



行星际日冕物质抛射中的磁流体波动观测

李青晟, 肖池阶*, 王红刚, 陈焱高, 王晓钢

北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

*联系人, E-mail: cjxiao@pku.edu.cn

收稿日期: 2013-06-20; 接受日期: 2013-07-04

国家重点基础研究发展计划(编号: 2011CB811404)和国家自然科学基金(批准号: 41274168, 11005015, 41104112, 11261140326)资助项目

摘要 日冕物质抛射(CME)是最大尺度的太阳活动现象, 灾害性空间天气的主要驱动源. 行星际日冕物质抛射(ICME)中的等离子体波动性质与 ICME 的演化密切相关. 由于 ICME 中的平均磁场较大, 其中的 Alfvén 低频扰动研究较少. 前人的研究只分析了 0.3AU 和 0.68AU 处的个别 ICME 中的 Alfvén 波动. ICME 在 1AU 处的 Alfvén 波观测较少. 本文对第 23 太阳周 1995–2006 年期间所有引起大磁暴($D_{st} \leq -100$ nT)的单个 ICME 事件进行统计分析, 结果表明: (1) 大约 30% 的 ICME 中长时间存在 Alfvén 波(超过 ICME 持续时间的 30%); (2) 约一半的 ICME 的鞘层中存在快磁声波; (3) 所有 ICME 中都存在短时间的慢磁声波. 这些观测结果为研究 CME 在行星际传播过程时其中的 Alfvén 波演化机制及其动力学演化提供了观测基础.

关键词 日冕物质抛射, 磁流体力学波, 太阳风, Alfvén 波

PACS: 52.35.Bj, 96.50.Ci, 96.50.Tf, 96.50.Uv

doi: 10.1360/132013-298

1 引言

日冕物质抛射(CME)是最大尺度的太阳活动现象. CME 携带着大量等离子体粒子、动量及磁能在行星际传播时, 被称为行星际日冕物质抛射(ICME). 研究表明, ICME, 特别是在 1AU 附近经过地球时携带南向行星际磁场的 ICME, 是大磁暴、高能粒子暴等灾害性空间天气事件的主要驱动源^[1,2]. 因此, 研究 CME 在行星际的传播及演化过程, 是空间等离子体和空间天气学领域的重要研究内容.

CME 在初发过程中, 由于存在磁场重联或者灾

变等急剧变化过程, 会产生大量的低频磁流体(MHD)波动, 如 Alfvén 波、快磁声波和慢磁声波等^[3,4,5]. 一般认为, CME 在行星际传播过程中, ICME 与周围的太阳风等离子体、或 ICME 内的等离子体之间相互作用, 也可能激发 MHD 波. ICME 中从源区或行星际产生的 MHD 波耗散时可以对 ICME 加热或加速, 因此 ICME 中的 MHD 波动性质及演化与 ICME 动力学演化密切相关, 甚至有可能与 CME 在源区的初发过程有关.

尽管太阳风等离子体中的 Alfvén 波性质及其耗散衰减机制已经取得了大量研究成果, 但 ICME 中的

引用格式: 李青晟, 肖池阶, 王红刚, 等. 行星际日冕物质抛射中的磁流体波动观测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1306–1313

Li Q S, Xiao C J, Wang H G, et al. Magnetohydrodynamic waves in interplanetary coronal mass ejections near 1AU observed by WIND spacecraft (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 1306–1313, doi: 10.1360/132013-298

Alfvén 波及快、慢磁声波等 MHD 波动研究较少.

Wang 等人^[6], Liu 等人^[7]发现 ICME 在传播过程中, 质子温度的下降速度要快于绝热膨胀过程, 所以他们推测 ICME 在传播过程存在未知的能量来源及加热机制. Liu 等人^[7]推测这些能量可能来自 ICME 中的 Alfvén 波能耗散, 类似于太阳风等离子体中的 Alfvén 湍流加热过程(如 Tu 等人^[8,9]的工作等). 并指出 ICME 中的 Alfvén 波可能在 ICME 到达地球前耗散殆尽, 因此在 1AU 附近的 ICME 中难以看到 Alfvén 波.

