

BES III 端盖 TOF 本征时间分辨的 MC 模拟

李昕 吴冲 安少辉 唐泽波 陈宏芳¹⁾ 李澄

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

摘要 BES III 飞行时间探测器(端盖部分)由 2×48 个塑料闪烁探测器模块构成.采用 Monte Carlo 模拟软件包 Geant4,对该探测器测量高能带电粒子的性能进行了模拟研究.文章讨论了最小电离粒子击中闪烁体不同位置,以及闪烁体形状,闪烁体表面覆盖材料对本征时间分辨的影响,给出了详细的模拟结果,并与宇宙线测试结果进行了比较.为该探测器研制和工程设计提供必要的参考数据.

关键词 BES III 飞行时间谱仪 闪烁体探测器 本征时间分辨

1 引言

在高能物理实验中,飞行时间测量方法是粒子鉴别的主要方法之一.提高飞行时间探测器的本征时间分辨是提高整个飞行时间谱仪的时间分辨的关键.研制中的 BES III 端盖飞行时间谱仪(End-cap Time-of-Flight,简称:ETOF)由 2×48 个塑料闪烁探测器构成,采用快时间响应的塑料闪烁体和抗磁场的细栅型(fine-mesh)光电倍增管(PMT).其主要物理目标是在 $1\text{GeV}/c$ 动量范围实现对 π/K 介子 2σ 分辨,设计要求 ETOF 总时间分辨率达到 $110\text{--}120\text{ps}$,包括:束团时间的不确定性,起始时间测量的精度,电子学时间测量精度等,其中 ETOF 探测器的本征时间分辨要求达到 80ps ^[1].

TOF 本征时间分辨与闪烁体的性能和光电倍增管参数直接相关,主要由闪烁体的发光衰减时间,光电倍增管中光电子的渡越时间涨落和光电子数的多少决定.而光电子数与闪烁体发射光的波长、光产额、几何形状、闪烁体的发光衰减长度、光传输过程和光电倍增管的光谱响应及量子效率有关.当闪烁体和光电倍增管性能确定后,TOF 本征时间分辨主要由粒子击中位置到光电倍增管的距离和光电子数

决定,其中光传输过程对光电子数的影响与晶体几何形状和不同包裹材料的光吸收和反射特性有关.根据 BES III ETOF 的设计方案,为了使探测器达到最佳本征时间分辨,采用 Geant4 模拟软件包^[2,3],对上述 3 种外在因素,即:粒子击中位置、晶体几何形状和不同包裹材料,对本征时间分辨的影响进行了细致的模拟研究,并与实验结果进行了比较.为 ETOF 的研制特别是工程设计提供必要的数据.

2 ETOF 描述

BES III ETOF 结构如图 1(a)和(b).闪烁体厚为 50mm ,相对于束流对撞点,两端各有 48 块闪烁探测器(BC408)构成扇形结构,内半径为 410mm ,外半径为 890mm ,单个塑料闪烁体几何形状为梯形.单个闪烁体的几何形状为梯形,长 480mm ,下底宽 53.67mm ,上底宽 116.5mm ,厚 50mm .初步设计在模型下方距梯形下底 32mm 处,安装直径为 50mm 的圆柱形光电倍增管(有效直径为 39mm),它们之间是 0.1mm 厚的硅油层.为了提高光收集效率,从底面切有 45° 光反射面.闪烁体表面可选用多种材料(如铝箔,tyvek 纸)作为光反射层,并在该材料外再用黑胶带包裹,作为避光层.

