

# AMS02 电磁量能器三维重建\*

李新乔<sup>1)</sup> 陈国明 李祖豪 陈刚 杨民 杨墨宇 王小斌

张少鹤 陶军全 吕雨生 陈和生

(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** 研究了 AMS02 电磁量能器簇射三维重建, 发展出一个新的三维重建程序, 并用蒙特卡罗模拟以及 2002 年末流测试数据对其进行了检验. 该程序应用两次方向重建、结合光纤衰减修正、横向以及纵向能量泄漏补偿, 完整地事例进行了重建, 得到了较为理想的能量分辨率和角度分辨率.

**关键词** 电磁量能器 三维重建 角分辨率 能量分辨率

## 1 引言

阿尔法磁谱仪 II (AMS02) 是一个具有大接收度的探测谱仪, 将于 2008 年安装到国际空间站 (ISS), 并计划运行至少 3—5 年. 它的主要物理目标是寻找反物质和暗物质, 并测量原初宇宙线成分和能谱<sup>[1]</sup>.

铅-光纤夹层电磁量能器 (ECAL, 简称量能器) 是 AMS02 的一个子探测器, 用来测量光子、电子和正电子能量沉积及入射方向, 并对光子(电子)和强子进行鉴别. 量能器为三维均匀取样型量能器, 铅是吸收体, 闪烁光纤作为灵敏取样介质, 光电倍增管读出信号. 如图 1(a), 量能器主体部分有效几何尺寸为  $64.8\text{cm} \times 64.8\text{cm} \times 18.5\text{cm}$ <sup>[2-5]</sup>, 总共有 9 个大层, 同一大层内的光纤相互平行, 相邻大层的光纤互相垂直. 每大层由两侧的 36 个光电倍增管读出信号, 而每个光电倍增管又包含 4 个独立阳极输出单元, 如图 1(b) 中放大的“田”形窗口所示. 所以量能器的 9 个大层被分为 18 个读出层, 每层包含 72 个单元.

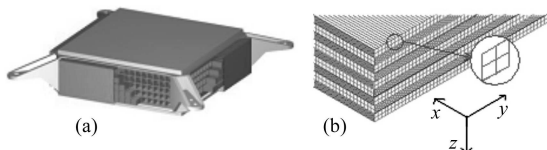


图 1 电磁量能器结构

本文设计了基于量能器单元输出能量的事例离线重建程序, 可以利用各个单元所沉积的能量进行簇射的三维重建, 给出粒子的能量和入射方向. 该程序用 GNU C++ 语言编写, 在 Linux 操作系统下编译运行, 输出数据为 ROOT<sup>[6]</sup> 格式, 方便对结果用 ROOT 软件包进行分析. 该程序具有较好独立性和可移植性等特点, 易于维护和使用.

本文使用 AMS02 电磁量能器 2002 年末流测试<sup>[2-5]</sup> 数据及蒙特卡罗模拟数据分别进行了重建, 以检验程序性能.

## 2 三维重建程序

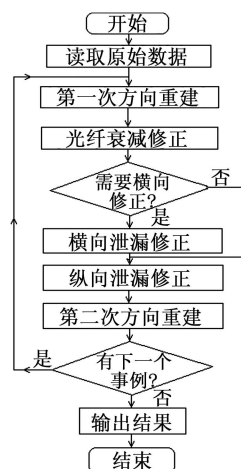


图 2 重建程序主流程图

2006 - 02 - 13 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)基金资助

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

为了实现重建目标, 得到入射粒子的能量和方向, 本程序有 5 个主要步骤: 第一次方向重建, 光纤衰减修正, 横向泄漏修正, 纵向泄漏修正及第二次方向重建, 其主流程图如图 2 所示. 下面分别介绍各个步骤.

## 2.1 第一次方向重建

第一次方向重建的目的是初步重建方向和入射点, 以计算各个单元对应光纤的光纤衰减距离.