ICME 中的 MHD 波动研究较少. 最近 Yao 等人^[10], Marsch 等人^[11]基于 Helios 卫星的观测数据, 分在 0.3AU 和 0.68AU 的两个 ICME 个例研究中证认出了 Alfvén 波, 但在 1AU 附近的 ICME 中没有发现 Alfvén 波. Liang 等人^[12]报道了在 2011 年 2 月 17–20 日期间 1AU 附近的一个 ICME 中存在明显的 Alfvén 波动. 显然需要进行系统地统计分析, 才能对 1AU 附近的 ICME 中 Alfvén 波及其他 MHD 波动准确了解, 从而有助于理解 ICME 中的加热加速过程和物理机制.

基于上述原因, 本文选择第 23 太阳周(1995–2006 年)期间, 引起大磁暴($D_{st} \leq -100$ nT)的 ICME 事件为样本, 对 1AU 附近的 ICME 中的 MHD 波动进行统计分析. 事件样本均选自 Zhang 等人^[13], 以及 Gopal-swamy 等人^[14]等文献中的列表. 为了简单起见, 我们放弃了多重 ICME 事件^[15], 只选取了全部 27 个单 ICME 事件作为样本, 基于卫星观测数据, 通过 SVD 分析^[16]得到波动色散关系的观测值, 并与等离子体波动的理论曲线进行比对; 同时对 Alfvén 相关关系、磁压强与热压强的相关关系等进行分析, 证认出 Alfvén 波、快磁声波和慢磁声波等 MHD 波模. 在第 2 节中详细介绍分析方法、典型事例及统计结果; 在第 3 节中将对统计结果进行分析讨论.

2 观测数据分析方法和结果

2.1 数据分析方法

本文测量数据来自 WIND 卫星搭载的 3-D Plasma Analyzer (3DP)和 Magnetic Field Investigate (MFI) 探测器^[17,18]. 3DP/WIND 提供 3 秒精度的质子密度、温度和速度的测量数据, 而 MFI/WIND 则提供同等精度下三维磁场和二维电场的测量数据. 利用这些数据, 我们通过计算 Alfvén 相关关系、SVD 分析等证认低频 MHD 波动.

在理想等离子体中存在三种 MHD 波动, 即慢波、快波和 Alfvén 波. 我们使用了两种方法来区分这些波动. 第一种方法是计算相关系数. 对于 Alfvén 波动的情形, 我们计算理论的 Alfvén 速度的扰动, 和实测的等离子体速度的扰动间的相关性. Alfvén 速度的扰动可以由 Alfvén 速度方程得到

$$\delta V_b = \frac{\delta B}{\sqrt{4\pi\rho}}. \quad (1)$$

其中 δB , δV_b 和 ρ 分别代表磁场的扰动, Alfvén 速度的扰动以及等离子体密度的扰动. 理论上, 在 Alfvén 波存在时, 太阳风速度的扰动与 Alfvén 速度的扰动非常接近. 实践中, 我们计算这两个扰动间的相关系数, 如果相关系数高于 0.7, 我们就认为该区间存在 Alfvén 波. 计算出的相关系数越高, 就表明该处存在 Alfvén 波的机会越大. 我们可以对每个 Alfvén 速度的分量和太阳风速度的分量都求出相应的相关系数, 因此我们得到的相关系数包括三个分量.

而对于可压缩 MHD 波模, 即慢磁声波和快磁声波, 我们则通过波动的压缩关系来初步判别. 即通过计算磁压扰动和热压扰动的相关性进行初步判别. 理论上, 对于慢波而言, 这一相关系数应该为-1; 而对于快波而言, 这一相关系数为+1. 因而如果我们观测到这一相关系数高于 0.7, 则认为此 MHD 波动为快波; 而如果低于-0.7, 则认为此 MHD 波动为慢波.

在前面相关分析的基础上, 我们进一步用 SVD 方法^[16]获得波动的色散关系, 并与理论色散关系进行详细比对, 从而确认观测到的波模性质.

根据法拉第定律, 在频率空间中, 我们可以得到一个关于波矢量 k 和磁场矢量以及电场矢量的关系式. SVD 方法可以用来分解场矩阵, 从而通过上述关系式得到 k 矢量. 因此, 我们可以得到波动的色散关系从而分析波模类型.

