



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

基础物理学教程

上 卷

陆 果



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

基础物理学教程

上 卷

陆 果



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

基础物理学教程 上卷/陆果. - 北京:高等教育出版社,
1998 (2002 重印)
高等学校教材
ISBN 7-04-006701-3

I. 基… II. 陆… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 18466 号

基础物理学教程(上卷)

陆 果

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

电 话 010 - 64054588

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

邮政编码 100009

传 真 010 - 64014048

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×960 1/16

印 张 25.25

字 数 430 000

版 次 1998 年 9 月第 1 版

印 次 2002 年 4 月第 4 次印刷

定 价 21.30 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

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。本书是在面向21世纪课程教材《基础物理学》的基础上，根据近年来的教学实践及读者的意见改写而成的。全书从现代科学技术的发展及理科对人才培养的要求出发，对理科非物理类专业基础物理课程的框架作了较大的变动，在课程内容的现代化方面作了较大幅度的改革。全书分力学和相对论、电磁学、光学、量子力学、热物理学等五部分，总计30章，分上、下卷出版。

本书可作为高等学校理科非物理类专业的教科书，也可供其他专业选用和社会读者阅读。

序

20 世纪初，物理学家揭开了原子内部结构的奥秘，建立了相对论和量子力学。1995 年，顶夸克的发现向人们宣告，六种夸克及其反粒子和胶子是构成质子和中子等强子的更为基本的粒子。1998 年，“发现号”航天飞机搭载阿尔法磁谱仪首次升空试验取得了成功，开始了直接到太空中探测和寻找宇宙中的反物质和暗物质的大型国际合作科学试验。今天，人们已经建立起了粒子物理的标准模型和宇宙学的标准模型，并继续探求着浩瀚的未知世界。在研究领域不断取得丰硕成果的同时，科学与技术迅速地、创造性地融合在一起，形成了一系列高、新技术部门。

随着科学技术的飞速发展，学科发展的方向日趋综合，新型的交叉学科不断出现并迅速发展。同时，近代物理学的概念、研究方法和实验技术在生物学、化学和地学等学科中已得到了广泛的应用。特别是，近代化学和生物学的发展已经深入到了微观领域，近代数学的发展与近代物理学的发展更是密切相关和相互促进的。因此，物理学，特别是近代物理学，已经成为各类人才所必须具备的基础知识。

我们正在培养 21 世纪的人才，教学和教材内容的更新势在必行。特别是，对于大学理科非物理类专业，除了普通物理课程之外，一般没有物理方面的后继课程。然而，原来的普通物理课程基本上是参照物理专业的普通物理课程设置的，近代物理学的内容很少，更缺少反映当代物理学及其前沿发展的内容。

为此，从现代科学技术的发展以及理科各个学科人才培养的要求出发，我们对物理课程的框架作了较大的变动，编写了《《基础物理学》》(陆果，北京：高等教育出版社，1997)，其内容分为以下五个部分：1) 力学和相对论，2) 电磁学，3) 光学，4) 量子力学，5) 热物理学。在内容上，不论原来是普通物理的内容还是理论物理的内容，不论是经典物理的内容还是近代物理的内容，只要是当今理科大学生应该掌握的物理基础，就在精心选择、重新组织和整理之后编写在本套书中。我们希望，即使是大学低年级的学生，也能够有限的时间内将发展到今天的物理学的基础和精华学到手，为他们未来的创造性工作打下较好的物理基础。

《《基础物理学教程》》是在面向 21 世纪课程教材《《基础物理学》》的基础上，根据近年来的教学实践及读者的意见改写而成的，删减了部分涉及数学较深或理论性较强的内容，减少了篇幅。该教程是教育部“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，希望能够达到如下的目标：不仅牢牢地把握住《《基础物理学》》的基本要求，保持并发扬《《基础物理学》》在课程现代化方面的成功之处，而且更适合于各类高等理工院校学生使用。

