

# 简明基础物理学

## 第一卷 力学与热学

全书主编

刘宏清

赵有伦

尹邦勇

本卷主编

杨宣东

余祖兴

邹勇



第二版



武汉大学出版社

WUHAN UNIVERSITY PRESS

## 第一版 编者的话

本书是武汉大学物理系第二基础物理教研室的教师根据多年的教学经验,参考教学大纲的要求,集体编写而成的。此书可作为综合性大学、师范院校、工科院校非物理专业的普通物理学教材。全书共分四卷,各卷自成体系,内容分别为:

第一卷 力学与热学

第二卷 电磁学

第三卷 光学与近代物理学

第四卷 实验物理学

在编写过程中,我们力求做到以下几点:首先,在高中物理和大学物理间跨一个较大的台阶,能引起读者对学习大学物理学的兴趣。其次,在系统编写经典物理的基础上,适当增加近代物理和现代物理的内容,使本书能反映时代性,其中,特别注意我国目前在物理学方面的发展和运用。同时,为了把大学物理的讲授和实验结合起来,特编辑实验物理卷,使本书能有较完善的体系。最后,为使一部分读者在学习普通物理学的基本内容时,还有兴趣深入学习,我们编辑了部分较难的内容,在书中用“\*”号表示,以供参考与选用。

担任全书各卷的编写人员有:

全书主编 刘宏清 胡修愚 周武光

第一卷主编 杨直东

第二卷主编 赵有伦 张少平

第三卷主编 徐斌富 马 莉

第四卷主编 尹邦勇 黄兴鼎 李守源

全卷各章的编者分别是：

杨宣东 (第一卷 第1~7章)

胡修愚

周武光 (第一卷 第8~10章)

刘宏清 (第二卷 第1~2章)

张少平 (第二卷 第4~5章)

赵有伦 (第二卷 第3,6~7章)

马 莉 (第三卷 第1~3章)

徐斌富 (第三卷 第4~8章)

黄兴鼎 (第四卷 实验1~10,26~27)

李守源 (第四卷 实验11~19,28)

尹邦勇 (第四卷 实验20~25,29~34)

全书各卷特请有关教师审阅：石展之教授(第一卷)，李琪副教授(第二卷)，刘福庆教授(第三卷)，周孝安副教授(第四卷)。本书出版过程中，得到武汉大学教务处、物理系和武汉大学出版社领导的关心和支持，我们在此表示衷心的感谢。

全书由于编写时间较紧，不当之处，敬请读者批评指正。

编者  
于武昌珞珈山  
1992.4

## 第二版 编者的话

本书在第一版基础上作了较大幅度的修改,加强理论物理、近代物理、物理前沿、高新技术在普通物理学中的渗透,目的在于反映物理学的发展。本书为适应综合性大学非物理专业普通物理学教学需要,仍以简明为主,以便于使用此教材的数学、计算机科学、化学、环境科学、分析测试科学、生物学、医学、图书情报学等学科的教师和学生有较普遍的适应性。对于本教材与各学科结合不到之处,敬请各位老师结合各专业学科的实际情况,予以补充讲授。

本书仍然保持原来四卷不变,各卷自成体系,以便分卷单独使用。

担任全书各卷编写与审稿的有关人员如下:

全书主编:刘宏清 赵有伦 尹邦勇

全书主审:刘觉平

第一卷主编:杨宣东 余祖兴 邹勇

第二卷主编:张少平

第三卷主编:徐斌富 马莉

第四卷主编:王承彦 周殿清 黄兴鼎

全书各章(实验)的编者分别为:

刘觉平 绪论

杨宣东 第一卷 第1~5章

邹勇 第一卷 第6~7章

余祖兴 第一卷 第8~10章

刘宏清 第二卷 第1~2章

- 赵有伦 第二卷 第 3,6~8 章  
张少平 第二卷 第 4~5 章  
马 莉 第三卷 第 1~3 章  
徐斌富 第三卷 第 4~8 章  
王承彦 第四卷 实验 1,3~7,10~11,13~15  
尹邦勇 第四卷 绪论 实验 16~29  
黄兴鼎 第四卷 实验 2,8~9,12,30~32  
周殿清 第四卷 实验 33~44

本书插图由陈宝联绘制。

本书再版过程中得到武汉大学教务处、理学院、出版社的关心和大力支持,编者在此表示衷心感谢!