理想等离子体理论给出了三种 MHD 波动的色散关系:

$$\omega = V_A k \cos \theta, \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \sqrt{V_A^2 + V_S^2} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4V_A^2 V_S^2 \cos^2 \theta}{(V_A^2 + V_S^2)^2}} \right]. \quad (3)$$

这里方程(2)表示 Alfvén 波的色散关系, 而方程(3)表示快波和慢波的色散关系, 其中正号代表快波, 负号代表慢波. V_A , V_S 则表示 Alfvén 速度和离子声速. 通

过比较理论的和实测的色散关系, 我们可以很容易地判断 ICME 中的 MHD 波动类型.

值得一提的是, WIND 卫星仅仅只能提供 2D 电场的测量, 因此我们使用如下关系:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mathbf{B}, \quad (4)$$

来得到

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (5)$$

即通过测量得到的 2D 电场和 3D 磁场数据计算得出 3D 电场矢量^[16]. 这一结果是建立在磁场与电场矢量垂直的假设上的.

因为 ICME 中波动的特性会随时间发生改变, 我们采用逐段 SVD 的反演方法, 即每次选取一小段时间的数据进行 SVD 分析, 同时也使用了滤波的方法来排除极高或者极低频率的波动的影响, 这些波动的频段与 MHD 波模相差很大, 不会影响我们的分析结果.

2.2 数据处理结果

2.2.1 事件选择

在两篇经典文献中, Zhang 等人^[13], Gopalswamy 等人^[14]分别对 1996–2005 年期间的 CME 事件的的对地效应进行了统计研究. 我们只选择了他们的事件列表中的单个 ICME 事件, 因为多重 CME 很难区分其中不同 CME 的贡献及其相互影响. 我们从文献事件列表中选取了全部的 27 个引起了大磁暴 ($D_{st} \leq -100$ nT) 的 ICME 事件来进行分析(见表 1). 并且我们使用了 SVD 反演和相关关系这两种方法来区分 ICME 中的不同 MHD 波模. 此外, 对于事件 22, 由于缺乏相应的 WIND 卫星的数据, 我们使用了较低精度的 ACE 卫星的数据来代替.

全部 27 个事件的基本信息如表 1 所示(选取自 Zhang 等人^[13], 以及 Gopalswamy 等人^[14]).

2.2.2 典型事例分析

通过计算 Alfvén 相关关系, 可压缩性相关系数和以及 SVD 反演, 我们分析了这 27 个事件的等离子体热压和磁压的相关性, 以及波动的色散关系. 大部分实测的色散关系结果与理论 MHD 波动的色散关系存在对应性.

事件 13 是一个存在长时间连续 Alfvén 波的典型 ICME 事件, 分析结果如图 1 所示. 事件中的 Alfvén 波动分布较为连续, 同时其总存在时间大于 12 h, 长

于 ICME 自身持续时间的 30%. 在这一事件中, Alfvén 波存在于磁云的中部. 而在其他区间和鞘层中, 我们发现波动的色散关系较为复杂, 如图 1 中最下面一栏所示, 数字 1 表示波动的色散关系不同于任何 MHD 波动的理论色散关系. 因而鞘层中的波动是否为 MHD 波动尚且不能断定. 此外, 我们在此事件中发现了短时间存在的慢波, 例如在 8 月 18 日的 14:00–20:00UT. 然而, 慢波并没有存在很长时间, 同时我们仅仅在此 ICME 事件中的较少部分中发现了慢波.

相似的事件还有事件 6 和事件 27 等. 这两个

表 1 ICME 事件列表, 包括事件的起止时间以及 ICME 的结构, 结构表示 ICME 是否包含磁云或者鞘层

Table 1 The ICME events list, including the start and end time, and the structure of ICMEs, i.e., if the ICME contains magnetic cloud or sheath

