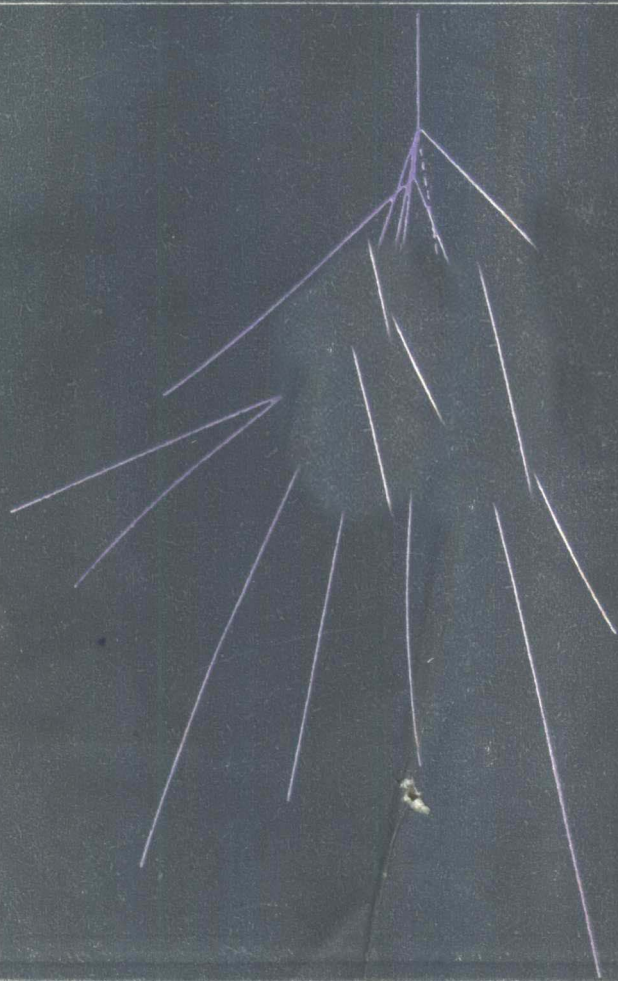


高等教育出版社

秦旦华 高崇寿

粒子物理学概要



粒子物理学概要

秦旦华 高崇寿

高等教育出版社

内 容 简 介

本书概要地讲述了粒子物理学的基本内容，介绍了粒子物理学发展的全貌和当前发展动向。本书尽量不用较深的数学工具，着重对粒子物理学中新的物理图象和物理概念作出直观而又准确的讲解。全书共分六章：一、粒子和粒子物理学；二、粒子物理学发展前期的几个重要进展；三、强子的内部结构；四、相互作用的统一理论；五、高能多重产生现象；六、粒子物理学的新进展和展望。书末附有粒子性质表。全书采用国际单位制。

本书可作为综合性大学、师范院校、工科院校及成人高等学校普通物理课程的教学参考书，也可供广大物理学爱好者参考。

责任编辑：陈海平

粒子物理学概要

秦旦华 高崇寿

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张3.5 字数87 000

1988年12月第1版 1988年7月第1次印刷

印数 0 001—1 900

ISBN 7-04-000809-2/O·315

定价1.00元

前 言

粒子物理学是基础科学中一门年轻的学科，是人类探索物质微观结构自然奥秘的前沿学科。粒子物理学从原子核物理学中作为一个独立学科分出来只有50年的历史。在这50年中，粒子物理学为我们认识和理解物质微观结构的规律提供了丰富多采的图景，同时也展现出了大量有待于人们去探索和研究的自然规律。

长期以来，粒子物理学在普通物理学中是作为原子核物理学的一部分而出现的，在教学中普遍感到，给粒子物理学安排的学时过紧，而在教材中所概括的内容过于陈旧。考虑到粒子物理学是一门迅速发展的前沿学科，这些问题都需要加以研究解决。

粒子物理学作为普通物理学的一部分进行教学时主要要处理好两个问题：① 要反映粒子物理学发展的主要面貌和当前发展动向；② 要能尽量摆脱较深的数学工具，对粒子物理学中给出的新的物理图象和物理概念作比较直观同时又是准确的讲解。本书是在这两方面尽我们力所能及作了一些尝试。本书是为师资培训写的参考书，我们认为，从本书所包括的内容来看，其广度和深度都超出了在普通物理学中应该教给学生的部分。但是作为任课教师，了解本书所介绍的内容则是十分必要的。本书所选内容兼顾历史的发展和重大进展的介绍，其中所涉及的最新进展到1985年12月为止。为了和教学需要相衔接，本书讲述时所用的数学基本上和普通物理学课程的其它部分一致，只有少数地方用到了相当于量子力学的数学。在对新概念的讲解上，尽可能不用数学语言，力求用比较直观的描述给出准确的讲解。

