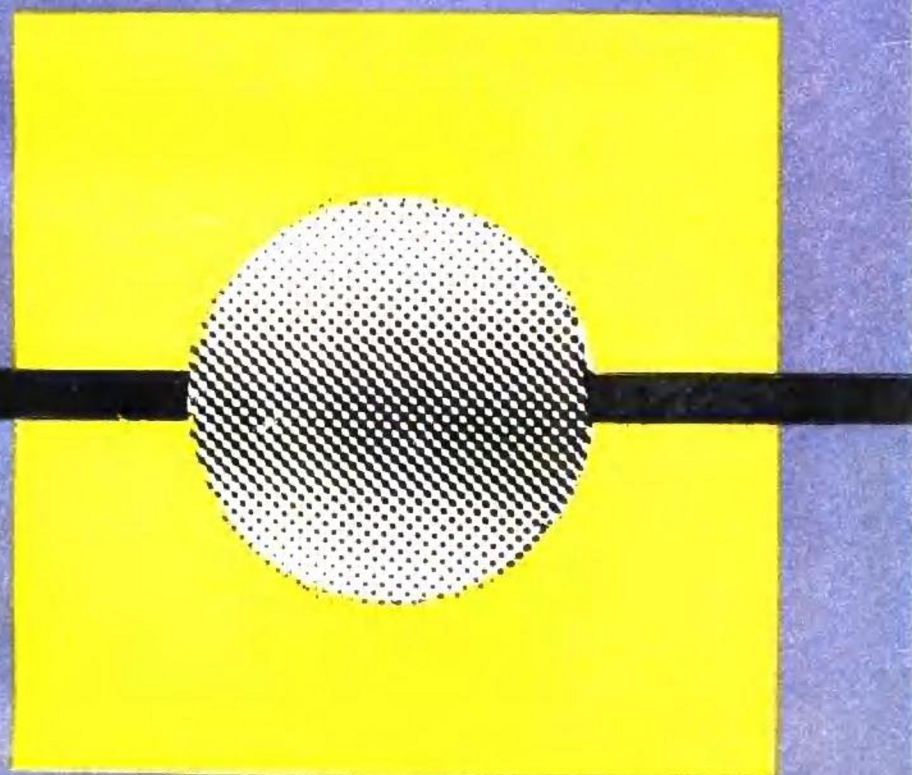


粒子物理与 核物理讲座

高崇寿 曾谨言 著

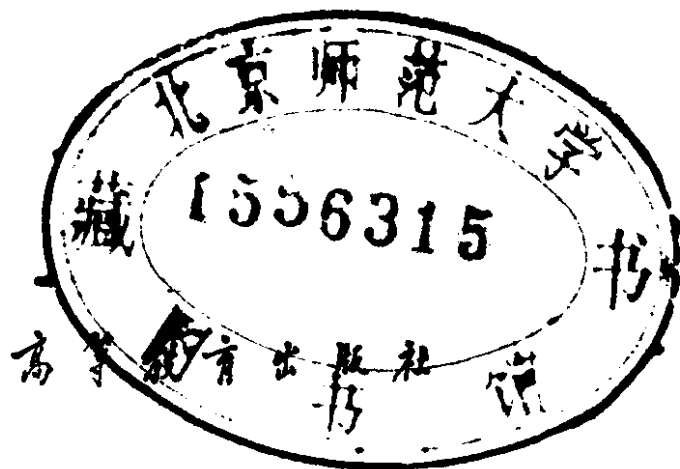


高等教育出版社

粒子物理与核物理讲座

高崇寿 曾谨言 著

JY1/182/13



内 容 简 介

本书着重介绍粒子物理学和核物理学新的重要进展及其发展动向,反映了作者分别在这些前沿领域长期从事研究和教学工作的经验、体会和成果。全书着重对粒子物理学和核物理学中新的物理机理、物理概念、物理规律作出直观而准确的讲解,避免用较深的数学工具或繁琐的数学推导以及某些与实验联系甚微的理论,着力启发读者从物理上思考问题;在叙述上则力求深入浅出,注意切合大学生的需要。

