Draft version January 30, 2026 年使用 AASTeX 7.0.1 中
的 LaTeX 双栏 样式排版

arXiv:2601.21101v1 [astro-ph.SR] 28 Jan 2026

彗星 C/2023 P1 西村日冕物质抛射驱动的断连后彗尾再生的首次定量研究

Shaheda Begum Shaik,[1,2] Guillermo Stenborg,[3] Phillip Hess,[2] Angelos Vourlidas,[3] Karl Battams,[2] and Robin Colaninno[2]

[1] George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA
[2] U.S. Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA
[3] The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD 20723, USA

（《天体物理学杂志》收稿日期：2026年1月5日；修订日期：2026年1月9日；接受日期：2026年1月17日）

摘要

彗星C/2023 P1（西村彗星）于2023年9月1日至14日由太阳轨道飞行器搭载的太阳轨道器日球层成像仪（SoloHI）进行了观测。在此期间，该彗星的离子尾持续波动，并发生四次尾部断连事件（TDEs），每次均与一次日冕物质抛射（CME）的经过相吻合。本文报告了观测效果最佳的一次TDE的离子尾动力学，该事件发生于9月11日。SoloHI白光图像显示，原有离子尾的下游部分突然弯曲，随后出现扭折并被切断。断连起始于图像中日冕物质抛射前沿投影经过后 ∼6.5小时，与日冕物质抛射侧翼遭遇相一致。断连之后，离子尾在 ∼24 小时内重新形成，再生速率为 ∼86±7 km s^{-1}，表明新电离物质沿环绕彗星彗发的磁场形成的速率。TDE之后，脱离的彗尾以估计速度 ∼295±20 km s^{-1}向背日方向漂移，与当地日冕物质抛射侧翼的速度相当，表明被切断的等离子体极有可能被日冕物质抛射带离彗星。本研究首次对彗星与日冕物质抛射的相互作用以及彗星尾部断连事件随后的再生阶段进行了直接的定量表征。这些测量之所以能够实现，得益于SoloHI独特的日球层内区覆盖，而这源于高光度灵敏度、短曝光时间以及能够保留精细尺度彗尾动力学的宽视场相结合。

关键词：彗星：一般 — 彗星：长周期彗星 — 彗星：离子尾 — 彗星：彗星动力学 — 彗星：近太阳彗星 — 太阳：太阳风 — 太阳：日球层 — 太阳：太阳日冕物质抛射 — 太阳：太阳活动 — 太阳：太阳天文台 — 太阳：太阳磁场 — 太阳：太阳物理学

1. 引言

彗星的离子（等离子体）尾是探测日球层条件的天然探针，其方向和亮度会随周围太阳风速度、密度以及行星际磁场（IMF）拓扑结构的变化而响应（Biermann 1951；Alfven1957）。对彗星活动的观测有助于揭示支配逸气、电离和彗尾形成的等离子体过程，而这些过程受到太阳环境的影响（例如，Ip 2004；Broiles等人 2015；Behar等人 2018；Bemporad等人 2023 ）。随着彗星接近太阳，彗星核升华产生的气体形成彗发，其中的中性分子会电离（Povich等人 2003）。这些离子对太阳风和行星际磁场高度敏感，因此形成一条背日向、与局地IMF方向对齐的离子尾。相比之下，尘埃尾由中性尘埃颗粒构成，这些颗粒受太阳引力和辐射压筛分，形成宽阔的尾部，其方向大致与弯曲的彗星轨道一致（Whipple 1950；Jones等人 2017，以及其中的参考文献）。

彗星经过距太阳 1 天文单位（au）以内的区域时，其离子尾呈现出动态特征，表现为振荡、不稳定性，以及显著的大幅度折曲和结（Nistic`o 等

电子邮箱：sshaik7@gmu.edu

2018；Wellbrock 和 Jones 2025）。太阳风携带并缠绕在彗星电离彗发周围的行星际磁场，可能与太阳磁结构发生磁重联，导致彗尾脱离，从而形成彗尾断连事件（TDE；Barnard1899，1920；Voelzke2005）。据报道，这些彗尾断连事件的主要日球层驱动因素包括穿越行星际扇区边界（例如日球层电流片，HCS；Niedner 和 Brandt 1978；Yi 等 1996；Konz 等 2004；Jia 等 2007）、遭遇流相互作用区（SIR；Wegmann 2000），以及与日冕物质抛射（CME）的磁结构相互作用（Jones 和 Brandt 2004；Vourlidas 等 2007；Kuchar 等 2008；Jia 等 2009）。

断连后，随着彗星物质持续电离，彗尾会迅速重建。尽管自 20 世纪 70 年代以来已有许多彗尾断连事件的报道，但由于时间采样间隔受限、视场（FOV）狭窄，以及在许多彗星观测中难以分辨彗尾的精细结构和动态过程等因素，对彗尾重建时间尺度及其与局部等离子体参数之间关系的定量约束仍鲜有实现。因此，在观测时间尺度上，彗尾重建一直被描述为瞬时完成（Voelzke2005），但缺乏分辨率足够的测量结果。彗星进入内日球层时会展现最为显著的动态变化，此时加热效应和行星际磁场的快速变化尤为明显。然而，在这一阶段开展地基观测往往颇具挑战，因为较小的日心角会降低彗星的可见度，因此，日球层成像仪器成为持续捕捉这些动态现象的主要手段。

太阳轨道器日球层成像仪（SoloHI；Howard 等，2020）是搭载于太阳轨道飞行器上的可见光成像仪（M¨uller 等，2020；Garc´ıa Marirrodriga 等，2021），其分辨日球层精细特征的能力优于位于 1 au 处的同类仪器（Hess 等，2023）。SoloHI 更高的空间和时间分辨率，加上 40° 宽视场，使其能够在内日球层相当大的距离范围内，详细追踪快速的形态变化。

在本研究中，我们利用 SoloHI 对彗星 C/2023 P1（西村；Zheltobryukhov 等，2024）的独特观测，分析其彗尾动力学。我们重点研究了彗星、日冕物质抛射和太阳风之间的相互作用，观测期为2023年9月1日至14日，并量化离子尾的演变及其对瞬变日球层条件和背景日球层条件的响应。在此期间，9月3日、5日、8日和11日观测到了四次彗尾断连事件，每次都恰逢日冕物质抛射穿越。在这段时间，SoloHI 提供了捕捉彗星—太阳风—CME相互作用的独特机会，使我们能够追踪细节，并解析从彗核延伸出的等离子体尾动力学。全部四次断连都与日冕物质抛射观测相吻合，表明日冕物质抛射驱动的磁重联是这些事件的主要触发因素，而非日球层电流片或流相互作用区穿越。