2004-09-12 收稿,2004-12-22 收修改稿

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

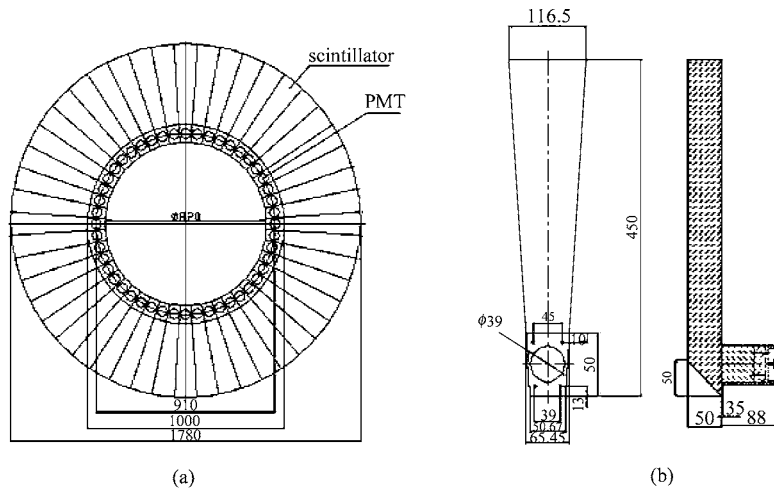


图 1 (a) BES III 端盖结构示意图; (b) 单块闪烁探测器结构图

TOF 模型如图 2. 其中内反射层(铝箔)和外吸收层厚度均为 0.1mm, 内反射层与闪烁体之间的空气层厚度为 0.3mm. 由于直接构造该闪烁体几何外形较为困难, 所以在程序中须先构造一个梯形闪烁体, 再在其较窄的一端构造 45°光反射层,

使被隔开的一小部分闪烁体在模拟过程中不起作用. 塑料闪烁体主要由氢和碳两种元素组成, 它们的原子个数比为 11:10, 密度为 1.032g/cm³. 模拟过程中使用的闪烁体(BC408)的基本参数见表 1.

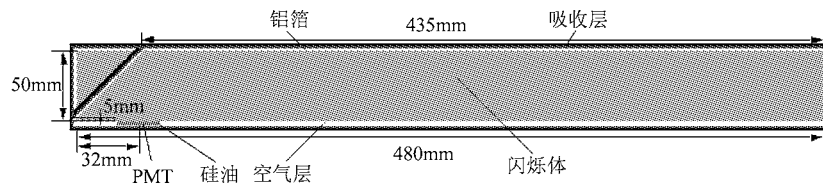


图 2 模拟 BES III 端盖闪烁探测器结构图

表 1 闪烁体 BC408 的基本参数表

密度/ (g/cm ³)	折射率	快成分上升 时间 τ_1 /ns	快成分下降 时间 τ_2 /ns	慢成分下降 时间 τ_3 /ns	慢快成 分比 R	光衰减 长度/cm	光出射最大 波长/nm
1.032	1.58	0.9	2.1	14.2	0.27	210	425

3 荧光产生和光传输过程

高能带电粒子进入闪烁体后, 可用 Geant4 的 G4Scintillation 来模拟光子和荧光产生过程. 在塑料闪烁体中每损失 100eV 能量平均产生一个光子, 它在闪烁体内部的出射方向是各向同性的, 其荧光成分的时间分布可用下面的公式描述^[4]:

$$P(t_{emit}) = \frac{1}{1+R} \left(\frac{e^{-t_{emit}/\tau_2} - e^{-t_{emit}/\tau_1}}{\tau_2 - \tau_1} + \frac{R}{\tau_3} e^{-t_{emit}/\tau_3} \right),$$

其中 τ_1 和 τ_2 是快成分的两个时间衰减常数, τ_3 是慢成分的时间衰减常数, R 是慢快成分的比值.

荧光在闪烁体内部经过多次折射和反射, 最终经耦合层(如: 硅油层)折射被 PMT 接收, 或者被闪烁体或包装材料吸收. Geant4 程序库中用于模拟荧光的传输过程包括: 光吸收过程(G4OpAbsorption); 瑞利散射过程(G4OpRayleigh); 边界过程(G4OpBoundryProcess) 和所有光子的传输过程(G4Transpotation). 对荧光光子来说, 瑞利散射通常是不重要的. 因为无论是在不同材料的边界, 还是在闪烁体内部, 瑞利散射过程截面都非常小, 一般可忽略. 光吸收过程遵循指数衰减规律: $P(l_{pro}) = e^{-l_{step}/\lambda}$, 其中, l_{step} 是这一步的传输的长度, λ 是光衰减长度. 光的边界过程是与闪烁体的包裹材料有关, Geant4 将光在不同材料边界的行为划分

为 3 种情况:

1) 电介质→电介质 (dielectric→dielectric). 光子可以发生折射和反射;

2) 电介质→金属 (dielectric→metal). 光子可以被金属材料吸收,或被反射回电介质材料中. 光子被反射的几率决定于金属材料的反射率;

3) 绝缘→黑体 (dielectric→black material). 如果用户对一种介质的光学性质不做任何定义, Geant4 就会默认它为黑体,光子一旦入射到黑体,就会立刻被吸收.

