

# 超高能宇宙线广延大气簇射(EAS) 观测阵列事例重建的研究

罗光宣 谭有恒 张春生 张慧敏

(中国科学院高能物理研究所, 中国科学院宇宙线与高能天体物理开放实验室 北京 100039)

**摘 要** 通过认真分析影响 EAS 事例重建精度与速度的种种精细因素, 采用适当的算法(如改进的单纯形法与变度量最优化算法等), 设计、编制了具有一定通用性的 EAS 阵列事例重建程序 EASFIT。北京怀柔 EAS 阵列<sup>[1]</sup>采用 EASFIT 后, 改善了阵列综合测量精度与参数离线重建速度(提高速度 100 倍左右), 并得到了该 EAS 阵的一些重要的物理结果(如“knee”区能谱等)。

**关键词** 宇宙线 广延大气簇射(EAS) 重建 最优化算法 单纯形算法

**中图分类号** O572.1 TP311

## 0 引 言

超高能初级宇宙线粒子进入大气后将与大气中的原子核碰撞引发广延大气簇射<sup>[5]</sup>产生一群阵前如盘状的粒子群飞向地面。对原初超高能宇宙粒子的测量只有用地面的 EAS 阵列的探测器抽样测量簇射次级粒子到达各探测器的相对时间与荷电粒子数, 然后在离线计算机上通过计算(重建)而推算原初粒子的参数。

EASFIT 首先是在怀柔 EAS 阵列研究“knee”区能谱( $10^{15} \sim 10^{16}$  eV)的物理工作背景下开始开发的。“knee”区能谱是宇宙线研究中的一个很重要的问题<sup>[5]</sup>, 但怀柔阵列原有的事例重建程序可以正确重建的事例的最低能量却在“knee”以上, 另外当时计算机环境下(VAX750)重建速度约 1 个/分事例, 几乎与在线记录速度(57 个/小时)相当, 再加上重建误差较大严重制约了“knee”区能谱研究工作的开展。因此正确提取“knee”区能谱信息的关键是通过认真精细的工作大大提高 EAS 重建的精度与速度, 也是分析怀柔 EAS 数据的关键问题。另一方面西藏羊八井 EAS 阵列很重要的任务是对超高能  $\gamma$  天文点源的寻找, 这对方向重建的精度有很高的要求。EASFIT 亦对方向重建问题进行了认真考虑。

## 1 EASFIT 总体介绍

该程度具有较好的通用性, 可方便应用于各 EAS 阵列。编程中很好地按模块化方式处理, 同时注意编码的优化(特别是循环体最内层的代码)。

该程序已在 VAX 系列小型机, Sun 工作站, IBM360, HP 工作站, IBM 兼容微机上运行通过。整个程序由以下文件组成:

EASFIT.for: 主程序及大部分子程序。

EASf.for: 描述 EAS 横向分布的函数, 缺省为单年龄参数的 NKG 函数, 用户可据自己要

求重新编定, 参数有 2 个或超过 2 个时需在头文件中相应定义参数个数。

EASd.for: 定义 EAS 阵列参数(探测器的坐标、尺寸等)的数据块文件。

EASFIT.inc: 定义常数参数(如探测器个数等)的头文件。

EASFIT.card: 用户指定的, EASFIT 运行时需自动读入的参数文件(如输入输出文件名, 迭代过程出口条件参数等)。

该程序已应用于怀柔 EAS 阵列, 结合 Monte Carlo 仿真模拟方法的研究<sup>[9]</sup>表明比该阵原重建程序下该阵的综合测量精度(包括荷电粒子总数与方向)有较大提高<sup>[3]</sup>, 使怀柔 EAS 阵列达到‘knee’区宇宙线能谱及 EAS 衰减长度等物理研究工作的要求, 并已得到了一些较好的物理成果<sup>[2~4]</sup>。同时其速度提高了 100 倍左右(依赖于横向分布函数参数个数、出口条件要求精度而有所不同)。具体用在怀柔 EAS 阵列后速度与精度改善的定量情况见图 2 与文[3]。

同时, 分析怀柔实验数据得到的大量物理量分布也都佐证了其正确性。如 75 万实验记录 EAS 事例重建的到达方向的赤经分布是很好的均匀分布, 赤纬分布正好是一个与其地理纬度完全吻合的单峰分布(如图 1)等等<sup>[3]</sup>。

