

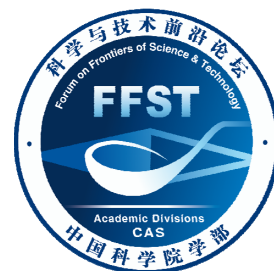


日冕物质抛射的行星际动力学过程研究

汪毓明*, 周振军, 刘佳佳, 申成龙, 王水

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

* E-mail: ymwang@ustc.edu.cn



收稿日期: 2012-07-25; 接受日期: 2012-12-11; 网络版发表日期: 2013-05-24

中国科学院重点部署项目(编号: KZZD-EW-01-4)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2011CB811403)、中国科学院重点方向项目(编号: KZCX2-YW-QN511)、国家自然科学基金(批准号: 41131065, 41121003, 40904046, 41274173)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: WK2080000005, WK2080000031, WK2080000007)资助

摘要 日冕物质抛射(CME)是太阳大气中频繁发生的最剧烈的爆发现象之一,也是灾害性空间天气事件最主要的驱动源,能在行星际空间乃至地球空间造成剧烈的扰动。行星际空间是 CME 爆发后影响地球空间环境的必经之路,在这过程中 CME 如何传播演化,对其最终的空间天气效应有着至关重要的影响。CME 的行星际动力学过程涉及众多宏观与微观、线性与非线性等多时空尺度的问题,主要可以归纳为动量交换与输运、能量转化与输运以及磁通量转换与输运这三个方面。目前这些方面的认识和理解主要依赖于广角成像、射电频谱、多点局地等多种空间卫星探测手段和技术,随着探测技术的不断发展,人们对 CME 的行星际动力学过程必定会有更加深入甚至全新的了解。本文简要综述近年来在这方面的研究进展,以介绍国内外华人学者的工作为主,全面展现 CME 的行星际动力学过程。

关键词日冕物质抛射
行星际动力学
空间天气

日冕物质抛射(CME)是太阳大气中频繁发生的最剧烈的爆发现象之一,在爆发过程中向行星际空间抛出大尺度磁化等离子体结构^[1]。一次典型的 CME 向行星际空间注入 10^9 t 等离子体^[2],当它传播到 1 AU 处其径向占据约 1/4 AU 的范围^[3],它的传播速度平均 500 km s^{-1} ,有时也可高达 3000 km s^{-1} 以上,因此它携带的动能相当可观,高达 10^{25} J,同时还携带了 10^{23} Maxwell 的磁通量。在太阳低年期间,平均每天产生 0.2 次 CME;但在太阳峰年期间,CME 发生的频率可达每天 4.5 次。

正因为 CME 抛出大量质量,空间影响范围广,传播速度快(可在 1~5 天内影响地球),发生频次高,

它能在行星际空间乃至地球空间造成剧烈的扰动,包括引起各类波动、造成磁场堆积、产生高通量的能量粒子、激发电磁暴、形成太阳高能粒子事件、引起地磁暴等一系列现象。因此 CME 是灾害性空间天气事件的最主要的驱动源。以发生在 2003 年 10 月 28 日的“万圣节”事件为例^[4],世界时 09:51 UT 太阳活动区 10486 中发生了一次剧烈的爆发活动,产生了对地传播的全晕状 CME。8 min 后,地球同步轨道的 GOES 卫星记录的软 X 射线流量剧增 2 个量级以上,表明该爆发活动形成的耀斑强达 X17.2 级;1 h 后,该卫星记录的高能质子流量急速增加,在短短的数小时内上升了 3 个数量级;8 h 后,高能粒子流量达到最大,造

中文引用格式: 汪毓明,周振军,刘佳佳,等. 日冕物质抛射的行星际动力学过程研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 934–950

英文引用格式: Wang Y M, Zhou Z J, Liu J J, et al. Dynamic process of coronal mass ejections in interplanetary space (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 2013, 43: 934–950

成 L1 点的 SOHO 卫星的极紫外成像仪和日冕仪严重的雪暴(Snow Storm)现象, 即高能粒子轰击 CCD 传感器而使成像图形成雪花状干扰; 1 天后, 该 CME 及其驱动的激波到达地球, 造成了-363 nT 的特大地磁暴, 强度为第 23 太阳周第五. 可见, 一次强烈的 CME 所引起的灾害性空间天气发展过程是非常迅猛的.

行星际空间是 CME 自太阳大气中产生后影响地球空间的必经之路. 在空间上, 这一区间有一个 AU 之长, 太阳风等离子体参数和行星际磁场的变化超过数个量级; 在时间上, CME 需要一至数天才能传播到地球, 跟周围的行星际介质有着充分的接触和相互作用时间. 因此 CME 的行星际动力学传播过程不仅是 CME 产生后的延续演化阶段, 也是 CME 的空间天气发展过程的重要阶段. 深入而全面的认识 CME 的行星际动力学过程对正确理解太阳大气中的能量快速释放、CME 的产生机制等物理过程和现象有着重要的意义, 同时在灾害性空间天气预报研究中占有极其关键的地位.

本文将首先介绍 CME 行星际过程的观测手段, 在此基础上从动量交换与输运、能量转化与输运和磁通量转换与输运三个方面来介绍 CME 的行星际动力学过程, 最后对这一研究方向进行总结并展望.

1 CME 行星际过程的观测与追踪

追踪 CME 在行星际空间中演化过程的观测手段主要有三类, 分别是广角成像观测、射电频谱观测和多点局地观测. 三类手段各有优缺点, 观测的侧重点和获

得的物理量也各不相同. 前两类都是遥感手段, 成像观测获得的是 CME 在天空平面内的全貌, 而射电频谱了解到的是 CME 所驱动的激波的信息, 尤其是激波传播速度的快慢; 第三类手段属于直接探测, 得到的是非常局部的信息, 但获得的物理量相对更为准确和可靠.

1.1 广角成像观测

日冕和行星际的成像观测主要是通过空间的日冕仪来实现的. 它记录的是日冕和行星际空间中的自由电子散射的太阳光子的数目. 能接收到的光子数一方面依赖于空间中自由电子的数密度, 同时也依赖于太阳光子的入射方向和观测视线之间的夹角^[5]. 因此在一定模型假设的基础上, 观测获得的图像反映了日冕和行星际空间中的等离子体密度.

目前最重要的空间日冕仪和日球层成像仪有 SOHO 飞船上的 LASCO 载荷包中的 C1, C2 和 C3 日冕仪以及 STEREO 飞船上的 COR1, COR2 日冕仪和 HI1, HI2 日球层成像仪. SOHO 飞船是 ESA 和 NASA 联合资助的空间项目, 它于 1995 年 12 月成功发射, 运行在日地系统第一引力平衡点 L1 点处, 24 h 不间断的观测太阳, 至今仍在运行, 已连续工作了 16 年半. 它搭载的 C1 日冕仪观测的是 3 个太阳半径以内的日冕情况, 不过 1998 年就已坏掉; 另外的 C2 和 C3 日冕仪的观测视野分别为 1.5~6 个太阳半径和 3.5~30 个太阳半径, 能够清楚的观测到 30 个太阳半径内的白光日冕密度的扰动情况^[6]. C2 和 C3 的图像大小均为 1024×1024 个像素点, 时间分辨率为每 24 min 一张图. 图 1(a)显示的是 LASCO/C3 捕捉到的一

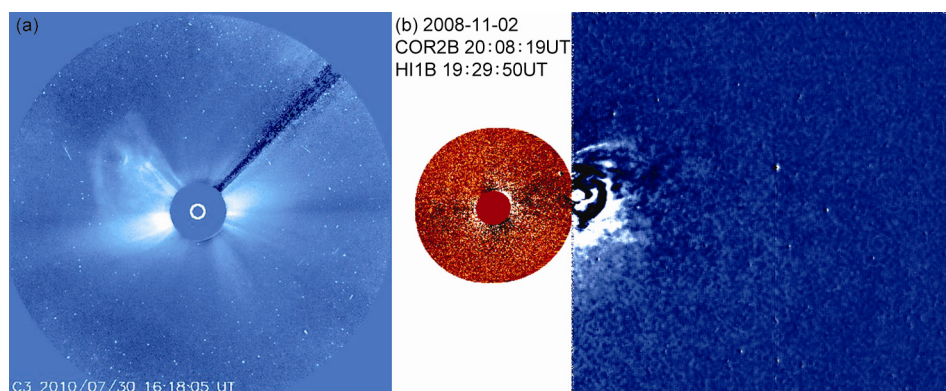


图 1 SOHO 卫星搭载的 LASCO/C3 日冕仪拍摄到的一次 CME(a)、STEREO 卫星搭载的 COR2 日冕仪和 HI1 日球层成像仪记录到的一次 CME(b)图

(a) 摘自 SOHO/Lasco 网站; (b) 摘自 STEREO 网站

次 CME, 图中我们可以清楚地看到 CME 在天空平面内抛射的方向、轮廓和亮度, 通过连续观测, 我们就能够获得 CME 在 30 个太阳半径内的运动学参数, 如速度、加速度和膨胀的速率等. LASCO 至今已记录到上万次 CME 事件, 对 CME 在日冕中的表现特性已经有了较为全面的认识, 结果在很多研究中都有论述^[7-9], 此处就不再赘述.

STEREO 包含两个完全一样的飞船, 由 NASA 于 2006 年 10 月成功发射. 这 2 个飞船都运行在地球绕日公转轨道附近, 一个离太阳稍近些, 公转速度快些 (STEREO-A), 一个稍远些, 公转速度慢些 (STEREO-B), 这就使得这两个飞船以每年约 45° 的速度相互远离, 从而实现了人类第一次从两个以上的视角观测太阳^[10]. STEREO 的另一个特点是超宽的视野, 它携带的 COR1 和 COR2 实时监测着 1.4~15 太阳半径的区域, 而 HI1 和 HI2 监测的区域从 12 太阳半径直至 1 AU 以外^[11]. 因此 CME 从太阳抛出后, 在日冕和行星际空间中的传播过程基本上能被 STEREO 完整的记录下来. 相对于 SOHO/LASCO 的观测数据, STEREO 的观测数据的空间和时间分辨率都提高了 1 倍以上, 对 CME 的传播演化过程能够进行更加细致的研究. 图 1(b)展示了 STEREO-B 观测到的一次 CME, 图中可以清楚地看到两个 CME 分别在 COR2 和 HI1 的视野中传播. CME 在 HI 中的观测特征可以参考 Harrison 等^[12]的综述文章.

