

BES III 晶体量能器设计中的蒙特卡罗研究*

刘春秀¹⁾ 傅成栋 周莉 张勤俭 夏小米 赖元芬 李金 方建
陈沅 蔡啸 尚雷 王曼 吕军光 王贻芳

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在 BES III 晶体量能器的设计、研制过程中,利用 7×7 CsI 晶体探测单元的模拟程序,对其性能做了精细的蒙特卡罗研究. 给出了与非相干噪声、能量线性、晶体光输出均匀性、位置依赖等相关的模拟结果.

关键词 晶体量能器 能量分辨 位置分辨 能量线性 光输出均匀性

1 引言

在北京谱仪上^[1],电磁量能器起着非常重要的作用,其主要功能是精确测量电子或光子的能量和位置. 在包含 π^0 (π^0 衰变成两个 γ) 衰变的 J/ψ , $\psi(2s)$ 和 D 介子的重建中 γ 的精确测量是非常重要的. 还有一些其他包含直生 γ 的衰变,例如 $\chi_{c0,c1,c2}(1P) \rightarrow \gamma J/\psi$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c(1s)$. 若要求 MDC 中测量的动量与 CsI 晶体量能器中测量的能量基本相等,可以将 e^+ 和 π^+ 分开. 这是因为电子的能量几乎 100% 被电磁量能器吸收,而 π^+ 只有一部分能量沉积在量能器中. 电子的分辨对于研究 D 介子的半轻子衰变道是很重要的.

BES III 采用 CsI(Tl) 晶体构造电磁量能器,其规模从物理上基本要求是:桶部半径 93cm、长 3.4m,端盖内半径 50cm、外半径与桶部匹配,晶体重量约 28t. 从各方面的综合原因,确定晶体的长度为 28cm ($15X_0$) 时,还存在许多设计方案的问题,如何选择晶体的横向截面,其除影响能量分辨和位置分辨外,还涉及到信号的通道数(价格). 文献[2]对 CsI 晶体量能器性能优化的研究表明,当 CsI 晶体采用典型尺寸为 28cm 长,前端截面 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$,后端截面 $6.5\text{cm} \times 6.5\text{cm}$ 时,BES III 量能器的性能是优化的.

另外,CsI 晶体为一软质晶体,由于折射率为 $n = 1.83$,与普通的光探测窗口 ($n = 1.5$) 不相匹配,因此晶体表面,除输出窗口都采用毛光面,外表也包装漫反射反光材料,达到更好的光输出. 由于晶体形状为契形,加上晶体表面、内部杂质、缺陷,光均匀性已经是不均匀的,但可以人为单独调试,减少局部光反射,改善均匀性. 物理上如何要求光输出均匀性,其影响如何? 本文以模拟的方式回答量能器的性能,给出了设计参考.

在 BES III 的设计、研制过程中,更加详细地了解量能器的性能是非常必要的. 鉴于此,本文基于建立在国际高能物理广泛采用的探测器模拟程序包 GEANT 3^[3] 之上的 7×7 CsI 晶体阵列的探测单元的模拟程序,对量能器的性能做了进一步细致地研究.

2 晶体量能器的性能

描写量能器性能的主要参数是能量分辨和位置分辨. 在 BES III 设计中,不可能通过做比例实验研究晶体量能器的性能,只能用蒙特卡罗模拟的方法深入了解其性能. 在实验上,量能器测量的沉积能量除粒子簇射能量外,还有电子学噪声和束流低能本底,这些噪声无法进行现实模拟. 根据 Belle 和

2003-07-15 收稿,2003-09-18 收修改稿

* 国家杰出青年科学基金(10225524)资助

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

BaBar 的实验结果, 单纯晶体探测器的静态噪声较小, 约为 220keV, 但在束流对撞环境中加速器的干扰、束流丢失在探测器环境周围的硬物质形成的簇射背景更为主要, 约为 0.5MeV. 在模拟中直接引用, 不做仔细地模拟研究. 然而, 噪声的存在直接影响量能器对较低能量光子或电子的探测, 因此本文重点研究了能量阈值取噪声的几倍时, 能够得到最好的能量分辨. 然后, 在噪声为 0.5MeV 时取优化的能量阈值对其他的性能, 如能量分辨的位置依赖、能量线性、晶体的纵向光输出不均匀性对能量分辨的影响以及位置分辨等做了详细地模拟研究.

