

北京谱仪(BES II)的飞行计数器(TOF)时间和分辨率的修正

彭海平^{1,2} 沈肖雁² 李海波² 张子平¹ 陈宏芳¹ 叶树伟¹

1 (中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 随着北京谱仪上 5800 万 J/ψ 数据的获取,为了获得较好的物理结果,必须有很好的粒子鉴别. 鉴于北京谱仪 II 飞行时间计数器(TOF)对粒子鉴别的特殊性,有必要对飞行时间计数器的时间测量和分辨率进行研究. 本文利用北京谱仪 II 已获取的 5800 万 J/ψ 数据,对飞行时间计数器的时间和分辨率进行修正,最后给出修正结果以及修正后的鉴别效率.

关键词 北京谱仪 飞行时间计数器 时间系统偏离 分辨率

1 引言

北京谱仪 II 是北京正负电子对撞机上的通用磁谱仪,其桶部 TOF 系统由 48 个闪烁计数器组成^[1]. 通过测量由 e^+e^- 对撞产生的粒子到达闪烁计数器的飞行时间来鉴别粒子的种类. 图 1 为一条径迹打到 TOF 的示意图,其中 θ 为径迹的极角. 利用主漂移室(MDC)和飞行计数器(TOF)的信息,以及运动学公式:

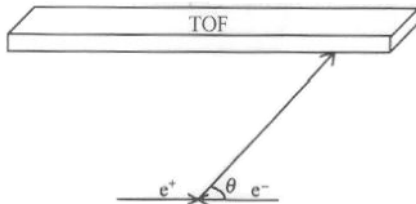


图 1 径迹打到 TOF 的示意图

$$T_{exp}^i = \frac{L \sqrt{P_i^2 + m_i^2}}{0.3 P_i}, \quad (1)$$

我们可以得到质量为 m_i 的粒子 i 预期的飞行时间值 T_{exp}^i . 其中 P_i 是粒子的动量, L 是粒子从顶点到 TOF 飞行的距离. 同时可以得到各粒子的相应的 χ_i :

$$\chi_i = \frac{T_{mea} - T_{exp}^i}{\sigma_i} \quad (2)$$

这里 T_{mea} 是测量时间, σ_i 是粒子 i 的分辨率. 具有最小的 χ_i^2 的粒子 i 被认为是正确的粒

2001-12-14 收稿

* 国家自然科学基金(19975044, 19991480)和中国科学院重大及特别支持项目(KJ95T-03)资助

子识别.改进后的飞行时间计数器对于电子的分辨率大约是 180ps,其相对于北京谱仪 I 330ps 有了很大的改进,利用 TOF 进行粒子鉴别具有很大的优越性.

利用 χ_i 的定义以及概率统计的观点^[2],被正确测定的粒子 i 的 χ_i 应当服从标准的正态分布,但是实验上实际强子的 χ 并不是一个标准的正态分布(图 2),中心值发生了偏移,这意味着时间测量有系统偏差.造成这个问题的原因是:即使在事例重建时对测量的时间作了 10 项校正^[3],由于刻度是利用 Bhabha 事例进行的,对于电子,其 χ 是很好的正态分布,但是由于在 TOF 中强子和电子行为有很大的差别,造成了强子 χ 中心值的偏离.同时 TOF 的时间分辨率依赖于击中的闪烁体计数器以及粒子飞行方向与 z 轴方向的夹角 θ ;分辨率还可能依赖于粒子的动量.这些问题会降低粒子的鉴别效率,最重要的是会加大真实数据与蒙特卡罗数据的差异,而产生很大的系统误差.所以有必要对 TOF 的时间和分辨率进行修正.

