

日冕物质抛射

王 水¹ 李 波¹ 赵寄昆²

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学系 合肥 230026)

(2. 中央大学太空科学研究所 中坻 32054)

摘 要

评述了近几年来日冕物质抛射研究的新进展,包括 Yohkoh、SOHO、WIND、Ulysses、Geotail 和 POLAR 等飞船最近取得的观测结果,并由典型事件探讨日冕物质抛射与太阳活动、行星际扰动和地球空间环境变化之间的关系。进而介绍日冕物质抛射形成机制和传播过程的主要理论模型和数值模拟结果,提出今后日冕物质抛射研究中一些值得注意的问题。

关键词 日冕物质抛射 — 太阳活动 — 空间天气

分类号 P182.62

1 引 言

日冕物质抛射 (CME) 是太阳大气中一种频繁发生的爆发现象,其表现为在几分钟至几小时时间尺度内日冕结构发生明显变化并伴有可观测的物质抛射。20 世纪 70 年代初,OSO-7 卫星上的日冕仪首次证实太阳大气物质的瞬变抛射,随后 Skylab、P78-1、SMM、ISEE3、Helios 等卫星和飞船上的日冕仪及 90 年代升空的 Yohkoh、SOHO、Ulysses、Wind 等卫星上的仪器设备取得了大量的 CME 观测资料^[1]。20 多年来,观测分析、理论研究和数值模拟的结果表明,CME 不仅是一种瞬变现象,它还可能对日冕的长期演化(例如与 11 年太阳周有关的太阳磁场变化的日冕响应)起着重要的作用;同时它与许多行星际扰动有着密切的关系,并可引起地球空间环境的剧烈改变。CME 也是 90 年代兴起的空间天气研究中的重要内容。

CME 具有多种形态,但以环形结构居多。这种环形结构由三部分组成^[2]:亮的外环、暗腔和亮核。外环具有前沿和后缘,平均携带着 $10^{15} \sim 10^{16} \text{g}$ 的物质向外运动,其足点基本上位于日面固定位置。暗腔是有较强磁场的低密度区域;腔内亮核通常是平均携有 10^{14}g 等离子体的爆发日珥物质。一次典型的 CME 可携带 $10^{23} \sim 10^{25} \text{J}$ 的能量到行星际空间。

CME 的空间尺度在纬度方向可达 45° ^[3],而在经度方向上难以直接确定,但由物质抛射

以后的观测资料估计它可达 180° 甚至更大^[4]。观测资料还表明, CME 的出现率与太阳活动及其它太阳物理现象有密切的关系。在太阳活动低年, 整个太阳上 CME 的出现率约每天 0.2 次, 且主要出现在磁赤道附近的低日球层纬度处; 而在太阳活动高年平均可达每天 3.5 次并可延伸到高纬区域发生^[5]。CME 与日珥的关系较为密切, 约有一半的 CME 伴有 $H\alpha$ 活动。现在一般认为太阳耀斑不能产生 CME, 但耀斑和 CME 会在相近时间内出现。根据亮环前沿位置随时间的变化可以估计 CME 的运动速度, 在 $5R_\odot$ (R_\odot 为太阳半径) 范围内的外环前沿速度具 $50 \sim 2000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的宽广范围^[6]。按速度变化 CME 又可以分为两类: 一类起始速度较低, 但向外运动过程中存在加速过程, 其最大加速度可以达到 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 另一类起始速度较大, 不存在加速现象。统计结果表明, 前者往往伴有爆发日珥出现, 而后者常常伴有耀斑发生。近半数 CME 在日面附近的速度小于 1AU 处太阳风速度的极小值 ($\approx 280 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 表明这些 CME 在 $5R_\odot$ 以远的日球层中进一步被加速; 而低纬快的 CME 在与较慢的太阳风等离子体相互作用后被减速。CME 和太阳风之间的相互作用将导致丰富的行星际物理过程。

除白光日冕仪外, 在 X 射线和射电波段也同时可观测到日冕物质抛射现象。Skylab 取得的软 X 射线资料首先给出了与 CME 相关的热日冕结构的直接证据。SMM 和 GOES 卫星, 特别是近年来 Yohkoh 飞船获得了大量高质量的软 X 射线观测结果^[7]。软 X 射线资料与同时期的白光日冕仪及 $H\alpha$ 观测资料结合起来分析, 有助于探寻 CME 的形成机制。观测资料还表明, II 型及其它型的射电爆与日冕物质抛射也有着密切的关系^[8]。

日冕物质抛射进入行星际空间之后, 太阳风中携带 CME 的磁力线两端通常仍附着在太阳上, 至少有三分之一的 CME 近似为无力场磁通量绳结构^[9]。当磁通量绳中场强很高、等离子体 β 值很小时, 这种 CME 在行星际空间中即称为磁云。太阳风中 CME 的一般特征包括^[1]: 反向流动 (counterstreaming) 的超热电子和高能质子、反常低的质子和电子温度, 强磁场、低等离子体 β 值、平滑的磁场旋转和磁场强度的微弱变化。当然, 很少有 CME 具备以上全部特征。在快速运动的 CME 前方会驱动行星际扰动或行星际激波, 进而引起大的地磁暴^[10], 导致地球空间环境的剧烈变化。

2 SOHO 和 Yohkoh 的一些观测结果

2.1 SOHO/LASCO 的观测

1995 年 12 月 2 日美国宇航局 (NASA) 和欧空局 (ESA) 联合发射的太阳和日球层观测台 (Solar and Heliospheric Observatory, SOHO) 卫星, 4 个月后到达 Lagrangian 点附近的轨道, 即沿日地连线约距地球 $1.6 \times 10^6 \text{ km}$ 处。其轨道呈椭圆形, 半长轴和半短轴分别为 6.5×10^5 和 $2 \times 10^5 \text{ km}$ 。SOHO 卫星携带的广角分光日冕仪 (Large Angle Spectrometric Coronagraph, LASCO), 系由三套日冕仪组成的光学系统, 其观测视野分别为: $(1.1 \sim 3.0)R_\odot$ (C1)、 $(1.7 \sim 6.0)R_\odot$ (C2) 和 $(3.7 \sim 32.0)R_\odot$ (C3)。与以前卫星上的日冕仪相比, LASCO 具有更大的视野, 更高的灵敏度和信噪比, 更宽的动力学范围^[11]。

SOHO/LASCO 发现一些 CME 具有全球性质, 即在太阳两侧皆有物质抛射, 图 1 给出了 1996 年 1 月 15 日出现的一种复杂的 CME 的发展过程, 图中赤道方向 (E-W) 东西延伸到 $\pm 15R_\odot$, 极向 (N-S) 为 $\pm 7R_\odot$ 。可以看到西部 CME 的演化包含有 4 个结构: 首先在主环之前有一窄的亮环向外伸展, 06:54UT 时刚刚冒出 LASCO/C3 的遮盘 ($3.7 R_\odot$), 到 10:59UT

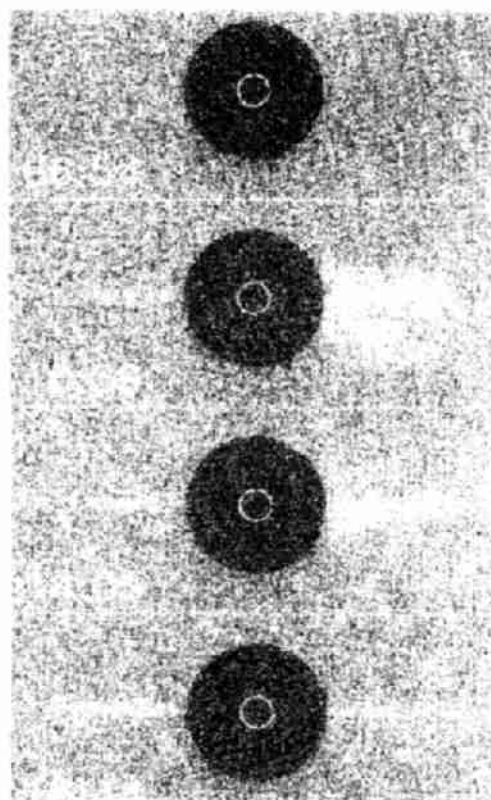


图 1 1996 年 1 月 15 日的日冕物质
抛射 (LASCO/C3 记录)^[11]

