

# $p, \bar{p}$ 在北京谱仪 (II) 中的行为研究\*

季晓斌<sup>1)</sup> 沈肖雁

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 从 Monte Carlo 模拟和北京谱仪 (BES II) 所取的实验数据入手, 分析了  $p$  和  $\bar{p}$  产生次级带电径迹和中性径迹的几率以及好径迹选择条件对这些次级径迹的去除情况、 $p$  在探测器中的能量损失和  $\bar{p}$  的湮没、 $p$  和  $\bar{p}$  在桶部簇射计数器中沉积能量的分布以及 3 种不同的粒子鉴别方法的优劣. 给出了 BES 目前可以正确重建出的  $p$  和  $\bar{p}$  的动量的最小值和利用 TOF 和  $dE/dx$  的联合信息鉴别  $p$  和  $\bar{p}$  的优越性.

**关键词** 北京谱仪 质子 反质子

## 1 引言

北京谱仪 (BES) 是工作在北京正负电子对撞机 (BEPC) 上的一台大型通用性磁谱仪<sup>[1,2]</sup>. 升级改造后的 BES II 从内到外由束流管、顶点探测器 (VC)、主漂移室 (MDC)、飞行时间探测器 (TOF)、桶部簇射计数器 (BSC)、磁铁和  $\mu$  子探测器等组成. 其中 TOF 的性能大大提高, Bhabha 事例的时间分辨率从 BES I 的 375ps 提高到 180ps, 增强了对  $\pi$ , K 和  $p$  的识别能力. 但是如果用 TOF 鉴别  $p$  和  $\bar{p}$ , 低能量  $p$  和  $\bar{p}$  的鉴别效率差别很大, 相应的动量谱也很不对称. 此外, 在含有  $\bar{p}$  的衰变道中, 光子的数目总是很多, 这些假光子经常会影响物理分析的结果. 因此, 全面了解  $p$  和  $\bar{p}$  在探测器中的行为、找出合理的粒子鉴别方法是十分必要的.

主要利用单粒子的 Monte Carlo 模拟程序研究了  $p$  和  $\bar{p}$  在探测器中与物质的相互作用、不同动量  $p$  和  $\bar{p}$  的重建效果、假光子的去除效果以及不同粒子鉴别方法的优劣性, 并从  $J/\psi$  的实验数据中进一步验证了 Monte Carlo 的结果.

## 2 $p$ 和 $\bar{p}$ 的 Monte Carlo 模拟

BES 上新发展的 Monte Carlo 模拟软件 SIMBES 基于 Geant 3.21<sup>[3]</sup>, 能较好地模拟强相互作用过程. 大量 SIMBES 模拟结果和数据的比较表明, SIMBES 和真实数据基本上是吻合的. 作为验证, 文中大部分图同时提供了数据和 MC 的分布图.

利用了单粒子的模拟程序, 用 SIMBES v104 版本分别模拟了 50,000 个, 动量从 0.1GeV/c 到 1.5GeV/c 之间均匀分布、 $\cos\theta$  处于正负 0.8 之间的质子和反质子.

模拟结果表明, 能量特别低的  $p$  根本不能被重建出来, 这主要是因为  $p$  的能量损失. 根据 Bethe-Bloch 公式<sup>[4]</sup>, 粒子在介质中的平均能量损失率为

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right],$$

这里  $Z$  和  $A$  分别是介质原子数和质量数. 其他的变量定义参见文献[4]. 在 BES 能区, 粒子在某种介质中的能量损失仅仅是  $\beta$  的函数. 所以, 对于相同动量的  $\pi$ , K 和  $p$ ,  $p$  的能量损失要比其余两个大得多. 此外, 粒子在固体中的能量损失明显比气体中的大, 因此粒子在各子探测器的内外壁处被吸收的可能性比

2003-05-20 收稿, 2003-07-02 收修改稿

\* 国家自然科学基金 (19991480) 和中国科学院“九五”重大项目 (KJ95T-03) 资助

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

较大. 图 1 显示的是 Monte Carlo 产生的  $p$  的动量 (重建之前) 随着带电径迹的选择条件逐渐严格而呈现的不同分布, 从中可以明显地看到束流管、VC 和 MDC 外壁对  $p$  的吸收作用.  $\bar{p}$  的情况与  $p$  不同, 由于  $\bar{p}$  与物质湮没后能够产生大量的带电径迹, 因此在动量很小的  $\bar{p}$  事例中, TOF 也可能有击中. 事例显示图也明显地表明低动量  $p$  的径迹在 VC 的外壁就已中断,  $\bar{p}$  湮没后却有很多径迹打在 TOF 上.

