

J/ψ 衰变中 $f_0(975)$ 的实验研究*

BES 合作组

白景芝	陈光培	陈宏芳 ¹	陈少敏	陈申见	陈雅青	陈宇	陈元柏
成正东	程宝森	崔化传	崔象宗	丁慧良	丁维阁	杜志珍	范晓聆
方建	高翠山	高美丽	高树琦	高文绣	顾建辉	顾树棣	顾维新
顾以藩	过雅南	郭愚益	韩纓	韩世温	何炬	何瑁 ²	何可人
胡贵云	胡洪波	胡涛	胡晓庆	黄德强	黄因智	姜春华	金山
金艳	柯尊建	康书辉	赖元芬	郎鹏飞	兰慧彬	李芳	李金
李群 ²	李佩琴	李启明	李如柏	李蔚	李卫东	李卫国	李小南
林树子	刘怀民	刘琦	刘荣光	刘延	刘经华	刘振安	吕军光
罗栓群	马爱民	马恩成	马基茂	毛慧顺	毛泽普	孟祥承	倪蕙苓
聂晶	潘玲君	漆纳丁	网友昆	荣刚	邵毓莺	沈本蔚	沈定力
沈红	沈肖雁	盛华义	宋晓非	史焕章	孙舫	孙汉生	谈益平
童国良	唐素秋	王临洲	王曼	王灵淑	王佩良	王平	王少敏
王泰杰	王运永	魏诚林	席德明	夏小米	谢佩佩	谢小希	谢一冈
许榕生	徐德之	徐芷青	薛生田	颜洁	严武光	杨长友	杨春敏
杨蔚	叶铭汉	叶诗章	喻纯旭	郁忠强	于传松	苑长征	张炳云
张长春	张达华	张会领	张建	张家文	张少强	张良生	张学尧 ²
张羽	张月元	庄保安	赵棣新	赵萌	赵京伟	赵平德	赵维仁
赵文衡	郑建平	郑林生	郑志鹏	周宝庆	周光谱	周化十	周莉
周月华	周小帆	朱启明	祝玉灿	朱永生			

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1 (中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2 (山东大学物理系 济南 250100)

1994-10-12 收稿

摘 要

本文基于北京正负电子对撞机 (BEPC) 上北京谱仪 (BES) 所收集到的

* 国家自然科学基金资助。

$7.8 \times 10^6 J/\psi$ 事例,系统研究了 $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ 两个衰变道,给出了过程的分支比以及 f_0 的位置和宽度参数,并对 $J/\psi \rightarrow \phi f_0$, $f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 过程的角分布进行了拟合,首次确定出该过程的螺旋度振幅比。/

关键词 标量介子,阈效应,自旋宇称,螺旋度。

1 引言

0^{++} 标量介子的行为和性质一直是人们关注和研究的热点之一。 $f_0(975)$ 便是一个典型。

$f_0(975)$ 首先在 1973 年的固定靶实验 $\pi^-p \rightarrow n\pi^+\pi^-$ 中被观察到^[1]。在其后的 e^+e^- 对撞实验中,也发现了很强的 $f_0(975)$ 信号。[MARK II 于 1981 年通过对 J/ψ 的单举 $\pi^+\pi^-$ 衰变道的分析^[2],给出了 $f_0(975)$ 的质量、宽度参数为:

$$m = (974 \pm 4) - i(14 \pm 5)\text{MeV}.$$

随后在 1988 和 1989 年,DM2 和 MARK III 分别报道了遍举道 $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$ 的实验结果^[3,4],在反冲 ϕ 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱中观察到明显的 f_0 信号,并给出分支比为:

$$(Br(J/\psi \rightarrow \phi f_0) \times Br(f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-))_{\text{DM2}} = (2.4 \pm 0.2 \pm 0.4) \times 10^{-4};$$

$$(Br(J/\psi \rightarrow \phi f_0) \times Br(f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-))_{\text{MARKIII}} = (4.2 \pm 0.3 \pm 0.6) \times 10^{-4}.$$

