

J/ ψ 能区强子单举产生的实验研究*

BES 合作组

白景芝	卞建国	柴正维	陈光培	陈宏芳 ¹	陈江川
陈少敏	陈雅清	陈 宇	陈元柏	程宝森	崔象宗
丁慧良	杜志珍	范晓舫	方 建	高翠山	高美丽
高树琦	顾建辉	顾树棣	顾维新	顾以藩	过雅南
韩世温	韩 纓	何景棠	何 炬	何 瑁 ²	胡贵云
胡敬亮	胡琼辉	胡 涛	胡晓庆	黄秀萍	黄因智
姜春华	金 山	金 艳	康书辉	柯尊建	赖元芬
兰慧彬	郎鹏飞	李 金	李佩琴	李 群	李如柏
李 蔚	李卫东	李卫国	李新华	李小南	林树子
刘怀民	刘 靖	刘经华	刘 琦	刘荣光	刘 延
刘振安	吕 峰	吕军光	鲁建业	罗栓群	罗 勇
马爱民	马恩成	马基茂	毛慧顺	毛泽普	孟祥承
倪蕙苓	聂 晶	漆纳丁	邱进发	屈云河	阙友昆
荣 刚	邵毓莺	沈本蔚	沈定力	沈 红	沈肖雁
盛华义	史焕章	宋晓非	孙 舫	孙汉生	孙式军
谈益平	唐素秋	童国梁	王 锋	王菊芳	王临洲
王灵淑	王 曼	王 萌	王佩良	王 平	王少敏
王泰杰	王运永	魏诚林	吴义根	席德明	夏小米
谢佩佩	谢一冈	熊伟军	许国发	许榕生	徐芷菁
薛生田	颜 洁	严武光	杨长友	杨春敏	杨 杰
杨晓峰	叶铭汉	叶诗章	叶树伟 ¹	易 凯	于传松
喻纯旭	余志堂	郁忠强	苑长征	张炳云	张长春

* 国家自然科学基金资助; 中国科学院重大基础研究项目.

张达华	张德红	张会领	张 建	张家文	张 霖
张良生	张勤俭	张少强	张学尧 ²	张 羽	张月元
赵棣新	赵海文	赵京伟	赵 萌	赵维仁	赵 昕 ²
郑建平	郑林生	郑志鹏	周光谱	周化十	周 莉
周月华	朱启明	祝玉灿	朱永生	庄保安	

(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)

1997-03-12收稿

摘 要

利用北京谱仪(BES)获取的 $2 \times 10^5 J/\psi$ 事例,首次给出 J/ψ 能区 π^\pm 、 π^0 、 K^\pm 、 K_S^0 、 ρ^0 、 K^{*0} 、 $K^{*\pm}$ 、 ϕ 等介子和 p 、 Ξ^\pm 、 Σ^\pm (1385) 等重子的单举产额,并与理论模型进行比较,结果表明唯象模型向低能区的延拓是可行的. 同时得到 J/ψ 能区的奇异抑制因子 $s/u \sim 0.3$, 自旋抑制因子 $V/(V+P) \sim 0.3-0.5$, 与 ARGUS 在 Υ 能区的测量结果一致,说明 $SU(6)$ 对称性破缺在 J/ψ 能区也是存在的.

关键词 单举产生, 事例判选, 不变质量, 唯象模型.

1 引 言

部分子碎裂成强子的过程是高能物理研究中的一个重要课题. 对这一非微扰过程, 目前只能从单举实验和唯象理论两方面逐步加深对它的认识.

在中高能区, ARGUS、TPC、ALEPH、DELPHI 等实验组进行了大量这方面的研究工作, 给出了 10GeV—90GeV 区间多个强子的单举产额^[1-3]. 其中, 德国 PETRA 对撞机上的 ARGUS 实验组在 1988—1992 年间, 系统报道了多个重子和介子的单举产额, 研究了 $\bar{p}p$ 、 $\Lambda\bar{\Lambda}$ 、 $\Xi\bar{\Lambda}$ 、 $\Lambda\bar{\Lambda}'$ (1520) 等重子味道关联, 发现了强子产生中的 $SU(6)$ 对称性破缺, 以及共振区重子产额比连续区升高的现象. $SU(6)$ 对称性破缺通常用奇异抑制因子 s/u 和自旋抑制因子 $V/(V+P)$ 表示, 各个实验组对这两个因子的测量结果基本一致, 都在 0.3 附近^[3,4].

