



(四)

从 (3.3) 共振到一系列共振的发现

1947年,用核乳胶在宇宙线中发现了理论上预言的 π 介子。这使实验物理学家们深受鼓舞。是不是下一步就能揭开“基本”粒子世界的秘密了呢?不,问题并非如此简单,因为就在同一年,用乳胶和云室又在宇宙线中发现了两个谁也没有料想到的粒子— Δ (兰姆达)和 Σ (西格马)超子。人们很自然的要问,是否还会有其它的粒子存在呢?可惜的是,宇宙线中的这些客人,来时无声,去后无影,又极为稀少,想通过宇宙线来进一步揭开“基本”粒子世界的秘密,是太困难了。于是很多国家就用几亿、十几亿、甚至几十亿美元的代价建造人工产生高能粒子的装置—加速器。美国伯克利辐射研究所的184吋(~ 4.7 米)大型同步回旋质子加速器就是其中较早的一个。1946年,这台加速器刚建成,就用质子束或次级中子束打靶,研究 π 介子的产生情况,经过两年的反复试验,1948年终于用 α 粒子束打靶产生了 π 介子,用加速器研究“基本”粒子的时代就从此开始了。

第一个共振态的发现

1952年,费米和他的同事们为了弄清楚核力的性质,对 π 介子与核子的相互作用作了进一步的探索。他们用加速器产生的 π^\pm 介子束打靶,研究 π^\pm 介子与核子N散射的情况。见图1。在这个实验中,发现了一个

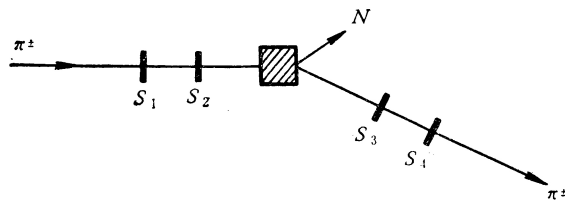


图1 费米研究 π^\pm 介子与核子N散射时所用装置示意图
方框代表靶子, S_1, S_2, S_3, S_4 代表闪烁计数器

十分奇妙的现象:当入射 π^\pm 介子的能量增加到 ~ 100 兆电子伏时,散射截面突然增加,而在 ~ 195 兆电子伏时,出现一个清晰的峰,然后又很快地下降,并且, π^+p 的散射截面为 π^-p 的散射截面的三倍,如图2所示。

当时,这种现象完全出乎理论家们的预料。于是,他们绞尽脑汁,用各种方法加以解释。一直到六十年代,才得到了一个比较公认的看法,就是:入射 π 介子

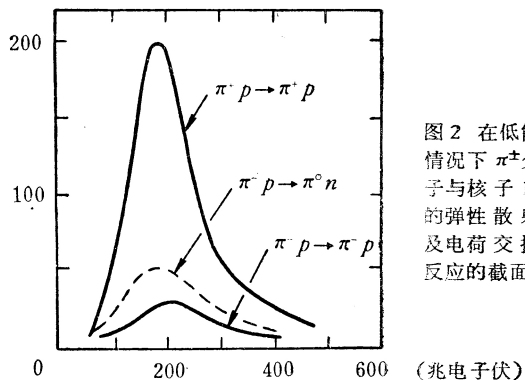
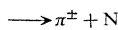


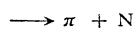
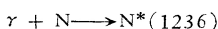
图2 在低能情况下 π^\pm 介子与核子N的弹性散射及电荷交换反应的截面

子的动能在195兆电子伏左右时,产生了所谓的 N^* (1236)共振态粒子,然后这个共振态粒子 $N^*(1236)$ 再衰变为 π^\pm 介子与核子N。按照量子力学的理论,这样的过程可以大大提高散射截面,整个过程用下式表示: $\pi^\pm + N \rightarrow N^*(1236)$



