

郑州 EAS 观测阵列的设计和初期运行

孙洛瑞 郭正元 赵书俊 岳学东

(郑州大学物理系 郑州 450052)

摘 要

本文报道郑州宇宙线观测阵列的设计和初期运行情况. 该阵列的探测面积为 $30\text{m} \times 30\text{m}$, 有八个闪烁计数器, 控制运行采用国际标准的 CAMAC 系统. 它可以对次级总粒子数为 4×10^4 到 8×10^6 的宇宙线广延大气簇射现象自动地进行连续观测.

一、引 言

超高能宇宙线的流强很低, 而且随着能量的升高迅速下降, 加之宇宙线入射到地球的时间又是随机性的, 所以, 对超高能宇宙线的探测就非常困难. 但是, 超高能宇宙线进入地球的大气层后, 与大气顶层的原子核发生作用形成级联簇射. 簇射生成的次级粒子, 分布在一个形状类似于凹透镜的圆盘内, 以接近于光速的速度向地面移动. 在海平面附近, 簇射次级粒子的分布半径可达数百米乃至若干公里. 这种现象称为宇宙线广延大气簇射 (EAS). 利用这一现象, 可以在地球表面使用多个探测器布置成一个阵列, 通过获取 EAS 事例的一些参数, 有效地探测超高能宇宙线, 研究与之相关的高能物理和天体物理问题.

郑州大学宇宙线研究组在校园内 (北纬 $34^{\circ}44'$, 东经 $113^{\circ}17'$, 海拔高度约 100m) 建造了一个小型宇宙线观测阵列, 其设计目的除了前述内容外, 还要以此为基础, 探索研制新型探测器和廉价阵列的方法. 该阵列已于 1990 年 11 月开始正式运转, 它能长时间、连续灵敏地探测簇射总粒子数大于 4×10^4 的 EAS 事例. 到 1992 年 3 月底, 一共记录到 10 万多个事例. 本文介绍阵列的设计及初期运行的情况.

二、阵列的粒子探测系统

郑州阵列的粒子探测系统由八个闪烁计数器组成. 四个快速时间探测器安装在一个 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的正方形顶点上, 四个触发计数器安装在一个 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 的正方形顶点上 (图 1). 两个正方形的中心相近而不重合. 八个闪烁计数器都兼作粒子密度探测器, 它们被安装于同一个水平面内 (绝对误差不大于 5cm). $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的探测器布局, 是验证 Linsley

效应的“标准”面积^[1]. 这将为今后开展这方面的研究工作打下一定的基础.

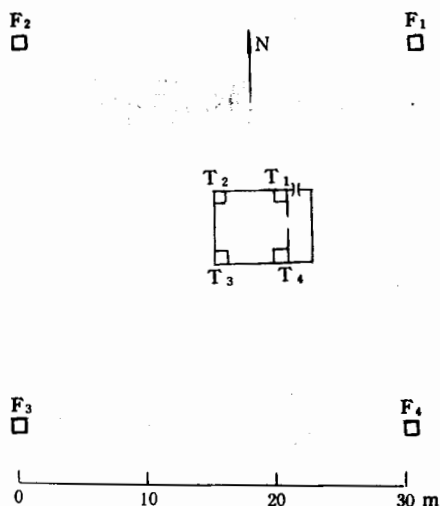


图1 郑州宇宙线观测阵列布局图
T₁—T₄为触发计数器, F₁—F₄为快速时间探测器

闪烁计数器的光导箱用2mm厚的黑铁皮制成,外形为正四棱锥形,采用空气光导.箱内壁涂有白色漫反射涂料,以提高光收集效率.所用闪烁体的外形尺寸为50cm×50cm×5cm,其五面被涂上漫反射涂料,未涂的一面是一个最大面积的抛光面,它在安装时水平向下.闪烁体下方50cm处是光电倍增管(GDB-50L型).

闪烁计数器输出的电脉冲,经由快速响应和低衰减的同轴电缆,送往电子学记录系统.阵列的记录控制系统与触发计数器都安装在中心控制室内.来自闪烁计数器的信号经过劈裂器,被分成两个相同的信号,分别经过高增益和低增益通道而被记录.两个通道的增益之比为40:1.在粒子密度不太大的情况下,采用高增益通道的信号以提高探测器的灵敏度.当高增益通道达到饱和时,改用低增益信号,从而扩大了探测器的动态范围.

