导致星链卫星消亡的2022年2月3日地磁暴的太阳成因

Nat Gopalswamy[1], Hong Xie[1,2], Seiji Yashiro[1,2], 和 Sachiko Akiyama[1,2]

[1]NASA戈达德太空飞行中心，格林贝尔特，马里兰州20771，美国

[2]美国天主教大学，华盛顿哥伦比亚特区20064，美国

电子邮箱：nat.gopalswamy@nasa.gov

提交日期：2022年12月30日

摘要：

我们报告了2022年2月3日中等强度地磁暴的太阳源区；这场地磁暴导致39颗星链卫星损失。此次地磁暴由2022年1月29日的晕状日冕物质抛射（CME）引起，该CME速度中等（~690 千米/秒），源自位于太阳东北象限（N18E06）的美国国家海洋和大气管理局活动区12936。此次喷发伴随一次M1.1级耀斑，该耀斑于1月29日世界时22:45开始，23:32达到峰值，并于次日00:24结束。该CME最终形成驱动激波的磁云（MC），在日地L1点和位于地球后方~340处的STEREO-Ahead（STA）均有观测记录。此次地磁暴由磁云强烈的南向分量引起，而磁云后方的高速太阳风流增强了这一分量。尽管地球与STA仅相隔~340，但在地球和L1点观测到的磁云却相当不同。一种可能是，磁云发生了扭曲，反映出太阳处中性线的弯曲。原位观测表明，由于磁云较早抵达STA，它的行进方向更靠近STA而非地球。然而，激波几乎同时抵达STA和地球，这表明激波在地球处因侧翼通过而较弱。

关键词：日冕物质抛射、磁云、太阳耀斑、地磁暴、Space Weather

1. 引言

Space Weather会影响人类及其在太空和地面上的技术。由于低地球轨道（LEO）中的卫星，地球热层中的Space Weather令人关注。一个近期例子是2022年2月的星链事件，其间，太空探索技术公司的猎鹰9号发射的49颗卫星中有38颗损毁。发射时，地磁暴正处于2022年2月3日的恢复阶段。此次地磁暴强度中等（Dst指数最低值为~ -66 nT）。地磁暴导致热层密度升高，进而使大气阻力在较长一段时间内增大，最终导致38颗卫星过早脱轨（Dang等（2022）；Zhang等（2022）；Fang等（2022）；Lin等（2022））。此次地磁暴与2022年1月29日23:36世界时发生的晕状日冕物质抛射（CME）有关，该抛射在三天后抵达地球（Dang等（2022））。

上述论文已经报道了Starlink事件的若干方面，因此我们重点关注相关晕状日冕物质抛射的太阳源区、日冕物质抛射早期的运动学，以及该日冕物质抛射最终如何在1天文单位处演变成磁云（MC）。我们依据Burlaga等人（1981）确立的标准识别磁云（MC）：增强的磁场强度、磁场分量之一的平滑旋转，以及较低的等离子体β。

这场地磁暴由一次日冕物质抛射引发。日冕物质抛射是嵌入高温等离子体中的一束磁力线，以最高达3000 km/s的速度远离太阳。该日冕物质抛射于世界时1月29日23:58离开太阳，约3天后抵达地球。日冕物质抛射的磁场与地球磁场相互作用，导致了这场地磁暴。此次日冕物质抛射速度中等（~550 km/s），但仍足以驱动激波，引起Dst指数小幅上升（称为磁暴突然 commencement），并先于地磁暴发生。

2. 观测、分析与结果

此次喷发发生在美国国家海洋和大气管理局活动区（AR）12936，该活动区位于太阳东北象限（N17E11）。根据太阳动力学观测台（SDO，Pesnell et al. 2012）搭载的日震磁成像仪（HMI，Scherrer et al. 2012）观测，该活动区主要呈双极性，前导极性为正。通过SDO搭载的大气成像组件（AIA，Lemen et al. 2012）在多个波段获得的极紫外图像，观测到了多种喷发特征。此外，太阳地球关系观测台（STEREO，Kaiser et al. 2008）搭载的仪器套件SECCHI（太阳—地球连接日冕与日球层探测，Howard et al. 2008）中的极紫外成像仪（EUVI）也获取了极紫外图像。SECCHI的内日冕仪（COR1）和外日冕仪（COR2），以及太阳和日球层观测台（SOHO，Domingo et al. 1995）搭载的大视场光谱日冕仪（LASCO，Brueckner et al. 1995），观测到了日冕和内日球层中的日冕物质抛射。LASCO的C2和C3望远镜覆盖的日心距离范围为2.5至32个太阳半径（Rs），而COR1和COR2的观测日心距离范围为1.4至15个Rs。此次事件发生时，位于E34的STEREO-Ahead（STA）正在观测太阳。因此，此次事件中的白光日冕物质抛射既从日地连线方向（SOHO、SDO）观测到，也从偏离日地连线的方向观测到。除极紫外成像仪提供的信息外，耀斑相关特征还取自GOES软X射线光变曲线。最后，太阳风（包括日冕物质抛射）的原位观测数据来自OMNI（作为节点的运行任务），以及STEREO的等离子体与超热离子成分（PLASTIC，Galvin et al. 2008）和粒子与日冕物质抛射瞬变的原位测量（IMPACT，Luhmann et al. 2008）探测项目。研究人员结合原位观测与日冕仪和极紫外观测，推断日冕物质抛射的日地传播过程。

