

# GEANT4 对飞行时间谱仪单块闪烁体的模拟研究\*

张黎明<sup>1)</sup> 彭海平 邵明 张子平 陈宏芳 伍健

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

**摘要** 基于 GEANT4 对飞行时间谱仪单块闪烁体进行了系统的模拟研究, 得出了飞行时间谱仪的本征时间分辨. 并对 BC404 和 BC408 两种类型的塑料闪烁体材料以及闪烁体与光电倍增管的耦合方式做了比较研究, 得到了比较结果. 这些结果对 BES III 粒子鉴别系统的设计有着指导意义.

**关键词** 飞行时间谱仪 BES III GEANT4 本征时间分辨

## 1 引言

北京正负电子对撞机 (BEPC) 和北京谱仪 II (BES II) 将做重大改建. 飞行时间谱仪 (TOF) 的分辨率将由原来的 180ps 提高到 90ps, 使得  $K/\pi$  的  $2\sigma$  分辨动量达到  $1.0\text{GeV}/c$ . BES III 的飞行时间谱仪采用塑料闪烁体计数器, 桶部的 TOF 由 64 块闪烁体组成, 可以覆盖全空间立体角的 83%.

GEANT4<sup>[1]</sup> 是面向对象的 C++ 程序, 它可以模拟 GEANT3 中没有的荧光产生过程, 并增加和完善了光与物质的各种作用过程. 此外, C++ 的内存动态存取技术还解决了 GEANT3 中由于次级粒子过多可能引起的内存溢出的问题.

单块 TOF 的蒙特卡罗模拟研究对粒子鉴别系统的设计有着指导意义. 这套模拟程序基于 GEANT4, 严格模拟了从能量沉积到最后电信号形成的整个物理过程.

## 2 模拟步骤

图 1 给出的是 BES III 飞行时间谱仪的模拟步骤. 当粒子穿过闪烁体时, 读取每一步的击中信息, 信息包括这一步起始时间、能量沉积、粒子的初末位置和初末速度. 利用这些信息, 产生荧光. 荧光在闪烁体中传输, 有一部分到达光电倍增管并产生电信

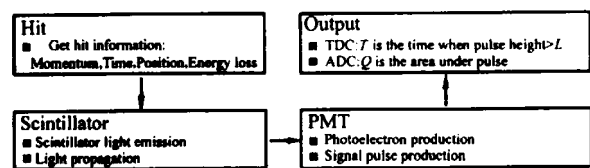


图 1 飞行时间谱仪的模拟的步骤

号. 最后通过甄别, 给出事例的电荷和时间值.

值得注意的是, GEANT4 处理光折射反射时传播速度有错误, 这里做了修改. 另外, 我们还在产生荧光时加入了 Birks 饱和效应<sup>[2]</sup>.

### 2.1 GEANT4 的基本输入参数

BES III 选择的有机闪烁体主要由氢和碳两种元素组成, 它们的原子数比为 11:10, 密度为  $1.032\text{g}/\text{cc}$ <sup>[3]</sup>. 模型长 2400mm, 宽 60mm, 厚 50mm. 端面上是直径

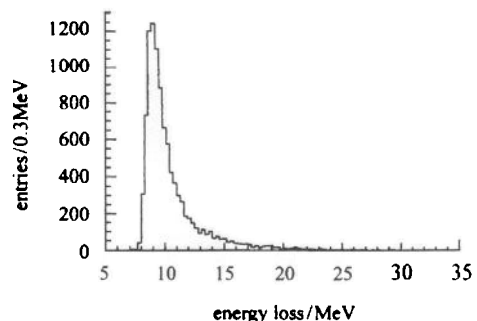


图 2 动量为  $1.5\text{GeV}/c$  的电子垂直穿过 5cm 厚闪烁体的沉积能量分布图

2003-04-25 收稿, 2003-06-05 收修改稿

\* 国家自然科学基金 (10175060) 资助

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

39mm 的圆柱形光电倍增管光阴极玻璃窗,它们之间有很薄的一层耦合物质。

图 2 是动量为 1.5GeV/c 的电子垂直穿过闪烁体的沉积能量分布图,可以看出大约每厘米沉积 2MeV 的能量。

### 2.2 荧光产生过程

GEANT4 的 G4Scintillation 类用来产生荧光。荧光在粒子通过闪烁体的路径上均匀产生,产生个数正比于粒子的能量损失。荧光的出射方向各向同性,出射时间遵循下式<sup>[4]</sup>:

