

BES III 桶部电磁量能器优化设计的 Monte Carlo 模拟*

田 丁¹⁾ 卞建国 陈国明 陈和生

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 运用模拟软件 GEANT3 对铅加闪烁光纤类型的 BES III 桶部电磁量能器 (BSC) 进行了模拟. 研究表明, BSC 中簇射的时间信息的读出有助于改善 z 向分辨, π^0 的质量分辨和排除假光子. 模拟计算还给出了 BSC 能量分辨率 ($6\%/\sqrt{E}$), ϕ 方向角分辨与读出粒度的关系, π^0 质量分辨率 σ_m/m 与光输出、光纤衰减长度及读出粒度的关系, 其中 m 为两个光子重建为 π^0 的不变质量.

关键词 BES III GEANT3 BSC 模拟

1 引言

在将 BES 升级到 BES III 的计划中, 桶部电磁量能器 (BSC) 可借鉴 Φ 工厂^[1] 的模式. 但 Φ 工厂²⁾ 加速器与 BEPC 不一样, 我们有自己不同情况和物理目标, 因此有必要对 BSC 进行模拟, 以获得 BSC 一些基本性能参数, 供在设计与制造 BES III 的 BSC 时参考.

2 BSC 结构

模拟所用软件是 GEANT3^[2]. 所模拟的 BSC 在结构上与 Φ 工厂类似, 由 24 块截面为梯形的铅和闪烁光纤的混合体组成, 每一块厚度为 19.2cm, 上底宽 32.5cm, 下底宽 37.6cm, 长 385.0cm. 24 块探测物质构成一个正 24 边形, 其内切圆半径为 123.5cm, 外切圆半径为 142.7cm. 取样物质所用的闪烁光纤直径为 1.0mm, 长 385.0cm, 每一层光纤与梯形的上下底平行, 层间距为 1.20mm, 横向间距为 1.35mm, 且相邻层的光纤相互错开, 结构如图 1 所示. 由于实际需要, 模拟过程还考虑了每根光纤外包有 0.05mm 厚的胶水 (图中未画出). 平均来说, 1.33cm 厚的探测物质相当于一个辐射长度 (X_0), 密度为 $5.3\text{g}/\text{cm}^3$,

2001-02-20 收稿

* 国家自然科学基金(19675047)资助

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

2) 所有与 Φ 工厂有关的参考文献均来自文献[1]

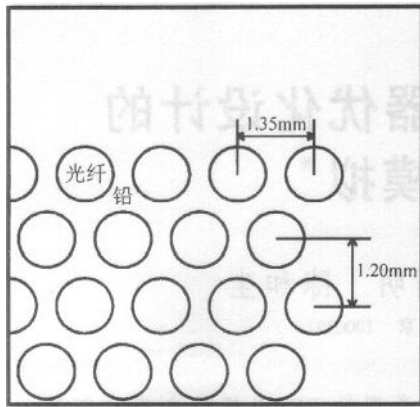


图 1 探测物质中闪烁光纤在铅中的位置

19.2cm 厚的探测物质相当于 $14.4X_0$, 有 160 层光纤.

光电倍增管读出分布在内外半径分别为 123.5cm 和 142.7cm 的圆环上, 每个读出所占的 $\Delta R, \Delta\phi$ (角度) 是一样的 (下文中的 $d\phi$ 为内切圆半径乘以 $\Delta\phi$).

3 模拟及数据分析过程

用单粒子过程对粒子与簇射探测器的相互作用进行模拟, 将取样物质中的能量沉积记录下来, 然后对其进行分析. 能量沉积的最小单元为 1cm 长的光纤, 记录其中沉积的能量 ΔE_i , 及其坐标 x_i, y_i, z_i (x_i, y_i, z_i 为最小单元的中心). 能量沉积处产生向光纤每一端发射的光子数由对参数为 $\Delta E_i \times L$ (L 为单位沉积能量的光输出) 的泊松分布独立抽样而得, 将其经过 e 指数衰减后得到传播到每根光纤末端的光子数. 分析主要基于这些光子数¹⁾. 分析考虑了光电倍增管无时间读出和有时间读出两种情况.

