

面向21世纪课程教材

新概念物理教程

热学

赵凯华 罗蔚茵



高等教育出版社

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

新概念物理教程

热 学

赵凯华 罗蔚茵



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112号

内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向21世纪课程教材和教育部理科物理学和天文学“九五”规划教材。本书的编写和改革思路与《力学》卷是一脉相承的,即根据现代科学发展的需求审视了热学传统教学内容,并向当代前沿开设了窗口和接口,特别在用普通物理的风格讲解量子统计分布上作了一些改革的尝试。本书共分热学基本概念和物质聚集态、热平衡态的统计分布、热力学第一定律、热力学第二定律、非平衡过程等五章和三个数学附录。

本书可作为高等学校物理类专业的教科书或参考书,特别适合物理学基础人才培养基地选用。对于其他理工科专业,本书也是教师备课时很好的参考书和优秀学生的辅助读物。

图书在版编目(CIP)数据

新概念物理教程:热学/赵凯华,罗蔚茵编著.

北京:高等教育出版社,1998(1999重印)

ISBN 7-04-006677-7

I. 新… II. ①赵… ②罗… III. ①物理学-高等学校-教材 ②热学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第01961号

新概念物理教程 热学

赵凯华 罗蔚茵

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 1998年2月第1版

印 张 21.75

印 次 1999年9月第3次印刷

字 数 370 000

定 价 22.60元

插 页 4

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究



面向 21 世纪课程教材



普通高等教育“九五”
国家级重点教材

作者简介



赵凯华 北京大学物理系教授,曾任北京大学物理系主任,现任国家教委高等学校理科物理学与天文学教学指导委员会委员、基础物理教学指导组组长,中国物理学会副理事长、教学委员会主任。科研方向为等离子体理论和非线性物理。主要著作有《电磁学》(与陈熙谋合编,高等教育出版社出版,1987年获全国第一届优秀教材优秀奖)、《光学》(与钟锡华合编,北京大学出版社出版,1987年获全国第一届优秀教材优秀奖)、《定性与半定量物理学》(高等教育出版社出版,1995年获国家教委第三届优秀教材一等奖),等。



罗蔚茵 中山大学物理系教授,曾任中山大学物理系副主任,现任中山大学高等继续教育学院院长,国家教委高等学校理科物理学与天文学教学指导委员会委员、基础物理教学指导组成员,中国物理学会教学委员会副主任。主要著作有《力学简明教程》(中山大学出版社出版,1992年获国家教委第二届优秀教材二等奖)、《热学基础》(与许煜寰合编,中山大学出版社出版),等。

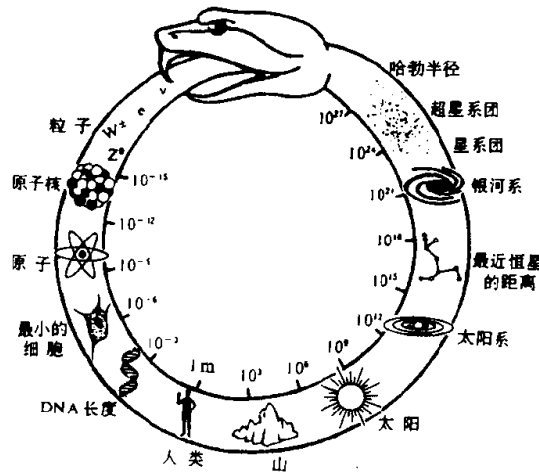
合作项目:

“《新概念力学》面向 21 世纪教学内容和课程体系改革”

1997 年获国家级教学成果奖一等奖

“新概念物理”

