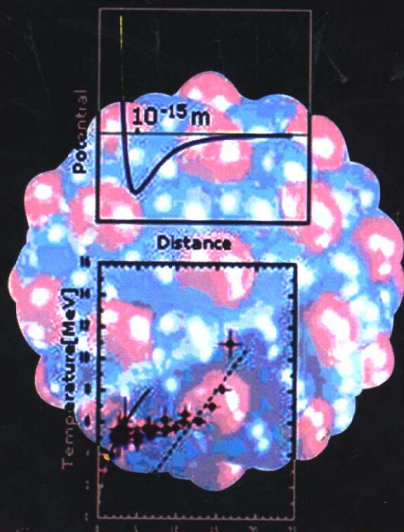
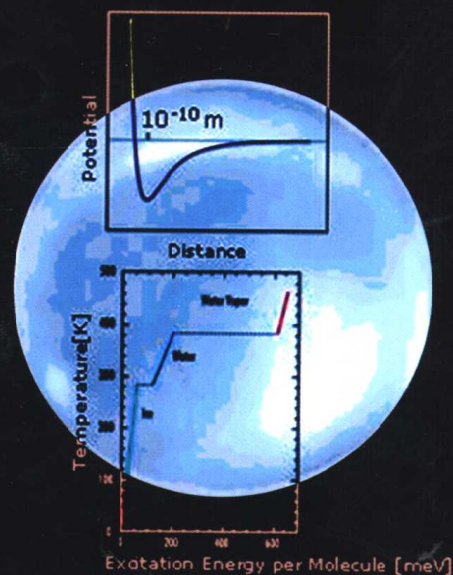


大学物理通用教程

主编 钟锡华 陈熙谋

热学

刘玉鑫 编著



北京大学出版社

大学物理通用教程

热学

刘玉鑫 编著

北京大学出版社

• 北 京 •

图书在版编目(CIP)数据

物理学通用教程. 热学/钟锡华, 陈熙谋主编; 刘玉鑫编著. —北京: 北京大学出版社, 2001. 2

ISBN 7-301-04590-5

I. 物… II. ①钟… ②陈… ③刘… 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(2000)第 76639 号

书 名: 大学物理通用教程——热学

著作责任者: 刘玉鑫 编著

责任编辑: 瞿 定

标准书号: ISBN 7-301-04590-5/O · 0474

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村 北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 邮购部 62752019

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

890 毫米×1240 毫米 A5 开本 7.75 印张 219 千字

2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 0001—4000

定 价: 13.00 元

序

概况与适用对象 这套大学物理通用教程分四册出版,即《力学》、《热学》、《电磁学》和《光学·近代物理》,共计约 130 万字. 原本是为化学系、生命科学系、力学系、数学系、地学系和计算机科学系等非物理专业的系科,所开设的物理学课程而编写的,其内容和分量大体上与一学年课程 140 学时数相匹配. 这套教程具有较大的通用性,也适用于工科、农医科和师范院校同类课程. 编写此书是希望非物理类专业的学生熟悉物理学、应用物理学,并对物理学原理是如何形成的有个较深入的理解,从而使他们意识到,物理学的学习在帮助他们提出和解决他们各自领域中的问题时所具有的价值. 为此,首先让我们大略地认识一下物理学.

物理学概述 物理学成为一门自然科学,这起始于伽利略-牛顿时代,经 350 多年的光辉历程发展到今天,物理学已经是一门宏大的有众多分支的基础科学. 这些分支是,经典力学、热学、热力学与经典统计力学、经典电磁学与经典电动力学、光学、狭义相对论与相对论力学、广义相对论与万有引力的基本理论、量子力学、量子电动力学、量子统计力学. 其中的每个分支均有自己的理论结构、概念体系和独特的数理方法. 将这些理论应用于研究不同层次的物质结构,又形成了原子物理学、原子核物理学、粒子物理学、凝聚态物理学和等离子体物理学,等等.

