

## BES III CsI 晶体量能器设计中的优化\*

刘春秀<sup>1)</sup> 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,对其性能进行蒙特卡罗研究,从而优化设计方案。

**关键词** 晶体量能器 能量分辨 位置分辨 探测效率

### 1 引言

在北京谱仪上<sup>[1]</sup>,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.描写量能器性能的主要参数是能量分辨和位置分辨. BES III 电磁量能器由 CsI(Tl)晶体构建,它的能量分辨率的主要因素可以用公式

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{EC}^2 + \sigma_{rl}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{PD}^2 + \sigma_{cal}^2} \quad (1)$$

表示,其中  $\sigma_{EC}^2$  为量能器本征的能量误差,主要依赖于入射粒子能量沉积的涨落,及信号产生或转换过程的涨落; $\sigma_{rl}^2$  为簇射过程中的能量泄漏误差,包括能量在量能器之前和内部“死区”的物质层中吸收和闪烁晶体之后的能量泄漏涨落、系统的非均匀性等; $\sigma_{noise}^2$  为量能器读出电子学的等效能量噪声及高亮度下沉积能量堆积的误差等; $\sigma_{PD}^2$  为闪烁晶体之后的簇射泄漏粒子在光电读出器件上产生的等效能量信号的误差; $\sigma_{cal}^2$  为刻度误差.主要考虑优化簇射过程中能量泄漏对总能量误差的影响,其中总能量误差已经包含了确定噪声和光电读出器件上产生的等效能量信号的误差,而没有考虑刻度误差的影响,这是因为文献[2]的研究已表明刻度误差的贡献相对较小.

位置分辨主要由电磁簇射的横截面大小决定.电磁簇射横截面的轮廓尺寸用 Molière 半径  $R_M$  表

示,与纵向尺寸一样用辐射长度  $X_0$  标度,定义为<sup>[3]</sup>

$$R_M = \frac{E_s}{E_c} X_0, \quad (2)$$

其中  $E_s = m_e c^2 \sqrt{4\pi/\alpha} = 21.2 \text{ MeV}$ ,  $E_c \sim 610/(Z + 1.24) \text{ MeV}$  为临界能量.对于 CsI 晶体  $R_M = 3.8 \text{ cm}$ .小截面尺寸的 CsI(Tl)晶体具有更好的位置分辨,但当截面尺寸远小于  $R_M$  时,一个电磁簇射将分配到很多晶体上,能量在众多晶体之间的吸收增多,能量泄漏增加,同时电子学噪声会由于众多电子学通道数增加而增大,因而能量分辨率变差. BES III 选择梯形长方体 CsI(Tl)晶体,一般选择具体的  $R_M$  作为其截面尺寸,具体数值则通过蒙特卡罗优化.本文讨论了晶体探测器的能量分辨、位置分辨、光子探测效率随具体晶体截面尺寸的变化,并综合考虑了性能、价格等因素给出最优选择.

BES III 晶体量能器的设计、研制过程中,如何根据实际情况设计一个优化的方案是一个必须认真研究的问题.对这个问题的回答有两个途径,一个是通过相关实验来验证不同的设计方案,这不仅耗资大,而且完成实验需要的时间也很长,这是设计过程中所不允许的.另一个途径就是用蒙特卡罗方法对不同设计方案进行模拟研究,这样可以在最短的时间内验证设计方案的优劣.本文就是采用后者来研究 BES III 晶体量能器的性能优化.

2003-06-16 收稿

\* 国家杰出青年科学基金(10225524)资助

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

## 2 晶体量能器性能的优化

簇射能量的泄漏主要与选择的晶体长度有关,其中晶体之间的能量损失由反射材料的选材控制,但影响较小,晶体之间若存在支撑结构,支撑结构的选材及其厚度直接影响簇射能量的泄漏程度.

为了尽可能减小簇射能量泄漏造成的能量误差,做了如下的模拟研究.

