



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

大学物理学

上 册

吴 柳 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century



普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理学

上 册

吴 柳 主编



B1291041



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

MAJ83/11

内 容 提 要

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 世纪课程教材和普通高等教育“十五”国家级规划教材.本书试图以培养人才的知识、能力和科学素质为出发点,重新设计大学物理课程的内容体系,注意加强对近代物理的介绍,反映物理学的前沿,力图用近代物理的观点重组经典物理内容,并注意介绍物理学的思想方法及其在工程中的实际应用.全书共有六篇,分为上、下两册.上册包括:绪论,时间和空间与运动,守恒定律,相互作用场;下册包括:波、量子物理,熵与不可逆过程.

本书可作为高等学校工科各专业的大学物理教材,也可作为综合性大学和高等师范院校非物理专业物理课程的教材或参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/吴柳主编. —北京:高等教育出版社,2003.10

ISBN 7-04-012975-2

I. 大... II. 吴... III. 物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 075573 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 22
字 数 410 000

版 次 2003 年 10 月第 1 版
印 次 2003 年 10 月第 1 次印刷
定 价 23.10 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

前 言

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,也是北京交通大学“国家工科物理基础课程教学基地”建设的成果,是“面向 21 世纪课程教材”和普通高等教育“十五”国家级规划教材。

本书最初作为北京交通大学改革教材于 1995 年开始编写并试用.1996 年纳入教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”,改编为《工科基础物理学》,在多校试用.以后,作为北京交通大学“国家工科物理基础课程教学基地”建设的核心教材,在多次试用的基础上,重新调整内容体系后编写而成,并恢复《大学物理学》名称。

本书从近代物理的高度,以物质结构及其运动的基本规律为主线组织教学内容,注重物理思想方法的介绍;注意教学内容的现代化和先进性,将相对论和量子物理等近代物理内容作为本书的重要内容,力图比较系统、完整地介绍物理学的基本理论,反映物理学的发展前沿。

教材编写方案经赵凯华、王殖东、陈泽民、漆安慎、张三慧等教授评议.本书出版前,陈泽民、喀兴林、王殖东、蔡伯镰、朱荣华等教授审阅了书稿.他们认为本书是一部突破传统体系、改革力度较大的面向工科学生的新教材,有利于提高物理教学的水平和学生科学素质的培养.他们同时也提出了一些有益的意见和建议,对提高本书的科学水平起了很重要的作用。

本书由北京交通大学吴柳教授任主编,北京交通大学林铁生教授和北京科技大学戴问民教授任副主编,主要编写人为北京交通大学吴柳、林铁生教授和北京航空航天大学陈强教授.北京交通大学余守宪教授参加了从本书的方案制订到修改定稿的全过程,对本书的最终出版起了重要作用.另外,在教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”项目和北京交通大学“国家工科物理基础课程教学基地”建设中曾参与过本书工作的还有(以姓氏笔画为序):王永生、冯澎、许启明、余虹、范玲、赵国忠、姜东光、郝世栋、高丛林。

本书的编写和试用,得到了北京交通大学和有关学校(北京航空航天大学、北京科技大学、大连理工大学、东北大学)的大力支持.高等教育出版社陈小平主任和陶铮、董洪光、王文颖同志为本书的出版付出了大量的劳动,作者在此一并表示感谢。

由于编者学识有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者和同行专家不吝赐教。

编 者
2003 年 8 月

策划编辑	陶 铮
责任编辑	董洪光
封面设计	张 楠
责任绘图	吴文信
版式设计	陆瑞红
责任校对	康晓燕
责任印制	杨 明

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街 4 号

高等教育出版社法律事务部

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

目 录

上 册

第 1 篇 绪 论

第一章 物理学的研究对象和方法	3
§ 1-1 物质与运动	3
§ 1-2 物理学方法	10
§ 1-3 物理量 单位制 测量	13
习题	18
第二章 物理学与科学技术	20
§ 2-1 物理规律的普适性	20
§ 2-2 物理学与现代科学技术	23
习题	31

第 2 篇 时间、空间与运动

第三章 运动的描述	35
§ 3-1 时间与空间	35
§ 3-2 质点运动学	38
§ 3-3 刚体运动学	49
习题	52
第四章 时间和空间的相对性	57
§ 4-1 经典时空变换	57
§ 4-2 狭义相对论时空变换	66
§ 4-3 狭义相对论时空观	69

