

# 利用 TOF 的 $Q$ 值进行粒子鉴别的研究\*

刘芳<sup>1,2;1)</sup> 何康林<sup>2;2)</sup> 孙胜森<sup>2</sup> 杨帆<sup>2</sup> 郑志鹏<sup>2</sup> 李金<sup>2;3)</sup>

1 (中国科技大学近代物理系 合肥 230026)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 飞行时间计数器(TOF)是北京谱仪(BES II)中用于粒子鉴别的重要子探测器.当带电粒子击中 TOF 时,闪烁计数器同时测量粒子的飞行时间  $T$  和脉冲幅度  $Q$ .本文利用 BES II 采集的双  $\mu$  事例,对脉冲幅度  $Q$  进行了研究.利用  $J/\psi$  强子事例样本,给出了脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  随粒子  $\beta\gamma$  值的变化关系.这表明可以利用 TOF 测量的脉冲幅度  $Q$  值实现对粒子的鉴别.最后给出用脉冲幅度  $Q$  进行粒子鉴别的效率和误判率.

**关键词** 飞行时间计数器 脉冲幅度 粒子鉴别 衰减长度

## 1 引言

北京谱仪(BES)<sup>[1,2]</sup>是运行在北京正负电子对撞机(BEPC)上的一台大型通用磁谱仪,由顶点探测器(VC),主漂移室(MDC),飞行时间计数器(TOF),簇射计数器(SC), $\mu$ 计数器,亮度监测器以及磁铁,电子学系统,触发判选系统和在线数据采集系统等部分组成.其中,飞行时间计数器是重要的子探测器,通过测量由  $e^+e^-$  对撞产生的带电粒子到达 TOF 的时间,联合主漂移室测量的粒子的动量<sup>[3]</sup>来鉴别粒子的种类.

桶部 TOF 系统由 48 块闪烁计数器组成,闪烁计数器主要由 5cm 厚的 BC-408 有机塑料闪烁体<sup>[4]</sup>、光导、光电倍增管和电子学线路 4 部分组成.当带电粒子打在闪烁体上,使原子(分子)电离、激发,在退激过程中发光,光子经过闪烁体、光导,一部分到达光电倍增管的光阴极打出光电子,再经过光电倍增管放大,产生一个脉冲信号,称之为脉冲幅度  $Q$ .当带电粒子击中 TOF 时,闪烁计数器同时测量脉冲幅度

$Q$ (表征带电粒子穿过闪烁体的能量损失)和粒子从对撞顶点飞行到 TOF 击中点的时间  $T$ .

本文首先用双  $\mu$  事例样本对 TOF 测量的粒子的脉冲幅度  $Q$  进行了研究.然后利用  $J/\psi$  事例的强子样本对脉冲幅度与粒子的动量,脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  与粒子的  $\beta\gamma$  的关系进行了分析.研究表明脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  只依赖于粒子的  $\beta\gamma$  值.因此除了利用 TOF 测量的飞行时间  $T$  进行粒子鉴别之外,脉冲幅度  $Q$  信息也可以用来做粒子鉴别,并对该鉴别方法做了检验.

## 2 脉冲幅度 $Q$ 的研究

闪烁计数器的光输出与入射粒子在闪烁体中的能量损失有一定关系. Birks 等人<sup>[5]</sup>在研究有机闪烁体中光输出比率  $\frac{dL}{dx}$  与入射粒子在闪烁体中的比能损失  $\frac{dE}{dx}$  ( $L$  为光输出,  $E$  为能量,  $x$  为在闪烁体中的穿行距离)的关系后,认为能量响应是非线性的.这

2004-12-06 收稿

\* 国家自然科学基金(19991480, 90103002)和中国科学院知识创新工程项目(U-602)资助

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

2) E-mail: hekl@mail.ihep.ac.cn

3) E-mail: lij@mail.ihep.ac.cn

是由于猝灭过程引起的,并据此提出了一个半经验公式:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + KB \frac{dE}{dx}}, \quad (1)$$

其中  $A, B$  为常数,  $B \frac{dE}{dx}$  表示单位距离的猝灭中心密度,  $K$  是猝灭参数. 当猝灭中心密度很小时,  $KB \frac{dE}{dx} \ll 1$ , 式(1)就变为

$$\frac{dL}{dx} \cong A \frac{dE}{dx}, \quad (2)$$

即光输出比率  $\frac{dL}{dx}$  近似与  $\frac{dE}{dx}$  成正比. BES II 的 TOF 使用的是猝灭中心密度很小的有机塑料闪烁体, 光输出近似与能损成正比. 应该可以用 Landau 函数来拟合脉冲幅度的分布.

