

太阳耀斑引起的日球和地磁扰动*

章 公 亮

(中国科学院空间物理研究所, 北京)

摘 要

本文统计分析了 1966—1978 年 2 级以上太阳耀斑引起的行星际介质参数的扰动, 进一步证实耀斑持续时间是区别其有无显著扰动效应的重要判据. 而亮度则是决定其所引起的行星际磁场和地磁场扰动强度的主要因素. 一个重要的新结果是在耀斑所引起的扰动中, 太阳风速度和行星际磁场强度有着截然不同的东西不对称性, 并且恰好分别与 $Kp = 4, 5$ 级的中等地磁扰动和 $Kp \geq 6$ 级的强扰动的不对称性相对应. 从而推断太阳风-磁层相互作用可能存在强、中两种方式. 后者主要是太阳风速度增强引起的, 而前者则必须有相伴的行星际磁场, 尤其是南向分量的增强. 亮耀斑同时兼有引起这两种相互作用的能力, 而非亮耀斑一般只能引起中等的相互作用.

一、引 言

太阳耀斑发生后, 在行星际空间激发的激波携带了耀斑释放的绝大部分能量, 进入日球空间, 引起行星际介质的巨大扰动. 耀斑激波及其随后产生的高速流能调制银河宇宙线、加速太阳风粒子至亚相对论能量. 而当它与地球磁层相互作用时, 除了能压缩磁层外, 更重要的是激发极光、产生极光带和磁层电流, 引起地球磁场的激烈扰动, 甚至影响电离层和高层大气. 因此它是日地物理学中的重要现象, 对它的研究已成为日地物理研究的最活跃的领域之一.

我们在研究太阳耀斑与磁扰关系时, 最早发现耀斑-磁扰关系中, 存在随耀斑日面位置分布的东西不对称性^[1], 以及磁扰特性依赖于耀斑产物在日地空间传播时间等重要特性^[2]. 并且提出了用行星际激波在螺旋磁场中各向异性传播的概念, 来解释所得的统计结果. 现代空间探测的结果证实, 我们当时的基本概念是正确的. 最近的工作又发现东西不对称性在强、中磁扰中有不同的反映^[3], 因此, 很有意义的问题是进一步探讨引起这种不对称性的原因是什么?

Akasofu^[4] 在研究太阳风和磁层相互作用问题时, 把太阳风速度 V 、行星际磁场强度 B 组合成一个能量耦合参数 ε :

$$\varepsilon = L_0 V B^2 \sin^4 \left(\frac{\Theta}{2} \right), \quad (1)$$

其中 Θ 是行星际磁场投影到日地黄道坐标系的 $y-z$ 平面内的极角. 他得到的 ε 参数与地磁扰动指数有很好的相关, 为解决日地扰动问题迈开了重要的一步. 但是他的工作仍未回答是什

本文 1982 年 7 月 8 日收到, 1983 年 3 月 18 日收到修改稿.

* 参加本工作的有薛顺生和陆晨等同志.

么因素引起 ϵ 参数的不同结构和变化,更未联系太阳活动来讨论这个问题。

本文以及我们其他一系列的工作的目的,就是在上述工作的基础上,研究太阳耀斑引起的太阳风和行星际磁场的扰动。这个问题尽管已有人作过不少工作,但这种研究大都是个别事例的分析,很少有人联系耀斑特性作系统的分析研究。本文则在前一工作^[5]的基础上,进一步从统计的角度讨论这个问题。我们将用时间叠加法统计耀斑发生前两天至后六天行星际介质各种参数的变化,其中包括密度 N 、温度 T 、压力 P 、磁场强度 B 、磁场垂直于黄道面的南向分量 B_z 以及太阳风—磁层能量耦合参数 ϵ 的变化。太阳耀斑资料选自文献[6]并参考了文献[7],行星际介质资料取自文献[8, 9]。列入统计的时期为 1966—1978 年,并且只讨论 2 级以上的耀斑的效应。统计量暂取为各种参数的日均值,由于行星际资料断缺较多,求平均时按每天实际观测小时数进行权重平均,在本文所列各图中,横坐标均为日期,以耀斑发生日为零天,纵坐标则为不同的统计参数,水平点划线是各种参数的总体平均值 \bar{x} , 水平虚线则是用 t 检验法算出的统计曲线日平均偏离此平均值的显著性水准 $\mu_{0.05}$ (取几率为 0.05, 即置信度为 95%):

$$\mu_{0.05} = \bar{x} + \frac{\sigma t_{0.05}}{\sqrt{n/d}},$$

其中 σ 为资料的标准偏差; n 为对应曲线所包含的统计资料小时数,除以统计天数 d ($d = 9$) 即为平均每天统计所得资料小时数; $t_{0.05}$ 为置信界。

