

对地日冕物质抛射研究

宋丽敏^{1,2} 张 军¹ 杨志良² 汪毓明³ 汪景琇¹

(1. 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2. 北京师范大学天文系 北京 100875)

(3. 中国科学技术大学地球和空间科学系 合肥 230026)

摘 要

日冕物质抛射, 作为太阳大气中频繁发生的极为壮观的活动现象, 越来越受到太阳物理学家的关注。其中一类特殊的抛射事件——对地日冕物质抛射, 通常与大的地磁暴、行星际激波和高能粒子事件相伴生, 具有强烈的地球物理效应, 是影响空间天气的主要因素之一。概括了对地日冕物质抛射的研究现状, 重点介绍了与对地日冕物质抛射事件相联系的光球向量磁场演化的观测研究成果, 并由典型事件探讨了暗条爆发、耀斑等剧烈太阳活动和对地日冕物质抛射之间的密切关系, 提出了尚待解决的主要问题和进一步的研究方向。

关键词 对地日冕物质抛射 — 太阳活动 — 磁重联

分类号 P182.62

1 对地日冕物质抛射

大多数天文学家将日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejections, CMEs) 定义为 ‘天空投影平面内在日冕仪遮光板外所观测到的向外传播的日冕亮结构’。王水等人曾在“日冕物质抛射”一文中详细评述了近几年来日冕物质抛射研究的新进展^[1]。对于日冕亮度增长范围超过 140°(也有的作者认为是 120° 或 130°) 的日冕物质抛射则称之为晕状 CME。而晕状 CME 可初发于对着地球的可见日面, 沿着日地连线方向向地球传播, 也可以发生在不可见的太阳背面, 背离地球向外传播。对于起源于可见日面, 朝向地球方向传播的日冕物质抛射则被称为对地日冕物质抛射, 例如 2000 年 7 月 14 日“巴士底事件”中就有巨环状对地日冕物质抛射。图 1 是 LASCO/C2 观测到的这一特殊事件的图像, 可见其巨环张角超过 270°, 几乎环绕日面一周。图中心部分的白色圆环代表太阳, 暗色的圆形区域是 C2 的挡光板。图中的晕状亮结构是由日冕物质抛射中密度大大增加的电子对太阳光球辐射的汤姆逊散射造成的。因而日冕物质抛射亮度的增长就反映了被抛出的高温等离子体密度的增长。这种 CME 在行星际空间传播, 形成

特约稿 2001-04-13 收到

2001-11-21 收到修改稿

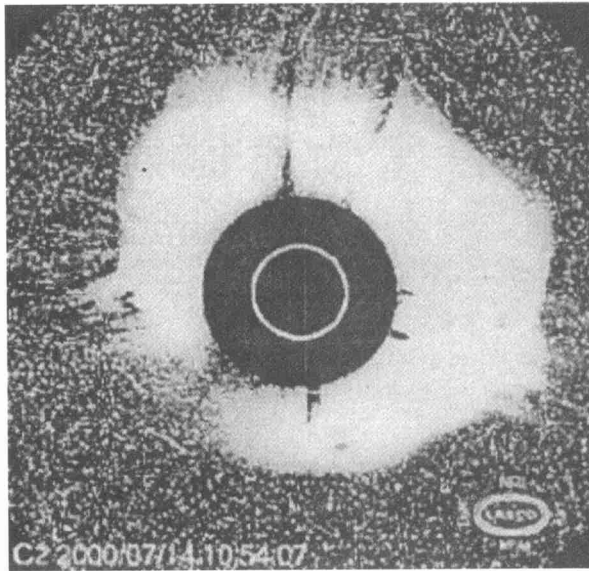


图 1 2000 年 7 月 14 日爆发的对地 CME(LASCO/C2)

中心的白色圆环代表太阳, 四周的白色晕状物为对地 CME

的磁云可直接撞击地球磁层, 其巨大的速度和可长期维持的强南向磁场使磁云与地磁场有效地相互作用, 产生强烈的地磁暴。例如, 最近的研究表明, 大多数与接近日面中心的太阳活动相伴生的对地 CME 发生后 3~5d 内, 在行星际空间有激波和磁云产生, 在地球上具有中等强度的地磁暴爆发^[2]。由此可见这类日冕物质抛射事件有强烈的地球物理效应, 是影响空间天气的主要因素之一, 对人类的生存环境有重要影响。

1982 年, Howard 等人报导了 P78-1 宇宙飞船上的 Solwind 日冕仪观测到的第一个对地 CME^[3]。随着空间探测仪器的发展, 自 1996 年以来, SOHO/LASCO 日冕仪已经观测到了许多对地 CME。由于这类 CME 爆发方向的特殊性, 其研究就具有特殊的意义。对地 CME 的研究重要性主要表现在以下几个方面: (1) 它们在日面上的源区能够被较好地测量; (2) 近地飞船对局地等离子体和行星际磁场的测量能够探求到对地 CME 沿中心轴方向的内部结构; (3) 它们对地磁活动的影响能够被较深刻地了解^[4]。

CME 的研究涉及广泛的物理问题, 如理想和耗散磁流体力学过程、磁重联、激波、粒子加速等, 是太阳、太阳风、行星际、磁层、电离层、中层和热层大气等多学科共同关心的研究领域。近 20 多年来对 CME 的观测分析、理论模型的研究及数值模拟都取得了不少结果, 但是其起源和演化过程至今尚不清楚。比较肯定的是 CME 不仅是一种瞬变现象, 而且其产生与大尺度磁场的重组有关^[5]。越来越多的太阳物理学家意识到, CME 的研究, 特别是对地 CME 的研究, 在太阳物理和类太阳恒星研究中非常重要, 对其细致地研究不但能从根本上改善人类对空间天气的预报能力, 而且对于我们理解广泛的天体物质抛射过程有重大意义。

