

新粒子的电磁衰变过程与层子的性质* 1)

王晓光 李毓林 赵佩英 程希有

(中国科学院高能物理研究所)

自从 1974 年底发现了新粒子 J/ψ 以来, 许多实验结果展示了新粒子的许多独特的性质. 例如质量大, 衰变宽度窄. 新粒子数目不断增加: $J/\psi, \psi', \psi'', \psi''', \chi(3415), \chi(3510), \chi(3550)$. 各种衰变道的分支比逐渐确定^[1]. 所有这些结果对于深入探讨基本粒子的内部结构以及层子的性质都是很重要的. 组成新粒子的层子是什么? 它们具有一些什么性质? 它们之间是如何结合构成新粒子的粒子谱? 它们与构成普通强子的层子有什么关系? 等等. 本文试图从新粒子的电磁衰变宽度入手, 对上述问题进行初步的探讨.

按照层子模型的观点^[2], 新粒子也是有内部结构的, 它们也是由层子构成的. 从理论上讲, 有一个最简单的、也是探讨得最多的方案, 假设组成新粒子的层子与组成普通强子的层子在一起构成近似 $SU(4)$ 对称性的四个基, 这第四个层子具有新量子数 C ^[3], 新粒子 $J/\psi, \psi', \psi'', \psi'''$ 则是 C 和 \bar{C} 的束缚态. 在这个方案里, ψ', ψ'', ψ''' 则被解释为 J/ψ 的径向激发态, 而 $\chi(3415), \chi(3510)$ 和 $\chi(3550)$ 则被解释为 $(C\bar{C})$ 的 P 波态, J^{PC} 分别为 $0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$. 这个方案对于解释新粒子的许多性质还存在一些原则性的困难, 这里不作全面的分析, 仅就新粒子的电磁衰变宽度作一些讨论.

一、新粒子电磁衰变过程的特点

新粒子的电磁衰变过程有三类:

1. $J, \psi(3684), \psi(4100), \psi(4400)$ 衰变到轻子对的宽度随着质量增加而减小^[1],

$$\begin{aligned}\Gamma_{J/\psi \rightarrow ee} &= (4.8 \pm 0.6) \text{ keV}; \\ \Gamma_{\psi(3684) \rightarrow ee} &= (2.1 \pm 0.3) \text{ keV}; \\ \Gamma_{\psi(4100) \rightarrow ee} &\lesssim 2 \text{ keV}; \\ \Gamma_{\psi(4400) \rightarrow ee} &= (0.44 \pm 0.14) \text{ keV}.\end{aligned}\tag{1}$$

2. $\psi(3684)$ 的一级电跃迁宽度较小, 由于 ψ' 的总宽度窄, 其分支比并不小. $\psi(3684)$ 的总宽度 $\Gamma_{\psi} = (228 \pm 56) \text{ keV}$, 而其电跃迁的分支比为^[1]

$$\begin{aligned}B(\psi' \rightarrow \chi(3415)\gamma) &= (10 \pm 4)\%; \\ B(\psi' \rightarrow \chi(3510)\gamma) &= (9 \pm 3)\%; \\ B(\psi' \rightarrow \chi(3550)\gamma) &= (8 \pm 3)\%.\end{aligned}\tag{2}$$

3. 新粒子的磁跃迁宽度很小, 如果 $X(2800)$ 存在, 实验上给出分支比为^[1]

* 1977 年 1 月 10 日收到.

1) 本工作是在朱洪元、黄涛同志的直接帮助下完成的.

$$\begin{aligned} B(J \rightarrow X(2800)\gamma) &< 3.0\%; \\ B(\psi' \rightarrow X(2800)\gamma) &< 1.1\%. \end{aligned} \quad (3)$$

对于第一类过程,从理论上讲与零点波函数 $|\psi(0)|^2$ 成正比,其衰变宽度为^[2]

$$\Gamma_{\text{电}} = \frac{16\pi}{3} \alpha^2 \beta \frac{1}{m^2} |\psi(0)|^2 \left(1 + K \frac{m}{2m_p}\right)^2, \quad (4)$$

