

$SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 结构模型下一种可能的 介子质量谱和新粒子的产生与衰变*

李小源 杜东生 吴济民

(中国科学院高能物理研究所)

最新的实验表明^[1], 在质心系总能量 2—7.6 GeV 之间, 在 e^+e^- 湮灭道中存在两个窄共振 $J(3.1)$, $\psi'(3.7)$ 和至少两个宽共振 $\psi''(4.1)$ 和 $\psi'''(4.4)$. 从实验曲线看, 在宽共振区域 4.1—4.4 GeV 内可能还有新的共振存在. 实验还发现了 C 宇称为正的粒子, 质量分别为 2.8, 3.41, 3.51, 3.53 GeV. 实验还测定了 $\Gamma_{\psi' \rightarrow e^+e^-}$ 和 $\Gamma_{J \rightarrow e^+e^-}$ 的比值约为 1:2. 文献 [2] 曾经指出, 在 Han-Nambu^[3] 所指出的 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 结构模型中, e^+e^- 对撞可能产生两个窄共振, 三个宽共振. J 和 ψ' 在 $SU_3^{(1)}$ 空间中若按 ω 和 ϕ 那样变换, 混合角 $\theta = 35^\circ$, 则 $\frac{\Gamma_{\psi' \rightarrow e^+e^-}}{\Gamma_{J \rightarrow e^+e^-}} = \text{tg}^2 \theta = \frac{1}{2}$.

能导致这种混合角的一种可能性是哈密顿量 H 具有近似的 SU_6 不变性. 我们尝试在这样的假设下进一步讨论 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 结构模型中介子的质量谱及它们的产生与衰变. 我们假设哈密顿量 $H = H_0 + H_1 + H_2$, 其中 H_0 在动能项不重要时在 $SU_3^{(1)}$ 和自旋空间满足 SU_6 对称. H_0 还具有 $SU_3^{(2)}$ 不变性, 但与 $SU_3^{(2)}$ 的表示有关. $H_1 = \sqrt{3} \lambda_8^{(1)} \times 1 \cdot A$, 其中 A 与 $SU_3^{(1)}$ 和自旋无关, 且具有 $SU_3^{(2)}$ 不变性. $H_2 = B \cdot 1 \times \sqrt{3} \lambda_8^{(2)}$, 其中 B 在 $SU_3^{(1)}$ 和自旋空间中是 SU_6 不变的, 但与 $SU_3^{(2)}$ 空间无关.

在一级近似下, 矢量介子的质量平方矩阵是 16 行 16 列的, 它可分解为如下的子矩阵:

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} (\omega_1, \omega_1), & (\phi_8, \omega_1), & (\omega_1, \phi_8), & (\phi_8, \phi_8) \\ (\omega_1, \omega_1) \left(\begin{matrix} m_1^2 & -2\sqrt{2} A_1 & -2\sqrt{2} \beta & 0 \\ -2\sqrt{2} A_1 & m_1^2 + 2A_1 & 0 & -2\sqrt{2} \beta \\ -2\sqrt{2} \beta & 0 & m_8^2 + 2B & -2\sqrt{2} A_8 \\ 0 & -2\sqrt{2} \beta & -2\sqrt{2} A_8 & m_8^2 + 2A_8 + 2B \end{matrix} \right), \\ (\phi_8, \omega_1) \left(\begin{matrix} m_1^2 - 2A_1 & -2\sqrt{2} \beta \\ -2\sqrt{2} \beta & m_8^2 - 2A_8 + 2B \end{matrix} \right), & (\omega_1, \phi_8) \left(\begin{matrix} m_8^2 + B & -2\sqrt{2} A_8 \\ -2\sqrt{2} A_8 & m_8^2 + 2A_8 + B \end{matrix} \right), \\ (\phi_8, \phi_8) \left(\begin{matrix} m_8^2 - 2A_8 - 2B, & m_{(\rho, K^*)}^2 = m_8^2 - 2A_8 + B, \\ m_{(K^*, \rho)}^2 = m_8^2 + A_8 - 2B, & m_{(K^*, K^*)}^2 = m_8^2 + A_8 + B, \end{matrix} \right) \end{matrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

* 1975 年 11 月 5 日收到.

