

羊八井 ARGO 实验初期阵列性能^{*}

刘琨^{1;1)} 何会海² 陈欣¹ 卢红² 木钧¹ 沈培若²
谭有恒² 吴超勇² 杨群宇¹ 张慧敏² 张勇²

1(云南大学物理系 昆明 650091)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 中意合作羊八井 ARGO 实验采用大型 RPC 阵列探测广延大气簇射事例,本文报告了该探测阵列初期建设进展状况及测试运行的包含 16 个 CLUSTER 的局部阵列性能,并探讨由此阵列所采集数据重建后的事例芯位、到达方向与角分辨等.初步测试结果表明 RPC 阵列可很好地在高海拔、低气压条件下正常运行.

关键词 EAS RPC 芯位 天顶角 方位角 角分辨

1 引言

中意合作羊八井 ARGO 实验^[1]位于西藏拉萨以北 90km 羊八井地区(90°31'50"E, 30°06'38"N, 海拔高度 4300m, 大气深度为 606g/cm²), 采用大面积阻性板探测器 RPC(Resistive Plate Chamber)^[2]作其基本探测单元构成一地毯式全覆盖 EAS(Extensive Air Shower)阵列, 利用当地良好的自然条件及高海拔优势探测小空气簇射事例, 进而研究 γ 射线天文、 γ 暴, 并在 TeV 能区测量 \bar{p}/p 等. 阵列工作能区为 100GeV—200TeV, 覆盖天区赤纬 δ 范围为 $-10^\circ < \delta < 70^\circ$.

由于这是世界上首次将 RPC 用于高海拔 EAS 实验中, 1998 年在羊八井实地建造了一小型 50m² RPC 阵列^[3], 检测了在 4300m 的高海拔地区 RPC 探测器及其阵列的工作性能, 实验取得了良好的结果^[4,5]. 在此基础上于 2000 年末开始正式安装大型阵列, 2003 年开始局部阵列测试运行, 本文报道了其数据的分析结果.

2 实验装置

整个阵列分为中心区和监护环, 中心区由 10 × 13 个探测器群 (CLUSTER) 组成; 监护环由 24 个 CLUSTER 组成, 主要用于芯内、芯外事例的判别. 每个 CLUSTER 由 12 个 CHAMBER (1.28m × 2.82m) 组成, 而每个 CHAMBER 又包含 10 个基本探测器单元 PAD (56cm × 62.5cm), 每个 PAD 上有 8 个单向读出条 (提供 PAD 上的粒子数密度), 故整个阵列由 154 个 CLUSTER 共 18480 个 PAD 组成 (图 1).

实验气体组分: 氩气 (15%) / 氟里昂 (75%) / 异丁烷 (10%), RPC 工作于流光模式, 工作电压为 7800V, 此时探测效率高达 98%, 时间分辨为 ~ 1ns, 读出条重数 ~ 1.2^[6]. 测试运行的 4 × 4 个 Cluster 局部阵列位于阵列的中心区, 面积为 ~ 693m² (有效探测面积为 ~ 92%), 触发条件为着火 PAD (称为一个 hit) 的重数 ≥ 20 , 触发时间窗口 400ns. Hit 的到达时间由 TDC 给出, 其时间窗口为 2 μ s. 原始数据包含事例的产生时间及其每个 hit 的到达时间、位置、读出条重数等信息. 以下数据分析的结果均是基于任选

2004 - 02 - 12 收稿

* 国家自然科学基金 (10120130794), 中国科技部、中国科学院、中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室及意大利 INFN 基金资助

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

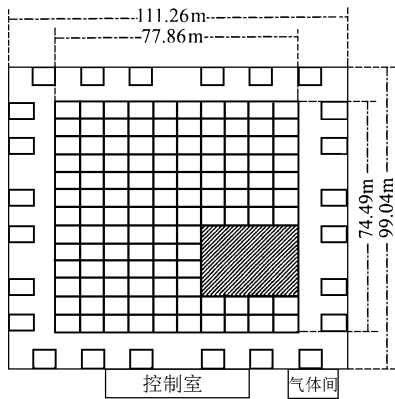


图 1 羊八井 ARGO 地毯探测器
其中每个方框代表一个 CLUSTER,图中阴影部分为测试运行的局部阵列.

的一次测试运行的数据,运行时间 ~ 10min,总事例数为 ~ 10⁵.

