

1994年2月21日行星际激波引起的磁暴^{*}

刘绍亮^{1,2} 郭建广¹ 宗秋刚² B.Wilken² 傅绥燕³

¹(中国科学技术大学地球和空间科学系 合肥 230026)

²(Max-Planck-Institute for Aeronomy, Katlenburg-Lindau, Germany)

³(北京大学地球物理系)

摘 要

利用 Imp-8, Geotail 和 Goes-6 等卫星资料, 研究了 1994 年 2 月 21 日 0900 UT 到达地球磁层的行星际激波引起的磁暴期间, 从太阳风向磁层传输能量的有关问题. 结果指出: (1) 南向行星际磁场 (IMF) 的长持续时间不是太阳风向磁层输能的必要条件. 南北振荡的, 较强 IMF 也能产生显著的能量传输; (2) 行星际扰动磁场通过弓激波和磁层顶后扰动磁能增加, 增幅将近 5 倍; (3) 在磁层内扰动磁场的 B_z 分量在 1×10^{-4} Hz 附近显著被吸收. 这一低频扰动磁场可能是磁暴期间导致氧离子和质子等环电流粒子向内扩散并被加速的原因之一.

关键词 行星际激波—磁暴—环电流—功率谱

1 引言

目前多数研究者认为持续较长时间的南向行星际磁场 (IMF) 的 B_z 分量扫过地球时, 相应的晨昏电场是引起地球磁暴的主要原因. Russell 等^[1] 研究了中等强度磁暴 ($-100 \text{ nT} < Dst_{\min} \leq -50 \text{ nT}$) 对应的行星际特征指出, 在行星际磁场的南北分量 $B_z \leq -5 \text{ nT}$, 持续时间 $\Delta t \geq 2 \text{ h}$ 条件下会引发中等磁暴. Gonzalez 等^[2] 对 1978 至 1979 年期间 10 个强磁暴 ($Dst_{\min} \leq -100 \text{ nT}$) 的分析指出, 相应 IMF 的特征是: 持续时间 $\Delta t \geq 3 \text{ h}$, 南北分量磁场强度 $B_z < -10 \text{ nT}$. 关于磁暴期间磁层环电流增强的原因大多认为是: 南向 IMF 在磁层向阳侧磁顶处和地球磁场发生重联, 后随太阳风对流至磁尾, 使尾瓣磁能增加. 在某种条件下近地磁尾会发生磁重联, 在重联区附近被加速的粒子进入内磁层. 这些被加速的粒子围绕地球漂移形成西向环电流, 导致地面磁场水平分量明显下降, 形成磁暴. 近期 Fu 等^[3] 利用 CRRES/MICS 的观测数据分析指出, 磁暴期间观测到 O^+ 通量密度最大值在磁暴急始后从磁层的大 L 值处移向小 L 值处 (L 从 6 到 3), 随后在恢复相再移向外层 ($L = 4-5$). 观测指出它们是磁暴主相环电流的重要成分, 在磁暴主相最大时所占比例可高达 50%, 特别是在强磁暴主相最大期间 O^+ 常常是环电流的主要成份. 该文认为这些 O^+ 应是起源于电离层. 关于磁暴期间这些氧离子由大 L 向小 L 的传输, 以及粒子能量增加的机制, 目前尚无完善的解释. 本文将从分析观测证据的角度出发, 对太阳风向磁层传输能量两方面的问题分别予以讨论: 一方面分析能够引起磁暴的南向 IMF 特

^{*} 国家自然科学基金 (49874035, 49834040) 和中国科学技术大学创新工程研究基金共同资助项目
2001-08-10 收到原稿, 2002-05-20 收到修定稿

征, 即南向 IMF 事件的长持续时间条件是否必需; 另一方面对 O^+ 向内扩散和增能的机制提出一种可能的解释.

