

一个和 X 级太阳耀斑相关的 甚高能 GLE 事件

彭朝然 力京 马欣华 王伟 朱清棋
沈长铨 经才骝 董玉琚 袁余奎 霍安祥

(中国科学院高能物理研究所宇宙线与高能天体物理开放实验室 北京 100039)

摘要 分析怀柔宇宙线 EAS 阵列在 1991 年 6 月份的计数率, 数据表明在 6 月 15 日的太阳 X12/3B 级大耀斑后的 GLE 事件持续期间, TeV 能区的宇宙线强度在 25min 内比通常有将近 4σ 的超出, 增强过程持续约 25min.

关键词 太阳耀斑 太阳宇宙线 GLE 事件 宇宙线广延大气簇射

1 引言

长期以来人们一直在研究宇宙线的起源和加速机制这一课题. 太阳是离我们最近的一颗恒星, 自然应从太阳产生的宇宙线入手. 太阳耀斑是太阳活动现象之一, 人们已多次观测到太阳耀斑期间宇宙线流强的瞬时增加. 所谓的宇宙线地面流强增长 (Ground Level Enhancement, GLE) 事件, 就是太阳耀斑产生的能量高达 500MeV 的质子在地面强度的短时间增加. 导致这一地面效应的耀斑常称为宇宙线耀斑. 常规的报道数据集集中于 MeV 至 GeV 能段, 确认太阳是高能粒子源. 但在 1989 年 9 月 29 日大耀斑期间, 观测到宇宙线耀斑质子能谱高端可达 100GeV^[1]; 文献 [2] 也报道, 利用海拔 3200m 的高山大云雾室所取得的核作用数据, 进行日计数率随时间变化的分析研究, 发现在 1972 年 8 月 4 日和 8 月 7 日两个大的太阳质子耀斑期间, 事例计数率比临近 20 多天的平均值有三倍标准偏差的涨高, 其相应的初级宇宙线能量在数 TeV 至 10TeV (下文简称甚高能区). 利用空间探测器在距太阳 20AU (天文单位) 内测量宇宙线强度与地球上强度之比, 推得在黄道面内太阳圈的界限为 50AU^[3], 这个尺度相当于 TeV 能区的质子的拉摩半径, 说明甚高能宇宙线可能受到太阳的调制. 理论上有人预言, 太阳宇宙线能量上限为 3TeV^[4]. 文献 [5] 的计算也表明, 耀斑粒子可能被加速到 10TeV 量级. 所以观测太阳活动与宇宙线强度的关联, 除了能为研究太阳的高能活动对空间环境的影响提供资料外, 要是能证明在太阳宇宙线耀斑期间确实对甚高能宇宙线有影响, 那么对了解甚高能宇宙线在这一过程中的调制、传播, 特别是被加速机制, 将起着重要的作用. 进而, 对于解决更高能量的宇宙线的起源和

加速机制问题,具有参考价值.

2 观测装置和数据处理

怀柔宇宙线观测站的探测器阵列如图 1 所示,该阵列由 53 个探测器组成. 每个探测器面积是 0.25m^2 的塑料闪烁计数器,选择甚高能粒子事例只用阵列中央间距为 10m 的 25 个探测器,接受簇射事例的总面积达 1600m^2 . 这 25 个探测器除中心的第 13 号之外的 24 个被分为三组,每组内的 8 个单路计数相加,形成三组独立的具有足够高统计精度的计数器,三组数据间的一致性可用于监测系统的稳定性.

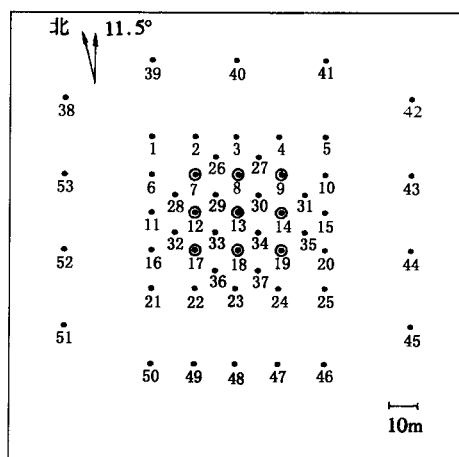


图1 怀柔阵列平面图

• 密度探测器, ○ 带快时间的密度探测器.

对 10 路以上的符合事件,对应的初级宇宙线能量一般大于 100TeV ,这类事例当做广延大气簇射的触发事例,数据采集系统记录落入每个探测器内的粒子数目和粒子的到达时间,这类事例率约 0.05Hz ,记录数据导致的死时间约 $4\mu\text{s}$. 对小于 10 路符合的事例,只统计两个触发事例间各种多路符合的计数,这类事例的符合率反映甚高能宇宙线强度的变化.

