

层子模型里介子的分类*

胡 宁

(北京大学物理系)

在前一工作中^[1]我们应用层子模型基本上解释了所有已观察到的较肯定的稳定和不稳定的介子,指出这些介子都可看作是一对层子和反层子在赝标型简谐振子位阱中 $J^P = 0^-$ 和 1^- 的态以及这两个态的轨道角动量 $l = 1$ 和 2 的激发态。在这篇短文中,我们将较详细的给出这个结论在实验上的主要依据。

按照上述理论, 0^- 介子和 1^- 介子径向波函数的大分量 g 满足下面简谐振动的波动方程:

$$M_1^2 g - \nabla^2 g + Mar^2 g - \frac{m^2}{4} g = 0, \quad (1)$$

式中 M 为层子的原始质量, $M_1^2 = M^2 - V_0^2/4$, V_0 代表超强作用的平底位阱,按照层子模型, M 和 V_0 都取很大的值(比如说大于 20 BeV),但 M_1^2 的值则数量级为 1 ,并且可取负值。在(1)式中数量级为 $1/M$ 的项已被略去,因此它代表非相对论的极限; ar^2 是原始引入的弹性位阱,在非相对论近似下,这个位阱由于 V_0 的影响变为 $(V_0/2)ar^2 \cong Mar^2$ 。如果 a 的数量级为 $1/M$,那么(1)式中各项的数量级都将为 1 。在下面讨论中,除(1)式外,不需要更多了解文献[1]的内容,因 M_1 和动量属同数量级,层子运动实际上是相对论的。

相应于(1)式的 Regge 轨迹在图 1 中给出。(1)式的本征值由下式给出:

$$m^2 = 4M_1^2 + 8\sqrt{Ma} \left(\frac{3}{2} + l + 2n \right), \quad (2)$$

l 代表角动量量子数, n 代表径向量子数, l 和 n 都必须为正整数。图 1 中的圆点代表由(2)式给出的本征态。以上是 SU_6 对称性被满足时的情况。实际上层子间除有与自旋和同位旋无关的力外,还存在较弱的与自旋和同位旋有关的力。这使得图 1 中的 Regge 轨迹分裂为很多大体上平行的轨迹。图 2 给出所有已观察到的较肯定的介子,其中八根实线代表由直线 $n = 0$ 分裂出来的 Regge 轨迹。下面的分析将指出,属于 $n \geq 1$ 的 Regge 轨迹由于极不稳定而未被发现。

1) 图 2 中八根实的直线代表 0^- 和 1^- 介子及其角动量 l 激发态的 Regge 轨迹,上面四根属于 1^- 介子系统,下面四根属于 0^- 介子系统,这是大家所熟知的。

2) 除少数例外(如 ω , ϕ , E 和 F_1),当总角动量 J 或介子的质量平方 m^2 增加时,激发态的能级宽度也增加。能级愈宽粒子愈不稳定。在图 2 的右部没有发现介子态。这表明 J 小(实际上是 l 小)但 m^2 大的粒子是不稳定的。一般地说, l 愈小,末态粒子间的离心位垒就愈低,因此 l 小能量高的末态愈不稳定。

3) 由于 m^2 的误差较大,它不排除这八根 Regge 直线是严格平行的。这将表明(1)

