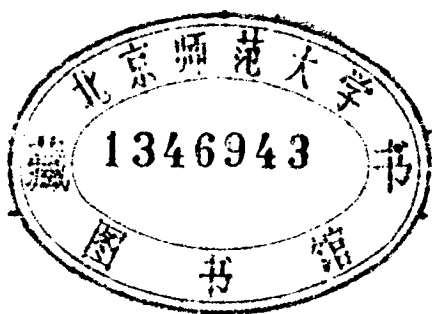


粒子物理学

(上册)

章乃森 编著

JY11/57/03



科学出版社

1986

内 容 简 介

本书系统地阐述了“粒子物理学”的基本内容,着重于实验事实、重要概念、基本规律和理论以及一些典型的实验方法,适当并简要地介绍了粒子物理研究前沿的最新进展、同步辐射、加速器、探测器等内容。

全书共分十二章。第一章粒子物理学概论;第二章高速粒子运动学;第三、四章轻子和强子;第五章对称性;第六章层子模型;第七、八、九章电磁作用、弱作用和弱电统一理论;第十章高能粒子碰撞;第十一、十二章粒子物理近期发展和同步辐射;各章之后附有习题和参考文献。全书分上、下两册出版,前六章为上册,后六章为下册。

本书选材得当、深入浅出、文字简明、概念清楚,可供大学物理系学生、研究生、教师和科研人员参考。

粒 子 物 理 学

(上 册)

章 乃 森 编 著

责任编辑 荣毓敏 韦秀清

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年4月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1986年4月第一次印刷 印张:15 5/8 插页:1

印数:0001—3,700

字数:408,000

统一书号:13031·3144

本社书号:4183·13—3

定 价: 4.40 元



序

高能物理的粒子物理学,作为一个学科来开发起始于1950年左右,当时高能加速器和探测器开始建造;此后,对高能物理问题便可以进行定量的研究。定量研究是物理学发展的关键;新现象的发现只不过是问题的开始,规律性的关系是从定量研究中产生的。

在头一、二十年,发现了大量的新粒子(大部分是“共振态”粒子)和许多其他新现象,以及一些规律性的关系。在最近一、二十年,主要是对一些重大问题进行了更加深刻和更加本质的研究,特别是对有关强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用,以及它们之间相互关系的了解,有了很重要的发展。

这里应该指出,新假说的提出是在实验研究不断取得进展的基础上,推动理论研究不断向更深一层发展的结果。例如:在强相互作用中有关强子内部结构方面,层子模型假说与实际情况的尖锐矛盾,使量子色动力学得以产生,从而引入了“颜色”和胶子的概念。反过来,量子色动力学必须受系统的实验事实来加以检验。丁肇中和其他几个实验小组所得的“三喷注”现象曾给量子色动力学理论一个有力的支持,同时也增强了寻找胶子的决心。被击出来的自由态层子也在能量越来越高的加速器上不断地在寻找。又如,在弱相互作用方面,为要解决在宇称不守恒基础上建立的弱作用理论与实验的尖锐矛盾,提出了弱电统一理论和中间玻色子。近年来,国际上一些实验小组的结果只是与理论近似的一致。最近莫玮小组进行了一个统计高的没有强作用参加的电子、 μ 中微子弹性碰撞的实验研究,结果是令人信服地对弱电统一理论给予了支持。中间玻色子也在能量越来越高的加速器上不断地寻找^[注]。最后一个例子是正、负电子彼此相距多远时它们的内部结

构才能显示出来，因而量子电动力学才遇到困难？丁肇中实验小组在研究胶子的同时，对此也进行了精密的探索。他们的实验结果表明，在有效能量达到三百六十亿电子伏特，并在五千万亿分之一厘米的小范围内，电子还没有显示出内部的结构，因而量子电动力学还是适用的。要解决这个问题还需要继续提高实验的能量。

总之，在物理学中，人们对任何一个问题的认识，都是随着实验和理论对立统一的发展过程而逐步加深的。因此，理论与实验密切结合对物理学的发展是十分重要和必需的！粒子物理学的迅速发展就是一个很好的例证。另一方面，可以清楚地看出，理论必须来源于实践，才能反过来指导实践。实际上，实验是科学理论的源泉，是自然科学的基础。仅以我国科举时代念四书五经的方法和态度来“精读”科学书籍（需要不断发展的第二手知识）而不联系实际进行科学研究，这对科学的发展是无济于事的！自然科学的研究对象是“物”，要研究“物”必须变革“物”和观测其变革后的反映，这自然就要进行科学实验。