对于衰变道 $J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$,DM2 从反冲 ω 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱中看到 1GeV 附近有一个小的 f_0 信号。通过用两个不相干的 B-W 函数加一个多项式的本底拟合 900—1400 MeV 的区间,并固定 f_0 的宽度到 35MeV,得到

$$m = 959.4 \pm 6.5\text{MeV},$$

$$Br(J/\psi \rightarrow \omega f_0) \times Br(f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-) = (1.10 \pm 0.21 \pm 0.16) \times 10^{-4}.$$

MARK III 在该衰变道只发现 f_0 质量附近有一个小的事例堆积。不过他们都没有给出 f_0 质量和宽度的完整数据。

根据这些实验结果,理论家们做了很多努力,试图更好地解释 $f_0(975)$ 。然而,经过二十多年的争论,对于 $f_0(975)$ 的性质仍然没有定论。 f_0 究竟是普通的 $s\bar{s}$ 介子^[5],还是多夸克态^[6],或是 $K\bar{K}$ 分子态^[7]等等,一直使人们感到困惑。因此,从实验上系统地研究 $f_0(975)$,从而显示它的基本面貌,对于认识它的性质是非常有意义的。

本文基于 BEPC 上对撞产生、BES 上收集到的 $7.8 \times 10^6 J/\psi$ 事例,系统研究了 $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ 两个衰变道,给出了过程的分支比以及 f_0 的位置和宽度参数,并对 $J/\psi \rightarrow \phi f_0$, $f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 过程的角分布进行了拟合,首次确定出该过程的螺旋度振幅比。这些实验结果无疑将会为理论上解释 f_0 提供重要的信息。

2 $J/\psi \rightarrow \phi f_0, f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$

2.1 事例筛选

由北京谱仪各子探测器记录下来的原始数据,经过过滤、刻度、重建、分类和压缩处理

后形成供物理分析用的 DST 数据文件。从四叉事例的 DST 文件中, 寻找满足有四个带电径迹, 其总电荷为 0 的事例, 并要求四个带电径迹的合成总动量丢失小于 0.3GeV , 以排除大于四叉的多叉径迹事例因径迹丢失而混入到四叉事例的样本。对于粒子鉴别, 要求至少有一根带电径迹在 3σ 的误差范围内被 TOF 或 dE/dx 判为 K 。对所有可能的 $K^+K^-\pi^+\pi^-$ 组合进行 4C 运动学拟合, 选取 χ^2 最小的组合。

如果至少两根带电径迹在 3σ 范围内被 TOF 或 dE/dx 判为 K , 则要求 $\chi^2 < 25$ 。
如果只有一根带电径迹在 3σ 范围内被 TOF 或 dE/dx 判为 K , 则要求 $\chi^2 < 7$ 。
同时要求 $|m_{K^+K^-} - 1.020| < 0.015\text{MeV}$, 顶点的 CUT 满足

$$|x| < 6\text{mm}, |y| < 6\text{mm}, |z| < 80\text{mm}.$$

经过上述事例筛选条件, 处理了 RUN462—961, RUN 1248—1616, RUN 1750—1940 以及 RUN 3579—3739 共 $7.8 \times 10^6 J/\psi$ 事例。

2.2 反冲 ϕ 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱的拟合

图 1 为 $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$ 道反冲 ϕ 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱。从图中可以看出, 在 1GeV 附近有一个明显的、高质量端下降很陡的 f_0 信号。由于 f_0 在 $K\bar{K}$ 阈附近出现, $K\bar{K}$ 阈效应造成了 f_0 的明显不对称半峰结构。为了在拟合质量谱时考虑到阈效应的影响, 采用了双道耦合公式^[6], 利用最大似然法进行质量谱拟合:

$$\frac{d\sigma}{dm} \sim \frac{\Gamma_\pi}{|m_R^2 - m^2 - im_R(\Gamma_\pi + \Gamma_K)|^2},$$

其中, m_R 为共振质量,

$$\Gamma_\pi = g_\pi \sqrt{\frac{m^2}{4} - m_\pi^2},$$

$$\Gamma_K = \begin{cases} g_K \sqrt{\frac{m^2}{4} - m_K^2} & \text{在阈以上} \\ ig_K \sqrt{\frac{m^2}{4} - m_K^2} & \text{在阈以下} \end{cases},$$

g_π 和 g_K 分别为 $f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 和 $f_0 \rightarrow K^+K^-$ 的耦合常数。

