

铅-闪烁光纤夹层电磁量能器的角分辨研究*

王小斌¹⁾ 陈国明 李祖豪 陈刚 杨民 杨墨宇

张少鹤 吕雨生 陈和生 李新乔

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

摘要 深入讨论了如何提高铅-闪烁光纤夹层电磁量能器角分辨的分析方法. 用 MC 方法模拟量能器对不同能量光子事例的响应, 得到了量能器电磁簇射位置测量误差函数; 通过量能器束流测试数据分析, 证明用每层所有测量单元计算该层重心、所有 18 层做方向重建、并运用误差函数来拟合入射方向, 能够从分析角度显著地改善量能器的角分辨.

关键词 电磁量能器 角分辨 位置测量误差函数

1 引言

阿尔法磁谱仪 II (AMS02) 是计划在 2007 年安装于国际空间站上的一个大型宇宙线探测器, 其目标是寻找暗物质、反物质并测量原初宇宙线成分和能谱^[1]. 根据理论预言, 源自于暗物质湮没的高能光子是暗物质存在的证据之一, AMS02 将以巡天模式对高能光子的能量和方向分布进行观测.

铅-闪烁光纤夹层电磁量能器是 AMS02 的一个子探测器, 用作测量电磁簇射^[2]的能量沉积. 高能光子和高能电子是在量能器中发生电磁簇射的典型粒子, 它们在量能器中的簇射行为非常类似. 利用发生电磁簇射的粒子在量能器各测量单元中的沉积能量, 可以计算该粒子的总能量和方向. 量能器的角分辨体现了量能器对电磁簇射粒子入射方向的探测能力.

图 1(a) 电磁量能器主体部分的有效几何尺寸为 648mm×648mm×185mm, 其簇射介质为铅, 灵敏取样介质是闪烁光纤^[3, 4]. 该量能器总共有 9 大层. 每一个大层内光纤平行于量能器的上表面嵌入铅介质之中, 如图 1(b) 所示, 相邻大层的光纤方向相互垂直并由两侧的光电倍增管读出信号. 每大层有 36 个光电倍增管, 而每个光电倍增管又包含 4 个独立的输出阳极.

建立图 1 中的坐标系, 量能器的 18 个信号层可分为 8 个 X 方向和 10 个 Y 方向读出层.

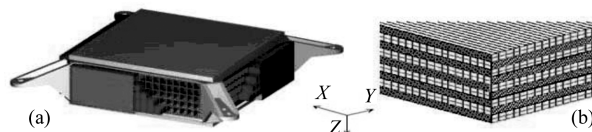


图 1 量能器结构

2002 年在 CERN 超级质子同步加速器 (SPS) 的 H6 束流上进行了该量能器的束流测试^[3-5]. 经过近一个月的数据采集, 获得了 120GeV 质子束流、120GeV μ 子束流的量能器刻度数据. 由于难以得到能量器能量探测能量范围 (3GeV 以上) 的光子, 量能器性能测试使用了可以在 H6 上获得的高能电子束流来代替, 能量分别为 3, 6, 10, 15, 20, 30, 35, 50, 80, 120, 150 和 180GeV. 上述 3 种带电粒子束流的束斑均有一定的大小, 以 120GeV 电子为例, 其形状^[5]在 X 方向为 $\sigma = 0.96\text{cm}$ 的高斯分布、Y 方向为 $\sigma = 0.16\text{cm}$ 的高斯分布. 为避免侧向能量泄漏的影响, 本文选择了靠近量能器测试区域^[3-5]中心附近、垂直逐一入射的事例进行分析. 表 1 显示了不同能量的电子束流在量能器 X-Y 平面内的入射位置.