2 事件描述与分析

1994 年 2 月 21 日 0903 UT 一个强行星际激波扫过 Geotail, 当时该飞船正处于地球磁层黄昏侧行星际空间, 其 GSE 坐标为 $(x, y, z)_{\text{GSE}} = (-26.9, 60.8, -2.3)$ Re. 这一激波也被处于弓激波上游的 Imp-8 飞船和磁层中同步轨道上的几颗卫星记录到. 激波到达时, 有关飞船和卫星所在位置示于图 1, 图中表示飞船在黄道面上投影的 GSE 坐标. 这一激波联系着 1994 年 2 月 20 日 0138 UT 发生在日面坐标 $(9^\circ\text{N}, 2^\circ\text{W})$ 上的 3B 级 $H\alpha$ 耀斑, 其软 X 射线强度为 M4.0. 从耀斑发生到飞船检测到激波约 30.4 h, 据此估计激波从太阳传播到地球磁层的平均速度为 1370 km/s. 飞船 Geotail 和 Imp-8 记录到的激波上下游等离子体参数和磁场各分量的起伏变化分别示于图 2(a),(b), 图中数据为 1 min 平均值, 从上向下分别为太阳风流速 v 、数密度 n 、温度 T 和磁场在 GSM 坐标系中的三个分量, 最下面两幅给出同一时间地磁活动指数 Dst 和 AE 的时均值变化, 横坐标是 2 月的日期.

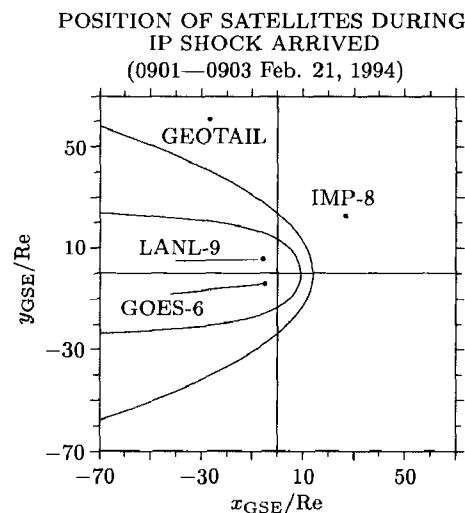


图 1 激波到达时飞船在黄道面 GSE 坐标系上的投影

Fig.1 The ecliptic plane projection (in GSE) of the position for Geotail, Imp-8, Goes-6 and Lanl-9 when the shock arrived at these spacecrafts

由于 Imp-8 资料缺失较多, 图 2(a) 中未给出该飞船的温度变化曲线, 图中 B_T 表示总磁场强度. 图 2 中垂直实线示出激波到达时刻. 图 2(b) 中的 Dst^* 指数是 Dst 经过动压 P_k 修正后的值. 动压修正公式采用 Burton 等^[4] 给出的经验关系

$$Dst^* = Dst - bP_k^{1/2} + c, \quad (1)$$

式中 b, c 分别由下述经验关系给出, $b = 0.20 \text{ nT}(\text{eV} \cdot \text{cm}^{-3})^{-1/2}$, $c = 20 \text{ nT}$. 由图 2 可见激波下游行星际磁场 B_z 分量并未出现长持续南向结构, 在 21 日 0900—2100 UT 间 B_z 南

