

新 粒 子

朱 重 远

(中国科学院物理研究所)

一九七四年十一月,有两个高能物理实验组宣布发现了一个质量约为 3.1Gev ,寿命约为 10^{-20} 秒的粒子。我们知道,以前已发现的质量为 $2-3\text{Gev}$ 的粒子,寿命一般为 $10^{-23}-10^{-24}$ 秒。可是,这个粒子,质量虽然大到 3.1Gev ,寿命却仍相当长。因此,这个发现成了高能物理中的一件重要的事。

其实,事情可以追溯到一九七〇年。当时,在BNL的一个实验组,在研究 $[P + Be \rightarrow (\mu^+ \mu^-) + \text{任何粒子}]^{(1)}$ 时,发现 $(\mu^+ \mu^-)$ 对的不变质量分布在 $3-4\text{Gev}$ 区域有一个“肩”。但由于实验分辨率差,没有能够看出它是一个共振。以后,到一九七四年春天,丁肇中组开始在BNL探测反应 $[P + Be \rightarrow (e^+ e^-) + \text{任何粒子}]$,由于此反应截面小,所以实验相当难。他们化了很多力量使仪器的能量分辨率比七〇年的实验好得多,结果到七四年八月,已经清楚地看到, $(e^+ e^-)$ 对的不变质量分布在 3.1Gev 处有一个峰,宽度与仪器的分辨率一致,而且没有连续分布的背景。以后几个月,他们又进一步做各种试验,到十月底,已完全肯定了八月的结果,他们在十一月宣布了这个结果,并把这个粒子称之为 $J^{(2)(3)}$ 。

另一方面,在SLAC e^+e^- 对撞机SPEAR上工作的Richter组,在以 200Mev 为步长测 e^+e^- 对撞产生强子的总截面时,发现在 3.2Gev 处截面高出周围约30%,于是他们重复地在 $3.1, 3.2, 3.3\text{Gev}$ 处测量截面,发现 3.2Gev 处截面仍高, 3.1Gev 处一会高一会不高, 3.3Gev 处则不高,由此他们怀疑可能有窄共振。接着,他们重新改装了仪器,使得测对撞束相对能量的精度达0.01%。从11月9日开始测量,到10日已经肯定截面在 3.1 附近有大幅度增加。他们把这个粒子叫做 $\Psi(3.1)$ 。(以后,我们称这个粒子为 $J(3.1)$,把 Ψ 的名字留给后来发现的粒子)。

意大利Frascati的 e^+e^- 对撞机ADONE,原来能量只有 3.0Gev 。在听到二个

● 本文是1975年11月在中山大学基本粒子讨论会上的报告,1975年12月作了部分补充。1976年6月本文付印期间,作者收到文(77)。附表的数据根据该文的新结果作了改动,但正文的叙述没有修改。

组发现新粒子的消息后，他们马上把加速器能量提高到3.1Gev。几天后，他们也看到了这个共振。

在 $J(3.1)$ 发现后不到二周，在SPEAR，又发现了第二个质量为3.7Gev的窄共振，它被称为 $\Psi(3.7)$ 。

这两个新粒子的发现，大大地促进了人们去寻找新粒子和研究新粒子的性质。

在这个报告中，我们主要是把所看到的实验资料（包括丁肇中教授在北京的报告）综合一下，同时也根据在北京的中国科学院高能物理所、北京大学及中国科学院物理所同志们的集体工作^{〔6〕-〔8〕}作一些分析。也有一部分分析是国外的及准备这次报告时作的。

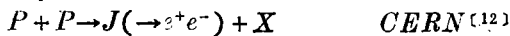
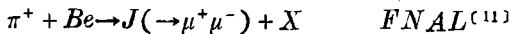
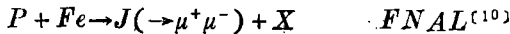
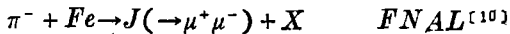
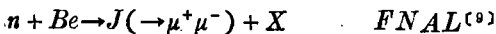
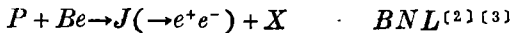
§1 已经发现了那些新粒子？还有那些实验表明可能有新粒子？

一、 $J(3.1)$ 粒子：

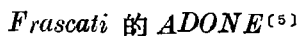
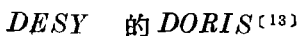
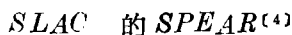
这个最先由BNL和SLAC发现的粒子，已经在多个实验室的多种反应中观察到，事例数很多。所以，它毫无疑问是存在的。

观察到 J 的实验有：

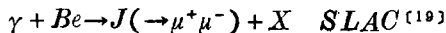
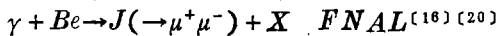
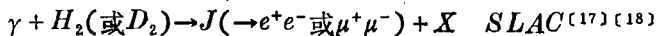
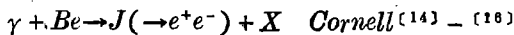
1、强子碰撞：



2、 e^+e^- 对撞实验：



3、光生实验：



二、 $\Psi(3.7)$ 粒子：

这个在SPEAR首先发现的粒子，现在也已在多个实验室的多种反应中观察到，事例数也很多。它也毫无疑问地是存在的。

观察到 $\Psi(3.7)$ 的实验有：

1、 e^+e^- 对撞实验：

SLAC的SPEAR⁽²¹⁾

DESY的DORIS⁽²²⁾

2、强子碰撞实验:

$P + P \rightarrow \Psi(3.7) (\rightarrow e^+e^-) + X$ CERN⁽¹²⁾

这个实验中有二个事例可看作 $\Psi(3.7)$ 产生,但不能作肯定的结论。

3、光生实验:

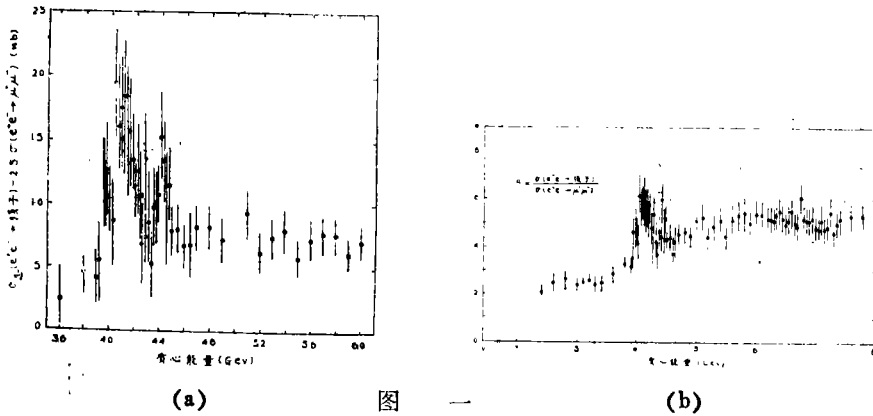
$\gamma + D_2 \rightarrow \Psi(3.7) (\rightarrow \mu^+\mu^- \text{或} e^+e^-) + X$ SLAC⁽¹⁸⁾

$\gamma + Be \rightarrow \Psi(3.7) + X$ FNAL⁽¹⁶⁾ [54]

三、 $\Psi(4.1)$ 及 $\Psi(4.4)$ 粒子:

SLAC在测量 e^+e^- 对撞产生强子的总截面以及 $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ 随能量的变化时,发现在质心能量为4.1Gev的区域有复杂的结构。早些时候曾说过可能是一个峰^[23],后来测量的点子更多了,发现可能是二个宽峰^{[24][25]}而且 $\Psi(4.1)$ 比 $\Psi(4.4)$ 要宽。(见图一)

顺便提一下,从图一可见,R可以分三个区域:(一)质心能量 ≤ 3.5 Gev时,R是介于2和3之间的常数。(二)质心能量 ≥ 5 Gev时R是一个比5稍大一点的常数。(三)在4.1Gev区域有结构。



在几个对撞机上,还继续寻找过窄共振。他们分别探索的能量范围是:

Nocosibirsk⁽²⁵⁾, 0.770—1.340 Gev

ADONE, ⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾ 1.910—2.545 Gev

2.970—3.090 Gev

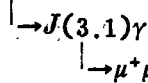
SPEAR, ^{(29)[30]} 3.2—7.6 Gev

结果都没有发现除 $J(3.1)$ 及 $\Psi(3.7)$ 以外的窄共振。

四、 $\Psi(3.7)$ 辐射衰变中看到新态:

1、DESY, (81)-(86)

a) 观察 $\Psi(3.7) \rightarrow P_0 \gamma$

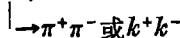


扣除背景后留下九个事例。由于两个终态光子能量有集中到某几组值的成团性，因此推测有新的中间态粒子存在。成团事例的光子能量分布及推出的中间态质量如下:

$$6 \text{ 个事例: } \left. \begin{array}{l} E_{\gamma_1} = 169 \pm 7 \text{ Mev} \\ E_{\gamma_2} = 398 \pm 7 \text{ Mev} \end{array} \right\} \rightarrow M_{P_0} = 3.507 \pm 0.007 \text{ Gev 或 } 3.258 \pm 0.007 \text{ Gev}$$

$$2 \text{ 个事例: } \left. \begin{array}{l} E_{\gamma_1} = 263 \pm 8 \text{ Mev} \\ E_{\gamma_2} = 436 \pm 8 \text{ Mev} \end{array} \right\} \rightarrow M_{P_0} = 3.407 \pm 0.008 \text{ Gev 或 } 3.351 \pm 0.004 \text{ Gev}$$

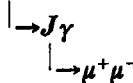
b) 观察 $\Psi(3.7) \rightarrow P_0 \gamma$



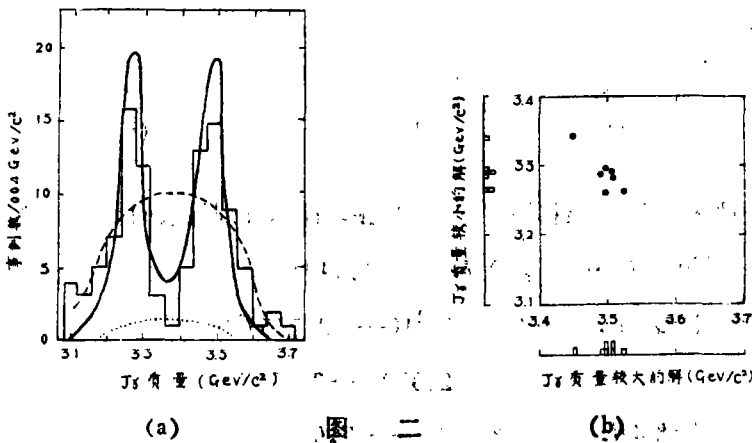
共看到二个事例可能属于这类衰变，其对应的中间态质量分别为: 3.515 Gev, 3.439 Gev.

