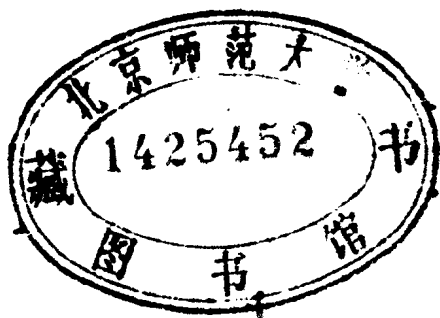


高等学校教学参考书

热 学 研 究

吴瑞贤 章立源 编著

7月1/231/05



四川大学出版社

1987年

内 容 简 介

本书系作者在四川大学、北京大学物理系多年的教学经验及教学研究的基础上编著而成。

全书共八章，包括温度、热力学第一定律、热力学第二定律、气体分子运动论的基本方程、气体分子速度及能量分布律、气体内的输运过程和涨落等，本书针对教学中的重点、难点进行了深入细致的分析讨论。全书概念清楚，重点突出，书中收入了一些最新观点，而且在不少章节中都有编著者的研究结果，形成本书的独到之处和特点。

本书可供理工科大学和师范院校基础物理教师及学生参考；对报考研究生的学生也有一定的参考价值。

热 学 研 究

吴瑞贤 章立源 编著

*

四川大学出版社出版

(四川大学校内)

四川省新华书店发行 成都市盲哑学校印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：12 字数：250千字

1987年4月第一版 1987年4月第一次印刷

印数：0001—3000册

统一书号：13404·12 定价：1.60元

前 言

本书是我们在北京大学和四川大学物理系多年教学实践及教学研究的基础上，在学术刊物及全国、省、市学术会议上发表的论文的基础上编写而成。

本书针对基础课教师经常关心和讨论的热学问题，针对学生学习中普遍存在的疑难问题，针对热学课的重点和难点，进行了深入细致的分析讨论。本书对一般热学书中未推导的定律作了推导，对一些重要公式，还介绍了几种不同的推导方法。本书在阐述热学概念和规律时，介绍了发展历史和科学家的贡献，希望从中体现物理规律的发现和发展的思维过程，从中领会科学研究及处理问题的方法，对于学生物理思维方法和解决问题能力的培养无疑是有益的。本书结合内容介绍一些联系实际的新成就和热学前沿，以利于学生开拓视野。本书可供学生学习及报考研究生时参考。本书也可作基础物理教材教法专业研究生的教学参考书。

总之，作者期望本书能对学生学《热学》时起到指导的作用；对报考研究生的学生起到辅导复习的作用；对攻读基础物理教材教法的研究生起到参考书的作用；对从事基础课教学的教师起到提供参考资料的作用；对中学物理教师的进修起到指导帮助作用；对广大科技工作者起到参考的作用。