这里应该说明的是,我们对入选耀斑,除按其光学等级、位置进行分组外,未作任何舍弃。这样做是为了能得到尽可能多的样本,以达到较高的统计置信度,尤其是不丢失一些大的日地事件,这种事件往往是大耀斑成群而生。当然,这种方法也给统计曲线带来一定的伴生耀斑的混合扰动效应。但我们相信,对任一入选耀斑来说,伴生耀斑的位置、发生时间的分布一般是随机的。如果入选耀斑样本数相当多,这种伴生耀斑的混合扰动效应也将是随机分布的,它的统计效应不会超过显著性水准。如果入选耀斑能引起扰动,那就会出现迟后数天的远超过显著性水准的峰;相反,统计曲线只是落在显著性水准以内的随机起伏。从下面的讨论可以看到,在多数情况下,用显著性检验的方法是可以鉴别统计规律性是否可信的。

二、耀斑的光学等级与日球扰动

是什么样的耀斑才能引起显著的日球扰动呢? 这是我们首先要讨论的问题。研究这个问题自然可以考虑其它太阳活动因素,例如通常采用的太阳射电暴的类型,但是我们的工作则注意到,就耀斑的磁扰效应来说,可以把它的光学等级和持续时间作为区分其扰动效应强弱的标志^[5]。耀斑的面积反映它的产物的几何尺寸,决定空间某一点引起扰动的几率;耀斑的亮度则反映它所释放的最大瞬时能量;而耀斑的持续时间则决定它所释放的总能量,并且也是它是否伴随有 IV 型射电连续谱的一种特征。因此把这些光学特征作为判据在物理上是可取的。对耀斑的宇宙线效应所作的统计也证实了这一点^[10]。因此本文仍沿用这种按光学特征分类组合耀斑的方法,根据耀斑的等级及持续时间是否超过 1.5 小时而分成若干组。考虑到 3 级耀斑的扰动效应十分显著,而它们的持续时间大都又超过 1.5 小时,因此都归入时间长的一组,称为主要耀斑。2 级耀斑中持续时间在 1.5 小时以下者,则称为次要耀斑。这两种耀斑又再根据它们的亮度分为亮耀斑 (b) 和非亮耀斑 (nf) 两种。入选的各类耀斑数列于表 1 之中。

图 1 和图 2 画出不同等级、不同持续时间的 2 级以上耀斑所引起的太阳风和行星际磁场

表 1 1966-1978 年各类耀斑数

亮 度	类别 面积 持续时间	主 要 耀 斑			次要耀斑	总 计
		3	3	2	2	
		$\geq 1.5h$	$< 1.5h$	$\geq 1.5h$	$< 1.5h$	
b		20	4	58	96	178
nf		7	4	51	147	209
合 计		27	8	109	243	387

