

Sommerfeld 理论物理学 (第五卷)



Thermodynamik Und Statistik

热力学与统计学

I

〔德〕Arnold Sommerfeld/著

胡海云 李军刚/译 吕勇军 范天佑/校



科学出版社

Sommerfeld 理论物理学

(第五卷)

热力学与统计学

[德] Arnold Sommerfeld 著

胡海云 李军刚 译

吕勇军 范天佑 校

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是《Sommerfeld 理论物理学》教程的第五卷, 全书共分 5 章, 前 3 章为热力学, 后 2 章为统计物理学. 各章内容包括: 第 1 章热力学、总论, 第 2 章热力学对特殊系统的应用, 第 3 章气体动力学基本理论, 第 4 章统计学的普遍理论: 组合方法, 第 5 章精确的气体动力学的概述. 书中的若干创见和重要成果是著者及其学生的贡献. 本书附有习题和部分参考答案.

本书可作为高等院校物理类各专业“热力学与统计物理学”的教材.

图书在版编目(CIP)数据

热力学与统计学/(德)阿诺德·索末菲 (Arnold Sommerfeld)著; 胡海云, 李军刚译. —北京: 科学出版社, 2018.3

(Sommerfeld 理论物理学; 第五卷)

书名原文: Thermodynamik und Statistik

ISBN 978-7-03-056945-5

I. ①热… II. ①阿… ②胡… ③李… III. ①热力学 ②统计物理学
IV. ①O414

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 049672 号

责任编辑: 陈玉琢 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 20 3/4

字数: 400 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

Sommerfeld 及其成就



Arnold Sommerfeld (1868—1951)

Sommerfeld 是德国伟大的理论物理学家、应用数学家、流体力学家、教育家、原子物理与量子物理的创始人之一。他对理论物理多个领域, 包括力学、光学、热力学、统计物理、原子物理、固体物理 (包括金属物理) 等有重大贡献, 在偏微分方程、数学物理等应用数学领域也有重要贡献。他引进了第二量子数 (角量子数)、第四量子数 (自旋量子数) 和精细结构常数, 等等。20 世纪最伟大的物理学家之一 Planck 在获得 1918 年度诺贝尔物理学奖的颁奖典礼的仪式上的演讲中指出: “Sommerfeld ... 便可以得到一个重要公式, 这个公式能够解开氢与氦光谱的精细结构之谜, 而且现在最精确的测量 ... 一般地也能通过这个公式来解释 ... 这个成就完全可以和海王星的著名发现相媲美。早在人类看到这颗行星之前 Leverrier 就计算出它的存在和轨道。”

Sommerfeld 思想深刻, 研究成果影响深远。例如, 他去世后发展起来的数值广义相对论和新近崛起的引力波理论研究中, 还引用 “Sommerfeld 条件”, 该条件在求解中发挥了重要作用。这再次彰显了他的科学工作的巨大价值。