### 2.1 建立模拟程序

为了完成晶体量能器性能的蒙特卡罗模拟,首先利用 GEANT3.21<sup>[4]</sup> 模拟  $7 \times 7$  CsI 晶体阵列的探测单元,阵列中每块晶体包装了  $200\mu\text{m}$  厚的聚四氟乙烯(Teflon)漫反射层和  $25\mu\text{m}$  的铝(Al)膜,在其后端放置了  $300\mu\text{m}$  厚、截面为  $2 \times 2\text{cm}^2$  的硅片(模拟硅光二极管).按距离 CsI 晶体探测单元由近及远的顺序放置的物质层为:2mm Al(模拟量能器内桶)、2cm 的空气、10cm 塑料闪烁体(模拟飞行时间计数器 TOF)、1cm Al(模拟主漂移室 MDC 外桶)、80cm 空气(模拟漂移室).每块晶体的尺寸为:24cm 长,前端截面为  $4 \times 4\text{cm}^2$ ,后端截面为  $5 \times 5\text{cm}^2$ .为了便于量能器设计方案中参数(例如晶体尺寸,包装 CsI 晶体的材料等)的调整,模拟程序中涉及的参数都可以在 GEANT 输入卡中设置.于是,基于此模拟程序可以对各种因素如何影响 BES III CsI 晶体量能器的性能做细致的模拟研究,从而优化设计方案.

### 2.2 桶部晶体排列方向和晶体小单元隔墙对能量分辨的影响

当 BES III 电磁量能器选用的 CsI(Tl) 晶体的尺寸为小端截面  $4 \times 4\text{cm}^2$ ,大端截面  $5 \times 5\text{cm}^2$ ,长为 24cm( $13X_0$ )时,研究了量能器桶部晶体的排列方向和晶体小单元隔墙对能量分辨的影响.在如下的模拟研究中,已考虑了簇射泄漏粒子在晶体后端硅光片上产生的等效能量信号(其中取等效 CsI(Tl) 晶体的能量因子为 40),同时每块晶体的能量沉积叠加  $0.5\text{MeV}$  高斯分布的非相干噪声信号,然后对大于阈值  $0.5\text{MeV}$  的沉积能量求和得到光子的能量.

#### 1) 晶体在 $\theta, \phi$ 方向指向中心线的偏移

若桶部晶体的支撑结构采用模块式,即每 8 块晶体安装在有隔墙的小单元内.当隔墙材料选用  $400\mu\text{m}$  的碳纤维(C)或  $500\mu\text{m}$  铝(Al)时,模拟能量分

辨随入射单光子作用点的变化,结果表明当作用点远离晶体中心时能量分辨较差,这是由于当作用点靠近小单元隔墙时晶体间的能量泄漏增加造成的.但当选用不同材质的隔墙时能量分辨的差别不大.于是,选用  $500\mu\text{m}$  的 Al 隔墙时,研究入射单光子方向偏离晶体轴线的角度对能量分辨的影响.图 1 给出了单光子的入射方向偏离晶体轴线分别为  $3^\circ, 1.5^\circ, 0.5^\circ, 0^\circ$  时,能量为  $500\text{MeV}$  或  $800\text{MeV}$  单光子的能量分辨随作用点到晶体中心距离  $Z(\text{cm})$  的变化.由图 1 可见能量分辨随  $Z$  的增加而变差,而且能量分辨由于光子入射方向偏离晶体轴线的角度不同而不同, $3^\circ$  时能量分辨最好, $0^\circ$  时能量分辨较差.这是由于当偏移角度为  $0^\circ$  时,晶体间的能量泄漏较大.因此,为了减少晶体间簇射能量的泄漏,要求 BES III 晶体量能器桶部的每块晶体在  $\theta, \phi$  方向指向中心线有  $1^\circ\text{--}3^\circ$  的偏移.