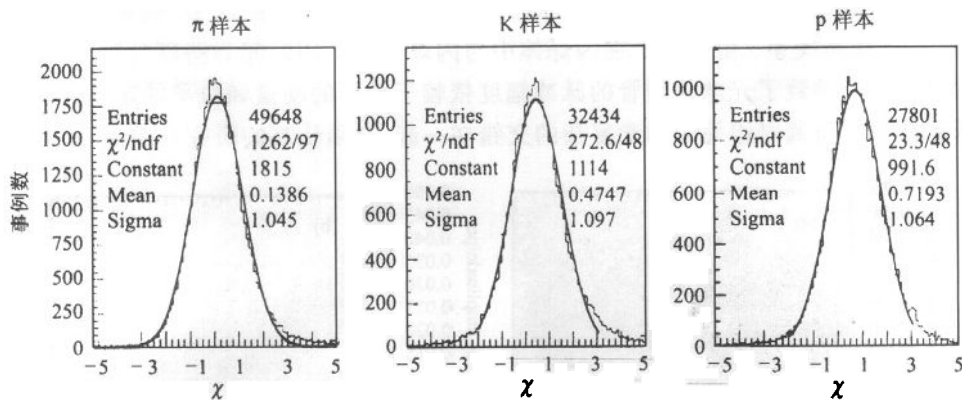


图 2 修正前 χ 的分布

2 样本选择

为了能够较好地研究 TOF,必须尽可能选择一个比较纯净的样本.因为我们的目的是要利用样本来研究 TOF,所以在选择样本时不能利用 TOF 的信息,而利用 dE/dX 信息来作粒子鉴别,通过运动学拟合来选择样本.同时样本最好来自一个共振态的衰变.通过 $J/\psi \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 衰变道来选择 π 样本,通过衰变道 $J/\psi \rightarrow K^{*+} K^- \rightarrow K^+ K^+ \pi^0$ 和 $J/\psi \rightarrow \phi\pi\pi \rightarrow KK\pi\pi$ 来选择 K 样本.而通过衰变道 $J/\psi \rightarrow \pi^0 p \bar{p}$ 来选择 p 样本.

3 时间修正

我们已经知道 χ 不是一个标准的正态分布,其中心发生了偏移,这意味着测量时间有系统误差,有必要对时间进行修正.定义 $\Delta T = T_{\text{mea}} - T_{\text{exp}}$ 为时间系统偏差.

在时间系统偏差的研究中,我们看到了时间系统偏差依赖于光电倍增管的脉冲幅度,

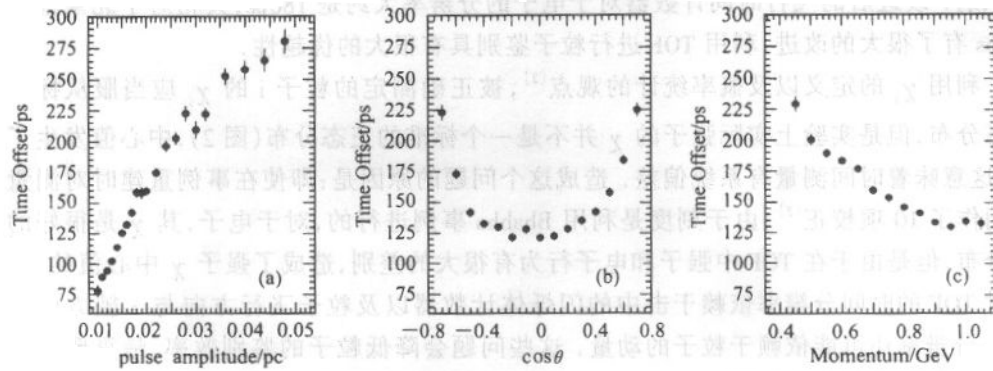


图 3 修正前质子的时间偏离与光电倍增管的脉冲幅度, 动量和运动方向的关系

粒子的动量和粒子的运动方向. 图 3 为质子的时间偏离与脉冲幅度 Q , 动量 p , 粒子的运动方向 $\cos\theta$ 依赖关系. 由于粒子在闪烁体中与闪烁体的作用时间和路程与粒子的动量和运动方向有关, 导致了光电倍增管的脉冲幅度依赖于粒子的动量和粒子的运动方向 (如图 4), 所有的与时间偏离相关的因素复杂的交错在一起, 必须认真的研究其关系.

