

BES III 端盖 TOF 时间分辨的束流测试

安少辉¹ 吴冲² 李昕¹ 陈宏芳¹ 衡月昆² 孙志嘉² 王贻芳² 李澄^{1;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 100049)

摘要 使用 800MeV 的电子束对 BES III 端盖飞行时间探测器 (TOF) 模块的性能进行测试. 研究了塑料闪烁体的包装材料、光电倍增管 (PMT) 的工作电压、电子束入射位置对单个 TOF 模块的本征时间分辨的影响, 并给出了测量时间与信号幅度和粒子击中位置的修正方法. 实验结果显示: 使用 Tyvek 纸包装, 闪烁体在安装 PMT 的一端有 45° 斜面, 电子击中在 TOF 模块不同位置其本征时间分辨在 70—90ps 范围内.

关键词 BES III 飞行时间谱仪 (TOF) 本征时间分辨 束流测试

1 引言

作为 BES III 探测器的重要部分之一的飞行时间谱仪 TOF (time of flight System) 其主要物理目标是在 1GeV/c 动量范围实现对 π/k 介子 2σ 分辨, 要求探测器本征时间分辨 $\leq 80\text{ps}$ ^[1]. 根据 BES III -TOF 设计方案, TOF 端盖部分由 2×48 个扇形塑料闪烁体探测器构成 (见图 1), 每个闪烁体 (型号: BC408) 模块

厚度为 50mm, 内半径为 410mm, 外半径为 890mm, 长 48cm, 采用抗磁场的 fine-mesh 光电倍增管 (型号: R5924), 工作在 1T 磁场下, 增益可达到 2.5×10^5 .

为了研究 TOF 闪烁体探测器模块的性能, 使用 800MeV 的实验电子束对该飞行时间探测器的性能进行测试. 通过改变塑料闪烁体的包装、形状、光电倍增管 (PMT) 的工作电压、电子束入射位置等实验条件对单个 TOF 模块的时间分辨进行研究, 为工程设计和 TOF 研制提供重要的数据.