我们在编写过程中得到北京大学、四川大学物理系许多教师的关心和帮助，在此表示感谢。

由于作者水平有限，编写时间又仓促，有不妥之处，诚恳希望广大教师和读者提出批评指正。

编 著 者
1986年7月

目 录

绪 论	(1)
-----	-------

第一章 温 度	(7)
---------	-------

§ 1 热力学系统 平衡态 状态参量	(7)
--------------------	-------

§ 2 热力学第零定律	(11)
-------------	--------

§ 3 温度 温标	(12)
-----------	--------

第二章 热力学第一定律	(22)
-------------	--------

§ 1 功 内能 热量	(22)
-------------	--------

§ 2 热力学第一定律	(38)
-------------	--------

§ 3 理想气体的各种基本过程间的关系	(41)
---------------------	--------

§ 4 理想气体 p — V 图中的线性过程	(56)
----------------------------	--------

§ 5 范德瓦尔斯气体的内能公式	(66)
------------------	--------

§ 6 范德瓦尔斯气体的各种过程	(69)
------------------	--------

§ 7 范德瓦尔斯气体在过程中的能量转换	(75)
----------------------	--------

第三章 热力学第二定律	(83)
-------------	--------

§ 1 热力学第二定律的几种表述	(83)
------------------	--------

§ 2 常见的三种不可逆过程的等效性	(87)
--------------------	--------

§ 3 热机及卡诺热机的效率 致冷机的致冷 系数	(93)
-----------------------------	--------

§ 4 卡诺定理的一些证明	(111)
---------------	---------

§ 5 关于建立热力学温标的一些问题	(117)
--------------------	---------

§ 6	态函数熵 $T-S$ 图	(126)
§ 7	熵增加原理	(137)
§ 8	回热式致冷机原理	(145)
§ 9	Pomeranchuk 致冷	(147)
第四章	气体分子运动论的基本方程	(150)
§ 1	理想气体压强公式的各种推导及压强的实质	(150)
§ 2	温度公式及温度的实质 基本方程的一些推论	(170)
§ 3	气体分子的各种模型及势能曲线	(175)
第五章	气体分子速度及能量分布律	(181)
§ 1	麦克斯韦速度分布律的推导	(181)
§ 2	麦克斯韦速度分布、速度分量分布及速率分布间的关系	(189)
§ 3	麦克斯韦速率分布律的性质及应用	(198)
§ 4	分布函数	(216)
§ 5	究竟是在原点附近还是在 v_p 附近分子出现的几率最大	(220)
§ 6	究竟是在 $\varepsilon(v_p) = kT$ 附近还是在 $\varepsilon_p = \frac{1}{2}kT$ 附近分子出现的几率大	(223)
§ 7	分子射线中的分子速率分布函数	(229)
§ 8	波尔兹曼分布律	(237)
§ 9	能量均分定理的简单推导	(247)
第六章	气体内的输运过程	(255)

§ 1	气体分子的平均自由程.....	(255)
§ 2	输运过程的宏观规律的共同特征.....	(265)
§ 3	输运过程的微观解释 推导输运系数的 一些方法.....	(271)
§ 4	究竟是分子总数的 $\frac{1}{4}$ 还是 $\frac{1}{6}$ 输运.....	(292)

第七章 相 变.....(295)

§ 1	相变 相变潜热.....	(297)
§ 2	克拉珀龙—克劳修斯方程.....	(302)
§ 3	气液相变.....	(310)
§ 4	固液相变 固气相变.....	(332)
§ 5	三相图.....	(335)
§ 6	物质的五种聚集态.....	(344)

第八章 涨 落.....(349)

§ 1	围绕统计平均值的涨落.....	(349)
§ 2	布朗运动.....	(354)
§ 3	涨落对仪器灵敏度的影响.....	(358)
§ 4	气体中的密度涨落 光的散射.....	(360)
§ 5	临界乳光现象.....	(365)
§ 6	热噪声 噪声温度计.....	(367)

参考文献(370)

绪 论

一、《热学》课程的任务、特点

热现象的理论分两个部分，一部分是研究宏观理论的热力学，第二部分是研究微观理论的统计物理学，其中的气体分子运动论发展得较早，这是普通物理学的《热学》中讲授得较多的部分。《热学》课程的目的，总的来说有三方面。

一是使学生掌握物质热运动形态的规律性，掌握热运动与机械运动、电磁运动等其它基本运动形式之间转化的规律性。

二是在讲授上述物理内容的基础上，使学生对下述问题的认识及思考能力有所提高。这些问题是：统计规律性与统计方法，对物质微观结构模型的认识及从能量转化观点分析问题的方法。第三方面是对物性方面（包括相变）之认识。

热力学部分是《热学》课程的一个重点，它根据热力学第零定律，第一、第二及第三定律作演绎的推理，解释物质在平衡态的性质。这部分理论具有普遍性、高度可靠性，但它不涉及从物质的分子、原子结构出发来研究问题。《热学》课的另一部分，则是通过气体分子运动论，掌握由大量粒子所组成的系统所具有的统计规律性。在诸如理想气体、麦克斯韦速率分布、输运现象、以及固体比热等问题上都提出了微观模型及统计规律。学生在接受这些问题时遇到不少困难。这可能有三方面原因，一是与力学相比，这里涉及的是物质结构的微观模型，而力学则是针对物体在一定条件下的宏观问题提出的宏观模型，对前者的认识难度大；另一个原因是由于象质点、刚体等概念，学生在中学时早已接受下来，所

以在大学学力学时并不显得陌生；第三个原因是《热学》作为一个学科来讲，对近代物理的早期发展占有特殊地位。例如，能量按自由度均分定理应用于热辐射问题上的失败，在低温条件下杜龙—珀替定律的失效，这就导致了普朗克提出量子概念，而爱因斯坦将此用于固体比热问题取得了开创性结果。这些科学上曾经发生的重大变革不可能不在学生学习《热学》课的实践中反映出来，既引导学生以深思，又在其逐步认识的过程中引起困惑。可以说，在大学学习阶段第一次使物理模型及统计规律性显得突出的课程就是《热学》。

