

利用宇宙线对 BESIII 量能器 CsI(Tl) 晶体 探测器单元的测量

尚雷^{1,1)} 蔡啸¹ 王曼¹ 王志刚^{1,2} 方建¹ 刘春秀¹ 刘万金¹ 孙丽君¹ 李光毅^{1,3} 严亮¹
张宏杰^{1,2} 张振华^{1,4} 单利民¹ 周莉¹ 俞伯祥¹ 袁诚¹ 赵正印^{1,4} 秦纲¹ 夏小米¹
赖元芬¹ 董明义¹ 谢文杰^{1,2} 胡涛¹ 吕军光¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (山西师范大学 临汾 041004)

3 (安徽大学 合肥 230039)

4 (河南师范大学 新乡 453700)

摘要 利用宇宙射线进行探测器模型的性能测试是高能物理普遍采用的方法, 其中最重要的步骤之一就是确定宇宙线入射的准确位置和径迹. 多数采用丝室探测器来进行宇宙线的精确定位, 需要很高的造价和复杂的电子学系统. 本文介绍一种简单的定位方法, 采用塑料闪烁体条加波移剂光纤编码读出的方式, 可以实现精度为 1cm 的定位. 据此建立了一套实验装置, 对 BESIII 电磁量能器 CsI(Tl) 晶体探测器单元的光输出强度和均匀性进行了测量.

关键词 能量分辨率 不均匀性 编码 波移剂光纤

1 概述

CsI(Tl) 晶体具有很高的发光效率和良好的能量分辨率, 在物理探测器方面得到广泛的应用. 北京正负电子对撞机改造工程的 BESIII 电磁量能器 (EMC) 也是 CsI(Tl) 晶体全吸收型量能器, 整个量能器共有 6240 个晶体探测器单元. EMC 的设计要求能量分辨率达到 $2.5\%/\sqrt{E/\text{GeV}}$. 一个高能 γ 簇射约覆盖 5×5 块晶体探测器单元, 其中约 80% 以上的能量沉积在簇射中心的 1—3 块晶体中. 同时沉积能量 dE/dx 沿着晶体长度方向也有很大的变化, 因此晶体之间的光输出差异和晶体本身的光输出不均匀性将影响到量能器的能量分辨率和能量线性. 晶体光输出不均匀性的定义 $u = (S_{\max} - S_{\min})/S_{\text{ave}}$, 公式中 S_{\max} , S_{\min} , S_{ave} 分别表示粒子入射在晶体不同位置时光输出的最大值、最小值和平均值. 这里定义的光输出不均匀性包括了晶体不同位置发光强弱的差别和不同位置产生的光在晶体中传输效率不同这两个方面的综

合效应. 在 BES 实验测量中, 需要对每块晶体的这些参数进行经常的刻度, 提供给数据重建作为修正参数. 利用宇宙线对这些参数的测量既是对探测器制造的质量检验, 也是将来离线修正参数的初始值.

图 1 是 GEANT 模拟 5×5 晶体阵列中晶体探测单元的不均匀性 (0%, 5%, 10%, 15%) 和能量分辨率的关系^[1]. 可以看出不均匀性对能量分辨率有较大的影响, 尤其在 $<1\text{GeV}$ 的能量区域内, 而这个能区正是 BESIII-EMC 的重点能区. 在 BESIII 设计中对晶体的不均匀性有严格的要求. 在晶体质量检测过程中需要对光输出强度和均匀性做出快速测量, 采用 ^{137}Cs 放射源和光电倍增管 (PMT) 读出的测量方式, 要求光输出不均匀性小于 7%.

这种快速测量方式与 BESIII 实际的实验情况有较大差别. 主要在于以下两个方面: 1) PMT 和实际的实验中使用的硅光二极管 (PD) 光谱响应不一致. CsI(Tl) 的发光光谱为 400—700nm, 峰值为 560nm. PMT(R1847-07) 和 PD(S2744-08) 的响应光

谱的范围分别为 300—700nm 和 320—1100nm, 峰值分别是 400nm 和 960nm^[2]. 对应于 CsI(Tl) 晶体的发光光谱, PMT 和 PD 的光电转化效率平均值约为 15% 和 40%. 2) 放射源 ¹³⁷Cs 的 γ 射线能量为 662keV, 大部分作用在 2cm 之内的晶体表层, 不能准确地反映晶体内部的发光信息. 此外, PD 读出系统的噪声较大 (平均等效能量为 220keV), 不能清晰地分辨出放射源的信号, 有必要选用宇宙线穿过晶体, 对晶体的光输出和不均匀性做最后的测量.