如图 1 所示是用 Landua 分布函数对  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  衰变中产生的 1.55GeV 的双  $\mu$  样本在第一块闪烁计数器右端输出的脉冲幅度  $Q$  进行拟合. 可以看到脉冲幅度确实是很好地符合 Landua 分布函数, 并得到脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$ .

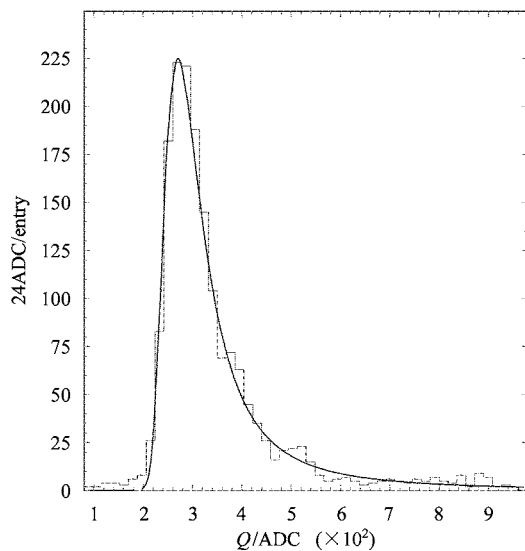


图 1 用 Landua 分布函数拟合 1.55GeV  $\mu$  子击中 TOF 所产生的脉冲幅度分布

组成 TOF 的闪烁体厚度为 5cm, 本文用粒子穿过闪烁体的中心位置  $z$  代替粒子击中桶部 TOF 表面的  $z$  向位置. 由于入射粒子击中 TOF 的  $z$  向位置的不同, 其入射角度也不一样, 导致入射粒子在闪烁体中穿行距离不同, 粒子在闪烁体内的能量损失也随之改变. 考虑这个因素的影响, 引入了  $\sin\theta$  的修正.

$$Q' = Q \times \sin\theta, \quad (3)$$

其中  $Q$  表示在这一点  $z$  以角度  $\theta$  入射的带电粒子在闪烁体内损失的能量(或闪烁计数器输出的脉冲幅度值),  $\theta$  是粒子入射方向与  $z$  向的夹角.  $Q'$  是在该粒子垂直入射的能量损失(或脉冲幅度). 图 2 给出了角度修正前后脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  随  $z$  的分布. 比较(a), (b)两图, 可以看出, 经过角度修正后, 脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  与入射粒子击中 TOF 的  $z$  向位置无关, 即修正后的脉冲幅度  $Q$  是一个与入射角度无关的物理量.

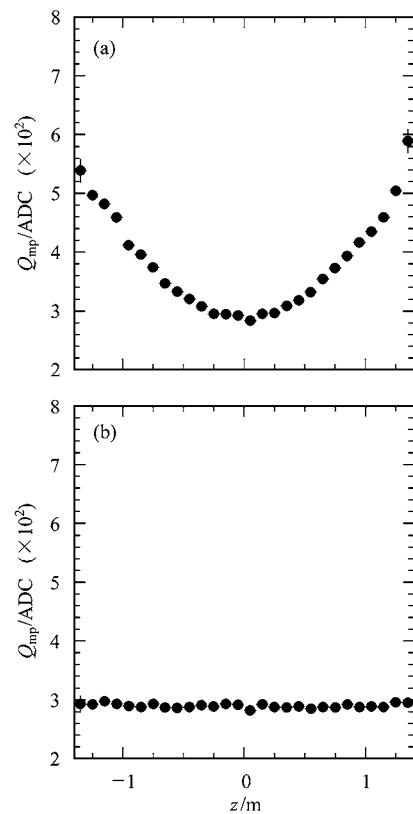


图 2 脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  随  $z$  的变化  
(a)为修正前;(b)为修正后.