在无时间读出的情况下, 设两端两个对应的光电倍增管所收集到的光子数为 n_a, n_b , 根据光子 e 指数衰减的方式得到相应能量沉积的 z 方向坐标 $z_c = \frac{\lambda}{2} \ln \frac{n_a}{n_b}$, λ 为光纤的衰减长度. 根据 z_c 用 e 指数形式反推出能量沉积处所发射的光子数, 继而得到测量的沉积能量, 根据每个读出的位置中心和其相应的测量到的沉积能量, 可得整个簇射束团的总能量和能量加权平均重心 Z_c .

在有时间读出的情况下, 根据 Φ 工厂的结果, 探测器所得粒子在 z 方向的簇射重心 Z_c 服从正态分布 $N(Z_0, \delta Z)$, 其中 Z_0 为实际簇射重心,

$$\delta Z = v_c \cdot \delta t_0 \cdot \sqrt{\cosh(Z_0/\lambda)}, \quad v_c = 17.2\text{cm/ns}, \quad \delta t_0 = 34\text{ps}/\sqrt{E^0},$$

E^0 是单位为 GeV 的入射光子或电子的能量. 其余过程与无时间读出时相同.

最后, 每个过程的模拟事例数均为 2000, 如未作说明, 所用参数 $L = 30/\text{MeV}$, $\lambda = 3\text{m}$, $d\phi = 4\text{cm}$, $\Delta R = 5.4\text{cm}$. 读出的阈值取为两个光子.

4 结果与讨论

4.1 时间读出问题

对于无时间读出和有时间读出情况, 我们模拟了入射光子能量 $E_\gamma = 0.3\text{GeV}$, $\theta = 75^\circ$

1) 结论中 BSC 的厚度和考查时间读出对排除假光子的可能性两个部分所用的沉积能量和时间直接为 GEANT3 模拟软件所给出, 没有经过能量转换为光子和光子的衰减过程

时 BSC 所给出的簇射重心 z 方向位置分辨 σ_z , 分别为 7.2cm 和 1.1cm, 由此可见时间读出与否对 σ_z 的影响很大, 而 Z 的测量对能量的测量也有影响. 另外我们还考虑了无时间读出和有时间读出的情况下, π^0 质量分辨率 σ_m/m 与光纤的衰减长度的关系, 结果如图 2 所示. 从图中可看出, 有时间读出时的结果要好于无时间读出时的结果.

对于有时间读出的情况下, 我们还初步考查了时间读出对排除假光子的可能性. 这是因为在模拟过程中, 当用 π^+ 入射时, 发现有些最小单元的能量沉积的时间相对其它单元有较大滞后. 查其原因, 是由强子簇射劈裂 (split-off) 引起的, 也就是通常所说的假光子. 由于假光子产生信号的时间较晚, 所以可利用时间信号将其排除. 模拟动量为 $0.8\text{GeV}/c$ 的 π^+ 在 $\theta = 50^\circ$ 时的情况, 大约有 20% (只考查了 300 个事例) 产生 2MeV 以上 ($\sim E_\gamma \geq 20\text{MeV}$) 时间较晚的能量沉积. 如果时间读出的分辨能达到 1ns , 则基本上可将这些假光子信号排除掉. 对 π^- , K^+ 也有类似的情况, 而 e, μ 入射时基本上不产生假光子.

基于上述原因, 我们认为时间读出是必需的. 以下只考虑有时间读出的情况.