时位于赤道的北侧;其次有一个大的平顶的环,它可能与慢模激波有关;在事件的南部边界可看到精细的弧状结构;而在北部边界有卵形泡向外运动。LASCO 观测到的 CME 事件中,这种卵形泡经常见到,这表明可能存在磁力线被截断事件(disconnection)。由图 1 还可看出,在太阳西侧出现日冕物质抛射的同时,在东侧也观测到向外运行的密度增高区,其速度约 $600\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,即与西侧大环的速度相同。图 2 描绘了上述各种结构前沿位置随时间的变化,表明所有结构基本上维持常速度向外运动,没有发生加速过程。但从 LASCO 的大量观测结果来看,另一类起始速度很小(如 1996 年 2 月 3 日出现的 CME),仅为 $10\sim 20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,但其加速度达到 $7.6\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,当主环前沿抵达 $6R_{\odot}$ 附近时,速度已增至 $300\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外, LASCO 还观测到许多小的抛射现象,它们的净增加质量约为 10^{14}g 量级,其运动速度也分为慢起和快起两类^[12]。特别是快起事件似乎是相对侧 CME 的共轭事件,并与主抛射具有类似的速度剖面。产生这种全球响应的物理机制尚不清楚。

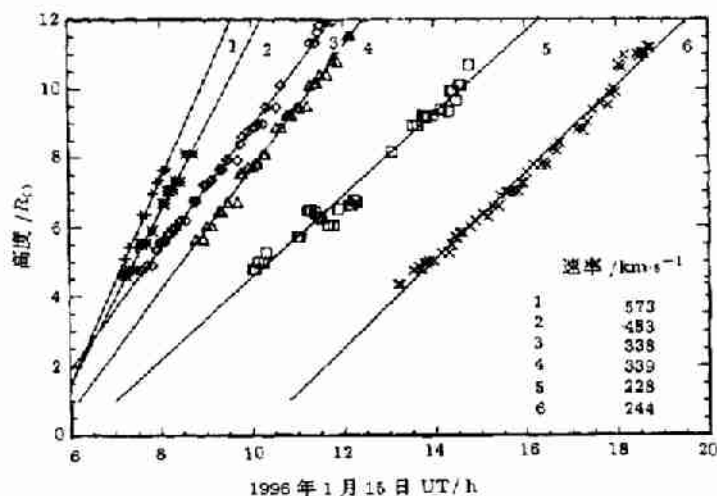


图 2 1996 年 1 月 15 日 CME 高度随时间的变化^[11]

- (1) 中心窄环前沿, (2) 平顶环前沿, (3) 环后内部暗条, (4) 沿南边界系统的前沿,
(5) 沿北边界卵形泡前沿, (6) 沿北边界截断事件中心

2.2 SOHO/LASCO 和 EIT 的联合观测

LASCO 还观测到一种晕状 (halo) CME, 它发生在日面中心附近, 并几乎在所有方向上沿太阳径向向外传播。SOHO 飞船上装有远紫外成像望远镜 (Extreme Ultraviolet Imaging Telescope, EIT), 可以得到日面中心附近 CME 起始和早期阶段的资料, 再结合 LASCO 的观测结果, 即可描绘出晕状 CME 完整的演化图像。EIT 选择了 4 组强 EUV 谱线的波段 (括号内为其峰值发射的相应温度): He II 303.7\AA ($8 \times 10^4\text{K}$) 和 Si XI 303.3\AA ($1.0 \times 10^6\text{K}$); Fe IX 171.0\AA 和 Fe X 174.5\AA ($1.1 \times 10^6\text{K}$); Fe XII 192.3\AA 、 193.5\AA 和 195.1\AA ($1.5 \times 10^6\text{K}$); 以及 Fe XV 284.14\AA ($2.0 \times 10^6\text{K}$)。1997 年 5 月 12 日 04:35UT 前后, 日面上发生一次爆发事件, 4:50UT 开始观测到低日冕中 CME 的几种迹象^[13], 其中包括一些大尺度波动^[14]。从 4:50UT 至 7:00UT, 出现从中心点 NOAA 活动区 8038 (23°N , 07°W) 向外的膨胀波面, 直至扰动占据到整个日面。这可能是 CME 作为扰动源产生的快模波。图 3 描绘了不同方向上扰动前沿的位置^[13], 可以看出在 5:15UT 之前扰动传播几乎是各向同性的; 但 5:15UT 时向北传播的扰动停滞在北部冕洞边界处。EIT 波动的起始与中性线附近变暗区域的出现是很一致的。当变暗区达到其极大尺度之后, 在日冕铁线中 (Fe IX/X 171\AA , Fe XII 195\AA , Fe XV 284\AA) 记录到一系列图像, 且 SOHO 上 Michelson-Doppler 磁场仪取得的光球层磁场资料表明爆发后拱 (post-eruption arcade) 限于高磁通量区域。爆发之后亮弧的形成是 CME 的又一个特征。

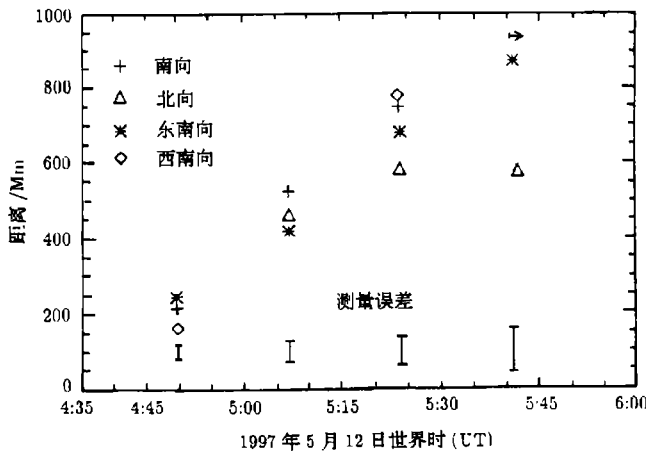


图 3 波阵面的距离—时间关系曲线^[13]

这次爆发事件以 $250\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的投影速率从太阳向外传播, 06:30UT LASCO/C2 记录到可识别的 CME, 到 08:06UT, LASCO/C3 开始观测到这个事件^[15]。拟合曲线给出在投影到天空平面上 CME 的运行速度近似为常数 (250 ± 20) $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 这也表明事件的源区靠近日面中心, 以此速度反推出这次事件发生在 04:30~05:00UT 之间, 与 EIT 观测到的爆发事件时间相吻合, 那么可以估计出这次 CME 前沿的真实速率约为 $600\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 Yohkoh 卫星的软 X 射线观测

X 射线发射直接由热日冕等离子体产生, 可由 X 射线资料分析距日面 $1.5R_{\odot}$ 以内日冕的性质, 进而确定发射源的位置。Yohkoh 卫星上软 X 射线望远镜 (Soft X-ray Telescope, SXT) 的带宽为 $0.3 \sim 3\text{keV}$ ($4 \sim 40\text{\AA}$), 可得到日冕的全球图像^[16]。Yohkoh 卫星获得了丰富的软

X 射线资料, 归纳起来有以下几种^[17]: (1) 膨胀的活动区环, 即一些活动区环并非保持静态而是以中等速率 ($10 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) 膨胀, 这种来自活动区的磁驱动的外流可对日冕整体结构产生影响^[18]; (2) 准直的软 X 射线喷流, 它们可能与浮现磁通量引起的磁场重联有关^[19], 其中某些伴有 III 型射电爆的喷流表明磁场是单极位形^[20,21]; (3) 耀斑喷射物, 这是一种伴有软 X 射线发射蓝移的向外的场向流动, 流动与耀斑相关, 并具有各种形式 (如低温的冲浪和针状物等)^[22], 其速度范围很宽; (4) 日面上的 CME 状抛射, 具有三区特征 (前缘、暗腔和悬浮暗条) 的膨胀结构; (5) 暗条爆发, 取得了暗条爆发及其后形成的长寿命拱弧的大量观测资料。