2 对地 CME 的空间观测研究

X 射线直接由日冕热等离子体产生。Yohkoh 卫星上软 X 射线望远镜 (Soft X-ray Telescope,

SXT) 可得到较高温范围内 ($\geq 2.0 \sim 3.0$ MK) 的全日冕动力学图像^[6]。其观测已表明至少部分抛射物质在其向外运动期间能够在 X 射线波段被探测到, 而且对地 CME 发生时日冕区出现大范围 X 射线辐射减弱 (dimming)。这种变暗的典型时标为 1h, 通常持续几天。其时标的演化快于日冕中典型的辐射致冷时标 (几 h)。这表明由膨胀或抛射造成的密度降低最有可能造成变暗现象^[7]。

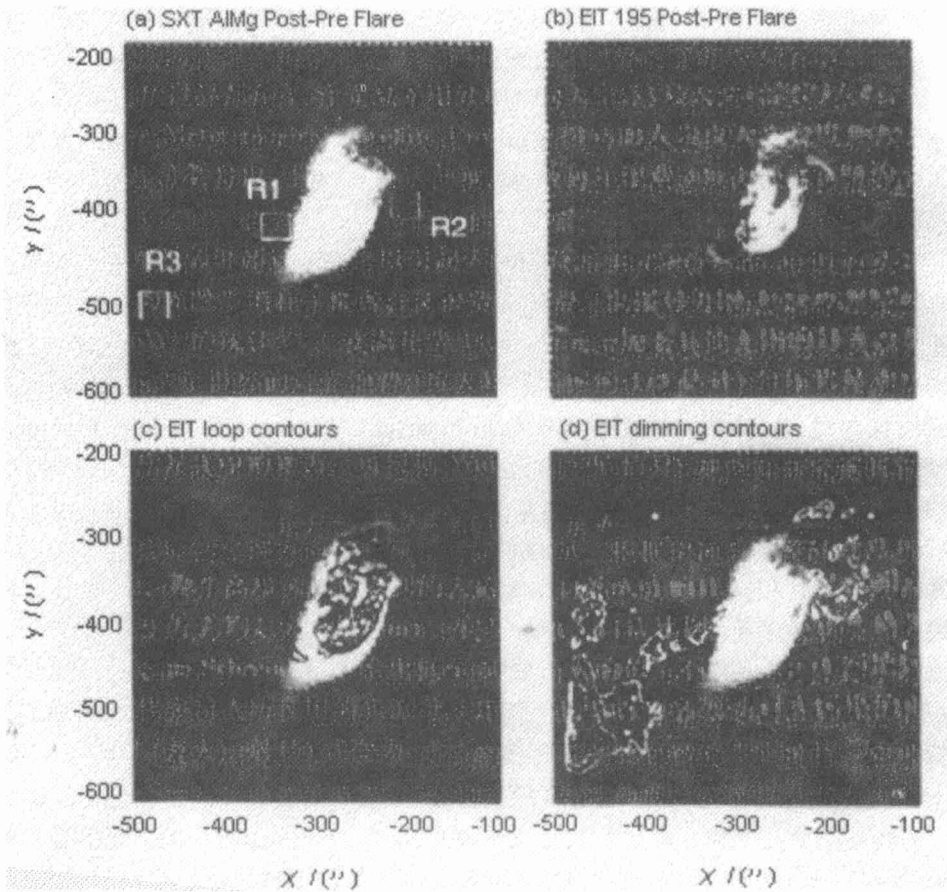


图 2 空间卫星观测到的与对地 CME 相伴生的变暗现象^[15]

(a)Yohkoh SXT 观测到的变暗现象。两个明显的暗化区 (R1, R2) 分别位于亮 cusp 结构对角线的两侧。相比之下, R3 区域的暗化不是特别明显。白色的小方框代表实际面积 $30'' \times 30''$ 。(b)SOHO/EIT 195\AA (Fe XII, $1.5 \times 10^6\text{K}$) 观测到的同一区域(对比(a))的变暗现象。(c)(d)中的轮廓图分别对应于图(b)EIT 辐射较强和较弱的区域, 将其叠加在 SXT 图像上, 可以明显看出: EUV 亮环被包络在 cusp 结构中, 而 EUV 暗化区的位置则与 SXT 暗化区的位置非常接近。

1997 年 4 月 7 日, Yohkoh /SXT 观测到与一个对地 CME 相伴生的变暗现象(见图 2a)^[8]。变暗在 CME 发生之前, X 射线辐射减弱(变暗)区域发生在爆发耀斑附近, 投影面积约 10^{20}cm^2 , 表明几倍于 10^{14}g 的物质被抛射掉。观测表明, 大多数被抛射的物质来自于耀斑前 S 形结构活动区端点的两个区域附近, 这些区域的 X 射线减弱在耀斑之后持续了三天。在耀斑亮度衰减阶段, 出现了“尖角”(cusp)结构。cusp 结构可能代表了爆发后重联或重组

的磁场。从质量估计看来,至少一部分 CME 质量通过这种变暗被探测到。这一事件首次在 X 射线图像中展现了伴随 CME 的日冕物质损失的直接证据。

对于对地 CME 事件, Hudson 等人分析了大量的实例后发现这种 S 状活动区 X 射线环系结构是对地 CME 日面源区的一个较普遍的特征^[9]。目前人们认为这种日冕软 X 射线环表征的是活动日冕中的磁力线环。其中最重要的发现是,无论冕环的瞬变增亮还是大耀斑都普遍包含上述 cusp 结构,即一个倒“Y”型的上端开放、下端封闭的磁场结构发生在耀斑环的顶部。这是反平行的开场磁力线重联驱动耀斑的理论模型所要求的基本磁场位形^[10]。Yohkoh 的观测还表明, cusp 结构外边缘的磁环具有更高的温度,超过 10^7K ,进一步支持了环顶的磁重联是耀斑能量来源这一观点。Masuda 等人又在软 X 射线耀斑环顶首次发现了脉冲式的硬 X 射线源,它本身可能是磁重联的产物或磁重联中产生的等离子体喷流与封闭环顶相互作用的高温区^[11]。

