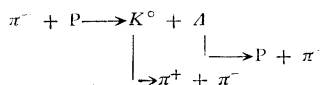


五彩缤纷的基本粒子 (二)

徐德之

8. 天外来的怪客——奇异粒子 经过十年的寂静时期, 寻找基本粒子的工作又进入了一个取得丰硕成果的时期. 从1947年开始, 人们在宇宙线中陆续发现了一些新的粒子, 象K介子和 Λ 、 Σ 、 Ξ 等重子. 这些粒子的发现, 当时是完全没有预料到的, 人们感到非常奇怪, 此外这些粒子还有一个奇特的性质, 即它们都是成对地出现的. 正是由于这两个原因, 人们就称它们为奇异粒子. 为了解释奇异粒子的性质, 派斯于1952年提出了缔合产生的概念. 他引入一个内禀量子数, 称为奇异数, 在强作用过程中奇异数应守恒, 所以在强作用碰撞过程中这一类粒子总是成双出现的. 这种“缔合产生”的概念很快就被证实了. 在图4的 π^- 和P的碰撞中, 的确同时出现了两个这类粒子. 用现在的符号, 此图可解释为



奇异粒子 K^0 和 Λ 一起出现, 故我们可令它们的奇异数为+1和-1, 此过程的奇异数就守恒了.

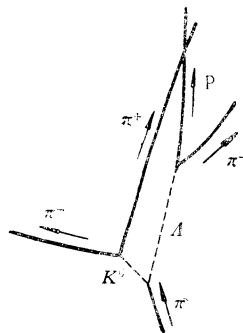


图 4

现在除了上面所述的一些奇异粒子外, 还发现了许多高自旋的奇异粒子如重子 Σ^+ 、 Ξ^* 、 Ω ……及介子 K^* 、 ρ 等等.

9. 短寿命的粒子——共振态 1950年以前发现的粒子几乎都只能通过弱作用发生衰变(只有 π^0 能通过电磁作用发生衰变). 因为作用比较弱, 所以寿命比较长($>10^{-10}$ 秒). 但这以后陆续发现了许多能通过强作用发生衰变的粒子, 它们的寿命都短于 10^{-22} 秒. 五十年代初, 斯坦伯格和费米独立地发现了第一个短寿命粒子.

为了研究强相互作用, 费米等人用 π 介子去轰击质子靶, 并测量了散射总截面, 得到了总截面随 π 的能量而改变的曲线(见图5). 他们发现在 π 的动能为195MeV处, 曲线有一个明显的峰. 这表明在此能量下, π 和P的反应几率达到极大. 过了十年之久, 人们才认识到在此能量下 π 和P可以构成一个束缚态, 所以质子很容易把 π 俘获进去, 反应几率也就大了. 这样的束缚态实际上是一个粒子, 它的质量等于在 π 、P的

质心系中此体系的总能量(在自然单位制中). π 的动能

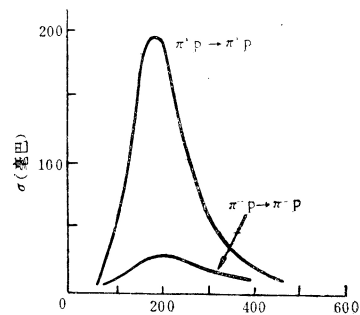


图 5 $E_{\text{动}}(\pi)$ (兆电子伏)

能为195MeV处的峰相应于一个质量为1236MeV的粒子, 我们称它为 Δ , 它一共有四种电荷状态: Δ^{++} 、 Δ^+ 、 Δ^0 、 Δ^- . 寿命很短, 只有 10^{-24} 秒. 这种不稳定的粒子也称共振态, 这是因为它在 π P弹性散射截面中表现为一个峰.

实验上寻找这种短寿命粒子的方法有两种. 一种就是上面所述的测量两个粒子的碰撞截面, 一个峰表示一个粒子. 另一种方法是从成千上万个事例中选出能产生同样几个粒子的事例(例如都有两个 π , 或都有 πN , 或都有 $K\pi$ 等等), 测出在这几个粒子的质心系中此体系的总能量, 如果从各张照片测定的总能量集中在某一能量附近, 则表示在这能量处有一个共振态. 总能量越集中则此共振态的寿命越长.

到目前为止, 已找到的共振态有两百多种, 它们分为两类, 一类的自旋为整数, 称为介子共振态; 另一类的自旋为半整数, 称为重子共振态. 它们都列在基本粒子表上, 这里不一一列举了.