章乃森同志所写的《粒子物理学》是一本较好的书。他具有多年的教学和科研经验，经过长期与同行和同学们的反复讨论和改进，广征意见而成此书。它的内容较为全面和丰富，既有基本知识又包括最新成果。这本书有两个特点：第一，引用了许多基本而又常用的物理概念和规律性的关系，并加以阐明；第二，介绍了不少有启发性的实验。这两个特点对准备将来从事实验研究和理论研究的学生，或较为成熟的科研、教学人员来说都是重要并大有益处的。书中虽然没有突出地总结性地说明，然而它却具体地体现了自然科学的理论是来自科学实验的实践，是受科学实验检验的。科学实验是科学研究中基本的实践活动。实践—理论—实践，如此循环，以至无穷，从而不断提高人们对自然界的认识，增强人们改造自然的能力。

同世界科技先进国家相比我国核物理学和粒子物理学还比较落后，特别在实验方面，因而这一类的书籍所见甚少。但是近年来，国家很重视这方面的发展，国内正在建立高能物理和应用的实



验基地、重核反应物理和应用的实验基地，同时也加强了核物理的研究和应用工作。此外，国际合作也正在进一步加强。所以这本书(和下面所提的书)的写作和出版是及时的。我相信高等院校从事自然科学的教师和高年级的学生，以及科研人员对这本书都会感兴趣的。章乃森同志的《粒子物理学》与王祝翔的《汽泡室》和《核物理探测器及其应用》，毛慧顺、王运永的《多丝正比室和漂移室》，唐孝威主编的《粒子物理实验方法》和李惕培的《实验的数学处理》等书的写作、出版及使用，对我国粒子物理、核物理学的发展和普及定会起到比较全面的、相互配合的促进作用。

张文裕

1982年12月

【注】在写这篇“序”的时候，西欧中心 CERN 正在改建 SPS 为超质子同步对撞机，准备寻找 $W^\pm$ 和 Z^0 。1983年1月和6月分别首先报道了 $W^\pm$ 和 Z^0 的发现。初步结果是这些粒子的质量和弱电统一理论的预言基本一致。这个重大成就决不是偶然的，它是理论和实验长期密切结合的结果[5]。

1984年12月20日补注

前 言

近三十年来,“粒子物理学”作为一门新兴的学科已得到了迅速发展。人们对物质微观结构、基本相互作用和运动规律的认识逐步深入,并进入新的层次。多年来粒子物理学始终处于物理学主流的前沿,实验和理论内容十分丰富,成为物理学的重要组成部分。

实验是科学理论的源泉,从实验工作者的观点来阐述粒子物理学的书籍在国内是缺乏的,在国际上也不多见。原因之一是这门学科的发展太迅速,新的实验结果、新的理论概念不断出现,写成的东西赶不上形势发展,很快就会过时。但是,从工作和教学的角度来看,反映粒子物理学基本内容的书籍还是很急需的,特别是为了迎接我国将要建成的高能物理及同步辐射实验和应用基地,各方面工作需要配合开展,国内编写的著作更显得迫切需要。作者根据自己在中国科学院高能物理研究所和中国科学技术大学讲授“粒子物理学”的讲义,重新整理、编写成书。内容侧重于基本实验事实、重要概念、物理规律和基础理论,并扼要地介绍一些典型实验方法和设备,反映一些新的研究进展和成果。本书语言力求简明易懂,内容注意由浅入深,以便于教学和参考。

作者1978年在高能物理研究所讲授“粒子物理学”课程时,印出了讲义初稿。1981年在科大讲课时,增写了相互作用等内容,印出了讲义第二稿。1981—1982年间中国科技大学张子平同志帮助修改、整理了讲义,并编写了高能强子碰撞、相空间、共振态和群论等章节。1983年讲义铅印前后,中国科技大学、山东大学、南开大学和武汉大学等校选用此讲义作为大学生或研究生的教材。近两年作者又听取了教学意见,对讲义作了系统地修正、补充,改写成书。高能所陈文祥同志和中国科技大学孙腊珍同志协助整理了

电、弱作用等章节,并编写了习题,参加了校对工作。高能所张竹湘同志为全书制图。

山东大学谢去病同志系统地校阅了书稿,提出了很多中肯的意见。

张文裕教授始终热情关心和鼓励本书的写作,并在百忙之中为本书作序,对此作者深表谢意。作者感谢中国科技大学近代物理系、高能物理研究所及谢家荣、肖健、郑林生教授对本书编写工作的支持,并感谢高崇寿、马仲骐、陈天伦、宋燊、顾以藩、李焕铁、郑朴英、杜远才、郑志鹏、陈映宣、邱荣等同志,及研究生周晓岗、陈秀苇,李悦宽、涂晓林和中国科技大学77、78届原子核专业同学等对本书有关章节提出的宝贵意见。

