

西藏羊八井广延空气簇射阵列 性能的 Monte Carlo 研究

M. Amenomori⁵, 白占武², 曹 臻¹, 丁林垲¹, 冯振勇², K. Hibino⁸,
N. Hotta⁶, 黄 庆², 霍安祥¹, 贾焕玉², 江光佐², 焦善庆², F. Kajino¹²,
K. Kasahara⁹, 拉巴次仁⁴, 梅东明⁴, 孟 烈¹, 孟宪茹⁴, 米玛次仁⁴, K. Miz-
itani⁷, 木 钧³, H. Nanjo⁵, M. Nishizawa¹², 努桑⁴, M. Ohnishi¹², I. Oh-
ta⁶, 任敬儒¹, To. Saito⁸, M. Sakata¹², 施志政¹, M. Shibata¹⁰, T. Shirai⁹,
孙欣新¹, H. Sugimoto¹¹, 台 安³, K. Taira¹¹, 谭有恒¹, N. Tateyama⁹,
S. Torii⁹, 王 辉¹, 王家祥², 温诚忠², Y. Yamamoto¹², 余光泽², 袁 澎¹,
T. Yuda⁸, 曾家刚², 赵春华⁴, 张春生¹, 张慧敏¹, 张 力³, 张 鸣³, 扎
桑⁴, 扎西次仁⁴, 周文德³

1. (中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)
2. (中国西南交通大学物理系, 成都 610031)
3. (中国云南大学物理系, 昆明 650091)
4. (中国西藏大学数理系, 拉萨 851501)
5. (日本弘前大学, 弘前)
6. (日本宇都宫大学, 宇都宫)

7. (日本埼玉大学, 浦和)
8. (日本东京大学宇宙线研究所, 田無)
9. (日本神奈川大学, 横浜)
10. (日本横滨国立大学, 横浜)
11. (日本相模工业大学, 富士川)
12. (日本甲南大学, 神戸)

摘 要

本文用 Monte Carlo 方法研究西藏羊八井空气簇射阵列性能。确定好事例判选标准。簇射中心定位精度达 3.4m。原初粒子到达方向角分辨率好于 1.1°。原初粒子能量按 $\lg E_0 = \lg(0.45 \sum N_i) \pm 0.226$ 确定, 其中 $E_0(\text{TeV})$ 为初级入射粒子能量, $\sum N_i$ 为 FT 探测器上探测到的粒子总数。

一、引 言

中日合作广延空气簇射(EAS)实验计划已经从 1990 年元月开始执行。该 EAS 阵列位于中国西藏羊八井海拔 4300m 平坦的山间台地上, 由 49 个 0.5m² 的快时间(FT)闪烁

计数器和 16 个 0.25m^2 的粒子密度闪烁探测器组成,如图 1 所示.前者按 7×7 等间距排列成 $90\text{m} \times 90\text{m}$ 方阵,探测器间距为 15m ,后者围绕上述 FT 阵列在距离 30m 处均匀分布,探测器编号分别为 1—49 号和 50—65 号. FT 阵列兼作 EAS 事例的到达方向和粒子密度测量,外围探测器用于排除心位偏离阵列的事例.阵列结构和探测器及电子学性能的详细描述见[1].

为了对数据的物理分析做准备,本工作用 Monte Carlo 方法对阵列的空间角度分辨、能量响应、平均观测阈能和事例心位位置分辨进行了研究.通过大量模拟计算和统计分析,也确定了好事例的离线选择标准.

