

闪烁体荧光传输特性对 ETOF 探测器性能的影响

李昕 唐泽波 陈宏芳¹⁾ 李澄 邵明

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

摘要 为了对 BESIII 端盖飞行时间探测器(ETOF)的测试结果给出合理的解释,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模拟研究. 详细探讨了当粒子击中 ETOF 模块不同位置时, 其闪烁体荧光传输特性与探测器模块输出信号之间的关联, 以及 PMT 输出信号甄别阈值的选取对闪烁探测器本征时间分辨的影响, 并寻找可能的改善时间分辨的方法. 为进一步提高 ETOF 的性能提供参考.

关键词 TOF Geant4 荧光传输 本征时间分辨

1 引言

研制中的 BESIII 谱仪端盖飞行时间探测器(End-cap Time-of-Flight, 简称: ETOF)安装在谱仪的主漂移室和端盖电磁量能器之间. 相对于束流碰撞的前后方向, 由 2×48 块 50mm 厚的梯形塑料闪烁探测器构成两个圆环形端盖, 其内半径为 400mm, 外半径为 838mm. 采用快时间响应的塑料闪烁体(BC404)

和抗磁场的细栅网型(fine-mesh)光电倍增管(PMT) R5924. 单个 ETOF 探测器模块几何形状和相对束流碰撞顶点的位置见图 1.

在对 ETOF 单块闪烁体探测器进行的一系列实验和模拟结果显示^[1, 2], 当粒子击中闪烁体不同位置时, 其时间分辨会发生较大变化($\sigma=60-80$ ps). 图 2 给出的是使用 800MeV 电子束测试 ETOF 本征时间分辨的实验结果. 从图中可以很清楚地观测到, 当粒子击中闪烁体的中间位置附近时, 其本征时间分辨存在一个最大值, 而这一区域是探测器的主要灵敏范围, 因此有必要探究其原因, 找出影响时间分辨的因素并寻找可能的改善方法.

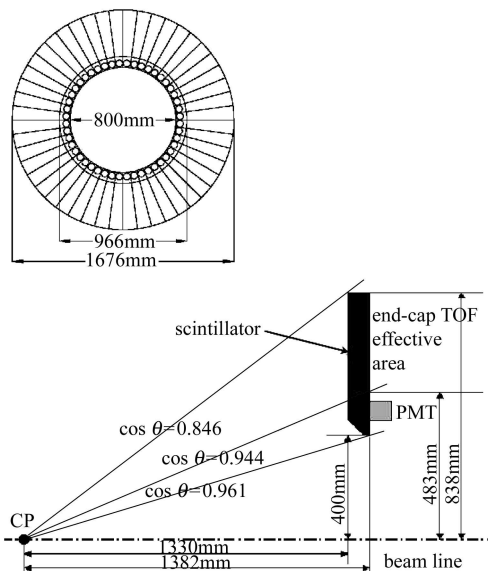


图 1 ETOF 结构示意图

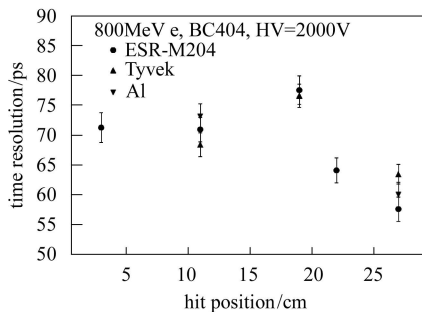


图 2 不同包装材料的 ETOF 模块时间分辨随粒子击中位置的变化
粒子击中位置分布以闪烁体没有安装 PMT 的一端为原点.

2006 - 02 - 11 收稿

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

2 模拟的基本方法

对于大面积闪烁探测器, 一般认为粒子击中闪烁体的位置越靠近PMT, 其荧光收集效率越高, 探测器输出信号幅度越大, 这有利于改善时间分辨. 但是单纯考虑PMT荧光收集效率的变化不能解释图2所示的束流测试结果. 影响ETOF本征时间分辨的另一主要因素是从粒子击中闪烁体发射荧光光子到PMT接收到光电子的时间分布, 包括: 1) 闪烁体自身的荧光产生时间涨落; 2) 光子在闪烁体内的传输时间分布; 3) 光电子在光电倍增管倍增过程中的渡越时间涨落. 其中第一和第三项时间涨落由闪烁体和PMT自身的性能决定, 与粒子击中位置无关. 因此, 模拟研究的重点是光子在闪烁体内的传播特性. PMT接收到的光子从传输方向上可分为两种: 向前发射(包括多次反射)击中PMT的光子(定义为直射成分)和先向后发射(包括多次反射)再被闪烁体反射后击中PMT的光子(定义为背射成分). 当粒子击中位置靠近PMT, 意味着直射和背射成分的传输路程差变大, 光子传输时间的涨落可能增大. 同时, 粒子击中位置变化也会引起直射和背射成分的数量变化, 影响光子传输时间的涨落, 进而影响ETOF时间分辨.