1995 年 12 月美国宇航局 (NASA) 和欧空局 (ESA) 联合发射了太阳和日球观测台 (Solar and Heliospheric Observatory, SOHO) 卫星,其上所载的广角分光日冕仪 (LASCO) 是由三架日冕仪组成的光学系统,可对高层日冕大、小尺度和开、闭位形进行观测,从而获得 CME 内部有关密度、温度和速度等信息。由于其较高的灵敏度和宽广的动态范围,SOHO/LASCO 可以更有效地观测到 CME^[12]。远紫外 (EUV) 成像望远镜 (Extreme-ultraviolet Imaging Telescope, EIT) 可提供与日冕物质抛射相关的过渡区和低日冕区的动力学图像^[13],得到 CME 初发和早期的资料,再结合 LASCO 的观测结果,就可以描绘出 CME 完整的演化图像。迈克尔逊多普勒成像仪 (MDI) 则提供了全日面磁场的系统观测^[14]。由于不受大气视宁度 (seeing) 的影响,其磁图的时间和空间分辨率以及灵敏度是前所未有的,为我们研究 CME 日面源区的大尺度磁场演化提供了有力的工具。

发生在 1997 年 4 月 7 日的对地 CME 事件同时被 EIT 195\AA (Fe XII , $1.5 \times 10^6\text{K}$) 观测到 (如图 2b,c,d)^[15]。观测表明,在发生软 X 射线辐射减弱的同一区域也同时观测到远紫外波段的辐射减弱,并且这种减弱与活动区耀斑环的远紫外发射增亮同时发生。EUV 波段观测到的变暗现象暗示与对地 CME 伴生的磁不稳定性延伸到了较冷的日冕低层。进一步支持了 Yohkoh/SXT 的研究结论,即日冕暗化更可能由密度降低 (或体积膨胀) 而不是日冕等离子体中温度的变化而引发的,而这种密度降低可能是 CME 磁通量绳爆发模型的关键特征。

此外,这种与 CME 相伴生的 EIT 暗化 (dimming) 现象可能随时间传播到很大的范围,类似于某种波动的传播,称之为“EIT 波”。按照快波模式,理论上,与另一种波——“Moreton 波”比较,EIT 波的传播速度应较快。但是实际情况恰恰相反。最近,实测表明,EIT 波的传播速度为 $200 \sim 400\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,远远小于 Moreton 波 ($700 \sim 1000\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)。如何解释这一矛盾将是一个极富挑战性的课题。

3 对地 CME 源区磁场演化及动力学活动现象

经过近 20 多年的研究,现在人们普遍认为 CME 是由于日冕大尺度磁场的不稳定性或失去平衡而激发的。磁场在研究 CME 的触发机制及演化过程中占据了举足轻重的角色,其源区磁场的种种运动和演化激发了与之伴生的多姿多彩的太阳活动,这些活动本身和 CME

密切相关。只有清楚地了解 CME 源区复杂多变的磁场演化, 我们才有可能最终解决 CME 的爆发机制及其相关的许多重要问题。对地 CME 为人们研究 CME 日面源区磁场演化如何导致整体磁不稳定性 and 爆发式能量释放提供了唯一的机会。

光球向量磁场的结构及其演化是以磁场的拓扑奇性和磁场位形的非势性来描述和理解的。产生激烈活动的磁场总是包含磁场的奇点、拓扑分隔面、分隔线, 或准分隔面等奇异的拓扑结构。与这些奇异结构相联系的磁场, 表现出磁通量的浮现和对消、强烈的横场剪切、相反极性磁场的挤压和相互作用以及磁场螺度和电流螺度的变化等多样化的演化形态, 严重偏离磁场的最低能量位形, 即势场位形, 从而积累的可释放的自由磁能引发了对地 CME 及与之伴生的激烈太阳活动^[10]。

3.1 2000 年 7 月 14 日的 Bastille 日冕物质抛射

2000 年 7 月 14 日爆发了第 23 太阳周中最重大的一次太阳事件, 被称为 ‘巴士底 (Bastille) 事件’。接近日面中心的活动区 NOAA9077 在 10:03UT 出现 X5.3 级耀斑的同时发生了巨大的暗条爆发以及以 $1800\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度飞离太阳的全球尺度的对地 CME。这次 CME 引发的行星际激波造成地球上 16 日极为壮观的极光现象。国际核心刊物《太阳物理 (Solar Physics)》将以专卷发表对这一事件的系统观测研究成果。我国的太阳物理工作者在这方面也做了大量工作。

Zhang J 等人综合分析 SOHO、TRACE^[16] 和 HSOS(Huairou Solar Observing Station)^[17] 的观测资料并仔细研究了暗条和活动区磁场演化的细节后发现(见图 3、4), 在整个事件的发展过程中, 唯一明显的磁场变化就是发生在暗条附近多处的磁对消, 而且所有暗条中的初始扰动和 $\text{H}\alpha$ 初始增亮都发生在磁对消处^[18]。这一发现暗示发生在太阳低层大气中的缓慢磁重联(磁对消是其表现形式之一)是引发太阳大气整体不稳定性的极为重要的因素, 而正是这种不稳定性导致了重大太阳活动现象。这一分析结果具有重大意义, 它首次找到了在超级活动区内发生磁对消的证据并第一次向人们展示了磁对消和主要太阳事件之间的本质联系。

