



全国高等师范专科学校教材

11

热 学

主 编 俞维诚

洪伟

华东师范大学出版社



全国高等师范专科学校教材

热学

主 审 徐文柳

主 编 俞维诚

编写成员 (按姓氏笔划为序)

王生贵 俞维诚

胡一飞 詹佑邦

华东师范大学出版社

(沪)新登字第201号

沈云林 4250737

曾怀林 5557815

钟南清

李冠武 4250132

4250133

邓鸣皋 4250159

王应德

4250646

全国高等师范专科学校教材

热学

俞维诚 主编

055-43

华东师范大学出版社出版

(上海中山北路3663号)

新华书店上海发行所发行 张家港市印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 12 字数: 300千字

1991年3月第一版

1995年2月第四次印刷

印数: 13,001-16,000本

ISBN7-5617-0652-0/N·050

定价: 8.10元

出版说明

党的十一届三中全会以来,师范专科教育有了很大的发展,但是,作为师专教学三大基本建设之一的师专教材建设,却始终没有得到很好的解决。近几年来,有的地区和学校为了改变这种状况,也零星地编写了一些师专教材,可是,不成套,有的学科甚至编写了几种,质量参差不齐。虽对师专无教材的局面有了部分改变,但终因没有一套全国统一的、高质量的教材而影响了师专的教学质量。

为了进一步发挥师专的办学效益,彻底改变师专没有适合自己特色的教材局面,国家教委师范司在1987年制订了《二年制师范专科学校八个专业教学计划》;继之又约请了全国有教学经验的专家、教授编写了这八个专业的《教学大纲》;1988年7月在长春又召开了全国二年制师专教材编写出版规划会议,会上研究制订了《1988~1990年二年制师专八个专业教材编写出版规划》。八个专业是:中文、历史、政治教育、数学、物理、化学、生物和地理。

在国家教委师范司的统一部署、各省市自治区教委、高教局的大力帮助和出版社的积极组织下,这套教材聘请了一些长期从事师专教学工作,具有丰富的教学实践经验和较高学术水平的教授或副教授担任各科主编。各科教材由学术造诣比较深、熟悉师专教学情况的专家负责主审。各位主编根据国家教委师范司拟定的《关于编写二年制师专教材的指导思想和基本原则》及各科《教学大纲》的精神,组织编者收集资料,综合研究,争取编出一套具有师专自身特色的教材,以适应师专教育的迫切需要。

现在,在各方面的大力支持下,经过主编、主审和各位编写人员的努力和辛勤劳动,这套教材将陆续面世。我们热忱地欢迎师

专的广大师生使用它,并在使用过程中,多提宝贵意见,使之不断完善,不断提高,以保持与当代科学和师专教育实践的同步发展。

1990年1月

前 言

教材建设是高等学校教学工作的基本建设之一。组织编写和出版适合高等师范专科学校特点的教材，对高等师专教育的发展将起重要的作用。为高等师专的物理专业学生学习普通物理而编写的《热学》教材的出版，是一件值得庆贺的事情。本书是由四位长期从事高等师专教学工作、具有丰富的教学实践经验和较高学术水平的教师，根据教学大纲的要求和学生的具体情况，收集资料，综合研究，精心编写而成的，既切合师专的实际，又具有一定的特色。

本书结合教学内容，在绪论和有关章节中适当介绍物理学史的内容，这对学生了解热学这一分支学科的概念、定理、定律的形成和发展，进而掌握教学内容，是很有帮助的，在使学生形成辩证唯物主义世界观、了解有关热学的前沿发展概况和研究课题方面，也会起很好的促进作用。这是本书的特色之一。

本书考虑到高等师范专科教育的特点，根据教学大纲的要求，突出基本概念和基本规律的阐述，并适当编排了例题，以提高学生的运算能力。除此以外，为了让学有余力的学生扩大知识面，以小字体形式对某些问题作了比较深入的探讨，在各章末尾还附有阅读材料，供学生选择参阅。这是本教材的另一特色。

当然，本书也不是完美无缺的，对有些问题的讨论，似还可进一步深化，某些概念的引入和概念之间的衔接也有待于进一步完善。但总的说来，本书仍不失为符合师专特点的一本较好的教材，希望本书出版以后，通过高等师范专科学校师生们的实践，能不断地加以改进、充实和提高，使之更加切合高等师专的实际，成为一本高质量、高水平的教材。

