

新粒子和层子模型理论对称性的一种可能—— SU_5 的扩充*

李 铁 忠

(中国科学院高能物理研究所)

在 J/ψ 和 ψ' 粒子发现后, SU_3 难于容纳和为了解释它的性质, 有人将层子模型理论^[1]的对称性从 SU_3 扩充到 SU_4 ^[2]. 我们不禁要问: 如再发现窄共振的中性矢量介子怎么办? 那时 SU_4 已难于容纳, 其扩充的一种可能是 SU_5 . 最近实验上确实有人宣称又发现了这种新粒子. 如有人宣称发现了质量在 6GeV 左右且具有惊人稳定性的新粒子^[3] Y . 如果用 J/ψ 刚发现时那样的理论分析方法^[4]来分析 Y 粒子, Y 粒子很可能是中性 1^- 介子. 还有人说, 在 4.8GeV 处也有一个窄共振的中性 1^- 介子^[5]. 本文不妨以 6GeV 的窄共振作为扩充到 SU_5 的例子.

U_5 代数共有 25 个无穷小算子 $\lambda_i^j (i, j = 1, 2, 3, 4, 5)$, 其矩阵元为

$$(\lambda_i^j)_k^l = \delta_i^l \delta_k^j. \quad (1)$$

因 SU_5 是四秩群, 我们选同位旋第三分量 I_3 , 超荷 Y 及 c 荷, b 荷

$$I_3 = \frac{1}{2} (\lambda_1^1 - \lambda_2^2), \quad Y = \frac{1}{3} \lambda_4^4 - \lambda_5^5, \quad c = \lambda_4^4, \quad (2)$$

$$b = \lambda_5^5, \quad (3)$$

b 是新增加的量子数. 盖尔曼-西岛规则扩充为

$$Q = I_3 + \frac{1}{2} (Y + c + b). \quad (4)$$

五个层子用 p, n, Λ, p', n' 表示. 这样根据层子模型理论, 0^- 介子和 1^- 介子填充 SU_5 的 24 维和 1 维表示. 1^- 介子么旋波函数为

$$\psi = \begin{pmatrix} \frac{\rho^0}{\sqrt{2}} + \frac{\phi^0}{\sqrt{6}} + \frac{\phi_c^0}{\sqrt{12}} + \frac{\phi_b^0}{\sqrt{20}} & \rho^+ & K^{*+} & \bar{D}^{*0} & \bar{H}^{*0} \\ \rho^- & \frac{-\rho^0}{\sqrt{2}} + \frac{\phi^0}{\sqrt{6}} + \frac{\phi_c^0}{\sqrt{12}} + \frac{\phi_b^0}{\sqrt{20}} & K^{*0} & D^{*-} & H^{*-} \\ K^{*-} & \bar{K}^{*0} & \frac{-2\rho^0}{\sqrt{6}} + \frac{\phi_c^0}{\sqrt{12}} + \frac{\phi_b^0}{\sqrt{20}} & F^{*-} & I^{*-} \\ D^{*0} & D^{*+} & F^{*+} & \frac{-3\phi_c^0}{\sqrt{12}} + \frac{\phi_b^0}{\sqrt{20}} & \bar{R}^{*0} \\ H^{*0} & H^{*+} & I^{*+} & R^{*0} & \frac{-4\phi_b^0}{\sqrt{20}} \end{pmatrix} + \frac{\omega^0}{\sqrt{5}}. \quad (5)$$

* 1976 年 4 月 29 日收到; 1977 年 2 月 28 日收到修改稿.

0^- 介子么旋波函数与(5)式类似.

一、 $\omega^0, \phi^0, \phi_c^0, \phi_b^0$ 的混合

矢量介子质量谱是由破坏 SU_3 对称的项给出, 而其中 $\omega^0, \phi^0, \phi_c^0, \phi_b^0$ 的量子数 I, I_3, Y, c, b 都是零, 所以能将其混合. 为符合实验也应将它们混合. 通常设

$$\begin{pmatrix} \omega \\ \phi \\ \phi_c \\ \phi_b \end{pmatrix} = R_4 \begin{pmatrix} \omega^0 \\ \phi^0 \\ \phi_c^0 \\ \phi_b^0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