在模拟中,将空气层和铝箔边界,或空气层和 tyvek 纸材料边界设为电介质→金属. 其余各交界面,如硅油与闪烁体边界,都设为电介质→电介质. 铝箔的反射率为 0.97,基本上可以看成是镜面反射. tyvek 纸是部分透明,可有部分光子出射,单层 tyvek 纸反射率约为 0.8—0.9(由其型号决定),但在实验中可进行多层包裹以提高其反射能力. 另外, Geant4 还提供了模拟镜面反射和漫反射的功能,模拟过程中将铝箔表面定义为光滑 (polished), tyvek 纸表面定义为粗糙 (ground),以比较这两种反射对 TOF 性能的影响.

4 光电倍增管响应

BES III 端盖采用细网型光电倍增管 R5924,它在 1T 的磁场下工作电压为 2000V 时的增益可以达到 2.5×10^5 ,光阴极的有效直径是 39mm. R5924 有着良好的时间特性,上升时间 2.5ns,渡越时间 9.5ns,渡越时间涨落 (TTS) 的半高全宽 0.44ns. 对应于 BC408 的发射谱 (410—450nm), R5924 光电倍增管光阴极的辐照灵敏度处在坪区 (80mA/w) 范围内,其平均量子效率为 0.213,阴极发射的光电子被收集的平均效率为 0.6. 因此在模拟过程中,以量子效率和收集效率的乘积作为光电子抽样的平均数. 光电倍增管采用阳极加正高压分压电路. 它的单光电子响应脉冲可以用下面公式描述^[4,5]:

$$v(t) = \frac{GQ}{2C_a} \frac{1}{b-a} \left[b e^{bt} e^{b^2 \sigma^2 / 2} \operatorname{erfc} \left(\frac{-b\sigma - t/\sigma}{\sqrt{2}} \right) - a e^{at} e^{a^2 \sigma^2 / 2} \operatorname{erfc} \left(\frac{-a\sigma - t/\sigma}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

其中, $a = -(\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\gamma})/2$,

$$b = -(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\gamma})/2,$$

$$\beta = \frac{(R+Z)C + 2C_a R}{2CC_a RZ}, \gamma = \frac{1}{2CC_a RZ},$$

$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$ (为补充误差函数), G 为光电倍增管的增益系数, Q 为输出电荷, C_a 是阳极和最后一个倍增极间的电容,取为 40pF. 取耦合电容 C 为 220pF, R 为负载电阻 (10kΩ), 阻抗 Z 为 50Ω. 为使波形的上升时间为 2.5ns, 取 $\sigma = 1.23$ ns. 光电倍增管的输出信号是所有单光电子脉冲信号的叠加:

$$V_{\text{PMT}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{pe}} v_i(t - t_{\text{TT}} - (t_0)_i),$$

其中 $(t_0)_i$ 为每个单光电子各自生成时间, t_{TT} 为渡越时间.

5 模拟结果

根据 BES III ETOF 设计和以上的分析,首先对 PMT 接收到的光电子时间分布,输出脉冲波形和分布进行模拟和计算 (见图 3(a), (b)). 图 4(a), (b) 是电子击中探测器不同位置的 PMT 接收到的光子数和输出信号幅度,以及时间分辨 (σ) 的模拟结果. 图中是以闪烁体较宽一端为原点,分别模拟电子从 6cm, 9cm,