根据 Monte-Carlo 的结果, f_0 质量区间内的接收度为均匀分布。另外, Monte-Carlo 给出质量分辨为 $\sigma_m = 10\text{MeV}$ 。综合上述因素, 得到 f_0 的质量、宽度参数为:

$$m = 969 \pm 4 \text{ MeV},$$

$$\Gamma = 43 \pm 8 \text{ MeV}.$$

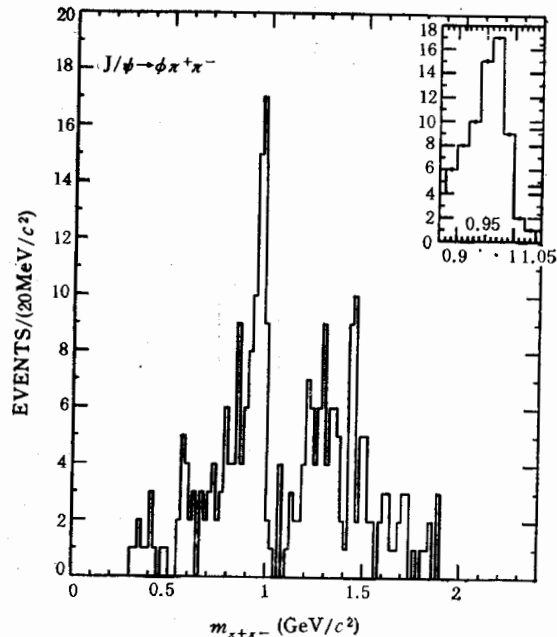


图 1 反冲 ϕ 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱

2.3 $J/\psi \rightarrow \phi f_0$ 的分支比

从 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱的拟合中可以得到,在拟合区间内有 $J/\psi \rightarrow \phi f_0, f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 的 f_0 事例 59 个。由 Monte-Carlo 给出的该过程的探测效率为 10.2%, J/ψ 总数估计为 7.8×10^6 。因此得到过程的分支比为:

$$Br(J/\psi \rightarrow \phi f_0) = (2.9 \pm 0.4 \pm 0.5) \times 10^{-4}.$$

2.4 $J/\psi \rightarrow \phi f_0$ 的角分布及拟合

对于强衰变过程 $J/\psi \rightarrow V + X, V \rightarrow P_1^+ P_2^-, X \rightarrow P_3^+ P_4^-$, 其角分布的螺旋度表达式为^[9]:

$$W(\theta_v, \theta_1, \varphi_1, \theta_m, \varphi_m) \sim \sum I_{\lambda_v, \lambda'_v}(\theta_v) \cdot A_{\lambda_v, \lambda'_v} \cdot A_{\lambda'_v, \lambda'_X} \cdot D_{\lambda_v, 0}^1(\theta_1, \varphi_1, 0) \\ \cdot D_{\lambda'_v, 0}^1(\theta_1, \varphi_1, 0) \cdot D_{-\lambda_X, 0}^S(\theta_m, \varphi_m, 0) \cdot D_{-\lambda'_X, 0}^S(\theta_m, \varphi_m, 0),$$

其中, S 为介子 X 的自旋值,

$A_{\lambda_v, \lambda'_v}$ 为过程 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow V + X$ 的螺旋度振幅, θ_v 为在 J/ψ 静止系中, 矢量介子 V 和正电子束方向之间的夹角, (θ_1, φ_1) 为在矢量介子 V 的质心系中, P_1^+ 出射方向的极角和方位角, (θ_m, φ_m) 为在 X 介子质心系中, P_3^+ 出射方向的极角和方位角。定义螺旋度振幅比为:

$$x = \frac{A_{11}}{A_{10}}, \quad y = \frac{A_{12}}{A_{10}}, \quad z_1 = \frac{A_{00}}{A_{10}}, \quad z_2 = \frac{A_{01}}{A_{10}},$$