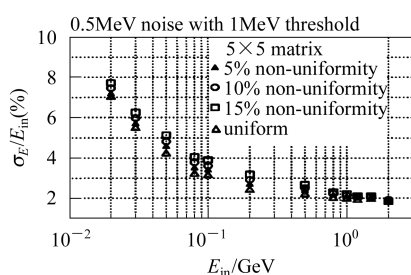


图 1 晶体光输出不均匀性对能量分辨率的影响

2 实验目的和设计

在量能器单元制作过程中, 分别对 CsI(Tl) 晶体、硅光二极管和前端放大器等进行逐一的检测, 再将这些部件组成一体构成 CsI(Tl) 探测器单元. 利用宇宙线对其进行测量主要有以下 3 个目的: 1) 对组装完成的探测器单元整体性能进行检测. 包括 PD 与晶体的耦合, 前放与 PD 的连接等; 2) 测量每个探测器单元的平均发光强度; 3) 测量每个探测器单元的发光不均匀性. 以上两个参数将作为对晶体探测器单元能量刻度的初始值, 也是离线能量分辨率和能量线性修正的基本参数.

实验主要考虑宇宙线中穿透能力较强的 μ 射线. 图 2 是 μ 在 CsI(Tl) 晶体中的电离能量损失 dE/dx 随着动量的变化关系图, 以及宇宙线中 μ 的动量分布谱^[3, 4].

图 2 可以看出宇宙线中 μ 的动量分布主要集中在 1GeV/c 以下 (图 2(b)), 峰值在 300MeV/c 附近. 同时 μ 在 CsI(Tl) 中的最小电离能损对应的动量也在 300MeV/c 左右, 且在 200MeV—1GeV 的动量区间内变化较小. 因此可以近似认为宇宙线中的 μ 穿过晶体时的沉积能量与穿过晶体的径迹长度成正比. 这个近似的误差较大, 主要原因在小于 200MeV/c 的低动量 μ 在 CsI(Tl) 中的电离能量损失差别较大, 这导致实验结果中的能量分辨率影响较大. 不过这对于确定能量峰位的影响并不是很大, 在本文后面将进行讨论.

实验中只考虑了能够穿过 3 块晶体横截面厚度的事例, 动量下限接近 100MeV/c.

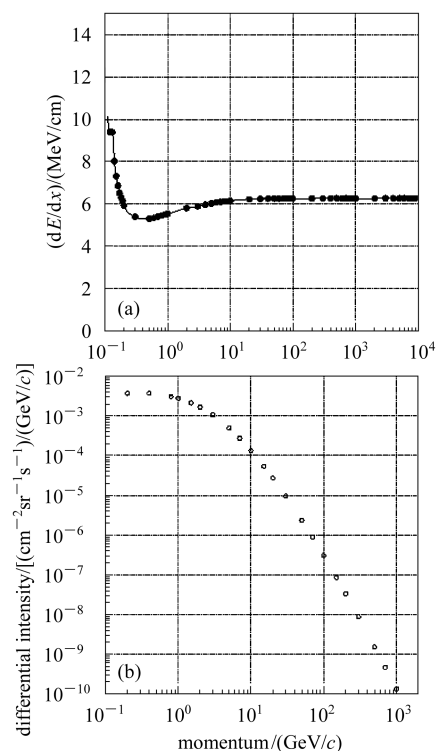


图 2 μ 在 CsI(Tl) 中的 dE/dx 随动量变化曲线(a)和宇宙线中 μ 的动量谱(b)

利用宇宙线测量最重要的步骤之一就是对宇宙线的定位和径迹测量. 实验考虑和比较了如下几种定位方案:

(1) 多丝正比室(MWPC)

MWPC 具有很好的位置分辨能力, 可以达到数百 μm . 但是考虑到我们的实验要求对定位不需要这么高. 另一方面, 多丝正比室需要较大的电子学读出道数和气体维护系统, 造价比较高. 因此没有采用这种方式.

(2) 利用闪烁光在塑料闪烁体中的幅度或时间差定位

实验结果表明这种定位方法的定位精度较差, 做出各种修正后仅为 $\pm 2\text{cm}$ ^[5], 而且大面积的闪烁体读出也比较困难. 因此也未采用这种方式.