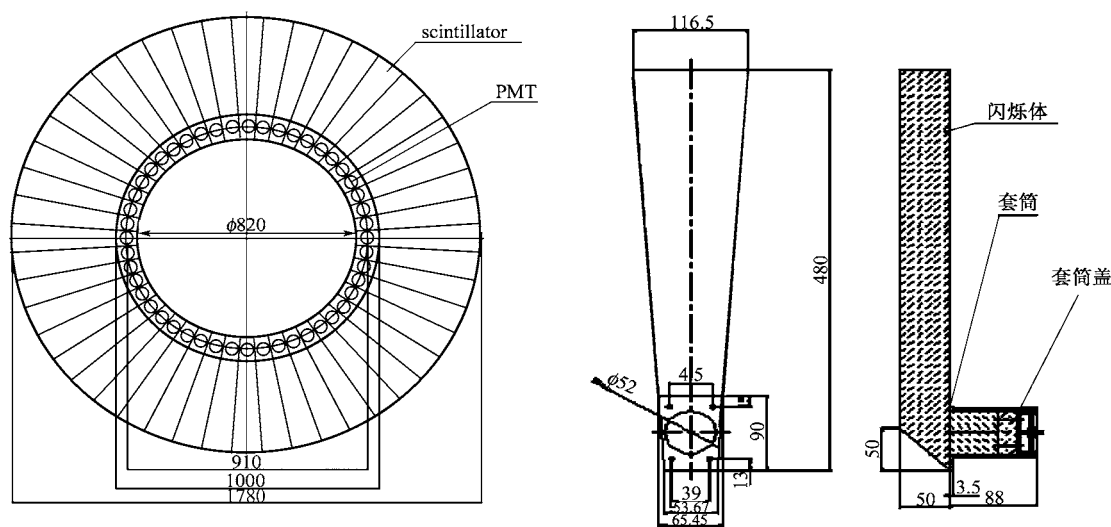


图 1 端盖 TOF 结构和单个模块闪烁体形状

2004-12-03 收稿, 2005-03-03 收修改稿

1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn

2 束流测试装置

图 2 是整个实验束测试系统示意图. 该实验束是中国科学院高能物理研究所为 BES III 探测器研制的一条专门的试验电子束^[2]. 经过直线加速器加速后的电子, 首先利用与靶的弹性散射来调整散射后电子束的强度. 经过磁场选择获得动量为 $800\text{MeV}/c$ 的电子束, 同时利用 Cherenkov 探测器对粒子种类进行选择. Cherenkov 探测器与闪烁探测器 S1 和 S2 组成望远镜系统, 并给出触发时间 (t_t) 信号作为 ADC 和 TDC 的门. 两个多丝正比室 MWPC1 和 MWPC2 相距 142cm , 可以提供入射电子的位置信息, 其位置分辨率约 0.5mm . 4 个面积为 $2\text{cm} \times 6\text{cm}$ (厚 0.5cm) 的闪烁体探测器 (T1, T2, T3, T4) 给出测量系统的起始参考时间 (T_0)^[3]. 待测 TOF 模块距离 T4 为 10cm . 为去除散射本底在 T1, T2 前增加了铅屏蔽.

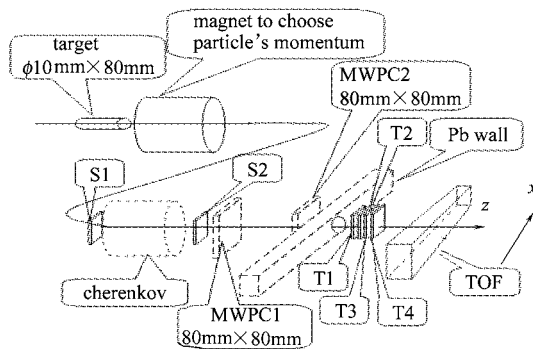


图 2 800MeV 实验束系统示意图

3 T_0 时间分辨的测量

为了测定 TOF 本征时间分辨, 首先需要确定测量系统的起始时间 (T_0) 的晃动. 当电子穿过测量系统, T1, T2 和 TOF 探测器给出的时间分别为 t_1, t_2 和 t . 相对于触发时间 t_t , 电子到达各个探测器的飞行时间分别为

$$T1 = t_1 - t_t, \quad T2 = t_2 - t_t, \quad T = t - t_t. \quad (1)$$

因此测量得到 TOF 的时间谱中包含了触发时间的统计涨落. 由关系 (1) 可以消除触发时间的统计涨落影响, 并得到以下关系式:

$$T - \frac{T1 + T2}{2} = t - \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (2)$$

根据误差传递公式, 进一步得到 TOF 本征时间分辨为

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{t - \frac{t_1 + t_2}{2}}^2 - \sigma_{\frac{T1 + T2}{2}}^2}, \quad (3)$$

式中 $\sigma_{\frac{T1 + T2}{2}}$ 是 T1, T2 两个闪烁体探测器总的时间晃动, 实际上表示起始时间 (T_0) 的时间分辨. 实验中加入闪烁体探测器 T3, T4 目的是为了测定 $\sigma_{\frac{T1 + T2}{2}}$. T1, T2, T3, T4 的摆放位置见图 3. 这样放置可以减小电子入射位置不同引起光子到达 PMT 时间的不同所带来的误差. 设 T3, T4 探测器给出的时间分别为 t_3, t_4 , 测量得到 $\frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{t_3 + t_4}{2}$ 时间晃动 (如图 4) $\sigma\left(\frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{t_3 + t_4}{2}\right) = \sqrt{\sigma_{\frac{T1 + T2}{2}}^2 + \sigma_{\frac{T3 + T4}{2}}^2} = 4.35\text{chn}$ (实验中用的 TDC 灵敏度为 24.7ps/chn). 因为 T1, T2 与 T3, T4 是完全相同的, 因此可以得到测量系统的起始时间分辨为