在预期出现 CME 的位置处, 软 X 射线日冕会迅速地明显变暗, 且此区域向外运动, 变暗区中物质量的下限估计为 $4 \times 10^{14} \sim 10^{15} \text{ g}$ 。这种 X 射线变暗可以出现多种形式。一些事例表明在耀斑拱的上空出现变暗特征; 有些事件中出现云状的变暗, 这种云存在大尺度的扭曲, 且从耀斑区向外运动并逐渐消失; 另外还有一种包络状 (“enveloping”) 的变暗事件; 以及出现瞬变的冕洞。由 X 射线和 K 日冕仪的观测资料分析表明, 近 2/3 的 CME 与瞬变 X 射线结构有关。对于发生在日面中心的晕状 CME, Yohkoh 软 X 射线望远镜发现伴有一种 S 状活动区 X 射线环系结构, 它将演变为一组亮环, 这可能是对耀斑的重联模式的支持^[23]。

3 对行星际和地球空间环境的影响

近几年的大量观测资料表明, CME 与行星际扰动有密切的关系, 并会引起地球空间环境的急剧变化。为了探讨 CME 对空间环境的影响, 科学家们对 1997 年 1 月的一次 CME 开展了综合研究。

3.1 1997 年 1 月 6~11 日事件的太阳源

1 月 6 日 17:34 UT SOHO 上的 LASCO/C2 日冕仪首先观测到 CME, 随后 C3 日冕仪也观测到了。这是一次从太阳指向地球的晕状 CME, 投影到天空平面上的前沿膨胀速度约为 $100 \sim 150 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 真实速率约为 $450 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 那么由 C2 资料反推出这次事件约在 14:00 UT 时发生在日面中心附近。这一天太阳表面相对平静, GOES 卫星记录到背景水平上小的 X 射线活动, H α 和 Yohkoh 软 X 射线望远镜记录则没有显著变化。但在日面中心的西部 NOAA8009 区域有一小而亮的磁通量浮现; 在 Air Force SN84 区域有西北 - 东南指向的磁极性反转线 (inversion), 并且在 SN84 区域的北部出现长寿命的暗条。由 1 月 6 日 CME 前缘的高度 - 时间曲线反推到日面, 表明这次 CME 的起始与 1 月 6 日太阳的弱活动性有关^[24]。观测资料还表明, 爆发日珥接近日球层电流片的底部, 那里可能为一冕流结构^[25]。

3.2 行星际效应

图 4 给出了 1997 年 1 月 9~12.5 日 WIND 飞船取得的磁场和太阳风参数^[25], 此时 WIND 位于地球向阳侧上游 $85 R_E$ 处 (R_E 为地球半径)。图 4 所示的这种行星际结构称为磁云^[26], 一般认为磁云与 CME 相关, 也有作者认为所有的磁云都与爆发日珥相关^[27]。图 4 表明 1 月 10 日 01:00 UT 首先观测到一个激波, 随后 1 月 10 日 04:45 UT 至 1 月 11 日 05 UT 期间为一磁云, 在磁云之后是共转流结构。磁云的特征表现为: 相当高的磁场强度 B 、磁倾角 (elevation) θ 从南向北平滑地旋转、较低的质子温度 T 、且电子温度 T_e 。与质子温度 T 的比值 T_e/T 较大。因此, 可将 B 、 T_e/T 增加, T 、 T_e 以及质子密度 N 降低作为磁云到达的标志。由于磁云

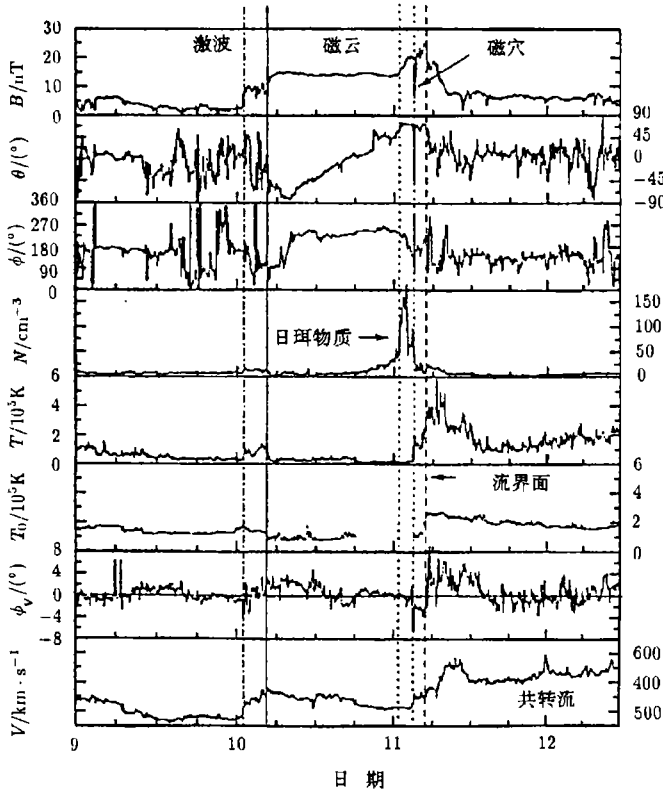


图4 1997年1月9~12.5日WIND飞船观测到的磁场和太阳风参数^[25]

在运行期间不断膨胀, 故其整体速率逐渐降低。

WIND 飞船上的等离子体分析仪还取得了1月10日~11日 ${}^4\text{He}^{++}$ 的观测资料^[25], 如图5所示。共转流中 ${}^4\text{He}^{++}$ 丰度($n({}^4\text{He}^{++})/n(\text{H}^+)$)约为3.5%, 与太阳风中的典型值4%相近。在磁云中, ${}^4\text{He}^{++}$ 丰度很低, 仅约1.5%。这种低的氦丰度可在日球层电流片附近观测到, 它与日冕中的冕流结构相关。这表明磁云中低的氦丰度反映了磁云与盃状冕流之间的关系。由图5还可看出, 共转流中 ${}^4\text{He}^{++}$ 的最可几速率($V_{\text{th}}({}^4\text{He}^{++}) = \sqrt{2kT_{\text{He}}/m_{\text{He}}}$)很高, 在磁云中 $V_{\text{th}}({}^4\text{He}^{++})$ 较低, 特别是在磁云的后部 ${}^4\text{He}^{++}$ 热速率相应的温度为 $T({}^4\text{He}^{++}) \approx 4000$ K, 且 $V_{\text{th}}({}^4\text{He}^{++})/V_{\text{th}}(\text{H}^+)$ 远小于1(在其他位置处近似为1)。然而, 在磁云后部观测到非常高密度的区域, 其中质子数密度达到 185cm^{-3} , 是太阳风平均密度 6cm^{-3} 的31倍; ${}^4\text{He}^{++}$ 也高达 18cm^{-3} , 氦丰度达到10%。这个区域的径向尺度仅0.02AU。Burlaga等人^[25]认为磁云后部的高密度区可能是日珥物质。他们发现太阳暗条的密度($\approx 1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$)与日冕的密度($\approx 5 \times 10^8\text{cm}^{-3}$)比值与31倍相近, 且高达10%的氦丰度与光球层氦丰度相近。高密度区与磁云的径向尺度之比(≈ 0.1)也和暗条高度($\approx 0.05R_{\odot}$)与日冕盃状冕流高度($\approx 0.5R_{\odot}$)的比值相近。这些数据都为高密度物质可能来自日珥提供了证据。但是, 并不是每次观测结果都能证实上述假说。有些作者提出日珥仅仅是跟随着磁云的压力脉冲^[28]。

