

胶球寻找的实验现状

祝玉灿

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 阐述了有关胶球寻找的最新实验状况,特别是集中在确认标量和张量胶球方面的现状.

关键词 胶球 湮没 中心产生 衰变

1 引言

夸克模型预言所有的介子都是由一个夸克和它的反夸克所组成,对于仅仅含有 u、d、s 轻夸克所组成的介子,在具有相同的 J^{PC} 量子数,而同位旋 I 分别为 1、0 和 $1/2$ 的情况下,应该有九种介子. 随着实验上的进展,尤其是 J^{PC} 为 0^{++} 的标量介子发现多于九个. 这就表明,除了符合夸克模型预言的普通介子外,那些多余的填不进去的介子到底是哪一类新型的粒子,成为国际上关注的焦点. 另外,格点规范理论取得了新的进展,对基态标量胶球和张量胶球的质量给出了定量的估计,恰恰与实验上发现的新型粒子相吻合. 因此,近些年来出现了胶球寻找和确认的热潮. 本文重点介绍几个不同的实验,如质子和质子对撞中心产生过程、质子和反质子湮没过程、 J/ψ 衰变过程及双光子产生过程,通过这些实验过程揭示出的现象和性质,提供鉴别和区分胶球和普通介子的信息.

2 QCD 与胶球

七十年代初,为了解释强相互作用下出现的实验事实,提出了量子色动力学 QCD 理论, QCD 认为组成强子的夸克之间存在着强相互作用,原因是除了夸克具有不同的“味”量子数以外,每种味道的夸克还具有不同“色”的量子数,也就是说,夸克还带有色荷,正如电荷决定电磁相互作用的强度一样,色荷决定着强相互作用的强度. QCD 认为夸克之间的强相互作用是通过胶子场传递的,而胶子正如传递电磁相互作用的光子那样,都是通过规范场来描述. 只不过光子不带电荷,光子与光子之间没有电磁相互作用,它由阿贝尔 $U(1)$ 规范理论所描述,而胶子本身带有色荷,由非阿贝尔 $SU_c(3)$ 规范理论所预言,胶子与胶子之间具有自耦合相互作用,由此,两个或多个胶子可以耦合成胶子束缚态——胶

球.

七十年代末, DESY 的几个实验组同时发现三喷注现象, 为胶子的存在提供了间接的实验证据. 如果实验上能够确认胶球的存在, 那将是对 QCD 预言的强有力的支持, 并且也是一类新粒子在实验上的发现.

从电荷在真空极化条件下的“屏蔽效应”, 即电磁相互作用在大动量转移, 相当于小距离处的作用强度会变强; QCD 理论引进了“反屏蔽效应”, 即强相互作用在大动量转移, 相应于小距离处的强作用强度会变弱, 电荷在真空极化条件下, 呈现“反屏蔽效应”, 这样就很好地解释了“渐进自由”的实验现象. 同时, QCD 理论认为强相互作用耦合常数也应该与动量转移相关, 引入了跑动耦合常数 $\alpha_s(q^2)$. 如果假定夸克具有三种颜色, 理论上计算的 R 值便与实验结果符合. 另外, QCD 还成功地解释了强子的某些静态特征, 正如强子的磁矩、强子多重态的质量劈裂等. 尽管随着 QCD 理论的进展, 加深了对强相互作用的认识. 然而, 涉及到非微扰理论计算的强相互作用现象, 还有待于 QCD 理论的进一步完善和发展.

3 实验现状

从八十年代至今, 世界上许多类型的实验组开展了大量与胶球寻找有关的工作, 例如通过 π 或者 K 介子和质子相互作用、质子和质子对撞中心产生、质子和反质子湮没产生、 J/ψ 辐射衰变产生、双光子过程研究与胶球有关的工作等, 观察到许多令人感兴趣的胶球候选者, 或者可能是混杂态、四夸克态, 如: $f_0(980)$ 、 $E/f_1(1420)$ 、 $\iota/\eta(1440)$ 、 $f_0(1500)$ 、 $\theta/f_j(1710)$ 、 $\xi(2230)$ 等.

通过 π 或 K 介子和质子相互作用, 寻找胶球、混杂态或奇特态的实验组有 BNL-852、BNL-881、Serpukhov-147、Serpukhov-164 等, 具体反应道如下:

$$\pi^- p \rightarrow n(\eta\eta), n(\eta\pi^0), n(\eta\pi^+\pi^-), n(\eta\eta');$$

$$\pi^- p \rightarrow n(\varphi\varphi), n(\varphi K^+ K^-);$$

$$\pi^- p \rightarrow n(K_s^0 K_s^0), n(\Lambda\Lambda);$$

$$\pi^- p \rightarrow p(\pi^- \pi^+ \pi^-);$$

$$\pi^- p \rightarrow n(\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-), n(\omega\omega), n(\pi^0 \pi^0);$$

$$K^- p \rightarrow \Lambda(\varphi\varphi), \Sigma(\varphi\varphi).$$

从 π 或 K 介子和质子相互作用的费曼图可以看出, 有些过程可以产生普通介子态, 如图 1, 有些过程也可以产生胶球, 如图 2. 图 1(b) 表示通过 $K^- p$ 反应产生 Λ 重子和胶球是很困难的. 最近 BNL-852 公布, 通过 $\pi^- p \rightarrow n(\eta\pi)$ 和 $\pi^- p \rightarrow p(\pi^- \pi^+ \pi^-)$ 分别发现了 J^{PC} 为 1^-+ 的奇特态, 其共振质量分别为 1.3GeV 和 1.6GeV , 目前, 还没有更多的实验重复出现此类的奇特态.