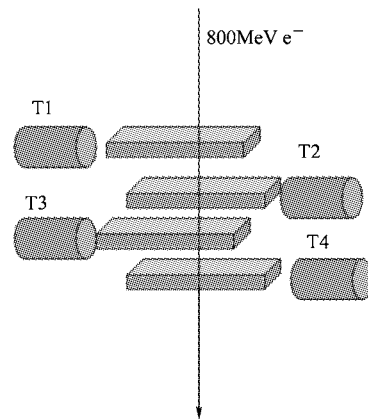


图 3 T1, T2, T3, T4 的放置方式

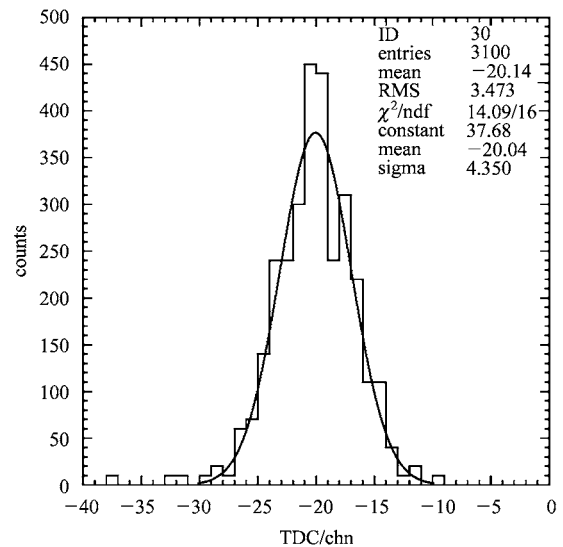


图 4 $\frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{t_3 + t_4}{2}$ 的谱形

$$\sigma_{T1+T2} = \sigma_{T3+T4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma \left(\frac{t_1+t_2}{2} - \frac{t_3+t_4}{2} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 4.35 \times 24.7 = 76\text{ps}.$$

4 T-A 和 T-P 修正

图 5 为 TOF 探测器测量得到的原始幅度谱和时间谱(其中信号幅度谱 200 道之前的突起是 ADC 的基线电平,对测量值无影响).由于在测量中使用的是前沿定时甄别器,信号幅度(A)涨落将引起定时时间(T)的晃动,并且电子击中 TOF 模块位置(P)不同将导致信号传输时间不同,因此需要对测量结果进行 T-A 和 T-P 修正.

