

新发现的重粒子 $\Upsilon(9.5)$ 是什么性质的粒子

高 崇 寿
(北 京 大 学)

摘 要

本文讨论了最近发现的重粒子 $\Upsilon(9.5)$ 可能是什么类型的粒子,分析了五种可能性的实验鉴别判据。指出 Υ 是重光子、中间玻色子、层子与反层子束缚态、无价层子强子时 Γ_{ee} 将分别差几个数量级,因此不难在 e^+e^- 碰撞实验中鉴别出来。对于 Υ 是介子的色空间激发态和新层子反层子对的束缚态这两种情形,虽然 Γ_{ee} 量级相同,但是 Γ_{ee} 的数值和 Υ 与 Υ' 的 Γ_{ee} 的比例仍不相同,并且它们要求还存在的其它新粒子的质量,特别是所预言的弱衰变的重粒子的质量不同,都可以作为实验上鉴别这两种可能性的依据。本文还讨论了这五种可能性下 Υ 的主要衰变特征。

最近在质子打到原子核的高能反应实验中,观察 $\mu^+\mu^-$ 质量分布,发现在质量 9.5GeV 附近有一个峰^[1]。对实验结果的分析表明,很可能这是 $m = (9.44 \pm 0.03)\text{GeV}$ 和 $m = (10.17 \pm 0.05)\text{GeV}$ 的两个矢量粒子(都称为 Υ)。如果 Υ 粒子确实存在,它是什么性质的粒子就需要首先弄清楚。

在本文中,我们讨论 Υ 粒子本性的几种重要可能性,着重讨论如何可以从进一步的实验中检验 Υ 粒子的本性。对于比较间接的和进一步的理论探讨暂不展开,因为这些工作可以留待实验上对 Υ 的本性有了倾向性的估计之后再深入进行。

我们首先考察 Υ 不是强子的情形。对于

$$\Upsilon \rightarrow \mu^+ + \mu^-, e^+ + e^-, \tau^+ + \tau^-,$$

衰变宽度为

$$\Gamma = \frac{g^2 m_\Upsilon}{4\pi \cdot 3}$$

如果 Υ 是重光子, $g = e$, 这时

$$\Gamma \approx 23 \text{ MeV},$$

本文1977年11月5日收到。

这个结果是完全确定的。如果 γ 是中间玻色子, g 是半弱相互作用耦合常数, 我们利用带电弱流耦合常数 G 来估计 g 的量级

$$\frac{G}{\sqrt{2}} \sim g^2 \frac{1}{m_\gamma^2},$$

得到

$$\Gamma \sim 0.18 \text{ MeV},$$

它比重光子的情形要小两个量级, 区别是明显的。

如果 γ 是重光子, 值得强调的有以下几点:

1. γ 到轻子对的衰变宽度对于每一个道都约为 23 MeV, 这比已知的中性矢量介子要大了约四个量级, 这是一个很强的特征。在 e^+e^- 对撞实验中 γ 峰将表现出有很大的积分截面。

2. 考虑到至少有三个轻子对道, γ 的总宽度至少有 70 MeV。它和矢量介子的不同在于衰变产物中应可看到很大分支比的轻子对。

3. 在强子碰撞中 γ 不需要成对产生。

4. 在 $\gamma \rightarrow$ 强子的衰变中, 不显示出 γ 有确定的同位旋, G 宇称等强子的量子数。

5. 从现有理论观点出发, 并未要求有两个 γ 粒子存在。

如果 γ 是中间玻色子, 值得注意的有以下几点:

1. γ 轻子对的衰变宽度对于每一个道都约为 0.18 MeV, 这比已知的中性矢量介子要大了约两个量级, 特征性也是很强的。在 e^+e^- 对撞实验中 γ 峰也将表现出有很大的积分截面。