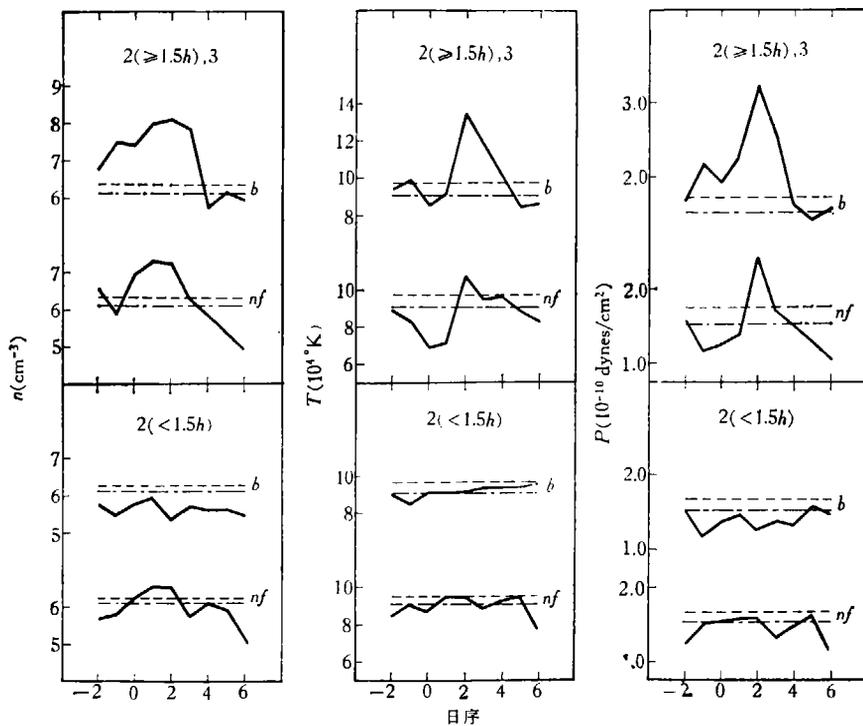


图 1 太阳耀斑引起的太阳风密度 (n)、温度 (T) 和压力 (P) 的变化

的扰动变化。每组曲线的上半部是主要耀斑，下半部则是次要耀斑。可以看到主要以持续时间长短为标准划分出两组耀斑，他们的扰动效应差别是非常鲜明的。和耀斑-磁扰以及耀斑-宇宙线下降的关系相似，耀斑的光学等级和持续时间是衡量耀斑有无明显的日球扰动效应的重要判据。只有 3 级耀斑和 2 级耀斑中那些持续时间在 1.5 小时以上的主要耀斑，才能引起显著的日球扰动；而 2 级耀斑中持续时间不足 1.5 小时的次要耀斑，基本上不引起有统计意义的日球扰动。在以下的讨论中，如不加特别的说明，我们都只是指的主要耀斑所引起的效应。