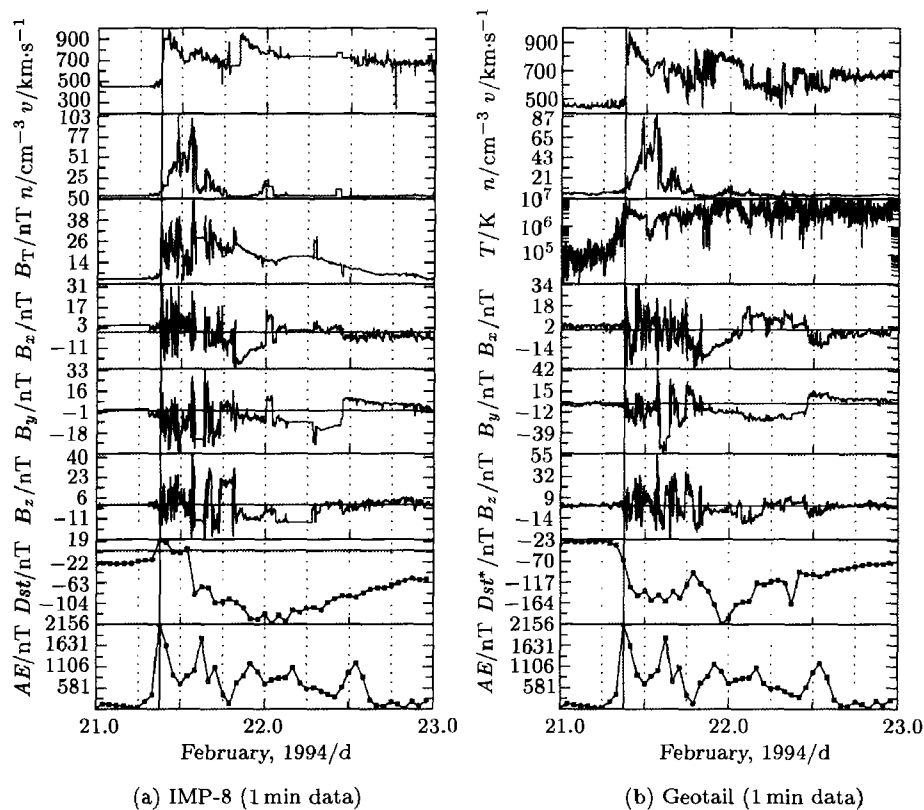


图 2 1994 年 2 月 21 和 22 日飞船太阳风记录和相应期间地磁指数 Dst 和 AE 的变化
(a) Imp-8 飞船; (b) Geotail 飞船

Fig.2 Solar wind parameters of two spacecrafts and the magnetic index Dst , AE on February 21 and 22, 1994. (a) for Imp-8; (b) for Geotail

向持续最长仅 17 min. IMF B_z 分量的主要特征是南北方向大幅度地振荡. 与此同时 Dst 指数显著下降, 最低值超过 -100 nT, 同时 AE 指数也出现明显的扰动, 表明产生了强的地磁暴. 激波到达磁层后在磁层内也引起各种复杂的扰动. 图 3 给出同步轨道卫星 Goes-6 记录到的激波到达前后磁场的扰动. 图中 H_p 、 H_e 和 H_n 分别表示磁场的向北、向地球和向东方向各分量, B_T 为磁场的总强度, 横坐标是该月日期. 由图可见在磁场大幅度起伏上叠加了许多小幅扰动, 这些小幅扰动大约持续了一天多一点的时间. 磁场的大幅度起伏是由于在同步轨道上, 地磁场的非轴对称分布引起. 那些叠加的小扰动看来是因激波下游 IMF 的扰动引起的. 图 4 是 Lanl-9 在地球同步轨道上记录到的质子 (50—400 keV) 和电子 (50—225 keV) 能通量在激波到达前后的变化, 图中 F_p 和 F_e 分别表示质子和电子的通量, 横坐标的上边给出地方时 LT 下边是世界时 UT. 由图可见激波到达磁层后高能量的质子和电子的通量都有明显的上升. 上述观测事实表明这个行星际激波和磁层的相互作用引起明显的能量传输. 为了进一步阐明激波下游 IMF 的扰动特征, 表 1 中给出 Geotail 和 Imp-8 在 2 月 21 日 0700 至 1700 UT 磁场起伏的平均性质. 表中分别给出两个飞船在上述 10 h 内 B_z 为正和负值的累加及相应的记录时间, 并由此求得它们各自的平均值. 可

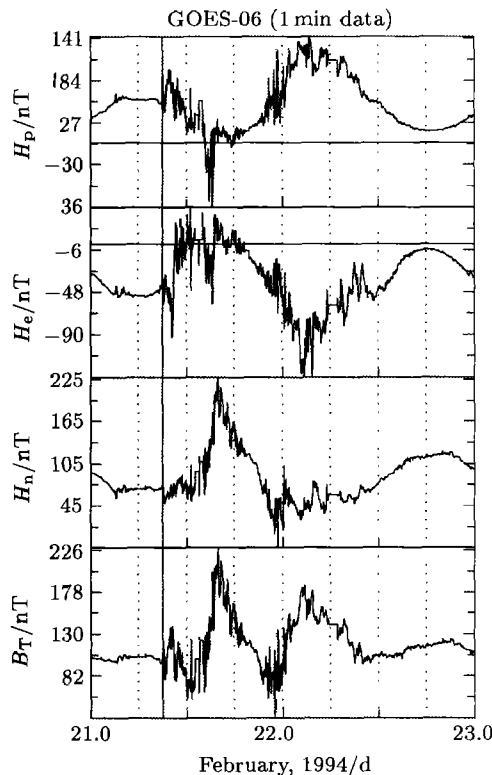


图3 Goes-6记录到的1994年2月21和22日地球同步轨道处磁场的变化

Fig.3 Geostationary magnetic field observations from Goes-6 on 21 to 22, February 1994