2005 - 03 - 30 收稿

* 国家自然科学基金(10099630)和国家科技部(国际科技合作重点项目)资助

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

表 1 垂直 X-Y 平面入射的电子束流中心位置与量能器边界的距离

能量/GeV	3	5	10	15	20	30
X 中心位置/cm	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
Y 中心位置/cm	8.6	8.6	7.7	8.6	8.6	8.6
能量/GeV	35	50	80	120	150	180
X 中心位置/cm	7.4	7.4	7.4	7.7	7.4	7.4
Y 中心位置/cm	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6

2 量能器角分辨计算方法

将重建的光子入射方向的空间直线投影为在 X-Z 平面和 Y-Z 平面内的两条直线. 以 X 方向为例, 若以 i 代表层号、 j 代表该层的测量单元号, 当电磁簇射在量能器中发生时, 有能量沉积的层均可以得到重心位置 $X_i^{\text{exp}} = \frac{\sum_j X_{ij} \cdot E_{ij}}{\sum_j E_{ij}}$, 其中 X_{ij} 为 i 层中测量单元 j 的 X 方向中心坐标, E_{ij} 为该单元的能量沉积. 令

$$\chi^2 = \sum \frac{(X_i^{\text{exp}} - X_i^{\text{fit}})^2}{\sigma_i^2} = \sum W_i (X_i^{\text{exp}} - X_i^{\text{fit}})^2, \quad (1)$$

其中权重为

$$W_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (2)$$

σ_i 是位置测量误差, $X_i^{\text{fit}} = Z_i \cdot k_x + b_x$ 是拟合直线. 令 $\delta\chi^2 = 0$, 可以得到 X-Z 平面内入射方向的斜率 k_x 和截距 b_x , 该直线与 Z 方向的夹角容易通过 $\theta_x = \tan^{-1} k_x$ 求出. 同理, 也可以得到 Y 方向的斜率 k_y 、截距 b_y 以及 θ_y . 对于多个相同能量、相同方向入射的事例样本, θ_x 和 θ_y 呈高斯分布, 可以用该高斯分布的宽度 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$ 来描述量能器在 X-Z 平面和 Y-Z 平面投影的角分辨.

此时重建出的光子入射方向矢量为 $\mathbf{R} = \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + 1}}(k_x, k_y, 1)$, 若入射方向为 \mathbf{R}_0 , 二矢量夹角由 $\Delta\theta = \cos^{-1}(\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R})$ 计算. 在 $\Delta\theta$ 的样本分布中找到 $\Delta\theta_{68}$, 使得在 $[0, \Delta\theta_{68}]$ 范围之内的事例占总数的 68%, 称 $\Delta\theta_{68}$ 为量能器的角分辨.

$\Delta\theta_{68}$ 和光子入射能量 E 的关系可以由 $\Delta\theta_{68} = \sqrt{\frac{a^2}{E^2} + b^2}$ 即 $\Delta\theta_{68} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b$ 来描述.

由 1 式可以看出, 方向重建时, 有 3 个因素影响量能器的角分辨: 权重 W_i 的取值、重心位置 X_i^{exp} 的计算, 以及拟合层数 n 的选取. 本文利用 2002 年量能器

的束流测试数据, 试图通过以上 3 方面的对比, 得到有效提高量能器角分辨的分析方法.

3 位置测量误差函数

方向拟合时, 简单的处理方法是取 $W_i \equiv 1$, 即各层等权重. 而本文用 GEANT3^[6] 软件包¹⁾ 通过 MC 模拟^[4, 5] 研究 σ_i 和能量之间的关系. 模拟时根据实际探测对象, 选择入射粒子为光子, 能量范围从 3GeV—1TeV, 共 43 个能量点, 各点沿能量对数坐标大致均匀分布, 每个能量点模拟 10^4 个事例. 为避免能量泄漏, 光子在量能器 X-Y 平面中心 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 范围内均匀入射.

图 2 是能量为 92GeV 的光子数据样本在第 15 层的位置测量误差 $\Delta X = X_{15}^{\text{MC}} - X_{15}^{\text{IN}}$ 分布及其高斯拟合, 其中 X_{15}^{MC} 是经过重建后的该层重心的 X 坐标, X_{15}^{IN} 是入射直线在该层的 X 坐标. 由拟合得到此时第 15 层的位置测量误差 σ_{15} 为 0.113cm.