从而,我们可以概括地说,物理学研究物质存在的各种主要的基本形式,它们的性质、运动和转化,以及内部结构;从而认识这些结构的组元及其相互作用、运动和转化的基本规律. 与自然科学的其他门类相比较,物理学既是一门实验科学,一门定量科学,又是一门崇尚理性、注重抽象思维和逻辑推理的科学,一门富有想像力的科学. 正

是具有了这些综合品质,物理学在诸多自然科学门类中成为一门伟大的处于先导地位的科学。

在物理学基础性研究的过程中所形成和发展起来的基本概念、基本理论、基本实验方法和精密测试技术,越来越广泛地应用于其他学科,从而产生了一系列交叉学科,诸如化学物理、生物物理、大气物理、海洋物理、地球物理和天体物理,以及电子信息科学,等等。总之,物理学以及与其他学科的互动,极大地丰富了人类对物质世界的认识,极大地推动了科学技术的创新和革命,极大地促进了社会物质生产的繁荣昌盛和人类文明的进步。

编写方针 一本教材,在内容选取、知识结构和阐述方式上与作者的学识——科学观、知识观和教学思想,是密切相关的。我们在编写这套以非物理专业的学生为对象的大学物理通用教程时,着重地明确了以下几个认识,拟作编写方针。

1. 确定了以基本概念和规律、典型现象和应用为教程的主体内容;对主体内容的阐述应当是系统的,以合乎认识逻辑或科学逻辑的理论结构铺陈主体内容。知识结构,如同人体的筋骨和脉络,是知识更好地被接受、被传承和被应用的保证,是知识生命力之本源,是知识再创新之基础。知识的力量不仅取决于其本身价值的大小,更取决于它是否被传播,以及被传播的深度和广度。而决定知识被传播的深度和广度的首要因素,乃是知识的结构和表述。

2. 然而,本课程学时总数毕竟也仅有物理专业普通物理课程的40%,故降低教学要求是必然的出路。我们认为,降低要求应当主要体现在习题训练上,即习题的数量和难度要降低,对解题的熟练程度和技巧性要求要降低。降低教学要求也体现在简化或省略某些定理证明、理论推导和数学处理上。

3. 重点选择物理专业后继理论课程和近代物理课程中某些篇章于这套通用教程中,以使非物理专业的学生在将来应用物理学于本专业领域时,具有更强的理论背景,也使他们对物理学有更为全面和深刻的认识。《力学》中的哈密顿原理;《热学》中的经典统计和量子统计原理;《电磁学》中的电磁场理论应用于超导介质;《光学·近代物理》中的变换光学原理、相对论和量子力学,均系这一选择的结果。

4. 积极吸收现代物理学进展和学科发展前沿成果于这套通用教程中,以使它更具活力和现代气息.这在每册书中均有不少节段给予反映,在此恕不一一列举,留待每册书之作者前言中明细.值得提出的是,本教程对那些新进展新成果的介绍或论述是认真的,是充分尊重初学者的可接受性而恰当地引入和展开的.

应当写一套新的外系用的物理学教材,这在我们教研室已闲散地议论多年,终于在室主任舒幼生和王稼军的积极策划和热心推动下,得以起动并实现.北大出版社编辑周月梅和瞿定,多次同我们研讨编写方针和诸多事宜,使这套教材得以新面貌而适时面世.北大出版社曾于1989年前后,出版了一套非物理专业用普通物理学教材共四册,系我教研室包科达、胡望雨、励子伟和吴伟文等编著,它们在近十年的教学过程中发挥了很好的作用.现今这套通用教程,在编撰过程中作者充分重视并汲取前套教材的成功经验和学识.本套教材的总冠名,经多次议论最终赞赏陈秉乾教授的提议——大学物理通用教程.

一本教材,宛如一个人.初次见面,观其外表和容貌;接触多了,知其作风和性格;深入打交道,方能度其气质和品格.我们衷心期望使用这套教程的广大师生给予评论和批判.愿这套通用教程,迎着新世纪的曙光,伴你同行于科技创新的大道上,助年轻的朋友茁壮成长.

