

场流关系和新粒子的衰变宽度*

吴丹迪 李铁忠 张肇西 黄 涛 谢治成

(中国科学院高能物理研究所)

最近实验上发现了两个窄共振 J (或 ψ), ψ' 和一个宽共振 ψ'' :

$$\begin{aligned} \Gamma_J &= (69 \pm 15) \text{ keV}, \quad m_J = 3.095 \text{ GeV}^{[1]}; \\ \Gamma_{\psi'} &= 500 \text{ keV} \quad (200-800 \text{ keV})^{[2]}, \quad m_{\psi'} = 3684 \text{ GeV}; \\ \Gamma_{\psi''} &= 250-300 \text{ MeV}, \quad m_{\psi''} = 4.15 \text{ GeV}^{[3]}. \end{aligned} \quad (1)$$

如果假定层子满足 $SU(4)$ 对称性, 构成强子结构模型的一个可能方案^[4]为: J 是 $p'\bar{p}'$ 的束缚态, ψ' 和 ψ'' 是径向激发态. 早先发现的通常强子都是由 p, n, λ 构成的束缚态. 如果对层子图形引入某种近似的禁戒规则 (例如 Zweig 规则), 那么由 $p'\bar{p}'$ 构成的束缚态就不能衰变为通常的强子, 这就可能解释 J, ψ 为窄共振的事实. 但是, ψ'' 也是由 $p'\bar{p}'$ 构成的束缚态, 为什么又那么宽呢? 这只有设想存在新的带 C 荷的粒子, 它们是由 p' 和 p (或 n, λ) 构成的束缚态, 在 $SU(4)$ 方案里就是赝标介子 D, F 和矢量介子 D^*, F^* , 而且它们的质量满足下列不等式:

$$\frac{1}{2} m_{\psi'} \lesssim m_D, m_F < \frac{1}{2} m_{\psi''} \quad (2a)$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{2} m_{\psi'} \lesssim m_{D^*}, m_{F^*} < \frac{1}{2} m_{\psi''}. \quad (2b)$$

只要这两个不等式有一个成立, 则 ψ'' 就可以强衰变为这些带 C 荷的粒子对, ψ'' 为宽共振, 而 J, ψ' 仍保持为窄共振. (利用 $SU(4)$ 对称性所得到的质量公式给出 D, F 和 D^*, F^* 的质量大约是在 $2.1-2.3 \text{ GeV}$ 附近^[4], 其阈比 4.15 GeV 要高, 不满足 (2) 式, 但是如果采用文献 [4] 中的方法, 对介子取线性质量关系 D, F 和 D^*, F^* 的质量就可能在 $1.85-2.0 \text{ GeV}$ 范围内, (2) 式就可以得到满足) 这样, 就可以在 $SU(4)$ 对称性方案里, 对 J, ψ', ψ'' 统一地加以探讨.

按照上述观点, 对于 J, ψ', ψ'' 来讲, 可能存在如下一些过程:

1) 二级电磁衰变

$$J, \psi', \psi'' \rightarrow \gamma \rightarrow e^+e^- \quad (\mu^+\mu^-, \text{强子等等}); \quad (3a)$$

2) 辐射衰变

$$J, \psi', \psi'' \rightarrow \eta_c + \gamma \text{ 等等}; \quad (3b)$$

3) 强衰变

$$\psi' \rightarrow J + \text{强子}, \quad (3c)$$

$$\psi'' \rightarrow J (\text{或 } \psi') + \text{强子}, \quad (3d)$$

$$\psi'' \rightarrow 2D (\text{或 } 2F, 2D^*, 2F^*, DD^*, FF^* \dots), \quad (3e)$$

* 1975 年 8 月 4 日收到.

其中“强子”指通常的强子,可以是数个不同的强子. η_c 是由 $p'\bar{p}'$ 构成的赝标介子束缚态, 如果 J, ϕ', ϕ'' 中还混有少量的 p, n, λ 成分, 在 (3b) 式中还有 $J, \phi', \phi'' \rightarrow$ 强子 + γ 这一类过程, 由于混入的成分对物理质量值的选取十分敏感, 因而难于得到混合成分的可靠的定量结论. 这里暂且假设 J, ϕ', ϕ'', η_c 都是纯粹的 $p'\bar{p}'$ 态. 对于 (3a) 式这一类过程已有文章作了讨论^[4]. 本文将主要讨论辐射衰变和强衰变的各种过程.