全书有不当之处,敬请批评指正。

编者

于武昌珞珈山

1999 年 11 月

# 目 录

绪 论	1
第一章 质点运动学	22
§ 1-1 质点 参照系 坐标系	22
§ 1-2 时间和空间	23
§ 1-3 速度矢量	24
§ 1-4 加速度矢量	30
§ 1-5 参照系的变换	41
习题	54
第二章 质点动力学	59
§ 2-1 牛顿运动定律	59
§ 2-2 牛顿运动定律的应用	64
* § 2-3 非惯性参照系中的动力学基本原理	70
习题	77
第三章 功与能	83
§ 3-1 功 功率 动能定理	84
§ 3-2 保守力和势能	89
§ 3-3 质点的机械能 机械能守恒	94
* § 3-4 平衡问题的研究	99
* § 3-5 功能原理	103
习题	106

<b>第四章 动量 动量矩</b> .....	112
§ 4-1 动量定理和动量守恒定律 .....	112
§ 4-2 球的碰撞 .....	121
§ 4-3 动量矩定理和动量矩守恒定律 .....	128
• § 4-4 万有引力 .....	139
习题.....	152
<b>第五章 刚体的定轴转动</b> .....	159
§ 5-1 质心和质心运动定律 .....	160
§ 5-2 刚体的平动和转动 .....	165
§ 5-3 刚体的定轴转动 .....	166
§ 5-4 刚体绕定轴转动的动能 力矩的功 .....	181
习题.....	187
<b>第六章 振动</b> .....	193
§ 6-1 简谐振动 .....	193
§ 6-2 简谐振动的旋转矢量表示法 .....	199
§ 6-3 单摆和复摆 .....	200
§ 6-4 简谐振动的能量 .....	203
§ 6-5 简谐振动的合成 .....	204
§ 6-6 阻尼振动 受迫振动 共振 .....	212
习题.....	218
<b>第七章 机械波</b> .....	222
§ 7-1 机械波的产生和传播 .....	222
§ 7-2 波长 波的周期和频率 波速 .....	224
§ 7-3 简谐波的波动方程 波的能量 .....	226
§ 7-4 惠更斯原理和波的衍射 .....	234
§ 7-5 波的干涉 .....	239

* § 7-6 多普勒效应 .....	249
习题 .....	252
<b>第八章 气体分子运动论</b> .....	259
§ 8-1 分子运动论的基本概念 .....	259
§ 8-2 气体的状态参量 理想气体状态方程 .....	264
§ 8-3 理想气体的压强 .....	269
§ 8-4 理想气体的温度公式 .....	273
§ 8-5 能量按自由度均分原理 理想气体的内能 .....	275
§ 8-6 气体分子速率的统计分布律 .....	280
§ 8-7 气体分子的平均碰撞频率和平均自由程 .....	293
* § 8-8 气体内的迁移过程 .....	296
§ 8-9 真实气体 范德瓦耳斯方程 .....	300
习题 .....	306
<b>第九章 热力学基础</b> .....	309
§ 9-1 热力学过程 功 热量 .....	309
§ 9-2 热力学第一定律 .....	315
§ 9-3 热容量 焓 气体的内能 .....	318
§ 9-4 热力学第一定律对理想气体的应用 .....	323
§ 9-5 循环过程 卡诺循环 .....	334
§ 9-6 焦耳-汤姆逊实验 .....	345
§ 9-7 热力学第二定律 .....	351
§ 9-8 热力学第二定律的统计意义 .....	356
§ 9-9 卡诺定理 .....	358
§ 9-10 态函数熵 可逆过程与不可逆过程的熵变 .....	360
* § 9-11 热力学第二定律的熵表述 熵与热力学 几率 .....	369
习题 .....	374