及质量矩阵

$$\begin{pmatrix} m_{\omega^0}^2 & \delta m_1 & \delta m_2 & \delta m_3 \\ \delta m_1 & m_{\phi^0}^2 & \delta m_4 & \delta m_5 \\ \delta m_2 & \delta m_4 & m_{\phi_c^0}^2 & \delta m_6 \\ \delta m_3 & \delta m_5 & \delta m_6 & m_{\phi_b^0}^2 \end{pmatrix} = R_4^{-1} \begin{pmatrix} m_{\omega^0}^2 & & & \\ & m_{\phi^0}^2 & & \\ & & m_{\phi_c^0}^2 & \\ & & & m_{\phi_b^0}^2 \end{pmatrix} R_4, \quad (7)$$

R_4 是四维转动矩阵, 本文采用自然基的表式. 只要知道(7)式左端的质量矩阵, 输入物理的 $\omega, \phi, \phi_c, \phi_b$ 的质量就能定出混合角. 为此引入质量算符

$$\hat{m}^2 = m_0^2 + \hat{d}\lambda_3^2 + \hat{e}\lambda_4^2 + \hat{f}\lambda_5^2, \quad (8)$$

其中 $\hat{d}, \hat{e}, \hat{f}$ 是与表示有关的参数. 以 $\hat{d}$ 为例, $\langle 1|\hat{d}|1\rangle = \alpha d, \langle 24|\hat{d}|24\rangle = d, \langle 1|\hat{d}|24\rangle = \beta d, \hat{e}, \hat{f}$ 也一样. 将(5)和(8)式代入

$$\langle |m^2| \rangle = \text{sp}(\mathcal{A}^+ \hat{m}^2 \mathcal{A}) + \text{sp}(\mathcal{A} \hat{m}^2 \mathcal{A}^+) \quad (9)$$

中, 获得质量矩阵

$$\begin{pmatrix} m_{\omega^0}^2 & \delta m_1 & \delta m_2 & \delta m_3 \\ \delta m_1 & m_{\phi^0}^2 & \delta m_4 & \delta m_5 \\ \delta m_2 & \delta m_4 & m_{\phi_c^0}^2 & \delta m_6 \\ \delta m_3 & \delta m_5 & \delta m_6 & m_{\phi_b^0}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_\rho^2 + \frac{2\alpha}{5}(d+e+f) & \frac{-2\sqrt{2}}{\sqrt{15}}\frac{\beta}{d} & \frac{\beta}{\sqrt{15}}(d-3e) & \frac{\beta}{5}(d+e-4f) \\ \frac{-2\sqrt{2}}{\sqrt{15}}\frac{\beta}{d} & m_\rho^2 + \frac{4}{3}d & \frac{-\sqrt{2}}{3}d & \frac{-\sqrt{2}}{\sqrt{15}}d \\ \frac{\beta}{\sqrt{15}}(d-3e) & \frac{-\sqrt{2}}{3}d & m_\rho^2 + \frac{1}{6}(d+9e) & \frac{1}{2\sqrt{15}}(d-3e) \\ \frac{\beta}{5}(d+e-4f) & \frac{-\sqrt{2}}{\sqrt{15}}d & \frac{1}{2\sqrt{15}}(d-3e) & m_\rho^2 + \frac{1}{10}(d+e+16f) \end{pmatrix} \quad (10)$$

及矢量介子的质量关系式

$$\begin{aligned}
 m_{\phi_0}^2 &= m_\rho^2 + \frac{4}{3}d, & m_{H^*}^2 &= m_\rho^2 + f, \\
 m_{\omega_0}^2 &= m_\rho^2 + \frac{2\alpha}{5}(d + e + f), & m_{I^*}^2 &= m_\rho^2 + d + f, \\
 m_{D^*}^2 &= m_\rho^2 + e, & m_{K^*}^2 &= m_\rho^2 + e + f, \\
 m_{F^*}^2 &= m_\rho^2 + d + e, & m_{\phi_b^0}^2 &= m_\rho^2 + \frac{1}{10}(d + e + 16f), \\
 m_{\phi_c^0}^2 &= m_\rho^2 + \frac{1}{6}(d + 9e),
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\text{其中 } d = m_{K^*}^2 - m_\rho^2, \quad e = \frac{2}{\alpha + 3}(m_\omega^2 + m_\phi^2 + m_{\phi_c}^2 - 3m_\rho^2) - m_{K^*}^2 + m_\rho^2,$$

$$f = \frac{5}{8 + 2\alpha}(m_\omega^2 + m_\phi^2 + m_{\phi_c}^2 + m_{\phi_b}^2 - 4m_\rho^2) + m_\rho^2 - m_{K^*}^2 - e,$$

