



统计物理学

[英] F. MANDL 著 范印哲 译

曼彻斯特物理学丛书

人民教育出版社

曼彻斯特物理学丛书

统计物理学

[英] F. MANDL 著

范印哲 译

人民教育出版社

内 容 提 要

本书是根据英国曼彻斯特物理学丛书中的 F. MANDL 所著《Statistical Physics》(1977 年重印本)译出的。

本书的特点是作者放弃了把热力学和统计力学当作独立学科分开讲授的传统作法,而是采用按统一的观点进行阐述的方法。注重对基本概念的阐述。内容包括:热力学第一定律、热力学第二定律、顺磁性、简单的热力学系统,固体的热容量,经典理想气体,量子理想气体,黑体辐射和粒子数可改变的系统等十二章。并附有习题、解题提示或答案。

本书对课程内容作了精心的选择和编排,并附有教学流程图,在使用上具有很大的灵活性。可作为我国综合大学、高等师范院校以及高等工业学校热力学和统计物理学课程的教学参考书。

STATISTICAL PHYSICS

F. MANDL

John Wiley & Sons Ltd.

Reprinted 1977. 10.

曼彻斯特物理学丛书

统计物理学

[英] F. MANDL 著

范印哲 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14.5 字数 340,000

1981 年 12 月第 1 版 1983 年 5 月第 1 次印刷

印数 00,001—11,300

书号 13012·0706 定价 1.90 元

译者的话

这套曼彻斯特物理学丛书(共七本),是英国曼彻斯特大学 F. MANDL 等根据英美大学的物理教学需要,总结了多年的教学经验,在各学科讲义的基础上修改完善而成的。

这套丛书的特点是,作者们根据教学需要对课程内容作了精心的选择和编排,基本内容讲得比较详细,某些加深加宽的内容以独立的章、节或段的形式出现,便于选择,使本书在使用上具有很大的灵活性,适应面较广。这是一套中等程度的教材。本书可作为我国综合大学、高等师范院校以及高等工业学校热力学和统计物理学课程的教学参考书。

本书的作者 F. MANDL 不是沿用把热力学和统计力学当作独立学科分开讲授的传统作法,而是采用按统一的观点进行阐述的方法,也就是所谓“打通”的方法。作者认为这样做有明显的好处;可使学生从微观上建立起正确的物理概念,同时在时间上也较为经济。

北京大学叶良修同志热情地指导了本书的翻译工作,校阅了译文,在此表示感谢。

由于译者的水平有限,译文中不妥或错误之处,恳请各位读者和专家指正。

1981. 12.

曼彻斯特物理学丛书主编序言

在制订大学物理学各门课程的大纲时，曼彻斯特大学物理系同人深感难以找到合适的教科书推荐给学生，其他大学的许多教师显然也有同感。大部分教科书的内容过多，学生没有时间加以消化；而且，按照这些书的编排方式，也极少有可能从中选取一些章节，借以定出一个自成体系、比重恰当的大纲。正是在这种情况下，产生了编写这套曼彻斯特物理学丛书的想法。

曼彻斯特物理学丛书各卷的材料比我们讲课时的内容大约增添了50%。为此，我们对丛书所应包括的课题作了精选，重点放在基础物理学方面，也包含一些深有启发、饶有兴味和富有价值的应用。考虑到各大学对具体课题的处理相差甚远，我们在组织材料时力求便于教师根据不同的分量、难度和不同的应用重点加以选择。为了这一目的，我们鼓励丛书各卷的作者使用教学流程图来表明各章之间的逻辑联系，并把某些节、段的课题打上星号。这些部分涉及较高深的内容，可供选读而不影响对各卷后继部分的理解。

因为计划把曼彻斯特物理学丛书作为一套体系完整的教材，所以丛书对所阐述的物理学各部分作了通盘安排。各卷深浅程度有所不同：《物性学》适用于第一学年，《固体物理学》适用于第三学年，其余各卷介乎于其间，使用时可以有相当大的灵活性。《电磁学》、《光学》、《电子学》和《原子物理学》都是从一年级水平开始，逐步进展为适合二、三年级的课程。《统计物理学》则适用于第二、三学年。丛书各卷的编纂均自成体系，可以单独使用。

