

胶球研究现状

沈 齐 兴

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

本文介绍了有关胶球研究的现状, 重点介绍确认胶球的一些定性的判据以及实验上已发现的一些可能的胶球候选者。

一、引 言

七十年代初提出的量子色动力学 (QCD)^[1] 是目前已知的能较好地描述强相互作用的一种非 Abel 规范理论。由于它的非 Abel 性质, 使得理论中包含的八种规范玻色子——胶子之间存在自相互作用, 从而二个或多个胶子可以形成纯胶子束缚态——胶球 (有些作者把由二个胶子构成的色单态称为胶子偶素 [Gluonium], 而由多个胶子构成的色单态称为胶球 [Glueball], 在本文中我们将把它们统称为胶球)。因此, 如果实验上能确定胶球的存在, 这将不仅是对 QCD 理论的一个强有力的支持, 而且将是一类新型强子在实验上的发现。

按照夸克模型, 介子是正、反夸克构成的束缚态。用 S 表示正、反夸克的总自旋, l 表示它们之间的轨道角动量, J 表示总角动量, P 表示介子的空间宇称, C 表示电荷共轭宇称, 则有

$$P = (-1)^{l+1}, \quad C = (-1)^{l+s}. \quad (1)$$

因此, 由正、反夸克构成的介子可能具有的量子数 J^{PC} 列在表 1 中 (这里只给出 $l \leq 3$ 时的情况)。

表 1 介子 ($q\bar{q}$) 的量子数 J^{PC}

l	$S = 0$	$S = 1$
0	0^{-+}	1^{-+}
1	1^{+-}	$0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$
2	2^{-+}	$1^{-+}, 2^{-+}, 3^{-+}$
3	3^{+-}	$2^{++}, 3^{++}, 4^{++}$

对于由二个胶子构成的胶球, 我们类似地可以得到

$$P = (-1)^l, \quad C = (-1)^{l+s}. \quad (2)$$

而玻色对称性给出一个附加条件

$$l + S = \text{偶数}. \quad (3)$$

所以,二个胶子构成的胶球的电荷共轭宇称总是正的。因为胶子的自旋为 1,二个胶子的总自旋 S 可以取 0, 1 或 2。这样,由二个胶子构成的胶球可能具有的量子数 J^{PC} 列在表 2 中。

表 2 双胶子胶球的量子数

l	$S = 0$	$S = 1$	$S = 2$
0	0^{++}		2^{++}
1		$0^{-+}, 1^{-+}, 2^{-+}$	
2	2^{++}		$0^{++}, 1^{++}, 2^{++}, 3^{++}, 4^{++}$
3		$2^{-+}, 3^{-+}, 4^{-+}$	

对于由三个胶子构成的胶球,所有的量子数 J^{PC} 都是可能的。

比较表 1 和表 2, 我们发现,胶球的某些量子数(例如 1^{-+} 和 3^{-+}) 在表 1 中不出现。我们把具有这种量子数的胶球称为奇特态 (exotic state) 或怪球 (oddball)。因此,由二个胶子构成的胶球,有 1^{-+} 和 3^{-+} 等奇特态,而由三个胶子构成的胶球有更多的奇特态,例如 $0^{+-}, 0^{-+}, 1^{-+}, 2^{-+}, 3^{-+}$ 等等。后面我们将会谈到,由于奇特态具有的量子数的特殊性,它在胶球的研究中占有比较重要的地位。

需要说明的是,表 2 列出的胶球量子数是在胶子有质量的位势模型的基础上给出的。如果认为胶子无质量,则根据杨振宁定理^[2], $1^{-+}, 3^{-+}$ 这样的态将不存在。这样,在无质量胶子的位势模型中将不出现由二个胶子构成的奇特态。但是在无质量胶子的口袋模型中, 1^{-+} 和 3^{-+} 奇特态是存在的,它们作为激发态出现^[3]。

理论研究的这一成果促进了实验工作的迅速发展,从七十年代末开始,全世界有许多实验组开展了一系列和寻找胶球有关的实验工作。这类工作主要可以分成如下几个方面:

(1) 通过 J/ψ 粒子的辐射衰变过程产生胶球。主要有在美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) SPEAR 上工作的 Mark II、Crystall Ball 和 Mark III 实验组以及在法国 Orsay 的 DCI 上工作的 DM 2 组。这四个实验组已分别获得 1.3×10^6 , 2.2×10^6 , 5.8×10^6 和 8.7×10^6 个 J/ψ 事例。1984 年 10 月 7 日破土动工的北京正负电子对撞机 (BEPC) 已于 1988 年 10 月 16 日实现了首次对撞,目前已进入正常运行阶段,北京谱仪 (BES) 正在加紧搜集 J/ψ 事例,预计到 1991 年年底获得的 J/ψ 事例数可能将达到或超过上述四个实验组已获得的 J/ψ 事例数的总和。

(2) 通过 π 介子和质子的相互作用产生胶球。主要有美国布鲁克海文国立实验室 (BNL) 的 E 769 实验组、苏联 Serpukhov 高能加速器上工作的国际合作小组以及欧洲核子研究所 (CERN) 的一些实验组。

(3) 通过 pp 或 $\bar{p}p$ 相互作用寻找胶球。这主要有 BNL、CERN 和费米实验室 (FNAL) 的几个实验组。

(4) 此外,SLAC 的 LASS 组和 SLAC、DESY 工作的研究双光子过程的 CELLO,

TPC/ $\gamma\gamma$ 等实验组也在进行与胶球有关的研究工作。

1980年 Mark II 实验组首先在 J/ψ 辐射衰变过程中发现了一个新的共振态^[4], 并命名为 $\iota(1440)$ (现在改称 $\eta(1440)$), 它被认为是胶球的第一个候选者。从那以后, 实验上相继发现了 $\theta(1690)$ (现在称为 $f_2(1720)$)^[5]、三个 g_T 态^[6]、 $G(1590)$ (或称 $f_0(1590)$)^[7] 和 $\xi(2230)$ ^[8]。有人认为它们也可能是胶球的候选者。

二、胶球的确认

实验上取得的进展反过来又促进了理论研究工作的开展。位势模型^[9]、口袋模型^[10]、格点规范理论^[11]、QCD 求和规则^[12]以及等效拉氏量方法^[13]已成为研究胶球的最常用的方法。但是, 要完全确认一个胶球, 困难还是很多的, 主要原因有以下几点:

(1) 缺少对胶球质量、宽度、衰变方式等性质的精确的预言。尽管许多理论模型都预言了各种胶球的质量, 但是由于大部分理论

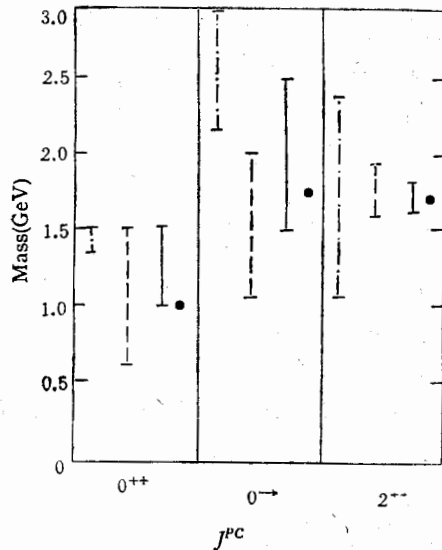


图 1

模型都包含不确定的参数 (例如格点规范计算给出的胶球质量依赖于弦张量 k 的取值; 口袋模型中包含参数 r_c , 它等于横电胶子自能与横磁胶子自能之比等等), 从而不能给出胶球质量的确定值。从结果看, 各种模型的预言也不完全一致, 甚至同一种模型也由于采用不同的计算方法而得到不同的结果。图 1 给出了四种理论模型对标量胶球 ($J^{PC} = 0^{++}$)、赝标胶球 ($J^{PC} = 0^{-+}$) 和张量胶球 ($J^{PC} = 2^{++}$) 质量的预言^[14], 其中点划线、虚线、实线和圆点分别表示格点规范理论、口袋模型、位势模型和 QCD 求和规则给出的预言。可以看到它们并不是完全一致的。

对于胶球的宽度更缺少了解, 有人估计胶球的宽度大约是 OZI 规则允许的强子衰

变宽度与 OZI 规则禁戒的强子衰变宽度的几何平均值, 从而得到胶球的宽度约为 10—50 MeV. (例如参看文献 [9] 中 D. Robson 一文)。但是也有作者对此估计提出了异议^[15]。

同样, 对于胶球衰变方式的研究也是很初步的, 甚至存在互不相容的观点。

(2) 除了由正、反夸克对构成的普通介子 ($q\bar{q}$) 以及由胶子构成的胶球 (gg 或 ggg) 外, QCD 理论还预言, 存在由二个夸克和二个反夸克构成的四夸克态 ($qq\bar{q}\bar{q}$) 以及由夸克和胶子构成的混合态 ($q\bar{q}g$ 或 $qqqg$ 等), 而且这四种不同种类的粒子的质量几乎都集中在 1—2.5 GeV 之间。因此, 为了从实验上区分出胶球, 往往需要大量的事例数来进行非常仔细的自旋—宇称分析, 从而给胶球的确认增加了难度。

(3) 具有相同量子数 J^{PC} 的各种粒子之间可能有混合, 这就更增加了辨认胶球的困

难。例如,按照 Lipkin 的观点^[46],胶球是 $SU(3)$ 的味单态,因此胶球的衰变方式应该是味对称的。但是,如果胶球内有 $(q\bar{q})$ 的混合,这种对称性将会破坏,从而不能把味对称的衰变方式作为是否是胶球的判别准则。

(4) 对普通 $(q\bar{q})$ 介子的研究还不完善。按照夸克模型,具有各种 J^{PC} 量子数的介子分别组成各种九重态,除了基态外还有径向激发态和轨道激发态,但是到目前为止还有许多九重态没有找到合适的粒子填充。这样,为了确认某个粒子是胶球,我们首先必须排除它填入 $(q\bar{q})$ 九重态的可能性。

由于上述困难,目前还没有一个区分出胶球的定量的准则,只存在一些定性的依据。根据这些判据,我们可以逐个讨论胶球的候选者,如果一个粒子能满足全部定性条件,那么这个粒子就有很大的可能是胶球,满足的条件越多,是胶球的可能性越大。下面我们给出判断一个粒子是否是胶球的定性的条件:

(1) 相应的 $(q\bar{q})$ 介子九重态已填满。

如果我们发现了一个新粒子,并测定了粒子的自旋 J , 空间宇称 P 、电荷共轭宇称 C 以及同位旋 I , 而具有相同 J^{PC} 量子数的 $(q\bar{q})$ 介子九重态(包括基态和激发态)中相应的位置已被填满,那么这个粒子有可能是胶球的候选者。

(2) 在有利于胶球产生的过程中能丰富地产生,而在不利于胶球产生的过程中很少产生。

有利于胶球产生的过程有如下三类:

(a) J/ψ 粒子的辐射衰变过程

$$J/\psi \rightarrow \gamma + X. \quad (4)$$

J/ψ 是 $J^{PC} = 1^{--}$ 的 $(c\bar{c})$ 束缚态,在最低阶它可以通过图 2 中表示的四种方式进行衰变,其中图 2(a) 表示通过三个胶子衰变成强子的强衰变过程;图 2(b) 表示通过一个虚光子衰变成强子的电磁衰变过程;图 2(c) 是我们所关心的辐射衰变过程;图 2(d) 表示 J/ψ 首先辐射衰变产生一个 η_c 粒子, η_c 再通过二个胶子衰变成强子。四种过程所占比例分别约为 75%, 16%, 8% 和 1%^[44]。 J/ψ 辐射衰变产生胶球和普通 $(q\bar{q})$ 介子

