

# 谈谈新粒子谱

## —— $\eta'_c$ 和胶子球的发现

黄

涛

提起新粒子，人们一定会想到  $J/\psi$  粒子。1974年  $J/\psi$  粒子发现以前，粒子物理学家正陶醉于  $SU(3)$  对称性分类成功， $J/\psi$  粒子的发现揭示出物质世界中除了已知的普通强子外，还存在一种性质很不相同的粒子，大家称它为新粒子。普通强子是由  $u$ （上层子）、 $d$ （下层子）、 $s$ （奇异层子）组成的，而  $J/\psi$  粒子无法从  $u$ 、 $d$ 、 $s$  来解释。一系列的实验事实告诉人们  $J/\psi$  粒子是由一种新的层子  $c$ （粲层子）组成的。可以毫不夸张地说  $J/\psi$  粒子的发现揭开了基本粒子物理学的一个新篇章。在那以后，人们不仅发现了  $J/\psi$  粒子一个家族，而且还发现了其它新的家族。例如  $\Upsilon$  粒子家族，它是由底层子  $b$  构成的；在轻子家族中还发现了重轻子（ $\tau$  轻子）。这样，考虑到层子的味（ $u$ 、 $d$ 、 $s$ 、 $c$ 、 $b$ ）和颜色（红、黄、蓝）以及反层子，共有三十种；而对于轻子族来讲有  $e$ 、 $\mu$ 、 $\tau$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_e$ 、 $\nu_\tau$  以及它们的反粒子共有十二种。人们可以预测还可能存在更多的新粒子有待实验上不断地发现；不仅如此，实验上还可能揭示出新的标度，在那样的标度范围内将揭示出层子和轻子也不是基本的，也有它们的内在结构。

这里，首先谈谈老的新粒子  $J/\psi$  的家谱，最近发现的  $\eta'_c$  就是属于这个家族的（见图 1）。大家知道  $J/\psi$  粒子是由  $c$  层子和反  $c$  层子组成的自旋为 1、宇称为负的矢量粒子，两个自旋为  $1/2$  层子除了可以组自旋为 1 的矢量粒子外还可以由  $(cc\bar{c})$  组成赝标介子（自旋为零，宇称为负） $\eta_c$ 。实验上还揭示出  $J/\psi$  的径向激发态  $\psi'$ （至于  $\psi''$  有人解释它为径向激发态，也有人解释它为轨道角动量  $D$  波激发态），还有轨道角动量为  $P$  波的激发态  $\chi$ 、 $\chi'$ 、 $\chi''$ ，其自旋、宇称、 $c$  宇称分别为  $0^{++}$ 、 $1^{++}$ 、 $2^{++}$ 。近来，在 Spear 上的水晶球实验组发现的  $\eta'_c$ ，它是  $\eta_c$  的径向激发态。其质量为

$$m_{\eta'_c} = (3592 \pm 5) \text{ MeV}$$

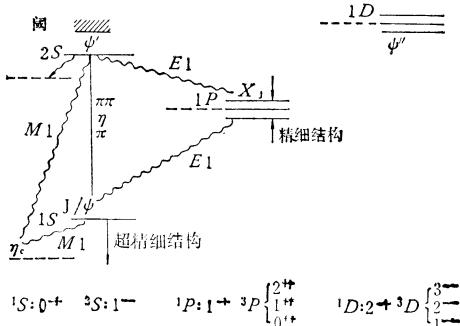


图 1

它与  $\psi'$  的质量差为

$$m_{\psi'} - m_{\eta'_c} = (92 \pm 5) \text{ MeV}$$

其宽度大约小于 9 MeV。它是从  $\psi'$  的衰变中发现的（见图 2）， $\psi' \rightarrow r + \eta'_c$ ，其衰变分枝比为  $(0.3-1.2)\%$ 。由于分枝比很小，还缺乏足够的数据确认它是  $\eta'_c$  粒子，人们相信它是  $J/\psi$  家族中的一个新成员。