徐文柳 1990年5月

目 录

绪论	1
§0.1 热学的研究对象和研究方法	1
§0.2 热学的形成和发展	5
第一章 热学的基本概念	11
§1.1 热力学平衡态	11
§1.2 温度和温标	13
§1.3 热和热的测量	21
§1.4 热传递	26
§1.5 理想气体状态方程	32
阅读材料	
几种常用的温度计	39
本章小结	41
思考题一	43
习题一	44
第二章 热力学第一定律	47
§2.1 热力学过程	47
§2.2 准静态过程的功	50
§2.3 系统的内能	53
§2.4 热力学第一定律	55
§2.5 理想气体的内能、热容和焓	60
§2.6 理想气体的等值过程	65
§2.7 理想气体的绝热过程	69
§2.8 循环过程 卡诺循环	75
§2.9 热机	83
§2.10 致冷机	91
阅读材料	
多方过程	96
本章小结	99

思考题二	101
习题二	105
第三章 热力学第二定律	110
§3.1 热力学第二定律	110
§3.2 实际宏观过程的不可逆性	114
§3.3 卡诺定理	120
§3.4 热力学温标	124
§3.5 熵	127
§3.6 熵增加原理	132
阅读材料	
一、热力学第二定律与能源的开发利用	138
二、热力学第三定律	140
本章小结	141
思考题三	144
习题三	146
第四章 分子运动的统计规律	149
§4.1 分子运动论的基本观点	149
§4.2 理想气体的压强公式	156
§4.3 温度的微观解释	162
§4.4 麦克斯韦速率分布律	164
§4.5 玻耳兹曼分布律 重力场中微粒按高度的分布	176
§4.6 能量按自由度均分定理	178
§4.7 理想气体的内能和热容	184
§4.8 热力学第二定律的统计意义	189
阅读材料	
一、统计概念与统计规律	194
二、负热力学温度	199
本章小结	201
思考题四	204
习题四	205
第五章 气体内的输运过程	209

§5.1 气体分子的平均自由程	210
§5.2 粘滞现象的宏观规律及其微观解释	215
§5.3 扩散现象和热传导现象	221
阅读材料	
一、低压气体的热传导和粘滞现象	228
二、真空的获得和测量	229
本章小结	234
思考题五	235
习题五	236
第六章 实际气体	238
§6.1 实际气体的实验等温线 物质的临界状态	238
§6.2 范德瓦耳斯方程	245
§6.3 范德瓦耳斯等温线	251
§6.4 实际气体的内能 焦耳-汤姆逊效应	256
阅读材料	
一、范德瓦耳斯气体的焦耳-汤姆逊效应	261
二、气体的液化和低温的获得	264
本章小结	267
思考题六	269
习题六	270
第七章 固体和液体	272
§7.1 固体和液体的状态变化	272
§7.2 晶体的宏观特性和微观结构	280
§7.3 晶体中粒子的结合力	286
§7.4 晶体中粒子的热运动 固体的热容	291
§7.5 液体的微观结构 溶液中的运输过程	295
§7.6 液体的表面现象	301
阅读材料	
一、水的反常膨胀	314
二、液晶和超导体简介	315
本章小结	318

思考题七	321
习题七	323
第八章 相变	325
§8.1 相变的一般概念	325
§8.2 蒸发与沸腾 饱和蒸气压	328
§8.3 汽化曲线 克拉珀龙方程	339
§8.4 固液相变 熔解曲线	343
§8.5 固气相变 三相图	347
§8.6 大气中的含水	351
阅读材料	
一、云、雨、雪、雹的形成及人工控制	355
二、物质的第四态与第五态简介	357
本章小结	359
思考题八	361
习题八	362
附录一 本书用到的主要物理量的名称、符号及单位	365
附录二 常用物理常数	366
附录三 热学常用单位换算	368
参考书目	363
后记	369

绪 论

§0.1 热学的研究对象和研究方法

(一) 热学的研究对象

热学和力学一样，都是物理学的重要组成部分。力学的研究对象是物体的机械运动所遵循的客观规律；热学的研究对象是热现象的规律，也就是物质的热运动和热运动与其他运动形态之间相互转化所遵循的客观规律。