这套丛书虽是为英国大学生编写的，同样也适合美国大学一

• III •

级以上的课程。在各卷的作者序言中,对于所要求的预备知识,都作了详细说明。

编纂这样一套丛书,必须对采用的单位制作出原则规定。经过尽可能广泛的协商,我们和作者及出版者共同决定,采用国际理论物理和应用物理协会多次建议和详尽解释的国际单位制(SI)。电学和磁学量都用国际单位制表出(其他单位制在电磁学卷中都有说明)。但是,我们并不认为诸如电子伏特这样的物理单位是不合法的。我们也不拘泥于某些细节,如10的因子(用0.012千克是否就比12克好?）、缩写符号(尽管秒的缩写s和sec对于电子计算机来说并不等同,对于科学家来说却毫无区别)以及诸如此类的琐碎事项等等。

这套丛书的初稿曾在曼彻斯特大学试用过,并在其它大学的教师中广为流传,因而已经听到许多反映。我们非常感谢曼彻斯特和其他大学的广大师生,他们的批评、建议和有益的讨论有助于这套丛书的最后定稿,使它的撰述增色不少。我们要特别感谢各卷的作者,感谢他们的辛勤工作,感谢他们贡献了许多新概念,感谢他们耐心的讨论和经常接受我们的许多建议和要求。我们也向出版者 John Wiley and Sons 公司表示感谢,他们在各方面给予我们很大帮助,包括提供初稿的资金。

F. Mandl

R. J. Ellison

D. J. Sandiford

于曼彻斯特大学理学院物理系

作 者 序

本书是准备给大学生的统计物理学课程使用的。热力学和统计力学的规律构成物理学中最热门的分支之一。我希望这本书能够使读者对此有所感受。我已放弃把热力学和统计力学当作独立学科分开讲授的传统作法，而是采用按统一的观点进行阐述的方法，这种统一阐述的方法有下列明显的好处：第一，由于一开始就把作为热力学规律的正确诠释的统计性质放在最前面，因而能更直接地导致人们对这些规律的深入理解。第二，这种方法强调物质的原子性，因而更富于启发性，由于这是大多数有成就的物理学家思想方法，所以对读者是一种更为有益的训练。第三，这种方法在时间上更为经济，鉴于科学的高速发展，这也是一个重要因素。

科学知识日益增长的一个结果是，大学生本科物理课程已不再可能把全部物理学知识都包括进来。可以有多种选择教材的方法，我试图写一本适应性很广的书，使读者能尽快地接触到专门课题，使教师能够根据不同分量、不同难度和不同应用重点来选择教材。在封二上印有教学流程图，用来表示各章之间逻辑上的联系。借助流程图可以达到上述目的。此外，还把某些节标上了星号*，并把不足一节的内容在印刷时加套网纹背底^①，用这两种方式标记出来的内容都可略去不讲。仅在作了上述标记的部分之间，偶尔会有相互参见，除此之外，这些标记部分后面都不需要。

我的目的是要相当准确地解释统计物理学的基本规律，并把

① 译文用仿宋字排印。

它们应用到范围广泛的各種重要問題上去。掌握了本書所述內容的讀者，對於更新的專題論文或者解決相當實際的問題不會感到困難。本書僅限於討論處於平衡的系統，略去了不可逆熱力學、漲落現象和輸運理論。這麼做，部分原因是由於時間和篇幅所限，但主要的是因為這些課題不適於作為基本內容。出于同樣的原因，我沒有討論統計物理學的基本根據問題，而是把理論建立在某些簡單直觀、似乎合理的公理的基础上。這種方法的正確性，其最根本的證明在於它的成功。