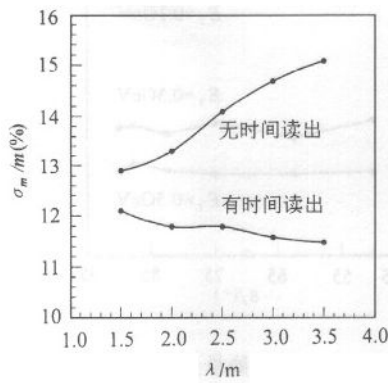


图 2 无时间读出和有时间读出情况下, π^0 质量分辨率与光纤衰减长度的关系

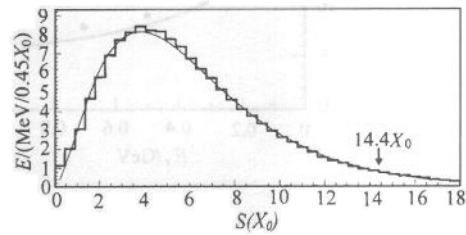


图 3 动量为 $1.5\text{GeV}/c$ 的电子在其前进方向簇射能量沉积分布

4.2 BSC 的厚度和能量分辨率

当电子入射动量为 $1.5\text{GeV}/c$, $\theta = 90^\circ$ 时, 图 3 给出了簇射能量沉积在电子前进方向的分布, 所用拟合曲线的函数形式为 $y = ax^b e^{-cx}$ (a, b, c 为可调参数^[3]). 从拟合的结果可得, 当 BSC 的厚度相当于 $14.4X_0$ 时, 电子 96.4% 的能量沉积在 BSC 中.

图 4(a)–(c) 分别给出了当 $\theta = 50^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, 厚度为 $14.4X_0$ 时能量分辨率随入射光子能量变化的曲线, 可看出结果与经验公式 $\sigma_E/E = C/\sqrt{E}$ (C 为能量分辨率常数, 即光子能量为 1GeV 时的能量分辨率) 符合很好, 从图中可知 C 在 6% 左右. 从 3 个图来看, 随着入射光子能量的增加, 探测器所给出的能量分辨率比经验公式从低能情况下所导出的要大. 由于 Φ 工厂所考虑过程中光子或电子的能量较低 ($< 0.3\text{GeV}$), 因此其根据低能情况下所导出的 C 为 5% 左右. 图 4(d) 给出了当光子能量为 $0.1\text{GeV}, 0.3\text{GeV}, 0.5\text{GeV}$ 时, 能量分辨率随 θ 变化关系. 从图中看出能量分辨率基本上与 θ 无关, 这与 Φ 工厂结果相符.

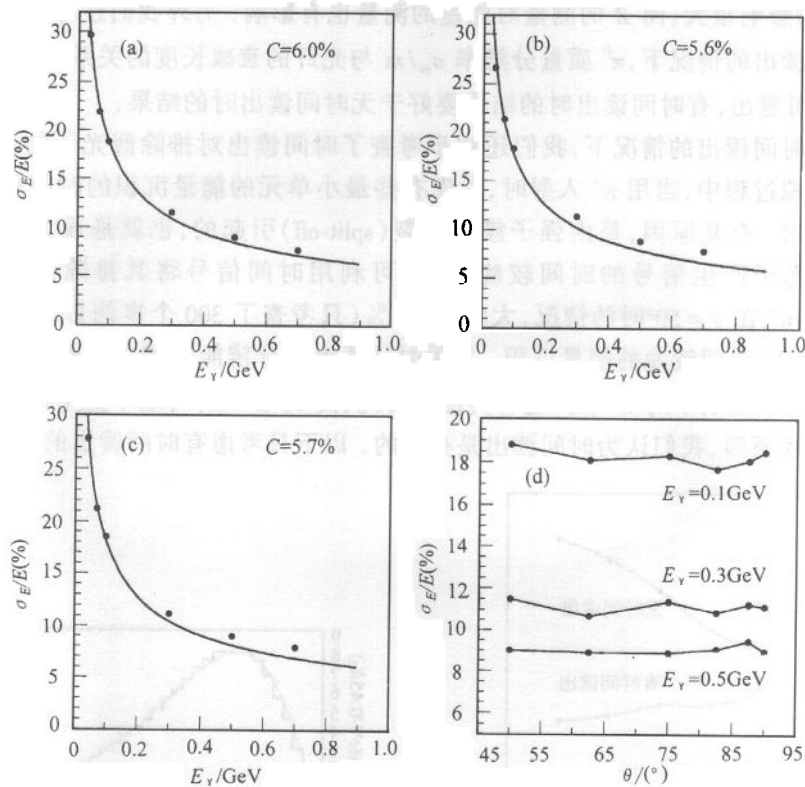


图 4 (a)一(c)分别对应光子入射角等于 $50^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时, 能量分辨率与入射光子能量的关系(图中 C 是能量分辨率常数); (d) 光子能量为 $0.1\text{GeV}, 0.3\text{GeV}, 0.5\text{GeV}$ 时, 能量分辨率与 θ 角的关系