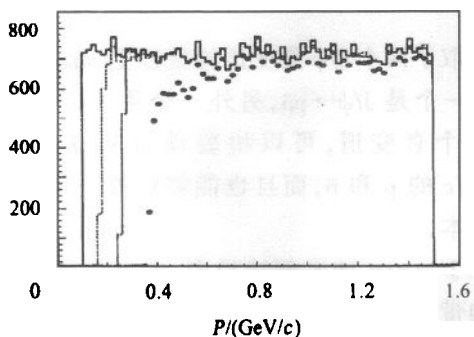


图 1 MC 直接产生的质子动量(重建之前)在不同带电径迹选择条件下的分布

实线: 无选择; 虚线: 要求至少有一条带电径迹; 点线: 要求至少有一条 MDC 中的带电径迹; 圆点: 要求 TOF 被击中.

在模拟的 50,000 个质子中, 大约有 1.5% 的事例重建出一条以上的带电径迹, 8.2% 的事例含有光子; 而在 50,000 个反质子中, 含有一条以上的带电径迹的事例约占 25.1%, 含光子的事例约占 83.7%. 图 2 显示的是  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$  中带电径迹和中性径迹的分布, 从中可以看出有许多额外的带电径迹和中性径迹产生. 为了去除这些额外的径迹, 带电径迹和光子分别用如下的条件选择. 如某一径迹是 MDC 重建出的径迹, 具有好的螺旋线拟合, 且其顶点限制在径向 2cm, 轴向 20cm 以内, 则该径迹被认为是好的带电径迹. 经过选择后, 具有一条以上带电径迹的事例在  $p$  样本中的比例几乎为 0, 在  $\bar{p}$  也大约只有 1.3%. 对于光子, 要求它在 BSC 中至少击中两层, 沉积能量大于 50MeV, 光子在 BSC 首层击中方向与它在 BSC 中的簇射发展方向的夹角小于  $25^\circ$ . 选择后含有光子的  $p$  事例约有 1.2%,  $\bar{p}$  事例仍有 54.9% 之多. 这对许多含  $\bar{p}$  的衰变道的分析是十分不利的. 考虑到大部分光子与  $p$  的夹角较小 (见图 3), 对于  $\bar{p}$ , 额外要求光子和带电径迹的夹角大于  $25^\circ$  以排除部分假光子. 经过这一选择后, 含光子的  $p$  事例降低到 20.1% 左右.

如果把通过好的带电径迹选择的事例认为是能够正确重建出来的事例, 它和总事例的比值称为重

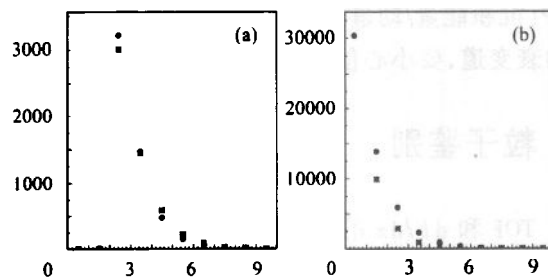


图 2  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$  中带电径迹和中性径迹的分布 (a) 是带电径迹的分布; (b) 是中性径迹的分布. 圆点代表数据, 星号代表 MC.