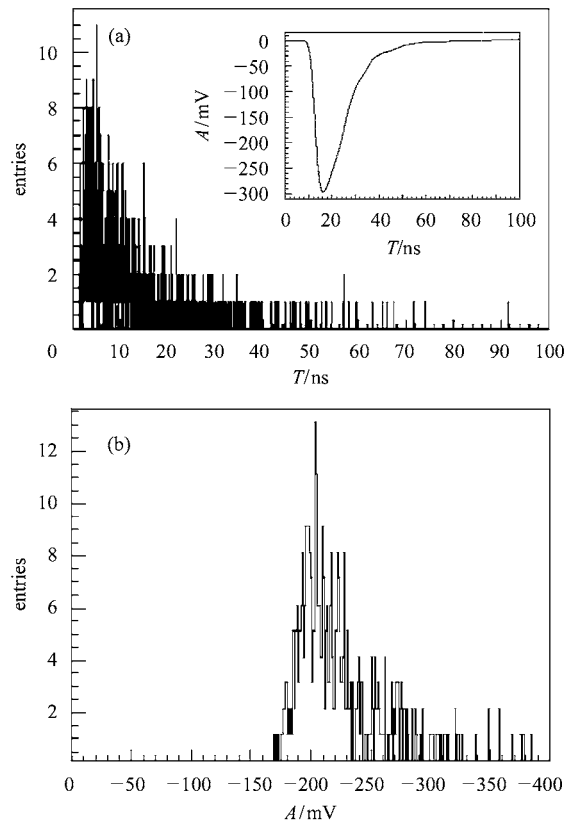


图 3 (a) 光电子时间分布谱和输出信号波形; (b) 典型的 PMT 输出脉冲幅度分布 (tyvek 纸包裹, 45° 倾角)

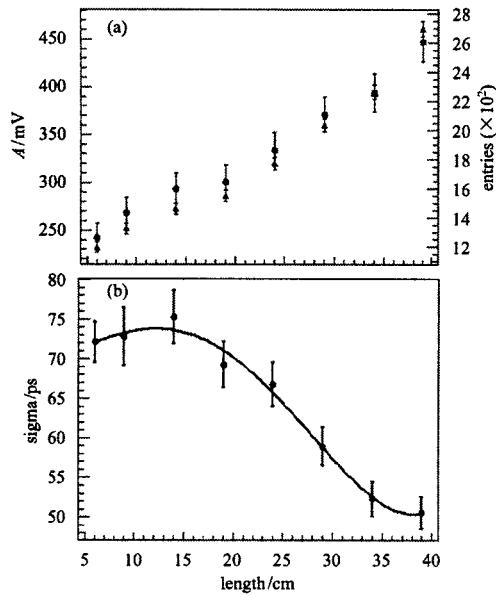


图 4 (a)不同位置的输出信号幅度(●)和 PMT 接收的光子数目(▲);(b)不同位置的时间分辨($T-A$ 修正后)

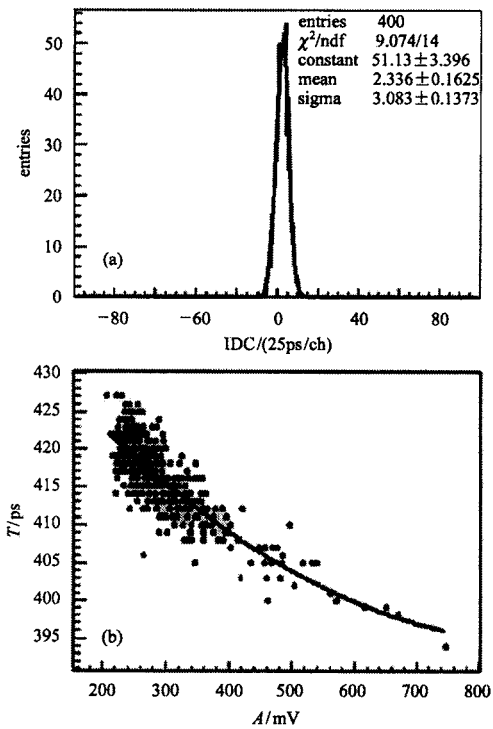


图 5 (a)时间分布谱($T-A$ 修正后, 击中位置在:14cm);(b)典型的 $T-A$ 关系

14cm, 19cm, 24cm, 29cm, 34cm, 39cm 处入射的情况 (PMT 在 44.8cm 处). 闪烁体包裹材料为铝箔, 端部有 45° 斜面, 每个位置取 400 个事例, 输出信号幅度为 400 个事例统计平均值. 在 PMT 信号的时间分布的取样中, 阈值条件设定为 30mV 作为信号产生时间. 模拟得到的 PMT 信号的时间分布见图 5(a). 由于 PMT 输

出信号幅度不同, 造成前沿定时取样上的时间晃动, 因此必须进行时-幅 ($T-A$) 修正. 图 5(b) 是模拟获得的一个典型的 $T-A$ 关系图, 拟合函数采用二次多项式, 即: $T = p_0 + p_1 \times A + p_2 \times A^2$, 其中 p_0, p_1, p_2 为拟合系数.