1998 年获国家教育委员会科学技术进步奖一等奖



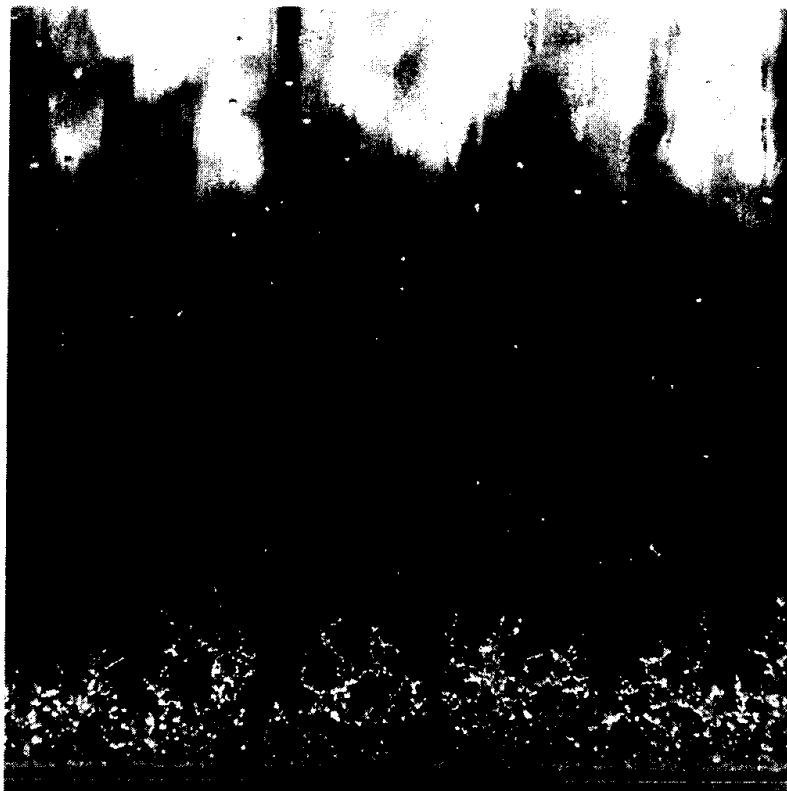
物理学是探讨物质基本结构和运动基本规律的学科。从研究对象的空间尺度来看,大小至少跨越了42个数量级。

人类是认识自然界的主体,我们以自身的大小为尺度规定了长度的基本单位——米(meter)。与此尺度相当的研究对象为宏观物体,以伽利略为标志,物理学的研究是从这个层次上开始的,即所谓宏观物理学。上次世纪之交物理学家开始深入到物质的分子、原子层次($10^{-9} \sim 10^{-10} \text{m}$),在这个尺度上物质运动服从的规律与宏观物体有本质的区别,物理学家把分子、原子,以及后来发现更深层次的物质客体(各种粒子,如原子核、质子、中子、电子、中微子、夸克)称为微观物体。微观物理学的前沿是高能或粒子物理学,研究对象的尺度在 10^{-15}m 以下,是物理学里的带头学科。本世纪在这学科里的辉煌成就,是60年代以来逐步形成了粒子物理的标准模型。

近年来,由于材料科学的进步,在介于宏观和微观的尺度之间发展出研究宏观量子现象的一门新兴的学科——介观物理学。此外,生命的物质基础是生物大分子,如蛋白质、DNA,其中包含的原子数达 $10^4 \sim 10^5$ 之多,如果把缠绕盘旋的分子链拉直,长度可达 10^{-4}m 的数量级。细胞是生命的基本单位,直径一般在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{m}$ 之间,最小的也至少有 10^{-7}m 的数量级。从物理学的角度看,这是目前最活跃的交叉学科——生物物理学研究领域。

现在把目光转向大尺度。离我们最近的研究对象是山川地体、大气海洋,尺度的数量级在 $10^3 \sim 10^7 \text{m}$ 范围内,从物理学的角度看,属地球物理学的领域。扩大到日月星辰,属天文学和天体物理学范围,从个别天到太阳系、银河系,从星系团到超星系团,尺度横跨了十几个数量级。物理学最大的研究对象是整个宇宙,最远观察极限是哈勃半径,尺度达 $10^{26} \sim 10^{27} \text{m}$ 的数量级。宇宙学实际上是物理学的一个分支,当代宇宙学的前沿课题是宇宙的起源和演化,本世纪后半叶这方面的巨大成就是建立了大爆炸标准宇宙模型。这模型宣称,宇宙是在一百多亿年前的一次大爆炸中诞生的,开初物质的密度和温度都极高,那时既没有原子和分子,更谈不到恒星与星系,有的只是极高温的热辐射和在其中隐现的高能粒子。于是,早期的宇宙成了粒子物理学研究的对象。粒子物理学的主要实验手段是加速器,但加速器能量的提高受到财力、物力和社会等因素的限制。粒子物理学家也希望从宇宙早期演化的观测中获得一些信息和证据来检验极高能量下的粒子理论。就这样,物理学中研究最大对象和最小对象的两个分支——宇宙学和粒子物理学,竟奇妙地衔接在一起,结成为密不可分的姊妹学科,犹如一条怪蟒咬住自己的尾巴。

