第11卷 第4期
1991 年 10 月

空 间 科 学 学 报
CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE

Vol. 11, No. 4
Oct., 1991

1989 年 9 月 29 日 GLE 事件的特征

叶 宗 海
(中国科学院空间科学与应用研究中心，北京)

摘 要

1989 年 9 月 29 日发生了 30 多年来最大的地面宇宙线增强事件(即 GLE 事件). 本文描述这次世界范围内的大事件的主要特征，包括强度时间变化、能谱、各向异性以及地理位置上的分布特征，并简述了这次事件对地球环境产生的影响.

关键词 太阳宇宙线，太阳耀斑，GLE 事件

一、引 言

自 1942 年记录到第一个 GLE 事件(太阳耀斑高能粒子到达地面引起的宇宙线增强)以来，到第 21 太阳周结束，在地面上已记录到 39 个 GLE 事件，其中以 1956 年 2 月 23 日事件最为强烈，位于地球赤道附近的观测站都记录到了这次增强事件. 第 22 太阳周的第一个 GLE 事件发生在 1989 年 7 月 25 日，Goos Bay (53.27N, 60.40W, R_c = 0.60GV) 的中子堆记录到宇宙线增强为 3.0%. 从 21 周的最后一个 GLE 事件到第 22 周第一个相对论太阳宇宙线事件之间相隔 65 个月的时间，这是自 1950 年有中子堆记录以来，所报告的 GLE 事件之间最长的间隔时间.

自 7 月 25 日 GLE 事件之后，在 4 个月时间之内又发生了 6 次 GLE 事件(见表 1)，而其中以 9 月 29 日的 GLE 事件最强烈，这是自 1956 年 2 月 23 日事件之后，30 多年来最大的 GLE 事件[1].

表 1 GLE 事件与太阳耀斑参量

时 期	光学耀斑				X射线耀斑		宇 宙 线	
	开始 (UT)	位置	Boulder 活动区	级别	级别	持续时间 (h)	增加 百分比	台站
7.25	0838	25N84W	5603	2N	X2.6	0.5	3	Goos Bay
8.16	0108	18S84W	5629	2N	X20	13	13	Mawson
9.29	1047	…105W	5698	…	X9.8	4	372	Iruvik
10.19	1229	27S10E	5747	4B	X13.0	>8	47	Mawson
10.22	1708	27S10W	5747	2B	X2.9	3.5	17	Goos Bay
10.24	1736	30S57W	5747	3B	X5.7	9	96	Iruvik
11.15	0652	11N26W	5786	3B	X3.2	1.5	1.7	Deep River

本文于 1990 年 12 月 12 日收到.

9 月 29 日发生了 X9.8 级的 X 射线耀斑，最大通量出现在 1133 UT. 8800MHz 射电暴开始于 1120UT，在 1137UT 达到极大值. 光学耀斑已无法判断其级别，因为耀斑发生在日面西边缘（105°W）的南部高纬，已不能全面观测到. 这个耀斑出现后不久，运行在空间的 GOES 卫星立即观测到太阳 X 射线和太阳质子事件（见图1）[2]. 紧接着相对论太阳宇宙线开始到达地面，地面宇宙线记录到明显的增强，极区中子堆记录到 380% 的增幅. 这是近几十年来罕见的 GLE 事件，它为研究太阳耀斑高能粒子发射、太阳宇宙线的性质及其地球物理效应提供了宝贵的资料和难得的机会. 本文根据我国宇宙线台和得到的部分世界资料，对这次典型的特大 GLE 事件的特征进行分析研究.