* 1975 年 2 月 26 日收到。

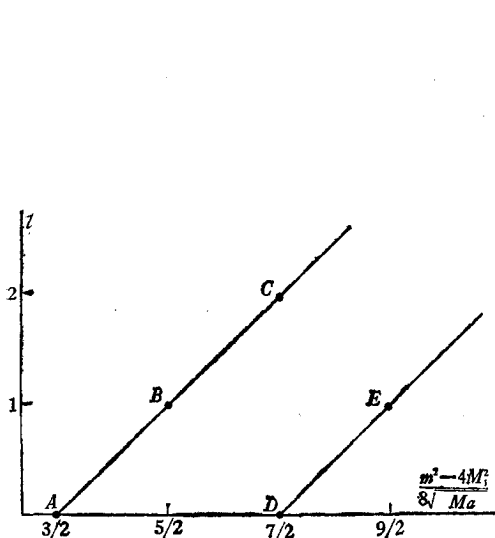


图 1

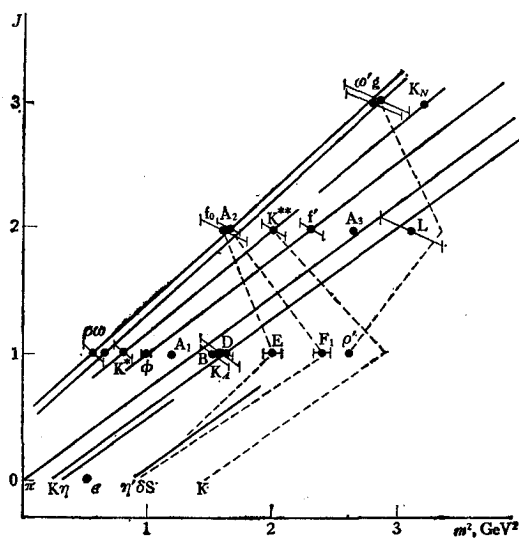


图 2

式中的 α 对于所有介子都是相同的。

4) 按照层子的简谐振子模型, J 激发态必须是由 l 激发造成的。因此在同一 Regge 轨迹上的态必须满足:

$$J = l + s, \quad (3)$$

s 代表基态的总角动量 J 值。对于 1^- 介子系统的上面四根 Regge 直线, s 取固定值 1; 对于 0^- 介子系统的下面四根 Regge 直线, s 取固定值 0. s 取固定值意味着层子和反层子在 l 激发过程中, 自旋的相对方向保持不变。

5) 图 2 中虚折线连接 l 激发相同但 J 不同的态, 其中满足(3)式的态位于经过基态的 Regge 直线上。按照我们的分析, 共有四根这样的折线。位于其中一根虚折线上的 f_0 , E , S 是 ω 介子的 $l = 1$ 激发态。位于另一根折线上的 A_2 , F_1 , δ 是 ρ 介子的 $l = 1$ 激发态。位于第三根折线上的 K^{**} , κ 和另一未知的不稳定介子是 K^* 介子的 $l = 1$ 激发态。最后一根折线上的 g , ρ' 和另一未知的不稳定粒子是 ρ 介子的 $l = 2$ 激发态。显然只有 $s \neq 0$ 的介子才有这种多重态。

6) E , D 和 F_1 的 J^P 值尚不能肯定, 它可以是 $0^-, 1^+, 2^-$ 等。如果 $J^P = 2^-$, 相应的基态或低激发态必须是 1^+ 。如果相应的 Regge 轨迹也与已有的大致平行, 这些态必须在 ρ 和 ω 的区域内。因为这种态没有被发现, 所以 $J^P = 2^-$ 是不大可能的。如 $J^P = 0^-$, 按照同位旋 I 和 G 宇称, E , D 和 F_1 与 η 和 π 是相同的态。这意味着除已有的 0^- 介子八重态, 还应存在另一能级不同的 0^- 介子八重态及它们的激发态。这种额外的解是(1)式所没有的。同样, 上面所提到 $J^P = 2^-$ 的额外解也是(1)式所没有的。如果按照现在的办法, 取 E , D 和 F_1 的 J^P 值为 1^+ , 就可按 $l = 1$ 的多重态进行分类。这种分类最简单的解释了几乎图 2 中所有的介子。

7) 近两三年来, 人们认为 A_1 和 A_3 不代表真正的激发态, 但在 1974 年初, 进一步的分析指出, A_3 仍可能是一个激发态^[2]。在我们所采用的分类里是没有 A_1 的位置的。 A_3 在

我们分类里是 π 介子的 $l = 2$ 激发态, 但 A_2 位于不稳定区的边缘, 缺少 A_2 并不影响我们的结论。

8) 根据上面分析结果, 在连接 K , K_N 和 L 的 Regge 轨迹右边区域里的 E , F_1 , ρ' , δ , S 和 κ , 它们是原在这根 Regge 轨迹左边 $J = l + 1$ 态分裂出来的(下面的计算将指出未分裂前的能级很接近于 $J = l + 1$ 态的能级)。换句话说, 原在这个区域里的介子都是极不稳定的。这也说明为什么 η 和 η' 没有给出激发态。不把 ρ' 看成 ρ 介子的迳向激发态也是和上面的看法相符的, 因为 ρ' 如是 ρ 的 $n = 1$, $l = 0$ 激发态, 它将是原处于不稳定区的态。

9) 在我们的分类中不易安置的只有 $D(1285, I^G = 0^+)$ 和 $\varepsilon(\lesssim 700, I^G J^P = 0^+(0^+)$, ε 虽然列入通常的介子表, 但象 A_1 一样被认为不代表激发态。如果把 f' , D 和 ε 也看成 $l = 1$, J 不同的 ϕ 介子激发态, 那将能把全部介子包括入我们的分类, 但下面的计算将指出所遇到的困难。