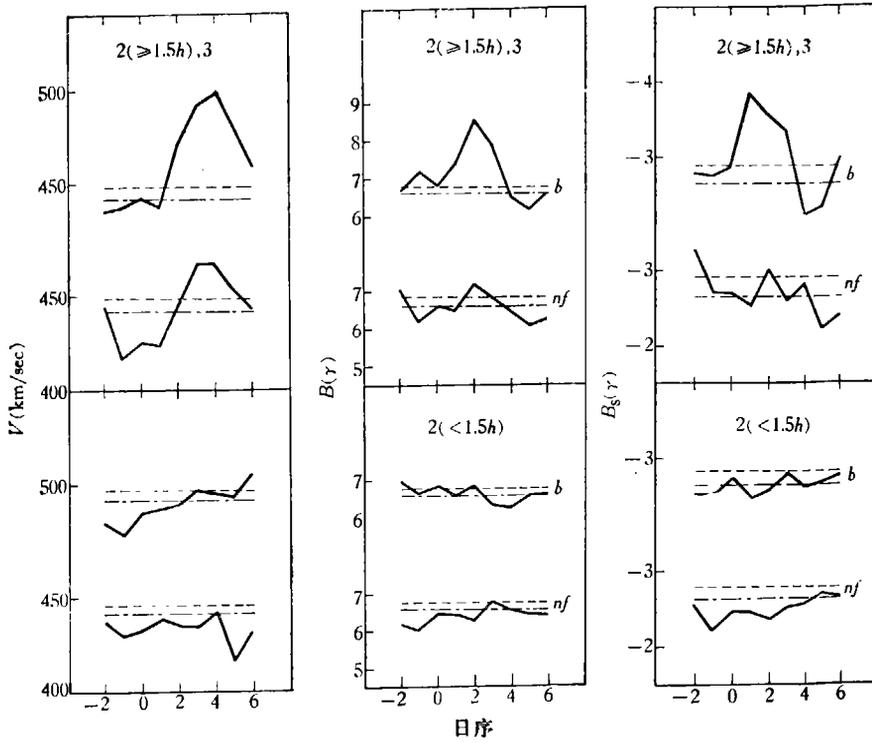


图 2 太阳耀斑引起的太阳风速 (V)、行星际磁场总强度 (B) 及其南向分量 (B_s) 的变化

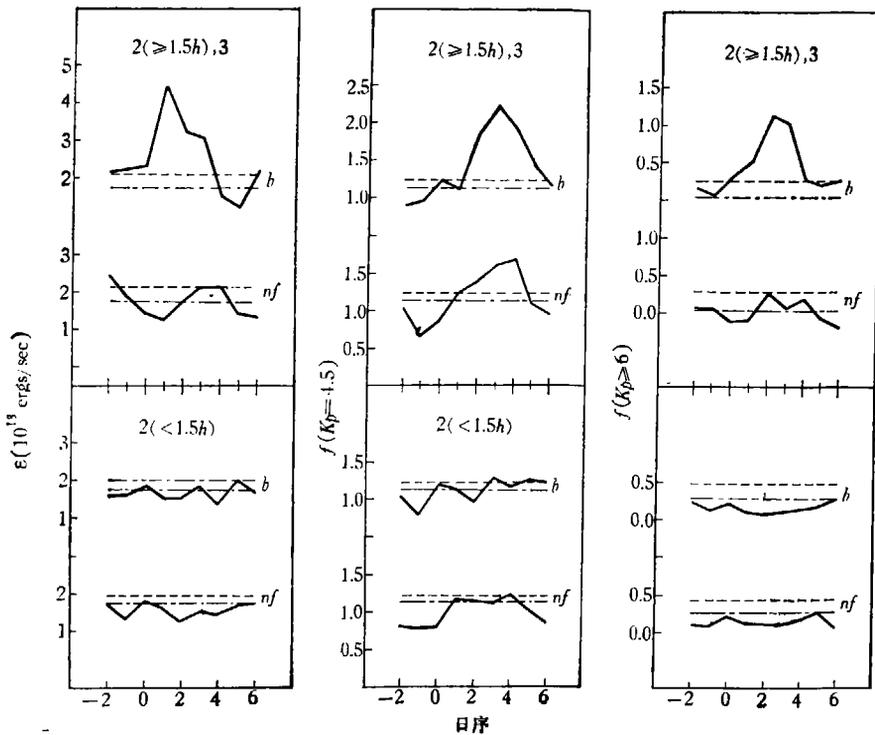


图 3 太阳耀斑引起的太阳风-磁层能量耦合参数 (ϵ) 和地磁 K_p 指数频次 $f(K_p = 4.5)$ 与 $f(K_p \geq 6)$ 的变化

图 1 和图 2 说明了耀斑高速流引起的太阳风和行星际磁场扰动强度随时间发展的平均特性,可以看到不同参数的时间进程是不尽相同的. 密度变化是激波引起的,因此它最早达到极值. 接着是太阳风温度、压力和行星际磁场总强度,在耀斑后第 2 天达到极大值,反映了相互作用区的到达. 最后来到的是高速流的峰,它明显地推迟到第 3 天和第 4 天才出现. 行星际磁场南向分量在耀斑后次日就达到极值,说明它可能是与激波相联系的一种扰动现象.

从图 1 和图 2 可以看到,耀斑的亮度是决定它所引起的日球扰动强度的重要因素,亮耀斑引起的日球效应要比非亮耀斑强. 首先可以预料得到的是两者引起的温度变化应该有所差别. 统计结果正是这样,亮耀斑所引起的太阳风温度扰动峰值比非亮耀斑所引起的高出 30% 左右. 后者的曲线偏低,但峰值还是显著的. 两者引起的压力变化有 30% 以上的差异,也是可以预料的. 值得我们注意的是,行星际磁场,尤其是其南向分量的强度扰动差别是非常之悬殊;亮耀斑引起的行星际磁场总能量变化比非亮耀斑所引起的大 40% 左右,并且后者只是略超过 0.05 显著性水准. 但是另一方面亮耀斑引起的太阳风密度和速度的变化,只是略高于非亮耀斑,其差别远不如以上几种太阳风参数那么显著.

为了联系耀斑的地磁扰动效应进行讨论,图 3 画出了太阳风-磁层耦合函数 ϵ 以及地磁 Kp 指数频次的变化^[3]. 详细的讨论留在第四节中进行.

三、方位分布特性

我们对耀斑-磁扰-宇宙线下降关系的研究得出了耀斑激波结构东西不对称性的结论^[1,2,5,10-12]. 由于行星际飞船为数甚少,很难在不同日球方位角上对同一耀斑事件进行详细的研究,因此关于耀斑激波的方位分布问题至今仍是不大清楚的^[13]. 在太阳自旋以及行星际螺旋场的作用下,这种激波的方位分布是相当复杂的. 如果把发生在不同日面经度上的太阳耀斑所引起的日球扰动进行统计研究,则可以得出这种不对称的耀斑激波的一般图象. 表 2 列出列入统计的主要和非主要耀斑的位置分布. 统计的结果则画于图 4 和图 5 之中.

图 4 的实线画出主要耀斑所引起的太阳风的密度、温度、压力和速度的变化. 可以看出这些参数的变化都有非常明显的东西不对称性,但又各有不同的特点. 密度的变化特点是东边耀斑的影响比西边耀斑影响强,尤其是在 E1 和 E2 位置的曲线,高峰更为突出,峰后迅速出现密度的稀疏区. 当耀斑出现在西部位置时,由于早先在东边位置耀斑的影响,密度仍在下降之中,而耀斑本身所引起的密度变化反而不甚明显.