(3) 塑料闪烁体条加上波移剂光纤编码读出的方式

这是本实验采取的方式. 使用塑料闪烁体作触发和定位, 经过切割加工和简单的人工抛光处理. 测量得到其衰减长度约 50cm, 采用波移剂光纤从闪烁体长条侧面引出较为合适. 对这种连接方式的发光强度进行了测量, 可以满足实验要求. 读出使用的光电倍增

管型号为 XP2020, 可以观测到单光电子峰位.

塑料闪烁体条的横截面为 1cm(宽)×1.2cm(高), 长度为 60cm(*y* 方向)和 80cm(*x* 方向)两种, 外面包着两层 130μm 厚的 TYVEK 人造纤维纸作反射层. 将波移剂光纤(φ1mm, 型号为 BCF-92)插入反射层, 通过空气直接耦合到闪烁体侧面. 当宇宙线穿过 1.2cm 厚的闪烁条时, 单根光纤耦合时平均光输出约为 8 个光电子, 用 4 根光纤耦合时, 每根光纤的平均光输出约为 4 个光电子.

闪烁体条沿 *x*, *y* 方向排列成 2 层. 每根闪烁体条上附着波移剂光纤导出到光电倍增管(PMT)读出, 通过编码方式判断哪根闪烁体条被击中从而进行定位. 定位精度可以达到 1cm, 能够满足实验要求.

3 实验装置和电子学系统

实验装置如图 3 所示.

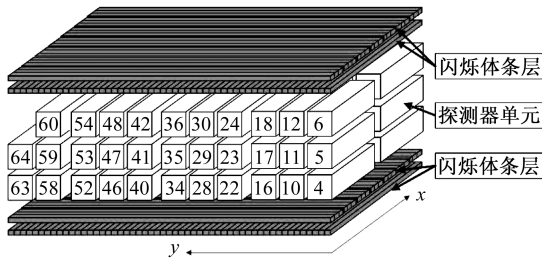


图 3 实验装置示意图

每组测量 64 个 CsI(Tl) 探测器单元, 按照图 3 所示的方式排放. 上下各 2 层塑料闪烁体条做触发和定位. 图中 *x* 方向定位的闪烁体条为 80cm×60 根, *y* 方向的长为 60cm×80 根. 上下两层相距 46cm, 每个闪烁体条通过 1—4 根波移剂光纤通过如下编码的方式连接到 PMT 读出. 定位时先根据被击中的晶体来判断宇宙线入射的大概区域, 然后再根据如下编码方式来确定宇宙线的准确位置.

图 4 是 *x* 方向 1—30 号塑料闪烁体条通过波移剂光纤与光电倍增管连接的编码方式. 每列代表一根塑料闪烁体条, 数字代表该闪烁体条所连接的 PMT 编号(①—⑤). 31—60 号闪烁体条重复 1—30 的编码方式.

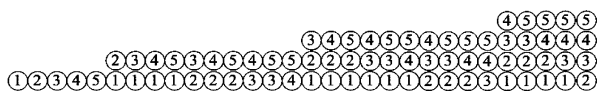


图 4 *x* 方向编码方式

y 方向也采取类似的编码方式(图 5 所示). 由于晶体的横截面尺寸较小(<6.5cm), 只需要 4 个光电倍

增管. 图 5 是 *y* 方向 1—13 号塑料闪烁体的编码连接方式, 重复 6 组, 最后 2 根分别连接到 ① 和 ② 号光电倍增管.

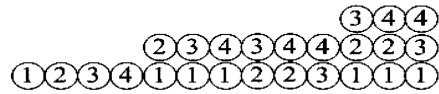


图 5 *y* 方向编码方式

通过以上的编码连接方式, 再结合晶体的信息可以完成对上下两层 80×60 个方格阵列的定位, 从而确定宇宙射线穿过晶体的径迹.

电子学系统如图 6.

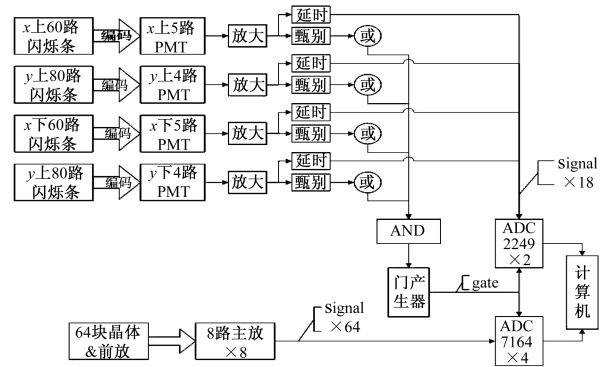


图 6 电子学系统示意图

PMT 信号经过放大、甄别, 每层 *x* 或 *y* 方向进行逻辑或运算, 再对上下 4 层信号做四重符合作为触发信号. 对于每个事例同时记录 18 路光电倍增管的电荷积分(由 LeCroy Q-ADC 2249 插件记录, 0.25pC/道, 1024 道)和 64 路探测器单元的信号峰值(由 Phillips 7164 ADC 插件记录, -4.0—0V, 4096 道).