2. 考虑到至少有三个带电轻子对道和三个中微子对道, 还有强子衰变道, γ 的总宽度至少为 1 MeV 量级。它和矢量介子的不同在于衰变产物中应可看到较大分支比的带电轻子对, 同时还有大体相同的分支比衰变到末态很难观察的中微子反中微子道 ($\nu_e \bar{\nu}_e, \nu_\mu \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau \bar{\nu}_\tau$)。

3. 对于重光子情形讨论的 3、4、5 三点, 对于中间玻色子情形完全相同。

利用上述讨论, 在对 γ 的性质进一步在实验中观察后, 不难明确判断 γ 是或不是重光子和中间玻色子。

三

如果 γ 是强子, 很可能是新的中性矢量介子。强子是直接参予强相互作用的粒子。在 J, ϕ 等新粒子发现后, 人们已经看到在某些强作用过程中 (例如 Zweig 禁戒的强衰变过程中), 有效耦合常数被大大压低, 甚至被压低到与电磁相互作用量级相近。因此不能根据有效耦合常数的量级来判断是否是强作用过程 (当然如果有效耦合常数很大还可估计为强作用过程)。强相互作用与电磁相互作用 (以及弱相互作用) 的严格定性区分是强相互作用满足更高的对称性, 有更多的守恒定律, 如熟知的同位旋, 奇异数, G 宇称等。所以 γ 是强子的判定性依据是观察 γ 衰变成强子时, 是否显示出 γ 有确定的同位旋, G 宇称等强相互作用量子数。

如果 Y 是强子, 它的具体性质还取决于模型. 主要要考虑的是以下三类可能性:

1. Y 是过去已知的介子的色空间激发态.

2. Y 是某种新层子 b 和 \bar{b} 的束缚态.

3. Y 是没有价层子和价反层子的强子. 我们下面分别对这三种可能性的主要特征进行讨论:

1. Y 是介子的色空间激发态

尽管在理论上色空间的概念早已引入, 但是在较低能量范围还没有观察到色激发态的强子存在迹象. 理论上也要求色激发态如存在, 质量应较高. Y 的质量很高, 符合理论上的这一要求.

如果 Y 是色激发态, 由于它可衰变到 $\mu^+\mu^-$, 不同色的层子电荷应不完全相同. 这样层子电荷不能取 Gell-Mann 方案, 可取的方案中最值得注意的是整数电荷方案.

在另一工作^[2]中, 我们讨论了层子具有整数电荷的 $SU(4) \times S_3^c$ 模型中把 Y 分类为介子色激发态的可能性. 所得的结果对于色空间是 $SU(3)$ 的模型都还保持, 只不过 $SU(4) \times SU(3)$ 模型预言的同时存在的色激发态有八族, 比 $SU(4) \times S_3^c$ 模型多了六族. 考虑到每一族至少应包含十六个赝标介子和十六个矢量介子. $SU(4) \times SU(3)$ 模型要求存在有待发现的新粒子太多了, 并且多的六族粒子都不是色中性的, 它们将表现出许多新的性质. 实验上区分色空间对称性是 S_3^c 还是 $SU(3)$, 则是实验证实色激发态确实存在之后进一步研究的问题.

如果 Y 是矢量介子的色激发态, [2] 中已给出的主要讨论为 (有关符号参看 [2, 3]):

(1) 可以和 $\mu^+\mu^-$ 耦合的色激发基态有三个: $\omega(\tilde{\varphi})$, $\varphi(\tilde{\varphi})$, $J(\tilde{\varphi})$. 实验上看到的 Y 应是这三个态 (和它们的径向激发态) 的合效果. 它们的质量差约为 $\varphi(\tilde{\varphi}) - \omega(\tilde{\varphi}) \approx 0.02\text{GeV}$, $J(\tilde{\varphi}) - \omega(\tilde{\varphi}) \approx 0.46\text{GeV}$. 考虑到 $\varphi(\tilde{\varphi})$ 和 $\omega(\tilde{\varphi})$ 质量接近, 在分辨率不很高的实验中, 可能实际看到的是两个峰, 两个峰的质量约差 0.45GeV 左右. 这和最近关于 Y 的实验结果是很好符合的, 实验初步定出的两个峰的距离也和上述预言基本符合.