2、SLAC, (86)-(88)

a) 观察 $\Psi(3.7) \rightarrow P_0 \gamma$



实验上识别这个反应用三种方法: ①用簇射计数器检测二个光子; ②只检测一个转化为 e^+e^- 对的光子; ③不观察光子, 只观察对 $J(\rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 体系反冲的未见质量(missing mass)平方的谱。三种方法都看到了 P_0 态。用①②两种方法定中间态质量, 结果是: (参见图二)



图二

3.500±0.010Gev 或 3.270±0.010Gev

第③法用于定这个衰变方式所占的分支分数(Branching Fraction), 结果见附表三。

b) 观察 $\Psi(3.7) \rightarrow \chi\gamma$

$$\rightarrow 4\pi^+, 6\pi^+, \pi^+\pi^-\kappa^+\kappa^-, \pi^+\pi^-\text{ 或 } k^+k^-$$

观察到的这几种带电粒子体系的不变质量分布见图三。从图中可以看到, $4\pi^+, 6\pi^+$ 和 $\pi^+\pi^-\kappa^+\kappa^-$ 的不变质量分布图结构类似, 至小有二个 χ 态, 质量为: $3.41 \pm 0.01Gev, 3.53 \pm 0.02Gev$ 。至于 $\chi \rightarrow \pi^+\pi^-$ 或 k^+k^- , 从图三c可见, 只有一个态有这种衰变方式, 其质量为 $3.40 \pm 0.01Gev$ 。

SLAC实验组认为^[72], 由于3.53的峰比估计的质量分辨率宽, 而a)法看到的3.50(或3.27)Gev的态却较窄, 因此有二种可能: ①3.53包含两个窄态, 其中一个为3.50; ②3.53是宽态, 3.50(或3.27)是另一个态。因此, 不管那种情况, 至少有三个态。

DESY观察到的态与SLAC观察到的态, 有些可能是同一态, 但也不一定。

五、 $\chi(2.75)$ 粒子: ^[83] [84] [85]

1、观察 $J(3.1) \rightarrow \chi\gamma$

$$\rightarrow P\bar{P}$$

DESY用磁铁识别 $P\bar{P}$, 看到四个事例, 其中有二个可能属于这种反应, 其 $P\bar{P}$ 对的不变质量分别为: $2.784Gev, 2.815Gev$ 。

2、DESY的DASP组及DESY-Heidelberg组都观察 $J(3.1) \rightarrow \chi\gamma$

$$\rightarrow \gamma\gamma$$

在扣除背景后, 总计余下16个事例, 其 2γ 不变质量分布集中于 $2.65-2.85Gev$ 之间。按照文献^[84] χ 态的质量为 $2.75Gev$ 。

六、 $2.426Gev$ 粒子:

BNL在 $\nu_\mu + P$ 实验中发现一张照片^[89], 经过分析, 认为它可能是:

$$\nu_\mu + P \rightarrow \mu^- \Lambda \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

注意到这个反应中强子体系的电荷改变是 $\Delta Q = +1$, 奇异数改变是 $\Delta S = -1$, 所以, 此流的 $\Delta S = -\Delta Q$ 。这种流, 在老的 SU_3 模型中是没有的, 但按 SU_4 模型^[73]可以有这种流。

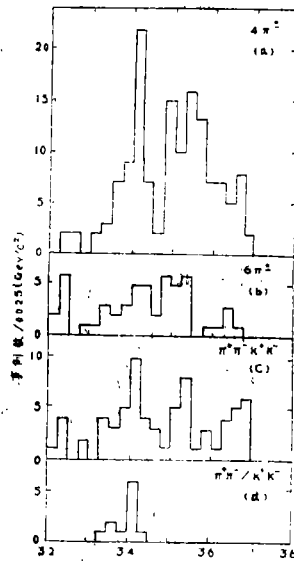


图 三

实验者认为：可能($\Delta\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$)是一个电荷为+2的粒子衰变出来的，其质量是 $2426 \pm 12 Mev$ 。

七、一九七二年中国科学院原子能研究所云南站在宇宙线观测中发现了一个重质量荷电粒子事例^[40]，该粒子质量可能大于 $10Gev$ 。

八、*Niu*等在宇宙线观测中发现过一个重粒子衰变为一个带电粒子和一个中性粒子的事例^[41]，这个中性粒子后来衰变为二个光子。如果它是 π^0 ，则重粒子是一个质量约为 $2Gev$ 、寿命约为 10^{-14} 秒的粒子。

九、 e^+e^- 对撞中反常轻子对的产生。

*SLAC*发现86个 $e^+e^- \rightarrow \mu^+e^- + \dots$ 的事例。扣除背景后，还有64个事例无法用通常的考虑解释。^{[38][42]}

有可能这是产生了一对新粒子，这对新粒子再分别衰变，放出 $e\mu$ ，从衰变角分布看，与新粒子只有二体衰变的假设不符。

实验结果与产生了一对重轻子的假设没有发现矛盾。不过，解释并不唯一。也可能是其它新粒子或新现象。

十、在 e^+e^- 对撞的带电粒子单举(inclusive)实验中，画 $S \frac{d\sigma}{dx}$ 对 χ ($\chi = \frac{2p}{\sqrt{s}}$)

的图，(见图四)发现当 $\chi < 0.2 - 0.3$ 时，标度性(scaling)行为不成立。^[24]这也可能是由于动量较低的新粒子产生所造成。

十一、在*FNAL*的 $\nu(\bar{\nu})$ 与核子的深度非弹性散射实验中，当 $E_{\nu}(\bar{\nu}) > 40Gev$ 时，已观察到14个无法用普通机制解释的 $(\mu^+\mu^-)$ 对产生事例。它们的横动量大，相应的截面所占的比例是：

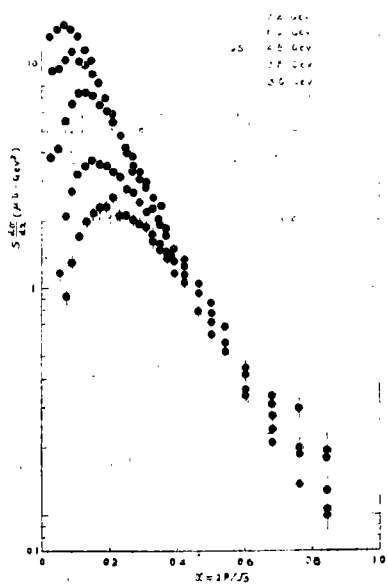
$$\frac{\sigma[\nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})N \rightarrow \mu^+\mu^-\chi]}{\sigma[\nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})N \rightarrow \mu\chi]} = (9 \pm 3) \times 10^{-3}$$

在文^[45]中报导，也看到了四个双 μ 事例，数据与*FNAL*的不矛盾。

在*CERN*，看到了中微子产生 μe 对的事例^[46]。(普通弱作用造成的背景估计只有 10^{-3} 。)

此外，在*FNAL*还看到，当 $E_{\nu} > 30Gev$ 时 $\bar{\nu}N$ 深度非弹性散射的不变质量分布在 x 较小时破坏标度不变性。

这些现象可能是由于有质量为 $2 - 4Gev$ 的粒子产生所造成。当然，这并不是唯一的解释。



图四

§ 2 $J(3.1)$ 与 $\phi(3.7)$ 的性质:

一、质量和宽度:

$J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 的性质主要由 e^+e^- 对撞实验定出。我们知道, e^+e^- 对撞截面的曲线受到下列效应很大的影响:

1. 软光子过程: 由于 e^+e^- 在对撞前辐射出软光子, 使得碰撞的有效质心能量下降。有一部分事例, 名义上其对撞能在共振上面, 实际上是在共振附近。这样, 截面曲线在共振能量上端有一个“辐射尾巴”, 而真正的共振峰处, 截面却减小了。

2. 由于同步加速器辐射带来的量子波动效应, 造成正负电子束有能散效应。因此, 对于窄共振, 用下面的方法定共振参数比直接测可能更可靠些。

先假定共振是 *Breit-Wigner* 型, 则 e^+e^- 对撞经过共振到终态 f 的截面为:

$$\sigma_f(E) = \frac{\pi(2J+1)}{E^2} \frac{\Gamma_{e^+e^-}\Gamma_f}{(M-E)^2 + \frac{1}{4}\Gamma_{总}^2}$$