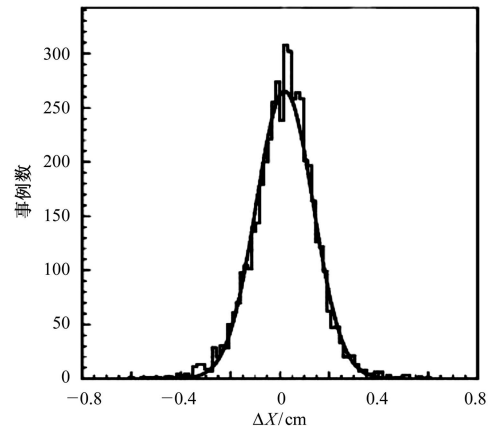


图 2 垂直入射光子能量为 92GeV 时量能器第 15 层的位置分辨

研究不同能量光子的单层位置分辨 σ_i 与其在整个量能器中平均沉积能量 \bar{E} 之间的关系, 对于所有的 18 个读出层, 发现均可以用位置测量误差函数来描述:

$$\sigma_i(\bar{E}) = a_i + b_i \bar{E} + c_i \bar{E}^{d_i}, \quad (3)$$

其中 (a_i, b_i, c_i, d_i) 为拟合参数, i 为层号. 图 3 为第 15 层的该函数拟合结果. 若光子垂直入射且能量侧泄漏可忽略时, 公式 (2), (3) 就给出了由总沉积能量来确定各层在方向重建中权重 W_i 的方法. 图 4 显示了入射能量为 25GeV 的光子由该方法得到的各层权重 W_i 与位置分辨 σ_i .

1)V.Choutko and E.Choumilov, "AMS Analysis Software Overview", AMS Internal Note

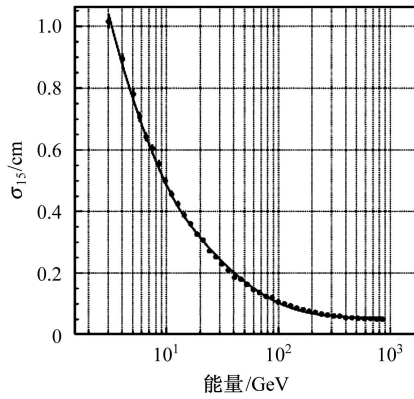


图 3 第 15 层位置分辨随光子总平均沉积能量的变化曲线

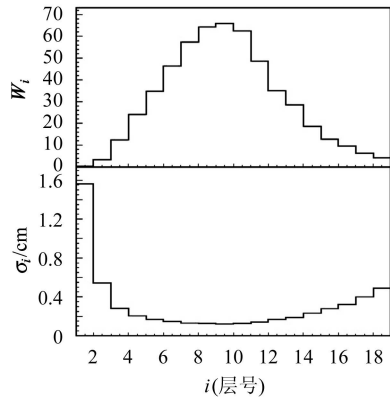


图 4 垂直入射能量为 25GeV 的光子各层权重和位置分辨

表 2 列出了由 MC 方法得到的量能器每层光子位置测量误差函数的 4 个参数值。

表 2 量能器各层的光子位置测量误差函数拟合参数

层位置 分辨/参数	a_i	b_i	c_i	d_i
$\sigma_1/3.3$	-0.03674	0.4680	0.00009965	-0.8310
$\sigma_2/1.7$	0.08929	0.3682	0.00002445	-0.6187
σ_3	0.1066	0.3579	0.02409	-0.2391
σ_4	0.08903	0.1783	0.09215	-0.03017
σ_5	0.1286	0.2503	0.04795	0.01625
σ_6	0.1384	0.07444	0.1089	0.2400
σ_7	0.1162	0.01813	0.1880	0.2840
σ_8	0.1029	0.06948	0.0260	0.3481
σ_9	0.08989	0.2610	0.3476	0.3655
σ_{10}	0.08072	0.3203	0.4327	0.4073
σ_{11}	0.07288	0.4393	0.5033	0.4224
σ_{12}	0.06523	0.4987	0.5570	0.4232
σ_{13}	0.06115	0.5922	0.6157	0.4536
σ_{14}	0.05838	0.6536	0.6957	0.4928
σ_{15}	0.05681	0.7329	0.7433	0.5072
σ_{16}	0.05531	0.8091	0.7639	0.5025
σ_{17}	0.04827	0.8482	0.8252	0.5462
σ_{18}	0.06414	0.8791	0.8812	0.6338

