

太阳大耀斑期间甚高能粒子流强 增加的一种机制

霍安祥 况浩怀

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1995-12-21 收稿

摘 要

近年来,在太阳大耀斑期间,由地面中子记录装置及地下不同深度 μ 子记录器记录到宇宙线粒子的短期增长(GLE)现象,其能量范围已达几百 GeV,甚至可达 TeV 能区.本文讨论了 TeV 能区的生长现象可能是银河宇宙线部分粒子获得再加速,由于宇宙线粒子能谱很陡,几百 GeV 的再加速能量能使 TeV 以上能区宇宙线流强有明显增长.

关键词 太阳耀斑, 宇宙线, 粒子流强.

1 引 言

1989年8—10月有一系列大的太阳耀斑发生并伴随发生大的太阳质子事件,日本地球气象卫星 GMS-3 上的仪器曾研究了这些事件,其能区对应质子为 4—68 MeV,对 α 粒子为 8—370 MeV. 10月20日事件表明从太阳 21 周以来,粒子流量为最大. 9月29日的事件虽然粒子流量不是最大,但它是这个时期以来地面流强增长事件(GLE)中最大的,全球中子记录器网络都记录了这个事件,从卫星到地面中子记录器获得的数据,可粗略地算出此事件粒子的微分能谱为一简单的幂谱,从几个 MeV 到 10 GeV,幂指数为 $\gamma = -2.6^{[1]}$.

雅库茨克复合装置记录和研究了 1989 年 9 月 29 日的大 GLE 事件^[2]. 这架装置包括地面中子记录器 18NM64、电离室 ASK-1 和地下三个不同深度放置的 μ 子望远镜 MT-6. 他们仔细分析在这个事件中记录的数据,得出这个事件中有能量为 2—150 GeV 的粒子产生. Baksan 组利用他们的地下闪烁体望远镜研究了 μ 子流强短期增长与太阳耀斑的关系^[3]. 在给出的 5 个有明显关联的事件中,1989 年 9 月 29 日 GLE 事件统计显著性达到 5.5σ . 仪器的探测阈能大于 200 GeV. 这一事件地下 μ 子数据的短期增长比地面“地毯”式阵列获得的生长峰值在时间上滞后 1.5 小时. 文献 [4] 推算了一系列 GLE 事件的粒子能谱,表明在太阳耀斑期间有 $E \leq 1$ TeV 的粒子产生. 云南站研究组^[5]利用他们的甚高能核作用事例数据,对 1972 年 8 月的数据日计数率时间变化的分

析, 发现在 8 月 4 日和 7 日两个 3B 级大耀斑期间, 事例记数率高出邻近日记数率的标准偏差分别为 3.6σ 和 3.3σ , 其相应能区为 10 TeV 左右.

从以上几个观测结果可以看出, 当太阳大耀斑发生时可能伴随有甚高能 (TeV 能区) 粒子流强的增长, 它的起始时间可以滞后 1.5 小时. 不同深度的大面积地下 μ 子望远镜是这个能区观测这种现象的主要工具之一. 近年来建成一些安装在高山的广延大气簇射阵列, 其观测阈能为几 TeV, 它们将是研究这个现象的重要工具.

2 甚高能宇宙线粒子流强增长的一种机制

许多观测结果表明太阳大耀斑期间 GLE 事件宇宙线粒子流强的增加可达几百 GeV 能区, 文献 [5] 的能区达到 10 TeV. 但现在无任何理论模型能给出太阳耀斑能发射如此高能的宇宙线. 文献 [5] 的作者曾在他们的文章中给出一种解释: 银河宇宙线中少量粒子受到太阳大耀斑爆发期间 (特别是连续几个大爆发, 如 1972 年 8 月 2—7 日) 形成的行星际空间冲击波再加速有可能达到此能区.