3 事例重建

事例重建是利用阵列探测到的 EAS 次级粒子的信息(到达时间、位置以及数目)重建原初粒子的方向、芯位、能量及成分等,对于局部阵列由于其有限的面积我们着重讨论方向和芯位的重建(在下面的数据处理中首先通过窗口扫描对噪声 hit 进行过滤,所选时间窗口为 150ns).

3.1 芯位重建

宇宙线流强的估算需要知道 EAS 芯位,同时芯位重建对原初方向重建、能量估算以及 γ/p 分辨都及其重要.重建芯位最简单的方法称为“重心法”,即计算次级粒子在观测面上的几何重心,由于其重建精度比较差一般使用高级的修正方法(加权法、平滑法、最大似然法等),这里给出所谓 Tree 法和 DTree 法的定义:

$$\mathbf{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \omega_i(l_i)}{\sum_{i=1}^N \omega_i(l_i)}, \quad (1)$$

其中 N 为 hit 重数,式中“Tree”长定义为: $l_i = \sum_{j=1}^N d(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) n_j$, $\mathbf{r}_c, \mathbf{r}_i$ 与 \mathbf{r}_j 分别为芯位、第 i 与第 j 个 hit 在观测面二维坐标系下的坐标矢量, $d(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ 为 \mathbf{r}_i 与 \mathbf{r}_j 间的距离, n_j 为第 j 个着火 PAD 中着火读出条的重数.

两种方法分别使用以下两种权重定义:

$$\omega_i^T = \frac{n_i}{l_i}, \quad \omega_i^{DT} = \left(1 - \frac{n_i l_i}{p_M}\right), \quad p_M = \max\{n_i l_i\}_{i=1, \dots, N}$$

即小 Tree 长 hit 具有较大的权重,事例重建后的芯位分布见图 2, Tree 法重建出的芯位分布更宽,且由于某些探测器噪声水平较高,重建出的芯位向这些探测器的位置倾斜,导致芯位分布的不对称性,而 DTree 法某种程度上滤掉了这些高噪声探测器的影响.芯位重建精度一方面取决于原初成分(不同原初成分 EAS 发展的横向分布不同),也依赖于重建方法和探测器性能.上述两种芯位重建方法中权重的取法很大程度上依赖于着火读出条的重数 n_i ,由于一个粒子打在一个 PAD 上引起的着火读出条的重数 (~ 1.2) 存在涨落,且单 PAD 上读出条的数目只有 8 条(即单 PAD 饱和粒子数为 8),同时局部阵列的有限面积只能采样 EAS 波前面的一部分,从而影响芯位重建的精度,同时很难对芯位在探测器内部和外部的的事例(即所谓芯内事例和芯外事例)进行区分(两重重建方法重建的所有事例的芯位都在探测器内部,这显然是错误的),这些也将影响芯外事例方向重建的精度.

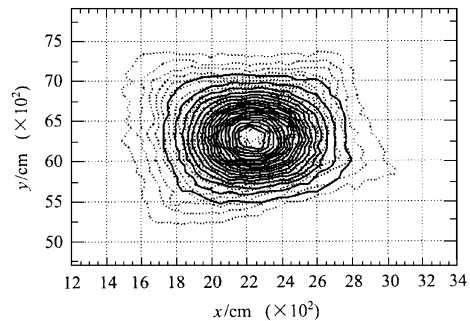


图 2 事例芯位的分布(实线为 DTree 法、虚线为 Tree 法的结果)

3.2 方向重建与探测器时间修正

EAS 方向重建的基本思想是对次级粒子的到达时间 t_i 作 χ^2 拟合:

$$\chi^2 = \sum_i w_i \{f(\mathbf{r}_i) - c(t_i - t_0)\}^2, \quad (2)$$

其中 w_i 为第 i 个 hit 的权重(这里采用读出条重数), c 为光速, t_0 为波前面到达坐标原点的时刻.波前面在小范围内近似为一垂直原初入射方向的平面,可以采用平面拟和原初方向 \mathbf{n} :

$$f(\mathbf{r}_i) = \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{n}. \quad (3)$$

对大阵列可以采用更精确的锥面近似:

$$f(\mathbf{r}_i) = \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{n} - \alpha \sqrt{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_c|^2 - (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_c) \cdot \mathbf{n}}, \quad (4)$$

其中 \mathbf{r}_c 为芯位, 修正因子 $\alpha = \text{ctg}\Omega$, $\Omega < 90^\circ$ 为原初入射方向和 EAS 波前面的夹角, 显然 $\alpha > 0$ (这一点可以用来粗略估计芯位重建的好坏, 及对芯内事例和芯外事例作简单判别, 见 3.3 节).

