

怀柔 EAS 阵列的 Monte Carlo 研究

罗光宣 谭有恒 张春生 董玉璐 袁 澎 张慧敏

王 辉 袁余奎 力 京

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1994-07-14 收稿

摘 要

用 GENAS 程序包为怀柔阵列产生了 36 万 Monte Carlo 模拟 EAS 事例,用它们研究了怀柔阵列的性能,确定了最佳的事例判选条件,对实验数据进行了正确性检验,得到了怀柔 EAS Size (即簇射在观测面的总荷电粒子数)与初级宇宙线能量之间的转换关系。这项研究表明,怀柔阵列的 EAS 心位和方向测定精度分别好于 3m 和 2.5° ; EAS Size 测定误差典型值约 8%;近垂直簇射的 Size (N) 与初能 (E) 的关系为 $E \approx 10^{10.64} N^{0.84}$ 。

关键词 广延大气簇射 (EAS), EAS 阵列, EAS Size, 初能, 天顶角。

1 引 言

与许多大型设备系统一样,怀柔 EAS 阵列也是一个由许多探测器件和电子学通道组成的复合系统。其整体性能不仅取决于粒子在探测器中的物理过程和光电信号在传输和电子学处理中的情况,而且还与阵列的海拔高度和具体阵形有关,因而难于直接测定。EAS 是一种以大气为介质的规模宏大的多粒子事件,尚无任何人工办法能够制造这种现象供人们去研究阵列的性能。然而,可以用 Monte Carlo 方法在计算机中模拟这种物理过程。限于计算机能力,以前怀柔组没有自己的 Monte Carlo 处理手段,性能指标是设法从各种专门实验和计算中估定的^[1]。1990年, EAS 快速模拟软件包 GENAS^[2]问世,使我们有了进行模拟研究的可能。利用此软件包,产生了 36 万多个模拟的怀柔 EAS 事例,对怀柔阵列的整体性能进行了研究,对怀柔近年来的实验数据进行了对比检验。本文报道这些结果。

2 模拟计算

模拟计算的具体内容是:用 Monte Carlo 方法产生 EAS 事例;模拟这些事例对怀柔阵列各探测通道的具体响应;并用处理实验数据的 EAS 重建程序处理之,得到各个模拟的 EAS 的特征参数,并与初始输入参数相比较以研究阵列性能。

整个 Monte Carlo 程序的结构和用途概括如图 1。其中的主程序包括两个部分: 调用模拟大气中的 EAS 过程的 GENAS 部分和调用模拟怀柔探测器效应的模块部分。而其中的参数文件则由用户提供给主程序, 它包括五类参数:

能量: 自总能量抽样。

初始粒子种类: 由 7 类核成分的积分分能谱^[3]在已抽定初能处的值的分布抽样决定。

方位角 φ : 在 $0^\circ-360^\circ$ 内均匀分布。

天顶角 θ : 在 $0^\circ-53^\circ$, 满足方向各向同性。

心位 (x, y) : 在触发效率 $\varepsilon = 1\%$ 等值圈内均匀投点。

2.1 设备对粒子响应过程的模拟

怀柔 EAS 阵列对粒子的探测过程包括塑料闪烁体对荷电粒子的响应及光电倍增管、光导箱、电缆及电子学系统对光电信号的响应。要在模拟中准确再现每一个过程是困难的, 通常采用的方法是用实验测出不同测量仪器对某一探测过程的响应之和, 并将此响应的分布引入模拟程序。沿此思路, 对几个关键的仪器响应过程作了如下处理:

1) 时间测量过程。由于 GENAS 已经考虑了闪烁体所引起的时间测量误差, 因此只需考虑光电倍增管、电缆、电子学系统引起的时间晃动。利用阵列的时间标定系统进行了此项测量: 同时送一个快速高压脉冲信号到两路快时间探测器去点燃固定在光电倍增管前方的发光二极管, 通过这两路探测器的 TDC 记录两路的输出脉冲时间差 Δt 。多次测量得到 Δt 的分布, 它近似于一个高斯分布, 其标准偏差 σ 是两路共同贡献的结果。若认为两路快时间通道的响应没有明显的差异, 则 $\sigma/\sqrt{2} = 1.2\text{ns}$ 就代表了每一路的光电倍增管、电缆及电子学系统对时间测量误差的贡献。