2.1 喷发几何结构

图1显示了 HMI 磁图中的目标活动区。AIA 在 193 Å 图像中观测到，后日冕环（PEA）跨越活动区的主中性线形成。

AIA 图像还显示了变暗区 D1 和 D2，分别位于极性反转线的负极侧和正极侧。人们认为，这些变暗区是日冕物质抛射磁通绳的两条腿锚定的位置（例如，Webb 等，2000；Gopalswamy，2009；Dissauer 等，2018；Sindhuja 和 Gopalswamy，2020）。变暗区的位置表明，日冕物质抛射磁通绳的轴大致水平，轴向磁场指向东方。轴前方的方位磁场指向北方，后方则指向南方。推断出的磁通绳轴向磁场方向表明，该磁通绳具有右手螺度，这种情况通常出现在南半球。我们的活动区位于北半球，因此该磁通绳违反了半球螺度符号规则。此类违反并不罕见（Zhang 等，2016）。图 2 所示的 SDO/AIA 1600 Å 图像中观测到的耀斑带与该 PEA 相符。

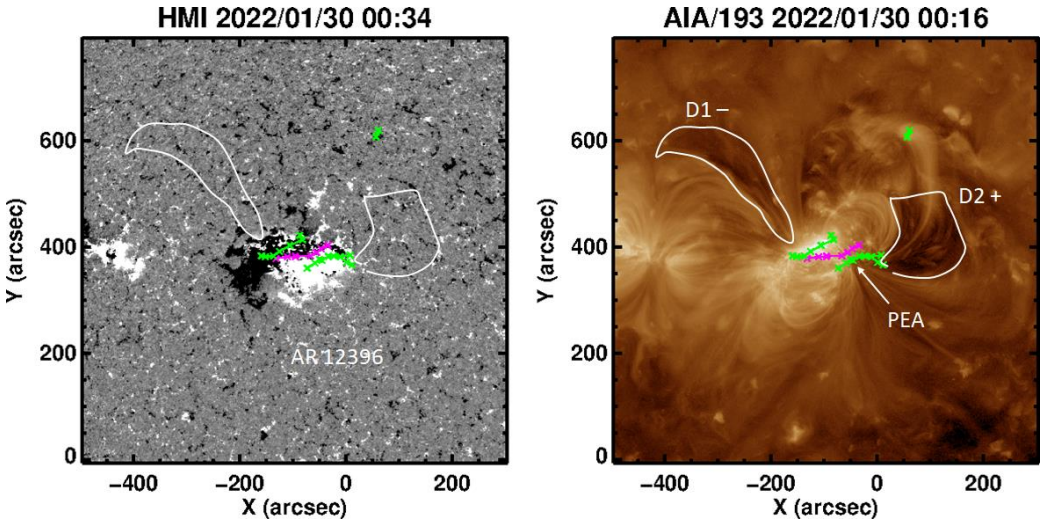


图1. SDO/HMI 磁图（左）和 SDO/AIA 193 Å 极紫外图像（右）显示的喷发几何结构。极性反转线（粉色线）两侧的变暗区分别标记为 D1 和 D2，其在光球层分别具有负极性和正极性。绿色十字标记了后日冕环（PEA）的脚点。

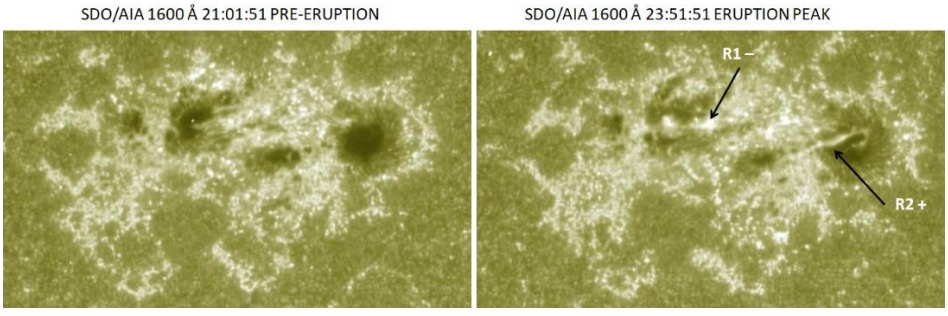


图 2. 世界时 21:01:51 和 23:51:51 拍摄的 SDO/AIA 1600 Å 图像中可见的 AR 12936 及其太阳黑子。右图中清晰可见耀斑带。R1 和 R2 是

活动区负极性区和正极性区上的带状结构。两条带状结构都延伸至太阳黑子。

图3中的GOES软X射线光变曲线显示，该耀斑为M级（M1.1级），分别于22:45世界时开始、23:32世界时达到峰值，并于00:24世界时结束（结束时间为1月30日）。该耀斑伴随一次日冕物质抛射，该事件被LASCO和SECCHI日冕仪清晰观测到。日冕物质抛射于23:16:35世界时首次出现在STA/COR1的视场（FOV）中（https://cor1.gsfc.nasa.gov/catalog/cme/2022/html/20220129_2311_cor1.html），并于23:36世界时出现在LASCO/C2视场中

（https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?img1=lasc2rdf&stime=20220129_2211&etime=20220130_0311）。当日冕物质抛射首次出现在东北日缘上方时，它还不是晕状日冕物质抛射，但在下一帧中便变成了晕状日冕物质抛射（Howard等（1982）；Gopalswamy等（2010a））。图3展示了SOHO/LASCO在两个时刻观测到的日冕物质抛射。有关该日冕物质抛射及其相关现象的详细信息，可参见SOHO/LASCO日冕物质抛射目录 https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2022_01/univ2022_01.html（Yashiro等（2004）；Gopalswamy等（2009））。在天空平面内，日冕物质抛射前沿的速度为~530千米/秒，并以-10.1米·秒$^{-2}$的速率缓慢减速。