与中高能区相比, 低能区强子单举测量的实验结果则十分缺乏. 只有早在 1976 年德国 DORIS 上的 DASP 实验组给出过 J/ψ 及 ψ' 衰变中强子 π 、 K 、 p 的产额和单举动量谱^[5], 以及 1975 年意大利 FRASCATI 的 ADONE 测量了 $J/\psi(3100) \rightarrow h's$ 过程中末态 π^\pm 、 π^0 的多重数^[6]. 到目前为止, J/ψ 能区强子单举产生的实验数据还很不完全.

理论上, 为了解释部分子强子化机制, 提出了 LUND、Webber、Caltech 等多个唯象模型. 相对而言, LUND 模型^[7]更能定性解释实验结果, 因而被广泛采用. 国内山东大学

去病教授等也提出了“山东模型”^[8,9],其在Υ能区的理论预言值(特别是重子)与实验符合很好^[8],是一个较有希望的模型.

本文利用北京谱仪(BES)^[10]积累的大量数据,将强子单举实验研究拓展到低能区,测量了J/ψ能区多个介子和重子的单举产额,并与唯象模型进行了比较.这对进一步从理论和实验两方面加强对强子化机制的认识是很有意义的.

2 强子事例总数的确定和粒子分辨

本文分析了 BES 在 J/ψ 共振区采集的 2×10^5 事例. 其中含有大量宇宙线、束流-气体、噪声等本底,真正的 J/ψ → h's 事例仅约占其中一半. 为了测量强子的平均多重数,首先要进行事例判选,确定强子事例总数.

事例判选中采用了排除法. 首先,确定每一事例中带电径迹数,之后对所有事例进行分叉统计,两叉以上(不含两叉)事例都作为强子事例保留,0叉、1叉事例全部排除,由此造成的事例损失将由效率修正补回. 对两叉事例,再逐步排除 Bhabha、双μ事例、J/ψ 轻子道事例以及宇宙线事例. 具体的判选条件可参见文献 [11, 12].

通过事例选择,从 2×10^5 真实事例中挑出约 9×10^4 个强子事例. 用 LUND 模型模拟 J/ψ 到强子末态的产生过程,并通过 BES 探测器的蒙特卡罗模拟作效率修正之后,确定强子事例总数为 115293. 考虑到 MC 模拟中有模型依赖问题,因此又用挑选真实强子事例样本的方法进行了效率修正. 数据样本取自 $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 衰变道,详见文献 [13, 14]. 两种效率修正方法在 10% 误差范围内一致,考虑到事例判选条件等其它误差来源,最后给出强子事例总数误差为 $\pm 12\%$.

对于粒子分辨,本文采用了通常的方法,即主要利用飞行时间和 dE/dx 信息在 3σ 内做 π 、K、p 区分,同时利用簇射计数器和 μ 子探测器进行 e、 μ 分辨^[12].

