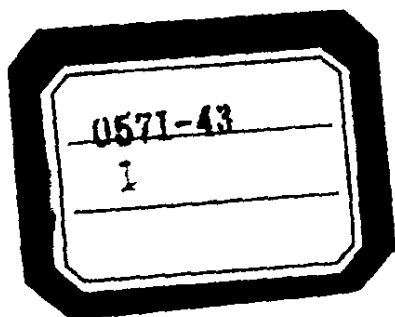


# 低能及中高能 原子核物理学

■ 程檀生 钟毓澍 编著



北京大学出版社



1737952

北京大学教材

# 低能及中高能原子核物理学

程檀生 钟毓澍 编著

July 11 1971



北京大学出版社



北师大图 B1348504

**图书在版编目(CIP)数据**

低能及中高能原子核物理学/程檀生编著. — 北京:北京大学出版社, 1997.8

北京大学教学用书

ISBN 7-301-03219-6

I. 低… II. 程… III. 核物理学-高等学校-教材 IV. 0571

**书 名:** 低能及中高能原子核物理学

**著作责任者:** 程檀生 钟毓澍 编著

**责任编辑:** 瞿 定

**标准书号:** ISBN 7-301-03219-6/O·383

**出 版 者:** 北京大学出版社

**地 址:** 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

**电 话:** 出版部 62752015 发行部 62559712 编辑部 62752032

**排 印 者:** 北京飞达印刷厂

**发 行 者:** 北京大学出版社

**经 销 者:** 新华书店

850×1168 32开本 19.5印张 506千字

1997年8月第一版 1997年8月第一次印刷

**印 数:** 0000—3,000册

**定 价:** 22.00元

## 内 容 简 介

本书为北京大学物理专业教材。全书除绪言外,共分八章:一、原子核的组成和自然单位制;二、原子核的静态性质;三、原子核的结构模型;四、原子核的放射性;五、原子核的衰变;六、核力;七、原子核反应;八、粒子物理简介。为了便于读者学习,一些必要的内容作为附录被放在书末,以供查阅。每章后还附有一定数量的习题,以便使读者能得到实际训练从而更牢固地掌握有关内容。

本书除作为高等学校物理及核物理类的本科生的专业教材外,也可作为研究生和有关教师的参考书。

## 序

原子核物理和粒子物理这个领域属于当前人类认识微观物质世界的最深层次。正因为如此,大学物理系学生对此有所了解是必要的。半个多世纪以来,人类对此新领域的探索已取得了巨大的进展。从原子的核心——原子核的性质、组成开始,层层深入,进入各种强子(包括各类重子与介子),再进入到夸克、胶子……,这个过程还在不断推进之中,目前已在空间尺度上小到  $10^{-17}$  m、时间间距上短到  $10^{-23}$  s 这个限度内积累了大量经验规律,据此,提出不少物理思想、概念、理论方法。特别要提一下的是对称性与“守恒量”,有些量是从熟知的物理领域里总结出来的规律向未知领域推广。在推广的过程中,发现有些仍然保留,如电荷、粒子数、动量、能量等;有些可以是不守恒的,如宇称、时间反演等。另外一些则是由新实验规律而提出来的,如同位旋、奇异数等。除了这些对称性和守恒量外,还有一些是属于这些基本粒子本身及由它们组成的复合粒子的性质、相互作用及其运动规律。这些已发展成一门庞大的学科。对此,这本书只能是一个初步的介绍。本书的特点之一是它已较齐全地包括了大量的重要成果,特别是一些最新进展。这对于初学者是很有启发性的,是一本较好的教材。对有关专业的研究生及教师也是一本好的参考书。

杨立铭

1995年4月于燕园

## 绪 言

原子核物理学这一门课程包含了两部分内容:原子核物理和粒子物理. 它们是研究原子核和基本粒子的性质、运动、相互作用、相互转化和其内部结构的科学. 它们是人们研究物质微观结构中的两个重要层次并由此而形成的在物理学中的两个重要分支学科. 对于物理学中各分支学科所研究的客体的大小, 粗略地表示在图 1 中. 对于原子核和基本粒子, 其线度都小于  $10^{-12}$  cm. 近两个世纪以来, 随着人们对物质微观结构认识和研究的深化, 从分子层次深入到原子层次, 再深入到原子核层次和基本粒子层次. 近二三