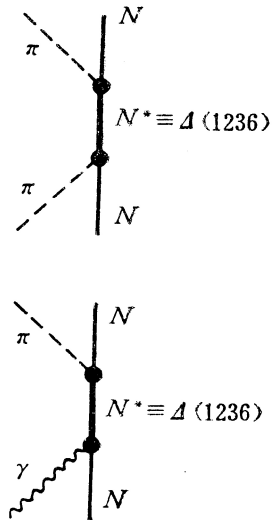
这就是最早发现的共振态粒子,叫做(3.3)共振,它的静止质量为1236兆电子伏/ c^2 ,寿命为 $\sim 10^{-23}$ 秒。

后来,人们通过高能光子打核子产生 π 介子的实验也发现了这个共振,其过程可以用下式表示:



这两个过程也可以用简单

图3 在低能情况下通过 π 介子散射和 π 介子光生而形成的激发态 N^* ,通常叫做 $\Delta(1236)$



的图象表示出来,如图 3 所示.

(3.3) 共振态这个名称的由来

为什么叫(3.3)共振呢?这还要从自旋和同位旋说起.

自旋 J ——即粒子的本征角动量,或称自旋(角动量).它和质量、电荷一样,是“基本”粒子的一种基本性质.自旋以普朗克常数 \hbar ($= \frac{h}{2\pi}$) 为单位.自旋是 \hbar 的整数倍($0, \hbar, 2\hbar, \dots$)的粒子称为玻色子,服从玻色—爱因斯坦统计,例如各种介子;自旋是 \hbar 的半整数倍($\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \frac{5}{2}\hbar, \dots$)的粒子称为费米子,服从费米—狄拉克统计,例如重子和轻子.

大多数粒子都有自旋,而且方向是量子化的.就是说,自旋粒子的“旋转”轴只可能取在几个特定的方向上.带电自旋粒子的这种特性在磁场中更加明显.质子和电子的自旋 $J = \frac{1}{2}$,它们在磁场中只能有两个方向: $J_x = +\frac{1}{2}$ (自旋向上,顺着磁场)和 $J_x = -\frac{1}{2}$ (自旋向下,逆着磁场). π 介子比较特殊,它是无旋粒子,自旋为零.分析在共振能量上散射的 π^\pm 的角分布,也可以知道(3.3)共振态的总自旋角动量为 $\frac{3}{2}\hbar$,这就是(3.3)共振中第一个 3 的由来.

同位旋 I ——它也和自旋一样,也是“基本”粒子的一种基本特性.这个量子数早在 1936 年就提出来了.因为当时在研究核力的过程中发现,在同样条件下,不考虑电磁相互作用时, $p-p$ 、 $n-n$ 、 $p-n$ 之间的强相互作用,不论强度还是力程都相同,即核力与核子的带电情况无关.这就是所谓核力的电荷无关性.于是,就可以把核子看成同一种粒子,而将质子和中子看成是同一种粒子的不同带电状态.核力是通过交换 π 介子实现的.所以,由核力的电荷无关性必然导致 π 介子的电荷无关性,即在强相互作用中, π 介子对核力的贡献也是和电荷无关的.这样,人们就把对核力贡献相同的粒子叫做同族粒子,用同位旋 I 来描写.同族各个成员之间的不同带电状态则用同位旋第三分量 I_3 加以区分.在同一个族中,电荷状态的个数 n 和这个族的同位旋 I 之间的关系是 $n = 2I + 1$.例如,核子族为二个成员,则 $n = 2I + 1 = 2$,所以,核子的同位旋 $I = \frac{1}{2}$,其第三分量 I_3 有两个: $I_3 = +\frac{1}{2}$ 表示质子, $I_3 = -\frac{1}{2}$ 表示中子.习惯上称为电荷双重态.同样,对于 π 介子族,因为它有三个成员,所以 $n = 2I + 1 = 3$,可见 π 介子的 $I = 1$,它的 I_3 则有三个值: $I_3 = +1$ 表示 π^+ 介子, $I_3 = 0$ 表示 π^0 介子, $I_3 = -1$ 表示 π^- 介子.于是将 π 介子族称为电荷三重态.族中各个不同电荷状态的电荷决定于同位旋第三分量

I_3 : 对于同位旋 $I = \frac{1}{2}$ 的核子族中各个成员的电荷 $Q = I_3 + \frac{1}{2}$,而同位旋 $I = 1$ 的 π 介子族中各个成员的电荷则为 $Q = I_3$.

