

面向21世纪课程教材

新概念物理教程

# 热学

(第二版)

赵凯华 罗蔚茵

# 新概念物理教程



高等教育出版社

面向 21 世纪课程教材

# 新概念物理教程

# 热学

(第二版)

赵凯华 罗蔚茵



高等教育出版社

## 内容简介

本书是在第一版的基础上,根据教学需要,结合读者使用此书的建议和意见,修订而成的。本书第一版是教育部“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;原书在结构上有较大的变化,在内容上有较大的更新,在用现代观点审视教学内容、向当代前沿开设窗口和接口、培养物理直觉能力等方面有较大的改革。这次修订保持了原书的上述特色,除订正了一些错误外,主要的修改在第二章中的量子统计分布。修订时删去一些太深的内容,更多地采用定性半定量的方法,突出物理图像。此外,书后还增补了习题答案。本书包括热学基本概念和物质聚集态、热平衡态的统计分布律、热力学第一定律、热力学第二定律、非平衡过程等五章和两个数学附录。

本书可作为高等学校物理类专业的教材或参考书,特别适合物理学基础人材培养基地选用。对于其它理工科专业,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. —2 版.  
北京:高等教育出版社,2005.11  
ISBN 7-04-017680-7

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(2005)第 108050 号

---

|      |                |      |                                                                   |
|------|----------------|------|-------------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社        | 购书热线 | 010-58581118                                                      |
| 社 址  | 北京市西城区德外大街 4 号 | 免费咨询 | 800-810-0598                                                      |
| 邮政编码 | 100011         | 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>         |
| 总 机  | 010-58581000   |      | <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>         |
| 经 销  | 北京蓝色畅想图书发行有限公司 | 网上订购 | <a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>       |
| 印 刷  | 北京外文印刷厂        |      | <a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a> |
| 开 本  | 787×960 1/16   | 版 次  | 1998 年 2 月第 1 版<br>2005 年 11 月第 2 版                               |
| 印 张  | 21             | 印 次  | 2005 年 11 月第 1 次印刷                                                |
| 字 数  | 360 000        | 定 价  | 24.80 元                                                           |

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 17680-00

## 第二版序

本书出版已经七年了。除了一般笔误和印刷错误外,本版作的主要修改在第二章中的量子统计分布。我们删去一些数学太难的部分,更多地采用定性半定量的方法,突出物理图像。此外,书后增补了习题答案。

作者感谢指出本书第一版中错误的所有教师和学生。

作者

2005年3月

# 序

本书是《新概念物理教程》中继《力学》卷之后的第二卷,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,它本身早已不应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。

## 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,树立鲜明的物理图像。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 $\lambda$ 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 $4^{\circ}\text{C}$ 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、标准规定焓与标准反应焓、混合气体的化学平衡、化学反应的焓产生与亲合势等。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出了一些宝贵的意见。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。

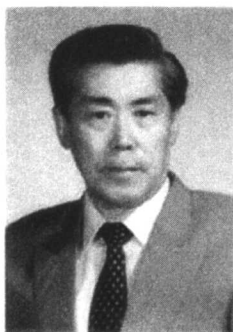
作者

1997 年霜叶时节

1998 年酷暑修订



## 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,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。他负责的“电磁学”被评为2003年度“国家精品课程”。



**罗蔚茵** 中山大学物理系教授,曾任中山大学物理系副主任、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

# 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 .....                 | 10 |
| 2.1 量热学 热质说与热动说 .....             | 10 |
| 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 .....                | 27 |
| 4.3 理想气体定律的推导 .....               | 29 |
| 4.4 实际气体 .....                    | 32 |
| § 5. 固体 .....                     | 34 |
| 5.1 晶体结构 .....                    | 34 |
| 5.2 非晶态与准晶态 .....                 | 38 |
| 5.3 固体中分子的热运动 .....               | 40 |
| § 6. 化学键 .....                    | 42 |
| 6.1 离子键 .....                     | 42 |
| 6.2 共价键 .....                     | 43 |
| 6.3 金属键 .....                     | 46 |
| 6.4 范德瓦耳斯键 .....                  | 48 |
| 6.5 氢键 .....                      | 48 |
| § 7. 液体 .....                     | 49 |
| 7.1 液体 —— 稠密的实际气体 .....           | 49 |
| 7.2 液体 —— 濒临瓦解的晶格 .....           | 53 |
| 7.3 表面张力的由来 .....                 | 54 |
| 本章提要 .....                        | 56 |