为了将闪烁计数器输出的脉冲信号转换成数字量(粒子数),需要对它们进行定标.把探测器的记录系统置于“单符合”状态,其输出信号幅度的分布曲线有一个峰状突起,称为单粒子峰,它与单个粒子在闪烁体内的电离损失相对应.峰的宽度由多方面的因素决定,诸如入射粒子的天顶角分布、到达光电倍增管光阴极的光子数涨落、粒子在闪烁体内能量损失的涨落等.为了减小粒子入射角不同造成的误差,又采用了计数管望远镜做双重符合计数,以选取接近垂直入射的 μ 子来进行定标.对于每一个闪烁计数器分别做出这两种曲线,求出它们的单粒子峰道数之比.在计算簇射的有关参数时,以双重符合的定标值为基准.而在进行定期校核时,使用“单符合”的分布曲线,更为简便易行.

三、数据的采集与处理

实验过程的控制和数据的采集,使用国际标准的电子计算机自动测量与控制系统(CAMAC)来实现.整个系统的方框图如图2所示.快速时间探测器输出的脉冲信号,除了被送往ADC转换为粒子数外,同时还被送往TDC测量各探测器接收到粒子的相对时间,用以推算初级宇宙线入射的方向.触发计数器的信号有一部分被送往符合电路.符合电路被置于三重符合状态,它的输出脉冲用于启动记录系统,开始以下的分析过程:

1. 对触发阵列的事例进行初步判选.计算机首先由ADC读入八个探测器所探测到的簇射粒子数,只有当四个快速时间探测器中至少有三个接收到的粒子密度 $\rho > 2/\text{m}^2$ 时,事例才被分析.否则,中止分析过程,系统返回初始状态.约有22%的事例满足这一条件而被进一步分析.

2. 计算初级宇宙线的入射方向.应用最小二乘法对快速时间探测器所接收到的簇射

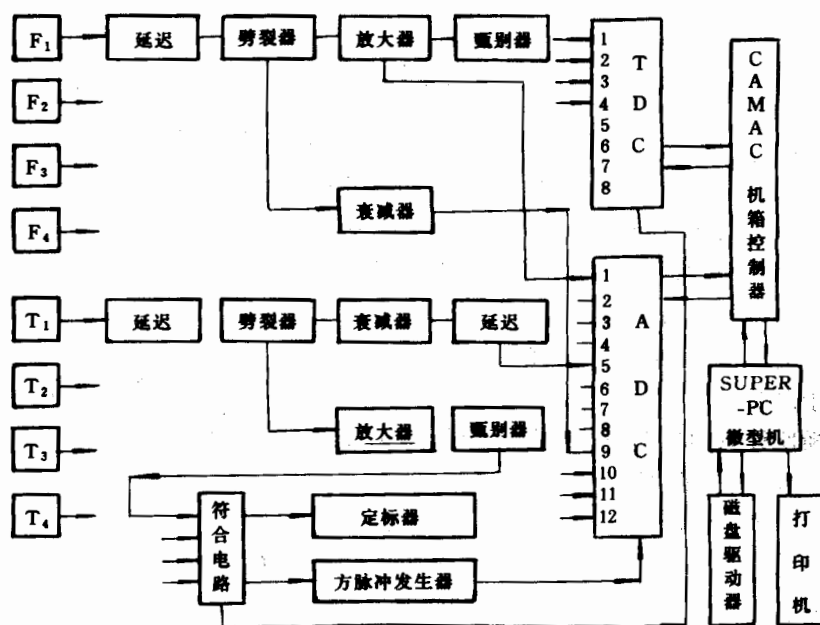


图2 记录控制系统的方框图

次级粒子进行共面拟合,求得初级宇宙线入射的天顶角 θ 和方位角 φ . 设第 i 个探测器的位置坐标为 (x_i, y_i) , 它接收到次级粒子的时间为 t_i , 则计算可得:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{m}{l}\right), \quad (1)$$

$$\theta = \arccos \sqrt{1 - m^2 - l^2}, \quad (2)$$

其中,

$$l = c \cdot (A \cdot E - C \cdot D) / (A^2 - B \cdot C),$$

$$m = c \cdot (A \cdot D - B \cdot E) / (A^2 - B \cdot C).$$

上式中, c 为光速, 其它字母的意义为:

$$A = \sum (x_i \cdot y_i) - \sum x_i \cdot \sum y_i,$$

$$B = \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2,$$

$$C = \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2,$$

$$D = \sum (x_i \cdot t_i) - \sum x_i \cdot \sum t_i,$$

$$E = \sum (y_i \cdot t_i) - \sum y_i \cdot \sum t_i.$$

根据求得的 θ 和 φ 值, 结合事例发生的时间, 可以计算出宇宙线入射方向所对应的赤经 α 和赤纬 δ .