这里, E 是质心能量, M 是共振质量, $\Gamma_{总}$ 是共振的总宽度, $\Gamma_{e^+e^-}$ 及 Γ_f 是共振衰变到 e^+e^- 及 f 终态的分宽度, J 是共振的自旋。显然,

$$\int_{(共振附近)} dE \sigma_f(E) \approx 2\pi^2(2J+1)\Gamma_{e^+e^-}\Gamma_f/M^2\Gamma_{总} \quad (1)$$

此式左边是共振截面曲线下的面积, 与仪器的能量分辨率关系不大, 所以, 用测量面积的办法来定各道的分宽度是比较合理的。

对 $J(3.1)$, 假定其自旋为1(已有实验证实, 见下面), 且假定 $\Gamma_{总} = \Gamma_{e^+e^-} + \Gamma_{\mu^+\mu^-} + \Gamma_{强子}$, 求同时与 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 、 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 及 $e^+e^- \rightarrow$ 强子三套数据符合的共振参数, 得到的结果见表一。

对 $\psi(3.7)$, 由于 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 中非共振本底比较大, 所以还假定了 $\Gamma_{e^+e^-} = \Gamma_{\mu^+\mu^-}$ ^[58], 得到的结果见表二。

二. J^{PC} :

$J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 是 e^+e^- 对撞的总截面中出现的共振, 如果它们是通过单光子产生的, 则它们与光子有自旋、宇称及电荷共轭, 即 $J^{PC} = 1^{--}$ 。

这种猜测, 现在已从两类实验得到证实:

1. $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 过程中共振与量子电动力学振幅间的干涉。
2. $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ (或 e^+e^-)在共振处的角分布。

下面, 我们分析这两类实验。为方便起见, 我们假定共振与轻子作用的等效哈密顿为:

$$H = \bar{\psi}^{(l)}(G_S + iG_P\gamma_5)\phi^{(l)}\psi + i\bar{\psi}^{(l)}(G_V\gamma_\mu + G_A\gamma_\mu\gamma_5)\phi^{(l)}B_\mu - ie\bar{\psi}^{(l)}\gamma_\mu\phi^{(l)}A_\mu$$

这里，最后一项是量子电动力学的相互作用，如果共振是 1^- 粒子，则 $G_S = G_P = G_A = 0$ ，如果共振是标量粒子，则 $G_P = G_V = G_A = 0, \dots$

由(1)式，可以导出：

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}{d\Omega} = & \frac{E^2}{64\pi^2} \left\{ (1 + \cos^2\theta) \left[\left| \frac{e^2}{E^2} + \frac{G_V^2(E^2 - M^2)}{(E^2 - M^2)^2 + \Gamma^2 M^2} \right|^2 \right. \right. \\ & + \left. \left| \frac{G_V^2 \Gamma M}{(E^2 - M^2)^2 + \Gamma^2 M^2} \right|^2 + \frac{G_V^4 + 2G_V^2 G_A^2}{(E^2 - M^2)^2 + \Gamma^2 M^2} \right] + \\ & + 4 G_A^2 \cos\theta \left[\frac{G_A^2 - \frac{e^2}{E^2} (M^2 - E^2)}{(E^2 - M^2)^2 + \Gamma^2 M^2} \right] + \frac{(G_P^2 + G_S^2)^2}{(E^2 - M^2)^2 + \Gamma^2 M^2} \left. \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

θ 是终态的 μ^+ 与初态 e^+ 的夹角。

从(2)式可以看出：

1. (2)式中第一项正比于 $\left| \frac{e^2}{E^2} + \frac{G_V^2(E^2 - M^2)}{(E^2 - M^2)^2 + \Gamma^2 M^2} \right|^2$ ， $\frac{e^2}{E^2}$ 来自量子电动力学振幅。如果新共振 $G_V \neq 0$ (即有 1^- 部分)，则与 $\frac{e^2}{E^2}$ 项干涉。当 $E > M$ 时截面增大，当 $E < M$ 时，截面减小。如果共振没有 1^- 部分，则共振幅与量子电动力学幅没有干涉。

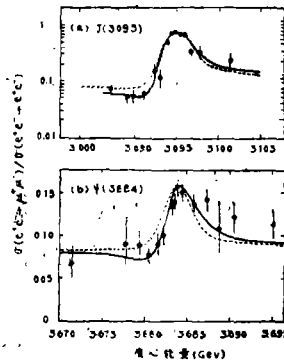
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 过程比 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 要多一个交换类空光子的费曼图。可以证明，在共振有 1^- 部分时，由于这个图的存在，当 $E > M$ 时，截面减小， $E < M$ 时截面增大。这与 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 正好相反，因而， $\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^-)}$ 将使干涉效应表现得最清楚。

测量的结果见图五，它清楚地表示出，无论对 $J(3.1)$ 还是 $\phi(3.7)$ ，干涉是存在的。因此， $J(3.1)$ 和 $\phi(3.7)$ 至少有 J^{PC} 为 1^- 的部分。

2. 从(2)式可知，如果共振是标量或赝标粒子，则减去量子电动力学贡献后，角分布应是

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{常数}$$

如果共振是 1^- 粒子，则



图五

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim (1 + \cos^2\theta)$$

DESY及SLAC均已作了测量。

DESY的结果是：在J(3.1)处有

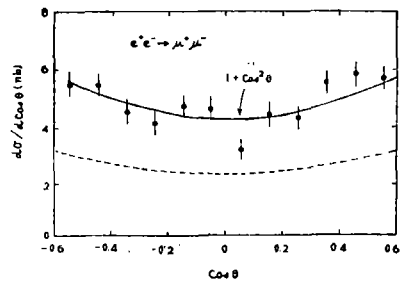
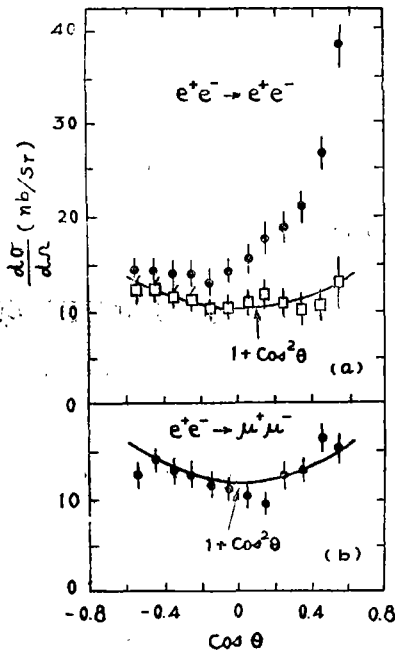
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} (e^+e^- \rightarrow e^+e^-) \sim 1 + (1.4 \pm 1.1)\cos^2\theta^{(18)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} (e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \sim 1 + (0.4 \pm 0.6)\cos^2\theta^{(57)}$$

SLAC的结果见图六⁽⁵²⁾⁻⁽⁵⁴⁾它们对J(3.1)及 $\phi(3.7)$ 均测量了。

综合这些实验结果，可以看到，J(3.1)及 $\phi(3.7)$ 的自旋确实是1。

3. 新共振是不是 1^{--} 与 1^{++} 的混合态呢？从(2)式可知，测量共振处角分布的前后不对称性，可以用来确定这一点。如定义 μ 介子的前后不对称性 $\mu_a = \frac{(\text{朝前的事例数}) - (\text{朝后的事例数})}{(\text{朝前的事例数}) + (\text{朝后的事例数})}$ ，则从(2)式可以导出，对 $\cos\theta$ 从 $(-a)$



(a, b) 图 六 (c)

到a的立体角，

$$\mu_a = \frac{a}{1 + \frac{1}{3}a^2} \cdot \frac{4(G_A/G_V)^2}{[1 + (G_A/G_V)^2]^2}$$

如果没有不同宇称的态混合，则

$$\mu_a = 0$$

DESY测量的结果是：

$$\begin{aligned} \text{在 } J(3.1) \text{ 处 } \mu_a &= 0.01 \pm 0.11 \text{ (DASP)}^{(59)} \\ &= 0.06 \pm 0.07 \text{ (PLUTO)}^{(60)} \end{aligned}$$

SLAC对 $J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 均已测量,结果见图七。^[80]结果均表明,共振处没有 μ 的前后不对称性。所以, $J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 不是 1^{--} 及 1^{++} 的混合态。

综合干涉、角分布及 μ_0 测量的结果,可以确定, $J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 都是 1^{--} 态。

三、 $J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 的衰变方式及分支比:

1. 测量 $J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 衰变方式及分支比的结果见附表一一四。

可以看出,对 $J(3.1)$,已测量的强子终态占百分之十几,还有百分之六十几的强子终态没有仔细测量。

在ADONE,已经测量了:^[74]

$\sigma_{2n} = \sigma(e^+e^- \rightarrow n\pi^+n\pi^- + \text{任何数目的}\pi^0)$,
 $n=1,2,3,4$ 以及对 σ_{2n} 有贡献的道中 π_0 的平均数 $\langle n\pi_0 \rangle_{2n}$ 。数据见附表一B。可以看到,平均中性多重数达 3.1 ± 0.8 ,而中性粒子是比较难检测的,这就是还有许多强子终态没有仔细测量的原因。

对 $\phi(3.7)$,几乎还没有对不含 J 的强子终态进行测量,这部分对于了解 $\phi(3.7)$ 及 $J(3.1)$ 的性质也是很重要的。

§ 3. J, ϕ 是那一族粒子?

我们知道,除新粒子外,已知的基本粒子分三族:轻子、光子、强子。理论上还建议可能有中间玻色子。

新粒子究竟属于那一族呢?