以看出两飞船的记录都是正 B_z 的平均值大于负 B_z 。如果我们认为当 IMF 的 B_z 分量为负时才有能量输入磁层，而当 B_z 为正时太阳风能量停止向磁层输入，那么在上述扰动特征磁场作用下也有显著能量输入的事实表明，太阳风向磁层输入能量的速率要比磁层内能量耗散的速率快得多，因而在有一有限时段内只要有足够多次的 B_z 南向摆动，就会有显著的能量输入磁层，而不必一定有长持续的 IMF 南向事件出现。

3 磁场扰动的谱分析

除上述 IMF B_z 分量为负时可能引起太阳风向磁层输能的机制外，本节将讨论磁场扰动波谱对能量传输的贡献。早在 20 世纪 60 年代初 Kellogg^[5] 讨论地球辐射带粒子来源时就提出：辐射带是在有磁扰时，粒子第三绝热不变量被破坏而第一、二绝热不变量仍保持不变的情况下形成的。由于第三绝热不变量被破坏，粒子可横越 L 壳运动，由外磁层向内磁层扩散。又因第一、二绝热量保持不变，使粒子在靠近地球时能量增加，并

认为这一增能过程在不是十分靠近地球时要比大气吸收和散射过程快得多。之后 Nakada 等^{[6],[7]}、Dungey 等^[8] 和 Falthammar^[9] 在上述物理模型设想下，利用 Fokker-Planck 方程讨论了质子的 L 扩散，表明在一定频率扰动场作用下粒子会从外磁层向内扩散，同时能量得到加强。为了解本文激波下游扰动磁场对磁层的作用，首先求出 Geotail 和 Goes-6 两颗卫星 0900—2100 UT 这段时间磁场扰动的功率谱。由于 Imp-8 资料缺失较多，未做谱分析。根据 Richardson 等^[10] 的研究 Imp-8 和 Geotail 两飞船相距在相关尺度范围内，它们记录到的扰动是类似的，这点也可从图 2 看出。因而我们可以认为 Geotail 的记录即可代表整个对磁层产生影响的扰动。由于所用资料是 1 分钟平均值，根据 Nyquist 抽样频率要求本文研究的频率上限取为 0.0083 Hz。对于资料中缺失的数据，谱分析时采用样条插值处理。为了解磁扰从行星际经磁鞘进入磁层的变化，图 5 给出磁场各分量及总磁场功率谱经弓激波和磁层顶后的变化。为了便于比较，图中各点分别取各频率区间 $\Delta f = 0.001$ Hz 内的求和值。第一区间从 $f > 4.63 \times 10^{-5}$ Hz(约 1/6 h) 起算是为了消除磁层内非轴对称场的影响。图中以 P 表示功率谱，下脚标分别示出对应的磁场分量。由图 5 可以看出 Goes-6 各分量功率谱相对 Geotail 基本上是增加的。从总磁场强度可以更清楚看出 Goes-6 的功率谱有明显的增加。为了对功率谱变化有一总体上的了解，表 2 给出频率低于 0.0083 Hz 两个频段的功率谱积分值。采用这样的频段划分是因为在 0.001 Hz 以下功率谱变化较大，而