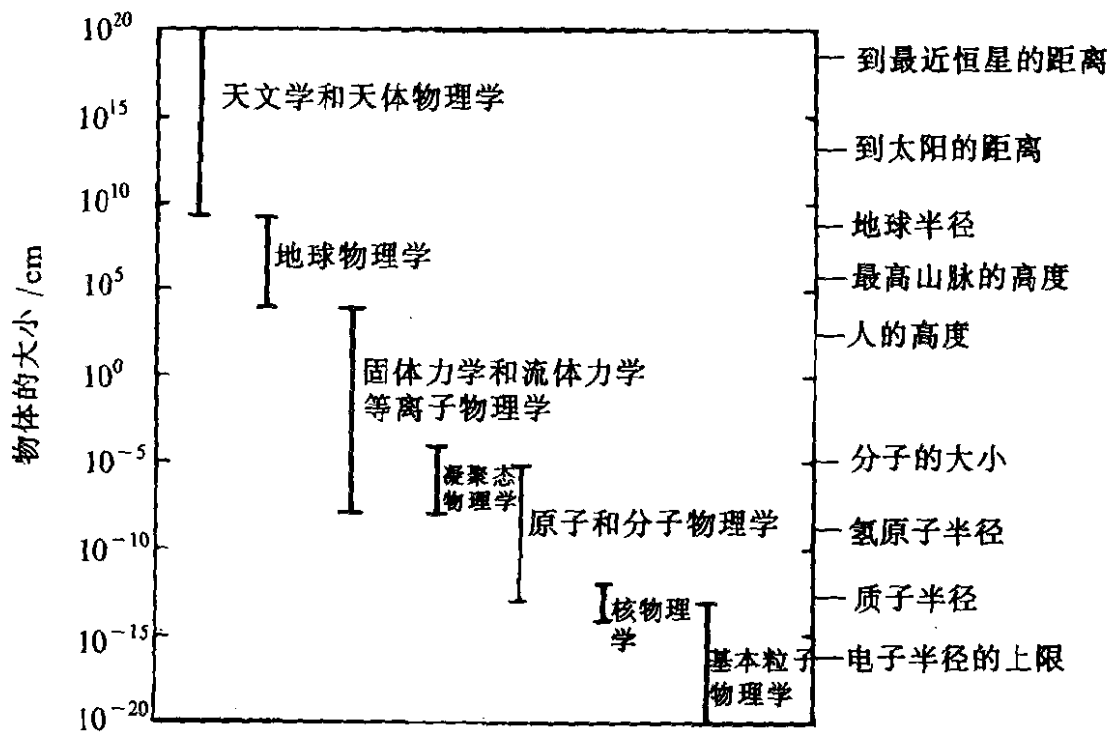


图 1

十年来, 夸克层次的研究也在迅速发展. 这些可形象地在图 2 中看到. 随着原子核物理学的发展, 人们可以发现很多研究问题是与基本粒子物理学分不开的, 也就形成了原子核物理学和基本粒子

物理学的交叉,即中高能原子核物理学. 这就是为什么 PANIC (Inter. Conf. on Particles and Nuclei, 即粒子和核的国际会议) 已成为原子核物理学领域中规模最大的两个国际会议之一. 原子核物理学和粒子物理学是基础学科,是物质微观结构研究的前沿之一;同时它们又和技术学科有广泛的联系,因而在相当广阔的领域内有着许多应用.

