

$\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 角分布测量中的效率修正*

焦健斌^{1,2;1)} 朱永生² 张学尧¹

1 (山东大学 济南 250100)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 利用参考衰变道 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 的高统计量通过判选条件转换实现对 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 过程角分布测量中 Monte Carlo 效率的修正, 并对该方法可能带来的系统误差进行估计, 这些结果被用于 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 角分布的测量.

关键词 效率修正 角分布 参考衰变道

1 引言

根据强子螺旋度守恒规则, $e^+e^- \rightarrow \psi' \rightarrow B_s\bar{B}_s$ 过程的角分布可以写成:

$$\frac{dN}{d\cos\theta} \propto 1 + \alpha \cos^2\theta, \quad (1)$$

这里 θ 是在实验室系下重子 (B_s) 与 e^+ 束流方向之间的夹角^[1].

在假设粲夸克的质量为无穷大的前提下, 由强子螺旋度守恒规则可得 $\alpha=1$ ^[1], 而实际上, 由于粲夸克的质量是有限的, 因此 J/ψ 与 ψ' 衰变为重子对末态的角分布 α 值根据螺旋度对称性的理论预言应是介于 0 和 1 之间的常数.

对 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 过程的角分布参数 α 值的已有理论预言和实验测量见表 1.

表 1 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 角分布参数 α 值的预言与测量

α 值	来源
理论预言值	
$\alpha = 0.58$	Claudson et al. ^[2]
$\alpha = 0.80$	Carimalo ^[3]
实验测量值	
$\alpha = 0.67 \pm 0.15 \pm 0.04$	M. Ambrogiani ^[4]

BES 合作组采集了 14M ψ' 事例^[5], 根据其他实验测得的 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 的分支比 (见表 2), 结合该过程的事例探测效率 (约为 38%), 可知 BES 能探测到超过 1000 个 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 事例, 因此有可能测量该反应的角分布. 为此

目的需要了解 $p\bar{p}$ 末态探测效率 $\epsilon_{p(\bar{p})}$ 对角度 θ 的依赖关系. 而 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 事例数统计量却不足以对此进行精确的研究.

表 2 不同实验组测得的 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 的分支比

分支比 ($\times 10^{-4}$)	来源
2.3 ± 0.7	MARK-I ^[6]
1.4 ± 0.8	DASP ^[7]
2.16 ± 0.39	BES-I ^[8]
2.87 ± 0.20	CLEO-C ^[9]
3.3 ± 0.9	BABAR ^[10]

BES II 采集了 58M J/ψ 事例^[11], 根据分支比 $BR(J/\psi \rightarrow p\bar{p}) = (2.26 \pm 0.01 \pm 0.14) \times 10^{-3}$ 和相应的探测效率约为 $\epsilon = 49\%$ ^[12], 可知能够观测到约 63000 个 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 事例, 利用这一高统计的事例样本, 可以比较准确地确定 $\epsilon_{p(\bar{p})}$ 随 θ 变化的关系, 用来对 Monte Carlo 确定的效率进行修正. 本文描述通过参考衰变道 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 来实现这一修正并应用于 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 角分布参数测量的方法.

2 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 事例的挑选

为了测量 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 过程的角分布, 首先要挑选出较为纯净的 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 事例. 由于该过程是一个两体强衰变过程, 因此要求末态中有且仅有两条好的重建带电径迹, 其总电荷数为 0; 每条径迹都要求有好的螺旋

2006-03-07 收稿

* 国家自然科学基金(10491303)和中国科学院百人计划基金(U-25)资助

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

线拟合; 径迹与对撞点之间的距离在 xy 平面内小于 2cm, z 方向小于 20cm; 径迹极角余弦的绝对值限制在 0.8 以内; 径迹的横动量大于 0.070GeV. 根据该衰变道的特性, 参考 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 事例的判选条件^[12], 我们确定了如下的事例判选规则:

(a) 宇宙线的排除: 为了去除宇宙线的干扰, 正负粒子飞行时间差的绝对值应当小于 4ns, 即 $|t_+ - t_-| < 4\text{ns}$;

(b) 粒子鉴别: 如果用 t_{meas} 表示粒子飞行时间的测量值, 用 $t_{\text{exp}}(\pi, K, p)$ 表示假定该粒子为 (π, K, p) 时飞行时间的预期值, 那么必须同时满足 $|t_{\text{meas}} - t_{\text{exp}}(p, \bar{p})| < |t_{\text{meas}} - t_{\text{exp}}(K)|$ 和 $|t_{\text{meas}} - t_{\text{exp}}(p, \bar{p})| < |t_{\text{meas}} - t_{\text{exp}}(\pi)|$;

(c) 非共线角条件: 该过程是一个两体过程, 所以来自该过程的一对正负粒子之间的非共线角 θ_{acol} 应当尽量小, 这里要求 $\theta_{\text{acol}} < 5^\circ$;

(d) 沉积能量条件: 正电荷在桶部簇射计数器内的沉积能量应小于 0.750GeV, 即 $E_+ < 0.750\text{GeV}$, 用以排除 e^+e^- 本底;

(e) 质心系能量条件: 假设末态的一对正负粒子是来自 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 过程, 则他们的能量之和与 $M_{\psi'}$ 的差别应当尽量小, 这里要求 $|E_p + E_{\bar{p}} - M_{\psi'}| < 0.130\text{GeV}$; 其中 $E_{p, \bar{p}}$ 是根据测得的 $p(\bar{p})$ 动量计算的.

(f) 反质子动量条件: 要求负粒子的动量与预期值 (即来自信号道的反质子的动量 1.586GeV) 之间的差别应小于 0.150GeV.

经过以上挑选后, 数据和 Monte Carlo(MC) 样本的质子动量谱分布的对比可以反映出数据的纯净程度 (见图 1).

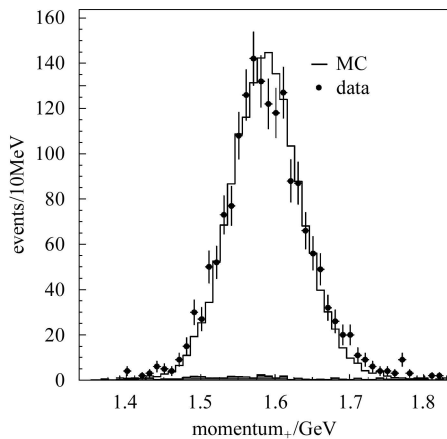


图 1 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 中质子动量分布的初步结果
直方图表示 MC 的分布 (MC 样本包括信号道与本底道, 均按照其分支比归一并加在一起), 误差棒表示真实数据的分布, 阴影部分是模拟的本底.

本底估计

对于 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 过程, 可能的本底道主要为与信号道同为两个荷电径迹的衰变道, 及那些两个荷电径迹带光子的过程, 通过 2004 年的粒子数据表^[13] 和利用 Lund 模型产生的 $\psi' \rightarrow \text{anything}$ 样本^[14] 可以找到主要的这类本底, 例如: Bhabha, Dimu, $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{CJ}(J=0,1,2)$ ($\chi_{CJ}(J=0,1,2) \rightarrow 2\text{-prong}$), $\psi' \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi \rightarrow \pi^0\pi^0\mu^+\mu^-$, 等等. 通过对这些本底道 MC 样本的研究, 发现这些本底总的影响在真实数据中占的比重小于 2.5% (见图 1).