使用Geant4软件包^[3, 4], 可以较为准确的模拟闪烁体内的荧光产生和传输过程, 并对生成光子的发射角度及路径进行细致的追踪. 塑料闪烁体中平均每损失100eV能量产生一个光子, 其荧光成分的时间分布可用下式描述^[5]:

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

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.

经过多次反射后, 到达光阴极灵敏区的光子按照PMT的量子效率转换成光电子. 在模拟程序中, 以量子效率和光电子收集效率的乘积作为光电子抽样的平均数. 光电倍增管的单光电子响应脉冲可以用下式描述^[6]:

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

其中

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

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

式中 $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$ (为误差补充函数), 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(10k Ω), 阻抗 Z 为50 Ω . PMT/R5924的信号上升时间为2.5ns, 式中 $\sigma = 1.23$ 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, 可定义为

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

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.

为了与束流测量结果比较, 在模拟过程中定义单个闪烁体模块的几何尺寸为: 以闪烁体末端为原点, 总长度为438mm, 末端宽116.5mm, 前端宽53.67mm. 在接近前端处安装PMT. 为了提高光收集效率, 前端底面切成45°角构成光反射面, 使用镜面反射材料(型号: ESR-M204, 反射率98%)包裹闪烁体. 入射粒子设定为800MeV电子. 同时为了提高统计精度, 取80个电子击中闪烁体同一位置的累加结果.

3 荧光传输特性

通过对生成的光子进行追踪, 可以统计出光子被反射次数(见图3(a))和光子在闪烁体内部总传输时间的分布情况(见图3(b)). 根据光子运动方向的不同, 可区分向PMT所在方向射出(直射成分, 见图3(c))和向反方向射出(背射成分, 见图3(d))的光子. 可以发现其传输时间分布对应于总传输时间分布的两个峰, 而峰位的差值则来源于直射和背射成分经过的路程差. 为了验证这一点, 统计峰位对应的反射次数和传输时间差, 使用粗略的计算方法(不考虑闪烁体侧面光反射): (直射和背射成分直线路程差+反射次数差额 \times 闪烁体厚度)/光速=峰位传输时间差. 在粒子击中位置距闪烁体末端18cm处, 由上式可得: $(0.36 + 4 \times 0.05)/3 \times 10^8 = 1.9$ ns, 与统计所得的峰位差值比较, 两者近似. 根据各个粒子击中位置的光子传输时间分布, 可以得出背射和直射成分传输时间差(见图4)以及相应的光子数比例的变化趋势(见图5). 当粒子击中位置靠近闪烁体末端时, 传输时间差小, 但两者数量接近, 因为这时两者在闪烁体内的传输路程接近; 而当击中位置靠近PMT所在的前端时, 情况则相反.

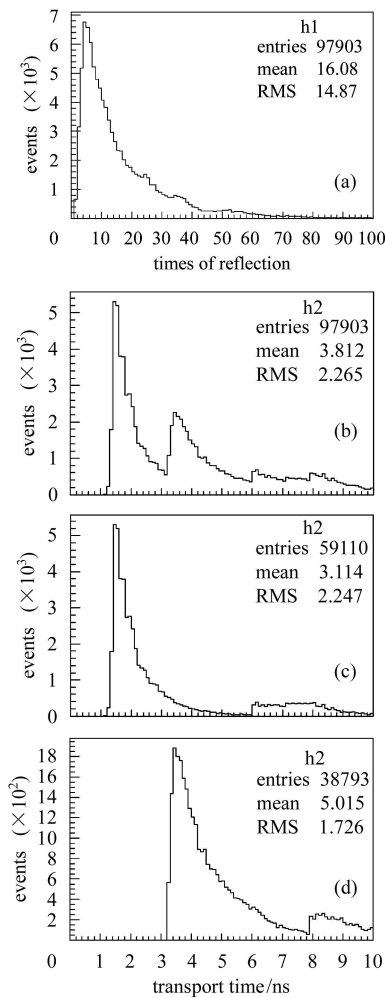


图 3 800MeV 电子击中闪烁体 18cm 处的模拟结果 (a) 光子在传输过程中被反射次数分布; (b) 光子在闪烁体内总的传输时间分布; (c) 直射成分在闪烁体内传输时间分布; (d) 背射成分在闪烁体内传输时间分布。