1.2 射电频谱观测

快速的 CME 在日冕和行星际空间传播过程中会在其前方驱动激波, 激波能加速带电粒子, 在一定条件下, 激波加速产生的高能电子会激发波动, 通过波波相互作用产生远端能够接受到的电磁波, 即 II 型射电暴. 而同样经常观测到的 III 型射电暴是高能电子束沿开放磁场由低向高快速穿越太阳日冕引起的等离子体辐射. 图 2(摘自 Wind/Waves 网站)是 Wind 卫星上的 Waves 仪器^[13]记录到的一次典型的 II 型射电暴. 我们可以清楚的看到随着时间的推移, 射电暴的频率有着显著的从高频到低频的变化, 称之为频率漂移. 理论研究表明, II 型射电暴的频率等于当地介质的等离子体频率, 因此频率的漂移意味着射电暴的激发源从高密度等离子体区域移动到了低密度等离子体区域. 在日冕和行星际空间中, 等离子体密度一般随日心距的增加而迅速降低, 因此射电暴的频率漂移可以用于反演 CME 驱动激波的向外传播速度.

在反演过程中, 日冕和行星际空间中的等离子体密度分布是关键参数. 在简单情况下, 人们利用一维密度模型, 如 Saito 等^[14]的模型, 从射电暴的频谱观测反演出激波的传播速度, 从而了解 CME 的运动状况. 但在很多情况下, 尤其在日冕和行星际环境被其他较早的 CME 剧烈扰动的情况下, 一维密度模型往往无法反映实际情况, 以至于反演出的速度误差

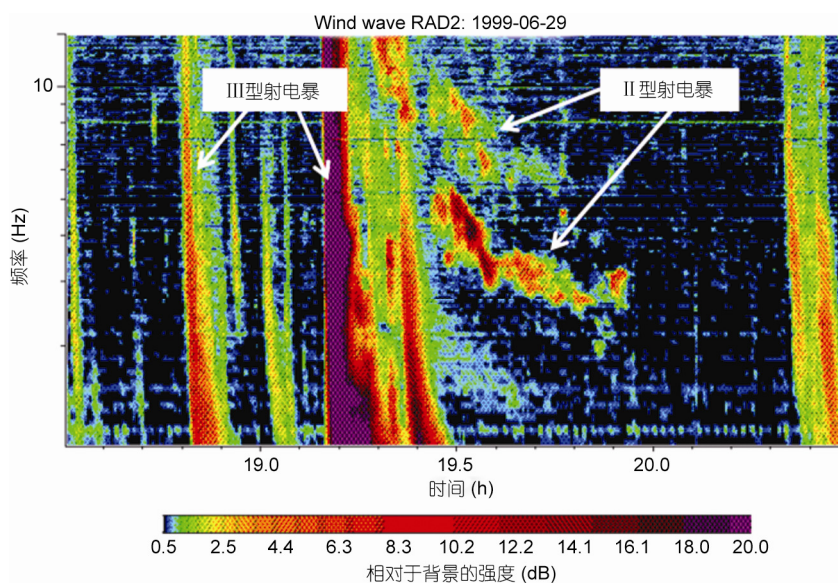


图 2 Wind 卫星搭载的 Waves 仪器记录到的频率漂移速度较慢的 II 型射电暴和快速漂移的 III 型射电暴

较大^[15]. 因此在实际的应用中如何获得较为准确的激波上游的等离子体密度是这方面研究的核心问题.

1.3 多点局地观测

CME 除了成像观测以外, 当它在行星际空间中传播的时候还可能被飞船实地探测到, 位于 L1 的 ACE 卫星就经常记录到行星际 CME(ICME)事件, 在卫星穿过 CME 的路径上的等离子体和磁场的参数能够被直接且相对准确的记录下来. 这些参数是遥感手段无法(准确)获得的. 然而 CME 是大尺度的磁化等离子体结构, 它在地球轨道附件的直径大约有 1/4 AU, 单点局地参数的测量虽然较准, 但很难反映出 CME 的全局特性. 多点局地观测是解决这一问题的主要途径. 探测过行星际空间的飞船有很多, 比如 Voyager, Helios, Ulysses, IMP 8, Wind 和 ACE 等, 因此在有些情况下, 确实能够实现对于同一个 CME 的多点局地探测. 磁云(MC)的首次发现是一个最为成功的例子^[16].

第一个报道的 MC 发生在 1978 年 1 月 5~8 日, 该发现是建立在 Helios 1, Helios 2, IMP 8, Voyager 1 和 Voyager 2 这 5 颗卫星的局地观测数据分析的基础之上. 该 MC 首先被处在 1 AU 处的 Helios 1 和 2 以及 IMP 8 记录到, 随后被 2 AU 处的 Voyager 1 和 2 记录到. 记录到的观测数据具有以下特征: (1) 增强的磁场, (2) 大而平滑的磁场方向的旋转, (3) 较低的质子温度等(图 3). 该研究工作根据不同日心距、不同经纬度的观测数据, 总结出这些卫星记录到的这一结构是一类特殊的 ICME, 它具有螺旋形的磁场结构和低的质子 β 值, 它在行星际空间的传播过程中在不断膨胀. 后续的一系列研究工作进一步发现, 由于它往往携带较强的磁场南向分量, 是地磁暴的重要的行星际扰动源. 目前 MC 已是行星际物理和空间天气学中的重要研究对象之一.

然而多点局地观测需要多卫星/飞船在时间和空间上的配合, 对于广阔的行星际空间来说, 人类的探测器实在太少, 要想从多点局地探测同一个 CME 事件还是可遇不可求. 因此目前要想全面追踪和研究 CME 在日冕和行星际空间中的动力学演化过程, 还应充分利用以上三种手段, 把遥感观测与局地探测结合起来, 以互相弥补各自的不足.

2 CME 的行星际动力学过程

动量、能量和磁通量是 CME 的三个相互关联的

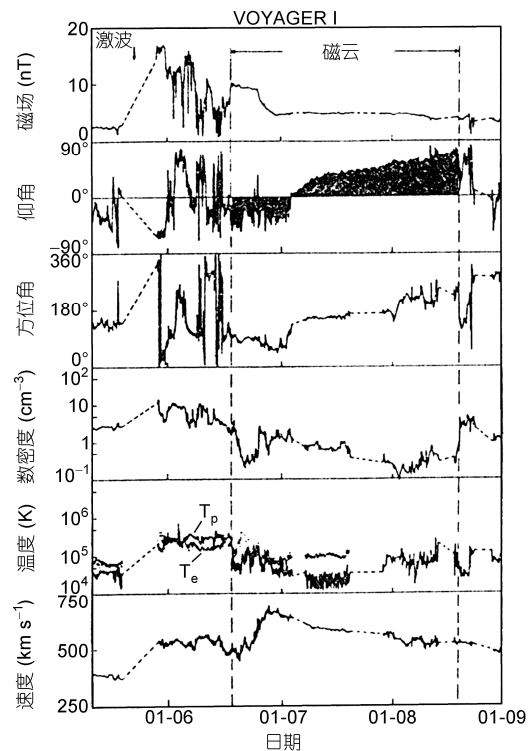


图 3 Voyager 1 记录到的发生在 1978 年 1 月 5~8 日的 MC 曲线从上到下为总磁场、磁场方向相对于黄道面的仰角、方位角、太阳风离子数密度、温度、速度^[16]

核心物理量. 我们就从这三个物理量入手, 主要通过介绍华人学者的一些突出的相关成果, 来认识和理解 CME 的行星际动力学过程以及其中的一些重要科学问题.

2.1 动量交换与输运

质量和速度是动量的两个基本量, 尤其是 CME 的速度演化, 对 CME 的初始能量的注入, 与周围介质的相互作用, CME 到达地球时间的估计等方面的研究都是重要的信息.

CME 的初始动量主要形成于 2 个太阳半径以内的内日冕中. Zhang 和 Dere^[17]利用 SOHO 卫星 LASCO/C1 谱线日冕仪的观测数据, 分析了若干边缘的 CME 事件, 发现 CME 在内日冕中的加速度大多在 100 m s^{-2} 以上, 平均为 330 m s^{-2} . 而 LASCO/C2 和 C3 的观测显示, 同样的这些 CME 在外日冕中的加速则在 0 附近, 远小于 CME 在内日冕的加速度. 这一研究结果说明 2 个太阳半径以内的内日冕确实是 CME 过程中日冕磁能释放的最主要区域. 与耀斑的软 X 射线流量的比较研究发现, CME 的传播速度与之密切相关^[18,19]. 如图 4 所示, 耀斑的爆发过程可以分为

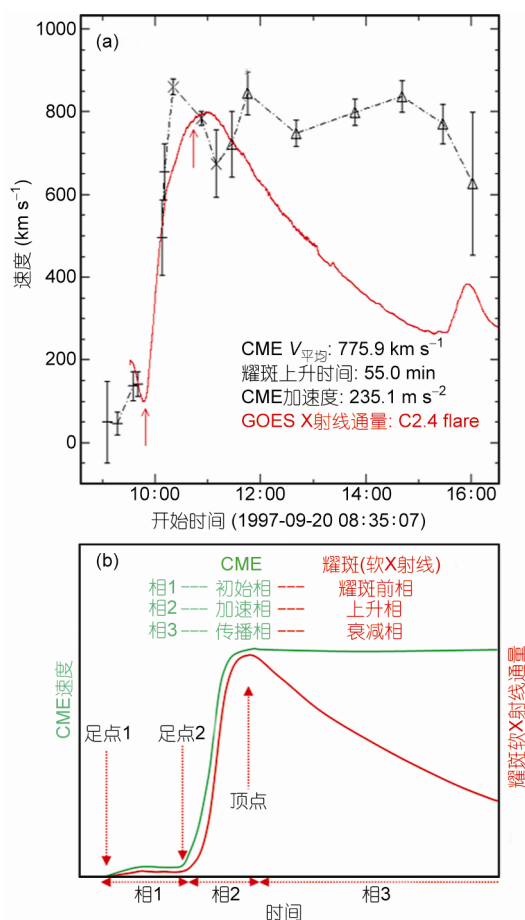


图4 CME的抛射速度和伴随的耀斑引起的软X射线流量
(a)以及CME和耀斑三个发展阶段的比较示意图^[18,19](b)
(a)中黑色符号和点划线示CME抛射速度, 红色实线示软X射线流量

三个阶段: 耀斑前相、上升相和衰减相; CME速度的演化也可分为相对应的三个阶段: 初始相、加速相和传播相. 当软X射线流量开始缓慢增加的时候, CME也在缓慢抬升; 当软X射线流量快速上升的时候, CME的速度也显著增加; 当软X射线流量达到极大时, CME的速度也趋于稳定; 随后软X射线流量下降, CME则基本保持已有的速度向外传播. 这一现象和规律随即被一系列的研究证实^[20-23].