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

其中  $\tau_1$  和  $\tau_2$  是快成分的两个时间衰减常数,  $\tau_3$  是慢成分的时间衰减常数,  $R$  是慢快成分的比值。待选择的闪烁体有 BC404 和 BC408,它们的基本参数见表 1<sup>1)</sup>。图 3 给出了它们的发射时间分布。可以看出 BC404 的荧光发射时间稍好一些,但它的光衰减长度较差。

表 1 闪烁体 BC404 和 BC408 的基本参数

	BC404	BC408
成分	Polyvinyltoluene	
折射率	1.58	
光输出/(%)	68	64
快成分上升时间 $\tau_1$ /ns	0.7	0.9
快成分下降时间 $\tau_2$ /ns	1.8	2.1
慢成分下降时间 $\tau_3$ /ns	14.2	14.2
慢快成分比 $R$	0.27	0.27
光衰减长度/cm	140	210
光最大波长/nm	408	425

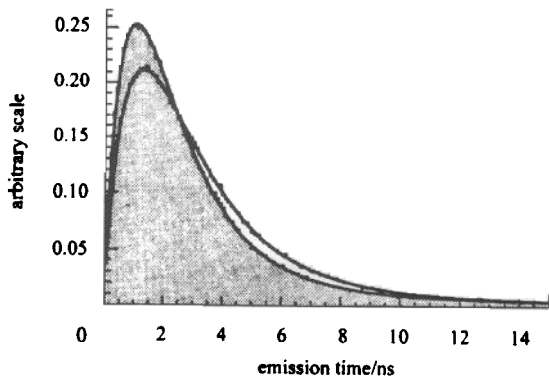


图 3 BC404 和 BC408 的荧光发射时间分布  
阴影为 BC404。

### 2.3 光传播部分

荧光在闪烁体内部经过折射和反射,最后有一部分到达光电倍增管光阴极。GEANT4 有 4 个类模拟光学光子的所有可能过程:光吸收过程 G4OpAbsorption,瑞利散射过程 G4OpRayleigh,边界过程 G4OpBoundaryProcess 和所有粒子的传输过程 G4Transportation;光吸收过程遵循指数衰减规律;边界过程的反射折射遵循菲涅耳能流反射折射公式<sup>[3]</sup>;闪烁体内的瑞利散射过程截面非常小,一般可忽略。这里的光传输有下面的性质:

如图 4 所示,记垂直于闪烁体末端面的方向为  $z$  方向。光沿  $z$  轴的分量始终不变,所以出射光子经

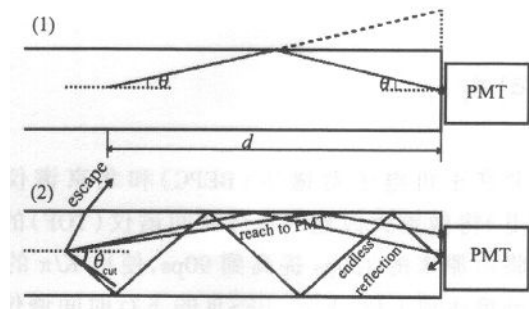


图 4 荧光在闪烁体中的传输图

过的距离满足

$$l_{\text{pro}} = (d + nL)/\cos\theta, \quad (2)$$

其中  $d$  是光子发射位置到出射端面的垂直距离,  $L$  是闪烁体的长度,  $n$  是光子在端面的反射次数。光传输时间为

$$t_{\text{pro}} = n_{\text{scint}} \frac{l_{\text{pro}}}{c},$$

$n_{\text{scint}}$  为闪烁体的折射率。

光在端面的入射角与发射角相等(见图 4(1)),所以存在一个截断角  $\theta_{\text{cut}}$ ,只有发射角小于它的光子才有可能从端面出来,  $\theta_{\text{cut}}$  满足下式