为更准确地约束 SoloHI 观测到的日冕物质抛射的传播方向和速度，我们还使用了太阳与日球层探测器（SOHO；Brueckner 等，1995）上的 LASCO/C2 和 C3（Domingo 等，1995）日冕仪，以及太阳与地球关系观测台-A（STEREO-A；Howard 等，2008）上的 COR2（Kaiser 等，2008）日冕仪获取的白光图像。这些仪器位于 1 au 附近，在彗星观测期间经度位置彼此接近（图1），为解读日后由 SoloHI 在日球层更远处观测到的日冕物质抛射提供了重要背景信息。

彗星 C/2023 P1 还于2023年9月27日至28日由帕克太阳探测器上的太阳探测器宽视场成像仪（WISPR；Vourli-das 等，2016）以白光成像（PSP；Fox 等，2016；Raouafi 等，2023），并于2023年9月17日至30日由 STEREO-A/HI-1 成像仪（Eyles 等，2009）成像。我们计划在后续文章中基于这些观测开展彗星动力学研究及三维观测几何分析。

我们报告对观测效果最佳的 TDE 的研究结果。该事件发生于2023年9月11日，旨在量化断连的动力学特征、研究其与日冕物质抛射穿越的相关性、监测断连的起始过程，并考察断连后尾部的再生长情况。本文结构如下：第2 节介绍观测并详细说明彗星星历，第3 节呈现结果与讨论，最后，第4 节总结我们的研究结果。

2. 观测

2.1. 彗星 *C/2023 P1* 的 *SoloHI* 观测

太阳轨道飞行器运行在绕太阳的椭圆轨道上，近日点距离为 0.28 天文单位。2023 年 9 月 1 日至 14 日期间，航天器的轨道距离从 0.69 天文单位减小到 0.54 天文单位。其搭载的成像仪 SoloHI 在可见光波段（450–850 nm）观测日冕和内日球层，视场为 ∼5至 45°，位于太阳中心起算、航天器逆冲压方向一侧。SoloHI 图像记录了电子散射的光球光（通过汤姆孙散射，即 K日冕；Billings，1966），以及行星际

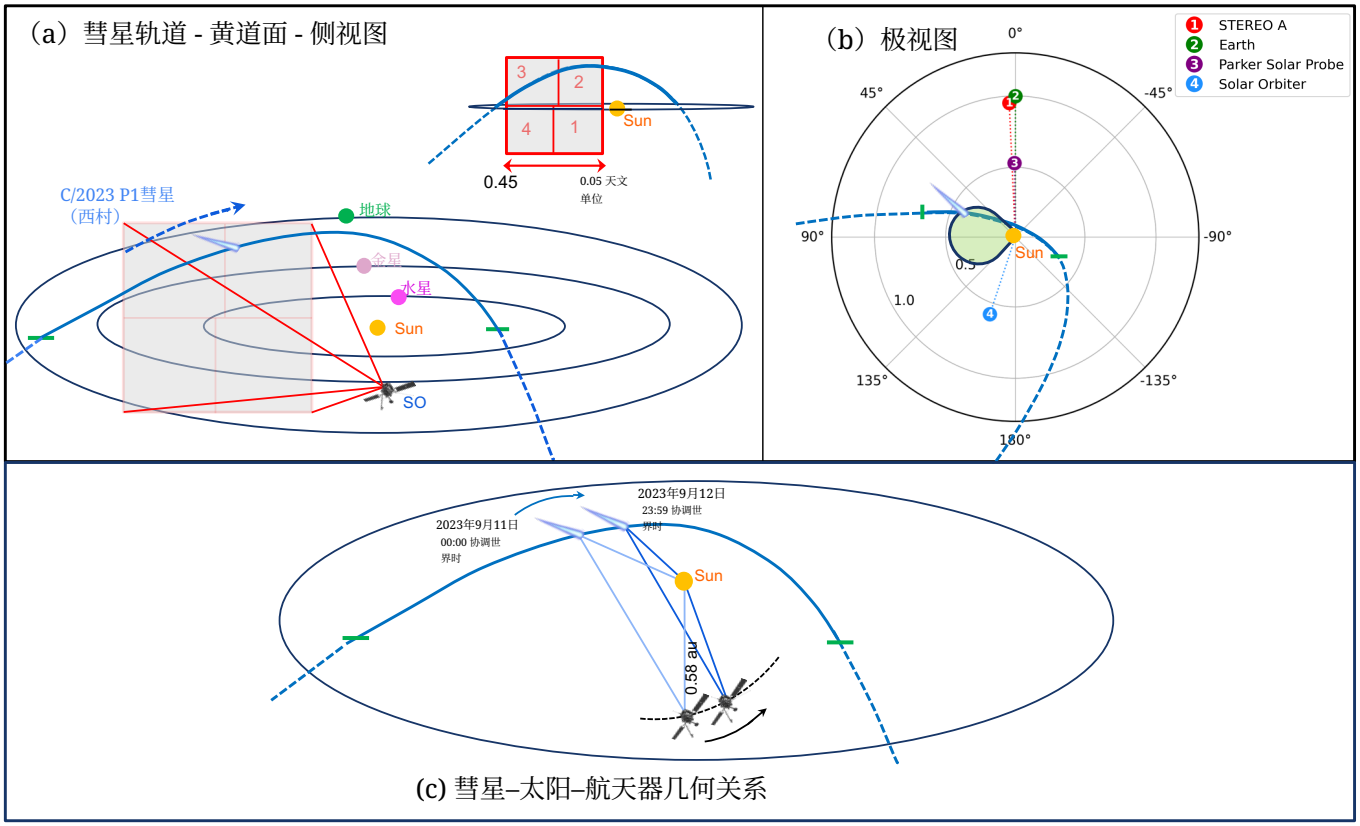

图1. C/2023 P1彗星的轨迹，以及太阳轨道器、附近行星和其他航天器各自的位置。(a) 2023年9月11日彗星相对于黄道面位置的侧视图。蓝色虚线箭头表示彗星轨迹的方向。彗星在黄道面上方的路径以蓝色实线表示，下方的路径以蓝色虚线表示。插图显示了当天的 SoloHI视场（红色轮廓线圈出的灰色阴影区域）。(b) 从太阳北极上方俯视的黄道面和彗星路径。绿色阴影区域表示与所研究的 TDE 相关的日冕物质抛射范围，并展示了日冕物质抛射与彗星相互作用的几何关系。背景图层中的极区地图由 Solar-MACH（Gieseler 等，2023）生成。(c) 彗星、太阳和太阳轨道器的几何关系，以及在分析时段（2023年9月11日 00:00 协调世界时至9月12日 23:59 协调世界时）彗星与轨道器的轨迹。轨道星历取自 JPL Horizons 页面。该示意图展示了简化后的日冕物质抛射与彗星相互作用几何关系，且未按比例绘制。