图 6(a) 和 (b) 是探测器在几种条件下的输出信号幅度和时间分辨计算结果. 通过比较可以得出: 1) ETOF 光收集效率随着电子束入射位置向闪烁体安装 PMT 的一端靠近而提高, 但时间分辨在 12.5cm 处最大; 2) PMT 的一端切 45° 斜面可以明显改善 TOF 的时间分辨能力和荧光收集效率; 3) 在反射率相同的情况下 (均为 97%), 用 tyvek 纸包裹闪烁体的效果要好于用铝箔包裹. 虽然两种情况下的荧光收集效率大致相同, 但 tyvek 纸外壳的时间分辨要优于铝箔. 这是因为铝箔表面对光子的反射效果类似镜面反射; 而 tyvek 纸表面反射效果接近漫反射, 使得各个光子在闪烁体内传输的路程长度较为接近, 因此到达 PMT 的时间涨落也较镜面反射小, 使时间分辨得到改善; 4) 在用 tyvek 纸包裹闪烁体的情况下, 模拟结果表明虽然反射率为 80% 时的 PMT 输出信号幅度较小, 但时间分辨率却要好于 97% 时的.

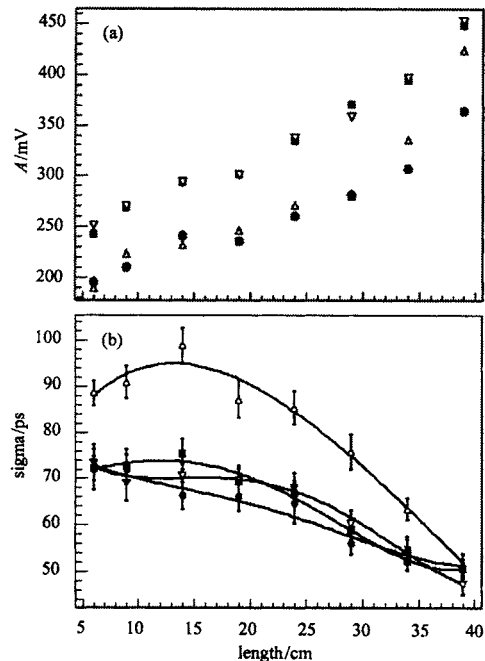


图 6 (a)不同条件下各个位置的 PMT 信号幅度; (b)不同条件下各个位置的 PMT 信号时间分辨
图中符号分别表示: ∇ tyvek 纸包裹 (45° 斜面), 反射率 0.97 (漫反射); \blacksquare 铝箔包裹 (45° 斜面), 反射率 0.97 (镜面反射); \triangle 铝箔包裹 (梯形), 反射率 0.97 (镜面反射); \bullet tyvek 纸包裹 (45° 斜面), 反射率 0.80 (漫反射).

通过追踪这两种情况下各个光子在闪烁体内的传输,一种可能的解释是:反射率为 80% 时,多次入射到 tyvek 纸表面的光子有更大的几率发生透射,进入吸收层被吸收而损失掉.这意味着只经过较少次反射的和直接入射的光子在 PMT 接收到的光子中占了更大的比重.这就使 PMT 接收光子的到达时间更为接近.因此,尽管有部分光子损失,但是时间分辨还是得到了改善.

为了得出一个最佳方案,有必要对不同反射率 tyvek 纸条件下的探测器性能进行模拟,模拟结果见图 7(a)和(b).由于 10—20cm 是时间分辨需要改善的主要灵敏范围(见图 4(b)),所以选择其中两处(14cm 和 19cm)处为粒子击中位置.模拟结果显示,随着 tyvek 纸反射率的下降,荧光收集效率降低,但在 80% 反射率条件下的探测器时间分辨最佳.这可能是 PMT 接收光子数下降和光子到达 PMT 时间涨落减小两种效果互相影响的结果.