CME内日冕中加速的驱动力来自于日冕磁能的释放. Qiu等^[24]通过综合分析光球层视向磁场和Halpα白光耀斑的观测资料, 利用双带耀斑扫过区域的大小估计了爆发过程中参与磁场重联的光球层磁通量. 并与CME爆发初期的抛射速度以及伴随的

暗条的上升速度进行比较, 发现光球层磁通量的转化率与它们的加速度密切相关(图5). 大量的数值模拟也显示了磁场重联在CME的爆发以及早期演化阶段的重要作用. 比如Chen等^[25]的2.5维磁流体动力学(MHD)数值模拟表明, CME爆发过程中, 如果它下方的垂直电流片没有磁场重联发生的话, CME抛射的速度较慢; 如果有磁场重联发生的话, 抛射速度则明显变快.

CME在内日冕获得初速度以后, 它的外日冕的速度演化相对较为缓慢, 但也明显的受到背景太阳风的调制. 大样本统计研究表明CME在外日冕的加速度随速度的增加而减小^[9]. 背景太阳风的速度大约在 450 km s^{-1} 左右, 随太阳周的变化会略有不同. 因此对于速度明显小于背景太阳风速度的CME, 比如小于 250 km s^{-1} 的CME, 它们一般都会被背景太阳风加速, 平均加速度略大于 5 m s^{-2} ; 而对于速度远大于背景太阳风速度的CME, 比如超过 900 km s^{-1} 的快速CME, 它们会感受到极大的阻力, 平均加速度接近 -20 m s^{-2} (图6). 统计研究还发现CME在日冕仪中观测到的表观亮度与抛射速度成正相关(图7)^[8]. 一个很自然的解释是CME的运动速度越快, 在其前方堆积的太阳风等离子体就越多也越密, 这就使得日冕仪中记录到的亮度也越亮. 随之带来的问题是通过日冕仪观测数据估计的CME质量会有更大的误差.

CME在行星际空间的传播过程中是相对独立的磁化等离子体结构, 其动力学过程可以用简单的牛顿方程来近似^[26]:

$$M_* \frac{dv}{dt} = F_{em} + F_{th} + F_D + F_g,$$

其中 M_* 是CME的有效质量, 包括它的真实质量和由于排开太阳风所带来的虚拟质量, 这就跟前面提到的太阳风等离子体在CME前方的堆积密切相关. 要解这个方程, 我们还需要知道CME受到的外力, 包括洛伦兹力 F_{em} , 热压梯度力 F_{th} , 太阳风的曳力 F_D 和重力 F_g , 其中对于曳力中的曳力因子的认识还不是很清楚. 虽然都是气态, 但由于电磁场的介入以及粒子完全电离, CME在行星际空间中的动力学过程与通常的气体动力学过程有着显著的差别且更复杂, 因此现在CME到达1 AU时间的预报精度还显不足, 误差大多在10 h左右, 好的可以到8 h左右(图8)^[27].

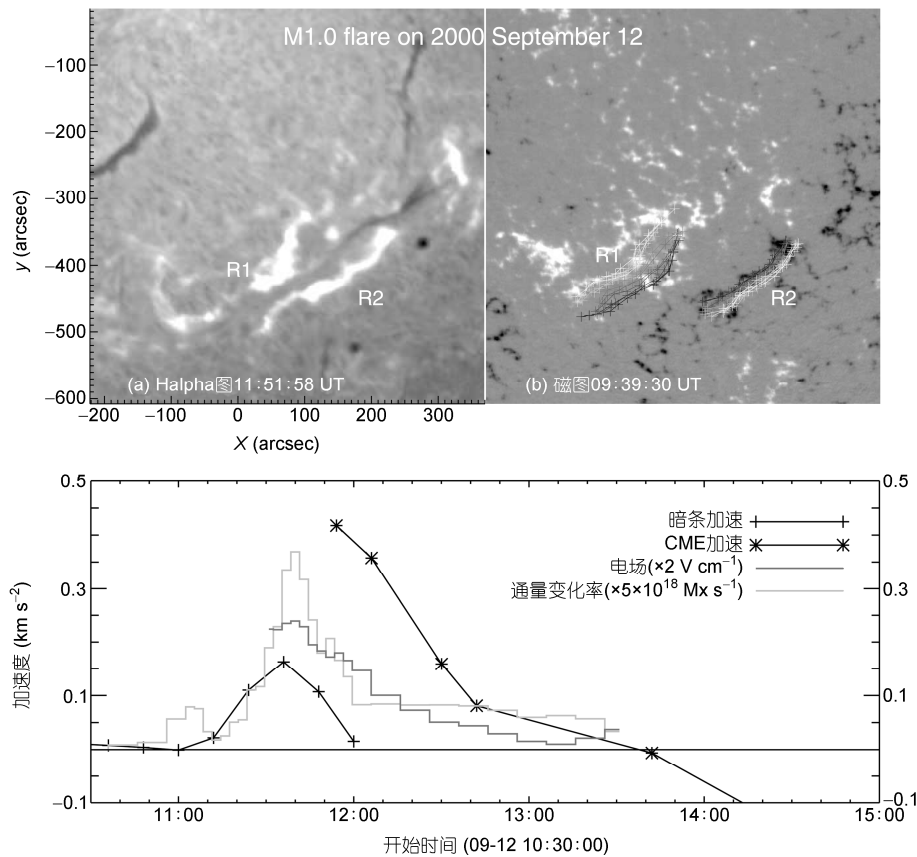


图 5 H α 谱线观测到的一次双带白光耀斑(a)、对应的 SOHO/MDI 观测到的双带耀斑扫过的磁通量(b)和伴随的暗条上升加速度, CME 的加速度, 电场, 光球层磁通量变化率的曲线^[24](c)

对于快速的 CME, 当它的速度超过当地的快磁声波速时, 就能在其前方驱动激波, 在一定条件下可以被白光日冕仪观测到^[28]. 在一定条件下, 激波能加速大量的带电粒子形成太阳高能质子(SEP)事件, 最重要的加速区域在 3 个太阳半径左右^[29], 这些高能粒子能从 CME 的动能中吸取约 3%~20% 的能量(图 9)^[30,31].

CME 与背景太阳风相互作用引起的动量交换不仅影响着 CME 的速度大小, 还改变着它的传播方向. 以往的统计研究表明地球空间附近观测到的约 40% 的 ICME 找不到对应的面对地球抛射的 CME^[32], 而且也存在着“问题磁暴”, 这些磁暴既不是冕洞高速流引起的, 也找不到对应的 CME 源^[33]. CME 在传播过程中发生的偏转现象是一个可能的解释. CME 在日冕中的偏转已被大量报道^[8,34,35], 尤其在太阳活动低年, 受到偶极场的影响, CME 主要向赤道偏转. 最近, STEREO 卫星数据获得的 CME 三维运行轨迹与

外推获得的日冕磁场的比较分析, 发现 CME 在日冕中的偏转方向与偏转率与日冕磁能密度梯度的方向和大小具有明显的正相关(图 10)^[36,37]. 而这也成为了第一个基于物理的定量估计 CME 偏转程度的方法. 当 CME 运动到行星际空间时, 背景太阳风磁场已经衰减得很弱, 太阳风速度变得相对较强. 统计分析间接表明, CME 在行星际空间的传播过程中也可能发生偏转, 且偏转的方向与 CME 和背景太阳风的速度差有关(图 11)^[38,39].

CME 除了与背景太阳风和行星际磁场相互作用会改变速度和方向外, 多个 CME 之间的碰撞和相互作用也会使得 CME 的动力学参数发生显著的变化. Shen 等^[40]通过对 2008 年 11 月 2~4 日发生的两个 CME 互相追赶并发生碰撞的事件进行了细致的分析, 发现它们之间的碰撞是超弹性的, 通过碰撞系统的总动能增加了 7%. 其中前一个 CME 的速度由于碰撞增加了 30%, 方向改变了 10° 左右; 而后一个 CME 的

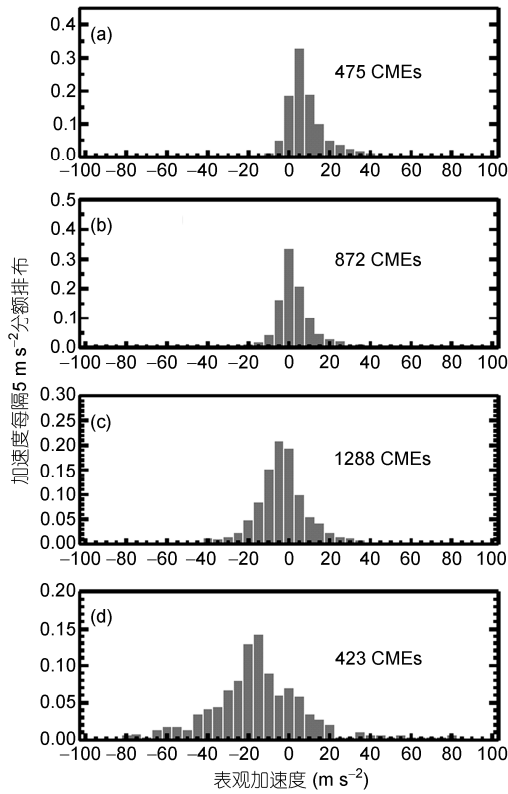


图6 对 SOHO/LASCO 观测到的数千个 CME 的速度和加速度的统计结果图
速度越大, 加速度越小, 引自参考文献[9]. (a) $V \leq 250 \text{ km s}^{-1}$; (b) $250 \text{ km s}^{-1} < V \leq 450 \text{ km s}^{-1}$; (c) $450 \text{ km s}^{-1} < V \leq 900 \text{ km s}^{-1}$; (d) $V > 900 \text{ km s}^{-1}$