§ 4-4 速度极限 四维时空	78
习题	83

第3篇 守恒定律

第五章 动量守恒定律	89
§ 5-1 动量 动量守恒定律	89
§ 5-2 动量定理	94
§ 5-3 牛顿定律	100
习题	104
第六章 角动量守恒定律	108
§ 6-1 角动量 角动量守恒定律	108
§ 6-2 刚体定轴转动 进动	118
习题	124
第七章 机械能守恒定律 相对论动力学	127
§ 7-1 动能定理	127
§ 7-2 机械能守恒定律	133
§ 7-3 能量和角动量的量子化	149
§ 7-4 相对论动力学	153
习题	161
第八章 对称性与守恒定律	166
§ 8-1 基本相互作用与守恒定律	166
§ 8-2 守恒定律与对称性	170

第4篇 相互作用场

第九章 引力场	179
§ 9-1 引力场强 引力势 梯度	180
§ 9-2 引力场的高斯定理和环路定理	184
§ 9-3 引力场的基本方程和动力学性质	191
§ 9-4 广义相对论简介	195
习题	201
第十章 静电场	202
§ 10-1 电荷 电场强度	203

§ 10-2 静电场的高斯定理和环路定理	210
§ 10-3 静电场与导体的相互作用	221
§ 10-4 静电场与电介质的相互作用	231
§ 10-5 静电场中的带电粒子	239
习题	243
第十一章 恒定磁场	248
§ 11-1 运动电荷的电场和磁场	249
§ 11-2 恒定电流的磁场	258
§ 11-3 恒定磁场中带电粒子的运动	268
§ 11-4 磁场与磁介质的相互作用	278
习题	286
第十二章 变化的电磁场	293
§ 12-1 电磁感应	294
§ 12-2 自感与互感	306
§ 12-3 磁场的能量	310
§ 12-4 麦克斯韦方程组	313
§ 12-5 电磁波	318
习题	322
第十三章 原子核与强、弱相互作用场	331
§ 13-1 原子核	331
§ 13-2 强、弱相互作用场	336
§ 13-3 统一场理论简介	340
习题	341

第 篇

绪 论

物理学是探索万“物”之“理”的科学,也可简单地理解为关于探索物质结构(“物”)及其运动的基本规律(“理”)的科学。

物理学的历史可以上溯到古希腊的自然哲学。事实上,英文物理学一词“physics”源于希腊文“φυσικα”,其含义是“自然”,这表明物理学在早期是广泛研究自然界的一切事物并对它们的演化、发展以及所伴随的各种现象加以探讨的一门学科。现代意义上的物理学,可以说始于牛顿(I. Newton)1687年发表的《自然哲学的数学原理》(Philosophiae Naturalis Principia Mathematica)。如果说17—19世纪发展起来的、以牛顿力学和麦克斯韦(J. C. Maxwell)电磁理论为代表的经典物理学,主要还限于研究宏观现象与机械、热和电磁等较简单的运动形态的话,那么以20世纪初开始建立的相对论和量子理论为代表的近代物理学,则把物理学推向了研究微观和宇观现象以及生命、材料、大气、信息乃至社会等复杂的运动形态的新阶段。今天物理学已经成为整个自然科学和各种工程技术科学的重要基础,成为人类打开自然奥秘之门的总钥匙和促进人类社会发展的主要动力。

物理学与科学技术有着密切的关系。例如,信息时代离不开计算机和通讯技术,图1所示的电视会议系统就是一例。计算机和通讯技术是建立在电磁理论和半导体物理等物理分支学科的基础之上的。再如,图2所示的磁悬浮列车实现了铁路运输的高速化。铁路运输涉及道路、桥梁、隧道以及动力能源、机车制造、信号控制与通信工程等学科,而它们又都是建立在力学、电学、热学、光学和量子物理等物理分支学科基础之上的。