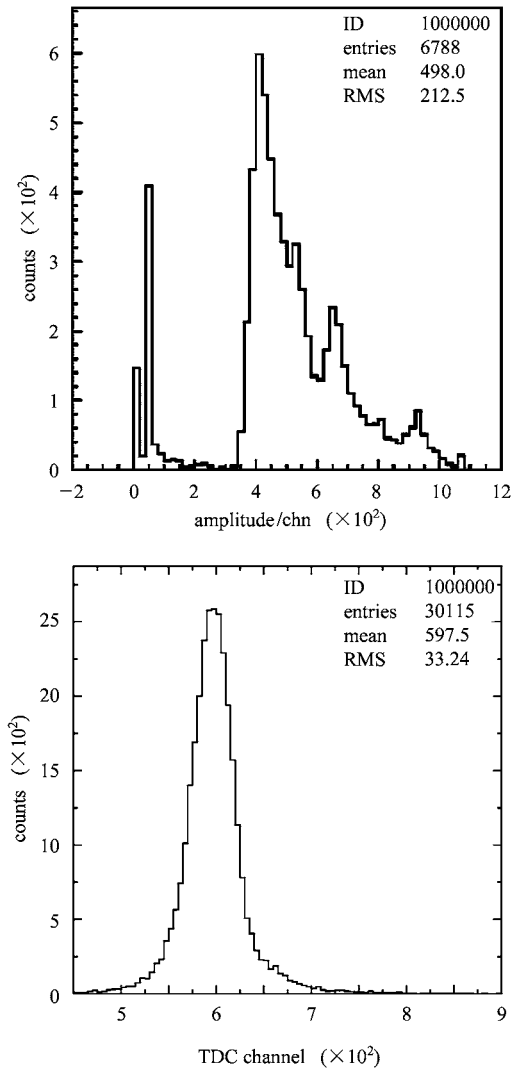


图 5 TOF 信号幅度谱和时间谱

图 6 是测量得到的输出的时间信号与幅度的关系.图 7 是利用两个多丝正比室给出的位置信息得到电子击中探测器的实际束斑的大小.采用二次多项式即: $t_A = p_0 + p_1 \times A + p_2 \times A^2$ (式中 p_0, p_1, p_2 为拟合参数)对测量数据进行 T-A 修正.图 8(a)和 (b)是 x 和 y 方向上的测量时间(T)随粒子击中位置(P)的关系. x 方向上 T-P 修正使用直线拟合, y 方向上 T-P 修正使用 4 次多项式拟合.图 9 是经过 T-A 和 T-P 修正后的时间谱 $(t - t_A - t_P - \frac{t_1+t_2}{2})$.根据式 (3) 可推算出 TOF 探测器的时间分辨 $\sigma_T = \sqrt{\sigma^2(t - t_A - t_P - \frac{t_1+t_2}{2}) - \sigma_{T1+T2}^2} = 87\text{ps}$,其中起始时间晃动 $\sigma_{T1+T2} = 76\text{ps}$.