本书分上、下两册出版,上册内容主要是粒子性质及其分类,下册内容主要是各种相互作用和同步辐射。因作者学识有限、书中缺点和错误在所难免。敬请读者指正。

作 者

高能物理研究所,

1984年9月于北京。

目 录

(上册)

序	i
前言	v
绪论	1
第一章 粒子物理学概论	5
§1.1 粒子物理学的研究内容	5
1.1.1 粒子物理学的历史发展	5
1.1.2 高能物理	9
1.1.3 粒子理论	11
§1.2 高能物理实验手段	13
1.2.1 宇宙线	13
1.2.2 高能加速器	14
1.2.3 束流输运和束流分离	31
1.2.4 高能粒子探测技术	41
§1.3 粒子的基本性质和分类	56
1.3.1 相互作用及其传递者	56
1.3.2 描写粒子基本性质的一些参量	60
1.3.3 粒子表	77
习题	78
参考文献	79
第二章 高速粒子运动学	81
§2.1 洛伦兹变换	83
2.1.1 空间-时间四维矢量洛伦兹变换	83
2.1.2 动量-能量四维矢量洛伦兹变换	88
2.1.3 洛伦兹变换的快速描写	91
§2.2 实验室坐标系和质心坐标系	94
2.2.1 质心坐标系和反应有效能量	94

2.2.2 反应 Q 值和阈能	100
2.2.3 一些物理量在实验室系和质心系之间的变换关系	102
§2.3 相空间	108
2.3.1 不变相空间积分	108
2.3.2 不变质量谱	111
§2.4 几类典型的运动学问题	115
2.4.1 2-2 反应中的 s 、 t 、 u 不变量	115
2.4.2 二体衰变运动学	122
2.4.3 三体衰变运动学, 达里兹图	124
习题	128
参考文献	129
第三章 轻子	130
§3.1 轻子的基本性质	130
3.1.1 电子和 μ 子	130
3.1.2 两类中微子	133
3.1.3 重轻子 τ 的发现和 τ 子中微子	137
3.1.4 电子和 μ 子的反常磁矩	140
3.1.5 中微子的螺旋性	145
3.1.6 轻子数和轻子数守恒定律	147
§3.2 正反粒子	148
3.2.1 反粒子的理论预言	149
3.2.2 正电子的发现	153
3.2.3 其他反粒子	154
习题	156
参考文献	157
第四章 强子	158
§4.1 核子和反核子	159
4.1.1 反核子的发现	159
4.1.2 重子数	161
4.1.3 核子的反常磁矩	161
§4.2 π 介子	163
4.2.1 π 介子的理论预言	163
4.2.2 π 介子的性质	166
§4.3 同位旋	172

4.3.1	核力的电荷对称性和电荷无关性	172
4.3.2	同位旋的基本概念	173
4.3.3	两个核子体系的同位旋	175
4.3.4	强作用的电荷无关性和同位旋守恒定律	178
4.3.5	核子同位旋算符及波函数的矩阵表示	179
4.3.6	π 介子的同位旋	181
4.3.7	πN 系统的同位旋	183
§ 4.4	奇异粒子—— K 介子与超子	188
4.4.1	“ V 粒子”——奇异粒子的发现	188
4.4.2	奇异量子数 (S) 和超荷量子数 (Y)	193
4.4.3	奇异粒子的同位旋和盖尔曼-西岛关系式	195
4.4.4	奇异粒子的自旋	198
4.4.5	奇异粒子的宇称	203
§ 4.5	共振态	206
4.5.1	弹性散射的分波分析	206
4.5.2	共振态的产生和描写	209
4.5.3	重子共振态	213
4.5.4	介子共振态	224
	习题	233
	参考文献	234
第五章	对称性	236
§ 5.1	对称性和守恒定律	237
5.1.1	经典力学中的对称性	238
5.1.2	量子力学中的对称性	241
5.1.3	对称性和群	244
§ 5.2	连续时空对称性	249
5.2.1	空间平移不变性和动量守恒定律	249
5.2.2	空间转动不变性和角动量守恒定律	251
5.2.3	时间平移不变性和能量守恒定律	253
§ 5.3	不连续时空对称性	254
5.3.1	空间反射和宇称守恒	254
5.3.2	时间反演不变性	255
§ 5.4	内部对称性	261
5.4.1	电荷共轭变换和 C 宇称守恒及 CPT 定理	261