CME驱动的激波可以加速电子, 进而产生II型射电暴。Cane等人^[29]指出所有产生II

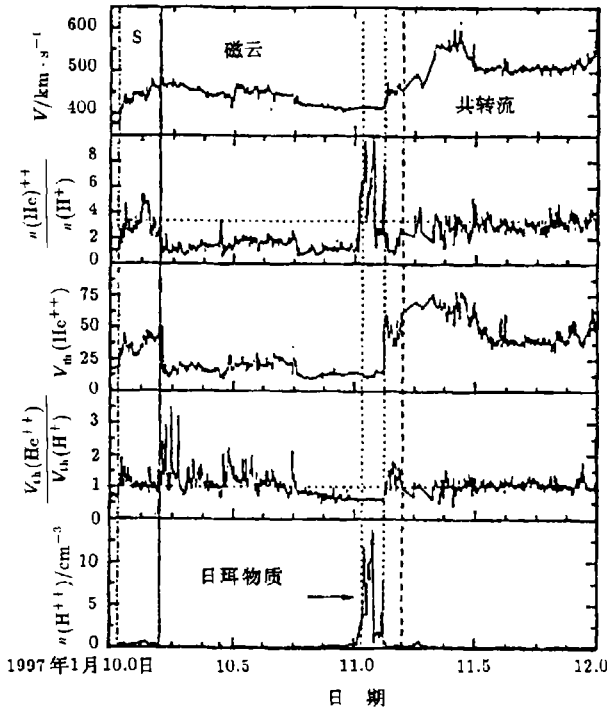


图5 ${}^4\text{He}^{++}$ 观测资料^[25]

型射电爆发的行星际激波都与 CME 相关, 且以伴有 II 型事件的 CME 最为巨大而剧烈, 其激波速率在 $500\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。由于 II 型射电暴频率为源区局域电子等离子体频率 f_p 或其谐波频率 $2f_p$, 可以由 II 型射电爆发的观测资料反推其源区的物理性质和动力学特征^[30]。1997 年 1 月 8~11 日 WIND 飞船以及 1 月 8 日和 12~14 日 Ulysses 飞船 (距太阳 4.73AU, 在日球纬度 18.7°N 、黄道纬度 25.6°N 、地球的 45.1°W 处) 皆观测到频率为 196kHz 的 II 型射电发射, 根据 WIND 和 Ulysses 同时的观测资料, 即可确定射电源区的三维位置。这些 II 型发射源于 1 月 6 日 CME 驱动激波与共转相互作用区 (CIR) 交界面处的局域高密度区^[31]。

3.3 对地球空间环境的影响

1 月 6 日 CME 经过行星际空间 (磁云) 到达地球附近, 引起地球空间环境的急剧变化。1 月 10 日 01:05UT 时刻位于日下点 (sub-solar point) 的 Geotail 飞船记录到与此 CME 相关的激波, 同时位于日下点附近的 GMS-4 卫星在 01:06UT 记录到相对论电子通量的急剧增加^[32]。Geotail 在 04:55UT 之前一直位于磁鞘中, 随后进入低纬边界层 (LLBL), 05:01UT 再次进入磁鞘。在 05:35~06:05UT 时段中飞船几次穿越磁层顶, 例如 05:35~05:39UT, 它位于磁层中, 表现为磁场呈北向, 离子密度较低 ($\approx 0.5\text{cm}^{-3}$) 和离子温度较高 ($\approx 5\text{keV}$)。05:39~05:42UT 它通过 LLBL 进入磁鞘边界层 (MSBL), 表现为磁场呈南向, 离子密度增加 ($\approx 10\text{cm}^{-3}$) 和离子温度降低 ($\approx 0.5\text{keV}$)。在 LLBL 中还观测到垂直于磁场的快速南向流动 ($\approx 500\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)。导致以上观测结果的起因, 一是行星际激波作用下引起磁层顶的压缩, 二是南向行星际磁场

分量导致磁层顶发生了磁场重联过程^[32]。此外,在 LLBL 中观测到不同于磁层热离子和磁鞘冷离子的第三类离子($\approx 1\text{keV}$),可能是由于磁场重联加热了磁鞘冷离子的缘故。这可以视为磁层顶处发生了磁场重联的一个间接证据。在同步卫星轨道处磁层对这次 CME 事件的响应主要表现为以下特征^[33]: (1) 太阳风密度增加引起磁层的全球性压缩,包括等离子体片密度增加和同步轨道处磁层顶穿越;(2) 强的伸展的(stretched)磁尾磁场,伴有亚暴活动性;(3) 磁层对流增长导致等离子体层变化;(4) 未察觉超浓的等离子体片;(5) 传播的等离子体片密度阵面。

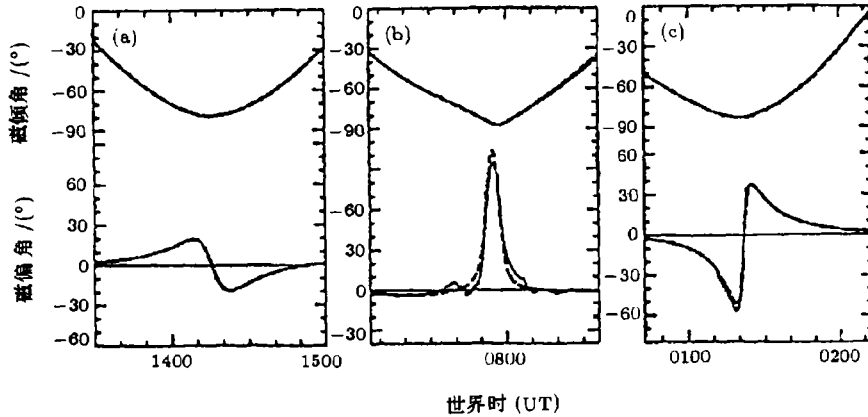


图 6 1997 年 1 月 9~11 日地磁场的倾角和偏角^[34]

实线为 POLAR 的资料,虚线为 IGRF 模式:(a) 1 月 9 日,北向行星际磁场和太阳风,(b) 1 月 10 日,强南向行星际磁场,(c) 1 月 11 日,强北向行星际磁场,高太阳风动压力

1997 年 1 月 10~11 日近似位于晨昏子午面中的 POLAR 飞船也记录到这次 CME 的影响。图 6 描绘了由 POLAR 飞船和国际地磁参考场(IGRF)得到的 1 月 9~11 日地球磁场倾角和偏角的变化,它反映了低空磁层对这次 CME 事件的响应。可以看出,在 3d 中观测到的磁倾角与理论值符合得很好,而磁偏角在正常的行星际磁场和太阳风条件下(9 日)或者强的北向行星际磁场及高太阳风动压力(11 日)时,观测与理论值还比较接近,而当出现强的南向行星际磁场分量时,将会出现较大的偏差。因此,磁场的偏离主要在局域的水平面中,即在垂直于局域磁场的方向中。那么,它主要是由场向电流引起的,南向行星际磁场分量 B_z 在确定场向电流的强度中起着主要作用。1 月 10 日晨扇 1 区中场向电流可达到 300 mA/m 以上^[34]。太阳风动压力增加对场向电流强度的影响不大。

地磁和极光活动对 1 月 6 日的 CME 也有着明显的响应。由 1997 年 1 月 9~11 日的行星际磁场和太阳风资料及日本京都地磁台的赤道环电流指数 Dst 资料可以看出,1 月 10 日 Dst 指数变成大的负值,表明这时候环电流的影响最大^[35]。除磁暴外,同时在低纬和高纬都观测到强的磁扰动,其峰值频率为 1、1.4、1.8 和 $2.2\sim 2.4\text{ MHz}$ 。这可能是由强的太阳风压力脉冲引起整个磁层可压缩振荡的结果^[36]。在此期间,POLAR 飞船上的远紫外成像仪(Ultraviolet Imager)还观测到各种全球性的极光结构^[37],在地面台站也观测到强烈的极光活动^[38]。在 1 月 10 日磁暴主相后期,SAMPEX(Solar, Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer)卫星和 3 个 GPS(Global Positioning System)卫星上的粒子探测器测量到 $0.4\sim 1.6\text{ MeV}$ 电子的快速增加^[39]。同步卫星的观测资料还表明^[40]相对论电子通量也有明显的增加。