其中 $\beta = |\text{Sp}(Q\mathcal{A})|^2$, Q 是电荷算符, \mathcal{A} 是么旋波函数, m 是矢量粒子的质量, K 是层子的反常磁矩. 对于电跃迁过程,这里引用原子的一级电跃迁公式:

$$\Gamma_{\text{电}} = \frac{4}{3} \alpha A B k^3 |\mathbf{r}|^2, \quad (5)$$

其中 A 是层子的电荷的平方, B 是由 χ 粒子不同自旋态的权重决定的因子, k 是光子的动量. 对于磁跃迁过程^[2]:

$$\Gamma_{\text{磁}} = \frac{\alpha}{24} \frac{m^2}{m_i} \left[1 - \left(\frac{m_i}{m}\right)^2\right]^3 \left[1 + \frac{K}{2m_p} (m_i + m)\right]^2 I^2, \quad (6)$$

其中 m_i 是赝标介子的质量, I 是初终态波函数的重迭积分.

显然要想准确地计算这些过程的理论值,必须对层子间的相互作用力作出假定,它们很强烈地依赖于层子间的相互作用力. 因此,实验上给出新粒子电磁衰变过程的这些特点对于我们检验 $SU(4)$ 模型,探讨层子间的相互作用力及层子的其它性质是很重要的.

二、谐振子势、库仑势、线性势

大家知道,对于普通强子的许多问题,如果假定层子间的相互作用力是谐振子位阱,这是比较好的近似,比如 ρ 介子也有它的激发态 ρ' , ρ 和 ρ' 衰变为轻子对的实验结果^[4]也有利于谐振子势,因为谐振子势的第一径向激发态的零点波函数与基态零点波函数之比为

$$\frac{|\psi_1(0)|^2}{|\psi(0)|^2} = \frac{3}{2} \quad (\text{对于谐振子势}). \quad (7)$$

如果利用(4)式,其结果与实验大致相符合(取 $K=0$). 很自然地设想对于组成新粒子的层子间的相互作用力也是谐振子势,由(7)式和 $\Gamma_{J \rightarrow ee}$ 实验值给出的 $\Gamma_{\psi(3684) \rightarrow ee}$ 值将比实验大很多,即使层子无反常磁矩, $\Gamma_{\psi(3684) \rightarrow ee}^{\text{电}} = 5.1 \text{ keV}$, 显然也是不合理的. 其实,从实验结果(1)可知,实验上预示径向激发态的零点波函数应该越来越小,这只有两种方案可以达到:一种是修改相互作用势,另一种是认为仍是谐振子势,但 S 波与 D 波混合,如 $\psi(3684)$ 态就是 S 波与 D 波的混合,按照后一种观点,当然可以使得 $\Gamma_{\psi(3684) \rightarrow ee}^{\text{电}}$ 值与实验值一致,但是混合后的另一个态衰变为轻子对的宽度,即使层子无反常磁矩时,也将有 3 keV , 而这个态实验上并没有发现. 如果假定由于新粒子内部存在某种张量力,使这个态分裂而被包含在 $\psi(4100)$ 之中,然而 3 keV 的宽度值也太大了. 另外,根据谐振子势算能级,以 J 和 $\psi(3684)$ 作输入,能比较好的与 $\psi(4100)$ 相合,但下一个激发态将是 4.6 GeV , 比实验上发现的 $\psi(4400)$ 大. 所以如果假定新粒子的结合力是谐振子势,与实验事实是相违背的.

这样,我们只有寻找另外的方案,假定相互作用力是其它形式的势. 为了使零点波函数在高激发态时越来越小,一个最简单的势是库仑势,在库仑势情况下,

$$\frac{|\psi_1(0)|^2}{|\psi(0)|^2} = \frac{1}{8} \quad (\text{对于库仑势}), \quad (8)$$

这显然又太小了,而且能级也不对.看来组成新粒子的层子间相互作用力是介于谐振子势和库仑势之间,本文取线性势作为尝试.

