草稿版本，2023年1月4日 使用 LaTeX 双栏样式排版，
采用 AASTeX631

arXiv:2301.00903v1 [astro-ph.SR] 3 Jan 2023

磁重联是太阳风的驱动因素 *NOUR E. RAOUAFI*,[1] *G. STENBORG*,[1] *D. B. SEATON*,[2] *H. WANG*,[3,4,5] *J. WANG*,[3,4,5] *C. E. DEFOREST*,[2] *S. D. BALE*,[6,7] *J. F. DRAKE*,[8] *V. M. URITSKY*,[9,10] *J. T. KARPEN*,[10] *C. R. DEVORE*,[10] *A. C. STERLING*,[11] *T. S. HORBURY*,[12] *L. K. HARRA*,[13,14] *S. BOURDAINE*,[1] *J. C. KASPER*,[15] *P. KUMAR*,[16,10] *T. D. PHAN*,[7] 和 *M. VELLI*[17]约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室，美国马里兰州劳雷尔，邮编 *20723* 西南研究院，美国科罗拉多州博尔德，邮编 *80302*[3]空间天气科学研究所，新泽西理工学院，美国新泽西州纽瓦克大学高地，邮编 *07102*[4]新泽西理工学院大熊太阳天文台，美国加利福尼亚州大熊城，邮编 *92314*[5]太阳-地球研究中心，新泽西理工学院，美国新泽西州纽瓦克大学高地，邮编 *07102-1982*[6]加州大学伯克利分校物理系，美国加利福尼亚州，邮编 *94720*[7]加州大学伯克利分校空间科学实验室，美国加利福尼亚州，邮编 *94720*[8]马里兰大学物理系，美国马里兰州大学公园市，邮编 *20742*[9]美国天主教大学，美国华盛顿特区密歇根大道东北*620*号，邮编 *20061*[10]美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心日球物理科学部，美国马里兰州格林贝尔特，邮编 *20771*[11]美国国家航空航天局马歇尔太空飞行中心，美国阿拉巴马州亨茨维尔，邮编 *35812*[12]伦敦帝国理工学院布莱克特实验室，英国伦敦 *SW7 2AZ*[13]*PMOD/WRC*，瑞士达沃斯多夫 *Dorfstrasse33 7260*[14]苏黎世联邦理工学院，*H¨onggerberg*校区，*HIT*大楼，瑞士苏黎世[15]*BWX Technologies, Inc.*，美国华盛顿特区 *20002*[16]美国大学物理系，美国华盛顿特区，邮编 *20016*[17]加州大学洛杉矶分校地球、行星与空间科学系，美国加利福尼亚州，邮编 *90095*

摘要

我们展示了极紫外太阳观测结果，揭示了太阳日冕底部由小尺度磁重联驱动的喷流活动无处不在。我们认为，在源头加热太阳风并驱动其形成的物理机制，是以小尺度喷流活动（即微喷流）的形式出现的普遍磁重联。这种喷流活动与太阳风和日冕等离子体加热一样，无论处于哪个太阳活动周期阶段都普遍存在。每个事件都源于反极性磁场的小尺度重联，产生一道短寿命高温等离子体喷流和阿尔芬波，并将其注入日冕。此类小喷流事件具有离散性，因此会导致日冕产生间歇性外流；这些外流在远离太阳的过程中逐渐均一化，最终形成太阳风。这一发现确立了小尺度磁重联在太阳和恒星大气中的重要性，有助于理解日冕加热和太阳风加速等普遍现象。基于此前将磁场折返与磁网络联系起来的分析，我们还认为，这些新观测或许能揭示日冕底部的磁活动与太阳风磁场折返现象之间的联系。这些新观测应放在更宏大的背景下考察，以理解磁重联的作用以及太阳大气中各种形式的喷流活动。

关键词： 磁重联 — 太阳：太阳风 — 太阳：磁场 — 太阳：日冕 — 太阳：紫外辐射 — 等离子体 — 波 — 恒星：恒星风、外流 — 方法：观测 — 技术：图像处理

