

BES III 上奇特态的寻找^{*}

马续波^{1,3;1)} 房双世² 祝玉灿¹ 鲁公儒³ 杨洪勋¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

3 (河南师范大学 新乡 453002)

摘要 介绍了对奇特态质量及其衰变性质的理论研究,对奇特态候选者的实验研究现状也做了详细讨论,并分析了理论预言和实验观测之间存在的 inconsistency. 从实验的角度上,对在 BES III 上通过 J/ψ 衰变寻找奇特态的几个过程做了讨论.

关键词 奇特态 混杂态 胶球 BES III 探测器

1 引言

对强子共振态的研究很大程度上改变了我们对强子结构的认识,强子曾经被认为是基本粒子.但是,在短短的几十年的时间里,数以百计的强子被发现,强子很显然不再是基本粒子.夸克的发现^[1]使我们对强子的结构有了进一步的认识.而且夸克作为强子的基本结构组成单元决定了强子的多样性.为了从理论上描述这些强子, Gell-Mann-Zweig 在 $SU(3)$ 对称性基础上提出了朴素夸克模型^[2],这个模型反映了强子的基本组成:介子是由正反夸克组成,而重子则是由 3 个夸克组成.这个简单的模型基本上可以解释观测到的强子,并根据 $SU(3)$ 对称性对它们给予分类.

夸克和其颜色自由度及其胶子概念的提出促使 QCD 理论的诞生,对强子的认识有了理论上的根据.问题是除了介子和重子之外,是否存在其他的强子结构?根据 QCD 理论,胶子有自作用,这意味着可能存在仅由胶子组成的强子.这种由两个胶子或者 3 个胶子组成的强子被称为胶球;胶子也可以和夸克相作用组成所谓的混杂态.另外, QCD 理论也不排除存在四夸克态、五夸克态和双重子态等多

夸克态.除了上述超出夸克模型的强子态之外,还有一些内禀量子数比较奇特的态,比如带电荷为 2,或者奇异数大于 2,或者同位旋大于 1 的介子态,还有带电荷大于 2,或者同位旋大于 3/2 的重子态.这些态都不同于普通的强子态,都可以称为奇特态.

但是现在所讨论的奇特态(exotic state)一般是指混杂态中具有奇特 J^{PC} 量子数的强子.对于普通介子,它们的 P 宇称和 C 宇称满足下面的关系式

$$P = (-1)^L, C = (-1)^{L+S},$$

其中 L 表示轨道量子数, S 表示自旋量子数.如果某一介子的 J^{PC} 不满足上述关系式,它的 $J^{PC} = 0^{+-}, 1^{-+}, 2^{+-} \dots$, 则称之为奇特态.尽管多夸克态、胶球和混杂态都有可能是带有这样量子数的奇特态,但对多夸克态和胶球的讨论一般仍局限于具有非奇特量子数的强子,所以理论上和实验上研究最多的是指混杂态中具有奇特量子数的强子.由于重子的自旋为分数,不存在类似于介子的奇特量子数,所以理论上只有普通的重子混杂态,没有具有奇特量子数的重子混杂态.因此本文所讨论的主要是指具有奇特量子数的介子.无论如何,只要找到了具有奇特量子数的介子,就是理论和实验上的巨大成功.验证理论的同时也必将促进理论的发展,也为

2004-09-17 收稿

* 国家自然科学基金(19991480)

1) E-mail: maxb@mail.ihep.ac.cn

今后实验上寻找更多奇特态提供了方向.

2 理论预言

QCD 是目前能够描述强相互作用的理论,也是描述夸克和胶子相互作用的工具.但是在计算一些可观测量时非常复杂以至于目前还不能完全按照 QCD 理论计算,因此常用一些理论唯象模型去简化计算并预言可观测量.混杂态最早是在口袋模型^[3]中被提出的,这个模型认为混杂态就像一个球,夸克和胶子被镶嵌在球的内部,并被夸克场和胶子场的边界条件所禁闭.在口袋模型预言的混杂态中,质量最小的奇特态是宇称为 1^{-+} 的强子,它的质量在 1.5GeV 左右.对混杂态的质量、宽度有较好预言的是流管模型^[5],它认为介子中的夸克和反夸克是一个由虚胶子组成的流管连接,一个混杂态介子是流管激发的结果,所以在理论计算时就类似于强子振动.混杂态的衰变伴随着流管的破缺,并且预言混杂态倾向于衰变到一个 $L=1$ 和一个 $L=0$ 的介子对.比如 $b_1(1235)\pi$ 和 $f_1(1285)\pi$.后来,将流管模型进行推广,允许混杂态衰变到两个 $L=0$ 的介子对,也就是说混杂态可以衰变到 $\rho(770)\pi, \eta\pi$ 和 $\eta'\pi$.但是,流管模型预言 1^{-+} 奇特态衰变到 $L=1$ 和 $L=0$ 介子对的比例要比衰变到两个 $L=0$ 介子对的比例大得多:

$$f_1(1285)\pi : b_1(1235)\pi : \rho\pi : \eta\pi : \eta'\pi = \\ 60 : 170 : 5 - 20 : 0 - 10 : 0 - 10.$$