取线性势的形式为

$$V(r) = \alpha + \beta r. \quad (9)$$

由薛定谔方程写出其径向部分为(取 $l = 0$ 只考虑 S 波)

$$\frac{d^2 \rho(\xi)}{d\xi^2} - \xi \rho(\xi) = 0, \quad (10)$$

其中

$$\xi = r h^{\frac{1}{2}} - k^2 h^{-\frac{3}{2}}, \quad h = 2\mu \hbar^{-2} \beta, \quad k^2 = 2\mu \hbar^{-2} (E - \alpha), \quad \rho(r) = r R(r),$$

$R(r)$ 是径向波函数. 方程(10)的解是 Airy 函数

$$\rho(\xi) = B A_i(\xi), \quad (11)$$

其中 B 是归一化系数,在 $r = 0$ 处, Airy 函数有一系列的零点,可以由这一系列的零点值定出线性势下相应的一系列的能级

$$m^2 = m_0^2 - r \xi_0, \quad (12)$$

其中 ξ_0 就是 Airy 函数的一系列零点,由这些零点值和 J/ψ , $\psi(3684)$ 的质量作输入就可以得到一系列激发态的能级(见表 1).

表 1

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m (MeV)	3095 (输入)	3684 (输入)	4102	4438	4725	4977	5204	5411	5602	5780

这个结果可以较好地给出 $\psi(4400)$ 态,这在谐振子势情况下是得不到的.

对于线性势情况利用 Airy 函数的性质,经过归一化的计算,就可以获得所有 S 波的激发态与基态零点波函数相等,即

$$\psi_i(0) = \psi(0) \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (13)$$

那么以 $\Gamma_{J \rightarrow ee} = 4.8 \text{ keV}$ 作输入,利用(4)和(13)式就可以获得

$$\begin{aligned} \Gamma_{\psi(3684) \rightarrow ee} &= 3.4 \text{ keV} \quad (K = 0), \\ \Gamma_{\psi(3684) \rightarrow ee} &= 4.4 \text{ keV} \quad (K = 1.793). \end{aligned} \quad (14)$$

可见此值仍比实验值大.这时如果考虑 S 波和 D 波混合可以使得 $\Gamma_{\psi(3684) \rightarrow ee}$ 与实验结果相合,且另一个态的宽度在 $K = 0$ 的情况下只有 1.35 keV ,如果由于新粒子内部存在某种张量力分裂使这个态推到 4.1 GeV 附近,似乎可以解决这一矛盾.然而由于 $\psi(4100)$ 本身还贡献 2.7 keV 的宽度,两者相加仍大于实验值很多.对于 $\psi(4400)$ 理论上的结果是 2.4 keV ,也比实验值大得多.因此,线性势仍不能给出与实验相符合的结果.

综上所述,从新粒子衰变为轻子对的实验结果来看,要想获得与实验值相符合的结果,组成新粒子的层子间相互作用似应介于线性势和库仑势之间.

三、新粒子的电跃迁和磁跃迁

目前实验上发现的 P 波态有三个 $\chi(3415)$, $\chi(3510)$, $\chi(3550)$. 如果假定 $SU(4)$ 方案, (5) 式中的 $A = \frac{4}{9}$, 对于 0^{++} , 1^{++} , 2^{++} 态, $B = \frac{1}{9}, \frac{3}{9}, \frac{5}{9}$, 利用谐振子的 S 波和 P 波波函数算出矩阵元 $|\mathbf{r}|^2$, 从而给出在静止系中的公式

$$\Gamma_{\psi(3684) \rightarrow \chi\gamma} = \frac{16}{27} B \alpha \left(\frac{m_{\psi'}^2 - m_{\chi}^2}{2m_{\psi'}} \right)^3 \sqrt{\frac{9}{4}} \cdot \frac{1}{\pi |\phi_{\psi'}(0)|^{4/3}} \quad (15)$$

其中 m_{χ} 是 P 波态 χ 的质量, $\phi_{\psi'}(0)$ 是 ψ' 粒子的零点波函数, 若以 $\Gamma_{\psi' \rightarrow 2e}$ 的实验值定出 $\phi_{\psi'}(0)$ 作为输入, 就可以计算出 $\psi(3684)$ 衰变到 P 波三个态的宽度值, 考虑到 $\Gamma_{\psi'}^0 = 228$ keV, 那么由 (15) 式给出的理论值见表 2 (这里取无反常磁矩时的 $\phi_{\psi'}(0)$ 值作输入).