3 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 过程的角分布

如前所述, $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 过程的角分布可以写成公式 (1) 的形式:

如果把 MC 的效率 (ϵ_{MC}) 和效率修正 (f_c) 的因素考虑在内, 那么实验测量到 $p\bar{p}$ 的角分布应表示为以下形式:

$$\frac{dN_{\text{meas}}}{d\cos\theta} \propto (1 + \alpha \cos^2\theta) \times \epsilon_{\text{MC}}(\cos\theta) \times f_c(\cos\theta). \quad (2)$$

3.1 MC 效率 $\epsilon_{\text{MC}}(\cos\theta)$

为了得到 MC 效率与极角的依赖关系, 我们用均匀相空间产生子模拟了 500,000 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 事例. 在经过事例挑选前后, 质子飞行方向与 e^+ 束流方向间夹角的余弦分别呈现不同的角度依赖关系 (见图 2), 两者之间的比即为 MC 效率随极角余弦的变化.

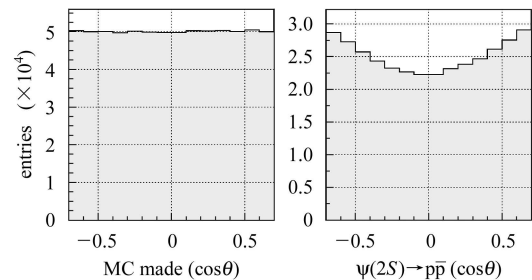


图 2 左图为事例挑选前 $p\bar{p}$ 事例的 $\cos\theta$ 的分布, 右图为事例挑选后的分布 (这里的 θ 是实验室系中质子的极角或反质子极角的补角)

3.2 MC 效率的修正 $f_c(\cos\theta)$

在实验过程中, 用 Monte Carlo 样本对待测过程进行模拟总会出现偏差, 对于相同的判选条件, 这种差别将会导致 MC 与真实数据有不同的选择效率, 因此为了尽可能的减小系统误差, 应当对 MC 效率进行修正.

修正函数 $f_c(\cos\theta)$ 包含了对每一个判选条件的修正, 定义为以下形式:

$$f_c(\cos\theta) = \frac{\epsilon_{\text{Data}}(\cos\theta)}{\epsilon_{\text{MC}}} = \prod_i \frac{\epsilon_{\text{Data}}(\cos\theta)(i)}{\epsilon_{\text{MC}}}, \quad (3)$$

$$i = PID_+, PID_-, E_+, E_D + E_{\bar{p}}, \theta_{\text{acol}}, P_{\bar{p}}^{[12]},$$

则经过了修正的 MC 效率为

$$\epsilon'_{\text{MC}}(\cos\theta) = \epsilon_{\text{MC}}(\cos\theta) \times f_c(\cos\theta), \quad (4)$$

如前所述, $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 事例统计量的限制使得我们无法通过信号道本身得到效率修正, 而需要借助其他高统计量的衰变道来近似的定出这一修正曲线. 这里选用的参考衰变道是 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$, 该衰变道是与信号道具有相同的衰变末态的强衰变过程, 有着较大的统计量, 也更容易得到纯净的样本(关于 J/ψ 与 ψ' 数据采集环境的差别的影响将在系统误差部分加以说明). 使用参考衰变道研究 MC 效率的修正, 首先需要把原信号衰变道的判选条件等价的应用到参考道上, 这时就需要根据两个衰变道之间的联系对判选条件进行变换, 具体做法如下:

- (a) 宇宙线的排除 $|t_+ - t_-| < 4\text{ns}$: 不需要作变换;
- (b) 粒子鉴别: 不需要作变换;

(c) 非共线角条件: $\theta_{\text{acol}} < 5^\circ \iff \theta_{\text{acol}} < 4.95^\circ$: 在两个衰变道 MC 样本中, 我们要求被非共线角条件排除的事例在总事例中所占的比例相同, 在原信号道中, 被该条件排除的事例大约占 0.76%, 则在参考道中同样要求有 0.76% 的事例被该条件排除;

(d) 沉积能量条件: $E_+ < 0.750\text{GeV} \iff E_+ < 0.630\text{GeV}$: 该条件利用 BSC 的沉积能量排除 e^+e^- 本底, 这里要求在两个衰变道中, 该条件对应的沉积能量点与各自的束流能量之比为常数, 即 $\frac{E_{\text{BSC}}}{E_{\text{beam}}} = c$, 对于 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 和 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$, E_{BSC} 分别为 0.750GeV 和 0.630GeV ;