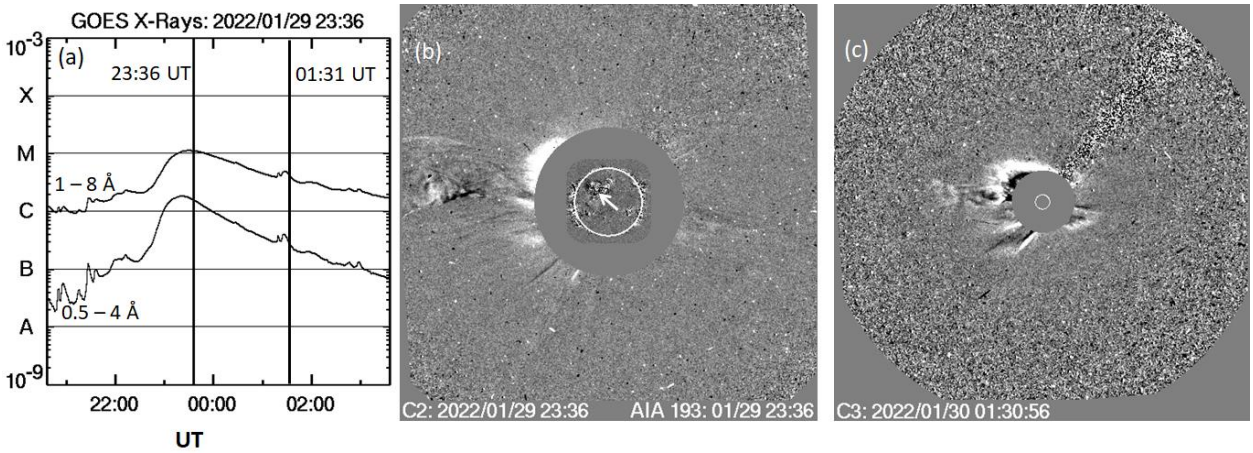


图3. GOES软X射线光变曲线（W m^{-2}）显示了M1.1级耀斑（a），以及23:36世界时（b）和01:31世界时（c）的SOHO/LASCO差分图像。图像的时间通过（a）中垂直实线标记在GOES光变曲线上。（b）和（c）中，中心的小白圆代表光学太阳。在（b）中，叠加了与LASCO/C2图像大致同时拍摄的193 Å极紫外差分图像。（b）中箭头所指的扰动标出了太阳圆面上的爆发区域。

2.2 日冕物质抛射运动学

CME 的天空平面速度通常小于其实际速度。可以通过对 CME 的 LASCO 和 STEREO 图像进行磁通绳拟合来确定实际速度。这里我们采用椭圆磁通绳（EFR）模型，该模型假设 CME 磁通绳具有一条

椭圆轴，且其径向圆形横截面不断变化。磁通绳顶点的日心距离为 h_{FR}。磁通绳顶点处的半径（R_0）与轴向距离（$h_{FR} - R_0$）之间的关系由几何参数 $\Lambda = (h_{FR} - R_0)/2R_0$确定。由 Λ 可得磁通绳半径 $R_0 = h_{FR}/(2\Lambda + 1)$。模型的详细信息见 Krall 和 St Cyr（2006年）以及 Krall （2007 年）。图 4 显示了 1 月 30 日世界时 00:30 的 STA/COR2 图像，图中叠加了拟合得到的 EFR 磁通绳。拟合效果合理，得出 $R_0/h_{FR} = 0.36$，对应于 $\Lambda = 0.89$。该解表明，当磁通绳前沿位于 10 Rs 处时，磁通绳半径为 3.6 Rs。磁通绳轴大致呈水平，倾斜角较小（-180）。这与图1所示变暗区 D1 和 D2 的位置一致。EFR 拟合还确定了磁通绳的侧视宽度和正视宽度分别为 290 和 450。

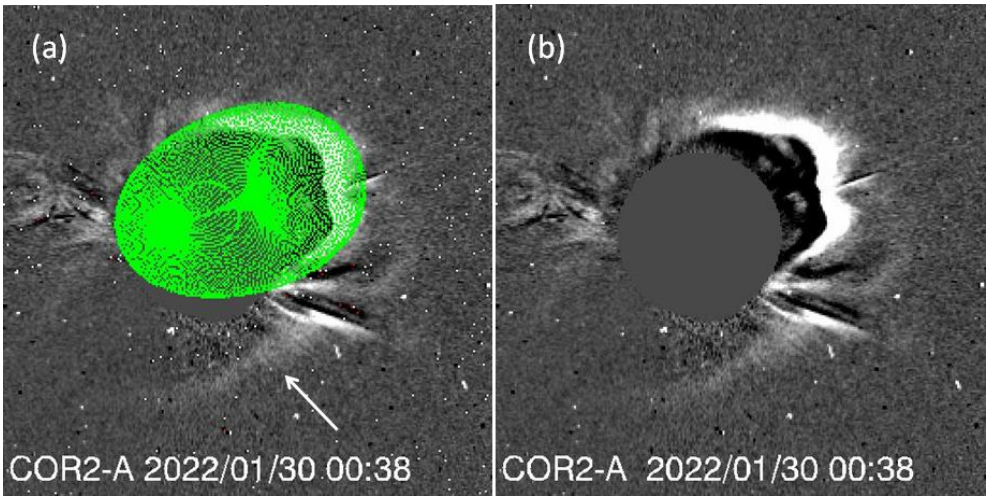


图4。（a）在世界时00:38，叠加显示于STA/COR2图像上的EFR 拟合磁通绳（绿色网格）。白色箭头指向包围磁通绳的扰动（可能是弱激波）。（b）作为参考，在未叠加EFR 拟合的情况下显示世界时00:38的STA/COR2图像。