<b>第十章 固体 液体 相变</b> .....	379
§ 10-1 固体 .....	379
§ 10-2 液体的微观结构 液体的热性质 .....	392
§ 10-3 液体的表面性质 .....	397
§ 10-4 相变 .....	406
习题 .....	414
<b>附录一 一些常用物理常数</b> .....	418
<b>附录二 国际单位制(SI)的基本量</b> .....	419
<b>附录三 国际单位制(SI)词冠</b> .....	420
<b>附录四 矢量</b> .....	421
<b>习题答案</b> .....	438

## 绪 论

[物理学的意义、内容与方法]

### 1 物理学的意义

#### 一、什么是物理学(研究对象与范围)

物理学是关于自然界最基本的物质形态、结构及其相互作用、运动与转化的基本规律的科学。随着科学观测手段的增强,物理学研究的领域不断扩展,至今已包含了从比质子半径( $10^{-15}\text{m}$ )还小的基本粒子世界的尺度到目前所知的最远的类星体的距离( $10^{26}\text{m}$ )之间的整个空间区域;包含了从可探测到的、非常短的最不稳定粒子的寿命( $10^{-25}\text{s}$ )直到质子的寿命( $10^{39}\text{s}$ )这样长的时间范围。

#### 二、物理学的历史与现状

从阿基米德(Archimedes, 公元前 287~前 212)的著作《板的平衡》与《浮力》问世开始,数学便进入了物理学,使物理学真正成为一门精密的科学。到 1687 年牛顿(I. Newton, 1642~1727)发表《自然哲学的数学原理》时,处理低速宏观物体运动的经典力学便已建立。发展到 19 世纪后期,研究经典的粒子与场的运动变化规律的力学、声学、热学、光学和电磁学等已形成了比较完整的经典物理学体系。与此同时,对光的传播与干涉等高速运动现象的实验研究以及对微观世界的探索,提出了在经典物理学框架中所

不能解决的问题,使物理学在 20 世纪初经历了两次大变革。这两次大变革的旗帜是普朗克(M. Planck, 1858~1947)的量子论和爱因斯坦(A. Einstein, 1879~1955)的相对论。它们剧烈地改变了人们的传统观念,推动着科学与技术的蓬勃发展,使得物理学进入了历史上发展最快的、最激动人心的时代。

今天,电磁力与弱力已经可以由一个统一的理论来描述,人们能够协调一致地解释电磁现象与放射性衰变现象;几百种亚核粒子可以由为数不多的、被称为夸克与胶子的基本粒子构成,将夸克结合在一起的强作用力则可以由胶子来传递。利用激光技术等,磁约束等离子体的密度与温度已经可以接近于达到发生聚变反应所需的条件。对流体和等离子体的研究导致了湍流与混沌方面的重大进展,发现了诸如超导、超流与量子霍尔效应等意想不到的现象。人工制造了在自然界中还不曾有过的物质(例如比金刚石还硬的氮化碳材料等)。可以说,在粒子物理学、原子核物理学、凝聚态物理学、原子分子物理学、光学、等离子体物理学、引力和宇宙学及宇宙射线物理学等各个分支领域中,在各个交叉学科和技术应用中,物理学都在迅速取得重大进展。

### 三、物理学与人类思维

正是解决力学问题的需要使牛顿发明了流数论,与莱布尼兹(G. W. Leibniz, 1646~1716)一起奠定了微积分的基础;正是为了理解狄拉克(P. M. Dirac, 1902~)提出的  $\delta$  函数,数学家最终创立了广义函数论;如果没有爱因斯坦的广义相对论,黎曼几何是很难受到数学界的重视的;而杨振宁提出的规范场则正与数学上纤维空间内的联络不谋而合,并因而推动了微分几何研究的进一步发展;从物理问题的精确可解性出发,又引发了关于所谓杨-Baxter 方程的数学新热点的研究。可见,不仅物理学的研究离不开严密的数学推理,反过来,物理问题的求解又给数学提出了新的发展动因,促进了数学的深入发展。同时,物理学家从科学实验中抽象出