No	起始时间	结束时间	结构
1	1997/5/15 9:00	1997/5/16 0:00	SH+MC
2	1997/10/10 22:00	1997/10/12 0:00	SH+MC
3	1998/8/26 22:00	1998/8/28 0:00	SH+ICME
4	1998/9/25 2:00	1998/9/26 16:00	SH+MC
5	1998/10/19 4:00	1998/10/20 7:00	SH+MC
6	1999/9/22 19:00	1999/9/24 2:00	SH+ICME
7	2000/2/12 9:00	2000/2/13 0:00	SH+ICME
8	2000/4/7 4:00	2000/4/8 6:00	SH+ICME
9	2000/8/12 5:00	2000/08/13 22:00	SH+MC
10	2000/10/13 12:00	2000/10/14 20:00	SH+MC
11	2000/10/28 21:00	2000/10/29 22:00	SH+MC
12	2001/4/18 12:00	2001/4/20 11:00	SH+MC
13	2001/8/17 20:00	2001/8/19 16:00	SH+MC
14	2002/4/17 16:00	2002/4/19 15:00	SH+MC
15	2002/4/20 0:00	2002/4/21 18:00	SH+MC
16	2002/5/11 16:00	2002/5/12 0:00	SH+ICME
17	2003/11/20 10:00	2003/11/21 1:00	SH+MC
18	2004/4/4 0:00	2004/4/5 18:00	SH+MC
19	2004/7/22 18:00	2004/7/24 8:00	SH+ICME
20	2004/7/24 14:00	2004/7/25 15:00	SH+MC
21	2004/7/27 2:00	2004/7/27 15:00	SH+MC
22	2005/1/21 20:00	2005/1/22 17:00	SH+MC
23	2005/5/15 6:00	2005/5/17 12:00	SH+MC
24	2005/5/20 4:00	2005/5/21 5:00	ICME
25	2005/5/29 1:00	2005/5/30 23:00	ICME
26	2005/6/12 16:00	2005/6/13 13:00	SH+MC
27	2005/9/11 5:00	2005/9/12 7:00	SH+ICME

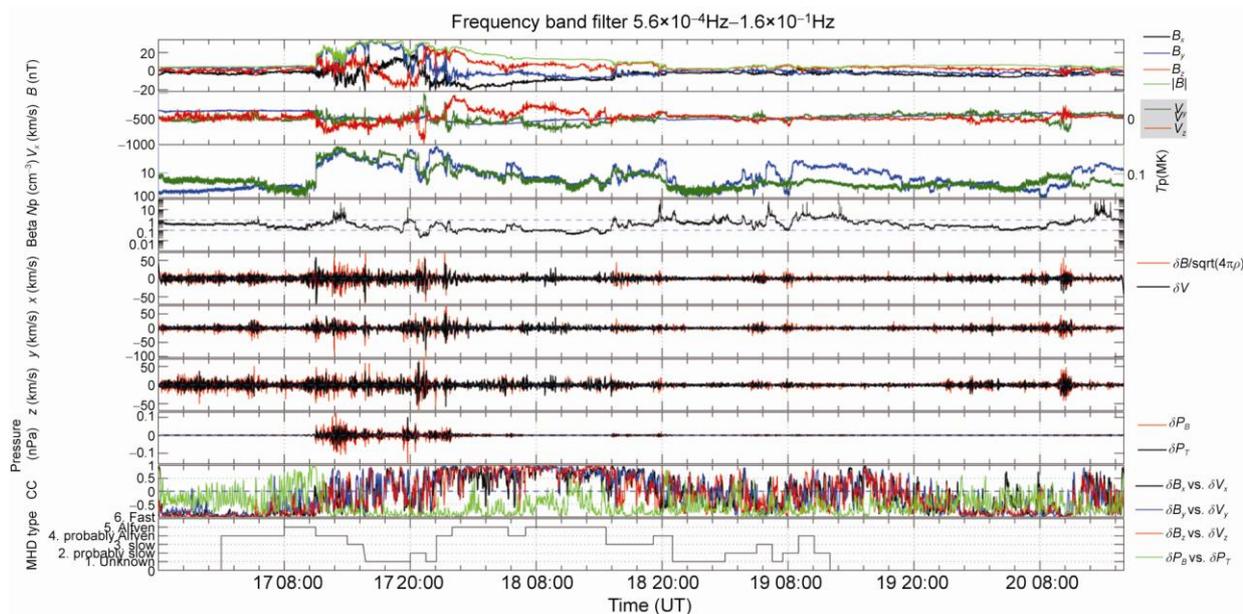


图 1 表 1 中 13 号事件的观测数据, 从上到下依次是: 磁场, 等离子体速度, 密度和温度, 三个速度分量的扰动, 磁压和热压的扰动, 可压缩性相关系数(包括三个速度分量的相关系数和磁压热压的相关系数), 扰动功率谱, 以及用 SVD 方法得到的 MHD 波动类型. 最下面一栏中的数字代表 MHD 波动的种类. 其中 4 代表实测色散关系接近 Alfvén 波的色散关系, 但是存在一定误差; 2 代表色散关系接近慢波, 但是存在误差; 1 代表色散关系与任何 MHD 波动都不相符. 这一事件中, Alfvén 波动存在时间长于 12 小时, 同时 Alfvén 波动分布于磁云的中间; 而慢波存在时间较短; 快波仅仅在鞘层前被观察到