什么是热现象与热运动呢？

众所周知，适当的冷热程度是人类生存的最基本条件之一。实践表明，用一定的方法（如传热或做功）可以使物体的冷热程度发生变化；而当物体的冷热程度发生变化时，物体的大小、状态和许多物理性质也将随着发生变化。例如，一般物体受热膨胀，遇冷收缩；水冷到一定程度要结冰，水热到一定程度要沸腾而变成水蒸气；钢件经过淬火后变硬；导体受热后电阻增大；等等。我们把物体冷热程度的变化以及与冷热程度有关的物理性质和状态的变化统称为热现象。物体的冷热程度常用温度这一物理量来表征。因此，也可以说凡是与温度有关的物理现象都称为热现象。我们周围的物质世界，无时无刻不在发生着各种各样的变化，热现象是其中最普遍的现象之一，而它和其他各种变化又常常是互相联系着的。例如，最简单的物体位置的变化（机械运动），就常伴随着出现摩擦生热的现象。

人们通过对热现象和其他现象的深入研究，逐步认识到宏观物体是由大量微观粒子（分子、原子或离子）组成的，这些粒子时刻在作各种不同类型的无规则运动，大量微观粒子这种永不停息的

无规则运动称为热运动。宏观上观察到的热现象正是组成物体的大量微观粒子热运动的结果。可以说，热运动是热现象的微观本质，热现象是微观粒子热运动的宏观表现。就单个粒子来讲，它的运动属于机械运动，服从力学的基本规律，但是由于它时刻要受到周围大量的其他粒子的复杂作用(如碰撞)，因此，其具体的运动过程是千变万化的，具有极大的随机性。然而，大量粒子的随机运动在总体上却可以显示出某种确定的规律。例如，当温度一定时，虽然气体分子的速度大小和方向各个不同，时时在变，但在总体上气体分子却具有和温度对应的确定的平均动能；而且温度越高，分子热运动对应的平均动能也越大。显然，粒子无规则运动的平均动能越大，其无规则运动就越剧烈。因此，物体宏观上温度的高低可以作为组成物体的大量微观粒子无规则热运动的剧烈程度的标志。由此可见，大量粒子的热运动虽然包含着机械运动，但是却不能归结为机械运动。它所引起的物质在宏观上的运动(如温度、压强的变化，物态的变化，扩散和传热等)，是物质的另一种基本运动形态，遵循着另一种新的基本规律。这些规律是热学要研究的重要内容之一。

上面我们曾经提到，热现象往往与其他现象相伴而生，这反映了热运动与其他运动形态之间的密切联系，在一定条件下它们可以相互转化。例如，在空中高速飞行的炮弹因受到空气的阻力而逐渐减速，与此同时，炮弹和飞行路径上空气的温度升高，机械运动转化成了热运动；又如，当电流通过导体时会因有电阻而发热，于是电磁运动转化成了热运动。与上述例子相反，在一定条件下热运动也可以转化成机械运动、电磁运动或其他形态的运动。例如，一台运行之中的内燃机，它不断地消耗燃料燃烧生成的热，同时不断地对外输出机械功，实现了热运动向机械运动的转化。又如，把两种不同的金属(如铜和康铜)导线的两端分别连接起来，组成一个简单的热电偶(如图 0.1.1 所示)，把热电偶的一端置于一杯热水中，另一端置于空气中，这时将发现回路中有电流通过，与

此同时杯中热水的温度将逐渐降低，出现了热运动向电磁运动转化的过程。这就是所谓的温差电现象。热运动与其他运动形态之间的相互转化遵循着一定的规律，这些规律是热学要研究的另一重要内容。

总之，热现象是一个十分普遍的物理现象，热学就是研究热现象规律的一门科学。热学理论在计温、量热、热机的研制，在化学、冶金、气象等学科的研究，在高温、高压、超高真空、超低温等特殊环境条件的创造等生产和科技方面都有重要的应用；而且热学知识也是学习物理学的其他部分和其他学科的基础；因此学好热学有着十分重要的意义。

(二) 热学的研究方法

在热学中，通常把所研究的宏观物体或物体系称为热力学系统，简称为系统。热学的任务就是通过对热力学系统的状态及状态变化的分析研究，来寻求热现象的规律。

一个热力学系统的状态，可以从宏观和微观两种观点加以描述。

从宏观看，热力学系统是连续分布的物质。系统的宏观状态可以用一些由实验直接观测的宏观量来描述。如一定质量的某种气体的状态，可以用体积、压强、温度、密度等宏观可观测量来描述。这就是热力学系统的所谓宏观描述。

