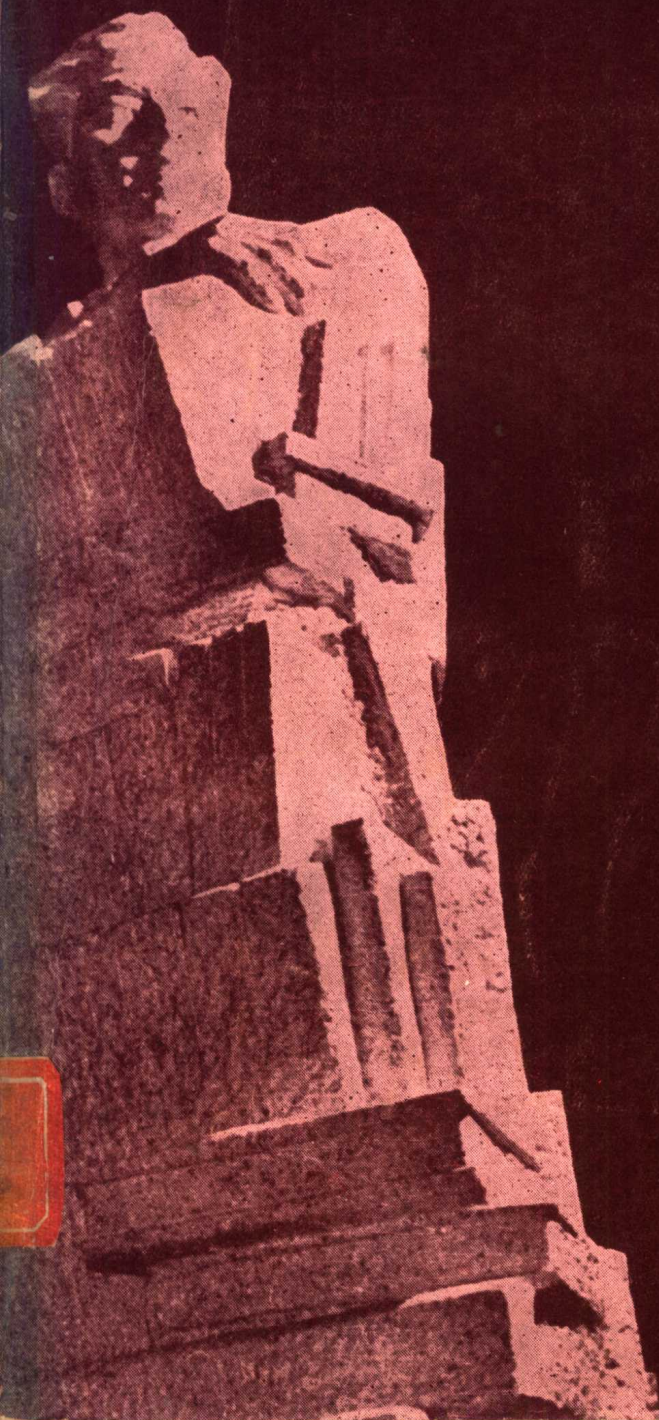


大学基础物理自学丛书

热学

吴必栋
斯颂乐 编



大学基础物理自学丛书

热学

吴必栋 斯颂乐 编

上海科学技术出版社

大学基础物理自学丛书

热 学

吴必栋 斯颂乐 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 12.25 字数 273,000

1983年8月第1版 1983年8月第1次印刷

印数 1—28,000

统一书号: 13119·1092 定价: (科四) 1.15 元

序 言

为了适应千百万未能进入高等院校的青年自学的需要,上海科学技术出版社在中学《数理化自学丛书》的基础上,又组织部分高等院校教师编写《大学基础数学自学丛书》、《大学基础物理自学丛书》和《大学基础化学自学丛书》。这是一件很有意义的工作。支持和鼓励广大在职青年坚持业余学习,让他们能够自学成才,是全社会的责任,也是我们高等学校教育工作者的义务,而为在职青年提供合适的自学读物,则是办好业余高等教育事业的一个组成部分。

《大学基础物理自学丛书》是由南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系的有关教师执笔编写的,其中力学(上、下册)由南京师范学院负责编写,热学由扬州师范学院负责编写,光学由安徽师范大学负责编写,电学(上、下册)和原子物理学由江苏师范学院负责编写。全书共七册,可供具有高中文化程度、立志于自学大学物理的广大读者使用。本书亦可作为全日制高等院校、各类职工大学以及电视大学学生学习普通物理学的参考读物。