(3.3)共振态既然是核子和 π 介子散射时形成的,它就有四带种电状态, $\pi^+p \rightarrow 2e, \pi^0p$ 和 $\pi^+n \rightarrow e, \pi^-p$ 和 $\pi^0n \rightarrow 0, \pi^-n \rightarrow -e$,即 $n = 2I + 1 = 4$,可见(3.3)共振态的 $I = \frac{3}{2}$,这就是(3.3)共振态的第二个 3 的由来.

总之,(3.3)表示总角动量(自旋)为 $\frac{3}{2}\hbar$,同位旋为 $\frac{3}{2}$.

更多共振态的发现

在六十年代,又发现了一大批共振态粒子,它们都是强作用衰变的,寿命都极短,大约在 10^{-24} — 10^{-23} 秒范围.因此一般都只能用比较间接的方法去探测它们.共振态粒子又分两类:一类是重子(费米子),包括(3.3)共振态.对于很多种重子类共振态,都可以用寻找共振峰的方法(见第一节)去找它们.另一类是介子(玻色子),对于介子类共振态,可以用分析质心系质量(又名不变质量)的方法去找它们.有些中性介子可在正负电子对撞中产生,所以也可以用寻找 e^+e^- 共振峰的方法去找它们.经过十几年的寻找,到目前为止,已找到的重子共振态约有二百种,已找到的介子共

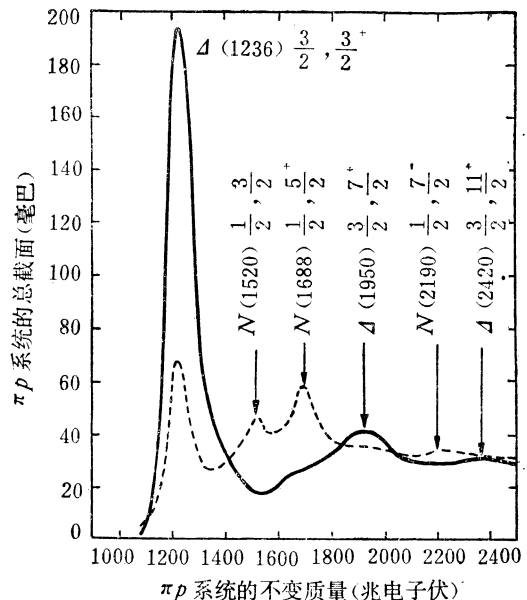


图 4 π^+p (实线)和 π^-p (虚线)散射的总截面
共振态约有 100 种,图 4 是 πN 散射出现的各种重子共振态.标出的数字分别表明共振态的质量、同位旋和角动量(自旋).例如, $\Delta(1950) \frac{3}{2}, \frac{7}{2}^+$,其质量为 1950 MeV/c²,同位旋为 $\frac{3}{2}$,角动量为 $\frac{7}{2}\hbar$,+表示宇

称性质。

通常，人们把同位旋 $I = \frac{1}{2}$ 的重子共振态用符号 N 表示，而把同位旋 $I = \frac{3}{2}$ 的重子共振态用符号 Δ 表示。所以(3.3)共振态粒子就用 $\Delta(1236)\frac{3}{2}^+$ 来表示。 π^\pm ——粒子散射时出现的共振态也可以看做是核子的激发态。激发态的总角动量(自旋)与入射 π 粒子所取的轨道角动量有关。轨道角动量是量子化的，只能取 \hbar 的整数倍，即 $L\hbar$ 。