CME 还会影响到地球的电离层状态。通过全球 GPS 网络的资料可以得到电离层总电子含量的全球分布 (TEC)，结果表明 1 月 10 日 16:30UT 在 Florida 和 Baja California 之间的美国南部 TEC 增加到其最大值，即相对于静日电离层 TEC 增加了 100% 以上^[41]。电离层中焦耳加热以及 E 层中中性风的作用可以使部分电磁能量耗散，电离层状态的改变不仅可与磁层之间相互作用，而且还能引起热层、中层甚至低层大气状态的变化。可以看出，CME 不仅仅是太阳大气中的物理现象，而且会对行星际空间和地球空间环境产生重要影响。

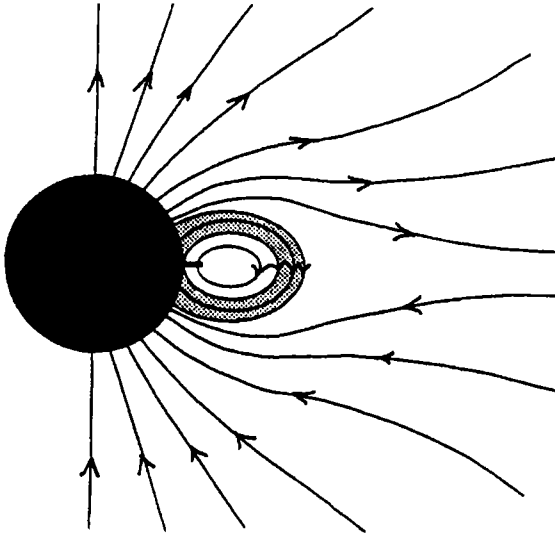


图 7 日冕物质抛射的初态磁场^[42]

4 物理模型

CME 的物理模型和驱动机制是人们长期以来热烈讨论而至今尚未解决的问题。早期认为，CME 是一种环形磁通量绳；后来将其视为壳状 (shell-like) 结构在天空平面中的二维投影；进而提出包含亮环、暗腔和悬浮日珥这三种结构的形态学模型^[42]，它可能与如图 7 所示的初始磁场位形有关。另有一些作者将其描述为二维的磁拱，光球层上磁力线足点的准静态剪切或扭折运动导致了磁拱的储能、上升和爆发^[43]。但分析表明，在半无限空间中，处于无力场状态的拱形磁场不足以通过光球层足点的剪切运动而将闭

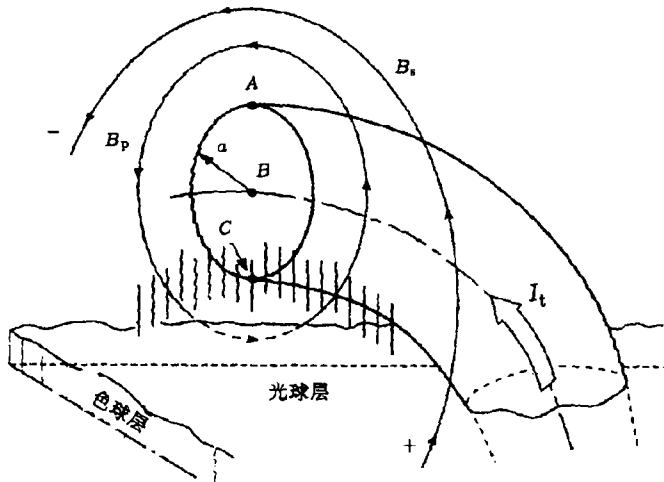


图 8 日珥-穴结构的模式^[46]

合的磁场线完全打开, 更无法同时供给 CME 带走的巨大能量^[44,45]。但是, 若无力场被刚壁限制在有限空间体积中, 其能量可以随着剪切的增强而无限地增长。在真实的太阳大气中, 处于非无力场中的等离子体的重量恰能起着类似禁锢磁场的刚壁的作用。无力场近似仅适用于冕底附近, 在较大的日冕高度处, 接近等温的日冕等离子体压力将起主要作用。因此, 图 7 所示的盔状冕流结构可以向行星际空间运动。

图 7 所示的磁场位形表示赤道附近有一个双极场, 其中含有完全闭合的磁环(图中闭合磁力线区)和一个垂直的日珥物质片(磁环底部实线所示)。闭合的磁环还有方位角方向的磁场分量, 形成赤道上空具有扭拧磁场的悬浮在日冕中的方位角方向的磁绳。真实日冕中磁绳的端点向下附着在背景磁场中, 图 8 给出了另一种便于分析讨论的日珥-穴结构模式^[46]。由图可以看到通量绳中心为一半径为 a 的小电流环, A 、 B 、 C 分别表示电流环的顶部(前缘)、质量中心和底部(后沿)。电流环外部是有局域平行于通量绳轴向的环向电流 I_t 产生的角向磁场。短线表示冷 ($T \leq 10^4\text{K}$) 的日珥物质。整个结构悬浮在背景磁场 B_0 中, 而通量管的足点固结在光球层上。可以通过考察磁通量管内等离子体元的受力情况, 来讨论通量管的运动学行为。结果表明^[47]: (1) 悬浮在自由边界的背景等离子体中的通量绳可以达到力学平衡; (2) 通量绳的运动取决于光球层以上环中总的角向通量 Φ_P 的变化, Φ_P 增加, 通量绳膨胀上升; Φ_P 不变, 则通量绳仅在其初始平衡位置附近振荡; (3) 在典型的日冕条件下, 平衡的通量绳对于腊肠模和扭折模是稳定的。由于问题的复杂性, 只能通过对受力情况的分析给予定性的讨论。较为真实的情况需要借助于数值模拟, 这将在下节中详细讨论。此外, 考虑到绝大多数日冕物质抛射是预先存在的日冕结构(如图 7 所示)失去平衡的结果, 研究大尺度日冕结构(如日珥、暗腔、盔拱等)的磁性质就具有重要的意义。Low 和 Hundhausen^[48] 认为观测上大多数日珥具有反转拓扑结构表明它可能位于一个双通量磁场系统中, 其中一通量用以联结源于光球层之下的偶极磁场, 另一通量则形成磁绳以维持日珥, 在光球层上空平行于磁反转线分布。日珥通量管在日冕中显示为暗腔, 它在冕流爆发时随日冕物质抛射而离开日冕, 从而消除了旧的磁通量, 使之成为新的磁周中相反极性的通量所代替。他们认为日冕物质抛射是 11yr 太阳周中日冕系统重整并以磁极性反转而告终的整个过程中最为重要的磁流体动力学过程^[49]。

如前所述, 行星际磁云与日冕物质抛射有着密切的关系。观测表明, 磁云中磁场很强, 很多作者视其为一个扭拧的磁通量管^[50]。另一种观点则认为一些磁云完全与太阳截断, 呈现为一种等离子体团或球状结构^[51]。一些作者采用无力场模式来描述磁云的结构, 通过与观测资料的拟合, 发现常 α (线性) 无力场圆柱形通量绳模型可以很好地描述磁云的主要磁场特征^[52]。图 9 描绘了 1997 年 1 月 10~11 日磁云采用线性无力场圆柱形通量绳模型拟合得到的结果^[25], 图中圆点表示磁场观测资料, 上三行分别表示地心黄道坐标系(GSE 坐标)中磁场的三个分量, 下三行则为磁场强度和方向。图中实线是拟合值, 可见磁场三分量以及磁场方向的变化拟合得较好, 但磁场强度曲线与观测值有较大偏差。这是由于静态模型没有考虑到场强随时间的演化, 与磁云后面共转流的相互作用将会挤压磁场, 而与其前部背景等离子体相互作用形成激波。因此, 对于较快运动的磁云来讲, 常 α 无力场不能反映磁云中场强的分布特征^[53]。

为了描述磁云在行星际空间中传播的演化特征, 可以应用自相似模型。引入一个自相似参数 $\eta = R/y(t)$ (其中 R 是空间变数, 表示偏离通量绳轴的距离; $y(t)$ 是随时间改变的演化函