(e) 质心系能量条件 $|E_{p\bar{p}} - 3.686| < 0.130\text{GeV} \iff |E_{p\bar{p}} - 3.097| < 0.080\text{GeV}$: 参数 $E_{p\bar{p}}$ 的分辨在信号道和参考道中分别为 0.065GeV 和 0.040GeV , 该条件要求测量值与理论预期值间的差别均小于 2 倍分辨;

(f) 反质子动量条件 $|P_{\bar{p}} - 1.586| < 0.150\text{GeV} \iff |P_{\bar{p}} - 1.232| < 0.110\text{GeV}$: 来自两个衰变道的反质子的动量分别为 1.586GeV 和 1.232GeV , 对应的分辨为 0.050GeV 和 0.037GeV . 该条件要求测量值与理论预期值间的差别均小于 3 倍分辨.

这样通过参考衰变道可得各判选条件效率的修正因子随 $\cos\theta$ 的变化(见图 3), 它们的乘积即为总的效

率修正 $f_c(\cos\theta)$ (见图 4).

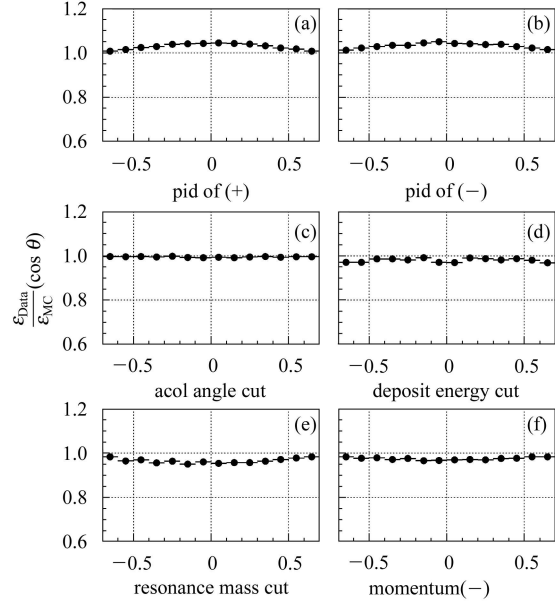


图 3 图 (a), (b), (c), (d), (e), (f) 分别是正粒子鉴别, 负粒子鉴别, 非共线角条件, 沉积能量条件, 质心系能量条件和反质子动量条件的效率修正曲线

由图 3(c) 可知, 非共线角条件的修正是可以忽略的. 考虑到探测器性能对于 $\cos\theta$ 的对称性, 所以 $f_c(\cos\theta)$ 应该可以用一关于 $\cos\theta = 0$ 对称的平滑曲线 $f_c(\cos\theta) = 1 + \beta \cos^2\theta$ 来描述.

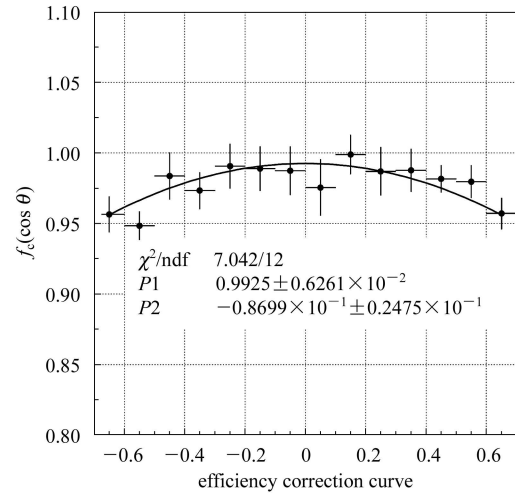


图 4 效率修正 $f_c(\cos\theta)$, 图中误差棒表示的数据点为各判选条件效率修正的总效应, 数据点的误差包括了统计误差和分辨率带来的系统误差, 应用 $f_c(\cos\theta) = 1 + \beta \cos^2\theta$ 对其拟合, P2 即拟合参数 β