如所周知, 宇宙线的微分能谱形式为

$$\frac{dN}{dE} = AE^{-\gamma}, \quad (1)$$

其中 A 为常数, γ 为能谱指数, 在 $E_0 \geq 10^{11}$ eV 能区 $\gamma \approx 2.7$, 是一个很陡的能谱. 当发生太阳大耀斑期间, 如果有部分 (η) 宇宙线粒子得到再加速, 这部分粒子加速后能量增加 ΔE , 它与初始粒子能量无关. 由 (1) 式推算出, 在 E_1 至 E_2 两个能量间宇宙线粒子数增加率为

$$R = \eta \left[\left(1 + \frac{\Delta E}{\bar{E}} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (2)$$

其中

$$\bar{E} = \frac{\gamma-1}{\gamma-2} E_1 \left[1 - \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\gamma-2} \right] \left[1 - \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\gamma-1} \right].$$

为了与实验比较, 我们作了一个 Monte-Carlo 模拟, 假定宇宙线中有 $\eta = 10\%$ 因太阳大耀斑爆发被加速, 其能量增加值分别取 $\Delta E = 100, 200, 500$ GeV, 表 1 列出在不同初级宇宙线质子能区, 分别由 (2) 式和 Monte-Carlo 模拟得到的宇宙线流强增加率 $R(2)$ 和 $R(\text{MC})$. 表中 Monte-Carlo 模拟结果比 (2) 式计算值略大, 这是因为统计涨落使很陡的能谱变平的效应. 由表中数据可以看出, 如果观测值统计量够大或者 $\eta > 10\%$, 云南站观测到的现象是可能存在的. 在最近一个太阳活动周期用合适的观测装置进行观测可以对其进行检验.

当前 10 TeV 能区观测这个现象比较有效的装置是我国西藏中日合作羊八井广延大气簇射 (EAS) 阵列, 羊八井一期阵列对初级宇宙线质子的探测效率在 5、10 和 50 TeV 时分别为 3%、31% 和 80%^[6], 事例率约为 20 Hz. 假定一个持续时间约为 4 小时的 GLE 事件, 在此期间羊八井阵列可探测到约为 3×10^5 个簇射事例. 图 1 表示羊八井阵列记录

表1 不同能区宇宙线流强的增加率

E_p (TeV)	ΔE (GeV)	100	200	500
2.5—5	$R(2)$	0.82%	1.68%	4.53%
	$R(\text{MC})$	1.03%	2.21%	7.01%
5—10	$R(2)$	0.41%	0.82%	2.13%
	$R(\text{MC})$	0.48%	0.99%	2.72%
10—20	$R(2)$	0.20%	0.41%	1.03%
	$R(\text{MC})$	0.22%	0.44%	1.12%
20—40	$R(2)$	0.10%	0.20%	0.51%
	$R(\text{MC})$	0.14%	0.25%	0.59%

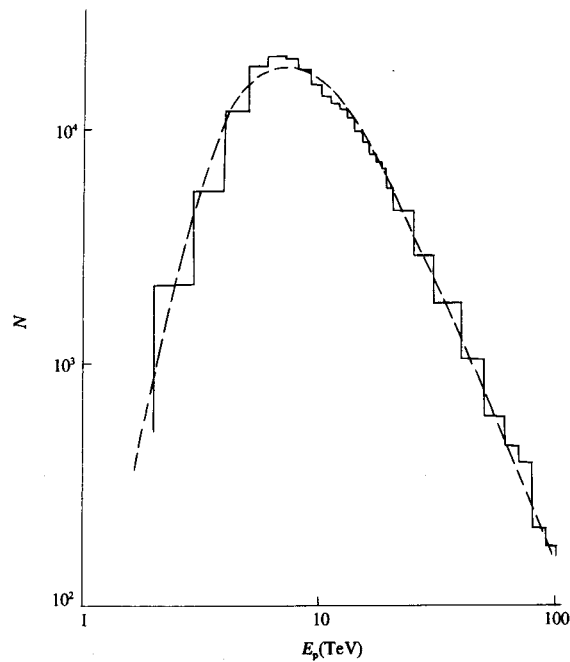


图1 羊八井阵列约4小时的记数分布及模拟

---- 实验分布; — Monte-Carlo 模拟.