尘埃粒子散射的光，这些粒子绕太阳运行（即 F日冕；Kimura & Mann 1998；Lamy et al. 2022）。此外，行星际天体和星场也构成了视场内的完整景象。

SoloHI图像由四个有源像素传感器（APS）拼接单元组成（如图1a所示，按逆时针方向编号为1至4）。这些拼接单元独立曝光和读出，并可在地面上组合成单幅图像。这种配置使各个拼接单元能够分别优化其曝光时间和成像节奏。这些图像[4] 经过校准过程，以消除探测器偏置、根据曝光时间对信号进行归一化，并将探测到的强度转换为平均太阳亮度（MSB；Hess等，2023年）。

为了去除 F日冕分量，从而显现出暗得多的 K日冕信号，我们进一步使用“LW”技术处理校准后的图像（Howard 等人，2022附录 A），该技术最初是为 PSP/WISPR（一种类似的白光日球层成像仪）开发的。该技术利用时域对背景信号进行建模，从而消除信号中占比相当大的准稳态分量的影响；准稳态分量是图像强度的最大贡献来源（Stenborg 等人，2025）。

2.2. 彗星星历

C/2023 P1 是一颗长周期彗星，由西村英男于2023年8月12日在日本挂川市发现。它于2023年9月17日到达近日点，日心距离为0.225天文单位。远日点距离为115.32天文单位

[4] 所有 SoloHI 数据均可通过 SoloHI 主页公开获取（https://solohi.nrl.navy.mil/so data）

表 1. 彗星观测期内的断连事件

SoloHI 观测		LASCO 观测		
断连事件	CME-彗星交会日期和时间	CME爆发日期和时间	源位置	角宽度（度）
TDE 1	2023年9月4日 01:43 UT	2023年9月3日 09:12 UT	西侧边缘	249（部分晕）
TDE 2	2023年9月6日 04:55 协调世界时	2023年9月5日 14:00 协调世界时	西侧边缘	360（晕）
TDE 3	2023年9月9日 03:23 协调世界时	2023年9月8日 11:36 协调世界时	西侧边缘	360（晕）
TDE 4	2023年9月11日 22:35 协调世界时	2023年9月10日，16:48 协调世界时	西侧边缘	126（部分晕状）

轨道周期约为439年。彗星轨道的偏心率很高，$e = 0.996$。在近日点时，这颗彗星的视星等为2.5，而其总绝对星等为12.2。

图 1 展示了彗星的轨道轨迹以及 SoloHI 的观测几何构型。蓝色曲线描绘了彗星的路径（实线表示位于黄道面上方，虚线表示位于黄道面下方），并标出了彗星在 2023年9月11日的位置。面板 (a) 中，红色轮廓线圈定的灰色阴影区域表示由四个 APS图块构成的 Solo HI视场。插图示意图展示了从太阳中心看去的 Solo HI视场，其横跨黄道面，彗星的投影轨道以蓝色表示。面板 (b) 展示了从太阳北极上方俯视、2023年9月11日的视图，其中显示了彗星路径以及地球、太阳轨道器、STEREO-A 和 PSP 航天器各自的位置。LASCO/SOHO 位于地球附近的拉格朗日点L1。在这一观测期间，太阳轨道器与地球几乎处于日合位置，因为地球与太阳轨道器相距近 160°。绿色阴影区域表示与所研究的 TDE 相关的日冕物质抛射传播方向的大致经度范围。面板 (c) 展示了分析所研究 TDE 期间（2023年9月11日 00:00 协调世界时至9月12日 23:59）彗星—太阳—太阳轨道器几何构型的演变，数据来自 JPL Horizons[5] 。

SoloHI视场的径向范围取决于航天器的日心距离。然而，由于在TDE期间，航天器仅从0.58天文单位移动至0.56天文单位，因此视场的线性范围几乎保持不变。如图1c所示，彗星与航天器之间的距离从0.77天文单位变为0.75天文单位。因此，SoloHI像素的线性范围从 ∼41.6 Mm/像素降至∼40.5 Mm/像素，变化幅度为 ∼2.6%。由于这一变化远低于像素级测量不确定性，因此可忽略不计。使用根据这些数值，主要分析所用的2号图块视场的近似线性范围约为10至 55 $R_\odot$。

[5] https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb lookup.html#/?des=2023%20P1&view=VOP

3. 结果与讨论

3.1. 断连事件与*CME*动力学

彗星 C/2023 P1 于2023年9月1日协调世界时08:50首次被SoloHI探测到，并一直留在该仪器的视场中，直至9月14日协调世界时约04时。通过在线版图2中的SoloHI拼接图和子视场影片，可以全面了解彗星及其等离子体尾的演变过程。2。

影片中的拼接图视图展示了彗星在SoloHI视场中的整体演变，以及其彗尾发生的多次断连事件。根据彗尾狭窄、高度准直的形态、持续的背日方向，以及断连后迅速再生的特征，我们将观测到的彗尾解释为离子尾。这种行为是离子尾的典型特征：离子尾受行星际磁场支配，在与瞬变太阳风结构及日冕物质抛射相互作用时会出现这种行为；而尘埃尾则不会如此，其在太阳辐射压作用下平滑演变（例如，Niedner 1981；Brandtetal. 1992）。

每个TDE的发生时间及相关日冕物质抛射（如LASCO日冕物质抛射目录[6]；Yashiro等，2004中所列）汇总于表1中。在四次断连事件中，TDE 4观测效果最佳，因为它是唯一一次被2号图块捕获的TDE；与3号图块相比，2号图块具有更高的时间分辨率和更短的曝光时间，因此成为本研究的重点。2号图块相对较短的曝光时间提高了测量精度，可在快速演化期间最大限度地减少运动模糊和噪声，并保留尾部形态。在我们的分析时段内，SoloHI 2号图块55至65秒的曝光时间对应于 <1 个像素的运动，对于以250 km s^{-1} 速度移动的特征而言。

