

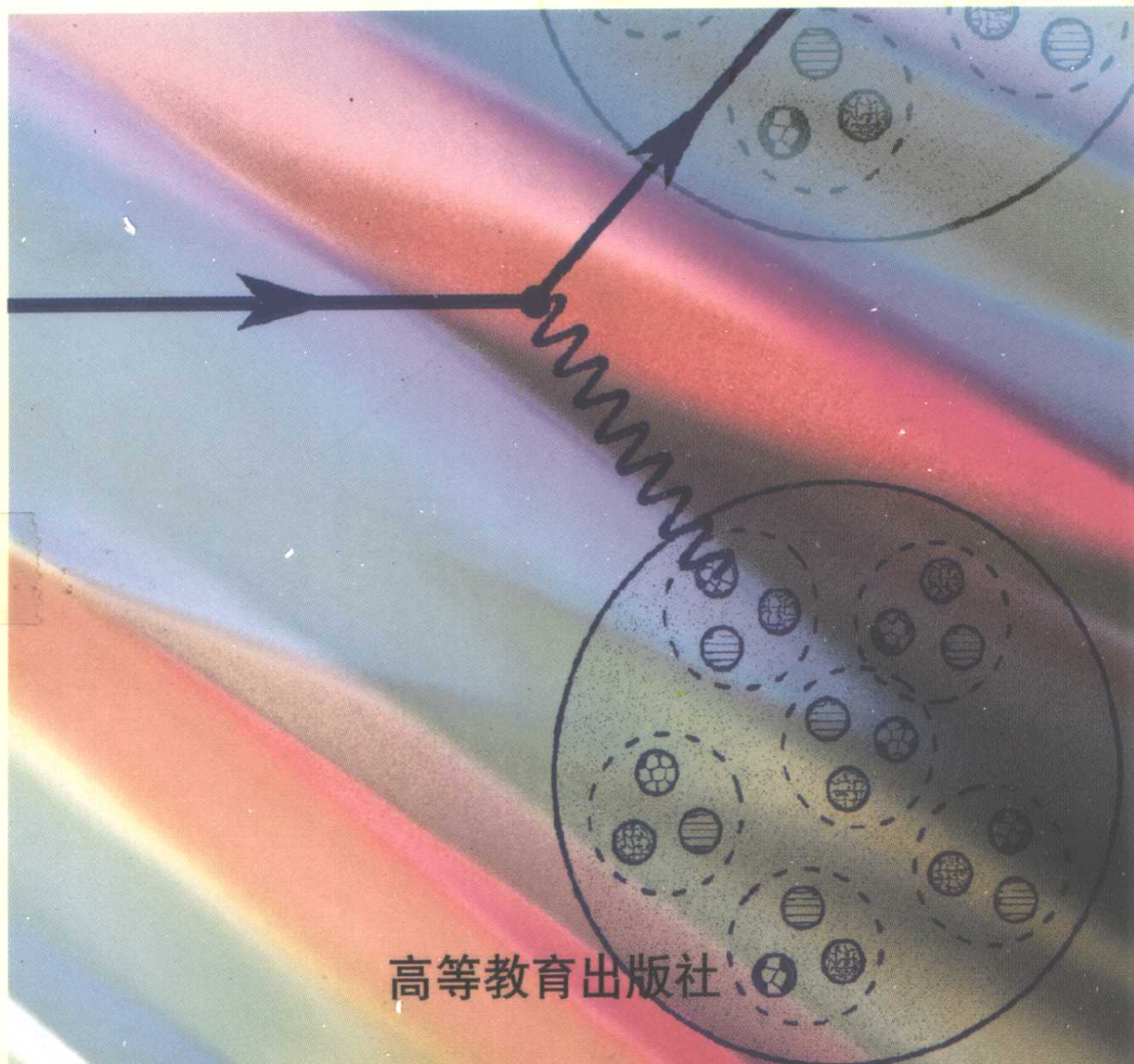


普通高等“九五”国家级重点教材

原子核物理基础

核子与核

宁平治 李磊 闵德芬



高等教育出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

原子核物理基础

核子与核

宁平治 李磊 闵德芬

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

原子核物理基础: 核子与核 / 宁平治, 李磊, 闵德芬
—北京: 高等教育出版社, 2003. 7

ISBN 7-04-011910-2

I. 原… II. ①宁…②李…③闵… III. 核物理学—高等学校—教材 IV. 0571

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 044887 号

策划编辑 陶 铮 责任编辑 陶 铮
封面设计 于文燕 责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京奥隆印刷厂