通过追踪磁通绳的前沿，我们确定了磁通绳的高度—时间演化、速度以及加速度曲线，如图5所示。CME速度缓慢增加，并在初始加速度结束前达到~ 744 km/s的峰值速度。速度的缓慢增加与 ~ 357 m s^{-2}的低峰值加速度一致。初始加速度还可以根据耀斑上升时间（~47 min）和达到的最大CME速度（744 km/s）确定为260 m s^{-2}。这是在耀斑上升时间内取平均得到的加速度，因此小于峰值加速度。达到峰值速度后，CME以-7.1 m s^{-2}的速率缓慢减速。在LASCO视场中通过对EFR数据点进行线性拟合得到的磁通绳平均速度为~691 km/s，显著大于天空平面速度（530 km/s）。CME继续处于STEREO的日球层成像仪（HI，Howard等，2008年）视场内，最终被L1处和STA处的航天器原位观测到。CME于1月30日世界时2:48出现在HI-1视场中。关于在HI视场中观测到的CME的更多细节可见:

https:// www.helcats-fp7.eu/catalogues/event_page.html?id=HCME_A__20220130_01 .

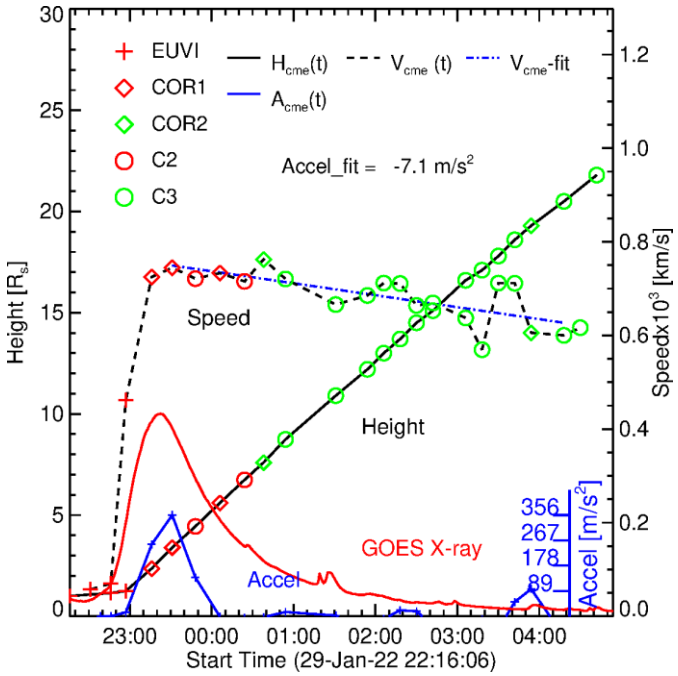


图5. 利用 STA 的 EUVI、COR1 和 COR2，以及 SOHO/LASCO 的 C2 和 C3 图像，绘制 EFR前沿高度（H_{cme} (t)）、速度（V_{cme} (t)）和加速度（A_{cme} (t)）随时间的变化曲线。图中使用不同的符号和颜色区分这些数据点。CME峰值速度（744 km/s）在耀斑峰值附近达到，之后以 -7.1 m s^{-2} 的速率缓慢衰减。

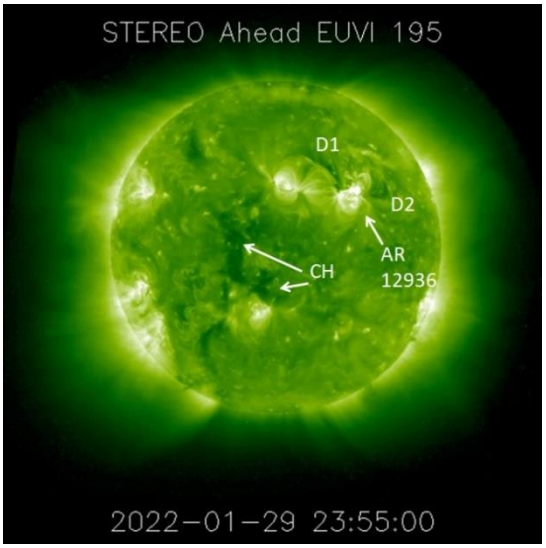


图6. 喷发进行期间，由 STA/EUVI 195 Å图像观测到的爆发区域（AR 12936）日冕环境。图中标出了变暗区 D1 和 D2，以及一个值得关注的日冕洞（CH）。活动区中的明亮结构为 PEA（见图1）。

Dang 等人（2022）对日冕物质抛射磁通绳进行了渐进圆柱壳（GCS，Thernisien 2011）拟合。我们的 EFR 拟合总体上与 GCS 拟合一致，磁通绳传播方向除外。尽管耀斑位置为 N17E11，EFR 拟合给出的磁通绳位置为 N05E20，略偏于耀斑位置的东侧和南侧。另一方面，GCS 拟合给出的磁通绳位置为 S07E34。GCS 拟合的典型误差为经度 ±170、纬度 ±40（Thernisien 等人（2009））， EFR 拟合的数值也与此相近。因此，两种拟合的南移都具有显著性，而东移对于 GCS 拟合则具有显著性。除北极冠洞外，喷发区域北侧和西侧似乎不存在任何可能导致偏转的源。在太阳活动周的上升相，极区日冕洞中磁场导致的偏转是众所周知的（Gopalswamy 等人，2008年）。源活动区东南方向存在日冕洞（见图6），其可能部分抵消了向南的偏转。东南日冕洞很可能形成了高速流，从而对日冕物质抛射磁通绳产生顺风作用。GCS 拟合的位置不同，可能是由于将周围扰动纳入了磁通绳的一部分（见图4）。

