

# 10TeV 宇宙线时间变化研究\*

贾焕玉<sup>1,2</sup> 王顺金<sup>2</sup>

1(北京大学技术物理系 北京 100871)

2(西南交通大学现代物理研究所 成都 610031)

**摘要** 利用羊八井 AS  $\gamma$  二期阵列实验数据,分析研究了 10TeV 宇宙线时间变化,以  $10.4\sigma$  和  $9.6\sigma$  的显著性发现了 10TeV 宇宙线流强气象效应修正后的半太阳日和太阳日周期变化,没有发现有恒星日变化. 同时发现 10TeV 宇宙线流强有 7 天左右周期变化的迹象.

**关键词** 宇宙线 气象效应 时间变化

## 1 引言

从宇宙空间到达地球的宇宙线,带有其产生和传播区域的信息. 通过观测宇宙线强度和各向异性的变化,可以研究宇宙线的起源、传播以及受太阳的调制等. 地面观测宇宙线强度随时间的变化研究起始于 1926 年,发现了宇宙线强度随观测面气压的增加而减小,称之为气象效应. 开始时主要研究起源于地球的变化,如地球大气层中某些变化和地磁场的变化引起所观测的宇宙线强度的变化,后来又使用能量小于  $10^{12}$ eV 的地下  $\mu$  子望远镜<sup>[1]</sup>和能量大于  $10^{13}$ eV 的 Air Shower (AS)阵列<sup>[2]</sup>研究了起源于地球外的变化. 对于  $\mu$  子望远镜观测实验,由于宇宙线的太阳调制和大气的影晌,AS 阵列具有太大的统计误差,使所得的结果具有很大的不确定性. 从 70 年代开始,Nagashima<sup>[3]</sup>等在 Norikura 山上利用 AS 阵列来研究宇宙线恒星时变化,并对一些结果进行了报道<sup>[4]</sup>. 但其数据量每秒也只有几个 AS 事例. 羊八井 AS  $\gamma$  二期实验阵列自 1994 年 11 月开始运行<sup>[5]</sup>,其触发率已达每秒 250 个宇宙线 AS 事例,观测阈能为 10TeV,而且有较精确的地面气象测量数据,可以以较高的精度研究宇宙线的时间变化.

利用羊八井 AS  $\gamma$  实验研究 10TeV 宇宙线的地球外时间变化时,首先要扣除起源于地球的变化. 其中起源于地磁的变化,对于 10TeV 宇宙线粒子的影响很小,可不考虑. 因此我们首先研究了起源于大气的变化,即气象效应. 然后对观测数据做气象效应修正,将这部分变化扣除掉. 利用修正后的实验数据,采用统计周期分析法研究了 10TeV 宇宙线的时间变化.

2000-05-29 收稿

\* 国家自然科学基金资助(19635010)

## 2 实验数据的气象效应修正

宇宙线气象效应是指地球大气气象参量对地面观测到的宇宙线流强的影响, 主要影响因素是大气气压和温度. 利用 AS 阵列研究气象效应时, 阵列上方大气层顶部, 原初宇宙线粒子与空气核第一次作用点处的气象参量值对研究气象效应是最适合和最重要的. 对羊八井 AS  $\gamma$  实验阵列, 还没有进行这些数据的大量测量, 不过可以应用观测面处精确测量的气象数据来进行研究<sup>[6]</sup>.

气象参量数值的变化在物理上会影响到观测面的宇宙线流强, 除此之外还对观测设备, 比如探测器和数据采集电子学系统的性能产生影响. 因此实验数据中的变化包括物理的和观测设备的变化. 宇宙线事例率是指单位时间内实验观测记录的 AS 事例数目. 对某一实验, 它与宇宙线流强成正比关系. 通过分析事例率与气象参数间的关联, 可得到气象参数对实验和实验观测到的宇宙线流强的影响.

### 气象参量影响系数的计算

通过计算 Pearson 样本相关系数  $R_p$  和 Kendall 的秩相关系数  $\tau^{[7]}$ , 可以得到气象参量和实验事例率的关联. 如果存在关联, 表明气象参量对实验事例率有影响. 定义气象参量影响系数

$$\beta = \frac{\Delta R}{R_0} / \Delta Q,$$

其中  $\Delta R$  表示由于气象参量变化  $\Delta Q$  而引起的事例率的变化量,  $R_0$  是实际的事例率, 可用事例率的平均值  $\bar{R}$  来代替. 对观测数据, 假设