$$\theta_{\text{cut}} = \sin^{-1} \frac{n_{\text{couple}}}{n_{\text{scint}}},$$

$n_{\text{couple}}$  为与光电倍增管耦合物质的折射率,取直接耦合和硅油耦合两种情况比较,它们的折射率分别为 1 和 1.43。

光电倍增管接收到的光子传输距离如图 5 所示。可以看出有硅油的光子数是无硅油的 2.3 倍,

1) 这些参数可参阅文献[3],慢成分参数参阅文献[4],由于引文中只有 BC408 的慢成分参数,这里假设 BC404 的慢成分与 BC408 的相同。

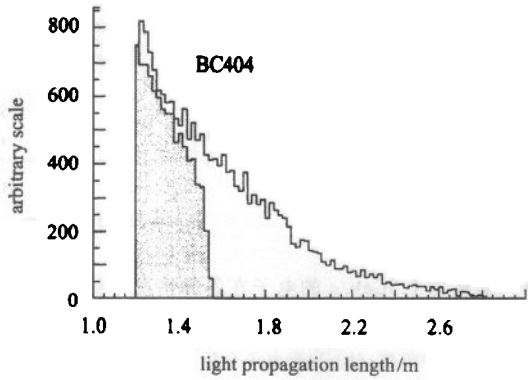


图 5 在闪烁体中心点处发射的到达光电倍增管的  
光子传输距离分布图(BC404)  
阴影部分为无硅油的情况,非阴影部分为有硅油的情况.无  
硅油的光子收集率为(2.54±0.06)%,加硅油的光子收集率  
为(5.9±0.1)%.

但由于截断角的增大,传输时间涨落也会增大.

### 2.4 光电倍增管响应

BES III 采用细网型光电倍增管(FM-PMT)R5924,它在 1Tesla 的磁场下工作电压为 2000V 时的增益可以达到  $2.5 \times 10^5$ ,光阴极的有效直径是 39mm,可以覆盖闪烁体端面面积的 40%. R5924 有着很好的时间特性,上升时间 2.5ns,渡越时间 9.5ns,渡越时间分散(TTS)的半高全宽 0.44ns<sup>[3]</sup>.

进入光阴极的一个光子以平均量子效率(BC404 是 0.224, BC408 是 0.213)乘以电子收集效率(0.6)的几率产生电脉冲. 光电倍增管采用阳极加正高压,阳极和最后一个倍增极差分输出的电路,它的单光电子响应的脉冲(见图 6(c))可由下式描述<sup>[6]</sup>:

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

其中

$$a = -(\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\gamma})/2, \quad (6)$$

$$b = -(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\gamma})/2, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{(R+Z)C + 2C_a R}{2CC_a RZ}, \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{1}{2CC_a RZ}. \quad (9)$$

增益系数  $G$  为高斯分布,中心值为光电倍增管的增益系数  $G_0$ ,宽度为  $G_0/\sqrt{N}$ ,  $N$  为光电倍增管第一倍增极产生的电子个数,取为平均值等于 10 的泊松分

布.  $C_c$  为电压转化因子.  $C_a$  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 200pF,负载  $Z$  为 50Ω,阻尼电阻  $R$  为 10kΩ. 为使谱形的上升时间为 2.5ns,取  $\sigma = 1.25$ ns.

光电倍增管的最后输出是这个事例中所有光电子脉冲信号的叠加,

$$V_{\text{PMT}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{pe}}} v_i(t - t_{\text{TT}} - (t_0)_i). \quad (10)$$

单光电子的时间

$$t_0 = t_{\text{dep}} + t_{\text{emit}} + t_{\text{pro}}, \quad (11)$$

其中  $t_{\text{dep}}$  为从粒子出射到沉积能量所用时间,  $t_{\text{TT}}$  为渡越时间. 图 6(a) 给出了一个事例的  $t_0$  的分布, (b) 给出了光电倍增管最后的脉冲形状.

