

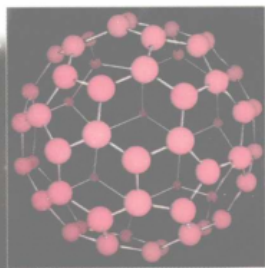


自然科学基础系列教材

大学物理学

上册

杨学栋 主编



哈尔滨工业大学出版社

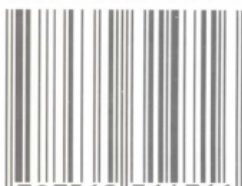


自然科学基础系列教材

大学物理学(上册)	杨学栋	主编
大学物理学(下册)	杨学栋	主编
大学物理实验(上下册)	金恩培 耿完桢	主编
工科数学分析(上下册)	张宗达	主编
线性代数与空间解析几何	郑宝东	主编
概率论与数理统计	许承德	主编
计算方法	崔明根	主编
实验数学	焦光虹	主编
工科数学分析(上下册)(偏理)	包革军	主编
线性代数与空间解析几何(偏理)	吴勃英	主编
复变函数	盖云英	主编
积分变换	包革军	主编
工科大学化学	徐崇泉	主编
工科大学化学实验	胡立江	主编

责任编辑 李永军 / 封面设计 卞秉利

ISBN 7-5603-1471-6



9 787560 314716 >

ISBN 7-5603-1471-6

O · 102 定价 24.00 元

自然科学基础系列教材

大学物理学

(上册)

杨学栋 李 斌 编

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

本书是根据原国家教委审定的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》和对重点理工科院校教学改革的要求精神,在总结多年教学实践及教学改革经验的基础上,吸取了国内外近年来同类改革教材的优点而编写的面向 21 世纪的教材。

全书分上下两册。上册包括力学和电磁学两篇;下册包括光学、量子力学和统计物理与热力学基础三篇。

本书可作为工科大学物理课教材,也可供其他理工科院校选为教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上/杨学栋主编.—2 版.—哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2002.1

ISBN 7-5603-1471-6

I.大… II.杨… III.物理学-高等学校-教材
IV.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 070034 号

大 学 物 理 学

Daxue Wulixue

(上册)

杨学栋 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

黑龙江省教育厅印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 16.75 字数 471 千字

2002 年 1 月第 2 版 2004 年 2 月第 4 次印刷

印数 14 601~17 600

ISBN 7-5603-1471-6/O·102 定价 24.00 元

地址:哈尔滨市南岗区和兴路 147 号 邮编:150080

如发现印、装质量问题,请与本厂质量科联系调换。

前 言

本书是根据原国家教委审定的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》和对重点理工科院校教学改革的要求精神,在总结多年来教学实践及教学改革经验的基础上,吸取了国内外近年来同类改革教材的优点编写而成。全书分上、下两册。上册包括力学和电磁学两篇;下册包括光学、量子力学和统计物理与热力学基础三篇。

编写本书的指导思想是面向 21 世纪科技发展对人才培养的总体需求,强调理工结合,内容现代化和加强科学素质培养的原则。

本书的主要特点是:

1. 加强近代物理学基础理论的教学内容。

本书在大力精简经典物理内容和保持物理学原有理论体系的基础上,加强了近代物理学两大理论支柱——相对论和量子力学的内容编写,相对论中增加了广义相对论简介,在电磁学中尽量使用狭义相对论的知识,从而更深刻地阐明电场和磁场的相互联系。在量子力学中除重点阐述其基本概念外,针对某些偏理科专业的需要,介绍了量子力学的一些基本方法,力图使读者对量子力学有更全面的了解。在热学中增加了量子统计的内容。此外,本书还对一些宏观量子效应及其应用也作了简单介绍。