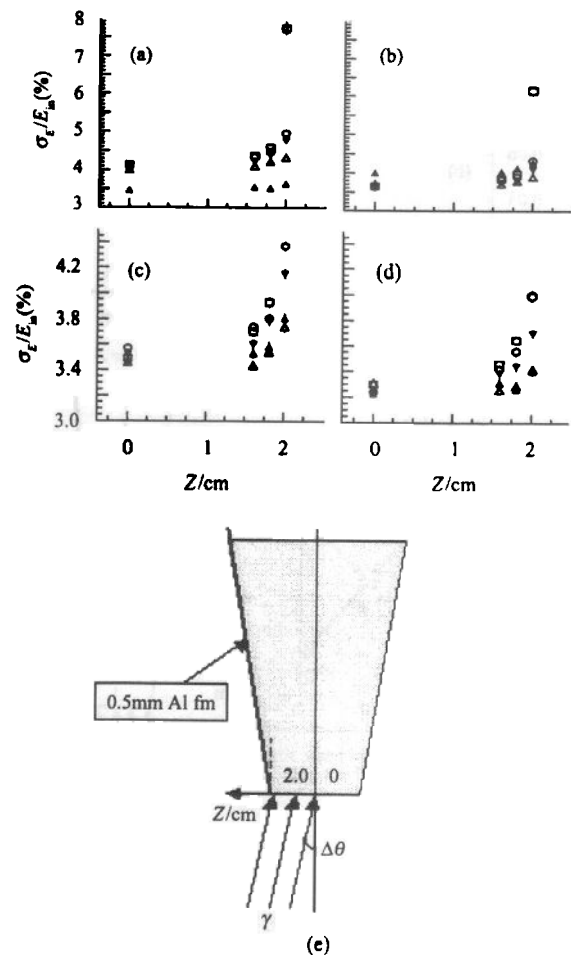


图 1 单光子入射方向偏离晶体轴线的角度分别为  $\blacktriangle 3^\circ$ ,  $\blacktriangledown 1.5^\circ$ ,  $\circ 0.5^\circ$ ,  $\square 0^\circ$  时,能量分辨随  $Z$  的变化.其中晶体间采用  $500\mu\text{m}$  的 Al 隔墙(或空气缝隙  $1.5^\circ$ ). (a), (b) 和 (c), (d) 分别是  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  的结果,入射单光子的能量 (a), (c)  $500\text{MeV}$ , (b), (d)  $800\text{MeV}$ . (e) 图是单光子入射的示意图.

2) 晶体小单元隔墙对能量分辨的影响

在摆放晶体时一个方向每隔两块晶体放置  $500\mu\text{m}$  Al 隔墙, 另一方向每隔 4 块晶体放  $500\mu\text{m}$  Al 隔墙, 单光子入射方向在  $\theta$  向偏离晶体中心轴线  $3^\circ$ ,  $\phi$  向偏离  $1.5^\circ$ , 扫描  $7 \times 7$  阵列中心的一块晶体, 得到能量分辨随能量的变化如图 2 所示. 由图 2 可见, 当光子的作用点在晶体边缘, 且向晶体外侧入射时, 能量泄漏比较严重, 能量分辨较差; 当晶体边缘有 Al 隔墙时, 能量泄漏更加严重, 能量分辨更差. 图 3 进一步证实了这个结论. 入射单光子扫描图 3(a) 所示 6 个等面积的不同区域, 得到的能量分辨不同, 将结果进行比较, 表明当光子作用点落在晶体缝隙附近时, 能量分辨较差, 当缝隙间有 Al 隔墙时能量分辨更差.