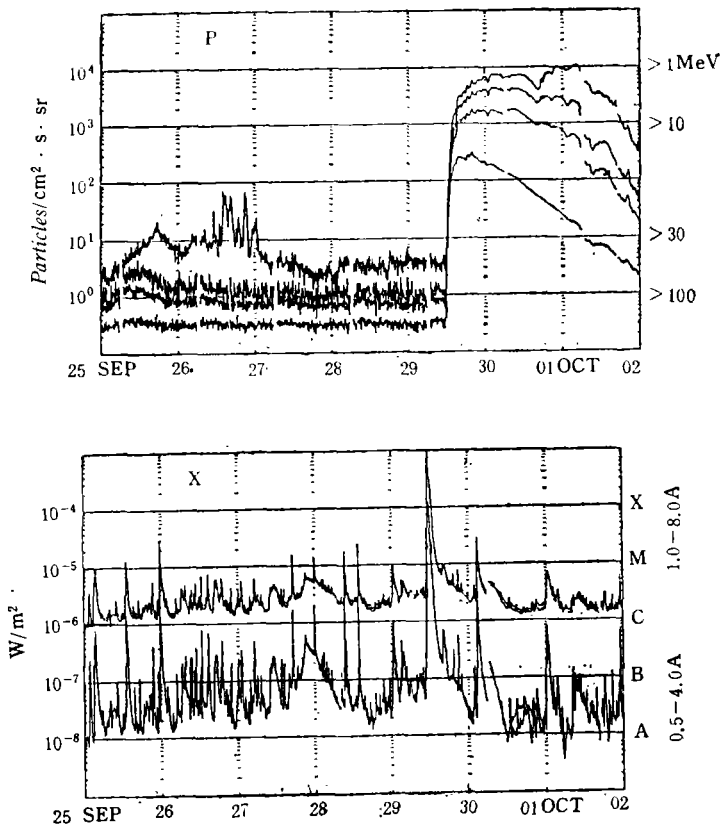


图 1　GOES 卫星测量的 1989 年 9 月 29 日太阳质子事件和 X 射线

Fig. 1　GOES satellite solar X ray and proton event plots on Sep. 29,1989

二、观 测 结 果

1989 年 9 月 29 日的 GLE 事件是一次罕见的太阳宇宙线地面增强事件，世界各地的宇宙线观测仪器都记录到了这次大事件. 表 2 列出了部分地面中子堆记录这次事件增加的最大百分比和以每小时计数为准的最大值出现时间.

表 2 一些中子堆记录的 GLE 事件

台站	位置	截止刚度 (GV)	增加的最大值 (%)	最大值出现时间 (UT)
Thule	76.6N, 68.8W	0	380	1400
Mcmurdo	77.95S, 166.6E	0.01	280	1400
Inuvik	68.35N, 133.7W	0.16	372	1400
Sanae	70.31S, 2.4W	0.86	213	1400
Deep River	46.1N, 77.5W	1.07	230	1400
Kerguelen	49.35S, 70.2E	1.10	260	1400
Keil	54.34N, 10.1E	2.32	132	1400
Hermanus	34.4S, 19.2E	4.60	104	1300
Rome	41.9N, 12.5E	6.32	98	1300
Potchefstroom	26.6S, 27.1E	7.00	107	1300
Tsumeb	19.2S, 17.58E	9.20	64	1300
Beijing	40.8N 116.2E	9.56	32	1300
Tokyo	35.75N, 139.7E	11.50	17	1200

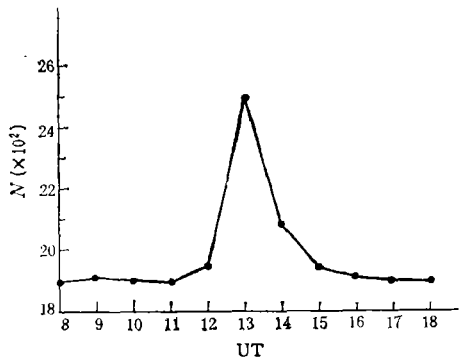


图 2 北京超中子堆记录的 1989 年 9 月 29 日的 GLE 事件

Fig. 2 The 29 September 1989 GLE as observed by the Beijing superneutron monitor

地面大多数宇宙线观测仪器在 1150UT 左右开始记录到宇宙线增加，北京站游离室记录的 μ 介子强度于 1148UT 开始增加，也就是在耀斑出现极大强度 (1133UT) 之后约 15 分钟记录到了第一批到达地球的太阳质子，可见这个耀斑是一个具有相当高能的质子耀斑。然后，强度迅速增加到极大值，μ 介子强度在 1210UT 达到极大值，增强约 12%*。与此同时，北京的超中子堆记录到最大增幅约 32%。图 2 是它记录的强度时间变化曲线。位于低纬的广州站 (23.6°N, 113.18°E, R_c = 16.0GV) 也记录到了 μ 介子垂直、东、南、西、北各方向的 GLE 事件的强度变化。这是我国宇宙线站建立以来首次记录到的 GLE 事件。