我寫的這本統計物理學是自成體系的，但是本書的內容深度要求讀者具備氣體分子動力論、原子物理學的基本概念和初等量子論的知識。好在對後者的需要很少。

在過去的十年間，我曾給曼徹斯特大學不同專業的大學生和研究生講授過統計物理學。現在這本書的結構形式，是在給物理、化學物理和電子工程諸專業的二年級大學生講課時所用講義的基礎上逐步形成的。這本講義共有 26 講，每講需要 50 分鐘，大体上包括了書中沒有標星號 * 的部分及第 5 章、第 7 章的 7.5 和 7.7 節、第 11 章的 11.4 和 11.5 節（除去全部加套網紋背底的部分）。此外還安排學生作大約 20 道習題，習題答案都是經過訂正、和典型例題的解答一起公布、並在課堂上討論過的。

習題和解題提示是本書的一個重要組成部分，要先努力認真作題，然後再去研究提示，這樣可以使讀者加深理解和提高解題技巧，從而在面臨新的情況時就更有信心了。習題中包括許多重要的物理內容，這些內容是完全有可能在正文中講述的。

本書的前身是我講課所用講義的最初版本，這本講義也曾在曼徹斯特大學以外的地方廣為流傳。我收到了許多讀者關於修改或增加內容的意見和建議，也曾同曼徹斯特的學生和同事們進行過富有启发性的討論，結果使原來的教科書有很大的改進。我衷

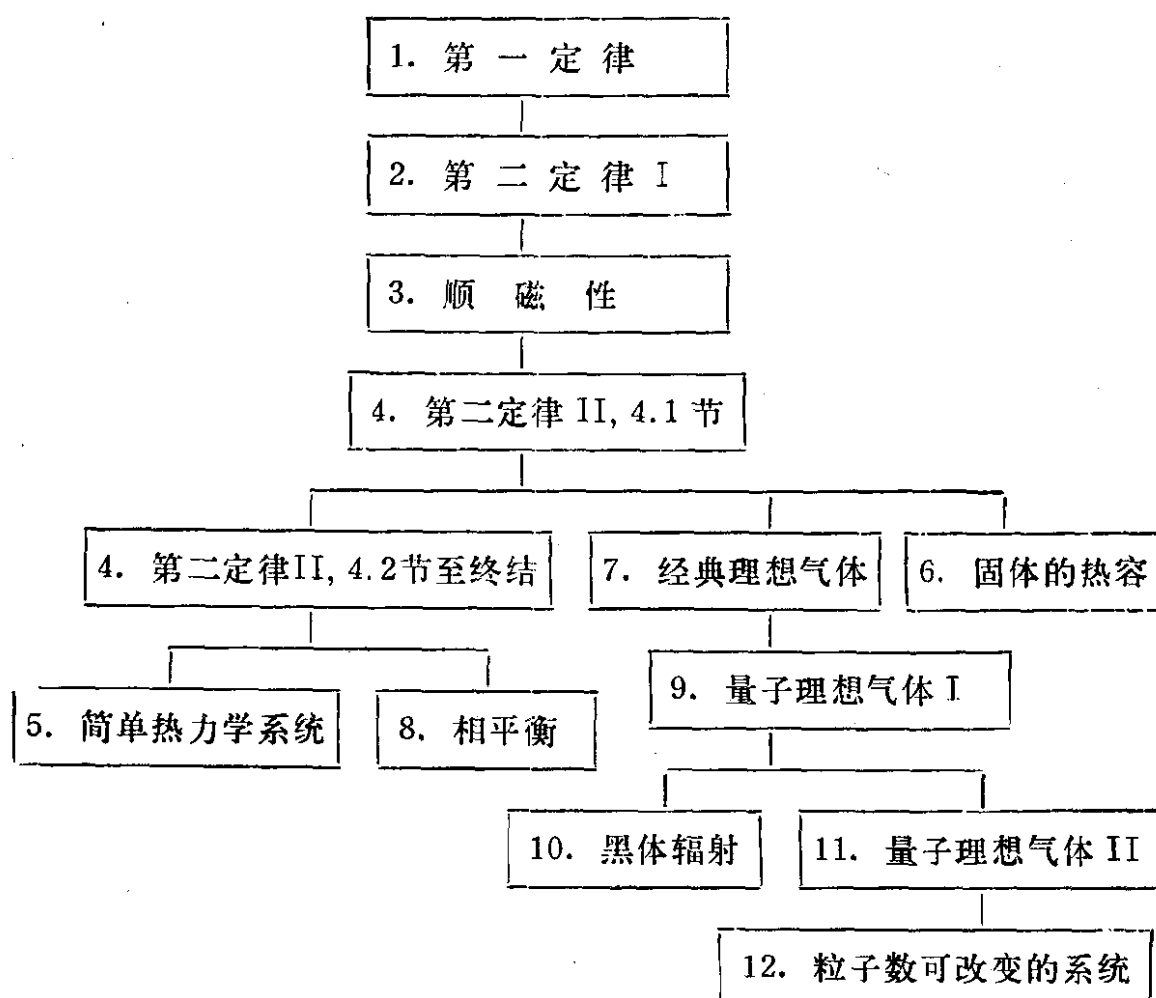
心地感谢对我有过帮助的人们，由于人数很多，无法在此一一致谢，但对 **Henry Hell** 教授和 **David Sandifot** 博士深表谢意，他们阅读了我的全部底稿，并就许多疑难点同我进行过讨论，直到——至少是暂时地——看起来已弄清楚为止。这种对知识的追求和探讨，不仅对本书大为有益，而且也是我在著书中感到极为高兴的地方之一。