电子学系统调整:

调整每一个光电倍增管的高压使单光电子峰位在 70 道左右. 再调整每一道探测单元主放大器的放大倍数, 使得宇宙线穿透一块典型的晶体时的输出幅度在 1000 道左右. 然后用同一个探测器单元和固定光源对各路主放大器的放大倍数进行刻度.

4 数据处理方法及结果

4.1 数据记录的信息及格式

每组晶体测量时间为 70h, 平均到每个探测器单元的有效计数约为 20000 事例. 数据记录分为两个文件: 分别记录晶体的编号和宇宙线事例信息. 每个事例包含 18 路 PMT 信息和 64 路待测探测器单元的信息.

4.2 数据处理方法

1) 事例筛选

对于每个宇宙线事例, 判断是否有垂直的一组晶体(3块, 最后两组是2块)同时有信号且超过一定的阈值, 如果有则判断为好事例. 若有2组或2组以上满足条件则可能是双粒子或者多粒子事例. 考虑定位系统无法分辨出同时来的双粒子径迹, 因此不考虑双粒子或多粒子事例.

2) 定位和径迹判断

对于初步选出的好事例, 通过判断PMT的信号和我们的编码规则, 得到宇宙线入射和出射的位置信息, 分别标记为 $(x1,y1)$ 和 $(x2,y2)$. 从而确定宇宙线穿过晶体的径迹和在晶体中的击中位置, 再根据晶体尺寸

和摆放方式, 进一步得到宇宙线穿透晶体的径迹长度.

3) 归一化并填充HBOOK文件

由于晶体的输出信号幅度正比于沉积在晶体中的能量, 在本实验中沉积能量和宇宙线穿透晶体的径迹长度也可以近似的认为是正比关系. 因此需要将晶体的信号幅度对径迹长度进行归一化, 从而得到晶体的光产额, 表征着晶体的光输出强度. 最后将这一信息和击中的位置信息填入HBOOK文件.

4) 给出结果: 晶体的光输出强度和均匀性

用PAW-Ntuple进行分析, 将晶体沿着长度方向分成9段, 根据宇宙线在晶体中的击中位置分别给出每一段的光输出强度 $S_i (i = 1, 2, \dots, 9)$. 再算出晶体不同位置的不均匀性 $U_i = (S_i - S_{ave}) / S_{ave}$. 以及该晶体的光输出不均匀性 $U = (S_{max} - S_{min}) / S_{ave}$.