由于近年来物理学在各个领域都有了重大的发展，而且《《基础物理学》》和《《基础物理学教程》》涉及面很广，因此无论对于教师还是对于学生，在使用这一套教材的过程中都会遇到一定的困难。为了帮助有关师生更深刻地掌握其基本内容并开阔视野，我和陈凯旋同志一起，编写了《《基础物理学教学参考书》》(高等教育出版社出版)，简明扼要地讲述了以下三个方面的内容：物理学和高技术前沿(包括粒子物理的标准模型、宇宙学的标准模型、非线性科学的基本概念、生命科学中的物理问题和高技术研究等五章)、习题精析提要以及常用的数学结果，最后还给出了直到1998年的诺贝尔物理学奖获得者的简况表。

本书的计算机排版工作由北京大学薛立新同志完成，高等教育出版社胡凯飞同志为本书的出版做了大量的工作。通过立项，我们得到了教育部和北京市教育局的资助。许多专家和学者对我们的工作给予了热情的支持和帮助。自1997年3月《《基础物理学》》出版以来，广大教师和学生提出了许多宝贵的意见和建议。对于所有这些帮助，我在此谨致以衷心的感谢。

由于本人的学识有限，缺点和错误在所难免，诚恳地希望读者提出宝贵的意见。

陆 果

· 1998年8月于北京大学

目 录

绪论

§ 1 物理学的意义	1
§ 2 物质和相互作用	2
一 物质的微观结构和夸克的发现	2
二 宇宙学的标准模型	4
三 基本的相互作用	5
四 粒子物理的标准模型	7
§ 3 物理量的测量和单位制	8
§ 4 物理世界的层次和数量级	10

第一部分 力学和相对论

第一章 质点运动学	13
§ 1-1 质点运动的描述	13
一 质点 参考系和坐标系	13
二 质点运动的矢量描述	13
三 直角坐标系 抛体运动	15
四 平面极坐标系 横向速度和径向速度	17
五 自然坐标系 切向加速度和法向加速度	18
§ 1-2 相对运动	21
习题	23
第二章 动量守恒和质点动力学	25
§ 2-1 惯性定律和惯性系	25
§ 2-2 质量 动量和动量守恒定律	26
一 两质点间的相互作用	26
二 惯性质量	26
三 动量 动量守恒定律	27
§ 2-3 力 冲量和动量定理	29
一 力的定义	29
二 力的叠加原理 质点系动量守恒的条件	30
三 牛顿运动定律	31

四	冲量和动量定理	31
§ 2-4	牛顿运动定律及其应用	34
一	牛顿运动定律的表述	34
二	牛顿运动定律的应用	35
三	自然界中常见的力	36
§ 2-5	伽利略相对性原理和非惯性系	42
一	伽利略相对性原理	42
二	伽利略变换	43
三	非惯性系	44
四	加速平移参考系中的惯性力	45
五	惯性离心力	45
六	科里奥利力	46
	习题	50
第三章	机械能守恒	54
§ 3-1	机械能守恒定律	54
§ 3-2	功和功率	56
一	功和能	56
二	功率	57
§ 3-3	势能	57
一	保守力 保守系的机械能守恒	57
二	势能曲线	60
§ 3-4	质心参考系	66
一	动量中心系和质心	66
二	质心运动定理	67
三	克尼希定理 资用能	68
§ 3-5	两体碰撞	70
	习题	74
第四章	角动量守恒	79
§ 4-1	角动量和角动量守恒定律	79
§ 4-2	力矩和角动量定理	80
一	力矩和质点的角动量定理	80
二	质点系的角动量定理	81
三	质心系的角动量定理	82
§ 4-3	质点在有心力场中的运动	86
§ 4-4	对称性与守恒定律	91