F. MANDL

英格兰 曼彻斯特

1970. 5.

教学流程图



每一章只需要前面那些用向下的路线连起来的章节作为预备知识,为使本书在使用上有最大的灵活性,已把某些内容放在标有星号*或加套网纹背底的章节里^①,仅在作了上述标记的部分之间,偶尔会有相互参见,除此之外,这些标记部分后面都不需要,都可略去不讲。

^① 译文用仿宋字排印。——译者注。

目 录

教学流程图

第 1 章 热力学第一定律	1
1.1 宏观物理	1
1.2 有关热的一些概念	4
1.3 第一定律	11
*1.4 磁功	22
小结	29
习题 1	29
第 2 章 热力学第二定律 I	31
2.1 自然过程的方向	31
2.2 宏观态的统计权重	34
2.3 孤立系统的平衡	41
2.4 肖脱基缺陷	51
2.5 置于热浴中的系统的平衡	56
小结	70
习题 2	72
第 3 章 顺磁性	74
3.1 置于热浴中的顺磁固体	74
*3.2 热容和熵	81
*3.3 孤立的顺磁固体	84
*3.4 负温度	85
习题 3	89
第 4 章 热力学第二定律 II	90
4.1 用于无穷小变化的第二定律	90
4.2 克劳修斯不等式	97
4.3 简单应用	100

带 * 的内容可略去不讲, 本书后面不需要这些内容.

4.3.1 水受热时的熵变	101
4.3.2 冰融化时的熵变	102
4.3.3 温度趋于相等过程的熵变	102
4.3.4 理想气体的等温压缩	103
4.4 亥姆霍兹自由能	105
4.5 其它热力学势	108
*4.6 最大功	111
4.7 热力学第三定律	114
*4.8 热力学第三定律(续)	118
小结	121
习题 4	123
第 5 章 简单热力学系统	125
*5.1 第二定律的其它表述形式	125
*5.2 热机和致冷机	126
*5.3 两种热容之差	133
*5.4 理想气体的性质	135
5.4.1 熵	135
5.4.2 混合熵	137
*5.5 实际气体的性质	141
5.5.1 焦耳效应	141
5.5.2 焦耳-汤姆孙效应	144
5.5.3 对流热交换器	149
*5.6 绝热冷却	150
习题 5	157
第 6 章 固体的热容	160
6.1 引言	160
6.2 爱因斯坦理论	162
6.2.1 爱因斯坦结果的推导	162
6.2.2 爱因斯坦结果同实验的比较	169
*6.3 德拜理论	172
6.3.1 德拜结果的推导	172
6.3.2 德拜结果同实验的比较	178
习题 6	180
第 7 章 经典理想气体	181