我们希望本书对于教师可以起教学参考书的作用；对于有兴趣想了解粒子物理学及其发展动向的教师、科学工作者和学生，它

目 录

前言	1
第一章 粒子和粒子物理学	1
§ 1.1 粒子及其运动特点	1
§ 1.2 自然单位制	2
§ 1.3 表征粒子特征性质的物理量	4
§ 1.4 相互作用	10
§ 1.5 粒子的分类	16
§ 1.6 粒子物理学	19
第二章 粒子物理学发展前期的几个重要进展	23
§ 2.1 粒子与反粒子	23
§ 2.2 量子电动力学的发展	24
§ 2.3 奇异粒子与奇异数	30
§ 2.4 空间反射对称性和宇称不守恒问题	33
§ 2.5 场论的基本物理图象	36
§ 2.6 对称性和守恒定律	38
第三章 强子的内部结构	42
§ 3.1 $SU(3)$ 对称性	42
§ 3.2 夸克模型	46
§ 3.3 强子结构的基本图象	55
§ 3.4 强子结构理论发展中的几个重要进展	57
第四章 相互作用的统一理论	61
§ 4.1 弱相互作用理论的发展	61
§ 4.2 电弱统一理论	65
§ 4.3 大统一理论	70
§ 4.4 超对称理论和亚夸克模型	71
第五章 高能多重产生	73

§ 5.1	高能多重产生现象	73
§ 5.2	两分量模型	77
§ 5.3	动力机制和概率统计模型	78
§ 5.4	高能多重产生的特殊性	80
第六章	粒子物理学的新进展和展望	83
§ 6.1	$W^\pm$ 及 Z^0 粒子的发现	83
§ 6.2	关于寻找顶(t)夸克的复合态	85
§ 6.3	关于中微子振荡	85
§ 6.4	关于胶子球	87
§ 6.5	超高能新现象	87
§ 6.6	关于粒子物理理论	88
§ 6.7	场论理论的发展	89
附表 1	常用物理常数表	90
附表 2	稳定粒子性质表	92
附表 3	共振态性质表	96
附图 1	Σ^- 粒子产生图	98
附图 2	Ω^- 粒子产生图	100
附图 3	J/ψ 粒子图	101
附图 4	F 粒子图	104
附图 5	W 粒子产生图	105

第一章 粒子和粒子物理学

§ 1.1 粒子及其运动特点

本世纪初期物理学的发展弄清楚了原子的直径大体上是 10^{-10}m , 进一步的发展又使人们认识到原子核的直径的量级是 $10^{-16}\sim 10^{-14}\text{m}$. 通过对光电效应的研究, 人们认识了作为电磁辐射量子的光子 γ . 1932 年英国的查德威克(Chadwick)发现了中子(为此他获得 1935 年度诺贝尔物理学奖), 人们确认了原子核是由质子(p)和中子(n)组成的. 在对中子 β^- 衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 过程的研究中, 从衰变后电子的能量分布不是一确定值而是一个分布, 泡利(Pauli)提出在中子 β^- 衰变中除电子外还应存在一不带电的、质量很小的后来被称为中微子 ν 的粒子(实际上是反中微子 $\bar{\nu}$, 1957 年在实验中得到检验). 中微子和光子一样, 静止质量为零. 1932 年美国入安德森(Anderson)在由威尔孙(Wilson)云室中接受到的宇宙射线中发现了正电子(1936 年获诺贝尔物理学奖), 随后约里奥·居里(Joliot-Curie)夫妇亦在人工放射性中证实了正电子的存在(1935 年获诺贝尔化学奖). 因此, 到 1933 年为止, 电子 e^- 、正电子 e^+ 、质子 p、中子 n、光子 γ 、中微子 ν 、反中微子 $\bar{\nu}$ 是人们最早认识的一批基本粒子, 当时人们认为这些粒子就是全部的基本粒子. 之所以称它们为基本粒子, 是因为人们认为它们可能是物质微粒结构的最小单元. 在这以后, 凡是可以和这些粒子相互作用并能相互转化且在当时认识水平上认为是同一层次的粒子, 统称为基本粒子. 随着实验和理论研究的发展, 已显示出某些基本粒子肯定不能看作为点粒子, 它们有一定