在图 1(b) 所示的坐标系中, 根据量能器输出层分别在  $x$  和  $y$  方向读出的原始数据, 计算各层在垂直读出方向的能量沉积的重心  $(x_L, z_L)$  和  $(y_L, z_L)$ , 其中  $1 \leq L \leq 18$  为层号, 分别按文献[5]中所给的方法拟合粒子入射方向在  $xz$  平面和  $yz$  平面的投影, 从而确定其入射角度和入射位置, 进而可以确定每层平面与入射直线的交点. 该交点可以认为是簇射在该层的中心位置. 各层簇射中心与相应光电倍增管的距离, 即光在光纤中的衰减距离.

AMS02 的事例率低(几 kHz), 电子学反应时间在微秒量级, 同时记录两条宇宙线的可能性很小; 入射光子到达量能器之前可能转化成一正负电子<sup>[7]</sup>, 正负电子的方向可由径迹探测器得到.

## 2.2 光纤衰减修正

光信号在光纤中传播时, 其强度随传播距离增加而减弱, 所以必须对读出的数据进行光纤衰减修正. AMS02 电磁量能器的闪烁光纤有两种衰减长度成分, 其输出幅度可表示为

$$A(x) = A_0[\varepsilon e^{-\frac{x}{x_1}} + (1-\varepsilon)e^{-\frac{x}{x_2}}], \quad (1)$$

其中  $A$  表示输出幅度,  $A_0$  为原初输出幅度,  $x$  为衰减距离,  $x_1$  和  $x_2$  分别为两种成分的衰减长度,  $\varepsilon$  表示两种成分的比例<sup>[3]</sup>.

衰减距离  $x$  根据第一次方向重建得到,  $x_1$  和  $x_2$  由束流测试确定. 设  $A$  为某读出单元的能量输出值, 则根据公式 1 反推可计算衰减前该单元的能量沉积值  $A_0$ .

## 2.3 横向泄漏修正

当簇射从量能器侧面向外延伸并发生横向泄漏时, 必须对其进行修正. AMS02 ECAL 在孔径内最大入射角度为  $23^\circ$ <sup>[8]</sup>, 针对垂直入射以及小角度斜入射两种情况, 本文对不同入射角每层各个单元沉积能量的分布规律进行了 MC 研究. 如图 3 所示, 单层各读出单元的沉积能量分布都近似中心对称.

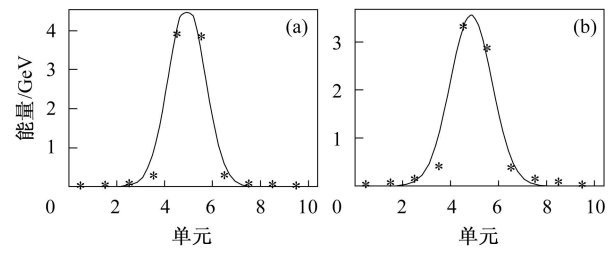


图 3 垂直入射及斜入射单层能量分布

(a), (b) 分别为 80 GeV 垂直入射第 8 层, 80 GeV 在  $x$  方向  $20^\circ$  斜入射第 8 层. 相对重心近似对称.

本文的重建程序中:

(1) 对于在  $xy$  平面上横向泄漏垂直光纤方向的层, 按照该层各单元的能量分布用对称法对泄漏部分进行补偿. 具体步骤如下:

首先, 判断从哪侧泄漏. 要求该层的能量最大单元不在边缘, 否则无法估计泄漏的大小.

其次, 找出该层能量沉积最大单元和次大单元, 判断这两个单元能量的大小关系, a) 如果能量相差 5% 以内 (如图 3(a)), 则以最大和次大两个单元的中心对称地取单元 (偶数个), 一直取到最边缘单元, 用这些单元计算能量沉积重心. b) 如果能量相差大于 5% (如图 3(b)), 则以该层能量沉积最大单元为中心对称地取单元 (奇数个), 一直取到最边缘单元, 用这些单元计算能量沉积重心.

最后, 计算在该重心无横向泄漏一侧部分的能量, 由对称性, 此即为该层总能量的一半, 从而得到该层总能量.

(2) 对于在  $xy$  平面上横向泄漏沿光纤方向的层: 这些层不能用对称法直接修正, 本文重建程序中参照其相邻的做了横向泄漏修正的层的横向泄漏百分比. 修正公式为

$$E_L = \frac{E_{L_0} \times E_{L'}}{E_{N_0}}, \quad (2)$$

其中  $E_L$  为该层修正后的能量,  $E_{L_0}$  为该层所有单元沉积能量,  $E_{N_0}$  为(1)中与该层相邻的做了修正的层 (首末两层取其隔层) 上所有单元的沉积能量,  $E_{L'}$  为(1)中得到的与该层相邻的做了修正的层的修正后的能量.