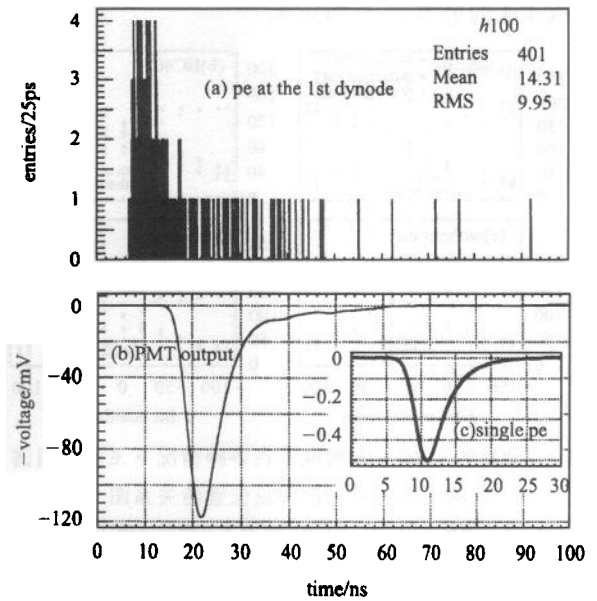


图 6 (a) 第一倍增极的光电子时间分布;(b) 光电倍增管输出的负电压信号;(c) 单光电子在光电倍增管的响应

### 2.5 信号读出

对每一个光电倍增管信号进行如下处理:取过阈值 30mV 的时刻为输出时间(TDC),电荷输出(ADC)为谱形下的面积除以电阻值. 每一个事例都有闪烁体前后端两个输出,两者组合可以得到更好的时间分辨.

## 3 模拟结果

为了选取最佳的闪烁体材料和耦合方式,这里模拟了多种可能的组合情况.

### 3.1 本征时间分辨率比较

对得到的前后端时间分别进行时间-电荷修正,得出各自的时间分辨率,用最简单的电荷加权平均法得到总的分辨率(这种方法只能反映击中点在闪烁体中心点附近的时间分辨,由图 7 可以看到击中点在靠近端面的总的结果并不好于单端的结果,如果要得到更好的结果,需要进行整体的刻度).图 7 给出了  $1.5\text{GeV}/c$  电子在各种情况下飞行时间谱仪的本征分辨与击中点位置的关系.可以看出击中点在闪烁体中心的时候,分辨率最差,此时 BC404 有硅油的情况下的分辨  $76\text{ps}$ ,BC408 为  $72\text{ps}$ ,没有硅油分辨率会差  $10-12\text{ps}$ .击中点越靠近两端分辨率越好,BC408 的下降趋势小于 BC404,当  $|z|$  大于  $40\text{cm}$  时 BC404 的分辨好于 BC408.

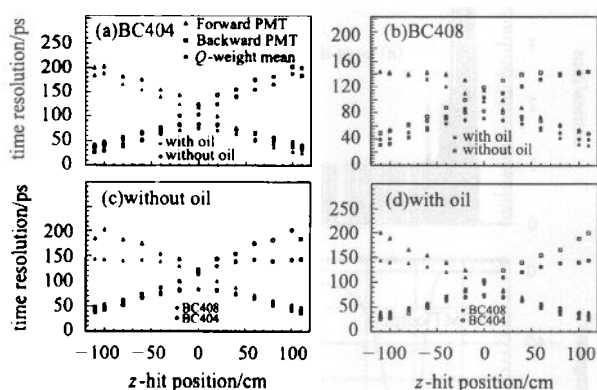


图 7 动量为  $1.5\text{GeV}/c$  的电子在各种情况下飞行时间谱仪的本征分辨与击中点位置的关系图

(a) BC404 有无硅油的比较;(b) BC408 有无硅油的比较;(c) 无硅油下 BC404 和 BC408 的比较;(d) 有硅油下 BC404 和 BC408 的比较.