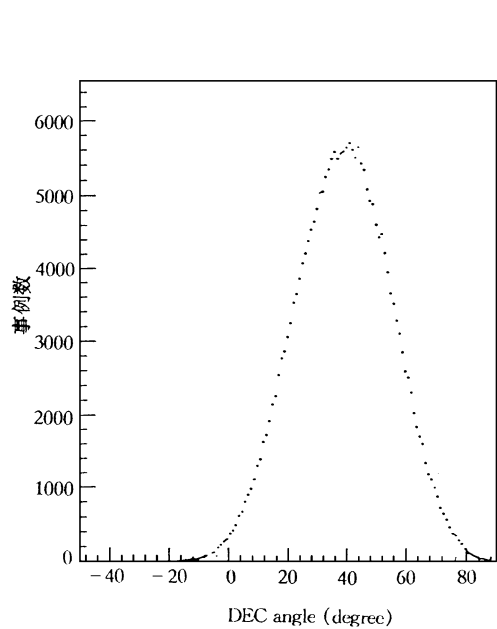


图 1 怀柔 EAS 阵列收集的约 75 万实验数据由 EASFIT 重建后的赤纬分布, 可以看到其峰值的赤纬与该阵地理纬度(40°25′)相一致

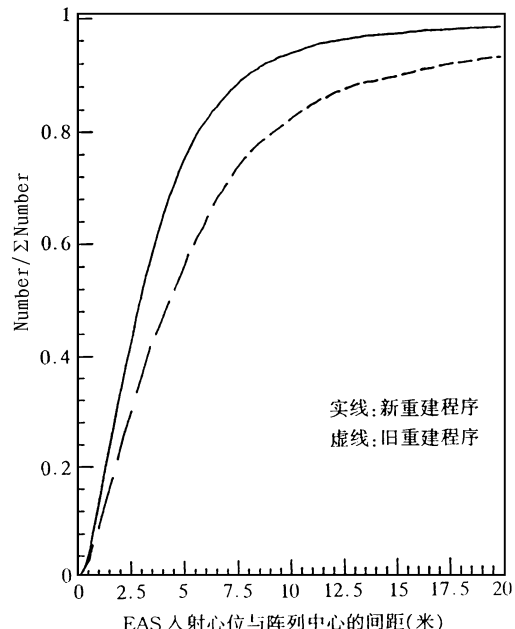


图 2 EAS 事例方向重建精度随其心距变化的关系曲线, 其中实线、虚线分别为怀柔站用 EASFIT 与旧重建程序重建的结果

对羊八井数据也作了部分类似检验。

由于 EAS 过程是一个随机过程, 严格意义上说应基于各探测器取样到的荷电粒子数与到达时间信息记数的分布函数(时间信号分布与高斯分布有较大偏离)用最大似然法求解。然而精确分布函数的复杂性与最大似然函数高维最大值的搜寻计算, 需要的巨大计算量都使这种处理不现实。