相邻两层的横向泄漏百分比基本相当, 因此, 程序当中以其相邻层横向泄漏百分比近似作为该层横向泄漏百分比, 并根据该层沉积能量对横向泄漏进行补偿. (综合使用(1)和(2)也可对簇射在  $x$  和  $y$  两个方向皆有横向泄漏的情况进行修正. 首先按照(1)对各层垂直光纤方向的泄漏部分进行补偿, 并能得到各层沿光纤方向泄漏部分的比例; 其次按照(2)对沿光纤方向的泄漏部分进行补偿. 此时, 每个在  $x$  和  $y$  两个方向皆有横向泄漏的层都得到两个方向上的修正.)

## 2.4 纵向泄漏修正

由于量能器的厚度有限, 高能粒子在量能器中的电磁簇射有时候会发生纵向泄漏, 在重建时必须对其进行修正. 纵向泄漏修正的主要方法有两种: 纵向拟合法和末层能量沉积法<sup>[3]</sup>. 本程序选用了精度较好、速度较快的末层能量沉积法进行修正. 修正公式为

$$E_{\text{Rec}} = \frac{E_{\text{Vis}}}{a - b \times E_{\text{Last}}/E_{\text{Vis}}}, \quad (3)$$

其中  $E_{\text{Last}}$  是经过横向泄漏修正之后量能器最后一层沉积能量,  $E_{\text{Vis}}$  是量能器的总沉积能量,  $E_{\text{Rec}}$  是重建能量.  $a, b$  为参数, 由量能器性质决定<sup>[3]</sup>.

根据末层沉积能量和总沉积能量, 代入公式(3)对纵向能量泄漏进行修正.

## 2.5 第二次方向重建

由于第一次方向重建得出的入射粒子的方向和入射点位置尚未考虑光纤衰减和横、纵向能量泄漏造成的影响, 所以需要第二次方向重建.

## 3 重建程序的运行结果

本重建程序在3GHz的CPU条件下重建1000个簇射(每层都有横向泄漏并满足修正条件)事例消耗的计算机时间约为30s.

### 3.1 能量重建结果

应用本重建程序对不同能量的电子的蒙特卡罗数

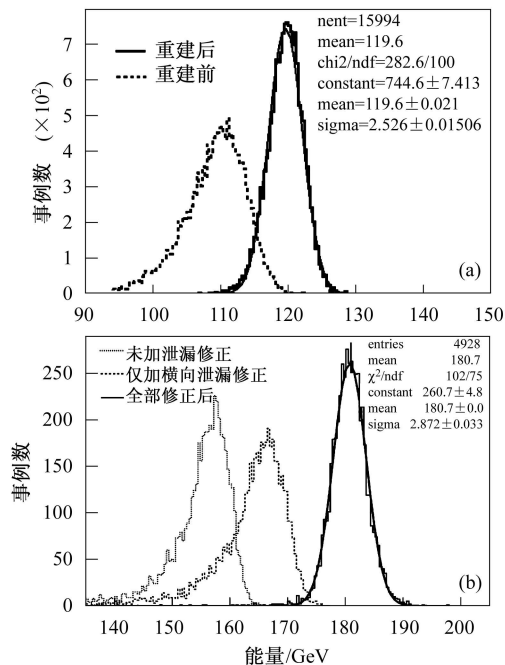


图4 120GeV(a)和180GeV(b)的电子入射重建前后能量分布

据以及2002年束流测试数据进行了三维重建. 图4分别显示了120GeV电子垂直入射(无横向泄漏有纵向泄漏)的束流测试样本和180GeV电子垂直入射(有横向及纵向泄漏)的蒙特卡罗样本的重建结果, 并对重建后的能量分布做高斯拟合, 拟合参数 $\sigma$ 表示量能器对该能量电子(光子)的能量分辨率.