其中, (a, b) 代表在 $SU_3^{(1)}$ 空间变换为 a , 在 $SU_3^{(2)}$ 空间中变换为 b 的状态. (1) 式中共有六个参数:

$$\begin{aligned}
 \frac{m_1^2}{4} &= \langle 1, 1 | H_0 | 1, 1 \rangle = \langle 8, 1 | H_0 | 8, 1 \rangle, \\
 \frac{m_8^2}{4} &= \langle 1, 8 | H_0 | 1, 8 \rangle = \langle 8, 8 | H_0 | 8, 8 \rangle, \\
 -\frac{A_1}{2} &= \langle 8, 1 | A | 8, 1 \rangle = \langle 1, 1 | A | 8, 1 \rangle, \\
 -\frac{A_8}{2} &= \langle 8, 8 | A | 8, 8 \rangle = \langle 1, 8 | A | 8, 8 \rangle, \\
 -\frac{B}{2} &= \langle 1, 8 | B | 1, 8 \rangle = \langle 8, 8 | B | 8, 8 \rangle, \\
 -\frac{\beta}{2} &= \langle 1, 8 | B | 1, 1 \rangle = \langle 8, 1 | B | 8, 8 \rangle.
 \end{aligned} \tag{2}$$

由于 $SU_3^{(2)}$ 空间单态和八重态之间的质量平方差很大, 由 β 导致的它们之间的混合将是不重要的. 特别是, 如果这两类状态的空间波函数很不相同, β 的数值也将是比较小的. 由上述原因, 在第一步讨论中可将 β 的效应略去. 又假定 (ω, ρ) 为 J 粒子, (ϕ, ρ) 为 ϕ' 粒子, (ω, ϕ_8) 为 ϕ'' 粒子, 那么将 $\rho, K^*, J, \phi', \phi''$ 的质量实验值输入, 就可以求得参数的数值和矢量介子的质量谱:

$$\begin{aligned}
 \beta &\sim 0, & A_1 &\sim 0.0677 & 2A_8 &\sim 1.33, \\
 B &\sim 1.81, & m_1^2 &\sim 0.728 & m_8^2 &\sim 14.5.
 \end{aligned} \tag{3}$$

表 1

介 子	质量(GeV)	介 子	质量(GeV)	介 子	质量(GeV)	介 子	质量(GeV)
$(\omega, \omega_1) = \omega$	0.770	$(\omega, \phi_8) = \phi''$	4.1 (输入)	$(\omega, \rho) = J$	3.095(输入)	(ω, K^*)	3.87
$(\phi, \omega_1) = \phi$	1.000	$(\phi, \phi_8) = \phi'''$	4.56	$(\phi, \rho) = \phi'$	3.684(输入)	(ϕ, K^*)	4.36
$(\rho, \omega_1) = \rho$	0.770(输入)	(ρ, ϕ_8)	4.1	(ρ, ρ)	3.095	(ρ, K^*)	3.87
$(K^*, \omega_1) = K^*$	0.892(输入)	(K^*, ϕ_8)	4.34	(K^*, ρ)	3.40	(K^*, K^*)	4.12

由表 1 可见, 当假设 (ϕ, ϕ_8) 为 ϕ''' 时, 质量的理论值与实验值之间的差别小于 4%.

为了求得 $|8, 8\rangle$ 态赝标介子的质量, 我们假定质量为 2.8 GeV 的新粒子是 (π, π) 态. 由此可得 $|8, 8\rangle$ 态矢量介子和赝标介子的质量平方差为

$$\Delta m^2 = m_{(\rho, \rho)}^2 - m_{(\pi, \pi)}^2 = 1.74 \text{ GeV}^2. \tag{4}$$

若略去 $|8, 8\rangle$ 和 $|1, 8\rangle$ 态赝标介子的混合, 可求得 $|8, 8\rangle$ 态赝标介子的质量谱. 然而, $|1, 8\rangle$ 态赝标介子 $(X^0, \pi), (X^0, \eta), (X^0, K)$ 的质量目前还难于估计, 因为它们属于 SU_6 单态而不属于 SU_6 的 35 重态. 在 $SU_3^{(2)}$ 单态介子中, SU_6 单态 X^0 的质量接近于 SU_6 的 35 重态中质量最大的 ϕ 介子质量. 假定这种情况对 $SU_3^{(2)}$ 的八重态同样存在, 那么就可以大略估计 $|1, 8\rangle$ 态中赝标介子的质量, 结果列于表 2 中.

根据前面给的哈密顿量 H_2 和表 1, 2 中的质量谱, 在强子碰撞中可以通过强作用和普通强子一起单个地产生的新粒子有

$$(\rho, \phi_8), (K^*, \phi_8), (\phi, \phi_8), (\omega, \phi_8), (\pi, \eta), (K, \eta), (\eta, \eta), (X^0, \eta).$$

表 2

介 子	质量(GeV)	介 子	质量(GeV)	介 子	质量(GeV)
(π, π)	2.8 (输入)	(π, η)	3.88	(π, K)	3.64
(K, π)	3.14	(K, η)	4.13	(K, K)	3.90
(η, π)	3.24	(η, η)	4.21	(η, K)	3.99
(X^0, π)	3.5	(X^0, η)	4.3	(X^0, K)	4.2