“自学丛书”与普通的教材相比,应该具有便于自学,无师自通的特点。本书在编写过程中,尽可能注意到这一特点。在内容的安排上抓住物理学中主要的必不可少的部分讲细讲透,不追求形式上的深而全;文字的叙述力求做到口语化、通俗化;新概念的引入尽量让读者在已有中学物理知识的基础上,通过具体的物理现象和有关实验逐步深化;对于物理公式

的推导,在数学的严密性上不作过高的要求。只要读者在自学本书的同时能自学《大学基础数学自学丛书》,在数学工具上不会发生大的困难。本书每章之首有提要,每章之末有小结,例题和习题按章节编排,每章末附复习题。本书例题较多,这是考虑到读者在自学本书的同时,不必再去翻阅其他参考书的例题。习题多是为了能让读者有选择的余地,并不要求读者对每道题都详细解答。本书附有习题和复习题答案,供读者解题时参考。

本书学习顺序原则上按照力、热、电、光、原子物理的顺序进行,但每种书又各自成系统,读者可按需要独立地选读其中任何一种,也不会有大的困难。

业精于勤,只要读者下定决心,持之以恒地刻苦攻读,相信大家是一定可以自学好大学物理的。

本书编审过程中得到南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系许多教师的协助,在此一并致谢。

由于本书编写者水平所限以及出版时间的仓促,书中缺点和错误在所难免,希望读者多加指正。

朱 正 元

1981年4月于江苏师范学院

目 录

序言

绪论	1
----------	---

第一章 温度	9
--------------	---

§ 1.1 系统 平衡态 状态参量	9
-------------------------	---

§ 1.2 温度的概念	14
-------------------	----

§ 1.3 温度的测量 摄氏温标	18
------------------------	----

§ 1.4 常用温度计	22
-------------------	----

§ 1.5 理想气体温标	27
--------------------	----

第一章小结	32
-------------	----

复习题一	35
------------	----

第二章 理想气体及气体分子运动论	37
------------------------	----

§ 2.1 准静态过程	37
-------------------	----

§ 2.2 气体的实验定律	43
---------------------	----

§ 2.3 理想气体的状态方程	50
-----------------------	----

§ 2.4 理想气体的压强和温度的统计意义	57
-----------------------------	----

§ 2.5 能量按自由度均分定理	66
------------------------	----

§ 2.6 理想气体的内能 气体的摩尔热容量	71
------------------------------	----

第二章小结	75
-------------	----

复习题二	78
------------	----

第三章 分子运动的统计规律	81
---------------------	----

§ 3.1 气体分子速率的测定	81
-----------------------	----

§ 3.2 统计分布律和分布曲线	85
------------------------	----

§ 3.3 麦克斯韦速率分布律	87
-----------------------	----

§ 3.4 气体分子的玻耳兹曼分布律——气体分子在重力 场中按位能的分布	95
---	----

§ 2.5 阿伏伽德罗常数 N_A 的测定	99
第三章小结	101
复习题三	102
第四章 气体内的输运过程	105
§ 4.1 气体分子的碰撞频率和平均自由程	105
§ 4.2 输运过程	111
§ 4.3 低压下气体的性质	123
§ 4.4 真空的获得和测定	128
第四章小结	136
复习题四	138
第五章 热力学第一定律	140
§ 5.1 能量转化和守恒定律	140
§ 5.2 准静态过程中系统所作的功	143
§ 5.3 内能	151
§ 5.4 热量	154
§ 5.5 热力学第一定律	156
§ 5.6 热容量 焓	162
§ 5.7 热力学第一定律对理想气体的应用	173
第五章小结	187
复习题五	192
第六章 热力学第二定律	197
§ 6.1 热机效率	197
§ 6.2 自发过程的单向性——热力学第二定律的实验基础	209
§ 6.3 热力学第二定律	213
§ 6.4 产生自发过程单向性的原因 热力学第二定律的统计意义	215
§ 6.5 卡诺定理	223
§ 6.6 热力学温标	226
§ 6.7 熵 热力学第二定律的数学表达式	230
第六章小结	245