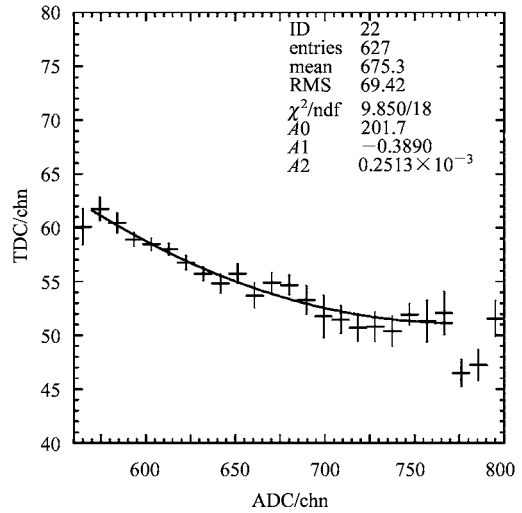


图 6 T-A 修正

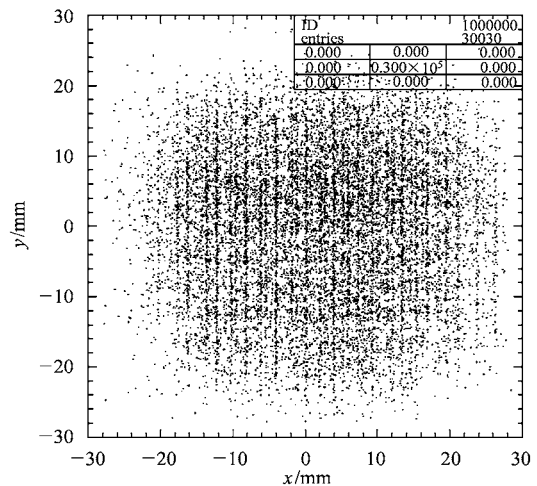


图 7 粒子击中探测器的束斑形状

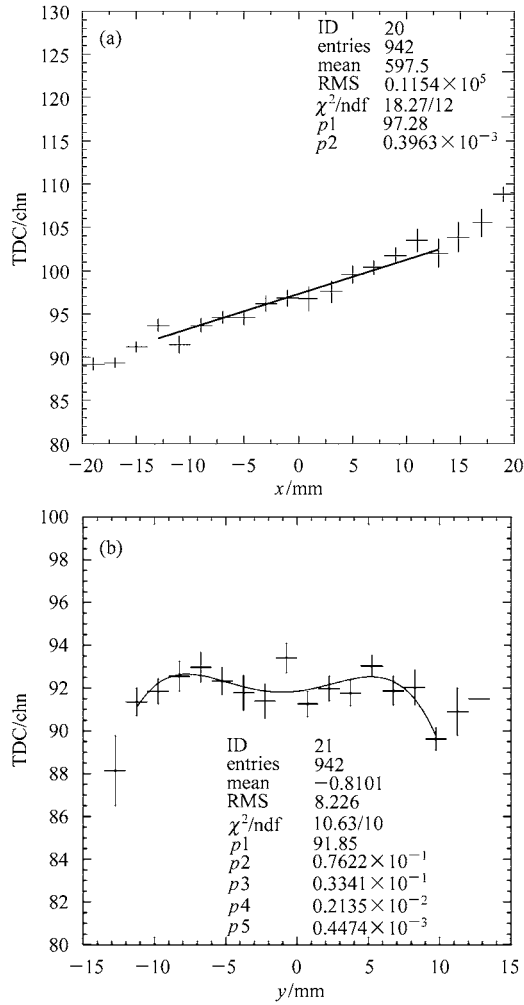


图 8 (a) x 方向上的 T-P 关系; (b) y 方向上的 T-P 关系

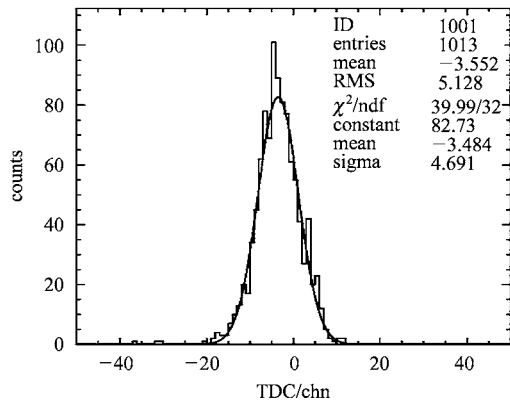


图 9 T-A 和 T-P 修正后的时间谱

5 测试结果和讨论

实验对在不同条件下的 TOF 模块性能作了测试. 每个数据点取 30000 个触发事例. 测量结果

如下:

1) 在靠近光电倍增管处, 闪烁体有无 45° 切角的信号幅度与时间分辨 (见图 10);

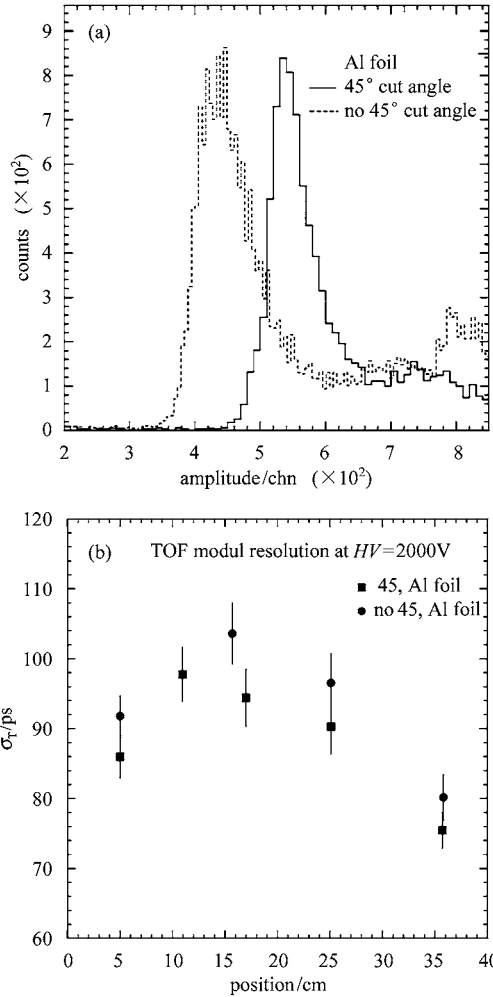


图 10 (a) 有无切角的幅度比较; (b) 有无切角的时间分辨比较

2) PMT 不同工作电压时的 TOF 模块时间分辨 (见图 11);