高纬和极区站记录的宇宙线增强更为显著，极区的 Thule 中子堆记录到 380% 的最大增强，而 Mcmurdo 中子堆记录的最大增强为 280%。图 3 和图 4 是高纬和极区站记录到的这次 GLE 事件的强度时间变化。

* 薛顺生，“空间物理与探测技术”，Vol.5, p.68, 1990.

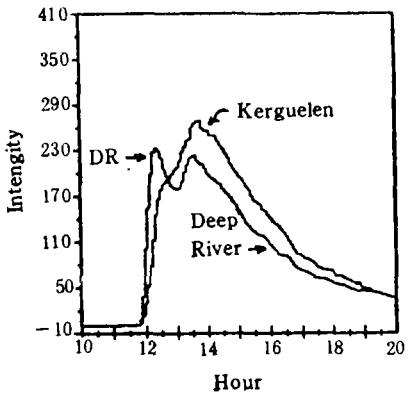


图 3　Deep River 和 Kerguelen 中子堆记录的 9 月 29 日 GLE 事件

Fig. 3　The 29 Sept. 1989 GLE as observed by the Deep River and Kerguelen neutron monitor

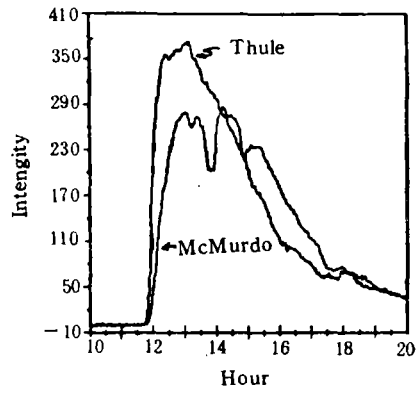


图 4　Thule 和 Mcmurdo 中子堆记录的 9 月 29 日 GLE 事件

Fig. 4　The 29 Sept.1989 GLE as observed by the Thule and Mcmurdo neutron monitor

三、基 本 特 征

1. 强度时间变化

一般说来，GLE 事件的强度时间变化有大致相似的规律，即事件一开始宇宙线强度增加，在一个不长的时间内迅速上升到极大值，然后逐渐衰减到正常水平．就 9 月 29 日的 GLE 事件的强度时间变化看，有如下一些明显的特征：

1）开始时间

根据地面仪器的记录，这次事件的开始时间在 9 月 29 日 1150UT 左右．北京的游离室记录 μ 介子强度于 1148UT 开始增加，而 Potchefstroom 和 Tsumeb 中子堆记录的 GLE 事件开始时间在 1145—1150UT 之间．根据 Sanae 站一分钟记录资料，开始时刻可以精确估计到 1149.5±0.5UT[3]．这些开始时间表明，在耀斑开始之后（1047UT）大约 60 分钟，第一批太阳质子就已到达地球．

然而，从广州望远镜记录的方向强度看，南、北方向的 μ 介子强度，特别是北方向强度在 1000UT 之后就开始明显地增加了（参看图 5）．可以说，有部分高能粒子于太阳光学耀斑开始之时就已到达地球了．也就是说，在太阳耀斑开始爆发之时或之前，已有部分高能粒子发射，这对于研究耀斑发生过程是很有意义的．