一 对称性	91
二 对称性与守恒定律	92
习题	96
第五章 连续体力学	99
§ 5-1 刚体运动学	99
一 刚体的平移和定轴转动	99
二 刚体的平面平行运动	101
§ 5-2 刚体动力学	102
一 定轴转动刚体的角动量和转动惯量	102
二 刚体定轴转动的角动量定理和转动定理	104
三 刚体定轴转动的动能定理	104
四 刚体的进动和陀螺仪	105
§ 5-3 固体的弹性	111
一 弹性体中的应力和应变	111
二 弹性体的拉伸和压缩	112
三 弹性体的剪切形变	113
§ 5-4 流体力学	114
一 流体的连续性方程	114
二 理想流体的定常流动	117
三 粘性流体的流动	119
习题	123
第六章 振动和波	127
§ 6-1 简谐振动	127
一 描述简谐振动的特征量	127
二 简谐振动的合成	129
三 振动的分解 傅里叶变换	132
§ 6-2 弹性系统的振动	135
一 谐振子的自由振动	135
二 谐振子的阻尼振动	137
三 谐振子的受迫振动和共振	139
§ 6-3 耦合振子	142
一 简正模	142
二 简正模的叠加	144
§ 6-4 机械波的产生和传播	145
一 波动图象	145

二	波动方程	147
三	波的能量	149
四	声波	150
§ 6-5	驻波	151
一	驻波的形成和特点	151
二	两端固定的弦中的驻波 多自由度系统的简正模	152
三	半波损失	153
§ 6-6	多普勒效应	155
§ 6-7	波包和非线性波	158
一	波包和群速	158
二	非线性效应对波动的影响	159
三	孤波和孤子	160
习题	160
第七章	相对论	164
§ 7-1	狭义相对论的基本假设	164
一	相对论的意义	164
二	狭义相对论的基本假设	165
三	迈克耳孙-莫雷实验	166
§ 7-2	相对论运动学	167
一	相对论变换和时空观	167
二	闵可夫斯基空间 洛伦兹变换下的不变量	170
三	狭义相对论的时空观	172
§ 7-3	相对论动力学	178
一	动量和质量	178
二	力 功和动能	180
三	能量 质能关系	181
四	能量和动量的关系	184
五	动量、能量和力的相对论变换	184
§ 7-4	广义相对论	191
一	等效原理	192
二	爱因斯坦的引力场方程	195
三	广义相对论的检验	196
习题	200

第二部分 电磁学

第八章 电相互作用和真空中的静电场	203
§ 8-1 电相互作用	203
一 电荷 电荷守恒定律	203
二 库仑定律 静电力的叠加原理	205
三 电场和电场强度	206
四 场强的叠加原理	206
§ 8-2 静电场的高斯定理	211
一 电场线	211
二 电场通量	211
三 静电场的高斯定理	212
四 静电场的高斯定理的微分形式	214
§ 8-3 静电场的环路定理和电势	217
一 静电场的环路定理	217
二 电势差与电势	219
三 电势叠加原理	221
四 等势面 电势的梯度	221
习题	227
第九章 静电场中的导体和电介质	229
§ 9-1 静电场中的导体	229
一 导体的静电平衡条件	229
二 导体壳和静电屏蔽	231
三 电容和电容器	233
§ 9-2 静电场中的电介质	235
一 电介质的极化	235
二 极化强度和极化电荷	236
三 各向同性线性电介质的极化规律	238
四 电位移 有电介质时的高斯定理	238
五 铁电体、永电体和压电体	240
六 电介质的击穿	241
§ 9-3 静电场的能量	243
一 带电体系的静电能	243
二 电场的能量和能量密度	246
习题	249