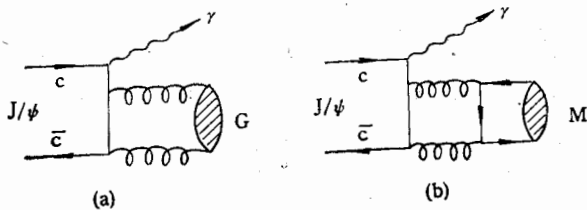


图 3

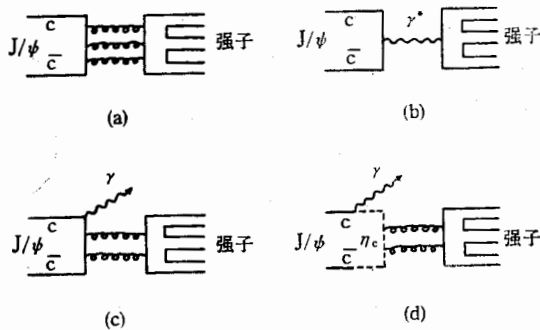


图 2

可以分别用图 3(a) 和图 3(b) 表示,数一下相互作用顶点我们就可得到一个初步的估计,即

$$\begin{aligned} \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma G) &\simeq O(\alpha\alpha_s^2), \\ \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma M) &\simeq O(\alpha\alpha_s^4), \end{aligned} \quad (5)$$

其中 G 代表胶球、 M 代表普通的 $(q\bar{q})$ 介子。所以,在 J/ψ 的辐射衰变过程中产生胶球的分支比

比产生普通 ($q\bar{q}$) 介子的分支比大。

QCD 的计算表明^[7], 对于 J/ψ 辐射衰变过程 (4), 终态 X 的量子数以 $J^{PC} = 2^{++}$ 、 0^{-+} 、 0^{++} 为主, 不管胶子是无质量的或有质量的都是如此。而从表 2 看到, 具有这些量子数的粒子正好是胶球的最低能态。所以, J/ψ 的辐射衰变过程是胶球能丰富产生的过程。这正是十多年来对 J/ψ 衰变的研究一直是一个热门课题的原因之一。

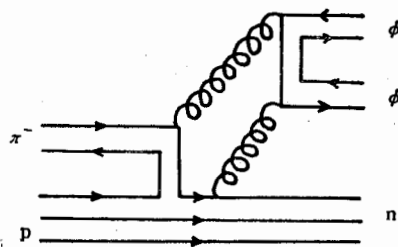


图 4

(b) OZI 规则禁戒的强子过程, 例如



我们知道, 过程 (6) 可以用图 4 来表示, 这是一个 OZI 规则禁戒的一次不连通图, 反应的截面相应于连通图应该被压低。所以, 如果我们发现反应截面没有压低, 这表明中间态有胶球产生。

(c) 中心产生过程, 例如



这个过程可以形象地用图 5 表示。

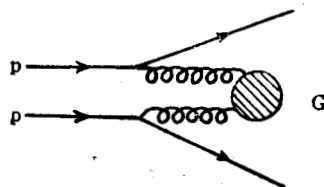


图 5

下面我们给出二类不利于胶球产生的过程:

(a) 双光子过程。

双光子过程是指如图 6 所表示的过程。由于胶子是电中性的, 不能直接参与电磁作用, 胶球参与电磁作用只有一种可能性, 即胶球内的胶子首先变成一对正、反夸克, 夸克再和光子发生作用, 这种几率是小的。因此, 如图 6 表示的胶球在双光子过程中的产生相对于 ($q\bar{q}$) 介子的产生一定被压低。

(b) 过程 $K^- p \rightarrow \Lambda X$, 其中 Λ 是超子。

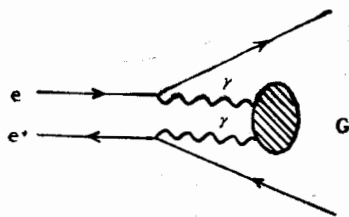


图 6

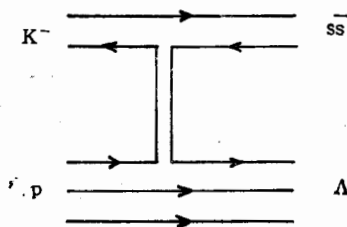
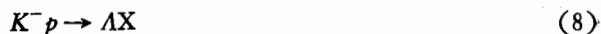


图 7

因为对于上面这个反应最容易发生的是如图 7 表示的过程, 即伴随 Λ 超子同时产生一对正、反奇异夸克 ss , 这对夸克可以组成 ϕ 粒子或和真空中产生的别的夸克对构成别的强子。因此, 如果粒子 X 在反应



中大量产生, 则 X 一定是以 ($q\bar{q}$) 为主要成分的普通介子, 而胶球的产生将被大大压低。

(3) 由于胶球是 $SU(3)$ 味单态, 它的衰变方式应当是味对称的^[16]。

为了定量地表示上述性质,可以引入如下一些量。

第一个量是由 M. S. Chanowitz 引入的^[18],被称为粘度 (stickiness), 它定义为

$$S \equiv \frac{\Gamma(J/\phi \rightarrow \gamma X)}{\Gamma(X \rightarrow \gamma\gamma)} \cdot \frac{\text{LIPS}(X \rightarrow \gamma\gamma)}{\text{LIPS}(J/\phi \rightarrow \gamma X)}, \quad (9)$$

其中 LIPS 表示洛仑兹不变相空间。由于在 J/ϕ 的辐射衰变过程中胶球相对于普通 ($q\bar{q}$) 介子能更丰富地产生,而在双光子过程中相对地被压低,因此,胶球的粘度应当比普通 ($q\bar{q}$) 介子的粘度大得多。

第二个量定义为

$$R_r(X) \equiv \frac{\tilde{\Gamma}(J/\phi \rightarrow \omega X)}{\tilde{\Gamma}(J/\phi \rightarrow \phi X)}, \quad (10)$$

其中 $\tilde{\Gamma}$ 表示去掉相空间影响后的宽度。在理想混合的情况下, $\phi = |s\bar{s}\rangle$, $\omega = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle)$, 计算给出^[19]

$$R_r(X) = \begin{cases} 2 & \text{如果 } X \text{ 是 } SU(3) \text{ 单态} \\ \frac{1}{2} & \text{如果 } X \text{ 是 } SU(3) \text{ 八重态} \end{cases} \quad (10a)$$

因此,对于一个胶球应当有 $R_r(G) > 1$ 。

第三个量定义为

$$R_r(X) \equiv \frac{\Gamma(J/\phi \rightarrow \gamma X)}{\Gamma(J/\phi \rightarrow \{\omega, \phi\} + X)}. \quad (11)$$

由于胶球在 J/ϕ 的辐射衰变过程中能大量产生,而在 J/ϕ 的强衰变过程中至少要通过 OZI 二次压低的过程才能产生从而被压低。因此,对于胶球 G, 应该有 $R_r(G) \gg 1$ 。

三、可能的胶球候选者

1. $\iota/\eta(1440)$

$\iota/\eta(1440)$ 是 Mark II 于 1980 年在过程

$$J/\phi \rightarrow \gamma + \eta(1440) \quad \begin{array}{l} | \\ \longrightarrow K^0 K^\pm \pi^\mp \end{array} \quad (12)$$

中首先发现的^[20], 他们从 1.3×10^6 个 J/ϕ 衰变中一共得到 85 个事例。由于他们没有获得 $\iota/\eta(1440)$ 的自旋和宇称, 他们把这个 $K^0 K^\pm \pi^\mp$ 共振态误认为是 $J^{PC} = 1^{++}$ 的 $E/f_1(1420)$ 。

1982 年, Crystal Ball 实验组在过程

$$J/\phi \rightarrow \gamma + \eta(1440) \quad \begin{array}{l} | \\ \longrightarrow K^+ K^- \pi^0 \end{array} \quad (13)$$

中也发现了这个粒子^[21], 在 2.2×10^6 个 J/ϕ 衰变中得到 174 个事例, 他们还用分波分析方法得到了 $\iota/\eta(1440)$ 的自旋-宇称 $J^{PC} = 0^{-+}$ 。

从 1983 年到 1985 年, 同在 SLAC SPEAR 上工作的 Mark III 实验组分别在如下

三个道也看到了 $\psi/\eta(1440)$ ^[22]:

$$J/\psi \rightarrow \gamma + \eta(1440) \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \rightarrow K^+K^-\pi^0, K_S^0K^\pm\pi^\mp, K_S^0K_S^0\pi^0 \end{array} \quad (14)$$

进一步证实了 $\psi/\eta(1440)$ 的存在。他们从三体螺旋性分析出发,证实了 $\psi/\eta(1440)$ 的自旋-宇称是 0^{-+} 。

在法国 Orsay DCI 上工作的 DM2 实验组也分别从如下的 J/ψ 辐射衰变过程

$$J/\psi \rightarrow \gamma + \psi/\eta(1440) \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \rightarrow K_S^0K^\pm\pi^\mp, K^+K^-\pi^0 \end{array} \quad (15)$$

观察到 $\psi/\eta(1440)$ ^[23], 从 8.7×10^6 个 J/ψ 衰变中分别得到 693 个和 296 个事例, 并从三体衰变角分布分析进一步证实了 $\psi/\eta(1440)$ 的自旋-宇称 $J^{PC} = 0^{-+}$ 。

J/ψ 的辐射衰变实验基本上都给出

$$\frac{BR(\eta(1440) \rightarrow K_S^0K^\pm\pi^\mp)}{BR(\eta(1440) \rightarrow K^+K^-\pi^0)} \simeq 2.$$

这表明 $\psi/\eta(1440)$ 的同位旋 $I = 0$ 。

四个实验组测得有关 $\psi/\eta(1440)$ 的主要性质已总结在表 3 中。

有人认为, 1967 年 CERN 的一个实验组在过程

$$p\bar{p} \rightarrow (K\bar{K}\pi)_{\pi\pi} \quad (16)$$

中发现的 $K\bar{K}\pi$ 共振态 $E^0(1425)$ ^[24] 其实就是 $\psi/\eta(1440)$, 当时测得这个粒子的质量和宽度分别为

$$M = (1425 \pm 7)\text{MeV}, \quad \Gamma = (80 \pm 10)\text{MeV},$$

并测得量子数 $I^G J^P = 0^+ 0^-$ 。1982 年这个实验组又重新分析了原来得到的资料^[25], 进一步确认了原来的结论。但是, $E^0(1425)$ 也可能是不同于 $\psi/\eta(1440)$ 的另一个 0^{-+} 态。

表 3

实验组	衰变方式	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	$BR(J/\psi \rightarrow \gamma\eta(1440))$ $\times BR(\eta(1440) \rightarrow K\bar{K}\pi) \times 10^3$
Mark II	$K_S^0K^\pm\pi^\mp$	1440 +10 -15	50 +30 -20	4.3 ± 1.7
C. B.	$K^+K^-\pi^0$	1440 +20 -15	55 +20 -30	$4.0 \pm 0.7 \pm 1.0$
Mark III	$K_S^0K^\pm\pi^\mp$	$1456 \pm 5 \pm 6$	$95 \pm 10 \pm 15$	$5.0 \pm 0.3 \pm 0.8$
Mark III	$K^+K^-\pi^0$	$1461 \pm 5 \pm 5$	$101 \pm 10 \pm 10$	$4.9 \pm 0.25 \pm 0.8$
Mark III	$K_S^0K_S^0\pi^0$			$3.6 \pm 1.6 \pm 1.8$
DM 2	$K_S^0K^\pm\pi^\mp$	1445 ± 8	105 ± 10	$3.6 \pm 0.15 \pm 0.6$
DM 2	$K^+K^-\pi^0$	1433 ± 8	95 ± 10	$4.1 \pm 0.3 \pm 0.7$