复习题六	248
第七章 实际气体和范德瓦耳斯方程	252
§ 7.1 实际气体的实验等温线	253
§ 7.2 分子间的相互作用力	255
§ 7.3 实际气体的状态方程——范德瓦耳斯方程	256
§ 7.4 范德瓦耳斯等温线	264
§ 7.5 实际气体的临界状态	265
§ 7.6 实际气体的内能 焦耳-汤姆孙效应	270
第七章小结	276
复习题七	277
第八章 固体的性质	279
§ 8.1 固体的宏观特征	279
§ 8.2 晶体的微观结构	282
§ 8.3 晶体的结合力和结合能	286
§ 8.4 固体的摩尔热容量	291
§ 8.5 固体的热膨胀和热应力	294
第八章小结	302
复习题八	303
第九章 液体的表面性质	305
§ 9.1 液体的表面张力现象和表面张力	305
§ 9.2 液体的微观结构 表面张力的实质	312
§ 9.3 弯曲液面下的附加压强	317
§ 9.4 液体和固体接触处的现象	324
§ 9.5 毛细现象	329
第九章小结	334
复习题九	336
第十章 物态变化	339
§ 10.1 物质三态的相互转变	339
§ 10.2 蒸发	341
§ 10.3 饱和蒸汽与饱和蒸汽压	342

§ 10.4 沸腾	347
§ 10.5 汽化热	354
§ 10.6 气-液二相图 克拉珀龙方程	356
§ 10.7 气体的液化 低温的获得	361
§ 10.8 熔解与凝固	363
§ 10.9 升华 三相点	369
第十章小结	372
复习题十	375
附录 一、几个积分的计算	378
二、习题答案	380

绪 论

一、热学的研究对象和研究方法

自然界中与冷热有关的现象到处可见。例如，任意两个物体互相摩擦就会发热，冷热程度不同的两个物体相互接触之后就会发生热量(能量)的传递，随着冷热程度的变化，物体的长度和体积都要发生变化，如果限制物体的长度和体积的变化，则物体内部就要出现应力，这种应力称为热应力，随着冷热程度的变化，物质所处的聚集态(气态、液态和固态)就要发生变化，等等。凡是与冷热程度有关的现象统称为热现象。用来表征物体冷热程度的物理量称为温度。因此，可以说，凡是与温度有关的一切现象都是我们研究的任务。自然界中的热现象形形色色，变化万千，似乎使人眼花缭乱了，摸不着头绪。然而，只要仔细地观察，深入地研究，我们就会发现，它们的变化都遵循着一定的规律，各种现象之间存在着一定的联系。例如，当温度不同的两个物体相互接触以后，热量只能自动地从温度较高的物体向温度较低的物体传递；又如由于温度的变化会引起物体长度和体积的变化，其变化的数值与物体原来长度或体积的大小、温度变化的多少之间存在着一定的数量关系，当温度发生变化时，如果限制物体长度或体积的变化，那么在物体内部就会产生热应力，其数值和材料的性质、温度变化的多少等因素之间也存在着一定的数量关系。掌握这种规律以后，在实际问题中我们就可以采取各种预防措施，以避免由此而造成的破坏和损失，甚至于可以使它变为有

利的因素为我们的生产建设服务。

为什么自然界中会出现形形色色的热现象呢？从微观角度看，这是由于组成物质的分子在各种各样的相互作用下，处于永不停息的热运动的结果。在中学里我们就已知道：(1)一切宏观物体都是由大量的分子(或原子等)组成的，分子之间存在着一定的间隙；(2)分子处于永不停息和“杂乱无章”的运动之中，这种运动称为分子热运动；(3)分子间存在着相互作用力(包括分子与分子间的相互排斥力和相互吸引力)。

由于分子在不停的热运动，分子与分子之间不断地产生碰撞，这就使得分子有向四面八方散开的趋势，由于分子间在一定的条件下存在着相互吸引作用，这就使得分子之间又有相互聚集的趋势。事实上，正是这两个相互对立的作用，构成了物质热性质以及热现象变化规律的内部依据。

分子热运动与机械运动和电磁运动一样，也是自然界中物质运动的基本形态之一。对于个别分子而言，由于它受到周围其他分子的作用是复杂的，这些作用又随时在变化，因此个别分子的运动就变得很难捉摸。但是，对于由大量分子组成的系统而言，在一定的条件下(如质量和温度一定)大量分子热运动的集体表现却遵守一定的规律，即统计规律。