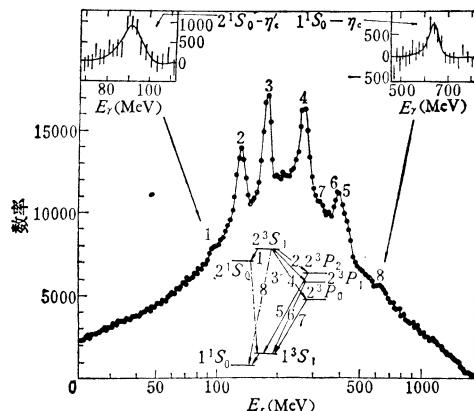


图 2

其次谈谈  $\Upsilon$  粒子家谱。它的家谱远没有粲粒子家谱清楚。然而由于  $\Upsilon$  粒子是由较重的  $b$  层子构成的； $b$  层子的质量大约在  $4-5 \text{ GeV}$ ，因此  $b$  层子在  $\Upsilon$  粒子内部的运动可以用一个势模型来处理，对于量子色动力学相互作用提供一些有价值的信息。在  $\Upsilon$  粒子家族中，相继发现了它的径向激发态  $\Upsilon'$ 、 $\Upsilon''$ 、 $\Upsilon'''$ （见图 3），它们衰变为正、反轻子对的宽度与静止势模型。理论预言是一致的。此外，它们可以通过发射  $\pi$  介子而衰变到  $\Upsilon$  粒子。

$$\Upsilon' \rightarrow \Upsilon + \pi\pi$$

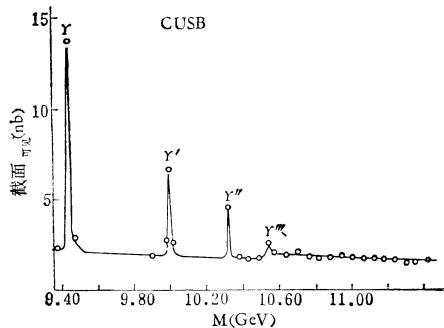
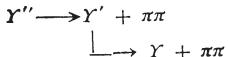


图 3



至于  $Y$  的第三个径向激发态也是  $B$  介子的工厂。按照 Kobayashi-Maskawa 模型,  $B$  介子将衰变为  $D$ 、 $F$ 、 $K$  介子, 这是由于  $b$  层子的衰变链  $b \rightarrow c \rightarrow s$ 。还有很重要的一点是  $Y$  粒子也是胶子素态的一个工厂。实验上明显地揭示出  $Y$  粒子衰变产物中存在着三个喷注, 三个喷注的角分布表明胶子的自旋是 1。理论上计算出  $Y$  粒子衰变为三个胶子的振幅,

$$\frac{\Gamma_{gg}}{\Gamma_{\mu\bar{\mu}}} = \frac{10(\pi^2 - 9)}{81\pi c_b^2} \cdot \frac{\alpha_s^3}{\alpha_s^2} \left( 1 + (9.1 \pm 0.5) \frac{\alpha_s}{\pi} + \dots \right)$$

它可以用来测量量子色动力学中“跑动”耦合常数  $\alpha_s$  的大小。实验结果导致

$$\alpha_s(M_Y^2) = 0.141 \begin{array}{l} + 0.009 \\ - 0.008 \end{array}$$

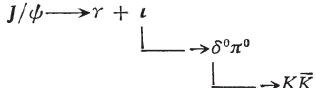
$$\Lambda_{\overline{MS}} = \left( 121 \begin{array}{l} + 44 \\ - 31 \end{array} \right) \text{MeV}$$

注意到公式中辐射修正是一个大值, 这样确定的  $\alpha$  和  $\Lambda$  不可能非常肯定, 但近似地来讲, 这个数值与其它实验分析是一致的。

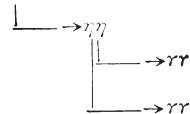
近两年来, 一个重要的理论和实验课题是寻找胶子球或胶子素。大家知道层子是带色的, 胶子是带色的, 它们不能单独存在, 但由两个胶子或三个胶子构成的束缚态却可以组成色单态, 我们称它们为胶子球, 对于两个胶子组成的色单态有时特称为胶子素。胶子素的研究可以从  $J/\psi$  粒子的辐射产物中寻找, 因为  $J/\psi$  的粒子自旋为 1、宇称为负、 $c$  宇称为负, 它可以衰变为三个胶子到强子终态; 它也可以衰变为一个光子、两个胶子, 两个胶子再变为强子终态。当  $J/\psi$  粒子辐射一个光子时, 两个胶子可以形成色单态道形成胶子素而衰变为强子。从理论上还估计了这样一个衰变道与  $J/\psi$  通过三个胶子衰变为强子之比应为  $\frac{36}{5} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_s} \sim 15\%$ , 其中  $\alpha = \frac{1}{137}$ ,  $\alpha_s$  是“跑”动耦合常数, 在  $J/\psi$  处,  $\alpha_s(m_\psi) \sim 0.3$ 。去年在 Spear 的水晶球实验组上精确地测量了  $J/\psi$  粒子的辐射衰变道, 由于水晶球实验设备测量光子的效率比较高, 不仅发现了  $\eta_c$ 、 $\eta'_c$  粒子, 而且有利于去寻找像胶子素这样的新粒子, 一共发现了两个新粒子可能是胶子素的候选者。一个在 1440 MeV 处, 称之为  $\epsilon$  (音约塔) (1440) 和  $\theta$  (1640)。 $\epsilon$  粒子的自旋为零、宇称为负、 $c$  宇称为正,  $0^{-+}$ , 其质量为

$$m_\epsilon = \left( 1440 \begin{array}{l} + 20 \\ - 15 \end{array} \right) \text{MeV}, \quad \text{宽度 } \Gamma = 70 \begin{array}{l} + 20 \\ - 30 \end{array} \text{ MeV},$$