一、是不是属于轻子族?

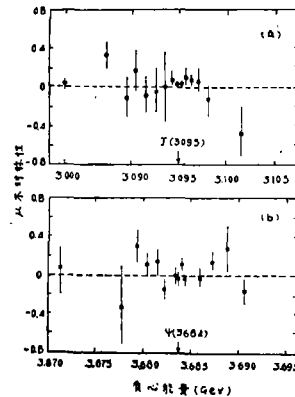
$J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 的 J^{PC} 是 1^{--} ,自旋不是 $\frac{1}{2}$,所以,它们不是通常所说的“重轻子”。但是,它们是不是重轻子的束缚态?

1. 如果 $J(3.1)$ 是重轻子束缚态,由于重轻子与光子的作用是: $ie\bar{\psi}\gamma_\mu\psi A_\mu$,因此,重轻子束缚态就与正负电子对束缚态氦(Positronium)十分类似。在瞬时近似下, J 的零点波函数可以算出。再用Mandelstam方法,可以算出:

$$\Gamma(J(3.1) \rightarrow e^+e^-) = \frac{\alpha^5}{12} m_J \sqrt{1 - \frac{m_e^2}{m_J^2}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{m_J^2} \right) \approx 5.3 \times 10^{-6} \text{keV}$$

实验给出的宽度的 $4.8 \pm 0.6 \text{keV}$,差六个数量级。

2. 如 $J(3.1)$ 是重轻子束缚态,则 $J(3.1)$ 衰变到强子主要只能通过光子。此时,应该有:



图七

$$\frac{\Gamma(J \rightarrow \text{强子})}{\Gamma(J \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \Big|_{\text{共外振}} = R \approx 2.5$$

实验上, $\frac{\Gamma(J \rightarrow \text{强子})}{\Gamma(J \rightarrow \mu^+\mu^-)} \approx 12$

因此, $J(3,1)$ [以及 $\phi(3.7)$] 不可能是重轻子束缚态。

二、是不是属于光子族?

$J(3.1)$ 是不是重光子? 如果是, 则它与轻子的作用是 $[-ie\bar{\phi}^{(1)}\gamma_\mu\phi^{(1)}B_\mu]$, 由此容易算出:

$$\Gamma(J(3.1) \rightarrow e^+e^-) = \frac{\alpha}{3} m_J = 7.5 \text{ Mev}$$

这大了三个数量级。

此外, 如果存在这样轻的重光子, 则将对光子传播子作出很大的修正。在检验量子电动力学的各种实验中应该看到它的效应。目前, 各种实验已以相当高的精度排除这种低质量的重光子。^[19]

结论: $J(3.1)$ [及 $\phi(3.7)$] 不可能是重光子。

三、是中间玻色子吗?

如果 J 是传递弱作用的中间玻色子, 则它与轻子的作用可以写为:

$$i\bar{\phi}^{(1)}(G_V\gamma_\mu + G_A\gamma_\mu\gamma_5)\phi^{(1)}W_\mu$$

由此算得: $\Gamma(J \rightarrow e^+e^-) = \frac{G_V^2 + G_A^2}{12\pi} m_J$

如采用普适弱作用观点, $G_V = G_A$

$$G_V^2 = \frac{G_{\text{弱中性流}}}{\sqrt{2}} m_J^2$$

$$\Gamma(J \rightarrow e^+e^-) = \sqrt{2} G_{\text{弱中性流}} m_J^3 / 12\pi$$

如取 $G_{\text{弱中性流}} m_J^2 = G_{\text{弱带电流}} M_W^2 \approx 10^{-6}$

则 $\Gamma(J \rightarrow e^+e^-) = 13 \text{ kev}$

注意到实验上弱中性流效应约为 20%, 如取 $G_{\text{弱中性流}} \sim 0.45 G_{\text{带电流}}$ 则算出的 $\Gamma(J \rightarrow e^+e^-)$ 与实验结果很接近, 这是文^[8]中说不能排除 J 是中间玻色子的原因。

不过, 现在我们已有了确定 J 是否是宇称混合态的实验。 J 是 1^{--} 粒子, 不是 1^{--} 与 1^{++} 的混合, 因此, 它不是中间玻色子。

实际上, 如果 J 是中间玻色子, 则 μ 前后不对称性应为:

$$\mu_a = \frac{\alpha}{1 + \frac{1}{3}\alpha^2} = \begin{cases} 0.75 & \text{对全部立体角检测} \\ 0.54 & |\cos\theta| \leq 0.6 (\text{DESY 及 SLAC 检测的立体角 至少有这样大.}) \end{cases}$$

这些数值远大于 § 2 的实验上限。

此外,如 J 是中间玻色子, $\Gamma(J \rightarrow \text{强子})$ 应与 $\Gamma(J \rightarrow \text{轻子})$ 差不多, 难以解释实验上 $\Gamma(J \rightarrow \text{强子})$ 比 $\Gamma(J \rightarrow \text{轻子})$ 大十几倍。

结论: $J(3.1)$ [以及 $\phi(3.7)$] 不是中间玻色子。

四、是不是与普通强子有强作用的粒子? 我们分析一些实验:

1. 实验上

$$\frac{\Gamma(J \rightarrow \text{强子})}{\Gamma(J \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \approx 12 > \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \Big|_{\text{共振外}} \approx 2.5$$

用电磁作用及弱作用, 此点难以解释。如果认为 J 与普通强子间有强作用, 则 $\Gamma(J \rightarrow \text{强子})$ 又应该宽得多, 而实际宽度却又很窄。不过, 有可能是压低的强作用。

所以, 这个实验数据既不能作为 J 与普通强子有强作用的证据, 也不能作为否定的证据。

2. 光生实验

有一部分人认为, 光生实验证明了 J 与核子有强作用。他们的分析是这样的(以 $SLAC$ 实验为例):

$SLAC$ 用 10 多 Gev 到 21 Gev 的韧致辐射束去撞击 H_2 和 D_2 , 产生出 $J(3.1)$ 和 $\phi(3.7)$ 。实验上直接测量的是几乎朝前 γN 散射微分截面。把这些数值外推到 $t=0$ 处得到:

$$\frac{d\sigma(\gamma N \rightarrow JN)}{dt} \Big|_{t=0} = 17.8 \pm 1.5 \text{ nb}/(\text{Gev}/c)^2 \quad (E = 21 \text{ GeV})$$

如果假定矢量为主理论成立, 则

$$\frac{d\sigma(\gamma N \rightarrow JN)}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{\alpha}{4} \left(\frac{\gamma_J^2}{4\pi} \right)^{-1} \frac{d\sigma(JN \rightarrow JN)}{dt} \Big|_{t=0}$$

$$\therefore \frac{d\sigma(JN \rightarrow JN)}{dt} \Big|_{t=0} \approx 25 \mu\text{b}/(\text{Gev}/c)^2$$

这里 γ_J 是 $J\gamma$ 顶角耦合常数, 可从 $\Gamma(J \rightarrow e^+ e^-)$ 定出。由此, 从光学定理可得:

$$\sigma_{\text{总}}(JN) \lesssim 0.8 \text{ mb}$$

如果假定朝前幅是纯虚的, 则

$$\sigma_{\text{总}}(JN) \approx 0.8 \text{ mb}$$

这比 $\sigma_{\text{总}}(\gamma N) \approx 0.1 \text{ mb}$ 要大, 因此, 有一部分人认为, 这证明了 JN 是强作用。

但是, 这个论证受到了不少批评。例如:

a) 用矢量为主理论时, 假定了在 $q^2 = -m_J^2$ 处的 $J\gamma$ 顶角与 $q^2 = 0$ 处的一样,

这没有根据。它们可能差别很大。^[2]

b) 假定“朝前幅是纯虚数”缺乏根据。如果不是纯虚, 则总截面比估计的可

能小得多。

c) 与典型的强作用数据比较, 就朝前散射微分截面而言, 我们有:

$$\left. \frac{d\sigma(\pi N)}{dt} \right|_{t=0} = 30 \text{mb}/(\text{Gev}/c)^2$$

$$\left. \frac{d\sigma(\varphi N)}{dt} \right|_{t=0} = 4 \text{mb}/(\text{Gev}/c)^2$$

它们比 $\left. \frac{d\sigma(JN)}{dt} \right|_{t=0}$ 要大几百到几千倍。就总截面而言, 有:

$$\sigma_{\text{总}}(\rho p) \approx 25 \text{mb}, \sigma_{\text{总}}(\omega p) \approx 25 \text{mb}, \sigma_{\text{总}}(\varphi p) \approx 11 \text{mb} \text{ 比 } \sigma_{\text{总}}(Jp) \text{ 也要大得多。}$$

因此, 从光生实验说 JN 是强作用并不令人信服。

3. 质量谱

从 § 1 可知, 实验上有不少具有不同的 J^{PQ} 值的态的证据。从能级结构看, 这很象是费密子与反费密子的束缚态, 其质量分裂是强作用的量级。不过, 这并没有能够说明, 它与普通强子间有强作用。

也有人提出一些其它的理由, 例如: 在强子碰撞中 J 的产生截面曲线与强子的产生截面形状相似, J 衰变的 SU_3 对称性特征大致可用强作用 SU_3 不变来解释..., 等等。不过, 这些显然不是有力的直接的证据。

结论: 现在既没有有力的证据排除 J 与普通强子有强作用, 也没有有力的证据证明它与普通强子有强作用。

§ 4. $J(3.1)$ 和 $\psi(3.7)$ 的内部对称性质 (续 § 2)

