

# 甚高能区宇宙线流强气象效应的分析\*

贾 焕 玉

(西南交通大学 成都 610031)

曹 臻 张 慧 敏

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

1993年5月22日收到

## 摘 要

讨论了用中日合作西藏羊八井超高能宇宙线空气簇射阵列作甚高能区宇宙线强度监测的可能性;分析了空气簇射阵列触发计数率的气象效应;摸索出一套气压及环境温度效应的修正方法,并用于1992年1月至2月观测数据的修正。

**关键词** 空气簇射阵列, TeV 宇宙线, 计数率, 气象效应。

## 1 引 言

用中子监视器和 $\mu$ 子探测器对宇宙线流强进行不间断观测,在当今大气物理及日地空间物理的研究中已成为一项日常工作。在日地空间物理,太阳剧烈活动的观测,GeV能区宇宙线产生、加速和传播机制的研究等方面都取得了重要的结果。自50年代起,人们就定量地研究了称为“气象效应”的宇宙线强度变化,这种效应起源于大气的气压、温度和湿度等气象参量的变化,以及它们之间的相互“干涉效应”。用中子监视器和 $\mu$ 子探测器记录的宇宙线强度,必须进行气象效应的修正,其中气压修正已成为GeV能区宇宙线流强测量中不可缺少的一个环节。70年代以后,广延空气簇射探测技术发展的主要目标是用于超高能区宇宙线粒子与大气核产生的超高能相互作用研究和探索极高能( $10^{18}$ — $10^{20}$ eV)的宇宙线粒子。83年以后主要朝提高角度分辨率方向发展,用于寻找超高能 $\gamma$ 点源。中日合作西藏羊八井广延空气簇射阵列正是为此目的而建设的。由于观测站海拔的提高,观测阈值下降,EAS触发计数率显著提高,加之采用了先进的快电子学技术,可以在很小的统计涨落( $<0.5\%h^{-1}$ )水平上记录EAS事例,这就提供了用于TeV能区宇宙线强度变化测量的可能性。为此,必须研究影响宇宙线强度变化的各种效应(其中气象效应最为显著)并对已知的明显关联作出修正。这样高海拔、高统计性和高能量的宇宙线流强监测尝试尚属首例,以往的气象效应修正方式不能直接应用,另外,由于广延空气

\* 国家自然科学基金、中国科学院、日本文部省资助。

簇射的特点,高空气压的变化甚至会产生更重要的影响,这就更依赖于各观测站所处的地理、气候环境和实验室环境及阵列触发条件。发展适于各个观测站自己的宇宙线流强修正方法具有重要的实用价值和理论价值。这些效应的研究成为宇宙线流强监测,特别是用于探索在 TeV 能区宇宙线传播甚至起源等问题中的重要环节。本文探讨了将羊八井广延空气簇射阵列计数率用于 TeV 能区宇宙线流强变化监测的可能性。着重分析了计数率受气象、环境因素变化的调制规律并摸索出相应的修正方法。

## 2 气象、环境因素的分析

中日合作西藏羊八井广延空气簇射阵列(YBJ EAS 阵列),位于  $90^{\circ}31'E$ ,  $30^{\circ}06'N$ , 拉萨西北约 90km (直线距离),海拔 4310m,由 56 个闪烁计数器按一定间隔排成阵列。该阵列的有关参数及性能详见<sup>[1,2]</sup>。该阵列触发判选条件为中心 49 路快时间探测器中任意 4 路的符合,符合时间小于  $1\mu s$ 。所记录的广延空气簇射阈能(按效率为 0.1 计算)为 10TeV,触发速率 20Hz。该站于 1991 年 9 月安装了气压、室内外温度、室内湿度 6 通道环境监测仪,可产生上述四个参量的连续记录,并且每两小时输出一次数字记录值。截止 1992 年 3 月 23 日共产生 1286 个有效记录,即两小时 EAS 事例计数率和相同时间的环境参数。同时收集了 1990 年 3 月,1991 年 3 月和 8 月拉萨气象站( $90^{\circ}08'E$ ,  $29^{\circ}41'N$ , 海拔 3650m)高空气压、温度、湿度月报(每日北京时间 7:30 和 19:30 两次记录)。本文的数据基础就由上述几部分构成。