开 本	850×1168 1/32	版 次	2003 年 7 月第 1 版
印 张	20.75	印 次	2003 年 7 月第 1 次印刷
字 数	530 000	定 价	34.00 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

原子核是一个强相互作用的多核子系统，是物质结构的一个重要层次。原子核的结构、性质和动力学是核物理研究内容的核心。这种研究的发展大致经历了以下三个阶段：第一阶段，通过大量的实验测量和理论分析，使人们逐步认识到多核子系统统一运动形态的不同侧面，并建立了在一定条件下适用的物理模型，以描述多核子系统的特定的运动状态。如描写单粒子运动的壳层模型(提出者因此而获 1963 年诺贝尔物理学奖)和描写多粒子协调运动的集体模型(提出者因此而获 1975 年诺贝尔物理学奖)等。这些模型都是根据实验现象提出，经受了新实验事实的检验，取得了极大成功，它们至今仍继续发挥着重要作用，并同时有了许多新的发展。第二阶段，原子核既然是一个多核子系统，原则上它的整体性质和运动形态应该由组成它的核子的性质以及核子-核子间的强相互作用势(核力)来决定。这就需要从实验和理论两方面深入研究核子的结构和性质，以及核力的本质。迄今对核力和核多体问题的理解已经大大深化。第三阶段，在核子的夸克-胶子结构被认清之后，如何由夸

克-胶子的强相互作用动力学——量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)出发来理解核子与核的性质,是当今受到普遍关注的核物理基本问题,也是原子核物理的长远目标。目前只有一些符合 QCD 精神的物理模型。

随着对原子核的认识从大尺度到小尺度的深化,在实验观测方面,“显微镜”的放大倍数越来越高,分辨能力越来越强。近 20 年来,原子核物理实验技术(如高能电子加速器、重离子加速器、新型探测技术等)有了惊人的提高,为深入认识核子与核的结构和性质提供了丰富的实验数据。介绍这些实验事实和理论认识构成了本书以下三个方面的主要内容:**核子结构**(A 篇,共 4 章)、**核子-核子相互作用**(B 篇,共 6 章)和**原子核结构**(C 篇,共 6 章)。

原子核物理属于基础学科,在学科自身发展的同时,与其它学科(如原子物理、凝聚态物理、天体物理等)有着重要的相互影响。此外,原子核物理的发展还使它逐渐具有了应用科学的性质。实际上,原子核物理的原理和技术在能源、新材料、环保、资源、考古、工农业、医学与生物学等诸多领域有着广泛的应用,对国民经济和社会发展起着重要的推动作用。

本书是在原讲稿基础上进行较大幅度的增删修改而成的,可作为高等学校物理类专业本科高年级学生和低

年级研究生的教材。期望本书能起到由本科生教材到研究生教材之间的桥梁作用。本书也可作为有关专业科技工作者的参考书。本书在选材和编写过程中考虑了以下几点：1. 符合由小到大的物质结构层次顺序；2. 低能现象与中高能现象并重；3. 由核物理的基本概念和基本规律有选择地引导到本学科前沿，努力反映本学科的新发展，并注意理论结果与实验事实的比较；4. 为突出内容主线，本书未专辟章节讲授反应、衰变等问题，仅在涉及这些问题时予以适当介绍；5. 努力反映中国学者的有关贡献。