$$R = a + \sum_{i=1}^N b_i Q_i, \quad (2)$$

式中  $N$  为气象参量的个数. 利用最小二乘法, 解出  $a$  和  $b_i$ , 则可求得影响系数

$$\beta_i = \frac{b_i}{R}. \quad (3)$$

我们对 1994 年 11 月到 1995 年 4 月期间羊八井 AS  $\gamma$  实验阵列记录的数据进行了上述计算. 得到电子学控制室内温度 ( $T_{in}$ )、室内湿度 ( $H$ )、探测器温度 ( $T_{det}$ )、观测面大气气压 ( $P_{re}$ ) 和大气温度 ( $T_{out}$ ) 等 5 个气象参量的影响系数, 分别为:

$$\beta_1 = -0.263\% / ^\circ\text{C}, \quad \beta_2 = 0.258\% / 1\%, \quad \beta_3 = -0.051\% / ^\circ\text{C},$$

$$\beta_4 = -0.670\% / \text{mb}, \quad \beta_5 = -0.046\% / ^\circ\text{C};$$

其中前 3 个气象参量主要影响实验设备, 而大气气压和温度影响 AS 在大气层中的发展过程, 从而影响记录到的事例率.

### 2.2 实验数据的气象效应修正

为了从实验数据中寻找地球以外的宇宙线变化, 必须对上述两部分影响进行扣除, 即进行数据的气象效应修正.

对气象参量引起的变化修正后的事例率 $R'$

$$R' = R - \Delta R, \quad (4)$$

其中 $R$ 是修正前的事例率,气象参数变化引起的事例率变化为

$$\Delta R = \sum_{i=1}^N \beta_i \cdot \bar{R} \cdot \Delta Q_i. \quad (5)$$

为了检验这种修正是否合理,再对修正后的数据进行与气象参量的关联分析.对1994年11月到1995年4月期间数据修正前后的关联分析的结果列于表1中.表中 $Prob$ 表示气象参量与事例率不存在关联的概率. $Prob=0$ 表示绝对关联, $Prob=1$ 表示完全无关联, $Prob$ 取值较大(大于0.0001)表示基本无关联.从表中可以得出结论:修正后的事例率与观测面气象参量已基本无关联,即修正后的事例率数据中已不包含气象效应因素,可以进行地球外宇宙线变化分析.

表1 气象效应修正前后事例率与气象参量的关联分析

参量 类别	Pearson(前)		Kendall(前)		Pearson(后)		Kendall(后)	
	$R_p$	$Prob$	$\tau$	$Prob$	$R_p$	$Prob$	$\tau$	$Prob$
					$\times 10^{-5}$		$\times 10^{-2}$	
Tin	-0.56	0.0	-0.37	0.0	-2.56	1.0	-0.82	0.237
H	0.53	0.0	0.36	0.0	0.983	1.0	2.23	0.001
Pre	-0.78	0.0	-0.57	0.0	-2.42	1.0	-0.79	0.25
Tdet	-0.35	0.0	-0.23	0.0	-0.05	1.0	-0.99	0.15
Tout	-0.30	0.0	-0.19	0.0	-0.36	1.0	-1.41	0.041

### 3 宇宙线时间变化分析

较低能量宇宙线地球外变化有非周期性的,也有周期性的.比如与太阳活动有关的调制效应产生的是太阳日变化.对于能量高到10TeV,宇宙线有没有这种周期性变化,以及与宇宙线起源、加速等有关的恒星日变化是否存在,都是宇宙线研究中很重要的基本问题.我们利用气象效应修正后的羊八井AS $\gamma$ 实验阵列数据对此进行分析研究.

对于宇宙线强度,可以利用统计周期分析法来研究其变化的周期性.假设观测的结果为一时间序列数值 $(t_1, x_1), (t_2, x_2), \dots, (t_N, x_N)$ ,检验这一系列数据中是否具有周期 $T$ .统计分析法分为4个步骤:

(1) 按一个试验性周期将所要分析的数据进行折叠.设 $t_i (i=1, \dots, N)$ 为实验测量数据的时间,对给定的周期 $T$ ,通过变换

$$\varphi_i = \frac{t_i}{T} - \left[ \frac{t_i}{T} \right] \quad (6)$$

对数据系列进行折叠,其中 $\left[ \frac{t_i}{T} \right]$ 表示 $\frac{t_i}{T}$ 的整数部分.将 $\varphi_i$ 称为该数据点在周期 $T$ 中的相位.显然 $\varphi_i$ 定义在 $[0, 1]$ 区间.将 $[0, 1]$ 区间分为 $m$ 道,统计落入每道的数据点数目为 $k_j (j=1, 2, \dots, m)$ .一般所有数据的时间长度可能不会正好等于设定的周期 $T$ 的整数

倍,那么在数据的尾部就可能会出现  $k$  值变小的现象. 这种尾部效应对数据点数目较少时,会有很大影响,但对数据量很大的分析影响很小,可以不去考虑. 通过第二步的平均计算,也可以消除尾部效应的影响.