Figure 1 Overview of event 13 in Table 1. The panels from top are the magnetic field, plasma velocity, density and temperature, perturbation of the three velocity component, perturbation of magnetic pressure and plasma pressure, compressive coefficients (coefficient of three velocity component and perturbation of magnetic pressure and plasma pressure), power spectral of perturbations, and the type of MHD waves granted by SVD. The numbers in the lowest panel represent the type of MHD waves. Moreover, 4 means the dispersion relation approximate to the Alfvén waves, but there exists some discrepancy; 2 means the dispersion relation approximate to the slow waves; 1 means the dispersion relation is different from any MHD waves. The Alfvén waves in this case exists continually longer than 12 hours. Furthermore, the Alfvén waves lay in the middle of the MC, slow waves exists very shortly. And the fast modes are only detected in the sheath region.

ICME 中存在很多相似的特征. (1) 这两个事件的鞘层都较薄; (2) 在事件的鞘层开始前, 都观察到了较短时间的快波; (3) 在磁云的后段都观察到了长时间连续分布的 Alfvén 波; (4) 在 ICME 的末段, 这两个事件的磁场都开始下降, 而随着磁场的下降我们刚好观测到 Alfvén 波动的出现.

然而, 在这两个事件的其他部分波动的性质并不相同. 此外, 我们可以在时间的鞘层前后观察到多种短时间的 MHD 波动存在. 因此我们怀疑, 在 ICME 期间, 可能发生了波模转换^[19]的过程, 而这些 MHD 波动可能产生自 ICME 在行星际空间中与背景太阳风的相互作用(Wang et al, under preparation). 另外, 我们在事件 27 中发现了双向电子流, 而在事件 6 中并没有发现这一电子流. 因此这些 MHD 波动可能与双向电子流的存在无关.

2.2.3 统计分析的结果和总览

我们对表 1 中所有的事件进行了 SVD 和相关性的分析, 并且进行了统计研究. 统计结果见表 2. 我们将 Alfvén 波存在时间大于 ICME 自身存在时间的 30% 的事件分类为存在长时间连续 Alfvén 波的事件. 在全部 27 个 ICME 事件中这一类型共有 8 个, 占全部事件的 29.6%.

此外, 对于 Alfvén 波在这 8 个 ICME 中的位置分布, 我们发现 4 个事件中 Alfvén 波存在于 ICME 的末端; 在其他一半 ICME 中, Alfvén 波存在于 ICME 的中部或者整个 ICME 期间. 事实上, 位于 ICME 末端的 Alfvén 波很可能是由于背景太阳风引起的.

我们在全部 27 个 ICME 中都或多或少观察到了慢波的存在, 但是这些波动的存在时间都不长. 例如, 在 13 号事件中, 我们观测到了部分短时间慢波的存在.

在. 这可能是由于慢波极容易耗散所致.

我们在这些 ICME 事件中并没有发现快波的存在. 然而, 我们在 13 个事件中发现短时间的快波存在于 ICME 起始之前(在部分事件中, 鞘层之前), 占全部事件的 48.1%. 这 13 个事件的这一特征与之前提到的事件 6 和事件 27 很类似. 由于观察到的快波

存在的时间极短, 一般短于半小时, 并且快波附近的波动特征一般不同, 我们认为这些事件中可能发生了波模转换的过程. 这将有待进一步的研究检验.

为了进一步研究 ICME 中 MHD 波动的影响因素, 我们分析了 WIND 卫星观测到的电子抛掷角数据.

