第 15 卷 第 1 期　　空 间 科 学 学 报　　Vol. 15, No. 1
1995 年 1 月　　CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE　　Jan., 1995

# 1991 年 3 月太阳活动引起的地磁扰动*

高 玉 芬
（国家地震局地球物理研究所，北京 100081）
章 公 亮
（中国科学院空间科学和应用研究中心）
周 荣 茂
（国家地震局地球物理研究所）

**摘　　要**

利用北京白家疃台和马道峪台的地磁资料分析了 1991 年 3 月下旬太阳活动引起的 24—27 日的磁暴. 从中纬记录看，这次磁暴有其特殊的形态：即急始幅度特别大，磁暴最强活动是急始后即刻开始的极区暴影响而产生的；磁暴过程中多个时段出现脉动，其中以周期为 650 秒左右的脉动尤为明显；其极化方向主要表现为左旋偏振，同时夹有右旋偏振，有时则无明显规律. 谱分析的结果表明，整个磁暴功率谱呈幂律 $P(f) = f^{-2.0}$ 分布. 对引起这次磁暴可能的行星际扰动进行了讨论.

**关键词**　磁暴，急始，脉动，极化，行星际结构

## 一、概　　况

1993 年 3 月中旬以后，在太阳南半球出现了以 Boulder 编号 6555 为主的活动区，这

**表 1　1993 年 3 月中旬以后主要耀斑**

| 日　期 | 时间 开　始 | 时间 结　束 | 位　置 | | 等　级 | 区　号 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 2337 | 2526 | S25 | E40 | 2B | 6555 |
| 22 | 2243 | 2331 | S26 | E28 | 3B/X9.4 | 6555 |
| 23 | 0219 | 0535 | S21 | E13 | 2B | 6555 |
| | 0237 | 0518 | S12 | E04 | 3N | 6556 |
| | 0455 | 0618 | S17 | E06 | 3B | 6556 |
| 24 | 0925 | 1056 | S26 | E06 | 2B | 6555 |
| 25 | 0802 | 0836 | S26 | W03 | 2B/X5.3 | 6555 |

* 国家自然基金资助课题. 国家地震局地球物理研究所论著编号 94A0091.
本文于 1994 年 2 月 3 日收到.

是发生在太阳活动趋于下降时期的一次强的太阳活动. 根据耀斑与磁扰的统计规律[1,2], 我们从 SGD 报告中选出 Hα 等级在 3 级以上和持续时间在 1.5 小时以上或X级的 2 级耀斑共 7 个列于表 1.

这些耀斑引起了强烈的地磁扰动. 根据北京白家疃地磁台的磁暴报告, 这次扰动是 3 月 24 日 0341UT 开始的急始型强烈磁暴. 最强烈活动发生在 24 日第二个三小时时段, $K$ 指数为 9. 急始变幅(根据国家地震局北京西郊马道峪台数字化记录): $X$ 为 181nT, $Y$ 为 63nT, $Z$ 为 14nT; 最大活动幅度(白家疃台): $D$ 为 34.7′, $H$ 为 411nT, $Z$ 为 88nT. 扰动发展过程可从图 1 的 $Kp$ 指数琴谱图中看出: 强扰动集中在 3 月 24 日—27 日, 在这期间又可分为三个阶段: 第一阶段从 3 月 24 日第二个三小时时段起持续三个时段, $Kp$ 指数分别为 $9^-$、$8^\circ$和 $7^+$; 第二阶段从 24 日第七个三小时时段到 25 日第二个三小时时段, 其中两个时段 $Kp$ 指数达到 $9^-$; 第三个阶段从 25 日第五个时段到 26 日第六个时段, 在这段时间, 最大 $Kp$ 指数为 $8^\circ$, 其它在 $5^+$ 以上, 这以后 $Kp$ 指数为 5 左右的中等扰动, 一直持续到 28 日第 8 时段才恢复平静.