2）上升时间

如果从每小时总计数看，低刚度的台站记录 GLE 事件的最大值时间都出现在 1400 UT，高刚度台站记录的 GLE 事件的最大值时间出现在 1300UT，东京站（R_c = 11.50 GV）最大值时间出现在 1200UT（参见表 2）．如果从短时间的精细结构看，北极区 Thule 站的 GLE 极大值时间出现在 1315UT 左右，南极的 Sanae 站 GLE 最大值出现在 1400UT，说明在北极 GLE 最大值出现时间早于南极．而 Hermanus 的最大强度在

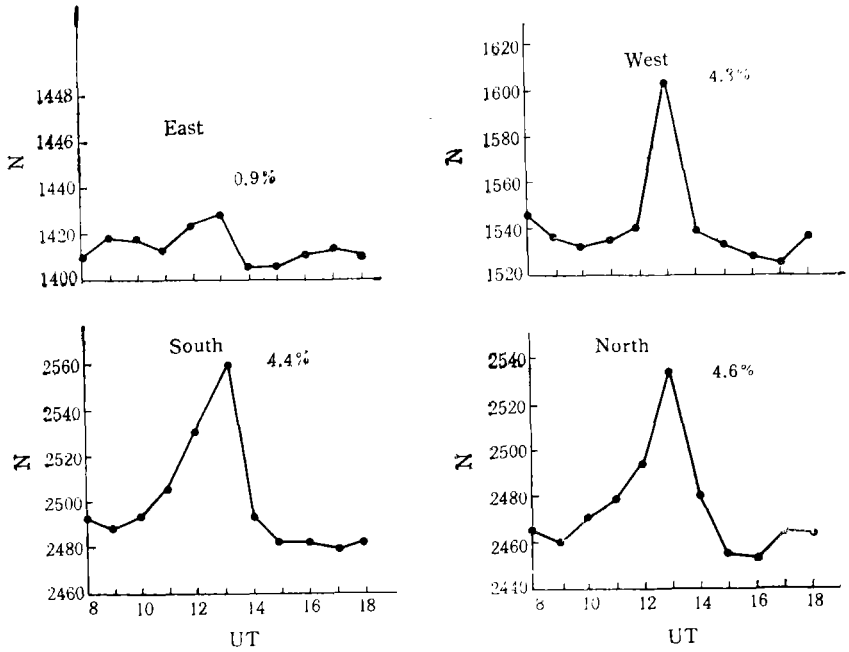


图 5 广州多方向望远镜记录的 1989 年 9 月 29 日 GLE 事件

Fig. 5 The 29 Sept. 1989 GLE as observed by the Guangzhou muti-directional telescope

1235—1240UT，北京的 μ 介子最大增强出现在 1210UT. 可以看出，随着地磁截止刚度 R_c 的增加，GLE 极大值出现的时间逐渐提前，说明 GLE 事件的开始阶段有较硬的能谱.

图 6 是南半球几个宇宙线观测站记录的这次 GLE 事件的强度时间变化[3]. 可以清楚地看出，极大值出现时间随截止刚度的减小而滞后. 随刚度减小，从强度开始增加到强度达极大值所需的时间越长. 也可以说，这次 GLE 事件开始能谱较硬，以后逐渐变软.

3) 衰减时间

从图 2—6 可以看出，纬度越高(截止刚度越小)，GLE 事件的衰减时间持续越长. 通常在高纬地区，直到 2000UT 宇宙线还未恢复到强度的正常水平，而在低纬地区，不到 1500UT 就已恢复到了强度的正常水平.