(2) Y 峰所包含三个态 $\omega(\tilde{\varphi})$, $\varphi(\tilde{\varphi})$, $J(\tilde{\varphi})$ 到 e^+e^- (或 $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$) 的部分宽度和 e^+e^- 对撞产生时的积分截面预言值分别为:

	$\Gamma_{ee} \propto Q_{\text{eff}}^2$		$\Gamma_{ee} \propto Q_{\text{eff}}^2 m^{-0.11}$	
	$\Gamma_{ee}(\text{KeV})$	$\int \sigma_T dE (\text{MeV} \cdot \text{nb})$	$\Gamma_{ee}(\text{KeV})$	$\int \sigma_T dE (\text{MeV} \cdot \text{nb})$
$Y_\omega = \omega(\tilde{\varphi})$	5.2	~ 1330	4.1	~ 1050
$Y_\varphi = \varphi(\tilde{\varphi})$	2.6	~ 660	2.05	~ 520
$Y_J = J(\tilde{\varphi})$	2.6	~ 600	2.04	~ 470

其中右边的预言公式取自 [4] 中的唯象分析. 在 [4] 中利用

$$\Gamma_{ee} = \frac{16}{3} \pi \frac{\alpha^2 Q_{\text{eff}}^2}{m^2} |\psi(0)|^2$$

对 ρ , ω , φ , J 的 $|\psi(0)|^2$ 进行唯象分析, 利用 Γ_{ee} 实验值得到 $|\psi(0)|^2$ 对质量的幂次依赖

关系为 $|\psi(0)|^2 \propto m^n$, $n = 1.89 \pm 0.15$, 代入得 $\Gamma_{ee} \propto Q_{\text{eff}}^2 m^{-0.11}$. 从表中列出的值来看, Γ_{ee} 的值比 Υ 是重光子和中间玻色子情形的预言值要分别小四个和两个数量级, 差别是明显的.

(3) 伴随 $\Upsilon_\omega, \Upsilon_\phi, \Upsilon_J$ 还应存在的 $\bar{\phi}$ 族和 $\bar{\rho}$ 族赝标介子十六重态和矢量介子十六重态质量都在 9—10 GeV 附近. 这些粒子如在实验中被发现将是对 Υ 是色激发态方案的判定性检验.

(4) $\Upsilon_\omega, \Upsilon_\phi, \Upsilon_J$ 以及其它 $\bar{\phi}$ 族粒子和 $\bar{\rho}$ 族粒子的衰变行为在[2]中都进行了讨论. 特别是多数赝标 $\bar{\rho}$ 族粒子将表现为弱衰变粒子, 其特征性是明显的.

对于这一可能性的具体讨论参看[2].

2. Υ 是新层子 b 和 \bar{b} 的束缚态

如果只引入一种新层子 b , 则基态可以和 $\mu^+\mu^-$ 直接耦合的只有一个态. 如果 Υ 确实是两个粒子, 则只能解释为较高质量的态是径向激发态, 正如对 $\psi(3684)$ 和 $J(3098)$ 的讨论相类似.

如果 Υ 是 $b\bar{b}$ 的矢量束缚态的基态, $\Upsilon \rightarrow e^+e^-$ 衰变宽度 Γ_{ee} 和 e^+e^- 对撞产生 Υ 的积分截面值分别应为:

	$\Gamma_{ee} \propto Q_{\text{eff}}^2$		$\Gamma_{ee} \propto Q_{\text{eff}}^2 m^{-0.11}$	
	$\Gamma_{ee}(\text{KeV})$	$\int \sigma_T dE(\text{MeV} \cdot \text{nb})$	$\Gamma_{ee}(\text{KeV})$	$\int \sigma_T dE(\text{MeV} \cdot \text{nb})$
$Q_b = \frac{2}{3}$	5.2	~1330	4.1	~1050
$Q_b = -\frac{1}{3}$	1.3	~330	1.0	~260