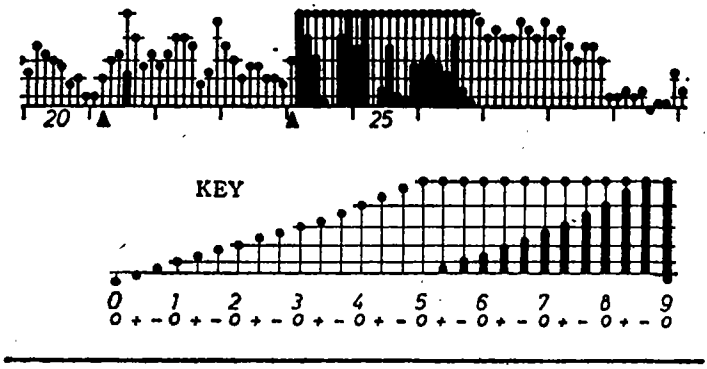



图 1 1991 年 3 月 $Kp$ 指数琴谱图

Fig. 1 Music spectrum of $Kp$ index in Mar. 1991

## 二、特殊的扰动形态

$Kp$ 指数琴谱图中显示出的三次较强活动在北京台记录中都可看出, 为节省篇幅, 略去原记录图.

这次磁暴的第一个特点表现在第一次强扰动上. 从原记录图中可以看出, 24 日 0341 急始后磁场立刻急剧下降, 大约在半小时内达到最低点, 之后磁场又迅速回升; 这一过程经历 2 个多小时. 根据我国各地磁台包括日本柿岗台的磁暴报告, 给出的最大活动期均为 24 日第二个三小时时段, 即与北京台的变化相同. 象这样在急始后两个小时内磁场下降如此剧烈又迅速恢复的形态是不多见的. 24 日 1400UT 后的一段时间, 扰动明显减弱.

原记录显示出 2030UT $H$ 分量有一急始状突增, 这是第二次强扰动的开始, 随即开始另一主相状下降. 在强磁暴过程中发生的急始型磁暴是容易被忽略的. 但我们认为区分

出这种磁暴对于研究磁暴类型对行星际扰动结构的响应是很重要的，因为它标志着一个行星际结构到达地球．第二阶段的强烈下降至 25 日 06 时趋于恢复，但地磁场仍高于扰动前水平．

第三次较强扰动从 25 日第五个时段开始，起始时间不明显，具有共转扰动的特点．扰动一直持续到 28 日第七个时段才恢复平静．

根据以上分析，也可以认为这次事件是由三个不同特征磁暴组成的．前两磁暴为急始型强烈磁暴，后一磁暴则为夹杂强扰动的缓始型中等磁暴，由于磁暴的叠加，其开始时间无法确定．

下面对第一次强扰动作较详细的分析：

首先把北京台 3 月 24 日到 27 日的水平分量时均值消除了 $S_q$ 以后与 *Dst* 指数(WDC-2 提供的临时指数)进行比较，结果见图 2．从图中看出两条曲线的明显差异发生在 24 日 0400—0500UT，此时北京台 $H$ 时均值为 −155nT，而 *Dst* 指数为 +67nT，其它大部分时段的变化趋势相同．由此看出北京台这段磁场扰动与形成磁暴主相的赤道环电流无关．

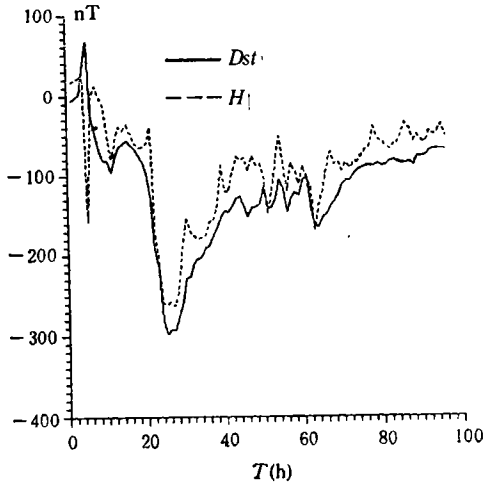



图 2　1991 年 3 月 24—27 日北京地磁台 $H$ 时均值(消除 $S_q$)与 *Dst* 指数(时间起始点为 24 日 0000UT)

Fig. 2　Hourly mean values for $H$ component (after removing $S_q$) of Beijing geomagnetic observatory and *Dst* index (the starting time is 0000UT, Mar. 24) during Mar. 24—27, 1991