二、计算模型及与实验数据的比较

这项工作采用了合作组成员 K. Kasahara 和 S. Torii^[2]建立的程序包 GENAS.该程序用电磁级联 B 近似解做为空气簇射纵向发展的基本关系.对不同能量范围的原初宇宙线光子和质子作出相应的修正.用广泛公认的 p-p 相互作用截面和辐射长度,抽样给出第一次作用深度,并以该深度为起点,用上述修正的 B 近似级联曲线算出给定观测面所在深度处的簇射总电子数,并考虑了对数标度上的一个高斯型涨落.作为一个近似的四维模拟过程,该程序用作者总结出的一个横向分布函数加上阵列的几何布局,可算出每个探测器上的粒子数,并考虑了一个泊松型的涨落.每个粒子到垂直于簇射轴的平面的延迟时间也用类似的经验公式加涨落抽样给出.由于采用了表格和近似解析解,该程序具有相当快的运行速度.为这项研究,产生并记录了质子和核引起的 2×10^5 个 EAS 事例.这些事例的能量范围设置在 $1-10^5\text{TeV}$ 之间,按公认的原初宇宙线能谱和混合比例^[3]抽样,入射粒子的天顶角假设在 $0^\circ-45^\circ$ 之间且均匀分布.初记录的到达阵列的 EAS 事例满足与真

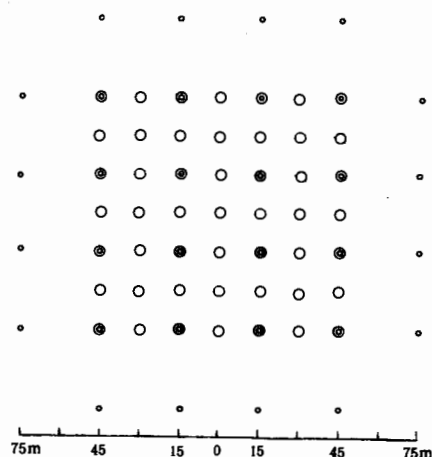


图 1 羊八井 EAS 阵列结构示意图

- ⊙ 0.5m^2 双头闪烁探测器
- 0.5m^2 单头闪烁探测器
- 0.25m^2 单头闪烁探测器

实阵列相同的触发判选条件(即在 49 路 FT 探测器中有任何 4 路探测器记录到大于 1 个粒子的计数).在实验方面,自 1990 年 10 月开始,已用上述触发判选条件以 20Hz 的计数率收集到多于 3×10^8 个事例.为了进行实验数据和模拟结果的比较,进行一个初步的事例判选,即要求事例的中心落在距阵列中心半径为 40m 的圆内,簇射的中心采用各探测器测量到的粒子密度加权平均求重心的方法获取.经验地将权重取为粒子密度的 k 次方,模拟结果表明,当 k 取 2.3 时,阵列对簇射心位的分辨达到最佳.原初粒子的入射方向是用簇射前锋面的平面近似对测量到的各探测点延迟时间进行拟合得到的.所得初步结果是关于阵列探测器记录到的簇射事例的总粒子数($\sum N_i$)分布和到达方向的天顶角分布.作为对于该 Monte Carlo 模拟程序可靠性和精度的初步检验,本文比较了得自于实验和模

拟的上述分布.