2) 粒子密度测量过程。GENAS 在抽样时已经考虑了 EAS 发展的固有涨落及闪烁体内发光过程的涨落, 因此在粒子密度测量的模拟中, 只需考虑光电倍增管及密度通道电子学在粒子密度测量中的涨落。这种涨落可以在探测器的粒子密度标定中被测定: 固定标定筒的光强, 多次测量某通道输出的 TDC 计数得到一个分布, 此分布的标准偏差就代表了探测通道对该光强的测量误差(由于它也包含了光源自身晃动的贡献, 这是一个安全的估计)。通过探测器的标定参数将光强转换为等价的粒子数。在不同的光强下重复上述测量, 得到对应于不同粒子数下的粒子密度测量误差分布函数并将之引入模拟程序。

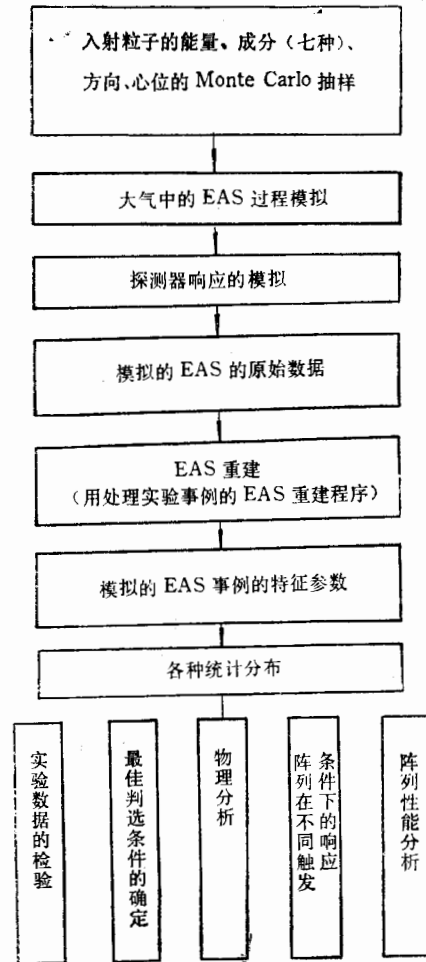


图 1 模拟计算的内容和流程

2.2 模拟中一些具体问题的考虑

2.2.1 EAS 心位投点面积的选取

图 2 为不同能量的 EAS 对怀柔阵列的触发效率 ε 随心距 r_c (即 EAS 心位到阵列中心的距离) 的变化曲线。可以看出, 在同一探测面积下, 对不同能量的 EAS 有着很不一样的探测效率。为避免偏差, 在投点面积的选取上, 对不同初能的 EAS 事例, 均以其触发效率 $\varepsilon = 1\%$ 时的探测面积 (πr_c^2) 作为 EAS 模拟中的心位投点面积。

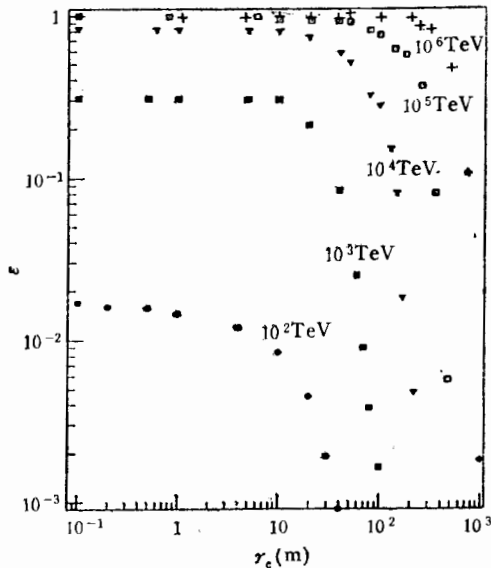


图 2 怀柔阵列的效率曲线

不同记号标记不同的 EAS 能量: ● 10^2 TeV,
■ 10^3 TeV ▽ 10^4 TeV, □ 10^5 TeV + 10^6 TeV。

2.2.2 初能和成分的抽样

按 GENAS 的要求对初级宇宙线成分进行了分类, 选取了每一种成分的初能谱, 并计算出了每种成分在总能谱中所占的比例。模拟中首先按总能谱抽样出初能, 然后再由各积分能谱在该初能下的值的分布抽样出其成分。能谱的下限能量即最小抽样能量 E_{\min} 被取为 100 TeV。