依据对问题的具体分析, 可采用对方向参数与结构参数分别用最小二乘法结合权重函数及其它修正精细确定的办法予以求解。

EASFIT 基本流程如图 3 所示。

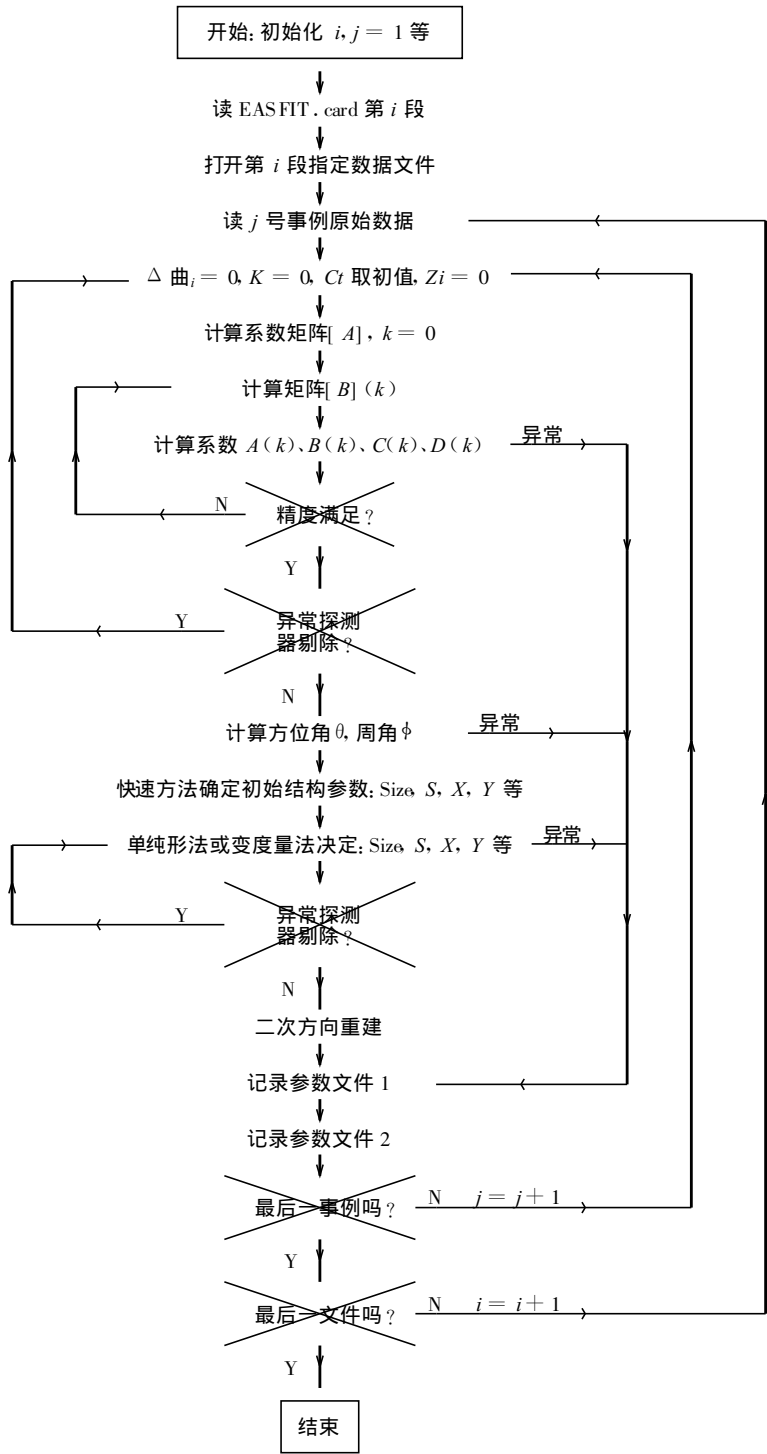


图 3 EASFIT 主要流程图

主要过程如下:

首先用修正的加权平均法得到初始 EAS 心位, 对事例方向用 LU 算法并用迭代法修正探测器对水平面的偏离、EAS 前锋面对平面的偏离, 再剔除异常响应快时间信号数据点后, 再作二次计算, 得到第一步方向参数; 将探测器投影到 EAS 坐标系中( $z$  轴为 EAS 中心轴), 对最大几个探测器作快速, 低维搜寻得到年龄  $S$ , 簇射大小(即次级荷电粒子总数)Size 的初始值, 再用改进的单纯形法或差商代替偏导数的 DFP 变度量最优化算法进行极小值的最优化搜寻, 确定心位坐标  $X_e$ 、 $Y_e$ 、Size 及横向分布参数(如  $S$  等), 最后用新计算的心位, 第二次计算 EAS 方向参数, 得到最后 EAS 事例重建参数。

## 2 方向参数重建

### 2.1 计算原理

阵列坐标系下 EAS 的方向, 天顶角  $\theta$ , 周角  $\phi$ , 通过最小二乘法得到, 即由使下式取最小值的  $\theta, \phi$  确定。

$$\chi_t^2 = \sum_{i=1}^{N_t} (AX_i + BY_i + CZ_i + D + \Delta_{\text{曲}} - d_{li})^2 W_{ti} \quad (1)$$

注: 1) 其中  $A, B, C$  为 EAS 方向与  $X, Y, Z$  轴的方向余弦。  $A = \sin \theta \cdot \cos \phi$ ,  $B = \sin \theta \cdot \sin \phi$ ,  $C = \cos \theta$ ,  $D$  为 EAS 前锋面到坐标原点的距离。

2)  $W_{ti} = 1/\sigma_{ti}^2 = 1/(\sigma_{\text{EAS}}^2 + \sigma_{\text{探测系统}}^2)$ 。由 MC 模拟得到取  $W_{ti} = \text{den}_i$  形式最好

3)  $\Delta_{\text{曲}}$  为 EAS 前锋面的曲面方程, 经 MC 分析取为  $ar_i^2 + br_i$ , 式中  $r_i(\theta, \phi)$  为第  $i$  号探测器到 EAS 中心轴的点线距离, 式中  $r_i$  还与 EAS 心位坐标有关。对 2)、3) 中的  $a, b, \lambda$  由相应阵列实验数据加以确定。

4)  $n_t$  为有效的快时间探测器个数。计算中用二次计算。第一次计算后对探测器的电子学误记录与宇宙线偶然符合通过设定实验值与计算值在某几率意义下最大偏差予以剔除。