### 3.2 脉冲幅度的比较

脉冲幅度对后面的电子学的设计也有指导作用,阈值的选取、放大电路需要与否都取决于幅度情况.

图 8 为  $1.5\text{GeV}/c$  电子在各种情况下脉冲幅度和光电子个数的情况,由(a)图可看出在击中点  $z$  大

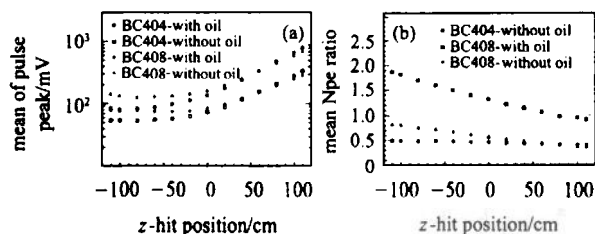


图 8 动量为  $1.5\text{GeV}/c$  的电子在各种情况下脉冲幅度和光电子个数(前向)随击中点位置的变化

(a) 为平均脉冲幅度;(b) 为光电子个数与相应击中位置的 BC404 有硅油情况的比值.

于 0 的情况下,随着  $z$  的增加,幅度会急剧增加;在  $z$  小于 0 后幅度基本没有变化.有硅油情况下的幅度总比没有硅油的大一倍,BC408 的幅度总体要高于 BC404.由图(b)可以看出 BC408 有硅油的情况产生的光子数最多,同时它的幅度和分辨率都是最好的.

## 4 结论

通过对飞行时间谱仪单块闪烁体的模拟,比较不同闪烁体材料及光电倍增管的耦合方式可以看出:击中点在中心点附近的本征时间分辨率 BC408 要好于 BC404,而在两端 BC404 好于 BC408,BC408 的脉冲幅度总高于 BC404;有硅油情况下的本征时间分辨率好于无硅油的情况,幅度也较大.

我们对飞行时间谱仪的整个物理过程的模拟是严格的,不同情况的比较结果在趋势上是正确的.同时与基于 GEANT3 的模拟结果比较,得到的结果也是一致的.尽管一些模拟参数的最后确定还依赖于实验的测试结果,但该模拟比较结果对 BES III TOF 系统的设计无疑具有可信的指导意义.

作者感谢北京高能所 BEPC 对该项目的支持,特别感谢王贻芳研究员、衡月昆副研究员的具体指导和有益的建议.

**参考文献 (References)**

- 1 Agostinelli S et al. N.I.M., 2003, **A506**: 250—303
- 2 Birks J W. The Theory and Practice of Scintillation Counting. London: Pergamon Press, 1964
- 3 BES III Collaboration. The BES III Detector (Draft). Beijing, 2002. 116—136
- 4 Nam J W, Choi Y I et al. N.I.M., 2002, **A491**: 54—68
- 5 Wright D H. Physics Reference Manual. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/PhysicsReferenceManual.pdf>, 2003. 182—188
- 6 Jones M. PMT Base Design for the CDF-II Time-of-Flight System. CDF Note 5358, 2000

**Single TOF Scintillation Counter Simulation Study with GEANT4\***ZHANG Li-Ming<sup>1)</sup> PENG Hai-Ping SHAO Ming ZHANG Zi-Ping CHEN Hong-Fang WU Jian

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract** Based on GEANT4, we simulated single TOF scintillation counter and got its intrinsic time resolution. By comparing two kinds of plastic scintillator material—BC404 and BC408 and different modes of coupling between the scintillator and PMT, we got their respective intrinsic time resolutions and pulse heights. Our simulation results will be an important reference for BES III TOF design.

**Key words** TOF, BES III, GEANT4, intrinsic time resolution

---

Received 25 April 2003, Revised 5 June 2003

\* Supported by NSFC(10175060)

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