它们也能通过强作用衰变,因此是宽共振态。它们产生的阈能不高,能量为十几 GeV 的强子束就能产生。但由于其他强作用过程的背景太大,辨认它们是很困难的。其它的新粒子通过强作用只能成对地产生,这需要更高能量的强子束。

通过电磁作用单个地和普通强子一同产生的新粒子有

$$(\rho, \rho), (K^*, \rho), (\phi, \rho), (\omega, \rho), (\rho, \phi_8), (\omega, \phi_8), (\phi, \phi_8), (K^*, \phi_8),$$

$$(\pi, \pi), (K, \pi), (\eta, \pi), (X^0, \pi), (\pi, \eta), (K, \eta), (\eta, \eta), (X^0, \eta).$$

它们产生的阈能在质心系为 3—5 GeV 的范围内,其中 $(\omega, \rho), (\phi, \rho)$ 在 e^+e^- 反应中表现为窄共振,而 $(\omega, \phi_8), (\phi, \phi_8), (\rho, \phi_8)$ 则表现为宽共振。当然, (ρ, ϕ_8) 只有在 β 不严格为零, $SU_3^{(2)}$ 中的 ϕ_8 和 ω_1 有一点混合时才能在 e^+e^- 反应中出现。目前 e^+e^- 反应在 4.1 GeV 附近出现的截面的峰可能是 (ω, ϕ) 和 (ρ, ϕ) 两个共振的叠加。其它的新粒子通过电磁作用必须成对地产生,其产生阈能在 8—9 GeV 以上。

假使在弱作用中 $SU_3^{(1)}$ 和 $SU_3^{(2)}$ 对称性全部破坏,那么在中微子反应中所有的新粒子都可能单个地和普通强子一同产生。

现在进一步讨论已经发现的新粒子的衰变过程。先讨论强衰变。 $(\rho, \phi_8), \psi''(\omega, \phi_8), \psi'''(\phi, \phi_8)$ 可以通过 H_2 强衰变为普通强子。由于强作用中的守恒定律以及 Zweig 规则,这三个宽共振不可能衰变为一个新粒子加上普通的强子。只有在 (ϕ, ϕ_8) 和 (ω, ϕ_8) 的混合角偏离 35° 时,才有可能存在下列三个过程: $(\phi, \phi_8) \rightarrow (\rho, \phi_8) + \pi, (\phi, \phi) \rightarrow (\pi, \eta) + 2\pi, (\phi, \phi_8) \rightarrow (\omega, \phi_8) + 2\pi$ 。由于同样原因,下面两个过程是禁戒的: $\psi'(\phi, \rho) \rightarrow J(\omega, \rho) + 2\pi, \psi' \rightarrow (\pi, \pi) + 2\pi$, 只有当 $\psi'(\phi, \rho)$ 和 $J(\omega, \rho)$ 的混合角偏离 35° 时这两个过程才能进行。只要能量守恒定律得到满足, $\psi' \rightarrow (K, \pi) + K$ 是可以进行的,但是相空间可能很小。

下面讨论新粒子的电磁衰变。新粒子衰变为轻子对的部分宽度之间的比例的理论值为

$$\Gamma_{e^+e^-}^J : \Gamma_{e^+e^-}^{\psi'} : \Gamma_{e^+e^-}^{\psi''} : \Gamma_{e^+e^-}^{\psi'''} = 1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{6} = 1:0.5:0.333:0.167.$$

而相应的实验值^[4]是

$$4.8:2.2:1.8-3.3:0.4-0.8 = 1:0.46:0.375-0.688:0.0833-0.167.$$

$\Gamma_{e^+e^-}^{\psi''}$ 理论值比 $\Gamma_{e^+e^-}^{A_1^0}$ 实验值小,这可能是由于在 4.1 GeV 附近还存在一个还没有被分辨出来的宽共振 (ρ, ϕ_8) 的缘故。

由于新粒子中层子的有效质量比普通强子中层子的有效质量大四至五倍,故反常磁矩也可能相应地小四至五倍。假使在新粒子之间的辐射过程的探讨中,将反常磁矩的贡献略去,那么用层子模型的计算方法可以得到

$$\Gamma_{J \rightarrow (\pi, \pi) + \gamma} = 6.2 \text{ keV}, \quad \Gamma_{\psi' \rightarrow (\eta, \pi) + \gamma} = 4.1 \text{ keV}, \quad \Gamma_{\psi' \rightarrow (X^0, \pi) + \gamma} = 2.1 \text{ keV}.$$

假使 (ω, ρ) , (ϕ, ρ) 之间的混合角是 35° , 那么 $\psi' \rightarrow (\pi, \pi) + \gamma$ 是禁戒的. 只有在混合角偏离 35° 时, 这一辐射过程才能进行. 即使 (ω, ρ) 和 (ρ, ρ) 的 P 波激发态的能量小于 3.684 GeV , 也只有在上述混合角偏离 35° 时, ψ' 才有可能辐射衰变到这些 P 波激发态. 当然, 这些 P 波激发态进行 $E1$ 辐射衰变, 分别跃迁到 (ρ, ρ) 和 (ω, ρ) 的基态, 是完全容许的. (η, π) 和 (X^0, π) 可以辐射跃迁到 (ρ, ρ) 的基态, 但是它们不能辐射跃迁到 (ω, ρ) 的基态, 除非 (ω, ρ) 和 (ϕ, ρ) 之间的混合角不是 35° .