如果假定, 在 e^+e^- 对撞中, $J(3.1)$ 和 $\psi(3.7)$ 确实是通过单光子中间态产生的, 则其通过中间态光子衰变到强子终态的分宽度可以估计出来:

$$\Gamma[J \rightarrow (\text{虚}\gamma) \rightarrow \text{强子}] = R\Gamma(J \rightarrow \mu^+\mu^-) = 12 \text{keV}$$

$$\Gamma[\psi(3.7) \rightarrow \text{虚}\gamma \rightarrow \text{强子}] = R\Gamma[\psi(3.7) \rightarrow \mu^+\mu^-] = 6.7 \text{keV}$$

与表一及表二中 $\Gamma(J \rightarrow \text{强子})$ 及 $\Gamma(\Psi \rightarrow \text{强子})$ 比较, 可知分别还有 40 多 keV 及 200 多 keV 不能解释为单光子中间态衰变。按文^[54], 称这部分衰变为“直接衰变”。

“直接衰变”不可能是电磁或弱衰变。在已知的作用中, 仅仅不能排除它是压低的强作用。

在本节中, 假定“直接衰变”的内部对称性与强作用相同, 由此估计 $J(3.1)$ 及 $\Psi(3.7)$ 的一些性质, 同时看一看实验结果与这种假定是否一致。

1. G 宇称:

从表一及表五可见, $\Gamma(J \rightarrow \text{偶数}\pi)$ 与设它们是通过单光子中间态衰变的结果一致, $\Gamma(J \rightarrow \text{奇数}\pi)$ 则必须主要来自“直接衰变”。因此, J 的 G 宇称是 (-1) 。

对 $\Psi(3.7)$, 其主要衰变方式是 $\Psi(3.7) \rightarrow J + 2\pi$ 。所以其 G 宇称也是 (-1) 。

2. 同位旋:

对 $J(3,1)$:

a) $\rho\pi$ 体系同位旋可以是0、1、2, 相应的同位旋波函数及不同电荷态所占的比例为:

I	波函数	$\rho^0\pi^0$ 数/ $(\rho^+\pi^- + \rho^-\pi^+)$ 数
0	$\frac{1}{\sqrt{3}}(\rho^+\pi^- - \rho^0\pi^0 + \rho^-\pi^+)$	0.5
1	$\frac{1}{\sqrt{2}}(\rho^+\pi^- - \rho^-\pi^+)$	0
2	$\frac{1}{\sqrt{6}}(\rho^+\pi^- + 2\rho^0\pi^0 + \rho^-\pi^+)$	2

实验上, $\Gamma(J \rightarrow \rho^0\pi^0)/\Gamma(J \rightarrow \rho^-\pi^+ + \rho^+\pi^-) = 0.59 \pm 0.17$ 因此, J 衰变的 $\rho\pi$ 终态同位旋为0. J 的同位旋为0.

b) 已测量到 $J \rightarrow \lambda \bar{\lambda}$. $\lambda \bar{\lambda}$ 的同位旋为0

c) 已知 J 的 G 宇称为 (-1) , C 宇称也为 (-1) , 所以, 其同位旋必为0, 2, ... 实验上, 已测量到 $J \rightarrow p \bar{p}$. $p \bar{p}$ 的 I 只能是0或1. 所以 J 的 I 为0.

对 $\Psi(3,7)$:

a) 2π 体系同位旋性质与 $\rho\pi$ 体系类似, 只要把那里的 ρ 换成 π 即可. 从表一知, $DESY$ 及 $SLAC$ 测量的结果, $\Gamma[\Psi(3,7) \rightarrow J + 2\pi^0]/\Gamma[\Psi(3,7) \rightarrow J + 2\pi^\pm]$ 与0.5一致, 所以, $J + 2\pi$ 中的二个 π 处于 $I=0$ 态, 再由 J 的 $I=0$, 就可得到 $\Psi(3,7)$ 的 $I=0$

b) 已测到 $\Psi(3,7) \rightarrow J + \eta$ 表明 $\Psi(3,7)$ 的 $I=0$

c) 已测到 $\Psi(3,7) \rightarrow P\bar{P}$, 由于 $\Psi(3,7)$ 的 G 及 C 宇称为 (-1) . 所以这表明, $\Psi(3,7)$ 的 $I=0$.

3. SU_3 性质:

$I=0$ 的单介子态可以是 SU_3 单态或八重态第八分量, 如果“直接衰变”保持 SU_3 不变, 则终态性质也应与 J [或 $\Psi(3,7)$]性质一样. 如果终态是通过单光子中间态(其性质如同 $\lambda_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_8$), 则终态也应如同“ $\lambda_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_8$ ”. 综合考虑 SU_3 不变性及 C 宇称守恒, 可以证明, 对 $J \rightarrow O^-O^-$ 有:

	SU_3 单态	“ λ_8 ”	“ $\lambda_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_8$ ”
$\pi^+\pi^-$	0	0	1
$\pi^0\pi^0$	0	0	0
k^+k^-	0	1	1
$k_s k_L$	0	1	0
$\eta\eta$	0	0	0

实验上所有这些衰变都没有看到(见表一),这有利于 J 是 SU_3 单态。

可以证明上表也可用于 $J \rightarrow 1^-1^-, 0^-2^+, 2^+2^+$ 等。从附表一,可以看到,没有观察到 $KK^*(1420)$, $K^*(892)K^*(892)$ 及 $K^*(1420)K^*(1420)$ 。这也有利于 J 是 SU_3 单态。

对于 $J \rightarrow 0^-1^-$, SU_3 性质的考虑给出:

	SU_3 单态	" λ_8 "	" $\lambda_3 + \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_8$ "
$\pi^+\rho^- = \pi^-\rho^+ = \pi^0\rho^0$	1	1	1
$k^+k^{*\mp(892)} = k^-k^{*\mp(892)}$	1	$\frac{1}{2}$	1
$k^0\bar{k}^{*0(892)} = \bar{k}^0k^{*0(892)}$	1	$\frac{1}{2}$	4
η^8V^8	1	1	1
$\eta^8\rho$	0	0	3
π^0V^8	0	0	3
$V^8 = \sqrt{\frac{1}{3}}\omega + \sqrt{\frac{2}{3}}\phi$			

从附表一知,实验上:

$k^0\bar{k}^{*0(892)}$ 占 $0.12 \pm 0.03\%$, $k^+k^{*\mp(892)}$ 占 $0.15 \pm 0.04\%$,它们在误差范围内相同,从而表明性质不是" $\lambda_3 + \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_8$ "。

不过, $\frac{1}{3}\rho\pi = \rho^-\pi^+ = \rho^+\pi^- = \rho^0\pi^0$ 占 $0.43 \pm 0.10\%$ 与 $KK^*(892)$ 比,这有利于 J 像" λ_8 ",而不利于 J 为 SU_3 单态。

同样的论证方法用于重子。应有:

	SU_3 单态	" λ_8 "	" $\lambda_3 + \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_8$ "
$\bar{\lambda}\lambda$	1	1	1
$p\bar{p}$	1	$(\frac{1}{2} - \frac{2}{3}F/D)^2$	$(1 + 3F'/D')^2$

从表一可知,实验结果与 J 是 SU_3 单态不矛盾,但如果选择特殊的 F/D 及 F'/D' ,也不与其它两种情况矛盾。

从上面的分析间接可见,如果假定直接衰变的对称性质与强作用相同,可以说明确强子终态的大部分特征。但是就 SU_3 性质而言,有些实验说 J 像单态,有些实验却说 J 像" λ_8 "。原因有待于进一步研究。

最后再提一下,尽管从对称性质看,“直接衰变”与强作用类似,但这些衰变的分宽度都不大。因此,虽然“直接衰变”有可能是压低的强作用,但还不能说这是 J 与普通强子有强作用的有力的直接证据。

§ 5. $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型及 SU_4 模型分析

上两节已指出, $J(3.1)$ 及 $\psi(3.7)$ 仍有可能是与普通强子有强作用的粒子, 不过强衰变必须压低。所以, 尝试应用有新自由度的强子结构模型—— $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型及 SU_4 模型, 是自然的。一年来, 国内外都做了不少工作。

一、 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型:

由于在 *Gell-mann* 等提出的三色模型中, 电磁流是 $SU_3^{(2)}$ 单态, 因而, e^+e^- 对撞通过中间光子产生的共振是颜色单态。它不能用颜色禁戒强衰变。所以, 这种三色模型不行。

目前考虑较多的是 *Han-Nambu* 型模型, 在这个模型中, 层子属于 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 的 $(3, 3^*)$ 表示, 电荷算子性质属于 $(1 \otimes 8 + 8 \otimes 1)$ 表示, $J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 填入 $SU_3^{(2)}$ 八重态激发, 具体的填法与 $SU_3^{(2)}$ 是否有次强破坏有关,

第一种填法: 如果次强作用只破坏 $SU_3^{(1)}$, 不破坏 $SU_3^{(2)}$, 则电磁作用 $(1, 8)$ 部分产生的粒子, 其 $SU_3^{(2)}$ 波函数应为 $U^{(2)}$ 单态, 即形为: $\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ 。如果考虑由于 $SU_3^{(1)}$ 破坏, 类似于 ω 和 ϕ 有 $(1, 8)$ 及 $8, 8$ 态混合, 则有二个态可由单光子产生:

$$J(3.1): \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\phi(3.7): \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