5)  $d_{li} = c \cdot dt_i$  相当于记录某一时刻 EAS 前锋面到  $i$  号探测器的距离。其中  $c$  为光速。

### 2.2 计算算法

一般情况下(1)式的最小值无法直接解析求解, 但由于 EAS 阵列探测器都尽量置于同一水平面上( $\Delta_z/\Delta x_i \ll 1$ ,  $\Delta_z/\Delta y_i \ll 1$ ) EAS 前锋面与平面的偏离也很小, 因此可先不考虑这两因素, 设  $z_i = 0$ ,  $\Delta_{\text{曲}} = 0$  得到一次近似解, 再通过迭代修正, 得到符合要求的最后解。

1) 设  $z_i = 0$ ,  $\Delta_{\text{曲}} = 0$

则通过对(1)式分别对  $A, B, D$  的一阶偏微商为零可得到三元一次方程组

$$\begin{cases} (\sum X_i^2 W_{ti}) A_{(n)} + (\sum X_i Y_i W_{ti}) B_{(n)} + (\sum X_i W_{ti}) D_{(n)} = \sum X_i W_{ti} d_{li(n)} \\ (\sum X_i Y_i W_{ti}) A_{(n)} + (\sum Y_i^2 W_{ti}) B_{(n)} + (\sum Y_i W_{ti}) D_{(n)} = \sum Y_i W_{ti} d_{li(n)} \\ (\sum X_i W_{ti}) A_{(n)} + (\sum Y_i W_{ti}) B_{(n)} + (\sum W_{ti}) D_{(n)} = \sum W_{ti} d_{li(n)} \end{cases} \quad (2)$$

2) 迭代修正

按如下迭代公式进行迭代求解, 至两次确定的两方向的交角小于用户指定要求为止。

$$d_{li(n)} = d_{li(n-1)} - \Delta_{\text{曲}}(\theta_{(n-1)}, \phi_{(n-1)}) - \cos \theta_{(n-1)} \cdot Z_i$$

$$\theta_{(k)} = \arcsin(\sqrt{(A_{(k)}^2 + B_{(k)}^2)}); \phi_{(k)} = \arctg(B_{(k)} A_{(k)})$$

[注  $A_{(k)}=0$  时:取  $\phi_{(k)}=0$ ; 当  $A_{(k)}^2 + B_{(k)}^2 \geq 1$  时:该事例作坏事例剔除]

线性方程组(2)  $[A][X] = [B]$  用上下三角矩阵分解算法(LU 算法)求解,具体过程分两步进行;第一步:对  $[A]$  系数矩阵进行 LU 分解,结果存入数组  $A[n]$ ,该步有  $N^3/3$  次乘除运算,第二步:对  $[B]$  系数矩阵及上述结果  $[A]$  解出  $[X]$ ,该步用  $N^2$  次乘除运算,迭代中不需再进行第一步,只反复进行第二步即可,同时给出的条件数(conf)参数可作为反映方向重建质量的参数在以后的分析中利用。

### 3 结构参数的重建

#### 3.1 计算原理

EAS 事例的结构参数 Size(总次级荷电粒子数),横向分布函数参数  $S$ (单参数 NKG 函数时即取年龄  $S$ ),心位在阵列坐标系下的坐标,通过最小二乘法,即使下式取极小值而确定。

$$\chi_d^2 = \sum_{i=1}^{Nd} (\text{Size} \circ f_{\text{横}i}(s) - Nd_i)^2 W_{di} \quad (3)$$

注:1)  $Nd_i$  为落入第  $i$  号探测器的荷电粒子与探测器面积之比。

2)  $W_{di}$  为权重因子,其取法对结构参数的重建精度与速度有很大影响。

<a> 如取  $W_{di}$  与 Size 无关的函数,通过(3)式对 Size 偏导数为零,可直接求得 Size,即:  $\text{Size} = (\sum \text{den}_i W_{di} f_{\text{横}i}) / (\sum W_{di} f_{\text{横}i}^2)$ , 于是对式(3)的最优化搜寻可不对 Size 进行,问题降低一维,可提高速度。

<b> 一般来说,  $W_{di}$  为 Size 的函数,MC 模拟显示取:

$$W_{di} = 1 / (a_1 Nd_i'^2 + b_1 Nd_i' + a_2 Nd_i^2 + b_2 Nd_i + c) \text{ 时 Size 重建精度较好。}$$

式中:  $Nd_i' = f_{\text{横}i} \circ \text{Size}$ ,  $a_1, a_2, b_1, b_2, c$  系数用实验决定。