4 提高量能器角分辨的分析方法

4.1 位置测量误差函数改善角分辨

将上文中由 MC 方法得到的位置测量误差函数运用于束流测试数据分析. 图 5(a) 显示了 10GeV 电子束流垂直入射, X 方向角度重建时, 运用位置测量误差函数与等权重进行方向重建结果的比较; (b) 显示了 50GeV 电子束流垂直入射, Y 方向角度重建时, 运用位置测量误差函数与等权重进行方向重建结果的比较. 由分布的宽度变化可以看出, 运用该函数提供的权重后, 量能器 X 方向和 Y 方向的角分辨均有显著提高. 同时, 由高斯拟合的中心值也可以看出, 该函数对方向的准确重建所起的作用亦相当明显.

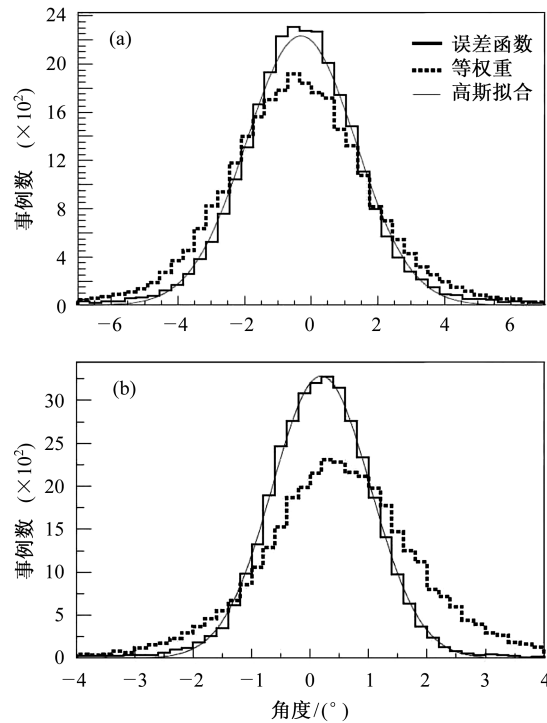


图 5 使用位置测量误差函数加权与等权重方法进行电子入射方向重建的比较

(a) 入射能量 10GeV, 垂直 X-Y 平面入射, X 方向重建; (b) 入射能量 50GeV, 垂直 X-Y 平面入射, Y 方向重建.

量能器的前两层为 Y 方向输出, 由于这两层能量沉积少, 并且在这两层中发生次级电子的大角度反冲几率较大, 通常其簇射重心位置偏离簇射主轴较远, 位置测量误差函数的优势在这两层上表现得最突出. 所以, 与 X 方向相比, Y 方向位置测量误差函数的效果更为明显.

表 3 位置测量误差函数对垂直入射电子的 X, Y 方向角分辨的改善

E/GeV		3	6	10	15	20	30	35	50	80	120	150	180
$\Delta\theta_x/(\circ)$	加权	2.7	2.1	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	0.86	0.74	0.67	0.71	0.73
	等权	4.4	3.0	2.1	1.6	1.3	1.2	1.1	0.91	0.80	0.74	0.80	0.85
$\Delta\theta_y/(\circ)$	加权	3.1	2.2	1.7	1.4	1.2	1.0	0.97	0.84	0.71	0.51	0.44	0.59
	等权	4.8	3.0	2.2	1.9	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2	1.0	1.0	1.2

表 3 给出了本次量能器束流测试垂直入射、不同入射能量时电子 X 和 Y 方向角分辨值, 包括加权与等权的对比. 可以看出, X, Y 两个方向, 加权得到的角分辨均优于等权.