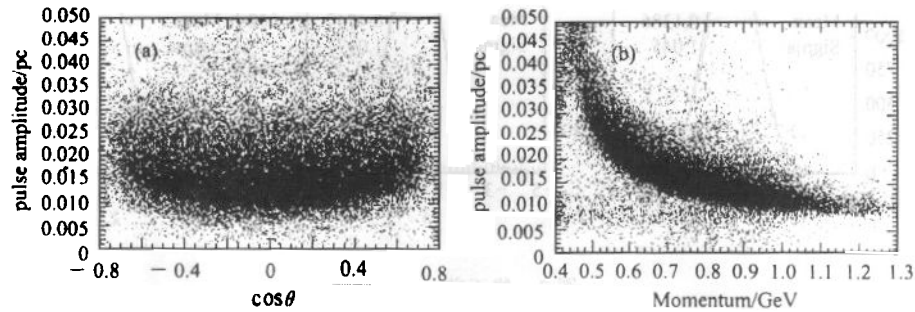


图 4 脉冲幅度随 $\cos\theta$ 和动量的变化

为了研究时间偏离与光电倍增管的脉冲幅度, 动量和运动方向的依赖性的相对大小, 首先可以在很小范围的脉冲幅度下研究时间系统偏离随粒子的动量和运动方向的变化, 从图 5 可以看到在很小的脉冲幅度范围内, 时间系统偏离随粒子的动量和运动方向的变化很小, 并且时间系统偏离对动量的依赖比对 $\cos\theta$ 的依赖性大. 同时看到当脉冲幅度在全范围时和脉冲幅度在小范围时的时间系统偏离随动量的变化趋势完全不一样. 这说明了时间系统偏离对脉冲幅度的依赖性远远大于对动量的依赖, 以至于当脉冲幅度在全范围时时间系统偏离对动量的依赖被对脉冲幅度的依赖性所覆盖. 其次可以比较当 $|\cos\theta|$ 大于 0.3 和 $|\cos\theta|$ 小于 0.3 时时间系统偏离随动量和脉冲幅度的变化. 图 5(a) 显示了当脉冲幅度在 0.0125—0.0175 范围内时, 不同的 $|\cos\theta|$ 区间内系统偏离随动量的变化; 图 6(b) 显示了在不同的 $|\cos\theta|$ 区间内时间系统偏离随脉冲幅度的变化, 从图中可以看到当 $|\cos\theta|$ 大于 0.3 和 $|\cos\theta|$ 小于 0.3 的不同区间内时间系统偏离随动量和脉冲幅度的变化没有太大的区别.

从上面的分析中可以看出时间系统偏离对脉冲幅度的依赖性最大, 其次是对动量的

依赖,对 $\cos\theta$ 的依赖最小. 造成时间系统偏离对脉冲幅度的依赖性的原因是不同脉冲幅度过甄别阈时间不同. 而不同粒子在闪烁体中发光的衰减时间不一样,使得不同粒子在光电倍增管中的脉冲的上升沿不一样. 就导致了在数据的刻度过程中,我们试图利用 Bhabha 事例作刻度而代替对各其他的粒子特别是强子的时间修正是不太准确的,在 TOF 的修正过程中对脉冲幅度的修正量是最主要的. 所以在时间系统偏离的修正中,首先对脉冲幅度作修正,再对动量作修正,最后对 $\cos\theta$ 作修正.