来的、与人们常识大相径庭的概念(如同时性,量子性等),正在迫使经院哲学家改变其习以为常的思维方式。物理学的实践还使人们确立了这样一个基本观念,即自然界的变化与发展是有规律的,人类智慧能够认识这些规律。这一基本观念现在已经渗透到了近代思想之中,在哲学思维的发展中产生了极其深远的影响,成为自然科学与技术赖以存在与发展的基石。

#### 四、物理学在整个自然科学技术中的地位

物理学所研究的分子与原子,不仅组成了通常无机界中的各种宏观物体、大气、陆地和海洋,也构成了有机界中的蛋白质、基因、器官和形形色色的生物体。因而自然而然,物理学的规律便成为化学、材料科学、生物学和地球物理学的基础,形成了诸如量子化学、分子生物学等分支学科与交叉学科。物理学所研究的时间与空间,是自然界中一切物质的存在形式。同时,物理学的基本概念与基本规律已被应用到自然科学的各个领域;所有物质形态都无例外地受到物理学规律的支配与制约。物理学为所有其他的自然科学、技术和医学提供理论原理和实验技术。在这个意义上讲,物理学是一切自然科学与技术的基础。

#### 五、物理学与经济技术革命

正是牛顿力学和热力学的发展,促使蒸汽机得以发明、应用与推广,因而引发了18世纪60年代开始的第一次技术革命。当社会陶醉在蒸汽机文明之中时,卡文迪许(H. Cavendish, 1731~1810)、富兰克林(B. Franklin, 1706~1790)、安培(A. M. Ampere, 1775~1836)和法拉第(M. Faraday, 1791~1867)等物理学家正在煞费苦心地观察和探索当时人们难于理解的电学和磁学现象的奥秘。当麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831~1879)将这一切总结在以他的名字命名的著名的方程组中时,谁也没有料到,在第一次技术革命开始后一百年(即19世纪70年代)便发生了以电力的广泛应

用和无线电通讯为标志的第二次技术革命。正当人们欢呼进入电的光明时代时,近代物理学的迅猛发展又引发了第三次技术革命,它开始于20世纪初并一直持续到今天;其特点是快速电子计算机技术的应用与推广,它正以前所未有的深度与广度改变着人类的物质文明与精神文明。此外,物理学还是发展能源、改善环境、维护国家安全这类国家规划的重要组成部分;事实上,物理学的发现已经在一些国家产生了核、电子、微电子和光技术等完整的工业部门。物理学构成了我们经济的一个极其重要的推动力。

## 2 物理学的内容

### 2.1 物理学的基本学说

#### 一、经典力学

牛顿力学作为由经验观察得到的物理理论的第一个数学抽象,标志着人类才智和技术史上的一个伟大的里程碑。这个无与伦比的成就,这个“人类历史上个人智慧果实的最高体现”(拉普拉斯的评价),理所当然地应归功于牛顿,在牛顿的墓志上铭刻着:“他那几乎神一般的思维力,最先说明了行星的运动和图像,慧星的轨道和大海的潮汐。”在牛顿几何力学的基础上,伯努利(D. Bernoulli, 1700~1782)、莫培都(P. Maupertuis, 1698~1759)、欧勒(L. Euler, 1707~1783)、达朗伯(J. R. d' Alembert, 1717~1783)、泊松(S. D. Poisson, 1781~1840)、拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736~1813)和哈密顿(W. R. Hamilton, 1805~1865)等在力学的表述形式上进一步加以发展,得到了拉格朗日方程、哈密顿方程和最小作用量原理以及用泊松括弧描述的动力学方程,建立了分析