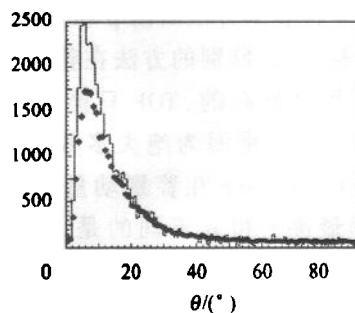


图 3  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ , 反质子事例中光子与带电径迹的夹角分布 误差棒代表数据, 直方图代表 MC.

建效率, 那么动量在  $0.8\text{GeV}/c$  以上的  $p$  和  $\bar{p}$  的重建效率基本相同, 都在 95% 以上; 在  $0.3\text{--}0.8\text{GeV}/c$  之间,  $\bar{p}$  的效率比  $p$  略低; 而在  $0.3\text{GeV}/c$  以下,  $p$  几乎无法重建出来,  $\bar{p}$  仍有一部分事例可以重建出来, 但是这部分小能量  $\bar{p}$  重建出来的动量在目前是不正确的, 即使经过  $dE/dx$  能量损失和磁场的修正<sup>[5]</sup> 也不能得到正确的结果. 所以, 对于 BES 目前的情况, 只有动量在  $0.3\text{GeV}/c$  以上的  $p$  和  $\bar{p}$  是可用的.

$p$  和  $\bar{p}$  的另一个显著的差别是它们在簇射计数器 (BSC) 中沉积的能量.  $J/\psi$  产生的  $p$  和  $\bar{p}$  在 BSC 中的沉积能量如图 4 所示,  $p$  在 SC 中的沉积能量一般在  $0.7\text{GeV}$  以下, 而  $\bar{p}$  则有可能达到  $2.5\text{GeV}$ . 常用

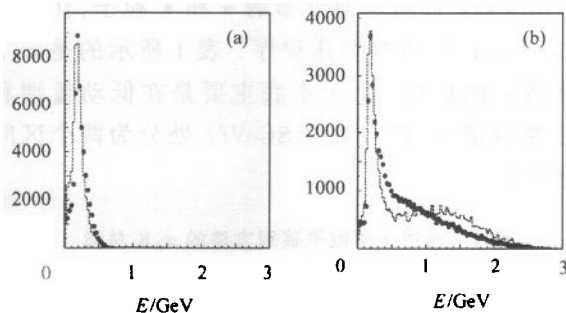


图 4  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ ,  $p$ (a) 和  $\bar{p}$ (b) 在 SC 中的沉积能量分布 误差棒代表数据, 直方图代表 MC.

$E/P$  (沉积能量/动量) 比排除电子, 但对末态中含有  $p$  的衰变道, 要小心使用.

### 3 粒子鉴别

TOF 和  $dE/dx$  的信息常被用来鉴别  $p, \pi$  和  $K$ , 比较了 TOF,  $dE/dx$  以及它们的联合信息 (TOF +  $dE/dx$ ) 方法鉴别  $p$  和  $\bar{p}$  的效果. 其中, 联合方法的  $\chi^2_{com}$  的定义为

$$\chi^2_{com} = \chi^2_{TOF} + \chi^2_{dE/dx}$$

图 5 是通过 3 种鉴别方法后的  $p$  和  $\bar{p}$  动量分布. 从  $p$  的情况来看, 联合鉴别的方法在整个动量区间的效率基本上都是最高的, TOF 只能鉴别动量高于  $0.37\text{GeV}/c$  的  $p$ , 这是因为绝大多数动量太低的  $p$  不能击中 TOF.  $dE/dx$  在鉴别动量低于  $0.8\text{GeV}/c$  的  $p$  时效率最高. 和  $p$  不同的是, TOF 对动量在  $0.25\text{--}0.37\text{GeV}/c$  的  $\bar{p}$  也有较高的鉴别效率. 在这个动量区间的  $\bar{p}$ , 有很多是在 MDC 外壁处湮没的, 湮没后产生的次级粒子击中 TOF, 这样 TOF 测得的时间和  $\bar{p}$  的预期飞行时间差不多, 所以仍然可以鉴别出  $\bar{p}$ .