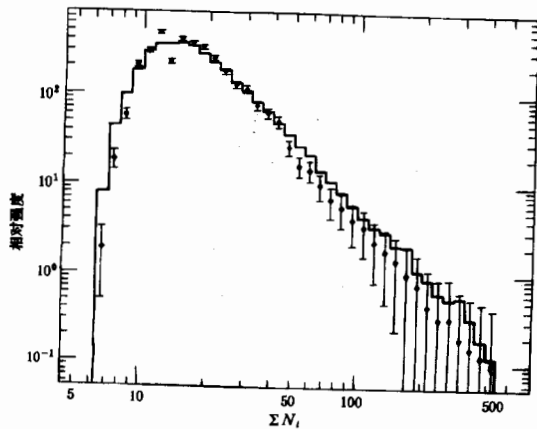


图2 实验和模拟的 $\sum N_i$ 分布比较

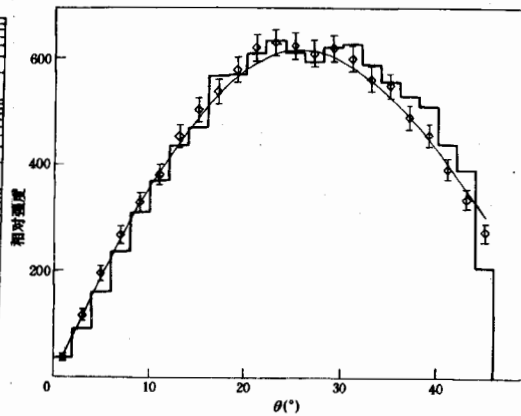


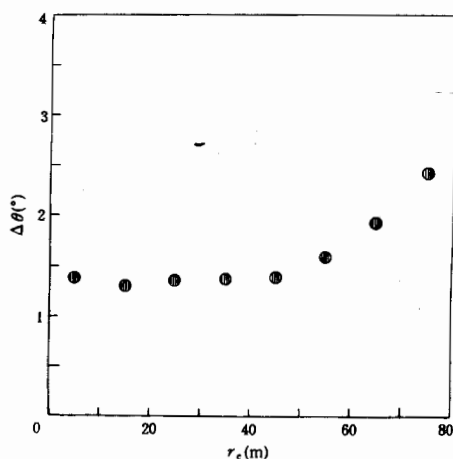
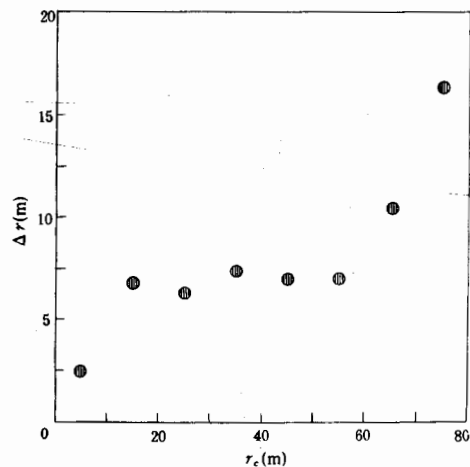
图3 实验和模拟的天顶角分布比较

图2中棱形点表示得自实验的 $\sum N_i$ 分布,直方图显示了模拟计算的相应分布.除了靠近探测阈能附近的 $\sum N_i < 20$ 的部分,分布具有一个负幂型的谱结构.其中,在 $20 \leq \sum N_i < 100$ 内,谱指数大约为 -2.1 ,在 $\sum N_i \geq 100$ 范围,大约为 -2.2 .在图3中,棱形点表示得自实验的到达方向天顶角分布.直方图给出了模拟结果.曲线给出的是用 $f(\theta) \propto \exp\{D_0(\sec\theta - 1)/\lambda\}$ 表示的天顶角分布函数拟合结果,参数 $\lambda = 155.6 \text{ g/cm}^2$.从图2和图3不难看出, Monte Carlo 计算有相当好的精确性,特别是在天顶角 $0^\circ - 45^\circ$ 范围之内.这为下面进行的关于阵列能量响应、角度分辨、簇射中心位置分辨和确定好事例判选条件的研究提供了较为可靠的保证.

三、判选条件

羊八井 EAS 阵列的主要物理目标是寻找甚高能 (TeV) 到超高能 (PeV) 能区的 γ 点源.这项工作要求阵列对宇宙线入射方向的测量精度高,以提高 $\gamma/\text{质子}$ 信噪比.为了得到足够好的到达方向分辨率以及进一步物理分析所必需的能量响应精度必须对实验记录到的事例进行合理的挑选.由于在计算原初粒子到达方向时采用了簇射前锋面平面近似,所以必须选择那些簇射中心尽可能靠近阵列中心的事例,使得有效的着火探测器尽可能对应小心距的密度和时间取样,以保证高的角度分辨,同时也使得簇射的有效部分能被记录.如果定义 r_c 代表阵列记录到的 EAS 事例的粒子密度重心 (即计算出的簇射心位) 到阵列中心的距离,通过模拟,得到阵列的角分辨 $\Delta\theta$ 和心位分辨 Δr (定义见下文) 随 r_c 的变化 (图 4, 5).

从图中可以发现,当 r_c 增大时, $\Delta\theta$ 和 Δr 均有增加的趋势,因此,对事例的心距 r_c 应当有所限制.另一方面,模拟还发现 EAS 的心位和探测到最大粒子密度探测器的位置有较强的关联,因此,确立了如下两条选择标准以保证所选事例的心位尽可能多的落在 FT 阵列

图4 阵列角分辨随 r_c 的变化图5 阵列心位分辨随 r_c 的变化

之内.