的大小并有内部结构。同时从已显示的内部结构看，已有的基本粒子并不属于同一层次，因此，现在已将基本粒子改称为粒子，将基本粒子物理学改称为粒子物理学。“基本粒子”这个名词已愈来愈成为历史的陈述。

粒子的运动有其特有的特点，概括起来，可以归纳成以下三点：

(1) 所有的粒子都是微观尺度的客体，因此都具有量子性，此时标志粒子的各物理量中往往出现普朗克(Planck)常数 $\hbar = h/2\pi$ ($\hbar \approx 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)。例如，粒子的能量、自旋角动量都与 $\hbar$ 有关，自旋角动量的取值也都是 $\hbar$ 的量级。

(2) 粒子运动时，其速度可以和光速 c ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) 相比拟。此时速度的变化也常达到可以和光速相比拟的量级。与此相应，其动能的变化也常达到相当于甚至远大于粒子静止能量的量级。

(3) 在运动过程中，常表现出粒子之间的转化，即粒子可以消失或产生，粒子的数目也是可变的。例如前面提到的 β 衰变

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

或 $\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$ 电磁衰变等。

粒子运动的这些特点决定了粒子物理学中所研究的规律必然是既能反映微观粒子的量子效应，又能反映高速运动的相对论效应。此外，还应能体现粒子可以产生或湮没的过程。因此，在粒子物理学的理论研究中，仅采用把个别粒子的相对论性运动作为研究对象的相对论量子力学是不够的。代替量子力学并能同时体现上面三个特点的是量子场论。

§ 1.2 自然单位制

在粒子物理学中讨论问题时总免不了出现以 $\hbar$ 体现的量子特性和以 c 体现的高速特征，即几乎所有公式中都出现 $\hbar$ 和 c 这

两个常数,正如著名物理学家费曼(Feynman)所说:“在高能物理中保留 $\hbar$ 和 c 完全是浪费时间”。因此,在高能物理中通常将 $\hbar$ 和 c 都取为1,加上在热力学统计物理中将玻耳兹曼(Boltzman)常数 k 也取为1,则这时基本量纲只有一个通常取为能量,并将其单位取为eV(电子伏特)或MeV($1\text{ MeV}=10^6\text{ eV}$)或GeV($1\text{ GeV}=10^9\text{ eV}\approx 1.6\times 10^{-10}\text{ J}$),这种单位制称为自然单位制。在自然单位制中, $\hbar$ 和 c 不再出现,使公式大大简化,且选用上述单位(如GeV)时,物理量的数值合理,数值变化范围不会太大也不会太小。

在自然单位制中,质量、能量、动量、温度都有相同的量纲[M],长度、寿命、磁矩都有相同的量纲[M⁻¹],而速度、角动量、电荷等都是无量纲的量。

自然单位制和其它单位制之间的换算关系完全可以通过基本关系式

$$\hbar=c=k=1$$

来实现。例如,在自然单位制里质子的质量为

$$m=(938.2796\pm 0.0027)\text{ MeV},$$

如果要换算到C.G.S.单位制,考虑到在C.G.S.制中MeV是能量单位,对于质量应取 MeV/c^2 ,即得

$$m=(938.2796\pm 0.0027)\text{ MeV}/c^2,$$

但因为

$$1\text{ eV}=1.6021892\times 10^{-12}\text{ erg},$$

$$1\text{ erg}=1\text{ g}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-2},$$

$$c=2.99792458\times 10^{10}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1},$$

由此质子质量应为

$$m=938.2796\times \frac{10^6\times 1.6021892\times 10^{-12}}{(2.99792458)^2\times 10^{20}}\text{ g}$$

$$=938.2796\times 1.7826756\times 10^{-27}\text{ g}$$

$$= 1.6726485 \times 10^{-24} \text{g},$$

误差换算时还要考虑换算系数本身的误差所带来的影响。

又例如,在 C.G.S. 制里,引力常数 G_N 的值为

$$G_N = (6.6720 \pm 0.0041) \times 10^{-8} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2},$$