4.3 ϕ 方向角分辨与读出粒度的关系

我们考虑了光电倍增管的两种读出排列方式: (1) 前一层读出单元在 ϕ 方向完全遮住后一层相应的读出单元(因为每个读出单元所占的 $\Delta\phi$ 相同). (2) 相邻读出层之间在 ϕ 方向错开半个读出单元. 图 5(a) 给出了在光子垂直入射时, 两种读出排列方式对应的 ϕ 方向角分辨 σ_ϕ 与 $d\phi$ 的关系. 图中上面两条曲线是 $E_\gamma = 0.05\text{GeV}$ 结果, 下面两条是 $E_\gamma = 0.3\text{GeV}$ 的结果. 从图中可看出第二种读出排列方式比第一种要好, 而且随着 $d\phi$ 的增大, σ_ϕ 的增加也比第一种要平缓. 图 5(b) 给出第二种读出排列方式中 σ_ϕ 与径向读出大小 ΔR 的关系. 从图中可知, 随 ΔR 的减小, ϕ 方向角分辨略有提高. 而第一种读出排列方式中 σ_ϕ 与 ΔR 无关, 当 ΔR 由 1cm 增加到 10cm 时, σ_ϕ 均为 6.3mr , 这个结论从逻辑上看也是合理的, 因为在第一种读出排列方式下, ΔR 的变化不能影响 ϕ 角的测量. 因此相邻两层的读出在 ϕ 方向应该错开半个单元.

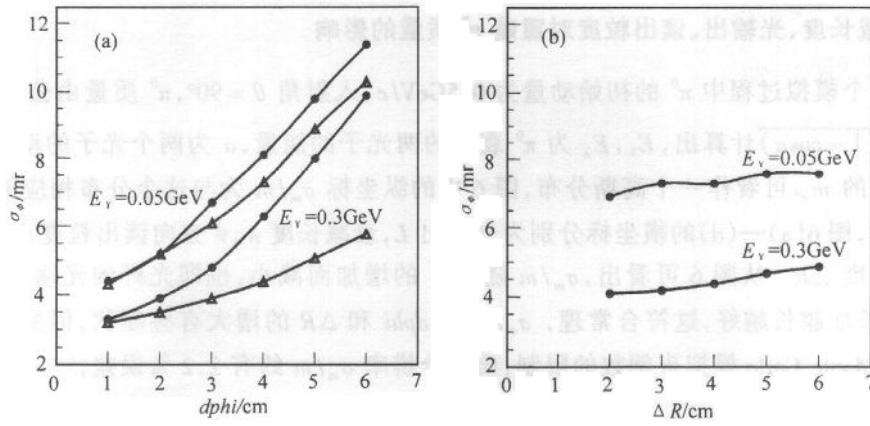


图 5 (a)光子能量为 0.05GeV 和 0.3GeV 时,两种读出排列所对应的 ϕ 角分辨与 $d\phi$ 的关系; (b)光子能量为 0.05GeV 和 0.3GeV 时,第二种读出排列所对应的 ϕ 角分辨与 ΔR 的关系
 ●第一种排列, \triangle 第二种排列.