我们利用 PEA 的视线磁图和极紫外图像测量了爆发区域中的总重联（RC）磁通量（Gopalswamy 等人，2017）：总 RC 磁通量是 PEA 下方区域磁通量的一半。我们选取世界时 01:30 的 AIA 193 Å 图像来确定 PEA 下方的区域。估算得到的总 RC 磁通量为 2.55 $\times 10^{21}$麦克斯韦。Gopalswamy 等人（2018a）利用一组 50 多个行星际日冕物质抛射，得出了日冕物质抛射磁通绳速度（V）与总 RC 磁通量（φ）之间的经验关系：

$V = 394\,\varphi^{0.67}$，（1）其中

φ 的单位为 10^{21} 麦克斯韦。对于 $\varphi = 2.55$，式（1）得出 V = 738 千米/秒，与测得的磁通绳速度（691 千米/秒）非常接近。

利用喷发数据磁通绳（FRED）技术（Gopalswamy 等人 2018b；Sarkar 等人 2020），可以估算近太阳磁通绳的轴向磁场，例如在距离 10 Rs 处。该技术将 φ 等同于通过前向拟合得到的日冕物质抛射磁通绳的环向磁通（φ_p），从而可以确定轴向磁场强度（B_o）：

$B_o = \varphi_p\, x_{01}/R_0 L$，（2）

其中，x_{01} (=2.4048) 是贝塞尔函数 J_0, 的第一个零点，R_0 是磁通绳的横截面半径，L 是磁通绳的长度，由磁通绳高度（h_{FR} - R_0）和 EFR 拟合得到的角宽度（2×740 或 2.58 弧度）确定。当 h_{FR} =10 Rs 时，轴距为 6.4 Rs，因此 L = 16.5 Rs。将这些值代入（2），并使用 $\varphi_p = 2.55\times10^{21}$ 麦克斯韦，可得轴向磁场强度为 21.3 mG。该值处于日冕磁通绳轴向磁场强度分布的低端（平均值为 ~51.9 mG），与测得的较低 RC 磁通相符。

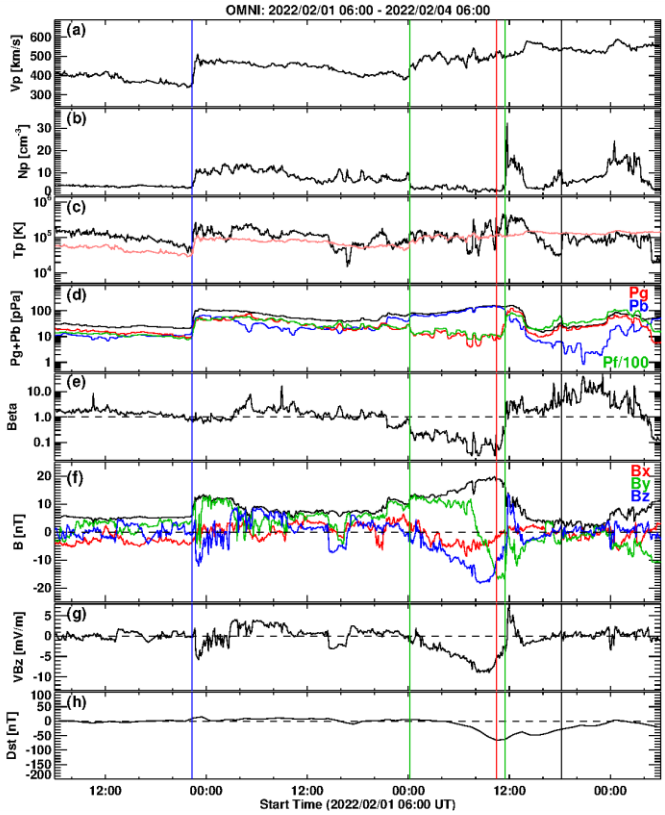


图7. 2022年2月1日至4日期间OMNI的太阳风观测结果。(a) 太阳风速度（V_p）、(b) 质子密度（N_p）、(c) 质子温度（T_p）以及预期温度（粉色线）、(d) 气体压力（P_g–红色曲线）、磁压力（P_b – 蓝色曲线）和流体压力（P_f–绿色曲线）以及总压力（P_g+P_b–黑色曲线）、(e) 等离子体β、(f) 总磁场强度（B）以及GSE坐标中的三个分量B_x（红色曲线）、B_y（绿色曲线）和B_z（蓝色曲线）、(g) 太阳风电场（太阳风速度乘以磁场的B_z分量）、(h) Dst指数，显示了此次中等地磁暴（Dst最低值时刻由垂直红线标示：2月3日11:00世界时）。Dst数据来自京都世界数据中心。垂直绿色线标示了根据等离子体低β特征确定的磁云边界。垂直蓝线标示了由磁云驱动的弱激波到达时刻。垂直黑线标示了星链卫星的发射时间（2月3日18:13世界时）。

2.3 行星际CME

图7展示了 OMNI 数据库中的太阳风参数。此次行星际日冕物质抛射伴有一道激波，于 2 月 1 日世界时 21:27 抵达 Wind号航天器（https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data/00791/wi_00791.html）。SOHO 的质子监测器（Ipavich 等，1998）也于世界时 21:42探测到了这道激波，详见 SOHO激波列表：https://space.umd.edu/pm/figs/figs.html。抵达地球的时间为 ~54 分钟后。因此，从日冕物质抛射首次出现在 LASCO C2视场的时刻算起，激波抵达地球的传播时间为 ~67 小时。激波鞘持续约一天，因为