表 2 ICME 中的 MHD 波动特征和部分参数. Alfvén 波栏表示事件中是否长时间持续存在 Alfvén 波; 位置栏表示 Alfvén 波在 ICME 中存在的位置; 慢波栏表示 ICME 中是否存在慢波; 快波栏表示是否有快波存在于 ICME 事件开始前; 双向电子流栏表示事件中是否观测到了双向电子流; 源区位置表示对应 CME 触发时的源区位置; 太阳风速度比表示激波发生前后太阳风速度的比例

Table 2 The properties of MHD waves and some parameters of ICMEs. Alfvén wave column shows whether the waves continuously exist very long time. Position column shows the location of Alfvén waves in ICMEs. Slow wave column shows the existence of slow waves. Fast wave column shows whether Alfvén waves exist at the interface of the ICMEs and the solar wind. Bi-direction electron stream column shows whether bi-direction electron stream exists in ICMEs. Source region shows where the CME erupted on the solar surface. Ratio of solar wind speed shows the ratio of the solar wind speed before and after the shock waves

No	结构	Alfvén 波	位置	慢波	快波	双向电子流	源区位置	太阳风速度比
1	SH+MC	No	–	Partial	No	Unknown	N21W08	0.710
2	SH+MC	Yes	Middle part of MC	Partial	Yes	Unknown	S27W05	1.025
3	SH+ICME	Yes	End of ICME	Partial	No	Yes	N35E09	0.524
4	SH+MC	No	–	Partial	Yes	Yes	N18E09	0.600
5	SH+MC	No	–	Partial	Yes	Yes	N10E10	0.772
6	SH+ICME	Yes	End of ICME	Partial	Yes	No	S21W05	0.685
7	SH+ICME	No	–	Partial	No	Yes	N22E03	0.762
8	SH+ICME	No	–	Partial	Yes	Yes	N16W66	0.584
9	SH+MC	No	–	Partial	No	Yes	N11W11	0.764
10	SH+MC	No	–	Partial	Yes	Yes	N01W14	0.759
11	SH+MC	No	–	Partial	No	Unknown	N06W60	0.801
12	SH+MC	Yes	End of MC	Partial	Yes	No	S20W85	0.787
13	SH+MC	Yes	Middle part of MC	Partial	Yes	Yes	N16W36	0.589
14	SH+MC	Yes	Middle part of MC	Partial	No	Yes	S15W01	0.720
15	SH+MC	No	–	Partial	Yes	Yes	S14W34	0.742
16	SH+ICME	No	–	Partial	No	No	S12W07	0.749
17	SH+MC	No	–	Partial	No	Unknown	N00E18	0.766
18	SH+MC	No	–	Partial	Yes	No	N16W10	0.813
19	SH+ICME	No	–	Partial	No	Yes	N10E35	0.709
20	SH+MC	No	–	Partial	No	No	N02E08	0.896
21	SH+MC	No	–	Partial	No	Yes	N04W30	0.619
22	SH+MC	Yes	Total MC	Partial	No	Unknown	N12W58	0.639
23	SH+MC	No	–	Partial	Yes	Yes	N12E12	0.450
24	ICME	No	–	Partial	No	No	N13W29	0.952
25	ICME	No	–	Partial	Yes	No	S12E13	0.802
26	SH+MC	No	–	Partial	No	Unknown	N07E13	0.632
27	SH+ICME	Yes	End of MC	Partial	Yes	Yes	S10E58	0.683

我们主要关注 ICME 中是否存在着双向电子流 (BDE), 这决定于 ICME 是否仍旧与太阳表面相连. 如果 ICME 与太阳表面相连, ICME 中的波动特征可能与太阳源区的情况有关, 甚至可能与 CME 的触发机制相关. 在中等能段(370 eV), 我们在 14 个事件中发现了双向电子流, 占全部事件的 51.8%. 遗憾的是, 我们并没有发现双向电子流与 MHD 波动特征的关系, 如表 2 所示.