通过质子和质子对撞中心产生的实验如: CERN-WA-091、CERN-WA-102, 具体的反

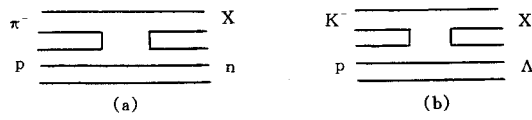


图 1

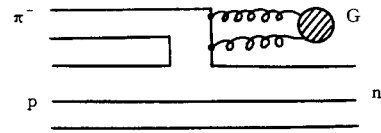


图 2

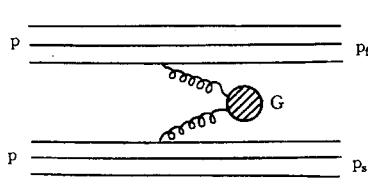


图 3

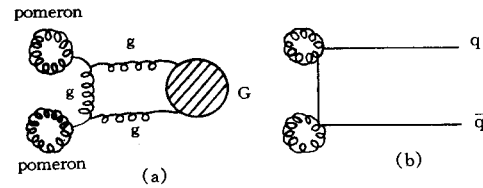
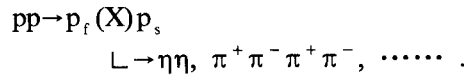


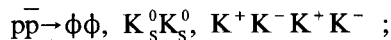
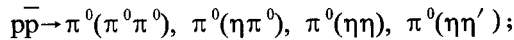
图 4

应过程如下:

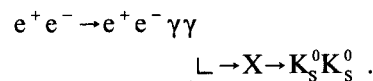


通过质子和质子对撞中心产生出现胶球的一种可能的图象正如图 3 所示. 特别需要指出的是西欧中心的 WA-76, WA-091 和 WA-102 实验组, 通过质子和质子中心产生的实验事实提出一种判断胶球产生的新机制¹⁾. 概括地说, 当质子和质子对撞时, 存在一个中间过程, 中间交换的物体是含有多个胶子的被称为 pomeron 的粒子, 随着对撞的质心系能量的提高, 这样的两个 pomeron 粒子的交换产生截面变得更大. 这两个 pomeron 粒子的交换既可以通过一个胶子进行, 也可以通过一个夸克进行, 如果是前者就会产生胶球, 如果按后者进行, 就会产生普通介子态, 如图 4 所示. 最近的实验结果表明, 当散射出的两个次级质子 (p_s 和 p_f) 之间的夹角偏小, 即相应于两个交换粒子 (pomeron) 的横动量差 dp_T 较小时, 明显地出现胶球候选者 $f_0(1500)$ 、 $f_j(1710)$, 而普通介子态 ρ 、 $f_2(1270)$ 、 $f_2'(1525)$ 、 $f_1(1285)$ 明显被压抑, 如图 5 所示.

通过质子和反质子湮没产生的实验有: CERN-PS-197 (Crystal Barrel) 和 CERN-PS-202 (JetSet) 等, 具体反应如下:



通过双光子过程的实验如: CESR/ CLEO, 具体反应过程如下:



1) WA102 Collaboration. CERN/PPE96-XXX, 10 Dec. 1996

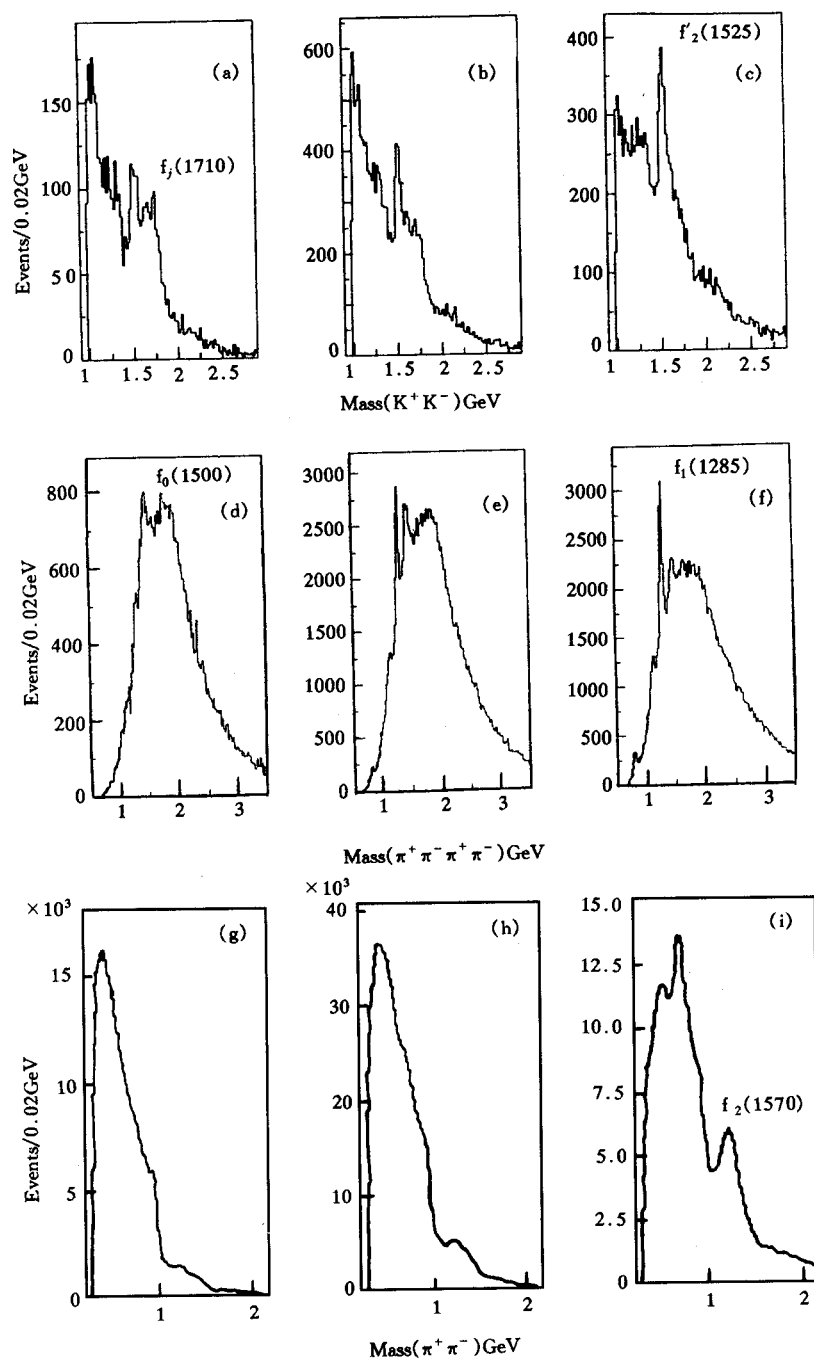


图 5 不同 dp_T 情况下, 相应的 K^+K^- , 4π 和 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱

(a), (d), (g): $dp_T < 0.2\text{GeV}$; (c), (f), (i): $dp_T > 0.5\text{GeV}$; (b), (e), (h): $0.2\text{GeV} < dp_T < 0.5\text{GeV}$.