《热学》中提出的某些模型，既然是物质结构的微观模型，那么在模型本身的一些内容上就会有统计性质，对模型进行处理计算的方法又是统计方法，这些都是学生所不熟悉的，而相应的思维训练对于一个物理学工作者显然是十分重要的。

上述《热学》课的特点使它在物理教学计划中占有特殊地位，它与高年级的《固体物理》课有些相似，但《热学》课所涉及的面更为广泛，它又属于低年级讲授的、为学生打好基础的课程。所以教好这门课对于给低年级大学生打好良好的基础及活跃物理思维能力是很重要的。

二、关于《热学》中的重点之一——热力学部分

我们主张在讲述这一部分内容时，首先还是“源源本本”地讲热力学，然后注意与气体分子运动论的统计观点相互呼应。这个呼应的目的是为了发挥这两者相互补充的特点，而不是以某一个代替另一个。在这种讲授方法下，学生既能对分子运动论与热力学两者的特点分别牢固地掌握，又能对两者间互补的关系有所体会。

在讲授热力学第一定律时，我们认为要突出三个方面，

一是热质说的否定与能量转化和守恒定律的建立；二是态函数内能；三是热量的科学定义。而从不同角度分析焦耳实验工作是讲清楚这三个方面的关键。

大家知道，焦耳以大量确凿的科学实验为基础，推翻了热质守恒说，即不存在什么单独守恒的热质，而是热与机械能、电能一起存在守恒关系。务使学生理解能量概念及其建立。能量转化守恒定律是以定量规律的形式表示了各种物质运动形式转化时的性质，指出了各种物质运动形式的公共量度——能量，它在形式转化时守恒。它与在《力学》中学生学过的有关概念相比，在认识上发生了飞跃。

在讲授这个重大定律时无疑应同时贯彻辩证唯物主义教育。我们认为要把这点和讲授的具体内容有机地结合起来，要让学生具体地了解一点科学发展过程。这对培养学生认识世界的能力是有益的。

为了使热力学第一定律能定量地发挥作用，引入态函数内能是重要的。又是由于焦耳实验，它以无可辩驳的实验基础为引入态函数内能铺平了道路。

在建立了态函数内能以后，根据能量转化和守恒自然写出热力学第一定律的数学表述。于是可按喀喇氏方法给热量下一个科学的定义，这就完全摆脱了热质说的影响。应该指出，喀喇氏关于绝热过程的定义，恰恰是对焦耳所作的大量实验的条件的科学抽象，它是从实际出发的科学概括而绝不是什么“烦琐哲学”。

通过以上的讲授，我们可以看到焦耳实验的作用。它否定了热质说；建立了能量守恒；确立了态函数内能；为给热量下一个科学定义铺平了道路。应该看到，在整个这个讲授

中，从不同的角度向学生分析焦耳实验的意义，不仅直接关系到学生对热力学第一定律理解的深度，它也训练学生对一个重大的科学实验进行反复地分析、思考的能力，这会使学生对于物理实验在物理学发展中的重要性有具体体会，有助于学生树立正确的认识论。这些无疑是符合《热学》课程性质的。

热力学第二定律是关于内能与其它形式能量相互转化的、独立于热力学第一定律的特殊转化规律。以认识这一特殊转化规律为契机，人们认识了不可逆过程的概念，自然界中的不可逆过程都是互相关联的，由某一过程的不可逆性可推断另一过程的不可逆性。人们对自然界的认识在这里又是一个飞跃。

在《热学》课中，还应通过可能讲到的热力学第二定律的应用问题，使学生领会到热力学第二定律的意义。如果没有这一环节，学生对热力学第二定律的体会往往较空泛。正是热力学第二定律，对提高热机效率指出了方向（对制冷机也如此）；正是由于热力学第二定律，使人们建立了与测温物质性质无关的热力学温标；应用卡诺定理还提供了一些不同物性之间关联的普遍关系式，这是热力学第二定律在解决实际问题中起的另一重要作用。

当然，《热学》中主要是使学生掌握基本定律和基本概念，而不涉及使用过多数学工具（如偏微商、全微分条件）去应用热力学定律于各个方面，也不讲系统的理论计算方法。

三、学生难点之一，对统计规律性的认识

通过气体分子运动论，掌握大量粒子所组成的系统具有

统计规律性，对于认识物质运动形式的一般特点而言，这恰是《热学》这门学科最本质的要点之一，也是教学中的难点。在现行的一般教科书中是通过理想气体压强公式的推导、范德瓦尔斯气体压强、速率分布以及气体输运过程等内容，引导学生逐步认识统计规律性的特点。