这里简单说明一下(3.3)共振态的寿命 τ_Δ 和质量 m_Δ 是怎样得到的。由于共振态粒子的寿命都很短，目前的探测器还不能直接测量它。但是按照量子力学中的测不准原理，可以从共振峰的半宽度估计出共振粒子的寿命 τ_Δ 。如果用 Γ 表示(3.3)共振的半宽度，则寿命 $\tau_\Delta = \hbar/\Gamma$ ，其中的 \hbar 已知为 6.58×10^{-22} 兆电子伏秒，从图 4 可得 $\Gamma = 120$ 兆电子伏，所以 $\tau_\Delta = \frac{6.58 \times 10^{-22}}{120} = 0.5 \times 10^{-23}$ 秒。

因为(3.3)共振是在入射 π 介子的动能 $T_\pi = 195$ 兆电子伏时发生的， π 介子的静止质量为 $m_\pi = 140$ 兆电子伏/ c^2 ，所以，入射 π 介子的总能量为

$$E_\pi = T_\pi + m_\pi c^2 = 195 + 140 = 335 \text{ 兆电子伏。}$$

在实验室系中 π 介子的动量 p_π 为(按照狭义相对论:

$$E_\pi^2 - C^2 p_\pi^2 = m_\pi^2 C^4):$$

$$\begin{aligned} p_\pi &= (1/C) \sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2 C^4} = \sqrt{335^2 - 140^2} \\ &= 304 \text{ 兆电子伏}/c \end{aligned}$$

又实验室系发生(3.3)共振时的总能量为入射 π 介子的总能量 E_π 加上核子的固有能量 $m_N C^2 = 938$ 兆电子伏，即： $E_\Delta = E_\pi + m_N C^2 = 335 + 938 = 1273$ 兆电子伏。

因此(按照狭义相对论： $E_\Delta^2 - C^2 p_\Delta^2 = m_\Delta^2 C^4$ ，而 $p_\Delta = p_\pi$) (3.3) 共振的静止质量为：

$$\begin{aligned} m_\Delta &= (1/C^2) \sqrt{E_\Delta^2 - C^2 p_\pi^2} = \sqrt{1273^2 - 304^2} \\ &= 1236 \text{ 兆电子伏}/c^2 \end{aligned}$$

六十年代还发现了一种分析质心系质量找介子共振态的方法。例如，用高能原子或用高能介子打靶，可以产生好几个介子。然后，专门挑选产生 π^+ 、 π^- 的事例，并且把 π^+ 、 π^- 的能量、动量测定下来，用狭义相对论的方法算出这个 π^+ 、 π^- 系统在质心系时的质量。把这样求出的每一对 π^+ 、 π^- 的质心系质量按大小排列起来，可以看到大部分求出的质心系质量都集中在某几个值的邻近。770Mev/ c^2 就是一个集中的地方。根据这样的分析，可以判断有一个静止质量为 770Mev/ c^2 的介子共振态， π^+ 、 π^- ，就是它的衰变产物。后来人们把这个介子共振态叫做 ρ 介子，还可以挑选产生 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 的事例，求它们的质心系质量，求得的质心系质量也有集中在某几个值邻近的倾向。用这个方法找到了 ω 介子，静止质量为 784Mev/ c^2 ，它可以衰变成 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 。相仿，挑选 K^+ 、 K^- 的事例，找到了静止质

量为 1019Mev/ c^2 的 φ 介子，它可以衰变成 K^+K^- 。

在六十年代，由于加速器可以大量产生 K^+K^- 粒子，所以扩大了散射实验的范围，人们又发现了带奇异数的共振态。关于带奇异数的介子共振态和重子共振态，我们将在讲奇异粒子时来讲。

(李云山 王孝良)