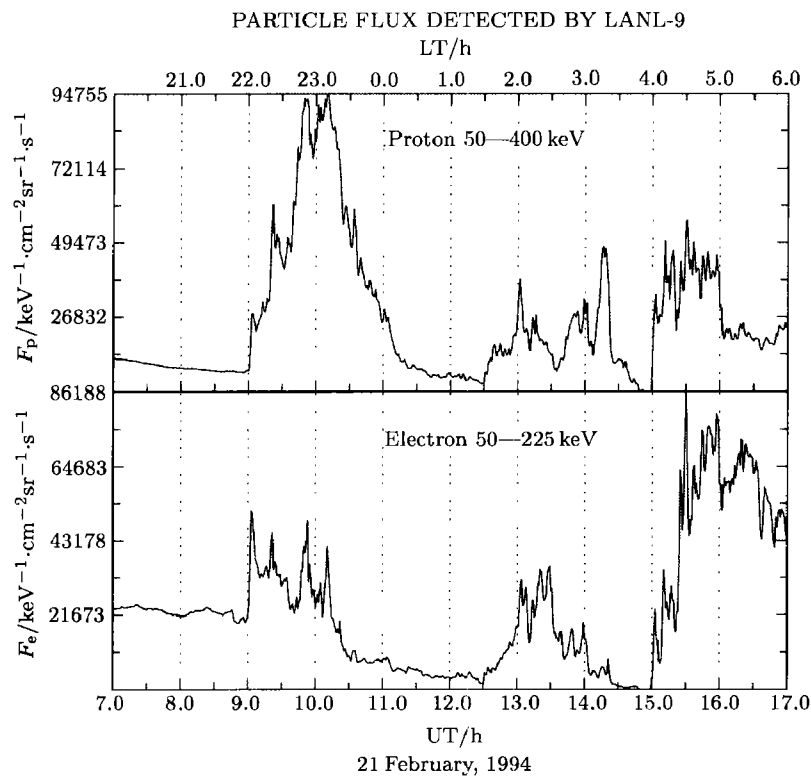


图 4 Lanl-9 于 1994 年 2 月 21 日在地球同步轨道处记录到的电子和质子能通量的变化
Fig.4 Geostationary electron and proton observations from Lanl-9 for February 21, 07 to 17 UT

表 1 激波下游磁场的起伏特征			表 2 Geotail 和 Goes-6 磁扰功率谱积分				
Tab. 1 Fluctuation character of IMF in the shock downstream			Tab. 2 The power spectra integration for Geotail and Goes-6				
	Geotail	Imp-8	Geotail		Goes-6		
			Δf_L	Δf_H	Δf_L	Δf_H	
$\Sigma + B_z(\text{min} \cdot \text{nT})$	3844.0	2832.4	$\Sigma P(f) _{B_X}$	0.138	0.044	0.569	0.081
有效记录时间 (min)	318	296		0.524	0.052	1.071	0.084
$\Sigma - B_z(\text{min} \cdot \text{nT})$	-1915.1	-1578.3		0.693	0.065	0.520	0.093
有效记录时间 (min)	192	197		0.170	0.021	0.964	0.123
平均 $+B_z$ (nT)	12.09	9.57					
平均 $-B_z$ (nT)	-9.97	-8.01					

* 表中 $\Delta f_L = 6.51 \times 10^{-5} \text{ Hz} - 1.00 \times 10^{-3} \text{ Hz}$,
 $\Delta f_H = 1.00 \times 10^{-3} \text{ Hz} - 8.33 \times 10^{-3} \text{ Hz}$

在较高频段变化较为平稳, 此点可在图 6 中看出. 由表 2 可见在小于 0.0083 Hz 频率范围内, 磁扰各分量从行星际进入磁层 (除 B_z 分量外), 其功率谱积分值是增加的. 也即磁扰经弓激波和磁层顶后会明显增强. 都亨等^[11]曾计算得出行星际起伏跨越弓激波后起伏幅度会增加的结论. 磁场扰动能量的增长是因太阳风或行星际激波与弓激波和磁层顶相互作用过程中, 使部份动能转化为磁场扰动能量的结果. 从总磁场强度功率谱的变化可以估算出经弓激波和磁层顶后扰动幅度增加到将近原来的 5 倍. 但有一例外, 即 L 频段磁场的 B_z 分量在磁层内反而减小, 其原因我们将在以后说明. 为了进一步分析磁扰各分量经