分子热运动和机械运动、电磁运动等都是物质的基本运动形态，它们彼此之间存在着密切的联系，在一定的条件下可以相互转化。例如，在摩擦生热的过程中，就实现了机械运动向热运动的转化。燃料在内燃机气缸内燃烧时，产生高温高压气体，通过活塞作功而产生机械运动，这就实现了热运动向机械运动转化；电流通过线圈或电阻丝时，线圈和电阻丝都将发热，这就实现了电磁运动向热运动的转化；等等。

总之，一切热现象的产生和变化，从微观角度来看，都是

与分子热运动以及和各种运动形态的互相转化紧密联系的。

热学是研究自然界中热现象的一门科学。它研究的对象是有关热现象的规律、应用以及它们的微观本质。热学的研究方法有下述两种。

(1) 热力学方法：它不考虑物质的微观结构，而以从大量的实践中总结出来的有关热现象的最普遍的宏观规律为基础，由能量转化与守恒的观点出发，研究物质的状态以及在状态变化过程中一些有关的宏观物理量之间的关系。由这种方法建立起来的有关热现象的理论称为热力学。热力学是热现象的宏观理论。

由热力学方法所得到的结论，具有很大的普遍性与可靠性。但是，由于它不涉及物质的微观结构，所以对热现象的本质就无法了解，因而对一些热现象，例如比热随温度的变化、布朗运动等，都无法作出解释。

(2) 分子物理学方法：它是从物质微观结构出发并对它作一些模型性的假设，然后运用求统计平均的方法来研究描述宏观性质的物理量与描述分子运动的微观量之间的联系，从而揭露热现象的本质。由这种方法建立起来的有关热现象的理论称为分子物理学。分子物理学是热现象的微观理论。

由分子物理学方法所得到的结论，不仅使我们能对热现象及其规律的本质有更深刻的理解，而且对热力学无法解释的比热随温度的变化、布朗运动等问题，也能给出令人满意的解释。这样就弥补了热力学的不足。但是由于它一开始就要考虑到物质的微观结构，并提出一些假设模型，所以它得出的结论有一定程度的近似性和局限性。

从上面的讨论中可以看出，热力学方法和分子物理学方法在研究热现象的过程中是相互联系，相辅相成的。

二、热力学的发展简史

热力学理论萌芽于十八世纪末,建立于十九世纪中期。在这之前虽然人们对热现象也积累了不少知识,对热现象的本质也曾提出一些假设,但是直到十八世纪末,热学还没有作为一门系统的科学建立起来。主要原因是在十八世纪以前生产发展缓慢,到了十八世纪初,人类社会发展到了一个重要的时期,这就是资本主义的兴起,当时由于海外贸易的迅速发展,市场的进一步扩大,工场手工业的生产已不敷需要,这就促使生产技术革命。随着简单机械的应用,接踵而来的就是需要解决动力来源这一关键问题。由于利用自然动力(如水力、风力)的机械受着自然条件的限制,因此蒸汽机的发明便成为势在必行,而瓦特改良的蒸汽机也就成为时代的骄子。正是由于生产实践中需要解决动力来源这样一个实际问题,才迫使人们千方百计地希望制造出一种能持续工作,而又不需任何动力或燃料的机器,这种机器就是永动机。然而,长期的实践证明,制造永动机只能是一个幻想,在实践中是无法实现的!于是,在1775年人们才得出一个结论:永动机是造不成的。这就为热力学第一定律的建立积累了实践经验。

另外,由于生产技术的发展,在十八世纪初建立了系统的计温学和量热学,从此有关热现象的研究和探讨,进入了实验科学的阶段。随着实验科学的蓬勃发展,气体的经验定律一个接着一个的发现,从而大大地促进了热学的发展,为了探求热现象的本质,英国物理学家布莱克提出了系统的“热质说”。所谓热质说,就是认为热是一种没有重量,不可称量,不生不灭,存在于一切物质之中的可以流动的特殊物质。由于热质说可以解释一些热现象,例如,热质论者认为物体的冷热是由于它含热质的多少来决定的,热传导是热质象流水一样从高