3) 对 TOF 晶体采用 3 种不同包装材料: 黑塑料纸 (black paper), 铝膜 (Al foil), Tyvek 纸. 测量结果见图 12. 其中电子击中探测器位置以 TOF 闪烁体中线 ($y = 0$) 和远离 PMT 一端 ($x = 0$) 为坐标原点, 即 PMT 的位置在 $x = 45\text{cm}$, $y = 0\text{cm}$ 处.

以上测试的结果可以得到一些有用的结论:

1) 在安装 PMT 的一端加 45° 切角, 增加光电倍增管光阴极对荧光光子的收集, 可以提高输出信号幅度和时间分辨;

2) 对于不同闪烁体的包装材料的影响, 采用 Tyvek 纸包装的探测器在输出信号幅度和时间分辨

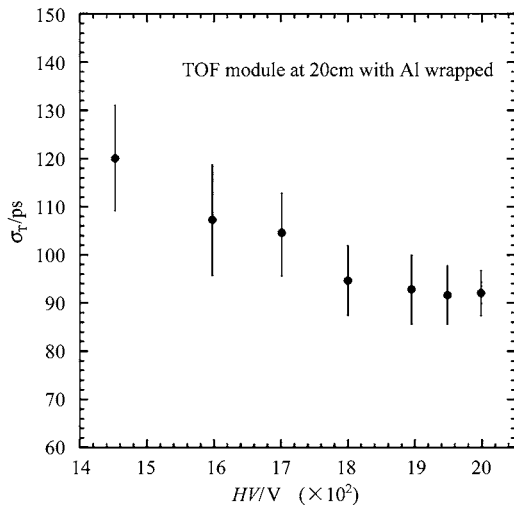


图 11 时间分辨与 PMT 工作电压的关系

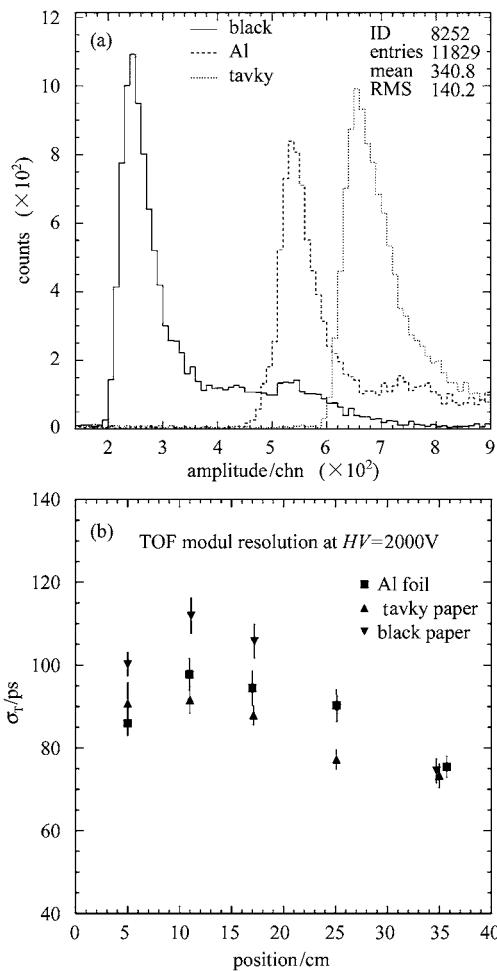


图 12 (a) 3 种不同包装 TOF 幅度比较; (b) 3 种不同包装的 TOF 时间分辨比较

率上要优于黑塑料纸、铝膜;

3) R5924 PMT 工作电压在 1900—2000V 时探测器的时间分辨较小.