如果混合角不是 35° , 则波函数 $SU_3^{(1)}$ 部分是它们的线性组合。用这里给出的波函数可以计算 $\Gamma(J \rightarrow e^+e^-)$ 及 $\Gamma(\phi(3.7) \rightarrow e^+e^-)$ 。如忽略 J 及 $\phi(3.7)$ 质量不同造成的修正, 则有: $\frac{\Gamma(J \rightarrow e^+e^-)}{\Gamma(\phi(3.7) \rightarrow e^+e^-)} = 2$

这与实验是符合的。

在这种考虑里, 由于 $SU_3^{(2)}$ 不变, 所以 $J(3.1)$ 及 $\phi(3.7)$ 都不能强衰变为普通强子。

$[\phi(3.7) \rightarrow J(3.1) + \text{其它}]$ 至少是一级 *Zweig* 规则禁戒, 宽度也是小的。

第二种填法: 如果 $SU_3^{(2)}$ 也有次强破坏, 其性质是 $T_{83}^{(2)}$, 则 $I^{(1)} I^{(2)} Y^{(1)} Y^{(2)}$ 相同的 $(1, 8)$, $(8, 1)$ 及 $(8, 8)$ 态将有混合, 情况比较复杂。这时, 除掉

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

不能由单光子中间态产生外, 其余五个对角线上的态均可以产生。其中有二个 ($I^{(2)} = 1, I^{(1)} = 0$) 的态不能强衰变为普通强子 (因为 $I^{(2)}$ 守恒), 因而是窄态⁽⁷¹⁾, 其余的态将是宽共振, 而且强作用可以单个产生它们。

上面两种填法都认为 $J(3.1)$ 不能强衰变到普通强子。辐射衰变是其主要衰变方式。

$SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型存在着严重的困难:

1. 既然在这个模型中, 主要是辐射衰变, 则在“直接衰变”终态中应当看到一个光子, 但是从表一可知, 现在已测到的“直接衰变”终态中, 几乎都没有这个光子。

2. 在这个模型中, e^+e^- 对撞可以产生 J 族粒子和一组普通强子对, 能量不需要太高, 可是实际上在 $E \sim 4\text{GeV}$ 以上, 看到的 J 很少, 也没有发现终态中有其它 J 族粒子。^[25]

2. 辐射衰变宽度问题。

以第一种填法为例, J 和 $\phi(3.7)$ 可以衰变到 $\eta' r$ 其宽度为,

$$\left. \begin{aligned} \Gamma(J \rightarrow \eta' r) &= 31 I^2 \text{MeV} \\ \Gamma(J \rightarrow [\phi(3.7) \rightarrow \eta' r]) &= 27 I^2 \text{MeV} \end{aligned} \right\} \text{(设层子有反常磁矩)}$$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma(J \rightarrow \eta' r) &= 1.3 I^2 \text{MeV} \\ \Gamma[\phi(3.7) \rightarrow \eta' r] &= 0.88 I^2 \text{MeV} \end{aligned} \right\} \text{(设层子没有反常磁矩)}$$

这里 I 是 J (或 ϕ)与 η' 的重叠积分如果它们的空间波函数一样, 则 $I=1$ 。

要使得它与实验符合, 要求重叠积分把宽度压下去三个数量级以上。

所以, 辐射衰变宽度太大, 虽不算这个模型的根本困难, 也是重要困难之一。

4. 在这个模型中, J 和 $\phi(3.7)$ 都是 $c=-1, I^{(1)}=0, G=-1$ 的态, 是 $SU_3^{(2)}$ 八重态。它们到普通强子的“直接衰变”应靠辐射衰变。辐射的光子应属于 $(1,8)$ 表示部分。因此, 这个光子带走的量子数是 $C=-1, I^{(1)}=0$ 。余下的终态强子体系应该是 $C=+1, I^{(1)}=0, G=C(-1)^I=+1$ 。

但是, § 4 中已分析过, 实验上“直接衰变”终态是 $G=-1$ 的态, 没有 $G=+1$ 的态。因此, 这个理论定性上就与实验不符合。这一点不管辐射的光子多“软”, 都是难以解释的。

我们认为, 这个困难对 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型是原则性的困难。

二、 SU_4 模型:

在 SU_4 模型中, 基础粒子除通常的 pn 外, 还有一个 c 粒子。它是 SU_3 单态, 电荷为 $+\frac{2}{3}$, “幻数”(charm)为 $(+1)$ 。

在这个模型中, 基态 0^- 及 1^- 介子 SU_4 波函数可写为:

$$\begin{array}{l}
 \overline{0}_1 \\
 1^-
 \end{array}
 \left(\begin{array}{cccc}
 \frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta^0}{\sqrt{6}} + \frac{\eta_8}{\sqrt{12}}, & \pi^+, & k^+, & \overline{D}^0 \\
 \pi^-, & -\frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta^0}{\sqrt{6}} + \frac{\eta_8}{\sqrt{12}}, & k^0, & D^- \\
 k^-, & \overline{k}^0, & \frac{-2\eta^0}{\sqrt{6}} + \frac{\eta_8}{\sqrt{12}}, & F^- \\
 D^0, & D^+, & F^+, & -\frac{3\eta_8}{\sqrt{12}}
 \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{cccc}
 \frac{\rho^0 + \omega^0}{\sqrt{2}}, & \rho^+, & k^{*+}, & \overline{D}^{0*} \\
 \varrho^-, & \frac{-\rho^0 + \omega^0}{\sqrt{2}}, & k^{0*}, & D^{-*} \\
 k^{-*}, & \overline{k}^{0*}, & \varphi, & F^{-*} \\
 D^{0*}, & D^{+*}, & F^{+*}, & \varphi_0
 \end{array} \right)$$

可把J(3.1)填入 $\varphi_0, \Psi(3.7)$ 填入径向激发态。

这时，禁戒 $\varphi_0 (=J)$ 衰变到普通强子的，不是对称性，而是Zweig-Izuka规则。

在这个模型中，参数比较少。例如，要计算带幻数的 1^- 介子的质量，只要假定J就是 $\varphi_0 = C\overline{C}$ 态，且质量分裂是 T_{33} 及 T_{44} 作用就可算出：^[70]

$$F^* = 2.30\text{Gev}, \quad D^* = 2.25\text{Gev}$$

如果把§1中提到的2.75Gev粒子作为物理的 η^P 态(是 η_8 及 η_1 的组合)，则可算出：

$$F = 2.31\text{Gev}, \quad D = 2.28\text{Gev}$$

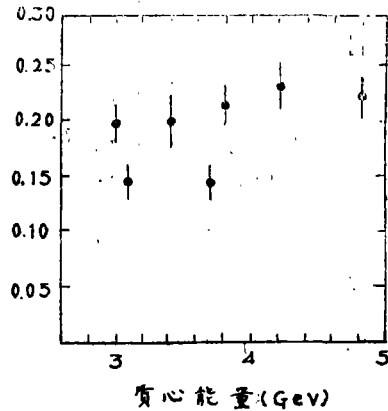
这些结果可以由实验上探索检验。

已做的实验有：

1. 在 e^+e^- 对撞机中找寻这些粒子。结果在1.5—4Gev区域，没有发现这些粒子存在的迹象。^[47]

2. 由于SU₄模型中基础粒子C弱衰变为 λ ，因此，在 e^+e^- 对撞中如果有带C荷粒子产生，则终态K介子与 π 介子数目的比应增加。实验中没有看到这种现象^[76](见图)，而且 $\pi(3.1)$ 及 $\Psi(3.7)$ 处，K介子数目反有明显的减少。

3. 在强子碰撞及其它实验中也找不到带幻数的粒子^{[48]—[61]}这是SU₄模型的困难之一。



图八

SU_3 模型也有严重的辐射衰变困难。我们知道在 η 及 η' 介子中只要混入少量的 $C\bar{C}$,就可以造成很大的辐射衰变。所以 η 及 η' 中应基本不含 $C\bar{C}$,而 η_0^P 基本上是 $C\bar{C}$ 。这时,可以算出:

$$\begin{aligned} \Gamma(J \rightarrow 2.75\gamma) &= 11I^2 \text{kev} && (\text{设 } c \text{ 无反常磁矩}) \\ &= 440I^2 \text{kev} && (\text{设 } c \text{ 有反常磁矩 } K = 1.79) \end{aligned}$$

其中 I 是 J 和 η_0^P 空间波函数的重叠积分。由于 J 和 η_0^P 中的 $C\bar{C}$ 处于同一轨道及径向态,质量又很接近,所不同的只是自旋组合方式,所以空间波函数不会有很大差别。接 SU_3 模型,它们应该一样。于是 $I=1$ 。如果考虑由于质量有差别会带来偏离,用文^[68]的方法计算,则可得到 I 仍然几乎是1。总之;由于这里与 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型不同, J 与 η_0^P 在同一个 SU_3 多重态中, I 不易有很大的改变,从这个意义上讲, SU_3 模型中辐射衰变宽度太大是一个重要的困难。

因此, $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型及 SU_3 模型都不是工作得很好的模型。

§ 6 结束语

从以上讨论,可以看到:

实验上,除 $J(3.1)$ 及 $\psi(3.7)$ 外,还有不少其它新粒子可能存在的证据;

$J(3.1)$ 及 $\psi(3.7)$ 的量子数及一些性质已确定;

从现有数据,经过分析,可以确定 $J(3.1)$ 及 $\psi(3.7)$ 不可能属于轻子、光子、中间玻色子等族。它们有可能是强子。但是,现在还没有有力的直接证据。特别是,还没有证据证明它们与普通强子有强作用。目前比较流行的 $SU_3^{(1)} \times SU_3^{(2)}$ 模型及 SU_3 模型都存在着困难。

