

高等学校教学用书·理论物理基础系列教程

7

热力学与统计力学

〔日〕户田盛和著
王云程译
赵振业校

北京师范大学出版社

高等学校教学用书

理论物理基础系列教程

第七册

热力学与统计力学

〔日〕户田盛和 著

王云程 译

赵振业 校

北京师范大学出版社

高等学校教学用书
理论物理基础系列教程

第七册

热力学与统计力学

(日)户田盛和 著

王云程 译

赵振业 校

北京师范大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
北京昌平展望厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.75 字数: 167千

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数: 1—2 200

ISBN7-303-00433-5/O·94

定价: 1.70 元

原 序

物理学是理工科学生必不可少的基础课之一。因为理工科任何专业的基础必然与物理学有密切关系。理工科学生要想在学习专业课之后，再自学物理学，很难获得令人满意的结果。就是说，必须在大学一、二年级扎扎实实地掌握物理学的基础知识。

这样，最重要的就是同学们要有积极的学习热情。同时，需要有一本向学生们传授物理学知识、指导学生学习方法的入门书。这套《理论物理基础系列教程》正是为了起到以上作用而编辑的，这套书的编辑方针与以往教科书有很大差别。

力学和电磁学是所有与物理学有关的重要学科的基础。因此，大部分学校要在低年级学完此课程。但象流体力学则可以作为选修课开设，也可以由同学们自学。另外，还需要有大学二年级学历能够阅读的、内容充实的量子力学和相对论等教材。

编者基于这种观点，选择了物理学的基础课，编写了《理论物理基础系列教程》，这套丛书共10册，包括《力学》、《分析力学》、《电磁学》（上、下）、《量子力学》（上、下）、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》及《物理用数学》等八个科目。所有这些科目不全是（日本）大学一、二年级的课程，但各科目可以各自独立学习，力争做到大学一年或二年级的学生能够读懂。

在物理学教材中，往往有很多公式和现象，在期末考试之前，学生们常常要死记硬背，这不但掌握不了物理现象的本质，反而产生厌恶情绪。我们对这套教程的读者所应考虑的最重要问题，不是死记公式和现象，而是学会掌握事物本质的能力。

物理学相信一切事物都源于少数基本事实，而它们又遵循少数基本定律，物理学求得这些定律。这些明确的基本事实和定律

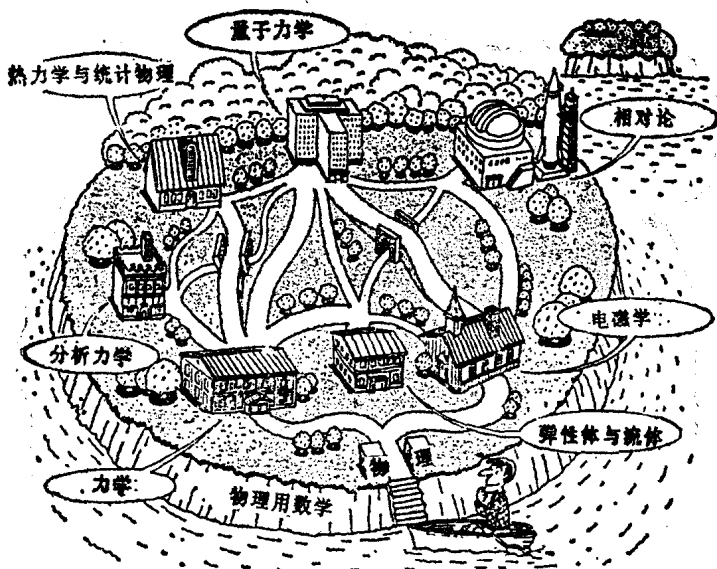
一定有助于同学们理解,在彻底理解的基础上,同学们通过自己亲身的努力去摸索事物的本质,这就是所谓的“物理学的思考方法”。