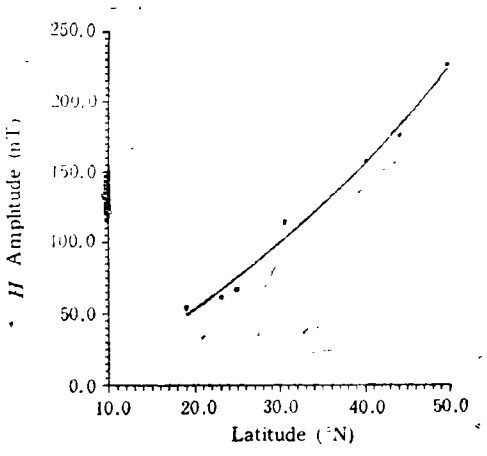



图 3　1991 年 3 月 24 日 0400—0500 $H$ 时均值(绝对值)随纬度的分布

Fig. 3　Latitudinal disturbutions of hourly mean values(absolute value)for $H$ component

利用我国东部多个台站同一时间的 $H$ 分量可进行进一步分析．所用台站(包括本文中所用全部台站)经纬度在表 2 中给出．图 3 给出 0400—0500UT (1200—1300LT) $H$ 时均值(消除了 $S_q$)随纬度的分布．所有时均值都为负值，图中纵坐标为绝对值．可以看出其数值随纬度的升高而增加，这明显指出磁场的变化源来自高纬．图 4 给出了利用我国主要地磁台的资料计算出的相应时间等效电离层电流矢量图．可以看出，电流强度从高纬到低纬逐渐减少，其方向为西偏南．在同一时间，处于极光带代号为 SQD ($\varphi$ = 67.37N,

表 2 所用台站经纬度

| 台 名 | 地理坐标 | | 地磁坐标 | |
|---|---|---|---|---|
| | 经度(°E) | 纬度(°N) | 经度(°E) | 纬度(°N) |
| 满洲里 | 117.4 | 49.6 | 186.8 | 38.5 |
| 长 春 | 125.2 | 44.0 | 193.7 | 33.2 |
| 北 京 | 116.2 | 40.0 | 186.1 | 28.9 |
| 武 汉 | 114.6 | 30.5 | 184.9 | 19.4 |
| 泉 州 | 118.6 | 24.9 | 188.7 | 13.9 |
| 广 州 | 113.3 | 23.1 | 183.9 | 11.9 |
| 琼 中 | 109.8 | 19.0 | 179.4 | 7.8 |
| 兰 州 | 103.8 | 36.1 | 175.2 | 24.9 |
| 成 都 | 103.7 | 31.0 | 175.0 | 19.8 |
| 通 海 | 102.7 | 24.0 | 174.0 | 13.0 |
| 拉 萨 | 91.0 | 29.6 | 163.4 | 18.9 |
| 乌鲁木齐 | 87.7 | 43.8 | 161.6 | 33.3 |
| 喀 什 | 76.0 | 39.5 | 149.4 | 29.5 |

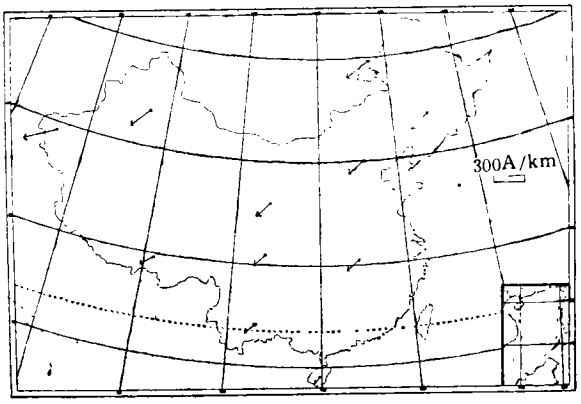



图 4 电流矢量图(时间同图 2)

Fig. 4 The plots of current vector (time same as in Fig. 2)

$\lambda = 26.63$E) 地磁台，$H$的时均值达 −1484nT，这说明极区确有强磁场扰动。

磁暴期间地面台站，特别是中纬台站记录到的地磁扰动是空间各种电流体系在地面产生的磁场的叠加，它包括了太阳风与磁层相互作用在磁层顶产生的电流、极区电流、赤道环电流、中纬电离层电流等。要严格区分这些电流在地面产生的磁场是困难的。就这个磁暴而言，根据以上分析可以肯定的是，广大中低纬地区在磁暴开始后前两个多小时的最强烈的扰动并不是赤道环电流引起的，而主要是由极区强烈亚暴电流体系向中低纬扩展所致。从原磁照图上看前两个多小时的变化很象个负湾扰，只不过与一般的湾扰不同的是其伴有很强很多的脉动成分，从此也可以断定其变化源与极区亚暴相同。