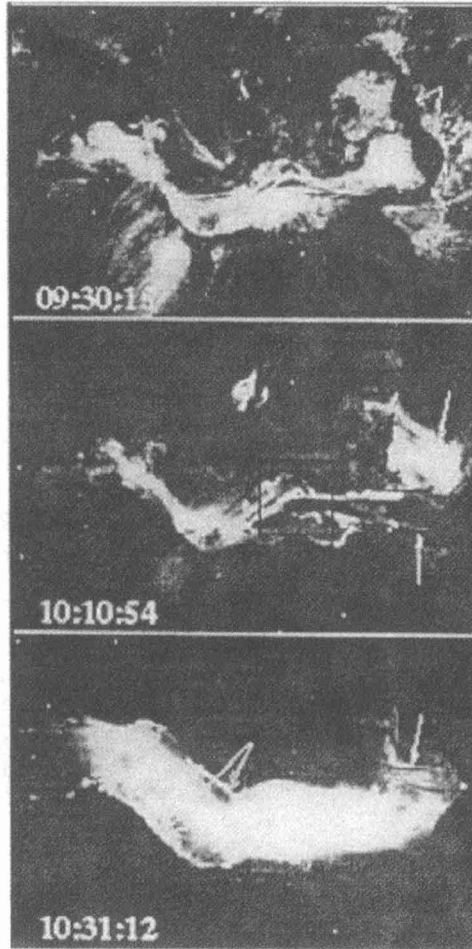


图 3 暗条演化时间序列图 (TRACE 195Å)^[18]

由图可见, 暗条由两个纤维状的结构组成 (箭头 1,2) 并存于折射点 (箭头 3)。暗条在 10:00 断裂, 接着出现一个亮的耀斑块 (箭头 4), 同时暗条爆发 (箭头 5)。耀斑块越来越大, 逐渐演变成由耀斑后环 (箭头 8) 连接的双带耀斑 (箭头 6,7)。

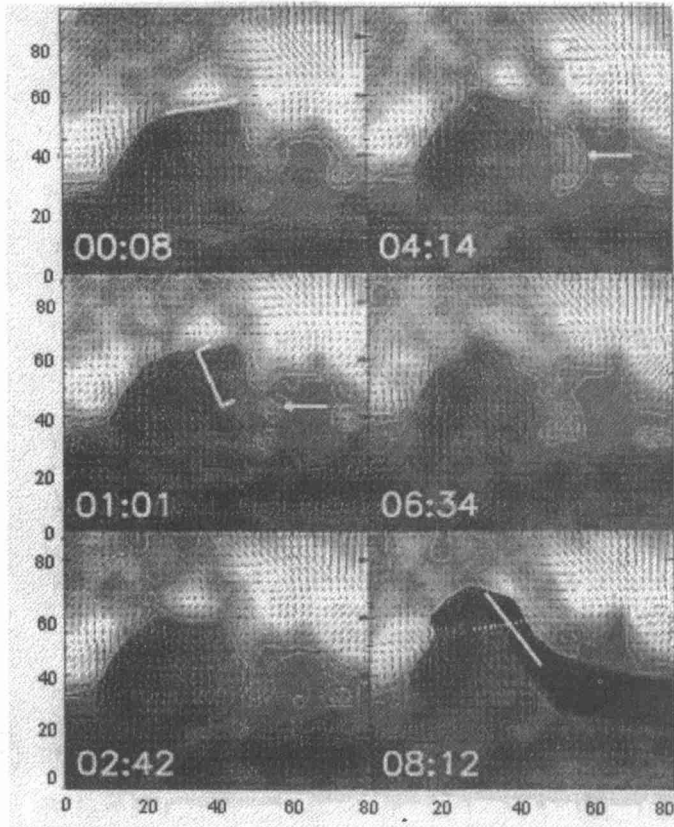


图4 图3方框区域的磁场演化图^[18]

灰度图代表纵向磁场的强弱,白色代表正极,黑色代表负极,等强度线分别表示的磁场强度为 ± 0.01 、 0.02 、 0.04 、 0.08T 。短线代表横向磁场,其长短表示横向磁场大小,走向代表横向磁场方向。图中白线表示磁中性线,由图可见其方向前后变化了约 70° 。箭头1、2所指为部分正极磁场区域,它们穿越磁中性线与负极磁通(方括号所示区域)相互抵消。

刘煜等人分析了此次事件中CME日面源区的大尺度黑子运动和大耀斑的关系^[19]。他们发现:(1)特殊的 δ 黑子位形和磁场快速连续的碎裂使活动区磁场长时间保持高度剪切状态。(2)一个黑子群的运动方向与暗条发生截断和激活的位置之间存在很好的对应关系。(3)快速浮现的磁通量系统的运动特性表明在黑子的运动和大耀斑之间存在良好的相关性。此外,邓元勇等人研究了Bastille事件日面源区磁场逐日的非势演化过程(7月11~15日)^[20]。其研究结果显示:沿着暗条通道及在通道附近区域,磁场剪切角发生巨大变化,这一演化过程在大耀斑之前至少持续了9h;旧的电流系统爆发,代之以新的弱电流系统,同样新的垂直电流螺度代替了旧的;源场减弱,因而在主要事件发生前,源场中的自由磁能密度减少。值得一提的是所有上述主要的非势演化都发生在磁通量大量损失的区域。颜毅华等人在非线性无力场的假定下,对这一活动区的日冕磁场结构进行了三维外推,第一次用数值方法展示了磁绳的结构(如图5)^[21]。分析显示,外推磁绳位于暗条磁中性线之上,多层不同走向的磁拱跨坐在其上。这种磁场结构有利于解释耀斑的能量释放过程,可能是磁绳的不稳定性触发了耀斑事件,而且出现在分米波段的漂移脉动结构被认为是日冕物质抛射初发阶段的表现。