2.2.3 有效记录时间的估算

为了比较实验和模拟的 EAS 能谱的绝对流强值及在不同触发模式下的事例率, 必须知道一定的事例数所对应的记录

时间。

设阵列的有效探测面积为 S , 有效记录时间为 T , 抽样的事例数为 n , 观测天顶角区间在 θ_1 到 θ_2 之间, 原初积分能谱以 $I(E)$ 表示, 则 T 可用下式计算:

$$T = \frac{2n}{I(E) \cdot S \cdot (\cos^2\theta_2 - \cos^2\theta_1)} \quad (1)$$

3 模拟与实验结果的比较

对模拟事例和实验事例采用相同的判选条件^[3]进行筛选, 再以同样的 EAS 重建程序^[4]计算其 EAS 参数, 然后对它们的一些重要统计分布进行比较。

3.1 EAS 到达方向的天顶角分布

EAS 的天顶角分布不仅反映宇宙线的各向同性性质而且反映 EAS 在大气中的衰减情况, 从而与超高能作用和大气辐射长度相联系。图 3(a) 给出了模拟的与实验的天顶角分布的比较。 $n/\sum n$ 为落入相应 θ 区间的 EAS 事例份额。模拟与实验数据有相当

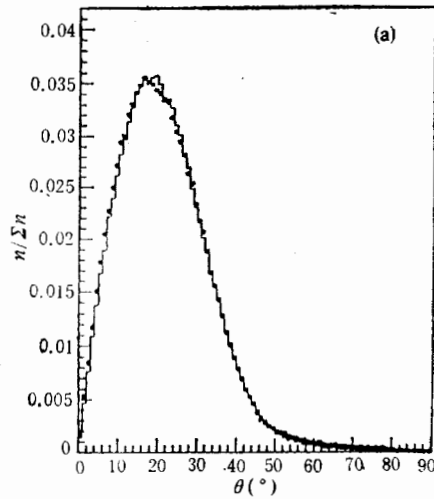


图 3(a)

对怀柔阵列 EAS 天顶角分布的检验

● 为实验数据,直方图为模拟结果

好的一致性。

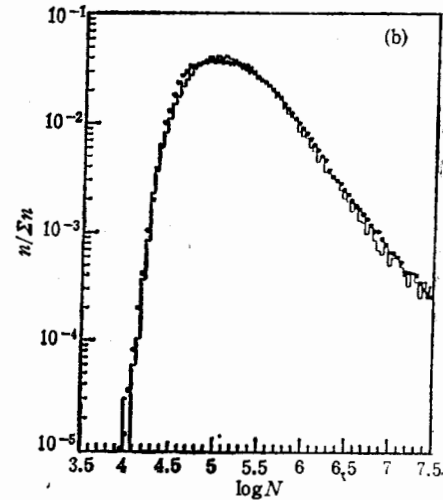


图 3 (b)

对怀柔阵列的 EAS Size 谱的检验(符号同(a))

3.2 阵列记录的 EAS 的 Size 构成

EAS Size, 即单个 EAS 在观测面的总荷电粒子数目, 是推算 EAS 初始粒子能量的基础。图 3(b) 是模拟的与实验的怀柔阵列 EAS Size 响应曲线的比较。二者间的符合同样是相当好的。

3.3 阵列的平均事例率

对当时触发条件下怀柔阵列的事例率, 模拟结果为每小时 57 个, 实验统计值为每小时 56 个。它们间的一致将会保证二者给出的宇宙线绝对流强的一致。

上述这些模拟与实验结果的彼此印证, 说明怀柔阵列的实验硬件和分析软件是可信的, 可以依据它们产生的数据进行物理分析和阵列性能研究。

4 怀柔阵列的性能指标

阵列的性能指标反映了观测能区的 EAS 在观测水平的发展状态和涨落, 阵列布置的合理性和各部件的性能, 以及离线数据处理和模拟计算的质量和精度。

用于研究阵列性能指标的模拟 EAS 事例的选择标准与用于实验的硬件触发条件和软件判选标准完全一致, 即: 至少十个探测器(包括中心探测器)被同时击中, 和落到所有探测器上的粒子密度之和 $\geq 240/\text{m}^2$ 。得到的主要性能指标如下:

4.1 阵列的探测效率和能量响应

对一定的硬件触发条件和离线分析事例判选标准, 入射的 EAS 有一定的被观测比。

例即探测效率。一般而言,效率是 EAS 初能、心距和天顶角的函数。图 2 给出了全天顶角区间 ($\theta \leq 53^\circ$) 的阵列探测效率与 EAS 能量和心距的关系。图 4 给出了怀柔阵列全天顶角区间的能量响应曲线,其峰值在 5×10^{14} eV 附近。为避免大天顶角时探测效率过低带来的不准确性,在推算宇宙线初能谱时只用了天顶角最小 ($\sec\theta < 1.05$) 的那组数据。

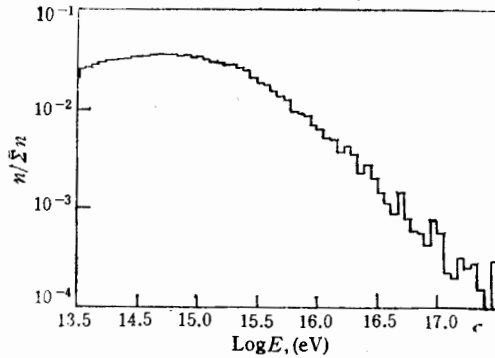


图 4 怀柔阵列的能量响应曲线

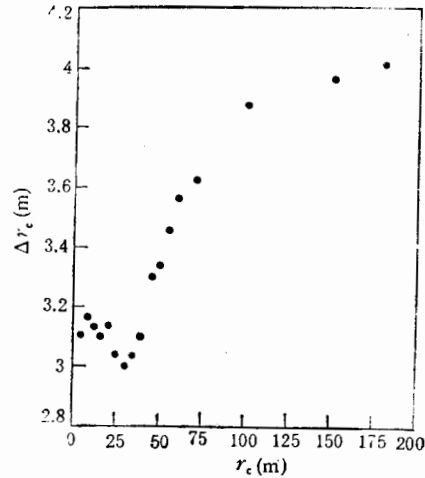


图 5 怀柔阵列心位测定精度和心距的关系

4.2 EAS 心位测定精度

“心位”,即 EAS 轴落在阵列坐标上的位置;“心距”,即 EAS 心位到阵列中心的距离。我们是这样定义和确定心位测定精度的: 设某一 EAS 事例的抽样得到的心位距阵列中心的位矢为 r_c , 利用离线重建程序拟合 EAS 参数得到的位矢为 r'_c 。对大量模拟事例进行统计,作 $|\Delta r_c| = |r'_c - r_c|$ 的分布,取几率为 50% 的 Δr_c 来代表阵列的心位测定精度。

统计并计算了不同心距(r_c)下的 Δr_c 。从图 5 可以看出,在心距 30m 之内心位测量精度保持在 3m 左右不变,而后随心距的增加测量精度越来越差。有关模拟结果还表明, Δr_c 还和初能及天顶角有关, E 越大、 θ 越小时心位定位精度越高。

4.3 EAS 方向测定精度

设一个 EAS 事例模拟抽样时的入射方向为 $L_1(l, m, n)$, 其中 l, m, n 代表 EAS 轴的方向余弦; 经分析程序重建后的方向为 $L_2(l', m', n')$ 。则 L_1 和 L_2 的空间夹角 ΔA 就代表了方向测量上的偏差。对大量的模拟事例作统计,可得到 $\Delta A = \arccos(L_1 \cdot L_2 / (|L_1| \cdot |L_2|))$ 的分布。定义该分布的中位值 ΔA_m 为阵列的方向测量精度。

图 6 给出了两种心距情况下具有不同方向测量偏差的事例所占的比例。其中曲线(1)代表 $r_c \leq 40$ m 的事例组,曲线(2)代表对不加心位选择的全体 EAS 事例所作的统计。由曲线(1)可知,对心距 $r_c \leq 40$ m 的用于物理分析的 EAS,怀柔阵列的角分辨