不仅限于物理学,科学的每个领域,都要探求事物的本质,但由于物理学发展的比较早,基础部分成熟,可以看做一个典型例子。因此,掌握“物理学的思考方法”的能力,不仅对于将来钻研物理学的同学们,而且对于钻研其它领域的同学都应该说是大有好处的。

在日常生活中,我们经常无意识地使用象时间、空间、力、压强、热量、温度、光等这样的物理学基本概念,物理学对这些日常使用的概念又重新给予了严格的定义,并与基本规律联系起来,物理学这样繁杂也是同学们厌烦的原因之一。但是,如果想根据基本事实和规律探索事物的本质,即使是日常感知的事物,也有必要详细弄清其实验的根据,重新明确与基本规律的关系,何况还涉及到超过我们日常体验的领域。例如,处理原子内部问题时,甚至有必要提出似乎与常识和直观相矛盾的新概念。因为物理学根据实验和观测不断扩大我们的经验世界,所以与其这样,倒不如改变常识和直观更有必要。

正如这样,用“物理学的思考方法”考虑事物,决不是很容易的事情。但是,如果采用正确的方法,是有可能掌握的。本教程的撰稿者们力求做到精选内容,所选的素材力争讲述通俗易懂,便于掌握。希望读者们和作者一起探求事物的本质。这样一来,自然而然地就能够学会“物理学的思考方法”。各卷篇幅都不大,不需要其它参考书就能读懂,但决不是简单的物理学摘要。希望读者认真阅读。

如上所述,因为各科目基本上可以独立阅读,所以根据需要,从哪个科目开始阅读都可以。但是,作为基本联系,可用图解的形式来表示各科的相互关系。



从图的前面向里延伸的宽路，表示传统的路线，窄路则表示做为相关联的学科，可以共同阅读。例如，《弹性体与流体》是集中了现代风格的弹性力学和流体力学的，但与《电磁学》中的场的概念相关联。而作为场的经典理论，又可以与《相对论》加以对比，这一卷的波动部分，对于《量子力学》的理解也有帮助。另外，每卷都广泛涉及到数学，如不脱离物理学本身，同时阅读《物理用数学》是大有益处的。在整理这套《理论物理基础系列教程》之际，编者阅读了全卷的原稿，也请执笔者提出了各种要求，再三改稿。另外，不断采用了执笔者们的相互意见和岩波书店编辑部所提出的见解。今后在听取读者意见的同时，将进一步加以修正。

编者 户田盛和
中嶋贞雄
1982年 8 月

译者序

这套《理论物理基础系列教程》是根据日本岩波书店1982—1984年出版的《物理入门コース》（物理学入门教程）翻译而成。原教程的主编者是户田盛和与中嶋贞雄。本书在日本颇受欢迎，在全套书出齐之前，先出的几本已经重印了三、四次。中译本根据我国习惯，⁽¹⁾定名为《理论物理基础系列教程》。

这套《系列教程》共十本，计有《力学》、《分析力学》、《电磁学》（上下）、《量子力学》（上下）、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》和《物理用数学》。各册篇幅不大，自成体系，而十本合起来又构成一个完整的整体。本书的起点相当低，有我国工科一年物理课基础的读者即可学习。但其达到的深度并不低，大体上只略低于我国综合性大学的理论物理各课的大纲要求，而在广度上则广于后者，并含有较多新鲜内容。

本书富有日本教材所独有的风格和特点：选材精炼；讲解简练而明快又不失科学性；系统经过精心安排，组织周密，突出重点，深入浅出。⁽²⁾在引导读者逐步掌握正确概念方面有其独到之处，书中不乏精辟的论述和精采简捷的推导与证明，在不知不觉之中把读者带到较难较深的境界。本书是我国高等学校理论物理各课较好的教学参考书，师范院校和成人教育院校可以直接采用作为课本。本书也是中学教师进修、工程技术人员知识更新和知识青年自学的理想读物。

本书的翻译工作由喀兴林、王锡绂、梁绍荣和任萍四人组成工作小组负责，他们担任组织译校、联系出版、保证译文质量和其它各项事务工作。本书的译校人员以北京师范大学和东北师范大学的人员为主，他们大多数都具有高级职称及多年的日文经