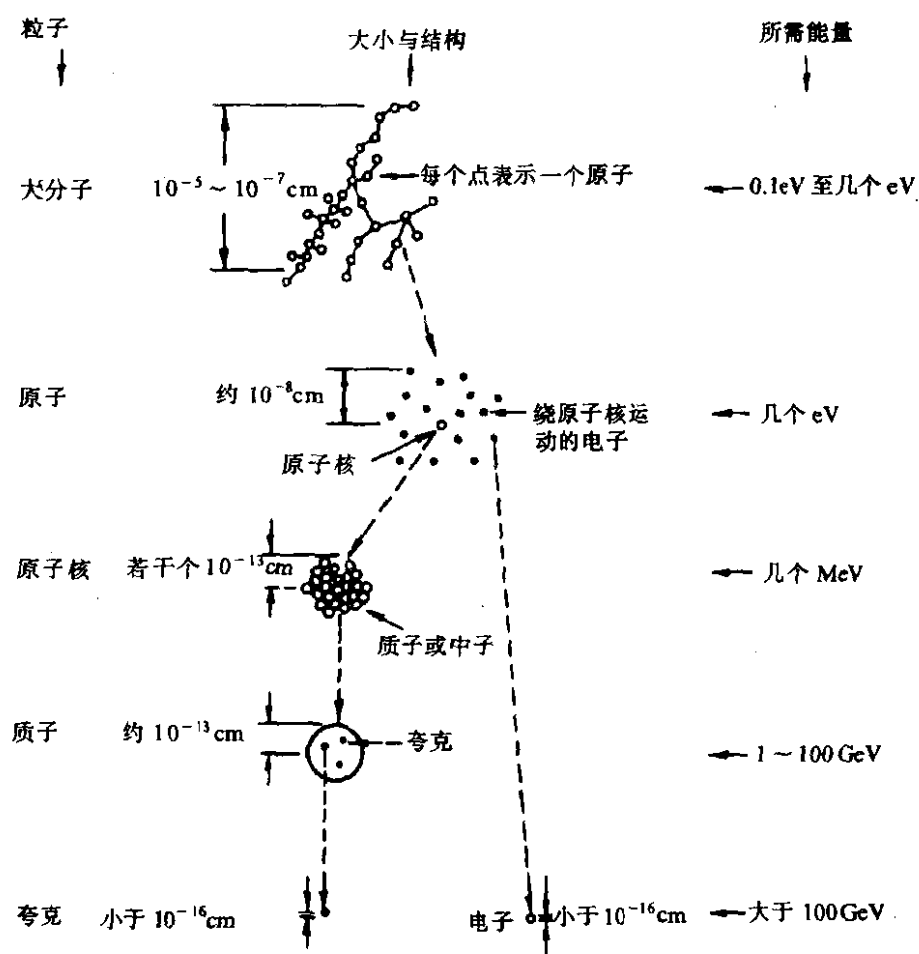


图2 自然界许多基本的物体是由更简单的物体构成的,为了探测它们的大小需要很高的能量. 图的右边给出了研究各种物体的结构所需要的能量. 物体越小,所需要的能量越高<sup>①</sup>

① 取自 Physics Through the 1990s, Elementary-Particle Physics, 1986; 中译本:《90年代物理学》,《基本粒子物理学》,1992.

早在公元前 4 世纪,人们就已开始对物质结构进行了探索和研究. 古希腊哲学家德谟克利特 (Democritus) 提出了微粒说,他把组成物质的最小基元或微粒称之为“原子”(不可分割的意思). 但这只是一种假说,代表人们对自然界的一种朴素的认识,并没有充分的严格的科学根据. 到了 1803 年,英国化学家道尔顿 (J.Dalton) 提出了原子学说,用“物质是由原子组成的”观点解释了不少现象,取得了不少成就. 但他认为原子是物质的“最后质点”,“不可分的质点”. 这一观点持续了相当长的一段时间,代表了人们对物质结构认识的一个阶段.

随着认识的不断深化,人们认识到原子并非“最后的质点”,而是仍然可分的,是有结构的. 这表现在 19 世纪末期的如下三个发现:

**1895 年伦琴 (W.K.Röntgen) 发现了 X 射线.** 对 X 射线的研究表明,各种原子放出的 X 射线都有其特征的谱线,这实际上是原子内层电子跃迁所产生的,由此说明原子是有内部结构的. X 射线已成为研究原子内部结构的有力工具之一.