为了检查这种变换的正确性, 把变换后的判选条件用于测量参考道的分支比和角分布, 并把结果与以前发表过的结果进行对比, 发现两者在误差范围内吻合, 例如角分布系数为 $\alpha = 0.707 \pm 0.038$ (见图 5), 与已

发表的结果 $\alpha = 0.676 \pm 0.036$ 在误差范围内一致^[12].
(这里 α 值的误差仅为统计误差)

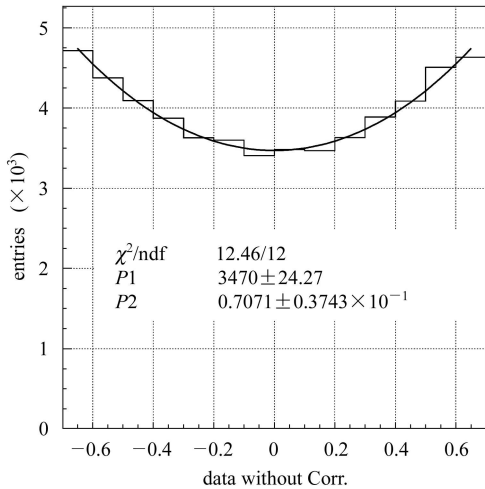


图5 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 中质子的角分布
图中拟合参数 P2 是用这种方法测得的 α 值.

3.3 系统误差的分析

用参考衰变道对信号道的 MC 效率进行修正的方法所带来的系统误差主要来自 (a). J/ψ 与 ψ' 数据的采集环境的差别带来的误差; (b). 效率修正曲线拟合带来的误差.

(a) J/ψ 与 ψ' 的数据采集环境有所不同, 因此利用 J/ψ 数据刻度 ψ' 数据时会带来一定的误差. 由于真实化文件体现了不同数据样本的谱仪性能状态的差异, 因此, 通过把 ψ' 数据的真实化文件应用到 J/ψ 数据的 MC 模拟中并观察其对结果的影响, 可以得到这种差异带来的误差.

在变换真实化文件后, 根据公式(3)得到的效率修正曲线 $f_c(\cos\theta)$ 与之前有一定的差别, 但由于 MC 效率曲线 $\epsilon_{MC}(\cos\theta)$ 也同时发生了变化, 在根据公式(2)对 α 值拟合时, 这两者引起的变化是相互抵消的 (见图6), 因此对结果的影响比较小, 其相对差别仅有 2.2%, 这一数值被用作 J/ψ 与 ψ' 的数据采集环境的差异带来的系统误差.

(b) 由图4可知, 效率修正在不同的 $\cos(\theta)$ 存在涨落, 用一平滑曲线去描述它将会带来一定的误差, 这一拟合误差会直接影响到修正后的 MC 探测效率 (ϵ'_{MC}) 随 $\cos\theta$ 的分布, 进而影响到对角分布参数 α 值的拟合.

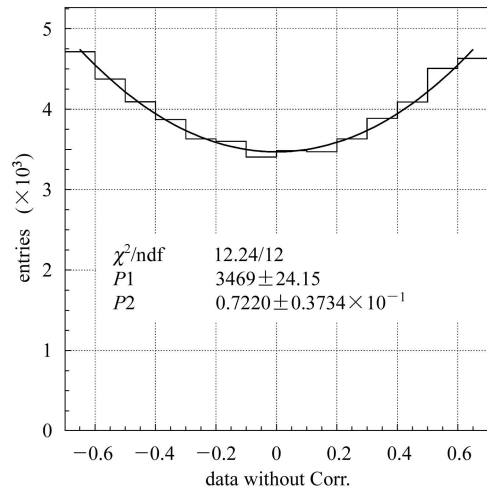


图6 改变真实化文件后测得的 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 中质子的角分布参数 α (图中 P2)

以公式(2)为函数形式对 α 值的拟合中, 效率修正 $f_c(\cos\theta)$ 作为一条平滑曲线被代入到拟合函数中, 如前所述, $f_c(\cos\theta)$ 可以表示为 $1 + \beta \cos^2\theta$ 的形式, 由图4可知, $\beta = -0.087 \pm 0.025$, 如果把 β 的值变化 1σ , 拟合 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 数据得到的角分布系数 α 的变化约为 4.8%, 这一数值被当作拟合过程带来的系统误差.