当环电流形成之后，中低纬度的磁场扰动源更为复杂。极区和赤道电流共同作用，使磁场扰动与纬度无明显关系。图 5 给出了我国东部不同纬度台站$H$分量（消除 $S_q$）在这次磁暴期间的变化。从图中可以看出，除 0400—0500UT 之外，其它大多数时间各台(纬

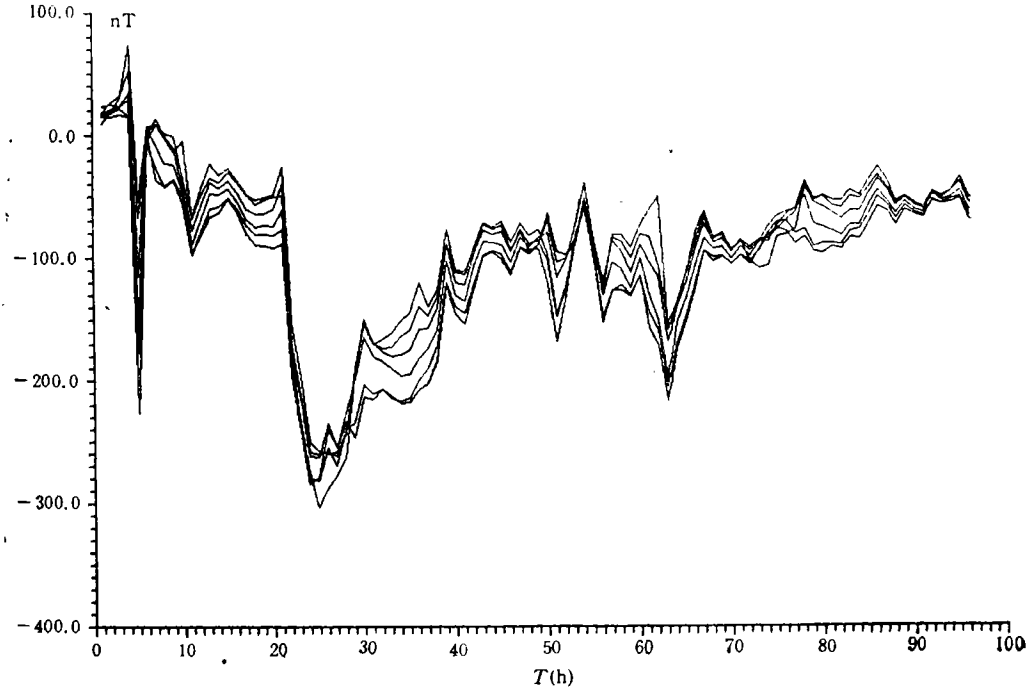



图5　1991年3月24—27日中国地磁台 $H$(消除 $S_q$)分量变化

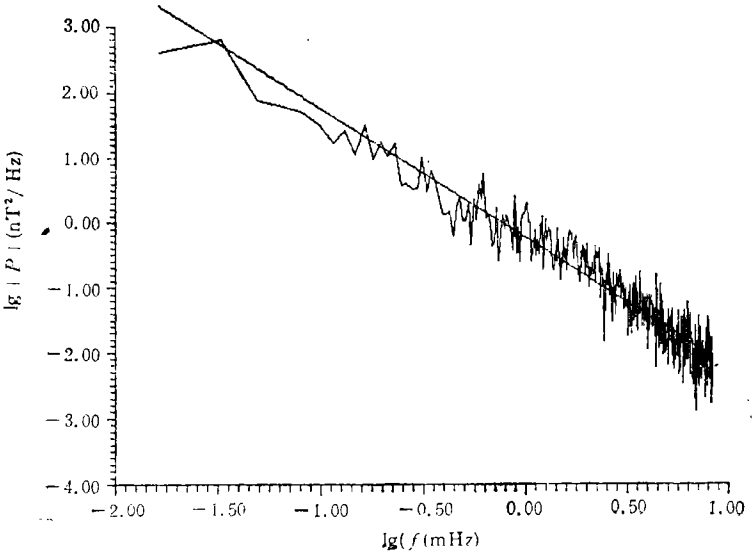
**Fig. 5** Variation of $H$ component (after removing $S_q$) during Mar. 24—27, 1991 for Chinese geomagnetic observatories

度差约30°)变化并无明显不同.