1991 年 6 月 15 日,太阳上面发生了一次 X12/3B 级的大耀斑^[6,7],开始于格林威治时间 8 时 10 分 (0810UT). 针对这个耀斑我们分析了 6 月份怀柔阵列的宇宙线计数率的变化. 数据处理分两步. 第一,剔除下列质量差的触发事例: (1) 三组单路计数明显不一致的数据,这是由于某一个或者几个探测器较长时间的故障(无信号输出或者放电),这类数据都是数小时甚至数天地统统被摒弃; (2) 单路计数率比平均值超出 20 倍标准偏差的事例,这是由于某个探测器短时间内受到干扰或者放电; (3) 和前一个事例的记录完全相同的事例; (4) 和前一个事例的时间间隔小于 12s 的事例,这是由于所有触发事例的时间间隔分布小于 10s 时偏离指数分布. 剔除后总共剩有 21 天的有效数据. 第二,利用非耀斑期间计数率和地面气压的关联,通过最小二乘法求得气压修正系数;然后,对所有数据作气压修正. 单路、至少两路符合、至少三路符合、至少四路符合和至少十路符合的计数率的气压修正系数分别为 -0.061 , -0.325 , -0.310 , -0.554 , -2.67 (单位: $\%/ \text{mbar}$). 由于单路事例多为穿透力较强的 μ 子引起,所以受气压影响较小;而多路符合的事例多由很高能粒子产生的次级软成分同时到达观察面所致,受气压影响较大.

图 2 是 1991 年 6 月份宇宙线强度单路计数率和两路符合率的变化,图中曲线中断部分是停机或仪器故障,对两路符合已扣除偶然符合的计数. 其中图 2(a) — (d) 分别是每 15, 20, 25 和 35min 内的两路符合的计数随时间的变化,图 2(e) 的上部曲线是北京超中子堆记录的每小时的宇宙线强度^[8],下部曲线是 μ 子垂直强度^[9],中间曲线是本工作的单路计数器二个半小时的平均计数. 在 15 日的小鼓包是 GeV 能区的 GLE 事件.

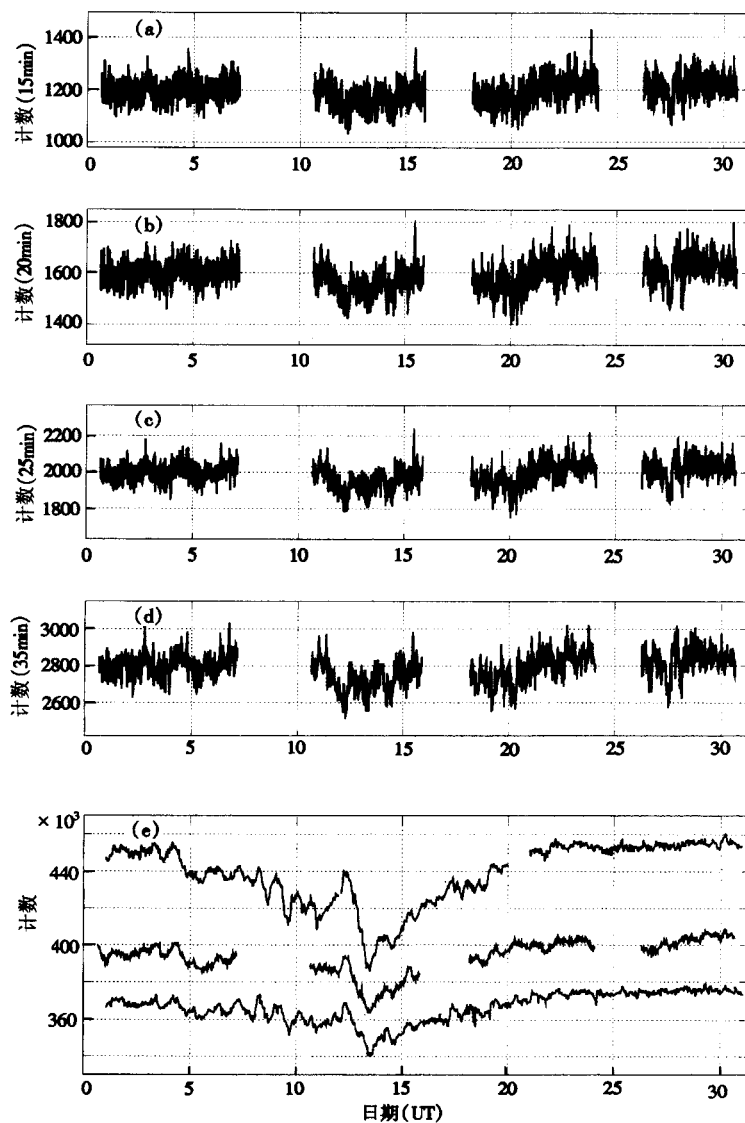


图2 1991年6月份宇宙线强度的变化

图 3 是两路符合的计数率的分布, 图 3(a)一(d)的横坐标分别是每 15, 20, 25 和 35min 的计数, 纵坐标是计数出现频率. 图 3(a)一(d)分别等价于图 2(a)一(d). 可以看到, 用高斯分布拟合数据得到的分布宽度远大于平均值的平方根, 这是由于探测器阈值的波动造成的.