2.1 能量分辨

由于晶体量能器簇射能量的泄漏, 重建的能量 E_{cal} 分布有一个低能尾巴, 分布的标准偏差对能量分布的宽度不能给出很好的估计, 因此能量分辨(称为本征分辨)用拟合能量分布的函数的半高宽来计算.

E_{cal} 的分布有一个不对称的形式, 它可以用正规的函数拟合^[4], 此函数为

$$f(\epsilon) = N \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_0^2} \ln^2\left(1 - \frac{\epsilon - \epsilon_p}{\sigma_E} \eta\right) - \frac{\sigma_0^2}{2}\right), \quad (1)$$

其中 ϵ 是沉积能量, ϵ_p 是最可几能量, η 是描写分布的不对称参数, N 是归一化因子. 能量分辨 σ_E 用分布的半高宽定义为

$$\sigma_E = \frac{FWHM}{\xi}, \quad (2)$$

$$\xi = 2\sqrt{\ln 4} \approx 2.355, \quad (3)$$

σ_0 用 η 表示为

$$\sigma_0 = \frac{2}{\xi} \sinh^{-1}\left(\frac{\eta\xi}{2}\right). \quad (4)$$

2.2 能量分辨对能量阈值的依赖

图 1 给出了 7×7 CsI 晶体阵列中能量沉积大于不同能量阈值的晶体数随单光子能量的变化. 显然这一数值依赖于入射单光子的能量, 低能时有明显能量沉积的晶体数远小于 25. 如果把没有明显能量沉积的晶体去掉, 预计低能光子的能量分辨能够得到改善. 于是, 将 7×7 阵列中每块晶体的能量沉积按降序排列, 前 n 个参与能量求和. 研究了不同能量单光子的能量分辨与求和晶体数目的关系, 结果如图 2 所示. 由图 2 可见低能光子的能量分辨随计数的增加开始变差, 这是由于随着参与能量求和的

晶体数的增加噪声的影响增大. 光子能量大于 100MeV 时噪声的贡献较小, 当参与求和的晶体数小于 10 时, 由于簇射泄漏能量分辨又变差.

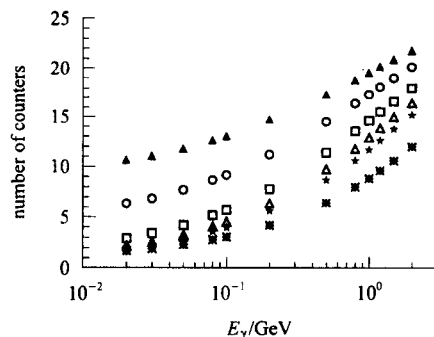


图 1 能量沉积大于能量阈值的晶体数随入射单光子能量的变化

能量阈值分别为 \blacktriangle 0.2MeV, \circ 0.5MeV, \square 1MeV, \triangle 1.5MeV, \star 2MeV, $*$ 4MeV.

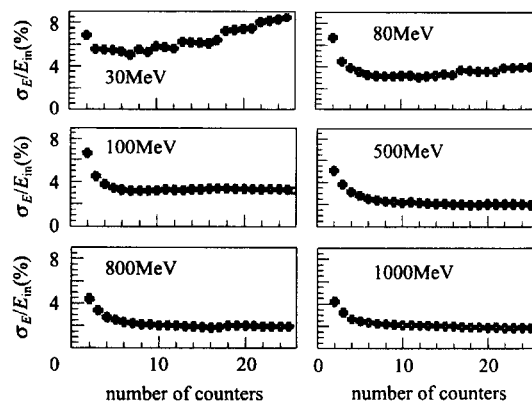


图 2 能量分辨对参与能量求和的晶体数的依赖 (叠加 0.5MeV 的噪声, 不设置能量阈值)

为了决定最优的能量阈, 图 3 给出了噪声分别为 $\sigma_{\text{noise}} = 0.3\text{MeV}, 0.5\text{MeV}$ 和 0.7MeV 时能量分辨对能量阈值的依赖. 结果表明阈值大约为 $2.5\sigma_{\text{noise}}$ 时, 能量分辨最好.