众所周知, J/ψ 的产生截面大, 易于在短时间内获取较高统计的 J/ψ 事例; 它的非共振本底小, 事例图象清楚; J/ψ 衰变过程中始态的动量是确定的, 有利于物理分析; J/ψ

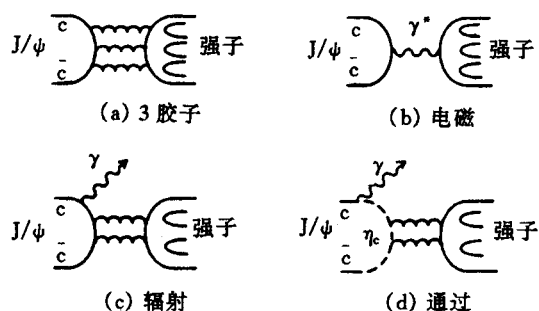


图 6

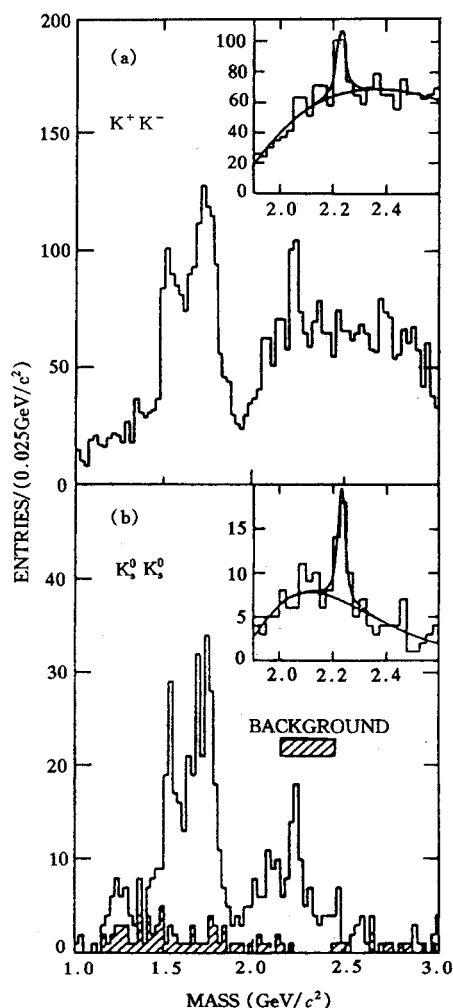


图 7 Mark III 通过 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma K_s^0 K_s^0$ 观察到 $\xi(2230)$ 的信号^[3]

只能通过 $(c\bar{c})$ 湮没后, 经由三胶子的强衰变过程、一个光子和两个胶子的辐射衰变过程、一个虚光子的电磁衰变过程衰变到强子终态, 如图 6 所示. 由此看来, J/ψ 衰变过程为系统的研究轻夸克强子谱和胶球的寻找提供了极为有利的实验场所. Mark II、Crystal Ball、Mark III 和 DM II 实验组分别获取了 1.6×10^6 、 2.2×10^6 、 5.8×10^6 和 8.6×10^6 个 J/ψ 事例. 自从北京正负电子对撞机 (BEP) 对撞成功后, 在北京谱仪 (BES) 上, 已经获取了 9×10^6 个 J/ψ 事例. 经过改进行升级后, 计划在 BES II 上, 获取更多的高质量 J/ψ 事例, 为研究 J/ψ 衰变物理提供更丰富的资源.

同时, 理论上对胶子球质量的估算, 也建立了位势模型、口袋模型、QCD 求和规则、格点规范理论及等效拉氏量方法等. 特别是超大型计算机的应用, 为格点规范理论的计算提供了优越的条件, 象 GF-11 (IBM) 组^[1] 给出了标量胶球的质量为 (1740 ± 71) MeV, 宽度为 (108 ± 29) MeV; UKQCD 组^[2] 给出标量胶球的质量为 (1550 ± 50) MeV, 张量胶球的质量为 (2270 ± 100) MeV.

近几年来, 随着理论和实验上的进展, 为数不多的几个胶球候选者, 如 $\xi(2230)$ 、 $\theta/f_j(1710)$ 和 $f_0(1500)$ 成为当前世界上胶球确认的热点.

早在 1986 年, MARK III 实验组^[3] 在

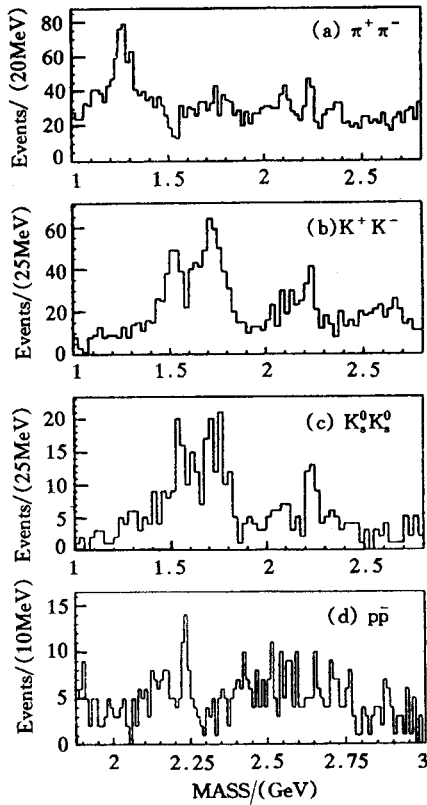


图 8 BES 通过 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$, $J/\psi \rightarrow \gamma K_S^0 K_S^0$, $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma p \bar{p}$ 观察到 $\xi(2230)$ 的信号^[4]

$\pi^+ \pi^-$ 和 $K^+ K^-$ 的衰变分宽度约 400KeV, 其衰变几率在扣除了相空间的贡献后, 呈现出较好的味对称性; 在 J/ψ 辐射衰变中大量产生等, 用普通介子、四夸克态和混杂态等均难以