(9), (10) 式中已假定了填充 SU_5 同一表示的粒子的空间和自旋波函数都相同。但 1 维与 24 维的不同。(10) 式的 α, β 是反映这种不同的参数。输入 $m_\omega, m_\phi, m_{\phi_c}, m_{\phi_b}$ ($m_{\phi_b} = 6\text{GeV}$) 的实验值能定出混合角和矢量介子的质量, 且由 (6) 式可知 ω, ϕ, ϕ_c 的成份与 SU_4 情况下相同, 基本上不含 $n'\bar{n}'$ 。而 ϕ_b 基本上是 $n'\bar{n}'$ 的成份, 也混进极少量其它成份。如认为 1 维及 14 维粒子的空间及自旋波函数相同, 则 $\alpha = \beta = 1$ 。把 (10) 式对角化, 即可得到 ϕ, ϕ_c, ϕ_b 的成份是纯的 $\lambda\bar{\lambda}, p'\bar{p}', n'\bar{n}'$ 态, 而 ω 是 $\frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} + n\bar{n})$ 态, 这与实验也相差不远。

二、质量公式

上面讨论表明, $\lambda_3^1, \lambda_4^1, \lambda_5^1$ 的破坏给出 1^- 介子的质量。现进一步讨论表达这类对称性破坏所导致的对介子及重子均适用的质量公式。为此引入哈密顿量

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{SB}, \tag{12}$$

$\mathcal{H}_0$ 是 SU_5 不变的, $\mathcal{H}_{SB}$ 是破坏 SU_5 对称的。假定 $\mathcal{H}_{SB}$ 为

$$\mathcal{H}_{SB} = A t_3^3 + B t_4^4 + C T_5^3.$$

用 (12) 式作类似于文献 [6] 的推导, 易得如下的 SU_5 的质量公式:

$$\begin{aligned}
 M &= M_0 + M_1 \left(\frac{(Y + c + b)^2}{4} - cb - I(I + 1) \right) + M_2(c^2 + W) + M_3(b^2 + X) \\
 &\quad + M_4Y + M_5c + M_6b + M_7W' + M_8X' + M_9X''.
 \end{aligned} \tag{13}$$

(13) 式适用于介子和重子。对介子一般取平方关系, 且由于介子填充正则表示而又要求电荷共轭不变, 则 (13) 式对介子简化为

$$m^2 = m_0^2 + m_1^2 \left(\frac{(Y + b + c)^2}{4} - cb - I(I + 1) \right) + m_2(c^2 + W) + m_3(b^2 + X). \tag{14}$$

(13)式中 W' , X' , X'' 对介子无贡献, 对重子一般有贡献, 介子和重子么旋波函数 (未混合前) 都是 W , X , W' , X' , X'' 的本征态. 它将 SU_3 , SU_4 , SU_5 区别开来. 如对 1^- 介子 W , X 的本征值为

	P	K^*	ϕ	ω	D^*	F^*	ϕ_c	H^*	I^*	R^*	ϕ_b
W	1	1	1	0	2	2	4	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	0
X	1	1	1	0	1	1	1	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$	5

W , X 的定义为 $W \equiv \frac{1}{2} (\lambda_i \lambda'_i + \lambda_j \lambda'_j)$, $i, j = 1, 2, 3$; $X \equiv \frac{1}{2} (\lambda_l \lambda'_l + \lambda_m \lambda'_m)$, $l, m = 1, 2, 3, 4$. (13), (14)式表明, 它不仅可获得 SU_3 , SU_4 的质量关系, 而且还会获得一些新的质量关系. 如果 6GeV 粒子被实验证实, 则可预言带新量子数 b 的粒子的质量为 $m_{H^*} = 4.36\text{GeV}$, $m_{I^*} = 4.38\text{GeV}$, $m_{R^*} = 4.85\text{GeV}$. (14)式与(11)式是相符的.