Sommerfeld 非常重视教育, 他培养的博士生中有 Heisenberg, Debye, Pauli 和

Bethe 四人获诺贝尔物理学或化学奖, 博士后中有 Laue, Pauling 和 Rabi 三人获诺贝尔物理学或化学奖, 他的学生中还有数十位国际顶尖科学家, 如 Hopf, Meissner, Froehlich, Brillouin, Morse 等, 这在迄今所有作为研究生导师的科学工作者与教育工作者中是绝无仅有的. 这些学生中除了 Laue 的成就在晶体衍射, Hopf 等在流体力学, Morse 等在数学方法等领域之外, 绝大多数在量子物理与量子化学领域, 他被称为“量子理论之父”是当之无愧的. 当然其中有时代的条件, 他置身于经典物理向现代物理发展的关键时期. 20 世纪初, 德国是世界量子物理研究的中心, 而他所在的 Goettingen 大学和 Muenchen(Munich) 大学又是德国量子物理研究的中心, 他本人又居该中心的中心. 在年龄上, 他位于量子理论的开创者 Planck (1858—1947) 和集大成者 Schroedinger (1887—1961) 的中间, 承上启下. 这按中国话讲, 是“时势造英雄”. 除去客观条件外, 他本人的深邃的洞察力, 集数学物理和理论物理的才能于一身, 科学地组织讨论班, 发现人才, 提携后学, 等等, 也是他成功的原因之一. 1918 年起他担任德国物理学会主席, 1920 年创办和长期主持《德国物理学杂志》(*Zeitschrift fuer Physik*), 编委会决定任何一位有信誉的科学工作者的原始性研究论文, 不经审稿人审查就发表, 从稿件收到至发表最快仅两个星期, 这极大地推动了科学理论的发展, 其中包括使得 Heisenberg, Born 和 Jordan 等的矩阵量子力学的论文及时得以报道, 促进了量子力学在德国的发展. 他同时热诚地对奥地利青年科学家 Schroedinger 的波动量子力学给以崇高的评价, 热诚支持它的发展 (Schroedinger 的论文是由 Planck 主编的, 另一本德国物理杂志——《德国物理年鉴》(*Annalen der Physik*) 上得以及时报道的). 可见当时德国科学界伯乐不少, 办事公平和效率之高. 他本人当然是一位天才. Born 称赞他具有发现和发展天才的才能. Einstein 佩服他凝聚和造就了那么多青年天才. 他领导和大大推动了 1910—1930 年全世界原子结构与光谱学的研究, 这属于微观物理的领域. 同时在流体力学等宏观领域也很有成就, 他指导 Hopf 与 Heisenberg 等在湍流方面的研究, 对后来的研究者, 包括取得很大成就的美籍中国科学家林家翘等都有重要影响, 等等. 按中国话说, 这又是“英雄造时势”.

Sommerfeld 一生的著述丰富, 其中之一是由他的讲课手稿整理的理论物理教程 (*Vorlesungen ueber theoretische Physik*), 共六卷, 包括: 第一卷力学 (*Mechanik*), 第二卷变形介质力学 (*Mechanik der deformierbaren Medien*), 第三卷电动力学 (*Elektrodynamik*), 第四卷光学 (*Optik*), 第五卷热力学与统计学 (*Thermodynamik und Statistik*), 第六卷物理学中的偏微分方程 (*Partielle Differentialgleichungen der Physik*). 迄今各国先后出版了各种理论物理教程, 那些著者都是有成就的科学家. 像 Sommerfeld 这样对教程所涉及的各个领域都有重要贡献的著者, 还不多见. 另外, 在所有理论物理的教程中含有内容极其丰富的《光学》单独一卷, 《物理学中的偏微分方程》单独一卷的, 这是唯一的一套, 因为 Sommerfeld 本人在这两个领域都有重要

贡献, 这又构成此教程的特点之一. 这套书既是教程, 又是科学专著, 包含他本人, 他的学生, 例如 Debye 对固体比热, Heisenberg 对湍流的原创性的贡献的详细讨论的珍贵资料, 等等, 它对物理学、物理学教学和物理学史都有重要意义. 这一教程早就译成英文、法文、俄文和日文等其他文种出版, 遗憾的是, 迄今尚未见中文译本. 其实, 前辈学者早就酝酿过翻译成中文工作, 由于当时条件的局限, 迟迟未能实现. 现在的译本可以说是为圆他们的梦而作的一点努力, 但是未必做得好. 不过该教程不包括量子力学. 为了弥补这一缺憾, 此套译本之外补充一卷 Sommerfeld 1929 年出版的《波动力学》(德文原名 *Atombau und Spektrallinien, Wellenmechanischer Ergaenzungsband*——原子结构与光谱, 波动力学补编) 的译本, 当然不作为他的这套教程中的一本 (顺便指出, 他的《原子结构与光谱》, 共 1555 页, 是另一套伟大的科学巨著). 通过读这博大精深的七本书, 我们可以看到, Sommerfeld 对理论物理的各个领域, 从宏观力学到量子力学, 从物理到数学都有创造性贡献, 这在所有目前已经出版的各种理论物理教程的著者中可能是绝无仅有的.