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| 思考题 .....                                 | 58        |
| 习 题 .....                                 | 60        |
| <b>第二章 热平衡态的统计分布律</b> .....               | <b>64</b> |
| § 1. 麦克斯韦速度分布律 .....                      | 64        |
| 1.1 统计规律与分布函数的概念 .....                    | 64        |
| 1.2 速度空间与速度分布函数 .....                     | 66        |
| 1.3 麦克斯韦分布律的导出 .....                      | 69        |
| 1.4 方均根速率 .....                           | 71        |
| 1.5 平均速率 .....                            | 75        |
| 1.6 泻流速率 .....                            | 76        |
| § 2. 玻耳兹曼密度分布 .....                       | 77        |
| 2.1 等温气压公式 .....                          | 77        |
| 2.2 玻耳兹曼密度分布律 .....                       | 78        |
| 2.3 麦克斯韦-玻耳兹曼能量分布律 .....                  | 79        |
| § 3. 能均分定理与热容量 .....                      | 80        |
| 3.1 自由度 .....                             | 80        |
| 3.2 能量按自由度均分定理 .....                      | 81        |
| 3.3 理想气体的热容量 .....                        | 83        |
| 3.4 固体的热容量 .....                          | 85        |
| § 4. 量子气体中粒子按能级的分布 .....                  | 86        |
| 4.1 能级与量子态 .....                          | 86        |
| 4.2 麦克斯韦-玻耳兹曼分布 .....                     | 86        |
| 4.3 $H$ 定理 .....                          | 90        |
| 4.4 能级的离散性对热容量的影响 .....                   | 91        |
| 4.5 玻色-爱因斯坦分布和费米-狄拉克分布 .....              | 93        |
| § 5. 费米气体 .....                           | 97        |
| 5.1 $T=0\text{K}$ 的简并费米气体 .....           | 97        |
| 5.2 $T>0\text{K}$ 的简并费米气体 .....           | 98        |
| 5.3 粒子之间的量子关联与量子简并 .....                  | 99        |
| 5.4 金属中的自由电子气 .....                       | 101       |
| 5.5 白矮星 .....                             | 102       |
| 5.6 中子星 .....                             | 103       |
| § 6. 玻色气体 .....                           | 106       |
| 6.1 简并玻色气体的化学势 玻色-爱因斯坦凝聚 .....            | 106       |
| 6.2 激发态上的粒子数与能量 .....                     | 108       |
| 6.3 从液氮的 $\lambda$ 相变到理想气体 BE 凝聚的实现 ..... | 109       |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 6.4 光子气体 .....             | 112        |
| § 7. 宏观态的概率和熵 .....        | 113        |
| 7.1 宏观态的概率 .....           | 113        |
| 7.2 玻耳兹曼熵关系式 .....         | 117        |
| 7.3 信息熵与遗传密码 .....         | 118        |
| 本章提要 .....                 | 121        |
| 思考题 .....                  | 124        |
| 习 题 .....                  | 127        |
| <b>第三章 热力学第一定律 .....</b>   | <b>130</b> |
| § 1. 从能量守恒到热力学第一定律 .....   | 130        |
| 1.1 能量守恒定律的建立 .....        | 130        |
| 1.2 广义功 .....              | 131        |
| 1.3 内能是个态函数 .....          | 132        |
| 1.4 热力学第一定律的数学表述 .....     | 133        |
| 1.5 准静态过程 .....            | 134        |
| § 2. 气体的热容量 内能和焓 .....     | 136        |
| 2.1 热容量 焓 .....            | 136        |
| 2.2 焦耳实验及其改进 .....         | 137        |
| 2.3 焦耳-汤姆孙效应 .....         | 139        |
| 2.4 节流膨胀液化气体 .....         | 142        |
| 2.5 化学反应热和生成焓 .....        | 143        |
| § 3. 热力学第一定律对理想气体的应用 ..... | 146        |
| 3.1 等温过程 .....             | 146        |
| 3.2 绝热过程 .....             | 147        |