10. 远房的亲戚—— J/ψ 粒子 1974年8月在布鲁克海汶实验室工作的丁肇中小组研究了用高能质子打在铍靶上所产生的 e^+e^- 对. 他们发现在 e^+e^- 体系的质心系中, 体系的总能量集中在3.1GeV的区域中. 通过仔细的测量, 得到此峰的宽度为60KeV左右. 这表示 e^+e^- 是由一个质量为3.1GeV的粒子衰变出来的, 其寿命约为 10^{-20} 秒. 就在这时, 在SLAC工作的瑞克特小组在 e^+e^- 对撞反应总截面中也发现了一个位于3.1GeV处的共振峰. 这样, 从衰变过程(测量衰变产物 e^+e^- 的质心系能量)和产生过程(测量 e^+e^- 反应总截面)中都找到了同一个粒子, 所以结果是非常肯定的. 它称为 J (或 ψ)粒子.

因为这个粒子可衰变为 e^+e^- , 也可以从 e^+e^- 碰撞中产生, 所以它显然是一个角动量为 h 整数倍的玻色子. 又从光子打在质子上产生此粒子的光生截面可知, 它是参加强作用的, 所以它是一个介子. 对一个质量达3.1GeV的介子, 没有一条已有的守恒定律能阻止它

通过强作用发生衰变,所以它的寿命应短于 10^{-22} 秒,但实验却测得它的寿命为 10^{-20} 秒。正是这种不平凡的性质引起了物理学家们的兴趣和注意。

为了解释这种性质,物理学家们采用了以前解释 ϕ 粒子衰变的方法。从各种量子数守恒上来考虑, ϕ 可以通过强作用衰变到 K^+K^- 、 $K_S^0K_S^0$ 或 $\pi^+\pi^-\pi^0$, 但因为 ϕ 和 $2K$ 体系的质量差比 ϕ 和 3π 体系的质量差小很多,所以 $2K$ 体系可以具有的能态比 3π 体系的少得多(或说相空间小得多)。这样,衰变到 $2K$ 体系的几率应比衰变到 3π 体系的几率小,但实验上却发现它主要衰变到 $2K$ 体系。物理学家对此作了如下的解释: ϕ 是由带奇异数的正反层子 $s\bar{s}$ 构成的, π^+ 由 u 层子和反 d 层子构成 ($u\bar{d}$)、 π^0 由 $u\bar{u}$ 和 $d\bar{d}$ 叠加而成, K^+ 由 u 和 \bar{s} 构成 ($u\bar{s}$)。于是 ϕ 到 $2K$ 体系和 3π 体系的衰变方式如图 6 所示。如果我们假设改变带奇异数层子数目的

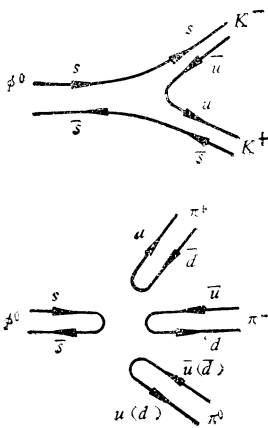


图 6

过程将受到压制(这条假设称 Zweig 规则),则显然到 3π 的衰变是受到压制的,因为在初态中有一对正反奇异层子,而末态中却没有。

对 J/ψ 粒子的衰变,我们可以用类似的方法来解释。设存在第四种层子 c (称为粲层子), J/ψ 是由正反 c 层子构成的,而所有比 J/ψ 粒子质量小的粒子中没有 c 及 \bar{c} , 所以 J/ψ 的强作用衰变就受到压制使强作用衰变几率减小,于是寿命就延长了。

既然有 c 层子,就应有 c 和 u 、 d 、 s 层子构成的介子和重子。果然,1976 年以后陆续发现了 D^0 (c 和 \bar{u} 构成)、 D^+ (c 和 \bar{d} 构成)等介子,还有 A_c^+ 及 Σ_c^{++} 等带 c 层子的重子。这些粒子的发现进一步证明了 c 层子的存在。

c 层子的引进,大大地打开了人们的眼界,人们不禁要问是否还有第五种、第六种层子呢? 1977 年费米实验室在 10GeV 附近又找到了一个长寿命的介子,称为 Y 。这需要引入第五种层子(称为 b)来解释它。1980 年找到了可能是有 b 数目的介子。但由第六种层子(定名为 t)构成的粒子却迄今尚未发现。

现在我们已认识了基本粒子大家庭中的各个成员了,它们有 300 员之多,使人眼花缭乱,人们一直想把它们象元素周期表那样分成一个个小家庭。这种尝试有很多,但都没有成功,直到 1961 年盖尔曼和诺依曼提出了八重态方案才解决了这个问题。1964 年盖尔曼又进一步提出了夸克模型,使这种分类法的理论基