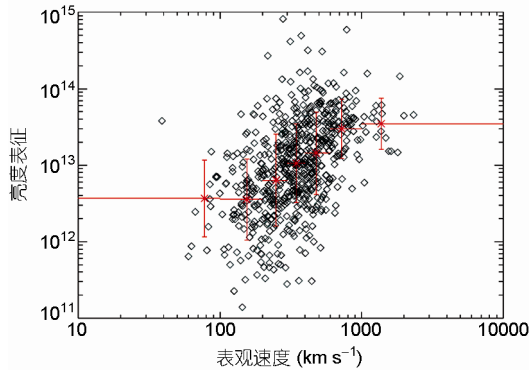


图7 1997~1998 年间边缘 CME 的投影速度和表观亮度之间的相关分析图
速度越大, 亮度越强, 引自参考文献[8]

速度减小了 14%, 方向改变了近 20° . 因此如何估计 CME 的传播轨迹, 以及能否到达地球的概率, 是准确预报 CME 空间天气效应的首要问题.

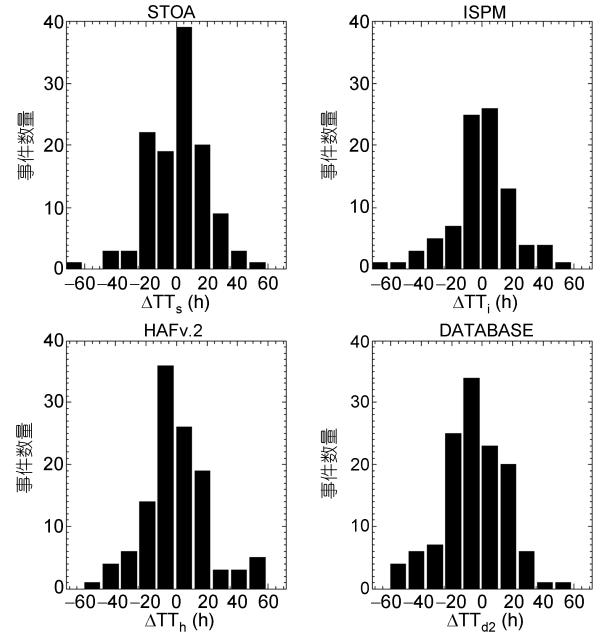


图8 不同方法估计 CME 到达时间的误差直方图
平均误差在 10 h 左右

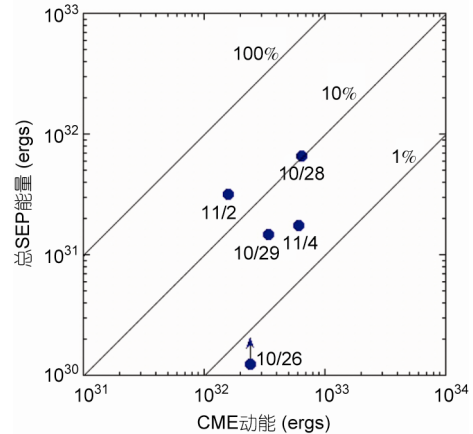


图9 高能粒子的能量占 CME 动能的百分比
总 SEP 能量和 CM 动能根据 Copalswamy 等^[31]. 资料取自 Lin 在 2006 年 SPD 暑期学校上的报告

2.2 能量转化与输运

CME 传播过程中的能量涉及势能、动能、热能和磁能, 在远离太阳的情况下, 势能一般可以被忽略, CME 的能量主要在动能、热能和磁能之间转换. CME 在爆发过程中经历着剧烈的膨胀, 温度会因此而下降, 但对日冕的光谱观测表明, CME 的温度下降并不明显, 这是因为在爆发过程中产生了大量的热能, 与

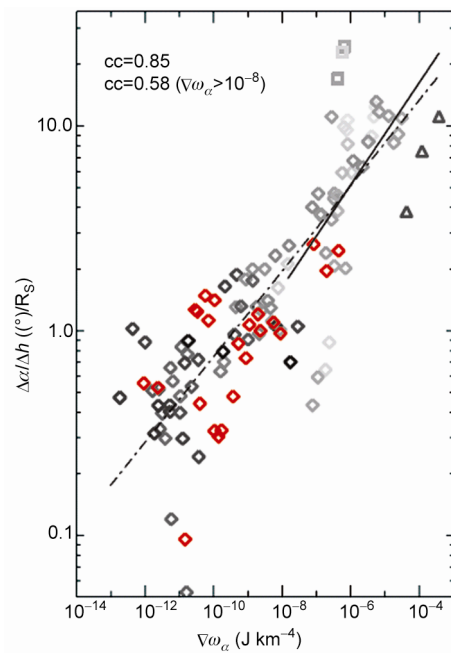


图 10 对 10 个 CME 偏转事件的统计研究图
CME 的偏转率与周围的日冕磁场磁能密度梯度成正相关

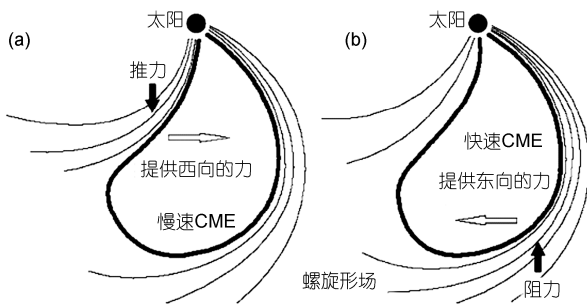


图 11 快慢 CME 受背景太阳风和行星际磁场的影响进而偏转的示意图

它携带的动能相当^[41,42], 这些热能可能是通过磁场重联过程, 由磁能转化而来的。

当 CME 运行在行星际空间的时候, 它持续膨胀, 无论是统计研究^[43]还是理论模型研究^[44], 都表明这一过程的多方指数小于单原子理想气体的绝热指数 1.67, 也小于太阳风的多方指数 1.46. 图 12(资料引自文献[43])显示的是上百个事件的统计结果. 这说明 CME 在膨胀的同时有持续的热能的注入(直接注入或由其他能量局地转化而来). 无力场模型表明在向外传播的过程中, CME 携带的磁能跟距离成反比, 也就是说 CME 的磁能在不断的衰减^[45], 于是磁能也就

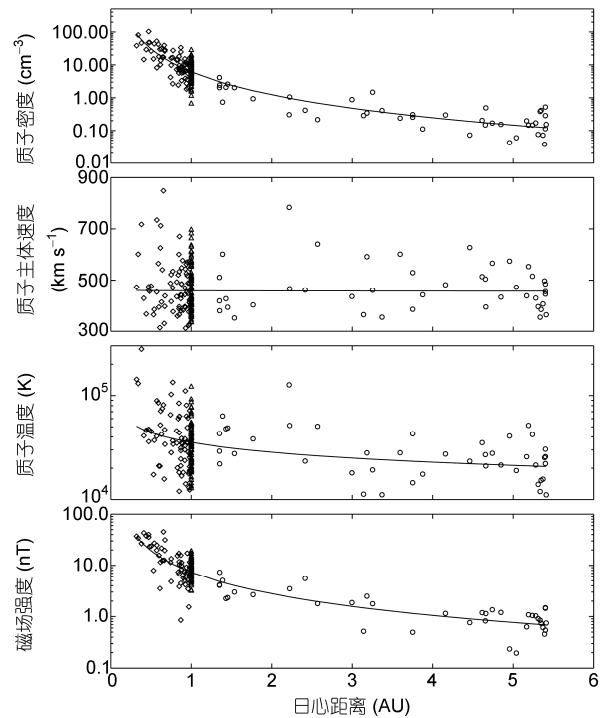


图 12 利用不同位置处卫星的观测数据对上百个 ICME 的热力学量进行的统计分析结果

很自然的成为了热能的一个可能来源。

行星际空间包括 CME 中存在着各种各样的波动, 它们是磁能转化为热能和动能的主要渠道. 通过对波谱的分析, 人们发现波的能量主要集中在低频波段(图 13)^[46], 而处在低频的 Alfvén 波则被认为是太阳风粒子加热的主要能量来源. 早在 20 世纪 60~70 年代, 行星际空间中的大振幅 Alfvén 波动就已被观测证实存在(图 14)^[47]; 近年来, ICME 中的 Alfvén 波的证据也随着卫星观测技术的不断进步、观测数据的不断积累而被发现. 从 0.3~1 AU, 人们都发现了携带 Alfvén 波的 ICME^[48~50].

波粒相互作用是波把能量传递给粒子的主要过程. 传统的理论认为波通过波粒共振相互作用传递能量, 这其中遇到的最主要的问题是与粒子共振的频率相对都比较高, 而波的能量又主要集中在低频段. 如何不断产生高频波使之与粒子共振, 成为了多年来众多学者研究的课题^[51~59]. Tu 等^[60]提出了 Alfvén 波的串级理论, 成为了太阳风加速的主流理论之一.

而最近随着人们对波粒相互作用认识的不加

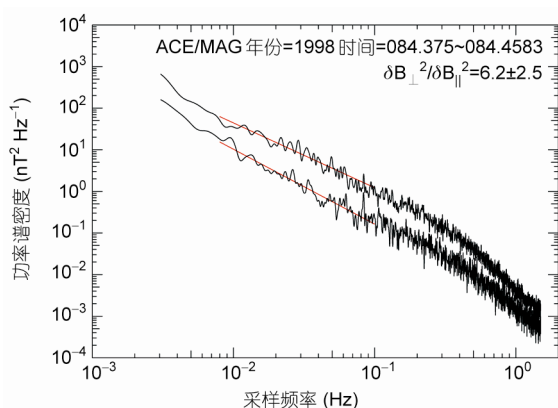


图 13 行星际磁场的功率谱
波的能量主要集中在低频段

深, 又提出了波粒非共振相互作用机制^[61~69], 其中包括分数共振引起的离子热化, 以及图 15 所示的非共振投掷角散射引起的离子热化^[64].