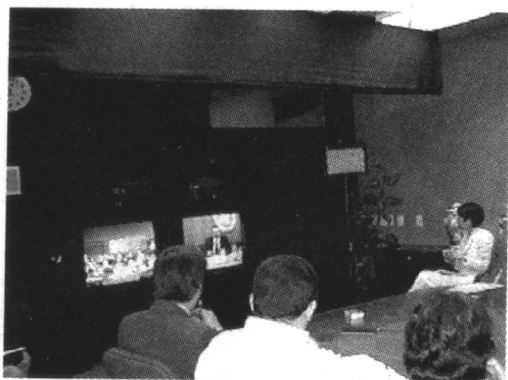


图1 以计算机和通讯技术为基础的电视会议系统

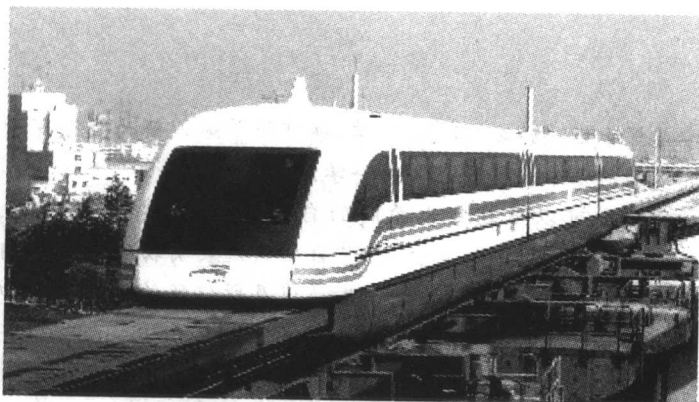


图2 磁悬浮列车使铁路运输走向高速化

第一章 物理学的研究对象和方法

物理学是关于自然界最基本形态的科学,它研究物质的结构、相互作用及其运动规律.本章试图对物质与运动、物理量和物理方法做概略叙述,以期对物理学的总体有所认识.

§ 1-1 物质与运动

自然界是由物质构成的,一切物质都处于永不停息的运动之中,物质和运动有各种各样的形式和层次,大到星系演变、日月运行、沧海桑田,小到生物进化、电子跃迁、核裂变、聚变,无一不是物质运动的结果.物理学主要研究一些最简单、最基本因而也是最普遍的运动形式,包括机械运动、电磁运动、热运动和微观粒子运动等等,这些运动是更高级的运动形式(如生命、遗传、思维等等)的必不可少的基础.

1-1-1 物质与运动

物理学所研究的物质大致可以分为“实物”和“场”两类.

物质世界是分层次的,我们知道,物体是由原子、分子组成的,原子是由原子核和电子构成的,而原子核又是由更小的粒子——质子和中子构成的,它们都属于**实物**.对于原子层次以上的实物,人们习惯于按照其物理特性(形状、结构、强度、密度、颜色、表面等等)分为固态、液态、气态和等离子态.固态和液态统称为**凝聚态**.固态里有晶态、准晶态和非晶态之分,液态里有液晶和非晶液态之分.非晶态固体和液晶在现代高新技术和工程里得到了越来越多的应用.今天,凝聚态物理已经发展成为现代物理学最大的分支学科.

物理学家还证实了一种新物质形态的存在.这是一种在超低温下,成千上万个原子集中在微米线度的空间内形成的凝聚质,称为**玻色(S. Bose) - 爱因斯坦(A. Einstein)聚集质**(Bose - Einstein condensate).这里所有原子的速度全同、方

向锁定,从而失去了运动个性而形成一个单一、聚合的整体.对这种物态的研究将可能了解遵守量子力学规律的力所具有的性质,还可能有助于揭示超导的奥秘和推断早期宇宙的成因,人们还期待着由它的原子射线产生原子波激射(atomic laser).

实物之间的相互作用是通过场来实现的.人们习惯于按照相互作用的类型来划分场,如电磁场、引力场等等.实物之间可以存在多种相互作用场.场作为物质的存在形式,具有质量、动量和能量.对“粒子”和“场”的本质的认识,属于量子场论等现代物理的任务,本书不做深入讨论.

物理学家认为,丰富多彩的自然界是一个内部存在普遍规律的统一体,他们的理想就是为整个物质世界找出统一自治的基本规律.随着人类认识物质世界的能力向时间和空间极限的不断逼近,物理学家对物质世界的层次和尺度有了日益广泛和深刻的理解.

1-1-2 数量级

为了便于描述物质世界的不同层次,常引入数量级的概念.

通常把 10 的幂指数称为数量级(简称量级).比如真空中的光速为 $c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$,其数量级是 8;原子的半径(约 10^{-10} m)比人的身高小 10 个数量级;等等.有了数量级的概念,就便于定性或半定量地描述和讨论不同层次的物理图像,避免拘泥于冗繁的数字计算.