1. 引言

太阳风和恒星风是普遍存在的带电粒子流（即电子、质子和重离子），遍布整个天体空间（Neugebauer & Snyder 1962）。恒星通过这些风损失角动量，随着年龄增长而减慢自转，塑造行星系统，并影响行星大气的组成及其物理和化学演化，进而影响这些行星的宜居性（L¨uftinger et al.2014；Gallet et al. 2017）。太阳风如何在源区产生、加热和加速，以及哪些因素决定其变化性，长期以来一直是基础性问题。

日冕和太阳风中炽热且高度动态的等离子体如何形成，是天体物理学中最具挑战性、历史最悠久的问题之一。太阳风主要分为三种类型：快速、低速和瞬变。快速太阳风

的速度通常超过 500 km/s，源自日冕洞内部（即开放磁场区域）。低速太阳风的来源一直存在很大争议（Abbo 等，2016）。它似乎产生于闭合磁场区域（如活动区和宁静太阳）与开放磁场日冕洞边缘之间的界面（D'Amicis 与 Bruno，2015）。快速太阳风的密度低于低速太阳风，温度则更高，且具有光球成分；低速太阳风则具有日冕成分。在 1 天文单位处，快速太阳风主要是阿尔fv´énic，而大多数低速太阳风则变化更多，且并非阿尔fv´énic（Grappin 等，1991；Bruno 与 Car-bone，2005；Bale 等（2019）；Kasper 等（2019）；Bourouaine 等，2022），不过也有研究报告了少见的阿尔fv´énic 低速太阳风流（D'Amicis 与 Bruno，2015；Marsch 等，1981；D'Amicis 等，2019；Perrone 等，2020）。目前已有两种主要理论用于解释太阳风如何通过加热和加速形成：磁重联（Parker，1988；Axford 与 McKenzie，1992；Fisk，2003）以及磁流体动力学（MHD）波湍流（Belcher 与 Davis，1971）。瞬变现象（如日冕物质抛射（CMEs））被视为第三种太阳风类型，它会驱动空间天气，并与太阳黑子周相关（Raouafi 等，2021）。

太阳大气中的喷流呈现出不同形式（例如，针状体 [Beckers 1968, 1972; Sterling 2000; de Pon- tieu et al. 2007]，喷流 [Shibata 等，1992; Raouafi et al.2016]，和喷涌 [Canfield et al. 1996]）。越来越多的证据表明，这类喷流在为日冕和太阳风提供质量与动量方面发挥着关键作用，并可能提供足够的能量来驱动太阳风（De Pon- tieu et al. 2007; McIntosh 等（2011）; Tian 等，2014）。在 X 射线/极紫外（EUV）观测中，日冕喷流的特征可追踪至数 Mm 的距离；在白光图像中可追踪至数个太阳半径（Wang 等，1998）；而原位测量则在 1 天文单位以外也探测到了这些特征（Wang 等，2006; Nitta 等，2008; Neugebauer，2012）。在较低高度处，de Pontieu 等（2007）在色球层中发现了一种类似现象，即 II 型针状体；这类针状体通常在色球层 Ca II 854.2 纳米谱线和 Hα 谱线中观测到（Rouppe van der Voort 等，2009），并在向上传播过程中受热。然而，没有证据表明 II 型针状体能够像日冕羽流和喷流那样达到日冕温度和高度。来自 IRIS（De Pontieu 等，2014）和 SDO 任务的观测表明，针状体中的冷等离子体会落回太阳表面（Samanta 等，2015）。针状体是否会对太阳风有所贡献，以及贡献有多大，目前尚不清楚。Sow Mondal 等（2022）最近的一项研究指出，要驱动太阳风，所需的针状体数量远多于观测到的数量。