ICME 中的 MHD 波动可能来自于太阳源区, 也可能由 ICME 在行星际空间传播过程中产生, 为了探究 MHD 波动是否来自 CME 在太阳表面的初发过程, 我们研究了 ICME 波动特征与 CME 源区的关系. 我们尝试研究 ICME 中的 MHD 波动与 ICME 的源区位置与源区特殊结构(如暗条、跨赤道环等)的关系. 如图 2 所示, 似乎有长时间 Alfvén 波动的事件, 其源区

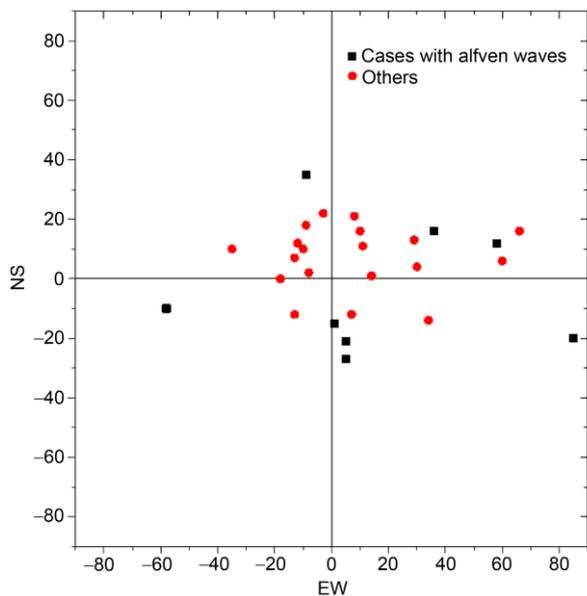


图 2 (网络版彩图)全部 28 个事件的太阳源区位置. 方点表示存在长时间 Alfvén 波动的事件, 圆点表示其他事件

Figure 2 (Color online) Locations of source region on the solar disc of all 28 ICMEs. Square point stands for the cases with long-time continuous Alfvén waves, while circular point stands for other cases.

一般有较高的纬度或者经度. 这点对于较小编号的事件尤其明显. 然而, 对于在 ICME 开始前观察到快波的事件, 它们的源区位置并没有明显的趋势. 此外, 我们也没有发现源区特殊结构域 MHD 波动间的

关系.

我们同时计算了激波前后太阳风速度的比例. 这一比例可能与波动的产生过程有关, 如果 MHD 波动产生于行星际空间, 那么行星际条件将可能对 ICME 中的 MHD 波动产生影响. 然而, 根据数据统计的结果, 这一速度比例也与 MHD 波动情况也没有明显的相关关系.

3 结论和讨论

ICME 中的低频 MHD 波动如果起源于 CME 的初发过程, 那么不同的 CME 触发机制可能导致 ICME 中 MHD 波动空间分布具有明显差异. 另外 Alfvén 波等低频 MHD 波动携带着大量的能量, 可能在 ICME 的膨胀, 传播过程中加热加速 ICME. 因此研究 ICME 中的 MHD 波动分布可能有助于研究 ICME 的动力学演化过程. 此外, ICME 中磁场扰动幅度远小于背景值, $\delta B/B \ll 1$ 且 $\beta \ll 0.1$, 是一个天然的弱等离子体湍流实验室. 因此这一研究也可为空间等离子体湍流研究提供观测基础.

本文系统分析了第 23 太阳周期间引起大磁暴的全部 27 个单 ICME 事件, 发现其中 1AU 附近的 ICME 中存在各种 MHD 波模. 主要结论有:

(1) 约 30%(7 个事件)的 ICME 中 Alfvén 波模的持续存在时间超出整个 ICME 持续时间的 30% 以上. 这一观测事实对研究 ICME 中 Alfvén 波的演化提供了重要的观测基础;

(2) 全部 ICME 中或多或少总存在一些慢磁声波;

(3) 约有 48% 的 ICME 的鞘层中有快磁声波存在, 但在 ICME 中没有诊断出来;

(4) 初步分析这些事件对应的 CME 源区, 没有发现源区位置、源区特殊结构(如暗条、跨赤道环等)等存在明显相关关系.

当然, 目前我们只对少部分引起了大磁暴的 ICME 事件进行了初步统计分析. 为了更深入地研究, 就必须对 1AU 附近包括没有引起地磁效应在内的全部 ICME 进行更大样本的统计分析. 另外条件允许时, 最好还能对 ICME 在行星际空间传播过程进行分析. 这些都有待日后更深入地研究 ICME 波动及其他相关问题.

致谢 感谢 WIND, ACE 卫星团队提供了良好的观测数据, 感谢 CDAWeb 网站提供数据下载服务.