**1896 年贝可勒尔 (A.H.Becquerel) 发现了放射性.** 当时他想用铀盐来研究荧光和 X 射线的关系,结果意外地发现了放射性. 这项研究打开了通往重大发展的大门. 接着居里夫妇 (Marie S. Curie 和 Piere Curie) 发现了放射性比铀更强的元素钋 (Po) 和镭 (Ra). 放射性元素的发现,明确地证实了原子是有结构的,它可以自发地由一种原子蜕变成另外一种原子.

**1897 年汤姆孙 (J.J.Thomson) 从阴极射线的研究中得出结论:** 阴极射线是由电子组成的. 他测定了电子的荷质比  $e/m_e$  (当时测定的值为  $1.3 \times 10^{11}$  C/kg, 现在的值为  $1.7588 \pm 0.0004 \times 10^{11}$  C/kg. 他当时指出:“有比原子更小得多的微粒存在”,这是一种大胆的假设,直接否定了原子不可分割的概念.

19 世纪末的这三大发现开创了物质结构研究的新纪元. 这以后,许多重大发现一个接一个,形成了蓬勃发展的局面,使物质



微观结构的研究逐步深化,由原子层次向原子核层次和基本粒子层次发展.与此同时,在物理理论方面,相对论、量子力学和以后发展的量子场论、规范场论等也逐步建立和发展,成为研究物质微观结构的强有力的理论基础.

从19世纪末到现在,九十多年过去了.纵观近一个世纪的发展,原子核物理学的研究早已走出实验室和理论研究的范围,它的成果已在化学、生物、农林、医学、能源及国防等诸多方面广泛地被应用着;粒子物理学的发展也在影响着许多学科的研究,它对新技术的支持和促进也起了很大的推动作用.

可以看出,近一个世纪以来,人们对物质微观结构认识的不断深化,极大地改变了人们社会生活的各个方面.很难想像,可以离开对物质微观结构认识的深化来谈高科技的发展.

因此,包含了物质微观结构研究中两个重要层次的基础课程——原子核物理学的讲授不仅在物理学系是必要的,而且对其他有关的系和专业的学生也将是有益处的.

本书作为这门课程的教材,着重介绍这两门分支学科的基本内容,至于它们的应用和其他学科、技术的联系,由于其广泛性,并且有的已形成专门的学科,限于篇幅,本书不可能过多地涉及.

应该指出,原子核物理学和粒子物理学的发展史都说明了实验和理论的研究是相互促进相互推动的.实验上的发现推动了理论研究的发展,理论上的预言终须实验作出判定性的检验,因此,实验是基础.另一方面,只有理论才能更系统更深刻地认识实验上的发现;随着科技的发展和进步,实验技术变得更加复杂和综合,因而需要更多经费的支持,这又需要依靠理论研究的发展,使实验发现不仅依赖于偶然发现,而是更多地依赖于有计划、有目的地发现.实验和理论研究的这种相互促进和推动的关系,被诺贝尔物理学奖获得者李政道教授有趣地归纳为“物理学家的两个定律”<sup>①</sup>:

---

① 李政道,《对称,不对称和粒子世界》,中译本由北京大学出版社1992年出版.

物理学家第一定律：没有实验物理学家，理论物理学家就要漂浮不定。

物理学家第二定律：没有理论物理学家，实验物理学家就会犹豫不决。

基于上述认识，尽管本书主要是介绍理论方面的知识，但对主要的实验结果和这些结果的主要特征以及在建立和发展理论中的作用也尽可能地介绍清楚。

按传统课程设置，这门课程是“原子物理学”的一部分，并不要求学生具备狭义相对论和量子力学的知识。但是，要真正理解原子核物理学和粒子物理学中的许多现象和规律，没有相对论，尤其没有量子力学知识是不可能的。因此，在讲述课程内容时，运用相对论和量子力学的概念和一些定性的甚至是定量的计算是必要的，然而应尽可能地避免大量或繁琐的数学计算。要做到这点并非易事。这几年来，我们试验把这门课程放在高年级时讲授，这样，运用相对论和量子力学知识就容易多了。但我们仍然认为要以结合概念和定性计算为主，而不宜涉及太多的数学计算。