3×10^5 个事例时能量实测分布及本文所作的 Monte-Carlo 分布. 如上所述, 如果一个太阳大耀斑在日地空间一系列冲击波下引起 10% 的宇宙线质子被加速, 增加能量分别为 100、200 和 500 GeV, 则相应于羊八井阵列记录到不同能区簇射数的增长由表 2 给出. 由表 2 看出, 当 $\eta = 10\%$, $\Delta E = 200$ GeV 时, 羊八井阵列可以记录到超过 5 倍标准

偏差的增长. 羊八井扩建二期工程已经完成并已试运行, 其事例率由 20Hz 增至 200Hz, 大大地增加了事例的统计量, 能更加有效地探测这种增长现象.

表 2 不同能区羊八井阵列的记数增长

增长记数		$\Delta E(\text{GeV})$		
		100	200	500
$E_0(\text{TeV})$	2.5—5	162 ± 125	347 ± 125	1103 ± 125
	5—10	521 ± 327	1062 ± 327	2902 ± 327
	10—20	212 ± 313	429 ± 313	1104 ± 313
	20—40	72 ± 228	131 ± 228	309 ± 228

3 分析与讨论

在近四个太阳活动周期, 观测记录到相当数量的太阳大耀斑伴随的宇宙线流强地面增长 (GLE) 事件, 其能量可达几十 GeV, 文献 [2—4] 给出能量范围达几百 GeV. 这些观测结果形成了一个能区很宽的综合能谱, 不同的能谱指数和流强增长的时间特征, 对了解太阳耀斑期间粒子的加速机制, 进而推论宇宙线在宇宙空间的产生和加速有很重要的意义. 从太阳耀斑爆发产生各种物理过程以及现有的太阳宇宙线加速机制模型来看, 文献 [5] 的观测结果是不可理解的. 但如果 10 TeV 能区银河宇宙线在行星际空间受到太阳大耀斑爆发形成冲击波再加速, 则可能得到文献 [5] 的观测结果. 由于地面 EAS 阵列观测阈能均高于 100 TeV (10^{14} eV), 记数率也很低, 故迄今为止, 没有 EAS 阵列观测 GLE 事件的结果报道. 另一方面, 如果太阳大耀斑期间宇宙线粒子被加速能量仅几个 TeV, 一般地面 EAS 阵列也不可能观测到这个现象, 而观测阈能为几个 TeV 的高山 EAS 阵列是观测这一现象的有效工具, 我们的模拟结果很好地说明了这一论点, 同时也解释了云南站的观测结果^[5]. 据报道 23 太阳周的活动期从今年开始, 1999—2000 年为太阳活动高峰年, 在峰年前后将是观测 GLE 事件最佳时期, 而且正是羊八井阵列二期工程投入运行的时期, 通过进一步观测和分析对于这一现象是否存在会有可靠的检验结果.

参 考 文 献

- [1] T. Kono, 22nd ICRC, 3(1991) 125.
- [2] Filippov, A. T. *et al.*, 22nd ICRC 3(1991) 113.
- [3] Alexeyev, E. N., Karpov, S. N., 23rd ICRC 3(1993) 167.
- [4] Kolomeets, E. V. *et al.*, 24th ICRC 4(1995) 240.
- [5] 霍安祥、戴义方、袁余奎, 高能物理与核物理, 14(1990) 862.
- [6] M. Amenomori, Z. Cao *et al.*, *Phys. Rev. Letters*, 69(1992) 2488.

A Model for Enhancement of the Flux of Very High Energy Particles During Large Solar Flares

Huo Anxiang Kuang Haohuai

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Received 21 December 1995

Abstract

In recent years, some short time enhancements of cosmic ray particles during large solar flares (GLE) were recorded by neutron monitor at sea level and underground muon detector at different depths. The energy regions concerned were in several hundred GeV, even in few TeV. It is discussed in this paper, that the flux enhancement in TeV region may be due to the re-acceleration of the galactic cosmic rays in the period of large solar flares. Because of the very steep energy spectrum of cosmic rays, if only 10% cosmic ray particles are re-accelerated with energy increment of several hundred GeV, the cosmic ray flux in TeV region could increase considerably.

Key words solar flare, cosmic rays, flux of particles.