彗星于2023年9月9日08:27协调世界时进入2号图块视场，TDE 4则发生在9月11日穿越日冕物质抛射期间。在图2的（a）面板中，

[6] https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME 列表

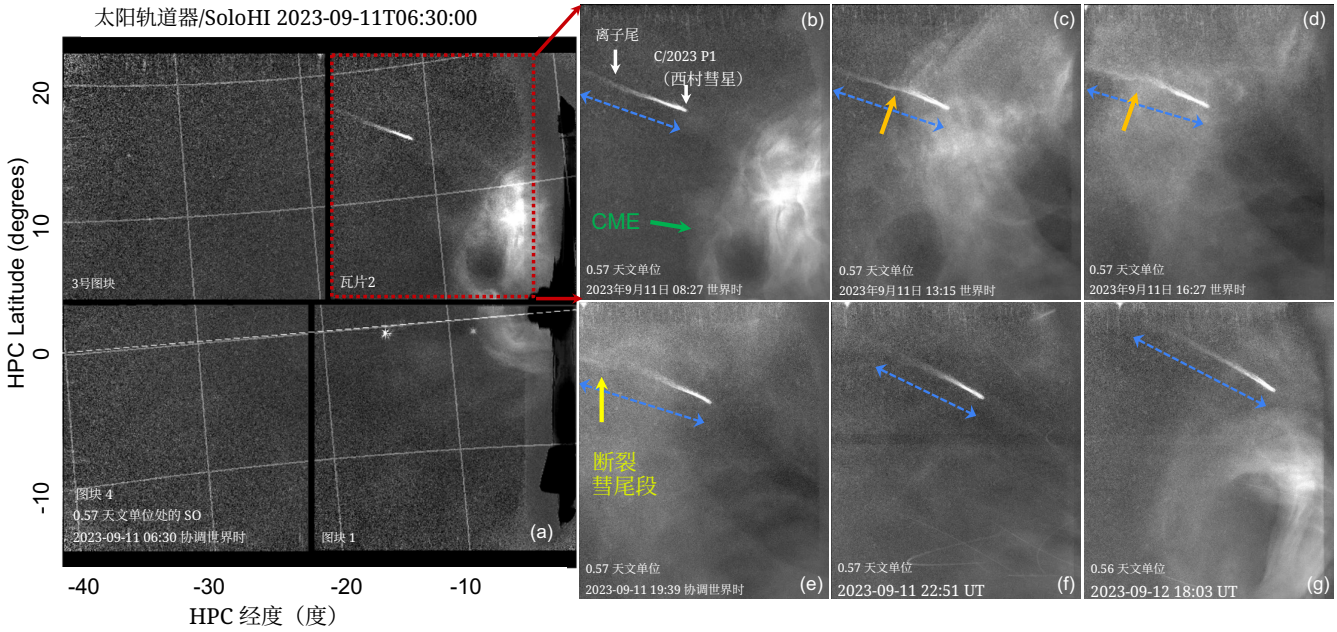

图2. 2023年9月11日C/2023 P1彗星-日冕物质抛射相互作用的SoloHI观测。(a) 完整SoloHI拼接图视场的快照，太阳位于图像右侧。由实线勾勒的网格描绘HPC坐标系中的经度和纬度，虚线表示黄道面。(b–g) 图(a)红框标示子视场中所选图像帧的时间序列，展示彗星-日冕物质抛射相互作用。橙色箭头标出彗尾中的扭结，黄色箭头指示已脱离的彗尾。断连之后，序列最后两幅快照展示了尾部再生，其彗尾长度和强度由蓝色虚线箭头标出。一部展示彗星整体演化及其与日冕物质抛射和彗尾断连事件相互作用的影片可在文章在线版本中获取。影片首先以瓦片3和瓦片2的拼接视图呈现宽视场演化，随后是所选子视场的放大视图。

我们展示了一幅涵盖四个APS图块的SoloHI拼接图像。由于四个图块的图像是在不同时间获取的，报告的时间对应于各图块观测时间的平均值。网格标示了日球面投影笛卡尔（HPC；Thompson 2006）坐标系中的经度和纬度。该坐标系以观测者为中心，太阳位于 0° 经度和 0° 纬度处。瓦片2中的红色矩形标出了感兴趣区域，可在其中详细观测彗星和彗尾。图中的（b）至（g）面板展示了彗星在该子视场内演化的六个时刻。

与 TDE 4 相关的日冕物质抛射于 2023年9月10日出现在 LASCO/C2 和 SECCHI-A/COR2 日冕仪的视场中，首次出现在 C2 日冕仪中的时间为 ∼16:48 协调世界时。该日冕物质抛射在太阳上的源区位于相对于地球而言的太阳西侧边缘附近，其角宽度在图 1b. 中以绿色区域表示。

LASCO日冕物质抛射目录根据截至 ∼30 $R_\odot$ 的高度—时间测量线性拟合，报告此次日冕物质抛射的天空平面（POS）速度为 ∼406 $\mathrm{km s^{-1}}$。然而，这一数值仅反映日冕物质抛射运动在LASCO观测平面上的投影，因此并不代表日冕物质抛射的实际速度。要恢复实际的去投影传播速度，需要确定日冕物质抛射的三维（3D）几何形态，并沿前端方向测量其高度。此外，仅凭POS测量，很难直接在像平面中明确判定日冕物质抛射与彗星相互作用的三维条件，因为这些测量无法指出日冕物质抛射三维曲面的哪个区域（前端或侧翼）与彗星相遇。

为解决这种几何歧义，我们采用渐进式圆柱壳模型（GCS；Thernisien2011）重建日冕物质抛射的三维几何结构。该模型是一种前向建模工具，用户可调整一组六个自由参数，以重现至少一张图像中可见的日冕物质抛射磁通绳结构；它被广泛用于日冕物质抛射重建（Kay& Palmerio 2024）。尽管该方法可用于来自单一视角的单张图像，但若联合使用多张来自不同观测视角且时间尽可能接近的图像，不确定性会显著降低（Nikou 等，2025）。我们利用 LASCO/C2、C3、SECCHI-A/COR2 和 SoloHI 的观测，对 9月10日协调世界时 18:30 至

9月11日协调世界时 22:00 这一时段进行重建。由于整个日冕物质抛射传播时段内的图像并非同时获取，我们在各自的观测覆盖时段内使用相互重叠的仪器组合。具体而言，后期阶段 LASCO/C3 与 SoloHI 的重叠观测，为日冕物质抛射在与 TDE 相关的高度和时刻的几何结构及运动学特征提供了最强约束。这确保了推导出的传播方向和速度以最符合事件发生位置处日冕物质抛射状况的观测为依据。

在拟合时段内，通过 GCS 重建得到的日冕物质抛射前沿日心高度从 $\sim$4 增至 80 $R_\odot$ （$\sim$0.02 至 0.37 天文单位）。根据这些高度的线性拟合，我们得出经去投影校正的日冕物质抛射前端速度为 $\sim 560 \pm 15\,\mathrm{km s^{-1}}$。速度误差估计以及文中报告的其他误差，均由拟合斜率不确定性的标准误差得出。