下面分别用两种方法给出了 3×3 和 5×5 矩阵确定能量, 噪声为 0.5MeV 时, 单光子的能量分辨. 一种是总能量和(不设置能量阈), 第二种是只将大于能量阈值的能量求和. 图 4(a) 和 (b) 给出了分析结果. 图中空心圆点是能量阈值为 1.25MeV 的能量分辨. 若不设置能量阈值, 在能量大于 100MeV 的较高能区, 5×5 的能量分辨比 3×3 的好, 这是由于 5×5 尽可能多的包含了光子簇射能量; 而在能量低于 30MeV 能区 5×5 能量分辨反而较差, 这是由于低能时噪声的贡献很大. 低能区的这种情形可以用优化的能量阈值得到改善. 由图 3 可以看到对于能

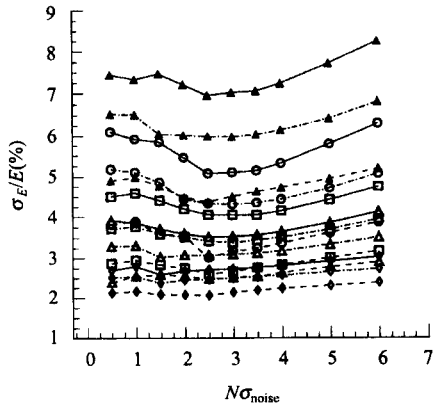


图 3 不同能量单光子的能量分辨对能量阈值的依赖
横坐标是噪声标准偏差的倍数;实线、点划线和虚线分别表示叠加
0.7MeV、0.5MeV 和 0.3MeV 的噪声;单光子能量分别为 ▲30MeV,
○50MeV, □80MeV, △100MeV, ◇200MeV.

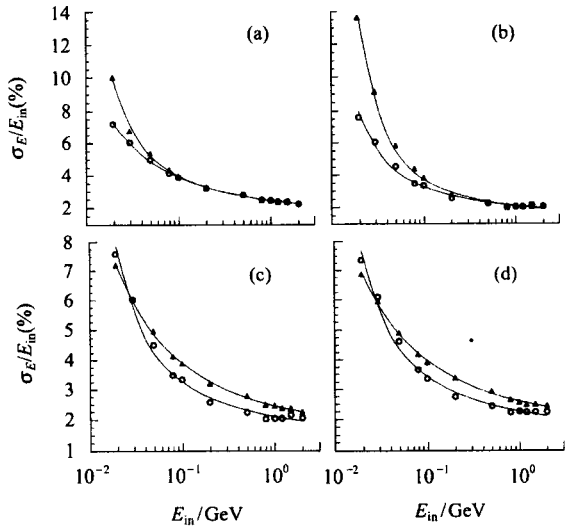


图 4 噪声信号为 0.5MeV 时单光子能量分辨随能量的变化
(a)和(b)分别是 3×3 和 5×5 的结果, ▲表示不设置能量阈值,
○能量阈值为 1.25MeV; (c)和(d)能量阈值为 1.25MeV 时的能
量分辨,其中(d)考虑了 1% 的刻度不确定性, ▲和○分别表示
3×3 和 5×5 的结果, (c)中实线分别是(5)和(6)式的拟合结果,
(d)中实线分别是(7)和(8)式的拟合结果.

量小于 100MeV 的光子, 能量阈值大于 1.25MeV 时
能量分辨变差. 当光子能量大于 200MeV 时, 能量分
辨对能量阈值不敏感. 在 BES III 的物理能区, 即光
子能量从 20MeV 到 2GeV 的范围, 如果有 0.5MeV 的
噪声, 1.25MeV 的能量阈值似乎是最优的. 噪声影
响、能量分辨如预期的一样降低了.