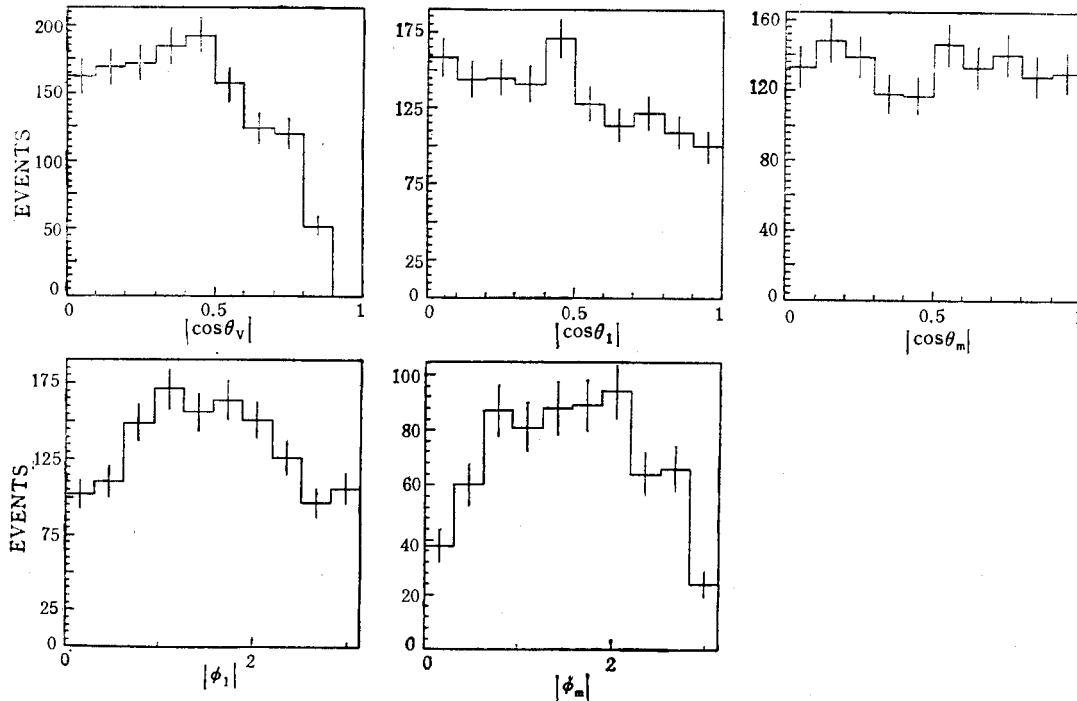


图2 角度的接收效率曲线

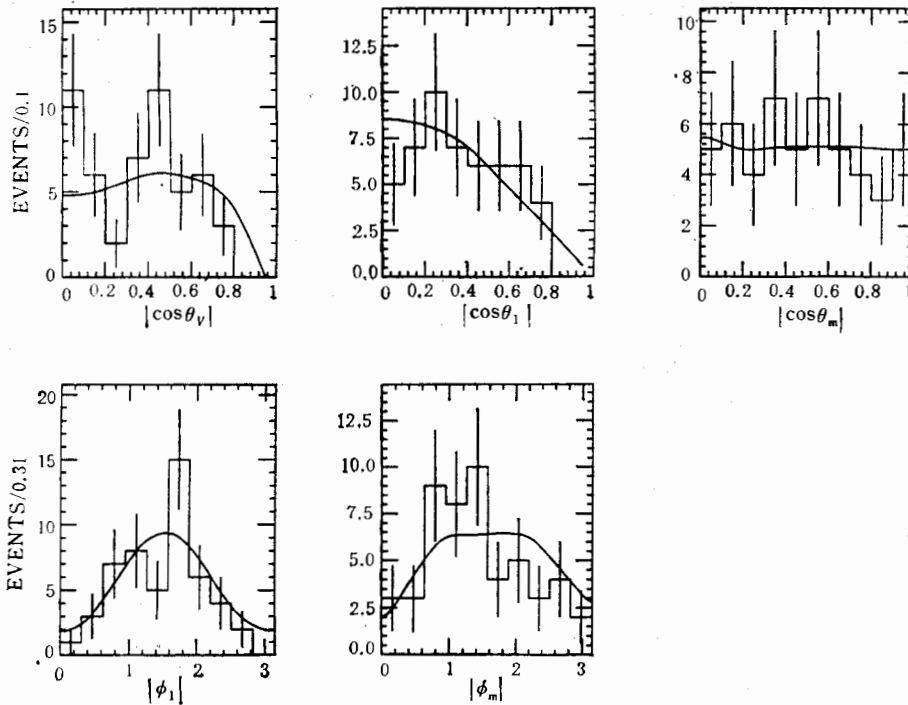


图 3 数据的角分布及拟合曲线

当 X 为标量介子时,

$$W \sim (1 + \cos^2 \theta_v) \sin^2 \theta_l - \sin^2 \theta_v \sin^2 \theta_l \cos(2\varphi_l) \\ + 2 \sin^2 \theta_v \cos^2 \theta_l z_1^2 - 2 \sin 2\theta_v \sin \theta_l \cos \theta_l \cos \varphi_l z_1,$$

可见,角分布与 (θ_m, φ_m) 无关.

本文采用螺旋度分析方法^[10]对过程 $J/\psi \rightarrow \phi f_0, f_0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 的角分布进行拟合,由于北京谱仪主漂移室的位置分辨率较好,角度分辨函数可以用 δ 函数来处理.由 Monte-Carlo 给出的接收效率曲线如图 2 所示.其数据的角分布的统计和拟合如图 3 所示.从 $\cos \theta_m$ 分布为均匀的形状,可以推断出 $f_0(975)$ 的自旋宇称为 0^{++} .将角度的分辨函数 δ 和接收度函数代入到对数似然函数,调节螺旋度振幅比 z_1 ,使对数似然函数达到最大,便可得到最佳的极化参数为: $z_1 = 0.09 \pm 0.18$.

3 $J/\psi \rightarrow \omega f_0, f_0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