2. 以渗透方式介绍了非线性物理学的知识。

在力学中介绍了非线性振动和非线性波动。在光学中介绍了非线性光学。在热学中介绍非平衡态热力学。书中还对“分形”、“混沌”、“耗散结构”等作了简单介绍。

3. 改变了经典力学的理论体系。

本书按照物质运动的时空性质和三条守恒定律为核心构成经

典力学的理论体系,加强了质量、动量、角动量和能量等重要概念的阐述,避免了与中学物理的重复,使读者有新鲜感,质点力学和刚体力学结合在一起,从而精简了经典力学内容。

4. 以培养理工科学生的科学素质和创造性思维为宗旨。

本书在绪论中介绍了宇宙和粒子物理标准模型,培养学生科学的自然观,在教材中尽量提出现代科技和物理学的前沿课题,以培养学生的探索和创新意识。书中强调物理思想和科学的方法论的教育,重在培养学生辩证唯物主义的世界观和分析、解决实际问题的能力。

5. 起点较高,避免与“中学物理”重复。

本书起点较高,凡“中学物理”所涉及的知识点均认为学生已基本掌握,一般不再简单重复。经典力学采用新体系,与中学完全不同,全书加强了矢量代数、微积分和复变函数等数学方法的应用,意在加强学生的数理基础,以适应 21 世纪高新技术对科技人才的需要。

本书承蒙哈尔滨工业大学物理系皮名嘉教授和孙万钧教授审阅,提出了许多宝贵意见。在编审过程中,得到哈尔滨工业大学各级领导的大力支持,编者一并深表谢意。在编写过程中重点参考了近年来国内一些优秀改革教材,编者对这些教材的编著人员深表敬意。

参加本书编写工作的有:李焱、周忠祥、孙秀冬、姜铃珍、李斌、赵树民、叶庆民、冯玉文、郑瑞华、陈小凡、邱莹、杨学栋等。

由于编者水平所限,疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2001 年 9 月

目 录

绪 论	(1)
§ 0-1 物理学及其发展	(1)
§ 0-2 现代物理学对物质微观结构和宇宙的认识	(2)
§ 0-3 物理学与工程技术	(9)

第一篇 力 学

第一章 机械运动描述	(13)
§ 1-1 物质和运动 时间和空间	(13)
§ 1-2 质点和刚体 参考系和坐标系	(16)
§ 1-3 质点和刚体运动的描述	(17)
§ 1-4 相对运动	(36)
习 题	(38)
第二章 动量和动量守恒	(41)
§ 2-1 惯性和质量	(41)
§ 2-2 动量和动量守恒定律	(44)
§ 2-3 动量的时间变化率	(45)
§ 2-4 动量定理	(60)
§ 2-5 非惯性系和惯性力	(65)
§ 2-6 动量守恒与空间平移对称性	(71)
习 题	(72)
第三章 角动量和角动量守恒	(77)
§ 3-1 角动量和角动量守恒定律	(77)
§ 3-2 质点系角动量 转动惯量	(81)

§ 3-3 角动量的时间变化率 转动定律	(87)
§ 3-4 角动量定理 质点系角动量守恒定律	(94)
§ 3-5 角动量守恒与空间旋转对称性	(106)
习 题	(107)
第四章 能量和能量守恒	(113)
§ 4-1 动 能	(113)
§ 4-2 功 动能定理	(115)
§ 4-3 势 能	(122)
§ 4-4 机械能守恒定律 能量守恒与时间平移对称性	(135)
§ 4-5 对称性与守恒定律	(143)
习 题	(154)
第五章 机械振动	(161)
§ 5-1 简谐振动	(161)
§ 5-2 阻尼振动	(172)
§ 5-3 受迫振动和共振	(176)
§ 5-4 振动的合成	(179)
§ 5-5 振动的分解 傅里叶变换	(185)
§ 5-6 两个自由度的振动	(191)
§ 5-7 非线性振动 混沌现象	(195)
习 题	(199)
第六章 机械波	(203)
§ 6-1 平面简谐行波	(203)
§ 6-2 波的干涉 驻波	(221)
§ 6-3 波包和群速	(233)
§ 6-4 多普勒效应	(236)
§ 6-5 非线性波 孤波	(241)
习 题	(243)
第七章 相对论基础	(248)

§ 7-1 狭义相对论的基本假设	(249)
§ 7-2 狭义相对论运动学	(254)
§ 7-3 狭义相对论动力学基础	(271)
§ 7-4 时空世界	(281)
§ 7-5 广义相对论简介	(288)
习 题	(298)