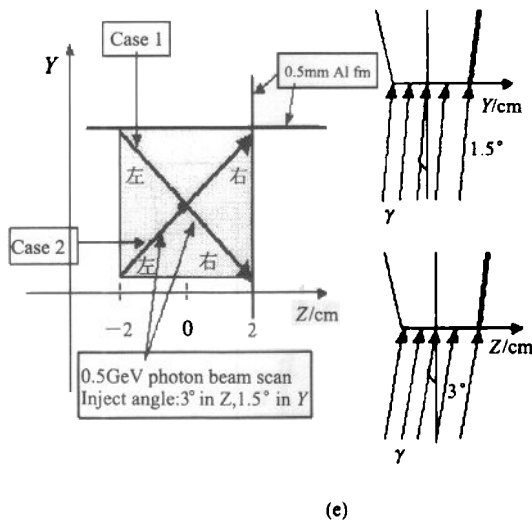
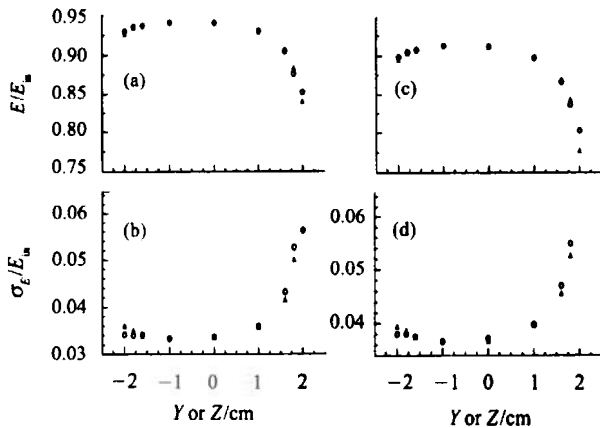


图 2 (a),(c) 能量分布的最可几位置和 (b),(d) 能量分辨随 Y 或 Z 的变化

其中 (a),(b) 和 (c),(d) 分别是  $5 \times 5$  和  $3 \times 3$  的结果,  $\blacktriangle$  和  $\circ$  分别表示 (e) 图中所指的 “Case1” 和 “Case2”. (e) 图是单光子入射的示意图.

上述结果表明, 采用晶体小单元隔墙做支撑时, 当光子击中隔墙及其附近时能量分辨明显变差, 这

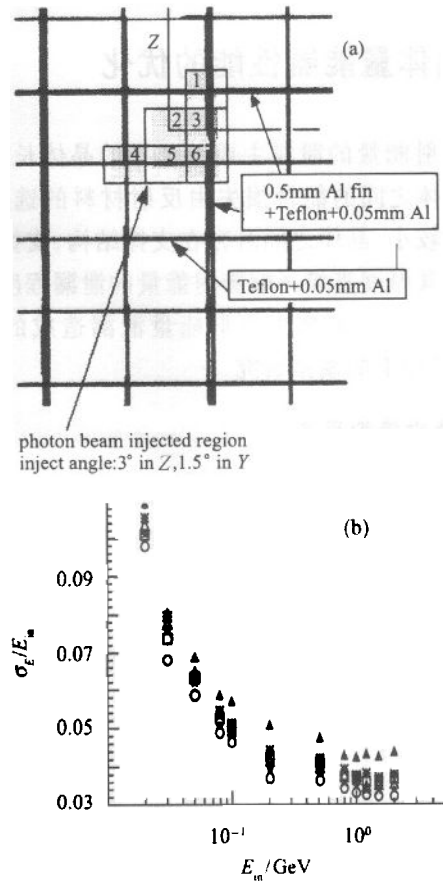


图 3 单光子扫描 (a) 图示意图所示 6 个不同区域时的能量分辨  
其中  $\blacktriangle$ ,  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\triangle$ ,  $\star$ ,  $*$  6.

一结果促使量能器的设计中放弃晶体小单元隔墙的支撑, 而改用 4 根直径 3mm, 长 2cm 的铁螺钉从晶体后端加固, 同时为了提高量能器的能量分辨, 将 CsI 晶体从 24cm (约  $13X_0$ ) 加长到 28cm (约  $15X_0$ ). 由图 4(a) 可见去掉晶体小单元隔墙, 晶体长度增加到 28cm 时, 1GeV 单光子的能量分辨从原来的 3.2% (24cm), 降低到 2.3% (28cm). 图 4(b) 也显示固定晶体的螺钉对能量分辨几乎没有影响.