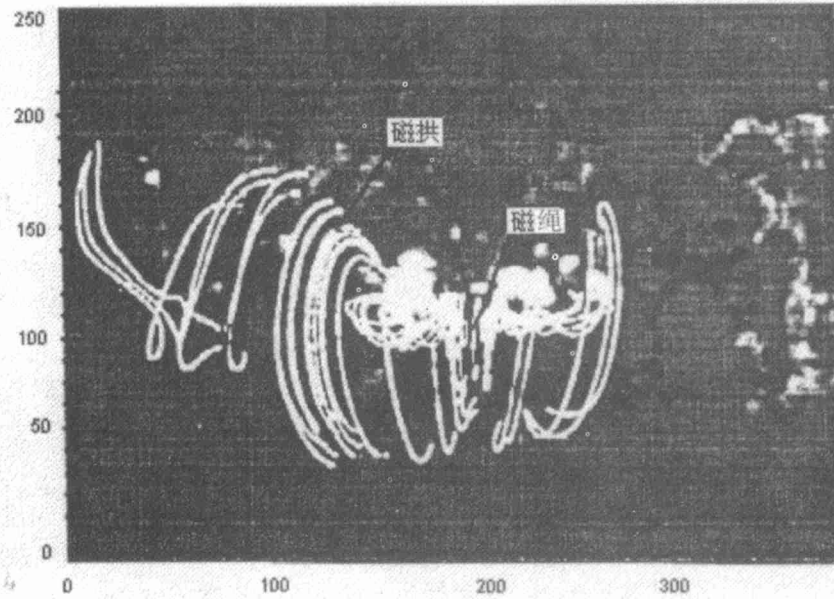


图 5 “巴士底事件”中的外推磁绳结构^[21]

背景的灰度图为光球纵向磁图, 白线为三维外推磁力线

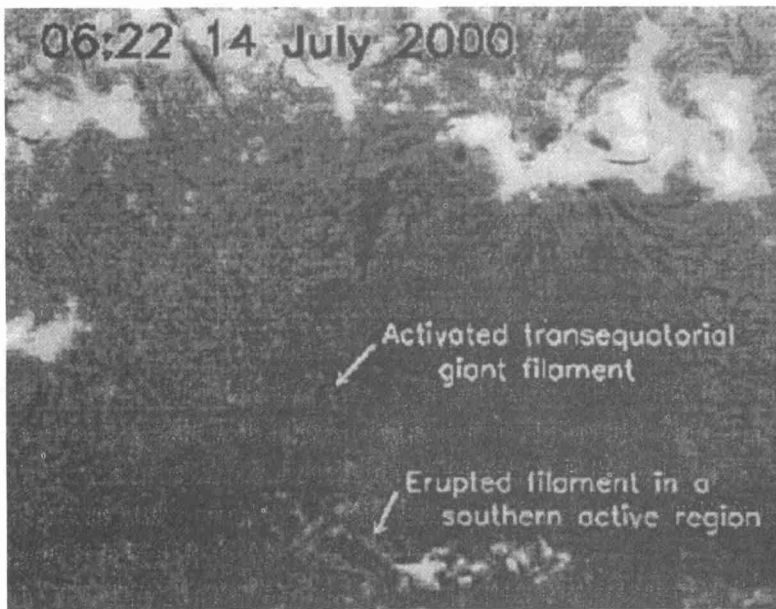


图 6 2000 年 7 月 14 日 06:22 UT 的怀柔 H α 单色像

图中右上方明显发亮的区域为活动区 NOAA9077, 下部的箭头由上至下分别指的是处于激活状态的跨赤道巨暗条和位于一南部活动区的爆发暗条。

最近, 汪景琇等人指出, 这一事件决不局限于一个活动区范围, 即不仅仅是活动区 NOAA9077 中的磁活动现象^[22]。作为证据, 他给出了 06:22UT 时的怀柔 H α 单色像 (图 6)。图中显示, 在活动区内爆发的暗条可能仅仅只是一个跨赤道的巨暗条的一部分。这个巨暗条在 Bastille 事

件前几 h 就已经被激活, 并出现部分爆发现象。连续的观测证实, 巨暗条中的部分物质流入了活动区内。在 Bastille 耀斑发生后, 巨暗条消失。位于太阳南半球另一活动区的暗条也与巨暗条的活动有关。他们认为 Bastille 日冕物质抛射事件是与包括南北两个半球的大尺度磁场结构及其相关的巨暗条活动相联系的。

3.2 对地 CME 与其它爆发现象(耀斑、暗条)的关系

暗条(日珥)爆发通常引发耀斑。而耀斑是最激烈的太阳活动现象之一, 通常在极短的时间标(即几 s~几十 min)内释放出 $10^{22} \sim 10^{25}$ J 的能量。在耀斑初始能量释放中, 电子和离子几乎同时被加速到相对论水平。被加速的粒子与背景等离子体相互作用, 产生紫外、X 射线和射电辐射的激烈增长, 有的耀斑中因有核反应而产生 γ 射线。理论分析表明, 只有磁能才能提供耀斑所需要的巨大能量。为了解释耀斑能量的快速释放, 太阳物理学家们发展了磁重联的概念和理论并将其运用到太阳物理其他研究领域。磁重联是伴有磁场拓扑灾变的磁能爆发式释放过程。迄今为止, 尚未得到磁重联的直接观测证据和细节。