图 4(c) 给出了每块晶体叠加 0.5MeV 的噪声,
能量阈值取 1.25MeV 时能量分辨随单光子能量的
变化. 图中的实线是如下函数的拟合, 其中 ⊕ 表示
平方求和. 对于 3×3 矩阵,

$$\sigma_E/E = (0.018/E \oplus 0.814/\sqrt[4]{E} \oplus 1.340) \% ; \quad (5)$$

对于 5×5 矩阵,

$$\sigma_E/E = (0.034/E \oplus 0.697/\sqrt[4]{E} \oplus 1.270) \% . \quad (6)$$

比较函数(5)式与(6)式表明拟合函数的第一项反应
了电子学噪声的影响, 能量簇射涨落反应在第二项,
泄漏涨落反应在第三项中.

为了模拟能量刻度对能量分辨的影响, 引入
1% 的能量刻度不确定性, 得到能量分辨随单光子
能量的变化如图 4(d) 所示. 图中实线分别为:

对于 3×3 矩阵,

$$\sigma_E/E = (0.015/E \oplus 0.794/\sqrt[4]{E} \oplus 1.422) \% ; \quad (7)$$

对于 5×5 矩阵,

$$\sigma_E/E = (0.032/E \oplus 0.696/\sqrt[4]{E} \oplus 1.343) \% . \quad (8)$$

比较函数(5)与(7)式或(6)与(8)式, 看到能量刻度
的不确定性包含在拟合函数的第三项中.

2.3 能量分辨对位置的依赖

纵向垂直位置 Y_{in} 固定在晶体的中心, 用
800MeV 的单光子扫描横向水平位置的 21 个作用
点. 对于 21 个不同位置, 沉积能量的峰值如图 5(a)
所示. 结果表明约 97% 的光子能量包含在 5×5 的

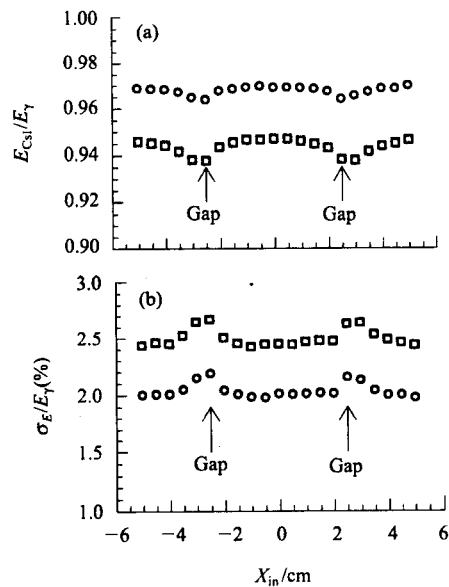


图 5 对于 $E_\gamma = 800\text{MeV}$ 单光子 (a) 能量沉积对位置的
依赖, (b) 能量分辨对位置的依赖
○和□分别是 5×5 和 3×3 的结果.

晶体矩阵中,对于 21 个不同位置,能量沉积的差值大约在 1% 以内,这一差别对于 3×3 是一样的. 两晶体间隙的效应,即能量沉积降低的效应比较明显. 图 5(b) 给出了能量分辨对单光子作用点横向水平位置的依赖,很显然能量分辨在晶体间隙附近变差,约升高 0.3%.

2.4 能量线性

在 BES III 的整个物理能区,若假设对所有能量的响应均一致,那么 CsI 晶体量能器的能量线性是非常重要的. 下面在 20MeV 到 2GeV 的能量范围内研究 CsI 量能器能量响应的线性. 能量线性定义为 $E_{\text{CSI}}/E_{\text{in}}$,它随单光子能量 E_{in} 的变化如图 6(a) 所示. 其中 E_{25} 和 E_9 分别是 1.25MeV 能量阈值时 5×5 和 3×3 矩阵的能量和. 由于簇射能量泄漏,在整个的能量范围 E_{25} 小于 E_{in} , E_9 比 E_{25} 小 2%. 在较高能区从晶体后端的簇射泄漏为主,造成 E_{CSI} 与 E_{in} 有较大的偏离.