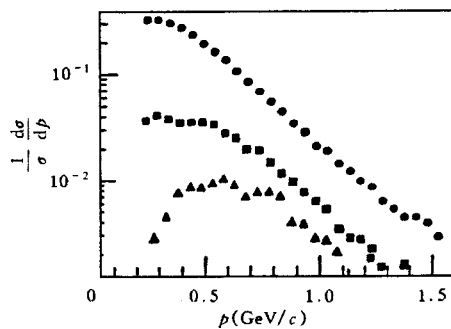
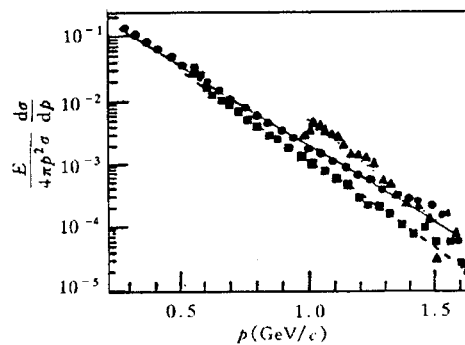
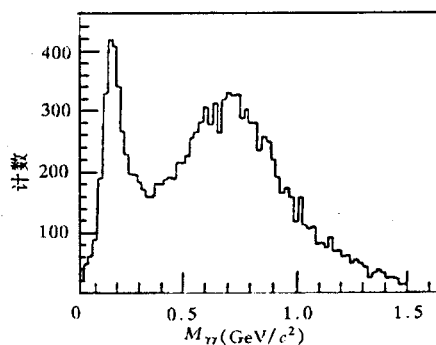
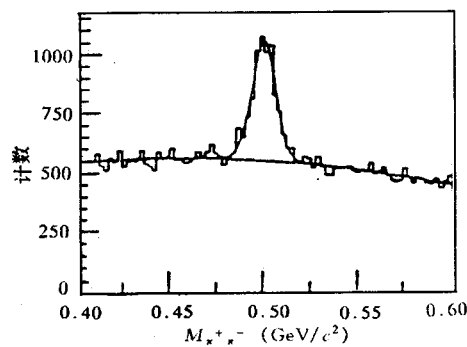
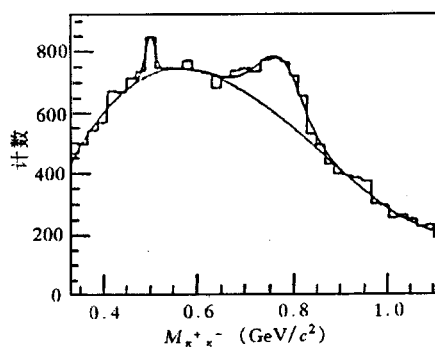
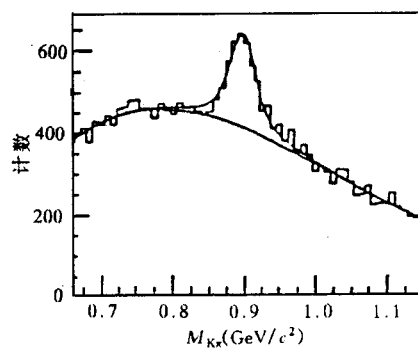
3 强子单举测量

3.1 π^\pm 、 K^\pm 、p 动量谱及多重数

π^\pm 、 K^\pm 、p 多重数是通过拟合动量谱并外推得到的. 首先通过粒子分辨,挑出末态 π^\pm 、 K^\pm 、p 带电径迹,做出 0.2—1.55 GeV/c 区间的动量谱(见图 1),用不变截面的经验拟合公式 $E \frac{d\sigma}{dp} \propto e^{-bE}$ ^[15] 外推至零动量区(见图 2),积分得到多重数(列于表 2),同时给出拟合斜率 b ,它是碎裂函数中的一个重要参数. 由表 1 看到,本文给出的 π^\pm 、p 动量谱拟合斜率与 DASP^[5,6] 基本一致,而 K^\pm 的差别较大.

表1 π^\pm 、 K^\pm 、p 动量谱拟合斜率

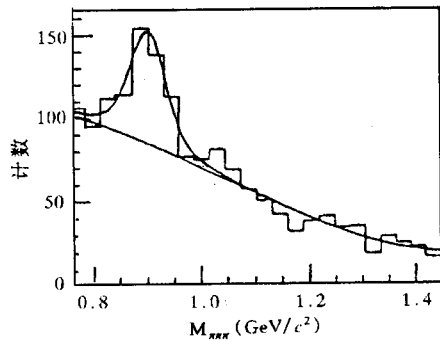
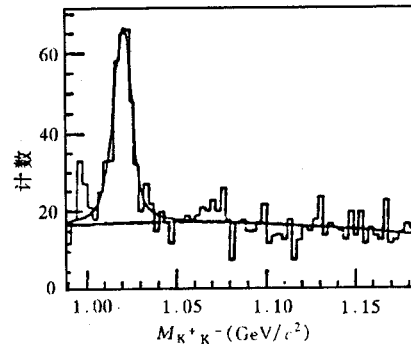
\sqrt{S} (GeV)	π^\pm	K^\pm	p+ \bar{p}
4—5.2(DASP)	5.0±1.0	4.9±0.2	5.4±0.5
3.1(DASP)	5.9±0.1	5.2±0.3	7.2±0.6
3.1(BES)	5.9±0.3	6.7±0.4	7.5±0.6