从文献 [5] 知, 对于任意的两个态 $|\alpha\rangle, |\beta\rangle$, 存在一系列弱形式的场流关系式, 例如:

$$\langle\beta|\phi_\mu^J(x)|\alpha\rangle = \frac{1}{4g_1^J(0)} \langle\beta|\bar{\psi}_{p'}(x)\gamma_\mu\psi_{p'}(x)|\alpha\rangle \quad \text{当 } (p_\alpha - p_\beta)^2 + m_J^2 = 0, \quad (4a)$$

$$\langle\beta|\phi_\mu^{\psi'}(x)|\alpha\rangle = \frac{1}{4g_1^{\psi'}(0)} \langle\beta|\bar{\psi}_{p'}(x)\gamma_\mu\psi_{p'}(x)|\alpha\rangle \quad \text{当 } (p_\alpha - p_\beta)^2 + m_{\psi'}^2 = 0, \quad (4b)$$

$$\langle\beta|\phi_\mu^{\psi''}(x)|\alpha\rangle = \frac{1}{4g_1^{\psi''}(0)} \langle\beta|\bar{\psi}_{p'}(x)\gamma_\mu\psi_{p'}(x)|\alpha\rangle \quad \text{当 } (p_\alpha - p_\beta)^2 + m_{\psi''}^2 = 0, \quad (4c)$$

$$\langle\beta|\phi^{\text{D}^+}(x)|\alpha\rangle = \frac{i}{4m_{\text{D}^+}f_2^{\text{D}^+}(0)} \frac{\partial}{\partial x_\mu} \langle\beta|\bar{\psi}_{p'}(x)\gamma_\mu\gamma_5\psi_n(x)|\alpha\rangle \quad \text{当 } (p_\alpha - p_\beta)^2 + m_{\text{D}^+}^2 = 0, \quad (4d)$$

$$\langle\beta|\phi^{\text{D}^0}(x)|\alpha\rangle = \frac{i}{4m_{\text{D}^0}f_2^{\text{D}^0}(0)} \frac{\partial}{\partial x_\mu} \langle\beta|\bar{\psi}_{p'}(x)\gamma_\mu\gamma_5\psi_p(x)|\alpha\rangle \quad \text{当 } (p_\alpha - p_\beta)^2 + m_{\text{D}^0}^2 = 0, \quad (4e)$$

$$\langle\beta|\phi^{\text{F}}(x)|\alpha\rangle = \frac{i}{4m_{\text{F}}f_2^{\text{F}}(0)} \frac{\partial}{\partial x_\mu} \langle\beta|\bar{\psi}_{p'}(x)\gamma_\mu\gamma_5\psi_\lambda(x)|\alpha\rangle \quad \text{当 } (p_\alpha - p_\beta)^2 + m_{\text{F}}^2 = 0, \quad (4f)$$

$$4m_{\eta_c}f_2^{\eta_c}(0)\langle\beta|\phi^{\eta_c}(x)|\alpha\rangle = i \frac{\partial}{\partial x_\mu} \langle\beta|\bar{\psi}_{p'}(x)\gamma_\mu\gamma_5\psi_{p'}(x)|\alpha\rangle + \frac{\alpha}{4\pi} S\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \langle\beta|F_{\mu\nu}(x)F_{\rho\sigma}(x)|\alpha\rangle \quad \text{当 } (p_\alpha - p_\beta)^2 + m_{\eta_c}^2 = 0, \quad (4g)$$

其中 $\phi_i(x)$ ($i = p', p, n, \lambda$) 是第 i 个层子的场量, $g_i^J(0)$ 和 $f_i^J(0)$ 分别是相应粒子的与 B-S 方程零点波函数有关的函数, (4g) 式表明考虑了 Adler^[6] 反常项, 从 (4) 式可以见到, 未知的量就是所有这些粒子的零点波函数值, 对于 J, ϕ', ϕ'' 可以利用实验值

$$\Gamma_{J \rightarrow \text{ee}} = 4.8 \text{ keV}^{[1]}, \quad (5a)$$

$$\Gamma_{\psi' \rightarrow \text{ee}} = 2.5 \text{ keV}^{[2]}, \quad (5b)$$

$$\Gamma_{\psi'' \rightarrow \text{ee}} = 8.5 \text{ keV}^{[7]} \quad (5c)$$

定出其数值为

$$|g_1^J(0)|^2 = 90.6 \times 10^9 \text{ MeV}^4, \quad (6a)$$

$$|g_1^{\psi'}(0)|^2 = 79.4 \times 10^9 \text{ MeV}^4, \quad (6b)$$

$$|g_1^{\psi''}(0)|^2 = 378.1 \times 10^9 \text{ MeV}^4. \quad (6c)$$

利用低能定理解析延拓就可以得到

$$\langle 2\pi J | \psi'' \rangle = \frac{m_J^2}{m_{\psi'}^2} \frac{g_1^{\psi''}(0)}{g_1^J(0)} \langle 2\pi \psi' | \psi'' \rangle, \quad (7a)$$

$$= \frac{m_{\psi''}^2}{m_{\psi'}^2} \frac{g_1^{\psi''}(0)}{g_1^{\psi''}(0)} \langle 2\pi J | \psi' \rangle. \quad (7b)$$