为了方便,人们还规定了一些词头,将基本单位(如米、秒等)和这些词头组合起来,构成这些单位的倍数单位或分数单位.在国际单位制里,人们在 10^{-24} 到 10^{24} 这 48 个量级之间规定了 20 个词头,每个词头都代表一个因数,具有特定的名称和符号,详见表 1-1,其中一些词头和物理量的基本单位组合在一起,已经成为物理名词的一部分,比如纳米科学、飞秒光谱等等.

表 1-1 国际单位制所用的词头

因数	词头名称		符号	因数	词头名称		符号
	英文	中文			英文	中文	
10^1	deca	十	da	10^{-1}	deci	分	d
10^2	hecto	百	h	10^{-2}	centi	厘	c
10^3	kilo	千	k	10^{-3}	milli	毫	m
10^6	mega	兆	M	10^{-6}	micro	微	μ
10^9	giga	吉[咖]	G	10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{12}	tera	太[拉]	T	10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{15}	peta	拍[它]	P	10^{-15}	femto	飞[母托]	f

续表

因数	词头名称		符号	因数	词头名称		符号
	英文	中文			英文	中文	
10^{18}	exa	艾[可萨]	E	10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{21}	zetta	泽[它]	Z	10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{24}	yotta	尧[它]	Y	10^{-24}	yocto	幺[科托]	y

1-1-3 物质存在与空间尺度

“四方上下曰宇,古往今来曰宙”.世间万物的存在、演化、变迁都需要相应的时空.对宇宙及世间万物的认识构成了人们的世界观.

现代科学研究涉及的空间尺度从小到 10^{-17} m 的亚原子粒子到大至 10^{26} m 的宇宙半径,跨越了大约 43 个数量级(表 1-2).在物理上,把大小接近或小于原子尺度数量级的研究客体叫做**微观系统**.而把大小在人体尺寸上下几个数量级范围内的客体称为**宏观系统**.近年来,随着纳米科学的发展,人们把由十几个到数百个原子组成的团簇及同量级大小的客体称为**介观系统**(mesoscopic system).一般而言,宏观系统和微观系统服从的规律是不同的,而介观系统虽然从空间范围上更接近宏观系统,它们却常常表现出微观系统的特征和效应.

人类能够感觉到的空间是三维的.前面所说空间尺度包含的 43 个量级,只是人类目前认识能力所能达到的界限.从大的一端说,宇宙是否无限大?为什么空间是三维的?至今还没有定论.空间有限和无限的问题实际上和空间的维数有关.举例来说,一个球面上的蚂蚁,无论它怎样爬行都不会受到限制,它自然“认为”它的世界(二维球面)是无限的;但对观察它的人来说,这个球面是有界的,换句话说,蚂蚁的“宇宙”是有界无限的.现实的宇宙到底是怎样的?对物理学来说,要得到证实或证伪才行.

表 1-2 空间尺度举例

(单位:m)

已观测到的宇宙范围极限	10^{26}
超星系团尺度	10^{24}
银河系半径	7.6×10^{22}
光一年内走的距离(1 l.y.)	10^{16}
日地距离	1.5×10^{11}
太阳半径	7×10^8

续表

地球半径	6×10^6
无线电中波波长	10^3
核动力航空母舰长度	3×10^2
人类身高	~ 1.5
灰尘线度	10^{-3}
人类红细胞细胞直径	10^{-6}
细菌线度	10^{-9}
原子线度	10^{-10}
原子核线度	10^{-15}
基本粒子线度	10^{-17}
普朗克长度(理论极限值)	10^{-35}

从小的一端说,物质是否无限可分?古人说“一尺之棰,日取其半,万世不竭”,哲学上也有“物质无限可分”的命题,但或许物理学更需要回答“怎么分?”“分成了什么?”“何时不可分?”这样一些问题.虽然 atom(原子)按希腊文 $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ 的原意是“不可分割的”,但后来的事实证明原子是有结构的,它由原子核和核外电子组成.再深入下去,就会发现并不这么简单.粒子物理的实验结果表明,组成质子、中子、介子等微观粒子的夸克,被“禁闭”在一个很小的区域内,各个夸克之间的相互作用随距离的增加而增加,要“分”出夸克似乎是不可能的——当用于“分割”的能量达到足够大时,又会产生出新的粒子!事实上,至今也没有直接观察到单独存在的自由夸克.因此,现在只能说这些粒子是有内部结构的复合粒子,“可分”的说法似乎已失去了原意.