太阳风速的变化则是另一种情形,它的变化有随着耀斑位置自东至西逐渐增高的趋势,最高和次高峰分别出现在 W2 和 W3 这两个位置. W3 位置的耀斑能引起如此大的太阳风速变化是出乎我们意外的. 在前一工作中^[3],我们发现地磁 $Kp = 4, 5$ 级的中等扰动的出现频率有随耀斑位置自东至西而逐渐增强的趋势. 这里的结果正好说明它与太阳风速的变化是相吻合的. 因此是一种有规律的现象,值得我们注意.

太阳风的压力变化则介于密度和速度之间. 一方面它与密度变化相似,在 E1 位置曲线有突出的峰;但另一方面又与速度变化相似,在 W3 边缘位置的耀斑引起的压力变化仍是相当大的. 温度的变化与压力变化是相似的. 要注意的是 W3 这个位置正是通过地球的行星际螺旋磁力线与太阳相联的区域. 这里的结果可能说明耀斑过程能沿行星际磁力线对太阳风进行加速和加热.

表 2 各类耀斑的位置分布

耀斑位置		东 (E)			西 (W)		
		E3 90°-60°	E2 60°-30°	E1 30°-0°	W1 0°-30°	W2 30°-60°	W3 60°-90°
主要耀斑	b	3	18	19	14	24	4
	nf	13	15	10	7	11	6
	合计	16	33	29	21	35	10
非主要耀斑	b	8	24	15	13	16	20
	nf	33	20	18	16	28	32
	合计	41	44	33	29	44	52
总计		57	77	62	50	79	62