1) $r_c < 40\text{m}$

2) $N_{\max} < 49$ (即记录到最大粒子密度的探测器必须落入 FT 阵列之内, N_{\max} 为探测器编号). 这一判选条件加上在任意 4 路 FT 探测器上记录到大于 1.5 个等效粒子的触发判选条件, 将挑出大约 50% 记录到的事例. 针对这部分事例, 本文将给出该阵列的物理性能.

四、阵列的性能

1. 心位测量精度

用模拟产生的数据, 作实际心位和计算得出的心位之差的分布, 发现满足一个标准偏差为 3.4m 的高斯分布.

2. 角度分辨率

图 6 显示了实际到达方向和平面近似下算出的到达方向之间的夹角的分布. 选择所谓“中值角度差”(MAD) 使得上述分布的 50% 的事例分别位于其左右两边. 本文中把这个量称为阵列的角度分辨率. 对于上述判选条件选出的事例, MAD 随原初粒子能量 E_0 的上升而减小. 可表示为

$$MAD = 1.7 \left(\frac{E_0}{100\text{TeV}} \right)^{-0.15} - 0.603,$$

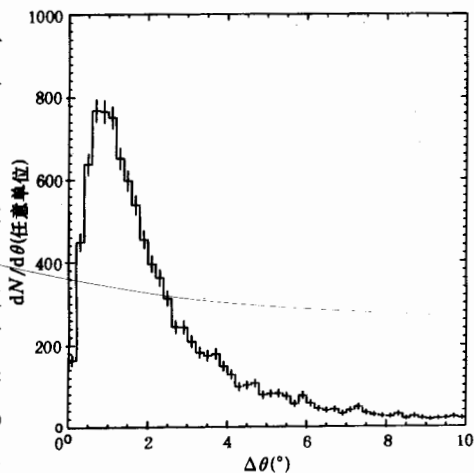


图6 实际到达方向与计算出的方向之间夹角的分布

其中 E_0 以 TeV 为单位, MAD 以度为单位. 对于 1.6° 的角分辨率, 相应的能量大约是 17TeV, 这被称为这些事例的中值能量.

3. 能量响应

从实验测出的可资利用的参量中, 唯一可以用于确定簇射的原初能量 E_0 的是阵列记录到的总粒子数 ($\sum N_i$), 显然这依赖于簇射的大小. 原初能量对 $\sum N_i$ 的依赖关系显示在图 7 中, 这种关系可以用

$$E_0 = 0.45 \sum N_i$$

给出一个近似的表示. 其中 E_0 以 TeV 为单位, $\sum N_i$ 限于对 49 个 FT 探测器测到的粒子数之和.