钟锡华 陈熙谋

2000年8月8日于北京大学物理系

作者前言

本书系统简明地介绍物质热运动的基本性质和规律以及热学研究方法. 全书内容共分六章, 第1章介绍热力学系统及其平衡态的基本概念、状态参量之间的关系及其微观本质. 第2章介绍热力学系统中微观粒子热运动的基本规律——按微观运动状态的统计分布. 第3章对偏离平衡态不大的系统, 即近平衡系统中的输运现象予以简要介绍, 并说明输运现象的微观本质. 第4章和第5章介绍热力学过程的基本规律——热力学的第一、第二和第三定律, 并对内能、熵、自由能、自由焓及化学势等物理量予以较深入的讨论. 第6章介绍相和相变的基本概念以及单元系中常见相变的现象、性质和规律. 全书内容和分量基本上与物理学B类课程约20学时相匹配.

本书极重视学生知识结构的建立和对学生分析问题、解决问题及创造性思维能力的培养. 编写中始终贯彻“崇尚结构、力求平实、承袭传统、注意扩展”的方针. 在内容的选取和安排、例题和习题的配置等方面, 既重视基本概念、规律、典型现象和应用等主体内容的系统介绍, 又注意知识的扩展和适度深化, 尤其是相关的目前活跃的前沿研究领域的发展和应用. 由于热学有其不同于其他学科分支的独特研究方法, 因此本书还注意热学的热力学和统计力学两种研究方法的介绍及其相辅相成之处, 以求使学生尽快适应热学的特点和学习方法. 由于时间仓促, 加上作者水平所限, 书中不妥和错误之处, 恳请读者批评指正.

在本书编写过程中, 本通用教程的主编钟锡华教授、陈熙谋教授和基础物理教学与研究中心主任舒幼生教授, 认真阅读了全部书稿, 并多次与作者进行深入具体的讨论, 提出了许多宝贵的修改意见, 中心的其他教员也提出了许多建议. 作者的研究生周

舰航和穆良柱以及物理系 2000 级贾宏博、任磊等同学也认真阅读了书稿,并从学生的角度提出意见和修改建议,还参与选编了部分习题及习题答案.作者对上述诸位表示衷心的感谢.

刘 玉 鑫

2001 年 2 月于北京大学物理系

大学物理通用教程

主编 钟锡华 陈熙谋

《热学》内 容 简 介

全套教程包括《力学》《热学》《电磁学》《光学·近代物理》。

《热学》包括平衡态与状态方程、分子动理论、热平衡态的统计分布规律、能量均分定理、近平衡态中的输运现象、热力学第一定律、热力学第二定律、热力学第三定律、单元系的复相平衡及相变等内容,共分六章,并配有 136 道习题。本书以热物理学的基本概念和规律、典型现象和应用为主体内容,尤其注意定律的推导和分析及概念、现象和规律的讨论,同时注意知识的适度扩展和深化,特别是基本规律在当代科学前沿中的应用,以及对学生在学习中的指导。本书具有崇尚结构、承袭传统、力求平实、注意扩展的特色,是一本通用教程,满足于理、工、农、医及师范院校的实际教学需要。

目 录

引言	(1)
第 1 章 热力学系统的平衡态及状态方程	(3)
1.1 物质结构的基本图像	(3)
1.2 热力学系统及其状态参量	(8)
1.3 平衡态的概念	(11)
1.4 温度与温标	(12)
1.5 状态方程的一般讨论	(19)
1.6 气体的状态方程	(23)
习题	(39)
第 2 章 热平衡态的统计分布律	(45)
2.1 统计规律与分布函数的概念	(45)
2.2 麦克斯韦分布律与麦克斯韦-玻尔兹曼分布律	(50)
2.3 能量均分定理与热容	(70)
2.4 微观粒子运动状态分布规律的一般讨论	(79)
习题	(87)
第 3 章 近平衡态中的输运过程	(90)
3.1 近平衡态中的输运过程及其宏观规律	(90)
3.2 气体分子的碰撞及其概率分布	(96)
3.3 气体中输运现象的微观解释	(103)
3.4 布朗运动及其引起的扩散	(109)
3.5 非平衡过程中的一些常见现象简介	(112)
习题	(118)
第 4 章 热力学第一定律	(121)
4.1 热力学过程和准静态过程	(121)
4.2 热力学第一定律	(124)
4.3 热力学第一定律在关于物体性质讨论中的应用	(131)
4.4 热力学第一定律对理想气体的应用	(137)
4.5 循环过程和卡诺循环	(151)