7.1	经典理想气体的定义	182
7.2	配分函数	186
7.3	经典情形的有效性判据	193
7.4	物态方程	196
*7.5	热容	198
*7.6	熵	200
*7.7	麦克斯韦速度分布	203
*7.8	实际气体	212
*7.9	经典统计力学	226
7.9.1	能量均分	232
	习题7	238
第8章	相平衡	241
8.1	平衡条件	242
*8.2	平衡条件的另一种推导方法	245
8.3	平衡条件的讨论	246
8.4	克劳修斯-克拉珀龙方程	250
8.5	克劳修斯-克拉珀龙方程的应用	254
8.5.1	熔点与压强的关系	254
8.5.2	沸点与压强的关系	255
8.5.3	蒸气压曲线	256
*8.6	临界点	257
	习题8	262
第9章	量子理想气体 I	264
9.1	引言	264
9.2	量子统计法	265
9.3	配分函数	270
	习题9	272
第10章	黑体辐射	273
10.1	引言	273
10.2	光子的配分函数	274
10.3	普朗克定律: 推导	277
10.4	黑体辐射的性质	279
*10.5	黑体辐射的热力学	285

习题 10	288
第 11 章 量子理想气体 II	289
11.1 配分函数	290
*11.2 配分函数: 另一种方法	299
11.3 经典极限	308
*11.4 金属的自由电子模型	310
11.4.1 费密-狄拉克分布	311
11.4.2 金属中自由电子的热容	318
*11.5 玻色-爱因斯坦凝结	320
习题 11	328
第 12 章 粒子数可改变的系统	330
12.1 引言	330
12.2 巨配分函数	333
*12.3 经典理想气体	339
*12.4 量子理想气体	340
12.4.1 量子理想气体中的涨落	342
12.5 多元系	344
习题 12	349
附录 A 数学结果	350
A.1 斯特令公式	350
A.2 积分 $\int_0^{\infty} (e^x - 1)^{-1} x^3 dx$ 的计算	351
A.3 动力论的某些积分	354
附录 B 态密度	357
B.1 普遍情况	357
B.2 薛定谔方程	365
B.3 电磁波	366
B.4 连续固体中的弹性波	367
附录 C 解题提示	369
参考书目	405
索引	410
单位换算系数	445
物理常数	446



热力学第一定律

1.1 宏观物理

统计物理学专门研究宏观系统即由大量的原子或分子组成的系统的物理性质。几克重的一片铜或处于室温及一个大气压下的一升空气,都是宏观系统的例子。一般说来,这样一个系统所包含的粒子数为阿伏伽德罗常数 $N_0 = 6 \times 10^{23}$ 的数量级。即使我们知道了粒子之间相互作用的规律,但由于阿伏伽德罗常数非常之大,使我们不可能用处理简单系统的方法——例如按经典力学处理行星运动或按量子力学处理氢分子——来处理宏观系统。我们永远不可能用实验方法得到对这种宏观系统的完整的微观^①说明,即得不到关于大约 10^{23} 个坐标的知识。即使已知初始数据,也不可能解出大约 10^{23} 个运动方程!

尽管从原子论的观点来看宏观物体是极为复杂的,但是人们不仅从日常经验中而且还通过精确的实验知道宏观物体遵从确定的规律。例如当一热的物体同一冷的物体热接触时,两物体的温度将趋于相等;在标准大气压下水总是在同一温度(规定此温度为 100°C)下沸腾;稀薄气体对容器器壁所施压强,可由理想气体定律得出。以上这些例子说明宏观物体遵从的规律和力学或电磁理论

① 这里使用的“微观”是对比“宏观”而言的,指的是一种完整的原子论的描述,与光学显微镜毫无关系。

的规律完全不同。它们没有对系统作出完整的微观描述(例如每个气体分子的瞬时位置),只提供某些宏观上可观测的量,如压强或温度,这些都是相应的微观性质的统计平均值。因此宏观定律都具有统计性质。但由于涉及的粒子数非常大,所以涨落(它是统计理论的基本特点)非常小。实际上,只有在非常特殊的条件下才能观测到涨落现象。通常情况下,涨落总是可以完全忽略不计,因而由统计规律得出的结论实际上是完全可靠的。

为说明这些概念,来讨论一下气体施于容器器壁的压强,我们用一个与容器连通的压力计测量气体的压强。我们可以把这个压力计想象为一个能自由运动的活塞,受到一可变外力 F 的作用,例如,用一个弹簧来施加外力 F (图 1.1)。当活塞处于静止平衡时,外力 F 和气体的压强 P 处于平衡: $P = \frac{F}{A}$, A 是活塞的面积。