从微观看，热力学系统是由大量的处于不停地运动之中的微观粒子组成的体系。每个微观粒子的状态都可用它的空间坐标、速度、动能、动量等微观量来描述。显然，如果组成系统的所有的微观粒子在某一时刻的状态都给出了，那也就是给出了系统在该时刻的状态的全面描述。对热力学系统状态的这种描述方法称为微观描述。由于一个热力学系统所包含的微观粒子的数目非常多（如一摩尔气体中包含有 6.022×10^{23} 个气体分子），要确定所有

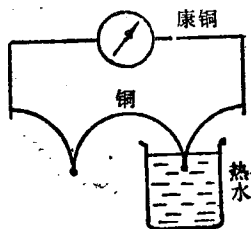


图 0.1.1 热运动向电磁运动转化的例子——温差电现象

粒子的状态就非常困难。然而,由于热现象是一种宏观现象,是组成系统的大量微观粒子热运动的集体表现和平均效果,所以,描述系统状态的宏观量,总是描述这些微观粒子状态的某些微观量的统计平均值。例如,气体对器壁的宏观压强,实质上是大量气体分子在热运动中对器壁不断碰撞的平均结果,其数值等于大量气体分子在单位时间内与单位面积器壁的碰撞中施于器壁的总冲量的平均值(见§4.2)。因此,在对系统的微观描述中,我们所关心的不是个别粒子的行为以及描述它的微观量的具体数值,而是系统所包含的大量微观粒子热运动的总效果,以及描述它们的微观量的统计平均值。

随着对热力学系统状态描述的观点不同,对热现象规律的研究也就有了两种不同的方法,并相应形成了两种不同的理论——热力学和统计物理学。

(1) 热力学方法。它基于对热力学系统状态的宏观描述。在研究中,它不考虑系统内部物质的微观结构,只是根据由观察和实验所总结出来的热力学定律,结合具体现象中的经验规律,用严密的逻辑推理方法解决问题。热力学是热现象的宏观理论,它具有高度的可靠性和普遍性,这是热力学方法的最主要优点。但是,由于热力学理论不涉及物质的微观结构,因此对具体物质所表现出来的某些与其微观结构有关的特性(如物态方程),以及由微观运动导致的涨落现象,热力学方法就显得无能为力,得不出应有的结论,这是热力学方法的局限性。

(2) 统计物理学方法。它基于对热力学系统的微观描述。在研究中,它从热力学系统是由大量的分子、原子等微观粒子所组成,而这些微观粒子相互间存在着十分复杂的联系,都在永不停息地作无规则的运动这一事实出发,并以热现象是大量微观粒子热运动的宏观表现,宏观量是变化万端的微观量的统计平均值这一深刻的认识为基础,依据每个微观粒子所遵循的力学规律,用统计的方法研究宏观物体的热性质。统计物理学是热现象的微观理

论,本书所介绍的分子运动论是统计物理学中重要的基础部分。由于统计物理学以物质的微观结构为基础,因此它深入到热现象的本质,解决了热力学所不能解决的一些与物质结构有关的问题。但是,由于物质微观结构的复杂性,在对微观量求统计平均值时,只能以一定的简化模型为基础,因此统计物理学的结论都是近似的,它的正确性必须由实验以及它与宏观理论相符合的程度来决定。这说明统计物理学方法同样具有局限性。

总之,热力学方法与统计物理学方法分别基于对热力学系统的宏观描述和微观描述,具有不同的特点,在探索热现象的规律中起着相辅相成的作用。

§0.2 热学的形成和发展

热学作为一门研究热现象规律的科学,其形成和发展是建立在人类利用热现象的基础之上的。

在远古时代,人类就已经从自然界中发现了火,并逐渐知道可以用火来取暖、照明、烧烤食物;以后又发展到用火烧制陶器、冶炼金属等。火的广泛应用以及人类生活环境冷热的四季变化,使人们初步认识了一些热现象。由于生活与生产劳动的需要,人们希望更广泛更有效地利用热现象,这就促使人们去进一步探索热现象的规律,研究热现象的本质。

在我国古代和古希腊,对热现象和物质结构就有两种对立的看法。一种看法以所谓的五行(水、火、木、金、土)、阴阳和四元素(土、水、火、气)等学说为代表,认为万物是由五行或四元素组成,热现象是基本要素“火”与其他要素相生相赅的表现;或者认为万物是阴阳二气化成的,而火是阳气的一种表现。另一种看法认为热是物质的一种运动的表现形态,而一切物质都是由不可分割的硬粒子(即原子)组成。14世纪之前,世界各国都处于奴隶社会和封建社会时期,由于生产力水平低下,热现象的应用还不够广泛,