习近平主席 2016 年在全国高等学校思想政治工作会议上指出, 只有培养出世界一流人才的大学才能成为世界一流大学. 培养优秀人才, 需要优秀教材和优秀科学专著. Sommerfeld 这套培养出 7 位诺贝尔物理奖或化学奖的理论物理教程, 会提供我们借鉴和学习的一个良好材料.

这套书能译成中文, 应该感谢德国已故物理学家 Prof. H. G. Hahn (他属于 Sommerfeld 最后一波的学生) 多年前的建议, 当时他得知 Sommerfeld 的《理论物理学》尚无中文译本, 建议今后能出中文译本, 认为它会有益于中国青年学者和学生. 也感谢德国 Stuttgart 大学理论物理研究所前所长 Prof. H-R Trebin, 他从德国寄来这套书的德文版的第四卷和第五卷, 帮助了翻译和校对工作.

最后简单介绍一下原著和翻译的情况. 原书写于 1942 年, 是第二次世界大战最激烈的时期, 结束于 1951 年, 他不幸死于车祸, 第五卷尚未完稿, 后来由他的学生继续完成. 当时情况困难, 写出一卷, 就出版一卷, 出版社很分散. 第二次世界大战之后, 德国分裂为德意志民主共和国 (东德) 和德意志联邦共和国 (西德), 它们分别出版 Sommerfeld 的理论物理学, 出版社更加分散, 书一版再版. 其间, 他的学生们对一些卷的内容作了增补和修订, 其中第二卷增补最大, 增加了一章 (第九章)——塑性与位错. 它从物理学观点分析位错, 并且把晶体变形与宇宙时间 - 空间弯曲做了类比, 也就是和 Einstein 广义相对论做了类比, 这一思想很新颖. 包括这一章的习题和习题解答以及四个附录在内, 超过 80 页, 相当于原书的四分之一的篇幅. 第三卷增补了广义相对论和引力波的内容, 等等. 1991 年两德统一前后, 由 Harri Deutsch 出版社统一出版, 现在我们采用的作为最终校对的就是这一版本.

该书首卷 1943 年出版后, 美国首先出版了英文译本, 其中许多译者是过去在德国留学的 Sommerfeld 的学生, 翻译得很出色, 这些英文译本成为我们现在翻译

的有力的资料. 鉴于这些英文译本出版时间比较早, 而且还存在许多错误, 甚至有的德文词句未能翻译, 德文版后来的增补和修订版的内容在英文翻译版中没有, 只能按照德文版翻译. 现在的中文翻译稿是按照德文原版和英文版翻译的结果, 因为我们德文水平的局限, 也只能这么做. 做的不好之处, 请读者多多批评指正.

此书中文译本的出版, 得到北京理工大学物理学院、爆炸科学与技术国家重点实验室和教务处以及某些译者个人的资助.

总 序

因受到以前学生的鼓励和出版社的多次邀请,我决定出版一本关于理论物理学课程的书,这也是我在 Muenchen 大学教授了长达三十二载的课程。

该课程属于基础课程,听课的学生有的来自 Muenchen 大学和理工学院物理专业,有的来自数学和物理学专业,也有的来自天文学和物理化学专业,他们大部分都是大三、大四的学生。该课程每周四次课,并辅以两小时的答疑时间。本书并未涉及现代物理学的专业课程。专业课程的讨论主要集中在我的论文和其他专著中。虽然在研究背景和文献综述中有提及量子力学,但这些课程的核心依然是经典物理学。

课程顺序安排如下:

1. 力学
2. 变形介质力学
3. 电动力学
4. 光学
5. 热力学和统计学
6. 物理中的偏微分方程

力学课程由我和另一位数学专业的同事轮流讲授。流体动力学、电动力学和热力学则由较为年轻的老师讲授。矢量分析会在单独的课程中讲授,本系列课程将不会涉及。

本书将会基本沿用我上课的风格,我不会拘泥于数学论证,而是将主要精力用来解决物理问题。我希望通过适当的数学和物理学角度,为读者展现物理学的生动性和趣味性。因此,若本书在系统论证和公理结构部分留有空白,我也不会过于苛求。我不希望读者被冗长繁琐的数学论证和错综复杂的逻辑推理所吓倒,进而分散了物理学本身的趣味性。这种风格在课堂教学中颇有成效,故而被运用到本书的撰写中。Planck 的课程在理论框架部分是无可挑剔的,但我相信我可以提出更广泛的题材并能更灵活地使用数学方法解决问题。此外,我很乐意更全面更彻底地向读者介绍 Planck 的理论知识,尤其是热力学和统计学。

各卷末收集的问题是对正文的补充。这些问题是学生的课下作业,并在课堂答疑环节进行了讨论。基础的数学问题并未收录在书末的附录内。问题按章节进行了排序。每个小节、每个方程都有编号。因此,通过给出小节和方程的编号,便可找到每卷内引用的方程。为了便于查询和翻阅,每个页面左上角都标有章节号。

回顾多年的教学生涯,我由衷感谢伦琴和菲利克斯·克莱因。伦琴不仅为我的学术活动创造了外部条件,让我得以享受优厚待遇,并且多年陪伴在我左右,致力于拓宽我的研究范围。在我职业生涯早期,菲利克斯·克莱因向我传授了最适合于教学的实践方法;他深谙教学之道,对我的教学方式产生了强烈而又潜移默化的影响。值得一提的是,当我在 Goettingen 大学任指导教授时,我的课程虽不如现在的六卷那么全面,但是却在听众中引起了很大的共鸣。后期,当我重新讲授这门课程时,我的学生经常向我反馈,他们只有在这里才真正掌握了数学结果的处理和应用,例如傅里叶方法、函数理论的应用和边界值问题。

最后,由衷希望这本书能激发读者对物理学的兴趣,同时,也希望本书带给读者的是身临其境的听课体验。

Arnold Sommerfeld

Muenchen, 1942 年 9 月

第五卷序

热力学是由公理发展为科学的一个极好的例子. 与经典力学不同, 热力学经受了量子革命, 而没有动摇根基. 自其诞生以来, 她只长出几个蓬勃分支: §12 Nernst 热力学第三定律, §15 稀溶液, §18 和 §19 第二定律在电学和磁学的应用. 我们认为, §21 不可逆过程的热力学, 构成经典平衡热力学的一个有前途的延伸; 它是基于 Onsager 互易关系, 并试图描述以有限速度实际发生的过程. 即使 Kirchhoff 把熵的概念限制在可逆过程, 正如 Planck 在他的自传文章(《自然科学》19)中提到的; Planck 早在他的博士论文中指出, 对这一概念普遍有效性的坚定信念导致他在 1900 年得到辐射定律和量子理论.

在任何情况下, 我们不建议这么严格遵守所陈述的公理模式, 力图从公理的最小可能数量发展科学. 这是由 Carathéodory 在他的第二定律证明中实现的, 我们确实将适当概述, 但不把它优先于 Carnot-Clausius 证明. 后者包含很多我们认为在入门课程教授中必不可少的有意义的和深思熟虑的内容. 它利用来自工程概念的事实, 在我们看来, 与其说是责备, 还不如说是一个优点呢. 毕竟, 热力学起源于蒸汽机制造商的需求.

在认识论上, 循环的考虑和热力学势的方法之间有一定的竞争. 在工程中首选前者, 因为它们对直观想象更具吸引力. 然而, 我们基本只使用后一种方法. 它更简短且不随意, 因为它不需要依赖于人造循环. 此外, 在 §7, 我们将对四个 Gibbs 势给予同样重视, 虽然在应用中, Gibbs 函数(也称为自由焓, 或简称为热力学势)是迄今为止最重要的一个.