本书假定读者具有量子力学的基础知识，若书中涉及一些一般初等量子力学可能不详细介绍的内容，则在附录中予以适当介绍。此外，假定读者尚不具备量子场论的知识。在编写过程中，为适合本科高年级学生使用，力求物理概念、物理图像和物理思想简明、清晰、深入浅出，不使之被繁琐的理论推导和数学计算所湮没，但对核心内容不回避适当的理论推导。在各章节对涉及核物理前沿课题的介绍中，有不少是从近十余年国内外发表的文献中提取的。因篇幅所限，仅对若干新现象、新概念、新规律做定性讲解，或仅介绍新结果，但给出了适量的参考文献，以利于有兴趣的读者进一步深入探讨。为表述方便，书中公式采用两种单位制：MKS 单位制和自然单位制，它们之间的转换关系见书末附录一。为方便

读者，附录九和附录十还给出了最新的化学元素周期表和核素性质表。

本书在编写过程中，得到蔡崇海教授、李学潜教授、胡北来教授、罗马教授和申虹教授等不同形式的帮助和支持。张小兵副教授阅读了低能强子物理部分的初稿，并提出了有益的建议。罗延安副教授协助补充校正了核素性质表。谭玉红博士校对了最后六章的初稿。作者在此一并致谢。最后，作者诚恳希望广大读者对本书中尚未发现的错误、疏漏和欠妥之处提出宝贵的意见。作者的电子信箱是：ningpz@nankai.edu.cn。

作 者

2002 年 2 月

内 容 提 要

本书是普通高等教育“九五”国家级重点教材。本书按核子结构—核子—核子相互作用—原子核结构的思路编写,既与核物理学科当前的发展阶段相适应,又较好地符合了认知规律。内容上有重点地反映近 20 年核物理在实验和理论上的新发展,适当加强了中高能核物理的内容,低能现象与高能现象并重,而且还大幅增加了原有核物理教材普遍未曾涉及的核子结构与强子的内容,以满足当今教学和科研的实际需要。本书条理清晰、论述严谨、语言简练、深入浅出。作者强调物理思想的简明清晰,又不回避必要的理论推导。

本书可作为本科高年级学生和研究生通用教材;略去一些较深的内容可作为本科高年级学生的教材;省掉一些起点低的内容则可作为具有核物理基础的研究生的教材,完整使用则有助于解决目前部分核物理专业研究生没有本科核物理基础的问题。

目 录

前 言

A 篇 核 子

A1 强子的性质	(2)
A1.1 引述——基本相互作用和基本粒子	(2)
四种基本相互作用(2) 夸克和轻子(5) 强子(6)	
A1.2 核子的性质	(8)
一般讨论(8) 核子半径与形状因子(10)	
核子的电磁形状因子(15) 核子的同位旋(19)	
A1.3 π 介子	(22)
存在 π 介子的理论预言(22) π 介子的一般性质(23)	
产生和衰变(25)	
A1.4 K 介子和超子	(26)
一般讨论(26) 产生和衰变(29)	
A1.5 共振态	(32)
从 πN 散射谈起(33) 共振的量子力学表述(35)	
重子共振态(38) 介子共振态(41)	
A1.6 强子的分类	(43)
强子的经验分类(44) 夸克的量子数(45) $SU(2)$ 与 $SU(3)$ (46)	
基于夸克模型的强子分类(50) $SU(6)$ (55)	
A1 参考文献	(58)
A2 强子结构的高能探针研究	(59)
A2.1 高能电磁探针“看到”的核子	(60)
核子的结构函数(60) 标度无关现象(63) 部分子(65)	
部分子模型的基本关系式(67) 部分子动量分布函数(71)	
胶子的贡献(73) 其它相关问题概述(74)	