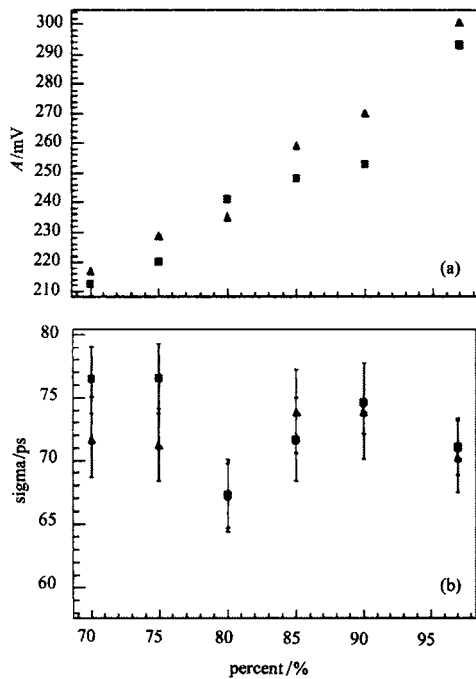


图 7 (a)不同反射率的 tyvek 纸包装的幅度变化;
(b)不同反射率的 tyvek 纸包装的时间分辨变化
▲粒子入射位置在 19cm; ■入射位置 14cm.

闪烁体切割斜面角度不同对光反射不同,从单纯光学规律计算 45° 切角是发生全反射最大的角度.由模拟结果可见(见表 2),45° 斜面时的情况也是最理想的选择.

表 2 不同角度斜面的 TOF 性能的模拟结果

闪烁体斜面角度	55°	45°	40°	35°
A/mV	202.8	241.1	237.8	193.5
σ /ps	77.1 ± 4.3	66.2 ± 2.9	68.3 ± 4.3	75.8 ± 4.7

图 8(a)和(b)是宇宙线 μ 子在闪烁体中能量沉积的模拟结果和相应的 PMT 输出脉冲幅度分布的测量结果.图 9 给出了粒子击中不同位置的模拟和

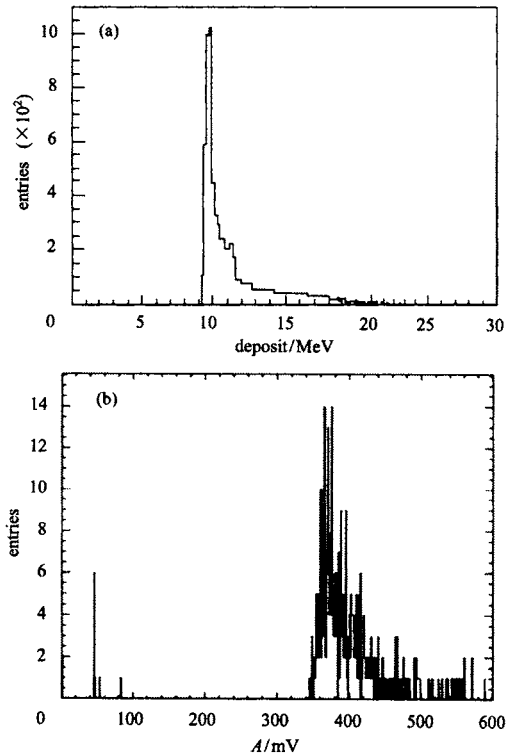


图 8 (a)最小电离粒子在闪烁体的能量沉积;
(b)PMT 输出脉冲幅度分布的测量结果

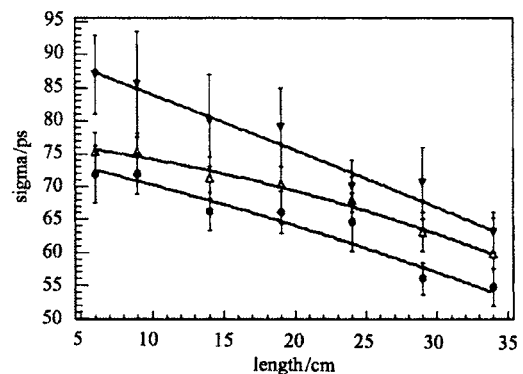


图 9 粒子击中闪烁体不同位置的时间分辨的模拟和测量结果
●理想点源(模拟结果); Δ2.5cm × 2.0cm 源(模拟结果); ▼实验结果.