我们包含的实验材料很不全. 在实际气体情况下, 我们自己只限于考虑 van der Waals 方程; 尽管其形式非常简单, 以及只使用两个经验常数, 它以令人非常满意的方式再现了液体及其蒸汽的主要性质. 在铁磁现象中, 以其单一的内场常数提供类似服务的 Weiss 理论起着类似作用而且成功了. 这两种理论的认真复查必须交给更专业的著作.

在我原来大学的讲课中, 与经典热力学相比, 我时常花更多的时间给统计力学, 因为考虑到它与量子理论的关系, 我个人更被后者吸引. 在目前的构想中, 原则上量子理论必须被排除在外, 或者只能偶尔被卷入, 作为 Boltzmann 统计的补充. 出于这个原因, 与第 3 章、第 4 章和第 5 章相比, 涉及热力学的各章节, 第 1 章和第 2 章所占的比例增加. Fermi 统计只在考虑金属电子时才惹人注意.

第 3 章包括统计力学的初步介绍, 在那看来, 用基本方法是可能的. 为此所引

用的例子 (van der Waals 常数, 顺磁现象的 Langevin 理论) 用来填补一些热力学部分留有的空白. Brown 运动是统计涨落最重要的例子, 与扭转平衡理论一并处理. 与平均自由程有关的问题只是提到并没有充分的体现, 因为它们属于统计力学中最困难的问题.

第 4 章构成了我们考虑的统计研究的顶峰. 我的观点是, 对于 Boltzmann 组合方法, 当它被限于静态过程时, 在丰富性和大胆性方面超越其竞争对手 —— 基于 Boltzmann 碰撞方程的动态方法. 事实上, 在这一章的第一部分, 我们将描述由 Boltzmann 给出的组合方法的原始形式, 其中气体分子被赋予了物理上的真实存在. 我们不谈它在 §32~§35 中引入量子力学初期的分立能级时的缺陷. 然而, 按这种方式, 我们尚未导出真正的量子统计. 因为, 在量子力学领域, 分子是无法彼此区分的, Boltzmann(粒子的状态分布) 的原始方法变得不切实际. 此外, 从量子力学观点上看, 状态是首先给定的; 支配其中分布在状态上彼此不可区分粒子的各种数值组合构成新统计学的实质内容. 我们在 §36 和 §37 中触及这些点. 在 §38 和 §39 中适当举例.

对我们没有把状态的这个真正的量子统计处理放在最开始, 而是以无疑是过时的粒子的 Boltzmann 统计方法开始的事实道歉, 也许是必要的. 究其原因, 这是纯粹的说教. 由于 Boltzmann 的原始方法实现了这么多, 并且是如此清晰, 以至于它似乎仍然给状态的新统计学的理解提供不可或缺的基础.

与第 4 章相比较, 第 5 章一直保持很简短. 此处需要的分子模型假设更具专业性, 所产生的计算比在组合方法中的计算更加繁琐. 事实上, 在 Hilbert 的手中, 它们已导出这样的不可逆过程如摩擦、热传导等的一致性理论, 这是 Maxwell 和 Boltzmann 多次试图实现而没有成功的. 除此之外, Chapman 和 Enskog 方法已经数值化发展到与观测的比较成为可能的程度. 然而, 迄今为止, 这样的应用超出一般课程讲授的范围; 它们说明了在第 3 章中粗略提到的平均自由程问题的精确数学展开带来的巨大困难. 我们的介绍必须限于对 Boltzmann 在他的工作中以统计方法提出的中心问题的澄清: 澄清可逆的力学和热力学第二定律之间的矛盾.