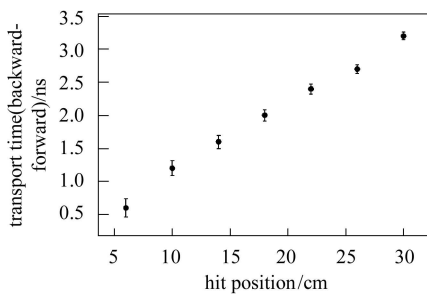


图 4 背射和直射成分传输时间差随位置变化

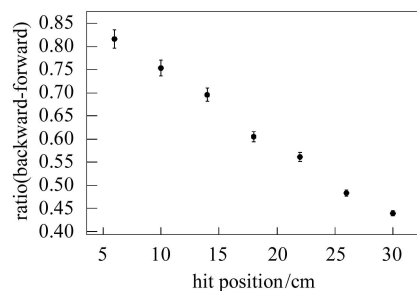


图 5 背射和直射成分数量比随粒子击中位置的变化

4 与 PMT 输出信号关联

为了进一步了解直射和背射成分对本征时间分辨的具体影响, 模拟计算给出了其各自对应的脉冲信号及总的 PMT 输出信号波形 (见图 6, 图 7). 由此可得脉冲上升时间 (信号幅度的 10%—90% 对应的的时间) 随粒子击中位置分布的变化 (见图 8). 可以发现, 对于直射成分而言, 粒子击中位置越靠近闪烁体前端, 信号上升沿越快, 这意味着其时间分辨越好; 背射成分则正好相反. 两者的综合影响使得 PMT 脉冲信号的上升时间在粒子击中闪烁体中间位置时出现最大值, 这与图 2 所示的时间分辨随粒子击中位置变化趋势接近.

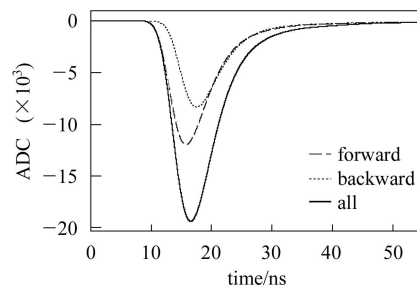


图 6 粒子击中位置距闪烁体末端 14cm 处 PMT 脉冲信号波形

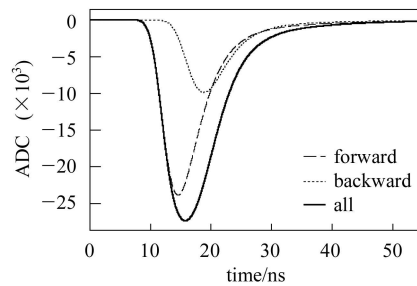


图 7 粒子击中位置距闪烁体末端 30cm 处 PMT 脉冲信号波形

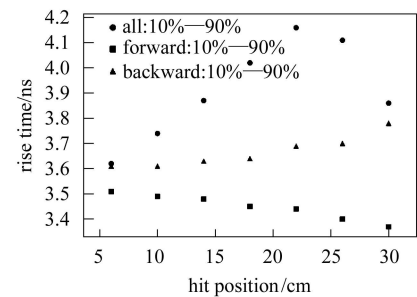


图 8 脉冲上升时间(10%—90%)随粒子击中位置分布的变化

另外, 我们注意到当粒子击中闪烁体末端和前端时, 信号上升时间很接近, 但实际测试时这两处的时

间分辨有明显差别. 这一方面是因为闪烁体前端的荧光收集效率大于末端; 另一方面, 前端直射和背射成分的传输时间差很大, 数量也相差很多, 这时其上升沿大部分由直射成分贡献, 背射成分只从峰值60%附近开始有贡献; 而当粒子击中闪烁体末端时, 直射和背射成分的传输路程和数量相近, 信号上升沿由两者共同组成. 再考虑到进行束流测试时PMT的甄别阈定位在信号峰值的10%左右, 因此选用范围较小的上升沿进行比较可能更能反映出前后端情况的不同和时间分辨的变化趋势. 由图9可见, 随着上升时间区间减小, 对应的信号上升时间最大值移向闪烁体中间靠后的位置, 这与实验结果更为吻合.

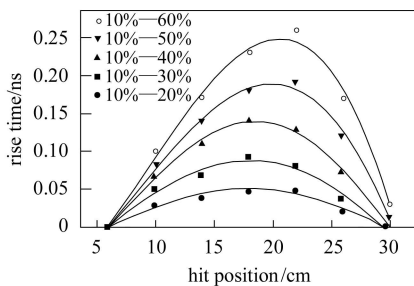


图9 不同范围脉冲上升时间随粒子击中位置分布的变化

设粒子击中闪烁体末端6cm处上升时间为0.

由上述模拟分析, 可以对束流测试结果进行解释. 当粒子击中闪烁体末端时, 直射和背射成分的数量接近, 背射成分的影响显著, 但两者的传输时间差不多, 所以上升时间不会达到最大; 而当粒子击中闪烁体前端时, 情况正好相反, 背射成分在峰值60%附近出现, 但其数量比直射成分少很多, 造成的上升时间增加也有限. 只有当粒子击中闪烁体中间附近时, 两种成分的综合影响导致信号上升时间达到最大, 使探测器时间分辨明显增大.