力学,为探索新力学的规律准备好了理论原则与框架。

## 二、经典电动力学

如果说牛顿力学考察的对象是人们所熟悉的实物粒子——质点,那么,经典电动力学所研究的对象则包括当时人们还不熟悉的物质存在的新形式——电磁场,它可以脱离实物粒子而独立存在;而通常的实物粒子——带电粒子则只能作为场的源而与场并存。正是麦克斯韦独具慧眼,在他的划时代名著《电磁场的动力学理论》中最先认识到物质能以场的形式存在;他才能高瞻远瞩,全面综合库仑(C. A. de Coulomb, 1736~1806)、欧姆(G. S. Ohm, 1787~1854)、奥斯特(H. C. Oersted, 1777~1851)、安培和法拉第等人的研究成果,提出了以他的名字命名的一套完整的方程组,并证实光波实际上是电磁波,在1873年出版的《电磁学通论》中,完成了经典电磁学理论体系,这是物理学发展史上又一个重要的里程碑。爱因斯坦在纪念麦克斯韦百年诞辰时这样说:“撇开麦克斯韦的一生工作在物理学的各个重要部门中所产生的个别重要结果不谈,而集中注意于他在我们关于物理实在的本性概念中所造成的变革,我们可以说:在麦克斯韦以前,人们以为,物理实在——就它应当代表自然界中的事件而论——是质点,质点的变化完全是由那些服从全微分方程的运动所组成的。在麦克斯韦以后,人们则认为,物理实在是由连续的场来代表的,它服从偏微分方程,不能对它作机械论的解释。实在概念的这一变革,是物理学自牛顿以来的一次最深刻和最富有成效的变革。”

## 三、热力学

它开始于16世纪以煤作为能源的大量应用,以及18世纪蒸汽机在工业上的广泛应用与改进的需要,并随着科学的计温学与量热学的建立而步入科学实验的正确道路。到19世纪中期,迈尔(J. R. V. Mayer, 1814~1878)、焦耳(J. P. Joule, 1818~1889)与亥

姆霍兹(HL. F. Helmholtz, 1821~1894)等人通过不同途径总结出了热力学第一定律,得到了热功当量;继而在卡诺(S. Carnot, 1796~1832)热机理论的基础上,克劳修斯(R. E. Clausius, 1822~1888)与汤姆逊(W. Thomson, 1824~1907)分别提出了热力学第二定律,揭示了自然界大量物质聚集态自发过程中的方向性;接着,作为低温物理实验发展的一个结果,能斯特(W. Nernst, 1864~1941)于1906年提出了热力学第三定律,从而使热力学自身成为一个完整的宏观平衡态理论体系。热力学中最富有成效的概念是熵,因为按照普朗克的观念,熵实际上起着自然界财政部长的作用,而能量只不过是会计。

#### 四、经典统计物理学

若将热力学视为研究热现象的宏观理论,则经典统计物理学便是从聚集态的微观结构上来阐明热运动的统计规律的。1857年,克劳修斯运用气体分子运动论的观点用统计方法推出了大量分子对器壁的压强公式。继而,麦克斯韦导出了著名的气体分子运动速度的分布律,并给出了按照几率分布进行统计平均而由系统的微观量得到宏观量的方法,使分子运动论与宏观的热力学理论自然地统一起来;随后不久便建立了输运过程的数学理论。1868年,玻耳兹曼(L. E. Boltzmann, 1844~1906)给出了麦克斯韦分布的一般形式,明确引入了刘维定理,导出了H定理,指明了熵的统计意义(即著名的用热力学几率表述熵的玻耳兹曼关系式)。1902年,吉布斯(J. W. Gibbs, 1839~1903)在他的名著《统计力学的基本原理》中提出了统计理论,导出了三种统计系综的统计分布律,这标志着经典平衡态统计物理已形成了一个完整的体系。