A2.2	高能电磁探针“看到”的 π 介子	(79)
	π 介子的形状因子(79) π 介子的结构函数(83)	
A2.3	关于夸克-胶子动力学的定性讨论	(87)
	夸克的色自由度(88) 带色的胶子(91)	
	夸克间的色相互作用(93) 反屏蔽效应与渐近自由(96)	
	跑动耦合常数(98)	
A2	参考文献	(100)
A3	强子结构模型	(102)
A3.1	介子的夸克势模型	(102)
	一般讨论(102) 重介子(105) 轻介子(108)	
A3.2	重子的夸克势模型	(110)
	3夸克体系哈密顿量(110) 轨道波函数(112)	
	自旋波函数(114) 味-自旋波函数(114) 总波函数(116)	
	重子质量谱(116) 重子磁偶极矩(118)	
A3.3	强子的袋模型	(120)
	Bogoliubov 袋模型(120) MIT 袋模型(122)	
	袋模型的改进(123)	
A3	参考文献	(128)
A4	低能强子物理的初步概念	(130)
A4.1	一些预备知识	(130)
	四维空间表示(130) 拉氏密度(131) 狄拉克方程(134)	
	相互作用(136) 守恒流(137)	
A4.2	手征对称性	(139)
	螺旋性——手征性(139) 手征变换(141) 手征袋模型(142)	
A4.3	手征对称性的自发破缺	(143)
	对称性自发破缺的概念(144) Goldstone 玻色子(147)	
	σ 模型(149) 几个有用的关系式(152) 夸克凝聚(153)	
A4.4	小结	(158)
	手征对称性破缺的方式(158) 手征对称性自发破缺的结果(158)	
	π 介子的二重性(159) 关于低能有效理论(160)	
A4	参考文献	(161)
A	篇习题	(163)

B 篇 核子-核子相互作用

B1 核子-核子束缚态——氘核	(169)
B1.1 引述——核力的一般特征	(169)
饱和性和短程性(169) 交换性(170)	
电荷对称性与电荷无关性(173) 核力的一般形式(174)	
B1.2 氘核	(178)
概述(178) 氘核 S 态(179) 氘核 S 态与 D 态的混合(180)	
氘核的电四极矩(183) 氘核的磁矩(183)	
B1 参考文献	(185)
B2 核子-核子散射态	(187)
B2.1 引述	(187)
B2.2 低能 NN 散射	(188)
相移分析(188) 散射长度和有效力程(192)	
B2.3 $E < 400$ MeV 的 NN 散射	(197)
微分截面特点(197) 高分波相移(200) 非定域势与动量相	
关性(202) 经典的唯象 NN 势(204) T 矩阵方法(205)	
B2.4 极化 NN 散射	(206)
核子与无自旋靶的散射(207)	
极化核子与极化核子的散射(209) 极化散射参量(210)	
B2 参考文献	(213)
B3 NN 势的介子交换模型	(215)
B3.1 单 π 交换势	(216)
B3.2 单玻色子交换势	(218)
B3.3 Bonn 势简介	(223)
B3 参考文献	(227)
B4 NN 势的夸克模型	(228)
B4.1 引述	(229)
B4.2 NN 势的非相对论夸克势模型	(231)
一般讨论(231) 关于6夸克波函数的对称性(233)	
关于 NN 势排斥芯(236) s 波 NN 散射相移(239)	
B4 参考文献	(240)

B5	现代核子-核子势	(242)
B5.1	引述	(242)
B5.2	现代唯象势	(244)
B5.3	现代介子交换势	(246)
B5.4	电荷对称性破缺和电荷无关性破缺	(248)
B5.5	小结	(251)
B5	参考文献	(252)
B6	其它强子与核子的相互作用	(254)
B6.1	π 介子与核子的相互作用	(255)
	一般讨论(255) πN 系统的同位旋(256)	
	πN 散射的相移分析(260) πN 散射的低能极限(264)	
	π 介子-核子耦合常数(267) πN 散射的 Δ -isobar 模型(268)	
	能量高于 Δ_{33} 共振区的 πN 散射(269)	
B6.2	K 介子与核子的相互作用	(270)
	一般讨论(270) KN 系统的同位旋(272) K^+N 散射(273)	
	K^-N 散射(274) KN 相互作用的动力学模型(276)	
B6.3	超子与核子的相互作用	(278)
	一般讨论(278) YN 散射实验数据(279)	
	某些对称性结果(282) YN 相互作用的理论模型(284)	
B6	参考文献	(286)
B	篇习题	(290)