除此之外,格点规范理论^[6]也对混杂态的质量做了预言,其中对 1^{-+} 奇特态的质量预言见表 1. 格点规范理论是从 QCD 中的关联函数出发,减少了模型依赖性,所以理论计算结果的可信度较高.但是在计算时需要输入的参数取决于实验上对这些参数的测量精度,比如夸克的质量以及计算时的边界条件等都会影响计算结果的不确定性.格点规范理论预言由轻夸克和胶子组成的 1^{-+} 奇特态质量为 1.9GeV 左右.除此之外格点规范理论还应用于非相对论重夸克,预言了 1^{-+} 的 c 夸克奇特态在 4.4GeV,预言 1^{-+} 的 b 夸克奇特态在 11GeV.但是格点规范理论对奇特态的宽度不能给出确定的预言.此外,还有胶子组份模型, QCD 求和规则等对 1^{-+} 奇特态的质量也做了预言(见表 1).从上面的理论模型预言可以知道,对于由两个轻夸克和一个胶子组成的 1^{-+} 奇特态,质量应该在 1.5—2GeV 附近.

流管模型预言奇特态的宽度在 300MeV 左右.除了口袋模型之外,其他理论预言对奇特态的衰变和流管模型类似.

表 1 理论模型预言的奇特态的质量

理论模型	质量/GeV	参考文献
口袋模型	1.3—1.8	[3]
胶子组分模型	1.3—1.8	[4]
流管模型	1.8—2.0	[5]
格点规范理论	1.9—2.1	[6]
QCD 求和规则	1.6—1.7	[7]

一个共振态,除了它的质量之外,宽度和衰变模式也是实验寻找中非常关心的特征.只有知道共振态的这些特性,实验上才可以有明确的方向.目前的理论都倾向于奇特态主要衰变到 S + P 介子对,而不是 S + S 介子对.对于奇特态的宽度,流管模型预言 0^{+-} 和 2^{+-} 奇特态的宽度都比较宽,尤其是 0^{+-} 奇特态,预言的宽度在 1500MeV.对于这样宽的共振态,实验上寻找比较困难,因为宽度太宽,很难与实验中存在的本底区分.只有 1^{-+} 的宽度在 300MeV 左右,处于实验能够观测的范围之内.所以目前实验上主要是针对寻找 1^{-+} 奇特态做了大量的工作,并观测到了几个奇特态候选者.

3 实验研究近况

目前,实验上对奇特态的寻找取得了很大的进展,已经有两个奇特态的候选者被列入在《粒子物理手册》^[8]中,这两个奇特态候选者的 $I^C J^{PC}$ 量子数都是 $1^{-} 1^{-+}$,前面已经讨论过,具有这样 J^{PC} 量子数的强子不可能是简单的 $q\bar{q}$ 介子.通常具有 $I^C J^{PC}$ 量子数为 $1^{-} 0^{-+}$ 的介子称之为 π ,具有 $I^C J^{PC}$ 量子数为 $1^{-} 2^{-+}$ 的介子称之为 π_2 ,所以这两个奇特态的候选者被命名为 π_1 .由于它们的质量分别在 1400MeV 和 1600MeV 左右,所以称它们为 $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$.

3.1 $\pi_1(1400)$

GAMS^[9]在 $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \eta n$ 过程中观测到在 $\pi^0 \eta$ 质心系中角分布的前后不对称性,他们认为是自旋为 2 的 D 波和 P 波的干涉,并首次给出一个 1^{-+} 粒子的质量和宽度(见表 2).随后, E179^[10]又在 $\pi^- p \rightarrow \pi^- \eta p$ 中也发现在 $a_2(1320)$ 质量附近除了 D_+ 波之外还有比较弱的 P_+ 波,在 1.3GeV 附近有一个共振态结构.

表 2 寻找 1^{-+} 的实验结果

奇特态	实验组	质量/(MeV/ c^2)	宽度/(MeV/ c^2)	衰变模式	产生过程
$\pi_1(1400)$	GAMS ^[9]	1406 ± 20	180 ± 30	$\eta\pi$	$\pi^- p \rightarrow \eta\pi^0 n$
	BNL ^[11]	$1370 \pm 16^{+30}_{-20}$	$385 \pm 40^{+65}_{-105}$	$\eta\pi$	$\pi^- p \rightarrow \eta\pi^- p$
	BNL ^[12]	$1359 \pm^{16+10}_{14-24}$	$314 \pm^{31+9}_{29-66}$	$\eta\pi$	$\pi^- p \rightarrow \eta\pi^- p$
	CBar ^[15]	$1400 \pm 20 \pm 20$	$310 \pm 50^{+50}_{-30}$	$\eta\pi$	$\bar{p}n \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta$
	CBar ^[16]	1360 ± 25	220 ± 90	$\eta\pi$	$\bar{p}p \rightarrow \pi^0 \pi^0 \eta$
$\pi_1(1600)$	BNL ^[20]	$1593 \pm 8^{+29}_{-47}$	$168 \pm 20^{+150}_{-12}$	$\rho\pi$	$\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$
	BNL ^[22]	1596 ± 8	387 ± 23	$\eta'\pi$	$\pi^- p \rightarrow \pi^- \eta' p$
	VES ^[25]	1610 ± 20	290 ± 30	$\rho\pi, \eta'\pi$	$\pi^- N \rightarrow \pi^- \eta' N$
	BNL ^[26]	$1709 \pm 24 \pm 41$	$403 \pm 80 \pm 115$	$f_1(1285)\pi$	$\pi^- p \rightarrow \eta\pi^+ \pi^- \pi^- p$
	BNL ^[27]	$1664 \pm 8 \pm 10$	$185 \pm 25 \pm 28$	$b_1(1235)\pi$	$\pi^- p \rightarrow \omega\pi^0 \pi^- p$
	CBar ^[28]	1590 ± 50	280 ± 75	$b_1(1235)\pi$	$\bar{p}p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \omega$
	BNL ^[26]	$2001 \pm 30 \pm 92$	$333 \pm 52 \pm 49$	$f_1(1285)\pi$	$\pi^- p \rightarrow \eta\pi^+ \pi^- \pi^- p$
$\pi_1(2000)$	BNL ^[26]	$2001 \pm 30 \pm 92$	$333 \pm 52 \pm 49$	$f_1(1285)\pi$	$\pi^- p \rightarrow \eta\pi^+ \pi^- \pi^- p$
	BNL ^[27]	$2014 \pm 20 \pm 16$	$230 \pm 32 \pm 73$	$\omega\pi^0 \pi^-$	$\pi^- p \rightarrow \omega\pi^0 \pi^- p$