闪烁计数器测量的脉冲幅度  $Q$  不仅与入射粒子穿过闪烁体的能量损失有关, 还与闪烁计数器的光能转换系数、传输系数、闪烁体的衰减长度、光导的光传输效率、光电倍增管的转换系数、倍增系数、电容以及电子学仪器的性能有关<sup>[6]</sup>. 其中, 闪烁体的衰减长度  $\lambda$  是描述光在闪烁体中传播能力的一个重要的物理量, 它与闪烁体的光学性能, 形状和表面特性有关. 当带电粒子击中某一块闪烁计数器时, 两端输出的脉冲幅度值  $Q_1$  和  $Q_2$  可以简单地写成如下形式:

$$Q_1 = A_1 \times \frac{Q_0}{\sin\theta} \times e^{-\frac{l-z}{\lambda}}, \quad (4)$$

$$Q_2 = A_2 \times \frac{Q_0}{\sin\theta} \times e^{-\frac{l/2+z}{\lambda}}, \quad (5)$$

其中  $A_1, A_2$  分别为闪烁体、两端的光导、光电倍增管和电子学线路除衰减长度外的其他性能的参数。 $Q_0$  表征粒子垂直入射 5cm 厚的闪烁体时输出的脉冲幅度。 $\sin\theta$  项是入射角度的修正。由式(4),(5),对  $Q_1$  和  $Q_2$  相除取对数有

$$\ln \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{2}{\lambda} \times z + \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (6)$$

由式(6)不难看出  $\ln \frac{Q_1}{Q_2}$  是  $z$  的一次函数。由选出的双  $\mu$  事例样本,分别得到 48 块闪烁计数器上  $\mu$  粒子的  $\ln \frac{Q_1}{Q_2}$  与  $z$  的分布,如图 3 是前 4 块闪烁计数器  $\ln \frac{Q_1}{Q_2}$  与  $z$  的分布。按照(6)式来进行拟合,分别得到各块闪烁体的衰减长度  $\lambda$  和比值  $\frac{A_1}{A_2}$  的数值。由于不同批次的数据可能会导致同一块闪烁体的  $\lambda$  值与  $\frac{A_1}{A_2}$

有所不同,因此,利用双  $\mu$  样本每 50 个 run 拟合一次,计算各块闪烁体的衰减长度  $\lambda$  和  $\frac{A_1}{A_2}$  的数值。

由闪烁体两端输出的  $Q_1$  和  $Q_2$  可以计算  $Q_{01}$  和  $Q_{02}$ :

$$Q_{01} = A_1 Q_0 = \frac{Q_1 \times \sin\theta}{e^{-\frac{l-z}{\lambda}}}, \quad (7)$$

$$Q_{02} = A_2 Q_0 = \frac{Q_2 \times \sin\theta}{e^{-\frac{l/2+z}{\lambda}}}. \quad (8)$$

由(7),(8)二式不难得到

$$Q_0 = \frac{1}{A_2} \times \frac{Q_{01} + Q_{02}}{1 + \frac{A_1}{A_2}}, \quad (9)$$

其中,脉冲幅度  $Q_0$  正比于垂直入射闪烁体的能量损失,并做了入射角度、闪烁体衰减长度等方面的校正。

式中的比值  $\frac{A_1}{A_2}$  由前面的双  $\mu$  事例得到。 $A_2$  是一归一参数。假设某一块计数器一端的  $A_2 = 1$  时,可以利用某一个闪烁计数器求出其余 47 个计数器的相应  $A_2$ 。