靠近太阳时，帕克太阳探测器（帕克太阳探测器）的测量结果揭示，太阳风具有高度结构化的特征，并由大振幅的阿尔´芬波主导。磁场经常被观测到在 90° 范围内旋转，形成反转或磁场折返（Bale 等（2019）；Kasper 等（2019）），此前也曾由尤利西斯号(Balogh 等（1999））、*WIND* (Gosling 等（2011））和 *Helios* (Horbury 等（2018）观测到。然而，在较大的日心距离处，这类现象十分少见。这些磁场折返还呈簇状分布，簇与簇之间由磁场近乎径向的平静期隔开。多篇研究探讨了这些结构可能的起源，可分为两类：日冕起源（Fisk 与 Kasper（2020）；Sterling 与 Moore（2020）；Drake 等（2021））和原位太阳风起源（Squire 等（2020）；Ruffolo 等（2020）；Shoda 等（2021）；Mallet 等（2021）；He 等（2021）；Schwadron 和 McComas（2021））。Bale 等(2021）和Fargette 等(2021）发现，磁场折返簇的尺度与太阳表面超米粒组织的尺度相关，这支持磁场折返起源于日冕的观点。然而，这些磁场折返如何在日冕中形成，以及太阳表面附近的驱动机制是什么，仍不清楚。这一问题仍存在激烈争论（Sterling 与 Moore（2020）；Drake 等（2021）；Squire 等（2020）；Shoda 等（2021）；Bale 等（2021）），部分原因是缺乏明确的观测证据，无法揭示在太阳大气底部附近导致加热并驱动太阳风的过程。

赤道日冕洞中的日冕羽流内发现了小尺度喷流，即微喷流，Raouafi & Stenborg（2014）。日冕羽流是从磁网络延伸至高日冕高度的明亮结构（Wang et al.1997）。它们在日全食图像中尤为显著，历史上被称为日冕射线（van de Hulst 1950）。观测还发现，羽流可延伸至太阳风高度（即 $\sim 45\ R_{\odot}$；DeForest et al. 2001）。与周围的羽流间区相比，它们更明亮但温度更低；在太阳日冕的极紫外和白光图像中，羽流间区呈现为较暗（即密度较低）的条带。关于日冕羽流和喷流的更多详情，请参阅Wilhelmet al.（2011）和Raouafi et al.（2016）的综述。Raouafi & Stenborg（2014）指出，日冕羽流底部的小尺度、高频喷流（即微喷流）由交换型磁重联驱动，并使羽流得以长时间维持（另见Panesaret al. 2018，2019；Uritskyetal.2021；Kumaretal.2022）。

我们在此展示证据表明，日冕底部附近由交换型磁重联驱动的微小尺度（数百千米）普遍喷流，可能是太阳风加热和加速的源头。我们将磁场折返（Bale 等（2019）；Kasper 等（2019））解释为这种小尺度爆发性磁活动的示踪物。

2. 太阳日冕底部普遍存在的喷流活动

来自*SOHO* (Domingoet al.1995）、*Hinode*(Kosugi et al. 2007）、*STEREO* (Kaiser et al. 2008）、*SDO*(Pes-nell et al. 2012）以及*SolO*(M¨uller et al. 2020）等空间任务所提供的高分辨率、高时间 cadence 观测显示，多尺度爆发现象极为多样，范围从巨大的耀斑（Shibata& Magara2011）和日冕物质抛射（Chen2011）到亮点爆发（Madjarska 2019）和日冕喷流（Shibata 等，1992；Raouafi 等，2016）。太阳观测表明，磁重联在这些结构的演化过程中发挥着主导作用，它使储存的磁能得以瞬时转化为等离子体动能、热能以及非热粒子能量，