按照在低能宇宙线测量研究中得到的大气气象效应的完整描述<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\Delta I(h)}{I(h)} = -\beta\Delta h + \int_0^h [W_T(h')\Delta T(h') + W_M(h')\Delta M(h')]dh'$$

式中,  $h$  是观测高度的正常气压,  $\Delta h$  是观测高度处气压变化,  $W_T(h')$  和  $W_M(h')$  是气压为  $h'$  等压面上的温度和湿度系数密度,(可由粒子在大气中传播的理论算出);  $\Delta T(h')$  和  $\Delta M(h')$  分别表示气压为  $h'$  等压面上温度和湿度的变化(由气象探空气球观测得到),在忽略高空温度及湿度效应(例如对于中子成分,最大分别为 0.03% 和 0.001%)<sup>[4]</sup>情况下,低能宇宙线流强与观测面处气压变化量的关联可简单地用一个指数关系来描述。对于甚高能区宇宙线的 EAS 测量方法,则不但有地面气压变化引起 EAS 触发率的变化,而且大气中不同高度处气压变化的分布不均匀性还能影响整个 EAS 的横向发展过程,影响簇射到达观测面时的横向分布,从而改变 EAS 的触发效率。显然,这种影响是依赖于各个不同阵列所处的海拔高度和所采用的触发判选条件的。因此,用 EAS 阵列测量宇宙线流强变化,其气象效应就不可能只用一个固定参数和地面单个气压测量点的数据给出普适的描述。然而为适应对宇宙线流强的短时期变化(小时级或十分钟级)行为的研究,当地气象台站的每日两次高空观测不足以提供气压修正所需要的气压变化信息,必须寻找一种近似的气象效应修正方法,依赖于 EAS 阵列各种参数,并且仅用地面连续观测的量作为修正的参数。为此,分析了大气中不同深度下,气压变化的关联。图 1 显示了一个典型的在不同深度下气压变化的行为。从图 1 中可以看出,虽然变化的幅度不同,但在较低的精度下,地面气压变化与高空气压变化存在着关联。在这种精度所表征的近似程度下,

用地面气压与阵列的 EAS 触发率间的关联代替整个大气的气压效应,并用于气压效应修正正是可能的.将 EAS 触发率以  $T_p = 0.998$  天的周期进行折叠后的位相分布和用同样处理方法得到地面气压位相分布(图 2),也非常清晰地体现了上述关联.图 2(a)的直方图表示宇宙线强度的日周期位相分布;图 2(b)的直方图表示地面气压变化的位相分布.在更长时间范围的非周期变化中(幅度更大)上述对应关系也清晰地存在.

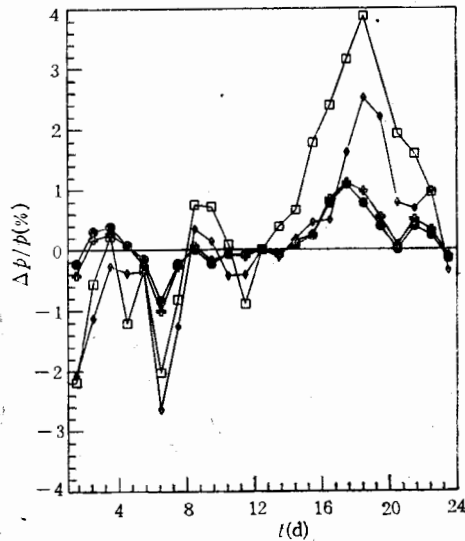


图 1 1991年3月拉萨地区气压变化曲线  
(气球测量结果)

● 658mbar 等压面; + 600mbar 等压面、◇ 300mbar 等压面; □ 100mbar 等压面. 横坐标为时间.