另外，对于所讲内容，我们尽可能列出有关的文献，其目的并非希望初学者都去钻研和掌握这些文献的内容，而是让有兴趣进一步深入钻研这些内容的读者作为参考之用。

书稿是在北京大学物理系和理论物理教研室的同事们支持和鼓励下写成的，在成书过程中获得了他们许多有益的建议、帮助和支持，在此一并表示感谢。在此应特别感谢我们的老师杨立铭院士，他阅读了我们的书稿并与我们作了许多有启发性的讨论，并且给予具体的指导。

# 目 录

绪言 .....	i
第一章 原子核的组成和自然单位制 .....	1
§1.1 原子核的组分 .....	1
1.1.1 电子和质子的发现 .....	1
1.1.2 早期有关原子核组成的想法及其碰到的困难 .....	4
1.1.3 中子的发现 .....	6
1.1.4 原子核由质子和中子组成 .....	8
1.1.5 核子的简单性质和亚核子自由度 .....	10
§1.2 自然单位制 .....	13
习题 .....	16
参考文献 .....	17
第二章 原子核的静态性质 .....	19
§2.1 原子核的表示和 $\beta$ 稳定核素 .....	19
§2.2 原子核的大小 .....	22
§2.3 原子核的结合能 .....	34
2.3.1 质量单位 .....	34
2.3.2 原子核的结合能 .....	36
2.3.3 原子核结合能的半经验公式 .....	40
§2.4 原子核的同位旋和同位旋相似态 .....	48
§2.5 原子核的角动量和磁偶极矩 .....	52
2.5.1 原子核的角动量(自旋) .....	52
2.5.2 原子核的磁矩(磁偶极矩) .....	53
2.5.3 原子核自旋和磁矩的实验测定 .....	56
§2.6 原子核的电四极矩 .....	63
2.6.1 原子核的电四极矩 .....	63
2.6.2 原子核电四极矩的测量 .....	68
2.7 原子核的统计性质 .....	70

§2.8	原子核的宇称	72
	习题	75
	参考文献	79
第三章	原子核的结构模型	80
§3.1	原子核的费米气体模型	81
3.1.1	原子核的费米气体模型	82
3.1.2	用费米气体模型解释结合能半经验公式	84
§3.2	原子核的壳层模型	88
3.2.1	原子核存在壳层结构的实验事实	89
3.2.2	单粒子模型	94
3.2.3	单粒子模型与实验的比较	102
3.2.4	剩余相互作用·组态混合·对关联	112
§3.3	原子核的集体运动	126
3.3.1	原子核集体运动存在的实验事实	126
3.3.2	集体运动图象和绝热近似	131
§3.4	球形核的振动	133
3.4.1	球形核振动模型	133
3.4.2	球形核振动模型与实验的比较	136
§3.5	变形核的集体转动模型	141
3.5.1	转子模型	141
3.5.2	变形核转子模型的讨论	142
§3.6	变形核的振动模型	159
§3.7	高自旋态和回弯现象	164
§3.8	变形核中的单粒子运动与壳层结构	168
3.8.1	变形核中的尼尔逊哈密顿量	168
3.8.2	尼尔逊哈密顿量的能量本征值和本征函数	169
3.8.3	超形变下原子核的壳层结构	173
3.8.4	尼尔逊单粒子能级系的应用	175
§3.9	相互作用玻色子模型	179
	习题	182
	参考文献	185