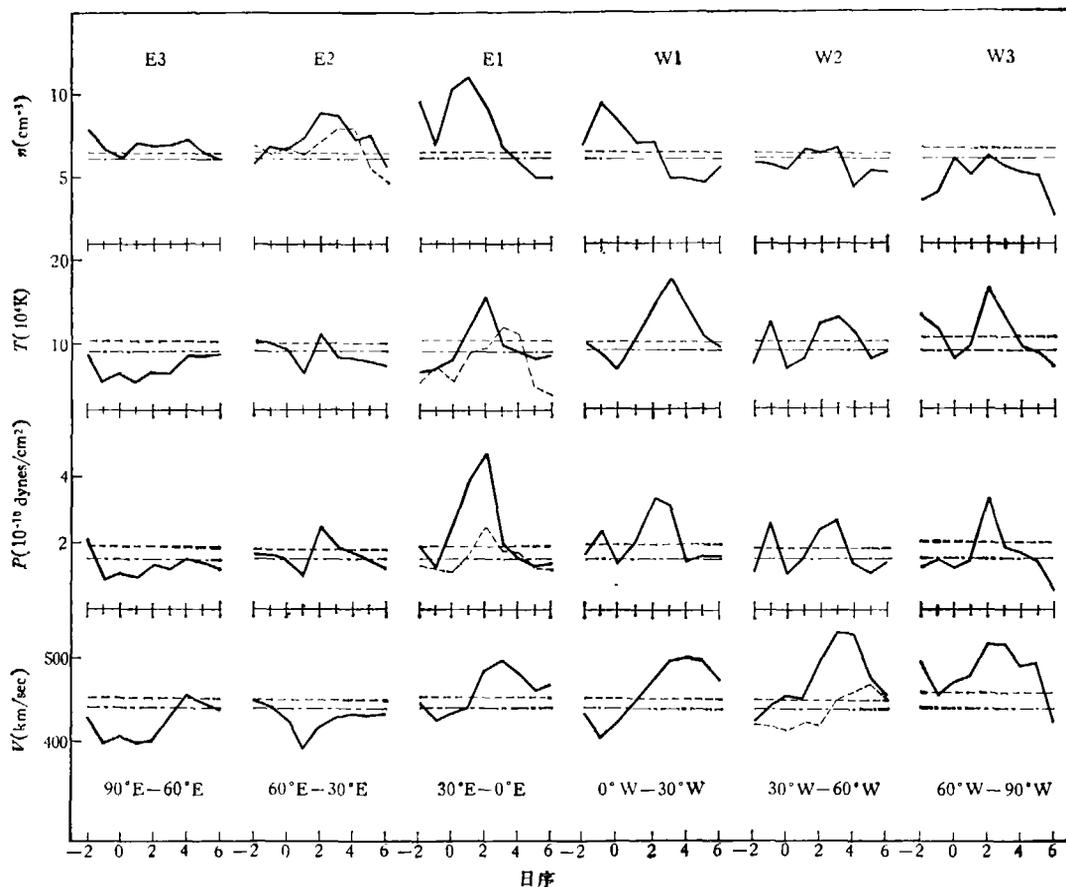


图 4 太阳耀斑所引起的太阳风密度 (n)、温度 (T)、压力 (P) 和速度 (V) 扰动的东西不对称性

以上这几种参数变化的东西不对称性是如此明显，以致在非主要耀斑的统计曲线中也有反映。尽管总的说来，非主要耀斑并无明显的统计扰动效应，但当它们发生在某些有利位置时，仍能引起显著的日球扰动变化。图 4 中用虚折线画出这种非主要耀斑的效应。当非主要耀斑

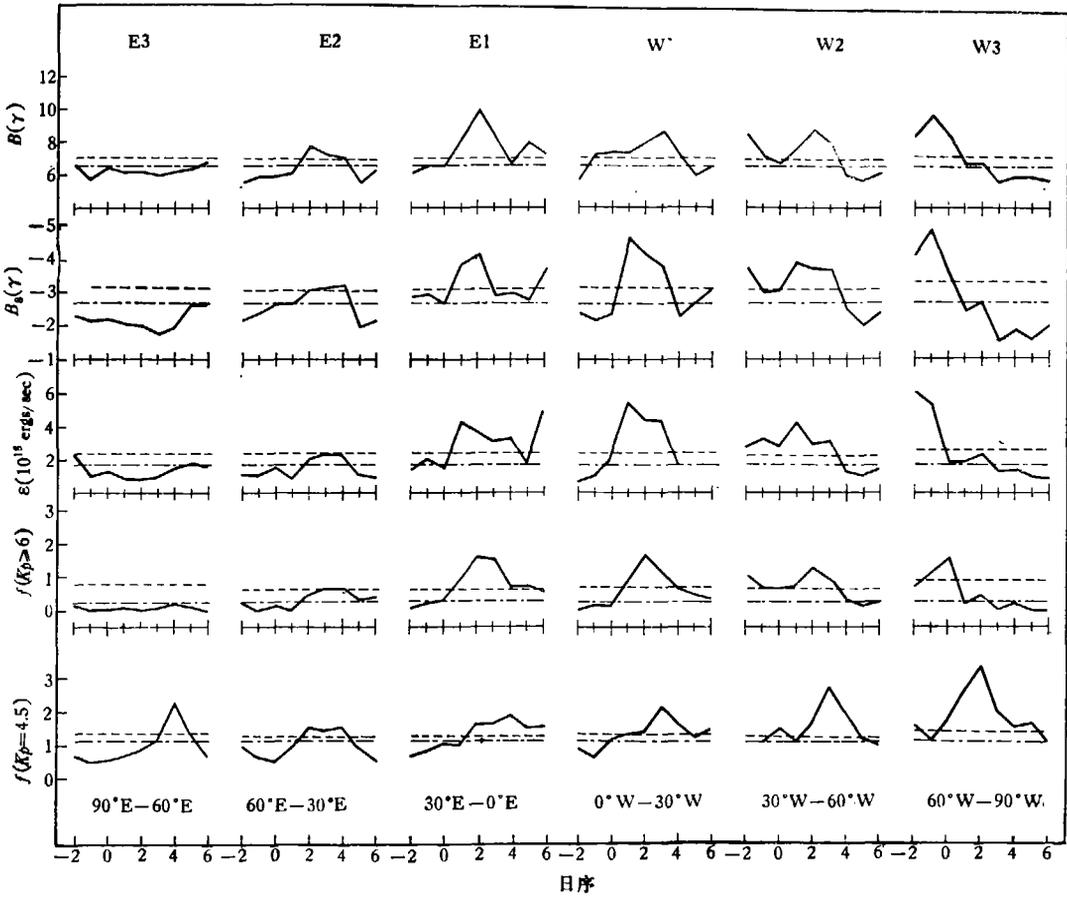


图5 太阳耀斑所引起的行星际磁场(B)及其南向分量(B_s)、太阳风-磁层能量耦合函数(ϵ)和地磁 Kp 指数频次 [$f(Kp \geq 4, 5)$, $f(Kp \geq 6)$] 扰动的东西不对称性