2.3 磁通量转换与输运

无论是日冕仪对 CME 的成像观测数据还是局地的 ICME 观测数据, 都已表明大部分 CME 的核心结构是具有螺旋磁场位形的磁通量管(Flux Rope, 图 16). 这类结构很容易在 1 AU 处形成大的磁场南向分量区间, 从而造成地磁暴.

CME 中的磁通量管从哪里来, 什么时候形成的? 这是一个争论已久的问题. Qiu 等^[71]研究了若干个

CME-ICME 事件对, 利用光球层磁场和白光耀斑的观测数据推出了 CME 爆发过程中通过磁场重联转化的磁通量, 并根据 1 AU 处的局地探测数据利用 GS 二维外推方法^[72]获得了 CME 对应的行星际 MC 的环向和轴向磁通量. 比较研究发现 CME 爆发过程中重联的磁通量与 1 AU 处 MC 携带的环向磁通量具有很好的正相关, 且在数值上基本相当^[71](图 17), 从而说明组成 CME 磁通量管的绝大部分磁场是在爆发期间形成的. 虽然如此, 最新的研究工作却也表明 CME 在爆发之前很可能就已经存在了相对较小的核心磁通量管(图 18), 完整的磁通量管则是在它的基础上进一步形成的^[73].

形成电流片并发生磁场重联是磁通量转化的重要物理过程. 理论模型认为 CME 在爆发过程中主要涉及两个电流片, 一个在 CME 尾部垂直向下连接到低日冕(图 19(a))^[74], 另一个横越在 CME 上方(图 19(b))^[75], 这两个电流片发生的磁场重联对 CME 的影响是不同的. 前者将跨越在 CME 上方制约 CME 爆发的磁拱磁通量转化为 CME 磁通量管的环向磁通; 而后者则使得 CME 磁通量管的磁力线与其上方的磁拱磁力线对消, 使得它们的磁通量转移到了两边, CME 的磁通量管的环向磁通也因此而减少. 无论哪个电流片上的磁场重联, 都会减少 CME 上方的约束, 促使 CME 的爆发. 在观测上, 也确实发现了这些电流片存在的证据. 比如 Lin 和 van Ballegoijen^[76]首次从 LASCO 日冕仪的观测数据中分析并证实了 CME 尾部

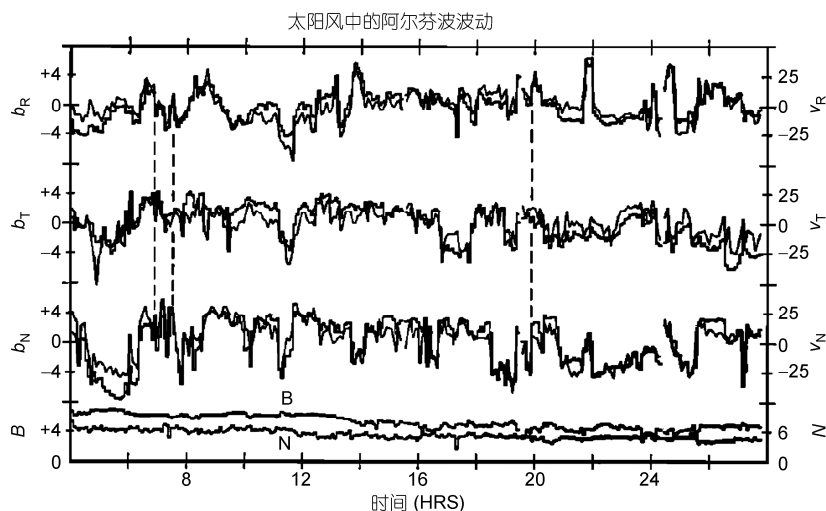


图 14 早期空间卫星观测到大振幅 Alfvén 波

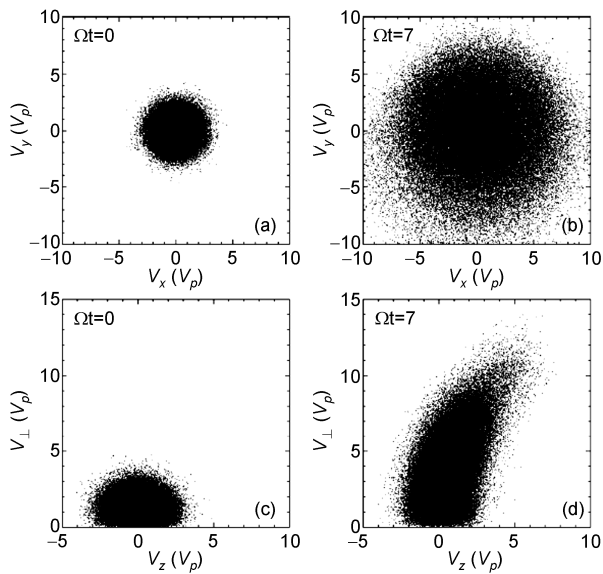


图 15 非共振投掷角散射引起的离子热化的理论计算结果

垂直电流片的存在(图 20); Zhou 等^[77]通过比较日冕的成像观测数据和行星际 1 AU 处的局地观测数据确认了 CME 上方横向电流片的存在, 这一电流片一直被拉伸到行星际空间中(图 21)。

在行星际空间传播的 ICME 被普遍认为是两个足点依旧连接在太阳上的磁通量管结构(图 16(b)). 这一物理图像是根据双向超热电子流的投掷角分布建立的^[78]. 对于扎根在光球层的开放磁力线来说, 太

阳上的各种小的爆发和扰动都可能产生向外运动的超热电子束流, 它们束流方向与磁场方向夹角一般为 0° 或 180° . 当超热电子流的投掷角分布同时在 0° 和 180° 附近出现两个较强的峰值时, 说明该磁力线很可能是两头都扎根在光球层上的闭合磁力线. 对 1 AU 处的行星际 MC 的研究表明, 绝大部分 MC 内部都有着明显的双向超热电子流(图 22)^[79], 说明 MC 有着较好的太阳磁连通性. 然而值得注意的是, 不是整个 MC 区间都存在双向超热电子流, 且 MC 的太阳磁连通性随日心距的增加而逐渐减弱. 统计研究结果显示在 1 AU 处 MC 的太阳磁连通性为 59% 左右, 而在 5 AU 处降为 54%(图 23)^[79,80]. 这可以理解为 ICME 在行星际空间的传播是其闭合磁力线逐渐打开的过程, 在 1~5 AU 处有近一半的 CME 磁通量管磁力线转化成了行星际磁场。

光球层和日冕频繁发生的磁场重联过程是行星际 MC 中闭合磁力线转化成开放磁力线的一个重要原因. 除此之外, 在行星际空间中磁场重联也有可能发生. Wang 等^[81]在分析磁云边界层的过程中就发现在磁云边界层中有明显的磁场重联观测特征(图 24). 当 CME 磁通量管的磁力线在 CME 向外传播的过程中一点一点剥离并转化为行星际磁场时, 我们可以想象 ICME 的尺寸和磁通量都会变小. 这可以解释在行星际空间观测到的不同持续时间、不同大小、不同强弱的 MC^[82,83].

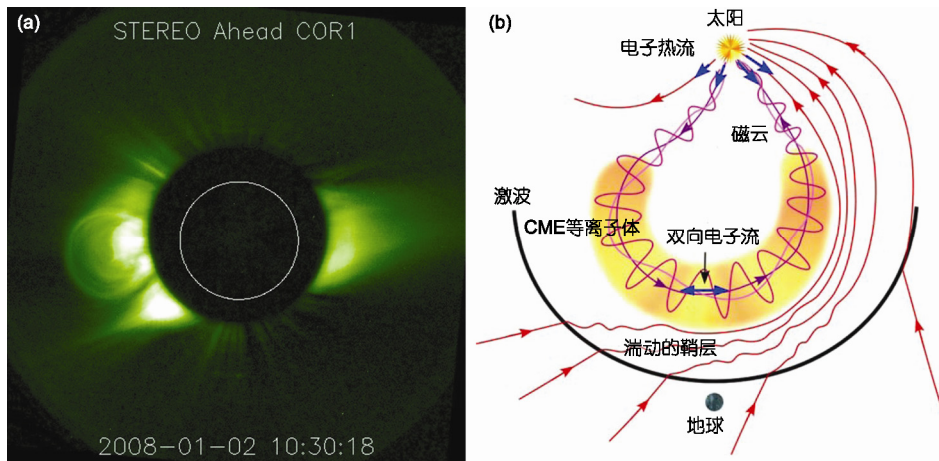


图 16 STEREO/COR1 观测到的一次 CME 具有明显的螺旋状磁通量管结构(a)和 ICME 在行星际空间中的示意图(b)

(a) 资料引自 STEREO/COR1 网站; (b) 资料引自参考文献[70]

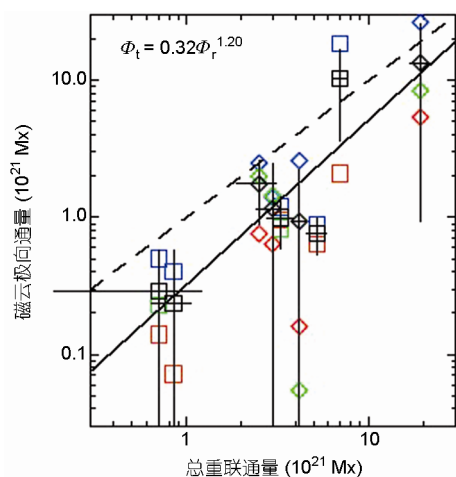


图 17 成像观测得到的 CME 过程中重联掉的磁通量与局地观测得到的 MC 极向磁通量的比较图
它们基本呈正相关

3 总结与展望

CME 行星际动力学过程的研究是空间物理领域中的一个重要研究方向, 上面的介绍也只是粗线条的描绘出了 CME 在行星际空间传播过程中的一些主要物理问题, 并不一定全面反映了当前研究的所有进展. 事实上还有很多重要的现象和物理过程没有提到, 比如多个 CME 在行星际空间中追赶、碰撞并相互作用这一更为复杂的物理过程, CME 驱动激波

在产生高能粒子形成射电暴等方面的研究.