第二篇 电 磁 学

第八章 静 电 场	(302)
§ 8-1 电荷 库仑定律	(302)
§ 8-2 静电场的场强和高斯定理	(307)
§ 8-3 静电场的环路定理和电势	(327)
§ 8-4 静电场中的导体 电容	(339)
§ 8-5 静电场中的电介质	(349)
§ 8-6 静电场的能量	(357)
习 题	(360)
第九章 电磁相互作用和稳恒磁场	(373)
§ 9-1 电磁相互作用	(373)
§ 9-2 稳恒电流 毕奥-萨伐尔定律	(385)
§ 9-3 稳恒磁场的高斯定理和安培环路定理	(395)
§ 9-4 磁场对运动电荷及电流的作用	(403)
§ 9-5 磁 介 质	(414)
习 题	(429)
第十章 电磁感应	(442)
§ 10-1 电磁感应定律	(442)
§ 10-2 动生电动势和感生电动势	(444)
§ 10-3 互感和自感	(454)
§ 10-4 磁场的能量	(460)
习 题	(465)

第十一章 电磁场和电磁波	(472)
§ 11-1 位移电流和全电流定律	(472)
§ 11-2 麦克斯韦方程组	(478)
§ 11-3 电 磁 波	(480)
§ 11-4 电磁场的能量和动量	(492)
习 题	(501)
附录	(505)
习题答案	(507)

绪 论

§ 0-1 物理学及其发展

物理学是研究物质结构和物质运动最基本最普遍规律的科学。它所研究的领域的空间尺度和时间尺度范围高达 $40 \sim 50$ 个数量级,从小到质子的半径 10^{-15}m ,到目前可探测到的最远的类星体的距离 10^{26}m ;从短到 10^{-25}s 的最不稳定粒子的寿命,直到长达 10^{39}s 的质子的寿命。物理学是一门以观察和实验为基础的精密科学,它发明为观测自然界所需要的更为有效的实验工具,创立能解释已观测到的或预测尚未观测到的物理现象的理论。物理学所研究的规律,包括其理论和方法具有极大的普遍性,物理学所研究的运动,普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中,因此,可以说,物理学是除数学以外,一切自然科学的基础,也是当代工程技术的重大支柱。物理学的发展过程充分说明了物理学的重要性。

公元 1600 年以前,包括古希腊自然哲学和中国古代物理学成果,以及哥白尼、开普勒等在天文学上的成就在内,为物理学的前科学时期。这以后,伽利略首创实验,物理思维,数学演绎结合的科学方法标志着物理学作为一门系统的定量学科的开端,1687 年牛顿发表《自然哲学的数学原理》,经典力学体系建立,标志着物理学成为一门真正的精密科学。到 19 世纪后期,以法拉第、麦克斯韦的电磁学理论、波动光学、热力学和经典统计物理学的发展,使经典物理学建立了比较完整的理论体系,并取得了巨大的成功。同时,物理学研究开始从宏观进入到了微观世界领域,经典物理学的局限性也开始显露出来。19 世纪末到 20 世纪初,普朗克的量

子论和爱因斯坦的相对论开辟了近代自然科学的新纪元,相对论和量子力学的建立,不但使人类对时空、物质及其运动的经典概念框架发生了根本性的变化,而且已成为近代物理乃至现代科学和工程技术的理论基础。从1940年至今,由于近代物理理论所带来的崭新观念加深了人们对客观世界的认识,加上实验技术水平和规模的空前提高,使物理学研究的深度和广度都有了很大的提高,物理学分支学科不断产生,例如,原子分子物理学、原子核物理学、凝聚态物理学、非线性物理学等。物理学与现代应用技术相结合,产生了激光物理、电子物理、等离子体物理等,以解决应用技术中的一系列物理问题。物理学与其他自然科学交叉、渗透,出现了天体物理、地球物理、化学物理、材料物理、生物物理等。物理学的所有分支学科和交叉学科,以及物理学在现代应用技术中都取得了引人注目的成就,物理学在现代科学技术中的重要作用在不断提高。