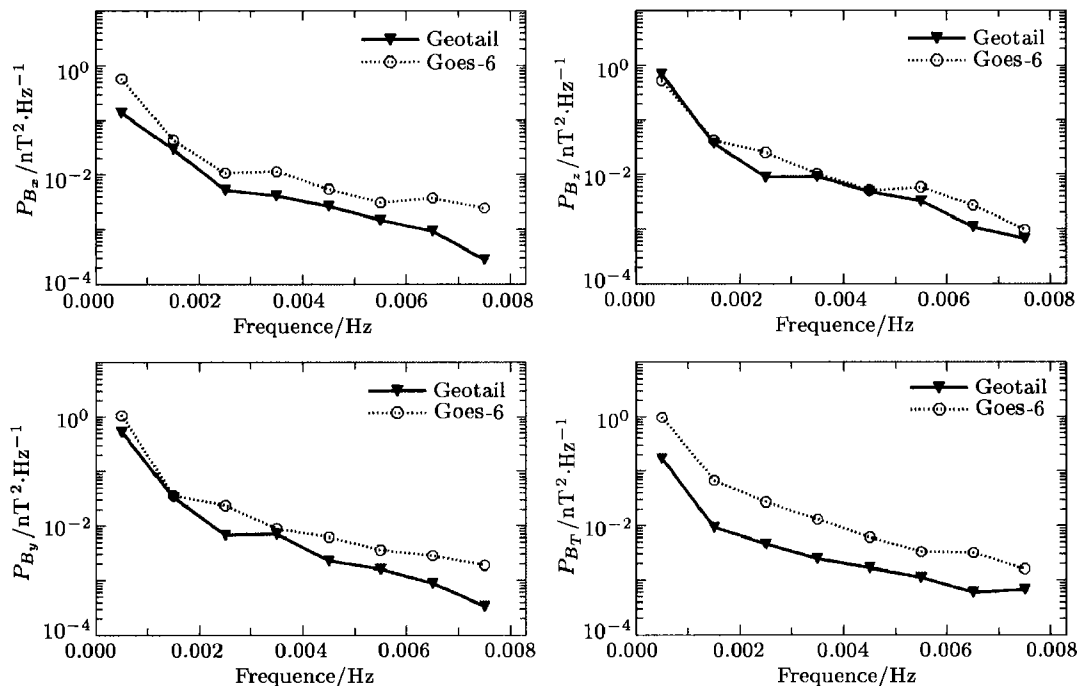


图5 飞船 Geotail 和同步卫星 Goes-6 磁场记录功率谱的比较

Fig.5 Comparison of magnetic field power spectra for Geotail and Goes-6

弓激波和磁层顶后的变化, 以 Goes-6 的功率谱减去相应频率 Geotail 的功率谱, 来表示磁扰强度经弓激波和磁层顶后的变化. 若某一频率的功率增大, 则差值为正, 减后的曲线会出现正的峰值, 反之则出现负峰. 如果该频率功率没有明显变化, 则差值相对会很小, 减后曲线趋近零值. 用磁层内外磁扰功率谱的差来表示磁扰经过弓激波和磁层顶后的变化. 结果示于图 6, 图中纵坐标是两卫星功率谱的差, 即以 Goes-6 卫星记录的功率谱减去相应频率 Geotail 飞船的功率谱. 图中用 ΔP 来表示, 下脚标分别对应不同的磁场分量. 由于 $f > 0.002 \text{ Hz}$ 以后, 所有分量差值的幅度都小于 0.01, 为了更好显示低频部分的变化, 图中曲线仅画至 0.002 Hz. 由图 6 可见经弓激波和磁层顶后在 0.0005 Hz 以下的低频端功率谱有较显著的变化. 其中各分量极低频处的增大是因磁层内同步卫星磁场记录的大幅度起伏 (见图 3) 引起. 特别值得关注的是 B_z 分量功率谱差在约 $f = 1 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ 附近曲线出现一明显的低谷, 表明进入磁层后在这一频率附近波能被明显吸收. 同时这一谷的出现也解释了前面提到的, 表 2 中 Goes-6 卫星 B_z 分量功率谱积分值反比 Geotail 飞船小的原因. 下面我们再对这一吸收谷的意义作进一步的说明. 本节开始已提到, 磁层内一定的扰动磁场会导致粒子向磁层内扩散, 条件是这种扰动会破坏粒子在磁层中运动的第三绝热不变量, 而又能保持它们的第 1,2 绝热量不变. 我们取粒子赤道投掷为 45° , 计算粒子在 $L = 6$ 处绕地球的漂移频率, 结果指出能量为 50 keV 的粒子的漂移频率在 $1 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ 附近. 对更大的 L 处具有相应漂移频率粒子的能量还会更低. 而这一能量范围的粒子正是环电流的主要成分. 此外 Nakada 等^[6] 还提到, 粒子在 L 空间运动的速度正比于电场与磁场的矢量积, 而 B_z 分量的扰动会提供最大的方位扰动电场, 非常有利于粒子的向内扩散. 由观测知道许多引起磁暴的行星际事件, 都伴随着 IMF 显著的扰动, 因而我们可