空间物理的发展依赖于观测手段和观测技术的不断进步. 自 1958 年苏联第一颗人造卫星上天后, 空间探测就在不断的蓬勃发展. 目前日冕和行星际物理领域的卫星探测项目向着更细、更广和更多的方向前进. 在 2006 年以前最重要的对日冕进行成像观测的卫星是 SOHO, 它的视野在 2~30 个太阳半径, 但视角单一, 观测数据的时空分辨率也不够高. 2006 年以后, 美国 NASA 的 STEREO 卫星把视野扩展到了 1 AU 以外, 观测的视角也从原来的一个扩展到了三个, 观测数据的时空分辨率也提高了一倍以上. 到了 2010 年, NASA 的 SDO 卫星更是把太阳的全日面观测数据的时空分辨率再次提高, 达到每分钟 5 张图, 每张图 4096×4096 个像素点, 而且有着更多的波段的极紫外成像观测.

然而具有成像功能的科学卫星, 除 STEREO 外几乎所有的卫星都在日地连线上, 且在 1 AU 处, 而未来的发展方向是近距离观测太阳, 从日地连线之外如 L4/L5 点处, 监测太阳和行星际空间, 甚至更进一步脱离黄道面从高纬地区进行观测. 比如已列入规划的欧空局 Solar Orbiter 计划飞到 0.3 AU 处进行观测, 而欧空局的 Solar Probe Plus 则更希望飞到约 10 个太阳半径处进行探测. 可以说国际上几乎每 2~3 年就有一个空间卫星计划对太阳和日球层进行观测研究.

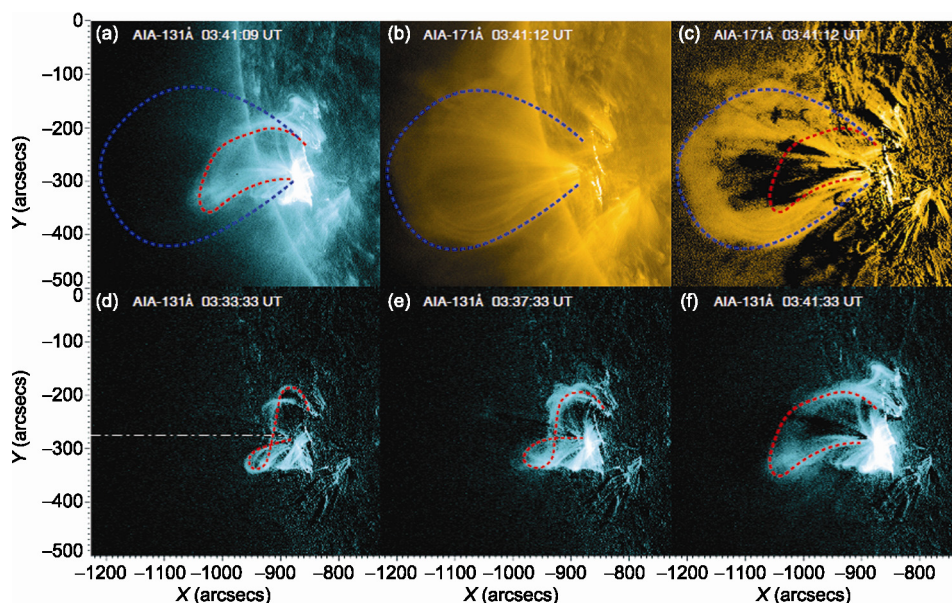


图 18 首次通过 SDO/AIA 的高温谱线成像观测发现 CME 爆发前存在的核心磁通量管

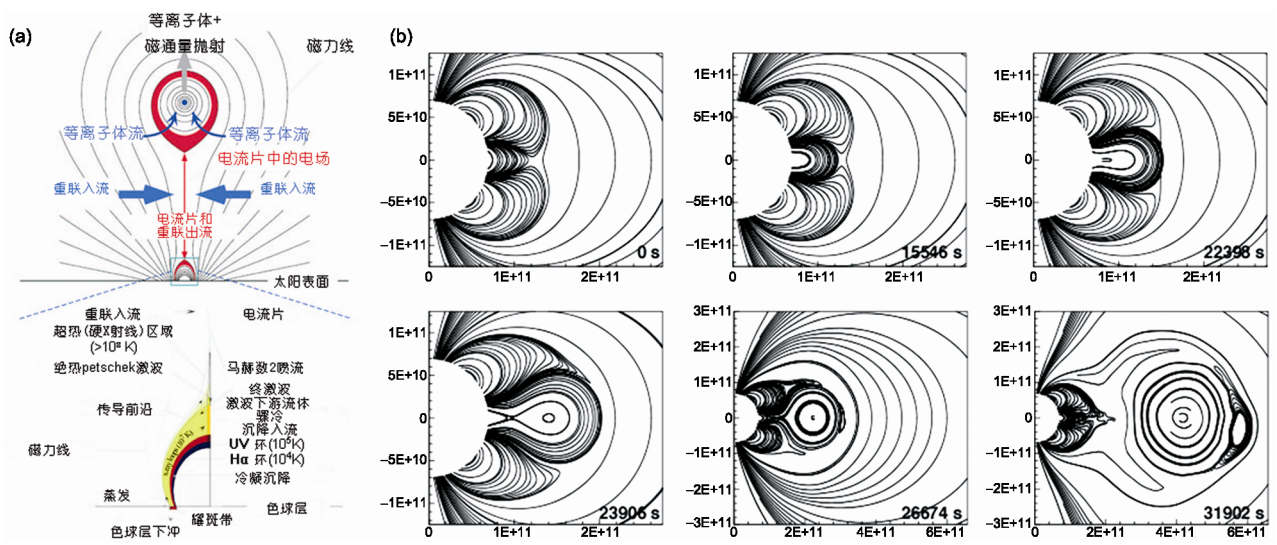


图 19 Lin 和 Forbes 的 CME 磁绳灾变模型示意图(a)^[76]和 CME 爆发(Break Out)模型示意图(b)^[77]