由于物理学研究范围的不断扩大,现在人们已很难给物理学下一个准确的定义。有人说,物理学家采用物理方法所研究的问题都属于物理学范畴。这种说法是有一定道理的。

§0-2 现代物理学对物质微观结构和宇宙的认识

现代物理学有两个前沿研究领域,一个是粒子物理,一个是天体物理,前者在最小的尺度上探索物质更深层次的结构,后者在最大的尺度上追寻宇宙的起源和演化。这是人类分别从微观和宇观这两个极端上探寻物质世界的奥秘,而近几十年来的研究竟使这个极端奇妙地衔接在一起,如同蛇头咬住了蛇尾。

一、基本粒子及其相互作用 粒子物理标准模型

物质世界的性质和运动规律是由其结构决定的,物质是由什么构成的?物质的微观结构和最基本成份是什么?一直是物理学追求的目标。1810年道尔顿建立了原子学说,认为原子是物质微

观结构不可分割的最小单元,1897 年汤姆孙发现了电子,1911 年卢瑟福提出了原子的有核模型,1932 年查德威克发现了中子,从而表明原子核是由紧密结合在一起的质子和中子组成的。在当时的实验研究中,没能探测出电子、光子、质子和中子等粒子的大小,人们把它们作为物质微观结构的最小组元,并称它们为基本粒子。20 世纪 50 年代以来,人们发现了大量称为强子的粒子。强子分为介子和重子,重子又分为核子(包括质子和中子)和各种超子。在至今已经发现的 430 种基本粒子中,介子有 150 种,重子有 264 种。随着实验能量的不断提高,人们发现一些基本粒子并不“基本”,它们仍有内部结构和一定的大小,特别是像强子这一类粒子。而对于电子, μ 子和中微子这样一些轻子则尚未观测到它们的大小和内部结构,这说明作为基本粒子的强子和轻子并不属于同一层次。因此,现在人们把基本粒子物理学改称为粒子物理学。1964 年盖尔曼和兹维格在对大量强子性质分析的基础上,各自独立地提出了强子结构的夸克模型。他们认为,所有的强子都是由夸克、反夸克和胶子组成的。现在,人们还没有观测到夸克和胶子有内部结构,它们与轻子是属于同一层次的粒子,其大小和轻子一样,半径小于 10^{-18} m。夸克最引人注目的特点之一是,在任何平常的条件下,都无法把夸克从它们的束缚态中解脱出来,这叫做夸克禁闭,迄今为止人们尚未在实验中找到自由夸克。根据夸克理论,重子由三个夸克组成,而介子则由一个夸克和一个反夸克组成,例如:质子由两个 u 夸克和一个 d 夸克组成,中子由两个 d 夸克和一个 u 夸克组成, K^+ 介子由一个 u 夸克和一个反 s 夸克组成, J/ψ 粒子由正、反 c 夸克, π^+ 介子由一个 u 夸克和一个反 d 夸克组成等等。

基本粒子是依靠它们之间的相互作用而结合在一起,组成了各种形态的物质,粒子间的相互作用有四种基本形式:强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用,见表 0-1 所示。

表 0-1 四种基本相互作用

种 类	作用对象	作用距离(m)	相对强度(10^{-15} m 处)	传递作用的基本粒子
强相互作用	强子	短($< 10^{-15}$)	1	胶子(g)
电磁相互作用	带电粒子	长	10^{-2}	光子(γ)
弱相互作用	大多数粒子	短($< 10^{-18}$)	10^{-13}	中间玻色子($W^{\pm}, Z^0$)
引力相互作用	所有物质	长	10^{-38}	引力子