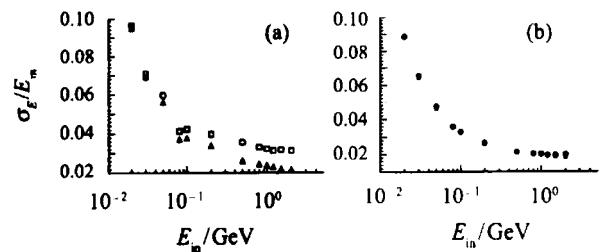


图 4 (a) CsI 晶体前端截面为  $4.5 \times 4.5\text{cm}^2$ 、晶体长度分别为  $\square$  24cm 和  $\triangle$  28cm 时的能量分辨; (b) 晶体长度 28cm 时, 晶体后端 4 根铁螺钉对能量分辨的影响  
其中  $\blacktriangle$  和  $\circ$  分别表示有螺钉和无螺钉.

### 2.3 晶体横向尺寸的优化

CsI 晶体从 24cm 加长到 28cm, 量能器的工程造价增加很多, 加大晶体的横截面, 可以减少电子学通道数, 从而降低电子学的造价, 同时也能提高量能器的能量分辨(横截面增大可以减小能量泄漏). 然而截面的增加会造成位置分辨变差. 于是, 很自然就会提出这样的问题: 为了适应 BES III 的物理要求, CsI 晶体的横截面采用多大尺寸更合适呢?

考虑各种因素的约束, 研究了晶体前端截面尺寸分别为  $4 \times 4\text{cm}^2$ ,  $4.5 \times 4.5\text{cm}^2$ ,  $5 \times 5\text{cm}^2$  时, 晶体量能器的能量分辨、位置分辨以及不同能量单光子的探测效率. 基于  $7 \times 7$  的晶体阵列, 用找重心的方法测量入射单光子的  $\theta, \phi$  方向, 这样测得光子的方向与初始入射方向的关联有些变形, 对位置做简单修正后<sup>2</sup> 得到位置分辨. 同时给出不同情况下单光子的探测效率. 若没有特殊说明探测效率定义为

$$\epsilon = \frac{N_{(\pm 2\sigma_Y, \pm 3\sigma_E)}}{N_{\text{tot}}}, \quad (3)$$

其中  $\sigma_Y, \sigma_E$  分别是单光子的位置分辨和能量分辨.

图 5(a) 给出了 CsI 晶体横截面取 3 个不同尺寸时能量分辨随单光子能量的变化, 结果表明晶体前端截面较大时, 能量分辨会更好. 对于 1GeV 单光子, 晶体前端截面为  $4 \times 4\text{cm}^2$ ,  $4.5 \times 4.5\text{cm}^2$  和  $5 \times 5\text{cm}^2$  时, 能量分辨分别为 2.29%, 2.23% 和 2.07%. 但是晶体