以合理地认为, Fu 等^[3]观测到磁暴期间环电流粒子向磁层低高度转移的现象正是这些扰动磁场作用的结果. 最后, 由本文资料分析和图 5 可以看出, IMF 功率谱的幂率特性在穿过弓激波和磁层顶后基本保持不变, 这和近期 Takalo 等^[12]的研究结果, 认为磁层类似一低通滤波器的结论是一致的.

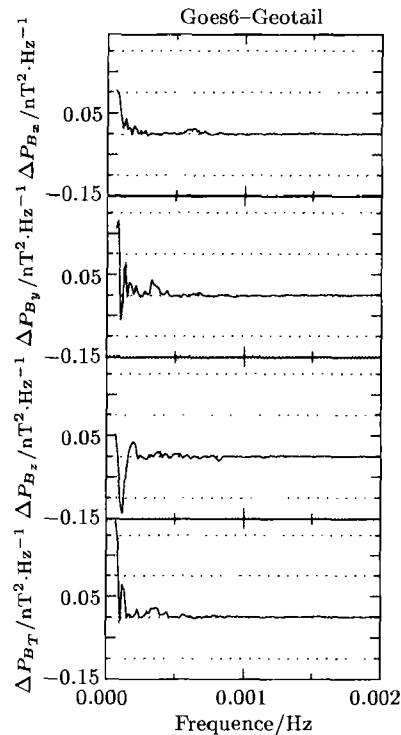


图 6 Goes-6 和 Geotail 飞船磁扰记录功率谱的差值

Fig.6 The difference of magnetic fluctuation power spectra for Goes-6 minus Geotail

4 讨论

本文研究的行星际激波的特点是其下游不存在长持续南向 IMF 事件, 但仍引起一强磁暴. 这一观测事实表明南向 IMF 事件长持续的特征并非引起磁暴的必备条件, 足够长时间和幅度足够大的南北起伏的 IMF 也可引起足够强的磁暴. 如果认为 IMF 南向时太阳风向磁层输入能量, 而当 IMF 转向北时输能停止, 则本文的观测表明: 太阳风向磁层注入能量的速率远远高于能量在磁层内耗散的速率. 其次对激波下游扰动磁场的谱分析可以看出, 在本文研究的频率范围内, 磁扰经弓激波和磁层顶后扰动功率谱总体上增强. 放大后的 IMF 磁扰进入磁层后 B_z 分量在 $f = 1 \times 10^{-4}$ Hz 附近出现明显的吸收谷, 这一频率处于某些磁暴环电流粒子第三绝热运动频率范围. 因而我们推测处于这一频率附近的扰动磁场会破坏某些粒子的第三绝热周期运动, 并导致粒子向内扩散. 又因这一频率较粒子镜点振荡和磁旋频率低得多, 粒子的第 1,2 绝热不变量得以保持, 使得粒子在向内扩散的过程中被加速. 用这一物理过程可部分说明 Fu 等^[3]的观测事实.