3. 用最大似然法估计簇射次级总粒子数 N 和中心位置 (x_0, y_0) . 由于阵列的面积比较小, 我们又只对簇射中心落于阵列内部的事例感兴趣, 所以, 可以假定距簇射中心为 r

处的一点的次级粒子密度为^[2]:

$$\rho = \frac{N}{2\pi} \cdot \frac{\exp(-r/R)}{R(r+1)}, \quad (3)$$

式中 $R=80\text{m}$, 为一常数. 在簇射次级粒子分布平面内任选一点 (x, y) , 连同它周围的八个点组成一个网格. 对于任意给定的 N 值, 以网格中的每一点作为簇射中心, 根据式(3)可以求出各个探测器接收粒子数的期待值以及相应的似然函数值. 调整 N 的数值, 直到似然函数达到极大. 如果求出的九个似然函数中最大的一个不对应于网格的中心, 则以最大似然函数所对应的点为中心再做一个 3×3 的网格, 重复前面的计算, 直到最大似然函数落在中心点为止. 这个中心点在探测平面内的投影 (x_0, y_0) 即为簇射的中心, 相应的 N 值为次级粒子总数.

4. 判断所计算的事例是否符合记录要求. 用于判选的条件有两个:

(1) 簇射次级粒子总数 $N \geq 4 \times 10^4$;

(2) 簇射中心 (x_0, y_0) 处于前述探测器安装的大正方形内.

同时满足这两个条件的事例才被视为有效, 其参数被存入磁盘, 以供离线分析使用. 部分参数被打印出来, 便于对阵列运转的情况进行了解. 若前述两个条件中的任一个不被满足, 该事例即被淘汰.

进行一次完整的事例分析, 平均需时 5.6 秒钟. 在分析过程中, 计算机每隔 1 秒向记录系统查询一次, 如果有新的事例发生, 则将原始数据读入内存留待处理. 由此可见, 探测系统的死时间小于 1 秒. 触发阵列的事例约 6 分钟出现一次, 因而可以认为阵列对于所探测的事例是连续灵敏的.

四、阵列运行获得的初步结果

郑州宇宙线观测阵列于 1990 年 11 月 19 日正式投入运转, 到 1992 年 3 月底, 共记录到 10 万多个次级总粒子数大于 4×10^4 的簇射事例. 对于这些事例进行初步分析, 得到了以下结果:

1. 初级宇宙线入射的角分布

入射事例数对天顶角 θ 的微分分布可以表示为下式:

$$Z(\theta)d\theta = k \cdot \cos^n \theta \cdot \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

式中常数 $k=3370$, $n=9.5$. 事例数随入射方位角的分布表明, 从各个方位角入射的几率差不多是相等的.

用“虚关闭”法对入射方向的测量误差进行了估算. 在大部分的有效事例中, 四个快速时间探测器都接收到次级粒子并给出有效的相对时间值, 据此可以计算出 θ 和 φ . 然后人为地假定在事例到达时有一个探测器被关闭(称为虚关闭), 只用其余三个探测器计算出另一组入射方向的角度 θ' 和 φ' , 并以 $\Delta\theta = \theta - \theta'$ 和 $\Delta\varphi = \varphi - \varphi'$ 分别表示 θ 和 φ 的偏差. 对于大量事例, 求出 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$ 的分布, 得出 θ 和 φ 的标准误差, 结果列于表 1 和表 2 中.

表 1 入射天顶角 θ 分布表

$\theta(^{\circ})$	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-60
$\sigma(\theta)$	2.12	2.12	2.34	2.34	2.54	2.54	2.80	2.80	3.46	3.55
事例数	1992	5291	7247	7692	7008	5891	4427	2722	1385	1101

表 2 入射方位角 φ 分布表

$\varphi(^{\circ})$	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
$\sigma(\varphi)$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
事例数	4615	4472	4552	4630	4940	4622	5130	4822

2. 初级宇宙线的次级总粒子数谱

为了对郑州阵列的设计和运行情况进一步检验, 还根据一年多来所获取的数据, 做出

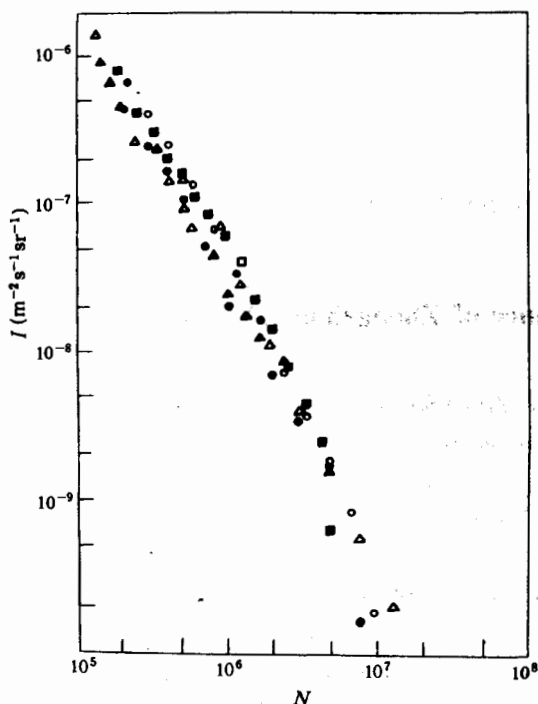


图 3 积分粒子数谱

图中所示实验数据分别来自于: ■——本实验, ▲Sydney^[3], ○——Buckland Park^[4], △——Catz 等^[5], ●——Ashton 等^[6].