GCS 的最佳拟合参数给出了日冕物质抛射在斯托尼赫斯特坐标系中的传播方向（经度，纬度） $\approx$(110°, 25°)，以及日冕物质抛射半角 52°。结合长宽比（κ = 0.36），该半角对应的 GCS 经向角宽度为 $\sim$146° 。此外，所得磁通量绳倾斜角 15° 以及彗星的轨迹表明，彗星在日心距离为 $\sim$64 $R_\odot$ 处穿过日冕物质抛射宽阔的侧翼区域，同时日冕物质抛射穿行于内日球层。在 SoloHI 的观测视角下，该侧翼对应于日冕物质抛射背向仪器的一侧，如图1b 所示。由于白光成像观测到的是沿延伸视线（LOS）积分的日球层汤姆孙散射光，位于不同深度的结构可能会在像平面的同一区域重叠。因此，在实际发生物理接触之前，日冕物质抛射前沿就可能在投影中掠过彗星，实际接触发生在 $\sim$64 $R_\odot$ 侧翼位置。这些视线投影效应解释了为何在图像序列中，日冕物质抛射和彗星看起来位于同一位置，而此时实际的日冕物质抛射—彗星相互作用尚未发生。

根据侧翼区域的磁通量绳几何形态（如 Thernisien (2011)所示），结合Hess & Zhang 2015附录部分所述的方法，以及日冕物质抛射前端与彗星之间的角距离（从 $\sim 50-60°$演变而来），我们估算了日冕物质抛射在侧翼区域彗星所在位置的局部速度为 $\sim 380 \pm 20\,\mathrm{km s^{-1}}$。该速度低于前端速度，符合自相似演化条件下，远离日冕物质抛射前端的大角距离处预期的较低膨胀速度。

3.2. 离子尾的动力学与断连事件 *4*

从图2 的 (b、c) 面板以及影片中的子视场画面可以看到，在彗星穿越视场期间、日冕物质抛射抵达彗星之前，离子尾中普遍存在微小且间歇性的波动，这表明彗星与周围介质发生了相互作用。协调世界时约 13:15，彗尾出现偏转和弯折（c、d 面板中的橙色箭头）。这一弯折的成因尚未得到明确确认，但其出现时间与日冕物质抛射前方可能存在的波状结构相吻合，该结构可能与受压缩的太阳风等离子体有关。不过，受限于对这一波状结构的观测，这仍属推测。

随着彗星随后遭遇日冕物质抛射侧翼，弯折逐渐演变，并在约6.5小时后明显断开；这与根据三维几何确定的日冕物质抛射侧翼穿越时间一致。图（e）中的黄色箭头标示了断连处及脱离的彗尾。请注意，到 $\sim$18协调世界时2023年9月12日，视场中出现了一个与新的日冕物质抛射相关的前沿（图g）。断连后，彗尾逐渐再生（图f至图g），下一节将对此进行分析和讨论3.3。

3.3. 断连后彗尾再生的特征

图3展示了SoloHI图像的时间序列，其中追踪了彗星彗尾的近距离细节，以考察其形态和TDE的动力学。图中每个面板均标注了断连的相应阶段。在面板（a）和（b）中，彗尾看起来连续，以橙色圆圈标示；弯折清晰可辨，并持续增长，以橙色箭头标示。在面板（c）中，弯折消失（洋红色箭头），可见一段彗尾与彗核断开（洋红色圆圈），标志着断连开始。断连位置位于彗尾下游、远离彗核，这表明导致断连的磁相互作用始于日冕物质抛射侧翼的磁场与原有尾部相交之处。接下来的两个面板（d）和（e）展示了日冕物质抛射经过后彗尾的演变，以及由此造成的彗尾断连。最后一个面板（f）捕捉到一条新的、较为笔直的彗尾从彗发中显现，并最终恢复至事件前范围。

为量化彗尾在断连后如何重新形成，我们测量了每张 SoloHI 图像中的彗尾长度。我们采用略高于背景强度的光度强度阈值（$\sim 1.8 \times 10^{-12}$ MSB；平均太阳亮度单位），以

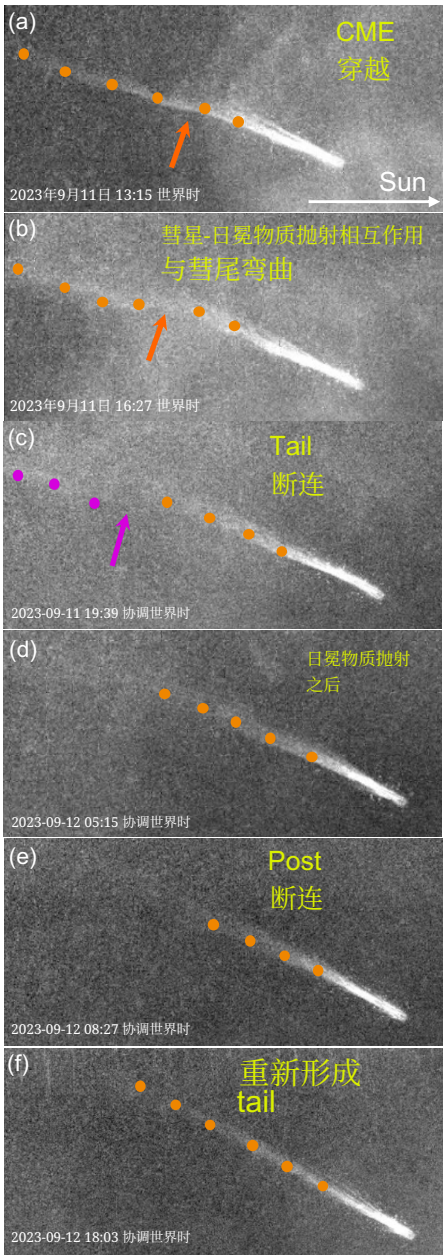

图 3. 所选 SoloHI 图像帧的时间序列，展示了子视场中彗星的放大视图下的彗尾动力学和断连事件。橙色圆圈标示彗尾上若干选定区域的强度，洋红色圆圈则标示断连彗尾的强度。面板 (a) 中的白色箭头指示朝太阳方向，即子视场的右侧。

确定每张图像中彗尾可可靠探测到的最远范围 [7]。我们承认，彗尾可能延伸到测量

[7] 明亮彗星头部的强度远高于 5.9×10^{-12} MSB

长度，而彗尾亮度的表观终点则降至光度灵敏度所能探测到的最低可观测星等。即便如此，随时间采用一致的强度阈值，仍可客观衡量彗尾恢复至事件前状态的程度。此外，在考察再生速率时，我们着重追踪彗尾恢复至事件前范围，而非彗尾长度的绝对星等。