Mark III 测量了如下的 J/ψ 强衰变过程^[26]:

$$J/\psi \rightarrow \omega X \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \rightarrow K\bar{K}\pi, \end{array} \quad (17)$$

$$J/\psi \rightarrow \phi X \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \rightarrow K\bar{K}\pi. \end{array} \quad (18)$$

对于过程 (17), $K\bar{K}\pi$ 不变质量分布在 1.44GeV 附近出现一个峰, 但是角分布分析表明 $J^{PC} = 1^{++}$, 因此这不可能是 $\iota/\eta(1440)$. 对过程 (18), Mark III 也没有看到 $\iota/\eta(1440)$, 测量给出

$$BR(J/\psi \rightarrow \phi\eta(1440)) \cdot BR(\eta(1440) \rightarrow K\bar{K}\pi) < 2.1 \times 10^{-4}. \quad (19)$$

DM2 也对强衰变过程 (18) 进行了测量, 得到了和 Mark III 基本一致的结果:

$$BR(J/\psi \rightarrow \phi\eta(1440)) \cdot BR(\eta(1440) \rightarrow K\bar{K}\pi) < 2.5 \times 10^{-4}. \quad (20)$$

J/ψ 的强衰变过程 (17) 和 (18) 是很有意义的二个过程, 如果粒子 X 是以 $s\bar{s}$ 为主要成分的 $q\bar{q}$ 束缚态, 那么过程 $J/\psi \rightarrow \phi X$ 可以通过图 8(a) 表示的一次 OZI 规则禁戒的图进行, 而过程 $J/\psi \rightarrow \omega X$ 只能通过由图 8(b) 表示的二次 OZI 规则禁戒的图进行, 从而相对前者会被压低. 反之, 对于以 $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ 为主要成分的粒子 X, 却好反过来, 从而过程 $J/\psi \rightarrow \phi X$ 会被压低. 这样, 我们可以通过测量 $J/\psi \rightarrow \omega X$ 与 $J/\psi \rightarrow \phi X$ 的分支比来判断粒子 X 的主要成分. 结果 (19) 和 (20) 表明, $\iota/\eta(1440)$ 中不会有很大的 $s\bar{s}$ 成分.

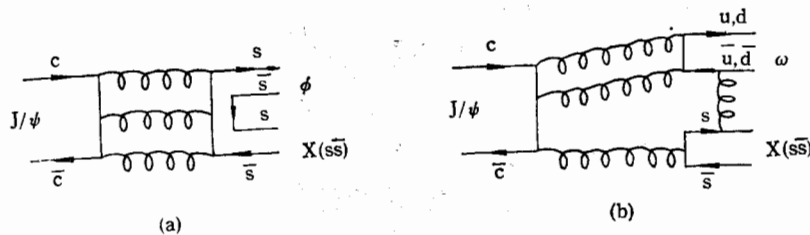


图 8

SLAC 的 LASS 实验组观察了过程

$$K^- p \rightarrow K^0 K^+ \pi^- \Lambda, \quad (21)$$

没有明显地看到 $\iota/\eta(1440)$ 的产生^[27]. 这也意味着 $\iota/\eta(1440)$ 不可能有很大的 $s\bar{s}$ 成分.

$\iota/\eta(1440)$ 的双光子产生截面已被几个实验组测量, 其中 TPC/ $\gamma\gamma$ 组给出^[28]

$$\Gamma_{\gamma\gamma}^{\iota/\eta(1440)} \cdot BR(\eta(1440) \rightarrow K\bar{K}\pi) < 1.6 \text{keV}. \quad (22)$$

CELLO 组给出^[29]

$$\Gamma_{\gamma\gamma}^{\iota/\eta(1440)} \cdot BR(\eta(1440) \rightarrow K\bar{K}\pi) < 1.2 \text{keV}. \quad (23)$$

而 M. Feindt 认为^[30], 综合 Mark II, TPC/ $\gamma\gamma$ 和 CELLO 组的结果, 有

$$\Gamma_{\gamma\gamma}^{\iota/\eta(1440)} \cdot BR(\eta(1440) \rightarrow K\bar{K}\pi) < 0.75 \text{keV}. \quad (24)$$

CERN 的 WA76 组对中心产生过程

$$pp \rightarrow p(K^0 K^+ \pi^-) p \quad (25)$$

进行了测量,没有看到 $\psi/\eta(1440)$ 的产生^[31].

J/ψ 的辐射衰变过程

$$J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi\pi \quad (26)$$

也是一个很有趣的过程,因为 Crystal Ball 组曾发现^[21], $\psi/\eta(1440)$ 衰变成 $K\bar{K}\pi$ 主要是通过 $a_0(980)\pi$ (S 波)道,而不是通过 K^*K (P 波)道进行的,即主要是

$$\begin{array}{l} \psi(1440) \rightarrow a_0^\pm(980)\pi^\mp \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad K\bar{K}. \end{array} \quad (27)$$

但是, $a_0(980)$ 的主要衰变方式是 $a_0(980) \rightarrow \eta\pi$. 因此,如果 Crystal Ball 的发现是正确的,则我们应当看到如下的过程

$$\begin{array}{l} J/\psi \rightarrow \gamma\eta(1440) \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad a_0^\pm(980)\pi^\mp \\ \quad \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad \quad \eta\pi^\pm. \end{array} \quad (28)$$

即应该在过程(26)中看到 $\psi/\eta(1440)$. 可是, Crystal Ball^[32]、Mark III^[33] 和 DM2^[34,23] 都没有在过程(26)中看到 $\psi/\eta(1440)$.

Mark III^[35] 还考察了过程

$$J/\psi \rightarrow \omega\eta\pi\pi, \quad J/\psi \rightarrow \phi\eta\pi\pi, \quad (29)$$

都没有看到 $\psi/\eta(1440)$.

BNL 769 实验组在分析 9504 个

$$\begin{array}{l} \pi^- p \rightarrow X_n \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad K_s^0 K_s^0 \pi^0 \end{array} \quad (30)$$

事例的基础上发现了一个共振态^[36]:

$$\begin{cases} m = 1453 \pm 7 \text{ MeV} \\ \Gamma = 100 \pm 11 \text{ MeV}. \end{cases}$$

自旋-宇称分析表明,它的量子数 $J^{PC} = 0^{-+}$. 由于这个共振态的质量和宽度与 $\psi/\eta(1440)$ 是一致的,因此,他们认为这个共振态很可能就是 $\psi/\eta(1440)$. 但后来他们发现^[37], 用二个 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的态能更正确地拟合 $K_s^0 K_s^0 \pi^0$ 的不变质量谱,其结果是,质量较低的态是自旋为 0 的 $a_0(980)\pi$ (S 波)共振态,并有

$$m_1 = 1412.8 \pm 5.4 \text{ MeV}, \quad \Gamma_1 = 19.0 \pm 7.0 \text{ MeV}. \quad (31)$$

质量较高的态是自旋为 0 的 K^*K (P 波)共振态,并有

$$m_2 = 1475 \pm 3.8 \text{ MeV}, \quad \Gamma_2 = 50.6 \pm 12.7 \text{ MeV}. \quad (32)$$

他们认为,第二个态可能就是 $\psi/\eta(1440)$.

根据上述的实验现状,下面我们对 $\psi/\eta(1440)$ 是否可能是胶球进行具体分析. 为此我们首先考虑 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的 $q\bar{q}$ 九重态. $1s$ 九重态已完全填满,它们是 π 、 K 、 η 和 η' . $2s$ 九重态中的八个成员已经找到,它们是 $\pi(1300)$ 、 $K(1460)$ 以及 $\eta(1280)$. 其中 $\eta(1280)$ 是在美国的 Argonne 国立实验室首先发现的^[38], 后来在日本的 KEK 得到证实^[39]. $\eta(1280)$ 已被认为是 $\eta(549)$ 的径向激发态. 虽然目前 $2s$ 九重态中 η' 的径向

激发态还没有被完全确认, 但已经有了可能的候选者 X(1400) 或 X(1420) (也许它们是同一个粒子). Mark III^[33] 和 DM2^[34,23] 已在过程 (26) 中看到了 X(1400), KEK 的 135 组^[40]在过程

$$\pi^- p \rightarrow \eta \pi^+ \pi^- n \quad (33)$$

中也看到了这个 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的粒子. X(1420) 也已被好几个实验组看到^[24,37,39,41,42]. 另外, J/ψ 衰变到 $\gamma\eta$ 和 $\gamma\eta'$ 的分支比已被测量, 其平均值分别为^[41]

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma\eta) = (8.8 \pm 0.6) \times 10^{-4}, \quad (34)$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') = (4.0 \pm 0.3) \times 10^{-3}, \quad (35)$$

小于 $J/\psi \rightarrow \gamma\psi(1440)$ 的分支比. 所以 $\psi(1440)$ 不可能是 η' 的径向激发态.

Mark III 曾对 $\psi(1440)$ 衰变到 $K\bar{K}\pi$, $\rho\rho$, $\omega\omega$, $\gamma\rho$ 进行了耦合道分析, 结果给出^[43]:

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma\psi(1440)) \cdot BR(\psi(1440) \rightarrow \rho\rho) \simeq (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-3},$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma\psi(1440)) \cdot BR(\psi(1440) \rightarrow \omega\omega) \simeq (0.3 \pm 0.1) \times 10^{-3}. \quad (36)$$

因此, 我们已有平均值

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma\psi(1440)) \simeq (6.3 \pm 0.5) \times 10^{-3}. \quad (37)$$

扣除相空间效应, 由 (34), (35), (37) 可得

$$\tilde{\Gamma}_{\gamma\eta} : \tilde{\Gamma}_{\gamma\eta'} : \tilde{\Gamma}_{\gamma\psi(1440)} = 1 : 6 : 14. \quad (38)$$

这表明, $\psi(1440)$ 在 J/ψ 的辐射衰变过程中比作为 $q\bar{q}$ 束缚态的 η 和 η' 能更多地产生.

如果我们利用已有的实验值按照 (9) 式计算 η , η' 和 $\psi(1440)$ 的粘度, 并把 η 的粘度归一为 1, 我们发现它们的粘度之比为^[29]:

$$S_\eta : S_{\eta'} : S_{\psi(1440)} = 1 : 4 : > 80. \quad (39)$$

(如用 (24) 式给出的实验值, 则有 $S_{\psi(1440)} > 128$.) 这表明 $\psi(1440)$ 的确具有比 η, η' 大得多的粘性.

将已有的实验值代入 (11) 式, 得到

$$R_\gamma(\eta) = 0.6 \pm 0.1, \quad R_\gamma(\eta') = 11.4 \pm 2.3, \quad R_\gamma(\psi(1440)) > 21, \quad (40)$$

同样有利于 $\psi(1440)$ 是胶球的解释.

对于 $\psi(1440)$ 以 $K\bar{K}\pi$ 为主的衰变方式似乎和胶球应当有味对称的衰变是矛盾的, 但是 M. Chanowitz 提出了一个不同的看法^[44], 他们的计算表明, 在口袋模型中, 0^{-+} 胶球是由一个横电型胶子 (TE) 和一个横磁型胶子 (TM) 构成的, TE 胶子的衰变是味道对称的, 但 TM 胶子和奇异夸克的耦合比和 u, d 夸克的耦合其振幅大五倍. 所以他们认为, 味对称的衰变方式不能作为判别胶球的一个准则.

总之, 上面的分析表明, $\psi(1440)$ 很可能是胶球的一个候选者.