粒子物理学部分主要讲授粒子的运动和动力性质,对称性和守恒定律,强子的对称性和强子结构,电弱统一理论,超高能和极高能物理,高能多粒子产生现象,相对论性重离子碰撞。核物理学部分则主要讲授原子核的粗块性质,核力的特征,原子核中的单粒子运动与壳结构,核形变与集体运动,对关联与超导性,高自旋态和超变形核态。

本书可作为高等学校物理系高年级学生和研究生的教学用书,同时也是有关教师更新教学内容的重要参考书,对有关的理论与实验物理工作者及广大物理学爱好者,亦是一本很有益的参考读物。

责任编辑:李松岩

粒子物理与核物理讲座

高崇寿 曾谨言 著

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 14.375 字数 340 000

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数 0001—1 220

ISBN 7-01-003153-1/O·970

定价 3.60 元

目 录

第一篇 粒子物理学

引言	1
§ 0.1 探索物质微观结构的前沿学科	1
§ 0.2 探索物质微观结构前沿学科发展的特点	2
第一章 粒子的运动和动力性质	4
§ 1.1 粒子世界的尺度特征	4
1. 什么是粒子	4
2. 粒子运动的特点	5
3. 自然单位制	6
§ 1.2 粒子的运动性质	8
1. 粒子的质量	8
2. 粒子的寿命	10
3. 粒子的电荷	17
4. 粒子的自旋	17
5. 粒子的磁矩	19
§ 1.3 粒子的运动学描写	21
1. 粒子的能量和动量	21
2. 粒子的快度和慢快度	23
3. 实验室系和质心系	25
4. n 个粒子反应的 Lorentz 不变量	27
5. n 体末态相空间	28
6. * 不稳定粒子的传播函数	30
§ 1.4 相互作用	32
1. 场论中场和粒子的基本图像	32
2. 场论中相互作用的基本图像	33
3. 四种相互作用	34

§ 1.5 粒子的分类	37
1. 已发现粒子的分类	37
2. 稳定粒子和共振态	38
3. 轻子-夸克层次粒子的分类	40
第二章 对称性和守恒定律	42
§ 2.1 对称和对称性	42
1. 对称和破缺	42
2. 变换和对称的分类	43
§ 2.2 守恒量的一般性质	45
1. 有没有经典对应	45
2. 相加性守恒量和相乘性守恒量	45
3. 严格守恒和近似守恒	46
§ 2.3 Nöther定理	46
1. 经典物理中的 Nöther 定理	46
2. 量子力学中的 Nöther 定理	49
3. *群的不变性和守恒定律的讨论	51
4. *分立对称性和复合对称性	52
§ 2.4 同位旋	54
1. 同位旋的引入	54
2. 同位旋守恒	57
3. 同位旋的破坏	59
§ 2.5 奇异数和重子数	60
1. 奇异粒子的奇异性质	60
2. 奇异数的引入	61
3. 重子数	62
4. Gell-Mann-西岛关系	63
5. U 粒子	65
§ 2.6 正反粒子变换	66
1. 粒子与反粒子	66
2. C 变换及其基本性质	69
3. 纯中性态和 C 宇称	70

4. 正反粒子组成系统的 C 宇称	70
5. C 变换不变和 C 宇称守恒	71
§ 2.7 G 变换	72
1. G 变换和 G 宇称	72
2. 普通介子的 G 宇称和 G 变换的性质	73
3. G 宇称守恒	74
§ 2.8 P 变换	76
1. 空间反射变换	76
2. 轨道宇称和内禀宇称	76
3. 相对宇称和绝对宇称	77
4. 宇称守恒和宇称不守恒	79
§ 2.9 CP 变换	80
1. CPT 定理	80
2. 弱相互作用的 CP 不变性	81
3. CP 破坏现象	82
4. CP 破坏的可能来源	83
§ 2.10 全同粒子交换变换	85
1. 全同粒子交换变换的绝对守恒性	85
2. 全同粒子组成系统的选择规则	87
3. 广义全同粒子组成系统的选择规则	87
4. 电荷共轭交换变换	89
§ 2.11 中性 K 介子的对称性	89
1. K^0 介子的弱相互作用行为	89
2. K_S 介子和 K_L 介子	90
3. K^0 介子再生	91
4. K^0 介子衰变中的 CP 不守恒	93
5. K_L 和 K_S 的质量差	93
§ 2.12 正反粒子组成系统的对称性	95
1. 正反费米子组成的系统	95
2. 正反玻色子组成的系统	96
3. 奇特态和绝对奇特态	98