(2) 对折叠后的数据进行平均计算. 设落在第  $j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) 道的测量数据值为  $x_l$ , 则进行完全折叠后,第  $j$  道数据的平均值

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{l=1}^{k_j} x_l}{k_j}, \quad (7)$$

对于  $\bar{x}_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) 的分布而言,这种平均过程将偶然性扰动或其它非  $T$  周期的周期贡献减弱.

(3) 分布检验. 如果数据中没有  $T$  信号,则  $\varphi_i$  应均匀分布在  $[0, 1]$  区间. 如果周期  $T$  存在,那么  $\bar{x}_j$  的均方偏差:

$$\sigma(T) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\bar{x}_j - \langle \bar{x}_j \rangle)^2}{m}} \quad (8)$$

将比在数据中不存在这种周期变化时大得多.

假设,由  $N$  个数据组成的数据系列的均方偏差是

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}, \quad (9)$$

则定义

$$\eta(T) = \frac{\sigma(T)}{\sigma_0} \quad (10)$$

为数据系列的周期图.  $\eta(T)$  实际上是数据系列中存在周期  $T$  的量度. 如果数据存在周期  $T$ ,则在  $T$  处  $\eta(T)$  有极大峰值,该峰具有半宽度  $T/\bar{k}$ ,  $\bar{k}$  是每道数据点数的平均值.

(4) 信噪比计算.  $\eta(T)$  的分布标准偏差为

$$S_\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_0} (\eta_i - \bar{\eta})^2}{N_0 - 1}}, \quad (11)$$

其中  $N_0$  是对不同的周期  $T$  做折叠的周期数目. 则信噪比

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta_{\max}(T_0) - \bar{\eta}}{S_\eta}. \quad (12)$$

## 4 结果与讨论

用上述方法分析了羊八井 AS  $\gamma$  实验阵列 1994 年 11 月到 1998 年 4 月期间部分数据.

根据图 1 所示的  $\eta(T)$  分布,发现事例率有半太阳日周期变化. 如图 2 所示,最大变化幅度为 0.13%,最大处的相位约为 0.2,信噪比为 10.45. Pekeris<sup>[8]</sup> 曾经提出过大气层

振荡理论. 根据这个理论,大气层具有大约 12h 的自由振荡周期,在高度 30km 的面上有节点. 假设 30km 以外的大气对 AS 的发展具有重要作用,那么宇宙线强度 0.5d 的变化与高空气压的半日变化一致.

同时发现了 10TeV 宇宙线有太阳日周期变化,  $\eta(T)$  分布和变化分别如图 3 和图 4 所示. 太阳日变化幅度为 0.075%, 最大处相位 0.12, 信噪比为 9.65.

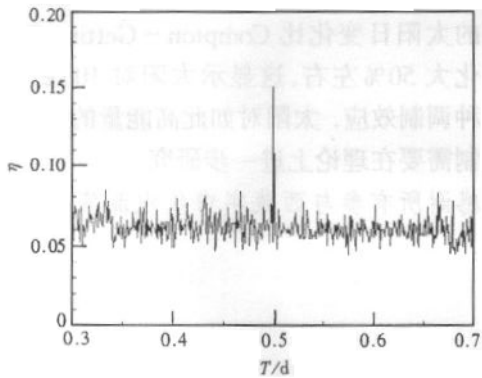


图 1  $T=0.5$  附近的信噪比  $\eta(T)$  分布

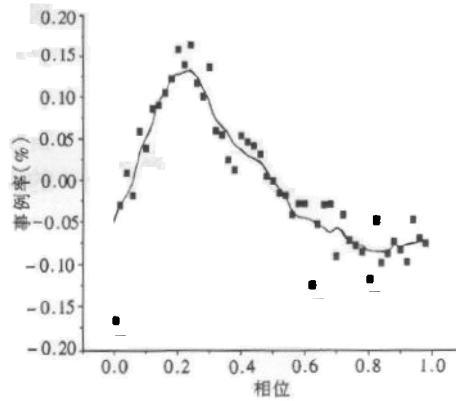


图 2  $T=0.5$  事例率变化的相位分布曲线是数据点平滑后的结果.