激波相对较弱。磁云型行星际日冕物质抛射于2月3日世界时~0:10抵达，持续~11.3小时。速度剖面未显示出典型的磁通绳膨胀特征（图7a），而是朝磁云后部逐渐升高。这表明磁云受到压缩，紧随磁云之后的密度上升也证实了这一点（图7b）。质子温度同样未呈现典型的低温特征（图7c）。磁云内部的总压力（图7d）由磁压（P_b）主导。云体末端的压力较高，表明磁云受到压缩。正如预期，高P_b区间与低等离子体β相吻合（图7e）。云体末端Bz分量骤增~50%（从−12 nT升至−18 nT，见图7f），明显表明磁云受到压缩。磁云内部的动压（P_f）相对较低，因此Dst指数主要受重联电场VBz控制（见图7g）。Dst指数在Bz骤降后立即达到最低值（图7h）。磁云过后，Bz分量迅速转向北向，使Dst快速、短暂地恢复，随后进入正常恢复阶段。观测到的云体末端B_z大多为负值，表明这是一个高倾角磁云。By分量大多朝东，因此这是一个右手磁云。

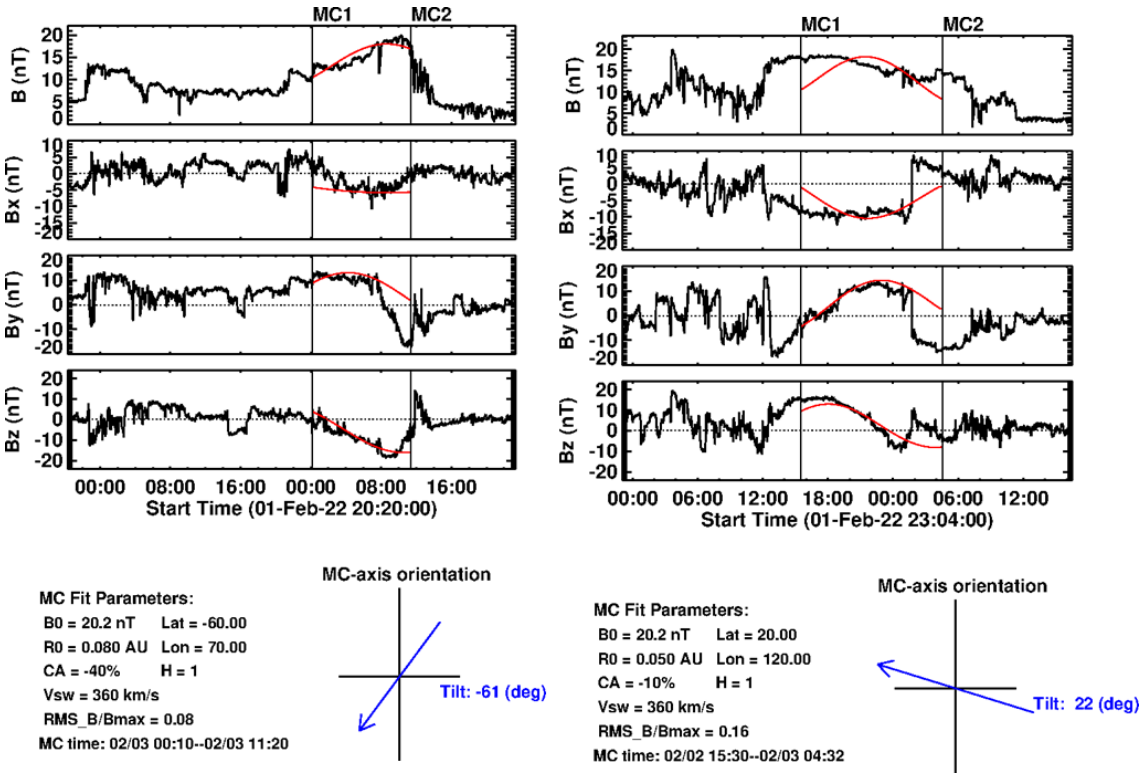


图 8. Wind（OMNI，左）和 STA（右）的原位磁场观测与拟合参数（红线）的比较。底部的蓝色箭头表示 Wind 和 STA 处磁通绳轴的局部方向。底部所示的拟合参数为：轴向磁场强度 Bo、磁云半径 Ro、以百分比表示的最近接近参数（CA）、螺度符号（H）、太阳风速度（Vsw），以及相对于最大磁场强度的磁场涨落均方根（B/Bmax）。

星链卫星发射时正值地磁暴的恢复阶段，但SWARM卫星的测量结果显示，恢复阶段热层中的风暴引起的密度显著升高（Lin等（2022））。2月4日世界时21时，另一场地磁暴的Dst指数最低达到−61 nT，进一步加剧了密度上升。有关这两场风暴期间密度变化的详情，参见Zhang等（2022）。

根据 EFR 拟合，我们推断磁通绳沿 E20 方向前进，该方向略微更靠近 STA（E34），而非地球（E00）。这与磁云在 STA 处比在 Wind 处早到达~8.5 小时的情况一致（参见图 8，其中比较了 Wind 和 STA 观测到的磁场分量）。拟合结果还表明，STA 处的最近接近参数（CA）小于 Wind 处的值，说明 STA 穿越磁云的位置更靠近磁云轴。另一方面，两艘航天器观测到的激波到达时间相差较小：STA 处为 2月2日世界时00:30，而 Wind 处为 2月1日世界时21:30。Fang等人（2022）开展的 WSA-Enlil模拟确实证实了地球处的这一激波到达时间。Wind 处的停滞距离也大得多，这可从持续时间更长的鞘层看出（23 小时，而 STA 处为 15 小时）。这些观测表明，磁通量绳鼻部比在 Wind 处更靠近 STA，而 Wind 处较弱的激波则位于更远处。在 Wind 和 STA 处观测到的磁通绳似乎有所不同，倾角也不相同。我们推测，磁通绳在原位观测前可能已发生畸变（可能出现扭缠）。这一点还需要进一步研究。我们还注意到，由于与高速流相互作用，磁通绳半径并未进行自相似膨胀。