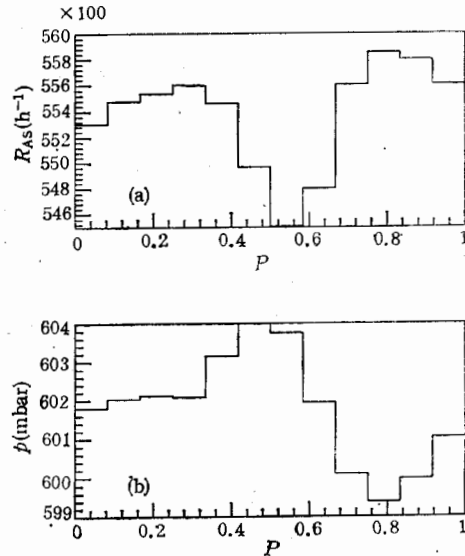


图 2 EAS 触发率(a)和地面气压  
(b)的周日变化  
横坐标是相对位相.

除了上述宇宙线 EAS 在大气传播过程中的气象效应外,还注意到另一类非宇宙线物理的环境因素影响,即实验室环境温度对电子学系统的影响导致 EAS 触发率的变化.单位温度变化( $^{\circ}\text{C}$ )引起的触发率变化与单位气压变化(mbar)引起的触发率变化幅度几乎相同.造成这种现状的原因是 EAS 测量技术所用大面积阵列必须置于室外,阵列设计的目标是用于超高能区  $\gamma$  天文研究,并没有要求严格的恒温条件,而在低能区宇宙线变化监测中所用的中子监视器或  $\mu$  子探测器都是置于恒温条件下的实验室内.鉴于实验室环境温度的影响,在关联分析中将同时考虑气压效应及室内温度效应,并用它们与 EAS 触发率的关联函数修正观测到的 EAS 触发率.

### 3 关联分析及其修正方法

由于存在气压和温度两个参量的共同影响,在求关联系数时,采用两变量多参数最小二乘拟合,以避免另一变量的积分效应引起的拟合误差.用

$$\Delta R_{As}(T, p) = A_T \Delta T + B_p (\Delta p)^2 + C_p (\Delta p) + D \quad (1)$$

作为试验函数,拟合实验数据并计算关联系数.其中  $\Delta R_{As}(T, p) = R_{As} - \bar{R}_{As}$ ,  $\Delta T =$

$T - \bar{T}$  和  $\Delta p = p - \bar{p}$ , 分别表示所用记录覆盖的时间范围内 EAS 触发率变化量 ( $\text{h}^{-1}$ ), 温度变化量 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 和气压变化量 (mbar), 其中的平均值为上述时间范围内测量值的平均值;  $A_T, B_p, C_p$  和  $D$  分别表示温度系数, 二次气压系数, 一次气压系数和零次气压系数。定义

$$\sigma_{AS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta R_{AS})_i^2},$$

$$\bar{\chi}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\Delta R_{AS}_i - R_{AS}(T_i, P_i)]^2,$$

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{\bar{\chi}^2}{\sigma_{AS}^2}},$$

$$\sigma_{cor} = \sqrt{\bar{\chi}^2},$$

分别为 EAS 触发率标准偏差, 拟合平均  $\chi$  平方, EAS 触发率与气压和室内温度的联合关联系数以及均方根气压温度修正误差。其中  $N$  为有效记录数目。用 1991 年 10 月—11 月和 1992 年 1 月—3 月的共 1286 个有效记录作为拟合输入, 得到如表 1 所示的关联及修正系数:

表 1 气压、温度与 EAS 触发率之间的关联系数

时 间	$N$	$\sigma_{AS}(\text{h}^{-1})$	$\rho$	$\sigma_{cor}(\text{h}^{-1})$
91.10.12—11.19	431	930.8	0.8170	536.7
92.1.10—3.23	855	1603	0.9172	638.7
92.1.2—2.20	378	1837	0.9581	526.0
时 间	$A_T(\text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$B_p(\text{h}^{-2} \cdot \text{mbar}^{-2})$	$C_p(\text{h}^{-1} \cdot \text{mbar}^{-1})$	$D(\text{h}^{-1})$
91.10.12—11.19	-449.7	8.144	-414.0	-37.18
92.1.10—3.23	-234.0	2.245	-277.9	-32.56
92.1.2—2.20	-181.3	-3.627	-322.1	68.00

在关联系数为 0.82—0.96 表示的关联水平上, 可用式(1)近似地描述宇宙线 EAS 触发率的气压温度关联, 从而可按

$$R_{AS}(t) = R_{AS}(T, p, t) - \Delta R_{AS}(T(t), P(t)) \quad (2)$$

的修正方式求出 TeV 能区宇宙线流强随时间  $t$  的变化规律, 它的正常涨落范围由均方根修正误差  $\sigma_{cor}$  来标度。

作为一个例子, 图 3 给出了 1992 年 1 月 20 日至 2 月 20 日 EAS 触发率变化曲线。图 3(a) 为修正前的情况, 图中水平线表示 EAS 平均触发率, 其中 2 月 18 日, 19 日出现了最大偏差, 达到 8.7%; 图 3(b) 显示了按式(2)和表 1 中最后一行的参数修正的结果, 图中中间一条水平线表示平均触发率, 上下两条水平线分别表示加、减一倍修正误差  $\sigma_{cor}$ 。从图中可见, 修正后的触发率基本上落在一倍标准偏差的范围内。2 月 18 日和 19 日的最大偏差降到了 1.3%。