现代物理学认为,物质有两种存在的基本形式:实物粒子和场。实物粒子在空间占有一定的有限体积,具有不可入性,而场则充满全空间,没有不可入性,场和实物粒子一样具有能量和动量,也具有不连续的微观结构。现代量子场论明确指出,物质存在的两种基本形式中,场是更基本的;每种粒子对应一种场,对应于各种不同粒子的场互相重叠地充满全空间;所有的场都处于基态时为物理真空;场的激发状态表现为出现相应的粒子,互为复共轭的两种激发状态表现为粒子和反粒子互换的两种物理状态;粒子之间的相互作用来自场之间的相互作用;基本相互作用是通过在相互作用着的粒子之间交换某种粒子来传递的,这些粒子统称为规范玻色子,例如表 0-1 中所列出的胶子,光子,中间玻色子和引力子。而实物物质都是由费米子组成的,费米子包括各种轻子、夸克以及它们的反粒子。玻色子是自旋角动量为普朗克作用量子 h 的整数(0、1、2) 倍的粒子,它们不遵从泡利不相容原理,服从玻色-爱因斯坦统计规律,而费米子是自旋角动量为 h 的半整数($1/2$, $3/2$) 倍的粒子,它们遵从泡利不相容原理,服从费米-狄拉克统计规律。

1967 年温伯格和萨拉姆在格拉肖理论的基础上,先后提出了电磁相互作用和弱相互作用统一的规范理论,称为电弱相互作用理论,并获得了一系列实验证明。目前,物理学家们还在试图把强相互作用和电弱相互作用统一起来,寻求一种“大统一”理论,并已取得了一些重要成果。由于基本相互作用之间数学上的相似性,

提示着存在一种更基本的统一的可能性:可能所有的相互作用只是同一种基本相互作用的不同表现形式,或许整个自然界可以归结为某种深刻的对称性。一些物理学家也试图找出这样的“超统一理论”,从而打破“物质”和“相互作用”之间的传统界限。但是,由于引力所起的作用还不太清楚,给这种“超统一理论”的研究带来相当大的难度。

粒子物理学研究的最新进展是,提出了粒子物理的标准模型。该模型指出,目前粒子物理所能观测到的所有实验结果可以用三大类 62 种粒子(其中有 2 种尚未发现)和这些粒子之间的四种基本相互作用加以解释。这三大类粒子是:规范玻色子 13 种、费米子 48 种和 Higgs 粒子 1 种。这四种基本相互作用是:强相互作用(或相互作用)、电弱相互作用、引力相互作用和 Higgs 粒子汤川相互作用。

作为相互作用的媒介粒子的规范玻色子包括 8 种胶子(g),光子(γ), W^+ , W^- , Z^0 和引力子。其中除引力子的自旋量子数为 2 以外,其他 12 种粒子的自旋量子数都为 1;除 W^+ 和 W^- 粒子分别带正负电荷外,其他 11 种粒子都不带电;除作为中间玻色子的 $W^\pm$ 和 Z^0 粒子有较大的质量外,其他 10 种粒子质量都为零。

自旋量子数为 $1/2$ 的费米子分为轻子和夸克两类,轻子包括电子(e^-)、电子型中微子(ν_e)、 μ 子(μ^-)、 μ 型中微子(ν_μ)、 τ 子(τ^-)和 τ 型中微子(ν_τ)以及它们的反粒子共三代 12 种;夸克有三代六种“味”,它们是第一代的上夸克(u)和下夸克(d),第二代的粲夸克(c)和奇异夸克(s),第三代的顶夸克(t)和底夸克(b)。而每味夸克又分“红”、“兰”、“绿”三种“色”,这样,三代夸克连同它们的反粒子共有 36 种。加上 12 种轻子,共有 48 种费米子。

粒子物理认为,电弱相互作用通过对称性自发破缺而出现电磁相互作用和弱相互作用两种表现形式,实现对称性自发破缺的粒子就是 Higgs 粒子,这种粒子使中间玻色子 $W^\pm$ 和 Z^0 获得很大的质量,使带电粒子和夸克获得质量,该粒子与其他粒子相互作用

的性质目前已全部搞清楚。在 62 种粒子中,由于引力太弱,还不能直接观测到引力子外,目前唯一应能找到但尚未找到的粒子就是 Higgs 粒子。这是一种自旋为零的不带电粒子。