下面研究脉冲幅度  $Q_0$  与粒子  $\beta\gamma$  的关系。

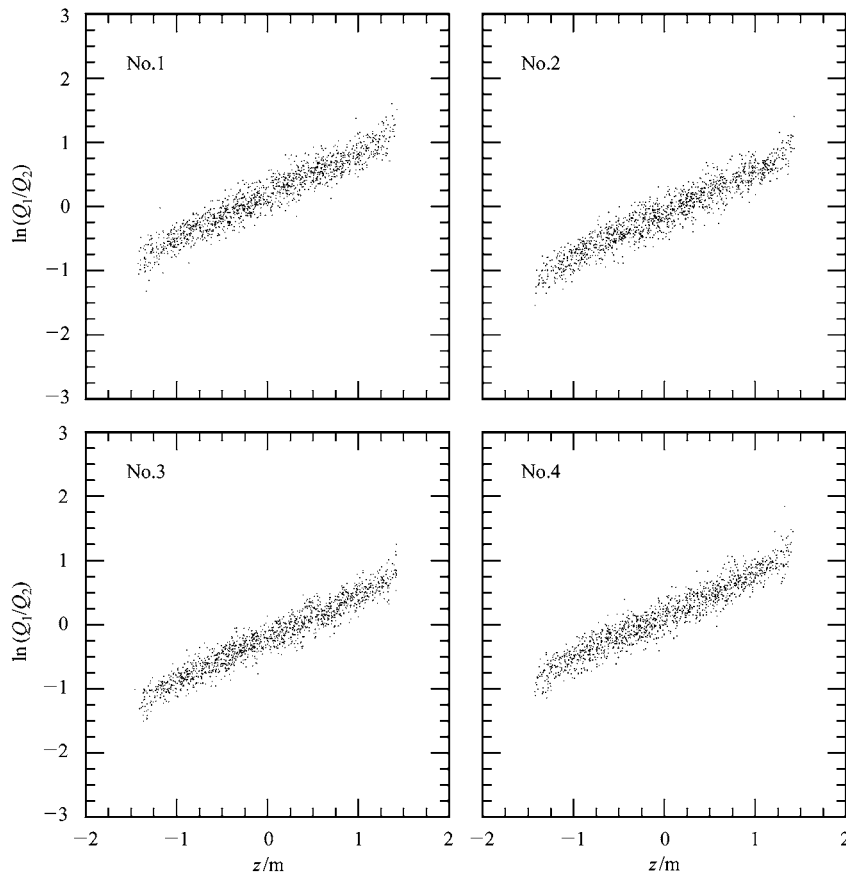


图 3 闪烁计数器中前 4 块  $\ln \frac{Q_1}{Q_2}$  与  $z$  的分布

### 3 脉冲幅度最可几值 $Q_{mp}$ 与粒子 $\beta\gamma$ 关系的研究

下面利用 BESII 在 1999—2000 获取的  $2.7 \times 10^7 J/\psi$  数据, 通过衰变道  $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ ,  $J/\psi \rightarrow \omega\pi\pi$ ,  $J/\psi \rightarrow K^* \bar{K}$ ,  $J/\psi \rightarrow \phi\eta$ ,  $J/\psi \rightarrow \phi\pi\pi$ ,  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0$  选择的  $\pi$ ,  $K$ ,  $p(\bar{p})$  强子样本对脉冲幅度  $Q$  进行研究. 在选择强子样本时, 没有使用 TOF 的信息, 只利用主漂移室的  $dE/dx$  信息进行粒子鉴别. 通过严格的运动学拟合和共振态的质量限制条件, 降低本底的污染, 提高样本纯度.

由  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  衰变的双  $\mu$  样本得到的参数可以计算所选取的强子事例的脉冲幅度  $Q_0$ . 图 4 是强子事例的脉冲幅度  $Q_0$  与动量  $p$  的散点图. 图中显示了各类强子的脉冲幅度  $Q_0$  分别集中在彼此分离的带中, 在动量较低的区域,  $\pi$ ,  $K$ ,  $p$  形成 3 条可以区分的带.

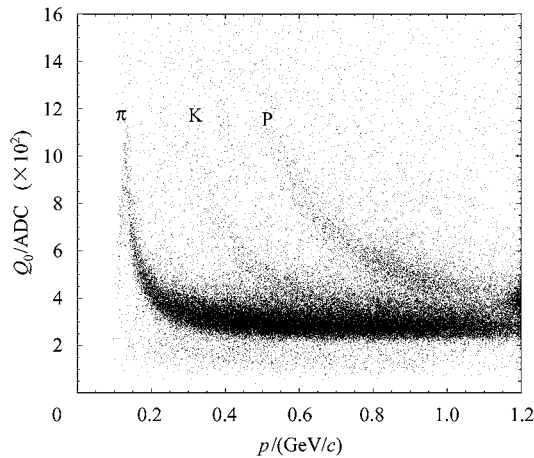


图 4 强子( $\pi, K, p$ )击中 TOF 的脉冲幅度  $Q_0$  和粒子动量的散点图

利用所选取的  $J/\psi$  强子样本(包括  $\pi, K, p$  带电粒子)来研究脉冲幅度  $Q_0$  的最可几值  $Q_{mp}$  与粒子的  $\beta\gamma$  的关系, 如图 5 所示, 不难看出对于不同种类的带电粒子, 脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  对  $\beta\gamma$  的依赖关系是相同的.