历。翻译工作以忠于原作为原则。

由于我们学识有限，加之译校人员众多，译文中容或有不当之处或彼此不甚统一之处，敬请各界读者指正，以便再版时修改。

喀兴林

1988年6月

前 言

使用火就和人类历史一样是远古时代的事情，从那时以来，对于热或温度无疑是人类特别关心的事情。可是，因为近在身边而不出奇的缘故，关于热的学问最早开始反而落后了。渐渐进入了19世纪，到这时除力学外物理学的分支没有别的，所以，继力学之后，最早的物理学分支就是热学了。继力学、热学之后电磁学被完成了。到19世纪末，渐渐物理学的体系被形成了。

把热学的基础归纳为热力学，它不仅在物理学中，而且在化学、生物学、医学，或者在地球物理学等的地球科学，在天文学等的宇宙科学，以及种种工程部门中具有广泛的应用，另外，在能量、资源、环境的问题中的重要性一定会越发增加的。因而，无论向哪个方面深入，作为热力学的核心部分的常识，都有熟知的必要。

由于这个理由，在本书中把热力学放在开头，其重要的地方非常仔细地叙述，作为总体将简洁地解决。

随着关于物质知识的深化，分子论发展了。以分子论研究热现象为基础产生了统计力学，这是本书后半部分的论题。

本书是如下构成的：

(1) 关于温度和热的经验事实——第一章

(2) 热力学—— $\begin{cases} \text{第二章} & \text{热力学第一定律} \\ \text{第三章} & \text{热力学第二定律} \end{cases}$

(3) 由分子而引起的气体性质的说明——第四章

(4) 统计力学—— $\begin{cases} \text{第五章} & \text{气体的统计力学} \\ \text{第六章} & \text{一般体系的统计力学} \end{cases}$

(5) 量子体系——第七章和第八章

(1) 是为(2)作准备的，(3)是为(4)作准备的。

但因为各章包含有各自独立的论题和研究方法，所以为了独立的阅读，多少总有点重复的叙述。

关于第二章、第三章的热力学是从两个定律导出的热现象之间的普遍关系的学问体系，作为物理学中的理论体系它具有独特的完美性，是在宏观立场上建立的学说。与此相反，第五章、第六章的统计力学是在分子论的立场上建立的理论体系。在这个立场上可以证明出与热力学同样的热现象之间的普遍关系。可是，因为还必须对物质的分子构造作出假定，统计力学才能具体地导出物质的热性质，所以在这点上与热力学在普遍关系的理论上有很大的区别。

在本书中热力学的独特研究方法得到了充分的反映，在前半部分没有引入分子论的研究方法，与后半部分的统计力学之间存在清楚的界限。同样，在统计力学部分完全可以不参照前半部分的叙述内容。

在研究气体的分子运动的第四章和第五章，以及论述统计力学的一般方法的第六章中假定分子的运动是用牛顿力学描述的。可是，分子或原子的运动，严格说来，必须用量子力学来研究。通常在多数情况下，普通气体或固体也可以近似用牛顿力学来研究。

在第七章中，从量子力学的立场上对统计力学的一般方法进行了修正，很显然，在第六章中论述统计力学的普遍方法移到量子力学中也不会引起特别大的变化。而且与牛顿力学相比，在量子力学的情况下，统计力学的普遍理论变得简单了。在本书中首先根据牛顿力学导出统计力学，这不过是为了对没有学过量子力学的读者给以照顾。

在量子力学中两个同种粒子碰撞时，把各个粒子的轨迹加以区分并进行追踪，这是不可能的。这正是量子力学和牛顿力学本质上不同的一点。对同种粒子组成的体系的研究在第八章中，作为

量子统计加以叙述的。对于金属或半导体中的电子的行为根据量子统计作了初步的理解，但在本书中仅仅涉及到量子统计的基础部分为止，为了深入理解物质的构造和性质的学问，预期本书可以起到作为出发点的作用。