很可能, $J(3.1)$ 及 $\psi(3.7)$ 是新的—族粒子,有新的相互作用,这正是目前人们难以理解它们的原因。

附表一、 $J(3095)$ 的性质

质量: $3.095 \pm 0.004 \text{Gev}$, $J^{PC} = 1^{--}$ SLAC [52]
总宽度: $69 \pm 15 \text{Kev}$

A 衰变方式及宽度

衰 变 方 式	宽 度	分 支 比	资 料 来 源 及 注
e^+e^-	$4.8 \pm 0.6 \text{Kev}$	$6.9 \pm 0.9\%$	SLAC [52]
$\mu^+\mu^-$	$4.8 \pm 0.6 \text{Kev}$	$6.9 \pm 0.9\%$	SLAC [52]
强子	$59 \pm 14 \text{Kev}$	$86 \pm 20\%$	SLAC [52]
$\gamma\gamma$		$\frac{3.1 \text{处 } e^+e^- \rightarrow 2\gamma}{\text{QED}} = 1.6 \pm 0.6$	ADONE [66]

	$<0.17\text{Kev}$	$<0.3\%$	DESY [35] [61]
$\pi^0\gamma$	$<0.3\text{Kev}$	$<0.5\%$	ADONE [66]
	$<0.6\text{Kev}$	$<0.9\%$	DESY [35] [61]
$\pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$ ($2.99\text{Gev} < M_x < 3.09\text{Gev}$)		$<0.3\%$	DESY [35]
$\eta^0\gamma$	$<1\text{Kev}$	$<1.6\%$	ADONE [66]
	$0.1\text{Kev} < \Gamma\gamma_{\eta^0} < 2\text{Kev}$		DESY 74.12 [54]
	$95 \pm 29\text{ev}$		DESY 70.8 [35]
$\eta^1\gamma$	$<1\text{Kev}$	$<1.6\%$	ADONE [26] [67]
	$<450\text{ev}$		DESY [35]
			DESY ⁻
	$(4 \pm 2.5)\Gamma\eta\gamma$		Heidelberg [34]
$\pi^+\pi^-$	$<0.022\text{Kev}$	$<0.03\%$	DESY [35] [62]
K^+K^-	$<0.04\text{Kev}$	$<0.06\%$	DESY [35] [62]
$K_S K_L$	$<0.012\text{Kev}$	$<0.02\%$	SLAC [30]
$\rho\pi$		$1.3 \pm 0.3\%$	SLAC [30]
		$\frac{\rho^0\pi^0}{\rho^+\pi^- + \rho^-\pi^+} = 0.59 \pm 0.17$	占 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 中 $>70\%$
			SLAC [58]
			SLAC [30]
			SLAC [30]
$2\pi^+2\pi^-$		$0.4 \pm 0.1\%$	SLAC [30]
$2\pi^+2\pi^-\pi^0$		$4.0 \pm 1.0\%$	{ 20% $\omega\pi^+\pi^-$ { 30% $\rho\pi\pi$
$3\pi^+3\pi^-$		$0.4 \pm 0.2\%$	SLAC [30]
$3\pi^+3\pi^-\pi^0$		$2.9 \pm 0.7\%$	SLAC [30] [54] 包括 $\omega\pi\pi\pi$
$4\pi^+4\pi^-\pi^0$		$0.9 \pm 0.3\%$	SLAC [30]
$\overline{K} \overline{K} \pi$			
$K^+ \overline{K}^{*0} (892) + \overline{K}^0 K^{*0} (892)$		$0.24 \pm 0.05\%$	SLAC [30]
$K^+ \overline{K}^{*0} (892) + K^- \overline{K}^{*0} (892)$		$0.31 \pm 0.07\%$	SLAC [30]
$\overline{K}^0 K^{*0} (1420)^+ + \overline{K}^+ K^{*0} (1420)$		$<0.19\%$	SLAC [30]

$K^+K^{*0}(1420)^+$		$<0.19\%$	SLAC (30)
$K^-K^{*0}(1420)$			
$K\bar{K}\pi\pi$			
$K^+K^-\pi^+\pi^-$		$0.4\pm 0.2\%$	SLAC (30) 不包括 $K^*(892)$ $K^*(1420)$
		$\frac{\varphi\pi^+\pi^-}{\omega\pi^+\pi^-} = 0.20\pm 0.10$	SLAC (58)
$K^{*0}(892)\bar{K}^{*0}(892)$ $+ \bar{K}^{*0}(892)K^{*0}(892)$		$<0.06\%$	SLAC (30)
$K^{*0}(892)K^{*0}(1420)$ $+ \bar{K}^{*0}(892)K^*(1420)$		$0.37\pm 0.10\%$	SLAC (30)
$K^{*0}(1420)\bar{K}^{*0}(1420)$ $+ \bar{K}^{*0}(1420)K^{*0}(1420)$		$<0.18\%$	SLAC (30)
$K\bar{K}\pi\pi\pi$		見到	SLAC (54)
$K^+K^-2\pi^+2\pi^-$		$0.3\pm 0.1\%$	SLAC (30)
$\eta\Phi$		見到	SLAC (54)
$P\bar{P}$		$0.36\pm 0.15\%$	PLUTO (60)
		$0.25\pm 0.07\%$	DASP (62)
		$0.23\pm 0.06\%$	DASP (35)
	$0.15\pm 0.03\text{Kev}$	$0.21\pm 0.04\%$	SLAC (30)
$\lambda\bar{\lambda}$		$0.16\pm 0.08\%$	SLAC (30)
$N\bar{N}\pi \begin{pmatrix} P\bar{P}\pi^0 \\ \bar{n}P\pi^- \\ n\bar{P}\pi^+ \end{pmatrix}$		$0.37\pm 0.19\%$	SLAC (30)
$P\bar{P}\pi^+\pi^-$		見到	SLAC (54)

B σ_{2n} 及 $\langle n_{\pi^0} \rangle_{2n}$ [74]

定义: $\sigma_{2n} = \sigma(e^+e^- \rightarrow n\pi^+n\pi^- + \text{任何数目}\pi^0)$

$\langle n_{\pi^0} \rangle_{2n}$ 为对 σ_{2n} 作贡献的反应道的平均 π^0 多重数。

在J(3.1)处测量的结果: [ADONE(74)]

σ_2	σ_4	σ_6	σ_8
$32\pm 5\%$	$49\pm 8\%$	$18\pm 3\%$	$1\pm 0.6\%$

这里的 $\sigma_{2.}$ 值是相对比例。

$\langle n_x 0 \rangle_2$	$\langle n_x 0 \rangle_4$	$\langle n_x 0 \rangle_6$	$\langle n_x 0 \rangle_{\text{总}}$	$\langle n_{\text{带电}} \rangle_{\text{总}}$
3.6 ± 0.9	3.1 ± 0.7	2.3 ± 0.6	3.1 ± 0.8	3.8 ± 0.3

$$\langle n_{\text{带电}} \rangle_{\text{总}} / \langle n_x 0 \rangle_{\text{总}} = 1.2 \pm 0.4$$

附表二 $\Psi(3684)$ 的性质

质量: $3.684 \pm 0.005 \text{Gev}$, $J^P = 1^{--}$ SLAC[53]
 总宽度: $228 \pm 56 \text{Kev}$

衰变方式及分支比

衰变方式	分支比	资料来源及注
$e^+e^- = \mu^+\mu^-$	$0.93 \pm 0.16\%$	SLAC 假定 $\mu-e$ 普适性 [53]
强子	$98.1 \pm 0.3\%$	SLAC [53]
J+任何粒子	$57 \pm 8\%$	SLAC [55]
	$54 \pm 10\%$	DESY [76]
$J\pi^+\pi^-$	$32 \pm 4\%$	SLAC [55]
	$36 \pm 6\%$	DESY [35]
$J\pi^0\pi^0$	$18 \pm 6\%$	DESY [35]
	$20 \pm 5\%$	SLAC [56]
	$17 \pm 3\%$	SLAC [77]
	$\frac{J+\text{中性}}{J+\text{任何}} = 0.44 \pm 0.03$	SLAC [55]
	$\frac{J+2\pi^0}{J+\pi^+\pi^-} = 0.64 \pm 0.15$	SLAC [56]
$J\eta$	$0.53 \pm 0.06\%$	SLAC [77]
	$4.3 \pm 0.8\%$	SLAC [30]
	$3.7 \pm 1.5\%$	DESY [35]
經中間态 $+\gamma \rightarrow J\gamma\gamma$	$< 6.6\%$	SLAC [30][77]
	$3.6 \pm 0.7\%$	SLAC [77]

关于 $\Psi(4-3.6 \text{Gev})$
 中間态見另表

$\gamma\gamma$	$<0.8\%$	DESY	[35]
$\pi^0\gamma$	$<1\%$	DESY	[35]
$\eta\gamma$	$<0.13\%$	DESY	[35]
$\eta'\gamma$	$<1\%$	DESY	[35]
$\pi^+\pi^-$	$<0.09\%$	DESY	[35]
K^+K^-	$<0.019\%$	SLAC	[37]
	$<0.16\%$	DESY	[35]
$\rho^0\pi^0$	$<0.023\%$	SLAC	[37]
	$<0.1\%$	SLAC	[30]
$2\pi^+2\pi^-\pi^0$	$<0.7\%$	SLAC	[30]
$K^+K^-\pi^+\pi^-$	$0.35\pm 0.15\%$	SLAC	[58]
	$\sim 0.05\%$	SLAC	[58]
$P\bar{P}$	$<0.03\%$	SLAC	[30]
	$0.032\pm 0.014\%$	SLAC	[58][77]
$\pi^+\rho_c^+(M_{\rho_c}\sim 3.1\text{Gev})$ 經 $\pi\gamma\rightarrow 3\gamma$	$<0.1\%$	DESY	[35]
	$<5\%$	DESY	[35]
$(3.58\text{Gev}<M_x<3.68\text{Gev})$	$<0.8\%$	DESY	[35]