Arnold Sommerfeld

目 录

Sommerfeld 及其成就

总序

第五卷序

第 1 章 热力学 总论	1
§1. 温度作为系统的一个属性	1
§2. 功和热	3
§3. 理想气体	6
A. Boyle 定律 (Boyle-Mariotte 定律)	6
B. Charles 定律 (Gay-Lussac 定律)	7
C. Avogadro 定律和普适气体常量	8
§4. 第一定律 能量和焓作为属性	10
A. 热功当量	10
B. 焓作为属性	12
C. 关于比热 c_p 和 c_v 之比的题外话	13
§5. 可逆和不可逆绝热过程	14
A. 可逆绝热过程	15
B. 不可逆绝热过程	17
C. Joule-Kelvin 多孔塞实验	18
D. 非常重要的一个结论	19
§6. 第二定律	20
A. Carnot 循环及其效率	21
B. 第二定律的第一部分	23
C. 第二定律的第二部分	27
D. 最简单的算例	29
E. 关于第二定律文字表述的评论	30
F. 能量和熵的相对量级	31
§7. 热力学势和互易关系	32
§8. 热力学平衡	37
A. 无约束热力学平衡和最大熵	37
B. 无约束热力学平衡下的等温等压系统	37

C. 弛豫平衡中附加的自由度	38
D. 热力学势的极值性质	38
E. 最大功定理	40
§9. van der Waals 方程	42
A. 等温线	43
B. van der Waals 气体的熵和热性质	44
§10. van der Waals 对气体液化的评论	46
A. 积分和微分的 Joule-Thomson 效应	46
B. 转化曲线及其实际应用	47
C. p - v 面中液-气相共存区域的边界	49
§11. Kelvin 温标	53
§12. Nernst 热力学第三定律	55
第 2 章 热力学对特殊系统的应用	59
§13. 气体混合物 Gibbs 悖论 Guldberg-Waage 定律	59
A. 气体的可逆分离	60
B. 扩散过程和 Gibbs 佯谬中的熵增加	61
C. Guldberg 和 Waage 的质量作用定律	62
§14. 化学势和化学常量	66
A. 化学势 μ_i	67
B. 理想混合物 μ_i 与 g_i 之间的关系	69
C. 理想气体的化学常量	70
§15. 稀溶液	71
A. 历史综述	71
B. 稀溶液的 Van't Hoff 状态方程	71
§16. 水的不同相 对蒸汽机理论的说明	74
A. 蒸汽压曲线和 Clapeyron 方程	74
B. 冰和水之间的相平衡	77
C. 饱和蒸汽的比热	78
§17. 相平衡理论综述	80
A. 水的三相点	80
B. Gibbs 相律	82
C. 稀溶液的 Raoult 定律	84
D. Henry 吸收定律 (1803)	86
§18. 原电池的电动势	87
A. 电化学势	88

B. Daniell 电池 (1836)	89
C. 个体反应缩简为总体反应	90
D. Gibbs-Helmholtz 基本方程	91
E. 实例	92
F. 对基本方程积分的说明	93
§19. 铁磁性与顺磁性	94
A. 磁化功和状态的磁方程	94
B. 顺磁质的 Langevin 方程	96
C. 铁磁现象的 Weiss 理论	97
D. 比热 c_H 和 c_M	100
E. 磁热效应	104
§20. 黑体辐射	105
A. Kirchhoff 定律	106
B. Stefan-Boltzmann 定律	108
C. Wien 定律	109
D. Planck 辐射定律	113
§21. 不可逆过程 近平衡过程热力学	119
A. 热传导和局域熵产生	119
B. 各向异性体中的热传导和 Onsager 互易关系	121
C. 热电现象	122
D. 内部变换	127
E. 一般关系	128
F. 不可逆过程热力学理论的局限性	130
第 3 章 气体动力学基本理论	131
§22. 理想气体状态方程	131
§23. Maxwell 速度分布	135
A. 单原子气体的 Maxwell 分布 1860 年的证明	135
B. 数值和实验结果	138
C. 能量分布总评 Boltzmann 因子	139
§24. Brown 运动	140
§25. 对顺磁质的统计讨论	145
A. 经典的 Langevin 函数	146
B. 借助于量子力学对 Langevin 函数的修正	148
§26. van der Waals 方程中常量的统计意义	149
A. 分子体积与常量 b	149