虽然对于 $\psi(1440)$ 的研究有了较大的进展, 但至今还存在一些不清楚的问题. 举例如下:

(1) 与 $q\bar{q}$ 的混合问题.

如果 $\psi(1440)$ 是 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的胶球, 它和具有相同量子数的 $q\bar{q}$ 束缚态 η 和 η' 同

能会有混合。如果 BNL 769 组在过程(30)中发现的具有较高质量的那个态的确是 $\psi/\eta(1440)$, 这意味着 $\psi/\eta(1440)$ 中必定有 $q\bar{q}$ 的混合。许多作者已从理论上讨论了 η , η' 和 $\psi/\eta(1440)$ 的混合问题^[45]。但是 Mark III 有关 J/ψ 强衰变的实验表明^[46], η 和 η' 只是 u, d, s 夸克构成的 $q\bar{q}$ 束缚态, 并得到 η 和 η' 之间的混合角 $\theta_p = -19^\circ \pm 1.0^\circ$ 。DM2 的结果也是类似的^[47], 他们的结论是, 即使 η' 波函数中有胶球成分, 也是极小的, 即 $|Z|^2 \approx 1\%$, 他们得到 $\theta_p = -20^\circ \pm 1.6^\circ$ 。Mark III 和 DM2 的结论与 SLAC ASP 组从双光子实验给出的 $\theta_p = -19.8^\circ \pm 2.2^\circ$ ^[48]也是一致的。同样, 也有不少作者已用各种理论讨论了仅含 η 和 η' 之间的混合问题^[49]。

(2) 另一个重要的问题是有关 $\psi/\eta(1440)$ 能区可能存在多个共振态的问题。Mark III^[50]和 DM2^[51] 都发现, 对于过程 $J/\psi \rightarrow \gamma K\bar{K}\pi$, $K\bar{K}\pi$ 的不变质量谱是不对称的, 这意味着在过程 $J/\psi \rightarrow \gamma K\bar{K}\pi$ 中发现的 $\psi/\eta(1440)$ 可能包含不只一个的共振态。为此 DM2 组首先对 1300MeV—1550MeV 能区进行了分波分析^[52], 他们发现了三个共振态。其中最主要的一个是 $a_0(980)\pi$, 这是一个 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的共振态, 其它参数为

$$m = (1459 \pm 5)\text{MeV}, \Gamma = (75 \pm 9)\text{MeV},$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma X(1459)) \times BR(X(1459) \rightarrow K\bar{K}\pi) = (1.8 \pm 0.2 \pm 0.3) \times 10^{-3}.$$

第二个是 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的 K^*K 共振态, 其质量、宽度和分支比分别为

$$m = (1421 \pm 14)\text{MeV}, \Gamma = (63 \pm 18)\text{MeV},$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma X(1421)) \cdot BR(X(1421) \rightarrow K\bar{K}\pi) = (0.83 \pm 0.13 \pm 0.18) \times 10^{-3}.$$

第三个是 $J^{PC} = 1^{++}$ 的 K^*K 共振态, 并得到

$$m = (1462 \pm 20)\text{MeV}, \Gamma = (129 \pm 41)\text{MeV},$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma X(1462)) \times BR(X(1462) \rightarrow K\bar{K}\pi) = (0.76 \pm 0.15 \pm 0.21) \times 10^{-3}.$$

Mark III 组也对 1350MeV—1600MeV 能区进行了分波分析^[53], 虽然他们也得到了类似的三个共振态, 但每个共振态的质量、宽度和分支比与 DM2 的结果有较大的差异。Mark III 得到的最主要的共振态是 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的 K^*K (P 波)共振态, 其质量、宽度和分支比为

$$m = (1476 \pm 11)\text{MeV}, \Gamma = (77 \pm 23)\text{MeV},$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma X(1476)) \times BR(X(1476) \rightarrow K\bar{K}\pi) = (1.10 \pm 0.17 \pm 0.22) \times 10^{-3}.$$

第二个共振态是 $J^{PC} = 1^{++}$ 的 K^*K (S 波)共振态, 并有

$$m = (1445 \pm 7)\text{MeV}, \Gamma = (90 \pm 27)\text{MeV},$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma X(1445)) \times BR(X(1445) \rightarrow K\bar{K}\pi) = (0.95 \pm 0.12 \pm 0.19) \times 10^{-3}.$$

第三个共振态是 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的 $a_0(980)\pi$ (S 波)共振态, 相应的质量、宽度和分支比为

$$m = (1424 \pm 10)\text{MeV}, \Gamma = (39 \pm 7)\text{MeV},$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma X(1424)) \times BR(X(1424) \rightarrow K\bar{K}\pi) = (0.68 \pm 0.08 \pm 0.14) \times 10^{-3}.$$

Mark III 得到的关于 K^*K (P 波)共振态和 $a_0(980)\pi$ (S 波)共振态的质量和宽度虽然和 π^-p 碰撞的结果(见(31)和(32)式)比较接近, 但是 BNL 769 组在分析 π^-p 实验结果时并没有考虑 K^*K (S 波)的贡献。另外, Mark III 关于 $J^{PC} = 1^{++}$ 的 K^*K (S 波)的结果和双光子实验的结果^[29]也不完全一致。我们期待北京谱仪 (BES) 在积累更多的 J/ψ 事例后能尽快给出更细致的分析。

表 4

实验组	衰变方式	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	$BR(J/\psi \rightarrow \gamma f_2(1720))$ $\times BR(f_2(1720) \rightarrow X) \times 10^4$
C. B	$\eta\eta$	1640 ± 50	220^{+100}_{-70}	$4.9 \pm 1.4 \pm 1.0$
C. B	$\eta\eta$	1720 固定	130 固定	$2.6 \pm 0.8 \pm 0.7$
DM2	$\eta\eta$	固定	固定	$1.3 \pm 0.4 \pm 0.3$
Mark III	$\eta\eta$	固定	固定	$2.0 \pm 0.6 \pm 0.8$
Mark II	K^+K^-	1700 ± 30	156 ± 20	$12.0 \pm 1.8 \pm 5.0$
Mark III	K^+K^-	$1720 \pm 10 \pm 10$	130 ± 20	$9.6 \pm 1.2 \pm 1.8$
DM2	K^+K^-	1707 ± 10	166 ± 33	$9.2 \pm 1.4 \pm 1.4$
Mark III	$K_s^0 K_s^0$	1720 固定	130 固定	$9.0 \pm 2.4 \pm 2.2$
DM2	$K_s^0 K_s^0$	1711 ± 9	173 ± 22	$10.4 \pm 1.2 \pm 1.6$
C. B.	$\pi^0 \pi^0$			$2.3 \pm 0.7 \pm 0.8$
DM2	$\pi^0 \pi^0$			$2.2 \pm 0.4 \pm 0.6$
Mark III	$\pi^+ \pi^-$			$1.47 \pm 0.24 \pm 0.71$
DM2	$\pi^+ \pi^-$	1693 ± 13	124 ± 24	$1.55 \pm 0.24 \pm 0.23$

$$BR(J/\psi \rightarrow \omega X(1720)) \times BR(X(1720) \rightarrow K\bar{K}) = \begin{cases} (3.9 \pm 1.2 \pm 0.6) \times 10^{-4} & \text{DM2} \\ (4.5 \pm 1.2 \pm 1.0) \times 10^{-4} & \text{Mark III.} \end{cases} \quad (51)$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \phi X(1720)) \times BR(X(1720) \rightarrow K\bar{K}) = \begin{cases} (3.6 \pm 0.2 \pm 0.6) \times 10^{-4} & \text{DM2} \\ (3.08 \pm 0.48 \pm 0.67) \times 10^{-4} & \text{Mark III.} \end{cases} \quad (52)$$

如果 Mark III 和 DM2 在过程 (49) 和 (50) 中观察到的共振态的确是 $\theta/f_2(1720)$ ，由于实验上已测得平均值^[14]：

$$BR(J/\psi \rightarrow \omega f_2(1270)) \times BR(f_2(1270) \rightarrow K\bar{K}) = (41.5 \pm 5.1) \times 10^{-4}, \quad (53)$$

$$BR(J/\psi \rightarrow \phi f_2'(1525)) \times BR(f_2'(1525) \rightarrow K\bar{K}) = (5.4 \pm 0.7) \times 10^{-4}. \quad (54)$$

(51) 比 (53) 小一个数量级，这和 $\theta/f_2(1720)$ 是胶球的解释不矛盾，因为 $J/\psi \rightarrow \omega f_2$

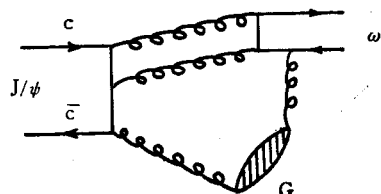


图 9

(1270) 和 $J/\psi \rightarrow \phi f_2'(1525)$ 可以通过图 8(a) 所示的一次 OZI 规则压低图进行，而 $J/\psi \rightarrow \omega + \text{胶球 } G$ 只能通过二次 OZI 规则压低的图(图 9)进行。但是 (52) 只比 (54) 约小一倍，如果 $\theta/f_2(1720)$ 是胶球，这是很难理解的。当然，由于事例数太少，Mark III 和 DM2 都没有作自旋-宇称分析，所以还不能排除 (51) 和 (52) 是来自其它粒子(例

如 0^{++} 的 $f_0(1750)$ 的贡献。

SLAC 的 LASS 组对过程

$$K^-p \rightarrow K_s^0 K_s^0 \Lambda, K^+ K^- \Lambda \quad (55)$$

进行了考察^[58], 在 $K\bar{K}$ 的不变质量谱中明显地看到了 $f_2'(1525)$, 但没有看到 $f_2(1720)$, 这表明 $\theta/f_2(1720)$ 中不会有很大的 $s\bar{s}$ 成分。

1986 年 CERN 的一个实验组^[59]测量了 85GeV 能量下的中心产生过程:

$$pp \rightarrow p(K^+K^-)p \quad (56)$$

和

$$\pi^+p \rightarrow \pi^+(K^+K^-)p.$$

他们发现其中一个共振态的质量和宽度分别为

$$M = (1742 \pm 10)\text{MeV}, \Gamma = (127 \pm 30)\text{MeV},$$

和在 J/ψ 辐射衰变过程中测得的 $\theta/f_2(1720)$ 质量和宽度是一致的。但是, 他们没有测量粒子的自旋。三年后, CERN 的 WA76 实验组测量了更高能量下 (300GeV) 的中心产生过程 (56) 和

$$pp \rightarrow p(K_s^0 K_s^0)p, \quad (57)$$

(参看文献 T. A. Armstrong et al., CERN/EP 89-70 (1989)), 在 K^+K^- 和 $K_s^0 K_s^0$ 系统分别发现一个共振态, 其质量和宽度分别为

$$m = (1713 \pm 10)\text{MeV}, \Gamma = (181 \pm 30)\text{MeV}, \quad (58)$$

和

$$m = (1706 \pm 10)\text{MeV}, \Gamma = (104 \pm 30)\text{MeV}.$$

对 K^+K^- 系统的自旋分析很强烈地支持 $J^P = 2^+$ 。如果上述中心产生过程中看到的粒子的确是 $J^{PC} = 2^{++}$ 的 $\theta/f_2(1720)$, 这将对 $\theta/f_2(1720)$ 胶球解释的一大支持。

迄今在双光子过程中还没有看到 $\theta/f_2(1720)$ 的产生。TPC/ $\gamma\gamma$ 组^[60]和 TASSO 组^[61]的测量结果分别是

$$\Gamma(f_2(1720) \rightarrow \gamma\gamma) \times BR(f_2(1720) \rightarrow K\bar{K}) < 0.2\text{keV}, \quad (59)$$

$$\Gamma(f_2(1720) \rightarrow \gamma\gamma) \times BR(f_2(1720) \rightarrow K\bar{K}) < 0.28\text{keV}. \quad (60)$$