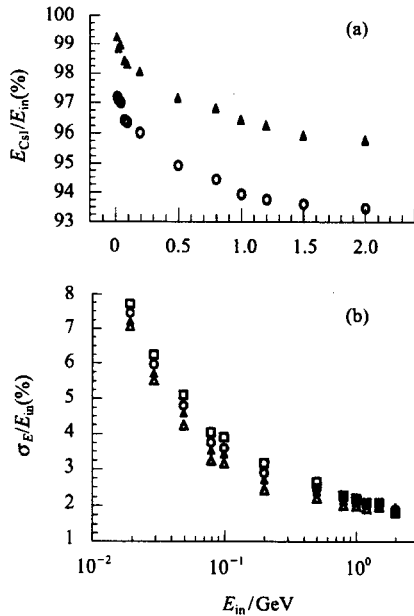


图 6 能量阈值为 1.25MeV 时, (a) 能量线性 $E_{\text{CSI}}/E_{\text{in}}$ 随单光子能量的变化

▲和○分别表示 E_{25} 和 E_9 ;

(b) 晶体纵向光输出的不均匀性对能量分辨的影响
其中光输出不均匀性分别为 \triangle , \blacktriangle , \circ , \square 15%.

2.5 光输出不均匀性的影响

晶体光输出均匀性与晶体的几何和表面处理有关,实验中有对均匀性晶体质量的验收标准. 这一验收指标需参考蒙特卡罗模拟结果给出. 于是,为

了估计沿晶体长轴 (z 轴) 的光输出不均匀性对能量分辨的影响,假设光输出不均匀性 U 为 5%, 10% 或 15%. 光输出不均匀性定义为

$$U = \frac{\text{maximum} - \text{minimum}}{\text{average}}. \quad (9)$$

在蒙特卡罗模拟中,第 i 块晶体的沉积能量 E_i 表示为

$$E_i = \sum_{\text{all hits}} E_{\text{hit}}(z)(1.0 + U/L_{\text{CsI}} \times z), \quad (10)$$

其中 L_{CsI} 是晶体的纵向长度, $E_{\text{hit}}(z)$ 簇射击中点在晶体纵向位置 z 处的沉积能量,晶体的前端位置定为 $z = 0\text{cm}$. 光输出不均匀性对能量分辨的影响如图 6(b) 所示. 结果表明光输出不均匀性对低能光子能量分辨影响较大,对较高能量光子能量分辨的影响较小. 模拟中簇射产生的光子、电子寻迹的最小能量为 0.5MeV (GEANT 参数 $\text{CUTGAM} = \text{CUTELE} = 0.5\text{MeV}$). 每一步寻迹的能量沉积都以不均匀性权重,然后求和得到每块晶体的能量沉积,最后叠加 0.5MeV 的非相干噪声.

2.6 位置分辨

单光子的位置用簇射重心 X_{cg} 计算,

$$X_{\text{cg}} = \frac{\sum_i x_i E_i}{\sum_i E_i}, \quad (11)$$

其中 x_i 和 E_i 分别是第 i 块晶体中心的位置和能量沉积. 簇射的重心 X_{cg} 对单光子作用点 X_{in} 的散点图如图 7(a) 所示,这里取 3×3 矩阵计算单光子的位置. 在晶体的中心和两晶体的间隙 X_{cg} 给出了正确的位置,但是在其他位置显示出了系统漂移. 为了修正这一系统效应,使用描写 X_{in} 和 X_{cg} 关联的简单的经验公式

$$X_{\text{in}} = X_{\text{cg}} - [C_1 \arctg(C_2 X_{\text{cg}}) + C_3 X_{\text{cg}}], \quad (12)$$

其中 C_1 , C_2 和 C_3 是拟合参数. 修正后 X_{in} 和 X_{cor} 的散点图如图 7(b) 所示,图 7(a) 中的系统漂移基本被消除. 用双高斯函数拟合 $X_{\text{cor}} - X_{\text{in}}$ 分布,由拟合函数半高宽得到修正后的位置分辨. 图 7(c) 给出了 800MeV 光子的位置分辨随入射光子作用点位置 X_{in} 的变化,结果表明两晶体间隙附近的位置分辨得到改善. 对不同的击中位置求平均得到位置分辨大约为 6.3mm.