计算新粒子和普通强子之间的辐射跃迁有困难. 作为层子-胶子系统, $SU_3^{(2)}$ 单态和 $SU_3^{(2)}$ 的八重态很不相同. 层子的等效质量很不相同, 反常磁矩可能很不相同, 胶子携带的质量也可能很不相同. 目前还没有计算这种电磁跃迁过程的理论方法. 假使搬用层子模型的计算方法, 令层子的反常磁矩等于零, 则得到

$$\begin{aligned} \Gamma_{J \rightarrow \eta + \gamma} &= 287 \text{ keV}, & \Gamma_{J \rightarrow X^0 + \gamma} &= 534 \text{ keV}, \\ \Gamma_{\psi' \rightarrow \eta + \gamma} &= 639 \text{ keV}, & \Gamma_{\psi' \rightarrow X^0 + \gamma} &= 338 \text{ keV}. \end{aligned}$$

假使令层子的反常磁矩等于普通强子中的层子的反常磁矩, 那么就有

$$\begin{aligned} \Gamma_{J \rightarrow \eta + \gamma} &= 5.78 \text{ MeV}, & \Gamma_{J \rightarrow X^0 + \gamma} &= 12.2 \text{ MeV}, \\ \Gamma_{\psi' \rightarrow \eta + \gamma} &= 16.3 \text{ MeV}, & \Gamma_{\psi' \rightarrow X^0 + \gamma} &= 4.95 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

它们都要比 J 和 ψ' 粒子的总宽度还大得多.

J 和 ψ' 粒子由于 $SU_3^{(2)}$ 中同位旋 $I^{(2)}$ 守恒不能通过强作用直接衰变为普通强子, 但是由于电磁相互作用破坏 $I^{(2)}$ 守恒, 它们可以通过电磁相互作用间接衰变为强子系统. 一种方式是 J 和 ψ' 转化为虚光子, 虚光子再转化为强子. J 粒子的这种衰变部分宽度为 12 keV . 另一种方式是通过二级电磁相互作用, 在 J 和 ψ' 粒子中混进 $SU_3^{(2)}$ 单态的成份, 和 $SU_3^{(2)}$ 八重态中的 ϕ_8 成份, 这种 $SU_3^{(2)}$ 单态成份再通过强作用直接衰变为普通强子. 这种方式对于衰变宽度的贡献还难于估计.

从上面的讨论可以看出, $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 结构模型的一部分结构和目前的实验结果不矛盾, 但是在理论上还有严重的困难. 首先是 J 粒子的一级电磁衰变过程的部分宽度为什么这样小? 其次, 如何解释 R 值在能量 $4-5 \text{ GeV}$ 范围内的变化问题. 虽然在 e^+e^- 碰撞中产生单个新粒子和普通强子的阈能在 3 GeV 处已经开始, 但是, 假使它们的贡献大到能够解释 R 值在 $4-5 \text{ GeV}$ 之间的上升, 那么在高能量 μ 介子深度非弹性碰撞中将会发生什么变化, 这又是一个问题. 由于在 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 结构理论中, 8 种胶子中有 4 种是中性的, 2 种带单位正电荷, 2 种带单位负电荷. 这些荷电的胶子在 e^+e^- 反应中, 在轻子和核子的深度非弹性碰撞中起什么作用, 也是一个有待研究的问题.

参 考 文 献

- [1] R. Schwitters Proceedings of the 1975 International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies, p. 5; G. Abrams, *ibid.*, p. 25; B. Wiik, *ibid.* p. 69; G. J. Feldman, *ibid.*, p. 39.
- [2] 卞震, 李宗, 梁疏, 科学通报, **20** (1975), 35.
- [3] M. Y. Han, Y. Nambu, *Phys. Rev.*, **139** (1965), B1006.
- [4] F. J. Gilman, Proceedings of the 1975 International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies, p. 131.

**A POSSIBLE MESON SPECTRUM AND THE
PRODUCTION AND DECAY OF THE NEW
PARTICLES IN THE $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ MODEL**

LI XIAO-YUAN TU TONG-SHENG WU JI-MIN
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)