近年来大量的地面和空间观测表明, 暗条爆发、耀斑通常与(对地)CME 相伴生。CME 通常在一个弱的软 X 射线爆发期间开始抬升, 而这种软 X 射线爆发一般发生在耀斑前几十 min。Harrison 早在 1986 年就已发现, 这种爆发起始于一个冕拱结构, 此结构与日冕物质抛射中的类环状结构有很好的空间对应关系。这暗示着冕拱的不稳定性可能是导致 CME 的直接原因。他还发现, 发生在 X 射线爆发之后的耀斑位于冕拱的一个足点处, 这表明与 CME 相伴生的耀斑和 CME 在空间位置上存在不对称性。这种不对称性在与耀斑相伴生的 CME 事件中是一种很常见的现象^[23]。20 世纪 90 年代, Harrison 等人又证实, CME 在时间上比与之相联系的耀斑早几 min 到 1h^[24]。这个出人意料的结论说明耀斑所释放的能量并不能加速 CME。CME 包含更大尺度的磁场变化。与耀斑中耗散式的能量释放不同, 日冕物质抛射中释放的能量是一种有序的成团等离子体的动能。发生 CME 的日冕内的等离子体声速约为 $350\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 而磁场扰动传播的阿尔文速度是 $700\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 1.1 个太阳半径处的物质逃逸速度是 $550\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。许多 CME 在这一高度的速度低于逃逸速度。这表明磁场和气压梯度必须不停地加速数十亿吨的 CME 物质, CME 不可能是爆发式的能量释放所驱动的。地面日冕仪和 Yohkoh 软 X 射线望远镜对 CME 的对比观测分析表明, CME 是发生在宁静日冕中的理想(或非耗散)的磁流体力学过程, 并不包括日冕等离子体的强烈加热。这种爆发加热只发生在 CME 后的耀斑过程中。

最近, Zhang J 等人在此基础上研究了 CME 与其伴生耀斑之间的时间演化关系^[25]。他们将日冕物质抛射的动力学演化过程分为三个阶段: 初发相, 膨胀相和传播相。初发相通常发生在耀斑开始之前。随后, 在速度-时间图上, CME 进入膨胀加速阶段。这一阶段与伴生耀斑的上升相符合得很好, 持续了几到十几 min, 并在接近软 X 射线耀斑极大时终止。此后, CME 经历了传播相, 以常速度或慢减速向外传播。他们的图像展示了 CME 传播速度和伴生耀斑强度之间的时间演化关系, 表明人们对 CME 和耀斑关系的认识又向前迈进了一步。

对于 CME 和暗条爆发之间的关系, 近来 Subramanian 和 Dere 以初发于可见日面的 32 个 CME 为样本, 分析了 CME 源区的情况^[26]。他们的统计结果显示, 在与 CME 有关的瞬变现象中, 41% 与活动区伴生并且无日珥爆发, 44% 与发生在活动区的日珥爆发相伴生, 另外 15% 与发生在活动区之外的日珥爆发相伴生。对于与活动区日珥爆发相伴生的 CME, 活动

区的典型寿命为 6~7 个月, 而对于无日珥爆发的活动区 CME, 活动区的寿命为 11~80 d 且伴随有时标为 6~7h 的小尺度磁浮现和磁对消。大量的统计分析表明, 暗条爆发与 CME 的关系比耀斑与 CME 的关系更密切。暗条爆发通常由局部不稳定性导致, 而这种局部不稳定性可能是触发 CME 整体磁不稳定性的直接原因。

尽管对日冕物质抛射与暗条(日珥)爆发、耀斑关系的研究一直在继续, 但是有关三者之间关系的清晰物理图像尚未建立。种种迹象表明, CME 与其它两类爆发现象之间并不存在简单的因果关系, 可以推测磁重联可能在其日面源区磁场演化过程中扮演了重要角色。Wang 和 Shi 曾对耀斑的能量释放过程提出了两步重联的图像^[27]: 第一步重联发生在光球或太阳低层大气, 其表现为光球磁图上的磁对消。这是一个缓慢持久的过程。慢的重联可能将磁能转化为热能和动能, 但更重要的是它将磁能传输到上层大尺度的日冕磁场中去。仅当一些关键条件满足时, 第二步重联发生。其快速猛烈的爆发特性可以直接造成瞬变太阳活动中的能量释放^[28], 包括 CME。

3.3 对地 CME 初发与大尺度磁场结构

对地 CME 被认为是由太阳表面的磁场演化驱动的。利用空间远紫外、紫外和 X 射线的观测资料, 我们能够证认对地 CME 的低日冕初发源区。无论在观测上还是在理论上, CME 初发的物理过程都是目前知之甚少的领域。而初发于可见日面的对地 CME 则给我们研究这一问题提供了新的机会。

最近 Low 从理论上提出, CME 是一种磁过程。由此过程, 大尺度日冕在 11 yr 活动周里系统地重新形成并导致整体磁场的极性反变^[29]。这种看法的中心点是在演化时标里, 扭转磁场整个从太阳低层大气上升到日冕, 形成了盔状冕流的暗腔。当盔状冕流动力学爆发时, 堆积在暗腔里面的磁场就与日冕物质一起离开日冕形成 CME。这相当于老的磁通量离开日冕, 而被属于新活动周的极性相反的磁通量所替代的过程。所以, CME 是日冕磁场重新形成的基本机制, 它把来自光球的磁通量和磁螺度及巨大的日冕物质一起抛射入行星际空间。依照这种看法, 每个 CME 对日冕磁场都有一点持久的贡献, 而在一个活动周里所有 CME 的累积效应就是抛去日冕和日球层的整体磁场, 为下一活动周新磁通量的浮现让出空间。目前这种以 CME 为中心的整体图像还只是根据理论模型的计算结果做出的设想, 还需要做定量的研究, 同时也需要实测的支持。但是这种整体图像吸引人的地方在于它把各种各样分散的观测资料与理论模型联系起来, 可以说是一个可试验的设想^[30]。