第四章	原子核的放射性 .....	187
§ 4.1	放射性衰变的基本规律 .....	188
4.1.1	单一放射性的指数衰减规律 .....	189
4.1.2	衰变常数·半衰期·平均寿命·衰变宽度 .....	190
4.1.3	多代连续放射性的衰变规律 .....	193
4.1.4	放射性的平衡:暂时平衡和长期平衡 .....	196
§ 4.2	放射系 .....	201
§ 4.3	放射性的活度和单位 .....	205
§ 4.4	放射性规律的一些应用 .....	206
4.4.1	确定放射源的活度和性质 .....	206
4.4.2	在考古学中确定动植物遗骸的存在年代 .....	208
§ 4.5	人工放射性核素的生产 .....	209
习题	.....	211
第五章	原子核的衰变 .....	213
§ 5.1	$\alpha$ 衰变 .....	213
5.1.1	$\alpha$ 衰变的特点 .....	213
5.1.2	$\alpha$ 衰变的理论机制 .....	216
§ 5.2	$\beta$ 衰变 .....	222
5.2.1	$\beta$ 衰变的特点及中微子的引入 .....	223
5.2.2	$\beta$ 衰变的类型和发生的必要条件 .....	229
5.2.3	$\beta$ 衰变的费米理论 .....	233
5.2.4	容许跃迁的选择定则和能量分布 .....	236
5.2.5	禁戒跃迁的选择定则和它的居里描绘图 .....	242
5.2.6	衰变常数和比较寿命 .....	245
5.2.7	弱相互作用常数的确定 .....	246
5.2.8	轨道电子俘获 .....	249
5.2.9	$\beta$ 衰变中的宇称不守恒及弱相互作用形式 .....	251
§ 5.3	$\gamma$ 跃迁和内转换 .....	262
5.3.1	$\gamma$ 跃迁概率和选择定则 .....	263
5.3.2	内转换和内电子对产生 .....	268
5.3.3	原子核的同质异能态 .....	272

5.3.4	分支比	274
5.3.5	角关联	275
	习题	280
	参考文献	282
<b>第六章</b>	<b>核力</b>	<b>284</b>
§6.1	氘核的性质	284
6.1.1	氘核的有限方势阱模型	285
6.1.2	非中心力的存在	287
§6.2	低能核子-核子散射	290
6.2.1	核力的有效力程理论	291
6.2.2	低能质子-质子和中子-中子散射	298
6.2.3	核力的电荷无关性·两核子波函数的同位旋描述	300
§6.3	高能核子-核子散射和核力的交换性	304
6.3.1	高能 n-p 散射和交换力的引入	304
6.3.2	核力的排斥心和自旋-轨道耦合力	306
§6.4	介子交换势	308
6.4.1	$\pi$ 介子交换理论	308
6.4.2	单玻色子交换势	310
§6.5	核力的微观模型	312
6.5.1	用夸克势模型描述核力	313
6.5.2	用口袋模型描述核力	315
§6.6	常用的核力唯象势	316
	习题	318
	参考文献	320
<b>第七章</b>	<b>原子核反应</b>	<b>322</b>
§7.1	核反应的一般概念	323
7.1.1	核反应的分类	324
7.1.2	核反应中的守恒定律	326
7.1.3	反应能和阈能	328
7.1.4	核反应中的细致平衡原理	333
7.1.5	在阈能附近核反应截面的特征	338