三、 ϕ_b 的 宽 度

从 SU_5 对称性的粒子分类给出许多带 b 荷的粒子, 且增加了一个新量子数 b 荷. 对强作用和电磁作用可假定 b 荷守恒. 这样在强作用和电磁作用过程中, 只能成对产生带 b 荷的粒子. 当然, 对 b 荷值为零的粒子如 ϕ_b , η_b , 在这种过程中可以单个产生. 前面已表明, ϕ_b 基本仅含 $n'\bar{n}'$ 的成分. 用 b 荷守恒和 Zweig 规则, 能解释 ϕ_b 的宽度很窄.

四、 ϕ_b 粒子的两种湮灭过程

1) $\phi_b \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$; 2) $\phi_b \rightarrow \pi\pi$, KK .

因 ϕ_b 粒子基本上含 $n'\bar{n}'$ 成份, 1), 2)两个过程只能通过 n' 和 $\bar{n}'$ 湮灭为虚光子再成对产生. 用层子模型理论^[1]和复合场论^[7]的成果讨论 1), 2)两个过程, 可估出如下的数值:

$$\Gamma_{\phi_b \rightarrow \pi\pi, KK} \approx \frac{1}{4} |F_{\pi\pi}(-m_{\phi_b}^2)|^2 T_{\phi_b \rightarrow 2l}.$$

从 $S = 3\text{GeV}^2$ 时实验值可知, π 介子形状因子 ≈ 0.02 . 估计它在 $S = 36\text{GeV}^2$ 时不会大于 0.02, 所以 $\Gamma_{\phi_b \rightarrow \pi\pi, KK}$ 比 $\Gamma_{\phi_b \rightarrow 2l}$ 小得多.

用 $\rho \rightarrow 2e$ 和 $J \rightarrow 2e$ 的实验值定出的零点波函数作为输入, 可得 $\Gamma_{\phi_b \rightarrow 2l}$ 的值, 见下表.

输 入	$ \phi_{\rho \rightarrow 2e}(0) ^2$	$ \sqrt{m_\rho} \phi_{\rho \rightarrow 2e}(0) ^2$	$ \phi_{J \rightarrow 2e}(0) ^2$	$ \sqrt{m_J} \phi_{J \rightarrow 2e}(0) ^2$
$\Gamma_{\phi_b \rightarrow 2l}$	1.4keV	0.2keV	3.7keV	1.8keV

凡是在 SU_4 理论中对 J/ψ 的所有讨论, 都可以用于 SU_5 理论中讨论 Υ 粒子 (或其它新发现的窄共振中性介子), 这有待于进一步的实验资料.

校后注 本文用在当时实验上还未肯定的 6 GeV 的粒子作为扩充到 SU_3 的一个假设的例子。现在看来 6 GeV 粒子几乎可以肯定是不存在了。但是,最近实验发现在 9.5 GeV¹⁾ 附近有新的共振,并仍取名为 γ 粒子。这个实验是比较可靠的。有的文献²⁾上推测它的衰变宽度是窄的。如果宽度是窄的这一点在实验上确能证明,那么我们就把它填在 SU_3 的矢量介子 24 维表示中的 ϕ_8 的位置。本文中的结论和公式均适用,只是遇到 6 GeV 的具体数值时改成 9.5 GeV 就可以了。

参 考 文 献

- [1] 1966 年北京暑期物理讨论会上北京基本粒子理论组的论文。
- [2] 吴济民、黄涛,科学通报, **20** (1975), 184。
- [3] CERN COURIER, **36** (3) (1976)。
- [4] 卞震、李综、梁疏,科学通报, **20** (1975), 35。
- [5] 杨振宁, 1976 年 4 月 16 日在北京的报告。
- [6] S. Okubo, *Prog. Theor. Phys.*, **27** (1962), 949。
- [7] 何祚庥、黄涛,物理学报, **23** (1974), 113; 264

NEW PARTICLES AND A POSSIBLE EXTENSION OF THE SYMMETRY OF THE STRATON MODEL THEORY — SU_3

LI TIE-ZHONG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

1) S. W. Herb *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **39** (1977), 252.
2) CERN COURIER, **17** (1977), 274.