本书在执笔时，丛书的作者诚恳地公推中岛贞雄为首。另外承蒙岩波书店编辑部的诸位，特别是片山宏海先生的热情关照，在此表示衷心的感谢。

户田盛和

1983年10月

理论物理基础系列教程
(共10册)

- 1 力 学
- 2 分析力学
- 3 电 磁 学 (上)
- 4 电 磁 学 (下)
- 5 量子力学 (上)
- 6 量子力学 (下)
- 7 热力学与统计力学
- 8 弹性体与流体
- 9 相 对 论
- 10 物理用数学

目 录

第一章 温度和热	(1)
§ 1-1 经验温度	(1)
§ 1-2 气体定律	(3)
§ 1-3 实际气体	(6)
§ 1-4 热量	(8)
§ 1-5 热和功	(11)
第二章 热力学第一定律	(13)
§ 2-1 能量守恒	(13)
§ 2-2 准静态变化	(15)
§ 2-3 比热	(23)
§ 2-4 气体的内能	(26)
§ 2-5 理想气体的绝热变化	(29)
第三章 热力学第二定律	(33)
§ 3-1 热机	(33)
§ 3-2 不可逆现象	(36)
§ 3-3 热力学第二定律	(38)
§ 3-4 可逆热机的效率和绝对温度	(40)
§ 3-5 熵	(47)
§ 3-6 熵增加定理	(52)
§ 3-7 热力学关系式的例子	(59)
第四章 气体和分子	(65)
§ 4-1 气体的压强	(65)
§ 4-2 理想气体的分子运动和温度	(70)
§ 4-3 气体的比热	(73)
§ 4-4 气体的凝结	(80)
第五章 气体分子的概率分布	(88)

§ 5-1	分子的分布	(88)
§ 5-2	斯特林公式	(94)
§ 5-3	最大概率分布	(96)
§ 5-4	分子的速度	(103)
§ 5-5	麦克斯韦分布	(107)
§ 5-6	有重力时气体的分布	(111)
§ 5-7	位相空间	(114)
第六章 经典力学体系		(117)
§ 6-1	分子论的(微观的)状态	(117)
§ 6-2	给定温度的体系	(123)
§ 6-3	给定温度的经典体系	(129)
§ 6-4	能量均分定理	(131)
§ 6-5	配分函数	(136)
§ 6-6	压强	(140)
§ 6-7	熵	(147)
§ 6-8	力学与概率	(150)
第七章 量子体系		(156)
§ 7-1	量子态	(156)
§ 7-2	量子体系	(160)
§ 7-3	固体的比热	(164)
§ 7-4	压强和熵	(168)
第八章 量子理想气体		(172)
§ 8-1	热辐射	(172)
§ 8-2	由同类粒子构成的体系	(176)
§ 8-3	量子统计	(182)
习题略解		(190)

第一章 温度和热

我们用温度表示所谓冷或热的感觉，而且，加热一个冷的物体，就会使其变热。这样来理解温度或热认为是容易的，况且象汽油机之类的热机又是与我们日常生活密切相关的。可是，当研究温度究竟是什么，热究竟又是什么的时候，就必须从本质上来研究热象现了。首先，从容易理解的气体的性质谈起，观察并整理有关温度和热的基本知识。

§ 1-1 经验温度

如同力和光曾经是从筋肉的感觉和眼睛的感觉出发一样，以物理学作为对象的温度概念，也必然是从冷的、热的感觉出发的。可是，人的感觉是不确切的，和别人进行比较也是困难的。因此，有必要制造一种能够确切比较某个物体比其它物体热或者冷的测温装置，即温度计。

例如，为测定水的温度，把水银温度计放入水中，水银的高度变化，即可成为一定的温标表示。这时，水和温度计具有同样的温度，故水的温度可以由温度计表示出来。

水银温度计是利用了水银体积随温度变化而变化，即热膨胀的性质。酒精或煤油温度计也同样利用了这个性质。热敏温度计、热电偶温度计是利用由于温度变化而变化的电学性质。

制造温度计时，通常取水和冰共存的温度（冰点）为 0 度，设在一个大气压下水沸腾的温度（水的沸点）为 100 度（如今后所述，现在还有以绝对温度为标准的国际规定温标）。在水银温