重要的是 E852 实验组在 $\pi^- p \rightarrow \eta\pi^- p$ 过程中也发现了 $\pi_1(1400)$ ^[11,12], 他们认为由于 $L=1$ 和 $L=2$ 分波干涉导致了 $\eta\pi$ 角分布的前后不对称性(见图 1). 文献中的分波分析结果见图 2, $a_2(1320)$ 和 $\pi_1(1400)$ 的贡献如图 2 中(a)和(b)所示. D 波和 P

波的相位差和它们的相位分别对应于图 2 中的(c)和(d). 分波分析结果显示主要是 $a_2(1320)$ 的贡献, 奇特态的贡献非常小(大约 3%). 尽管在 $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 衰变模式中的统计量比较小, 但是得到的结果和 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变模式中分析结果相一致.

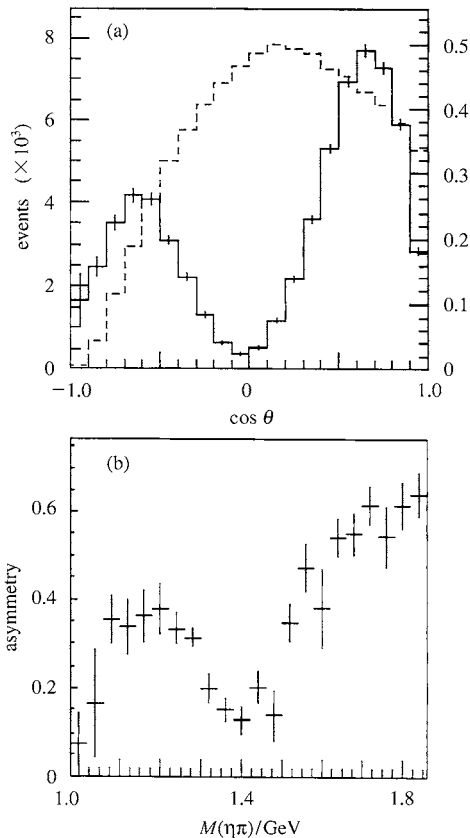


图 1 (a) 在 $\eta\pi^-$ 质心系中 $\cos\theta$ 的分布(其中虚线是效率曲线); (b) 不对称性随着 $m_{\eta\pi^-}$ 的变化

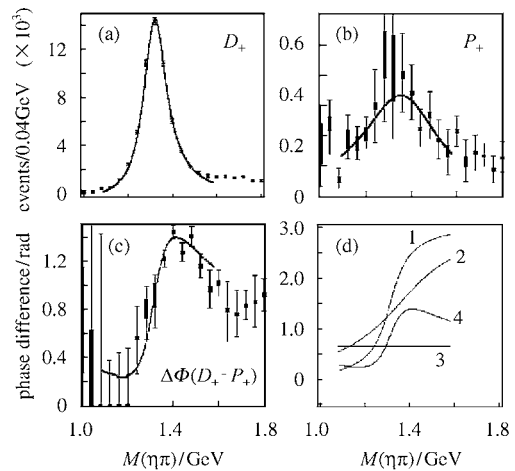


图 2 分波分析结果

(a)和(b)分别是 $a_2(1320)$ 和 $\pi_1(1400)$ 的贡献; (c) 是 D 波和 P 波的相位差; (d) 中实线 1 和 2 分别为 D 波和 P 波的相移, 实线 4 是两者的相位差.