如果换算到自然单位制里,首先考察量纲

$$[G_N] = [L^3][M^{-1}][T^{-2}] = [M^{-2}],$$

因此,在自然单位制中 G_N 的单位可表为能量(即质量)的负二次方或时间(长度)的正二次方。利用 $\text{erg} = \text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 代入得

$$G_N = (6.6720 \pm 0.0041) \times 10^{-8} \text{cm}^5 \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{erg}^{-1},$$

再利用

$$1 \text{ erg}^{-1} = 1.6021892 \times 10^{-6} \text{MeV}^{-1},$$

$$\hbar = 6.582173 \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot \text{s},$$

$$c = 2.99792458 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1},$$

得到

$$\begin{aligned} G_N &= (6.6720 \pm 0.0041) \times 10^{-8} \times \\ &\quad \frac{1.6021892 \times 10^{-6} c^5 \hbar \text{MeV}^{-2}}{(2.99792458)^5 \times 10^{50} \times 6.582173 \times 10^{-22}} \\ &= (6.6720 \pm 0.0041) \times 1.005173 \times 10^{-45} \text{MeV}^{-2} \\ &= (6.7065 \pm 0.0041) \times 10^{-45} \text{MeV}^{-2}, \end{aligned}$$

由此得出一个具有质量量纲的量 m_P ,

$$m_P = \frac{1}{\sqrt{G_N}} = 1.22110 \times 10^{22} \text{MeV},$$

称为普朗克质量,是标志引力相互作用强度特征的量。

§ 1.3 表征粒子特征性质的物理量

每一种粒子都有一些体现其特征的物理性质把它和其它粒子区分开来,这些体现粒子特征的物理量的数目随着粒子物理学的发展而日益增多。新物理量的引入常常与人们对粒子性质了解的

深入相联系。如观察到质子和中子的质量相近及它们参与强相互作用时耦合常数及相互作用行为相近，唯一的差别在于它们所带电荷不同。为了反映这个性质，人们引入了同位旋的概念，将质子与中子看作是同位旋为 $1/2$ 的同位旋多重态中的二个态其区别在于它们在某特定方向上投影的取值不同。

下面给出粒子物理学中一些最重要的物理量：

(1) 质量

每种粒子都具有确定的质量。相对论效应告诉我们，粒子运动时质量随速度增加而增加：

$$m(v) = \frac{m}{\sqrt{1-v^2}}$$

因此，粒子质量表中给出的粒子质量都是指粒子的静止质量 m 。

已发现的粒子质量分布在一个很大的范围内，有少数几种粒子的质量从实验上只测到一个很低的上限，很有可能就是零质量的粒子。典型的例子是光子，现有实验给出光子质量 m_γ 的值为

$$m_\gamma < 3 \times 10^{-33} \text{ MeV}$$

在理论上往往把光子作为质量为零的粒子来处理。

已知的质量不为零的粒子中最轻的是电子，其质量为

$$m_e = (0.5110034 \pm 0.0000014) \text{ MeV}.$$

此外，质子质量为

$$m_p = (938.2796 \pm 0.0027) \text{ MeV}$$

或

$$m_p = (1836.15152 \pm 0.00070) m_e,$$

中子质量为

$$m_n = (939.5731 \pm 0.0027) \text{ MeV}.$$

现在实验上已发现的最重的粒子是 1983 年发现的 $W^\pm$ 粒子和 Z^0 粒子。欧洲核子研究中心 (CERN) 两个实验组 (UA 1 组和 UA 2 组) 测得的质量如下表。

	UA 1	UA 2
m_{μ}	$(80.9 \pm 1.5 \pm 3.0) \text{ GeV}$	$(81.0 \pm 2.5 \pm 1.3) \text{ GeV}$
m_{π}	$(95.6 \pm 1.4 \pm 3.0) \text{ GeV}$	$(91.9 \pm 1.3 \pm 1.4) \text{ GeV}$