习题	(157)
第 5 章 热力学第二定律和第三定律	(164)
5.1 可逆过程与不可逆过程	(164)
5.2 热力学第二定律的两种语言表述	(168)
5.3 热力学第二定律的数学表述和熵增加原理	(171)
5.4 熵及热力学第二定律的统计意义	(181)
5.5 热力学第二定律的应用举例	(187)
5.6 自由能与吉布斯函数	(192)
5.7 热力学第三定律	(196)
习题	(197)
第 6 章 单元系的相变与复相平衡	(202)
6.1 相、相变及相平衡的概念	(202)
6.2 一些常见相变	(207)
6.3 单元系的复相平衡	(219)
习题	(226)
附录 常见高斯积分表	(228)
习题答案	(229)

引 言

热学是研究物质的热运动、热运动对物质宏观性质的影响及其与物质的其他运动形式之间转化规律的物理学分支. 热学的研究对象是由大量微观粒子组成的热力学系统. 鉴于此, 热学中常用的研究方法有宏观和微观两种. 所谓宏观方法就是从系统热现象的大量观测事实出发, 通过逻辑推理和演绎, 归纳总结出关于物质各种宏观性质之间的关系以及宏观过程进行的方向、限度的规律, 这种方法又称为热力学方法, 所得的结论称为热力学定律. 由于其基础是大量实验事实, 因此所得的结论是可靠的、普适的, 不论所研究的系统是天文的、化学的、生物的或其他的, 也不论其涉及的现象是力学的、电磁的、天体的或其他的, 只要与热运动有关就应遵循热力学规律. 然而, 这种方法不能揭示宏观规律的微观本质. 所谓微观方法, 也称分子动理论(Kinetic theory of molecular)方法或统计力学方法, 是从系统由大量微观粒子组成的前提出发, 根据一些微观结构知识, 把宏观性质视为微观粒子热运动的统计平均效果, 运用统计的方法, 找出宏观量与微观量的关系, 确定宏观规律的本质. 由于目前人们对微观的认识尚不很深入细致, 有关微观结构的知识通常是模型假设, 因此, 尽管所得结论较深刻地揭示本质, 但是模型相关的. 比较这两种研究方法可知, 宏观方法和微观方法分别从两个不同的角度研究物质的热运动性质和规律, 它们彼此密切联系, 相辅相成, 使热学成为联系微观世界与宏观世界的一座桥梁.

根据热物理学研究方法的不同, 通常将之分为热力学和统计力学两部分. 作为热物理学的基础, 本书注意热学的两种研究方法及其相辅相成之处的介绍. 在编写中, 按照“崇尚结构、力求平实、承袭传统、注意扩展”的方针, 加强了知识结构的系统性和严谨性的介绍. 例如, 对热力学系统的组成, 强调不仅限于分子、原子层次, 也包含更深入更微观的层次以及更大的团簇、大分子层次; 对基本概念、定律等,

既加强了其推导过程 and 对其正确性的检验、论证等内容的介绍,又进行了较广泛深入的分析讨论和引申;对典型现象及应用实例等,既加强对常见现象和实例的深入分析和讨论,又适当引入了一些当今活跃的相关的前沿研究领域的发展和应用;既适度扩展、深化了知识,又为加强学生分析问题、解决问题和创造性思维能力的训练和培养提供了较丰富的材料和广阔的空间. 希望本书能对新世纪大学生的学习、成长和事业发展有较大的帮助.