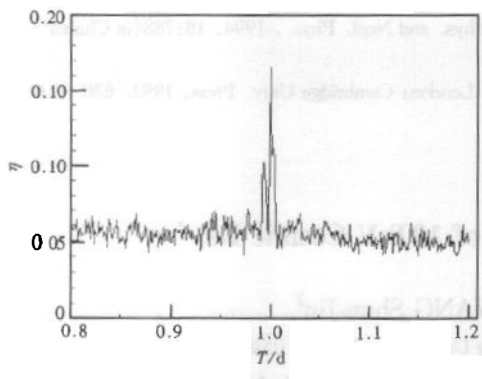


图 3  $T=1.0$  附近的信噪比  $\eta(T)$  分布

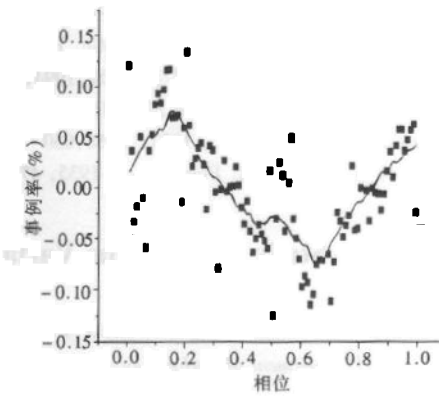


图 4  $T=1.0$  事例率变化的相位分布曲线是数据点平滑后的结果.

如果仔细对气象效应进行修正后,假设来自宇宙空间的宇宙线各向同性,而由于地球的公转运动,对于在地球上观测的宇宙线强度仍然存在有 Compton - Getting 效应<sup>[9]</sup>引起的太阳日变化,这种变化的幅度

$$a = (\gamma + 2) \frac{v}{c} \cos \lambda, \quad (13)$$

其中  $\gamma=2.7$  是宇宙线微分谱指数,  $\lambda$  是观测点的地理纬度,  $c$  是光速,  $v$  是地球的公转速度,  $v=30\text{km/s}$ . 将上述数值代入(13)式,得到应该存在约 0.05% 的太阳日变化. 分析得到的太阳日变化比该值大 50% 左右.

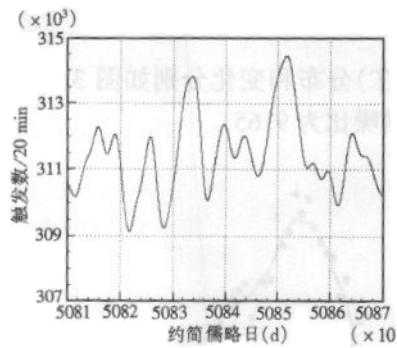


图 5 平滑后的事例率的时间分布

我们寻找了恒星日变化,其周期变化不明显,即没有发现恒星日变化。

通过对气象效应修正后的数据进行平滑滤波处理,显示有 7d 左右的周期变化迹象. 事例率随约简儒略日变化的部分结果如图 5 所示. 而太阳磁场扇形结构中一个中心面扫过地球的平均周期是 7d,分析得到的太阳日变化比 Compton - Getting 效应引起的变化大 50% 左右,这显示太阳对 10TeV 宇宙线有某种调制效应. 太阳对如此高能量的宇宙线的调制机制需要在理论上进一步研究.

作者感谢所有参与西藏宇宙线观测实验的中外合作者.

### 参考文献 (References)

- 1 Nagashima K, Mori S. Proc. of the Int. Cosmic Ray Sym. On High Energy Cosmic Ray Modulation, Tokyo, 1976. 326
- 2 Fichtel C E, Linsley J. Astrophys. J., 1986, **300**:474
- 3 Nagashima K, Fujimoto K, Sakakibara S et al. II Nuovo Cimento, 1989, **12C**:695
- 4 Sakakibara S. Proc. of the Int. Sym. on Cosmic Ray Modulation in the Heliosphere, Morioka, 1984. 314
- 5 Amenomori M, Ayabe S, Cao P Y et al. Proc. 25th ICRC, Durban, 1997, **5**:245
- 6 JIA Huan-Yu, CAO Zhen, ZHANG Hui-Min. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1994, **18**:788 (in Chinese)  
(贾焕宇,曹臻,张慧敏. 高能物理与核物理, 1994, **18**:788)
- 7 William H P. Numerical Recipes in FORTRAN. Second Edi. London: Cambridge Univ. Press, 1992. 622
- 8 Pekeris C L. Proc. Roy. Soc., 1937, **A158**:650

## Study of the Time Variation of 10TeV Cosmic Ray\*

JIA Huan-Yu<sup>1,2</sup> WANG Shun-Jin<sup>2</sup>

1(Department of Technology and Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2(Institute of Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** With the Yangbajing AS  $\gamma$  array, the time variation of 10TeV cosmic ray was studied. Solar time semi-diurnal and diurnal variations have been detected with  $10.4\sigma$  and  $9.6\sigma$  levels for the 10TeV cosmic ray flux and semi diurnal variation with an amplitude 0.13% and a phase 0.2 and diurnal variation with 0.075% and 0.12. The sidereal diurnal variation for 10TeV cosmic ray was not found with  $0.7\sigma$  level. The analysis result in longer period gives some evidence of 7 days variations.

**Key words** cosmic ray, meteorological effect, time variation

Received 29 May 2000

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19635010)