其中第一个误差是统计误差,第二个是系统误差。 Z^0 粒子的质量约为质子质量的100倍。

根据相对论,粒子的动量 p 及能量 E 应满足下述关系

$$E^2 - p^2 = m^2, \quad m = \sqrt{E^2 - p^2}.$$

利用上述关系,我们可以通过测量 $\chi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}$ 的衰变中 μ^+ 在磁场中的偏转得到 μ^+ 的动量 p_{μ^+} ,并考虑到动量-能量守恒得到 π^+ 的质量。取 π^+ 静止系(在此系中, π^+ 的质量为静止质量 m_{π^+}),

$$p_{\mu^+} = -p_{\nu} = p,$$

$$m_{\pi^+} = E_{\nu} + E_{\mu}.$$

注意到 $m_{\mu} = 105.65 \text{ MeV}$, $m_{\nu_{\mu}} = 0$,得

$$m_{\pi^+} = \sqrt{m_{\mu}^2 + p^2} + p.$$

实验值给出 $p = (29.80 \pm 0.04) \text{ MeV}$,故

$$m_{\pi} = (139.58 \pm 0.05) \text{ MeV}.$$

(2) 寿命与宽度

已发现的数百种粒子中,除极少数是稳定的以外,其它的都是不稳定的,即在产生之后,经过一定时间将自动转化为其它种类的粒子。每种粒子在衰变前平均存在的时间称为平均寿命,简称寿命。考虑到相对论中运动时钟的延缓效应,运动粒子衰变时其寿命将有时间延缓效应,即

$$\tau(v) = \frac{\tau}{\sqrt{1-v^2}},$$

粒子物理学中说的寿命都是指粒子静止时的平均寿命。理论上稳

定粒子的寿命为无穷大，实验上则表现为给出这些粒子寿命的下限：

电子寿命 $> 2 \times 10^{22}$ 年，

质子寿命 $> 1.3 \times 10^{32}$ 年。

可以衰变的粒子中寿命最长的依次为中子、 μ 子：

中子寿命 $= (898 \pm 16) \text{s}$ ，

μ 子寿命 $= (2.197090 \pm 0.000050) \times 10^{-6} \text{s}$ 。

现在已知的寿命最短的粒子的寿命约为 10^{-25} 秒量级。

量子效应决定了不稳定粒子的质量有一定的自然宽度 Γ ，它和粒子的寿命 τ 之间满足关系

$$\Gamma \tau = 1,$$

亦即对于粒子的寿命可等效地用宽度描写，稳定粒子的宽度为零。现在已知的寿命最短的粒子，其宽度约为 3 GeV 。

对于质量为 M 、宽度为 Γ 的不稳定粒子，通过实验来测量其质量时，实验测到的质量值 m 并不完全确定；如果测量次数很多，则各次测量的值形成一定分布，分布曲线为

$$P(m) = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{(m-M)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}},$$

如图1.1所示。不稳定粒子质量 M 和宽度 Γ 的物理意义为：对不稳定粒子的质量作多次独立测量时，测得质量 m 的期待值为 M ，质量分布到峰高一半处的宽度为 Γ 。

(3) 电荷

质子电荷 e 的实验值为

$$e = (1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{C}.$$

所有粒子，其所带的电荷都是质子电荷的整数倍，亦即质子电荷为电荷的最小单位，这个规律的实验检验是测量电子电荷 e 。与质子电荷 e 的代数和是否为零，现在实验给出

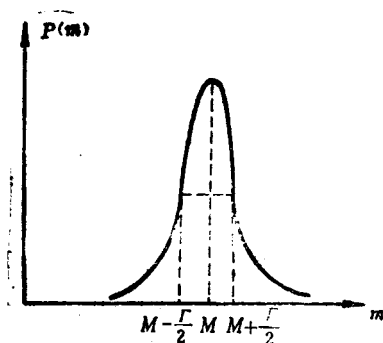


图 1.1 不稳定粒子的质量分布

$$\left| \frac{e - |e_s|}{|e_s|} \right| < 1.0 \times 10^{-21}.$$

现在已发现的各种粒子中电荷绝对值最大的为质子电荷的两倍，如同位旋为 $3/2$ 的 Δ^{++} (1236 MeV)。

(4) 自旋

每种粒子都有确定的自旋角动量，其数值可以用一个自然数或自然数加 $1/2$ 来标志，即自旋量子数 J 的可能取值为 $0, 1/2, 1, 3/2, \dots$ ，自旋角动量的值为 $\sqrt{J(J+1)}\hbar$ 。电子、质子和中子的自旋量子数为 $1/2$ ， π 介子自旋量子数为 0 ，光子及新发现的 W 粒子和 Z 粒子的自旋量子数为 1 。现已发现的粒子中，最大的自旋量子数为 $11/2$ 。