#### 五、狭义相对论

1905年6月,爱因斯坦的划时代的论文《论动体的电动力学》

宣告了狭义相对论的诞生。爱因斯坦指出,只要摒弃绝对时间观念,所谓的光借以进行传播的介质——以太——便是多余的。爱因斯坦提出,不论观察者以多大的速度作自由运动,它所观察到的科学定律都是一样的(即狭义相对性原理)。爱因斯坦还认为这个原理也适用于光速,并称之为光速不变原理。爱因斯坦据此自然推出了特殊洛伦兹变换公式以及质能等价关系等非凡的结论。前者改变了牛顿时代以来传统的绝对时间与绝对空间的观念,空间与时间各自都成了相对的概念,只有事件的时空间隔才是绝对的;后者则限制了任何有质量的物体永远以低于光速的速度运动,只有光或其他没有内禀质量的波才能以光速运动。爱因斯坦在创立狭义相对论的过程中,还创造了一种独特的思维方式,即在运用经验知识与数学推理的基础上,借助于理想实验(当今的计算机模拟实验实际上是它的延伸)来领悟出现象背后的带根本性的物理原则,并以此为基础演绎出具体的物理结论。这种思维方式对爱因斯坦之后的理论物理学家产生了深远的影响。

## 六、广义相对论

经过1908年至1914年之间多次不成功的尝试之后,爱因斯坦于1916年在他的著名论文《广义相对论的基础》中建立了一个与狭义相对论协调一致的引力理论,即广义相对论。爱因斯坦将只对惯性系适用的狭义相对性原理推广到任意参照系,认为物理规律在任意参照系中都应表为同样形式(广义相对性原理);同时,爱因斯坦根据引力质量与惯性质量等价的事实提出了等效原理,即认为引力效应与加速度效应在物理效果上完全等效,它意味着局域参考系的加速度仅有相对的意义,而引力实际上只是时空不平坦导致的后果。质能分布使时空弯曲,物体总是沿着弯曲时空中最短的路径(即测地线)运行,在通常的三维空间中则表现为引力效应。这一将引力几何化的观念是革命性的,它深刻地影响着现代物理学的发展。爱因斯坦据上述原理导出了以他的名字命名



的引力场方程。这个复杂的非线性方程有一些惊人的预言,其中最有名的是太阳引力使光线弯曲并使光速减慢,这已被日益发展的空间技术实验所证实。

## 七、量子力学

为了消除经典物理在黑体辐射问题上所导致的紫外灾难,普朗克在1900年提出了能量子假设,即认为物体只能按能量子为单位一份一份(而不是连续)地发射与吸收能量;1905年,爱因斯坦在解决光电效应问题中进一步提出了光子概念,认为辐射场是由具有能量子的能量与相应动量的光子组成的。这样,以波的形式存在的电磁辐射也具有粒子的特征。接着,德布罗意(L. de Brogli, 1892~1987)提出,通常以粒子形式存在的实物粒子也具有波动性。其间,玻尔(N. H. D. Bohr, 1885~1962)提出了量子论与氢原子模型,将原子辐射的频率与原子在两个定态之间的跃迁联系起来;不久,泡利(W. Pauli, 1900~1958)便提出了著名的不相容原理,指出两个以上的费米子例如电子不能处在完全相同的量子态,从而将玻尔的原子模型推广到多电子原子。

继而,海森堡(W. Heisenberg, 1901~1976)与薛定谔(E. Schrödinger, 1887~1961)分别创立了矩阵力学与波动力学,它们实际上是相互等价的量子力学体系。海森堡按玻尔的对对应原理(即经典体系对应于大量子数极限下的量子体系)建立了以算符表示的力学量之间的对易规则,导出了力学量随时间变化的方程(海森堡方程),并提出了著名的测不准关系,即一个微观粒子的动量与位置的测量不准确度的乘积有一个可用普朗克常数表征的下限;薛定谔则将德布罗意的物质波推广为描述微观状态的波函数,建立波函数随时间变化的方程(薛定谔方程)。1926年,玻恩(M. Born, 1882~1970)提出了波函数的几率诠释,将波函数的模方解释为微观粒子出现的几率密度。这样,能够确定的不是微观