3. 讨论

2022年2月3日的磁云在1天文单位处驱动着一个激波，但 STEREO/WAVES（Bougeret等人，2008年）或地面观测站均未报告II型射电暴。这类射电宁静激波广为人知，也并不少见（Gopalswamy等人，2010b）。我们确实观测到磁通绳周围存在类激波扰动，但激波强度不足以加速非热电子并产生II型射电暴。频率范围为25–80 MHz的米波非热射电连续谱于世界时23:06左右开始，并持续至次日清晨（世界时00:15）。该射电辐射由位于阿拉斯加Cohoe的复合式天文低频低成本光谱仪及可移动观测站（CALLISTO，Benz等人，2005年）频谱仪记录（http://soleil.i4ds.ch/solarradio/callistoQuicklooks/?date=20220129）。此次喷发还与STEREO/WAVES实验观测到的低频III型射电暴有关，该射电暴于世界时23:20开始，频率低于2 MHz，并向下延伸至50 kHz（
h
t
t
p://
s
t
e
r
e—————————————

从LASCO/C2首次观测到激波的时间（1月29日世界时23:36）到激波抵达STA的时间（2月2日世界时00:30），激波传播时间为~72 小时。根据经验性的冲击波到达（ESA）模型，激波传播时间T由日冕仪视场内的CME平均速度（V）决定，关系式如下（Gopalswamy等（2005a,b））：$T = 151.002 \times 0.998625^{V} + 11.5981$小时（3）。

回顾一下，CME在日冕仪视场中的平均速度为691 km/s，将其代入方程（1）可得 T = 69.95小时，比观测到的传播时间（72小时）仅短~2 小时。如果考虑到CME经度位于太阳—STA连线以西~140，传播时间则为71.82小时，与观测值几乎相同。这表明CME经历了正常的减速过程，未受到后续高速流的显著影响。

4. 总结与结论

我们研究了引发星链空间天气事件的2022年2月3日地磁暴的太阳源区。该CME速度中等，在日冕仪视场中的平均速度为~691km/s。在被Wind和SOHO航天器于日地L1点探测到之前，STEREO/HI也在行星际介质中观测到了该CME。通过EFR 拟合获得的CME磁通绳三维信息表明，该CME的运动方向位于地球与STEREO-Ahead之间，但更接近后者。本研究的主要发现可总结如下。

1. 此次地磁暴是由2022年2月3日初抵达地球的磁云中的南向磁场分量引起的。

2. 由于磁云之后跟随而来的高速 Wind，南向磁场分量在 Dst指数达到最小值前显著增强。

3. 该磁云可追溯至太阳，是源自美国国家海洋和大气管理局活动区12936的晕状日冕物质抛射；该活动区于2022年1月29日22:45世界时发生喷发。

4. 该晕状日冕物质抛射在日冕仪视场中的速度中等（~690 千米/秒），并在行星际介质中缓慢减速。初始加速度峰值为0.36千米/秒$^{-2}$，这与根据耀斑上升时间和日冕物质抛射速度推导出的平均加速度一致。

5. 日冕物质抛射速度与根据后日冕环下方磁通量推导出的日冕物质抛射速度和总重联磁通量之间的经验关系一致。

6. 距离为 ~10 Rs 处的磁通绳半径和轴向磁场强度处于统计结果所确定的适当范围内。

7. CME驱动激波在两小时内到达了 STEREO-Ahead 和地球，而磁云则提前约 15 小时到达 STEREO-Ahead，这表明它是从侧翼到达地球的。

8. 与 STEREO-Ahead 相比，地球处较大的鞘层厚度证实了磁云侧翼到达。

致谢

本研究得益于 NASA 的开放数据政策。我们感谢 SOHO、STEREO、SDO 和 Wind 团队在线提供本研究所用的数据。我们也感谢美国国家海洋和大气管理局在线提供 GOES X射线数据。本研究得到 NASA的LWS TR&T 和 STEREO计划的支持。感谢审稿人 A. Klicik 提供的宝贵意见。

参考文献

Benz, A. O., Monstein, C., Meyer, H.：2005，Solar Phys. 226，143。DOI：10.1007/s11207-005-5688-9

Bougeret, J.-L., Goetz, K., Kaiser, M. L. 等：2008年，Space Sci. Rev. 136, 487。DOI：10.1007/s11214-007-9298-8

Brueckner, G. E., Howard, R. A., Koomen, M. J. 等：1995，Solar Phys. 162, 357。DOI：10.1007/BF00733434

Burlaga, L.F., Sittler, E., Mariani, F., Schwenn, R.：1981，J. Geophys. Res. 86, 6673。DOI：10.1029/JA086iA08p06673

Dang, T., Li, X., Luo, B., Li, R.,Zhang, B., Pham, K. 等：2022，Space Weather, 20, e2022SW003152。DOI：10.1029/2022SW003152

Dissauer, K., Veronig, A. M., Temmer, M., Podladchikova, T., 和 Vanninathan, K.：2018，Astrophys. J., 855，文章编号 137。DOI：10.3847/1538-4357/aaadb5

Domingo, V., Fleck, B., Poland, A. I.：1995，Solar Phys. 162，1。DOI：10.1007/BF00733425