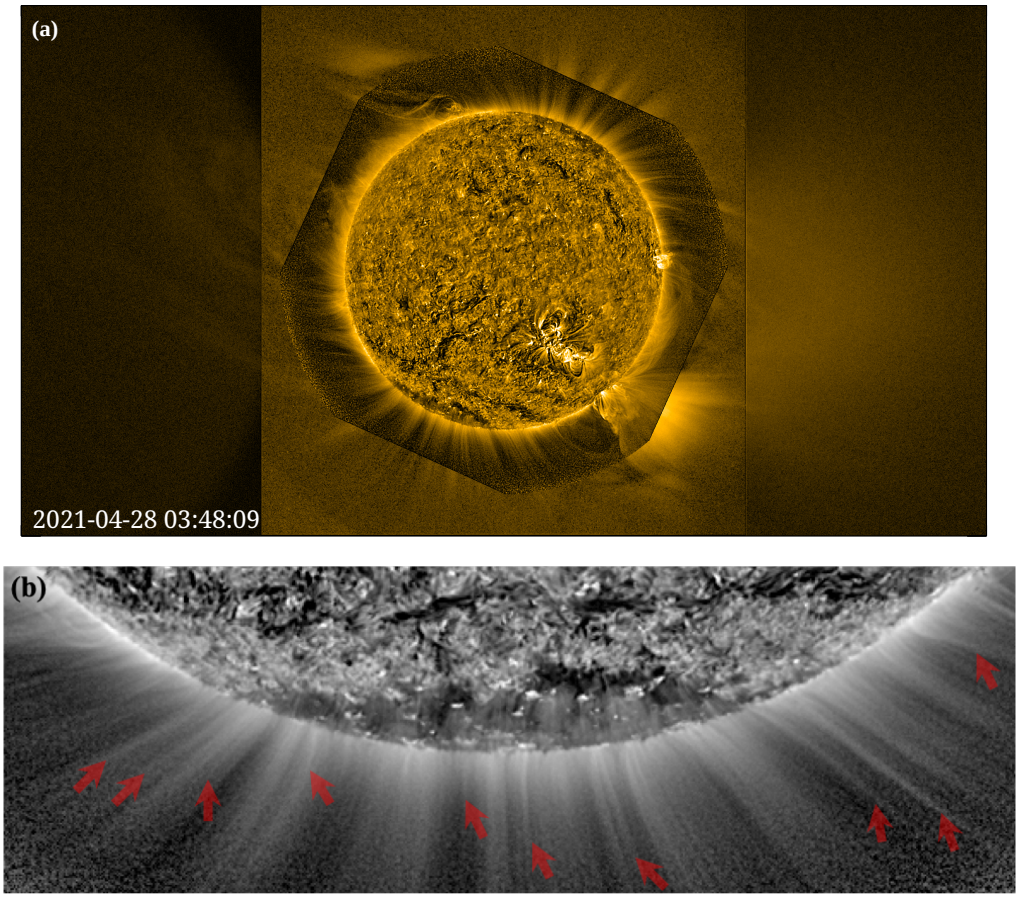


图 1. (a) *SDO*/AIA 和 *GOES-R*/SUVI 171 ˚A 图像合成图，显示太阳日冕底部的小尺度活动及其向更高高度的延伸（参见补充材料中的影片）。AIA 视场中的小喷流最大延伸范围受仪器灵敏度限制。对其发生率和大小的估计也受到仪器时间分辨率和空间分辨率的限制。SUVI 图像将日冕底部观测到的结构映射到太阳风中。配套影片展示了这一现象高度动态且持续不断的特性。(b) AIA 图像（171 ˚A）显示了太阳极区边缘上方呈细长状的小喷流结构。箭头标出了小喷流事件示例。

粒子。与太阳黑子和活动区在太阳活动周极小期几乎消失不同，小尺度活动（如喷流、亮点等）在太阳活动周的各个阶段都普遍存在（例如参见McIntosh et al.2014；Madjarska2019）。事实上，磁重联引发的喷流显然是太阳上的一种基本过程。重联驱动的喷流并不局限于开放磁场区域（即日冕洞），也会发生在闭合结构中，将等离子体加热到高温。这类活动的一个典型例子是，在赤道日冕洞内羽流底部观测到的微小喷流（即微喷流）（Raouafi & Stenborg 2014）。然而，以往的分析仅限于特定的日冕结构，即赤道日冕洞中的羽流（Uritsky et al. 2021；Ku-mar et al.2022）或单个微喷流（Panesaretal. 2018，2019）。微喷流是开放磁通量与闭合磁通量之间发生的微小重联事件，会导致等离子体沿准直方向喷射进入太阳日冕（Raouafi & Stenborg 2014；Kumaret al.2022；Panesar et al. 2018，2019）。（Raouafi & Stenborg 2014）发现小喷流是日冕羽流的主要驱动因素，能够使其持续数天乃至数周。（Kumar 等，2022）还发现，羽流底部存在准周期性能量释放（相当于纳耀斑能量，即 10^{24} 尔格），并伴有小喷流，可能为太阳风提供大量质量流。