3.1 事例筛选

从四叉事例的 DST 文件中,寻找满足有四个带电径迹,其总电荷为 0,且其中性径迹数为 2 至 6 的事例.用 TOF 或 dE/dx 鉴别粒子,并要求具有最大权重的 π 满足: $W_{\pi}^{\max} > 0.95$.对四根带电径迹和任意两根中性径迹做 4C 运动学拟合,选取 χ^2 最小的组合作为所需要的 $2(\pi^+ \pi^-) \gamma \gamma, \pi^0$ 的选择由 $|m_{\gamma\gamma} - 0.135| < 0.06 \text{ GeV}$ 得到.同时,要求:

$$|m_{\pi^+ \pi^- \pi^0} - 0.783| < 0.06 \text{ GeV}.$$

采用上述事例筛选条件,处理了 RUN 462—961, RUN 1248—1616, RUN 1750—1940 以及 RUN 3579—3739共 $7.8 \times 10^6 J/\psi$ 事例。

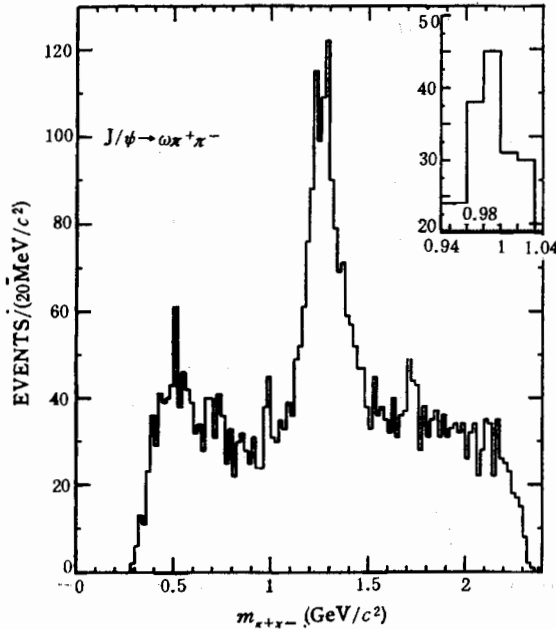


图4 反冲 ω 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱

3.2 反冲 ω 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱

从图4中反冲 ω 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱可以看出,在1GeV附近,有一个明显的 f_0 峰。用五个不相干的B-W函数以及多项式本底拟合整个谱区间,并考虑到1GeV附近的质量分辨函数 $\sigma_m = 10\text{MeV}$,得到 f_0 的位置和宽度参数为:

$$m_{f_0} = 985 \pm 9\text{MeV},$$

$$\Gamma_{f_0} = 11 \pm 6\text{MeV}.$$

由Monte-Carlo得到的 f_0 区间的探测效率为7.1%, f_0 事例数为32,由此得到分支比为:

$$\begin{aligned} Br(J/\psi \rightarrow \omega f_0) \\ = (1.3 \pm 0.8 \pm 0.2) \times 10^{-4}. \end{aligned}$$

4 结论与讨论

分别从 $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$, $J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ 两个衰变道研究了反冲 ϕ 和反冲 ω 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱。在这两个道中均发现了 f_0 信号。拟合的结果表明,反冲 ϕ 的 f_0 位置较低、宽度较大,而反冲 ω 的 f_0 位置较高且宽度较窄。因此,很自然地,人们就会问这样一个问题:反冲 ϕ 的 f_0 和反冲 ω 的 f_0 是否是同一态?从对 f_0 的理论解释来看,如果认为这两个 f_0 是同一个态, $s\bar{s}$ 的假定不能解释 $J/\psi \rightarrow \omega f_0$ 中的 f_0 ,虽然 $s\bar{s}$ 可以很好地解释 $J/\psi \rightarrow \phi f_0$ 中的 f_0 。另外,从 f_0 的伙伴 $a_0(980)$ 来看,在 $J/\psi \rightarrow \gamma K\bar{K}\pi^0$ 道, $K\bar{K}\pi^0$ 的不变质量谱中有一个明显的 $\iota(1440)$ 峰,在 $K\bar{K}$ 谱中可以看到 $a_0(980)$ 的存在。因此,这个 a_0 是由 $\iota(1440)$ 衰变来的。而在 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi\pi$ 道, $\eta\pi$ 的谱中有一明显的 a_0 ,而在 $\eta\pi\pi$ 中没有 $\iota(1440)$ 。可见,这个 a_0 不是由 $\iota(1440)$ 衰变来的^[1]。由此,同样也可以问这样一个问题:这两个 a_0 是否也不是一个态?

我们的结果仍然是很初步的,进一步了解 f_0 的性质还需要研究更多的道,并需要更多的统计量。

参 考 文 献

- [1] S. D. Protopopescu et al., *Phys. Rev.*, **D7** (1973) 1279.
- [2] G. Gidal et al., *Phys. Lett.*, **107B** (1981) 153.
- [3] A. Falvard et al., *Phys. Rev.*, **D38** (1988) 2706.

- [4] L. William et al., *Proceedings of Hadron 89*, p. 109.
 [5] D. Morgan, *Phys. Lett.*, **51B** (1974) 71.
 [6] R. J. Jaffe, *Phys. Rev.*, **D15** (1977) 267.
 [7] J. Weinstein et al., *Phys. Rev.*, **D27** (1983) 588; **D41** (1990) 2236.
 [8] S. M. Flatte, *Phys. Lett.*, **63B** (1976) 224.
 [9] 郁 宏、沈齐兴, *高能物理与核物理*, **14**(1990)504.
 [10] 白景芝等, *高能物理与核物理*, **17**(1993)97.
 [11] G. Eigen, CALT-68-1483 (1987) p. 78, p. 81.

Experimental Study of $f_0(975)$ in the J/ψ Decays

BES Collaboration

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

Received 12 October 1994

Abstract

Based on 7.8×10^6 J/ψ events collected by the BES at BEPC, through study of the hadronic decays $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$ and $J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$, the branching ratios of the processes and the mass positions and the widths of f_0 are obtained. The angular distributions of $J/\psi \rightarrow \phi f_0$, $f_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ are fitted and the helicity amplitude ratio of this process is first given.

Key words scalar meson, threshold effect, spin-parity, helicity.

更正 因工作失误,本刊第 19 卷第 1 期第 94 页图 1 有误,应为下图。特此更正。