发生在 E2, E1 和 W2 这三个位置时,它们也分别会引起太阳风密度、温度和压力以及速度的显著扰动。

行星际磁场扰动的中心子午线效应是非常明显的,耀斑在 E1 位置时所引起的磁场强度扰动为最大;但是它又有明显的东西不对称性,W2 位置的曲线峰值与 W1 位置的相接近,均远强于 E2 位置的峰。磁场南向分量的变化并不与总强度完全相同,峰值有提前出现的趋势,以耀斑在 W1 位置曲线峰值为最高,东西不对称性更为突出。到了 W3 位置,耀斑发生后行星际磁场总强度和南向分量似都有减弱的趋势,至少是并无明显的增强效应。这种情况与太阳风速、温度和压力的变化是完全不同的。由于强活动区往往是接连发生耀斑的,在 W3 位置发生耀斑以前可能在同一活动区内发生过另一主要耀斑。这一前导耀斑的位置处在 W1 或 W2 区,它引起的行星际磁场变化会是很大的。因此 W3 位置的统计曲线峰值出现在耀斑以前是可以理解的。这正说明在此位置的耀斑引起的磁场增强远小于 W1 或 W2 位置耀斑的效应。有趣的是这一特性与地磁 $Kp \geq 6$ 强扰动的频次、 Ap , Dst 指数的变化是相似的^[3]。这也是值得我们注意的。

太阳耀斑引起的日球扰动的上述东西不对称性,反映了耀斑高速流和激波的复杂的方位

角分布特性。当激波传播方向与行星际磁场夹角较大时,它所引起的密度、压力和磁场强度变化最大,因此在 E1 位置的这些参量变化曲线峰值也最高。磁场南向分量的变化则可能与在快激波后出现的张力旋转波有关^[2,14]。在西边缘位置的耀斑为什么会有如此强的太阳风速、温度和压力效应而不引起显著的磁场变化,则可能是由于耀斑激波接近于平行于行星际螺旋磁场传播的缘故。这时激波可能是不引起磁场变化的普通气体激波^[15]。另外,是否存在某种机制,使耀斑活动所激发的某些等离子体波动沿行星际磁力线加热或加速背景太阳风,这也是值得探讨的问题。

四、关于日球和地球扰动的相关

现在讨论太阳耀斑引起的太阳风-磁层能量耦合函数 ϵ 和地磁扰动 Kp 指数频次的变化。 ϵ 函数包括了太阳风速度 V 和行星际磁场这两方面的因素。由于 ϵ 参数有量级的变化,因此统计曲线实际上反映了强扰动的特点。比较图 2 和图 3 可以看到:无论是从亮耀斑曲线的变化趋势,尤其是峰值的分布来看,或者是从亮耀斑与非亮耀斑曲线的比较来看, ϵ 函数的曲线与行星际磁场,尤其是南向分量强度的变化曲线是相似的,但并不与太阳风速的曲线相似。从图 4 和图 5 不同位置耀斑引起的变化曲线中,也可以看到这种特性。因此 ϵ 函数的强扰动取决定作用的是行星际磁场强度,尤其是南向分量的强度,而不是太阳风速度。

关于地磁扰动,我们只考虑 Kp 指数频次的变化,并且分为 $Kp \geq 6$ 级的强扰动和 $Kp=4, 5$ 级的中等扰动这两种等级,分别统计它们的每日出现频次 f 。从图 2 和图 3 可以看到强扰动和中等扰动所对应的行星际扰动特性是不尽相同的。强扰动主要是由主要耀斑中的亮耀斑所引起的,而非亮耀斑引起这种扰动的几率是很小的;它的传播速度也比较快,峰值出现在耀斑后的第 2 天。这些特性都与行星际磁场的变化特性相象,但不同于太阳风速度的变化。从图 4 和图 5 所画的不同位置的耀斑曲线来看,强扰动的曲线有明显的与中心子午线效应相联系的东西不对称性,这一点也是与行星际磁场的变化曲线相类似。但与太阳风速度的变化有所不同。对图 4 和图 5 中的资料进行相关分析表明, $Kp \geq 6$ 级的地磁扰动的出现频次,与行星际磁场总强度 B 的相关系数高达 0.97,但与太阳风速度 V 的相关系数则只有 0.64。因此可以认为 $Kp \geq 6$ 级的地磁强扰动主要是行星际磁场强度增强所引起的。