表1 粒子击中不同位置时背射成分影响的起始位置

粒子击中位置/cm	6	10	14	18	22	26	30
背射成分影响起始位置(与信号最大幅度的百分比%)	2.86×10^{-12}	2.36×10^{-4}	0.157	3.3	13.9	33.9	60.4

6 结论

根据较为细致的模拟分析, 对ETOF单块闪烁体探测器的实验结果给出解释, 其时间分辨随粒子击中闪烁体位置的变化是由PMT接受到的光子直射和背射成分共同影响造成的. 主要影响因素包括直射和背

5 寻找改善ETOF本征时间的方法

为了进一步验证上述结果, 并寻找可能的改善时间分辨的方法, 尝试在闪烁体末端增加一块光吸收材料以去除背射成分的影响. 因为如果PMT只接收到直射成分的话, 随着粒子击中位置向PMT靠近, 时间分辨会越来越越好. 图10的模拟结果证实了这一设想, 距闪烁体末端18cm处的时间分辨最大值消失了. 但同时, 去除背射成分也大大降低了PMT接受到的光子数量, 因而时间分辨并没有得到明显改善.

另一种降低背射成分影响的方法是调整PMT输出信号的甄别阈. 这里假设当背射成分信号的上升沿数值达到相同时刻总信号上升沿数值的1%时, 背射成分对信号的上升沿开始有影响. 模拟计算出粒子击中不同位置时这一时刻所对应的上升沿位置(表1). 取低于该位置的甄别阈, 就可以减弱背射成分的影响. 模拟结果(见图10)表明, 取信号峰值的3%为阈值, 18cm处的时间分辨最大值消失了, 这说明该位置背射成分的影响确实减弱了. 但是在实际的实验中, 如此小的阈值会使信号中噪声的影响增大, 进而导致探测器的性能变差.

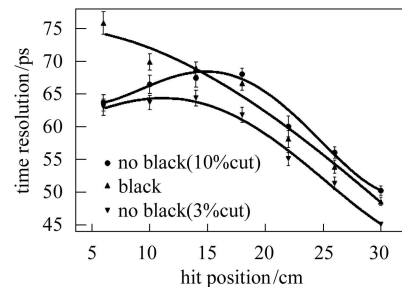


图10 不同条件下时间分辨随粒子击中位置的变化(模拟结果)

▲在闪烁体末端增加光吸收材料, ●使用信号峰值10%为阈值, ▼使用信号峰值3%为阈值.

射成分的传输时间差和数量比. 当粒子击中闪烁体中间位置附近时, 这两种成分的综合效果使得信号上升时间明显增大, 从而导致时间分辨出现最大值.

通过调整PMT的甄别阈和增加光吸收材料的方法, 可以减弱和消除背射成分的影响, 但同时也会引入一些其他的不利因素, 因此不会明显改善ETOF的本征时间分辨. 一种可能有效的方法是提高PMT增

益和信噪比, 同时适当的减弱背射成分的影响, 这有待于进一步的实验和模拟验证.

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 AN Shao-Hui, WU Chong, LI Xin et al. HEP & NP, 2005, **29**(8): 775 (in Chinese)
(安少辉, 吴冲, 李昕等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(8): 775)
- 2 LI Xin, WU Chong, AN Shao-Hui et al. HEP & NP, 2005, **29**(6): 586 (in Chinese)
(李昕, 吴冲, 安少辉等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(6): 586)
- 3 Geant4 User's Guide: For Application Developers (Version: Geant4 3.1). 2001
- 4 Geant4 Physics Reference Manual. December 22, 2000
- 5 ZHANG Li-Ming, PENG Hai-Ping, ZHANG Zi-Ping et al. Meas. Sci. Technol., 2004, **15**: N54—N57
- 6 Matthew Jones CDF/DOC/TOF/CDFR/5358. 2000

Effect of Light Transmission Characteristic of Scintillator on the Intrinsic Time Resolution of ETOF

LI Xin TANG Ze-Bo CHEN Hong-Fang¹⁾ LI Cheng SHAO Ming

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

Abstract In order to find rational explanation to the experimental result and possible methods to improve the performance of End-cap Time-of-Flight detector (ETOF) in BESIII, the Monte Carlo simulation of the detector is carried out by using Geant4 software package. The simulation data of PMT signal and the time resolution of the ETOF are given. The simulation and data analysis are mainly focused on studying the effect of the light transmission characteristic in scintillator when particle hits different position and different thresholds of PMT signal are chosen. The study can make reference for the improvement of ETOF detector in BESIII.

Key words TOF, Geant4, light transmission, intrinsic time resolution