它们和色激发方案给出的预言量级相同, 其中 $Q_b = \frac{2}{3}$ 时预言值比 $Q_b = -\frac{1}{3}$ 时相应的大四倍. 但是即使 $Q_b = \frac{2}{3}$, 其预言值也比色激发方案预言的值小. 因为在色激发方案中, Υ 由 $\Upsilon_\omega, \Upsilon_\phi, \Upsilon_J$ 三个态组成, Γ_{ee} 是三个态之和. 即使是只考察 Υ 的两个峰中质量较低的一个峰, 它也应是 Υ_ω 和 Υ_ϕ 之和, 它的预言值也是新层子束缚态方案 $Q_b = \frac{2}{3}$ 情形预言值的 1.5 倍.

如果 Υ 是 $b\bar{b}$ 矢量介子, 简记作 $\Upsilon = b\bar{b}(1^-)$. 按 $SU(3)$ 分类方案还应存在 $u\bar{b}(1^-)$, $d\bar{b}(1^-)$, $s\bar{b}(1^-)$, $c\bar{b}(1^-)$, $u\bar{b}(0^-)$, $d\bar{b}(0^-)$, $s\bar{b}(0^-)$, $c\bar{b}(0^-)$ 和它们的反粒子以及主要成分为 $b\bar{b}(0^-)$ 的态. 它们的质量按质量平方关系计算分别约为:

	I		II	
	$m_0-(\text{GeV})$	$m_1-(\text{GeV})$	$m_0-(\text{GeV})$	$m_1-(\text{GeV})$
$u\bar{b}, d\bar{b}$	6.65	6.70	5.19	5.22
$s\bar{b}$	6.67	6.71	5.28	5.30
$c\bar{b}$	6.91	6.95	6.25	6.27
$b\bar{b}$	9.41*	6.44(输入)	9.43*	9.44(输入)

* $0-b\bar{b}$ 态是假定其为纯 $b\bar{b}$ 态的质量.

其中 I 和 II 是两种公式计算的结果. 令 m_{ik} 为由 i 层子与 k 反层子组成的粒子质量, J 为粒子的自旋. I 是按公式^[5]

$$m_{ik}^2 = D_i + D_k - C_J$$

计算的结果. 这就是考虑了自旋分裂的“味”无关性后按通常 $SU(5)$ 一级破坏给出的公式. II 是按公式^[5]

$$m_{ik}^2 = (M'_i + M'_k)^2 - A_J^2 + \frac{3}{2} \omega_\rho \left(\frac{A_J}{A_i} \frac{(M'_i + M'_k)}{2M'_u} \right)^{\frac{1}{2}}$$

计算给出的结果. 这个公式是在层子模型中对层子间相互作用作适当假定后导出的, 它给出的结果对已发现的 $SU(4)$ 多重态符合较好. 这两个公式中出现的参数取值及其物理意义参看[5].

从上表可以看出, 预言的非中性粒子质量都明显低于 Υ 粒子. 这是和色激发方案的明显不同. 值得注意的是 $u\bar{b}(0^-)$, $d\bar{b}(0^-)$, $s\bar{b}(0^-)$ 和 $c\bar{b}(0^-)$ 都只能通过弱相互作用衰变. 因此实验上去找寻重的弱衰变粒子并测定其质量对于区分这两种可能性是十分重要的.

3. Υ 是没有价层子和价反层子的强子

在现有强子结构理论中, 常常要求存在一些没有价层子 (和价反层子) 的强子. 其中主要的是以下两类:

- (1) 层子模型中引入的胶子;
- (2) 高能多重产生理论中和 Regge 极点理论中引入的真空的激发态.

由于在不同理论中引入的无价层子强子性质很不相同, 难于一一作具体讨论. 我们仅讨论一种可能性较大的典型情况.