带电粒子通过单位长度的物质时, 最可几电离能损失由 Bethe-Block 公式<sup>[7]</sup>给出:

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right], \quad (10)$$

式中  $K = 4\pi N_A \gamma_e^2 m_e c^2$ ,  $N_A$  和  $\gamma_e$  分别是 Avogadro 常数和经典电子半径,  $Z, A$  分别是介质原子序数和原

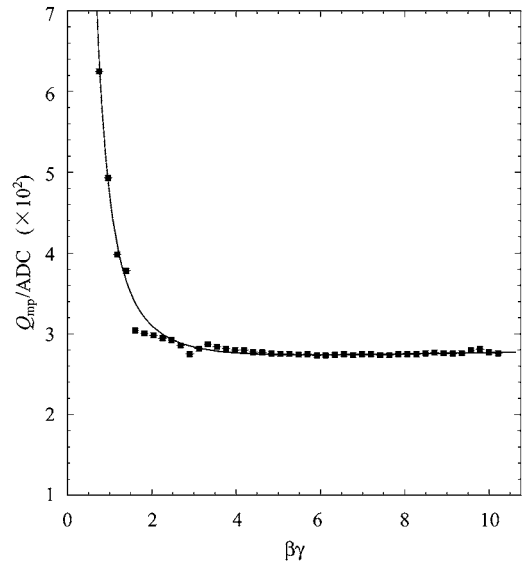


图 5 强子( $\pi, K, p$ )击中 TOF 的脉冲幅度  $Q_0$  的最可几值  $Q_{mp}$  随  $\beta\gamma$  的变化

子质量,  $z$  为入射粒子电荷数,  $m_e$  和  $I$  分别是电子静止质量和平均电离电位,  $\delta$  是由密度效应引入的修正项. 式(10)表明, 带电粒子通过介质的电离能损是其速度的函数. 由于闪烁计数器的光输出与能损成正比, 最可几值  $Q_{mp}$  可以简化用两个参数来表示的形式:

$$Q_{mp} = \frac{P_1}{\beta^2} \left( P_2 + \ln \beta^2 \gamma^2 - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right), \quad (11)$$

其中  $P_1, P_2$  是两个参数. 用式(11)对图 5 进行拟合, 得到两个参数的值,  $\chi^2/\text{DOF} = 1.37$ , 可见(11)式能较好的描述实验数据. 脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  与  $\beta\gamma$  的关系可以完全确定. 事实上, 强子在击中 TOF5cm 闪烁体后由于电离能损其动量会有所减少<sup>[7]</sup>, 式(11)中  $\beta\gamma$  是用粒子击中 TOF 界面前的数值, 因此, 式(11)可以看成是  $Q_{mp}$  的近似表达式.

### 4 粒子鉴别和检验结果

由上面的讨论可以知道, 具有相同动量的不同种类粒子的  $\beta\gamma$  值不同, 它们所对应的  $Q_{mp}$  值就不同, 相应的不同种类的粒子脉冲幅度  $Q_0$  的分布也不同, 由此可以实现粒子鉴别<sup>[4]</sup>. 下文对动量小于 1.2GeV 的强子进行了研究.

由前面的  $\pi, K, p$  样本, 分别得到不同动量区间内的脉冲幅度  $Q_0$  的 Landau 分布, 并进行归一化, 即分别得到了  $\pi, K, p$  几率函数  $P_j(Q_0, Q_{mp}, \xi)$ ,  $j = \pi, K, p$ . 图 6 所示为  $\pi$  样本动量在 0.5—0.6GeV 区间脉

冲幅度  $Q_0$  的几率函数,对于箭头所示某一脉冲幅度  $Q_0$ ,对应有一箭头所示概率  $P_\pi$ .对一条带电径迹  $i$ ,已知它的动量  $p$  和 TOF 测量的脉冲幅度  $Q_0$ ,根据上述几率函数  $P_j(Q_0, Q_{mp}, \xi)$  可以得到假定该径迹为  $\pi, K, p$  的概率  $P_\pi^i, P_K^i, P_p^i$ ,如果  $P_\pi^i > P_K^i$  且  $P_\pi^i > P_p^i$ ,则该粒子可判为  $\pi$ ;类似地可判为  $K$  或  $p$ .