4. 胶球的对称性	100
§ 2.13 对称性的定性分析	100
1. 守恒定律的回顾	100
2. 离心位垒	101
3. 等效耦合常数分析	101
4. $J^{PC} = \text{偶}^{++}$ 和奇 $^{-}$ 粒子的衰变	102
5. η 粒子	102
6. ϕ 粒子	103
7. ι 和 E 粒子	104
第三章 强子的对称性和强子结构	106
§ 3.1 更高对称性的探寻	106
1. 同位旋和奇异数	106
2. 几种可能的更高的对称性	107
3. $SU(3)$ 对称性的确立	109
§ 3.2 $SU(3)$群的不可约表示	109
1. $SU(3)$ 群的生成元	109
2. $SU(3)$ 群不可约表示的描写	110
3. 不可约表示的Casimir 算符	111
4. 不可约表示中所包含的态	112
5. 不可约表示的直乘和分解	112
§ 3.3 $SU(3)$理论的发展	115
1. 坂田模型	115
2. 八正法	116
3. Ω^{-} 粒子的性质和实验上的探寻	117
4. 夸克模型	119
5. 自旋统计关系和色空间	121
§ 3.4 味对称性的破缺	122
1. 对称性破缺带来的变化	122
2. Gell-Mann-大久保质量分裂公式	122
3. 介子的 $1+8$ 表示混合	124
4. 衰变过程的对称性破缺	127

§ 3.5 强作用动力学	129
1. 色相互作用和胶子	129
2. 渐近自由	130
3. 强子结构的动力图像	131
4. 色禁闭	133
§ 3.6 介子和重子	134
1. 介子和重子的自旋宇称分布	134
2. Zweig规则	136
3. 重子磁矩	139
4. 重子的电磁质量差	140
5. 重夸克和重夸克偶素	143
6. 粲粒子和底粒子	146
§ 3.7 胶球, 混杂子和重子偶素	147
第四章 电弱统一理论	149
§ 4.1 弱相互作用现象	149
1. 弱衰变过程的特点	149
2. 宇称不守恒问题	150
§ 4.2 普适费米弱相互作用理论	151
§ 4.3 中间玻色子理论和电弱统一的可能性	153
§ 4.4 电弱统一理论	156
1. 电弱统一理论中包含的粒子	157
2. 粒子之间的相互作用机理	158
3. 对称性的自发破缺	159
4. 电磁相互作用与弱相互作用的分离	167
5. W^\pm 粒子和 Z^0 粒子	169
6. Higgs 粒子 H^0	171
7. 费米子的代和代的混合	172
8. 中微子质量和中微子振荡	176
§ 4.5 电弱统一理论基础上的进一步探索	179
1. 大统一理论	179
2. 更高电弱对称性的探寻	182

第五章 超高能物理	185
§ 5.1 W粒子和Z粒子.....	185
1. W粒子和Z粒子的宽度给出的信息.....	185
2. W粒子的磁矩.....	190
3. 第二个W粒子和第二个Z粒子.....	191
§ 5.2 Higgs粒子.....	192
1. 中性Higgs粒子.....	192
2. 多个Higgs粒子的可能性.....	195
3. Higgs粒子的分布.....	197
4. 重Higgs粒子的衰变行为.....	199
§ 5.3 顶夸克和第4代费米子.....	200
第六章 高能多粒子产生现象	203
§ 6.1 多粒子产生现象的实验特征.....	203
§ 6.2 多重数分布.....	208
§ 6.3 关联和集团效应.....	213
1. 单举谱和双举谱.....	213
2. 快度关联.....	213
3. 集团效应.....	214
第七章 相对论性重离子碰撞	216
§ 7.1 相对论性重离子碰撞的实验特点.....	216
§ 7.2 相和相变.....	217
1. 强子物质态和夸克胶子等离子体.....	217
2. 实现相变的途径.....	218
3. 手征对称性恢复相.....	220
§ 7.3 相变的几个实验表现.....	220