在羽流中产生微喷流的机制，在太阳圆面的其他区域也会发生。对*SDO*/AIA 和 *GOES-R*/SUVI 观测进行仔细分析后发现，这种现象远不止存在于日冕羽流中，而是普遍得多。图 1a 和图 1b 分别展示了 AIA 和 SUVI 的宽视场图像合成图（Seaton 等，2021）以及南极区的 AIA 放大视图。原始图像显示，朦胧的结构延伸至较高的日冕高度。采用多分辨率图像处理技术处理后的图像揭示，微小的高温等离子体爆发遍布几乎所有日冕结构。这些事件的持续时间从几十秒到几分钟不等。日缘外日冕中这种活动无处不在且极具动态性，令人瞩目（

详见补充材料中的视频）。通过分析长时间连续的SDO/AIA 图像序列，我们发现这种日缘外的小尺度活动持续存在，表明它遍及整个太阳表面（即日冕洞、宁静太阳和活动区；参见补充材料中的视频）。

3. 驱动小尺度喷流的磁重联

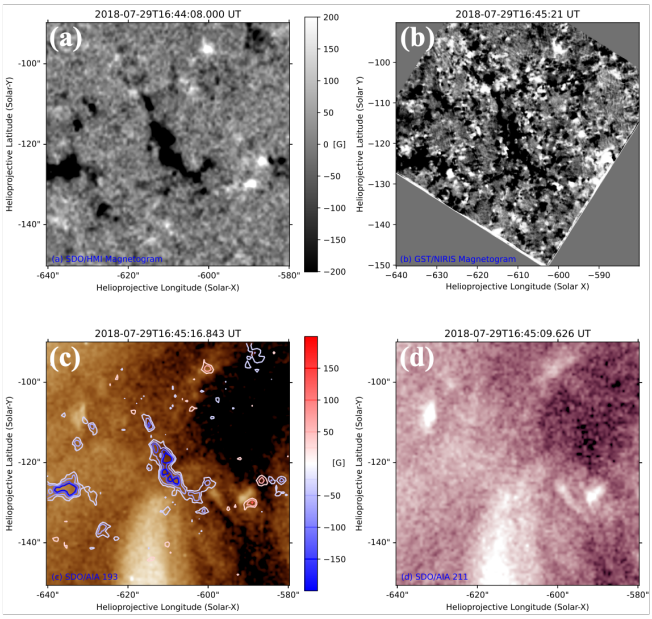


图 2. 来自*SDO*/HMI (a) 和大熊湖太阳天文台/GST-NIRIS (b) 仪器的同时磁图，其空间分辨率分别为 1″和 0″.2。NIRIS 磁图的磁场强度已缩放至 HMI 的单位尺度。图中显示的磁场在 ±200 G 处饱和。相应的极紫外图像分别来自 SDO/AIA 的 193 ˚A (c) 和211 ˚A (d) 通道。红色（蓝色）等高线表示正（负）网络磁场和磁元素。面板 (a) 显示，低分辨率下只有强磁场区域能够被分辨，而太阳圆面的大部分区域似乎没有任何显著的磁通量。随着空间分辨率和仪器灵敏度的提高，磁图发生了显著变化（面板 (b)）。尤其是，表面上空无一物的区域和单极性斑块显示出明显更多的混合极性，这是磁重联易于发生的环境。

图2a、b展示了来自*SDO* 日震与磁成像仪（HMI；Scherrer等，2012年）以及大熊湖太阳天文台（BBSO）的1.6米古德太阳望远镜（GST）所拍摄的磁图。HMI和GST磁图的空间分辨率分别为 1″ 和 0″.2。受HMI较低的分辨率和灵敏度限制，只有相对较强的磁场区域能够被观测到，同时隐约可见弥散的反极性磁场。这种清晰的视图主要归功于两个仪器因素：偏振测量灵敏度，以及低分辨率导致的反极性磁场之间的塞曼抵消磁场在分辨单元内相互抵消。提高仪器灵敏度并提升空间分辨率后，磁场景观发生了显著变化。低分辨率仪器观测到的大多数单极性磁通集中区，在高分辨率下都变得支离破碎，这一点在GST亚角秒磁图中清晰可见。整个仪器视场内遍布着大量具有高度混合极性的多尺度磁元素。背景网络磁场（位于超米粒边界、日冕洞开放磁场的基部）与反极性的网络内部磁场之间的磁重联，可能是小尺度喷流的成因。这与磁场折返具有超米粒组织尺度的调制尺度这一发现相符（Bale等，2021年；Fargette等，2021年）。补充材料中提供了GST磁图的动画序列。