宇宙线测量结果. 模拟和测量条件为: tyvek 纸包裹, 45°斜面, 反射率 0.97 的漫反射. 模拟和实验结果比较, 本征时间分辨随粒子击中位置的变化基本一致. 实验中宇宙线望远镜的有效触发面积为 $2.5\text{cm} \times 2.0\text{cm}$, 由于粒子击中位置和实验中电子学系统定时精度(约 30ps)的影响, 实验测量的 ETOF 时间分辨比模拟的本征时间分辨略差.

6 结论

使用 CERN 库的 Geant4 模拟软件包, 对 BES III 端盖 TOF 的表面覆盖材料选取, 闪烁体形状的选择, 及粒子击中闪烁体不同位置等条件下的探测器本征时间分辨给出了较为详尽模拟数据, 为最大限度的改进 BES III 端盖 TOF 的性能提供参考.

依据现在的设计方案, 模拟结果表明 BES III 端盖 TOF 探测器工作的最佳条件是: 当 PMT 垂直安装在闪烁体 44.8cm 处, 在安装 PMT 的一端切 45°斜面构成端面漫反射面, 闪烁体表面用反射率为 80% 的

tyvek 纸包裹. 在这种情况下, 相对于束流碰撞顶点(水平距离 1330mm), 当探测带电粒子的入射方向在 22° ($\cos\theta = 0.93$) 和 32° ($\cos\theta = 0.85$) 范围内, 即在 ETOF 的主要灵敏区内, 其本征时间分辨可达 80ps (模拟结果见图 10).

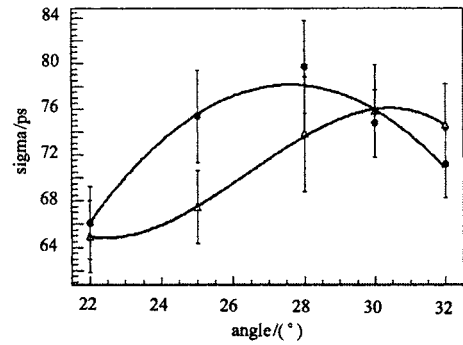


图 10 不同角度入射和垂直入射的 ETOF 本征时间分辨的比较
△垂直入射; ●以不同角度入射.

作者感谢中国科学院高能物理研究所及 BES III-TOF 合作组对该项目研究的多方面支持和帮助.

参考文献 (References)

- 1 BES III Collaboration. The BES III Detector (Draft). 2002, June
- 2 Geant4 User's Guide: For Application Developers, Version: Geant4 3.1. 2001
- 3 Geant4 Physics Reference Manual. December 2000
- 4 Matthew Jones. CDF/DOC/TOF/CDFR/5358, 2000
- 5 ZHENG Li-Ming, PENG Hai-Ping, SHAO Ming et al. HEP & NP, 2003, **27**(12): 1109—1113 (in Chinese)
(张黎明, 彭海平, 邵明等. 高能物理和核物理, 2003, **27**(12): 1109—1113)

Monte Carlo Simulation of BES III End-Cap TOF

LI Xin WU Chong AN Shao-Hui TANG Ze-Bo CHEN Hong-Fang¹⁾ LI Cheng

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

Abstract The End-Cap TOF (ETOF) of Beijing Spectrometer (BES III) consists of 2×48 pieces of trapezoidal scintillator (BC408). Its main physics goal is to realize the $2\sigma \pi/k$ separation at momentum up to $1\text{GeV}/c$, and to obtain TOF intrinsic time resolution of 80ps. In order to study the effects of several factors on the intrinsic time resolution of ETOF, the Monte Carlo simulation of the detector is carried out by using Geant4 software package. The performance of ETOF at different conditions, such as scintillator covered materials, shapes, and particle hit positions, is simulated and discussed in detail. The result can provide a reference for the design of ETOF detector in BES III.

Key words BES III, TOF, scintillator, intrinsic time resolution

Received 12 September 2004, Revised 22 December 2004

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