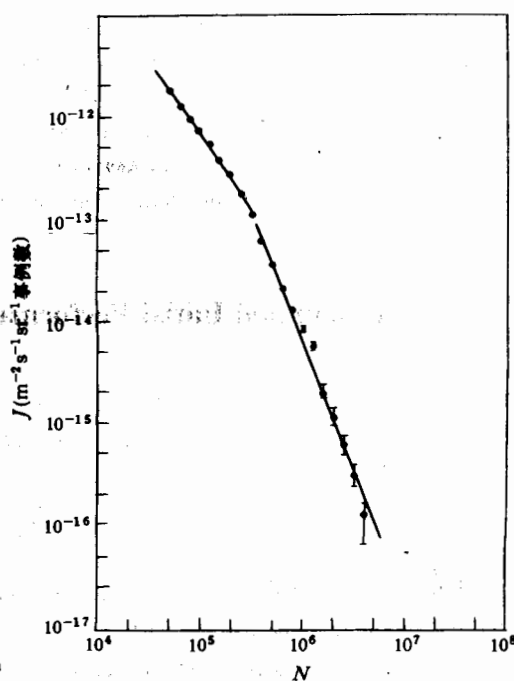


图 4 微分粒子数谱

了积分粒子数谱(图 3)和微分粒子数谱(图 4). 在进行数据处理前, 利用 Monte Carlo 模拟计算, 确定中心落于 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的探测面内、次级总粒子数不同的各种簇射对本阵列的触发几率. 为了避免由于探测效率太低而引起的较大误差, 只选用那些对阵列的触发效率接近于 100% 的事例. 所选事例的次级总粒子数为 $4 \times 10^4 - 8 \times 10^6$. 接近于所选下限的

事例,其触发效率略低,按照模拟计算的结果,对它们进行了适当的补偿.在计算过程中,还根据文献[7]的工作结果,对闪烁计数器的转换效率进行了必要的修正.所选事例的入射天顶角都小于 20° ,这样做的目的是为了避开由于大角度入射而产生的较大误差.由图可以看出,本实验测得的积分流强与其他研究组的结果符合得相当好.在微分粒子数谱中,对应于粒子数 3×10^5 附近,谱的指数由 -1.8 改变为 -2.8 ,这一拐点已经被许多研究组观测到.对拐点出现的原因也有过不少讨论^[8,9].

郑州宇宙线观测阵列,是在河南省科委和河南省教委的资助下建成的.郑州大学高能物理研究室的许多同志参加了一定的工作.物理系计算机房的同志在数据处理方面也给予过不少帮助.作者在此一并向他们表示感谢.

参 考 文 献

- [1] J. Linsley, Univ. New Mexica Reseach Note, UNML-61083.
- [2] G. W. Clark et al, *Phys. Rev.*, **122**(1961),637.
- [3] L. Sun & M. M. Winn, *Nucl. Instr. & Meth.*, **223**(1984),173.
- [4] P. C. Crouch et al., *Nucl. Instr. & Meth.*, **179**(1981),467.
- [5] Ph. Catz et al., *Proc. of 14th ICRC*, **12**(1975),4329.
- [6] F. Ashton et al., *Proc. of 16th ICRC*, **13**(1979),243.
- [7] S. Shibata et al., *Proc. of 9th ICRC*, **2**(1965),672.
- [8] J. R. Prescott, *Proc. Phys. Soc.*, **A69**(1956),870.
- [9] G. Khristiansen et al., *Cosmic Rays of Superhigh Energies*, Verlag Karl Thiernig, 1980,p148

Design and Initial Performance of Zhengzhou EAS Array

SUN LUORUI GUO ZHENGYUAN ZHAO SHUJUN YUE XUEDONG
(Department of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

ABSTRACT

This paper describes the design and initial operation of the Zhengzhou Air Shower Array. The array is composed of 8 scintillation counters and its detection area is about $30\text{m} \times 30\text{m}$. An international standard CAMAC system is employed to control the experiment. The measurement of cosmic ray showers with size range from 4×10^4 to 8×10^6 is performed continuously and automatically.