5.4.2	G 变换和G宇称守恒	267
§ 5.5	么正群	272
5.5.1	$U(1)$ 规范不变性	273
5.5.2	$SU(2)$ 群和同位旋	274
5.5.3	$SU(3)$ 和 $SU(4)$ 群	281
	习题	289
	参考文献	290
第六章	强子结构	291
§ 6.1	强子分类	291
6.1.1	费米-杨振宁模型	292
6.1.2	盖尔曼-西岛分类系统	293
6.1.3	坂田模型	295
6.1.4	强子的超多重态	298
6.1.5	强子的么正对称性, V 旋、U 旋	305
§ 6.2	层子模型	308
6.2.1	u, d, s , 三层子	309
6.2.2	介子的层子构成	311
6.2.3	重子的层子构成	313
6.2.4	强子的质量公式	317
6.2.5	矢量介子的轻子衰变	322
6.2.6	π 介子打击同位旋标量靶的坠尔-颜过程	324
6.2.7	层子模型对作用截面的解释	325
6.2.8	$SU(6)$ 对称性和核子磁矩	325
§ 6.3	J/ψ 粒子的发现和 $SU(4)$ 对称性	328
6.3.1	J/ψ 粒子的发现	328
6.3.2	J/ψ 粒子谱	335
6.3.3	粲层子的引入	335
6.3.4	粲介子和粲重子	338
§ 6.4	层子和轻子	344
6.4.1	层子的味道	344
6.4.2	层子的颜色	348
6.4.3	层子和轻子的对称性	352
6.4.4	自由层子的寻找	253
6.4.5	亚层子模型	356

§ 6.5 雷吉理论	358
6.5.1 雷吉轨迹	358
6.5.2 雷吉轨迹的弦模型	362
习题	364
参考文献	365
(一) 附录	366
I. 克列布希-高登系数及附表	366
II. 狄拉克方程	379
III. 极化束流(自旋为 $1/2$) 的描述	386
IV. 群论简介	390
(二) 附表	405
I. 物理常数表	405
II. 质心系能量、动量和束流动量关系表	407
III. 球谐函数	414
(三) 附图	415
(四) 粒子性质表	428
I. 稳定粒子表	428
II. 介子表	451
III. 重子表	472
(五) 元素周期表	

(下册)

第七章 电磁相互作用
第八章 弱相互作用
第九章 弱电统一理论
第十章 高能粒子碰撞
第十一章 粒子物理学的近期发展
第十二章 同步辐射
附录

绪 论

人们对物质结构的认识是由表及里逐步深入的。在人类社会发展的历史中，由于物质生产的需要，人们常常想知道：多种多样、千变万化的物质世界是如何构成的？有没有一些基本运动规律可以统一地解释丰富多彩的自然现象？在古代，由于生产和科学水平的限制，还不能具体解决这些问题，但已存在着一些属于假说之类的猜测与幻想。例如，我国古代夏朝（公元前约两千年），就有所谓金、木、水、火、土的五行学说，认为这是组成物质世界的五种要素。在欧洲，古希腊的恩培多克勒（Empedocles）大约在公元前 430 年就认为大地是由水、火、土和空气等元素组成。德谟克利特（Democritus，公元前 460—370 年）认为万物是由大小不同、质量不同、有不可入性的原子组成，原子是“不可再分”的意思。我国战国时代宋国的哲学家惠施（公元前约 350 年）所说：“至小无内，谓之小一”（最小的物质是不可分的，称作最小的单元），“小一”就是“原子”的意思。其后伊壁鸠鲁（Epicurus，公元前约 300 年）、迦生迪（Gassendi，1592—1655）等人继承了这一观点。这些人的“原子学说”虽然都还缺乏科学根据，但已属于物质有微观结构观点的萌芽。

真正带有近代性质的原子论，是道尔顿（John Dalton，1766—1844）在十九世纪初提出来的，在这以前不久波意耳（Boyle）、拉瓦锡等人第一次建立了科学的元素概念。道尔顿认为，每一种元素都代表一种特定的原子。不同元素的原子，其性质，首先是重量不同。他认为原子是物质结构不可分割的基元。但后来发现，随着原子序数的增加，这些化学元素的性质具有某种周期性的变化规律。1869 年俄国门捷列夫分析当时已发现的 63 种元素的化学性质，总结其规律性，排列出元素周期表，预言了当时尚未发现的

多种元素及其化学性质。以后，人们在实验中确实陆续地发现了这些元素，并填满了周期表。92种元素具有这种周期性的规律，表明了这些原子不是互不相关的，而是存在着某种内在联系。这就暗示了原子不是物质不可分割的最终单元，而是具有内部结构的。