而 CELLO 组^[62]和 PLUTO 组^[63]的结果分别是

$$\Gamma(f_2(1720) \rightarrow \gamma\gamma) \times BR(f_2(1720) \rightarrow K\bar{K}) < 0.11\text{keV} \quad (61)$$

和

$$\Gamma(f_2(1720) \rightarrow \gamma\gamma) \times BR(f_2(1720) \rightarrow K\bar{K}) < 0.09\text{keV}. \quad (62)$$

上面我们介绍了有关 $\theta/f_2(1720)$ 的主要实验结果, 现在我们来了解一下相应的 $2^{++}q\bar{q}$ 态。众所周知, $2^{++}q\bar{q}$ 基态九重态已全部填满, 它们是 $a_2(1320)$, $K_2^*(1430)$, $f_2(1270)$ 和 $f_2'(1525)$ 。一个重要的问题是, $\theta/f_2(1720)$ 是否可能是 $f_2(1270)$ 或 $f_2'(1525)$ 的径向激发态。从表 4 我们看到,

$$BR(f_2(1720) \rightarrow K\bar{K}) > 5 \times BR(f_2(1720) \rightarrow \pi\pi) \quad (63)$$

而 $f_2(1270)$ 的 86% 衰变为 $\pi\pi$, 因此, $\theta/f_2(1720)$ 不可能是 $f_2(1270)$ 的径向激发态。有人认为, 在 πp 碰撞过程中发现的 $f_2(1810)$ 可能是 $f_2(1270)$ 径向激发态的候选者^[64], 也有作者认为, 在过程 $\pi^-p \rightarrow M^0 n \rightarrow \omega \omega n$ 中发现质量约为 1960MeV 的共振态可能是

$$\langle f_i \gamma | S | J \rangle = (2\pi)^4 \delta^4(p_j - p_\gamma - p_i) \frac{e}{\sqrt{8E_j E_\gamma E_i}} A_\lambda, \quad (70)$$

其中 λ 是 2^{++} 粒子 f 的螺旋性, 可能的取值为 $0, \pm 1, \pm 2$. 相应的 A_λ 称为螺旋性振幅. 由于空间反射不变性, 只有三个独立的振幅 A_λ , 即 A_2, A_1 和 A_0 . 定义

$$x = A_1/A_0, \quad y = A_2/A_0. \quad (71)$$

x 和 y 称为螺旋性振幅之比, 它们的值可以通过实验测量得到. 实验上发现, $\theta/f_2(1720)$ 和 $f_2(1270)$, $f_2(1525)$ 具有不同性质的 x, y 值, 对于以 $q\bar{q}$ 为主要成分的 $f_2(1270)$ 和 $f_2(1525)$, 它们的 x 和 y 有一个共同的特点, 即 $x \simeq 1, y \simeq 0$, 而对于 $\theta/f_2(1720)$ 有 $|x| \simeq |y| \simeq 1$. Mark III^[66]和 DM2^[68]已分别测得 $\theta/f_2(1720)$ 的 x 和 y 为

$$x = -1.07 \pm 0.20, \quad y = -1.09 \pm 0.25$$

和

$$x = -1.30 \pm 0.14, \quad y = -1.10 \pm 0.18.$$

理论上, B. F. L. Ward^[69]利用等效拉氏量方法, 并认为 $\theta/f_2(1720)$ 是由两个横电型胶子构成的 2^{++} 胶球, 计算得到 $x = -0.85, y = -1$, 和实验值基本符合. 文献 [70] 的计算表明, 假定 $\theta/f_2(1720)$ 是一个既有 S 波, 也有 D 波混合的张量胶球, 即可得到和实验值完全符合的 x 和 y . 另外, 如果认为 $f_2(1270)$ 和 $\theta/f_2(1720)$ 有混合, 而 $\theta/f_2(1720)$ 是一个既有 S 波又有 D 波的 2^{++} 胶球, 文献 [71] 不仅得到了和实验值相符合的 $f_2(1270)$ 的 x 和 y 的值, 而且可以给出

$$R = \frac{BR(\phi' (3685) \rightarrow \gamma + f_2(1270))}{BR(J/\psi \rightarrow \gamma + f_2(1270))} = 10\%,$$

和 Crystal Ball^[72]得到的实验值 $R = (9 \pm 3)\%$ 符合得很好. 此外, $f_2(1270)$ 和胶球 $\theta/f_2(1720)$ 有较大混合的观点也能定性地说明 (64) 式, 即为什么 $f_2(1270)$ 和作为胶球候选者的 $\theta/f_2(1720)$ 在 J/ψ 辐射衰变过程中几乎有一样大的产生率.

如果认为 $\theta/f_2(1720)$ 是一个 2^{++} 的纯胶球, 作为一个 $SU(3)$ 味单态, 考虑 D 波相空间修正后可得 $\theta/f_2(1720)$ 衰变到 $\pi\pi, K\bar{K}, \eta\eta$ 的宽度之比约为

$$\Gamma(\pi\pi) : \Gamma(K\bar{K}) : \Gamma(\eta\eta) = 10 : 5 : 1 \quad (72)$$

但表 4 给出的实验平均值为

$$\Gamma(\pi\pi) : \Gamma(K\bar{K}) : \Gamma(\eta\eta) = 1 : 6 : 1, \quad (73)$$

这似乎和作为 $SU(3)$ 味单态的胶球应该有味对称的衰变方式的猜测^[46]是不相容的. 但文献 [73] 给出了一种可能的解释, 他们认为, 只要对 π, K, η 分别引入形状因子, (73) 式给出的实验值实际上意味着 $\theta/f_2(1720)$ 有味对称的衰变方式. 当然, 正如我们前面已指出的, 有些作者已指出, 不能把味对称的衰变方式作为判断一个粒子是否是胶球的准则.

通过上面的讨论我们看到, 如果 $\theta/f_2(1720)$ 的确是一个 $J^{PC} = 2^{++}$ 的粒子, 它不可能是一个纯 $q\bar{q}$ 态, 很有可能它是一个胶球的候选者 (有 $q\bar{q}$ 混合的胶球). 但是, 目前的实验资料还不可能排除 $\theta/f_2(1720)$ 的其它可能性, 例如混合态 $q\bar{q}g$ ^[74] 或四夸克态 $q\bar{q}q\bar{q}$ ^[75], 尽管这些解释本身也各自存在一些还无法理解的问题.

3. $\xi(2230)$

$\xi(2230)$ 是 Mark III 实验组在 1983 年积累 2.7×10^6 个 J/ψ 事例的基础上,在过程



中发现的^[76]. 到 1985 年, Mark III 又积累了 3.1×10^6 个新的 J/ψ 事例,进一步证实了在过程 (74) 中发现的 $\xi(2230)$, 而且在过程



中也看到了这个粒子^[77]. 在 ξ 的 K^+K^- 衰变道一共得到 93 个事例,并测得

$$\begin{aligned} m(\xi) &= (2230 \pm 6 \pm 14) \text{MeV}, \quad \Gamma(\xi) = \begin{pmatrix} +20 \\ 26 & \pm 17 \\ -16 \end{pmatrix} \text{MeV}, \\ BR(J/\psi \rightarrow \gamma\xi) \times BR(\xi \rightarrow K^+K^-) &= \begin{pmatrix} +1.7 \\ 4.2 & \pm 0.8 \\ -1.4 \end{pmatrix} \times 10^{-5}. \end{aligned} \quad (76)$$

在 ξ 的 $K_s^+K_s^0$ 衰变道,一共得到 23 个事例,并测得

$$\begin{aligned} m(\xi) &= (2232 \pm 7 \pm 7) \text{MeV}, \quad \Gamma(\xi) = \begin{pmatrix} +23 \\ 18 & \pm 10 \\ -15 \end{pmatrix} \text{MeV}, \\ BR(J/\psi \rightarrow \gamma\xi) \times BR(\xi \rightarrow K_s^+K_s^0) &= \begin{pmatrix} +1.6 \\ 3.1 & \pm 0.7 \\ -1.3 \end{pmatrix} \times 10^{-5}. \end{aligned} \quad (77)$$

由于 ξ 能衰变成 $K_s^+K_s^0$, 因此 ξ 的自旋必定是偶的,且宇称一定为正,即 $J^{PC} = (2n)^{++}$. Mark III 组利用最大似然拟合方法对 ξ 进行的自旋分析表明, ξ 的自旋很可能是 2,但不能排除自旋为 4 的可能性^[33].

Mark III 组对 ξ 粒子的螺旋性振幅之比 x 和 y 的测量结果给出^[78]: 如果 ξ 粒子的自旋 $J = 2$, 则有

$$x = -0.67 \begin{array}{c} +0.14 \\ -0.16 \end{array}, \quad y = 0.13 \begin{array}{c} +0.21 \\ -0.19 \end{array}. \quad (78)$$

如果 ξ 粒子的自旋 $J = 4$, 则有

$$x = 1.29 \begin{array}{c} +0.62 \\ -0.30 \end{array}, \quad y = 0.40 \begin{array}{c} +0.76 \\ -0.39 \end{array}. \quad (79)$$

ξ 粒子的自旋不能被完全确定的原因是目前已得到的 ξ 粒子的事例数太少以及存在不敏感区域^[79,80]. 按照文献 [80] 的计算,如果采用目前通常采用的分析方法,为了确定 $\xi(2230)$ 的自旋和宇称,至少需要 500 个 $\xi(2230)$ 事例.文献 [81] 提出了确定 $\xi(2230)$ 自旋的一种新方法,即矩分析方法.

DM2 组虽然已得到比 Mark III 组更多的 J/ψ 事例 (8.6×10^6 个),但他们没有发现粒子 $\xi(2230)$, 他们得到分支比的上限为^[82]:

$$\begin{aligned} BR(J/\psi \rightarrow \gamma\xi) \cdot BR(\xi \rightarrow K^+K^-) &< 2.3 \times 10^{-5} \quad (95\% \text{ C. L.}), \\ BR(J/\psi \rightarrow \gamma\xi) \cdot BR(\xi \rightarrow K_s^0\bar{K}_s^0) &< 1.6 \times 10^{-5} \quad (95\% \text{ C. L.}), \end{aligned} \quad (80)$$

需要指出的是,虽然 DM2 组宣称没有看到 $\xi(2230)$,但他们给出的分支比(80)仍然在 Mark III 组给出的(76),(77)式标明的实验误差范围之内。

在 $\xi(2230)$ 发现之后,理论物理学家依据 ξ 粒子的产生、衰变方式以及它的宽度等性质,对 ξ 粒子的解释给出了多种模式,其中有 Higgs 粒子^[83]、胶球^[84]、混合态^[85]、四夸克态^[86]及高角动量的 $s\bar{s}$ 态^[87]等。

不久前,Mark III 组在过程

$$J/\psi \rightarrow \gamma X \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \omega\phi \end{array} \quad (81)$$

中发现了一个质量为 $(2222 \pm 3 \pm 1)\text{MeV}$,宽度接近于 0 的粒子 X ^[88],角分布分析表明, X 的自旋-宇称 $J^P = 2^+$,并测得

$$\begin{aligned} BR(J/\psi \rightarrow \gamma X) \cdot BR(X \rightarrow \omega\phi) \\ = (2.8 \pm 0.9 \pm 0.3) \times 10^{-5}. \end{aligned} \quad (82)$$