E852^[13] 在 $\pi^- p \rightarrow \eta\pi^0 n$ 过程中也观测到了 1^{-+} 存在的迹象, 虽然对质量和宽度的确定不是很理想, 但分析的结果和文献[11]中相一致. Crystal Barrel 实验组^[14] 通过 $\bar{p}p \rightarrow \pi^0 \pi^0 \eta$ 过程也发现一个很弱的 1^{-+} 信号. 这是因为 $\pi_1(1400)$ 的产额来自 1S_0 波要比来自 3S_1 波小的多, 所以对 $\bar{p}n \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta$ ^[15] 的研究

非常有必要. 尽管加入了 P 波增加了分波的复杂性, 但是因为 0^{++} 不会对 $\pi^- \pi^0 \eta$ 有贡献, 从某种意义上又减少了复杂性. 图 3 是 $\eta\pi^-$ 和 $\eta\pi^0$ 的 Dalitz 图. 在 1300MeV 事例集中的地方, 在 $\rho(770)$ 所对应的带之上可以看到 $a_2(1320)$ 与其他振幅干涉的迹象. ρ 和 σ 衰变到 $\pi\pi$ 以及 $a_2(1320)$ 衰变到 $\eta\pi$ 都不能很好的解释这种强烈的干涉现象. 这种干涉也会造成和前面类似的 $\eta\pi$ 角分布的前后不对称, 也意味着 $\pi_1(1400)$ 的存在. 而且在分波分析时, 如果没有 P 波贡献, 则不能解释所观测到的干涉现象. 分波分析得到的 $\pi_1(1400)$ 质量和宽度的也和其他实验组的结果相一致 (见表 2). 另外, 在这个过程中, $\pi_1(1400)$ 对 $\pi^- \pi^0 \eta$ 的贡献为 34%, 远大于其在 $\pi^- p \rightarrow \eta\pi^- p$ 过程中的贡献^[11,12]. 后来, Crystal Barrel 实验组对不同条件下所采集的两批 $p\bar{p} \rightarrow \pi^0 \pi^0 \eta$ 数据又重新做了分析^[16]. 对两批数据样本联合做了分析, 分析结果表明 $\pi_1(1400)$ 主要在 3P_1 中观测到, 也有少量的 1S_0 . 这也解释了在文献^[14]中所观测到的较弱的信号.

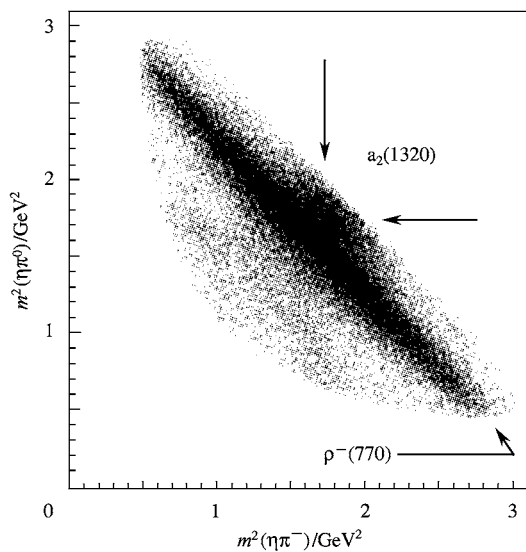


图 3 $\eta\pi^0$ 不变质量和 $\eta\pi^-$ 不变质量的达立兹图

VES 实验组^[17]在 $\pi^- N \rightarrow \pi^- \eta N, \pi^- \eta' N$ 过程中也看到有 P 波的贡献和一个比较宽的结构. 尽管相移分析和 E852 得到的结果类似, 不过他们并没有声称找到了 1^-+ 奇特态.

在上述过程中分析得到的 $\pi_1(1400)$ 的质量和宽度见表 2^[18,19], 尽管各个实验组的结果之间还有差别, 但误差范围内是一致的. $\pi_1(1400)$ 的宽度和质量主要是通过 $\eta\pi$ 这一衰变模式分析得到的, 通过

这个衰变模式寻找奇特态有非常有利的一方面, 因为两个赝标量介子总是处于 P 波状态, 而且同位旋为 1, 它们不可能组成胶球.

3.2 $\pi_1(1600)$

E852^[20,21]在 $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ p$ 中观测到另一个 1^-+ 奇特态. 分波分析表明除了已经知道的 $f_2(1270), a_2(1320)$ 和 $\pi_2(1670)$ 外, 在 $\rho\pi$ 的不变质量中还有一个 1^-+ 的奇特态. 相移分析也表明在 1600MeV 存在一个奇特态 (见图 4). 实线 1 为 1^-+ 分波的相移, 共振态的质量应该在 1600MeV, 实线 2 对应于已知共振态 $\pi_2(1670)$ 的相移. 分波分析的结果见图 5. E852^[22]在 $\pi_1(1600)$ 衰变到 $\eta'\pi$ 这个简单的衰变模式中也看到的它的存在. VES 实验组^[23]分析了在质心能量为 36.6GeV $\pi^- N \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ N$ 的数据. 文献^[24]曾经给了他们的初步结果. 在 $\rho^0\pi^-$ 不变质量中他们观测 1.6GeV 左右一个比较宽的结构. 但是文献^[23]指出这个结构很是依赖于分波分析本身, 并且这个 1^-+ 结构的贡献非常小, 只占整个分波振幅的 2%. 另外, 从文献^[21]中也可以看到, 这个过程的分波成分非常多.

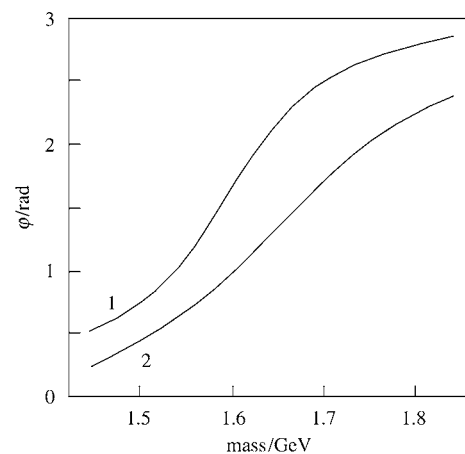


图 4

实线 1 是 1^-+ $\rho(770)\pi$ 分波的相移,
实线 2 是 2^-+ $f_2(1270)\pi$ 分波的相移.