度计上定出0度和100度的刻度，在玻璃管上，把这段间隔分成100等分，0度以下和100度以上，也以同样间隔刻上刻度。用这样的温度计表示的温度称作经验温度。特别地，把用上述方法制成的标度叫做摄氏温度，把 t 度写做 $t^{\circ}\text{C}$ 。

由温度的标度方法可知，用水银温度计和酒精温度计，即使测定同样的水的温度，除了 0°C 和 100°C 之外，未必会表示出一致的温度。因为水银和酒精的热膨胀系数因温度的变化是不同的。低于 0°C 或高于 100°C 的温度的标度，在普通的温度计上不能规定，这意味着经验温度不是完全客观的。严密地、客观地确定温度的标度可以说是个重要的问题。这正是本书要研究的重大课题之一，以后将要解决它。在此之前，关于温度或热的种种作现象的理解，即做唯象论的考察。即使用普通的温度计研究温度的变化，区别高温和低温也是可能的，所以，在这个阶段用它也足够了。

热平衡 把热的物体和冷的物体相接触放置，热的物体变冷，冷的物体变暖了，不一会儿，两个物体温度变得相同，此后不再变化了。这时两个物体称做处于热平衡。

根据经验，如果物体A与B处于热平衡，A与C也处于热平衡的话，则使B和C直接接触，也不会引起温度的变化（即B和C也处于热平衡）。

根据这个经验定律，如果以物体A作为中间媒介，就可以确定B和C具有相同的温度。例如，物体A是测定由于温度变化而引起的体积膨胀的温度计，就可以比较物体B和C的温度。

有关热平衡的上述定律，是在物体接触时不引起化学反应等情况下成立。如果考虑到化学反应，A和B接触不引起化学反应，A和C接触也不引起化学反应，但B和C接触仍有可能引起化学反应。由此可知，上述关于热平衡的经验定律绝不是当然的事情。在不引起化学反应的情况下，仅使温度趋于相等的接触叫热接触。

在热接触中认为从高温物体向低温物体传递了热,关于热将在 § 1-4研究。

§ 1-2 气体定律

最初的温度计是由因研究落体运动而出名的伽里略 (Galileo Galilei) 制做的。那是一个在鸡蛋大小的玻璃球下,连接着一根细长的玻璃管,把它竖直地放入温水中,直到水进入管中为止。当用手或嘴加热管中的空气,使其膨胀时,管中的水位下降,由此可以知道温度。伽里略还对空气的性质做了种种研究,知道空气有重量,对于大气压和真空也有了某种程度的理解。

压强和体积 波义耳 (Robert Boyle) 测定了施加压力时空气体积的影响,了解到压强和体积互成反比例 (1662 年),后来又证实了对于其它气体,这个定律也成立。设压强为 P , 气体的体积为 V , 则有

$$PV = \text{一定 (温度一定)} \quad (1.1)$$

把它叫做波义耳定律 (图1-1)。

体积和温度 查理 (Jacques A. C. Charles) 发现在压强一定时,气体由温度引起的膨胀比率 (膨胀系数) 与气体种类无关,是一定的 (1787年)。但这个研究结果没有发表,所以,1802 年盖·吕萨克 (Joseph L. Gay-Lussac) 再一次发现了这个定律。如果设气体的体积在 0°C 时为 V_0 , 在 $t^\circ\text{C}$ 时为 V , 根据仔细地测定得到,膨胀的比率

$$\frac{V - V_0}{V_0 t} = \frac{1}{273.15} \quad (\text{压强一定}) \quad (1.2)$$

如果使 t 减小,这个式子左边就是 0°C 的膨胀系数,而当 t 增大时,这个式子也成立,把它改写成

$$V = V_0 \left(1 + \frac{1}{273.15} t \right) \quad (1.3)$$