表 1 BES 给出 $\xi(2230)$ 的质量、宽度和分支比^[4]

Decay mode	M_ξ (MeV)	Γ_ξ (MeV)	$B(J/\psi \rightarrow \gamma \xi) B(\xi \rightarrow X)$ (10^{-5})
$\pi^+ \pi^-$	$2235 \pm 4 \pm 6$	$19_{-11}^{+13} \pm 12$	$5.6_{-1.6}^{+1.8} \pm 2.0$
$K^+ K^-$	$2230_{-7}^{+6} \pm 16$	$20_{-15}^{+20} \pm 17$	$3.3_{-1.3}^{+1.6} \pm 1.2$
$K_S^0 K_S^0$	$2232_{-7}^{+8} \pm 15$	$20_{-16}^{+25} \pm 14$	$2.7_{-0.9}^{+1.1} \pm 0.8$
$p \bar{p}$	$2235 \pm 4 \pm 5$	$15_{-9}^{+12} \pm 9$	$1.5_{-0.5}^{+0.6} \pm 0.5$

解释, 恰恰能被胶球的解释所接受^[5]. 另外, 它在双光子的实验中, 至今还没有被观察到. 最近, CLEO 实验组^[6]通过对双光子产生 ξ , 而 ξ 衰变到 $K_S^0 K_S^0$ 的过程给出了 $\Gamma_{\gamma\gamma} \cdot Br(\xi \rightarrow K_S^0 K_S^0)$ 的上限, 即在 95% 的置信水平下, 小于 1.3eV, 从而估算出粘度 $S_\xi > 82$ (95% C.L.), 事实上, 由于胶子与光子很难耦合, 从它的费曼图不难看出双光子产生胶球的几率是很小

$J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma K_S^0 K_S^0$ 衰变道中发现了 $\xi(2230)$ 的信号, 且衰变宽度很窄, 如图 7 所示. DMII 实验组没有重复观察到此信号, 其它固定靶实验, 如 $\pi^- p \rightarrow n \eta \eta'$, $\pi^- p \rightarrow n K_S^0 K_S^0$ 和 $K^- p \rightarrow \Lambda K^+ K^-$, 在 2.2GeV 附近尽管发现了共振态, 但是质量和衰变宽度均与 MARK III 组发现的 $\xi(2230)$ 不完全相符. BES 合作组通过 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma K_S^0 K_S^0$, 分别以 4.1σ 和 4.0σ 的置信水平重复观察到 $\xi(2230)$ 的信号, 其质量、衰变宽度及过程的分支比均与 MARK III 实验组得到的结果相一致, 于是使 $\xi(2230)$ 的存在得以确认. 此后, BES 在非奇异夸克的衰变模式, $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma p \bar{p}$ 过程中观察到 $\xi(2230)$, 如图 8 所示, 并给出它的质量、宽度和过程的分支比^[4], 见表 1. 由此揭示出的若干重要性质, 如衰变宽度很窄, 约 20MeV; 到

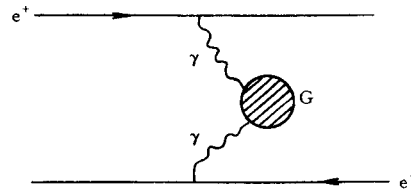


图 9

的,如图 9 所示. 由此,该实验组没有观察到 $\xi(2230)$,恰恰说明 $\xi(2230)$ 是一个重要的胶球候选. 目前, BES 正在 $\xi \rightarrow \pi^0 \pi^0, \eta\eta, \eta\eta'$ 和 $\eta'\eta'$ 等衰变道中^[7], 系统研究 $\xi(2230)$ 的重要性质, 结果如图 10 所示. 关于 $\xi(2230)$ 的自旋宇称的特性, 应用矩分析方法进行了初步分析, 由于统计量的限制, 到底是 2^{++} 还是 4^{++} , 仍然不能给予区分. 近来, 西欧中心的 Crystal Barrel 和 JetSet 实验组^[8] 利用质子-反质子湮没产生 $K^+K^-, \pi^+\pi^-, K_s^0K_s^0, \pi^0\pi^0, \eta\eta$ 这些末态, 对 $\xi(2230)$ 能区进行扫描, 据他们报道的初步结果, 没有观察到 ξ 的信号, 给出新的分支比上限为:

$$Br(\xi \rightarrow p\bar{p}) \cdot Br(\xi \rightarrow K_s^0 K_s^0) < 7.5 \times 10^{-5};$$

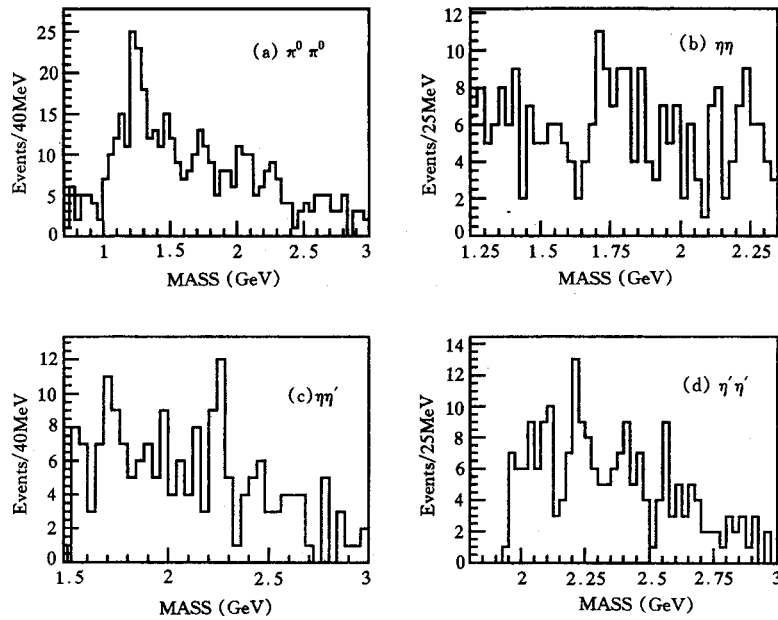


图 10 BES 给出 $\xi(2230)$ 在 $\pi^0\pi^0, \eta\eta, \eta\eta'$ 和 $\eta'\eta'$ 不变质量谱中的信息^[7]