上述大与小两个极限方向的研究早已是当代物理学的前沿,但在二者之间的整个空间范围,一直也是物理学研究的极为重要和活跃的领域.

1-1-4 时间尺度

时间是与空间并行的另一个基本概念.没有物质的存在就没有空间,而没有物质的运动就没有时间.

现代科学研究涉及的时间尺度从寿命约为 10^{-25} s 的 Z^0 粒子到年龄约为 10^{18} s 的宇宙,跨越了大约 43 个数量级(表 1-3).对于宇宙的年龄,理论和实验观测的推算值还比较粗糙.按照某些天文学家提出的理论,宇宙是从“大爆炸”中诞生的,时间的起点从爆炸开始时算起,由此可以推算出宇宙的年龄大约在 150

亿年左右,哈勃望远镜的最新观测数据也支持宇宙年龄在这个数量级范围.

表 1-3 时间尺度举例

(单位:s)

宇宙年龄	10^{18}
太阳系年龄	1.4×10^{17}
原始人出现	10^{13}
最早的文字记录	1.6×10^{11}
人类平均寿命	2.2×10^9
地球公转(1 a)	3.2×10^7
地球自转(1 d)	8.6×10^4
太阳光到地球的传播时间	5×10^2
人类心脏跳动周期	1
声波的周期	10^{-3}
无线电波的周期	10^{-6}
π^+ 介子的平均寿命	10^{-9}
分子振动周期	10^{-12}
原子振动周期(光波周期)	10^{-15}
光穿越原子的时间	10^{-18}
最短的粒子寿命	10^{-25}
普朗克时间(理论极限值)	10^{-43}

绝大多数微观粒子也是有寿命的,它们经过一定时间后就会衰变成为其他粒子.粒子的寿命是粒子从产生到衰变所存在的平均时间.多数粒子的寿命都比较短,但电子、质子等粒子的寿命被认为是无限长或接近无限长.

1-1-5 物质的质量

在 17 世纪的牛顿时代,质量曾用于表示“物质之量”.但二者是有区别的.物质的量在今天用于表示原子数目的多少,其单位为摩尔(mole),并在 1971 年正式确认为国际单位制的七个基本单位之一.而质量的概念要复杂得多,有引力质量和惯性质量之分.在现代物理学中,物质的质量和它自身的运动状态有关,并与能量相联系.关于质量的概念将分别在以后有关章节中进行讨论.

表 1-4 质量范围举例

(单位: kg)

银河系	2.2×10^{41}
太阳	2.0×10^{30}
地球	6.0×10^{24}
月亮	7.4×10^{22}
地球上的海洋	1.4×10^{21}
远洋轮船	10^8
大象	10^3
人	$\sim 6.0 \times 10^1$
葡萄	10^{-3}
灰尘	10^{-10}
烟草花叶病毒	2.3×10^{-13}
青霉素分子	5.0×10^{-17}
铀原子	4.0×10^{-26}
质子	1.7×10^{-27}
电子	9.1×10^{-31}
中微子	$< 2.0 \times 10^{-35}$

现代物理学所涉及的物质质量跨越的范围更大(表 1-4). 按照现代物理学观点, 光子和所有以光速运动的粒子的静止质量为零, 这无疑质量范围的下限, 质量的上限应是宇宙的总质量. 目前根据星体发光的光度学理论得到的宇宙总质量比动力学理论的结果要小 1 或 2 个数量级, 由此人们推测宇宙中还存在所谓暗物质. 在现有理论中, 暗物质的存在与否具有特别的意义, 由此可以给出宇宙是有限还是无限的理论判断. 因此, 寻找暗物质的工作是目前物理学界和天文学界都极为关心的事情. 有意思的是, 粒子物理中有一类叫做中微子的粒子, 它们的质量下限如此之小, 一直难以确定其质量. 不过据报道, 1998 年在日本进行的实验表明, 中微子有不为零的静止质量. 这有助于解释暗物质的存在. 换句话说, 尺度极小的微观粒子可能决定着大尺度宇宙的图像. 由此也可以说明, 整个物质世界既分层次又是一个和谐和统一的整体.

1-1-6 粒子与相互作用

现代物理学认为, 物质的最小构成单元不再是分子、原子, 而是更为基本的