础更为明确。

把粒子分类就是把性质相似的粒子放在一起,作为一类。我们把这种性质的相似性称为对称性,如中子和质子,除了它们的电磁性质外,其它性质都很相似。如果我们把一个体系中的中子和质子互换,则变换前后体系的性质基本相同,所以我们将中子和质子看成同一种粒子的两种不同的状态。在粒子物理中我们称之为二重态,而把中子和质子互换说成是对此二重态进行了某种变换。当然,变换不限于交换,还可有很多种变换。一般来说总是变换成中子和质子的叠加态,即变为 $|n'\rangle$ 、 $|p'\rangle$ 态

$$|p'\rangle = a|p\rangle + b|n\rangle, |n'\rangle = c|p\rangle + d|n\rangle$$

但这种变换也不是任意的,而是按一定的规律来变换的,这种规律就是“群”。一种确定的变换规律表示一个群,其中包括了所有的符合此规律的变换。这种规律就反映在系数 a 、 b 、 c 、 d 的关系上。如前面所说的中子、质子的变换是按 $SU(2)$ 群来变换的,它称为二维么正么模群。么正性是为了保证在变换前后测到粒子的几率不变。如原来一个粒子处于纯质子态上,则我们测到它在质子态上的几率为 1,在中子态上的几率为零;经过变换后,它不再是一个纯质子态了,而以某一几率处于质子态上,某一几率处于中子态上,但这两个几率之和仍应为 1。么正性对 a 、 b 、 c 、 d 的限制为

$$\begin{cases} a^*a + b^*b = 1 \\ c^*c + d^*d = 1 \\ a^*c + b^*d = 0 \end{cases}$$

么模性对 a 、 b 、 c 、 d 的限制是要求由它们构成的行列式为 1,即 $ad - bc = 1$ 。么模性是为了使分类结果与实验相符。从群的理论可知,在 $SU(2)$ 变换下允许有一个不变的量,如果我们把它看成一个状态的话,则在 $SU(2)$ 变换下它是不变的,即不会和别的状态发生叠加。我们把这种态称为单态。如由一个质子和一个中子构成的复合粒子就可以是一个单态。简单地来看,把质子和中子互换所得到的体系和原来的是一样的。(但严格地说还要稍为复杂一些,这里不详述了。)在基本粒子中, A 、 Ω 、 η ……就是这样的单态,因为没有其它性质和它们类似的粒子,所以它们每一个自成一类。又如在 $SU(2)$ 变换下允许有使两个状态叠加的态,我们称之为二重态。在实验上则发现除了 (p, n) 性质相同外,还有 (Ξ^0, Ξ^-) 、 (K^+, K^0) ……等两个一组性质相似的粒子。在 $SU(2)$ 变换下还可有三个状态及四个状态发生叠加的状态,实验上则发现有 (π^+, π^0, π^-) 、 $(\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-)$ 等三个一组及 $(\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-)$ 等四个一组性质相似的粒子。由此可见用 $SU(2)$ 来分类是和实验符合的,不过这样分成的各类之间没有什么关系。我们希望能找到一种分类法,能把更多的粒子连在一起,这就是三维么正么模群分类法或称 $SU(3)$ 分类法。

在夸克模型中,我们假设有三种基础粒子,称为 u

夸克、 d 夸克、 s 夸克，它们的性质是相似的，是同一种粒子的不同电荷、奇异数态。它们的电荷分别为

$$\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e, -\frac{1}{3}e;$$

奇异数分别为 0, 0, -1。我们把它们看成 $SU(3)$ 变换中的一个三重态，即在 $SU(3)$ 变换下，将得到这三个状态的各种线性叠加态。我们再设所有的重子都是由三个夸克组成的，于是由三种夸克可组成 uuu, uud, uus, \dots 等等 27 个状态。用群的理论可知，这 27 个状态可组合成四类，它们分别有 1, 8, 8, 10 个状态。在 u, d, s 作 $SU(3)$ 变换下，只有一个状态的那一类是不变的，其它三类则分别使 8 个状态和 10 个状态发生叠加，而每一类状态不会和别类中的状态叠加。每一类状态有确定的量子数。通过量子数的分析，我们可以将重子分别放于八重态和十重态中。如 uud 的电荷为 +1，奇异数为零，所以它是质子； udd 的电荷为零，奇异数也为零，所以它是中子等等。放置的结果如图 7 所示。我们看