结合 BES 已经公布的结果

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma\xi) \cdot Br(\xi \rightarrow p\bar{p}) = 1.5 \times 10^{-5};$$

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma\xi) \cdot Br(\xi \rightarrow K_s^0 K_s^0) = 2.7 \times 10^{-5},$$

不难看出

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma\xi) > 2 \times 10^{-3};$$

$$Br(\xi \rightarrow K_s^0 K_s^0) \approx 10^{-2};$$

$$Br(\xi \rightarrow p\bar{p}) \approx 0.7 \times 10^{-2},$$

暗示出 $\xi(2230)$ 还有许多衰变道没有发现, 而且可能还有几个衰变几率非常大的模式有待

深入探讨, 象 $\xi \rightarrow \eta\eta'$ 、 $\xi \rightarrow \eta' \eta'$ 、 $\xi \rightarrow 4\pi$ 都是今后特别值得探讨的衰变模式, 再来看一下产生 $\xi(2230)$ 的截面与 $\xi(2230)$ 的衰变分支比之间的关系^[9]:

$$\sigma_{\text{peak}} = [4\pi\hbar^2 c^2(2J+1) / (s-4m_p^2)] \times Br(\xi \rightarrow p\bar{p}) \times Br(\xi \rightarrow K^+ K^-),$$

具体数据见表 2. 假定 $\xi(2230)$ 的宽度为 20MeV 、 $J^{PC} = 2^{++}$, 从表中可以估算出, $\xi(2230)$ 产生的截面大约是 $2-3\mu\text{b}$, 而 JetSet 实验组给出的扫描曲线表明, 其本底水平也是 $2-3\mu\text{b}$, 如图

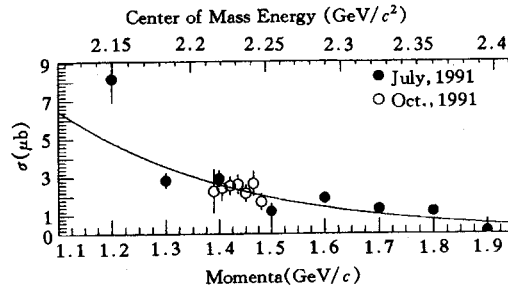


图 11 JetSet 实验组给出 $\xi(2230)$ 产生截面和 $p\bar{p}$ 质心系能量之间的扫描曲线^[8]

11 所示. 由此看来, 降低 $p\bar{p}$ 湮没实验的本底; 提高探测器的灵敏度和分辨率; 增加扫描点, 成为该实验的当务之急. $\xi(2230)$ 是否是个 2^{++} 的胶球, 有待于 J/ψ 衰变和 $p\bar{p}$ 湮没等实验更细致的研究, 提供更准确的、统计性更好的实验数据.

表 2 $\xi(2230)$ 的产生截面和它的衰变分支比之间的关系^[9]

Γ (MeV / c^2)	J^{PC}			
	0^{++}		2^{++}	
	σ_{peak} (μb)	Double Br ($\times 10^{-4}$)	σ_{peak} (μb)	Double Br ($\times 10^{-4}$)
1	10	30	13	7.7
3	6	18	7.7	4.6
30	1.8	5.4	2.1	1.3

早在 1982 年, Crystal Ball 实验组^[10]在 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta$ 衰变道中首先观察到 $\theta/f_j(1710)$ 共振信号. 随后, 许多实验组都对它的性质作了大量的研究, 结果表明, 共振质量和衰变宽度各不相同, 尤其是 $\theta/f_j(1710)$ 的自旋宇称为 0^{++} , 还是 2^{++} , 说法不一. 由此看出, 这个较早被人们认为是胶球的候选者, 它的性质在实验上依然迷惑不解, 见表 3. BES 通过 J/ψ

表 3

衰变模式	实验组	$M(\text{MeV})$	$\Gamma(\text{MeV})$	J^{PC}
$J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta$	C. B. (1982)	1640 ± 50	220^{+100}_{-70}	2^{++}
$\pi^- p \rightarrow K_s^0 K_s^0 n$	BNL(1982)	1771^{+77}_{-53}	200^{+156}_{-9}	0^{++}
$\pi^- N \rightarrow K_s^0 K_s^0 n$	FNAL(1984)	1742 ± 15	57 ± 38	
$\pi^- p \rightarrow \eta\eta N$	GAMS(1986)	1755 ± 8	< 50	0^{++}
$p\bar{p} \rightarrow p(K\bar{K})\bar{p}$	WA76(1989)	1713 ± 10	181 ± 30	2^{++}
$J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$	DM2(1988)	1707 ± 10	166 ± 33	0^{++} or 2^{++}
$J/\psi \rightarrow \gamma K\bar{K}$	MARK III(1991)	1710 ± 20	186 ± 30	0^{++} (2^{++})
$p\bar{p} \rightarrow \pi^0 \eta\eta$	E760(1993)	1748 ± 10	264 ± 25	even $^{++}$
$J/\psi \rightarrow \gamma 4\pi$	MARK III data D. Bugg(1995)	1750 ± 15	160 ± 40	0^{++}

表4 BES给出 $f_j(1710)$ 质量区间 0^{++} 和 2^{++} 成份的质量、宽度和分支比^[11]

Spin	Mass (MeV)	Width (MeV)	$Br(J/\psi \rightarrow \gamma X)(X \rightarrow K^+ K^-)(10^{-4})$
0^{++}	$1781 \pm 8^{+10}_{-31}$	$85 \pm 24^{+22}_{-19}$	$0.8 \pm 0.1^{+0.3}_{-0.1}$
2^{++}	$1696 \pm 5^{+9}_{-34}$	$103 \pm 18^{+30}_{-11}$	$2.5 \pm 0.4^{+0.9}_{-0.4}$
$f_2'(1525)$	$1516 \pm 5^{+9}_{-15}$	$60 \pm 23^{+13}_{-20}$	$1.6 \pm 0.2^{+0.6}_{-0.2}$

$\rightarrow \gamma K^+ K^-$ 观察到 $\theta / f_j(1710)$ 为一个宽共振的信号, 它即不是纯 0^{++} , 也不是纯 2^{++} , 而是二者的耦合, 采用矩分析法, 将 $\theta / f_j(1710)$ 质量范围分成若干小区间, 把 0^{++} 和 2^{++} 成分的螺旋度振幅随不变质量区间而变化的曲线绘制出来, 发现 2^{++} 的成分位于 $\theta / f_j(1710)$ 质量范围的低质量端, 而 0^{++} 的成分在高质量端. 经过拟合, 分别给出这两个成分的质量、宽度和过程的分支比^[11], 如图 12、13 和表 4 所示.