附表三 $\phi(3684)$ 幅射衰变中看到的新态及其衰变分支比

$$\frac{\phi(3684)\rightarrow\text{新态}+\gamma}{\phi(3684)\rightarrow\text{所有道}} \cdot \frac{\text{新态}\rightarrow f}{\text{新态}\rightarrow\text{所有道}}$$

SLAC [36][37][38]

f	3410 Gev	3530 Gev	PO(3.50或3.27Gev)
$4\pi^\pm$	$0.14\pm 0.07\%$	$0.20\pm 0.10\%$	
$6\pi^\pm$	$\sim 0.1\%$	$\sim 0.2\%$	
$k^+k^-\pi^+\pi^-$	$\sim 0.07\%$	$\sim 0.05\%$	
$\pi^+\pi^-$ 或 k^+k^-	$0.13\pm 0.05\%$	$<0.027\%$	$<0.027\%$
JY	$<0.5\%$		$3.6\pm 0.7\%$

DESY[31][32][35]

f	3.439 Gev	3.515 Gev	3.407 Gev (或3.351 Gev)	3.507 Gev (或3.258 Gev)	2.75 Gev
$\pi^+\pi^-$		$\sim 0.02\%$			
k^+k^-	$\sim 0.02\%$				
J γ			$\sim 1.5\%$	$\sim 4 \pm 2\%$	
$\gamma\gamma$				$< 1.3 \times 10^{-5}$	$< 3.7 \times 10^{-4}$

附表四 J(3095)辐射衰变中看到的新粒子

(1) $J \rightarrow X\gamma \rightarrow P\bar{P}\gamma$ (DESY)[35] 看到两个事例 m_x 在 2.8 Gev 左右
(2) $J \rightarrow X\nu \rightarrow 3\gamma$ (DESY-Heidelberg) 和 (DASP)(33)(34) 扣除本底后有十六个事例, 质量 m_x 为 2.75 Gev 且有: $\frac{J \rightarrow X\gamma}{J \rightarrow \eta\gamma} \cdot \frac{X \rightarrow 2\gamma \text{ 分支比}}{\eta \rightarrow 2\gamma \text{ 分支比}} \sim 1$ $\frac{J \rightarrow X\gamma}{J \rightarrow \text{所有}} \cdot \frac{X \rightarrow 2\gamma}{X \rightarrow \text{所有}} \sim 1.5 \times 10^{-4}$

附表五 e^+e^- 在 J(3.1) 及 3.0 Gev 处的 $n\pi$ 态产生与 μ 对产生截面比值的比较 [SLAC[76][30]]

$n\pi$ 态	$\pi^+\pi^-\pi^0$	$2\pi^+2\pi^-$	$2\pi^+2\pi^-\pi^0$	$3\pi^+3\pi^-$	$3\pi^+3\pi^-\pi^0$
$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow J \rightarrow n\pi)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow J \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ / $\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow n\pi, 3.0 \text{ Gev})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-, 3.0 \text{ Gev})}$	> 3.5	0.82 ± 0.22	> 5.2	1.10 ± 0.54	> 4.5

附表六 $\phi(4.1)$ 及 $\phi(4.4)$ 的性质 [77]

- e^+e^- 对撞在 3.9—4.1 Gev 间有复杂的结构, 可能有几个共振。
- $\phi(4.4)$ 的性质:

$M = 4414 \pm 7 \text{ Mev}$
$\Gamma = 33 \pm 10 \text{ Mev}$
$\Gamma[\phi(4.4) \rightarrow e^+e^-] = 440 \pm 140 \text{ ev}$

参 考 资 料

- [1] J. H. Christenson et al. PRL 25 (1970)1523.
- [2] 丁肇中教授1975年11月在北京的学术报告.
- [3] J. J. Aubert et al. PRL 33 (1974)1404.
- [4] J. E. Augustin et al. PRL 33 (1974)1406.
- [5] C. Bacci et al. PRL 33 (1974)1408,1649.
- [6] 刁成、卞震、李綜, 科学通报 20 (1975)28.
- [7] 刁成、章燕、李綜, 科学通报 20 (1975)32.
- [8] 卞震、李綜、梁疏, 科学通报 20 (1975)35.
- [9] B. Knapp et al, PRL 34 (1975)1044.
- [10] G. J. Blunar et al. PRL 35 (1975)346.
- [11] A. J. S. Smith et al. 的实驗, 丁肇中教授1975年11月在北京的学术报告中介紹过.
- [12] F. W. Büsser et al PL 56B (1975)482.
- [13] W. Braunschweig et al. PL 53B (1975)393.
- [14] D. E. Andrews et al. PRL 34 (1975)231.
- [15] B. Gittelman et al. PRL 35 (1975)1616.
- [16] B. Gittelman, 在 SLAC 輕子-光子会上的报告.
- [17] J. F. Martin et al. PRL 34 (1975)288.
- [18] U. Camerini et al. PRL 35 (1975)483.
- [19] J. T. Dakin et al. PL 56B (1975)405.
- [20] B. Knapp et al. PRL 34 (1975)1040.
- [21] G. S. Abrams et al. PRL 33 (1974)1433
- [22] L. Criegee et al PL 53B (1975)489
- [23] J. E. Augustin et al PRL 34 (1975)764
- [24] R. F. Schwitters, 在 SLAC 輕子-光子会上的报告.
- [25] F. J. Gilman, 在 SLAC 輕子-光子会上的报告. SLAC-PUB1650.
- [26] C. Bempord, 在 SLAC 輕子-光子会上的报告.
- [27] B. Esporsito et al. PL 58 B (1975)478.
- [28] C. Bacci, et al. pL 58 B (1975)481.
- [29] A. M. Boyarski et al. PRL 34 (1975)762.
- [30] A. M. Boyarski et al SLAC-PUB-1599, LBL-3897.
- [31] B. H. Wiik, 在 SLAC 輕子-光子会上的报告
- [32] W. Braunschweig et al. PL 57B (1975)407.
- [33] J. Heintze, 在 SLAC 輕子-光子会上的报告.
- [34] J. Heintze. DESY 75/34.
- [35] B. H. Wiik, DESY 75/37.
- [36] G. J. Feldman, 在 SLAC 輕子-光子会上的报告.
- [37] G. J. Feldman et al. PRL 35 (1975)821.

- [38] W. Tanenbaum et al. PRL 35 (1975)1323.
[39] E. G. Cazzoli et al. PRL 34 (1975)1125.
[40] 中国科学院原子能研究所云南站, 物理, 1(1972)54.
[41] K. Niu et al. Prog. Theor. Phys. 46 (1971)1644.
[42] M. L. Perl et al. SLAC-PUB-1626, LBL-4228.
[43] A. Benvenuti et al. PRL 34 (1975)597.
[44] A. Benvenuti et al. PRL 34 (1975)419.
[45] B. C. Barish, Report to Inter. Conf. on Neutrino Phys.
[46] CERN Courier 4 (1975)103.
[47] A. M. Boyarski et al. PRL 35 (1975)195.
[48] C. Baltay et al. PRL 34 (1975)1118.
[49] H. Deden et al. PL 58 B (1975)361.
[50] J. J. Aubert et al. PRL 35 (1975)416.
[51] E. J. Bleaser et al. PRL 35 (1975)76.
[52] A. M. Boyarski et al. PRL 34 (1975)1357.
[53] V. Lüth et al. PRL 35 (1975)1124.
[54] F. J. Gilman, SLAC-PUB-1600.
[55] G. S. Abrams et al. PRL 34 (1975)1181.
[56] E. Hilger et al. PRL 35 (1975)625.
[57] J. W. Simpson et al. PRL 35 (1975)699.
[58] G. S. Abrams 在 SLAC 輕子-光子会上的报告。
[59] W. Braunschweig et al. PL 56 B (1975)491.
[60] L. Criegee et al. DESY 75/32.
[61] W. Braunschweig et al. PL 53 B (1975)491.
[62] W. Braunschweig et al. PL 57 B (1975)297.
[63] W. W. Ash et al. Nuo. Cim. Letters 11 (1974)705.
[64] R. Baldini-celio et al. Nuo. Cim. Letters 11 (1974)711.
[65] G. Barbiellini et al. Nuo. Cim. Letters 11 (1974)718.
[66] C. Bacci et al. Nuo. Cim. Letters 12 (1975)269.
[67] R. Baldini-Celio et al. PL 58 B (1975)475.
[68] 北京基本粒子理论组: 1966年北京科学讨论会论文。
[69] J. E. Augustin et al. PRL 34 (1975)233.
[70] 朱重远, 物理学报 24 (1975)351.
[71] $J(3,1)$ 填低質量态, 它不能强衰变。 $\psi(3,7)$ 填入高質量态, 它与 $J(3,1)$ 及 2π 間为强作用, 但由于相空間小, 寬度也不大。
[72] G. S. Abrams et al. SLAC-PUB-1659, LBL-4293.
[73] M. K. Gaillard, B. W. Lee, L. L. Rosner, Rev. Mod. Phys. 47 (1975)277.
[74] R. Baldini-Celio et al. PL 58 B (1975)471.
[75] G. J. Feldmann, SLAC-PUB-1624.
[76] M. L. Perl, SLAC-PUB-1614.
[77] W. Tanenbaum SLAC-PUB-1722(1976).