VES^[25]也曾经联合 $b_1(1235)\pi, \eta'\pi, \rho(770)\pi$ 进行分析, 分析得到的宽度和质量与 E852 的结果相一致 (见表 2). 并且给出了 $\pi_1(1600)$ 衰变到 $b_1(1235)\pi, \eta'\pi, \rho(770)\pi$ 分支比的比值为 $1:1.0 \pm 0.3:1.5 \pm 0.5$. 从这个比值还不能排除 $b_1(1235)\pi$ 是它的主要衰变道. E852 的最近分析结果中再次确认 $\pi_1(1600)$ 的存在, 而且是分别在 $f_1(1285)\pi$ 和

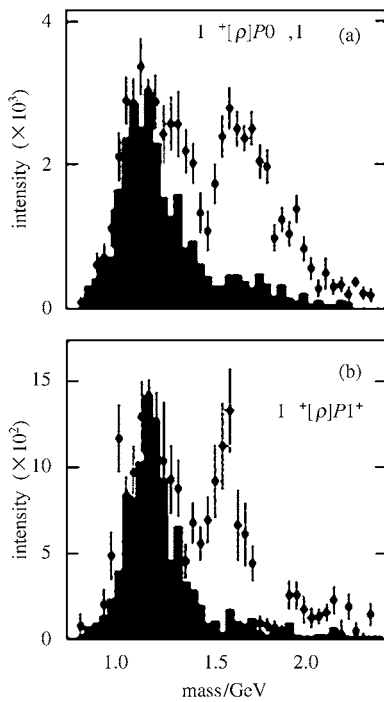


图 5 (a)是在正常宇称交换下 1^{-+} 的贡献;
(b)是非正常宇称交换下 1^{-+} 的贡献
图中阴影部分是本底的贡献.

$b_1(1235)\pi$ 末态中观察到. 同时分析结果表明除了 $\pi_1(1600)$ 外, 还有一个 $\pi_1(2000)1^{-+}$ 奇特态, 两种不同末态中分析的质量符合得非常好, 尽管宽度有些差别, 分别为 306MeV 和 230MeV, 但在误差范围之内是一致的.

综上所述, 近十几年来, 国际上多个实验组在 1^{-+} 奇特态寻找方面取得了很大的进展. 然而, 一个值得深思的问题是何他们的结果至今没有得到国际高能物理界的认可? 仔细地观察一下这些结果, 便会发现, 这些实验各自存在一些不足之处, 要么没有 P 波的结构; 要么有些迹象, 但是误差非常大; 要么存在 P 波的增长结构, 但是没有相位突变等等. 这种现状恰恰为 BES III 留下了空间和机遇. 对上述问题给以澄清和进一步的研究.

4 在 BES III 上寻找奇特态

在固定靶实验中多个实验组都观测到了 1^{-+} 奇特态的存在, 而且在 $p\bar{p}$ 湮没过程中得到了验证. 理论上认为另外一个寻找奇特态的理想途径就是通过 J/ψ 衰变. 但是迄今为止在 J/ψ 衰变过程中还没有看到有关奇特态的报道. 其中一个原因可能是

1^{-+} 产生的截面较小. 而各个实验组目前所采集的 J/ψ 样本还不足以观测到奇特态; 另一方面, 按照理论预言, 奇特态一般都比较宽, 而且末态粒子较多, 加上探测器性能不是很好, 所以探测效率比较低. CLEOc^[29]和将要建成的 BES III^[30]探测器性能非常好, 对带电粒子的动量分辨和粒子鉴别, 对光子的探测和能量分辨都比以往的探测器有了较大的改进. 而且对撞机的亮度也比以往提高了两个数量级左右, 从而能够在较短的时间内采集大量的 J/ψ 样本. 在一年之内, CLEOc 可以取得 $10^9 J/\psi$ 事例, 而 BES III 则可以取得 $10^{10} J/\psi$ 事例, 如此巨大的样本为寻找 1^{-+} 奇特态提供了一个很好的机遇.

对于在 J/ψ 衰变中如何寻找奇特态粒子, 郁宏等人^[31]曾提出了一些具体的衰变道, 如 $J/\psi \rightarrow \rho\omega\pi$, $J/\psi \rightarrow \rho\rho\pi$ 和 $J/\psi \rightarrow V(\omega, \rho, \phi)a_2\pi$, 并用矩分析方法做了讨论. 在 J/ψ 衰变中寻找奇特态主要通过 J/ψ 衰变到一个矢量介子和一个奇特态. 这里分别把 ρ , ω 和 ϕ 对应的奇特态称为 $\hat{\rho}$, $\hat{\omega}$ 和 $\hat{\phi}$. 表 3 列出了流管模型所预言的几个有可能在 J/ψ 衰变中观测到的奇特态及其它们的主要衰变道和衰变宽度. 同时, 表 3 还列出了次衰变模式的主要衰变道和它们的分支比.