(a)中间垂直方向的红色双箭头线是电流片的位置. $1\text{E}+11$ 表示 1×10^{11} , 余同

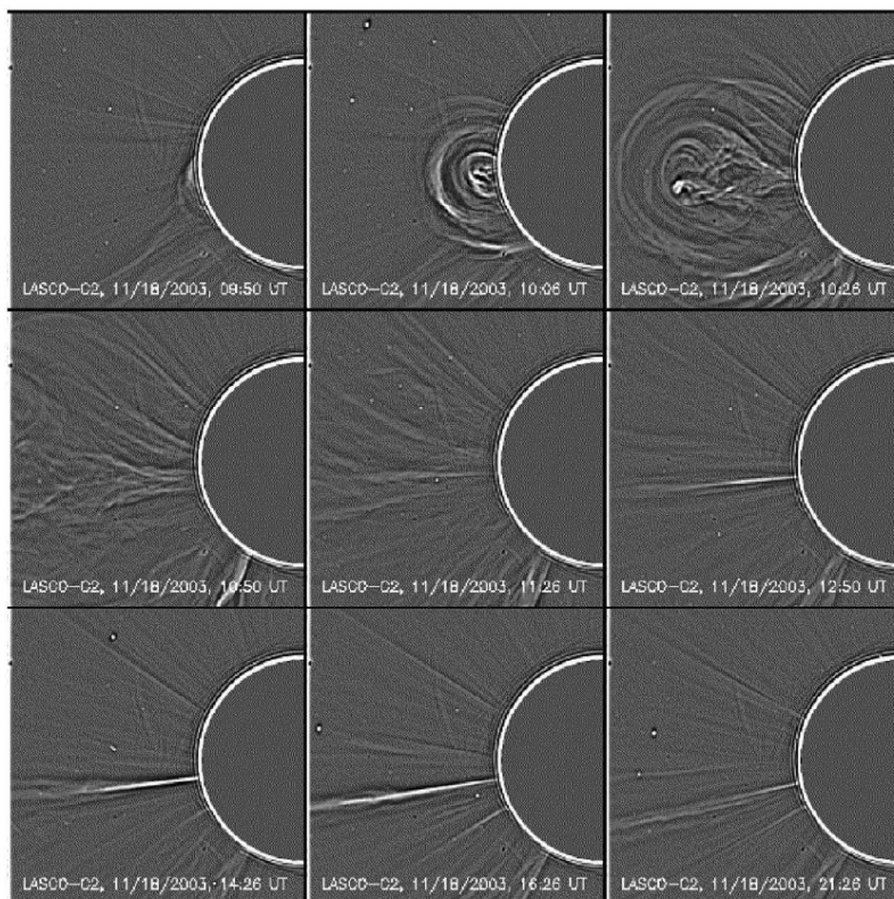


图 20 SOHO/LASCO 的差分图像

显示了 CME 尾部形成的一个电流片结构

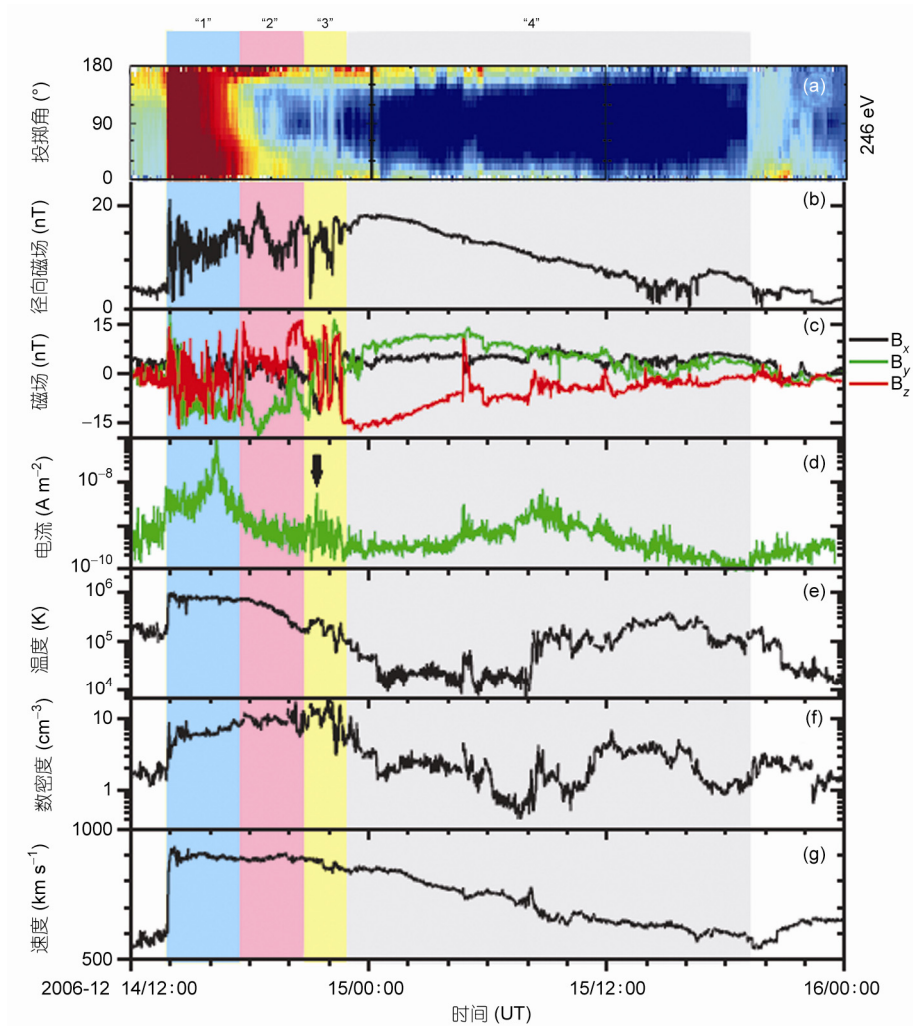


图 21 在行星际 MC 前方发现的双向超热电子流区域
粉红色标记的“2”区暗示着 CME 上方的横向电流片被一直拉伸到行星际空间

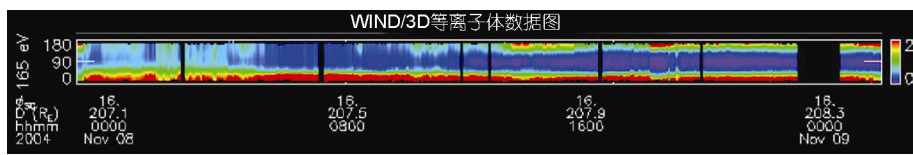


图 22 在 1 AU 处观测到的一次 MC 事件中超热电子的投掷角分布图
可看到有些时候是双向超热电子流,有些时候是单向

我国在空间科学的研究和探测方面起步较晚. 然而在改革开放的推动下, 随着经济实力的不断增强, 近 10~20 年, 我国在空间物理领域的科学研究水平有了显著的提高. 就 CME 行星际动力学这一研究方向来说, 20 世纪我国的 SCI 科学论文产出总量在全球排在第 11 位, 与巴西相当; 在 2000~2005 期间上升到了第 6 位, 已经超过了德国和芬兰; 在最近 5 年更

是排到了第 2 位, 仅次于美国. 虽然总量有着明显的上升趋势, 但论文的质量和原创性成果的数量还明显不如其他发达国家, 这一现状的根本原因在于我国尚缺乏自主空间探测项目和自主观测数据. 只有大力发展我国的空间探测技术, 包括空间有效载荷的研制能力, 才能使我国在空间科学的研究领域真正站到国际前沿.

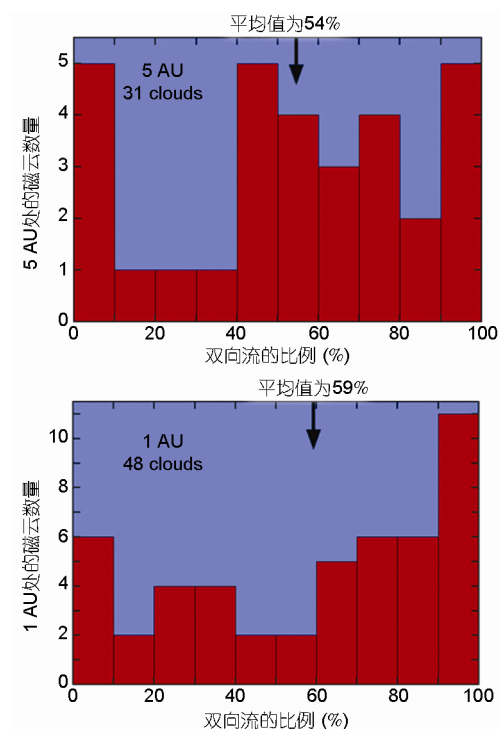


图 23 在 1 和 5 AU 处的 MC 的太阳连通性的比较图
随日心距的增加, 连通性降低

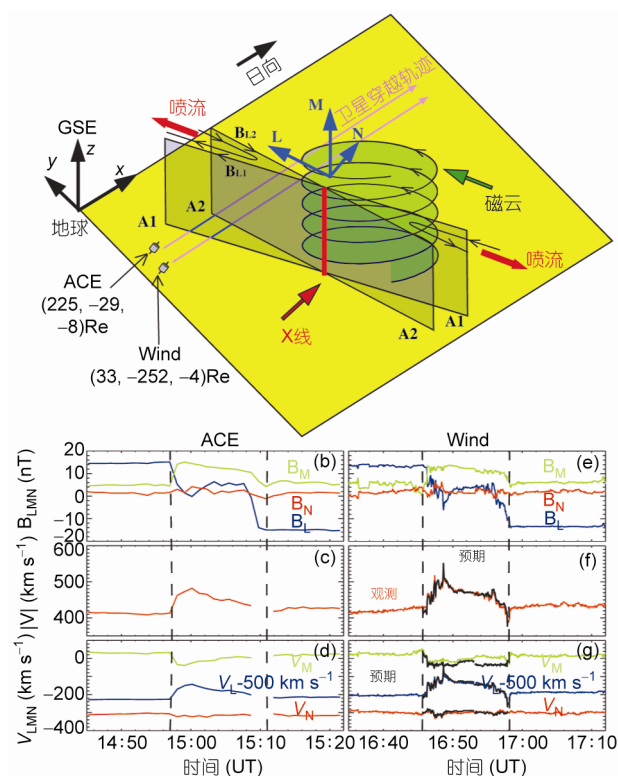


图 24 在 MC 边界层中发现的一次磁场重联事件

致谢 感谢文中涉及的所有卫星项目, 它们提供的观测数据使得人们对 CME 的行星际动力学过程达到了现有的水平。

参考文献

- 1 Hudson H S, Bougeret J L, Burkepile J. Coronal mass ejections: Overview of observations. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 13–30
- 2 Vourlidas A, Subramanian P, Dere K P, et al. Large-angle spectrometric coronagraph measurements of the energetics of coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2000, 534: 456–467
- 3 Lepping R P, Jones J A, Burlaga L F. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. *J Geophys Res*, 1990, 95: 11957–11965
- 4 Wang Y, Ye P, Zhou G, et al. The interplanetary responses to the great solar activities in late October 2003. *Sol Phys*, 2005, 226: 337–357
- 5 Vourlidas A, Howard R A. The proper treatment of coronal mass ejection brightness: A new methodology and implications for observations. *Astrophys J*, 2006, 642: 1216–1221
- 6 Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO). *Sol Phys*, 1995, 162: 357–402
- 7 St Cyr O C, Howard R A, Sheeley N R, et al. Properties of coronal mass ejections: SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998. *J Geophys Res*, 2000, 105: 18169
- 8 Wang Y, Chen C, Gui B, et al. Statistical study of coronal mass ejection source locations: Understanding CMEs viewed in coronagraphs. *J Geophys Res*, 2011, 116: A04104
- 9 Yashiro S, Gopalswamy N, Michalek G, et al. A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft. *J Geophys Res*, 2004, 109, doi: 10.1029/2003JA010282
- 10 Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. The STEREO mission: An introduction. *Space Sci Rev*, 2007, 136: 5–16
- 11 Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, et al. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI). *Space Sci Rev*, 2008,