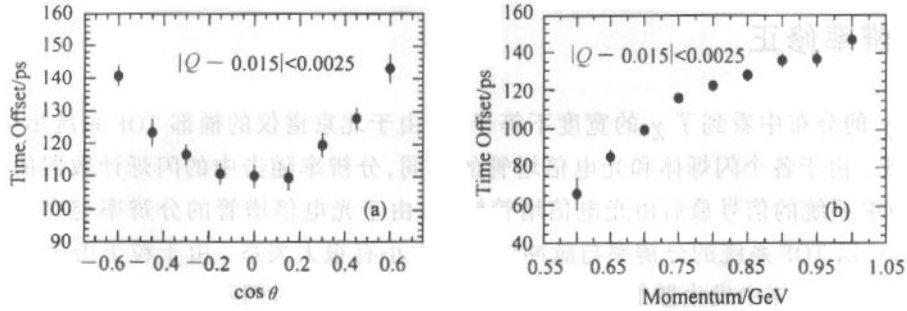


图 5 脉冲幅度在小范围内时间系统偏离随 $\cos\theta$ 和动量变化

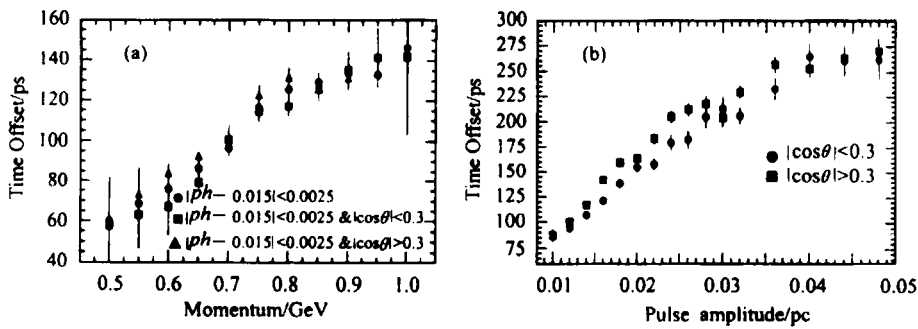


图 6 脉冲幅度在小范围内时间系统偏离随动量和脉冲幅度的变化

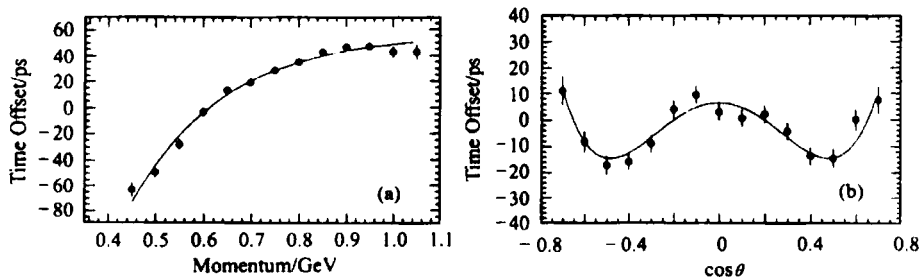


图 7 时间系统偏离随动量和 $\cos\theta$ 的变化

我们首先利用公式 $\Delta T1 = A + B \cdot \exp(c \cdot Q)$ 拟合图 3 中的第一个图,得到时间系统偏离与脉冲幅度的关系,其次可以定义 $\Delta T2 = T_{mea} - T_{exp} - \Delta T1$,得到 $\Delta T2$ 与动量 P 依赖关

系(图 7(a)),再用公式 $\Delta T2 = A + B \cdot \exp(c \cdot P)$ 拟合 $\Delta T2$ 与动量 p , 得到时间偏离对动量依赖的修正量. 最后定义 $\Delta T3 = T_{mea} - T_{exp} - \Delta T1 - \Delta T2$, 得到 $\Delta T3$ 与 $\cos\theta$ 依赖关系(图 7(b)), 利用公式 $\Delta T3 = A + B \cdot \cos^2\theta + C \cdot \cos^4\theta$ 来拟合 $\Delta T3$ 与 $\cos\theta$ 的关系. 最后对时间总的修正是 $\Delta T = \Delta T1 + \Delta T2 + \Delta T3$, 同时从我们的研究中看到了不同种类强子的时间系统偏离对脉冲幅度, 动量和 $\cos\theta$ 的依赖性都不一样, 所以用同样的办法分别对各种不同的粒子分别作修正.

4 分辨率修正

从 χ 的分布中看到了 χ 的宽度不等于 1. 由于北京谱仪的桶部 TOF 系统由 48 块闪烁体组成. 由于各个闪烁体和光电倍增管的不同, 分辨率随击中的闪烁计数器的不同而不同. TOF 系统的信号最后由光电倍增管输出, 由于光电倍增管的分辨率与光电子的多少有关, 所以 TOF 系统的分辨率与脉冲信号的大小有很大关系. 由于粒子击中 TOF 后产生的光子在闪烁体中发生散射, 使得光子传到光电倍增管时间不同而引起分辨率的不同, 所以 TOF 系统的分辨率与粒子运动方向的极角 $\cos\theta$ 有关. 同时由于粒子在主漂中的散射和粒子运动路径的不确定等因素, 使得分辨率可能与粒子的动量有关. 与研究 TOF 的系统时间偏离一样, 由于光电倍增管的脉冲幅度与粒子的动量和极角 $\cos\theta$ 有关, 所以要认真的研究分辨率与脉冲幅度, $\cos\theta$, 动量依赖性的相对大小关系.