C 篇 原子核

C1	核内的核子-核子相互作用	(295)
C1.1	核内核力的定性讨论	(295)
	核半径与密度分布(295) 束缚能与分离能(300)	
	核内核力的定性特征(302)	
C1.2	核物质	(305)
	无限大核物质的概念(305) 费米气体模型(306)	
	核物质的压缩模量(310) 核子在核物质中的平均自由程(311)	
	核物质中核子的有效质量(314)	
	核物质饱和性对核力的要求(315)	

C1.3 核内的有效二体力	(316)
从现实二体力到有效二体力(316) 唯象有效二体力(317)	
微观有效相互作用(320)	
C1.4 核内的平均势	(322)
一般讨论(322) 平均势的唯象确定(323)	
平均势中的单粒子能级(324)	
C1 参考文献	(329)
C2 核多体方法	(331)
C2.1 Hartree-Fock 平均场	(332)
Hartree 平均场(332) *Hartree-Fock(HF)平均场(333)	
Hartree-Fock 基态(334)	
C2.2 Brueckner-Hartree-Fock 方法	(335)
引述(335) 二体关联波函数(336)	
Bethe-Goldstone 方程的 s 波解(337) 核物质基态性质(340)	
C2.3 DBHF 方法	(343)
引述(343) DBHF 基本点(344)	
C2.4 相对论平均场	(345)
引述(345) σ - ω 模型下的场方程(346) 平均场近似(348)	
RMFT 简评(349)	
C2 参考文献	(350)
C3 原子核的壳层结构	(352)
C3.1 单粒子壳层模型与原子核的静态性质	(352)
核自旋和宇称(352) 磁偶极矩(353) 电四极矩(358)	
C3.2 核能谱与电磁跃迁及其单粒子估计	(360)
能谱与壳层问题(360) 电磁跃迁的物理概念(363)	
C3.3 形变原子核的壳层结构	(370)
核形变和集体运动的定性理解——长程关联(370)	
形变参量(373) 形变壳层模型的单粒子能级(374)	
形变核单粒子波函数(379) 形变壳模型的改进(381)	
形变核基态性质(382)	
C3.4 剩余相互作用	(384)
一般讨论(384) 配对相互作用(386) 对关联的实验证据(387)	

Seniority 模型(389) BCS 模型(392) 小结和展望(398)	
C3 参考文献	(399)
C4 原子核的集体运动	(401)
C4.1 一般讨论	(401)
C4.2 集体振动态	(403)
低频小振幅表面振动(404)	
高频小振幅简谐振动——巨共振(408)	
C4.3 集体转动态	(412)
转动哈密顿量(414) 转动态波函数(416) 转动态能级(418)	
转动核的电磁矩(420) 转动核的电磁跃迁(421)	
C4.4 高自旋态与超形变核	(423)
什么是高自旋态(424) 带交叉与回弯现象(426)	
全顺排与带终止现象(428) 超形变与巨超形变(430)	
形状共存和全同带现象(433) 超形变带能级自旋的确定(435)	
推转哈密顿量与 Routhian(436)	
Signature 劈裂与 Signature 反转(438)	
磁转动带与手征二重带(442) 小结和展望(445)	
C4 参考文献	(446)
C5 极端条件下的原子核	(452)
C5.1 引述——重离子碰撞	(452)
四种极限情况(452) 重离子碰撞概述(453)	
C5.2 远离 β 稳定线的原子核	(457)
β 稳定线(457) 新核素的合成(459) 晕核(460)	
皮核(462) $N=Z$ 双幻核(463)	
C5.3 热核	(464)
热核概述(464) 液-气相变(466)	
C5 参考文献	(468)
C6 原子核的非核子自由度	(472)
C6.1 引述	(472)
传统核物理成就辉煌(472) 非核子自由度(472)	
核介质效应与相变(473) 关于理论方法(474)	
关于实验探测(474)	