图1 π^+ 、 K^+ 、 p 动量谱● π^+ 、■ K^+ 、▲ p .图2 π^+ 、 K^+ 、 p 不变截面● π^+ 、■ K^+ 、▲ p .图3 π^0 信号($\gamma\gamma$ 不变质量谱)图4 K_S^0 信号($\pi^+\pi^-$ 不变质量谱)图5 ρ^0 信号($\pi^+\pi^-$ 不变质量谱)图6 K^{*0} 信号($K\pi$ 不变质量谱)

3.2 强子共振态的单举测量

强子共振态的单举产额,是通过拟合其衰变产物的不变质量谱得到的.

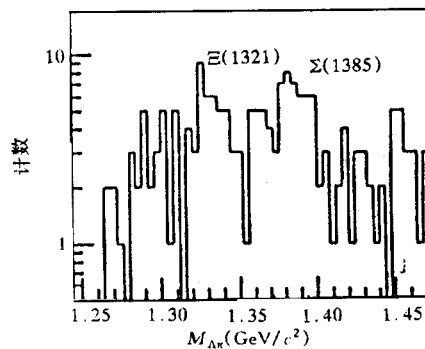
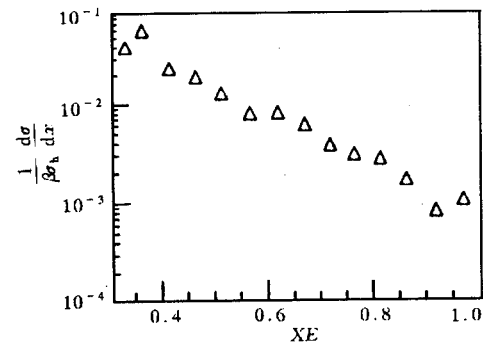
图 3 是两光子末态不变质量谱中的 π^0 信号,为了尽量压低本底,同时保持较高的信噪比,要求两光子在簇射计数器中总的沉积能量($E_1 + E_2$) $> 0.8\text{GeV}$.

图7 K^{*+} 信号(3π 不变质量谱)图8 ϕ 信号(K^+K^- 不变质量谱)

K_S^0 信号由 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱得到(图4).根据 K_S^0 长寿命粒子的衰变特征,确定如下判选条件:

- (1) 同一事例中有两根以上带电径迹;
- (2) 至少有两根带电径迹被粒子分辨程序^[12]判别为 π ;
- (3) 每个 $\pi^+\pi^-$ 组合应该满足下面的 cut 条件:
 - i) xy 平面上,由两径迹“交点”确定的次级顶点到对撞点的距离 $L_{xy} > 0.5\text{cm}$;
 - ii) 两径迹对应于该“交点”的 z 坐标之差 $|\Delta z| < 2.5\text{cm}$;
 - iii) xy 平面上,次级顶点处两径迹合成的总动量方向与对撞点到次级顶点的连线方向保持一致.

同样, ρ^0 、 K^{*0} 、 K^{*+} 、 ϕ 、 Ξ^+ 和 Σ^+ (1385)的信号峰也是在各自衰变产物的不变质量谱中找到的,见图5—9.具体的判选条件可参见文献[12].