观测上, 基于对一组初发于可见日面的日冕物质抛射的观测研究, 汪景琇等人提出, 日冕物质抛射是某类太阳大尺度结构不稳定性发生、向外膨胀乃至部分抛入行星际空间的物理过程^[22]。这些大尺度磁场结构是太阳磁场的内禀分量。它们大体上可以分为两类。一类是连接太阳南北半球两个活动带的巨磁环。以 1997 年 11 月 4 日发生在超级活动区 NOAA8100 的事件为例, 对观测到的全日面磁场做理论外推(如图 7), 结果表明, 活动区 8100 与位于北半球的 8102 和 8099 两个活动区有磁力线连接, 这些磁力线组成巨磁环, EIT 暗化区正好在巨磁环下。这些横跨赤道、连接南北半球活动带的巨磁环很可能是一组相似日冕物质抛射的原初磁场拓扑或是 CME 的载体。另一类表现为巨暗条及与之相关的大尺度磁场结构。后者在光球全日面磁图和综合磁图上, 往往表现为排成两列的相反极性的黑子或谱斑磁场, 其磁中性线的长度一般超过 50 日面度, 被称为‘超级 A 结构’。图 8 是 1999 年 5 月 10 日 MDI 的全日面光球磁

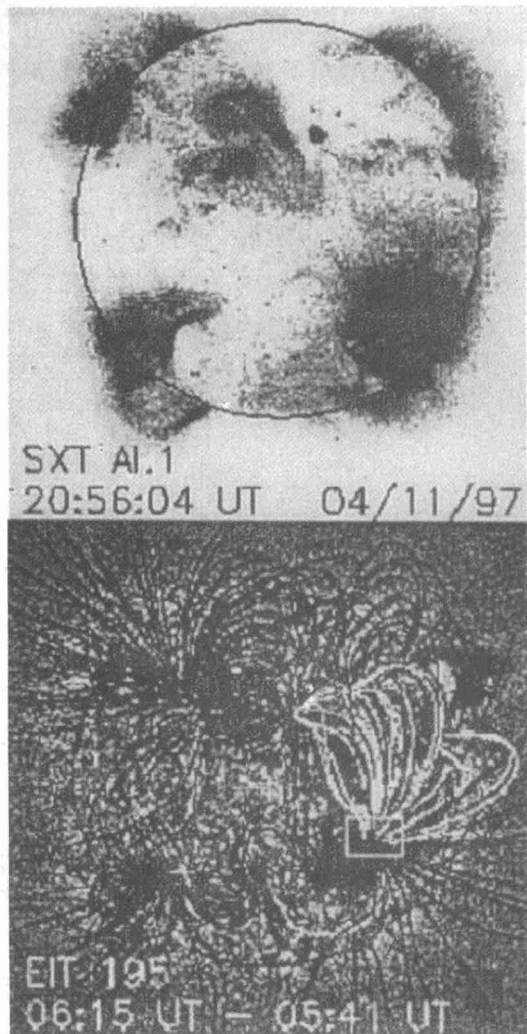


图 7 1997 年 11 月 4 日全日面软 X 射线 (上图) 和远紫外 (195\AA , 下图) 图像^[22]

其中在 EIT 图像上叠加了全日面磁场的外推磁力线。上图日面西南部的大块暗化区域为超级活动区 NOAA8100, 这个区域被认为是发生在当天的一组相似 CME 的日面源区。对比两图可以发现, 活动区 8100 与位于北半球的两个活动区有磁力线相联, 这些磁力线组成巨磁环 (即下图中的一组白色弧线),

EIT 暗化区正好位于巨磁环下。

(8) CME 中的粒子如何获得加速? 主要的加速机制有哪些?

(9) CME 与地磁暴的关系如何? 哪些物理参数决定了 CME 对近地空间环境的影响程度?

虽然, 自 SOHO/LASCO 投入工作以来, 已经观测到了数以百计的对地日冕物质抛射。

图^[31]。从图中我们可以清楚地看到这种特殊的大尺度磁场位形。虽然这些大尺度磁结构的认证是基于对个案的分析而得到的, 是否具有普适性还有待系统的大样本分析。但是日冕物质抛射是由大尺度磁场不稳定性所驱动的这一概念的提出确为我们理解其产生机制提供了新的思路。

4 尚待解决的主要问题及进一步研究方向

虽然人们对于 (对地)CME 的认识已经取得了一定的进展, 但是, 对其实质的了解还存在许多问题。以下仅列出几个主要问题:

(1) CME 的触发机制是什么? 与之相联系的磁浮现和磁通量相互作用有哪些特征?

(2) CME 的能量来自何处? 能量是如何储存和释放的?

(3) CME 与耀斑、日珥及其它太阳活动之间的物理关系是什么? 有何规律?

(4) 磁重联在 CME 事件中起什么作用? 与 CME 相联系的向量磁场演化和三维拓扑结构是怎样的?

(5) 小尺度的不稳定性或爆发过程与 CME 大尺度磁结构的演化之间有什么关系? 小尺度磁活动能否触发 CME? 怎样触发?

(6) CME 对日冕结构的长期演化有什么影响? 11yr 太阳活动周的变化和 CME 到底有什么关系?

(7) CME 在行星际空间是如何传播的? 它与行星际磁云、激波的关系怎样?

但是, 对于其日面源区认证、源区特征分析以及这些对地 CME 与太阳表面其它活动的相关性还缺乏系统的研究, 尤其缺乏的是对光球向量磁场结构和演化的知识。上述问题的解决在很大程度上与 CME 源区磁场的演化息息相关, 而对于这方面的研究才刚刚开始, 至今只有少数公布的观测分析展现了 CME 的初发机制及阐明 CME 源区表面的磁场演化。可以说任何试图将 CME 和其源区的磁场演化、局部太阳活动联系起来努力都是非常有意义的。