《新概念物理教程·热学》封面插图说明：



顷刻秋霜，逡巡冬雪，天地造化，难晓难参。窗外丛林犹绿，却雨雪交加，寒意料峭。

古人注意到雪花独六出，迥别于五出的凡花俗草。虽然雪花都具有六度旋转对称性，人们也曾为世界上没有两片相同的雪花而赞叹。眼前我们看到的是另一番景象：晶莹剔透的团粒在玻璃上堆垒集聚，形成一簇簇似同非同的植株，亚赛婷婷玉女婆娑起舞，婀娜多姿。这是什么几何图形？一位数学出身的物理学家告诉我们，它叫“分形”。大自然通过物态相变、扩散和聚集，把这种美丽的几何图形塑造了出来。

责任编辑	奚静平
封面设计	季思九
责任绘图	孟庆祥
版式设计	赵凯华
责任校对	奚静平
责任印制	陈伟光

序

本书是《新概念物理教程》中继《力学》卷^①之后的第二卷,编写和改革的思路是一脉相承的,但根据热学教学内容的特点有所发展和不尽相同的侧重。现将要点分述如下。

一、按照科学发展的进程和需求,强化熵的教学

热力学第一定律和热力学第二定律从来就是热学中最基本的两条定律,前者是能量的规律,后者是熵的法则。“能”和“熵”两个概念哪个更为重要?随着时间的推移,情况正在变化。传统的看法以为“能”是宇宙的女主人,“熵”是她的影子。后来有人提出不同的看法:“在自然过程的庞大工厂里,熵原理起着经理的作用,因为它规定整个企业的经营方式和方法,而能原理仅仅充当簿记,平衡贷方和借方。”(1938 R. Emden 语)

热力学定律和达尔文的进化论同属 19 世纪科学上最伟大的发现,然而表面上看起来二者似乎相互抵触。本世纪 40 年代薛定谔提出了生命“赖负熵为生”的名言,60 年代普里高津(I. Prigogine)建立了耗散结构理论,热力学第二定律与进化论的矛盾被澄清了。从物理学走向生命科学,越发显示出“熵”这个概念的重要性。

1948 年电气工程师香农(C. E. Shannon)创立了信息论,将信息量与负熵联系起来。历史上以热机发展为主导的第一次工业革命是能量的革命,当前以信息技术为主导的第二次工业革命可以说是熵的革命。现在“熵”这个名词已超出自然科学和工程技术的领域,进入人文科学。

近年来国际上一些物理教育改革家企图把物理学归结为少数几个基本概念,尽管各家之言见仁见智,但无例外地都把“熵”(或其等价的说法,如能的退降)列为一条。但在传统的普物教材中“熵”介绍得很简略,有些为非物理专业开设的课程中“熵”已被删除。这是违反科技进步发展的时代潮流的。在本书中我们从微观(玻耳兹曼熵)到宏观(克劳修斯熵),从历史到前沿,从物理学到化学、环境与生命科学,多方面地介绍了“熵”的概念。特别是我们认为,只有通过应用才能加深对一个概念的理解。热力学第二定律的正宗应用是讨论热平衡的条件和判据。因为最常见的系统不是孤立系,而是在一定外部约束条件下(如定温、定体或定压)的热力学系统,我们还需把“熵”的概念延伸到“自由能”的概念才好应用。讲熵而不讲自由能,实属功

① 该书以后在本书中引用时简称《新概念力学》。

亏一篑。引入“自由能”并运用到热平衡问题上,可使学生反过来加深对“熵”概念的理解,在这一点上本书的两位作者各自都曾有过一些教学实践。

有所取就要有所舍。过去在普物的热学课中常常热衷于讨论热机或一般循环的效率问题。近年来国内外物理教育界有识之士都认识到,循环效率问题不过是引入熵定理的一根拐杖,它本身早已不该是物理课程的重点。最好能想办法绕过它,至少需要淡化它。本书(特别是在习题中)不再对各式各样循环的效率作过多的讨论。^①

二、运用定性半定量的方法,以普通物理的风格引进量子统计的概念

从提出“普通物理现代化”的那天起,“现代物理普物化”的问题就提上了教改的日程。现代物理硕果累累,琳琅满目,教师领着学生浏览一下,固然对开阔他们的眼界,提高他们学物理的积极性不无好处。然而,作为一门物理课,重要的是让学生对这些成就的物理本质有起码的了解,这就涉及近代物理的理论基础——相对论和量子力学了。“现代物理普物化”的标志是用普物的风格讲好相对论和量子力学。