为了获得 TOF 的分辨率, 首先定义 $\Delta T = T_{mea} - T_{exp} - \Delta T'$, 其中 T_{mea} 与 T_{exp} 的定义与前面一样, $\Delta T'$ 是对时间系统偏离总的修正量, 按照定义 ΔT 应该服从高斯分布, 用高斯函数拟合 ΔT , 其宽度为 TOF 的分辨率. 图 8 显示了分辨率随脉冲幅度, $\cos\theta$, 动量和各块闪烁体的变化.

从图 8 中可以看到, TOF 的时间分辨率依赖于脉冲幅度, $\cos\theta$ 和各块闪烁体, 而基本上不依赖于粒子的动量. 由于脉冲幅度依赖于 $\cos\theta$, 所以要认真地研究分辨率与脉冲幅度和 $\cos\theta$ 依赖性的相对大小. 利用电子样本在很小的脉冲幅度范围内研究分辨率与 $\cos\theta$ 的关系以及在很小的 $\cos\theta$ 范围内研究分辨率与脉冲幅度的关系. 图 9(a) 显示了在不同的脉冲幅度范围内分辨率随 $\cos\theta$ 的变化, 图 9(b) 显示了在不同的 $\cos\theta$ 范围内分辨率随脉冲幅度的变化, 由此可以看到在不同的 $\cos\theta$ 范围内, 分辨率随脉冲幅度的变化没有很大的改变, 同时分辨率对脉冲幅度的依赖性比对 $\cos\theta$ 的依赖性大得多.

综上所述, 我们得到 TOF 的分辨率依赖于脉冲幅度, $\cos\theta$ 和闪烁体的块数, 而不依赖于动量; 同时分辨率对脉冲幅度的依赖比对 $\cos\theta$ 的依赖性大. 所以在作分辨率的修正过程中可以先把分辨率作为脉冲幅度的函数得到分辨率的大小, 再对分辨率作 $\cos\theta$ 和闪烁体的块数的修正, 不对分辨率作动量修正. 首先利用公式 $\sigma_q = A + B \cdot \exp(-c \cdot Q)$ 拟合图 8 中的(a)图, 得到了分辨率为脉冲幅度的函数, 其次定义 $\chi_{\cos\theta} = \frac{T_{mea} - T_{exp} - \Delta T}{\sigma_q}$, 同时可以得到 $\chi_{\cos\theta}$ 的宽度随 $\cos\theta$ 的分布(图 10(a)), 利用公式 $F_{\cos\theta} = D + E \cdot \cos^2\theta$ 拟合图 10(a) 得到分辨率的 $\cos\theta$ 修正因子 $F_{\cos\theta}$, 则经 $\cos\theta$ 修正后分辨率为 $\sigma_{\cos\theta} = (A + B \cdot \exp(-c \cdot Q))$