在我们的分析时段内，太阳-彗星-轨道器相位角变化极小（从 ∼43到 38°），因此观测几何的影响可以忽略不计，使不同帧中的彗尾长度具有可比性。我们沿着每帧中的瞬时彗尾轴线测量瓦片2中可见的彗尾长度，因为彗尾方向可能随行星际磁场而摆动。通过考虑 SoloHI 2号图块的像元角尺度（每像素对应的角尺寸为 74″）以及图1所示的相应航天器与彗星之间的距离，将以像素表示的投影长度（即从彗核到沿彗尾轴线可见的最远点的直线距离）换算为兆米（Mm）。根据彗星的三维日心位置、太阳轨道器的视线几何，并假设彗尾沿径向背离太阳传播，对测得的彗尾长度进行去投影处理，以校正视线投影效应。

在图4中，我们展示了彗星穿过2号图块视场期间连续三天测得的彗尾长度。图4 中观测到的彗尾长度最初上升并非实际变化，因为这仅表示随着彗星向视场中心移动，进入瓦片2的彗尾比例增加。虽然这一时期在瓦片3中也能看到彗尾，但两个图块的观测时间不同，且光度灵敏度各异，因此任何跨越图块边界测量彗尾的尝试都容易产生显著误差。我们转而将连续四个时间戳中观测到的平台区域视为瓦片2中完整彗尾长度的代表，图4中的紫色箭头标出了该区域。

2023年9月11日协调世界时19:00左右，彗尾长度骤然减小，表明发生了彗尾断裂。图中顶部的紫色横线标示了日冕物质抛射的演化过程，即日冕物质抛射在SoloHI视场中传播并与彗星相遇的时间段。左侧第一个红色箭头标示了在SoloHI图像的投影中观测到日冕物质抛射前沿穿过彗星的时刻，第二个箭头则标示了第3.1节讨论的实际日冕物质抛射与彗星侧翼相遇的时刻。3.1。

在 TDE 发生后、彗尾离开视场前，再形成尾的长度随时间近似线性

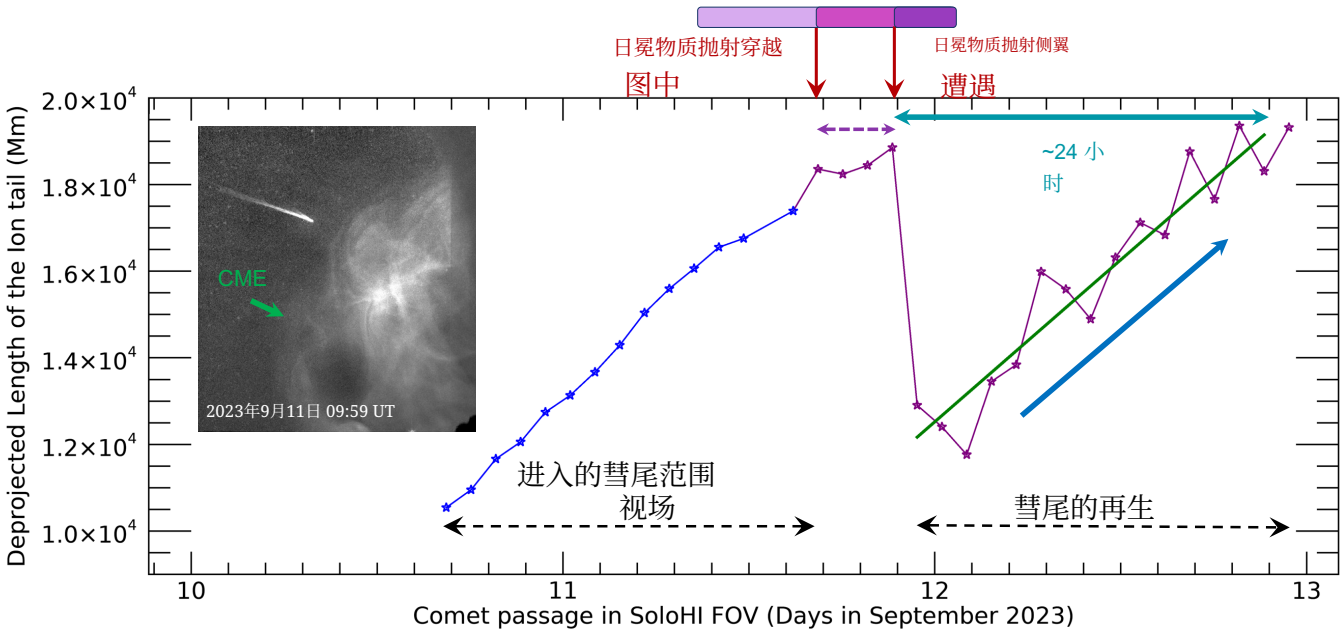

图4。断连事件后离子尾的再生速率。插图显示了彗星和日冕物质抛射在 SoloHI 2号图块视场中的传播过程。2023年9月11日协调世界时19:00附近，彗尾长度骤减，表明发生了彗尾断连；此前出现了日冕物质抛射穿越和侧翼遭遇（上方红色箭头）。图中蓝色符号表示彗星彗尾进入视场的范围。彗尾连续四帧完全处于视场内（紫色箭头所示），随后观测到断连和再生。紫色横线标示日冕物质抛射经过 SoloHI视场的持续时间，包括日冕物质抛射进入视场（浅紫色）、其前沿在彗星-日冕物质抛射相互作用发生前的投影穿越过程（中紫色），以及彗星穿过日冕物质抛射侧翼后的时间段（深紫色）。增长速率由绿色线所示线性拟合的斜率确定。

增长。这种线性增长表明，彗尾的再 $\sim 86 \pm 7\,\mathrm{kms}^{-1}$。作为参考，相应的天球平面再生长率为 $\sim 53 \pm 5\,\mathrm{kms}^{-1}$，可视为下限。恢复至事件前范围历时 24 小时。该再生速率远低于这些日心距离处慢太阳风的典型整体速度（$\sim 300 - 400\,\mathrm{kms}^{-1}$）（Parker 1958；Brooks 等人, 2015）。这一速率反映了彗尾的重建过程，该过程可能受彗星离子产生速率、磁场重构，或日冕物质抛射后环境逐渐平复时磁场重新缠绕等因素控制，相关讨论见 Jock-ers &Lust (1973)；Jones等人(2000)；Voelzke (2005)；Opitom 等人(2016)。

3.4. 脱离彗尾的动力学

在TDE之后，我们追踪漂移的脱离彗尾的运动（图3c中的洋红色圆圈），以评估其动力学，并将其运动置于日冕物质抛射的背景中。利用第3.3节所述的彗星—航天器观测几何，我们测量脱离彗尾段的速度，以确定其相对于断开位置的背日漂移。假设脱离的等离子体段近似从彗核沿径向向外运动，其位移在连续帧之间测得后，给出其后缘的去投影漂移速度 $\sim 295 \pm 20\mathrm{kms}^{-1}$。该速度略低于局地日冕物质抛射侧翼速度 $\sim 380 \pm 20\,\mathrm{kms}^{-1}$，该值由第3.1节讨论的GCS重建推断得出，同时考虑到GCS重建的预期不确定性，以及沿单一视线对空间不同位置的结构成像所固有的投影效应。