第十章 电磁相互作用	252
§ 10-1 磁相互作用.....	252
一 磁性现象.....	252
二 磁场和磁感应强度.....	252
三 洛伦兹力.....	253
四 带电粒子在磁场中的运动.....	253
五 霍尔效应.....	255
§ 10-2 运动电荷的电磁场.....	259
一 运动电荷的电场和磁场(非相对论的).....	259
二 电磁场的相对论变换.....	260
三 运动电荷的电磁场(相对论的).....	261
四 两个运动电荷之间的相互作用.....	264
§ 10-3 磁场和电流.....	266
一 恒定电流.....	267
二 毕奥-萨伐尔定律.....	273
三 安培定律.....	273
习题.....	281
第十一章 恒定磁场和磁介质	286
§ 11-1 磁场的高斯定理和安培环路定理.....	286
一 磁场的高斯定理和矢量.....	286
二 安培环路定理.....	288
§ 11-2 有磁介质时的高斯定理和安培环路定理.....	292
一 介质的磁化.....	292
二 有磁介质时的高斯定理.....	296
三 有磁介质时的安培环路定理.....	296
§ 11-3 介质的磁化规律.....	298
一 顺磁质和抗磁质.....	298
二 铁磁质.....	300
习题.....	304
第十二章 电磁感应	306
§ 12-1 电磁感应定律.....	306
一 电磁感应现象的发现.....	306
二 法拉第电磁感应定律.....	307
三 楞次定律.....	308
§ 12-2 动生电动势和感生电动势.....	310

一	动生电动势.....	310
二	感生电动势.....	311
三	电磁感应定律的普遍形式.....	312
四	电磁感应与相对性原理.....	313
§ 12-3	互感和自感.....	317
一	互感.....	317
二	自感.....	318
§ 12-4	磁场的能量.....	321
一	自感磁能.....	321
二	互感磁能.....	322
三	磁场的能量.....	323
§ 12-5	暂态过程.....	325
一	LR 电路的暂态过程.....	325
二	RC 电路的暂态过程.....	326
三	LCR 电路的暂态过程.....	326
§ 12-6	超导电性和超导磁体.....	328
一	零电阻现象.....	328
二	迈斯纳效应和磁通量子化.....	329
三	超导磁体的特点.....	332
四	工作在持续电流状态的超导磁体.....	333
	习题.....	335
第十三章	电路.....	338
§ 13-1	直流电路.....	338
一	电路中任意两点之间的电势差.....	338
二	基尔霍夫方程组.....	339
§ 13-2	交流电及其简单电路.....	343
一	交流电概述.....	343
二	交流电路中的基本元件.....	344
三	简单交流电路的矢量图解法.....	347
§ 13-3	交流电路的复数解法.....	350
一	交流电的复数表示法.....	350
二	交流电路的基尔霍夫方程组及其复数形式.....	352
§ 13-4	交流电的功率.....	353
一	瞬时功率和平均功率.....	353
二	功率因数.....	354

§ 13 - 5 共振电路	355
一 串联共振电路	356
二 共振电路的品质因数	357
三 并联共振电路	358
习题	360
第十四章 电磁场和电磁波	364
§ 14 - 1 位移电流	364
一 电磁场的基本规律	364
二 位移电流	365
三 安培环路定理的普遍形式	366
§ 14 - 2 麦克斯韦方程组和边界条件	368
一 麦克斯韦方程组	368
二 电磁场的边界条件	369
§ 14 - 3 电磁波	372
一 自由空间中的电磁波和平面电磁波	372
二 电磁波的辐射	377
三 电磁波谱	381
§ 14 - 4 电磁场的能量和动量	381
一 电磁场的能量密度和能流密度	381
二 电磁场的动量	383
三 电磁场是物质的一种形态	384
习题	385
附录	
附表 1 基本物理常量 1986 年的推荐值	387
附表 2 保留单位和标准值	387
附表 3 太阳系的基本数据(I)	388
附表 4 太阳系的基本数据(II)	388

绪 论

§ 1 物理学的意义

物理学是研究物质、能量和它们的相互作用的学科^①，或者说，物理学是关于自然界最基本形态的学科，它研究物质的结构和相互作用以及它们的运动规律。具体而言，物理学研究宇宙间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。