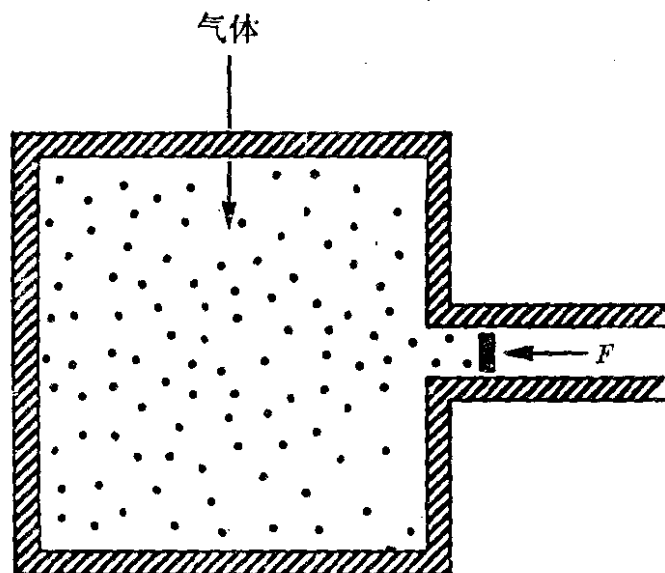


图 1.1 外力 F 和气体作用在可动活塞上的压强相平衡。

对比压强的宏观测定,我们来考虑此压强实际上是怎样产生的^①。根据气体分子运动论,气体分子和器壁进行弹性碰撞。由于大量碰撞产生的压强肯定不是一个严格与时间无关的常数,恰好相反,作用在活塞上的瞬时力是一迅速涨落的量。所谓气体压强

^① 关于根据气体分子运动论对理想气体压强的详细推导,参看 Flower and Mendoza²¹, 5.12 节,和 R. Becker⁵, 24 节或 Present¹¹, 第 2 章。

指的就是这个涨落的力在发生了大量碰撞的一段足够长的时间间隔内的平均值。于是可以用分子稳态速度分布来计算每单位时间内在单位面积上，从分子到器壁的动量转移，这就是压强。当然，加在活塞上的力 F 只近似抵消由分子碰撞产生的无规则冲力。平均来看，活塞静止不动，但是因为分子的碰撞是断续的，所以活塞将在其平衡位置附近作微小的无规则振动。这种微小的无规则运动称为布朗运动(Flowers and Mendoza²¹, 4.4.2 节)。在我们所讨论的活塞及一般情况下，这些微小的运动是完全观察不到的。只有用很细小的宏观物体(如悬浮在液体中的很微小的颗粒)或用非常灵敏的仪器(如检流计中悬挂着的非常灵敏的转动装置——参阅 7.9.1 节)才能观察到布朗运动。布朗运动是对能够达到的测量精度的根本限制之一。

有两种研究宏观物理的方法。历史上最早的是经典热力学方法，主要是由卡诺、克劳修斯、W. 汤姆孙(后来叫开尔文勋爵)、R. 买厄和焦耳在十九世纪前半期发展起来的。这种方法的基础是从一些宏观系统的大量实验中概括、演绎出来的几个基本原理——热力学定律，这些定律在解释宏观现象上的成功证明它们是正确的。热力学定律是唯象定律，它们不是从微观图象中得出来的，这样不仅避开了所有原子的概念，而且只使用描述宏观系统性质的宏观变量，如压强、体积和温度。当然，避开原子的概念严重地限制了热力学对系统所能提供的信息，特别是表示各宏观变量之间的关系，并把一个系统与别的系统区别开来的物态方程(例如对于理想气体 $PV = RT$)必须由实验确定。但也有许多情况，是不需要或不可能进行微观描述的，而热力学能够做出很有意义的，具有很大普遍性的论断^①。

① 一种极好的但不易懂的，表现出它的优美形式、逻辑结构和理论威力的经典热力学的叙述，参看 Pippard 的著作。