因为 $J/\psi \rightarrow \gamma\omega\phi$ 是 OZI 规则双重压低的过程(见图 10),而测量得到的分支比(82)已接近由(76)和(77)式给出的分支比,所以,如果在过程(81)中发现

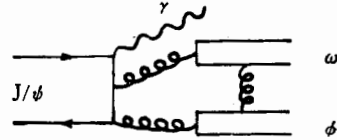


图 10

的粒子 X 就是 $\xi(2230)$,这将有利于 $\xi(2230)$ 的混合态或四夸克态解释。

SLAC 的 LASS 组在考察过程

$$K^- + p \rightarrow X + \Lambda \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ K_s^0\bar{K}_s^0, K^+K^- \end{array} \quad (83)$$

时,除了明显地看到 $f_2'(1525)$ 外,还在 2.2GeV 处看到了一个粒子,角分布分析表明这个粒子的自旋-宇称是 2^{++} 或 4^{++} ^[58]。如果这个粒子就是 $\xi(2230)$,则 $\xi(2230)$ 有较大可能是轨道角动量 $l=3$ 的 $s\bar{s}$ 态。

CERN 的 GAMS 组^[89]和苏联的 MIS ITEP^[90]都在过程

$$\pi^- + p \rightarrow nX \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \eta\eta' \end{array} \quad (84)$$

中发现了一个共振态,测得其质量和宽度分别为

$$m_X = 2220 \pm 10\text{MeV}, \Gamma_X \lesssim 60\text{MeV}.$$

同位旋和 G 宇称 $I^G = 0^+$,衰变产物角分布分析表明,粒子的自旋 $J \geq 2$ 。如果这个粒子是 $\xi(2230)$,则测量结果给出

$$R = \frac{BR(\xi \rightarrow \eta\eta')}{BR(\xi \rightarrow K\bar{K})} \simeq 2. \quad (85)$$

这将排除 $\xi(2230)$ 是 $l=3$ 的 $s\bar{s}$ 态的可能性(它将预言 $R \simeq \frac{1}{3}$),而有利于 $\xi(2230)$ 的胶球解释。

除了 K^+K^- 和 $K_s^0\bar{K}_s^0$ 外,目前还没有发现 $\xi(2230)$ 的其它衰变道。表 5 给出的分

表 5

衰变方式	$BR(J/\psi \rightarrow \gamma \xi) \times BR(\xi \rightarrow X)$
$\xi \rightarrow \mu^+ \mu^-$	$< 5 \times 10^{-6}$
$\xi \rightarrow \pi \pi$	$< 2 \times 10^{-5}$
$\xi \rightarrow K^* \bar{K}$	$< 2.5 \times 10^{-4}$
$\xi \rightarrow K^* \bar{K}^*$	$< 3 \times 10^{-4}$
$\xi \rightarrow \eta \eta$	$< 7 \times 10^{-5}$
$\xi \rightarrow \eta \eta'$	$< 8 \times 10^{-5}$
$\xi \rightarrow p \bar{p}$	$< 2 \times 10^{-5}$
$\xi \rightarrow \phi \phi$	$< 3.8 \times 10^{-5}$

支比的上限是由 Mark III 得到的^[77,88,91]。

此外, BNL 的 789 实验组^[92]及 CERN 的 LEAR 组^[93]在过程

$$p\bar{p} \rightarrow K^+ K^- \quad (86)$$

中都没有看到 $\xi(2230)$, 前者给出上限

$$BR(p\bar{p} \rightarrow \xi) \times BR(\xi \rightarrow K^+ K^-) < 2 \times 10^{-4}. \quad (87)$$

后者在假定 ξ 的自旋-宇称为 2^{++} 及宽度为 30MeV 的基础上给出

$$BR(p\bar{p} \rightarrow \xi) \times BR(\xi \rightarrow K^+ K^-) < 1.3 \times 10^{-4}. \quad (88)$$

因此, $\xi(2230)$ 是否存在这个问题将有待于 BEPC 作出回答。如果 $\xi(2230)$ 确实存在, 为了确定 $\xi(2230)$ 的自旋, 估计至少需要 2.5×10^7 个 J/ψ 事例。由于 $\xi(2230)$ 的自旋 $J \geq 2$, 以及理论上预言的分支比 $BR(J/\psi \rightarrow \gamma H^0) \simeq 2.9 \times 10^{-5}$ 比实验上测得的分支比 $BR(J/\psi \rightarrow \gamma \xi) \times BR(\xi \rightarrow K\bar{K}) = (9.3 \pm 1.2) \times 10^{-5}$ ^[78] 还小得多, 因此, $\xi(2230)$ 作为 Higgs 粒子的解释已不太可能, 但目前的实验资料还不足以排除前面提到的其它可能的解释。

4. $G/f_0(1590)$

$G/f_0(1590)$ 是 1983 年在苏联 Serpukhov 高能加速器上工作的 IHEP-IISN-LAPP 协作组在过程

$$\begin{array}{c} \pi^- p \rightarrow nG \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad \rightarrow \eta\eta \end{array} \quad (89)$$

中首先发现的^[94]。他们测得这个粒子的质量和宽度分别为

$$\begin{aligned} m &= (1592 \pm 25)\text{MeV}, \\ \Gamma &= (210 \pm 40)\text{MeV}. \end{aligned} \quad (90)$$

粒子的自旋-宇称 $J^{PC} = 0^{++}$, 同位旋、 G 宇称为 $I^G = 0^+$ 。不久, 他们又在另一个反应道

$$\begin{array}{c} \pi^- p \rightarrow nG \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad \rightarrow \eta\eta' \end{array} \quad (91)$$

中看到了这个粒子^[95]。在过程 (89) 和 (91) 中的 π 介子的能量为 38GeV 。CERN 的 GAMS 实验利用 100GeV 的 π 介子, 在过程 (89) 中也证实了 $G/f_0(1590)$ 的存在^[96]。后

来,他们又在



道发现了 $G/f_0(1590)$ ^[97].

从上面这些过程中发现的 $G/f_0(1590)$ 具有如下一些性质:

- (1) 宽度很宽, $\Gamma \simeq 200\text{MeV}$,
- (2) $BR(G \rightarrow \pi^0 \pi^0)/BR(G \rightarrow \eta\eta) < 0.3$,
- (3) $BR(G \rightarrow K\bar{K})/BR(G \rightarrow \eta\eta) < 0.6$,
- (4) $BR(G \rightarrow \eta\eta')/BR(G \rightarrow \eta\eta) = 2.7 \pm 0.8$,
- (5) $BR(G \rightarrow 4\pi^0)/BR(G \rightarrow \eta\eta) = 0.8 \pm 0.3$.

性质(2)和(3)排除了 $G/f_0(1590)$ 是普通 $q\bar{q}$ 介子的可能性. $G/f_0(1590)$ 也不可能是四夸克态 $(u\bar{u} + d\bar{d})s\bar{s}$, 因为由此预言的分支比之比 $BR(G \rightarrow K\bar{K})/BR(G \rightarrow \eta\eta) = 2$, 被性质(3)排除. 文献[98]指出, 如果 $G/f_0(1590)$ 是一个标量胶球, 性质(2)和(3)可得到解释, 并预言 $2 \leq BR(G \rightarrow \eta\eta')/BR(G \rightarrow \eta\eta) \leq 3.7$, 和性质(4)完全符合. 而性质(5)也是和 $G/f_0(1590)$ 是一个标量胶球的解释是一致的^[97].

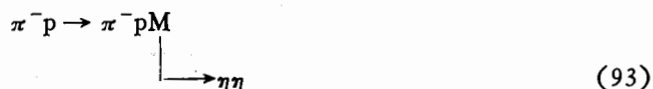
$G/f_0(1590)$ 可能成为标量胶球的候选者已引起人们的普遍关注. 但是, 作为一个胶球, 它应当在 J/ψ 的辐射衰变过程中产生, 可是 Mark III 和 DM2 至今都没有看到它的踪迹. 为此, 许多作者对此进行了探讨.

文献[99]提出了一种观点, 认为由于 $\theta/f_2(1720)$ 和 $G/f_0(1590)$ 的宽度都很大, J/ψ 辐射衰变产生在 $\sim 1.7\text{GeV}$ 处的宽共振峰中可能包含着二个态, 即 $\theta/f_2(1720)$ 和 $G(1590)$, 并建议用推广的矩分析方法进行检验. 由于 BES 能较好地探测中性粒子, 在积累足够多事例的基础上有可能作出明确的结论.

J. F. Donoghue 也曾提出过类似的观点^[96], 他认为, 可能 $G/f_0(1590)$ 和 $\theta/f_2(1720)$ 已经一起在 J/ψ 的辐射衰变过程 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta$ 中看到.

QCD 求和规则的计算, 给出了另一种可能性^[100], 计算结果表明, 在 J/ψ 辐射衰变过程中, 标量胶球的产生比赝标胶球和张量胶球的产生压低 4—7 倍.

此外, CERN 的 NA12/2 实验曾在中心产生过程



中发现一个共振态^[101], 其质量、宽度以及其它的一些量子数分别为

$$\begin{aligned} m &= (1610 \pm 20)\text{MeV}, \\ \Gamma &= (170 \pm 40)\text{MeV}, \\ I^G J^{PC} &= 0^+ 0^{++}. \end{aligned} \quad (94)$$

他们认为这个共振态很可能就是 $G/f_0(1590)$. 在 1990 年 8 月新加坡召开的 25 届国际高能物理会议上, Y. Prokoshkin 的报告进一步确认了上述实验结果, 并指出, NA12/2 实验的结果支持 $G/f_0(1590)$ 是一个标量胶球的解释.

总之, 除了在 J/ψ 的辐射衰变过程中尚未明确看到 $G/f_0(1590)$ 外, 目前大部分的

实验结果有利于 $G/f_0(1590)$ 作为胶球的候选者。当然,也有作者认为 $G/f_0(1590)$ 不可能是胶球(例如参看文献 [102])。

5. $g_T/f_2(2010)$, $g'_T/f_2(2300)$ 和 $g''_T/f_2(2340)$

1982年, BNL/CCNY 实验^[103]在过程



中发现了二个新的共振态: $g_T(2160)$ 和 $g_T(2320)$ 。正如图4所表示的,过程(95)是一个 OZI 规则压低的过程,但测量到的反应截面比 OZI 规则允许的过程(例如 $\pi^- p \rightarrow K^+ K^- \phi n$) 的反应截面还要大,所以有人认为,至少有一个 g_T 态可能是胶球^[103,104]。

到1985年,上述实验已积累了3652个事例^[105],进一步的分析表明,事实上存在三个共振态,即 $g_T(2050)$, $g'_T(2300)$ 和 $g''_T(2350)$,一个不依赖于模型的分波分析还表明,这三个态都是 $J^{PC} = 2^{++}$ 的态,并认为有可能其中的一个或全部三个态都是胶球(或有 $q\bar{q}$ 混合的胶球)。

到1988年, BNL/CCNY 实验得到的总事例数已积累到6658个^[106],在此基础上完成了更仔细的分析,得到三个共振态的质量和宽度如表6所示,他们还发现, $g_T(2010)$ 基本上是 $l=0, S=2$ 的 S 波态,而 $g'_T(2300)$ 和 $g''_T(2340)$ 是 S 波和 D 波的混合态,其成分给出在表7中。

表 6

	质量 (MeV)	宽度 (MeV)
g_T	2011 +62	202 +67
	-76	-62
g'_T	2297 ± 28	149 ± 41
g''_T	2339 ± 55	+81
		-69

$\phi\phi$ 共振态也曾在别的一些实验中发现,例如 CERN 的 WA67 实验^[107],他们在过程



中得到13088个 $\phi\phi$ 共振事例,发现了二个共振态,其质量和宽度分别为

$$m_1 = (2231 \pm 10) \text{MeV}, \Gamma_1 = (133 \pm 50) \text{MeV}$$

和

$$m_2 = (2392 \pm 10) \text{MeV}, \Gamma_2 = (198 \pm 50) \text{MeV}.$$

CERN 的 WA76 实验组宣称^[108],他们在中心产生过程



中看到的 $\phi\phi$ 质量谱与 BNL/CCNY 组看到的是类似的,并且, $\phi\phi$ 系统衰变角分布

的分析有利于 $J^P = 2^+$. 如果他们看到的确实是 g_T 态, 这将对 g_T 态作为胶球候选者的一个支持, 可惜 WA76 实验的结果是很初步的, 连共振态的质量和宽度的具体数值也没有给出.