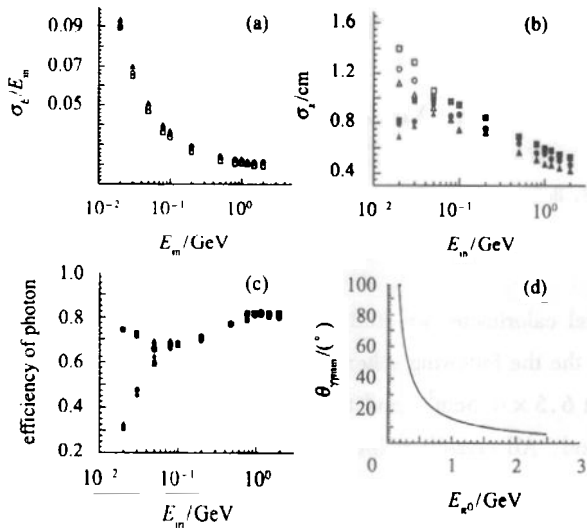


图 5 晶体长 28cm 时不同前端横截面时, (a) 能量分辨, (b) 光子的平均位置分辨, (c) 单光子探测效率随光子能量的变化

其中  $\triangle 4 \times 4\text{cm}^2$ ,  $\square 4.5 \times 4.5\text{cm}^2$ ,  $\square 5 \times 5\text{cm}^2$ ; (b), (c) 中相应的空心标记表示  $n > 0$ , 实心标记表示  $n > 1$ ; (d) 在实验室系  $\pi^0$  衰变产生的两光子最小张角对  $\pi^0$  能量依赖.

前端截面越大, 量能器的位置分辨明显变差, 如图 5(b) 所示. 晶体前端截面为  $5 \times 5\text{cm}^2$  时, 位置分辨最差, 1GeV 单光子的位置分辨约 6mm ( $4.5 \times 4.5\text{cm}^2$  时位置分辨约 5.5mm;  $4 \times 4\text{cm}^2$  时位置分辨约 4.8mm). 图 5(b) 中  $n$  为能量沉积大于能量阈值 (1MeV) 的晶体数目, 当  $n$  大于 1 时, 低能光子的位置分辨会变好, 但探测效率很差 (如图 5(c) 所示). 这是由于当  $n = 1$  时, 不论单光子的作用点在晶体中心还是边缘, 它的位置完全由晶体的中心位置决定, 光子能量越低, 只有一块晶体有能量沉积的几率越大. 由图 5(c) 还可以看到 CsI 晶体取 3 个不同尺寸时单光子的探测效率基本上一致.

在 BES III 物理能区, 末态产生的  $\pi^0$  以能量小于 1.5GeV 为主, 大于 1.5GeV 的  $\pi^0$  产生几率非常小.  $\pi^0$  衰变产生两光子的最小张角随  $\pi^0$  能量的增加而减小 (如图 5(d) 所示). 1.5GeV  $\pi^0$  衰变产生的两光子的张角大于  $10^\circ$ . 当 BES III 量能器采用前端截面  $5 \times 5\text{cm}^2$  的 CsI 晶体时, 桶部  $\theta = 90^\circ$  的位置单块晶体覆盖张角最大, 即  $3.04^\circ$  (桶部内径 942mm).  $\pi^0$  衰变两光子在量能器桶部至少跨过 3.3 块晶体, 即使加上光子位置分辨的模糊, 量能器也能分辨  $\pi^0$  产生的两光子. 鉴于此, BES III 量能器可以采用前端截面约为  $5 \times 5\text{cm}^2$  的 CsI 晶体.

### 2.4 其他因素对能量分辨的影响

主漂移室外桶、TOF 的闪烁体、量能器内桶以及

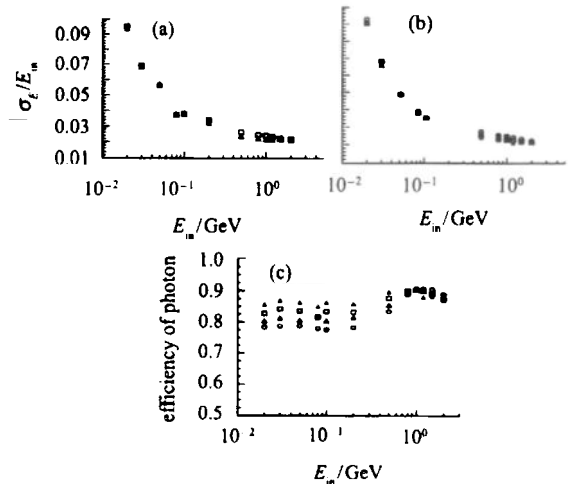


图 6 (a)  $\triangle$  单层或  $\square$  双层 TOF 闪烁体对能量分辨的影响; (b) 和 (c) 分别是单光子能量分辨随能量的变化和单光子的探测效率随能量的变化  
MDC Al 外桶和 TOF 闪烁体厚度分别为:  $\blacktriangle 5\text{mm Al } 5\text{cm}$  闪烁体,  $\square 1\text{cm Al } 5\text{cm}$  闪烁体,  $\triangle 5\text{mm Al } 10\text{cm}$  闪烁体,  $\circ 1\text{cm Al } 10\text{cm}$  闪烁体.