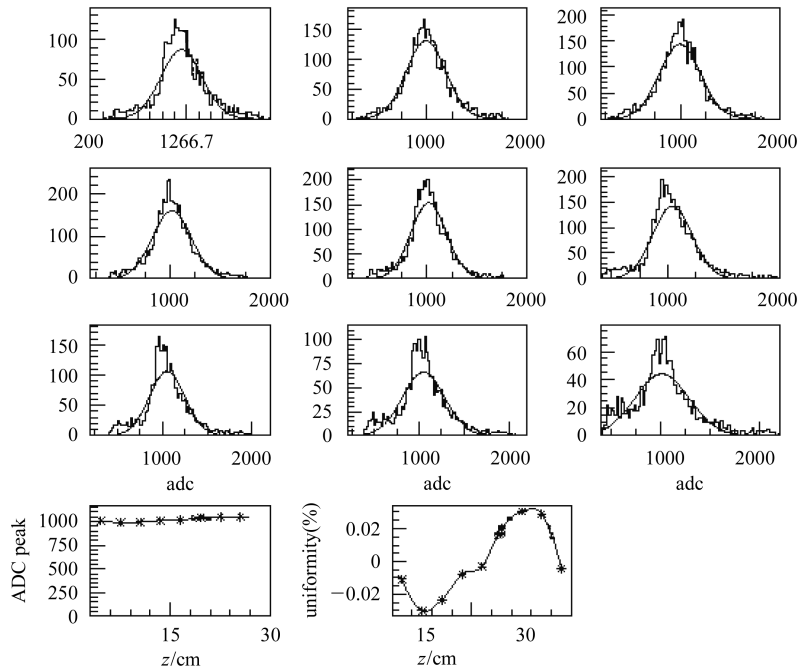


图 7 单个 CsI(Tl) 探测器单元的光输出强度和均匀性分布

4.3 实验结果

实验的结果见图7—图9. 图7是单个晶体探测器单元的结果, 前9幅图为宇宙线击中晶体不同位置(将晶体分为9段)时晶体光输出的谱型, 后2幅图是9段晶体的光输出强度和均匀性结果. 图8是PD+宇宙线和PMT+放射源两种测量方法得到的第10号晶体(120块)光输出强度的比较. 图9是这两种不同测量方法得到的光输出不均匀性的比较.

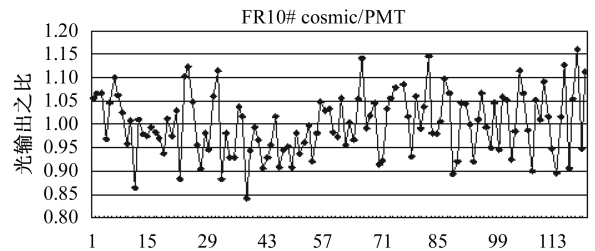


图 8 宇宙线测量的晶体光输出强度与 PMT 测量结果的比较(横坐标为晶体编号)

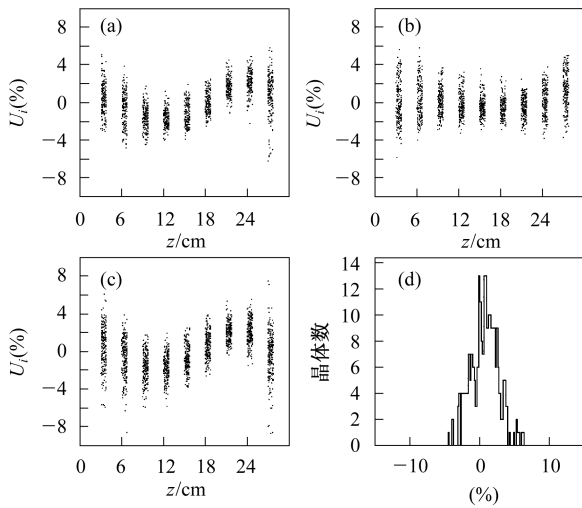


图 9 宇宙线测量的不均匀性与 PMT 测量结果的比较
 (a) uniformity(Cosmic); (b) uniformity(PMT);
 (c) uniformity(Cosmic-PMT); (d) 两种测量的不均匀性之差。

5 讨论

利用宇宙射线装置测量了 CsI(Tl) 晶体探测器单元的光输出强度和均匀性, 同时检测组装过程中可能出现的问题. 目前已经完成了近 4000 个单元的测量.

(1) 宇宙射线测量的结果与 PMT 测量的结果相比较(图 8, 图 9), 可以看出二者的测量结果基本上一致. 通过上面的比较, 检测到约 1.2% 的探测器单元 PD 与晶体之间的粘接存在问题, 约有 1% 左右的 PD 与前端放大器的连线有故障. 为此调整了晶体探测器单元的组装工序并增加一个塑料绝缘片来避免 PD 引出线路的短路问题, 保证了量能器总装前每个晶体探测单元的质量.

(2) 这套测量系统的材料取材于 BES II 使用过的塑料闪烁体, 由于闪烁体老化加上波移剂光纤的转化效率较低(5%左右), 所以在判断击中事例的过程中存在一定的误码(约 5% 的误码率). 但是由于上下两层定位系统相距较远, 单个误码对宇宙线径迹长度的判断误差在 3% 以内, 因此对峰位的确定影响并不大.

(3) 讨论 μ 动量的不确定性对实验结果的影响. 根据图 2 的 dE/dx 随动量的关系曲线可以看出, 不同动量的宇宙线在晶体中的 dE/dx 差别较大, 因此实验中

宇宙线在晶体中的沉积能量涨落变大, 导致测量得到的能量分辨率较差, 约为 20% (图 7 中所示), 但沉积能量的最可几值(即图 7 中的峰值)并不会发生明显变化, 因此通过增加事例数(每个点的事例数 2000 以上), 可以使得由于 μ 动量的不确定性带来的沉积能量的涨落而导致的峰位误差远小于晶体的不均匀性(约为 5%).