所谓“普物风格”,我们的理解是讲授尽量避免艰深和复杂的数学,突出物理本质,树立鲜明的物理图象。我们在《新概念力学》里,继狭义相对论之后,从等效原理出发介绍了广义相对论的一些基本内容,避免了黎曼几何与时空度规等数学语言。本卷《热学》遇到的是量子统计问题。实现这个问题的普物化是有相当难度的,经过几次修改,我们现在的处理方案如下。

只讨论理想气体。简并理想气体的量子性主要体现在能级的离散性和粒子之间的量子关联上。学生对前者并不太难接受,我们反而可以利用离散性把复杂的多重积分为求和,在无需求出计算结果的情况下,求和表达式的简洁性对突出物理本质是有利的。因而我们利用了离散形式的玻耳兹曼动理方程导出理想气体的 MB、BE、FD 三种统计分布和 H 定理来,突出体现了它们是粒子在不断碰撞(跃迁)的过程中达到的动态平衡。粒子间的量子关联影响着跃迁的概率,从而决定着统计分布的具体形式。这只能通过比喻让学生去理解了。

导出了统计分布函数,是讨论物理问题的开始,而不是终结。量子理想

① 本书第一次印刷定稿前夕,笔者有幸看到清华大学李复教授绕过卡诺定理导出克劳修斯不等式的讲法,认为这是一个有益的尝试,并采纳了他的讲法。第二次印刷时,考虑到直接由热力学第二定律推演出卡诺定理,对突出热力学温标的普适性更加有利,故在讲法上作了一些调整。

气体有别于经典理想气体的崭新特征,是它们的简并性强烈地依赖于它们的密度。找出描述量子气体简并性的参量(如费米能、简并温度和简并压)与密度的函数关系,在将理论应用到实际问题时是十分必要的。反映这种函数关系的信息本来已包含在统计分布的表达式中,在理论物理课程中只需做进一步的数学推演即可。但普物风格的讲法不宜这样处理。我们从海森伯不确定度关系出发,采用了定性和半定量的方法,导出了简并温度依赖密度的函数关系,最后只剩下一个无量纲的数值系数不能准确确定。如前所述,简并性源于粒子间的量子关联,而量子关联是微观客体波粒二象性的体现,后者正是海森伯不确定性原理的本质。所以我们采用的这种定性半定量的讲法,比按部就班的数学推演能更好地反映出事物的物理本质来。

有了上述基础,本书就可能向读者较为深入地展示金属中的自由电子气、白矮星与中子星、液氮的 λ 相变与超流、光子气和大爆炸热宇宙模型等前沿课题了。

三、体现当前热学与其它学科的相互渗透,增添一些与化学等有关的知识 和内容

20世纪50年代以后,现代科学在不断分化的基础上,又高度融合起来,形成诸多新兴交叉学科。化学与物理学结合,产生量子化学、分子反应动力学、固体表面催化、功能材料等协作领域;生物学与物理学结合,产生分子生物学、量子生物学、遗传密码与蛋白质合成等交叉学科。物理学与其它学科杂交,受惠是双向的。物理学的进展激励着其它学科新方向的研究,反过来,其它学科中的新问题向物理学提出了意义深远的挑战。

与科学进步的这种新趋势相适应,我们的物理教学也应作必要的调整。就《热学》范围看,主要应增添一些与化学有关的知识 and 内容。在本书中这类内容有化学键和热化学的基本原理。

本书讲化学键的特色是力图将它与物性和物质结构联系起来,例如讲金属键时与金属的延展性及其晶体的密堆结构联系起来,讲离子键时与离子晶体的脆性联系起来,讲碳的两种共价键时与其三种同素异形体金刚石、石墨和球烯联系起来,讲氢键时与水的一系列反常特性,如 4°C 以下和结冰时冷胀热缩、高热容、高汽化热等联系起来,并由此进一步联系到水在生命和环境系统中无可替代的作用,等等。

热化学,或者叫物理化学,本是化学系里的一门重要基础课,它的内容是用热力学方法讨论化学反应和化学平衡问题。目前这门课物理系的学生是不学的。本书仅结合混合理想气体模型介绍了该课程最基本的概念:如反应焓与生成焓、标准规定熵与标准反应熵、混合气体的化学平衡、化学反应