粒子物理标准模型指出,62 种粒子中能独立存活的粒子共 10 种,它们是电子(e^-),中微子(ν_e, ν_μ, ν_τ)和它们的反粒子,以及光子(ν)和引力子,在复合粒子中能独立存活的粒子有 2 种,它们是质子 p 和反质子 $\bar{p}$ 。

基本粒子之间的基本作用有四种,这就是媒介粒子为胶子的强相互作用,其规律用量子色动力学,即色 $SU(3)$ 规范理论来描写;媒介粒子为光子和中间玻色子的电弱相互作用,其规律用 $SU(2) \times SU(1)$ 电弱统一理论(包括量子电动力学)来描写;媒介粒子为引力子(尚未发现)的引力相互作用,其规律用广义相对论来描写;媒介粒子为 Higgs 粒子的 Higgs 汤川相互作用,这种作用目前还未直接观测到。

粒子物理的标准模型成功地经受住了所有的实验检验,到目前为止,超出标准模型的实验结果一个也没有得到。尽管粒子物理的标准模型的成功是惊人的,但它仍然对许多基本问题没有作出回答。例如,究竟是什么决定了粒子的最基本性质——质量,是否存在其他种类的基本粒子,被一些统一理论所预言的自由的磁单极子是否存在,怎样将强相互作用和电弱相互作用进一步统一起来,等等。这说明粒子物理标准模型并没有达到尽善尽美的程度,它只是人类对物质微观结构认识到一定深度的反映,人类对客观世界的探索和研究是无穷无尽的。

二、宇宙的标准模型

太阳系是人们认识和了解最早、最多的天体系统,它由太阳、九大行星(包括地球)、60 多颗卫星、几十万颗小行星以及彗星、流星和星际物质组成,太阳系的范围约为 10^{13} m。太阳是银河系(星系)中一颗普通的恒星,银河系由 2000 多亿颗恒星组成,直径约为

10^{21} m。由银河系、仙女座星系以及 40 多个小星系组成的星系群,称为本星系群,它的范围约为 3×10^{22} m。此外,还有所谓的星系团,由数千个星系组成。由本星系群、室女座系团、大熊星系团以及 50 来个较小的星系团和星系群组成的超星系团,称为本超星系团,它的范围约为 10^{24} m。现在,对宇宙的观测范围约为 10^{26} m,已发现十几个超星系团。

1929 年哈勃发现,星系光谱的每条谱线的波长都增加了,按多普勒效应可以推断,越远的星系以越快的速度离开我们而去,这表明整个宇宙处在膨胀状态。1946 年以来伽莫夫、阿尔佛和赫曼提出和发展起来的大爆炸宇宙学说,预言了早期大爆炸的辐射仍残存在我们周围,只是由于宇宙膨胀所引起的红移使其温度只有几开。1965 年,彭齐亚斯和威尔逊观测到了充满宇宙空间的、温度在 $2.5 \sim 4.5$ K 之间的黑体辐射,常称为 3 K (或 2.7 K) 宇宙微波背景辐射。1989 年 11 月宇宙背景探测卫星升空,证明实测的微波背景辐射强度随波长的变化、精确地符合于温度为 (2.726 ± 0.010) K 的黑体辐射谱。宇宙背景辐射是宇宙大爆炸理论的重要实验依据,尽管这一关于宇宙起源的学说目前仍存在许多困难,但已逐步形成了建立在广义相对论基础上的所谓宇宙标准模型。

按照宇宙标准模型,大约在 $150 \sim 200$ 亿年以前发生了一次大爆炸,在爆炸后百分之一秒时,宇宙像一盆由质子、中子、电子和光子等粒子组成的极密集的宇宙“汤”,其温度高达 10^{11} K,在爆炸中,每一个粒子都加速离开其他粒子,宇宙迅速膨胀,温度迅速下降。在大爆炸后约 3 分钟时,宇宙的温度降到 10^9 K,这时中子和质子开始合成较轻的原子核,其中氢核约占 73%,氦核约占 27%,又过了几十万年,宇宙的温度降到 3000 K 以下,电子与原子核结合成稳定的原子,它们组成的气体由于引力作用而形成气团,最后凝聚为今天宇宙里的星系。