| 3.3 大气的垂直温度梯度 .....        | 150        |
| 3.4 多方过程 .....             | 154        |
| § 4. 循环过程和卡诺循环 .....       | 157        |
| 4.1 循环过程 .....             | 157        |
| 4.2 理想气体卡诺循环及其效率 .....     | 159        |
| 本章提要 .....                 | 162        |
| 思考题 .....                  | 164        |
| 习 题 .....                  | 166        |
| <b>第四章 热力学第二定律 .....</b>   | <b>170</b> |
| § 1. 热力学第二定律的表述和卡诺定理 ..... | 170        |
| 1.1 自然现象的不可逆性 .....        | 170        |
| 1.2 热力学第二定律的语言表述 .....     | 170        |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 1.3 卡诺定理                  | 172        |
| 1.4 热力学温标                 | 173        |
| 1.5 历史性的回顾                | 176        |
| § 2. 卡诺定理的应用              | 177        |
| 2.1 内能和状态方程的关系            | 177        |
| 2.2 克拉珀龙方程及其在相变问题上的应用     | 179        |
| § 3. 克劳修斯不等式与熵定理          | 181        |
| 3.1 热力学第二定律的数学表述——克劳修斯不等式 | 181        |
| 3.2 熵是态函数                 | 183        |
| 3.3 熵的计算                  | 185        |
| 3.4 熵增加原理                 | 190        |
| 3.5 热力学熵与玻耳兹曼熵的统一         | 194        |
| § 4. 关于热力学第二定律的若干诘难和佯谬    | 196        |
| 4.1 洛施密特的诘难               | 196        |
| 4.2 策尔梅洛的诘难               | 197        |
| 4.3 吉布斯佯谬                 | 197        |
| 4.4 麦克斯韦妖与信息              | 198        |
| § 5. 热平衡与自由能              | 198        |
| 5.1 孤立系的热平衡判据             | 198        |
| 5.2 定温定体条件下的热平衡判据 亥姆霍兹自由能 | 199        |
| 5.3 定温定压条件下的热平衡判据 吉布斯自由能  | 200        |
| 5.4 物体系内各部分之间的平衡条件        | 201        |
| 5.5 范德瓦耳斯气液相平衡            | 204        |
| 5.6 混合气体的化学平衡             | 208        |
| § 6. 连续相变 超流              | 212        |
| 6.1 有序-无序转变               | 212        |
| 6.2 朗道二级相变理论              | 213        |
| 6.3 液氮的超流现象               | 215        |
| 6.4 唯象的二流体模型              | 217        |
| 6.5 准粒子(元激发)的概念           | 218        |
| 本章提要                      | 220        |
| 思考题                       | 222        |
| 习题                        | 224        |
| <b>第五章 非平衡过程</b>          | <b>230</b> |
| § 1. 近平衡态弛豫和输运过程          | 230        |
| 1.1 经验定律                  | 230        |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 1.2 平均自由程与碰撞频率      | 234 |
| 1.3 分子自由程的概率分布      | 236 |
| 1.4 从量纲看输运系数        | 237 |
| 1.5 初级气体动理论         | 237 |
| 1.6 与实验的比较          | 240 |
| 1.7 稀薄气体中的输运过程      | 241 |
| § 2. 涨落 关联 布朗运动     | 241 |
| 2.1 涨落              | 241 |
| 2.2 临界点的涨落          | 244 |
| 2.3 布朗运动            | 245 |
| 2.4 时间关联与涨落回归假说     | 246 |
| § 3. 分形             | 250 |
| 3.1 分形与分形维数         | 250 |
| 3.2 布朗粒子轨迹的分形维数     | 254 |
| 3.3 分形生长            | 256 |
| 3.4 逾渗              | 258 |
| § 4. 线性不可逆过程热力学     | 261 |
| 4.1 局域热平衡概念         | 261 |
| 4.2 嫡流与嫡产生          | 262 |
| 4.3 输运过程的嫡产生        | 262 |
| 4.4 化学反应的嫡产生        | 264 |
| 4.5 广义流和广义力         | 266 |
| 4.6 最小嫡产生原理         | 267 |
| 4.7 线性区耗散结构之不可能     | 268 |
| § 5. 耗散结构           | 268 |
| 5.1 化学振荡与螺旋波        | 268 |
| 5.2 图灵斑图            | 270 |
| 5.3 贝纳尔对流           | 271 |
| 5.4 耗散结构的特征         | 272 |
| § 6. 生命与生态环境        | 273 |
| 6.1 生命的热力学基础        | 273 |
| 6.2 地球生态环境的辐射收支与负嫡流 | 275 |
| 6.3 地球表面的温度与温室效应    | 277 |
| 6.4 水是生命之源          | 279 |
| 6.5 盖娅假说与新自然观       | 280 |
| 6.6 地外生命与地外文明问题     | 282 |
| § 7. 热宇宙模型          | 284 |