在 GST磁图中[1]，，在较低分辨率下没有磁通量的区域，出现了大量磁性双极区。这些小尺度、极性高度混杂的磁场为磁重联提供了丰富的场所。在约 90 分钟的连续观测期间，我们在 GST 的宁静太阳/日冕洞边界区域 70″ × 70″ 视场中识别出 1434 次湮灭事件。最值得注意的是，这些区域的分布似乎均匀，因为宁静太阳与日冕洞之间没有明显差异（图 2c、d），这表明太阳低层大气中的小尺度磁重联具有普遍性。观测到的磁通量湮灭率为 $1–2 \times 10^{18}$ 麦克斯韦 Mm^{-2} 小时$^{-1}$。88 次湮灭与 Hα 针状体有关，其中 61 个起源于网络磁场集中区，这些区域可能与太阳风开放磁力线相连。其中，7 次在针状体上方产生了可探测到的极紫外小喷流。假设太阳上其他区域的发生情况也具有代表性，按观测到的频率推算，太阳上每秒约发生 600 次磁通量湮灭$^{-1}$，产生约 35 个 Hα 针状体$^{-1}$，以及 3 个极紫外小喷流$^{-1}$。我们预计，此类湮灭/磁重联区域还会产生尺度小于目前最小可观测尺度的其他爆发现象。

磁重联还会产生阿尔芬˙扰动（波、波前和激波）。与微喷流相关的径向流和阿尔芬˙扰动同时产生，是磁重联的自然结果（Karpen 等（2017）；Uritsky 等（2017）；Roberts 等（2018））。Cirtain 等人（2007）展示了太阳 X 射线喷流中存在阿尔芬˙波的证据。这些阿尔芬˙波对于加热和加速太阳风等离子体，以及在更高的日冕高度产生湍流至关重要（Chandran 等人，2011）。

3.1. 日冕喷流率、质量和能量通量

[1] 有关BBSO/GST磁图的制作方法以及磁精细结构的识别详情，请参阅Wang等人(2022)和附录A。

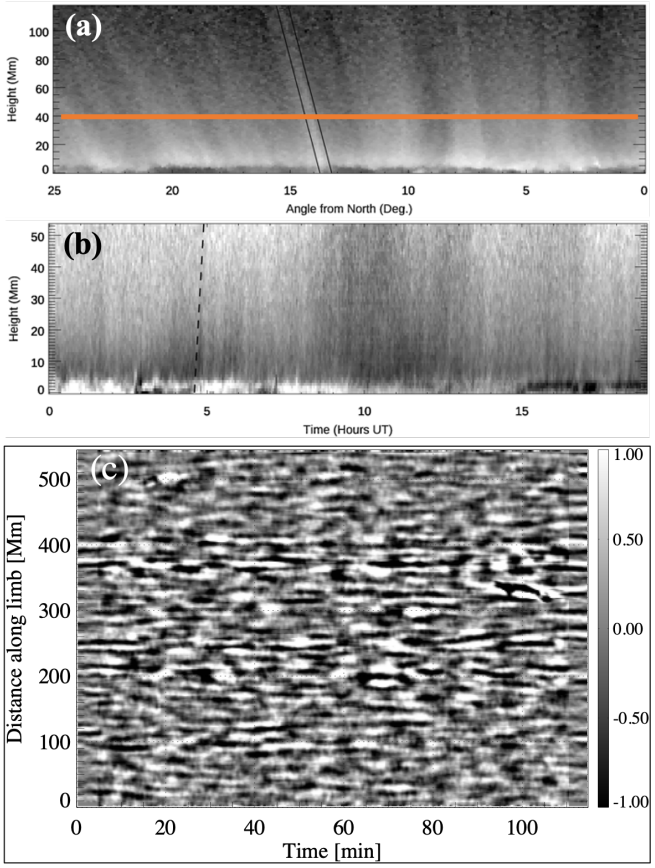


图 3. (a) 北部太阳极区的 AIA 171 ˚A 图像的极区投影，显示日冕中的亮（暗）结构（例如羽流、羽流间区域等）。(b) 沿 (a) 中深色线标记的虚拟狭缝绘制的时距图。由小尺度磁重联产生的微喷流始终存在，并主导太阳日冕底部的活动。(c) 示意图展示了 (a) 中穿过橙色虚拟狭缝的日冕结构在太阳极区边缘上方 40 Mm 高度处随时间的变化。微喷流是其中的亮结构。