以推导理想气体压强公式为例，至少有下列几点要启发学生深入思考，以加深对统计规律性及统计方法的认识。

(1) 气体施于器壁的压强是大量气体分子对器壁不断碰撞的平均效果；

(2) 分子速度分布的概念；

(3) 完全弹性碰撞作为统计等效假设；

(4) 宏观短、微观长的时间间隔内平均，(dt)；

(5) 宏观小、微观大的面积上平均，(ds)；

(6) 柱体方法是一种统计方法，(即在计算速度为 v_i 的分子中，在时间 dt 内，能与 ds 相碰的分子数时所引用的柱体方法)；

(7) 求平均值的方法，(加权平均)；

(8) 压强公式表征三个统计平均量之间的相互联系的统计规律。

这样，在讲理想气体压强公式时，通过讲授分析以及课程讨论，使学生对统计概念有初步认识，接着在讲平衡态下气体分子速率的统计分布时，要再次着重强调统计规律是对大量偶然事件的整体起作用的规律，统计分布律是对大量偶然事件而言的分布规律。

当继续讲气体输运过程的微观解释时，学生的认识又有所深化。输运过程在宏观上表现为某物理量的单向输运，从

微观上看，则是相应的微观物理量通过某一面 (ds) 作不等价交换的结果。粘滞现象是分子间定向运动动量不等价交换的结果；热传导是分子间热运动动能不等价交换的结果。这种不等价交换取决于两个因素：一是参加输运的分子数，另一个是每个分子所携带的微观量的平均值，后者与分子碰撞有明显关联。因此，宜引导学生从分子间碰撞对宏观量的作用这个角度，全面回顾一下理想气体模型、范德瓦尔斯气体模型以及麦克斯韦速率分布律。

由于学科的发展、科技水平的提高以及中学、大学教学实践的发展，因而，课程设置及课程内容不可能一成不变，需要在百花齐放、百家争鸣的方针下不断推陈出新。事实上，近二十年来，国外（如苏联、美国等）出版的相当于普通物理水平的力学、热学等教材均有相当变化。当前我国有些高中已讲授初等微积分，在力学讲授及习题内容上均有不小提高。五十年代教学大纲已面临非改不可的形势。在热学方面，由于液体、固体微观理论日益发展，低温、高压等技术之进步以及诸如液晶、量子流体等新现象不断涌现，加以热力学又日益向分支方向深入发展、渗透而形成技术科学（如热力工程、低温工程），这必然要促使《热学》这门课程内容上的推陈和更新，使之更加适应变化了的科学、技术的新局面。

第一章 温 度

§1 热力学系统 平衡态 状态参量

一、热力学系统

热学的研究对象是由大量微观粒子组成的系统。所谓系统是指把我们所研究的对象从周围环境中区分出来，被研究的对象称为系统。它的状态及其变化规律就是我们要研究的内容。在系统外部与系统发生相互作用的其他物体称为外界。凡是着重研究热力学性质及热运动与其他运动形态转化规律的系统称为热力学系统。根据系统与外界相互作用的情况可以分为：

(1) 孤立系统：与外界无任何相互作用（即无功、热转换）的系统。

(2) 绝热系统：与外界有功的交换而无热量传递的系统。

(3) 透热系统：与外界无功的交换，而有热量传递的系统。

(4) 一般系统：与外界有功的交换，也有热量传递的系统。

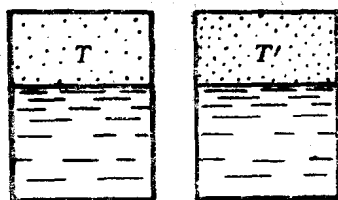
二、平衡态

系统的客观状态可分为平衡态和非平衡态。在没有外界影响的条件下宏观性质不随时间改变的状态称为平衡态。否

测，称为非平衡态。由于平衡态是热力学系统宏观状态的重要的特殊情形，因而必须对它作以下几点说明。

“没有外界影响”，是指外界对系统既不作功又不传热，也没有电磁作用、化学反应作用。总之，与外界没有发生能量交换。这是必不可少的条件，如果外界要对系统做功或传热，那就是有外界影响，系统就不再是处于平衡态了。如果一个物体系统在有外界影响下，即使各部分的宏观性质长时间不发生变化，也不是平衡态，这种在外界影响下达到稳定不变的状态称为稳定态。例如，一端浸在沸水另一端浸在冰水中的金属杆。当沸水与冰的温度维持不变时，杆上各处的温度虽然不同，但不随时间改变。这个金属杆是否处于平衡呢？若金属杆左端与沸水接触右端与冰接触，就有热量从左端传到右端，就有热传导。系统（杆）受到外界的影响，故金属杆不处于平衡态。