热力学系统的平衡态 及状态方程

- 1.1 物质结构的基本图像
- 1.2 热力学系统及其状态参量
- 1.3 平衡态的概念
- 1.4 温度与温标
- 1.5 状态方程的一般讨论
- 1.6 气体的状态方程

1.1 物质结构的基本图像

- 物质由分子、原子等微观粒子组成
- 物质分子处于不停顿的无规则运动状态
- 分子之间存在相互作用

● 物质由分子、原子等微观粒子组成

宇宙广袤,生灵万物,千姿百态,种类繁多,它们在构成上是否有相同之处呢?无论在我国,还是在西方,自古就有物质由最小基本单元构成的朴素原子论学说和“一尺之捶,日取其半,万世不竭”的无限可分学说,并且存在激烈的争论.到19世纪初,英国科学家道尔顿(J. Dalton)发现一种物质和另一种物质化合形成其他物质时,它们的质量总成简单的整数比的关系.据此,他提出:物质都由原子组成,不同物质的原子的质量有简单整数比的关系.这样就把经典的原子论提高到了一个新的高度.化学家们还根据可以利用化学方法使化合物分解,但不能利用化学方法使单质分解的实验事实,提出化合物由分子(molecular)组成、分子由原子(atom)组成、原子不能被任何化学手段分割或改变的观点.虽然在19世纪物质结构的原子分子论得到公认,但由于没有直接的证据证明原子分子的真实性的,原子分

子一直被看作是为描述问题方便而臆想出来的抽象概念. 到 20 世纪初, 关于分子无规则运动——布朗运动的理论建立并得到实验检验之后, 才真正确立了物质结构的原子分子学说.

更深入地, 1911 年卢瑟福(E. Rutherford)的 α 粒子散射实验表明, 原子并不是无结构、不可分割的, 而是由电子(electron)和原子核(nucleus)组成的. 后来又发现原子核由质子(proton)和中子(neutron)组成, 质子和中子由夸克(quark)组成. 因此, 按照现代科学认识水平的观点, 物质结构的原子分子学说可以表述为: 所有物质都由分子、原子构成, 分子是组成物质的保持物质化学性质的最小单元, 如 $O_2, H_2O, \dots$; 原子是组成单质和化合物的基本单元, 它由原子核和电子组成; 原子核由质子和中子组成, 质子和中子由夸克组成. 由此可知, 物质结构是分层次的, 关于物质性质的讨论也是建立在相应的结构层次上的. 在常见物质的热运动性质和规律的层次上, 通常把分子、原子看作是组成物质的微观单元. 例如, 在讨论常见的以固态(solid state)、液态(liquid state)及气态(gas state)存在的物质的热运动性质及规律时, 都把物质视为仅由分子组成. 但是, 对于高能原子核碰撞的研究, 就至少应在质子、中子及传递其间相互作用的介子(meson)的层次上; 对于早期形成的宇宙及目前宇宙中的被称为奇异星等天体的研究, 则应该在夸克及传递其间作用的胶子(gluon)的层次上.

● 物质分子处于不停顿的无规则运动状态

物质分子都在不停顿地作无规则运动. 所谓无规则运动就是完全随机的运动, 该随机性既包括速度的大小, 又包括速度的方向. 这就是说, 对所有分子而言, 其运动是各向同性的, 没有任何一个方向比别的方向占有优势. 这样, 分子的无规则运动就与其整体的定向运动不同. 定量来讲, 分子无规则运动的特征是: 在其体坐标系(或质心系)中, 分子的质心动量为零. 分子的这种无规则随机运动又称为热运动(thermal motion). 那么, 在讨论物质分子的热运动时, 应该将之同整体运动区分开来, 并将整体运动扣除掉. 对于物质分子热运动的概念还应该注意, 热运动是所有分子运动的宏观的整体表现, 并

不是对某一个具体分子而言的. 分子热运动的典型表现是布朗运动. 1827 年, 英国植物学家布朗(R. Brown)在显微镜下观察悬浮在静止液体中的花粉时, 发现花粉颗粒不停顿地作无规则的跳跃运动. 后来, 人们把微小颗粒的无规运动统称为布朗运动, 并把作无规则运动的微小颗粒称为布朗粒子.