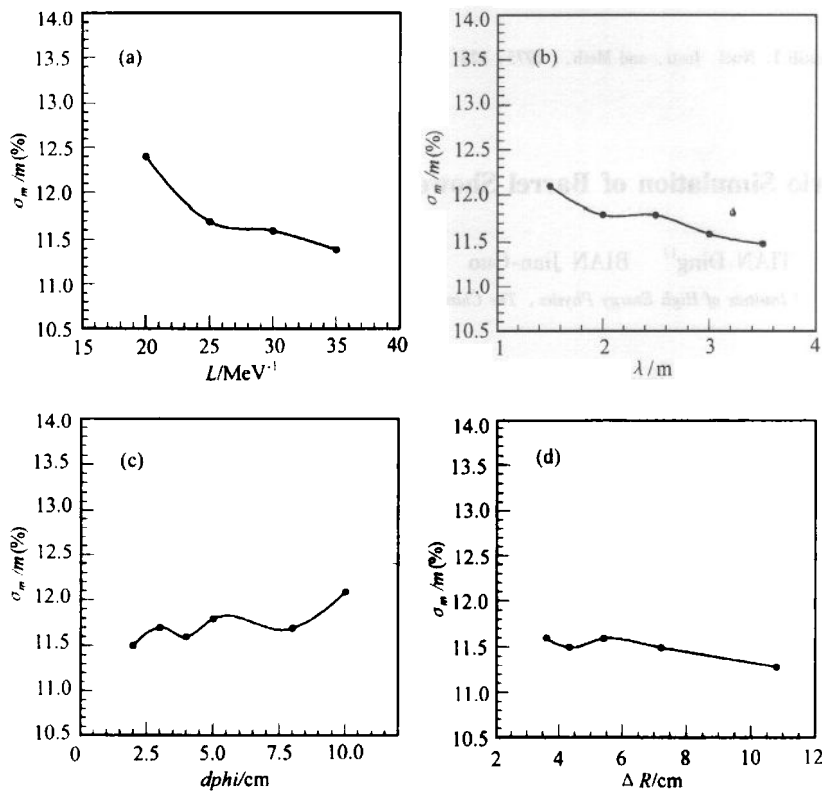


图 6 (a)–(d)分别对应 π^0 质量分辨率与光输出、光纤衰减长度、 $d\phi$ 及 ΔR 的关系

4.4 衰减长度、光输出、读出粒度对重建 π^0 质量的影响

在这个模拟过程中 π^0 的初始动量为 $0.5\text{GeV}/c$, 入射角 $\theta = 90^\circ$, π^0 质量由公式 $m_{\pi^0} = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos\alpha)}$ 计算出, E_1, E_2 为 π^0 衰变的两光子的能量, α 为两个光子的动量夹角. 这样得到的 m_{π^0} 可看作一个高斯分布, 图 6 中的纵坐标 σ_m/m 为与这个分布相应的 m_{π^0} 质量分辨率, 图 6(a)–(d) 的横坐标分别为光输出 L , 衰减长度 λ , ϕ 方向读出粒度 $dphi$, R 方向读出粒度 ΔR . 从图 6 可看出, σ_m/m 随 L, λ 的增加而减小, 也即光纤的光输出越大越好, 衰减长度越长越好, 这符合常理. σ_m/m 随 $dphi$ 和 ΔR 的增大有些起伏, 但变化不大. 另外, 受 Monte Carlo 模拟事例数的限制, 质量分辨率 σ_m/m 约有 2.2% 误差.

感谢吕军光教授和其他老师给予的建议和帮助.

参考文献 (References)

- 1 Lee-Franzini J. Status of DAΦNE and KLOE. In: I. Maiani, G. Panzeri, N. Paver. The Second DAΦNE Physics Handbook, volume II. Italy: SIS-Pubblicazioni dei Laboratori Nazionali di Frascati, 1995. 779–792
- 2 See R Brun et al. The BSC Detector Simulation is Based on GEANT Version 3.21. GEANT 3, CERN DD/EE/84-1 (Revised), 1987
- 3 Longo E, Sestili I. Nucl. Instr. and Meth., 1975, 128(2):283–307

Monte Carlo Simulation of Barrel Shower Counter of BES III for Better Design*

TIAN Ding¹⁾ BIAN Jian-Guo CHEN Guo-Ming CHEN He-Sheng

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract With GEANT3 frame, we simulate the lead-scintillating fiber type barrel shower counter (BSC) of BES III. The structure of BSC in the simulation is analogous to Φ Factory's, and its thickness is $14.4X_0$. The simulations show that the shower time information read-out is necessary for improving the Z spatial resolution, the π^0 invariant mass resolution and for rejecting fake photons. Also, the energy resolution $\sigma_E/E (= 6\%/\sqrt{E})$, the relation of ϕ angle resolution σ_ϕ with readout granularity and the relations of mass resolution of π^0 σ_m/m with light yield, attenuation length, readout granularity are given, where m is the invariant mass of π^0 reconstructed by two photons.

Key words BES III, GEANT3, BSC simulation

Received 20 February 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19675047)

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