根据表 3 中所列奇特态的 $I^G(J^PC)$ 量子数以及强衰变中同位旋守恒, 只有在 $J/\psi \rightarrow \rho\hat{\rho}$ 中有可能观测到上面所说的 $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$. 其他两个过程因为同位旋不守恒而受压制. 对于 $J/\psi \rightarrow \rho\hat{\rho}$, 可以通过 $\hat{\rho} \rightarrow b_1(1235)\pi$ ($b_1(1235) \rightarrow \omega\pi$) 寻找奇特态. 因为 ω 的主要衰变模式为 $\pi^+\pi^-\pi^0$, 所以末态粒子为 $3(\pi^+\pi^-\pi^0)$. J/ψ 衰变到 7π 的分支比较大, 可以选取较大的样本, 是其有利一面. 但是 ρ 和 $b_1(1235)$ 宽度较宽, 在信号区域内会有较大的本底. 而且在 7π 的衰变末态粒子中有可能和奇特态其他衰变模式一样, 互相为本底, 也为分析带来一定的困难. 另外, 末态粒子有 6 个带电的 π , 无法分清是从 ρ 还是从 ω 衰变而来, 误组合也会造成很大的连续本底. 如果选择 $\hat{\rho} \rightarrow f_1(1285)\pi$, $f_1(1285) \rightarrow \eta\pi\pi$, 则末态粒子为 $2(\pi^+\pi^-)$ 和 4 个光子. 在以前的探测器中, 由于量能器的性能不是很好, 对这样的过程的探测效率比较低, 但是在 BES III 和 CLEOc 上的 CsI 晶体量能器对光子能量分辨非常好 (2%—3% 左右), 有利于大样本的选择. 另外 π 个数的减少也会减少在选 ρ 过程中的误组合. 尽管 4 个光子组合成 π^0 和 η 时有误组合, 但是由于 π^0 和 η 的宽度几乎为零, 所以误组合本底的大小直接取决于量能器的能量分辨. BES III 上良好的探测器性能减少了这种本底的影响.

表 3 流管模型预言的奇特态的衰变模式和相应的衰变宽度

奇特态	J^{PC}	衰变模式	$\Gamma_{H \rightarrow AB}/\text{MeV}$	A 的宽度/MeV	A 的衰变模式及其分支比
$\hat{\rho}(1900)$	$1^-(1^{-+})$	$[b_1(1235)\pi]_{S,D}$	100,30	155	$b_1(1235) \rightarrow (\omega\pi)_{S,D}$ most
					$b_1(1235) \rightarrow \eta\rho$ seen
		$[f_1(1285)\pi]_{S,D}$	30,20	24	$f_1(1285) \rightarrow \eta\pi\pi$ 50%
					$f_1(1285) \rightarrow 4\pi(\rho\pi)$ 38%
		$f_1(1285) \rightarrow a_0(980)\pi$ 37%			
$\hat{\omega}(1900)$	$0^+(1^{-+})$	$[a_1(1260)\pi]_{S,D}$	100,70	~ 400	$a_1(1265) \rightarrow \rho\pi$ most
		$[\pi(1300)\pi]_P$	100	200—600	$\pi(1300) \rightarrow \rho\pi$ seen
		$[K_1(1400)K]_S$	100	174	$K_1(1400) \rightarrow K^*\pi$ 94%
$\hat{\phi}(2100)$	$0^+(1^{-+})$	$[K_1(1270)K]_D$	80	90	$K_1(1270) \rightarrow K\rho$ 42%
					$K_1(1270) \rightarrow K_0^*\pi$ 28%
					$K_1(1270) \rightarrow K^*\pi$ 16%
					$K_1(1270) \rightarrow K\omega$ 11%
					$K_1(1270) \rightarrow K\pi\pi$ 11%
		$[K_1(1400)K]_S$	250	174	$K_1(1400) \rightarrow K^*\pi$ 94%
		$[K(1460)K]_P$	30	250	$K(1460) \rightarrow K\pi\pi$ seen

对于 $f_1(1285)$ 的另外一个主要衰变模式 $4(\pi)$, 末态粒子就和 $b_1(1235) \rightarrow \omega\pi$ 一样都是 $3(\pi^+\pi^-)\pi^0$, 在事例选择时它们互相为本底, 不容易区分, 所以做分波分析时比较困难.

对于 $J/\psi \rightarrow \omega\hat{\omega}$, 如果选 $\hat{\omega} \rightarrow a_1(1260)\pi$ 和 $\hat{\omega} \rightarrow \pi(1300)\pi$, 末态粒子也是 $3(\pi^+\pi^-)\pi^0$. 在 BES I, 曾经利用 780 万 J/ψ 进行寻找^[32], 在反冲 ω 的 4π 不变质量中看到在 1.75GeV 左右存在一个小的结构(见图 6), 并在 $\omega\pi\pi$ 的不变质量中也看到了在 1.9GeV