在进行方向重建前首先要对 hit 到达时间的系统误差作修正, 其产生原因包括 RPC 探测器的时间响应涨落、电缆长度的差异、电子学通道的不一致性等. 该误差将导致重建方向的系统偏差, 直观表现在原初粒子方位角分布 2π 周期的正弦调制^[4](图 3), 而利用等天顶角法或全天扫描法找源依赖于方位角分布的均匀性, 所以时间修正非常重要. 对于羊八井 ARGO 实验庞大的 PAD 数来说, 人工标定是比较困难的. 基于次级粒子到达时间分布对所有探测器单元的无偏性假设, 可以利用大统计量下 PAD 上 hit 的时间分布的差异对各个 PAD 作离线相对标定, 作了时间修正后方位角分布的正弦调制效应基本消除了(见图 4).

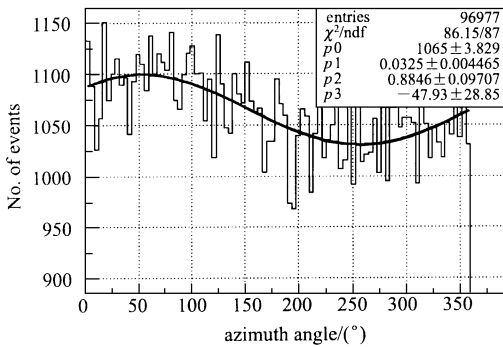


图 3 时间修正前的方位角分布图及其正弦拟和曲线
其中拟和参量 p_0 为直流分量, p_1 为正弦调制份额,
 p_2 为其周期 (2π 的倍数), p_3 为相位.

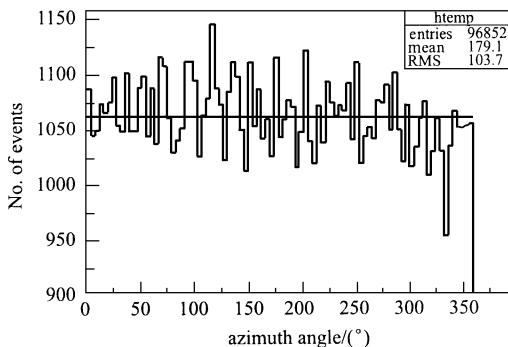


图 4 时间修正后的方位角分布图

由于阵列面积和探测器单元数目远大于 50m^2 实验(均为 50m^2 实验的 ~ 15 倍), 时间修正前方位角分布的正弦调制效应明显变弱 (50m^2 实验中正弦调制份额接近 40%).

3.3 天顶角分布

由于大气的吸收作用, 事例的天顶角 θ 的分布具有以下形式:

$$\frac{dN}{d\text{sec}\theta} \propto \frac{e^{-\frac{x_0}{\lambda} \text{sec}\theta}}{\text{sec}^3\theta}, \quad (5)$$

其中 x_0 为观测面大气垂直深度, λ 为吸收长度. 上式要求对事例芯位进行选择, 而局部阵列和其芯位重建方法无法做到这一点, 3.2 节方向重建中的 α 因子可以用来对芯内事例和芯外事例作初步判别, $\alpha > 0$ 的事例被认为是芯内事例, 得到的天顶角分布如图 5, 实验数据可以依公式 5 拟合到 50° , 拟和参数 $\lambda = 120 \pm 1\text{g}/\text{cm}^2$, 这和模拟计算^[7]及 50m^2 实验结果^[4]符合得很好.

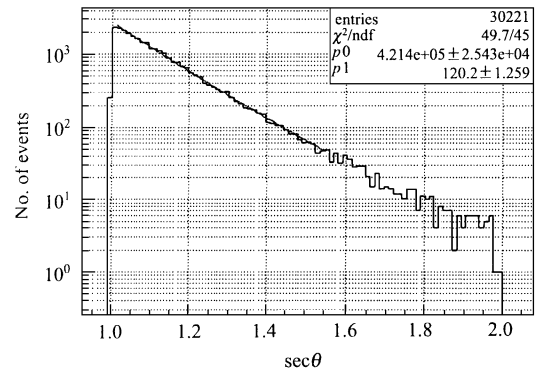


图 5 事例天顶角分布

3.4 角分辨

EAS 方向角分辨是检验阵列工作性能的一个重要参量, 同时也对物理分析工作至关重要. 我们采用棋盘法^[8]计算阵列的角分辨:

$$\sigma = \frac{M_{\Delta\theta}}{2\sqrt{2\ln 2}}, \quad (6)$$

其中 $M_{\Delta\theta}$ 是利用奇偶 PAD 重建原初方向空间角差分布的中位值, 图 6 为阵列角分辨随 hit 多重数的变化, 多重数越高角分辨越好, 对其进行幂率函数拟合, 指数为 -0.7 ± 0.1 , 这和棋盘法的假设(角分辨正比于事例多重数的平方根)基本吻合. 当事例 hit 多重数为 160 时角分辨为 $\sim 2^\circ$.