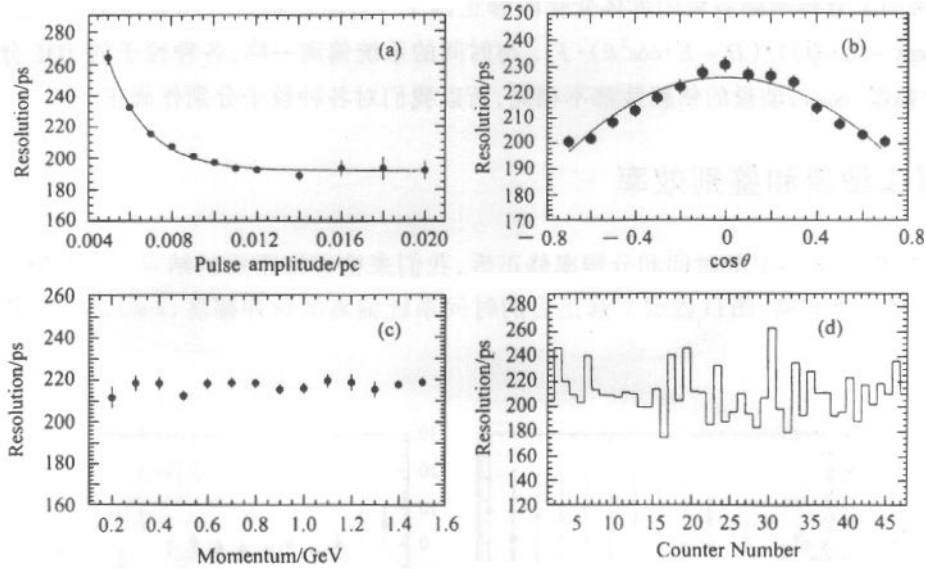


图 8 TOF 的时间分辨率随脉冲幅度, $\cos\theta$, 动量和各块闪烁体的变化

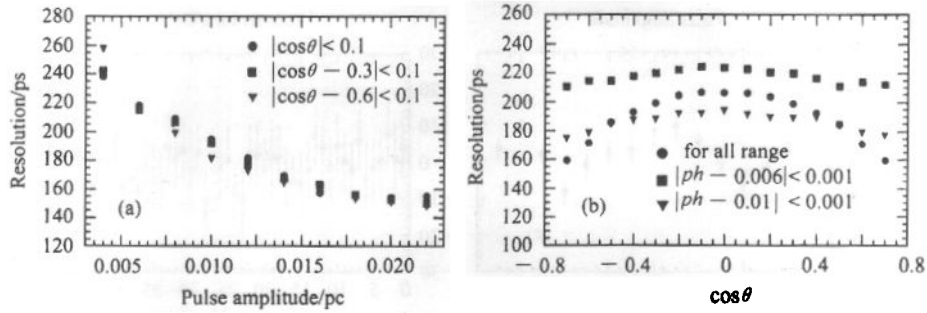


图 9 TOF 的时间分辨率随脉冲幅度, $\cos\theta$ 的变化

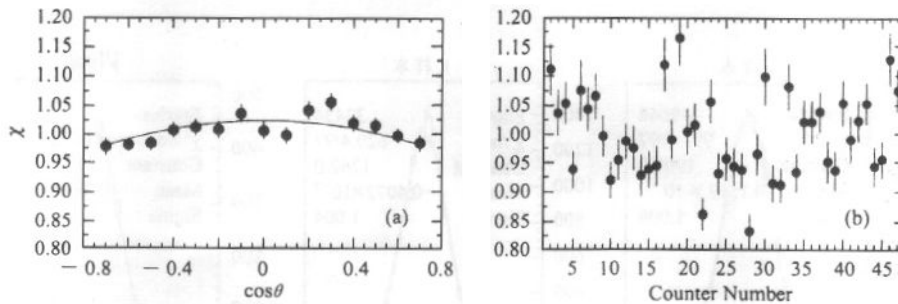


图 10 χ 的宽度随 $\cos\theta$ 和各块闪烁体的变化

• $F_{\cos\theta}$. 最后可以定义 $\chi_{\text{count}} = \frac{T_{\text{mea}} - T_{\text{exp}} - \Delta T}{\sigma_{\cos\theta}}$, 得到 χ_{count} 的宽度随各块闪烁体的变化(图 10

(b), 得到了分辨率随各块闪烁体变化的修正因子 F_i , 经过修正后的分辨率为 $\sigma_{\cos\theta} = (A + B \cdot \exp(-C \cdot Q)) \cdot (D + E \cdot \cos^2\theta) \cdot F_i$. 与时间的系统偏离一样, 各种粒子的 TOF 分辨率对脉冲幅度, $\cos\theta$, 动量的依赖性都不相同, 所以我们对各种粒子分别作修正.