(5) 同位旋

质子和中子的质量相近 ($m_p = 938.3 \text{ MeV}$, $m_n = 939.6 \text{ MeV}$)，自旋都是 $1/2$ 。它们参与强相互作用时，耦合常数相近，行为也相近。它们的差别主要表现为所带的电荷不同，可以看作是电荷不同引起了质量的微小差别。这种情况在 π^+ 、 π^0 和 π^- 介子之间也可以明显地看到 ($m_{\pi^\pm} = (139.5673 \pm 0.0007) \text{ MeV}$, $m_{\pi^0} =$

(134.9630 ± 0.0038) MeV)。后来发现这个特性是能够直接参与强相互作用的粒子所具有的普遍特性。海森堡(Heisenberg)提出, 由于质子和中子如此相似, 我们可以把它描写为一个粒子, 即核子 N 的两个态。这就引进了“同位旋”的概念(用符号 I 表示); 并且, 在强相互作用过程中, 同位旋守恒。

“同位旋”是指在某种抽象空间中的“角动量”, 在概念上与“自旋”的概念相似, 只是它们隶属于不同的空间。对于核子, 规定 $I = 1/2$ 。与自旋为 $1/2$ 的粒子的自旋角动量在某一特定方向上的投影可以取 $J_3 = 1/2$ 及 $-1/2$ 两个可能值一样, 同位旋为 $1/2$ 的粒子的同位旋在该抽象空间中某特定方向上的投影也可以有 $I_3 = 1/2$ 和 $-1/2$ 两个值。因此, $I_3 = 1/2$ 及 $I_3 = -1/2$ 两个状态对应于质子及中子。同样, 我们可以把 π^+ 、 π^0 和 π^- 介子看作为同位旋 $I = 1$ 的粒子 π 介子分别处于 $I_3 = 1(\pi^+)$ 、 $I_3 = 0(\pi^0)$ 及 $I_3 = -1(\pi^-)$ 的情形。

在 I_3 与核子电荷 Q 之间有明显的下述关系:

$$Q = I_3 + 1/2;$$

在 I_3 与 π 介子电荷 Q 之间有下列关系:

$$Q = I_3.$$

同位旋和自旋有极大的相似性, 它们的数学结构完全相同, 同位旋守恒的数学表述也和角动量守恒的数学表述相同。它们的不同在于, 自旋作为角动量, 与普通三维空间中在旋转下的行为有关, 因此说自旋在某一特定方向的投影时, 这特定方向是具体的。而说同位旋沿某一特定方向的投影时, 是指抽象空间中的特定方向, 在现实三维空间看这特定方向并不具体。然而, 同位旋守恒定律的存在表示这抽象空间仍有现实的物理意义。从上面的表示式可以看到, 它的第三轴和电荷有关。

同位旋守恒定律的确立表明要对粒子的运动状态进行完全的描写, 还需引入更多的自由度。这些自由度通常称为内部自由度,

同位旋自由度是人们最先认识的粒子运动的内部自由度。

除了质量、寿命、电荷、自旋和同位旋以外,还有许多表征粒子特性的物理量。这些物理量的取值反映了粒子参与的相互作用性质。粒子的不同直接反映在参与的相互作用中。例如电荷为零的粒子和电荷为一个单位的粒子在电磁场作用下,其相互作用性质显然是不同的。

§ 1.4 相互作用

现已确知的粒子之间的相互作用有四种:引力相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用。这些相互作用都随距离的增加而减弱,但随距离变化的关系则大不相同。引力相互作用比后面三种作用弱得多,约为弱相互作用强度的 10^{25} 分之一。因此,在粒子物理学中主要涉及到的是后面三种相互作用。

通过对粒子间相互作用截面的研究,我们认识到自然界的确实存在上述三种不同的相互作用。

先观察粒子之间的相互作用截面,截面一般采用面积单位——靶恩(1 靶恩(b) = 10^{-28}m^2),根据量子力学规则,与发生作用的几率有关。

考虑下述三种类型的过程:

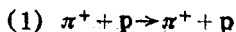


图 1.2 为这种反应的截面图中, σ_{tot} 和 σ_{el} 分别表示强子的总截面和弹性截面; p_{beam} 和 s 分别表示实验室系的束流动量和质心系的能量平方;不同的实验点符号表示不同实验组的结果(下同)。曲线的峰值约为 200 mb,而且对于较大的 π 介子动能, σ 一直拖长到几十 mb。

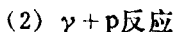


图1.3中, σ_{T} 为总截面, PHOTON ENERGY 表示光子能量, PHOTON AND NUCLEON, 表示光子与核子的质心系总能量。