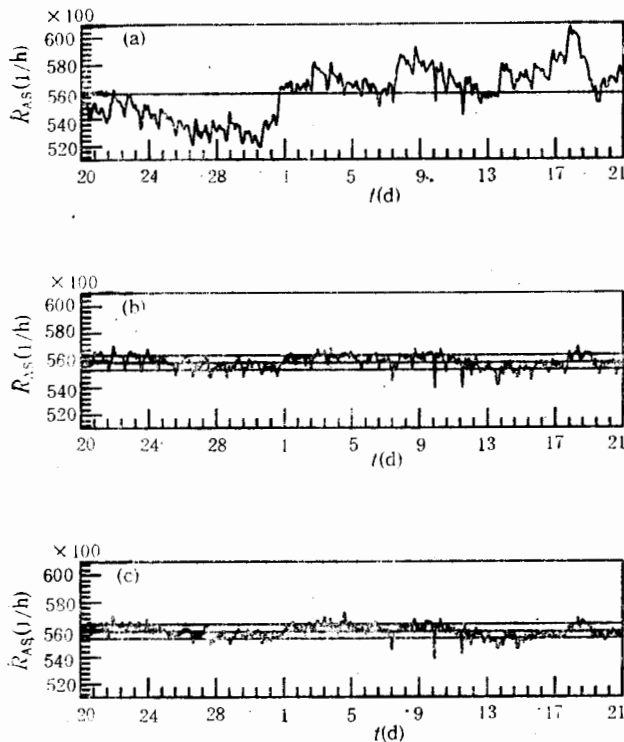


图3 1992年1月20日至2月20日宇宙线变化曲线  
(a) 修正前;(b) 经气压、室温修正;(c) 经式(3)表示的周日变化修正。

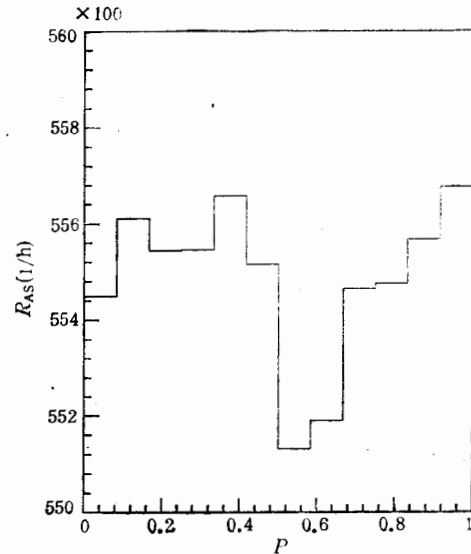


图4 温度、气压修正后 EAS 触发率周日变化

## 4 结果及讨论

上述宇宙线 EAS 触发率与气压和实验室温度的关联及其修正方法,是以关联系数  $\geq 0.82$  的关联分析为基础的,因此修正的可靠性可以保证。修正的效果可以从图 3(b) 中看出。首先,修正后的 EAS 计数率基本保持了原来的变化规律;其次,仍然保留了一个明显的周日变化过程,如图 4 所示,周期和位相分布较修正前发生了变化,更接近一个半日周期变化,起伏的幅度较修正前仅仅减少了 60% 左右。事实上,根据第 2 节的分析,气压变化对 EAS 触发率的影响不仅仅来自地面气压的变化,而很可能更依赖于高空不同深度下气压变化的分布情况。从图 1 中可以看出,在同一气压剧烈变化的事件中(如 1991 年 3 月 11 日到 23 日),300mbar、100mbar 等压面的气压变化相对幅度更大,而且变化持续的时间以及变化的时间分布都存在差异。因此修正后的起伏可能是气压的剩余效应,因为上述修正用变化幅度相对较小的地面气压变化替代整个观测站上空的气压变化情况对宇宙线 EAS 触发率所做的修正。当然也包含了其他气象因素引起的效应。然而,因绝大多数 EAS 触发率的涨落已经小于一倍标准偏差,一般来说,已基本达到适用水平,可不再做进一步的分析和修正。例如把显示在图 4 中的周期性结构用于数据的进一步修正。如果把经过气压、实验室温度修正后的 EAS 触发率周日变化当作一种未知的,但规律

清晰的行为,则可以用 Fourier 展开

$$\Delta R_{AS}(t) = \sum_{k=1}^N \left[ A_k \cos \left( \frac{2\pi k t}{T_p} \right) + B_k \sin \left( \frac{2\pi k t}{T_p} \right) \right] \quad (3)$$

代替这种周期性变化的平均位相分布,并用于宇宙线 EAS 触发率的进一步修正。将这种方法应用到 1992 年 1 月 20 日至 2 月 20 日的的数据上, Fourier 分析结果如下:

$$T_p = 0.999 \text{ 天};$$

$$A_k (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) = 232.7, -154.7, 74.86, -32.09, -24.61, -1.800;$$

$$B_k (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) = -5.349, -47.43, 65.96, -56.57, 14.51, -75.26.$$

修正的结果如图 3(c) 所示。对照图 3(b), 可见起伏的行为有所改善,但变化已不再显著。

与霍安祥教授的讨论,对这项研究帮助极大,谨表感谢。

### 参 考 文 献

- [1] M. Amenomori, 白占武,曹臻等,高能物理与核物理, 17(1993)385.
- [2] Tibet AS<sub>γ</sub> Coll., Proceeding of Michgan An Arbor Symposium, Oct., 1990.
- [3] 多尔曼,宇宙线天体物理学实验和理论基础,周志文等译,科学出版社,北京,1987年3月,99页.
- [4] 多尔曼,宇宙线强度变化,朱岗崑等译,科学出版社,北京,1965年7月,99页,110—115页.

## The Study of Meteorological Effects on TeV Cosmic Ray Flux

Jia Huanyu

(Department of Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

Cao Zhen      Zhang Huimin

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

Received on May 22, 1993

### Abstract

The possibility for monitoring TeV cosmic ray flux with China-Japan joint Tibet Air Shower Array (ASA) is discussed. The meteorological influences on trigger rate of ASA are analysed. A correction method for these effects is found and is adopted in the data correction.

**Key words** Air shower array, TeV cosmic rays, trigger rate, meteorological effects.