第二篇 原子核物理学

第一章 绪论	225
§ 1.1 历史的简单回顾.....	225
§ 1.2 原子核的不稳定性.....	232

第二章	原子核的粗块性质	239
§ 2.1	原子核的大小	239
§ 2.2	原子核结合能	244
§ 2.3	原子核裂变	252
§ 2.4	巨共振	258
第三章	核力的特征	265
§ 3.1	核力的电荷无关性与同位旋概念	266
§ 3.2	氘核, 张量力, 对称性对核力形式的限制	269
§ 3.3	同位旋相似态与同位旋多重态	272
第四章	原子核中的单粒子运动与壳结构	281
§ 4.1	原子与原子核中的幻数	281
§ 4.2	Mayer-Jensen的强自旋轨道耦合壳模型	290
§ 4.3	变形势中的单粒子能级与壳结构	299
§ 4.4	对原子核壳模型的反思	305
第五章	原子核的形变与集体运动	310
§ 5.1	原子核的形变, 电四极矩	310
§ 5.2	原子核的转动与转动惯量	315
§ 5.3	转动谱公式的进一步研究	321
§ 5.4	原子核的振动	333
§ 5.5	原子核集体运动理论的其它进展——相互作用 玻色子模型, 生成坐标方法	342
第六章	原子核的对关联与超导性	347
§ 6.1	原子核性质的奇偶差	347
§ 6.2	核子的配对关联和对相互作用	354
§ 6.3	准粒子激发谱	358
§ 6.4	转动惯量, 准粒子相互作用与堵塞效应	364
第七章	原子核高自旋态	369
§ 7.1	高自旋态的实验制备	369
§ 7.2	回弯现象及其物理机制	373

§ 7.3	带交叉频率与带相互作用强度	382
§ 7.4	高自旋态研究中的其它一些问题	386
1.	顺排角动量	387
2.	对关联相变	389
3.	三轴变形	392
第八章	超变形核态	397
§ 8.1	超变形稳定核态存在的微观机制	397
§ 8.2	高自旋超变形核态	400
§ 8.3	原子核电荷半径 $\langle r^2 \rangle$ 随同位素的变化	405
附录 1	基本物理常数表	414
附录 2	稳定粒子性质表	417
附录 3	共振态性质表	426

第一篇 粒子物理学

引 言

§ 0.1 探索物质微观结构的前沿学科

人类在探索自然奥秘的过程中，一个重要的基本问题是探索物质微观结构的规律。例如当把一把铁尺分割成两块时，每一块仍表现出铁的性质，除了数量上减少外，别的并没有什么不同。这样的分割原则上可以一直继续下去，问题在于是不是可以这样地无限分割下去，是不是分割到一定程度就不能再分了。上一世纪物性学和物理化学的研究发展表明物质的微观结构并不是物质宏观结构简单地缩小，各种物质都是由分子构成的，分子的性质是物质物理性质和化学性质的基础。如果把单个分子再加以分割，物质的物理性质和化学性质就会明显地变化。这表明物质微观结构与宏观结构不同，不能从宏观世界规律直接推广到微观来认识微观世界的规律性。这样，在十九世纪，物性学和物理化学就成为当时人类探索物质微观结构规律的前沿学科。

二十世纪以来，物理学在探索物质微观结构基本规律方面不断地取得进展。本世纪初，研究原子的相互作用和原子的内部结构，产生了原子物理学。从本世纪初到三十年代，探索物质微观结构的前沿学科是原子物理学；三十年代到四十年代是原子核物理学；五十年代到八十年代是粒子物理学。这三个学科反映了物质微观结构的不同层次，每一层次，物质运动规律有其特有的特点。