5 修正结果和鉴别效率

在完成了对 TOF 的时间和分辨率修正后, 我们来检查修正后的结果. 首先检查修正后的时间系统偏离. 图 11 显示了修正后的时间系统偏离随脉冲幅度, $\cos\theta$, 动量, 各闪烁

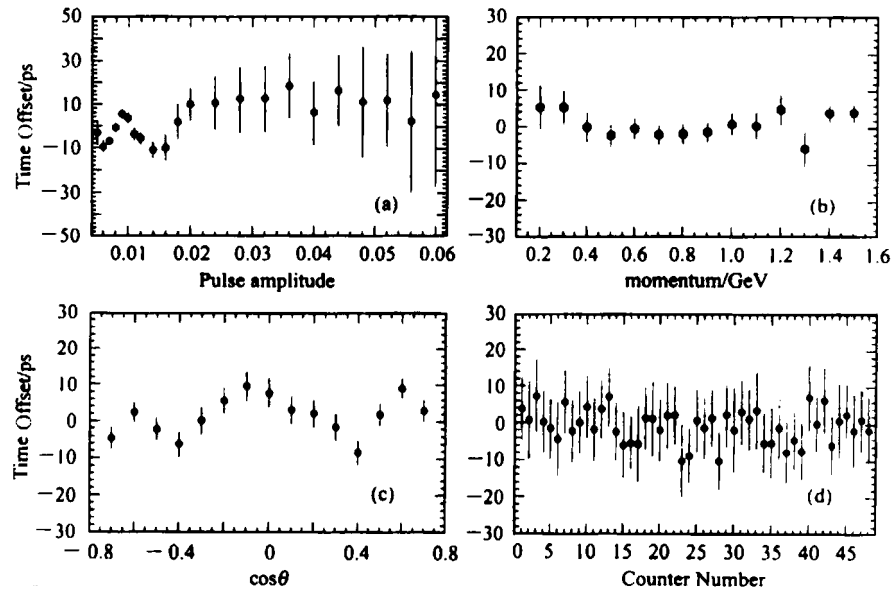


图 11 修正后时间系统偏离分布随脉冲幅度, 动量, $\cos\theta$ 和闪烁体块数的变化

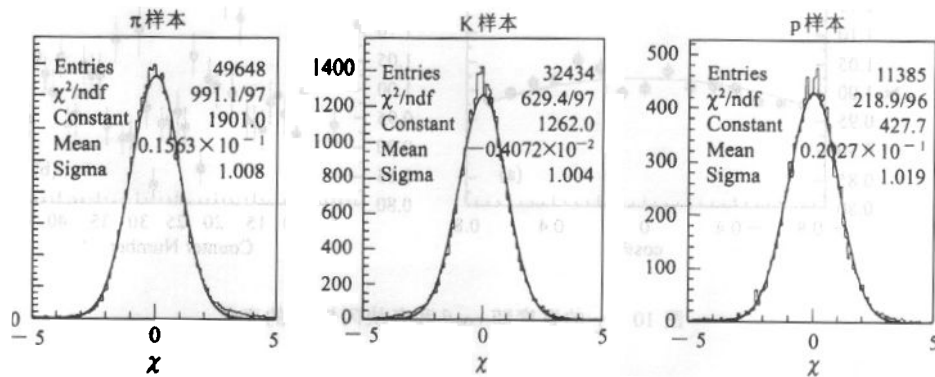


图 12 强子修正后 χ 的分布

体的分布,看到了修正后的时间系统偏离接近 0. 其次重新定义 $\chi = \frac{T_{\text{mea}} - T_{\text{exp}} - \Delta T}{\sigma}$, 其中 ΔT 是时间的修正量, σ 是修正后的分辨率,看到了 χ 是一个很好的正态分布(图 12), 同时检查 χ 随动量, 脉冲幅度和 $\cos\theta$ 以及各个闪烁体的分布, 看到其基本上是一个标准的正态分布. 第三, 用修正后的 TOF 信息进行粒子鉴别. 图 13(a) 显示了 π 的鉴别效率在修正前后的比较, 看到了在修正后鉴别效率有所提高, 图 13(b) 显示了 π 和 K 修正后的鉴别效率. 可以看到 TOF 在粒子动量小于 1.0 GeV 对 π/K 的鉴别效率大于 85%. 最后我们还把修正后的 TOF 信息作为粒子鉴别运用到 $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \omega k^+k^-$ 的事例判选中看到了共振峰 ϕ 和 ω 的事例有所提高.