图 7 是图 6 中 4 个站中子堆记录的 GLE 衰减期间增强计数率随时间的变化曲线，它们可以拟合为指数函数

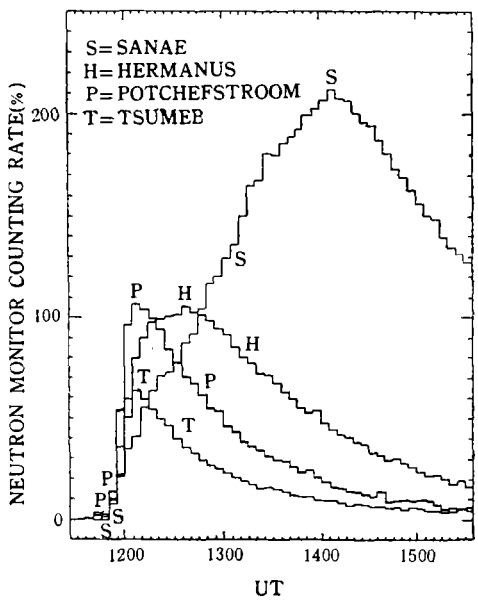


图 6 南纬 4 个中子堆记录的 9 月 29 日的 GLE 事件

Fig. 6 The 29 Sept. 1989 GLE as observed by the south latitude neutron monitors

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

时间常数 τ 从 144 秒(对低刚度的 Sanae 站)到 52 秒(对 Tsumeb 的高刚度中子堆)。这也表明，在地球上记录的太阳质子能谱在逐渐变软。

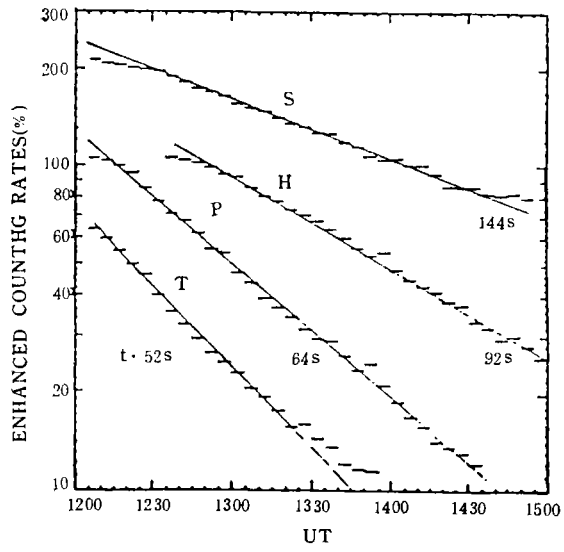


图7　4 个中子堆的 GLE 衰减相的强度时间变化

Fig. 7　The intensity-time profiles for GLE decaying phases of the four neutron monitor

4) 双峰结构

从图 3 和图 4 可以看到，在强度时间变化曲线上存在着十分有趣的结构差别，即有的站记录到了这次 GLE 事件的双峰结构。在稍低的截止刚度，如 Deep River 和 Kerguelen 存在着明显的结构差别，Deep River 有双峰结构，而 Kerguelen 没有，只是一个在北半球、西边，一个在南半球、东边。在极区这种结构差别更突出(图 4)，Thule 没有双峰结构，而 Mcmurdo 有显著的双峰结构。与前者相反，有双峰结构的是在南半球、东边，没有双峰结构的是在北半球、西边。产生这种结构差别的原因是什么？这是值得我们进一步研究的问题。

2. 各向异性

从前面 GLE 事件的开始时间和上升时间的讨论，已经明显地看到，这个事件的开始一段时间内，GLE 事件具有明显的各向异性。从图 6 看到，到达 Tsumeb 和 Potchefstroom 站的粒子，至少到 1210UT 之前都是高度各向异性的，而在 Hermanus 记录到的计数率的增长速率相对于前两个高截止刚度的站有更慢的速率。

从图 5 广州多方向望远镜观测到的这次 GLE 事件看到，到达地球的粒子具有高度的各向异性。首先可以看出 GLE 事件具有极显著的东、西不对称性，西方最大强度增加 4.3%，而东方最大强度只增加 0.9%，西方强度大大超过了东方强度，这是因为东方的截止刚度大于西方截止刚度的原因，但这种差异远大于 1989 年 3 月宇宙线暴显出的各向异性[4]。南、北方向强度差异较小，北方最大强度增加 4.6%，南方最大强度增加 4.4%，北方强度略大于南方强度，这也是与 3 月宇宙线暴不同的。

从 GLE 事件开始时间看，南、北方向在 1000UT 以后强度就开始增加，而东、西方的强度增加出现在 1100UT 以后，表明东、西方到达的粒子比南、北方更硬。就东、西方而言，西方增强稍早些，南、北方向而言，北方增强更早些。