图9 Ξ^+ 和 Σ^+ (1385)信号($\Lambda\pi$ 不变质量谱)图10 K_S^0 的能谱

在不变质量谱中找到信号峰,通过 Breit-Wigner共振峰拟合^[16],可以得到粒子数目.选择效率则由蒙特卡罗模拟得到.由于这样得到的效率与蒙特卡罗模拟中所采用的事例产生器有关,为此,分别用 LUND 模型和山东模型事例产生器进行了模拟,比较两种模拟结果,可以得到与模型有关的系统误差.系统误差的其它来源包括:强子事例总数的误差 12%;各个具体的单举强子信号判选条件的变更导致的误差;粒子分辨的不确定性.在 J/ψ 峰值能量处, $e^+e^- \rightarrow h's$ 的 QCD 连续截面仅占 $J/\psi \rightarrow h's$ 截面的 1% 以下, e^+e^- 的

双光子道产生的强子截面则更小, 故予以忽略. 统计误差主要来自共振峰拟合. 经过上述分析, 得到各强子共振态单举产额的最终结果, 见表 2.

图 10 是 K_s^0 的单举微分截面随能量分数 XE 的变化曲线(能谱). 其中 $XE = 2E / \sqrt{S}$, E 是粒子能量, \sqrt{S} 是质心系总能量. 微分截面的形式写成 $\frac{1}{\beta \cdot \sigma_h} \cdot \frac{d\sigma}{dx}$, 是归一化的标度无关截面. 式中 σ_h 是 J/ψ 衰变到强子过程的总截面, X 是能量分数.

4 结果综述及与理论模型的比较

本文给出的各强子多重数的结果见表 2, 表中同时列出了山东模型、LUND 模型的理论预期值.

4.1 奇异抑制和自旋抑制

根据强子多重数, 可以算出奇异抑制因子 s/u 和自旋抑制因子 $V/(V+P)$. 通过这两个因子, 可以研究强子化过程中 $SU(6)$ 对称性的破缺.

ARGUS 实验组对这两个参数的测量结果分别是^[4]:

$$\begin{aligned} s/u &= 0.29 \pm 0.06(K^*/2\rho^0); & V/(V+P) &= 0.39 \pm 0.08(\rho/\pi); \\ &= 0.27 \pm 0.08(K/\pi); & &= 0.40 \pm 0.05(K^*/K). \\ &= 0.26 \pm 0.16(2\phi/K^*). \end{aligned}$$

根据本文的测量结果, 可以给出 J/ψ 能区中上述参数值. 需要注意的是, 计算 s/u 和 $V/(V+P)$ 的粒子数应是直生强子数, 而表 2 中的多重数是指衰变末态总的粒子数, 包括了来自其它粒子衰变的次级产物, 为此, 用 JETSET 产生器进行了修正, 最终得到 J/ψ 能区 s/u 和 $V/(V+P)$ 比值分别为:

$$\begin{aligned} s/u &= 0.29 \pm 0.15(K^{*\pm}/2\rho^0); \\ &= 0.28 \pm 0.11(K^{*0}/2\rho^0); \\ &= 0.40 \pm 0.19(2\phi/K^{*\pm}); \\ &= 0.41 \pm 0.13(2\phi/K^{*0}); \\ &= 0.25 \pm 0.05(K^\pm/\pi^\pm); \\ &= 0.33 \pm 0.04(K_s^0/\pi^0). \\ V/(V+P) &= 0.35 \pm 0.11(\rho^0/\pi^0); \\ &= 0.37 \pm 0.18(K^{*\pm}/K^\pm). \end{aligned}$$

上述结果与 Υ 能区 ARGUS 结果基本符合, 证明奇异抑制和自旋抑制在低能区同样存在, 具有普遍性.

4.2 多重数比较

LUND 模型、山东模型最早都是针对高能喷注事例提出的, 后来在解释 Υ 能区胶子碎裂机制上也取得了成功, 那么, 在 J/ψ 这样的低能区又会怎样呢? 这是理论家们很关心的问题. 比较表 2 中的理论预期值和实验值, 可以看到, 理论结果与 BES 实验测定值相当接

近,对于 π^\pm 、 K^\pm 、 π^0 、 ϕ 、 ρ 等粒子的平均多重数,则两者在误差范围内一致. 这表明,上述唯象模型在延拓到低能区后也是适用的,和实验数据有可比性. 当然,要对各个模型进行精确检验,还必须对能谱、味道关联、快度关联等一些对模型敏感的量进行进一步的实验研究.