---

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 7.1 大爆炸和决定早期宇宙历史的两个判据 ..... | 284        |
| 7.2 几个里程碑 .....             | 285        |
| 7.3 微波背景辐射的发现 .....         | 287        |
| 7.4 膨胀宇宙中的辐射与物质的热力学 .....   | 289        |
| 7.5 膨胀宇宙中的辐射与物质的动力学 .....   | 291        |
| 7.6 星系的形成 .....             | 292        |
| 7.7 热寂说的终结 .....            | 294        |
| 本章提要 .....                  | 295        |
| 思考题 .....                   | 298        |
| 习题 .....                    | 300        |
| <b>数学附录</b> .....           | <b>304</b> |
| A. 高斯积分 .....               | 304        |
| B. 误差函数 .....               | 305        |
| <b>习题答案</b> .....           | <b>306</b> |
| <b>索引</b> .....             | <b>310</b> |

# 第一章 热学基本概念和物质聚集态

我国古代传说,燧人氏钻木取火以化腥臊,奉为千古圣皇;古希腊神话,普罗米修斯(Prometheus)盗天火开罪于主神而泽惠天下,崇为世间英雄。在古代各民族的语言里,“火”与“热”几乎是同义语。热学这一门科学起源于人类对于热与冷现象本质的追求。由于史前人类已经发明了火,我们可以想象到,追求热与冷现象本质的企图可能是人类最初对自然界法则的追求之一。

热学中最核心的概念是“温度”,另一重要概念是“热量”。在科学史上长期以来这些基本概念是混淆不清的,“但是一经辨别清楚,就使得科学得到飞速的发展。”(爱因斯坦语<sup>①</sup>)。的确,这些概念都是相当深刻的,在本课里也不能一下子把问题说透彻。我们先对它们作些初步的介绍和分析,随着课程的进展,读者将会对这些概念有逐步深入的理解。

## § 1. 温度

### 1.1 温度计和温标

朴素的温度概念来自于日常生活,冷热的感觉靠身体触摸。南北朝贾思勰的《齐民要术》中谈:制酪的温度要“小暖于人体”,作豉则“令温如腋下为佳”,即人们自身的体温是衡量温度的标准。这种方法当然很不可靠,例如数九寒天在室外用手触摸铁器和木柄,则感前者比后者冷,其实二者的温度一样,感觉的不同是导热性能的差异造成的。测温需要有客观的手段。

除化学成分外,在物理方面影响物质性能的因素,恐怕莫过于温度了。热胀冷缩,蒸腾凝聚,乃至电阻的增减,焰色的变化,任何一种与温度有关的物理效应,原则上都可用来作为测温的手段。古人睹瓶水之冰释而识天下之寒暑,观炉火之纯青乃知金汁之可铸,可以说是客观测温方法的萌芽。

现在较公认的看法认为,温度计的发明者是伽利略。他取细长玻璃管一根,一端连有玻璃泡,另一端开口,倒插于盛有着色水的容器中(见图 1-1),



图 1-1 伽利略验温器

① 爱因斯坦、费尔德,《物理学的进化》,上海:上海科技出版社,1962,24。



由管中水柱的升降来表示“热度”(那时还没有温度的概念)。伽利略的装置(1659年)没有刻度,且与气压变化有关,很不精确,只能称做验温器,说不上是温度计。伽利略之后约180年内,经众多人的努力,出现了愈来愈完善的温度计,并创立了几种温标。建立一种温标(temperature scale)需要三个要素:测温物质、测温属性和固定标准点。一般说来此三要素都与物质的选择有关,故称经验温标。仅就固定标准点而言,早年建立而目前还在使用的温标有:

### (1) 华氏温标

单位是“华氏度”,记作 $^{\circ}\text{F}$ ,是从德国迁居荷兰的华伦海特(G. D. Fahrenheit)1714年建立的。他起初把盐水混合物的冰点定为0度,把人体的正常温度定为96度,后来又添了两个固定点,把无盐的冰水混合物的温度定为32度,把大气压下水的沸点定为212度。现今使用的华氏温标只保留后二者为标准点,在这样规定的温标里,人体正常温度较准确的数值是 $98.6^{\circ}\text{F}$ 。目前只有英美在工程界和日常生活中还保留华氏温标,除此之外较少有人使用了。

### (2) 摄氏温标

单位是“摄氏度”,记作 $^{\circ}\text{C}$ ,是瑞典天文学家摄尔修斯(A. Celsius)1742年建立的。他原来把水的冰点定为100度,沸点定为0度,这很不合人们的习惯。他的同事斯特雷默(M. Strömer)建议倒过来,把水的冰点定为0度,沸点定为100度,●这便是现在使用的摄氏温标。摄氏温标目前在生活和科技中使用得最普遍。国际单位制(SI)所规定的热力学温标中温度的单位为“开尔文”。现摄氏度已按热力学温标重新定义得与开尔文一致了(详见第四章1.4节)。

最初的温度计以酒精或水银为测温物质,选它们的热膨胀作为测温属性。水银温度计仍是目前在常温下最常使用的温度计。以气体为测温物质的温度计有两种:定体气体温度计(以压强为测温属性)和定压气体温度计(以体积为测温属性)。此外,金属的电阻温度计和温差电偶温度计适用于从低到高很宽的温度范围,在科学技术中有着广泛的应用。

设某经验温标所用的物质测温属性为 $X$ ,它在摄氏温标的固定点 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $100^{\circ}\text{C}$ 下的数值分别为 $X_0$ 和 $X_{100}$ ,在某个其它温度 $t$ 下其读数为 $X$ ,按线

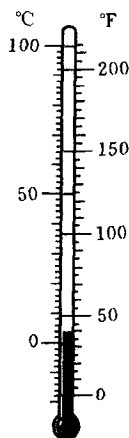


图 1-2  
华氏温标  
与摄氏温标  
的对比

● 均指在标准大气压下。