- 136: 67–115
- 12 Harrison R A, Davis C J, Davies J A. Pre-CME onset fuses—Do the STEREO heliospheric imagers hold the clues to the CME onset process? *Sol Phys*, 2009, 259: 277–296
- 13 Bougeret J L, Kaiser M L, Kellogg P J, et al. WAVES: The radio and plasma wave investigation on the wind spacecraft. *Space Sci Rev*, 1995, 71: 231–263
- 14 Saito K, Poland A I, Munro R H. A study of the background corona near solar minimum. *Sol Phys*, 1977, 55: 121–134
- 15 Shen C, Wang Y, Ye P, et al. Strength of coronal mass ejection-driven shocks near the sun and their importance in predicting solar energetic particle events. *Astrophys J*, 2007, 670: 849–856
- 16 Burlaga L, Sittler E, Mariani F, et al. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations. *J Geophys Res*, 1981, 86: 6673–6684
- 17 Zhang J, Dere K P. A statistical study of main and residual accelerations of coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2006, 649: 1100–1109
- 18 Zhang J, Dere K P, Howard R A, et al. On the temporal relationship between coronal mass ejections and flares. *Astrophys J*, 2001, 559: 452–462
- 19 Zhang J, Dere K P, Howard R A, et al. A study of the kinematic evolution of coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2004, 604: 420–432
- 20 Gallagher P T, Lawrence G R, Dennis B R. Rapid acceleration of a coronal mass ejection in the low corona and implications for propagation. *Astrophys J*, 2003, 588: L53–L56
- 21 Kundu M R, White S M, Garaimov V I, et al. Radio observations of rapid acceleration in a slow filament eruption/fast coronal mass ejection event. *Astrophys J*, 2004, 607: 530–539
- 22 Qiu J, Liu C, Gary D E, et al. Hard X-ray and microwave observations of microflares. *Astrophys J*, 2004, 612: 530–545
- 23 Sterling A C, Moore R L. Slow-rise and fast-rise phases of an erupting solar filament, and flare emission onset. *Astrophys J*, 2005, 630: 1148–1159
- 24 Qiu J, Wang H, Cheng C Z, et al. Magnetic reconnection and mass acceleration in flare-coronal mass ejection events. *Astrophys J*, 2004, 604: 900–905
- 25 Chen Y, Hu Y Q, Sun S J. Catastrophic eruption of magnetic flux rope in the corona and solar wind with and without magnetic reconnection. *Astrophys J*, 2007, 665: 1421–1427
- 26 Cargill P J. On the aerodynamic drag force acting on interplanetary coronal mass ejections. *Sol Phys*, 2004, 221: 135–149
- 27 Feng X S, Zhang Y, Sun W, et al. A practical database method for predicting arrivals of “average” interplanetary shocks at Earth. *J Geophys Res*, 2009, 114: 013499
- 28 Vourlidas A, Wu S T, Wang A H, et al. Direct detection of a coronal mass ejection-associated shock in large angle and spectrometric coronagraph experiment white-light images. *Astrophys J*, 2003, 598: 1392–1402
- 29 Cliver E W, Kahler S W, Reames D V. Coronal shocks and solar energetic proton events. *Astrophys J*, 2004, 605: 902–910
- 30 Emslie A G, Kucharek H, Dennis B R, et al. Energy partition in two solar flare/CME events. *J Geophys Res*, 2004, 109: A10104
- 31 Gopalswamy N, Yashiro S, Krucker S, et al. Intensity variation of large solar energetic particle events associated with coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2004, 109: 010602
- 32 Yermolaev Y I, Yermolaev M Y, Zastenker G N, et al. Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: A review. *Planet Space Sci*, 2005, 53: 189–196
- 33 Webb D F, Cliver E W, Crooker N U, et al. Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms. *J Geophys Res*, 2000, 105: 7491
- 34 Cremades H, Bothmer V. On the three-dimensional configuration of coronal mass ejections. *Astron Astrophys*, 2004, 422: 307–322
- 35 MacQueen R M, Hundhausen A J, Conover C W. The propagation of coronal mass ejection transients. *J Geophys Res*, 1986, 91: 31–38
- 36 Gui B, Shen C, Wang Y, et al. Quantitative analysis of CME deflections in the corona. *Sol Phys*, 2011, 271: 111–139
- 37 Shen C, Wang Y, Gui B, et al. Kinematic evolution of a slow CME in corona viewed by STEREO-B on 8 October 2007. *Sol Phys*, 2011, 269: 389–400
- 38 Wang Y, Shen C, Wang S, et al. Deflection of coronal mass ejection in the interplanetary medium. *Sol Phys*, 2004, 222: 329–343
- 39 Wang Y, Zhou G, Ye P, et al. A study of the orientation of interplanetary magnetic clouds and solar filaments. *Astrophys J*, 2006, 651: 1245–1255
- 40 Shen C, Wang Y, Wang S, et al. Super-elastic collision of large-scale magnetized plasmoids in the heliosphere. *Nat Phys*, 2012, 8: 923–928
- 41 Akmal A, Raymond J C, Vourlidas A, et al. SOHO observations of a coronal mass ejection. *Astrophys J*, 2001, 553: 922–934
- 42 Ciaravella A, Raymond J C, Reale F, et al. 1997 December 12 helical coronal mass ejection. II. Density, energy estimates, and

- hydrodynamics. *Astrophys J*, 2001, 557: 351–365
- 43 Liu Y, Richardson J D, Belcher J W. A statistical study of the properties of interplanetary coronal mass ejections from 0.3 to 5.4 AU. *Planet Space Sci*, 2005, 53: 3–17
- 44 Wang Y, Zhang J, Shen C. An analytical model probing the internal state of coronal mass ejections based on observations of their expansions and propagations. *J Geophys Res*, 2009, 114: 014360
- 45 Kumar A, Rust D M. Interplanetary magnetic clouds, helicity conservation, and current-core flux-ropes. *J Geophys Res*, 1996, 101: 15667–15684
- 46 Smith C W, Vasquez B J, Hamilton K. Interplanetary magnetic fluctuation anisotropy in the inertial range. *J Geophys Res*, 2006, 111, doi: 10.1029/2006JA011651
- 47 Belcher J W, Davis L. Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium, 2. *J Geophys Res*, 1971, 76: 3534–3563
- 48 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: 014914
- 49 Marsch E, Ao X Z, Tu C Y. On the temperature anisotropy of the core part of the proton velocity distribution function in the solar wind. *J Geophys Res*, 2004, 109: 010330
- 50 Liang H, Xiao C, Zhou G, et al. Alfvénic fluctuations in an interplanetary coronal mass ejection observed near 1 AU. *Plasma Sci Technol*, 2012, 14: 102–106
- 51 Ryan J M A, Axford W I. The behaviour of minor species in the solar wind. *J Geophys Res*, 1975, 41: 221–232
- 52 Hollweg J V. Alfvén waves in the solar atmosphere. *Sol Phys*, 1981, 70: 25–66
- 53 Marsch E, Goertz C K, Richter K. Wave heating and acceleration of solar wind ions by cyclotron resonance. *J Geophys Res*, 1982, 87: 5030–5044
- 54 Isenberg P A. Resonant acceleration and heating of solar wind ions: Anisotropy and dispersion. *J Geophys Res*, 1984, 89: 6613–6622
- 55 Cranmer S R. Ion cyclotron diffusion of velocity distributions in the extended solar corona. *J Geophys Res*, 2001, 106: 24937–24954
- 56 Gary S P, Goldstein B E, Steinberg J T. Helium ion acceleration and heating by Alfvén/cyclotron fluctuations in the solar wind. *J Geophys Res*, 2001, 106: 24955–24963
- 57 Tu C Y, Marsch E. On cyclotron wave heating and acceleration of solar wind ions in the outer corona. *J Geophys Res*, 2001, 106: 8233–8252
- 58 Hollweg J V, Isenberg P A. Generation of the fast solar wind: A review with emphasis on the resonant cyclotron interaction. *J Geophys Res*, 2002, 107: 000270
- 59 Vocks C, Marsch E. Kinetic results for ions in the solar corona with wave-particle interactions and coulomb collisions. *Astrophys J*, 2002, 568: 1030–1042
- 60 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: 9695–9702
- 61 Chen L, Lin Z, White R. On resonant heating below the cyclotron frequency. *Phys Plasmas*, 2001, 8: 4713
- 62 White R, Chen L, Lin Z. Resonant plasma heating below the cyclotron frequency. *Phys Plasmas*, 2002, 9: 1890
- 63 Voitenko Y, Goossens M. Cross-field heating of coronal ions by low-frequency kinetic Alfvén waves. *Astrophys J*, 2004, 605: L149–L152
- 64 Wang C, Wu C, Yoon P. Heating of ions by Alfvén waves via nonresonant interactions. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 125001
- 65 Lu Q, Li X. Heating of ions by low-frequency Alfvén waves. *Phys Plasmas*, 2007, 14: 042303
- 66 Wu C, Yoon P. Proton heating via nonresonant scattering off intrinsic alfvénic turbulence. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 075001
- 67 Lu Q, Chen L. Ion heating by a spectrum of obliquely propagating low-frequency Alfvén waves. *Astrophys J*, 2009, 704: 743–749
- 68 Wang C B, Wu C S. Pseudoheating of protons in the presence of Alfvénic turbulence. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 020703
- 69 Chandran B D G, Pongkitiwanichakul P, Isenberg P A, et al. Resonant interactions between protons and oblique Alfvén/Ion-cyclotron waves in the solar corona and solar flares. *Astrophys J*, 2010, 722: 710–720
- 70 Zurbuchen T H, Richardson I G. *In-situ* solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 31–43
- 71 Qiu J, Hu Q, Howard T A, et al. On the magnetic flux budget in low-corona magnetic reconnection and interplanetary coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2007, 659: 758–772
- 72 Hu Q S, Bengt U Ö. Reconstruction of two-dimensional structures in the magnetopause: Method improvements. *J Geophys Res*, 2003, 108: 009323
- 73 Zhang J, Cheng X, Ding M D. Observation of an evolving magnetic flux rope before and during a solar eruption. *Nat Commun*, 2012, 3: 747

- 74 Lin J, Forbes T G. Effects of reconnection on the coronal mass ejection process. *J Geophys Res*, 2000, 105: 2375
- 75 Antiochos S K, DeVore C R, Klimchuk J A. A model for solar coronal mass ejections. *Astrophys J*, 1999, 510: 485–493
- 76 Lin J, van Ballegoijen A A. Equilibrium and evolution in multipolar magnetic configurations resulting from interactions among active regions. *Astrophys J*, 2005, 629: 582–591
- 77 Zhou G P, Xiao C J, Wang J X, et al. A current sheet traced from the sun to interplanetary space. *Astron Astrophys*, 2010, 525: A156
- 78 Larson D E, Lin R P, McTiernan J M, et al. Tracing the topology of the October 18–20, 1995, magnetic cloud with $\sim 0.1\text{--}10^2$ keV electrons. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1911
- 79 Shodhan S, Crooker N U, Kahler S W, et al. Counterstreaming electrons in magnetic clouds. *J Geophys Res*, 2000, 105: 27261
- 80 Crooker N U. Counterstreaming electrons in magnetic clouds near 5 AU. *J Geophys Res*, 2004, 109: 010426
- 81 Wang Y, Wei F S, Feng X S, et al. Energetic electrons associated with magnetic reconnection in the magnetic cloud boundary layer. *Phys Rev Lett*, 2010, 105, doi: 10.1103/PhysRevLett.105.195007
- 82 McAllister A H, Knipp D J, Crocker N U, et al. Identification of solar drivers: The November 3–4, 1993, geomagnetic storm. *J Geophys Res*, 1998, 103: 26221–26233
- 83 Feng H Q, Wu D J, Zhao J K. Discussion on the identification of magnetic cloud boundaries using cloud natural coordinate system. *Chin Astron Astr*, 2007, 31: 146–163