Υ 可以衰变到 $\mu^+\mu^-$, 这衰变过程至少是二级电磁作用过程. Υ 又是无价层子 (和价反层子) 的中性粒子, 它不能通过直接顶点变成光子, 而只能通过层子反层子对中间态. 它最大可能是一个中性矢量粒子, 因为只有中性矢量粒子衰变到 $\mu^+\mu^-$ 是通过二级电磁作用, 而其它自旋宇称的中性粒子至少要通过四级电磁相互作用. 我们考察 Υ 是中性矢量粒子的情形.



图 1

$\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$ 衰变的过程可以用图 1 描写. 中间态的层子反层子对实际应表现为矢量介子 ω, φ, J . 矢量介子与光子的直接顶点可表为

$$Q_V e f(V) V_\mu A_\mu$$

$f(V)$ 是有效耦合常数中扣除介子 V 与光子耦合的有效电荷后剩下的部分, 它和介子的波函数零点值相联系. 矢量介子的 e^+e^- 衰变给出

$$|f(V)|^2 \propto m_V^3 \text{ (或 } m_V^{2.89[4]}),$$

我们可写作

$$f(V) = f m_V^{3/2}.$$

由于 Υ 是没有价层子反层子的强子, 它和矢量介子的耦合应与矢量介子和光子的耦合结构相同, 故可写为

$$g_V f m_V^{3/2} V_\mu Y_{\mu 3}$$

其中 g_V 为矢量介子 V 的有效“强”荷。SU(4) 对称性要求 $\frac{1}{\sqrt{2}} g_\omega = g_\phi = g_J = g$ ，由此

得到 $Y\gamma$ 的等效耦合常数为：

$$\frac{\sqrt{2} g Q_\omega e f^2 m_\omega^3}{m_Y^2 - m_\omega^2} + \frac{g Q_\phi e f^2 m_\phi^3}{m_Y^2 - m_\phi^2} + \frac{g Q_J e f^2 m_J^3}{m_Y^2 - m_J^2}$$

考虑到 $m_Y^2 \gg m_\omega^2, m_\phi^2$ ，上式近似为

$$\frac{g e f^2}{m_Y^2} \left(\sqrt{2} Q_\omega m_\omega^3 + Q_\phi m_\phi^3 + Q_J m_J^3 \frac{1}{1 - \frac{m_J^2}{m_Y^2}} \right)$$

考虑到 $Q_\omega^2: Q_\phi^2: Q_J^2 = 1:2:8$ ，且 $m_\omega^2, m_\phi^2 \ll m_J^2$ ，实际上前两项的贡献比后一项小得多，即只要考虑 J 的贡献。即等效耦合常数为

$$\frac{g e f^2 Q_J m_J^3}{m_Y^2 - m_J^2}$$

由此得到

$$\begin{aligned} \Gamma(Y \rightarrow e^+e^-) &= \Gamma(Y \rightarrow \mu^+\mu^-) = \Gamma(Y \rightarrow \tau^+\tau^-) \\ &\approx \alpha \left(\frac{g e f^2 Q_J m_J^3}{m_Y^2 - m_J^2} \right)^2 \frac{1}{3m_Y^2} \end{aligned}$$

但考虑到

$$\Gamma(J \rightarrow e^+e^-) = \frac{1}{3} \alpha Q_J^2 f^2 e^2,$$

代入后得

$$\Gamma(Y \rightarrow e^+e^-) \approx \Gamma(J \rightarrow e^+e^-) \frac{g^2 f^2 m_J^6}{m_Y^2 \left(1 - \frac{m_J^2}{m_Y^2} \right)^2}$$

可以对 $g^2 f^2$ 的上限作出估计。因为在 $J \rightarrow \rho\pi$ 的过程中 $J \rightarrow Y \rightarrow \rho\pi$ 过程是有贡献的， $J \rightarrow \rho\pi$ 的等效耦合常数为

$$g f m_J^{3/2} \frac{1}{m_J^2 - m_Y^2} f_{Y\rho\pi}$$

由此得到对 $\Gamma(J \rightarrow \rho\pi)$ 的贡献为

$$\begin{aligned} &\frac{f_{Y\rho\pi}^2}{4\pi} g^2 f^2 \frac{m_J^6}{24} \frac{1}{(m_Y^2 - m_J^2)^2} \\ &= g^2 f^2 \Gamma(Y \rightarrow \rho\pi) \frac{m_J^6}{m_Y^3} \frac{1}{(m_Y^2 - m_J^2)^2} \end{aligned}$$