另外,从这个发展过程来看,探索物质微观结构的前沿学科还和微观粒子能量变化尺度有关. 原子物理学的能量变化尺度是电子伏(eV), 原子核物理学的能量变化尺度是兆电子伏($\text{MeV} = 10^6 \text{eV}$), 粒子物理学的能量变化尺度是京电子伏($\text{GeV} = 10^9 \text{eV}$), 现在粒子物理学中能量变化已接近太电子伏($\text{TeV} = 10^{12} \text{eV}$), 是否又要出现一个新学科作为新的探索物质微观结构的前沿学科? 从过去的发展过程来看, 这个新学科应该从粒子物理学中孕育和发展出来. 但是这个新学科是什么? 它将在甚么时候出现? 它所反映的新物理的新特点是什么? 这些问题都是物理学家, 特别是粒子物理学家密切注视的重要问题.

上面所讲的探索物质微观结构前沿学科的发展演变过程可以用下面的表来说明:

物理化学 物性学	原子物理	原子核物理	粒子物理	??物理
10^{-2}eV	1eV	10^6eV	10^9eV	$10^{??} \text{eV}$
19世纪	0—30年代	30—40年代	50—80年代	??年代

§ 0.2 探索物质微观结构前沿学科发展的特点

探索物质微观结构前沿学科的发展有一些共同的特点. 它们研究的对象都是当时人类认识的微观最小客体, 研究的内容包括互相联系的两个方面:

- (1) 微观最小客体的性质、运动、相互作用、相互转化的规律;
- (2) 微观最小客体内部结构规律.

原子物理学从一开始就是从研究原子结构问题展开的, 也就是说, 上述两个方面紧密联系同时开展起来; 原子核物理学也是从一开

始就从研究原子核结构问题展开的。粒子物理学则不一样。

粒子物理学是研究场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律的学科，是研究粒子内部结构规律的学科。粒子物理学是四十年代开始从原子核物理学中分出来的，前期的发展大体上到五十年代。粒子物理学在六十年代取得了两个重大的突破性进展。一个进展是强子结构理论的确立。六十年代以前，粒子物理学中并没有得到显示粒子有内部结构的直接实验证据，理论上对粒子的处理是把粒子看作一个“点”来处理的，并且取得很大的成功。这样粒子物理学在当时研究的主要是场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律。六十年代中，高能物理实验的进展给出了能够直接参与强相互作用的粒子即强子是有内部结构的直接证据，理论上建立了强子结构理论，并且得到实验的验证。另一个进展是电磁相互作用和弱相互作用统一理论的成功。在物理学的发展过程中，一直在探讨从实验的研究中认识的各种相互作用之间的联系，是否可以把它们统一起来。在这个方向上的第一次突破是在经典物理范围内实现的，把电相互作用和磁相互作用统一起来成为电磁相互作用。六十年代中实现了第二次突破，实现了把电磁相互作用和弱相互作用统一起来成为电弱相互作用。由于电磁相互作用和弱相互作用的强度不同，力程不同，实验行为不同，把它们统一起来所遇到的困难和问题要比把电相互作用和磁相互作用统一起来成为电磁相互作用复杂得多。这两个进展标志着粒子物理学的发展成熟。从整个发展过程来看，粒子物理学从一开始就作为研究场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律的学科而出现，但作为研究粒子内部结构规律的学科则实际上到了六十年代才充分发展起来。