10) 从图 2 中虚折线的形状, 我们看到 $J = l$ 态的能级最高, $J = l + 1$ 态次之, $J = l - 1$ 态的能级最低。这表明造成上述多重态能级分裂的作用很可能主要是张量作用力:

$$V_2 = -g \left[\frac{3}{2} (\sigma_1 \mathbf{r})(\sigma_2 \mathbf{r}) \frac{1}{r^2} - \frac{1}{2} (\sigma_1 \cdot \sigma_2) \right], \quad (4)$$

σ_1 和 σ_2 代表层子和反层子的自旋, $\mathbf{r}$ 代表层子和反层子的相对距离。这种力将造成自旋与轨道角动量之间的耦合。Bethe^[3] 曾经利用微扰论计算出能级位移除以 g 的值。结果列在表 1 中。从表 1 我们看到 $J = l$ 的能级最高, $J = l - 1$ 的能级最低, 这是和实际情况相符的。我们还注意到 $J = l + 1$ 态的能级位移最小, 比起其它态的位移几乎可以略去, 这样 $J = l + s$ 态在分裂后几乎仍处于原 Regge 轨迹上。这说明为什么在通过基态的 Regge 轨迹上 (3) 式被满足。

表 1 (态用 $^{2s+1}l_J$ 表示)

l	$J = l - 1$		$J = l$		$J = l + 1$	
	态	$\frac{\Delta E}{g}$	态	$\frac{\Delta E}{g}$	态	$\frac{\Delta E}{g}$
0					3S_1	0
1	3P_0	-2	3P_1	1	3P_2	-1/5
2	3D_1	-1	3D_2	1	3D_3	-2/7

在把表 1 用于我们的问题时, 首先必须把 ΔE 换成 Δm^2 , 因为 (1) 式的本征值是 m^2 。表 2 给出表 1 的理论结果和实验结果的比较。我们看到, 除 K^{**} 和 κ 多重态外, 其它三组多重态所给出的 g 值在能级自然宽度范围内是一致的。 K^{**} 和 κ 给出太小的 g 值。可能是由于 κ 的 m^2 值是基本上不可靠的。再者, 前面曾提到 f' , D 和 ε 属于 $l = 1$, J 不同的多重态的可能性。我们看到, 如果用虚折线把这三个态连接起来, 折线的形状和图 2 中

表 2 (Δm^2 代替表 1 中 ΔE)

介 子	$l, l' G J^P$	$m^2(\text{GeV}^2)$, 实验	Δm^2 , 实验	Δm^2 , 理论	g
$F_1(1540)$	$1, 1-1+$	$2.37 \pm 0.06^*$	0.65 ± 0.19	$(6/5)g$	0.54 ± 0.16
$A_2(1310)$	$1, 1-2+$	1.72 ± 0.13	0.78 ± 0.18	$(9/5)g$	0.44 ± 0.10
$\delta(970)$	$1, 1-0+$	0.953 ± 0.049			
$E(1420)$	$1, 0+1+$	2.01 ± 0.08	0.40 ± 0.30	$(6/5)g$	0.33 ± 0.23
$f_0(1270)$	$1, 0+2+$	1.61 ± 0.22	0.62 ± 0.26	$(9/5)g$	0.34 ± 0.14
$S(993)$	$1, 0+0+$	0.986 ± 0.040			
$K^{**}(1420)$	$1, \frac{1}{2}2+$	2.02 ± 0.14	$0.33 \pm ?$	$(9/5)g$	$0.18 \pm ?$
$\kappa(\sim 1300)$	$1, \frac{1}{2}0+$	$1.69 \pm ?$			
$g(1680)$	$2, 1+3-$	2.84 ± 0.30	0.19 ± 0.94	$(5/7)g$	0.27 ± 1.32
$\rho'(1600)$	$2, 1+1-$	2.65 ± 0.64			

* 这里给出的“误差”代表能级的自然宽度。

已有的大不相同。利用表 1 的理论值和实验比较的结果给出负的 g 值。这说明 D 不能被看作是和 f' 组成一个多重态。由于这个情况, 我们的分类就无法把 D 包括进去; 和 f' 组成多重态的另外两个态应位于图 2 中 ρ' 和 κ 的右边。它们由于能量比较大而极不稳定, 所以没有被观察到。

参 考 文 献

- [1] 胡 宁, 物理学报, **24** (1974), 458.
- [2] *Physics Letters*, **50B** (1) (1974), “Rev. of Particle Properties”.
- [3] H. Bethe, *Phys. Rev.*, **57** (1940), 390.

THE CLASSIFICATION OF MESONS IN THE STRATON MODEL

HU NING

(Department of Physics, Peking University)