综合上述结果可以得出结论:在无磁场情况下,采用 Tyvek 纸包装的探测器工作电压在 2000V 时,当 800MeV 电子击中端盖 TOF 模块不同位置,其时间分辨在 75—95ps 范围内.扣除电子学时间测量精度 ~ 30ps 后本征时间分辨为 70—90ps. 根据 BES III TOF 设计方案^[4],考虑到束团时间和长度不确定性以及电子学测量的精度等因素的影响,从我们的实验结果可以得出端盖 TOF 的总体时间分辨可以达到 110—120ps.

图 13 中给出了上述条件下的测量和模拟结果.进一步用宇宙线(主要成分是 μ 子)进行了测试,与束流实验比较,两者趋势基本一致,但是宇宙线测量的结果要好.这是由于 800MeV 电子在塑料闪烁体中的能量损失主要是辐射损失,其能量沉积的分布比宇宙线 μ 子(接近于最小电离粒子)能量沉积的分布要宽.图 13 中也给出了宇宙线测量条件下的模拟结果^[5],因为模拟只包括光在塑料闪烁体中传输情况,并没有考虑光电倍增管的性能以及后续电子学系统的晃动,所以这个结果要好于实际结果,但是从图中可以看出两者趋势是一致的.

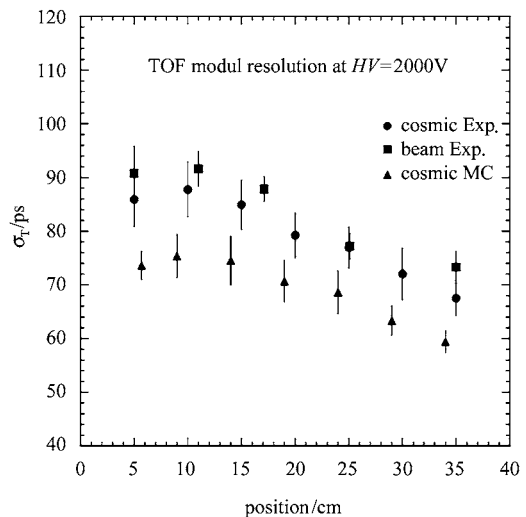


图 13 实验结果与模拟结果的比较

参考文献 (References)

- 1 BES Collaboration. The BES Upgrade[J]. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A458**:627
- 2 LI Jia-Cai, ZHANG Liang-Sheng, HU Chun-Liang et al. HEP&NP, 2005, **29**(1):55—61 (in Chinese)
(李家才, 张良生, 胡春良等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(1):55—61)
- 3 HUANG Sheng-Li, XU Zi-Zong, WANG Zhao-Min et al. HEP&NP, 2002, **26**(9):959—963 (in Chinese)
(黄胜利, 许咨宗, 汪兆民等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(9):959—963)
- 4 BES III Collaboration. BEPC II 初步设计. IHEP-BEPC II -SB-03-4.
- 5 LI Xin, WU Chong, AN Shao-Hui et al. HEP & NP, 2005, **29**(6):586—591 (in Chinese)
(李昕, 吴冲, 安少辉等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(6):586—591)

Beam Test of the Time Resolution of the BES III Endcap TOF

AN Shao-Hui¹ WU Chong² LI Xin¹ CHEN Hong-Fang¹
HENG Yue-Kun² SUN Zhi-Jia² WANG Yi-Fang² LI Cheng^{1;1)}

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 The Endcap TOF (ETOF) of Beijing Spectrometer (BES III) consists of 2×48 pieces of trapezoidal scintillator (BC408). Its main physics goal is to reach the intrinsic time resolution of 80ps and to realize the $2\sigma \pi/k$ separation at momentum up to $1\text{GeV}/c$. In this paper, the performance of one ETOF module under different conditions, such as with different packing material, operating voltage and shape of scintillator, is tested by the beam of 800MeV electrons at IHEP. The primary results show that the intrinsic time resolution of ETOF with Tyvek paper wrapping is between 70—90ps.

Key words BES III, time of flight (TOF), intrinsic time resolution, beam test