参考文献

- [1] Russel C T, McPherron R L, Burton R K. On the cause of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(7):1105—1109
- [2] Gonzalez W D, Tsurutani B T, Gonzalez A L C, Smith E J, Tang F, Akasofu S -I. Solar wind-magnetosphere coupling during intense magnetic storms (1978—1979). *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(A7): 8835—8851
- [3] Fu S Y, Pu Z Y, Zong Q G, Xiao C J, Xie L, Wilken B. Ion composition variations in the ring current during intense magnetic storms and their relationship with evolution of storms. *Chin. J. Geophys.*, 2001, **44**(1):1—11. in Chinese (傅绥燕, 濮祖荫, 宗秋刚, 肖池阶, 谢伦, B. Wilken. 大磁暴中环电流离子成分的变化及其与磁暴演化的关系. 地球物理学报, 2001, **44**(1):1—11)
- [4] Burton, R K, Mcpherron R L, Russell C T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**(31):4204—4214
- [5] Kellogg P J. Van Allen radiation of solar origin. *Nature*, 1959, **183**:1295—1297
- [6] Nakada M P, Dungey J W, Hess W N. On the origin of outer-belt protons, 1. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**(15):3529—3532
- [7] Nakada M P, Mead G D. Diffusion of protons in the outer radiation belt. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**(19):4777—4791
- [8] Dungey J W. Effects of electromagnetic perturbations on particles trapped in the radiation belts. *Space Sci. Rev.*, 1965, 199—222
- [9] Falthammar C G. On the transport of trapped particles in the outer magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**(5):1487—1491
- [10] Richardson J D, Paularena K I. Plasma and magnetic field correlations in the solar wind. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A1):239—251
- [11] Du H, Wei F S, Whang Y C. Transport of the interplanetary fluctuation to the magnetopause. *Chin. J. Space Sci.*, 1988, **8**(1):26—34. in Chinese (都亨, 魏奉思, 黄云潮. 行星际起伏向磁层顶的输运. 空间科学学报, 1988, **8**(1):26—34)
- [12] Takalo J, Mursula K. Role of the driver in the dynamics of a coupled-map model of the magnetotail: Does the magnetosphere act as a low-pass filter. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A12):27 665—27 672

THE MAGNETIC STORM RESULTED FROM THE INTERPLANETARY SHOCK OF FEBRUARY 21, 1994

LIU Shaoliang^{1,2} GUO Jianguang¹ ZONG Qiugang² B. Wilken² FU Suiyan³

¹(Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

²(Max-Planck-Institute for Aeronomy, Katlenburg-Lindau, Germany)

³(Geophysics Department, Peking University)

Abstract

On February 21, 1994, at 0903 UT a strong interplanetary shock crossed the Geotail spacecraft while it is at $(x, y, z)_{\text{GSE}} = (-26.9, 60.8, -2.3)$ Re. The shock has

also been observed or detected its effect by other satellites such as Imp-8, Goes-6, Goes-7 and Lanl successively. This shock resulted in magnetic index Dst dropped down to lower than -100 nT and AE shows an explicit increase. At the same time the geomagnetic field fluctuated intensively, the flux increased of various energetic particles at geosynchronous orbit. These means there are notable energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. Gonzalez *et al.* pointed out the IMF B_z component should be lower than -10 nT and its duration longer than 3 hours for a strong magnetic storm, of which, Dst index lower than -100 nT, but the character of the shock studied in this paper is that there have no long duration of IMF southward B_z event but only large amplitude fluctuation northward and southward in the downstream of the shock, furthermore the enhanced value and average value for the $-B_z$ is lower than that for the $+B_z$. If we think that the energy transfer from the solar wind into the magnetosphere take place only during IMF B_z component is negative, then this means the rate of energy transferred into ring current is far quicker than the dissipation of the ring current. This result shows that the duration time of southward IMF is not the essential condition for energy transfer from solar wind into the magnetosphere, if the southward IMF has large amplitude and short time-duration, but repeated many times there may be accumulated notable energy in the ring current owing to the rate of ring current dissipation is very slow relative to the rate of energy pouring into the ring current. In addition, for above result we have analyzed the power spectrum property of the magnetic field, it is shown that the disturbance magnetic energy enhanced near five times after the disturbance field crosses the bow shock and the magnetopause. Nakada *et al.* pointed out that disturbance field in magnetosphere which frequency is in some band would destroy the third adiabatic invariant for some particles but maintain the first and second invariants of them, these particles will spread inward and get energy in this process. The spectrum analysis in this paper shows that the B_z component of the disturbance field in magnetosphere is absorbed notably near 1×10^{-4} Hz, we inferred that this low frequency field may be a reason which resulted in the ring current particles (such as oxygen ion, proton and so on) diffused inward and enhanced their energy, this process have been reported by Fu *et al.* by means of CRRES/MICS in 2001.

Key words Interplanetary shock, Magnetic storm, Ring current, Power spectrum