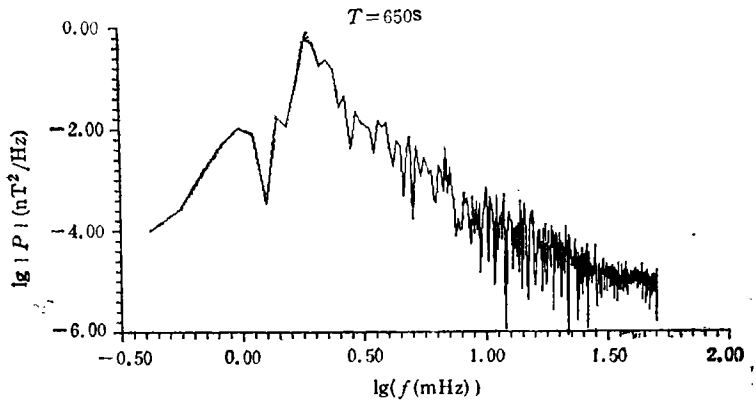
这次磁暴形态的第二个特点是急始幅度特别大,水平分量的急始幅度约为1989年3月(急始幅度 $\Delta H = 48$nT)特大磁暴的4倍. 但其后面的扰动却远不及那次磁暴强烈. 1989年3月13日北京白家疃台记录到的最大活动幅度 $H = 741$nT ($Dst = -599$ nT). 而这次磁暴的急始变幅虽远大于前者,但最大活动幅度 $H = 411$nT ($Dst = -298$nT). 因此,这个磁暴也有力说明磁暴的急始幅度和与赤道环电流形成的主相强弱无关.

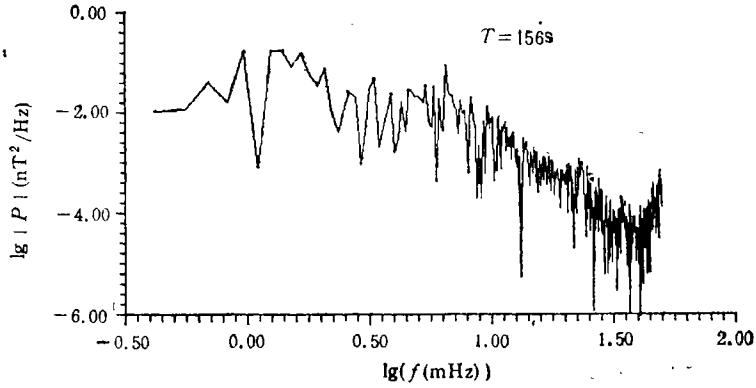
## 三、磁暴期间伴随的脉动

这次磁暴的第三个特点是在几个时间段出现明显的脉动. 在磁暴开始后的10个小时内以及25日3:00—5:00, 26日5:00—15:00在磁照图上都可看到明显的脉动. 其中以 $Pc5$ 和 $Pc6$ 脉动最为突出. 图6给出了利用北京马道峪台磁饱和式磁力仪10秒采样数字化记录水平分量资料功率谱分析结果. 图6a为整个磁暴期间的功率谱(1分钟平均); 图6b为磁暴开始后的2个小时,即24日1141—1341LT(下)及24日1941—2141LT(上)的功率谱(10秒采样). 图6b的结果是在作功率谱前进行了消除趋势性变化及滤波处理,滤掉了低频成分而得到的. 从图6a可以看出,扰动能量分布随频率增加而衰减,其衰减规律可从功率谱随频率的分布呈幂律形式 $P(f) = f^{-2.0}$ 看出. 图6b上图峰值位置非常明显,其相应周期为 $T = 650$s. 下图中,在较长周期部分峰值不突出,相比之下,在




(a) the whole storm periods



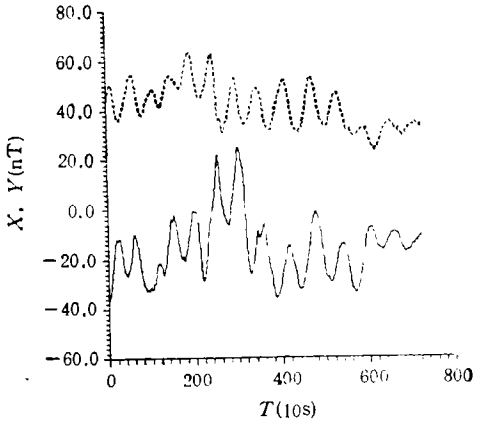




(b) 1141—1341 LT on March, 24 (top)
1941—2141 LT on March, 24 (bottom)