表 7

	S 波(%) ($l = 0, S = 2$)	D 波(%) ($l = S = 2$)	D 波(%) ($l = 2, S = 0$)
g_T	98 +1 -3	0 +1	2 +2 -1
g'_T	6 +15 -5	25 +18 -14	69 +16 -27
g''_T	37±19	4 +12 -4	59 +21 -19

从引言中的讨论我们知道, 如果 g_T 态的确是张量胶球, 它应当在 J/ψ 的辐射衰变过程中产生. 因此, Mark III^[88,91]和 DM2^[109]都分别对过程

$$J/\psi \rightarrow \gamma\phi\phi \rightarrow \gamma K^+ K^- K^+ K^- \quad (98)$$

和

$$J/\psi \rightarrow \gamma\phi\phi \rightarrow \gamma K^+ K^- K_s^0 K_L^0 \quad (99)$$

进行了测量, 他们都在 2.25 GeV 附近发现了一个新的共振态, 但是, 对 $\phi\phi$ 静止系中二个 ϕ 介子衰变平面之间的夹角以及 ϕ 介子静止系中 K^+ (或 K_s^0) 介子的极角的角分布分析表明, 这个共振态的自旋-宇称是 $J^P = 0^-$, 因此它不可能是 g_T 态. Mark III 的测量^[91]还给出了产生 g_T 态的分支比的上限

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma g_T (2.04 - 2.4)) \cdot BR(g_T \rightarrow \phi\phi) < 1.16 \times 10^{-4}. \quad (100)$$

另外, 按照 H. J. Lipkin 的观点^[16], 作为一个 $SU(3)$ 味单态的胶球应该具有味对称的衰变方式. 因此, 如果 g_T 态是张量胶球, 去掉相空间影响后, g_T 态到 $\rho\rho$, $\omega\omega$ 和 $\phi\phi$ 的衰变宽度之比应为

$$\tilde{\Gamma}_{\rho\rho} : \tilde{\Gamma}_{\omega\omega} : \tilde{\Gamma}_{\phi\phi} = 3:1:1. \quad (101)$$

Mark III^[110]和 DM2^[111]已对过程

$$J/\psi \rightarrow \gamma\rho\rho, \gamma\omega\omega \quad (102)$$

进行了测量, 但都没有看到 g_T 态的产生. Mark III 给出分支比的上限分别为

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma g_T (2.1 - 2.4)) \cdot BR(g_T \rightarrow \rho\rho) < 6 \times 10^{-4} \quad (103)$$

和

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma g_T (2.1 - 2.4)) \cdot BR(g_T \rightarrow \omega\omega) < 2.6 \times 10^{-4}. \quad (104)$$

DM2 的结果是

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma g_T (2.0 - 2.45)) \cdot BR(g_T \rightarrow \rho\rho) < 2.7 \times 10^{-4} \quad (105)$$

和

$$BR(J/\psi \rightarrow \gamma g_T (2.0 - 2.45)) \cdot BR(g_T \rightarrow \omega\omega) < 1.3 \times 10^{-4}. \quad (106)$$

Mark III 和 DM2 的这些实验结果似乎是不利于 g_T 态的胶球解释的,但是文献 [112] 在假定至少有一个 g_T 态是胶球的基础上进行的理论计算给出的分支比 $BR(J/\psi \rightarrow \gamma g_T) \times BR(g_T \rightarrow \rho\rho, \omega\omega, \phi\phi)$ 基本上都没有超过 Mark III 和 DM2 给出的上限. 因此 Mark III 和 DM2 已有的实验结果还不足以排除 g_T 态是胶球的解释. 当然, 目前的实验结果也不能排除 g_T 的其它可能性, 如混合态 $s\bar{s}g$ [112].

四、小结和讨论

到目前为止, 已经发现的胶球候选者至少有 $\iota/\eta(1440)$, $\theta/f_2(1720)$, $\xi(2230)$, $G/f_0(1590)$ 以及三个 g_T 态. 其中 $\iota/\eta(1440)$ 也许是最佳的胶球候选者. 如果我们能从实验上明确无误地找到 η' 的径向激发态, 那么, $\iota/\eta(1440)$ 作为胶球候选者的地位就更加巩固. $\theta/f_2(1720)$ 的自旋如果的确是 2 不是 0, 它不太可能是一个 $q\bar{q}$ 态, 但作为胶球候选者只是其中的一种较可能的解释, 目前的实验结果还不能排除其它的可能性, 例如混合态 ($q\bar{q}g$) 或四夸克态 ($q\bar{q}qq$) 的可能性. 如果我们能在 J/ψ 的辐射衰变中找到 $G/f_0(1590)$, 或者从理论上能给出更令人信服的使标量胶球在 J/ψ 辐射衰变过程中产生受到大大压低的动力学原因, 则 $G/f_0(1590)$ 作为胶球的可能性将更大. 对于 $\xi(2230)$, 目前的实验结果还无法判断它是胶球, 混合态, 四夸克态, 还是高角动量的 $s\bar{s}$ 态. 三个 g_T 态中是否至少有一个是胶球, 还需要实验的进一步检验.

尽管对胶球的研究取得了一定的进展, 但仍然存在很多需要解决的问题. 例如, 如果 $\iota/\eta(1440)$ 是一个胶球, 它是纯胶球还是有 $q\bar{q}$ 的混合, 这种混合有多大? 对于 $\theta/f_2(1720)$, 自旋为 0 的可能性并没有被完全排除 [113], 有待实验进一步检验; 需要对 $\gamma\eta\eta$ 道测量 $\eta\eta$ 共振态的自旋并作仔细的分波分析, 确定它是完全来自 $\theta/f_2(1720)$ 的贡献, 还是包含有 $G/f_0(1590)$ 的贡献; 除了 $K\bar{K}$, $\eta\eta$, $\pi\pi$ 外, $\theta/f_2(1720)$ 是否存在其它的衰变道; 为什么至今在 J/ψ 辐射衰变过程中没有见到 $G/f_0(1590)$ 和 g_T 态的产生? $\xi(2230)$ 是否存在? 如果存在, 它的自旋是 2 还是 4? 这些都是十分重要的有待进一步解决的问题.

从上面的讨论我们还看到, 由于胶球和具有相同自旋-宇称的 $q\bar{q}$ 态往往有混合, 从而增大了确认胶球的困难. 可是, 对于奇特态(例如 1^{-+} , 3^{-+} , 0^{--} , 2^{+-} 的胶球态), 不存在相应的 $q\bar{q}$ 态, 一旦实验上发现了这类共振态, 就能毫不含糊地断定它们不可能是 $q\bar{q}$ 态. 因此, 寻找奇特态(包括胶球、混合态和四夸克态)的工作愈来愈受到实验物理学家的重视. 苏联 Serpukhov、欧洲 CERN、日本 KEK 及美国 BNL 等的一些实验组已经开展了这方面的研究工作, CERN 的 GAMS 实验 [114] 曾声称在过程

$$\pi^- p \rightarrow \eta \pi n$$

中发现了一个质量为 $1406 \pm 20 \text{ MeV}$, 宽度为 $180 \pm 30 \text{ MeV}$, $J^{PC} = 1^{-+}$ 的粒子, 但还没有得到其它实验组的证实. 从 J/ψ 的衰变过程寻找奇特态也是一个值得重视的方向.

至 1990 年 9 月, 北京谱仪已搜集到 300 万个 J/ψ 事例, 估计到 1991 年年底事例数总数有可能达到或超过 Mark III 和 DM2 事例数的总和, 即 1450 万. 我们认为, 在此基础上是可以做出一些有意义的物理工作的, 例如, 给出 $\xi(2230)$ 是否存在的明确结论;

对 $\epsilon/\eta(1440)$ 进行更有效的分波分析, 给出更精确的结果, 从而对目前 Mark III 和 DM2 的不一致的结论作出检验; 有可能得到 $G/f_0(1590)$ 在 J/ψ 辐射衰变过程中产生的某些信息等等。如果能搜集到 10^8 个 J/ψ 事例^[115], 包括 $\xi(2230)$ 的自旋的测量、 J/ψ 辐射衰变和强衰变的全面的分波分析在内的更多的有意义的物理问题可望得到解决^[116]。

参 考 文 献

- [1] H. Fritzsch and M. Gell-Mann, *Proc. XVI Int. Conf. on High Energy Physics*, Vol. 2., (1972);
S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **31**(1973), 494;
D. J. Gross and F. Wilczek, *Phys. Rev.*, **D8**(1973), 3633;
戴元本, “相互作用的规范理论”, 科学出版社1987年9月第一版。
- [2] C. N. Yang, *Phys. Rev.*, **77**(1950), 242.
- [3] Bernd Diekmann, CERN-EP/86-112, (1986).
- [4] D. L. Scharre et al., *Phys. Lett.*, **97B**(1980), 329.
- [5] C. Edwards et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 458.
- [6] A. Etkin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 1620.
- [7] F. Binon et al., *Nuovo Cimento*, **78A**(1983), 313.
- [8] W. Toki, SLAC-PUB-3262(1983); R. M. Baltrusaitis et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 107.
- [9] D. Robson, *Nucl. Phys.*, **B130**(1977), 328;
T. Barnes, *Z. Phys.*, **C10**(1981), 275;
J. M. Cornwall and A. Soni, *Phys. Lett.*, **120B**(1983), 431.
- [10] R. L. Jaffe and K. Johnson, *Phys. Lett.*, **60B**(1976), 201;
J. F. Donoghue, K. Johnson and Bing An Li, *Phys. Lett.*, **99B**(1981), 416;
M. Chanowitz, *Nucl. Phys.*, **B222**(1983), 211.
- [11] M. Falcioni et al., *Phys. Lett.*, **110B**(1982), 295;
K. Ishikawa et al., *Phys. Lett.*, **110B**(1982), 399;
P. de Forcerand et al., *Phys. Lett.*, **152B**(1985), 107 and *Z. Phys.*, **C31**(1986), 87.
- [12] M. A. Shifman, *Z. Phys.*, **C9**(1981), 347.
J. Ellis and J. Lanik, *Phys. Lett.*, **150B**(1985), 289;
H. Gomm and J. Schechter, *Phys. Lett.*, **158B**(1985), 449.
- [13] V. A. Novikov et al., *Nucl. Phys.*, **B191**(1981), 301;
S. Narrison, *Z. Phys.*, **C26**(1984), 209;
M. Shifman et al., *Nucl. Phys.*, **B147**(1979), 385, 448, 519.
- [14] L. Köpke and N. Wermes, *Phys. Rep.*, **174**(1989), 67.
- [15] M. S. Chanowitz, LBL-16653(1983); Proc. of the Charm Physics Symposium, June 1987, Institute of High Energy Physics, Beijing, China,
- [16] H. J. Lipkin and H. R. Rubenstein, *Phys. Lett.*, **76B**(1978), 342.
- [17] A. Billoire et al., *Phys. Lett.*, **80B**(1979), 381;
R. Lacaze and H. Navelet, *Nucl. Phys.*, **B186**(1981), 247.
- [18] M. S. Chanowitz, Proc. of the 6th International Workshop on Photon-Photon Collisions, ed. R. L. Iander, World Scientific, Singapore, 1984.
- [19] C. A. Heusch, XVII International Symposium on Multiparticle Dynamics, Seewinkel, Austria, June 1986.
- [20] D. L. Scharre et al., *Phys. Lett.*, **97B**(1980), 329.
- [21] C. Edwards et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 259.
- [22] W. Toki, SLAC-PUB-3262(1983);
N. Wermes, SLAC-PUB-3730(1985);
J. D. Richman, Ph. D Thesis, CALT-68-1231 (1985).
- [23] J. E. Augustin et al., LAL/85-17 (1985);
J. E. Augustin et al., *Phys. Rev.*, **D42**(1990), 10.
- [24] P. Baillon et al., *Nuovo Cimento*, **A50**(1967), 393.
- [25] J. J. Becker et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 186.
- [26] A. Falvard et al., *Phys. Rev.*, **D38**(1988), 2706.
- [27] D. Aston et al., *Phys. Lett.*, **201B**(1988), 573.
- [28] H. Aihara et al., *Phys. Rev. Lett.*, **557**(1986), 51.