左右有一个增长(见图 7). 因为信号很弱, 而且本底很大, 还不能确定是共振态还是来自于统计涨落, 有

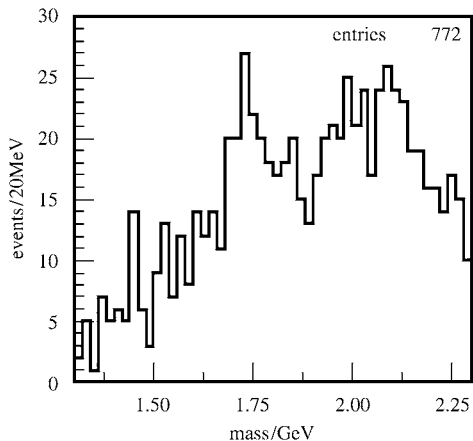


图 6 4π 的不变质量谱

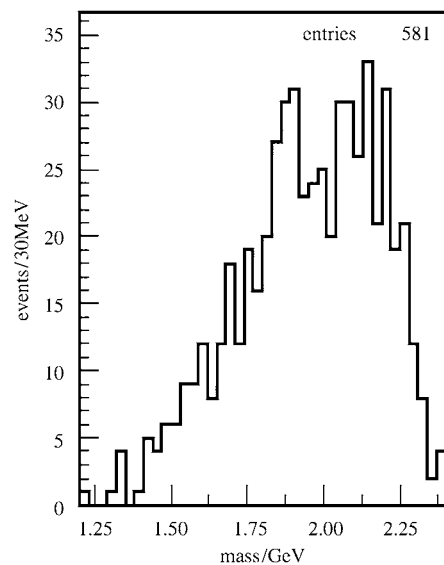


图 7 $\omega\pi\pi$ 的不变质量谱

待于更大 J/ψ 样本的验证. 对于 $\hat{\omega} \rightarrow K_1(1400)K$, 如果奇特态的质量在 1900MeV 左右, 根据两体衰变的运动学, $\hat{\omega}$ 的动量将比较低. 因为 K 和 $K_1(1400)$ 的

阈值就在 1900MeV 左右,所以末态粒子的动量将非常低,有可能许多带电粒子都不能很好的探测和重建出来.尤其是 BES III 采用超导磁铁,磁场为 1T,使得低动量的带电粒子飞不出主漂移室.所以从这个衰变模式寻找奇特态比较困难.

对于 $J/\psi \rightarrow \hat{\phi}\phi$,其有利之处是 ϕ 的衰变宽度非常窄,易于选取 ϕ 信号,排除本底.尽管,目前的某些理论模型预言, $\hat{\phi}$ 的质量高于 $\hat{\rho}$ 和 $\hat{\omega}$ 的质量,通过 $J/\psi \rightarrow \hat{\phi}\phi$ 去寻找 $\hat{\phi}$ 类型的奇特态可能存在一定的困难,然而,从实验的角度上看,仍然值得利用这个衰变道去尝试 $\hat{\phi}$ 奇特态的寻找.

上面仅仅讨论了奇特态衰变道的情况,从表 2 中实验结果看,奇特态衰变到两个 $S=0$ 介子的分支比不一定很小,所以对奇特态的其他衰变模式的寻找也是非常必要的.尤其是通过 $J/\psi \rightarrow \rho\eta\pi$ 和 $J/\psi \rightarrow \rho\eta'\pi$ 两个衰变道寻找奇特态.末态粒子较少,探测效率比较高,而且本底容易分析,在 BES III 大统计量的情况下分析这两个衰变道,可以从另一方面验证所观测到的两个奇特态候选者.

5 总结与讨论

近十几年来对奇特态的研究取得了很大的进展.实验上已经观测到了奇特态的候选者.尤其是 $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$,在不同的实验过程中都看到有 P 波存在的迹象.除此之外, E852 新发现的

$\pi_1(2000)$ 也非常有意义.尽管还需要进一步验证.因为奇特介子的寻找和研究介子谱是紧密相关的,所以当前对奇特态的研究仍然令人十分关注.

尽管实验观测到了奇特态候选者,但与理论预言的差别还是很大.理论预言奇特态的质量在 1.9GeV 左右,所观测到的两个奇特态候选者明显比理论预言偏低.另一方面,理论上认为奇特态主要衰变到 S 波加上 P 波,衰变到一对 S 波介子的几率较小,但是从实验的角度看, $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$ 衰变到 $\eta\pi$ 和 $\eta'\pi$ 的宽度并不一定很小,这也和理论预言有抵触.但是 $\pi_1(2000)$ 却和理论预言符合得比较好,是在 $f_2(1285)\pi$ 和 $b_1(1235)\pi$ 末态中观测到的,在 $\eta\pi, \rho(770)\pi$ 中没有看到,这也和理论符合得较好.

因为 $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$ 的同位旋为 1,所以它们不可能是胶球.但对于 $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$ 是混杂态和四夸克态,实验上还不能给以充分的验证,理论上也存在争论.另外,他们的实验结果绝大部分是来自于固定靶实验,他们是否真正的奇特态还有待将来更多更精密的实验去验证.本文提到了 BES III 将是寻找、证实奇特态存在的理想探测器.

总之,尽管奇特态产生截面较小,实验上寻找奇特态比较困难.但是随着实验技术的提高和新的高性能探测器的建成,利用所采集到的巨大的数据样本,通过不同的实验途径寻找到奇特态的可能性也将会越来越大.一方面对当前的实验结果进行验证,另一方面也可以开展对奇特态其他衰变模式的寻找.