4.2 各层重心位置计算方法对角分辨的影响

本文尝试并比较了 4 种计算簇射重心位置的方法: 同层所有的测量单元, 相邻并能量沉积最大的 3

个测量单元、5 个测量单元、7 个测量单元.

图 6 分别显示了用以上 4 种重心位置计算方法对束流测试 35GeV 电子的 X 方向(a)图和 120GeV 电子的 Y 方向(b)图角度重建结果. 可以看出, 用较少测量单元计算重心位置重建时, 有中心值不准确和不符合高斯分布的缺点. 同时, 考虑到事例频率低、所选事例不涉及多径迹重建等特点, 本文用各层所有测量单元来计算该层的簇射重心位置.

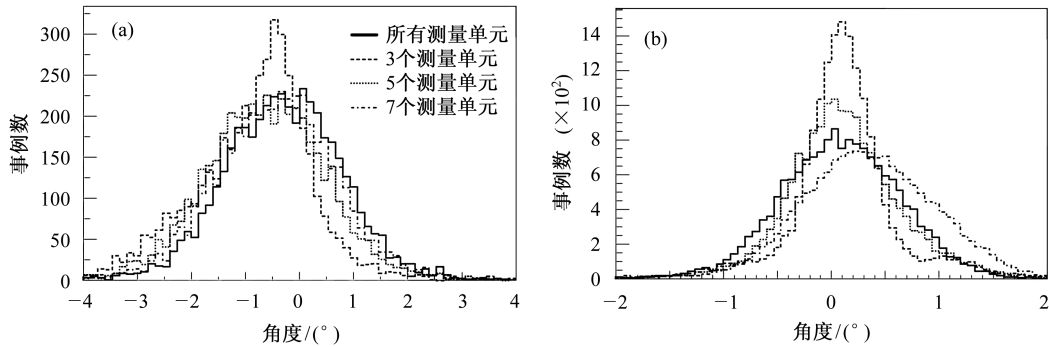


图 6 束流测试电子样本在量能器各层中的重心位置用不同方法计算时方向重建结果比较

(a) 入射能量 35GeV, 垂直 X - Y 平面入射, X 方向重建; (b) 入射能量 120GeV, 垂直 X - Y 平面入射, Y 方向重建.

4.3 拟合层数对角分辨的影响

方向重建时, 在层数的选择上, 本文比较了 X 方向的 2 种情况: 使用所有 8 层的重心位置和去掉偏离拟合方向最远的一层后重建; Y 方向 3 种情况: 用所

有的 10 层、去掉偏离最远的一层以及只用后 8 层的重心位置重建. 重建结果见表 4.

由表 4 看出, 使用位置测量误差函数给出的权重, 不仅有避免考虑拟合层数选择的优点, 而且可以得到更真实地反映量能器角分辨能力的分析结果.

表 4 X, Y 方向用不同层数对不同入射能量的电子方向重建所得的角分辨(\circ)

E/GeV	3	6	10	15	20	30	35	50	80	120	150	180
X 8层加权	2.71	2.11	1.64	1.42	1.16	1.08	1.04	0.855	0.744	0.672	0.711	0.728
X 7层加权	2.94	2.22	1.73	1.50	1.23	1.16	1.09	0.917	0.796	0.719	0.763	0.775
Y 10层加权	3.13	2.24	1.69	1.41	1.19	1.01	0.968	0.835	0.713	0.514	0.444	0.593
Y 9层加权	3.15	2.36	1.75	1.46	1.25	1.06	1.01	0.863	0.732	0.538	0.459	0.607
Y 8层加权	3.53	2.40	1.72	1.47	1.21	1.02	0.971	0.837	0.716	0.516	0.448	0.594
Y 8层等权	5.26	3.69	2.60	2.15	1.59	1.24	1.13	0.952	0.764	0.520	0.447	0.607

5 量能器的角分辨束流测试结果

用位置测量误差函数来计算各层在方向重建时的权重, 用各层所有击中单元来计算簇射重心位置, 用

所有 18 层的重心来重建电子的入射方向, 图 7 给出了 35GeV 入射电子的重建方向与入射方向之间的夹角 $\Delta\theta$ 的分布, 并计算得到量能器对 35GeV 电子的角分辨 $\Delta\theta_{68}$ 值为 1.54° .