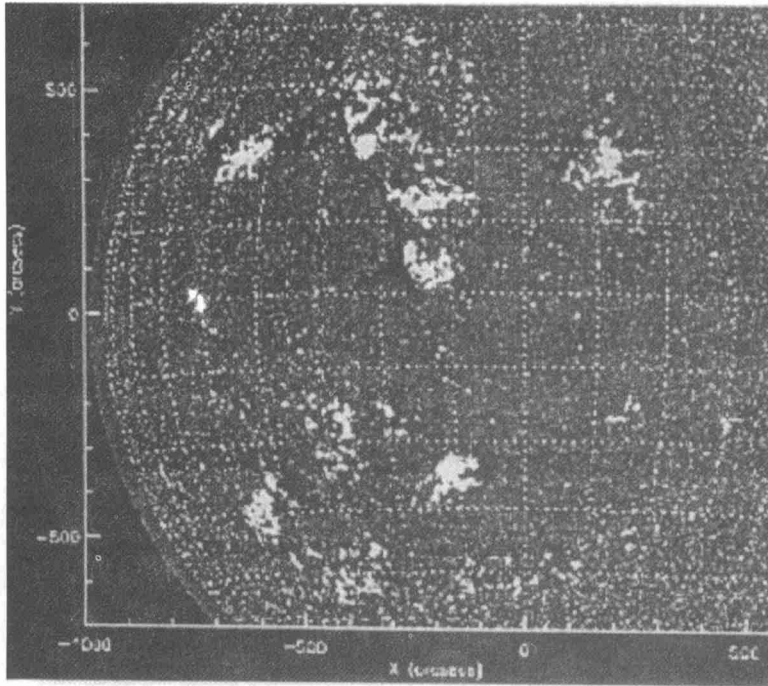


图 8 1999 年 5 月 10 日 SOHO MDI 全日面光球磁图^[31]

黑色曲线为“超级 A 结构”区域中的磁中性线

在这个领域内我国有一定的优势。位于怀柔的太阳多通道磁场望远镜可以为我们提供高分辨率 ($2 \sim 3''$) 的太阳光球矢量磁图, 太阳磁场的研究工作者们在矢量磁场的分析上也已经积累了丰富的经验。展望未来, 我国的太阳物理学家有望在这一领域做出更多有影响的工作。

参 考 文 献

- 1 王水, 李波, 赵寄昆. 天文学进展, 2000, 18: 192
- 2 Webb D F, Cliver E W, Crooker N U et al. J. Geophys. Res., 2000, 105: 7491
- 3 Howard R A, Michels D J, Sheeley N R et al. Ap. J., 1982, 263: 101
- 4 Webb D F et al. American Astronomical Society, Proc. of Solar Phys. Division meeting 32, 2000, 284
- 5 Simnett G M, Harrison R A. Solar Phys., 1985, 99: 291
- 6 Tsuneta S, Acton L, Bruner M et al. Solar Phys., 1991, 136: 37
- 7 Hudson H S, Acton L W, Freeland S L. Ap. J., 1996, 470: 629
- 8 Sterling A C, Hudson H S. Ap. J., 1997, 491: L55
- 9 Hudson H S, Lemen J R, St Cyr O C et al. Geophys. Res. Lett., 1998, 25: 2481

- 10 Wang J. *Fundam. Cosmic Phys.*, 1999, 20: 251
 11 Masuda S, Sato J, Kosugi T *et al.* *Adv. Space Rev.* 2000, 25: 1821
 12 Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J *et al.* *Solar Phys.*, 1995, 162: 357
 13 Delaboudiniere J-P, Artzner G E, Brunaud J *et al.* *Solar Phys.*, 1995, 162: 291
 14 Scherrer P H, Bogart R S, Bush R I *et al.* *Solar Phys.*, 1995, 162: 129
 15 Zarro D M, Sterling A C, Thompson B J *et al.* *Ap. J.*, 1999, 520: L139
 16 Handy B N, Acton L W, Kankelborg C C *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25: 248
 17 Ai G, Hu Y. *Publ. Beijing Astron. Obs.*, 1986, 8, 1
 18 Zhang J, Wang J, Deng Y *et al.* *Ap. J.*, 2001, 548: 99
 19 Liu Y, Zhang H. *Astron. Astrophys.*, 2001, 372: L1019
 20 Deng Y Y *et al.* *Solar Phys.*, 2001, in press
 21 Yan Y H, Deng Y Y, Karlicky M *et al.* *Ap. J.*, 2001, 551: 115
 22 汪景琇, 张军, 邓元勇等. *中国科学*, 2001, 增刊, in press
 23 Harrison R A. *Astron. Astrophys.*, 1986, 162: 283
 24 Harrison R A. *Astron. Astrophys.*, 1995, 304: 585
 25 Zhang J, Dere K P, Howard R A *et al.* *Ap. J.*, 2001, 559: 452
 26 Subramanian P, Dere K P. *Ap. J.*, 2001, 561: 372
 27 Wang J, Shi Z. *Solar Phys.*, 1993, 119: 143
 28 Wang J. *Space Sci. Rev.*, 2001, 95: 55
 29 Low B C. In: Crooker N *et al.* eds. *Coronal Mass Ejections*, Washington DC: AGU, 1997: 39
 30 章振大. *日冕物理*. 北京: 科学出版社, 2000. 311
 31 Wang J. Presented as an invited talk at COSPAR meeting, Beijing, 2001, 未发表

Earth-directed Coronal Mass Ejection

Song Limin^{1,2} Zhang Jun¹ Yang Zhiliang² Wang Yumin³ Wang Jingxiu¹

(1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100012*)

(2. *Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing, 100875*)

(3. *Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026*)

Abstract

Coronal mass ejections (CMEs), known as the most spectacular form of solar magnetic activity, are of great scientific significance in the fields of solar physics. As one special kind of CMEs, earth-directed CMEs are usually associated with severe geomagnetic storms and interplanetary shocks as well as high-energy particle events. They are main factors of space weather and have strong geoeffectiveness. This paper summarizes the most recent progress of earth-directed CMEs, and mainly focuses on the evolution of the photosphere magnetic field associated with them. The relationships between earth-directed CMEs and filament eruptions, flares and other solar activities are discussed. Finally, some open questions and future researches are presented.

Key words earth-directed CME—solar activity—magnetic reconnection