(7) 式意味着对于不同的过程, 假定一个解析延拓的办法. 从实验上知道

$$\frac{\Gamma(\phi' \rightarrow J + \pi^+ + \pi^-)}{\Gamma_{\phi'}} = 0.32 \pm 0.04^{[8]}, \quad (8)$$

如果取(1)和(8)式的结果,估计实验上给出

$$\Gamma_{\phi' \rightarrow J+2\pi} \simeq 240 \text{ keV}, \quad (9)$$

即 $\Gamma_{\phi' \rightarrow J+2\pi}$ 占 ϕ' 的总宽度 $\Gamma_{\phi'}$ 的 48%. 这样从(9)和(7)式可得到

$$\begin{aligned} \Gamma_{\phi'' \rightarrow J+2\pi} &\simeq 0.6 \text{ MeV}, \\ \Gamma_{\phi'' \rightarrow \phi' + 2\pi} &\simeq 40 \text{ keV}. \end{aligned} \quad (10)$$

若取等效哈密顿量

$$\mathcal{H}_i(x) = g G'_{\mu\nu}(x) G_{\mu\nu}(x) \varphi_\pi(x) \varphi_\pi(x), \quad (11)$$

(9)式意味着

$$\begin{aligned} \frac{g^2}{4\pi} &\simeq 5.6 \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-4} \\ &\simeq 0.73 m_J^{-2} m_{\phi'}^{-2}. \end{aligned} \quad (12)$$

顺便指出,若利用光生的实验结果^[9]

$$\sigma(\gamma + \text{Be} \rightarrow J + X) = (16 \pm 5) \text{ nb}, \quad (13)$$

$\downarrow$
 $\mu\mu$

利用弱形式下场流关系式以及 π -P 碰撞总截面和 P-P 碰撞总截面的比约为 2:3 的关系,可以估计 $\pi\phi' \rightarrow \pi J$ 的截面,再通过交叉对称性可以估计出 $\phi' \rightarrow J + 2\pi$ 过程的几率是 208 keV,这与(9)式很相近.

用类似的方法,利用(9)式的宽度值可以估计出 $J \rightarrow 2\pi\gamma$, $\phi' \rightarrow 2\pi\gamma$, $\phi'' \rightarrow 2\pi\gamma$ 这类过程的宽度大约是 1—10 keV.

对于(3e)式这一类过程,我们假设(2)式中两个不等式至少有一个成立,例如(2a)不等式成立,以 $\phi'' \rightarrow D^+ D^-$ 为例,利用弱形式下的 PCAC,类似于文献[10]中的方法就可以得到

$$\Gamma_{\phi'' \rightarrow D^+ D^-} = \frac{1}{384\pi} \left(1 - \frac{4m_D^2}{m_{\phi''}^2}\right)^{3/2} m_{\phi''} \left(\frac{m_D^2 g_1^{\phi''}(0)}{2|f_2^D(0)|^2}\right)^2. \quad (14a)$$

如果假设 $\frac{g_1^{\phi''}(0)}{f_2^D(0)} = \frac{m_{\phi''}}{m_D}$, 那么(14a)式就变成:

$$\Gamma_{\phi'' \rightarrow D^+ D^-} = \frac{1}{384\pi} \left(1 - \frac{4m_D^2}{m_{\phi''}^2}\right)^{3/2} m_{\phi''} \left(\frac{m_{\phi''}^2}{2g_1^{\phi''}(0)}\right)^2. \quad (14b)$$

利用(6c)式给出的 $g_1^{\phi''}(0)$ 值可以得到(取 $m_D = 1.85 \text{ GeV}$)

$$\Gamma_{\phi'' \rightarrow D^+ D^-} \simeq 76 \text{ MeV}. \quad (15)$$

按照此方法可得到

$$\begin{aligned} \Gamma_{\phi'' \rightarrow D^0 \bar{D}^0} &= \Gamma_{\phi'' \rightarrow D^+ D^-}, \\ \Gamma_{\phi'' \rightarrow F^0 \bar{F}^0} &\simeq \Gamma_{\phi'' \rightarrow D^+ D^-}. \end{aligned} \quad (16)$$