图 7 是用脉冲幅度做粒子鉴别的检验,图中从左至右依次是为  $\pi, K, p$  的鉴别效率.由图 7 可以看出,随着粒子动量的降低, $\pi, K, p$  的鉴别效率逐渐提高,特别是动量小于  $0.75\text{GeV}$ ,对于  $\pi, K, p$  有良好的鉴别能力.由此可见,如果在物理研究中,与主漂移室的  $\frac{dE}{dx}$  的信息及 TOF 测量的时间信息联合起来对粒子进行鉴别,必然会提高北京谱仪的粒子鉴别能力.

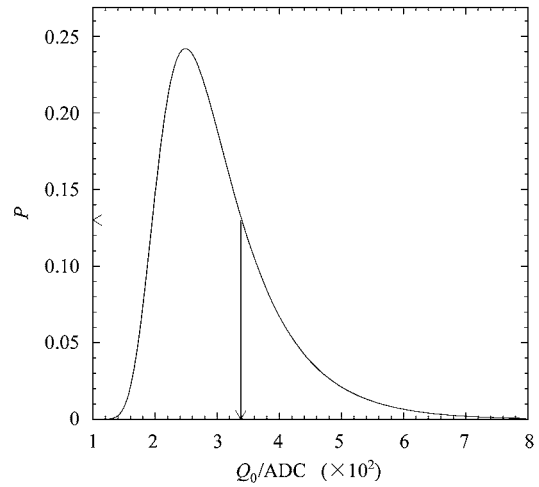


图 6  $\pi$  样本动量在  $0.5\text{--}0.6\text{GeV}$  区间脉冲幅度  $Q_0$  的几率函数

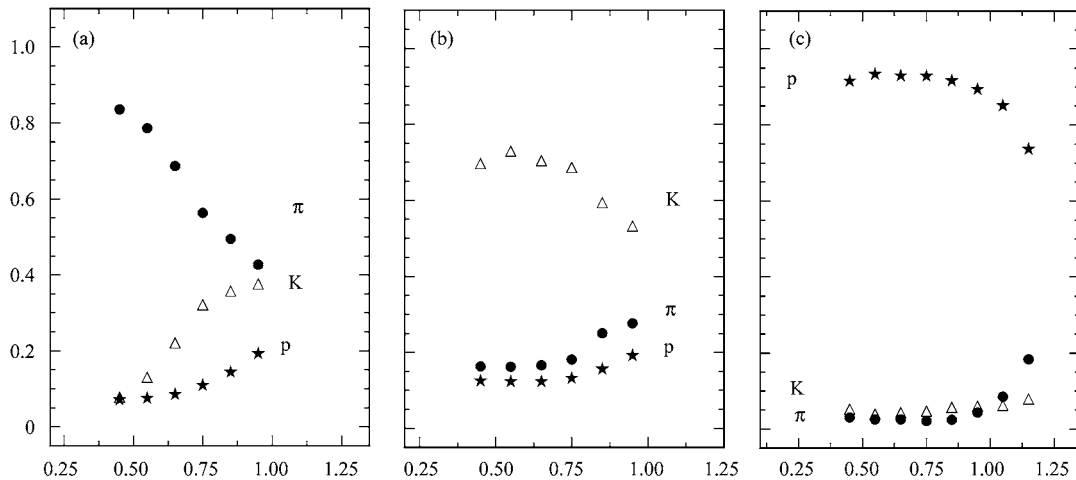


图 7 用脉冲幅度做粒子鉴别的检验

(a) 是  $\pi$  粒子被鉴别为  $\pi$  (●),  $K$  ( $\Delta$ ),  $p$  (★) 的鉴别效率; (b) 和 (c) 是  $K$  和  $p$  粒子的相应鉴别效率.