表 5 给出了对应不同能量电子, 运用位置分辨函数重建入射方向得到的 $\Delta\theta_{68}$ 值.

表 5 束流测试中量能器角分辨随入射电子能量变化(单位: °)

E/GeV	3	6	10	15	20	30
$\Delta\theta_{68}$ 加权/(°)	4.6	3.3	2.5	2.1	1.8	1.6
E/GeV	35	50	80	120	150	180
$\Delta\theta_{68}$ 加权/(°)	1.5	1.3	1.1	0.89	0.90	1.0

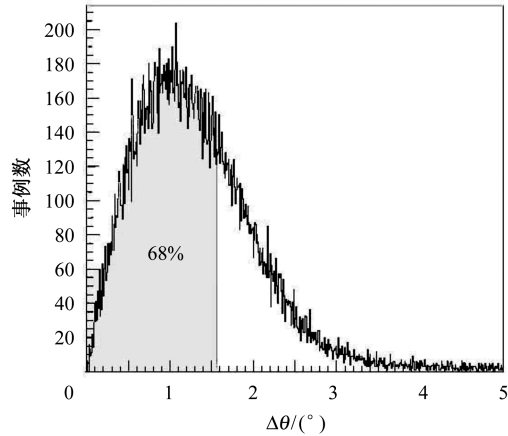


图 7 35GeV 垂直入射的电子样本 $\Delta\theta$ 分布及 $\Delta\theta_{68}$ 计算

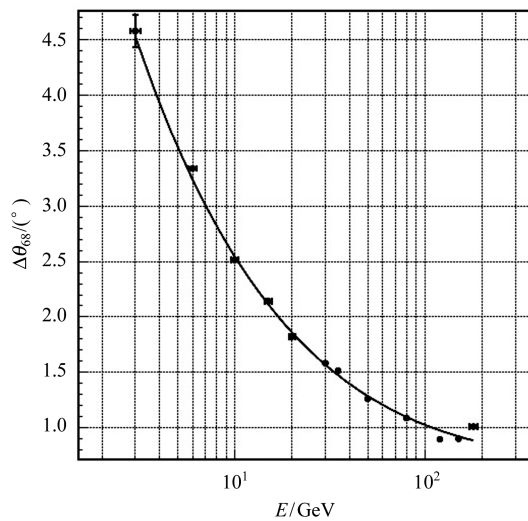


图 8 束流测试电子的能量-角分辨曲线

根据本次束流测试数据, 图 8 给出了电子垂直入射条件下 $\Delta\theta_{68}$ - E 关系的拟合结果:

$$\Delta\theta_{68} = \frac{(7.76 \pm 0.03)^\circ}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus (0.67 \pm 0.01)^\circ,$$

表 6 不同能量的电子束流有效事例率和经过选择后的有效事例数

能量/GeV	3	5	10	15	20	30	35	50	80	120	150	180
有效事例率(%)	71.1	77.9	84.8	50.7	71.7	33.2	13.7	98.7	88.8	42.5	42.4	12.9
有效事例数	726	38964	27133	10134	7174	6426	4665	35539	9773	16980	8903	9180

可以认为, 上式也反映了量能器对垂直入射高能光子的角分辨随入射光子能量的变化关系.

6 讨论

由于本次束流测试没有测量单个粒子击中量能器准确位置的装置, 所以也就无法由实验数据获得量能器的位置分辨率. 因此, 用相同入射条件光子 MC 模拟簇射的发生过程, 并根据总能量沉积来计算权重就成为一个简单有效的办法. 对于斜入射或者有能量侧泄漏的情况, 也可以通过相应条件的 MC 模拟来获得权重.