封装晶体的反射膜材料等都不同程度地造成电子或光子的簇射能量泄漏,从而影响能量分辨.蒙特卡罗模拟结果表明,量能器 A1 内桶厚度分别是 2mm, 4mm 或 6mm 时,能量分辨基本一致,而且当用螺钉支撑晶体时可以去掉量能器内桶;在确保晶体闪烁光产额一定的条件下,封装晶体的反射膜材料的选取对能量分辨的影响较小,考虑到晶体闪烁光的收集,尽可能减小反射膜厚度对能量分辨比较有利.

图 6(a)对 TOF 闪烁体分别采用单层(5cm)和双层(10cm)时的能量分辨进行了比较,结果显示单层 TOF 对量能器的能量分辨更有利.图 6(b)给出了当主漂移室外桶厚度和 TOF 闪烁体厚度分别取不同值时 CsI 晶体量能器的能量分辨,结果表明在不影响主漂移室和 TOF 性能的前提下适当减小主漂移室外桶厚度(不同厚度的材料进行比较时以辐射长度为单位)以及 TOF 闪烁体厚度,都能够不同程度

地改善电磁量能器的能量分辨,同时也可以提高低能光子的探测效率(如图 6(c)所示,这里探测效率

$$\text{定义为 } \epsilon = \frac{N_{(\pm 3\sigma_E)}}{N_{\text{tot}}}.$$

### 3 总结

利用蒙特卡罗方法模拟 BES III 晶体量能器的性能,给出了最优选择.目前 BES III 量能器基本上已经决定采用典型尺寸为 28cm 长、前端截面  $5 \times 5\text{cm}^2$ 、后端截面  $6.5 \times 6.5\text{cm}^2$  的 CsI(Tl)晶体;固定晶体采用螺钉从晶体后端加固的方式,而不采用晶体间加隔墙的方式;桶部晶体的在  $\theta$  方向偏离晶体中心线  $1^\circ-3^\circ$ ,  $\phi$  向偏离  $1.5^\circ$ .对于 1GeV 单光子能量分辨约为 2.1%、位置分辨约为 6mm.

### 参考文献 (References)

- 1 BAI Jing-Zhi et al. Nucl. Instr. and Methods, 1994, A344: 319
- 2 LIU CX et al. Monte Carlo Study of Performance of BES III CsI Crystal Calorimeter. HEP & NP, to be published. (in Chinese)  
(刘春秀等. BES III 晶体量能器设计中的蒙特卡罗研究. 高能物

理与核物理,待发表)

- 3 Particle Data Group, Hagiwara K et al. Phys. Rev., 2002, D66: 010001
- 4 Application Software Group. GEANT User's Guide, Program Library W5013. CERN, 1993

## Optimization in the Design of BES III CsI Crystal Calorimeter\*

LIU Chun-Xiu<sup>1)</sup> 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 study its performance by Monte Carlo simulation and then optimize the scheme. Those results show that the the following scheme is optimized. CsI crystals typically have a front face of about  $5 \times 5\text{cm}^2$  and a rear face of about  $6.5 \times 6.5\text{cm}^2$ , and the length of all crystals is 28cm. The crystals are supported by four iron screws fixed at the rear end. All crystals point to the collision point with a small tilt of  $1^\circ-3^\circ$  in the  $\theta$  and  $1.5^\circ$  in the  $\phi$ . Then we obtain that the energy resolution is about 2.1% and the position resolution about 6mm for 1GeV photon.

**Key words** crystal calorimeter, energy resolution, position resolution, detection efficiency

Received 16 June 2003

\* Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (10047104)

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