### 5 结论

本文对脉冲幅度随着入射角度的变化关系进行了修正.利用双  $\mu$  事例样本对各块闪烁体的衰减长度  $\lambda$  和闪烁体两端的性能参数的比值  $\frac{A_1}{A_2}$  进行了重新刻度.并利用 BES II 采集的  $J/\psi$  强子事例样本,对带电粒子的脉冲幅度  $Q_0$  进行了研究,发现经过角度修正以后,粒子的脉冲幅度只与粒子的  $\beta\gamma$  值相关,而与粒子的入射位置  $z$  (入射角度) 无关,并确定了带电粒子的脉冲幅度最可几值  $Q_{mp}$  与入射粒子的  $\beta\gamma$  值之间的关系.根据这一关系,可以实现用脉冲幅度  $Q$  进行粒子鉴别.文章最后给出了这种方法进

行粒子鉴别的效率和误判率.用桶部 TOF 系统输出的脉冲幅度进行粒子鉴别,表明 TOF 系统除了可以利用它的时间信息进行粒子鉴别外,脉冲幅度  $Q$  信息也可以用来做粒子鉴别,挖掘了北京谱仪硬件系统的固有潜力.此外,用脉冲幅度进行粒子鉴别,是一种独立于现有主漂移室的  $\frac{dE}{dx}$  和 TOF 鉴别粒子的方法.当把 3 种方法联合起来进行粒子鉴别时,必将有助于提高北京谱仪对粒子的鉴别能力.用脉冲幅度  $Q$  进行粒子鉴别的方法对有一定厚度的 TOF 都是适用的.

感谢电子学室、加速器中心和运行车间全体人员在 BES 取数期间的大力协作和支持.

## 参考文献 (References)

- 1 DING Hui-Liang et al (BES Collaboration). HEP & NP, 1992, **16**: 769 (in Chinese)  
(丁慧良等(北京谱仪合作组). 高能物理与核物理, 1992, **16**: 769)
- 2 BAI Jing-Zhi et al (BES Collaboration). Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A458**: 627
- 3 ZHENG Zhi-Peng, ZHU Yong-Sheng. Electron-Antielectron Physics of Beijing Spectrometer. Nanning: Guangxi Technology and Science Press, 1998 (in Chinese)
- 4 XIE Yi-Gang et al. Particle Detector and Data Acquisition. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)  
(谢一冈等主编. 粒子探测器与数据获取. 北京: 科学出版社, 2003)
- 5 Birks J B. Phys. Rev., 1951, **84**: 364
- 6 TANG Xiao-Wei. Experimental Methods of Particle Physics. Beijing: The Higher Education Press, 1982 (in Chinese)  
(唐孝威主编. 粒子物理实验方法. 北京: 高等教育出版社, 1982)
- 7 Particle Data Group. Phys. Lett., 2004, **B592**: 242

## Particle Identification with Pulse Amplitude of TOF Counter \*

LIU Fang<sup>1,2;1)</sup> HE Kang-Lin<sup>2;2)</sup> SUN Sheng-Sen<sup>2</sup> YANG Fan<sup>2</sup> ZHENG Zhi-Peng<sup>2</sup> LI Jin<sup>2;3)</sup>

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

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

**Abstract** Time of flight counter (TOF) is one of the main subdetectors of Beijing Spectrometer II (BES II) for identification of charge particles. Time of flight and pulse amplitude are measured from the time of flight counters, when the particle hits on the TOF. Based on Di-mu sample from BES II, the correction of pulse amplitude  $Q$  is studied. Using the hadron sample of  $J/\psi$ , the relation between the corrected Pulse amplitude and  $\beta\gamma$  value is analyzed. A conclusion is that it is feasible to use the pulse amplitude  $Q_0$  of TOF to identify the particles. Finally the particle identification and mis-identification rate are given when the pulse amplitude is used to identify the particles.

**Key words** time of flight counter, pulse amplitude, particle identification, attenuation length

Received 6 December 2004

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480, 90103002) and Knowledge Innovation Project of CAS (U-602)

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

2) E-mail: hekl@mail.ihep.ac.cn

3) E-mail: lij@mail.ihep.ac.cn