C6.2 原子核的介子自由度	(475)
核内的盈余 π 介子(475) 核内介子交换流的实验检测(476)	
核内 π 介子性质的变化(477) 核内的实 π 介子(478)	
核介质内的矢量介子(479)	
C6.3 原子核的夸克自由度	(480)
核内夸克效应的实验研究(480) 涉及夸克层次的核模型(482)	
C6.4 奇异性核物理	(482)
K-核散射(483) 超核(484) 奇异性核物质(485)	
C6.5 核物质的新形态——夸克-胶子等离子体	(486)
禁闭相和退禁闭相(487) 自由气体模型下的 QGP(489)	
QGP 标识信号 I : 直接光子发射(492)	
QGP 标识信号 II : 双轻子产生(493)	
QGP 标识信号 III : J/ψ 和 ψ' 产额压低(495)	
QGP 标识信号 IV : 奇异性增强(495)	
QGP 标识信号 V : Strangelet 产生(497) 手征相变(497)	
C6 参考文献	(499)
C 篇习题	(505)
附 录	
附录一 单位和物理常数	(510)
1.1 单位	(510)
1.2 物理常数	(512)
附录二 特殊函数	(514)
2.1 勒让德多项式、连带勒让德函数与球谐函数	(514)
2.2 合流超几何函数与拉盖耳多项式	(520)
2.3 球贝塞耳函数	(522)
附录二 参考文献	(525)
附录三 单粒子波动方程(束缚态)	(526)
3.1 引述	(526)
1. 薛定谔(Schrödinger)方程(526) 2. Klein-Gordon 方程(527)	
3. 狄拉克(Dirac)方程(528)	

3.2 薛定谔方程(束缚态)	(531)
1. 球对称势(531) 2. 球对称方势阱(533)	
3. 球对称谐振子势(534) 4. 线性势(535) 5. 库仑势(536)	
3.3 Klein-Gordon 方程(束缚态)	(538)
1. 非相对论极限(539) 2. 零自旋粒子与电磁场的相互作用(539)	
3. 球对称势(540) 4. 介原子(540)	
3.4 狄拉克方程(束缚态)	(542)
1. 径向方程(542) 2. 球对称方势阱(545)	
附录三 参考文献	(547)
附录四 单粒子波动方程(散射态)	(548)
4.1 薛定谔方程(散射态)	(548)
1. 分波法(549) 2. 有效力程(551) 3. 库仑势散射(552)	
4. 复势的散射(555) 5. 包含自旋-轨道耦合势的散射相移(556)	
4.2 Klein-Gordon 方程(散射态)	(559)
1. 标量粒子的势散射(559) 2. 介质中的 p 波散射(560)	
3. 介质中的 s 波散射(562) 4. π -核散射的有效光学势(563)	
4.3 狄拉克方程(散射态)	(565)
1. 核物质中的狄拉克方程(565) 2. 狄拉克唯象学(566)	
附录四 参考文献	(567)
附录五 有关角动量的一些公式	(568)
5.1 Clebsch-Gordon 系数	(568)
5.2 D 函数	(577)
5.3 球张量与 Wigner-Eckart 定理	(580)
附录五 参考文献	(581)
附录六 量子力学补充	(582)
6.1 Lippmann-Schwinger 方程	(582)
1. 积分方程(582) 2. 算符形式解(584) 3. T 矩阵方程(586)	
6.2 黄金规则与态密度	(587)
1. 定义(587) 2. 箱中的自由核子(588) 3. 核子-核势散射(589)	
6.3 二次量子化	(590)
1. 引导性例子(590) 2. 玻色子算符(592) 3. 费米子算符(593)	
4. 多体哈密顿量(593)	

6.4 矩阵对角化	(595)
1. 定义(595) 2. 矩阵对角化(595)	
附录六 参考文献	(596)
附录七 相对论运动学	(597)
7.1 洛伦兹变换	(597)
7.2 不变质量	(597)
7.3 阈能	(598)
7.4 低能极限和高能极限	(599)
7.5 Mandelstam 变量	(599)
7.6 交叉对称性	(600)
附录八 多极矩和多极辐射	(602)
8.1 电磁多极矩	(602)
8.2 电磁多极辐射	(605)
附录八 参考文献	(607)
附录九 元素周期表	(608)
附录十 核素性质表	(610)
部分习题答案	(637)