图 7(d) 给出了平均位置分辨随单光子能量的变化. 其中实线是如下函数的拟合,拟合函数为

$$\sigma_x(\text{mm}) = 1.718 + 0.057/\sqrt{E} + 4.279/\sqrt[4]{E}, \quad (13)$$

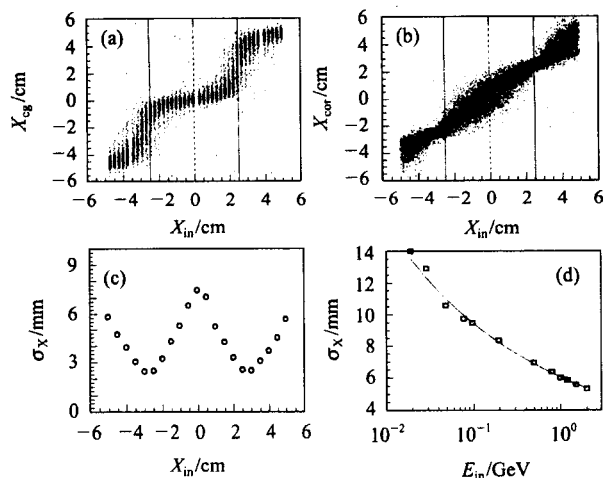


图7 (a)修正前和(b)修正后 X_{in} 和 X_{cg} (X_{cor}) 的散点图
(垂直实线标记晶体间隙, 虚线标记晶体的中心);
(c)800MeV 单光子的空间分辨对位置的依赖;
(d)平均位置分辨对能量的依赖

其中 E 的单位是 GeV.

3 总结

基于 7×7 CsI 晶体阵列探测单元的模拟程序, 利用能量范围从 20MeV 到 2GeV 的单光子研究了 BES III 晶体量能器的性能. 当用 5×5 矩阵对沉积能量求和时, 1GeV 单光子的能量分辨约为 2.1%. 而且蒙特卡罗的模拟研究还表明取能量阈值约为噪声信号的 2.5 倍时, 低能光子的能量分辨能够得到改善. 当 800MeV 光子入射作用点在两晶体间隙时能量沉积约降低 1%, 能量分辨约升高 0.3%. 800MeV 光子的平均位置分辨约为 6.3mm. 本文的蒙特卡罗模拟结果与 Belle 的束流实验结果^[4] 定性上是一致的, 这能很好地验证本文模拟结果的可靠性.

参考文献 (References)

- 1 BAI Jing-Zhi et al. Nucl. Instrum. Methods, 1994, **A344**:319
- 2 LIU Chun-Xiu et al. HEP & NP, 2003, **27**(12):1114(in Chinese)
- 3 Application Software Group. GEANT User's Guide, Program Library W5013. CERN, 1993
- 4 Ikeda H et al. Nucl. Instrum. Methods, 2000, **A441**:401

Monte Carlo Study of Performance of BES III CsI Crystal Calorimeter*

LIU Chun-Xiu¹⁾ FU Cheng-Dong ZHOU Li ZHANG Qin-Jian XIA Xiao-Mi
LAI Yuan-Fen LI Jin FANG Jian CHEN Yuan CAI Xiao SHANG Lei
WANG Man LÜ Jun-Guang WANG Yi-Fang
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract In the process of design and research of BES III crystal calorimeter, we made a detailed Monte Carlo study for the performance of BES III CsI crystal calorimeter on the basis of the detection cell of 7×7 CsI matrix. Results are presented on incoherent noise, on energy linearity, on uniformity of the crystal light output, on position dependence. Those results show that the energy resolution of the 5×5 matrix sum is about 2.1% for 1 GeV photon and the best energy resolution of the lower energy photon is obtained with the energy threshold of $2.5 \sigma_{noise}$. The energy deposit in the matrix decreases by about 1% and the energy resolution degrades by about 0.3% when 800MeV photons are injected in the gap region between two crystals. The average position resolution is about 6.3 mm at 800 MeV.

Key words crystal calorimeter, energy resolution, position resolution, energy linearity, uniformity of light output

Received 15 July 2003, Revised 18 September 2003

* Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (10225524)

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