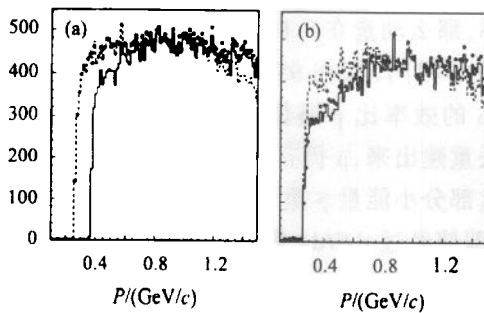


图 5 粒子鉴别后  $p$ (a) 和  $\bar{p}$ (b) 的动量分布  
实线代表 TOF, 虚线代表  $dE/dx$ , 圆点代表 TOF +  $dE/dx$ .

为了估计  $\pi, K$  本底的误判情况, 利用单粒子模拟程序分别产生了 20,000 个动量在  $0.1\text{GeV}/c$  与  $1.5\text{GeV}/c$  之间均匀分布的  $\pi$  和  $K$  粒子, 让它们通过和  $p, \bar{p}$  相同的判选程序. 表 1 所示的是  $\pi, K$  本底混入的总数. 由于本底主要是在低动量端和高动量端混入, 所以在  $0.8\text{GeV}/c$  处分为两个区间比较合理.

表 1 通过 3 种粒子鉴别方法的  $\pi, K$  总数

动量	TOF	$dE/dx$	TOF + $dE/dx$
$P < 0.8\text{GeV}/c$	433	856	761
$P > 0.8\text{GeV}/c$	1138	2603	1397

从表 1 中可以看到, 用 TOF 做粒子鉴别时混入的本底总是最低的,  $dE/dx$  的本底最高. 综合考虑效率和本底情况, 认为在一般情况下可以利用联合鉴别的方法鉴别  $p$  和  $\bar{p}$ , 这样即能够保持较高的效率和较低的本底, 又可以尽可能地避免在不同动量区间用不同的鉴别方法所带来的效率突变.

### 4 数据检验

选取了两个  $J/\psi$  衰变道检验以上 Monte Carlo 的结果. 一个是  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ , 另外一个为  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-$ . 从这两个衰变道, 可以检验动量从  $0.1\text{GeV}/c$  到  $1.3\text{GeV}/c$  的  $p$  和  $\bar{p}$ , 而且也能够获得比较干净的  $p$  和  $\bar{p}$  样本.

在  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$  的事例选择中, 要求两条且只有两条好的带电径迹, 带正电的径迹被鉴别为  $p$ , 带负电的为  $\bar{p}$ ,  $Prob(\chi^2_{p\bar{p}}, 4C) > 0.05$ , 其中,  $Prob(\chi^2_{p\bar{p}}, 4C)$  是根据运动学拟合得到的  $\chi^2$  值计算出的概率. 从带电径迹和中性径迹数的分布和  $p$  和  $\bar{p}$  在 BSC 中的沉积能量来看, 数据和 Monte Carlo 基本上是符合的. 用 TOF 选择一条带电径迹, 比较 3 种粒子鉴别方法对另一条径迹的鉴别效率的差异 (见图 6(a), (b)). 联合鉴别的效率和  $dE/dx$  的效率基本相同, TOF 的效率略低些.

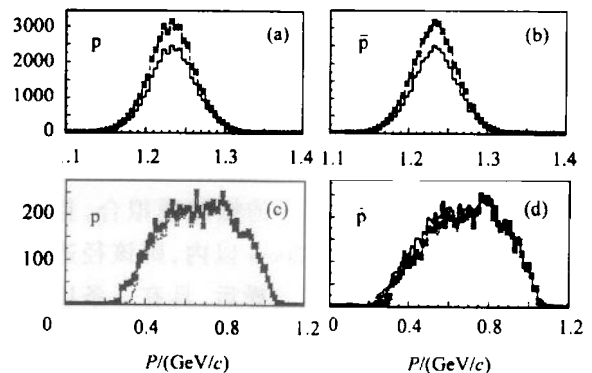


图 6 3 种粒子鉴别方法后的  $p$  和  $\bar{p}$  动量分布  
(a), (b) 来自  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ ; (c), (d) 来自  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-$ .  
实线代表  $dE/dx$ , 虚线代表 TOF, 星号代表 TOF +  $dE/dx$ .