的熵产生与亲合势等。在学科交叉的潮流中,这些知识对物理系的学生也变得愈来愈重要。

此外,非线性科学和远离平衡态热力学的新观念对生命和生态环境问题的理解有着特殊重要的意义,本书中增添了分形、耗散结构等内容的介绍,为打开有关方面的窗口做好准备。

四、注重物性知识的背景,对热学教材的体系作适当的调整

传统上普通物理热学教材都把气液固三态和它们之间的相变放在全书的最后,内容多半是描述性的,只个别的地方用到书中前面的原理。我们把这部分内容搬到全书的最前面,作为第一章。这一章以分子运动和分子力的抗衡为统一的线索,贯穿分子动能和相互作用势能数量级的估计和对比。这样调整的好处是为下面讲述分子运动论和热力学原理时提供了较好的物性知识背景,在例题和习题中都可引用,避免了“有理无物”之嫌。

* * * * *

在作者们共同拟定了全书的构思后,罗蔚茵提供了第三、四章的初稿,赵凯华作了修改,补充了第四章的 §4 和 §6 的理论部分;本书其余部分皆由赵执笔,全部书稿经多次交换意见后,由赵统一定稿。本卷成书过程中最艰苦的章节是量子统计部分,前后曾三易其稿。每稿甫成,即请北京大学物理系 95 级的学生於海涛、罗迟雁等阅读,让他们从学生的角度提出自己的感觉和想法。这种反馈信息成为我们修改下一稿的主要依据。中山大学物理系的黎培进博士非常仔细地阅读了本书的初稿,提供了十分详尽的勘误表。在审稿过程中北京大学的包科达教授、南京大学的秦允豪教授等对本书提了一些宝贵的意见。对上面提及的所有人,我们在此表示衷心的感谢。

作者自信本卷改革的力度超过了《力学》卷。但改得对不对、好不好?有待海内外同行的评说和指正。我们诚恳地祈望广大教师和读者不吝赐教。

作者

1997 年霜叶时节

1998 年酷暑修订

目 录

第一章 热学基本概念和物质聚集态	1
§ 1. 温度	1
1.1 温度计和温标	1
1.2 热力学第零定律	3
1.3 理想气体状态方程和理想气体温标	5
1.4 温度大观	9
§ 2. 热量及其本质	9
2.1 量热学 热质说与热动说	9
2.2 原子论	14
2.3 分子力与分子运动	18
§ 3. 物质聚集态随状态参量的转化与共存	21
3.1 闭合系的 $p-V-T$ 曲面	21
3.2 等温线 多相共存	22
3.3 $p-T$ 三相图	25
§ 4. 气 体	26
4.1 气体的微观模型和温度的微观意义	26
4.2 理想气体压强公式	28
4.3 理想气体定律的推导	30
4.4 实际气体	32
§ 5. 固 体	35
5.1 晶体结构	35
5.2 非晶态与准晶态	39
5.3 固体中分子的热运动	42
§ 6. 化学键	43
6.1 离子键	43
6.2 共价键	44
6.3 金属键	48
6.4 范德瓦耳斯键	49
6.5 氢键	50
§ 7. 液 体	51
7.1 液体 —— 稠密的实际气体	51
7.2 液体 —— 濒临瓦解的晶格	55
7.3 表面张力的由来	56

本章提要	58
思考题	60
习题	62
第二章 热平衡态的统计分布律	66
§ 1. 麦克斯韦速度分布律	66
1.1 统计规律与分布函数的概念	66
1.2 速度空间与速度分布函数	68
1.3 麦克斯韦分布律的导出	71
1.4 方均根速率	73
1.5 平均速率	77
1.6 泻流速率	78
§ 2. 玻耳兹曼密度分布	79
2.1 等温气压公式	79
2.2 玻耳兹曼密度分布律	81
2.3 麦克斯韦-玻耳兹曼能量分布律	82
§ 3. 能均分定理与热容量	83
3.1 自由度	83
3.2 能量按自由度均分定理	84
3.3 理想气体的热容量	86
3.4 固体的热容量	88
§ 4. 量子气体中粒子按能级的分布	89
4.1 能级与量子态	89
4.2 麦克斯韦-玻耳兹曼分布	89
4.3 H 定理	93
4.4 能级的离散性对热容量的影响	94
4.5 玻色-爱因斯坦分布和费米-狄拉克分布	97
§ 5. 量子理想气体的性质	99
5.1 粒子之间的量子关联与量子简并	99
5.2 简并费米-狄拉克气体的定性讨论	101
5.3 简并玻色-爱因斯坦气体的定性讨论	103
5.4 量子态密度与对量子态求和	106
5.5 简并量子理想气体特性的进一步研究	107
§ 6. 费米气体实例	108
6.1 金属中的自由电子气	108
6.2 白矮星	109
6.3 中子星	110