加上受到神权思想的束缚，人们对热现象的认识长期停留于上述臆测和空论阶段。

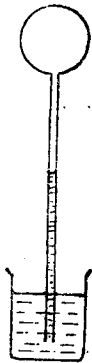


图 0.2.1 伽利略于 1593 年制成的世界上第一个验温器

14 世纪到 16 世纪，资本主义开始在欧洲萌芽发展，生产力的解放和发展一方面为自然科学积累了许多知识，另一方面也向自然科学提出了许多新课题。在这种时代条件下，欧洲出现了反对封建神学，借助古希腊、古罗马文化的文艺复兴运动。这个运动冲破神权统治，唤起人们的自信，推动人们去探索、创新。于是，力学、光学、天文学、生理学等近代自然科学理论相继诞生，涌现了许多著名的科学家。生产的需要和科学的发展要求能够定量地测定物体的温度。1593 年，伽利略把一端开口另一端连有玻璃泡的细长玻璃管倒插在水中，利用空气的热膨胀制成了世界上第一个验温器(见图 0.2.1)，它是以后温度计发展的基础。伽利略的验温器虽然可以粗略地比较不同的温度，但因受到大气压

的影响而不能较准确地测量温度，因此在改进之前它不能作为研究热现象的有效的实验仪器。17 世纪之前，由于缺乏必要的实验基础，对热现象的研究一直未能形成一门系统的科学。

18 世纪以后，资本主义在欧洲得到了广泛的发展。大生产迫切希望解决生产的动力问题，于是产生了把热转变为机械功的愿望。这个愿望于 1705 年首先由英国的铁匠纽科门实现。他制作了一种叫做“大气蒸汽机”的发动机，并用于矿井提水。但是，纽科门的蒸汽机效率极低，且要用人工来开关蒸汽通路，因此实用性很差。1764 年，徒工出身的英国机械师詹姆士·瓦特(1736~1819)在纽科门大气蒸汽机的基础上，经改进制成了往复式蒸汽机。这种蒸汽机于 1785 年后的工业革命中被广泛地作为纺织等大生产的动力。蒸汽机的出现和后来的广泛应用以及在生产中遇到的大量与热现象有关的问题，促使人们对水、水蒸气和其他物质的热性

质，对热现象的规律和本质以及热功转换的效率等进行广泛的研究。1724年，德国物理学家华伦海特(1686~1736)改良了水银温度计，并确立了以冰与盐水的混合温度为零度，以人体血液温度为100度的华氏温标，从而使温度测量有了精确的量具和共同的标准。1761年法国气体化学家布拉克(1728~1799)引入比热、熔解热、汽化热等概念，后来又设计了量热器对它们进行测量。华伦海脱和布拉克等人的工作为系统的计温学和量热学的建立打下了基础。从此以后，热现象的研究走上了实验科学的道路而得到迅速的发展，逐渐形成了一门系统的科学——热学。

在关于热的本质的研究和争论中，热学理论得到了发展。18世纪初，出现了把热看成是一种没有质量、能够流动的物质的理论，即所谓的“热质说”。由于“热质说”根据热质守恒的假设成功地说明了有关热传导和量热学的一些实验结果，因此在整个18世纪十分流行，占有统治的地位。“热质说”的致命弱点是不能解释摩擦生热现象。历史上第一个用实验驳斥“热质说”的是德国物理学家本杰明·汤普森，即伦福德伯爵(1753~1814)。1798年，他用钝钢钻钻炮筒，虽然没钻下什么碎屑，但是却有大量的热产生而使大量的冷水沸腾。他认为，热既然可以在摩擦中不断产生，就只能是一种运动，而不可能是一种物质。第二年，伦福德的看法得到了英国化学家戴维(1778~1829)的支持，他把两块冰互相摩擦，而使冰融化成水。这些结果用“热质说”是无法解释的。伦福德与戴维的工作当时在物理学界并未引起广泛注意，原因是还未找到机械功与热之间的数量关系。

1842年德国医生迈尔(1814~1878)在一篇论文中提出了能量守恒的理论，认为热是能量的一种形式，可以与机械能互相转化，并且首次从空气的定压比热容与定容比热容之差算出了热的功当量。但是，用实验方法准确测定热功当量，因而奠定能量守恒定律基础的，却要归功于英国物理学家焦耳(1818~1889)。从1840年起，焦耳花了几十年时间，用各种不同方法测定热功当量，都得