种含义:一种是作为宏观物体的一种运动形态来使用的(如谈到宏观物体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体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。

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，构成了热学研究的一个重要的基本内容。

综上所述，热学是以物质的热运动以及热运动与其它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 热学的宏观理论和微观理论

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。宏观现象一般是指空间线度大于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 厘米、由大量微观粒子组成的系统整体以及场在大范围内所表现出来的现象，如气体的膨胀，物质的聚集态的转变等；微观现象一般是指空间线度小于 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 厘米的粒子（原子、分子和各种基本粒子）和场在极其微小的空间范围内所发生的现象，如单个分子的运动，分子间的碰撞等。描述宏观现象的物理量称为宏观量，如物体的温度、压强、热容量等；描述微观现象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，是从宏观物体的总体上来观察和考虑问题；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。这样，就形成了研

究热现象的两种方法和理论：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，研究宏观物体的热的性质，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，用统计的方法阐明宏观物体的热的性质。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，对于所得的结果往往知其然而不知其所以然。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。总之，热力学和统计物理学在对热现象的研究上是各具特色、相辅相成的。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，古人在生产和生活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

^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。

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, 认为万物都是土、水、火、气四种元素在数量上不同比例的配合。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)认为火和热本身就是摩擦和碰撞引起的, “但这就是运动”。

十七世纪以后, 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)

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

则从气体分子与器壁碰撞的概念导出了玻意耳定律。十八世纪四十年代，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。

十八世纪中叶以后，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。

十九世纪四十年代，德国医生迈尔(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，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和分子运动的联系,分子运动论得到飞跃的发展.很多学者先后在分子运动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)的工作为分子运动论奠定了基础.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).这些工作使气体分子运动论从一些定性的论据发展成一个系统的定量的理论.

在气体分子运动论的发展过程中,一个新的观念,即几率的考虑在物理学中出现了.人们逐渐认识到,任何试图测定每单个分子运动的企图是困难的和没有意义的,压强、温度等宏观性质都是大量分子杂乱运动的宏观表现,所以需要考虑的是这些分子运动的平均性质.在1870年以后,玻耳兹曼和麦克斯韦都提出了研究宏观平衡性质的几率统计法.1887年玻耳兹曼从几率概念出发,给予热力学第二定律以统计解释.这些工作为统计力学奠定了基础.1902年吉布斯(Joseph Willard Gibbs, 1839—1903)出版了他的统计力学著作,把玻耳兹曼和麦克斯韦所创立的统计方法推广而发展成为系统的理论,从而使热学上很多与平衡态有关的问题获得了普遍的解决.统计力学理论使热力学过程的不可逆性失去绝对的意义,它指出任何宏观平衡态都必然伴随着永不停息的微小涨落.这种涨落说明了布朗(Robert Brown, 1773—1858)在1827年发现的悬浮在液体中的超显微粒子持续的无规则运动(布朗运动),1904、1905年斯莫卢霍夫斯基(Smoluchowski, 1872—1917)和爱因斯坦(Albert Einstein, 1879—1955)提出和完成了关

于布朗运动的统计理论。

可见，气体分子运动论是统计力学的前身。这二者和涨落理论一起构成了统计物理学的三个组成部分。本教程不全面介绍统计物理学，只讨论分子运动论。

上世纪末、本世纪初，关于热容量理论和黑体辐射能谱分布规律的研究，揭示了经典统计物理学理论的重大缺陷，发现了微观运动的新的特性，1900年普朗克提出了能量量子化的假设。这种假设成功地解释了黑体辐射问题，并正确地解释了气体比热和固体比热随温度变化的规律。这一进展最终促使经典统计物理学发展成为量子统计物理学，有力地推动了固体、液体(统称为凝聚态)和等离子体中各种物理性质的研究。

本世纪五十年代以后，非平衡态热力学和统计物理学理论得到迅速发展。六十年代末，以比利时物理学家普利高津(I. Prigogine)为代表所创立的关于非平衡态系统自组织现象的理论，在物理学、化学、生物学、医学、生态演化、天体演化等领域内的应用，都取得了重大成功。但是相对于平衡态理论来讲，非平衡态理论还很不完善，有待继续研究和发展。

第一章 温 度

本章首先介绍如何从宏观角度描述一个热力学系统的平衡状态,进而研究如何根据热平衡关系给出热力学中的重要物理量——温度的定义,并以各种经验温标为例阐述温度测量的依据和标度方法,然后着重介绍理想气体温标。最后讨论如何根据实验定律导出表示理想气体宏观参量之间关系的理想气体状态方程,并说明理想气体状态方程的应用。

§1-1 平衡态 状态参量

一、热力学系统的平衡态

在研究物理现象时,人们通常只注意某一物体或物体系,并在想象中把这一物体或物体系同它周围的物体隔离,这一被确定为我们的研究对象的物体或物体系叫做系统。它的状态及其变化规律就是所要研究的内容。在系统外部,与系统的状态及其变化直接有关的一切叫做系统的外界。热力学研究的客体是由大量分子、原子组成的物体或物体系,研究的内容是这个系统的热性质及其热运动与机械运动等其他运动之间的转化,这样的系统称为热力学系统。一定的热力学系统,在一定的条件下总处于一定的状态。热力学所研究的是热力学系统的宏观状态及其变化规律。

平衡态是热力学系统宏观状态的一种最简单而又十分重要的特殊情形。所谓平衡态是指在不受外界影响的条件下,系统的所有可观测的宏观性质都不随时间变化的状态。这里所说的不受外界影响,是指外界对系统既不作功也不传热,但是并不要求系统不受外力的作用。只要外力不作功,对系统的热力学状态就没有影响(在同时不传热的条件下)。

举例来说,将一块烧红的铁投入一盆冷水中,铁将逐渐变冷,