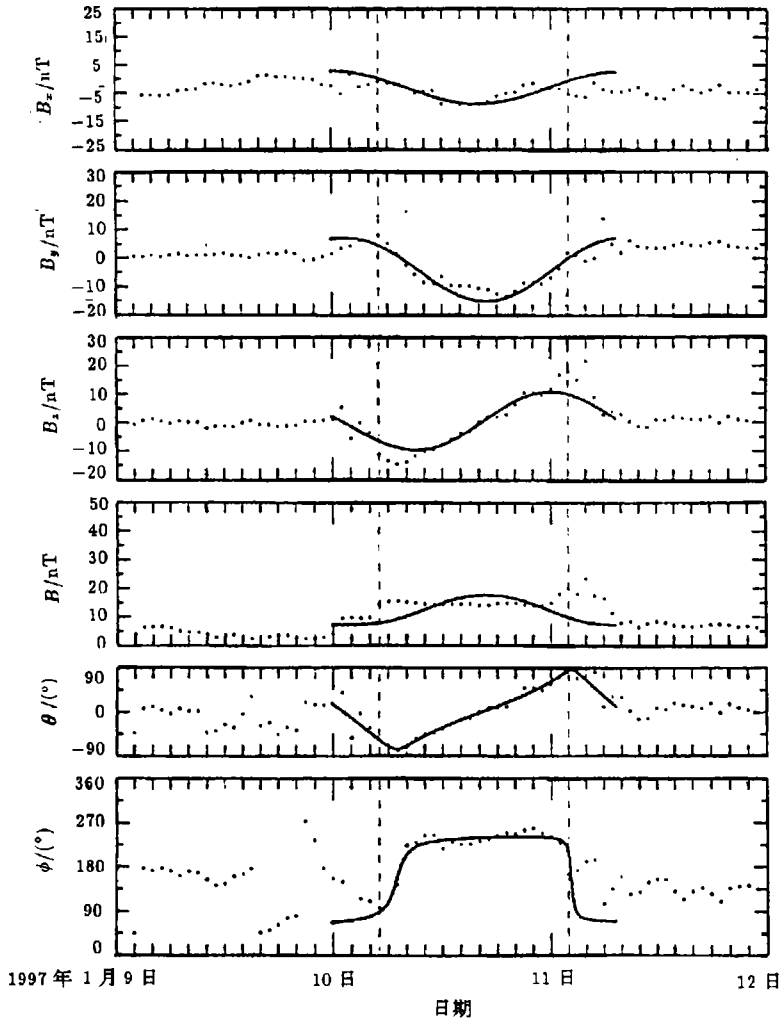


图 9 1997 年 1 月 10 ~ 11 日磁云的线性无力场拟合 [25]

数), 使磁流体力学方程组(无力场模型是其中的一个特殊情况)可以简化为变量 η 的二阶非线性常微分方程 [54], 其在 $t \rightarrow \infty$ 时的渐近解为 $y = (2\gamma k/\nu)t^{\frac{1}{2\gamma}}$, 式中 γ 是多方指数, k, ν 为常数. 当取 $\gamma = 1/2$ 时, 得到磁云中的最大场强 $B_{\max} \propto t^{-2} \propto r^{-2}$, 而膨胀速度 $v = (R/t)\mathbf{i}_r$ (\mathbf{i}_r 为径向单位矢量), 这些结果相当于自由线性膨胀模式. 球状模式也可以用自相似解法讨论其随时间的演化, 但只能在 $\gamma = 4/3$ 时得到解析解, 这与观测值 ($\gamma < 1$) 不符. 与球状模式相比, 磁通量绳模式似乎更适合描述磁云 [55].

5 数值模拟

在日冕物质抛射研究中, 数值模拟是一种十分重要的研究方法. 近来, Wu 等人将 Low

提出的日冕物质抛射的形态学模型作为其数值模拟的初态^[56], 即视全球性日冕磁场形态包括两部分: 一是包含悬浮磁通量绳的腔, 其两个端点连到光球层; 另一是冕流拱; 共同构成冕流 - 通量绳系统^[57,58]。进而增加通量绳中方位角向磁场 B_ϕ 的强度, 数值求解三维轴对称磁流体力学方程组, 考察冕流磁通量系统随时间的演化。他们计算了两种情况^[59]: 低密度冕流 - 通量绳系统 (即具有暗腔) 和高密度的系统 (即没有暗腔)。数值模拟的结果表明, 低密度冕流 - 通量绳模式确实会出现亮环、暗腔和高密度日珥三部分结构并在向外传播过程中保持这样的结构 (见图 10)。高密度冕流 - 通量绳系统也会演化为通常观测到的环状日冕物质抛射位形, 但有暗腔 (低密度) 的系统比无暗腔的情形演化得更快, 且其传播速度也更快。总的来讲, 存在通量绳的系统具有更多的磁能, 故更易于崩溃。磁浮力对该演化过程起了重要作用。在以上的计算中, 他们采用了理想的磁流体力学方程组。他们还应用三维轴对称时变的磁流体力学模式, 数值模拟了 1996 年 7 月 28~29 日观测到的日冕物质抛射事件, 得到了与观测资料相当符合的结果^[60]。近来, 他们更采用自行设计的完全的三维时变磁流体力学格式数值模拟了 LASCO 和 EIT 观测到的 1997 年 5 月 12 日的 CME 事件, 波阵面位置的数值模拟结果如图 11 所示, 比较图 3 和图 11 即可看出, 数值模拟结果很好地再现了这一传播特征。

一些作者为了研究磁云在行星际空间的传播特征, 应用自洽的磁流体力学格式数值讨论了磁通量绳和球状结构从 $18R_\odot$ 到 1AU 的传播行为^[61,62]。图 12 描绘了其轴垂直于黄道面的柱状磁云到达 1AU 时黄道面中的磁场位形和温度分布^[63]。可以看出, 磁云内温度较低 (其中等离子体密度和 β 值也较低) 且非常不均一, 等离子体速度从前向后光滑地降低。磁云左侧是一片低温区域, 这是由于磁云驱动的激波加速和压缩了等离子体, 其后的等离子体会绝热膨胀和冷却, 形成低密度和低温区。由图 12 还可看出, 磁通量绳在传播过程中还会发生畸变和偏转。初始时是一个圆柱形通量绳随着太阳风径向向外抛射, 到 1AU 时角向尺度约为径

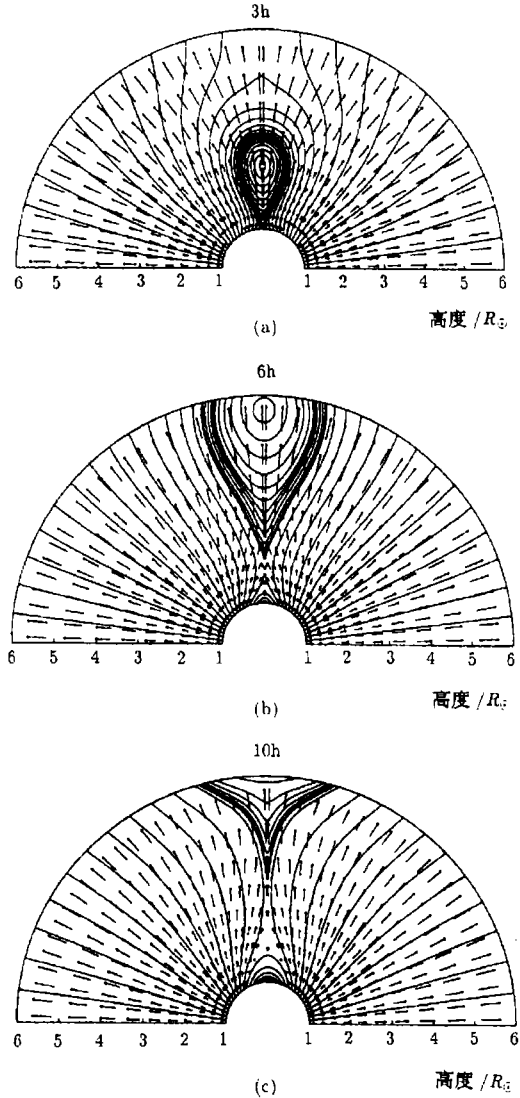


图 10 低密度冕流 - 通量绳系统磁场形态和等离子体速度场的演化^[59]