对于(3b)式过程的估计如下:

如果取 $m_{\eta_c} \simeq m_J$, 且假设 $f_2^{\eta_c}(0) \simeq g_1^J(0)$, 那么由(4g)式利用低能定理,就可以得到

$$\begin{aligned} \Gamma_{\eta_c \rightarrow \gamma\gamma} &\simeq \frac{\alpha^2}{144\pi^3} m_{\eta_c}^5 |f_2^{\eta_c}(0)|^{-2} \\ &\simeq 33.1 \text{ keV} \quad \text{当取 } m_{\eta_c} = 3 \text{ GeV}. \end{aligned} \quad (17)$$

利用弱形式 V. D. M, 可以得到与(7)式完全类似的关系:

$$\langle J | \eta_c \gamma \rangle : \langle \phi' | \eta_c \gamma \rangle : \langle \phi'' | \eta_c \gamma \rangle = \frac{m_J^2}{g_1^J(0)} : \frac{m_{\phi'}^2}{g_1^{\phi'}(0)} : \frac{m_{\phi''}^2}{g_1^{\phi''}(0)}. \quad (18)$$

这样就可以得到

$$\Gamma_{V_c \rightarrow \eta_c + \gamma} = \frac{1}{48\pi\alpha} \frac{m_{V_c}^4}{|g_1^{V_c}(0)|^2} \left(\frac{m_{V_c}^2 - m_{\eta_c}^2}{2m_{V_c}m_{\eta_c}} \right)^3 \Gamma_{\eta_c \rightarrow \gamma \gamma}, \quad (19)$$

其数值列表如下:

m_{η_c}	$J \rightarrow \eta_c + \gamma$	$\phi' \rightarrow \eta_c + \gamma$	$\phi'' \rightarrow \eta_c + \gamma$
3.0 GeV	0.93 keV	781 keV	830 keV
3.2 GeV	禁戒	327 keV	568 keV

从上表可以见到, 实验上 ϕ' 是窄共振 ($\simeq 500$ keV), 就要求 $m_{\eta_c} > 3.2$ GeV, 否则 $\phi' \rightarrow \eta_c + \gamma$ 将具有较大的分枝比, 这是和目前实验结果不一致的. 这是 $SU(4)$ 模型的一个严重的困难. 这也预示着两种可能性: 一种是 $SU(4)$ 方案解释 J, ϕ', ϕ'' 新粒子需要寻找新的图像, 很可能 J, ϕ', ϕ'' 是属于一个与通常强子不同的新族; 另一种可能是 η_c 粒子的质量比通常所想象的要高得多.

本文从 $SU(4)$ 对称性出发, 利用弱形式的场流关系式和低能定理对 J, ϕ', ϕ'' 进行了某些分析, 如果本文的分析正确, 那么就对 η_c, D, F 这些粒子的质量范围有一个要求, 这有待实验上的检验. 当然, 本文对 J, ϕ', ϕ'' 这样高质量的粒子采用低能定理是否是一个好的近似, 是值得讨论的问题.

参 考 文 献

- [1] A. M. Boyarski *et al.*, *Phys. Rev. Letters*, **34** (1975), 1357.
- [2] Frederick J. Gilman, SLAC-Pub-1537.
- [3] J. E. Augustin *et al.*, *Phys. Rev. Letters*, **34** (1975), 764.
- [4] 吴济民、黄涛, 科学通报, **20** (1975), 184.
- [5] 何祚庥、黄涛, 科学通报, **21** (1976), 30.
- [6] S. Adler, *Lectures on Elementary Particles and Quantum Field Theory* (1970), Braudeis University Summer Institute in Theoretical Physics, Vol. 1.
- [7] 高崇寿, 在北京基本粒子讨论班上对 ϕ'' 粒子实验分析的报告.
- [8] G. S. Abrams *et al.*, *Phys. Rev. Letters*, **34** (1975), 1181.
- [9] B. Knapp *et al.*, *Phys. Rev. Letters*, **34** (1975), 1040.
- [10] K. Kawarabayashi, M. Suzuki, *Phys. Rev. Letters*, **34** (1966), 255.

FIELD-CURRENT RELATIONS AND SOME DECAY WIDTHS OF THE NEW PARTICLES

WU DAN-DI, LI TIE-ZHONG, ZHANG ZHAO-XI, HUANG TAO, XIE YI-CHENG
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)