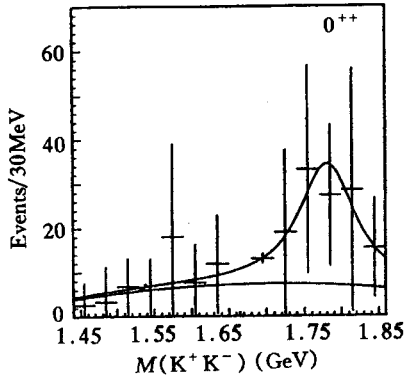


图12

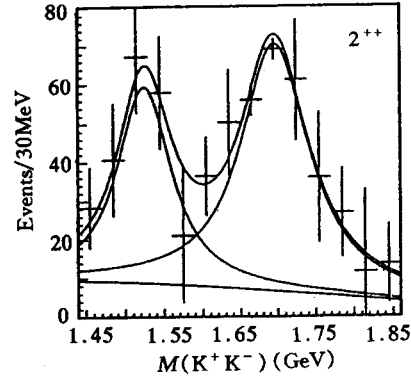


图13

根据最近理论上给出的估计公式^[12]:

$$10^3 Br(J/\psi \rightarrow \gamma 0^{++}) = \frac{m}{1.5 \text{ GeV}} \cdot \frac{\Gamma_{R \rightarrow gg}}{96 \text{ MeV}} \cdot \frac{x |H_S(x)|^2}{35}$$

其中: $x = 1 - \left(\frac{m}{m_{J/\psi}}\right)^2$; $H_S(x)$ 为随 $x = 1 - \left(\frac{m}{m_{J/\psi}}\right)^2$ 变化的函数, 下标 S 表示标量介子. 由实验和理论, 可以给出 $Br(R \rightarrow gg)$ 的值, 对于 $\theta / f_j(1710)$ 区间的 0^{++} 成分而言, 估算表明它衰变到双胶子的分支比相当大, 意味着它具有相当大的胶球成分.

Crystal Barrel 实验组通过质子和反质子湮没生成 $\pi^0(\pi^0\pi^0)$ 、 $\pi^0(\eta\eta)$ 和 $\pi^0(\eta\eta')$ 观察到另一个标量胶球候选者 $f_0(1500)$ ^[13]. Mark III 和 DM2 实验组在分析 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 衰变过程中, 从 4π 不变质量谱中发现三个共振结构, 分别位于 1.5 GeV、1.8 GeV 和 2.1 GeV 附近, 前两个共振结构的自旋宇称为 0^- , 主要通过 $\rho\rho$ 衰变到 4π 末态. 1993 年费米实验室 E760 通过 $p\bar{p}$ 湮没产生 $\pi^0(\eta\eta)$, 在 $(\eta\eta)$ 不变质量谱中也观察到类似的三个结构. 众所周知, 相对于 $(\eta\eta)$ 系统, 自旋宇称不可能成为 0^- . 1995 年 Crystal Barrel 实验组

的 Bugg 教授认为, 除了 $J/\psi \rightarrow \gamma\rho\rho \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 的过程外, 也应该考虑 $J/\psi \rightarrow \gamma\sigma\sigma \rightarrow \gamma\pi$

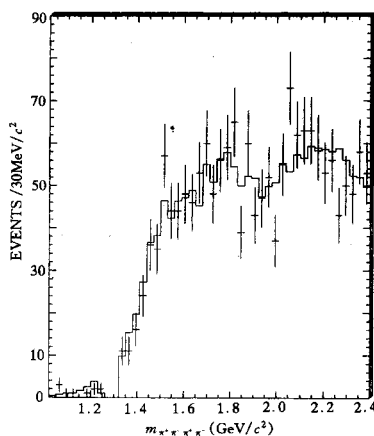


图 14 BES 拟合 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 的 4π 不变变量谱^[14]

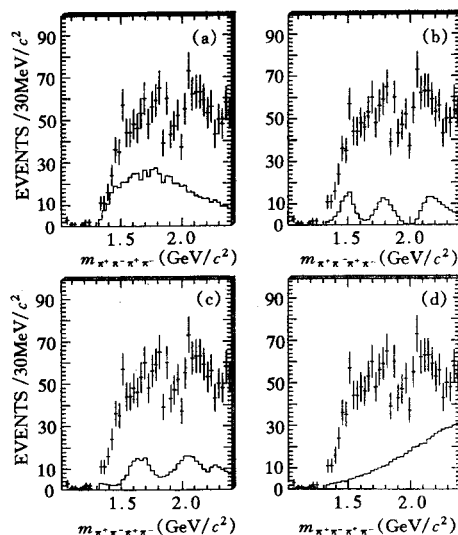


图 15 各种分波成分的贡献^[14]
(a) 0^- 成份的贡献; (b) 0^+ 成份的贡献; (c) 2^+ 成份的贡献; (d) 本底贡献.