物理学领域包含的尺度从小到质子(proton)的半径 10^{-15} m，直到目前可探测到的最远的类星体(quasar)的距离 10^{26} m；包含的时间从短到 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。研究包含如此宽广范围的物理现象，发明为观测自然界所需要的更为有效的实验工具，创立使我们能够解释已经观测到的物理现象的理论，这些就是物理学的目标和成就。

物理学是一切自然科学的基础。物理学所研究的粒子，构成了蛋白质、基因、器官、生物体、陆地、海洋和大气等一切人造的和天然物质。在这个意义上，物理学构成了化学、生物学、材料科学和地球物理学等学科的基础，物理学的基本概念和技术被应用到了所有的自然科学。在这些学科和物理学之间的边缘领域中，形成了一系列新的分支学科和交叉学科，从而促使自然科学更加迅速地发展。

① 摘自 1999 年 3 月召开的第 23 届国际纯粹与应用物理联合会(IUPAP)代表大会通过的决议。该决议还指出：物理学是一项国际事业，它对人类未来的进步起着关键的作用。对物理教育的支持和研究，在所有国家都是重要的，这是因为：1. 物理学是一项激动人心的智力探险活动，它鼓舞着年轻人，并扩展着我们关于大自然知识的疆界。2. 物理学发展着未来技术进步所需的基本知识，而技术进步将持续驱动着世界经济发动机的运转。3. 物理学有助于技术的基本建设，它为科学进步和发明的利用，提供所需训练有素的人才。4. 物理学在培养化学家、工程师、计算机科学家，以及其他物理科学和生物医学科学工作者的教育中，是一个重要的组成部分。5. 物理学扩展和提高我们对其他学科的理解，诸如地球科学、农业科学、化学、生物学、环境科学，以及天文学和宇宙学——这些学科对世界上所有民族都是至关重要的。6. 物理学提供发展应用于医学的新设备和新技术所需的基本知识，如计算机断层扫描(CT)、磁共振成像、正电子发射层析术、超声波成像和激光手术等，改善了我们的生活质量。

从古希腊的自然哲学算起，物理学的发展已经有了 2600 多年的历史。物理学真正成为一门精密的科学，却是从 1687 年牛顿 (I. Newton, 1642–1727) 发表《自然哲学的数学原理》才开始的。在历史上，人们在实践中首先观察到的是宏观的物体和现象，对它们的研究导致了经典物理学的诞生和发展。到 19 世纪后期，力学、热学、电磁学和光学等经典物理学已经建立了比较完整的理论体系，并取得了巨大的成功；同时，物理学研究开始进入到了微观世界领域，并对高速运动现象，特别是光的传播和干涉现象进行了精密的研究，经典物理学的局限性也开始显露了出来。

20 世纪初，普朗克 (M. Planck, 1858–1947) 的量子论和爱因斯坦 (A. Einstein, 1879–1955) 的相对论开辟了近代科学的新纪元，物理学成了自然科学的先驱。这些崭新的观念改变了人们对客观世界的认识，极大地影响了科学技术的发展。物理学研究的范围迅速扩大、不断深入。今天，人们在粒子物理学、原子核物理学、凝聚态物理学、原子分子物理学和光学、等离子体物理学、引力和宇宙学、宇宙射线物理学等分支学科以及各个交叉学科和技术应用中，都取得了引人注目的成就。

物理学的发展，广泛而直接地影响了社会生产和生活的各个方面，成为科学技术和社会发展的巨大推动力。18 世纪 60 年代开始的第一次技术革命，主要的标志是蒸汽机的广泛应用，它是牛顿力学和热力学发展的结果。19 世纪 70 年代开始的第二次技术革命，主要的标志是电力的广泛应用和无线电通讯的实现，它是电磁学发展的结果。20 世纪 40 年代兴起并一直延续到今天的第三次技术革命，是近代物理学发展的结果，它的特点是出现了一系列新技术和高技术，并在此基础上创造了一系列的新产品和新装置，深刻地改变了人类的物质生产和精神生活。