(4) 在正负电子对撞机和谱仪运行中, 晶体量能器是利用高能电子(Bhabha 事例)刻度给出晶体发光强度归一化修正系数, 和用 π^0 衰变的连续能量的 γ 来进行校正给出能量线性修正系数. 一个高能电子或光子的簇射约覆盖 5×5 块晶体阵列, 图 10 显示了不同入射能量光子在中心晶体上沉积能量的分布, 簇射在晶体长度方向上的沉积能量不是均匀分布的.

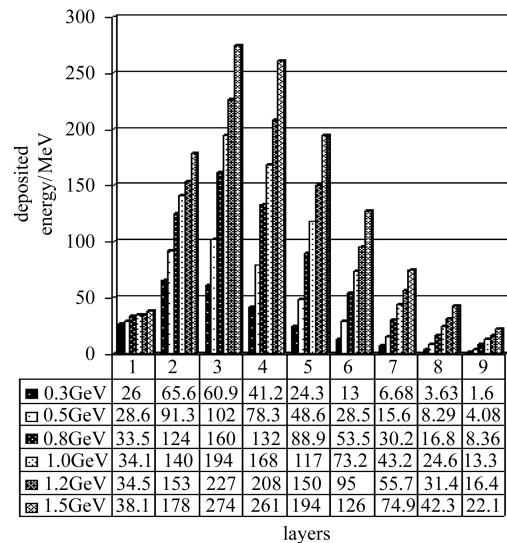


图 10 不同入射能量的光子簇射在中心晶体各层中的沉积能量
 横坐标为晶体长度方向的 9 段。

由于沉积能量分布与入射能量有关, 而晶体本身的光输出是不均匀的(特别是在晶体的中前段影响更大), 用不同能量的电子簇射刻度得到的相对晶体发光强度归一化修正系数有差异. 同样, 低能量的 γ 与高能簇射分配在周围晶体的能量沉积位置也不相同, 晶体光输出不均匀也将对用连续能量的 γ 给出能量线性修正系数造成影响. 如果可能修正晶体光输出不均匀分布, 就可以减少上述问题的影响, 提高刻度参数的精度. 本实验中得到的每块晶体的光输出不均匀性, 正是可利用于离线数据修正的基本参数.

参考文献(References)

- 1 LIU Chun-Xiu. Monte Carlo Research on BESIII CsI Electromagnetic Calorimeter. Report of Post-doctor Research, 2003 (in Chinese)
(刘春秀. BESIII CsI 晶体量能器的蒙特卡罗模拟研究. 博士后研究报告, 2003)
- 2 Hamamatsu Catalog, 1999
- 3 XIE Yi-Gang et al. Particle Detectors and Data Acquisition. Beijing, Science Press, 2003 (in Chinese)
(谢一冈等. 粒子探测器与数据获取. 北京: 科学出版社, 2003)
- 4 Hitomi Ikeda. Development of the CsI(Tl) Calorimeter for the Measurement of CP Violation at KEK B-Factory. Ph.D Dissertation. Nara Women's University, Nara, Japan, 1999
- 5 ZHOU Li et al. HEP & NP, 2004, **28**(5): 532—536 (in Chinese)
(周莉等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(5): 532—536)

Cosmic Ray Test on CsI(Tl) Modules of BESIII Electromagnetic Calorimeter

SHANG Lei^{1,1)} CAI Xiao¹ WANG Man¹ WANG Zhi-Gang^{1,2} FANG Jian¹ LIU Chun-Xiu¹
 LIU Wan-Jin¹ SUN Li-Jun¹ LI Guang-Yi^{1,3} YAN Liang¹ ZHANG Hong-Jie^{1,2}
 ZHANG Zhen-Hua^{1,4} SHAN Li-Min¹ ZHOU Li¹ YU Bo-Xiang¹ YUAN Cheng¹
 ZHAO Zheng-Yin^{1,4} QIN Gang¹ XIA Xiao-Mi¹ LAI Yuan-Fen¹ DONG Ming-Yi¹
 XIE Wen-Jie^{1,2} HU Tao¹ LÜ Jun-Guang¹

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2 (Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

3 (Anhui University, Hefei 230039, China)

4 (Henan Normal University, Xinxiang 453700, China)

Abstract A simple method for positioning cosmic rays is reported, using plastic scintillator bars with wavelength shifting fiber and photoelectron multiplier readout. The accuracy of positioning is 1cm. More than 4000 CsI(Tl) modules from BESIII calorimeter have been tested for light output and uniformity.

Key words energy resolution, uniformity, encoding, wavelength shifting fiber