3 结果与讨论

从图 2 看到, 15.458 日(即 15 日 1100UT)的计数总是最高或者次高. 图 3 中箭头表示这个事件的计数, 在图 3(a)一(c)中, 该事件的计数与均值的距离达到 3.8 倍至 4.0 倍的标

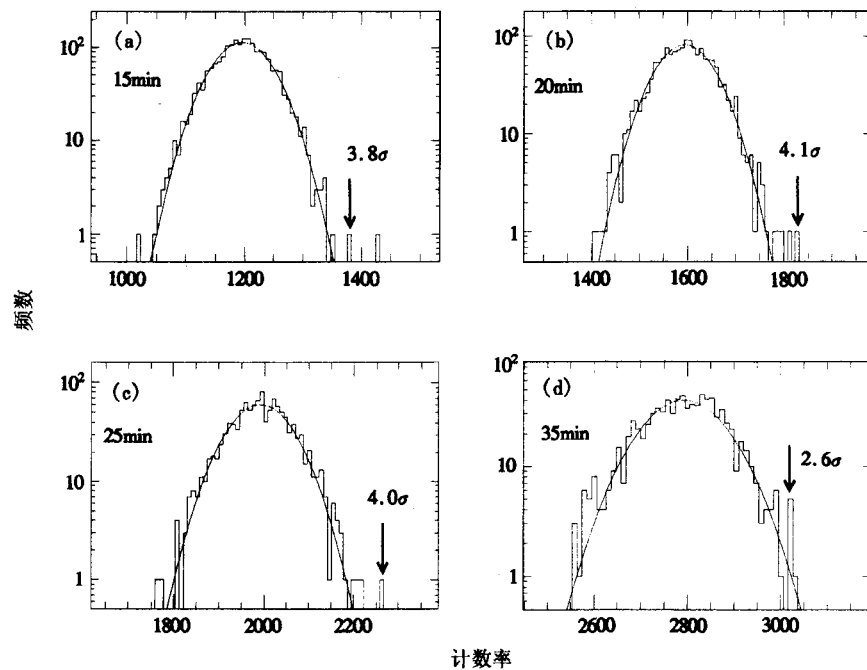


图3 两路符合计数的分布

准偏差,时间间隔大于 30min 统计(看图 3(d)),显著性逐渐下降,说明增强过程持续了约 25min. 模拟结果表明,两路符合对应的初级粒子的阈能为 TeV 量级,所以这是一个甚高能宇宙线增强事件,而且正处于 GeV 能区的 GLE 事件的持续期间. 对于正态分布,超过 4.0σ 的偶然概率为 3.2×10^{-5} ,涨落构成的本底事件为 0.05 次(总共有 1505 次的统计),换句话说,计数涨落到这么高的概率只有 5%,所以这个事件很可能与太阳耀斑有关联.

从图 3 可看到,除 15 日 1100UT 的事件之外,总有另外一个事例在 $+3.3\sigma$ 之外,但是这个事件对应的时间在改变,也就是说,带有偶然性,因此可把这些事件当成本底涨落,大于 3.3σ 的概率为 5.0×10^{-4} ,刚好有大约一个的涨落本底.

图 4 给出了 11 日—16 日的每 30min 内三组单路计数随时间的变化,由数据的一致性判断,阵列在 15 日的工作是正常的. 再从图 2(e)看,我们的单路计数率和另外两条曲线符合得很好,尤其是 13 日—16 日的 Forbush 下降,在结构细节都一致,有理由相信本工作使用的数据是可靠的.

去年,俄罗斯的 Baksan 组报道^[10],他们的地下 μ 望远镜在 1991 年 6 月 15 日格林威治时间 10 时观测到初能大于 500GeV 的质子增长事件,强度有 5.0σ 的超出,持续时间约 15min. 本工作在能量上和 Baksan 的结果有一定的符合,但时间相差约一小时.