图 6　磁暴期间部分时段功率谱

Fig. 6　Power spectra of some intervals during the storm

$T$ = 156s 处峰值较突出，这一峰值在上图中也可看到；同时，下图尾部明显上升，其相应周期为几十秒．这段时间多种波的出现与急始脉冲及强亚暴活动密切相关，很可能是由于突然脉冲触发的磁流体波和磁力线共振引发．而在图 6b 上图中的脉动发生在亚暴活动恢复后的一段时间．在记录图上几乎呈简单正弦形振荡．图 7 给出了马道峪台 $X$ 和 $Y$ 分量数字化仪记录，其中 $X$ 为实线，$Y$ 为虚线．$X$ 的幅度达 40nT，$Y$ 的幅度达 20nT．图 8 给出这段时间内部分时间段的极化图．可以看出，主要极化方向为左旋，但中间夹有右旋偏振，而中间一些时间段极化方向无明显规则．这说明，整个物理过程是相当复杂的．一个单台记录所能得到的信息是有限的，而一个简单的物理模型也不能解释这一复杂过程中出现的各种现象．




7 图　北京马道峪台 3 月 24 日 1941—2141LT $X$ 和 $Y$ 记录

Fig. 7　The records of $X$ and $Y$ component at Ma daoyv station during 1941—2141 LT, March, 24

地面记录到的脉动是从波的发生地经磁层、电离层传到地面的，它不但与波的产生机制、地点、传播方向、传播路径上介质的物理参数有关，而且还会受到地下感应的影响，但同时它也带来了丰富的信息．正因为如此，人们早已对它进行了广泛的研究[3,4]．对不同频段的脉动，提出了多种不同的产生模

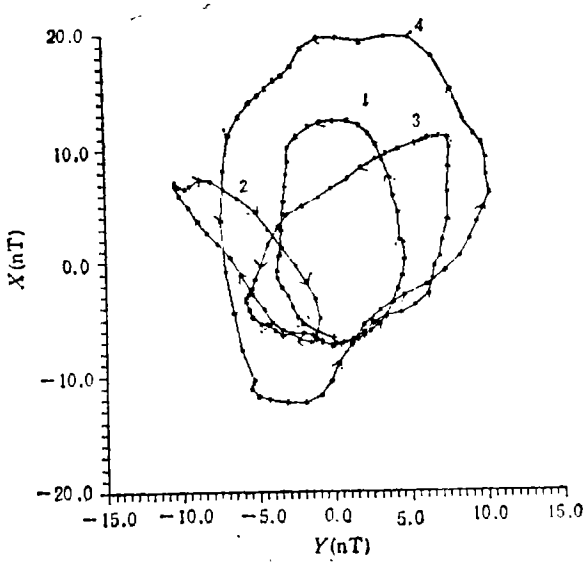



图 8　图 7 中部分时段磁场极化图，图中数字表示时间段顺序

Fig. 8　The magnetic field polarization of some intervals in Fig. 7 (the figure indicate the order of intervals)

型，而每种模型也只能解释一部分现象．要充分了解这些波动现象的完整过程，覆盖足够长时间和足够大空间的观测资料及更现实的物理模型都是不可少的．

## 四、扰动起因的推论

目前，我们尚未见到相应的行星际资料，因此弄清楚这次事件的起因是有困难的．但是，根据我们对日地扰动事件的综合研究[5]，可以对引起这次事件的太阳—行星际扰动作如下的推论．

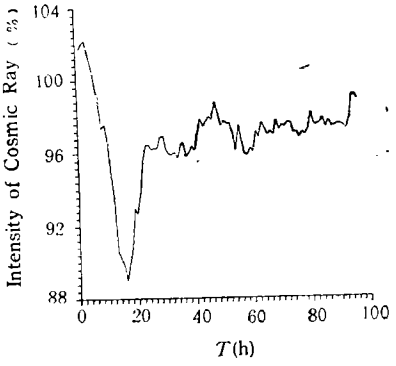



图 9 1991 年 3 月 24—27 日宇宙线强度变化(起始时间为 3 月 24 日 0000UT)

Fig. 9 Intensity variation of cosmic ray during March. 24—27, 1991 (the starting time is 0000UT, March. 24).