参考文献 (References)

- Aubert J J et al. Phys. Rev. Lett., 1974, **33**:1404; Augustin J E et al. Phys. Rev. Lett., 1974, **33**:1406
- Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, **8**:214; Zweig G. CERN Preprint, 1964, 8419/TH.412
- Bogliubov P N. Ann. Inst. Henri Poincare, 1967, **8**:163; Barnes T, Close F E. Phys. Lett., 1982, **116B**:365; Barnes T et al. Nucl. Phys., 1983, **B224**:241; Flensburg M, Peterson C, Skold L. Z. Phys., 1984, **C22**:293; Chanowitz M, Sharpe S R. Nucl. Phys., 1983, **B222**:211
- Horn D, Mandula J. Phys. Rev., 1978, **D17**:898; Tanimoto M. Phys. Lett., 1982, **116B**:198; Ishida et al. Phys. Rev., 1992, **D47**:179; Iddir F, Semmlala L. hep-ph/0211289
- Isgur N, Paton J. Phys. Lett., 1983, **124B**:247; Merlin J, Paton J. J. Phys., 1985, **G11**:439; Isgur N, Paton J. Phys. Rev., 1985, **D31**:2910; Merlin J, Paton J. Phys. Rev., 1987, **D35**:1668; Isgur N, Kokosko R, Paton J. Phys. Rev. Lett., 1985, **54**:869; Close F E, Page P R. Nucl. Phys., 1995, **B443**:233
- Barnard C et al. Phys. Rev., 1997, **D56**:7039; McNeile C. Phys. Rev., 2002, **D65**:094505
- Latorre J I et al. Phys. Lett., 1984, **B147**:169; Chetyrkin K, Narion S. Phys. Lett., 2000, **B485**:145; Balisky I I et al. Phys. Lett., 1982, **112B**:71; Latorre J I et al. Phys. Lett., 1983, **128B**:262; Govaerts J et al. Nucl. Phys., 1984, **B248**:1
- Eidelman S et al (Particle Data Group). Phys. Lett., 2004, **B592**:1
- Alde D M et al. Phys. Lett., 1988, **B205**:397
- Aoyagi H et al. Phys. Lett., 1993, **B314**:246
- Thompson D R et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**:1630
- Chung S U et al. Phys. Rev., 1999, **D60**:092001
- Dzierba A R et al. Phys. Rev., 2003, **D67**:094015
- Amsler C et al. Phys. Lett., 1994, **B333**:277
- Abele A et al. Phys. Lett., 1998, **B423**:175
- Abele A et al. Phys. Lett., 1999, **B446**:349
- Beladidze G M et al. Phys. Lett., 1993, **B313**:276
- Popov A V. Proceedings of the Ninth International Conference on

- Hadron Spectroscopy. Protvino, Russia, 2001
- 19 Dorofeev V. Proceedings of the Ninth International Conference on Hadron Spectroscopy. Protvino, Russia, 2001
- 20 Adams G S et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:5760
- 21 Chung S U et al. Phys. Rev., 2002, **D65**:072001
- 22 Ivanov E I et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:3977
- 23 Zaitsev. Nucl. Phys., 2000, **A675**:155c
- 24 Gouz Y P et al. AIP Conf. Proc., 1993, **272**(1):572(Proceedings of the XXVI International Conference on HEP, Dallas)
- 25 Khokhlow Y et al. Nucl. Phys., 2000, **A663**:596
- 26 Kuhm M et al. Phys. Lett., 2004, **B595**:109
- 27 LU M et al. hep-ex/0405044
- 28 Baker C A et al. Phys. Lett., 2003, **B563**:140
- 29 CLEO-c Collaboration. CLEO-c and CESR-c: A New Frontier of Weak and Strong Interactions, CLNS 01/1742
- 30 BES III Collaboration. The BES III Detector: Preliminary Design Report, IHEP-BEPC II -SB-13. January 2004
- 31 SHEN Qi-Xing, YU Hong. HEP&NP, 1999, **23**(10):954(in Chinese); SHEN Qi-Xing, YU Hong, LI De-Min. HEP&NP, 2000, **24**(10):908(in Chinese); LI De-Min, YU Hong, SHEN Qi-Xing. Commun. Theor. Phys., 2001, **35**:44 (沈齐兴, 郁宏. 高能物理与核物理, 1999, **23**(10):954; 沈齐兴, 郁宏, 李德民. 高能物理与核物理, 2000, **24**(10):908)
- 32 BAI Jing-Zhi et al. HEP&NP, 2002, **26**(1):8(in Chinese) (白景芝等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(1):8)

Search for Exotic States at BES III *

MA Xu-Bo^{1,3;1)} FANG Shuang-Shi² ZHU Yu-Can¹ LU Gong-Ru³ YANG Hong-Xun¹

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2 (The China Center of Advanced Science and Technology, Beijing 100080, China)

3 (Hennan Normal University, Xinxiang 453002, China)

Abstract A general introduction to the theoretical predictions for the mass, width and decay modes of exotic states is briefly described. The current status of experimental searches for the candidates of exotic states and their inconsistencies with theoretical predictions are discussed. Some specific J/ψ decay channels are proposed to search for exotic states at BES III experiment.

Key words exotic states, hybrids, glueball, BES III detector

Received 17 September 2004

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19991480)

1)E-mail: maxb@mail.ihep.ac.cn