§7.2	反应截面的分波分析和核反应机制简介 .....	340
7.2.1	散射截面和反应截面的分波分析 .....	340
7.2.2	核反应的三个阶段描述和核反应机制简介 .....	347
§7.3	光学模型 .....	351
7.3.1	光学模型的基本思想 .....	352
7.3.2	反应截面的光学模型计算 .....	356
§7.4	复合核反应 .....	361
7.4.1	复合核模型 .....	361
7.4.2	单能级的布莱特 - 维格纳 (B-W) 公式 .....	367
7.4.3	复合核的统计理论 —— H-F 公式 .....	374
7.4.4	复合核的衰变和蒸发谱 .....	381
§7.5	直接反应 .....	385
§7.6	重离子反应 .....	392
§7.7	轻子与原子核的散射 .....	400
7.7.1	电子-核子的弹性散射 · 形状因子 .....	401
7.7.2	轻子的深度非弹性散射 .....	403
§7.8	原子核的裂变和聚变 .....	416
7.8.1	原子核的裂变反应 .....	417
7.8.2	原子核的聚变反应 .....	436
习题	.....	443
参考文献	.....	445
<b>第八章</b>	<b>粒子物理简介 .....</b>	<b>448</b>
§8.1	粒子物理的发展 .....	448
§8.2	相互作用 .....	451
8.2.1	相互作用和截面 .....	451
8.2.2	相互作用和寿命 .....	454
8.2.3	媒介粒子和力程 .....	455
§8.3	粒子的分类 .....	457
§8.4	电荷守恒 · 重子数和轻子数守恒 .....	465
§8.5	奇异量子数 $S$ 和盖尔曼 - 西岛关系 .....	466
8.5.1	奇异量子数 .....	466

8.5.2	盖尔曼-西岛关系	469
8.5.3	中性 K 介子的混合和转化	470
§8.6	粒子的对称性和守恒定律	473
8.6.1	在量子力学中的对称性	474
8.6.2	分立变换下的对称性	477
§8.7	强子结构	494
8.7.1	强子的么正对称性和超多重态	496
8.7.2	强子的夸克结构模型	501
8.7.3	夸克的颜色量子数	507
8.7.4	盖尔曼-大久保质量公式	510
8.7.5	核子的夸克波函数和磁矩	515
8.7.6	$J/\psi$ 和 $\gamma$ 粒子的发现与 c(粲)和 b(底或美)夸克的引进	517
§8.8	强相互作用的动力学理论和各种唯象夸克模型	523
8.8.1	量子色动力学	523
8.8.2	一些唯象夸克理论模型	525
§8.9	费米子的代	537
	习题	538
	参考文献	540
附录 I	相对论性运动学简介	543
附录 II	量子力学基本原理和方法	550
附录 III	单玻色子交换势	560
附录 IV	角动量的基本关系	563
附录 V	球谐函数	570
附录 VI	核素的性质表	573
附录 VII	粒子性质表	589
附录 VIII	元素周期表	600
附录 IX	基本物理常数表	601
	参考资料	



# 第一章 原子核的组成和自然单位制

## §1.1 原子核的组分

众所周知,原子核是由质子和中子组成的.但是,如何获得这一结论的呢?对这一段历史过程简短的论述,不仅可使我们真正理解这一结论的由来,而且也使我们对于原子核物理学的初期发展阶段有一定的了解.

### 1.1.1 电子和质子的发现

1897年,汤姆孙(J.J.Thomson)从研究阴极射线的实验中,测出射线是由带负电的粒子组成的;并测定了该粒子的电荷和质量之比(即荷质比  $e/m_e$ ),第一次从实验上确认了一个新的客观实体——电子.图1.1是他所使用的阴极射线管的示意图.阴极射线从阴极C发射,通过窄缝A和B后形成细束.在金属板D和E

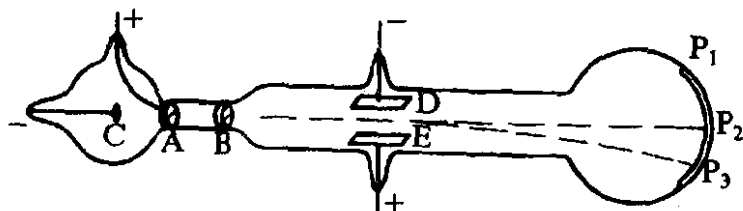


图 1.1 汤姆孙测定阴极射线粒子荷质比的示意图

上加上电压.从射线偏转的方向可以判定射线微粒是带负电的.而后再加上与电场方向垂直的均匀磁场,调节磁场强度的大小,使带负电微粒所受到的洛伦兹(Lorentz)力与电场力相平衡.由此可得带负电微粒的速度为

$$v = E/B, \quad (1.1.1)$$

其中  $E$  和  $B$  分别为所加的电场和磁场强度.然后去掉电场而保