第一次强烈扰动最可能的起因是 3 月 22 日 2243UT 的 3B/X9.4 耀斑，日地时差不到 29 小时，平均传播速度约为 1400km/s，是属于传播速度极快的日地扰动． 急始前地磁场扰动水平并不高，说明背景太阳风速并不很高；急始幅度罕见的大，是由相对传播速度极高的行星际激波压迫磁层的结果．为了帮助推论相应的行星际结构，图 9 画出北京宇宙线超中子堆记录．可以看到急始之后，宇宙线强度急剧地下降，也说明行星际强激波及其后随的湍流结构到达地球[6]．

在 22 日至 23 日 05 时之间又发生 2 次 3 级耀斑活动，先后相间只有 3 小时左右，很可能形成一次或两次激波的追赶和叠加，从而增强了原激波强度[7,8]．强极区暴的出现说明激波后存在南向的强磁场结构，极区暴很快恢复则又意味着此南向磁场结构时间尺度较短，太阳风能量通过重联及强烈压缩磁层等过程，集中在短时间输入极区，但未能形成强环电流主相．值得注意的是宇宙线下降恢复的时间是 24 日 1500—1600UT，与第一次强烈扰动脉动终止的时间非常接近，标志着湍流剧烈的行星际强磁场结构的主体已通过地球．

综上所述，第一次强扰动是以行星际强激波及其后随高速、强湍流的强磁场结构所引起极区强亚暴活动为特征的．

从 Kitt Peak 台 10830A 图上可以看出，在 6555 活动区东西两侧均有冕洞，第二次强烈扰动则可能是冕洞高速流前沿追赶第一强瞬变扰动结构的后部所引起的．值得注意的是第二强烈主相并无相应的宇宙线下降．其原因可能是追赶只在地球轨道附近行星际空间局部形成强磁场湍流结构，而宇宙线下降则要求包围地球的大空间尺度的强湍流结构．从第三扰动形态看，它是比较典型的夹杂强扰动的共转扰动．它们可能是 3 月 24 日以后耀斑相联系的瞬变扰动与冕洞高速流相互作用的结果．总之，1991 年 3 月地磁扰动不仅存在瞬变流之间的追赶相互作用，而且存在共转高速流与瞬变扰动结构的相互作用复杂过程．地磁扰动特征和宇宙线变化为我们提供了丰富的信息，有待于我们进一步研究．

**致谢**　周军成、周锦屏、刘其俊为本文提供了有关资料；WDC-C2 中心提供 *Dst* 指数，特表示感谢。

## 参　考　文　献

[1] 章公亮，高玉芬，聂华山，李灼华和章庆华，空间科学学报，第 10 卷，第 1 页，1990。
[2] 章公亮，中国科学 A 辑，第 3 期，第 254 页，1984。
[3] Jacobs, J. A., Geomagnetic Micropulsations, Springer-Verlay, Berlin Heidelbery New York, 1970.
[4] Jacobs, J. A., *Geomagnetism*, Vol. 4, p. 481, 1991.
[5] Zhang, G. L., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 53, p. 1055, 1991.
[6] Zhang, G. and L. F. Burlaga, *J. Geophys. Res.*, Vol. 93, p. 2511, 1988.
[7] 顾惠成，魏奉思和吕建永，空间科学学报，第 12 卷，第 29 页，1992。
[8] 叶宗海和孙小青，空间科学学报，第 12 卷，第 270 页，1992。

# THE GEOMAGNETIC DISTURBANCES CAUSED BY SOLAR ACTIVITY IN MARCH 1991

Gao Yu-fen
*(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing* 100081)

Zhang Gong-liang
*(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing)*

Zhou Rong-mao
*(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing)*

## Abstract

Using the geomagnetic data of Baijiatuan and Madaoyu observatories in Beijing, the magnetic storms of March 24—27 caused by solar activity during the last ten days of March 1991 are analysed. From the records of mid-latitude, one could find the storms have some specific morphological features: the amplitude of the sudden commencement is very large, the most severe activity of the storms is produced by the substorm beginning immediately after the sudden commencement; there appear some pulsations in many intervals during the storms, in particular, the pulsations with $T = 650$s are outstanding. It is polarization direction displays mainly left-handed, but, it mixed up with right-handed ones without any obvious regularities. The results of spectra analysis indicate that power spectrum $P(f)$ of the whole storm follows the form $P(f) = f^{-2.0}$. In addition, the interplantary disturbances are discussed, which may cause the storms.

**Key words** Magnetic storm, Sudden commencement, Pulsation, Interplanetary structure