鉴于蒙特卡罗方法的灵活性, 本文详细分析了以下3种MC电子数据的能量重建: (1) 垂直入射无横向泄漏; (2) 垂直入射, 一侧有横向泄漏; (3) 从中部10°斜入射到底角, 末几层有能量泄漏.

能量重建后, 数据样本的高斯拟合中心值如表1所示. 对所有能量点, 能量分布高斯拟合中心值都和入射能量符合得很好, 说明对光纤衰减、横纵向泄漏均能够正确修正.

表1 不同入射方式重建能量高斯拟合中心值, 样本1, 2, 3分别对应以上3种情况(GeV)

入射能量	3	6	10	15	20	30
样本1	2.941	5.917	9.882	14.82	19.81	29.76
样本2	3.012	5.993	9.981	14.98	19.99	29.99
样本3	3.011	5.975	9.939	14.91	19.87	29.79

入射能量	35	50	80	120	150	180
样本1	34.69	49.69	79.65	119.6	149.5	179.3
样本2	35.03	50.01	80.15	120.3	150.5	180.7
样本3	34.74	49.56	79.39	119.2	149.0	178.8

图5给出以上3组MC数据得到的能量分辨率随能量变化的拟合结果. 拟合曲线表示为  $\frac{\Delta E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b$ , 其中3种情况下  $a, b$  的拟合结果如表2. 可以看出, 横向有泄漏比横向无泄漏的结果稍差, 但非常接近.

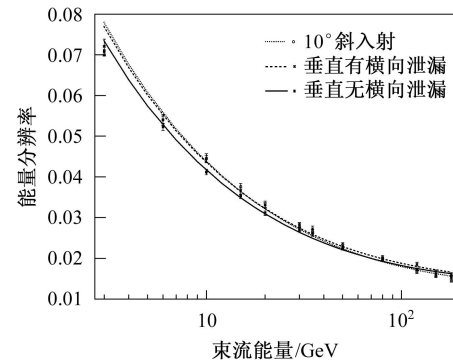


图5 不同入射方式的蒙特卡罗数据重建得到的能量分辨率随能量变化曲线

表2 图5中3条曲线拟合参数  $a, b$  的拟合结果

样本	$a$	$b$
1	0.125 ± 0.001	0.0133 ± 0.0003
2	0.131 ± 0.002	0.0135 ± 0.0003
3	0.133 ± 0.001	0.0121 ± 0.0003

### 3.2 角度重建结果

图 6 给出用重心法及权重拟合公式<sup>[5]</sup>对 30GeV 电子垂直无横向泄漏入射样本重建结果。

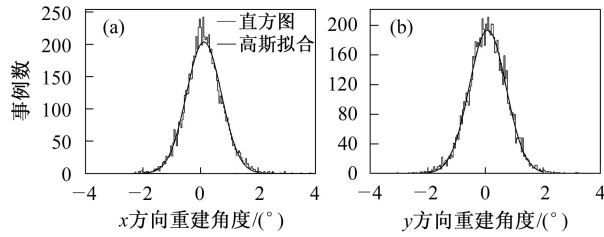


图 6 蒙特卡罗模拟 30GeV 电子垂直入射角度重建结果  
(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向。

图 7 给出应用本程序对束流测试数据及蒙特卡罗模拟数据方向重建的角分辨率随能量的变化的拟合结果, 其中  $\Delta\theta_{68}$  为对应各入射能量时量能器的角分辨率<sup>[5]</sup>。

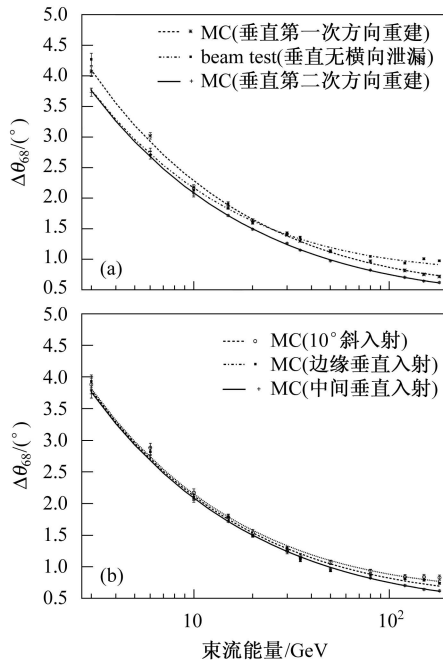


图 7 几种情况下得出的角分辨率随能量变化曲线  
(a) 给出束流测试的角分辨率结果作为比较。可见 MC 和束流测试结果很好符合, 高能情况下束流测试角分辨率变差是受电子学读出系统影响; (b) 作为参照, 中间垂直入射即 (a) 中垂直第二次方向重建结果。