综上所述,又有迹象表明,太阳活动对甚高能宇宙线有一定的影响,但是统计显著性还不足以下确切的结论,也需要更多的证据才能确认与太阳耀斑的关联,所以有必要在即将到来的太阳活动丰年做更细致的观测,怀柔站阵列正适合于进行这方面的研究. 我们已将探测器间的距离缩小一倍,这样做一则降低阈能,二则能同时观测二路、三路和四路等符合率的变化,测出能谱;另外,还把多路符合的计数改为固定每 5s 记录一次,以期得

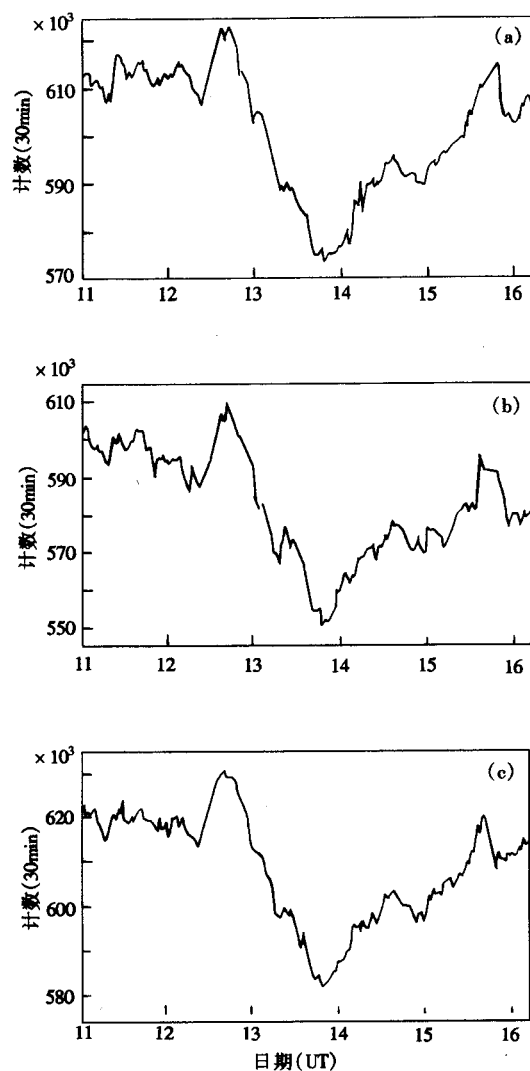


图4 三组8个单路每30min的总计数随时间的变化

(a) 第一组内8个单路总计数; (b) 第二组内8个单路总计数; (c) 第三组内8个单路总计数.

到更加可靠的爆发时刻和持续时间, 为理论解释提供更详细的资料.

感谢中国科学院空间中心的龚菊红和叶宗海教授提供的地面气象资料; 同时感谢李延国副研究员在数据采集系统改进中的工作和有益的讨论.

参 考 文 献

- 1 Filippov A T et al. Proc. of 22nd ICRC, Dublin, 1991, 3:113
- 2 Huo Anxiang, Dai Yifang, Yuan Yukui. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1990, 14(9): 862—864

- (霍安祥、戴义方、袁余奎. 高能物理与核物理, 1990, 14(9): 862—864)
- 3 Webber W R. Rapporteur Paper on Outer Heliosphere Regions, Rapporteur Paper on 16th ICRC, Kyoto, 1979, 14:253
 - 4 Srivastava N B. Basic Nuclear Physics Cosmic Rays, 1979
 - 5 Zhang Li et al. Proc. of 23rd ICRC, Calgary, 1993, 3:33—37
 - 6 Akimov V V et al. Proc. of 22rd ICRC, Calgary, 1993, 3:73
 - 7 Kudela K et al. Proc. of 23rd ICRC, Calgary, 1993, 3:71
 - 8 Solar-Terrestrial Environment Laboratory et al. Cosmic-Ray Intensity 37, Graphs of Hourly Neutron Intensities 1990—1991(1996)
 - 9 Chinese Solar-Geophysical Data (in Chinese), 1991, 216
(太阳地球物理资料, 1991, 216)
 - 10 Karpov S N et al. Proc. of 25th ICRC, Durban, 1997, 1:157

A Very High Energy GLE Event Possibly Associated With the X Solar Flare of 15th June 1991

Peng Zhaoran Li Jing Ma Xinhua Wang Wei Zhu Qingqi
Shen Changquan Jing Cailiu Dong Yuju Yuan Yukui Huo Anxiang

(The Key Lab. of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract Analysing the changes of cosmic ray counting rates obtained by the Huai-Rou EAS array in June of 1991, we find a very high energy GLE event after the X solar flare of 15 June 1991. The event started at 1100 UT of the day and lasted about 25 minutes. The counting rate in the 25 minutes for the event exceeds the monthly mean value with about 4σ .

Key words solar flare, solar cosmic ray, GLE event, extensive air shower