B. van der Waals 内聚力与常量 a	151
§27. 平均自由程问题	153
A. 一个特殊情况下平均自由程的计算	153
B. 黏度	154
C. 热导率	157
D. 一些与平均自由程概念相关问题的总评	159
第 4 章 统计学的普遍理论: 组合方法	161
§28. Liouville 定理, Γ -空间和 μ -空间	161
A. 多维 Γ -空间 (相空间)	161
B. Liouville 定理	162
C. 理想气体的等概率	163
§29. Boltzmann 原理	165
A. 用排列来量化热力学概率	166
B. 用最大概率来度量熵	168
C. 元胞的合并	170
§30. 与热力学对照	171
A. 等容过程	171
B. 无外力情况下气体经历的一般过程	172
C. 外力场中的气体; Boltzmann 因子	173
D. Maxwell-Boltzmann 速度分布律	174
E. 混合气体	175
§31. 比热和刚性分子的能量	176
A. 单原子分子气体	176
B. 气体组成和双原子分子	178
C. 多原子分子气体和 Kelvin 的乌云	181
§32. 考虑分子振动的比热和固体的比热	182
A. 双原子分子	182
B. 多原子分子气体	183
C. 固体和 Dulong-Petit 规则	183
§33. 振动能量的量子化	183
A. 线性振子	184
B. 固体	186
C. 推广到任意量子态	187
§34. 转动能量的量子化	188
§35. 关于辐射理论和固体的补充材料	191

A. 自然振动方法	191
B. 固体比热的 Debye 理论	192
§36. Γ -空间的配分函数	193
A. Gibbs 条件	194
B. 与 Boltzmann 方法的关系	195
C. 量子效应引起的修正	197
D. Gibbs 假设分析	199
§37. 量子统计基础	200
A. 全同粒子的量子统计	200
B. Darwin 和 Fowler 的方法	201
C. Bose-Einstein 和 Fermi-Dirac 分布	203
D. 鞍点方法	204
§38. 简并气体	207
A. Bose-Einstein 和 Fermi-Dirac 分布	207
B. 气体简并度	210
C. 高简并度的 Bose-Einstein 气体	212
§39. 金属电子气	215
A. Drude 理论的评价性介绍	215
B. 完全简并 Fermi-Dirac 气体	216
C. 近完全简并	219
D. 特殊问题	220
§40. 方均涨落	223
第 5 章 精确的气体动力学的概述	229
§41. Maxwell-Boltzmann 碰撞理论	229
A. 气体动力学中态的描述	229
B. f 随时间的变化	231
C. 弹性碰撞定律	232
D. Boltzmann 的碰撞积分	234
E. Boltzmann 关于分子混沌的假设	235
§42. H-定理和 Maxwell 分布	236
A. H-定理	236
B. Maxwell 分布	239
C. 平衡态分布	241
§43. 流体动力学的基本公式	242
A. 分布函数的级数展开	242

B. Maxwell 的输运方程	244
C. 质量守恒	246
D. 动量守恒	247
E. 能量守恒	248
F. 熵定理	251
§44. 关于碰撞方程的积分	253
A. 利用矩方程积分	253
B. 矩方程的变换	254
C. 碰撞矩的评估	256
D. 黏度和导热系数	257
§45. 电导率和 Wiedemann-Franz 定律	261
A. 金属中电子的碰撞和传输方程	261
B. 碰撞方程的近似解	263
C. 电流和能量通量	266
D. 欧姆定律	267
E. 导热系数和绝对热电动势	268
F. Wiedemann-Franz 定律	269
习题	271
习题解答	279