$^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 的过程, 他们对 Mark III 的数据重新分析, 结果表明 1.5GeV 和 1.8GeV 附近的共振态的自旋宇称为 0^+ , 而不是以前给出的 0^- 且主要通过 $\sigma\sigma$ 过程衰变到 4π 末态. 而

表 5 BES 在拟合 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 所设置的数据表^[14]

J^P	Mass	channel	L or $^{2S+1}L_2$
2^+	$f_2(1270)$	$\rho\rho$	1D_2 3D_2
0^-	$\eta(1440)$	$\rho\rho$	$L=1$
0^+	$f_0(1500)$	$\sigma\sigma$	$L=0$
2^+	$f_2(1560)$	$\rho\rho$	5S_2 1D_2 3D_2
2^+	$f_2(1710)$	$\rho\rho$	5S_2
0^+	$f_0(1750)$	$\sigma\sigma$	$L=0$
2^+	$f_2(2010)$	$\sigma\sigma$	1D_2 3D_2
		$\rho\rho$	1D_2 3D_2
		$f_2(1270)\sigma$	5S_2
0^+	$f_0(2100)$	$\sigma\sigma$	$L=0$
2^+	$f_2(2220)$	$\sigma\sigma$	5S_2 3D_2
		$\rho\rho$	5S_2 3D_2
		$f_2(1270)\sigma$	5S_2

$2.1\text{GeV}/c^2$ 共振结构的自旋宇称为 2^+ , 且主要是通过 $\rho\rho$ 的过程衰变到 4π 末态. 随后, BES 采用 Bugg 教授提供的分波法, 对 BES 的 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 数据进行了分析^[14], 发

现他们的分析工作中有两点需要改进:首先在计算总截面时,蒙特卡罗模拟过于简化,对粒子在探测器中相互作用的全过程并非进行全面模拟;其次,对本底形状的描述和估算也显得粗糙.而总截面和本底的计算和描述又是格外的重要,BES 实验组在分析工作中,对以上两点作了仔细的改进.通过最大似然法对 BES 的数据进行拟合后,可能的共振态及其相应的衰变模式列在表 5.将拟合出的各个共振态,结合粒子表给出的数据,选择一组设定值,对 BES 数据从 1.0GeV 到 2.4GeV 范围进行整体拟合,结果如图 14 所示,其中各个分波成分的贡献表示在图 15 中.各个共振态的分支比列在表 6 中.

表6 BES给出 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 中各个共振态及终态为 4π 的分支比^[14]

$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_2(1270)) \cdot B(f_2 \rightarrow 4\pi) = (2.1 \pm 0.3) \times 10^{-4}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma \eta(1440)) \cdot B(\eta \rightarrow 4\pi) = (2.5 \pm 0.4) \times 10^{-3}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1500)) \cdot B(f_0 \rightarrow 4\pi) = (4.0 \pm 0.6) \times 10^{-4}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_2(1560)) \cdot B(f_0 \rightarrow 4\pi) = (4.3 \pm 0.7) \times 10^{-4}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_2(1710)) \cdot B(f_2 \rightarrow 4\pi) = (5.5 \pm 0.8) \times 10^{-4}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1750)) \cdot B(f_0 \rightarrow 4\pi) = (5.5 \pm 0.8) \times 10^{-9}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_2(2010)) \cdot B(f_2 \rightarrow 4\pi) = (1.0 \pm 0.2) \times 10^{-3}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(2100)) \cdot B(f_0 \rightarrow 4\pi) = (6.1 \pm 0.9) \times 10^{-9}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_2(2220)) \cdot B(f_2 \rightarrow 4\pi) = (2.6 \pm 0.4) \times 10^{-4}$
$B(J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-) = (4.8 \pm 0.3 \pm 0.6) \times 10^{-3}$

BES 对 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 的数据分析,除了观察到 $f_0(1500)$ 和 $f_0(1750)$ 这两个可能的标量胶球候选者外, $f_2(2220)$ 是不是 $\xi(2230)$, 也是非常引人注目的,同时,在 2GeV 附近出现一个很宽的张量介子 $f_2(2010)$ 是不是 WA102 实验组观察到的张量介子 X(1930), 这些共振态都是重要的张量胶球的候选. Amsler 和 Close^[15] 解释 $f_0(1500)$ 可能是一个与邻近的普通介子 ($n\bar{n}$) 和 ($s\bar{s}$) 混合的胶球, 而 Weingarten^[16] 设想 $\theta/f_j(1710)$ 可能是一个标量胶球, 若与邻近的普通介子 ($n\bar{n}$) 和 ($s\bar{s}$) 相混合, 其图象也并不同于前者所描述的那样.

4 前景与困难

综上所述,寻找胶球的任务还是十分艰巨的,尽管,目前对胶球的判选,已经给出一些定性和半定量的准则:

(1) 如果一个新粒子的 J^{PC} 和 I^G 等量子数与普通介子九重态(包括基态或激发态)的量子数相同,且九重态的位置已被添满.

(2) 有利于胶球产生的过程大量地产生,如 J/ψ 辐射衰变过程. QCD 计算表明,对于 J/ψ 辐射衰变,终态 X 的 J^{PC} 量子数以 0^{++} , 0^{-+} 和 2^{++} 为主,具有这些量子数的粒子正是胶球的最低能态,所以 J/ψ 辐射衰变过程是胶球丰富产生的过程,从费曼图中相互作用顶点也可以看出,这也正是 J/ψ 辐射衰变研究一直是个热门课题的原因.

(3) 不利于胶球产生的过程很少产生,如双光子过程,胶球中的胶子与光子很难耦

合. 除非胶球中的胶子首先变成一对正、反夸克, 由夸克再和光子发生相互作用, 这种几率很少, 因此这种双光子过程产生胶球是受压制的. 像 $K^- p \rightarrow \Lambda X$ 过程, 如果 X 是胶球, 将被压低. 像 OZI 规则禁戒的强衰变过程, 不利于胶球产生, 如 $\pi^- p \rightarrow n \phi \phi$, 这是一个不能直通的反应过程, 其截面一定受压低, 但是如果发现此反应的截面没有压制, 反而强烈产生, 这个中间态 ($\phi\phi$) 便可能为胶球.

(4) 由于胶球是 $SU(3)$ 味单态, 它的衰变方式是味对称的.

(5) 由 M. S. Chanowitz 引入粘度:

$$S = \frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma X)}{\Gamma(X \rightarrow \gamma\gamma)} \cdot \frac{Lips(X \rightarrow \gamma\gamma)}{Lips(J/\psi \rightarrow \gamma X)},$$

对于胶球而言, 其 S 值将会很大.

$$(6) R_v(X) = \frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow \omega X)}{\Gamma(J/\psi \rightarrow \phi X)} = \begin{cases} 2 & \text{如果 } X \text{ 为 } SU(3) \text{ 单态} \\ 1/2 & \text{如果 } X \text{ 为 } SU(3) \text{ 八重态} \end{cases},$$

Γ 表示扣除相空间影响后的宽度, 对于胶球应有 $R_v(G) > 1$, 因为胶球是 $SU(3)$ 味单态.

$$(7) R_\gamma(X) = \frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma X)}{\Gamma(J/\psi \rightarrow \{\omega, \phi\} + X)},$$

由于胶球在 J/ψ 辐射衰变过程中能够大量产生, 在 J/ψ 强衰变过程中至少要通过 OZI 的双不连通的图形才能产生, 因此, 对于胶球应有 $R_\gamma(G) \gg 1$.