当外界条件不变时，已经处于平衡态的物体可以长时间处于此状态；当外界条件改变时，状态也相应变化，但经过一定时间后又达到新的平衡态。例如，在密封容器内装有一定的液体。液体蒸发，经过一定时间后达到饱和状态，蒸发停止。也就是说，系统处于平衡态。若将外界条件改变，例如对容器加热，则平衡受到破坏，温度升高。加热后，温度升高到另一温度，达到新的



(a) 加热前 (b) 加热后

图 1—1 平衡状态

平衡态，即为新的饱和状态，如图 1—1 所示。

“宏观性质不随时间改变”，并不是说宏观性质处处相同。至于宏观性质是否各处相同，这要看具体的情况而定。

当无外力场或是有外力场但可忽略不计时，处于平衡态下的均匀系统（如均匀的气体、液体或固体）的各种宏观性质不但不随时间改变，而且各处相同；处于平衡态下的非均匀系统（如图 1—1 中水与水蒸汽所组成的系统）的各种宏观性质不随时间改变，但并不一定各处相同。非均匀系统的一些宏观性质各处相同，另一些则不一定各处相同，但是可将非均匀系统分为很多均匀部分，每一部分的宏观性质则处处相同。当有外力场（如重力场）的作用时，处于平衡态的系统的一些宏观性质则各处不同。例如，在重力场下气体在不同高度处的压强和密度都不相同。

实际情况不会有完全不受外界影响而宏观性质永远保持不变的系统，所以平衡态是一个理想的概念，是外界条件变化很慢时的近似。以后我们将会看到很多实际问题可以近似作为平衡态处理。因而研究平衡态问题不仅具有理论的意义而且具有现实的意义。

处于平衡态时，系统的宏观性质虽然不随时间改变，但组成物质的分子却是在永远不停的作无规则的运动，只是大量分子运动的统计平均效果不变，因此，从微观角度来看，在不停地变动，而从宏观角度来看，宏观性质（如温度、压强等）不变。所以，热力学的平衡状态是一种动的平衡，称为热动平衡，简称热平衡。如上面讲的密封容器的例子，它在一定的外界条件（温度一定）时达到饱和状态（平衡态）。实际上，液体分子在不断地蒸发，汽态分子在不断地凝结，达到饱和状态时，逸出液面的分子数与进入液体的分子数大致

相等。

平衡是相对的，因此，平衡态的概念也不是绝对的。由于分子是在作无规则的热运动，所以虽然处在平衡态下，但系统的宏观性质的数值仍会发生偏离统计平均值的或大或小的涨落。例如，处于平衡态下的气体的压强和温度值均有一些涨落。

必须指出，处于平衡态的物体必须满足一定的平衡条件：力学平衡条件（在无力场时表现为系统内部各处压强相等），热力学平衡条件（温度相等），相平衡条件（若无相变的情形，则不考虑）；化学平衡条件（本书只讨论无化学反应的情形，也可不考虑）。因此，对于外力场作用可忽略的一定质量的气体而言，必须各处的压强 p ，温度 T 相等时才是平衡态。可见，平衡态与热平衡是有区别的，平衡态必定温度相等，必然处于热平衡，但热平衡时只是温度相等，压强 p 不一定相等，不一定为平衡态。

三、状态参量

描述平衡态性质的物理量称为状态参量。不同情形时选用不同的状态参量来描写状态。

对于一定质量的纯气体，用压强 p 和体积 V 两个参量就能确定系统的状态，因而状态参量是压强 p 和体积 V 。例如，气缸中装有一定质量的纯气体，若固定体积加热时则压强增大，若保持恒定的压强加热时则体积膨胀。这就表明气体的压强和体积是可以独立改变的。压强 p 属于力学参量，体积 V 属于几何参量。

对于混合气体，除了压强、体积外还要引入反映各化学成分的化学参量：各组成成分的质量或摩尔数。