(温)到低(温)的流动,而太阳光通过透镜聚焦生热,也是由于热质的集中所造成的;等等。此外,更重要的是由于这一观点符合当时在哲学思想领域中占统治地位的形而上学的思想体系,因此统治了上百年。但是,因为它不能解释某些热现象(如摩擦生热等等),所以即使在当时也没有得到科学界的普遍承认。最初直接用实验事实驳斥热质论的是伦福德(O.Rumford),他发现在用钻头钻大炮炮筒时,钻头和金属都很快发热,后来戴维(H.Davy)做了将两块冰在真空中相互摩擦使其溶解的实验,从而进一步说明热只能是运动的一种表现,它是外界做功的结果,1841年迈耶(J. R. Mayer)提出“热必须当作力来看”(当时所说的力是指“能”而言),并且指出这种“力”在数量上是守恒的,在性质上具有可转化的特性,他利用熟知的公式

$$C_p - C_v = R$$

计算了热功当量,这样热质说彻底破产了,能量转化与守恒定律开始形成了。与迈耶同时,焦耳(J.P.Joule)经过二十多年的工作,采用了多种方法,作了热功当量的测定,其结果都是一致的,最后于1850年写出了总结性的论文,这就给能量转化与守恒定律,即热力学第一定律提供了可靠的实验根据,使能量转化与守恒定律成为物理学界公认的一条定律。热力学第一定律是自然界中普遍规律之一,它的发现不仅推进了整个物理学的发展,而且奠定了辩证唯物论的基础。

理论和实践都证明了永动机是制造不成的。但是为了适应生产的发展,需要迅速解决更有效地利用动力的问题,人们转而研究如何提高热机效率问题。十九世纪的头二十年,不少工程师和科学家对这一课题进行了认真的研究。在这一理论工作的研究中颇有成效的是法国青年工程师卡诺(S. Car-

not), 他在 1824 年发表了关于热机效率的卡诺定理, 这不仅解决了提高热机效率的问题, 重要的是奠定了热力学第二定律的基础。后来克劳修斯(R. Clausius)和开耳文(L. Kelvin)根据卡诺定理先后于 1850 年和 1851 年各自独立地建立了热力学第二定律。这个定律反映了自然界中自发过程进行的方向问题, 它与热力学第一定律连同能斯脱(W. Nernst)于 1912 年从化学反应中总结出来的热力学第三定律一起组成了一个完整的热力学理论。上世纪五十年代之后, 热力学的进一步发展主要是在于将前两个基本定律应用到各种具体问题中去, 并且在新的实践中找到了反映物质的各种性质的热力学函数, 使得热力学理论更加趋于完善。

其次, 我们再来介绍分子物理学的发展简况。关于热现象的本质的认识可以追溯到远古, 在古希腊, 对于热的本质和物质的结构就有两种不同的看法。亚里士多德等认为地球上的万物都是由可以相互转变的火、气、水、土四种元素组成的。另一种看法是德膜克利特提出的, 他认为热是物质运动的一种表现, 而一切物质都是由不可分割的硬粒子(称为原子)组成的。在纪元前 300 年左右我国驺衍也创立了五行说, 认为水、火、木、金、土是万物的根本。这些认识都只是停留在对物质结构的臆测阶段。

后来, 由于生产技术和科学的发展, 对热现象及其本质的研究有了新的发展, 1658 年伽森第(P. Gassendi)提出了物质是由分子组成的, 假设分子是硬粒子, 能向各个方向运动, 并且进一步解释了物质的固、液、气三种聚集态。1678 年胡克(R. Hooke)提出了同样的主张, 他认识到气体的压强是由于气体分子与器壁相碰撞的结果。1738 年伯努利(D. Bernoulli)发展了这一学说, 并且从气体分子与器壁碰撞的概念导

出了玻意耳定律。1774~1748年罗蒙诺索夫(Ломоносов)明确提出了热是分子运动的表现,成功地解释了一些热现象。1808年道尔顿(Dalton)应用物质的原子概念,解释了化学上的定比定律和倍比定律。1826年布朗运动的发现,使人们对物质结构的认识有了进一步发展。1857年克劳修斯发表了有实验依据的气体分子运动论,在这个基础上麦克斯韦(J. C. Maxwell),玻耳兹曼(L. Boltzmann)等人建立了初步的统计物理理论。1902年吉布斯(J. W. Gibbs)发表了他的名著《统计力学基本原理》,他把麦克斯韦、玻耳兹曼所创立的统计物理理论推广而发展成为系统的理论。至此,统计物理才被建立起来。随着科学技术的发展,1924~1926年又在量子论的基础上建立了量子统计法,这就使统计物理的理论更加完善了。

统计物理学包含三个部分:分子运动论、统计热力学和涨落理论。本书只讨论关于分子运动论的一些基本概念、基本规律,并用分子运动论的观点去揭露有关热现象的微观本质。