(8) 最近由 Close、Farrar 和李振平^[12]对 J/ψ 辐射衰变过程给出一些定量计算的方法:

$$10^3 Br(J/\psi \rightarrow \gamma 0^{++}) = \frac{m}{1.5\text{GeV}} \cdot \frac{\Gamma_{R \rightarrow gg}}{96\text{MeV}} \cdot \frac{x |H_S(x)|^2}{35},$$

$$10^3 Br(J/\psi \rightarrow \gamma 2^{++}) = \frac{m}{1.5\text{GeV}} \cdot \frac{\Gamma_{R \rightarrow gg}}{26\text{MeV}} \cdot \frac{x |H_T(x)|^2}{34},$$

$$10^3 Br(J/\psi \rightarrow \gamma 0^{-+}) = \frac{m}{1.5\text{GeV}} \cdot \frac{\Gamma_{R \rightarrow gg}}{50\text{MeV}} \cdot \frac{x |H_P(x)|^2}{45}.$$

其中下标 S、T、P 分别代表标量介子、张量介子和赝标量介子.

如果实验上能够测定共振态 R 的质量 m 、 J^{PC} 和衰变宽度, 另外也能够确定 J/ψ 辐射衰变到 R 的分支比, 即 $Br(J/\psi \rightarrow \gamma 0^{++}, \gamma 2^{++}, \gamma 0^{-+})$, 由于理论上可以把 $x |H_f(x)|^2$ 随 $x = 1 - (m/m_{J/\psi})^2$ 变化的函数形式给出, 那么

$$Br(R \rightarrow gg) = \frac{\Gamma(R \rightarrow gg)}{\Gamma(R \rightarrow \text{all})}$$

就可以算出来. 通常, 对于普通介子和胶球分别衰变到双胶子的分支比期望如下:

$$Br(R(qq) \rightarrow gg) = O(\alpha_s^2) \approx 0.1 - 0.2;$$

$$Br(R(G) \rightarrow gg) \approx O(1),$$

由此,可以判断共振态 R 是个胶子球,还是 $(q\bar{q})$,或者是二者的混合.

事实上,要完全确认胶球的存在,实验上和理论上的困难还是很多的. (1)目前,仍然缺少对胶球的质量、宽度和衰变模式等性质的精确预言,尽管格点规范理论给出一些参数性质,但仅仅是初步的,与其他的理论预言如位势模型、口袋模型、QCD 求和规则以及等效拉氏量方法等还存在不相容的现象. (2)普通介子谱的复杂性还不完全清楚,而胶子球、四夸克态、混杂态及普通介子态的质量几乎都集中在 1—2.5GeV 之间,从实验上鉴别胶球,往往需要将它从复杂的结构中剥离出来,此外它们的各种衰变和产生的模式及性质,它们的自旋宇称都需要精确地测量和确定,这些都给胶球的确认带来十分大的难度. (3)粒子的混合相当普遍,具有相同 J^{PC} 量子数的各种粒子之间存在着混合,尽管胶球是 $SU(3)$ 味单态,如果混有 $(q\bar{q})$ 的成分,味对称性受到不同程度的破坏,也为胶球的鉴别增加了难度. (4)迄今为止,对普通介子态的研究还不完善,尤其是 0^{++} 、 0^{-+} 、 2^{-+} 九重态,还没有合适的粒子来全部填充,除了基态的研究外,还要对径向激发态和轨道激发态进行研究.

事实上胶球的研究,不仅只是确认一、两个胶球的存在,更为实质性的是构画出胶球谱,这类胶球谱学的系统研究,还有待于理论和实验方面的全面进展.

参 考 文 献

- [1] Chen H, Sexton J, Vaccarino A et al. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 1994, **34**:357
- [2] Bali G et al. phys. Lett., 1993, **B309**:378
- [3] Baltrusaitis R M et al. phys. Rev. Lett., 1986, **56**:107
- [4] BES Collaboration. phys. Rev. Lett., 1996, **75**:3502
- [5] Huang T et al. phys. Lett., 1996, **B380**:189
- [6] Galik R. Limits on two-photon production of the Xi(2230) at CLEO. In: Donnelly T W ed. 6th Conference on the Intersections of particle and Nuclear Physics. New York: The American Institute of Physics, 1997.
- [7] Zhu Y C. Experimental study on $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ and $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^0 \pi^0$, $J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta$, $J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta'$, $J/\psi \rightarrow \gamma \eta' \eta'$. 1996 Divisional Meeting of particles and fields of American Physical Society. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., 1996
- [8] Hertzog D. The xi(2230) and Other States studied at LEAR. In: Donnelly T W ed. 6th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics. New York: The American Institute of Physics, 1997
- [9] Bardin G et al. phys. Lett., 1987, **B195**:192
- [10] Edwards C et al. phys. Rev. Lett., 1982, **48**:458
- [11] BES Collaboration. phys. Rev. Lett., 1996, **77**:3959
- [12] Close F, Farrar G, Li ZP. phys. Rev., 1997, **D55**:5749
- [13] Anisovich V V et al. phys. Lett., 1994, **B323**:233
- [14] Zhu Y C. PWA analysis of BES data on $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$. In: Donnelly T W ed. 6th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics. New York: The American Institute of physics, 1997
- [15] Amsler C, Close F. Phys. Lett., 1995, **B353**:385; Phys. Rev., 1996, **D53**:295
- [16] Sexton J, Vaccarino A, Weingarten D. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:4563

Recent Experimental Status of Glueball Search

Zhu Yucan

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences Beijing 100039)

Abstract This paper described the recent experimental status of glueball search, and it particularly centred on the situation of confirmation about Scalar and Tensor glueballs.

Key words glueball, annihilation, central production, decay