这种漂移速度表明，断连后的脱离物质很可能是由日冕物质抛射的侧翼输运的，因为在相互作用发生后，日冕物质抛射扫过了彗星。这种行为可以自然地解释为彗星与日冕物质抛射前端之间存在较大的角距（60° 在TDE发生时）。此外，将这种漂移速度与彗尾在初始波状结构和日冕物质抛射前缘穿越期间所观测到的波动（如图2所述），以及断连开始前6.5小时的延迟结合起来，进一步表明触发机制源于日冕物质抛射侧翼的磁结构内部。

4. 结论

SoloHI拍摄到了C/2023 P1彗星穿越内

日球层期间发生的多次彗尾断连事件影像，时间为2023年9月1日至14日；拍摄时彗星距太阳0.55至0.26天文单位。本研究分析了2023年9月11日发生的彗尾断连事件，当时距离彗星过近日点还有六天。下文将概述主要研究发现及其更广泛的意义。

- 与普遍认为日球电流片穿越、共转相互作用区和日冕物质抛射会驱动彗尾断连事件的预期相反，我们发现，此处观测到的全部四个事件都与日冕物质抛射穿越有关。SoloHI 图像序列显示，日冕物质抛射通过后会在数小时内造成持续的波动和离子尾中的大幅度折曲，并最终使彗星原有彗尾的一部分发生断连。结合对发生时间、三维几何和观测到的彗尾动力学的分析表明，触发因素源于日冕物质抛射侧翼的通过，为内日球层中磁场驱动、由日冕物质抛射引起的彗尾断连事件提供了一个清晰实例。

- 再生速率：断连后，离子尾在 1.9×10^6 千米的距离内恢复到事件发生前的长度（ ~24小时，线性增长速率为~86 ± 7 千米 秒$^{-1}$ （~$10.7 \pm 0.6\,R_\odot$ 天$^{-1}$）。此前针对彗星尾部断连事件的空间观测研究（例如 Vourlidas 等，2007 年；Kuchar 等，2008 年）证实，日冕物质抛射能够导致彗尾断连，并提供了彗尾及断连动力学的诊断方法。本研究首次对彗尾再生速率进行了定量测量。这项测量得以实现，归功于 SoloHI 独特的观测能力：其具有足够的光度灵敏度和曝光时间，并受益于有利的观测几何，从而在接近日心的日心距离处，当彗星穿过视场时，分辨出了彗星等离子体动力学和彗尾断连 ≤0。32 天文单位。尽管多种物理过程可能会影响彗尾的重建，但对这些机制及其对彗星科学影响的详细解释超出了本文的范围。

- 断连几何结构：TDE发生在日冕物质抛射前缘在投影上首次出现在SoloHI图像中、似乎越过彗星之后 ~6.5小时。此前观测到的彗尾明显折弯，可能反映了彗星与前端的日冕物质抛射驱动的扰动相互作用；这种扰动会使彗尾变形，但不足以将其切断。侧翼，但这种扰动不足以切断彗尾。只有当日冕物质抛射侧翼的磁结构到达彗星时，才会真正发生断连；这与彗星和日冕物质抛射前端之间的 ~60° 角距离，以及彗星位于日冕物质抛射磁通绳宽阔侧翼内的位置相符。

  彗尾断连后，脱离的彗尾段以~$295 \pm 20\,\mathrm{km s^{-1}}$的去投影速度向背日方向漂移，该速度与彗星同日冕物质抛射相互作用位置处的局地侧翼速度相当。这一漂移速度表明，彗尾正被缓慢膨胀的日冕物质抛射侧翼区域被动地向外输运。这种动力学行为，连同相对于日冕物质抛射方向的几何偏移，进一步证实彗星经历的是侧翼驱动的相互作用，而非与前端的直接遭遇。

本分析为理解内日球层中彗尾重组的物理过程建立了基准，并为离子产生、等离子体拾取和磁场披覆提供了相关观测约束。综合来看，测得的再生长行为、断连时序和漂移速度表明，在彗星与日冕物质抛射相互作用期间，彗星离子尾对日冕物质抛射的磁结构反应敏感。同样，断连起始的数小时延迟以及再生长时标凸显了在较近日心距离上分辨并检验高度动态的彗星近核等离子体环境的能力。这些观测首次表明，彗尾重组是一个响应不断演化的周围环境的渐进、可量化过程，而非在观测时标上表现为瞬时发生。

致谢

太阳轨道器是欧洲空间局（ESA）与美国国家航空航天局（NASA）开展国际合作的任务，由ESA负责运行。太阳轨道器日球层成像仪（SoloHI）由美国海军研究实验室设计、建造，目前也由其运行，并获得NASA日球物理部太阳轨道器合作办公室在DPR NNG09EK11I项下的支持。NRL的相关工作还得到美国海军研究办公室的支持。S.B.S.感谢乔治·梅森大学（GMU）通过NRL合同（N00173-23-2-C603）提供的支持。GS和AV感谢SoloHI资助项目80NSSC22K1028提供的经费支持。