EASFIT 程序同时提供  $W_{di}$  与 Size 无关,有关的二种方式提供用户选择使用。

3) 荷电粒子数探测器一般有饱和值  $NdM_i$ , 对此相应修改该探测器对  $\chi_d^2$  的贡献为当  $Nd_i > NdM_i$  时

$$\chi_{di}'^2 = \begin{cases} Nd_i' > NdM_i & \text{时} & = 0 \\ Nd_i' \leq NdM_i & \text{时} & = \chi_{di}^2 (\text{不变}) \end{cases}$$

4)  $n_d$  为有效粒子数探测器数,同方向重建类似亦作二次拟合对电子误触发等偶然符合予以剔除。

#### 3.2 计算方法

1) 起始参数 心位由简单加权平均加经验公式修正确定。横向分布函数参数  $S$  与 Size 由经验公式基础上再作几个最大计数探测器低维快速最优化得到。

##### 2) 最优化搜寻算法

提供以下二种算法用户选用,前者用于低维,后者用于高维(如横向分布为多参数函数,  $W_{di}$  取复杂形式等)

##### a) 改进单纯形算法<sup>[7]</sup>

为适应本问题,对出口条件作了一定改进。为将参数约束在一定范围,采用罚函数法。为

使  $S \in [S1, S2]$ , 构造新的罚函数

$$\chi'_{di} = \begin{cases} S \in [S1, S2] \text{ 时} & = \chi_{di} \\ S > S2 & = X_{di} + (S - S2) \chi_{di} \\ S < S1 & = X_{di} + (S1 - S) \chi_{di} \end{cases}$$

b) 用差商代替偏导数的 DFP 变度量算法

为将参数约束在一定范围, 采用函数变换的办法。如为使  $S \in [0, 2]$  则用变换函数  $S' = \pi / (2 \cdot \arctg(S)) + 1$  完成。

## 4 结束语

随着羊八井二期工程的建成, 以及与意大利合作在羊八井建立地毯式 EAS 阵列工作的开展, 在线事例记录率的提高, 取样拟合点的增多, 都要求重建能更快速完成, 同时物理工作也要求较高的参数重建精度, 因此问题的进一步深入研究仍是很有意义的。

重建中另一个重要问题是能否识别原始成分(重建原初成份代码), Cosmos 模拟显示在探测器计数的相互关系中含有这样的信息, 神经网络方法, 很可能是从中提取这些信息重建成份最有效的数据处理方法。

致谢 作者罗光宣感谢戴贵亮先生对本文的讨论和建议, 感谢怀柔站工作期间董玉锯老师的关心。

## 参考文献

- 1 Tan Y H, et al. Proceedng of 2st ICRC (1990) HE. 7. 3.
- 2 罗光宣等. 怀柔 EAS 阵列对初级宇宙线膝区能源的测定. 高能物理与核物理, 1995, 19(9): 769.
- 3 罗光宣. 超高能宇宙线空气簇射现象的研究[硕士论文]. 北京, 中科院高能所, 1994.
- 4 Sun Xinxin, et al. Search for Cosmic Ray Bursts With Energy Above 10 14eV, *Chinese Physics Letters*. 1995, 12(1): 61.
- 5 (原联邦德国) O C 阿尔科费尔. 宇宙线入门. 徐春娴, 朱清其译. 北京: 科学出版社, 1987.
- 6 罗光宣等. 怀柔 EAS 阵列性能的 Monte Carlo 研究. 高能物理与核物理, 1995, 19(10): 884.
- 7 王子若, 陈永昌编. 优化计算方法. 北京: 机械工业出版社, 1989, P111.

# STUDY OF THE RECONSTRUCTION OF THE EAS EVENTS AT ULTRA-HIGH ENERGIES

Luo Guangxuan Tan Youheng Zhang Chunsheng Zhang Huimin  
(*Institute of High Energy Physics. Academia Sinica. Beijing 100039*)

**ABSTRACT** Taking into account of various factors which effect the reconstruction precision of EAS events and selecting some suitable optimum algorithm (such as simplex method algorithm, DFS algorithm). A new software EAS-FIT is made, which is of wider use and described briefly with some applications. This new software was been used to analyse the EAS raw data of Beijing Huairou array. The results show that it can improve overall precision of the array and greatly increse the speed of off-line reconstruction (20-120 times faster than the old one). In addition, some important physics results can be obtained such as energy spectrum at the 'keen' region and so on.

**KEY WORDS** cosmic pays extensive air shower (EAS); reconstruction optimum algorithm; simplex method.