表 2

χ	$\chi(3415)$	$\chi(3510)$	$\chi(3550)$
$\Gamma_{\psi' \rightarrow \chi\gamma}$	4.28 keV	37 keV	26.5 keV
分支比	18.9%	16.3%	11.7%

考虑到推导得 (5) 式所用的近似所导致的误差, 这些结果与实验值 (2) 相差不远. 如果用库仑势的波函数来进行计算, 得到的结果要比谐振子势的结果大 7.5 倍, 这与实验值相差太多了. 估计线性势处于两者之间, 比谐振子势偏大, 与实验值相差也较大.

由于相对论层子模型对于电跃迁的计算方法还没有可靠的公式, 这里沿用了原子跃迁公式又利用量子力学三维位阱来估计, 其可靠程度目前还难于估计, 不过从定性上来看, 库仑势是不可能的, 谐振子势较为接近, 线性势要比谐振子势差一些.

对于磁跃迁, 如果 $X(2800)$ 态存在, 由于 $X(2800)$ 质量与 J 较为接近, 可以假定 $I \approx 1$, 由 (6) 式就可以估计 $J \rightarrow X(2800)\gamma$ 过程的宽度值,

$$\begin{aligned} \Gamma_{J \rightarrow \chi\gamma} &= 12 \text{ keV} \quad K = 0, \\ \Gamma_{J \rightarrow \chi\gamma} &= 530 \text{ keV} \quad K = 1.793. \end{aligned}$$

可以见到, $K = 0$ 时比实验结果的上限大六倍; 当 $K = 1.793$ 时, 宽度值更猛增, 看来目前的实验结果倾向于认为 C 层子无反常磁矩. 但即使 $K = 0$, 实验结果也难于理解.

四、讨 论

本文以新粒子的电磁衰变的实验结果探讨了 $SU(4)$ 模型中新粒子的内部结构 (例如对层子间的相互作用和层子的性质作了某些定性的讨论), 提出了一些有意义的问题, 例如

(1) 组成普通强子的层子间的结合力与组成新粒子的层子间的结合力可能不同.

(2) 组成新粒子的层子间的结合力可能是介于谐振子势和库仑势之间, 本文还讨论了一种可能的位势-线性势, 并从能级, $\Gamma_{\psi \rightarrow ee}$, 一级电跃迁, 磁跃迁的实验结果作了初步的分析. 从能级来看, 线性势较好; 从新粒子衰变为轻子对的宽度比来看, 线性势也有困难, 似应介于线性势和库仑势之间; 从一级电跃迁的实验结果看, 谐振子势与实验值较为接

近, 线性势较差, 库仑势更差. 因此 $SU(4)$ 模型是否合理, 在 $SU(4)$ 模型中组成新粒子的层子间到底通过什么相互作用结合在一起, 还有待进一步的研究.

(3) 组成新粒子的层子的反常磁矩很小, 或者无反常磁矩.

本文用了近似的 $SU(4)$ 对称性, 但是本文的结论对此并不依赖. 只要人们将 $\psi(3684)$, $\psi(4100)$, $\psi(4400)$ 看作 J 粒子的径向激发态, 文中的讨论仍适用.

本文所用的计算方法还是不够准确的, 特别是用了非相对论位势的概念来分析上述问题, 因此从定量上来讲并不完全可靠, 根据目前的实验结果, 改进计算方法来深入探讨层子间的相互作用力是有意义的问题.

参 考 文 献

- [1] G. J. Feldman, Lectures Presented at the SLAC 1976 Summer institute on particle physics.
- [2] 1966 年北京暑期物理讨论会上北京基本粒子理论组的论文.
- [3] 吴济民、黄涛, 科学通报, **20** (1975), 184.
- [4] Allert Silverman, Proceedings of the 1975 International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies. Page 355.

ELECTROMAGNETIC DECAY OF NEW PARTICLES AND THE PROPERTIES OF STRATONS

WANG XIAO-GUANG LI XIAO-LIN ZHAO PEI-YING CHENG XI-YOU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)