参考文献

Alfven, H. t. 1957, Tellus, 9, 92, doi: 10.3402/tellusa.v9i1.9064 Barnard, E. E. 1899, 《皇家天文学会月刊》, 59, 354, doi: 10.1093/mnras/59.6.354 —. 1920, 《天体物理学杂志》, 51, 102, doi: 10.1086/142527 Behar, E., Tabone, B., Saillenfest, M., et al. 2018, 《天文学与天体物理学》, 620, A35, doi: 10.1051/0004-6361/201832736 Bemporad, A.,Pennella,S., Battams,K., etal.2023, 《天文学与天体物理学》, 680, A90, doi: 10.1051/0004-6361/202346881 Biermann, L. 1951, 天文学杂志, 29, 274, doi: 1951ZA.....29..274B Billings, D. E. 1966, 太阳日冕指南（纽约：学术出版社）Brandt, J. C., Randall, C. E., Yi, Y., & Snow, M. 1992, 载于《小行星、彗星、流星 1991》，编者 A. W. Harris & E. Bowell, 93 Broiles, T. W., Burch, J. L., Clark, G., et al. 2015, 《天文学与天体物理学》, 583, A21, doi: 10.1051/0004-6361/201526046 Brooks, D. H., Ugarte-Urra, I., & Warren, H. P. 2015, 自然通讯, 6, 5947, doi: 10.1038/ncomms6947 Brueckner, G. E., Howard, R. A., Koomen, M. J., et al. 1995, 太阳物理学, 162, 357, doi: 10.1007/BF00733434 Domingo, V., Fleck, B., & Poland, A. I. 1995, 太阳物理学, 162, 1, doi: 10.1007/BF00733425 Eyles, C. J., Harrison, R. A., Davis, C. J., et al. 2009, 太阳物理学, 254, 387, doi: 10.1007/s11207-008-9299-0 Fox, N. J., Velli, M. C., Bale, S. D., et al. 2016, 《太阳系研究评论》, 204, 7, doi: 10.1007/s11214-015-0211-6 Garc´ıa Marirrodriga, C., Pacros, A., Strandmoe, S., et al. 2021, 《天文学与天体物理学》, 646, A121, doi: 10.1051/0004-6361/202038519 Gieseler, J., Dresing, N., Palmroos, C., et al. 2023, 天文学与空间科学前沿, 9, doi: 10.3389/fspas.2022.1058810 Hess, P., Colaninno, R. C., Vourlidas, A., Howard, R. A., & Stenborg, G. 2023, 《天文学与天体物理学》, 679, A149, doi: 10.1051/0004-6361/202346907 Hess, P., & Zhang, J. 2015, 《天体物理学杂志》, 812, 144, doi: 10.1088/0004-637X/812/2/144 Howard, R. A., Stenborg, G., Vourlidas, A., et al. 2022, 《天体物理学杂志》, 936, 43, doi: 10.3847/1538-4357/ac7ff5 Howard, R. A., Moses, J. D., Vourlidas, A., et al. 2008, 《太阳系研究评论》, 136, 67, doi: 10.1007/s11214-008-9341-4 Howard, R. A., Vourlidas, A., Colaninno, R. C., et al. 2020, 《天文学与天体物理学》, 642, A13, doi: 10.1051/0004-6361/201935202 Ip, W. H. 2004, 载于《彗星 II》，编者 M. C. Festou, H. U. Keller, & H. A. Weaver, 605 Jia, Y.-D., Combi, M. R., Hansen, K. C., & Gombosi, T.I. 2007, 《地球物理研究杂志》（空间物理），112，A05223，doi: 10.1029/2006JA012175 Jia, Y. D., Russell,C. T., Jian, L. K. 等 2009，《天体物理学杂志快报》，696，L56，doi: 10.1088/0004-637X/696/1/L56 Jockers, K., & Lust, R. 1973, 《天文学与天体物理学》，26，113 Jones, G. H., Balogh, A., & Horbury, T. S. 2000，《自然》，404，574，doi: 10.1038/35007011 Jones, G. H., & Brandt, J. C. 2004，《地球物理研究快报》，31，L20805，doi: 10.1029/2004GL021166 Jones, G. H., Knight, M. M., Fitzsimmons, A., & Taylor, M. G. G. T. 2017，《伦敦皇家学会哲学汇刊》A辑，375，20170001，doi: 10.1098/rsta.2017.0001 Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M. 等 2008，《太阳系研究评论》，136，5，doi: 10.1007/s11214-007-9277-0 Kay, C., & Palmerio, E. 2024，《空间天气》，22，e2023SW003796，doi: 10.1029/2023SW003796 Kimura, H., & Mann, I. 1998，《地球、月球与行星》，50，493，doi: 10.1186/BF03352140 Konz, C., Birk, G. T., & Lesch, H. 2004，《天文学与天体物理学》，415，791，doi: 10.1051/0004-6361:20031695 Kuchar, T. A., Buffington, A., Arge, C. N. 等 2008，《地球物理研究杂志》（空间物理），113，A04101，doi: 10.1029/2007JA012603 Lamy, P. L., Gilardy, H., &Llebaria, A. 2022，《太阳系研究评论》，218，53，doi: 10.1007/s11214-022-00918-y M¨uller, D., St. Cyr, O. C., Zouganelis, I. 等 2020，《天文学与天体物理学》，642，A1，doi: 10.1051/0004-6361/202038467 Niedner, Jr., M. B. 1981，《天体物理学杂志增刊》，46，141，doi: 10.1086/190740 Niedner, Jr., M. B., & Brandt, J. C. 1978，《天体物理学杂志》，223，655，doi: 10.1086/156299 Nikou, E., Zhang, J., Dhakal, S. K.,& Dupertuis, M.2025，《天体物理学杂志》，987，157，doi: 10.3847/1538-4357/adcef0 Nistic`o, G., Vladimirov,V., Nakariakov, V. M.,Battams, K., & Bothmer, V.2018，《天文学与天体物理学》，615，A143，doi: 10.1051/0004-6361/201732474 Opitom, C., Guilbert-Lepoutre,A., Jehin, E. 等 2016，《天文学与天体物理学》，589，A8，doi: 10.1051/0004-6361/201527628 Parker, E. N. 1958，《天体物理学杂志》，128，664，doi: 10.1086/146579 Povich, M. S., Raymond, J. C., Jones, G. H. 等 2003，《科学》，302，1949，doi: 10.1126/science.1092142 Raouafi, N. E., Matteini, L., Squire, J. 等 2023，《太阳系研究评论》，219，8，doi: 10.1007/s11214-023-00952-4 Stenborg, G., Vourlidas, A., & Howard,R. A. 2025，《天体物理学杂志增刊》，280，21，doi: 10.3847/1538-4365/adf1ab Thernisien, A. 2011，《天体物理学杂志增刊》，194，33，doi: 10.1088/0067-0049/194/2/33

Thompson, W. T. 2006, 《天文学与天体物理学》, 449, 791, doi: 10.1051/0004-6361:20054262Voelzke, M. R. 2005, 《地球、月球与行星》, 97, 399, doi: 10.1007/s11038-006-9073-yVourlidas, A., Davis, C. J., Eyles, C. J. 等 2007, 《天体物理学杂志快报》, 668, L79, doi: 10.1086/522587Vourlidas, A., Howard, R. A., Plunkett, S. P. 等 2016, 《太阳系研究评论》, 204, 83, doi:10.1007/s11214-014-0114-yWegmann, R. 2000, 《天文学与天体物理学》, 358, 759

Wellbrock, A.,& Jones,G. H. 2025,《地球物理研究杂志》（空间物理）, 130, e2024JA033623, doi: 10.1029/2024JA033623Whipple, F. L. 1950,《天体物理学杂志》, 111, 375, doi:10.1086/145272Yashiro, S., Gopalswamy, N.,Michalek, G., etal. 2004,Journal of Geophysical Research (SpacePhysics), 109,A07105,doi: 10.1029/2003JA010282Yi, Y., Walker, R. J., Ogino, T., & Brandt, J.C. 1996,J. Geophys.Res., 101, 27585, doi: 10.1029/96JA02235Zheltobryukhov, M., Zubko, E., Chornaya, E., et al.2024,《皇家天文学会月刊》, 528, L117, doi: 10.1093/mnrasl/slad181