第一章 粒子的运动和动力性质

§ 1.1 粒子世界的尺度特征

1. 什么是粒子

本世纪初,物理学的发展弄清楚了原子的直径大体上是 10^{-10} m的量级,原子是由原子核和在原子核周围运动的电子组成的.进一步的发展中又认识到原子核的直径是 10^{-14} m的量级,原子核又是由若干个质子和中子组成的.电子、光子、质子、中子就是人们最早认识的一批基本粒子.对基本粒子性质的实验研究主要是观察基本粒子在相互碰撞时的行为,碰撞能量愈高,能够辨认的空间距离愈小.在当时,由于实验上没能测出这些基本粒子的大小,被认为可能是物质微观结构的最小单元,因此被称为基本粒子.在这之后,凡是和这些粒子可以相互作用和相互转化并在当时的实验认识水平上被认为同属于物质微观结构最小层次的粒子,统称为基本粒子.随着实验能量的不断提高,实验和理论研究的发展,测出质子的电磁半径(也就是电荷分布半径)为 0.8×10^{-16} m.以后又定出 π 介子的电磁半径也是同一量级,比质子略小.这些结果显示,某些基本粒子肯定不能被看作是点粒子,它们有一定的大小并有内部结构.加速电子的高能碰撞实验却表明,尽管能量不断提高,如现在已经提高到 10^2 GeV的量级,但仍然完全可以把电子当作点粒子来对待.这表明如果电子的半径不为零的话,其值应小于 10^{-18} m.这些进展显示,已有的基本粒子并不属于同一层次.因此,现在已经把基本粒子改称粒子,基本粒子物理学改称粒子物理学.

原子	-----	原子核	-----	(基本)粒子
$\sim 10^{-10}\text{m}$		$\sim 10^{-14}\text{m}$		$\sim 10^{-16}\text{m}$
				$\ll 10^{-16}\text{m}$
			有结构	“点粒子”

2. 粒子运动的特点

粒子物理学是研究场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律的学科，是研究粒子内部结构规律的学科。粒子的运动性质有其特有的特点，主要表现在三点上：

(1) 所有的粒子都是微观尺度的客体，都具有量子性；

(2) 粒子运动时，速度的变化常达到可以和光速相比拟的量级，相应能量的变化常达到相当于甚至远大于粒子静止能量的量级，运动是相对论性的；

(3) 粒子运动时，常表现出粒子之间的相互转化，粒子数目是可变的，反映出自由度是可变的。

粒子物理学中所研究的物理规律必然是既能反映微观粒子的量子性，又能反映高速运动的相对论性，还能体现粒子可以产生或湮没的过程。量子性和相对论性要求对粒子运动规律的理论描述必须在量子力学和相对论的基础上。自由度可变要求理论描述应该以具有无穷多自由度的系统即“场”的理论为基础。能同时体现上述三方面特点的是相对论性量子场论：

微观	-----	高速	-----	粒子数可变
量子性 $\sim \hbar$		相对论性 $\sim c$		无穷多自由度
量子力学		相对论		场论
理论描述上的基础：相对论性量子场论				

3. 自然单位制

粒子物理研究中所遇到的物理量，都是有直接微观含义的物理量，或者是通过统计性质和微观含义相联系的物理量。这些量都可以通过几个基本的物理量表达出来，基本物理量及其单位的不同选取，就构成了不同的单位制。粒子物理学中常常采用自然单位制。

微观物理学中涉及的基本物理量原来有长度、时间、质量、电荷、温度等五种。为了减少独立的基本物理量的数目，规定以真空的介电常数为无量纲的数 1 或 $1/4\pi$ 来定义电荷，从而使电荷不再是基本的物理量。

利用 Boltzmann 常数

$$\begin{aligned}k &= (1.380658 \pm 0.000012) \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \\ &= (8.617385 \pm 0.000073) \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}\end{aligned}$$

规定其值为无量纲的 1。这样温度和能量将具有相同的量纲，可以用同一单位来度量，这时原有的温度和能量的换算关系为

$$1 \text{ eV} = (11604.45 \pm 0.10) \text{ K}$$

利用真空光速

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

规定其值为无量纲的 1。这样时间和长度将具有相同的量纲，可以用同一单位来度量，这时原有的时间和长度的换算关系为

$$1 \text{ s} = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m}$$

利用 Planck 常数

$$\begin{aligned}\hbar &= (1.05457266 \pm 0.00000063) \times 10^{-34} \text{ Js} \\ &= (6.5821220 \pm 0.0000020) \times 10^{-22} \text{ MeVs}\end{aligned}$$

规定其值为无量纲的 1。这样时间和能量的倒数将具有相同的量纲，可以用同一单位来度量，这时原有的时间和能量单位的关系为