表2 J/ψ能区强子平均多重数

粒 子	BES	山东模型	LUND7.3
$\pi^+ + \pi^-$	3.02 ± 0.45	3.04	2.93
$K^+ + K^-$	0.39 ± 0.08	0.32	0.35
π^0	1.59 ± 0.22	1.70	1.65
ϕ	0.020 ± 0.005	0.025	0.026
ρ^0	0.198 ± 0.063	0.279	0.277
K_s^0	0.120 ± 0.018	0.157	0.171
$K^{*0} + \bar{K}^{*0}$	0.097 ± 0.025	0.142	0.170
$K^{*+} + \bar{K}^{*-}$	0.100 ± 0.043	0.141	0.172
$p + \bar{p}$	0.11 ± 0.03	0.101	0.136
$\Xi^- + \bar{\Xi}^+$	0.0041 ± 0.0012	0.0043	0.0029
$\Sigma^-(1385) + \bar{\Sigma}^+(1385)$	$(2 \pm 1.5) \times 10^{-3}$	0.00237	0.002
$\Sigma^+(1385) + \bar{\Sigma}^-(1385)$	$(2 \pm 1) \times 10^{-3}$	0.00244	0.0018

感谢北京正负电子对撞机岗位上的有关同志,特别是计算机中心的工作人员对本工作的支持. 本工作进行过程中,与山东大学物理系的谢去病教授、Lund大学的Anderson教授、Dortmund大学的D.Wegener教授等在理论模型方面进行过多次有益的讨论,在此对他们所给予的支持和帮助表示诚挚的谢意.

参 考 文 献

- [1] H. Albrecht *et al.* (ARGUS), *Z. Phys.*, **C39**(1988)177; **C41**(1989)557; **C44**(1989)547; **C46**(1990)15; H. Albrecht *et al.* (ARGUS), *Phys. Lett.*, **236B**(1990)102; **230B**(1989)349; **215B**(1988)429.
- [2] P. Avery *et al.*, *Phys. Rev.*, **D43**(1991)3599; P. Avery *et al.*, *Phys. Rev.*, **D31**(1985)2161.
- [3] Alessandro De Angelis CERN PPE/93-35(1993); ALEPH note (PHYSIC 92-107).
- [4] Wegner Hofmann, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **38**(1988)279.
- [5] W. Braunschweig *et al.*, *Phys. Lett.*, **B63**(1976)115.
- [6] R. Baldini-celio *et al.*, *Phys. Lett.*, **B58**(1975)471.
- [7] B. Anderson *et al.*, *Phys. Rep.*, **97**(1983)31; X. Artru, *Phys. Rep.*, **97**(1983)147; A. Casher, H. Neuberger, S. Nussinov, *Phys. Rev.*, **D20**(1979)179; **D21**(1980)1966.
- [8] 田丽丽、谢去病, *高能物理与核物理*, **17**(1993)885.
- [9] Lili Tian *et al.*, *Phys. Rev.*, **D49**(1994)4517; Qu-bing Xie *et al.*, *Phys. Rev.*, **D38**(1988)2169.
- [10] J. Z. Bai *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.*, **A344**(1994)319; 白景芝等, *高能物理与核物理*, **16**(1992)769.
- [11] 白景芝等, *高能物理与核物理*, **19**(1995)673.
- [12] 赵 昕, J/ψ能区强子单举产生的实验研究, 博士论文, 山东大学, 1996.
- [13] 苑长征, 由 $\psi(2S) \rightarrow \pi + \pi^- J/\psi$ 道测量 J/ψ 轻子道衰变分支比, 硕士论文, 高能物理研究所, 1993.

- [14] 方伟贞, $\psi(2S)$ 共振参数的测量, 硕士论文, 高能物理研究所, 1995.
 [15] 余志堂, J/ψ 衰变中强子产生的研究, 硕士论文, 高能物理研究所, 1995.
 [16] 许榕生、张学尧、李群, 共振峰拟合, BES 内部报告, 1990.