- [29] H. J. Behred et al., *Z. Phys.*, **C42**(1989), 367.
- [30] M. Feindt, DESY 89-142 (1989).
- [31] T. A. Armstrong et al., *Phys. Lett.*, **221B**(1989), 216.
- [32] C. Edwards et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 859.
- [33] J. Becker et al., Contributed Paper to the 23rd Int. Conf. on HEP, Berkeley, July 1986 and SLAC-PUB-4246 (1987).
- [34] B. Jean-Marie, Proc. of the 23rd Int. Conf. on HEP, Berkeley, July 1986.
- [35] L. Köpke, Proc. of the 23rd Int. Conf. on HEP, Berkeley, July 1986.
- [36] M. G. Rath et al., *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 802.
- [37] M. G. Rath et al., *Phys. Rev.*, **D40**(1989), 693.
- [38] N. R. Stanton et al., *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), **346**.
- [39] A. Ando et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 1296.
- [40] T. Tsuru, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Hadron Spectroscopy, Tsukuba, Japan, 1987.
- [41] S. Chang et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 779;
A. Birman et al., *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 1557.
- [42] D. F. Reeves et al., *Phys. Rev.*, **D34**(1986), 1960.
- [43] N. Wermes, SLAC-PUB-3730 (1985).
- [44] M. S. Chanowitz, LBL-16489(1983); M. S. Chanowitz and S. R. Sharpe, *Nucl. Phys.*, **B222**(1983), 211.
- [45] T. Teshiman et al., *Phys. Lett.*, **123B**(1983), 455;
E. Kawai, *Phys. Lett.*, **124B**(1983), 262;
H. Haber et al., *Phys. Rev.*, **D32**(1985), 2961;
J. L. Rosner, *Phys. Rev.*, **D27**(1983), 1101;
F. Caruso et al., *Z. Phys.*, **C30**(1986), 493;
S. Basu et al., *Phys. Rev.*, **D37**(1988), 1250.
郁宏等, 高能物理与核物理, **8**(1984), 285;
郁宏, 高能物理与核物理, **12**(1988), 754.
- [46] D. Coffman et al., *Phys. Rev.*, **D38**(1988), 2695.
- [47] J. Jousset et al., *Phys. Rev.*, **D41**(1990), 1389.
- [48] N. A. Roe et al., SLAC-PUB-4931 (1989).
- [49] Kuang Ta Chao, *Phys. Rev.*, **D39**(1989), 1353;
F. J. Gilman and R. Kauffman, *Phys. Rev.*, **D36**(1987), 2761; **D37**(1988), 3348;
Abraham Seiden et al., *Phys. Rev.*, **D38**(1988), 824;
R. Akhoury and J. M. Frere, *Phys. Lett.*, **220B**(1989), 258.
- [50] W. J. Wisniewski et al., Proc. of the 2nd Int. Conf. on Hadron Spectroscopy, Tsukuba, Japan, 1987, and CALT-68-1446 (1987).
- [51] L. Stanco, Contrib. to the BNL Workshop on Glueballs, Hybrids and Exotic Hadrons, Upton N. Y., Aug. 1988.
- [52] G. Szklarz, LAL 89—61 (1989).
- [53] Z. Bai et al., SLAC-PUB-5275 (1990).
- [54] C. Edwards et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 458.
- [55] M. E. B. Franklin, Ph. D. Thesis, SLAC Report 254 (1982); D. L. Scharre, Proc. of the 10th Int. symp. on Lepton and Photon Interactions at High Energy, Bonn 1981.
- [56] W. Toki, SLAC-PUB-3262 (1983);
K. F. Einsweiler, Ph. D. Thesis, SLAC Report 272(1984);
R. M. Baltrusaitis, *Phys. Rev.*, **D35**(1987), 2077.
- [57] J. -E. Augustin et al., Orsay Preprint, LAL 85-27, (1985); F. Couchot, Ph. D. Thesis, Orsay Preprint, LAL 87-55, (1987); J. -E. Augustin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2238.
- [58] D. Aston et al., *Nucl. Phys.*, **B301**(1988), 525; *Phys. Lett.*, **208B**(1988), 342.
- [59] T. Armstrong et al., *Phys. Lett.*, **167B**(1986), 133.
- [60] H. Aihara et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 404.
- [61] M. Althoff et al., *Z. Phys.*, **C29**(1985), 189.
- [62] H. J. Behrend et al., *Z. Phys.*, **C43**(1989), 91.
- [63] Ch. Berger et al., *Z. Phys.*, **C37**(1988), 329.
- [64] G. Costa et al., *Nucl. Phys.*, **B175**(1980), 402.
- [65] D. Alde et al., *Phys. Lett.*, **216B**(1989), 451

- [66] S. Ono and F. Schöbert, *Phys. Lett.*, **118B**(1982), 419.
- [67] M. S. Chanowitz, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Hadron Spectroscopy, Tsukuba, Japan, April 1987.
- [68] J. -E. Augustin et al., Orsay Preprint, LAL/85-27 (1985).
- [69] B. F. L. Ward, *Phys. Rev.*, **D33**(1986), 1900.
- [70] B. A. Li et al., *Phys. Rev.*, **D35**(1987), 1070.
- [71] Qi-Xing Shen and Hong Yu, *Phys. Rev.*, **40**(1989) 1517.
- [72] Roger A. Lee, in QCD and Beyond, proceedings of the XXth Rencontre de Moriond, Les Arcs, France, 1985, edited by J. Tran Thanh Van, p. 311.
- [73] K. F. Liu et al., *Phys. Rev.*, **D40**(1989), 3648.
- [74] M. S. Chanowitz and S. R. Sharpe, *Nucl. Phys.*, **B222**(1983), 211.
- [75] R. Jaffe, *Phys. Rev.*, **D15**(1977), 267; B. A. Li and K. F. Liu, *Phys. Rev.*, **D32**(1985), 308.
- [76] K. F. Einsweiler, SLAC-PUB-3202 (1983).
- [77] R. M. Baltrusaitis et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 107.
- [78] G. Eigen, CALT-68-1483(1987).
- [79] 严武光, 郁宏, 高能物理与核物理, **13**(1989), 234.
- [80] 严武光, 高能物理与核物理, **14**(1990), 193.
- [81] 郁宏, 高能物理与核物理, **13**(1989), 87.
- [82] J. Augustin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2238.
- [83] H. Haber and G. Kane, *Phys. Lett.*, **135B**(1984), 196; R. Wiley, *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 585; R. M. Barnett et al., *Phys. Rev.*, **D30**(1984), 1529.
- [84] B. F. L. Ward, *Phys. Rev.*, **D31**(1985), 2849; **D32**(1986), 1260.
沈齐兴和郁宏, 高能物理与核物理, **14**(1990), 477.
- [85] M. Chanowitz and S. R. Sharpe, *Phys. Lett.*, **132B**(1983), 413; K. T. Chao, *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2579.
- [86] S. Pakvasa et al., *Phys. Lett.*, **145B**(1984), 134; *Phys. Rev.*, **D31**(1985), 2378 以及 [85] 中赵光达的文章.
- [87] S. Godfrey, R. Kokoski and N. Isgur, *Phys. Lett.*, **141B**(1984), 439.
- [88] G. Eigen, CALT-68-1595 (1989).
- [89] D. Alde et al., *Phys. Lett.*, **177B**(1986), 120.
- [90] V. F. Obraztsov, Proc. of the 23rd Int. Conf. on HEP, Berkeley, July 1986.
- [91] Z. Bai et al., SLAC-PUB-5159 (1990).
- [92] J. Sculli et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1715.
- [93] G. Bardin et al., *Phys. Lett.*, **195B**(1987), 292.
- [94] F. Binon et al., *Nuovo Cimento*, **78A**(1983), 313.
- [95] F. Binon et al., *Nuovo Cimento*, **80A**(1984), 363.
- [96] D. Alde et al., *Nucl. Phys.*, **B269**(1986), 485
- [97] D. Alde et al., *Phys. Lett.*, **198B**(1987), 286.
- [98] S. S. Gershtein et al., *Z. Phys.*, **C24**(1984), 305.
- [99] 郁宏, 高能物理与核物理, **14**(1990), 286.
- [100] V. A. Novikov et al., *Nucl. Phys.*, **B165**(1980), 55, 67; **B191**(1981), 301; A. Billoire et al., *Phys. Lett.*, **95B**(1980), 99.
- [101] D. Alde et al., *Phys. Lett.*, **201B** (1987), 160.
- [102] G. J. Gounaris, *Nucl. Phys.*, **B320**(1989), 253; J. Lanik, *Z. Phys.*, **C39**(1988), 143.
- [103] A. Etkin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 1620.
- [104] S. J. Lindenbaum and H. J. Lipkin, *Phys. Lett.*, **149B**(1984), 407; S. J. Lindenbaum and R. S. Longacre, *Phys. Lett* **165B**(1985), 202.
- [105] A. Etkin et al., *Phys. Lett.*, **165B**(1985), 217.
- [106] A. Etkin et al., *Phys. Lett.*, **201B**(1988), 568.
- [107] P. S. L. Booth et al., *Nucl. Phys.*, **B273**(1986), 677.
- [108] T. A. Armstrong et al., *Phys. Lett.*, **221B**(1989), 221.
- [109] D. Bisello et al., *Phys. Lett.*, **179B**(1986), 294; D. Bisello et al., LAL 90-12 (1990).
- [110] R. M. Baltrusaitis et al., *Phys. Rev.*, **D33**(1986), 1222; *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 1723.
- [111] D. Bisello et al., *Phys. Rev.*, **D39**(1989), 701; *Phys. Lett.*, **192B**(1987), 239.
- [112] R. Sinha et al., *Phys. Rev.*, **D35**(1987), 952.
- [113] T. Bolton, Proceedings of the Tau Charm Workshop, SLAC-REPORT-343, p. 763; S. U. Chung, CERN COURIER, 28(1988) No. 10, 25.

- [114] D. Alde et al., *Phys. Lett.*, **205B**(1988), 397.
[115] Y. Minghan, invited talk, Lepton Photon Symposium, Stanford University, August 7-12, 1989.
[116] M. S. Chanowitz, LBL-26484 (1989).

Current Situation on the Glueball Research

SHEN QIXING

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

ABSTRACT

The current situation on the glueball research is reviewed in this paper. The emphases are some qualitative guidances to identify the glueball and several possible candidate states for the glueball which have been discovered in the experiments.