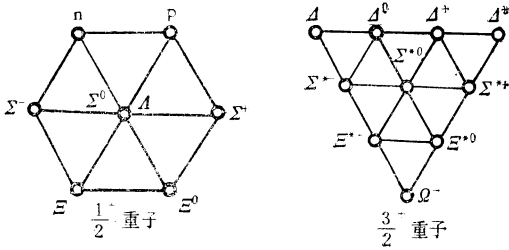


图 7

到每一类中包含了 $SU(2)$ 的几个类，八重态中包含了一个单态 Λ 、两个二重态 (p, n)、(Ξ^0, Ξ^-)、一个三重态 ($\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$)。十重态中包含了一个四重态 ($\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$)，一个三重态 ($\Sigma^{*+}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*-}$)，一个二重态 (Ξ^{*0}, Ξ^{*-})，一个单态 Ω^- 。当时 Ω^- 还未发现， $SU(3)$ 分类法预言了它的存在，后来果然被发现了，所以 $SU(3)$ 分类法就被认为是一种正确的分类法。

对介子也可作类似的分类。我们假设介子是由夸克一反夸克对构成的。由三种夸克可构成九种夸克一反夸克态： $u\bar{u}, u\bar{d}, u\bar{s}, d\bar{u}, d\bar{d}, d\bar{s}, s\bar{u}, s\bar{d}, s\bar{s}$ 。从群的理论可知，可将它们组合成两类变换性质不同的态，一类中只有一个状态(单态)： $\frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$ ，它在

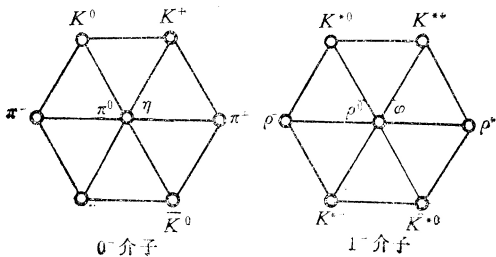
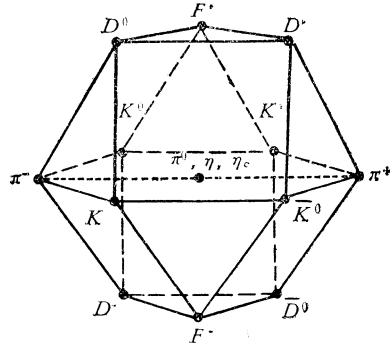
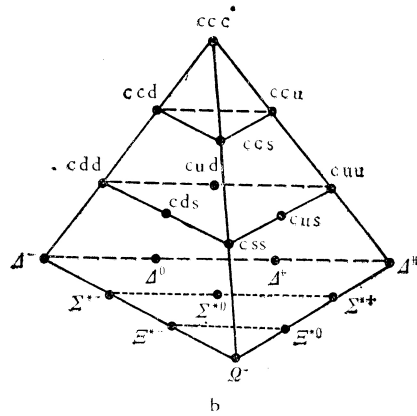


图 8

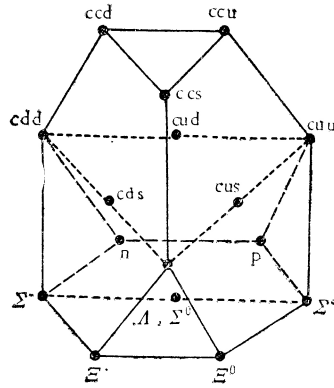
$SU(3)$ 变换下是不变的；另一类有八个状态： $u\bar{d}, u\bar{s}, d\bar{u}, d\bar{s}, s\bar{u}, s\bar{d}, \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}), \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$,



a



b



c

图 9

已发现的重子可放于 20 重态中(见图 9b, 9c)图 9b 是自旋为 3/2 的 $SU(3)$ 十重态的扩充，图 9c 是自旋为 1/2 的 $SU(3)$ 八重态的扩充。从图中可见还有许多空位未被填充。 Υ 粒子发现后又增加了 b 夸克，所以群又要扩充为 $SU(5)$ 。我们同样可以将粒子按 $SU(5)$ 群来分类，但显然将留下更多的空位，以待更多的粒子去填充。

在 $SU(3)$ 变换下总得到此八个态的叠加态。每一个状态有确定的量子数，通过量子数分析，可把介子分别填于单态中和八重态中。填入单态的有 η', ω 等粒子，而八重态则如图 8 所示。

1974 年以前发现的基本粒子都可放入适当的 $SU(3)$ 多重态中。但 J/ψ 粒子发现后增加了一个 c 夸克，于是就

必须将 $SU(3)$ 扩充为 $SU(4)$ 。这时四种夸克可有 16 种介子态，它分成一类单态和一类十五重态。介子的放置方式如图 9a 所示。重子态有 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 个，它可分成一个四重态和三个 20 重态。