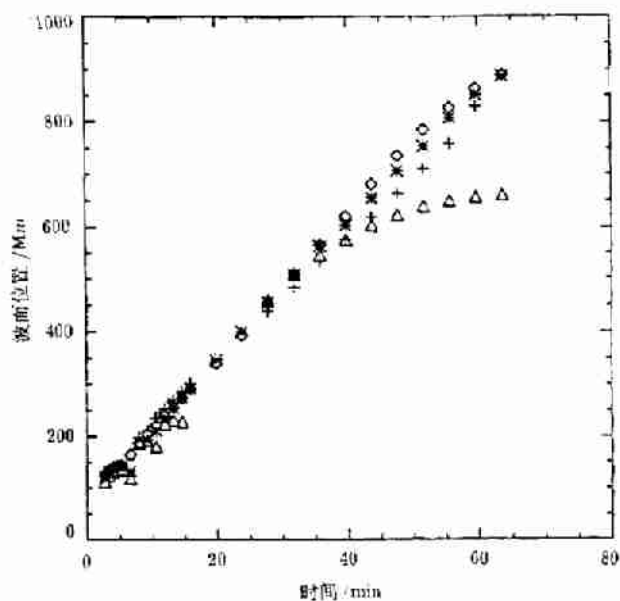


图 11 波阵面位置的数值模拟结果

图中 + 为南向, Δ 为北向, * 为东南向, \diamond 为西南向

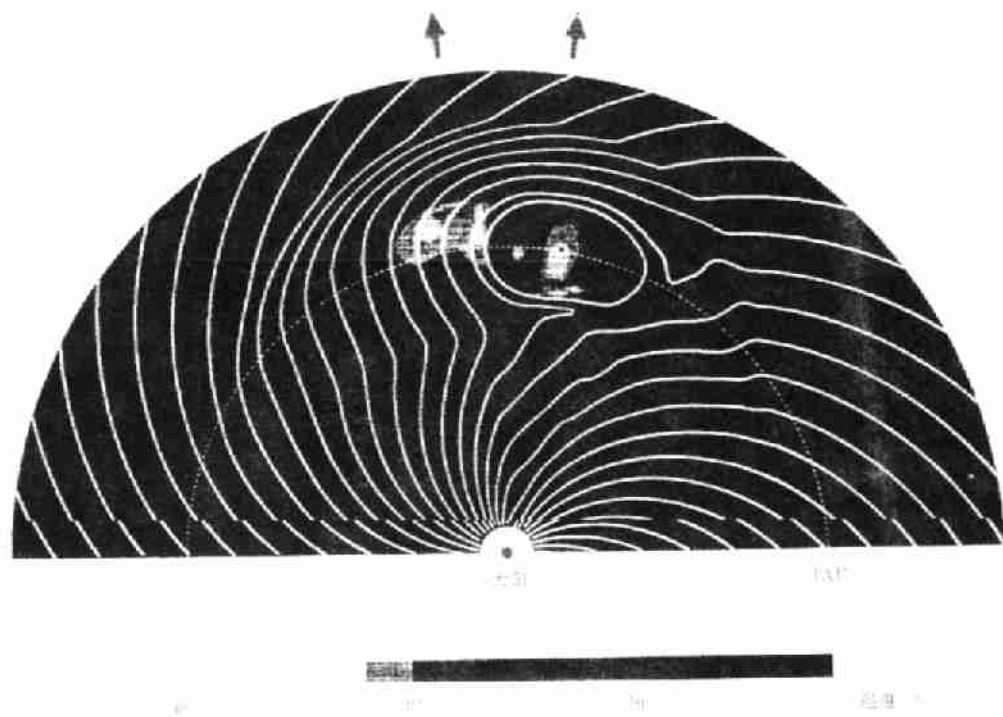


图 12 柱状磁云到达 1AU 时黄道面内温度分布和磁场位形^[63]

向尺度的 1.5 ~ 2.0 倍。磁云的偏转则取决于通量绳内磁场强度及边界处磁场的梯度, 它是由 Lorentz 力引起的。以上数值模拟研究中未考虑磁云与日球层电流片之间的相互作用。对于初始位形为球状结构的磁云, 模拟结果表明它在传播过程中不发生偏转, 但最终会演化为环状的闭合通量绳。

6 讨 论

以上简要地介绍了近年来日冕物质抛射研究的一些进展, 特别是一系列卫星和飞船取得许多新的观测资料, 加强了人们对于日冕物质抛射的认识。但是, 距离对日冕物质抛射实质的真正了解还相差很远, 除了要取得更多更精确的同时、多点的观测资料外, 还有大量问题需要进一步深入研究。

6.1 日冕物质抛射的起源

(1) 日冕物质抛射起始的标志是什么? 虽然 Yohkoh 卫星上的软 X 射线望远镜可以获得 $1.5R_{\odot}$ 以内日冕的全球图像^[16], 但是并不是每次日冕物质抛射都伴有激烈的太阳活动。例如 1997 年 1 月 6 日的事件仅与弱太阳活动有关^[24]。

(2) 日冕物质抛射的能量来自何处? 典型的日冕物质抛射要带走 $10^{23} \sim 10^{25} \text{J}$ 的能量到行星际空间, 这些能量是如何储存起来的? 光球层上磁力线足点的剪切或扭拧运动或者磁通量从光球层向上浮现对日冕物质抛射的储能过程会起什么作用?

(3) 触发日冕物质抛射的物理起因是什么? 日冕物质抛射是一个大尺度的太阳大气现象, 晕状日冕物质抛射可涉及到整个日面, 并几乎在所有方向上沿径向向外传播^[13]。小尺度的不稳定性或爆发过程与大尺度磁结构的演化之间有什么关系?

(4) 现在普遍认为日冕物质抛射与日珥有着密切的关系, 环形结构中的亮核就是日珥物质; 有时也会同时发生耀斑。这三者之间的物理联系是什么?

(5) 近半数日冕物质抛射在低日冕中的速度小于 1AU 处的太阳风速度, 即在日面附近日冕物质抛射存在加速现象, 其加速机制是什么?

(6) 磁场重联过程在日冕物质抛射事件中起什么作用? 是触发机制还是事件爆发后产生的? 日冕物质抛射是一种大尺度现象, 可以视为理想磁流体力学过程, 在小尺度上显得特别重要的有限电阻率如何对大尺度磁流体力学现象起作用?

(7) 日冕物质抛射还伴有从射电到 X 射线频段的各种辐射现象, 这些辐射的产生机制是什么? 这涉及到日冕物质抛射中的许多等离子体物理过程。

(8) 一些作者将日冕物质抛射事件视为日冕磁场重整的基本物理过程, 最终将导致 11 年太阳活动周的变化^[49]。日冕物质抛射对日冕结构的长期演化到底有什么影响? 11 年太阳活动周变化起因于太阳内部还是日冕物质抛射?

6.2 日冕物质抛射的传播和演化

(1) 一些作者认为磁云与日冕物质抛射相关密切^[64], 但是并非所有的日冕物质抛射都演化为磁云, 这两者到底有何物理联系? 为什么无力场近似可以很好地解释磁云的磁场特征? 磁云传播过程中其前方激波是如何形成的? 磁云本身又是如何膨胀的?

(2) 如何从太阳风中识别日冕物质抛射事件? 日冕物质抛射怎样与背景太阳风、日球层电流片等相互作用? 相互之间又是如何传输能量的?

(3) 磁云中氦丰度较太阳风为低, 且 He 的动力学温度 ($\approx 4000\text{K}$) 低, $V_{\text{th}}(^4\text{He}^{++})/V_{\text{th}}(\text{H}^+)$ 远小于 1^[25], 这是由于初始日冕物质抛射处于这种状态, 还是存在其他原因?

(4) 行星际空间中是否存在磁场重联? 无力场磁通量绳的磁云模式可以很好地解释一些观测结果, 那么这种通量绳如何与太阳磁场截断?