$Kp = 4, 5$ 级的中等扰动则具有完全不同的相关关系。亮耀斑和非亮耀斑几乎有相同的几率能引起这种中等扰动;它的传播速度比较慢,峰值出现在耀斑后的第 3 至第 4 天。这些特性都与太阳风速度的变化特性相象,但不同于行星际磁场的变化。从不同位置耀斑的曲线来看,中等扰动的变化与太阳风速度的变化相象,都具有非常明显的随耀斑位置自东至西逐渐增强的东西不对称性,而与具有中心子午线效应的行星际磁场变化特性完全不同。相关分析表明, $Kp = 4, 5$ 级地磁扰动的出现频次与太阳风速度 V 的相关系数高达 0.92,但与行星际磁场的相关系数则低至 0.44。因此可以认为, $Kp = 4, 5$ 级的地磁中等扰动主要是太阳风速增高所引起的。

五、结 论

归纳本文以及我们其他工作的结果,可以对太阳耀斑引起的日球和地球磁场扰动作出如下结论:

(1) 耀斑的持续时间和等级是决定其所引起的日球和地磁扰动强度的重要特征。一般说来,只有 3 级耀斑和持续时间在 1.5 小时以上的 2 级耀斑,才能引起显著的日球和地磁扰动效应;在这些有显著扰动效应的主要耀斑中,亮耀斑的效应要比非亮耀斑强,尤其是两者所引起的行星际磁场强度、 ϵ 参数以及 $Kp \geq 6$ 级的强地磁扰动的强度差别更为悬殊。

(2) 耀斑引起的 1A. U. 处的日球扰动有非常明显的东西不对称性。当耀斑发生在日面东部时,它所引起的太阳风密度变化最大,而太阳风速度则有随耀斑位置自东至西逐渐增高的规律性。温度和压力的变化介于上述两种情况之间。地磁 AE 指数和 $Kp = 4, 5$ 级的中等扰动变化与太阳风速的变化是相似的。

(3) 行星际磁场总强度、南向分量以及 ϵ 指数的变化则以当耀斑发生在日面中心子午线附近及其偏西区域 ($30^\circ E - 60^\circ W$) 时引起的扰动为最大。这种特性与地磁 Dst , Ap 指数以及 $Kp \geq 6$ 级的强扰动分布与中心子午线效应相联系的东西不对称性效应相一致。

(4) 太阳风与磁层的相互作用可能有两种主要的方式:

第一类相互作用主要是太阳风速度增高所引起的。如果行星际磁场,尤其是南向分量并不强,它只引起 $Kp = 4, 5$ 级的中等扰动。

第二类相互作用主要是行星际磁场,尤其是南向分量增强所引起的。如同时太阳风速也相当高,则有可能引起 $Kp \geq 6$ 级的强扰动。

致谢:本文承 NASA 的 J. I. Vette 先生和刘振兴同志赠送宝贵的行星际资料。在资料分析过程中,中国空间技术研究院计算站,尤其是穿孔组的许多同志付出了大量辛勤的劳动。同时也得到杨蕙芬、徐元芳等同志多方面的帮助,作者在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 章公亮,地球物理学报, **12**(1963), 32.
- [2] 章公亮等,同上, **25**(1982), 11.
- [3] 章公亮,陆晨,空间科学学报, **3**(1983), 66.
- [4] Akasofu, S. I., *Space Sci. Rev.*, **28**(1981), 121.
- [5] 章公亮,孙玉莲,空间物理论文集,科学出版社,1980, 103.
- [6] *Quartely Bulletin Solar Activity*, 1966—1978. I. A. U.
- [7] *Solar Geophysical Data*, 1966—1978, WDC-A-STP, NOAA, Boulder, Colorado, U. S. A.
- [8] King, J. H., *Interplanetary Data Book*, NSSDC/WDC-A-R & S, 77—04, 1977.
- [9] ———— *ibid.*, NSSDC/WDC-A-R & S, 79—08, 1979.
- [10] 薛顺生等,太阳耀斑引起的宇宙线强度下降(待发表).
- [11] 魏奉思,地球物理学报, **23**(1980), 1.
- [12] 魏奉思、严健萍,全国空间物理学术会议文集(1979), 科学出版社, 1982.
- [13] D'Uston, C., et al., *Journ. Geophys. Res.*, **86** (1981), 525.
- [14] Burlaga, L. F., Klein, L., *Magnetic Clouds in the Solar Wind*, NASA, TM-80668, 1980.
- [15] 章公亮、蒋和荣,空间科学学报, **2**(1982), 281.