3. 能谱特性

从表 2 可以清楚地看到，9 月 29 日 GLE 事件的最大增加百分比随截止刚度的增加而迅速下降。图 8 是地面中子堆记录的这次 GLE 事件最大增加百分比随地磁截止刚度的变化，也就是这次事件的刚度谱。很显然，在截止刚度低于 4GV 和截止刚度大于 8GV

的粒子能谱较好地符合于指数刚度谱，$\Delta I/I = Ae^{-R/R_0}$，式中 ΔI 为最大强度增加量，I 为平均强度，A 为常数，R_0 为特征刚度，R 为地磁刚度．当截止刚度小于 4GV 时，$A \approx 375$，$R_0 \approx 1.70$GV；当刚度大于 8GV 时，$A \approx 8000$，$R_0 \approx 1.76$GV．在截止刚度 4—8 GV 范围内，GLE 的增强变化不大．通常的太阳质子事件能谱都较好地符合于指数刚度谱，而这次特大的相对论太阳质子事件，在 4—8GV 刚度范围内偏离指数刚度谱较大，这是一个显著的特点．

其次，我们注意到了位于南、北纬度的各宇宙线观测站记录的宇宙线增强也有较大的差别．如刚度相近的 Deep River 和 Kerguelen，Thule 和 Mcmurdo，它们的增强幅度差别较大，而且结构也有大的差异．特别是位于南大西洋磁异常区的几个站，如 Tsumeb、Hermanus 和 Potchefstroom 偏离上述曲线较大，这表明地磁异常对带电粒子可能产生的影响．

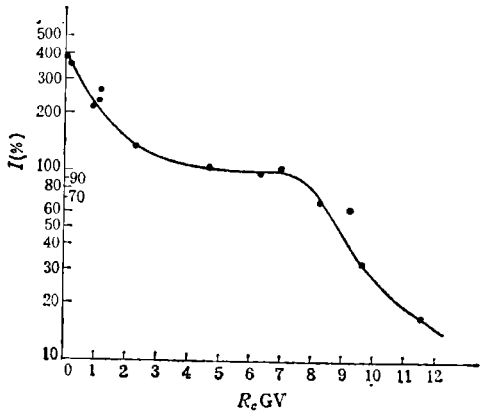


图 8 1989 年 9 月 29 日 GLE 事件的刚度谱

Fig. 8 The rigidity spectrum of the GLE on 29 Sept. 1989

四、对空间环境和航天技术的影响

由于这次事件是罕见的高能量、高通量的特大 GLE 事件，因此，它对电离层、地球大气等有关参量将产生明显的扰动．这次太阳宇宙线事件属于 4 级事件，它不仅对极区电离层 D 层产生巨大的电离，而且也会使中、低纬度的 D 层电离增加．根据关于太阳宇宙线对极区电离层 D 层电离的模式计算[5]，这样的大事件会使极区 D 层的电子产生率比平时高出 2—3 个数量级，使电子浓度大大增加，造成 LF、VLF 和 VH 电波传播的异常变化，影响正常的通迅与导航．据报道*，我国云南和临潼都观测到 LF 和 VLF 的相位突然异常，而且电离层的突然骚扰达到了 3^+ 级(即最大的扰动级别)，世界许多台站都报道了这次大的电离层骚扰[6]．

根据统计结果[7]，这样大的太阳宇宙线事件必定会对大气臭氧含量产生明显影响，即大气臭氧含量．特别是高纬地区的臭氧含量将出现明显下降．对于 3、4 级的太阳宇宙线事件，对高纬臭氧含量平均统计下降可达 12.0%．根据世界臭氧资料[8]进行的分析表明，在高纬 Hradec Kralove (50.11N, 15.50E, $R_c = 3.6$GV)、Potsdam (52.23N, 13.03E, $R_c = 2.5$GV) 和 Longyer (78.13N, 15.35E, $R_c = 0.08$GV) 的臭氧含量在 GLE 事件之后 1—3 天之内最大下降分别为 17.0% 17.5% 和 12.6%．在低纬的 Buenos Aires (34.6S, 58.48W, $R_c = 10.03$GV)、Huancayo (12.03S, 75.33W, $R_c = 13.01$GV) 和 NAHA (26.01N, 127.50E, $R_c = 15.3$GV) 的臭氧含量最大下降分别为 5.8%、4.6% 和 4.4%．