§ 7. 玻色气体实例	113
7.1 液氦的 λ 相变	113
7.2 光子气体	115
§ 8. 宏观态的概率和熵	117
8.1 宏观态的概率	117
8.2 玻耳兹曼熵关系式	121
8.3 信息熵与遗传密码	122
本章提要	125
思考题	128
习题	131
第三章 热力学第一定律	135
§ 1. 从能量守恒到热力学第一定律	135
1.1 能量守恒定律的建立	135
1.2 广义功	136
1.3 内能是个态函数	137
1.4 热力学第一定律的数学表述	138
1.5 准静态过程	139
§ 2. 气体的热容量 内能和焓	141
2.1 热容量 焓	141
2.2 焦耳实验及其改进	143
2.3 焦耳-汤姆孙效应	145
2.4 节流膨胀液化气体	148
2.5 化学反应热和生成焓	149
§ 3. 热力学第一定律对理想气体的应用	152
3.1 等温过程	152
3.2 绝热过程	153
3.3 大气的垂直温度梯度	157
3.4 多方过程	161
§ 4. 循环过程和卡诺循环	163
4.1 循环过程	163
4.2 理想气体卡诺循环及其效率	166
本章提要	169
思考题	171
习题	173
第四章 热力学第二定律	178
§ 1. 热力学第二定律的表述和卡诺定理	178

1.1 自然现象的不可逆性	178
1.2 热力学第二定律的语言表述	178
1.3 卡诺定理	180
1.4 热力学温标	182
1.5 历史性的回顾	184
§ 2. 卡诺定理的应用	186
2.1 内能和状态方程的关系	186
2.2 克拉珀龙方程及其在相变问题上的应用	188
§ 3. 克劳修斯不等式与熵定理	190
3.1 热力学第二定律的数学表述——克劳修斯不等式	190
3.2 熵是态函数	192
3.3 熵的计算	194
3.4 熵增加原理	199
3.5 热力学熵与玻耳兹曼熵的统一	203
§ 4. 关于热力学第二定律的若干诘难和佯谬	206
4.1 洛施密特的诘难	206
4.2 策尔梅洛的诘难	207
4.3 吉布斯佯谬	207
4.4 麦克斯韦妖与信息	208
§ 5. 热平衡与自由能	208
5.1 孤立系的热平衡判据	208
5.2 定温定体条件下的热平衡判据 亥姆霍兹自由能	209
5.3 定温定压条件下的热平衡判据 吉布斯自由能	210
5.4 物体系内各部分之间的平衡条件	210
5.5 范德瓦耳斯气液相平衡	214
5.6 混合气体的化学平衡	219
§ 6. 连续相变 超流	223
6.1 有序-无序转变	223
6.2 朗道二级相变理论	224
6.3 液氦的超流现象	226
6.4 唯象的二流体模型	228
6.5 准粒子(元激发)的概念	229
本章提要	231
思考题	234
习题	236
第五章 非平衡过程	242

§ 1. 近平衡态弛豫和输运过程	242
1.1 经验定律	242
1.2 平均自由程与碰撞频率	246
1.3 分子自由程的概率分布	248
1.4 从量纲看输运系数	249
1.5 初级气体动理论	249
1.6 与实验的比较	252
1.7 稀薄气体中的输运过程	253
§ 2. 涨落 关联 布朗运动	254
2.1 涨落	254
2.2 临界点的涨落	257
2.3 布朗运动	258
2.4 时间关联与涨落回归假说	260
§ 3. 分形	263
3.1 分形与分形维数	263
3.2 布朗粒子轨迹的分形维数	266
3.3 分形生长	269
3.4 逾渗	271
§ 4. 线性不可逆过程热力学	275
4.1 局域热平衡概念	275
4.2 熵流与熵产生	275
4.3 输运过程的熵产生	275
4.4 化学反应的熵产生	277
4.5 广义流和广义力	280
4.6 最小熵产生原理	281
4.7 线性区耗散结构之不可能	281
§ 5. 耗散结构	282
5.1 化学振荡与螺旋波	282
5.2 图灵斑图	284
5.3 贝纳尔对流	285
5.4 耗散结构的特征	286
§ 6. 生命与生态环境	287
6.1 生命的热力学基础	287
6.2 地球生态环境的辐射收支与负熵流	289
6.3 地球表面的温度与温室效应	292
6.4 水是生命之源	293
6.5 盖娅假说与新自然观	295