Fang, T.-W., Kubaryk, A., Goldstein, D., Li, Z., Fuller-Rowell, T., Millward, G. 等：2022，Space Weather，20，e2022SW003193。DOI：10.1029/2022SW003193

A. B. Galvin，L. M. Kistler，M. A. Popecki 等：2008年，Space Sci. Rev. 136，437。DOI：10.1007/s11214-007-9296-x

Gopalswamy, N.：2009，《太阳—地球系统的气候与天气》（CAWSES）：选自2007年京都研讨会的论文，T. Tsuda、R. Fujiki、K. Shibata 和 M. A. Geller 编，77。

Gopalswamy, N., Lara, A., Manoharan, P. K., Howard, R. A.：2005a，Adv. Space Res. 36, 2289。DOI：10.1016/j.asr.2004.07.014Gopalswamy, N., Yashiro, S., Liu, Y., Michalek, G., Vourlidas, A., Kaiser, M.L., 和 Howard, R.A.：2005b，J. Geophys. Res. 110, A09S15。DOI：10.1029/2004JA010958Gopalswamy, N., Akiyama, S., Yashiro, S., Michalek, G., Lepping, R. P.：2008，J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 70, 245。DOI：10.1016/j.jastp.2007.08.070Gopalswamy, N., Yashiro, S., Michalek, G., Stenborg, G., Vourlida ward, R. A.：2009，Earth Moon Planets 104, 295。DOI：10.1007/s11038-008-9282-7 Gopalswamy, N., Yashiro, S., Michalek, G., Xie, H., Mäkelä, P., Vourlidas, A., 和 Howard, R. A.：2010a，Sun a nd Geosphere. 5, 7。Gopalswamy, N., Xie, H., Mäkelä, p., Akiyama, S., Yashiro, S., Kaiser, M. L., Howard, R.A. 和 Bougeret J.-L.：2010b，Astrophys. J. 710, 1111。DOI：10.1088/0004-6256/710/2/1111Gopalswamy, N., Yashiro, S., Akiyama, S., 和 Xie, H.：2017，Solar Phys. 292, 65。DOI：10.1007/s11207-017-1080-9 Gopalswamy, N., Yashiro, S., Akiyama, S., 和 Xie, H.：2018a，J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 180, 35。DOI：10.1016/j.jastp.2017.06.004 Gopalswamy, N., Yashiro, S., Akiyama, S., 和 Xie, H.：2018b，IAU Symposia, 335, 258。DOI：10.1017/S1743921317011048 Howard, R. A., Michels, D. J., Sheeley, N. R. Jr. 和 Koomen, M. J.：1982，Astrophys. J. 263, L101。DOI：10.1086/183932 Howard, R. A., Moses, J. D., Vourlidas, A. 等：2008，Space Sci. Rev. 136, 67。DOI：10.1007/s11214-008-9341-4Ipavich, F. M., Galvin, A. B., Lasley, S. E. 等：1998，J. Geophys. Res. 103, 17205。DOI：10.1029/97JA02770Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M., St. Cyr, O.C., Guhathakurta, M., Christian, E.：2008，Space Sci. Rev. 136, 5。DOI：10.1007/s11214-007-9277-0Krall, J.：2007，Astrophys. J. 657, 559。DOI：10.1086/510191 Krall, J., 和 Sr. Cyr, O. C.：2006，Astrophys. J., 652, 1740。DOI：10.1086/508337 Lemen, J., Title, A., Akin, D. J. 等：2012，Solar Phys. 275, 17。DOI：10.1007/s11207-011-9776-8

Lin, D., Wang, W., Garcia-Sage, K., Yue, J., Merkin, V., McInerney, J. M., 等：2022, Space Weather，20，e2022SW003254。DOI：10.1029/2022SW003254Luhmann, J. G., Curtis, D. W. Schroeder, P. 等：2008年，Space Sci. Rev. 136，5。DOI：10.1007/s11214-007-9170-xPesnell, W. D., Thompson, B. J., Chamberlin, P. C. 等：2012，Solar Phys. 275，3。DOI：10.1007/s11207-011-9841-3Sarkar, R., Gopalswamy, N., 和 Srivastava, N.：2020，Astrophys. J. 888，121。DOI：10.1086/508337 Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I. 等：2012，Solar Phys. 275，207。DOI：10.1007/s11207-011-9834-2Sindhuja, G., 和 Gopalswamy, N.：2020，Astrophys. J.，889，编号104。DOI：10.3847/1538

-

4357/ab620f Thernisien, A.：2011，Astrophys. J. Supp. Ser. 194，33。DOI：10.1088/0067-0049/194/2/33Thernisien, A., Vourlidas, A., Howard, R.A.：2009。利用 STEREO/SECCHI 数据对日冕物质抛射进行前向建模。Sol. Phys. 256，111。Webb, D. F., Lepping, R. P., Burlaga, L. F., DeForest, C. E., Larson, D. E., Martin, S. F., Plunkett, S. P., and Rust, D. M.：2000，J. Geophys. Res. 105，27251。DOI：10.1029/2000JA000021 Yashiro, S., Gopalswamy, N., Michalek, G., St. Cyr, O. C., Plunkett, S. P., Rich, N. B., and Howard, R. A.：2004，J. Geophys. Res. 109，A07105。DOI：10.1029/2003JA010282 Zhang, H., Brandenburg, A., Sokoloff, D. D.：2016，Astrophys. J. 819，146。DOI：10.3847/0004- 637X/819/2/146 Zhang, Y., Paxton, L. J., Schaefer, R., & Swartz, W. H.：2022，Space Weather. 20，e2022SW003168。DOI：10.1029/2022SW003168