由此得到

$$\frac{g^2 f^2 m_J^6}{m_Y^3 (m_Y^2 - m_J^2)^2} < \frac{\Gamma(J \rightarrow \rho\pi)}{\Gamma(Y \rightarrow \rho\pi)}$$

即

$$\Gamma(Y \rightarrow e^+e^-) \Gamma(Y \rightarrow \rho\pi) < \Gamma(J \rightarrow e^+e^-) \Gamma(J \rightarrow \rho\pi).$$

这个不等式是 Y 为无价层子中性矢量粒子所要求的。如果我们要求作为强作用的 $Y\rho\pi$ 顶

点耦合常数大于电磁作用参予的 $\gamma\rho\pi$ 顶点, 则又要求

$$\Gamma(Y \rightarrow \rho\pi) > \left(\frac{m_Y}{m_\rho}\right)^3 \Gamma(\rho \rightarrow \pi\gamma)$$

这样得出 $\Gamma(Y \rightarrow e^+e^-)$ 上限也比普通矢量介子小约五个数量级, 很容易从 Γ_{ee} 的量级和其它可能性区分开来. 同时可以看到, 这么小的 Γ_{ee} 使 Y 在 e^+e^- 对撞中实际上很难观察到, 而只能在强作用产生时才有可能观察到.

四

在上面我们讨论了 Y 的五种可能性. 分析表明, 这五种可能性下所给出的预言是很不相同的, 通过进一步的实验可以对 Y 究竟属于什么类型的粒子作出判断. 首先需要作 e^+e^- 对撞实验, 观察 Γ_{ee} (即积分截面) 值, 这样从量级上就可基本作出判断 (色激发和新层子束缚态这两可能性量级一样). 进一步观察 Y 峰是由几个峰组成, 它们之间质量差以及各峰分别的积分截面值, 则可有助于把色激发和新层子束缚态这两种可能性进一步区分开来. 此外找到所予言的重弱衰变粒子对于验证这两种可能性是带有判定性的, 这方面的实验值得充分重视.

参 考 资 料

- [1] S. W. Herb et al., *Phys. Rev. Letters*, **39**(1977), 252.
- [2] 高崇寿, $SU(4) \times S_3^a$ 层子模型方案和新发现的中性重矢量粒子, (待发表).
- [3] 北京大学物理系基本粒子理论组, 高能物理与核物理, **1** (1977), 41.
- [4] J. D. Jackson, *Proceedings of Summer Institute on Particle Physics*, SLAC Report 198(1976), 147.
- [5] 高崇寿, 不同质量层子与反层子的 Bethe-Salpeter 方程和介子的 $SU(4)$ 质量关系, (待发表).

WHAT IS THE NATURE OF THE NEWLY DISCOVERED HEAVY PARTICLE $\Upsilon(9.5)$

GAO CHUNG-SHOU
(Peking University)

ABSTRACT

In this paper, we discuss the nature of the newly discovered heavy particle $\Upsilon(9.5)$. Five possibilities of experimental criteria are analysed. We show that if Y is a heavy photon, an intermediate boson, a bound state of straton-antistraton or a hadron without valence stratoms, and all the Γ_{ee} will differ by several orders of magnitude and can therefore be discriminated easily in e^+e^- collision experiments. The width value Γ_{ee} and its ratio of Y to Y' are not identical for the case of colour excited states of meson and the case of bound states of the new straton-antistraton. The masses of other existing new particles can also be predicted. In particular, the masses of weakly decaying heavy particles are not the same for these two cases, which may be regarded as a criterion to discriminate between these two cases. We have also discussed the main decaying properties of Y for these five possibilities.