(5) 日冕物质抛射驱动的激波可以加速电子, 进而产生 II 型射电暴^[29]。伴随着这些射电爆发的等离子体物理过程是什么? 激波加速机制本身就是非常重要的问题。

(6) 发展完全三维的磁流体动力学计算格式, 结合具体观测事件, 数值模拟日冕物质抛射在行星际空间中的传播和演化特征, 无疑是一项非常诱人而富有挑战性的工作。

6.3 日冕物质抛射对地球空间环境的影响

(1) 在识别哪些日冕物质抛射事件会对地球空间环境产生重大影响时, 一般认为出现南向行星际磁场分量将会引起地球磁场的急剧变化和高能粒子事件。还能找到其它较量的识别标志吗?

(2) 日冕物质抛射(磁云)与地球弓激波的相互作用。由于弓激波是无碰撞激波, 在数值研究中需要发展高维而稳定的混合模拟和完全粒子模拟程序, 研究磁鞘中磁云的特征。

(3) 日冕物质抛射(磁云)与地球磁层顶如何相互作用? 卫星已经观测到磁层顶被压缩, 且提供了发生磁场重联的间接证据^[32], 但其物理过程需要进一步研究。

(4) 如何由日冕物质抛射的观测资料来预报行星际扰动和地球空间环境的变化, 当然这是整个空间天气研究中的重要内容, 需要各国和各有关学科科学家的共同努力。

参 考 文 献

- 1 Gosling J T. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, Geophys. Mono. Ser. 99, Washington: AGU, 1997. 9
- 2 Illing R M E, Hundhausen A J. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90(A1): 275
- 3 Hundhausen A J. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(A8): 13177
- 4 McAllister A H, Dryer M, McIntosh P et al. *J. Geophys. Res.* 1996, 101(A6): 13497
- 5 Webb D F, Howard R A. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(A3): 4201
- 6 Hundhausen A J, Burkepile J Y, Cyr O C St. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(A4): 6543
- 7 Hiei E, Hundhausen A J, Sime D G. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20(24): 2785
- 8 Kahler S W, Clever E W, Cane H V. *Solar Phys.*, 1989, 120(2): 393
- 9 Marubashi K. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, Geophys. Mono. Ser. 99, Washington: AGU, 1997. 145
- 10 Gosling J T, Bame S J, McComas D J et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, 17(7): 901
- 11 Howard R A, Brueckner G E, Cyr O C St et al. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, Geophys. Mono. Ser. 99, Washington: AGU, 1997. 17
- 12 Sheeley N R Jr, Wang Y-M, Hawley S H et al. *Ap. J.*, 1997, 484: 472
- 13 Thompson B J, Plunkett S P, Gurman J B et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2465
- 14 Dere K P, Brueckner G E, Howard R A et al. *Solar Phys.*, 1997, 175(2): 601
- 15 Plunkett S P, Thompson B J, Howard R A et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2477
- 16 Tsuneta S, Acton L, Bruner M et al. *Solar Phys.*, 1991, 136(1): 37
- 17 Hudson H S, Webb D F. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, Geophys. Mono. Ser. 99, Washington: AGU, 1997. 27
- 18 Hick P, Jackson B V, Woan G et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(5): 643
- 19 Yokoyama T, Shibata K. *Nature*, 1995, 375(1): 42
- 20 Raulin J-P, Knudu M R, Hudson H S et al. *Astron. Astrophys.*, 1996, 306(1): 299
- 21 Knudu M R, Raulin J-P, Nitta N et al. *Solar Phys.*, 1998, 178(1): 173

- 22 Shibata K, Masuda S, Shimojo M *et al.* *Ap. J.*, 1995, 451(2): L83
- 23 Hudson H S, Lemen J R St, Cyr O C *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2481
- 24 Webb D F, Cliver E W, Gopalswamy N *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2469
- 25 Burlaga L F, Fitzenreiter R, Lepping R *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A1): 277
- 26 Osherovich V, Burlaga L F. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, *Geophys. Mono. Ser.* 99, Washington: AGU, 1997. 157
- 27 Bothmer V, Schwenn R. *Space Sci. Rev.*, 1994, 70(1-2): 215
- 28 Gopalswamy N, Hanaoka Y, Kosugi T *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2485
- 29 Cane H V, Sheeley Jr. N R, Howard R A. *J. Geophys. Res.*, 1987, 92(A9): 9869
- 30 Reiner M J, Kaiser M L, Fainberg J *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2493
- 31 Hoang S, Maksimovic M, Bougeret J-L *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2497
- 32 Nakamura M, Seki K, Kawano H *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2529
- 33 Thomsen M F, Borovsky J E, McComas D J *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2545
- 34 Le G, Russell C T, Luhmann J G. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2533
- 35 Fenrich F R, Luhmann J G, Le G *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2541
- 36 Villante U, Francia P, Lepidi S *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2593
- 37 Spann J F, Brittnacher M, Elsen R *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2577
- 38 Steel D P, McEwen D J, Sivjee G G. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2573
- 39 Li X, Baker D N, Temerin M *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2561
- 40 Reeves G D, Baker D N, Belian R D, *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 3265
- 41 Ho C M, Mannucci A J, Lingdqwister U J *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(14): 2589
- 42 Low B C. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, *Geophys. Mono. Ser.*, 99, Washington: AGU, 1997. 39
- 43 Mikic Z, Linker J A. *Ap. J.*, 1994, 430(2): 898
- 44 Aly J J. *Ap. J.*, 1991, 375(1): L61
- 45 Low B C, Smith D F. *Ap. J.*, 1993, 410(1): 412
- 46 Chen J. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101 (A12): 27499
- 47 Chen J. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, *Geophys. Mono. Ser.* 99, Washington: AGU, 1997. 65
- 48 Low B C, Hundhausen J R. *Ap. J.*, 1995, 443(2): 818
- 49 Low B C. *Solar Phys.*, 1996, 167(1-2): 217
- 50 Burlaga L F, Lepping R, Jones J. In: Russell C T, Priest E R, Lee L C eds. *Physics of Flux Ropes*, *Geophys. Mono. Ser.* 58, Washington: AGU, 1990. 373
- 51 Vandas M, Fischer S, Pelant P *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(A12): 21061
- 52 Lepping R P, Jones J A, Burlaga L F. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(A8): 11957
- 53 Farrugia C J, Burlaga L F, Freeman P *et al.* In: Schwenn R ed. *Solar Wind Seven*, New York: Pergamon, 1992. 611
- 54 Osherovich V A, Farrugia C J, Burlaga L F. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(A7): 12307
- 55 Farrugia C J, Osherovich V A, Burlaga L F. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(A7): 12293
- 56 Low B C. *Phys. Plasmas*, 1994, 1: 1684
- 57 Wu S T, Guo W P, Dryer M. *Solar Phys.*, 1997, 170(2): 265
- 58 Guo W P, Wu S T. *Ap. J.*, 1998, 494: 419
- 59 Wu S T, Guo W P. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, *Geophys. Mono. Ser.* 99, Washington: AGU, 1997. 83
- 60 Wu S T, Guo W P, Andrews M D. *Solar Phys.*, 1997, 172(2): 719
- 61 Vandas M, Fischer S, Dryer M *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(A7): 15645
- 62 Cargill P J, Chen J, Spicer D S *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(A3): 4855
- 63 Vandas M, Fischer S, Dryer M *et al.* In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J eds. *Coronal Mass Ejections*, *Geophys. Mono. Ser.* 99, Washington: AGU, 1997. 169

64 Bravo S, Blanco-Cano X, Lopez C. J. *Geophys. Res.*, 1999, 104(A1): 581

Coronal Mass Ejections

Wang Shui¹ Li Bo¹ Chao J. K.²

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

(2. *Institute of Space Research, Central University, Zhongli 32054*)

Abstract

The recent progress on the coronal mass ejections (CMEs), including observational results obtained by Yohkoh, SOHO, WIND, Ulysses, Geotail and POLAR, are presented. The relations between CMEs and solar activities, interplanetary disturbances as well as geospace environmental variations are investigated. Some typical theoretical models and numerical simulation results on the formation mechanism and propagating process of CMEs are described. Finally, some noticeable problems for future research are posed.

Key words coronal mass ejections—solar activity—space weather