参考文献

- 1 章振大. 日冕物理. 北京: 科学出版社, 2000. 171–320
- 2 Hudson H S, Bougeret J L, Burkepile J. Coronal mass ejections: Overview of observations. *Space Sci Rev*, 2006, 123(1): 13–30
- 3 Kopp R A, Pneuman G W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon. *Solar Phys*, 1976, 50(1): 85–89
- 4 Antiochos S K, DeVore C R, Klimchuk J A. A model for solar coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2006, 510(1): 485–493
- 5 Chen P F, Shibata K. An emerging flux trigger mechanism for coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2000, 545(1): 524–531
- 6 Wang C, Du A M, Richardson J D. Characteristics of the interplanetary coronal mass ejections in the heliosphere between 0.3 and 5.4AU. *J Geophys Res*, 2005, 110(A10), doi:10.1029/2005JA011198
- 7 Liu Y, Richardson J D, Belcher J W, et al. Thermodynamic structure of collision-dominated expanding plasma: Heating of interplanetary coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2006, 111(A1): A01102
- 8 Tu C Y, Pu Z Y, Wei F S. The power spectrum of interplanetary Alfvénic fluctuations: Derivation of the governing equation and its solution. *J Geophys Res*, 1984, 89(A11): 9695–9702
- 9 Tu C Y, Marsch E. MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: Observations and theories. *Space Sci Rev*, 1995, 73(1-2): 1–210
- 10 Yao S, Marsch E, Tu C Y, et al. Identification of prominence ejecta by the proton distribution function and magnetic fine structure in interplanetary coronal mass ejections in the inner heliosphere. *J Geophys Res*, 2010, 115(A05): A05103
- 11 Marsch E, Yao S, Tu C Y. Proton beam velocity distributions in an interplanetary coronal mass ejection. *Ann Geophys*, 2009, 27(2): 869–875
- 12 Liang H M, Xiao C J, Zhou G P, et al. Alfvénic fluctuations in an interplanetary coronal mass ejection observed near 1AU. *Plasma Sci Tech*, 2012, 14(2): 102–106
- 13 Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst < 100$ nT) during 1996–2005. *J Geophys Res*, 2007, 112(A10): A10102
- 14 Gopalswamy N, Yashiro S, Akiyama S. Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2007, 112(A06): A06112
- 15 Wang Y M, Wang S, Ye P Z. Multiple magnetic clouds in interplanetary space. *Solar Phys*, 2002, 211(1-2): 333–344
- 16 Santolik O, Parrot M, Lefeuvre F. Singular value decomposition methods for wave propagation analysis. *Radio Sci*, 2003, 38(1), doi: 10.1029/2000RS002523
- 17 Lepping R P, Acuna M H, Burlaga L F, et al. The WIND magnetic field investigation. *Space Sci Rev*, 1995, 71(1-4): 207–229
- 18 Lin R P, Anderson K A, Ashford S, et al. A three-dimensional (3-D) plasma and energetic particle experiment for the WIND spacecraft of the ISTP/GGS mission. *Space Sci Rev*, 1995, 71(1-4): 125–153
- 19 Kaghshvili E K, Esser R. Velocity shear-induced mode conversion in solar wind and streamer plasmas. *AstroPhys J*, 2000, 539(8): 463–468

Magnetohydrodynamic waves in interplanetary coronal mass ejections near 1AU observed by WIND spacecraft

LI QingSheng, XIAO ChiJie^{*}, WANG HongGang, CHEN YanGao & WANG XiaoGang

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology and School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Previous observations of interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) show that only from 0.3 to 0.68AU did Alfven wave exist in the ICMEs, and rarely discovered at 1AU in ICMEs. Here we present a preliminary statistical result on the existence of magnetohydrodynamic (MHD) waves in ICMEs near 1AU. Based on all of 27 single ICME events which led to major magnetic storms during 1996–2005, several types of MHD waves in ICMEs are identified with the dispersion relations by SVD method: (1) in about 1/3 ICMEs near 1AU, 8 out of 27 events, some Alfven waves exist continuously ; (2) in 13 cases there are fast waves exist in the sheath of the ICMEs; (3) slow waves exist in all events. These observations may show some new clues to the basic wave property and dynamics of ICME.

coronal mass ejections, MHD waves, solar wind, Alfven waves

PACS: 52.35.Bj, 96.50.Ci, 96.50.Tf, 96.50.Uv

doi: 10.1360/132013-298