Experimental Study of Hadron Inclusive Production in J/ψ Region

BES Collaboration

Bai Jingzhi Bian Jianguo Chai Zhengwei Chen Guangpei Chen Hongfang¹
 Chen Jiangchuan Chen Shaomin Chen Yaqing Chen Yu Chen Yuanbo
 Cheng Baosen Cui Xiangzong Ding Huiliang Du Zhizhen Fan Xiaoling
 Fang Jian Gao Cuishan Gao Meili Gao Shuqi Gu Jianhui Gu Shudi
 Gu Weixin Gu Yifan Guo Yanan, Han Shiwen Han Ying He Jingtang
 He Ju He Mao² Hu Guiyun Hu Jingliang Hu Qionghui Hu Tao
 Hu Xiaoqing Huang Xiuping Huang Yinzhi Jiang Chunhua Jin Shan
 Jin Yan Kang Shuhui Ke Zunjian Lai Yuanfen Lan Huibin
 Lang Pengfei Li Jin Li Peiqin Li Qun Li Rubo Li Wei Li Weidong
 Li Weiguo Li Xinhua Li Xiaonan Lin Shuzi Liu Huaimin Liu Jing
 Liu Jinghua Liu Qi Liu Rongguang Liu Yan Liu Zhen'an Lü Fong
 Lü Janguang Lu Jianye Luo Shuanqun Luo Yong Ma Aimin
 Ma Encheng Ma Jimao Mao Huishun Mao Zepu Meng Xiangcheng
 Ni Huiling Nie Jing Qi Nading Qiu Jinfa Qu Yunhe Que Youkun
 Rong Gang Shao Yuying Shen Benwei Shen Dingli Shen Hong
 Shen Xiaoyan Sheng Huayi Shi Huanzhang Song Xiaofei Sun Fang
 Sun Hansheng Sun Shijun Tan Yiping Tang Suqiu Tong Guoliang
 Wang Feng Wang Jufang Wang Linzhou Wang Lingshu Wang Man
 Wang Meng Wang Peiliang Wang Ping Wang Shaomin Wang Taijie
 Wang Yunyong Wei Chenglin Wu Yigen Xi Deming Xia Xiaomi
 Xie Peipei Xie Yigang Xiong Weijun Xu Guofa Xu Rongsheng
 Xu Zhijing Xue Shengtian Yan Jie Yan Wuguang Yang Changyou
 Yang Chunmin Yang Jie Yang Xiaofeng Ye Minghan Ye Shizhang
 Ye Shuwei¹ Yi Kai Yu Chuansong Yu Chunxu Yu Zhitang
 Yu Zhongqiang Yuan Changzheng Zhang Bingyun Zhang Changchun
 Zhang Dahua Zhang Dehong Zhang Huiling Zhang Jan Zhang Jiawen
 Zhang Lin Zhang Liangsheng Zhang Qinjian Zhang Shaoqiang

Zhang Xueyao² Zhang Yu Zhang Yueyuan Zhao Dixin Zhao Haiwen
Zhao Jingwei Zhao Meng Zhao Weiren Zhao Xin² Zheng Jianping
Zheng Linsheng Zheng Zhipeng Zhou Guangpu Zhou Huashi Zhou Li
Zhou Yuehua Zhu Qiming Zhu Yucan Zhu Yongsheng Zhuang Baoan

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

1(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

2(*Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100*)

Received 12 March 1997

Abstract

The mean multiplicities of mesons π^\pm , π^0 , K^\pm , K_s^0 , ρ^0 , K^{*0} , $K^{*\pm}$, ϕ and baryons p , Ξ^\pm , Σ^\pm (1385) are measured for the first time in J/ψ region with 200,000 J/ψ events collected by the BES detector. The results are compatible with LUND and Shandong phenomenological models. Based on the experimental results, the strangeness suppression factor s/u and spin suppression factor $V/(V+P)$ are calculated to be ~ 0.3 and $\sim 0.3-0.5$ respectively, in good agreement with those given by ARGUS Collaboration in Υ region. This indicates that the $SU(6)$ breaking is consistent in the energy region from J/ψ to Υ .

Key words inclusive production, event selection, invariant mass, phenomenological model.