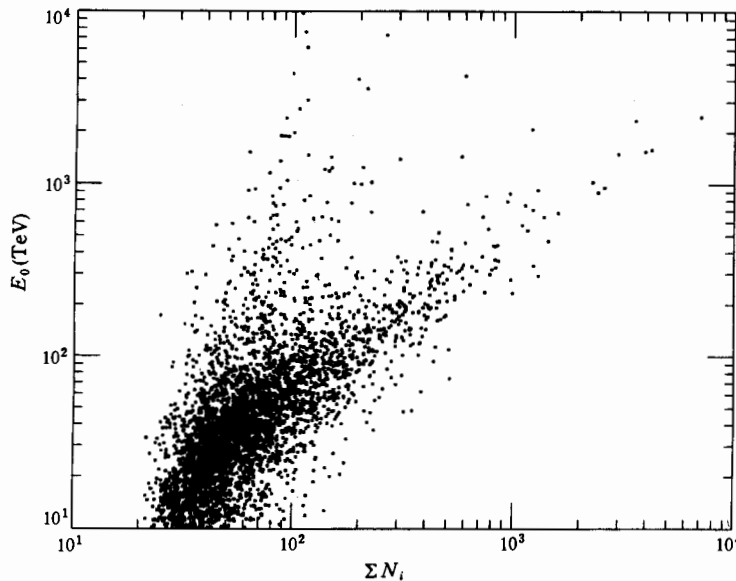


图 7 原初宇宙线能量和 $\sum N_i$ 的关系

五、结 论

将模拟计算结果和实验数据作比较, 清楚地显示出程序 GENAS 对实验数据的分析是很有帮助的. 借助这个程序, 确定了好事例判选条件可用于实验数据的分析. 按照这个判选条件, 簇射事例的中心位置确定精度达到 3.4m, 到达方向角度分辨率小于 1.1° , 原初宇宙线粒子能量可根据簇射粒子数按下列公式给出的精度确定:

$$\lg E_0 = \lg(0.45 \sum N_i) \pm 0.226,$$

其中, E_0 以 TeV 为单位.

参 考 文 献

[1] Tibet AS Collaboration, Symposium on High Energy Interactions, Michigan University, USA, Oct. 1990

- [2] K. Kasahara & S. Torii, *Computer Physics Communications*, **64**, (1991)109.
 [3] 张春生, 博士论文, 中国科学院高能物理研究所(1990), 67页.

The Monte Carlo Simulation for the Performance of the Yangbajing EAS Array, Tibet

M. AMENOMORI¹ BAI ZHANWU² CAO ZHEN¹ DING LINGKAI¹ FENG ZHENYONG² K. HIBINO³
 N. HOTTA⁴ HUANG QING² HUO ANXIANG¹ JIA HUANYU² JIANG GUANGZUO² JIAO
 SHANQING² F. KAJINO¹² K. KASAHARA⁵ LABACIREN⁴ MEI DONGMING⁴ MENG LIE¹ MENG
 XIANRU⁴ MIMACIREN⁴ K. MIZITANI⁷ MU JUN³ H. NANJO⁵ M. NISHIZAWA¹² NUSANG⁴ M.
 OHNISHI¹² I. OHTA⁶ REN JINGRU¹ TO. SAITO⁸ M. SAKATA¹² SHI ZHIZHENG¹ M. SHIBATA¹⁰
 T. SHIRAI⁹ SUN XINXIN¹ H. SUGIMOTO¹¹ TAI AN³ K. TAIRA¹¹ TAN YOUHENG¹ N.
 TATEYAMA⁹ S. TORII² WANG HUI¹ WANG JIAXIANG² WEN CHENGZHONG² Y. YAMAMOTO¹²
 YU GUANGCHE² YUAN PENG¹ T. YUDA⁸ ZENG JIAGANG² ZHOU CHUNHA⁴ ZHANG
 CHUNSHENG¹ ZHANG HUIMIN¹ ZHANG LI³ ZHANG MIN³ ZHASANG⁴ ZHAXICIREN⁴ ZHOU
 WENDE³

- 1 (*IHEP, Academia Sinica, Beijing 100039*)
 2 (*Department of Physics, South West Jiaotong University 610031*)
 3 (*Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091*)
 4 (*Department of Mathematics-Physics, Tibet University, Lasa 851501*)
 5 (*Hirosaki University, Hirosaki, Japan*)
 6 (*Utsunomiya University, Utsunomiya, Japan*)
 7 (*Saitama University, Urawa, Japan*)
 8 (*ICRR, University of Tokyo, Tanashi, Japan*)
 9 (*Kanagawa University, Yokohama, Japan*)
 10 (*Yokohama National University, Yokohama, Japan*)
 11 (*Shonan Institute of Technology, Fujisawa, Japan*)
 12 (*Konan University, Kobe, Japan*)

ABSTRACT

An analysis of the performance of the Yangbajing EAS array, Tibet, has been done with the Monte Carlo simulation in this paper. Selection criteria on EAS events have been defined. The accuracy of EAS core position determination is 3.4m. The angular resolution of primary particle arrival direction is better than 1.1 degree. The energy response function of the array has been given, i. e. $\lg(E_0) = \lg(0.45 \times \sum N_i) \pm 0.226$, where E_0 (TeV) is the primary energy of the incident particle, $\sum N_i$ is the sum of detected particle number on FT detectors.