这个事件对人类航天技术的影响也是显著的．据报道[1]，在巴黎和华盛顿之间飞行

的高高度协和式超音速飞机上的辐射监测器，在它的运行过程中第一次达到了预警水平．这个警报水平置于一个等效的胸部X射线透视的水平，当然，这对旅客和乘员并不会带来危险．在地球和金星之间飞行的 Megellan 飞船，在这次事件期间它的太阳电池输出降低了 5%．此外，许多飞船，包括 Megellan 飞船在内都观测到制导、指令和控制功能的干扰．

五、结论和讨论

由以上的分析可以得出如下一些结论：

1. 从低纬 μ 介子方向望远镜的观测看，在地面观测到太阳爆发之前，已经有部分高能粒子到达地球．

2. GLE 事件的最大值出现时间随截止刚度减小而滞后，说明高能粒子最先到达地球，最大强度主要集中在较低的能量部分．

3. 高能粒子的上升时间和衰减时间都比低能粒子快．表明地球上记录的太阳质子能谱开始较硬，以后逐渐变软．

4. 这个事件具有相当丰富的高能粒子，有很高的能谱硬度．刚度小于 4GV 和大于 8GV 的粒子能谱服从指数刚度谱规律，在 4—8GV 刚度范围内，强度增加变化不大．

5. 这次 GLE 事件在最初阶段具有明显的各向异性．而且该事件有很强的东、西不对称性，西方强度几乎是东方的 5 倍，这远远超过了宁静时和 Forbush 下降时的东、西不对称性．

前面我们提到了这次 GLE 事件在高纬某些台站记录到了双峰结构．我们注意到了上述两对台站中有双峰结构的一个位于南半球、东经一边，一个位于北半球、西经一边．这是值得进一步研究的问题，这可能与行星际扰动结构、方向特性、以及地理位置有关．

本文简要讨论了这次事件对人类技术和环境带来的影响．这种分析是很初步的和不完全的，有待进一步全面分析，这里只想说明这次事件对环境影响的重要性．

参　考　文　献

[1] Shea, M. A., Proc. 21st International Cosmic Ray Conf., Vol. 12, p. 196, 1990.
[2] Preliminary Report and Forecast of Solar-Geophysical Data, No. 738, p. 19, 1989.
[3] Stoker, P. H., Proc. 21st International Cosmic Ray Conf., Vol. 12, p. 205, 1990.
[4] 叶宗海等，空间科学学报，第10卷，第280页，1990.
[5] Zong Qiu-gang and Ye Zong-hai, Proc 21st International Cosmic Ray Conf., Vol. 7, p. 46, 1990.
[6] Solar-Geophysical Data, Prompt Reports, No. 543. NOAA National Geophysical Data Center, part 1, 1989.
[7] 叶海宗等，空间科学学报，第7卷，第65页，1987.
[8] Ozone Data for the World, Atmospheric Environment Service, Vol. 30, No. 5, 1989.

THE FEATURES OF THE GROUND LEVEL ENHANCEMENT EVENT OF COSMIC RAY ON 29 SEPTEMBER 1989

Ye Zong-hai

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The ground level enhancement (GLE) from the solar proton flare of 29, Sept., 1989 is recorded by the world wide network of the neutron monitors and μ-meson telescopes. This GLE is the greatest event since the event on 23 Feb. 1956. The features of the world wide GLE including the intensity time profiles, the spectrum, the anisotropy and the geographical distribution etc. are studied in this paper. And the influences of the GLE on the earth's environment are described briefly in this paper.

Key words Solar cosmic ray, Solar flare, GLE event