其衰变过程为



它并不是  $E$  (1420) 介子, 从它的性质来看, 倾向于它是一个胶子素态。另一个新粒子态  $\theta$  (1640), 它也是在  $J/\psi$  的辐射衰变中发现的,



其终态是一个  $5\gamma$  态。 $\theta$  粒子的宽度大约是

$$(220 \begin{array}{l} + 100 \\ - 70 \end{array}) \text{ MeV},$$

其量子数尚未确定, 倾向于它的自旋、宇称、 $c$  宇称分别为  $2^{++}$ 。如果按口袋模型解释它为两个层子和两个反层子的束缚态, 其宽度又太窄了。通过  $QCD$  求和规则的分析, 很可能它是一个胶子素态。

此外, 在正、负电子散射过程中  $2\gamma$  物理实验上也揭示了一些新的结果。例如在  $2\gamma$  道里, 从电荷共轭为正的衰变道的准确测量表明可能存在  $2^{++}$  和  $0^{-+}$  共振态。在接近于  $\rho\rho$  阔处有一个明显的  $4\pi$  道衰变增强, 如果它是一个共振态, 其质量大约是 1.6 GeV。有人解释它为胶子球, 也有人解释它为两个层子和两个反层子的束缚态。然而它是不是一个共振态以及它属于什么类型的粒子, 至今未有定论。

对于  $J/\psi$  家族中  $D$  介子 (它是由粲层子与上层子或下层子组成的束缚态) 寿命的测量也得到了一个有趣的结果。大家知道, 从直观的旁观者模型可以获得一个结论:  $D^+$  介子的寿命与  $D^0$  介子的寿命相等, 即  $\tau(D^+) = \tau(D^0)$ 。可是实验上却给出十分不相同的结果  $\tau(D^+) \approx 10\tau(D^0)$ 。目前有迹象表明从实验和理论两方面向  $\tau(D^+) \approx 3\tau(D^0)$  靠拢。在  $Y$  粒子家族中,  $B$  介子 (由底层子与上、下层子组成的束缚态) 的发现以及它的各种衰变道的详细测量也已经开始得到了一些信息。

在轻子家族中, 在  $\tau$  重轻子发现以后, 并没有增加新成员。最近测得  $\tau$  轻子的寿命是

$$\tau_\tau = (4.9 \pm 1.8) \times 10^{-13} \text{ 秒}.$$

此值与理论结果是符合的。

几年来, 人们怀着极大的兴趣寻找新粒子, 除了上述的  $J/\psi$  家族、 $Y$  家族、轻子家族以外, 人们还在寻找其它类型的新粒子。例如, 层子除了  $u$ 、 $d$ 、 $s$ 、 $c$ 、 $b$  以外, 还有没有新的味道, 像顶层子  $t$ , 实验上是寻找  $t$  层子和反  $t$  层子组成的介子束缚态, 目前实验上告诉我们这样的介子如果它存在, 其能量大于 36 GeV; 轻子和层子存在一定的对称性, 除了电荷为 0、 $\pm 1$  的轻子外, 还有没有电荷为分数的轻子; 除了旋量轻子, 还有没有标量轻子; 如果轻子也是有结构的, 那么轻子应有它的轨道激发态和径向激发态; 此外, 人们还在寻

找理论上可预言的磁单极子、黑格斯粒子、轴子(Axion)轴子是在研究量子色动力学中提出的,因为在量子色动力学中存在一项,对应着强 CP(电荷共轭宇称和宇称的组合)破坏,从已有的中子电矩实验可知这一项的系数 $\theta$ 很小,理论上为了解释 $\theta$ 为什么这样小而引入了轴子,并预言轴子的质量很小,比 $\pi$ 介子的质量还要小。在近五年中,人们设计了各种实验在寻找它,目前在 SLAC 以及 CERN 都有实验在寻找轴子。

综上所述,可以见到在基本粒子这样小的微观世界中,新粒子谱愈来愈丰富,而且将会更加丰富。这些新粒子的发现将更深刻地揭示出粒子世界的本质的以及动力学机制。