虽然观察到了布朗运动现象, 如图 1-1 所示, 但在当时及其后相当长一段时间内, 布朗运动的本质并不清楚. 直到 1877 年, 德尔索(Lx. Delsau)指出, 这种现象是由于微粒受到周围分子碰撞的不平衡

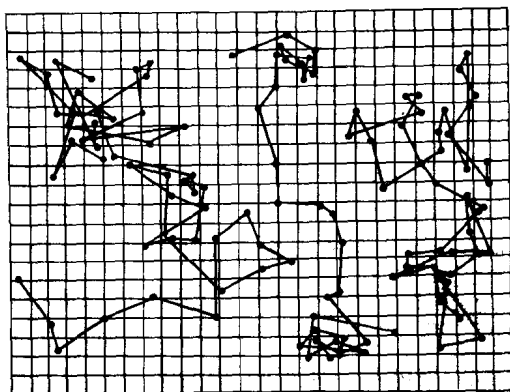


图 1-1 实验观察到的藤黄粉末在水中的布朗运动的投影

而引起的一种起伏运动. 这种不平衡表明, 液体或气体分子的运动是无规则的. 因为只有无规则运动才能使得在任一很短的时间间隔内从不同方向撞击微粒的分子个数不同, 因而微粒在不同方向受到的冲击作用不同, 从而微粒向着受到作用大的方向运动. 随着微粒线度的增大, 荷载它们的介质(液体或气体)的分子从各个方向对它们的冲击的合成效果减弱, 从而使微粒的无规运动剧烈程度减弱; 随着温度的升高, 液体或气体分子运动的剧烈程度增大, 其对布朗粒子的冲击变得更频繁, 从而使布朗粒子的无规则运动变得更加剧烈. 这些结果表明, 布朗粒子的无规则跳动与荷载布朗粒子的介质分子的无规则运动, 两者互为表里.

虽然德尔索的论断阐明了布朗运动的本质, 但由于缺乏系统的

定量的解析,说服力仍然不足.到1905年,爱因斯坦(A. Einstein)首先在统计力学框架下提出描述布朗运动的理论,随后斯莫陆绰斯基(M. von Smoluchowski)和朗之万(P. Langevin)也分别发表了他们关于布朗运动的理论研究成果,并最终建立了关于布朗运动的理论(参见本书第3.4节).1908年,佩兰(J. B. Perrin)的实验精确地证实了爱因斯坦等人理论的正确性,图1-1是佩兰实验结果的图示.随着科学的发展和实验技术的进步,其后更多的实验事实都说明原子分子不仅确实存在,并且总是处于不停顿的无规则运动状态.

• 分子之间存在相互作用

一方面,物质由分子和原子组成,原子和分子都在不停地作无规则热运动.另一方面,物质都以某种形态存在,如,常见的物质形态有固态、液态、气态等.为什么分子或原子可以凝聚成固体或液体呢?让我们先考察一些日常实例:拉断一段金属丝需要在其两端施加很大的拉力;水龙头中流出的水大多形成连续的水流;提起置于黏稠液体中的棍子时可看到液体有黏连性;气体可以变成液体……凡此种都表明,物体各部分之间有相互吸引力,进而可以推知,分子之间存在吸引力.可是,固体和液体很难被压缩.这表明,组成固体或液体的分子之间不可能靠得太近.于是可以推知,分子之间还存在排斥力.综合这两方面的因素可知,分子之间存在相互作用力,通常称这种相互作用力为分子力(intermolecular force).分子力由吸引力和排斥力两部分构成.

根据实验推知,分子力在分子相距较远时表现为吸引力,在分子相距很近时表现为排斥力.于是,林纳德和琼斯提出,分子力相应的相互作用势可以近似表示为图1-2中的实曲线的形式,并可解析地表述为

$$\varphi(r) = \frac{\sigma}{r^s} - \frac{\mu}{r^t}, \quad (1.1)$$

其中 r 为两分子间的间距, σ 和 μ 近似为常量, s 和 t 近似为常数(在多数情况下,取 $s=12$, $t=6$,可以得到与实验较好符合的结果).这种形式的分子势称为林纳德-琼斯势(Lenard-Jones potential).由