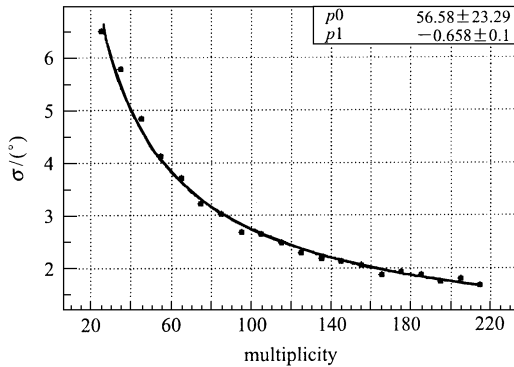


图 6 阵列角分辨随事例多重数的变化

4 结论

本文报告了当前羊八井宇宙线观测站 ARGO 实验的建设状况,所做的工作表明,RPC 阵列可以很好地在高海拔、低气压条件下稳定运行,数据重建后的各项性能指标与模拟计算及 50m^2 实验的结果相符合,达到了预期要求.数据分析显示探测器时间修正的重要性.

羊八井 ARGO 实验将于 2005 年中完成一期阵列建设,其正式运行将使羊八井观测站成为国际宇宙线研究的重要基地.

参考文献 (References)

- 1 Abbraccio M et al. Astroparticle Physics with ARGO Proposal, 1996
- 2 Santonico R et al. Nucl. Instrum. Methods, 1981, **A187**:337
- 3 LU Hong et al. HEP & NP, 1999, **23**:417—424 (in Chinese)
(卢红等.高能物理与核物理,1999,23:417—424)
- 4 HE Hui-Hai et al. HEP & NP, 2001, **25**(1):79—85 (in Chinese)
(何会海等.高能物理与核物理,2001,25(1):79—85)
- 5 QU Ruo-Fei et al. HEP & NP, 2001, **25**(5):371—376 (in Chinese)
(瞿若非等.高能物理与核物理,2001,25(5):371—376)
- 6 HE Hui-Hai et al. HEP & NP, 2004, **28**(4):422—425 (in Chinese)
(何会海等.高能物理与核物理,2004,28(4):422—425)
- 7 CUI Shu-Wang. PhD thesis, Institute of High Energy Physics, CAS, 2004
(in Chinese)
(崔树旺. 博士论文,中国科学院高能物理研究所,2004)
- 8 Alexandreas D E et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **A331**:350

Study on the Performance of YBJ Preliminary Carpet *

LIU Kun^{1,1)} HE Hui-Hai² CHEN Xin¹ LU Hong² MU Jun¹ SHEN Pei-Ruo² TAN You-Heng²
WU Chao-Yong² YANG Qun-Yu¹ ZHANG Hui-Min² ZHANG Yong²

1(Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

2(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The Sino-Italian collaboration YBJ-ARGO experiment is under construction at the Yang Baging High Altitude Cosmic Ray Laboratory (Tibet, China, 4300m a. s. l., $606\text{g}/\text{cm}^2$). About 693m^2 of preliminary carpet detector have been instrumented and put into operation for calibration runs devoted to test the performance of the individual components and their integrated operation. Events collected with a “shower mode” trigger have been recorded to check the consistency of physics data. The performance and characteristics of a preliminary carpet detector are analyzed using its test run data at the high altitude conditions. Shower reconstruction algorithms are described together with the results after time offset correction. Results of the test run show the importance of the time correction for data analysis, and some results concerning detector calibration, azimuth angle distribution, zenith angle distribution and angular resolution are presented.

Key words EAS, RPC, shower core, zenith angle, azimuth angle, angular resolution

Received 12 February 2004

* Supported by NSFC(10120130794), the Chinese Ministry of Science and Technology, the Chinese Academy of Sciences, the Key Laboratory of Astro-Particle Physics, and INFN, Italy

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