从量能器结构和性能的角度分析, 束流测试中, 量能器对 150GeV 和 180GeV 的电子角分辨变差的主要原因有两个: 一是光电管的饱和效应和高能量下少量的横向泄漏导致能量分辨变差^[4]; 二是此次束流测试 Y 方向最底部 6 层的一个光电倍增管(测量单元编号 5 和 6)损坏无数据读出, 它们与簇射中心距离最远不超过 4cm, 由于能量增加时簇射展宽也增加, 其影响在能量越高时越明显.

另外, 束流品质也是一个影响量能器束流测试角度分辨结果的重要因素. 实验所用的 H6 二级束流和三级束流, 不同种类、不同能量的粒子束斑均有一定的形状和大小, 束流也不是绝对垂直于量能器 X-Y 平面入射的^[4]. 因此, 电子束斑宽度在 X 方向和 Y 方向差异比较大, 是造成 X 方向和 Y 方向角分辨不同的主要原因之一.

本次测试所用的电子束流中混杂有质子本底, 数据处理过程中, 由总击中单元数和每个击中单元平均沉积能量两个条件^[4]来进行事例选择, 选择效率和选择后的有效事例数如表 6. 由于质子簇射远不如电磁簇射的形状规则, 如果质子本底发生强子簇射而未被排除, 也会使角分辨变差.

另外, 由于角度重建依赖于各测量单元中的能量沉积, 文献[4]中讨论的量能器的能量分辨率在入射电子能量为 120GeV, 150GeV 和 180GeV 时变差的主要原因, 如量能器刻度^[3]的准确性、能量线性, 以及光纤衰减长度修正精确与否等因素, 也都会对角分辨产生影响.

7 结论

本文可以得到如下结论: 从蒙特卡洛方法得到的位置测量误差函数可以统一地被写为仅与发生电磁簇射粒子的沉积总能量以及层号相关的经验函数; 分析量能器电子束流测试的数据, 认为在使用位置测量误

差函数的前提下, 用每层所有的探测单元计算重心、在 X 方向和 Y 方向都用所有的层来进行方向重建, 能够得到较高的角分辨. 按上述方法, 本文亦给出了此次量能器束流测试的角分辨结果:

$$\Delta\theta_{68} = \frac{(7.76 \pm 0.03)^\circ}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus (0.67 \pm 0.01)^\circ.$$

参考文献(References)

- 1 Battiston R et al. *Astropart. Phys.*, 2000, **13**: 51—74
- 2 TANG Xiao-Wei. *Methods of Particle Physics Experiments*. Beijing: People's Education Press, 1982 (in Chinese)
(唐孝威. 粒子物理实验方法. 北京: 人民教育出版社, 1982)
- 3 LI Zu-Hao et al. *HEP & NP*, 2004, **28**: 521 (in Chinese)
(李祖豪等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 521)
- 4 LI Zu-Hao et al. *HEP & NP*, 2004, **28**: 1188 (in Chinese)
(李祖豪等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 1188)
- 5 YANG Zhao-Yu et al. *HEP & NP*, 2004, **28**: 1086 (in Chinese)
(杨墨宇等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 1086)
- 6 Application Software Group. *CERN Computing and Networks Division. GEANT Detector Description and Simulation Tool*. 1993

Study on Angular Resolution of Lead-Scintillating Fiber Electromagnetic Calorimeter*

WANG Xiao-Bin¹⁾ CHEN Guo-Ming LI Zu-Hao CHEN Gang YANG Min YANG Zhao-Yu
ZHANG Shao-He LU Yu-Sheng CHEN He-Sheng LI Xin-Qiao

(Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract Analyzing methods on the angular resolution of lead-scintillating fiber electromagnetic calorimeter are studied. The space resolution function, which is used to calculate weights, is extracted from Monte-Carlo simulation. Better angular resolution was obtained from the beam test data of AMS ECAL in 2002 at CERN, when the space resolution function was used in the fit. Different ways to calculate the centers of gravity, to choose the layers to fit the incidence direction are also discussed.

Key words calorimeter, angular resolution, space resolution function

Received 30 March 2005

*Supported by NSF (10099630), International S&T Collaboratin Key Program, Ministry of Science and Technology of China

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