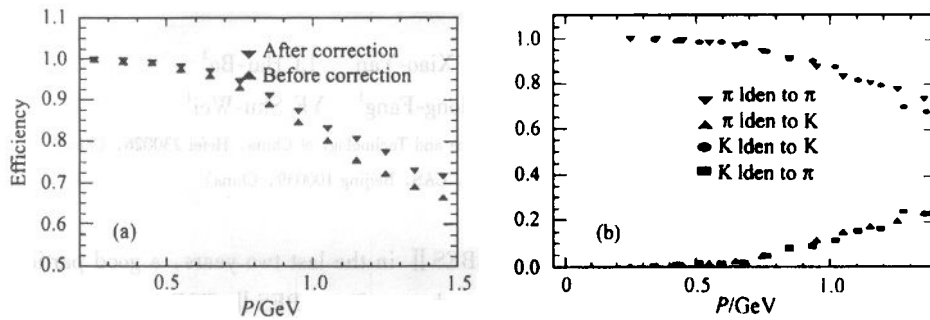


图 13 修正前后 π 的鉴别效率和修正后的 K/ π 的鉴别效率

6 结论

由于不同的粒子在 TOF 中的行为不同, 而这些不同的行为在数据的刻度与重建过程并不能很好地作修正, 导致了测量时间有系统偏离. 同时由于分辨率会依赖于各种物理量, 这种依赖性在数据的重建过程中也不能很好的体现, 所以有必要对 TOF 的测量时间和分辨率作修正. 在经过仔细研究之后, 我们看到了时间的系统偏离主要依赖于脉冲幅度, 其次依赖于动量, 而对 $\cos\theta$ 的依赖性最小. 所以对于时间的系统偏离, 先作脉冲幅度的修正, 再作动量的修正, 最后作 $\cos\theta$ 修正; 对于 TOF 的时间分辨率, 却主要依赖于脉冲幅度, 所以先把分辨率作为脉冲幅度的函数而得到分辨率, 再对分辨率作 $\cos\theta$ 和各块闪烁体的修正. 在完成了对时间和分辨率修正后, 看到了时间偏离接近于 0, 同时 χ 是一个很好的正态分布, 并且修正后鉴别效率有所提高. 最重要的是可以用同样的方法对蒙特卡罗数据做修正, 这样可以减少真实数据与蒙特卡罗数据之间的差异, 从而减小物理分析中的系统误差, 而且这种方法还可以推广应用到对主漂移室 dE/dX 信息的修正.

作者感谢吕军光, 张长春, 毛泽普研究员的有益建议和讨论, 感谢 J/ψ 组全体老师和学生的帮助, 感谢电子学室, 加速器中心和运行车间全体人员在 J/ψ 取数期间的大力协作和支持.

参考文献 (References)

- 1 BAI Jing-Zhi et al (BES Collaboration). BES Upgrade, Nucl. Instr. Meth., 2001, **A458**:627—637
- 2 ZHU Yong-Sheng et al. Probability and Statistics in Experimental Physics. Beijing: Science publisher, 1991 (in Chinese)
(朱永生等. 实验物理中的概率与统计. 北京: 科学出版社, 1991)
- 3 RONG Gang et al. HEP & NP, 2001, **25**:154—159(in Chinese)
(荣刚等, 高能物理与核物理 2001, **25**:154—159)

Corrections to BES II TOF Time and Its Resolution

PENG Hai-Ping^{1,2} SHEN Xiao-Yan² LI Hai-Bo²
ZHANG Zi-Ping¹ CHEN Hong-Fang¹ YE Shu-Wei¹

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

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

Abstract With the 58 million J/ψ data taken at BES II in the last two years, a good particle identification (PID) becomes more important in data analyses. Since BES II TOF is an important subsystem for PID, it is necessary to study TOF time and its resolution in detail. Using the 58 million J/ψ data we have studied the corrections for TOF time offset and its resolution, and finally given out the correction result and PID efficiency.

Key words BES II, TOF, offset, time resolution

Received 14 December 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19975044, 19991480) and The Chinese Academy of Science (KJ95T-03)