在选择  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-$  事例时, 要求有 4 条好的带电径迹, 且分别被鉴别为  $p, \bar{p}, \pi^+, \pi^-$ , 运动学拟合给出的  $\chi^2(4C) < 15$ . 在比较粒子鉴别时, 除了要比较的径迹之外的 3 条径迹都用联合鉴别的方法鉴别, 结果见图 6(c), (d). 联合鉴别和只用  $dE/dx$  的效果相近. 这两个衰变道的结果同样说明了联合鉴别的效果比较好.

## 5 结果和讨论

由于  $\bar{p}$  与探测器物质的湮没,它能够产生比  $p$  多得多的次级带电径迹和中性径迹. 经过好径迹选择后,  $p$  产生的次级径迹基本能够被排除,  $\bar{p}$  产生的次级带电径迹也可大部分被排除,但光子仍然保持较高的比例.  $p$  和  $\bar{p}$  在探测器中的能量损失要比  $\pi$ ,  $K$  大得多,大量低能的  $p$  在各子探测器的内外壁被吸收掉,只有动量大于  $0.25\text{GeV}/c$  的  $p$  才可能在 MDC 中产生径迹;探测到的许多低能  $\bar{p}$  的径迹是它湮没以后产生的,所以无论是  $p$  还是  $\bar{p}$ ,如果它的动量小于  $0.3\text{GeV}/c$ ,目前都不能重建出正确的动量

值.

鉴别  $p$  和  $\bar{p}$  可以用 TOF,  $dE/dx$  和二者联合的方法. 3 种方法各有优劣. 动量小于  $0.37\text{GeV}/c$  的  $p$  不能击中 TOF,因此无法用 TOF 鉴别这些低能的  $p$ . TOF 做粒子鉴别时,本底混入的最少,但它的鉴别效率一般也较低;  $dE/dx$  的效率一般较高,但本底也较多;联合鉴别的方法本底处于两者之间,而且能够尽可能的避免不同动量区间使用不同的粒子鉴别方法所带来的效率的不连续性,因此一般情况下,TOF 和  $dE/dx$  联合鉴别  $p$  和  $\bar{p}$  是一种较好的方法.

感谢 MC 组刘怀民、陈江川等的支持. 感谢王文峰博士的有益讨论.

### 参考文献 (References)

- 1 BES Collaboration (BAI J Z et al.) HEP & NP, 1992, **16**(9):769 (in Chinese)  
(BES 合作组(白景芝等). 高能物理与核物理, 1992, **16**(9):769)
- 2 BES Collaboration (BAI J Z et al.) Nucl. Instrum. Meth., 2001, **A458**:627—637
- 3 LI C G. Postdoc Work Report; CHEN J C, SIMBES talk on BES'02
- 4 Hagiwara K et al. Phys. Rev., 2002, **D66**:010001
- 5 RONG C, MA J M, MAO H S et al. HEP & NP, 1996, **20**(7):577 (in Chinese)  
(荣刚, 马基茂, 毛慧顺等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(7):577)

## Performance Study of $p, \bar{p}$ in BES II Detector

Ji Xiao-Bin<sup>1)</sup> SHEN Xiao-Yan

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** Based on the Monte Carlo simulation and  $J/\psi$  data of BES II, the performance of  $p$  and  $\bar{p}$  in BES detector is studied, which includes the criteria for removing the secondary charged tracks and fake photons produced by the annihilation of  $p$  with the materials, the energy loss and deposited energy of  $p$  and  $\bar{p}$  in BSC, as well as the minimum  $p$  and  $\bar{p}$  momentum which can be reconstructed correctly. The combined TOF and  $dE/dx$  information is suggested to be used for  $p$  and  $\bar{p}$  identification.

**Key words** BES, proton, anti-proton

Received 20 May 2003, Revised 2 July 2003

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480) and Major Subjects of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)

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