人们对原子结构的认识，经历了一段曲折的过程。事实上，这仅仅是人们进入物质的微观世界，认识和掌握微观运动规律的开始。十九世纪末，二十世纪初，人们发现了一系列新现象：阴极射线、光电效应、放射性、X射线，以及里德伯 (Rydberg) 的光谱线定律等等。当时对于电是否具有原子结构，曾有过很多讨论。例如，1897年物理学家开耳芬 (Lord Kelvin) 还认为电是一种连续的、均匀的液体。而同一年中汤姆孙 (J. J. Thomson) 完成了他的有名实验：利用带电粒子在电磁场中偏转的方法，测定了阴极射线的电荷和质量的比值 e/m 。携带此电荷的微粒，即被称为电子。1911年密立根 (R. A. Millikan) 通过“油滴实验”测出了电子电荷的数值，进一步肯定了电荷的不连续性。确认了电子电荷是电荷最小单位，即电荷是量子化的。1901年普朗克 (Max Planck) 研究辐射理论，导出黑体辐射公式，提出了光的量子化假说。1905年爱因斯坦用光子理论成功地解释了光电效应实验现象，进一步证实了光能量量子化理论。

汤姆孙发现电子后，1903年提出原子结构假说：他假设原子序数为 Z 的原子具有的正电荷 Ze ，以均匀的密度分布在原子的球形体积之中。而 Z 个带负电荷 ($-e$) 的电子，则分别埋置在连续分布着正电荷的原子体积之内，原子的总电荷为零。由于电子很轻，在受到扰动时，就会围绕平衡位置振荡，辐射电磁波。根据这种假定，他成功地算出原子半径为 10^{-8}cm ，但这种模型和很多其它实验结果有矛盾。

1911年英国科学家卢瑟福 (Lord Rutherford) 发现 α 粒子穿过物质薄层被散射时，存在着大角度散射的事例。这种事例不能用许多同方向小角度偏转的统计迭加来解释，但却说明原子中的正

电荷并不象汤姆孙所假设的均匀分布在原子(直径 10^{-8}cm)范围内,而是集中在一个很小的区域(直径 10^{-12}cm)之中.这就是著名的卢瑟福原子图象:中心是一个电荷为 $+Ze$ 的原子核,周围有 Z 个电子(电荷为 $-e$),围绕原子核运动.

卢瑟福原子图象和经典电动力学理论之间存在着尖锐的矛盾.根据经典电磁理论,由于电磁辐射,围绕原子核运动的电子不会有稳定的轨道,而应逐渐地接近原子核.尼·波尔(N. Bohr)没有受传统观念的束缚,他认为经典理论不适用于微观体系,需要假设电子绕原子核旋转的原子系统只存在一些不连续的稳定状态.处于这些稳定状态中转动电子,虽然具有加速度但不会发生电磁辐射.只有当原子体系由一个稳定的能量状态过渡到另一个稳定的能量状态时,才能辐射光子.光子的能量等于两稳定状态的能量差.在这一假定的基础上,玻尔在1913年提出了有名的氢原子结构理论.后来,原子光谱学等实验结果以及1925年后发展起来的量子力学理论,都证实并发展了玻尔的原子模型.从而破除了原子是“物质最终单元”,是“数学上的点”等形而上学的观点.

原子核是否依然具有结构呢?它是由什么组成的?1919年卢瑟福使用放射性元素的 α 射线轰击靶核的方法,第一次获得了原子核的人工裂变,在氮核中打出最简单的原子核——氢核(即质子).这说明原子核还是复合系统.如果原子核只是 Z 个质子组成的,那么它如何克服静电斥力,而保持自己的稳定性呢?1932年查德威克(J. Chadwick)在人工核裂变实验中发现了中子.同年苏联人伊凡宁柯(Иваненко)提出原子核是由数目几乎相等的质子和中子(统称为核子)组成的.原子核内核子间的强相互作用抵消了质子间的库仑斥力,而使一些原子核保持相对稳定.大部分原子核是不稳定的,会自发地进行 α 、 β 或 γ 衰变.精确测定中子质量,说明中子重于质子,自由中子会衰变.为了保持在这一衰变中能量守恒定律仍然成立,1931年泡利(W. Pauli)提出了中微子假设:原子核的 β 衰变,是原子核内中子和质子之间的转化,同时

放出电子(或正电子)及反中微子(或中微子)。这是本世纪三十年代人们对原子核的理解。当时人们对物质微观结构的认识,已经深入到分子、原子、原子核等层次,在这一基础上,人们进一步揭露物质的奥密,从而进入了粒子物理的领域。