$$\Delta A_m \approx 2.5^\circ.$$

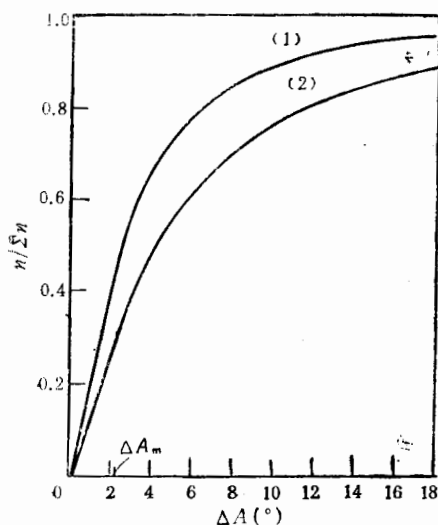


图 6 事例数比例和 ΔA 的关系

其中曲线(1)代表心距 $\leq 40\text{m}$ 的事例;曲线(2)代表不经过选择的全体事例。 ΔA 的中位值被取作阵列的方向测量精度。

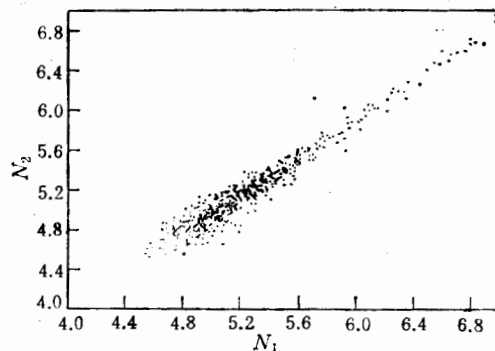


图 7 模拟的 Size N_1 和“观测”的 Size N_2 间的散点图

4.4 EAS Size 测定精度

将模拟产生的 Size 值 N_1 与经重建处理“测量”到的 Size 值 N_2 相比较,作 N_2-N_1 散点图(见图 7),可以清楚地看到,它们的平均行为有很好的线性关系,但其分散度随 Size 的变小而增大。这主要是由于当初能很低时,大气簇射发展到观测面时簇射小涨落大,同时探测器取样到的粒子数减少的缘故。

定义 Size 测定值的相对误差为 $\Delta N/N_1 = |N_1 - N_2|/N_1$, 并分 Size 区间进行统计,以其标准偏差作为阵列的 Size 测定精度指标。在我们所关心的 Size 区间 $N_1 = 10^5$ 和 $N_1 = 10^6$, 此精度分别为 15% 和 8%。

4.5 EAS Size 与初能的关系

对天顶角 $\vartheta < 17.25^\circ$ 的模拟 EAS 的初能 E 和经重建处理得到的 Size N_2 的关系进行统计,其平均行为可用下式很好地拟合:

$$E = 10^{10.64} N_2^{0.84} \quad (\text{eV}). \quad (2)$$

因此,怀柔 EAS 阵列的特征性能指标可归纳如下:

心位分辨: $\sim 3\text{m}$ (当 $r_c \leq 30\text{m}$)

方向分辨: $\sim 2.5^\circ$ (当 $r_c \leq 40\text{m}$)

Size 精度: $\sim 8\%$ (当 $N = 10^6$)

能量响应峰: $\sim 5 \times 10^{14} \text{eV}$.

$N \rightarrow E$ 转换: $E = 10^{10.64} N^{0.84} (\text{eV})$.

作者感谢霍安祥、丁林璋先生和孙欣新、曹臻同志的有益讨论和建议;感谢孟烈、施志政、王挺鹤、王焕玉同志在实验和设备建造上的帮助。

参 考 文 献

- [1] Tan, Y. H. et al., Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf. Adelaide, Australia, HE, 7.3—7.
- [2] K. Kasahara, S. Torii, *Computer Physics Communications*, 64 (1991) 109.
- [3] 罗光宣等,高能物理与核物理,19(1995)769.
- [4] 罗光宣等,怀柔实验总结报告,内部资料,1994.

Monte-Carlo Investigation on the Performance of Huairou EAS Array

Luo Guangxuan Tan Youheng Zhang Chunsheng Dong Yuju
Yuan Peng Zhang Huimin Wang Hui Yuan Yukui Li Jing
(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Received 14 July 1994

Abstract

360 thousands of Monte-Carlo EAS events have been simulated by using the "GENAS" package as well as the geometry and instrument response of Huairou EAS array. They are used for the investigation of array performance and event selection criteria, and for the check of experimental data. It shows that there are fair coincidence between the experimental and the simulated results on the trigger rate, the zenith angle distribution, the Size response etc. The accuracies of core position and arrival direction are about 3m and 2.5° , respectively. The relative error of EAS Size determination is about 8% when the Size is about 10^6 , the peak value of energy response of array is 5×10^{14} ev and the best fit of the relation between EAS Size and primary energy is $E \approx 10^{10.64} N^{0.84}$.

Key words extensive air shower, EAS array, EAS Size, primary energy, Zenith angle.