§ 2 物质和相互作用

一 物质的微观结构和夸克的发现

人类对物质微观结构的认识是不断发展的。1810 年道尔顿 (J. Dalton, 1766–1844) 建立了原子学说，认为原子是物质微观结构的最小组元。1897 年汤姆孙 (J.J. Thomson, 1856–1940) 发现了电子 (electron)，1911 年卢瑟福 (E. Rutherford, 1871–1937) 提出了原子的有核模型，1932 年查德威克 (J. Chadwick, 1891–1974) 发现了中子 (neutron)，从而表明原子核是由质子和中子组成的。在当时的实验研究中，未能探测出电子、光子 (photon)、质子和中子等粒子的大小，人们就认为它们可能是物质微观结构的最小组元，称它

们为基本粒子。

20世纪50年代以来,人们发现了数百种称为**强子(hadron)**的粒子。强子分为**介子(meson)**和**重子(baryon)**,重子又分为**核子(nucleon)**,包括质子和中子)和**超子(hyperon)**。随着实验能量的不断提高人们发现,一方面,强子这些所谓的基本粒子具有一定的大小和内部结构,如质子的电荷分布半径为 0.8×10^{-16} m;另一方面,电子、 μ 子(muon)和中微子(neutrino)这样一些轻子(lepton)情况却完全不同。高能碰撞实验表明,尽管加速电子的能量现在已经达到 10^{11} eV,但仍然可以把电子当作点粒子来对待,尚未观测到电子的内部结构。由此可见,原来称之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(M.Gell-Mann, 1929-)和兹维格(G.Zweig, 1937-)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(quark)**、**反夸克(antiquark)**和**胶子(gluon)**组成的:重子由3个夸克组成,反重子由3个反夸克组成,介子由一对正、反夸克组成。现在,人们还没有观测到夸克和胶子有内部结构,它们与规范玻色子以及轻子是属于同一层次的粒子。夸克最引人注目的特点之一是,在任何平常的条件下,无法把夸克从它们的束缚态中解脱出来,这称为**夸克禁闭(quark confinement)**。迄今为止,几乎所有试图产生或发现自由夸克的实验都失败了。

在夸克模型的最早理论中,仅仅有三“**味(flavour)**”夸克,它们是**上夸克(up quark)**、**下夸克(down quark)**和**奇异夸克(strange quark)**。在深度非弹性散射实验中,人们用高能电子和中微子作为“探针”,首先探测到了质子内部有“又小又硬”的东西,这表明夸克是有可能真实存在的。确立夸克理论的决定性事件是1974年 J/ψ 粒子和1977年 Υ 粒子的发现,它们是两味新夸克——**粲夸克(charm quark)**和**底夸克(bottom quark)**存在的实验证据。

理论表明,在自然界中自旋量子数为 $1/2$ 的费米子是成组地存在着的,一组费米子称为一“代”费米子(见表1)。到1977年,实验上已经发现了五味夸克,但理论上预言还应该存在第六味夸克——**顶夸克(top quark)**。为了确保泡利不相容原理总能得到满足,人们引入了一个新的量子数——“**色荷(color charge)**”,每一种夸克都分为红、绿、蓝三种色(color)状态。由于重子和介子都是无色的,因此不可能在强子以外直接观测到夸克的色状态。

1995年3月2日,美国费米国家实验室的两个小组各自独立地发现了顶夸克。他们采用的是质子-反质子对撞机,它是一个长达6.4 km的环形加速器,使用了1 000个超导磁体,把质子和反质子加速到各具有 9×10^{11} eV的能量后进行对撞,平均大约要 10^6 次对撞才能观测到一次顶夸克,而且它