由图 7(a) 可知, 加了光纤衰减修正以后的角分辨率比未加光纤衰减修正时的角分辨率有明显改善。另外由图 7(b) 可知, 边缘垂直入射以及  $10^\circ$  斜入射到末层角上的结果比中间垂直入射的结果变差。变差的主要原因都是横向泄漏对各层能量沉积重心重建造成的影响。

量能器的角分辨率  $\Delta\theta_{68}$  与入射能量满足关系式  $\Delta\theta_{68} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b$ , 对各个能量点对应角分辨率拟合得到  $a$  和  $b$ 。图 7 中各条蒙特卡罗曲线的拟合参数  $a, b$  如表 3。

表 3 图 7 中 4 条蒙特卡罗曲线拟合参数  $a, b$  的拟合结果

	$a(^{\circ})$	$b(^{\circ})$
垂直第二次	$6.48 \pm 0.03$	$0.38 \pm 0.01$
垂直第一次	$7.04 \pm 0.04$	$0.51 \pm 0.01$
$10^\circ$ 斜入射	$6.52 \pm 0.09$	$0.60 \pm 0.03$
边缘垂直入射	$6.50 \pm 0.09$	$0.50 \pm 0.03$

第二次方向重建是第一次方向重建的迭代。至于是否需要做第三次方向重建, 本文详细研究了各个能量点的第三次角度重建, 并与第二次角度重建所得结果做了对比。结果表明, 第三次角度重建的结果与第二次几乎相同, 例如, 对 20GeV 电子边缘垂直入射样本的方向重建角分辨率: 第二和第三次皆为  $1.49^\circ$ ; 对 180GeV 电子  $10^\circ$  斜入射: 第二和第三次皆为  $0.83^\circ$ 。因此, 不必再做第三次方向重建。

### 4 结论

本文给出基于 Linux C++ 的 AMS02 ECAL 事例重建程序。具有很好的通用性和可维护性。该程序包括两次方向重建, 光纤衰减修正, 横向、纵向泄漏补偿。能够对事例进行完整的能量和方向重建, 并给出比较理想的重建结果。另外, 该程序还有占用较少计算机系统资源和速度较快的优点。为 AMS02 ECAL 以后的束流测试以及在轨取数的事例重建做好了必要的准备。

## 参考文献(References)

- 1 Battiston R et al. *Astropart. Phys.*, 2000, **13**: 51—74
- 2 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)
- 3 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)
- 4 YANG Zhao-Yu et al. *HEP & NP*, 2004, **28**: 1086(in Chinese)
- 5 WANG Xiao-Bin et al. *HEP & NP*, 2005, **29**: 1071(in Chinese)  
(王小斌等. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 1071)
- 6 <http://root.cern.ch/>
- 7 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)
- 8 Cadoux F et al. *Nucl. Phys. B(Proc Suppl)*, 2002, 159

## 3D-Reconstruction of AMS02 Electromagnetic Calorimeter\*

LI Xin-Qiao<sup>1)</sup> CHEN Guo-Ming LI Zu-Hao CHEN Gang YANG Min YANG Zhao-Yu  
WANG Xiao-Bin ZHANG Shao-He TAO Jun-Quan LÜ Yu-Sheng CHEN He-Sheng  
(Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** A new program of 3D-reconstruction of AMS02 Electromagnetic Calorimeter(ECAL) is developed. In the program, the direction reconstruction is iterated, and the corrections for fiber attenuation, transverse leakage and longitudinal leakage are performed. The program is tested by comparing the beam test data and Monte-Carlo simulation, and a good agreement is obtained.

**Key words** calorimeter, 3D-reconstruction, angle resolution, energy resolution

---

Received 13 February 2006

\* Supported by NSFC (10099630), International S&T Collaboration Key Program, Ministry of Science and Technology of China

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