在认为 (a), (b) 两项误差不相关的前提下, 本文描述的效率修正方法带来的总的系统误差应为这两项的均方根.

4 总结

通过参考衰变道 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 对信号道 $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ 角分布测量的 MC 效率进行修正可以解决信号道统计量不足的问题, 经过前面的分析和检查发现, 判选条件在两个衰变道之间的变换是有效的. 考虑不同极角下探测效率的涨落和 J/ψ 与 ψ' 的数据采集环境的差异导致的不确定性, 可以确定该方法带来的系统误差约为 5.3%.

感谢 BEPC 和 BES 全体成员在获取 58M J/ψ 数据和 14M ψ' 数据期间所付出的辛勤劳动; 同时感谢 BES 刻度组, MC 组, J/ψ 物理组与 ψ' 物理组同事们的合作与支持.

参考文献(References)

- 1 Brodsky S J, Lepage G P. Phys. Rev., 1981, **D24**: 2848
- 2 Claudson M, Glashow S L, Wise M B. Phys. Rev., 1982, **D25**: 1345
- 3 Carimalo C. Int. J. Mod. Phys., 1985, **A2**: 249
- 4 Ambrogiani M et al(E835 Collab). Phys. Lett., 2005, **B610**: 177—182
- 5 MO X H et al. HEP & NP, 2004, **28**: 455
- 6 Feldman G J, Perl M L. Phys. Rept., 1977, **33**: 285—365
- 7 Brandelik R et al(DASP Collab). Z. Phys., 1979, **C1**: 233—256
- 8 BAI J Z et al(BES Collab). Phys. Rev., 2001, **D63**: 032002
- 9 Pedlar T K et al(CLEO Collab). Phys. Rev., 2005, **D72**: 051108
- 10 Aubert B et al(BABAR Collab). Phys. Rev., 2006, **D73**: 012005
- 11 FANG S S et al. HEP & NP, 2003, **27**(4): 277(in Chinese) (房双世等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(4): 277)
- 12 BAI J Z et al(BES Collab). Phys. Lett., 2004, **B591**: 42—48
- 13 Eidelman S et al(Particle Data Group). Phys. Lett., 2004, **B592**: 1
- 14 CHEN J C et al. Phys. Rev., 2000, **D62**: 034003; Nucl. Sci. Eng., 1984, **88**: 551; Ranft J, Ritter S. Z. Phys., 1983, **C20**: 347; Fasso A et al. FLUKA 92, Proceedings of the Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environment, Santa Fe, 1993

Efficiency Correction in the Measurement of $\psi' \rightarrow p\bar{p}$ Angular Distribution *

JIAO Jian-Bin^{1,2;1)} ZHU Yong-Sheng² ZHANG Xue-Yao¹

1 (Shandong University, Ji'nan 250100, China)

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

Abstract In the angular distribution measurement of $\psi' \rightarrow p\bar{p}$, the sample of $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ selected from 58M J/ψ events with high statistics is used to determine the polar angle dependent efficiency, and to correct the Monte Carlo efficiency in $\psi' \rightarrow p\bar{p}$. The systematic error of this method is also analyzed. The obtained efficiencies and related errors are used for the measurement of angular distribution of $\psi' \rightarrow p\bar{p}$.

Key words efficiency correction, angular distribution, reference channel

Received 7 March 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10491303) and 100 Talents Program of CAS (U-25)

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