图3a 展示了*SDO*/AIA 171 ˚北极区的极区投影图（±25°）。两条黑线标示了用于构建图3b 中时距图的区域。虚拟狭缝上的小喷流事件呈条纹状，其斜率给出了平均速度 $\sim$ 150 km s^{-1}。图3c 展示了极紫外图像中的信号随时间的变化；该信号穿过位于太阳极区边缘上方 40 Mm 处的圆形狭缝（即（a）图中的橙线）。小喷流是亮结构，典型持续时间为数分钟。为了估算穿过人工狭缝（图3a 中橙线）的小喷流数量，我们采用傅里叶分析得出喷流发生率。随后，我们根据该发生率反推出本次分析所考察的数小时内小喷流的总数。对这两幅图的分析得出，在北极冠上方、位置角区间为 $\sim$ 2500 的小喷流每日发生率 50° 。这一小喷流发生率比已报告的 $\sim$ 160 X-

每个太阳半球每天的 X 射线喷流数量（Savcheva 等, 2007；Paraschiv 等，2015），尽管我们的分析将微喷流发生率低估了约 30%。微喷流的探测也受到仪器灵敏度以及数据空间和时间分辨率的限制。相比之下，X射线喷流明显更大、寿命更长，而且单个喷流的能量更高。

微喷流的典型宽度为 $2'' - 3''$ (Kumar 等，2022)，速度为 150 km s^{-1}，寿命为 $5 - 10$ 分钟。假设这些事件底部的日冕密度为 5×10^8 cm^{-3}，则每个小尺度微喷流向日冕中的粒子喷射率约为 $7.5 \times 10^{1}5$cm^{-2}s^{-1}。这相当于 3×10^{32} 质子 s^{-1}，且假设所有喷射等离子体都能逃逸（因此该值应视为上限），微喷流整个寿命期间总计喷射 1×10^{35} 质子。要解释 6×10^{35} 质子 s^{-1} (von Steiger 等, 2000；Wang，2016，2020) 的太阳风损失，需要约有 2×10^3 个微喷流在任一时刻处于活动状态，并且整个太阳上每秒启动 6 个微喷流。这个数值与上述根据 BBSO/GST 测量结果外推的速率相当。

假设小喷流宽度与上述所述相同，每个小喷流注入日冕的动能为 1.2×10^6 erg cm^{-2} s^{-1}，或 5×10^{22} erg s^{-1}。如果任一时刻有 2×10^3 个微喷流处于活动状态，则小喷流动能注入率总计为 1×10^{26} erg s^{-1}。相比之下，太阳总体动能损失率（假设渐近流速为 500 km s^{-1}）约为 1×10^{27} erg s^{-1}。显然，注入的小喷流等离子体必须在日冕热压力和波压力的作用下进一步加速，才能达到太阳风的渐近速度。

BBSO/GST 分析表明，光球处重联双极磁场的磁通密度为 $\sim$ 190 G。在日冕高度，我们估计重联磁场强度在 $5 - 10$ G 的范围内。假设重联过程中释放到等离子体中的磁能分配给等离子体整体流动和加热。（详细计算请参见补充材料。）

小喷流的总产生率为 ~ 6 jetlets s^{-1}（即 5×10^5 jetlets d^{-1}），远高于根据太阳边缘观测估算的 $\sim$ 0.03 jetlets s^{-1}（即 2.5×10^3 jetlets d^{-1}）。然而，后者仅覆盖了太阳周长的 $1/2\pi$，且仅统计了从太阳边缘向盘面及盘后延伸、位于一个狭窄但未确定角度 δ 范围内的小喷流。对于 $\delta \approx 0.03$ rad，这些全日面结果与边缘探测结果一致，相当于距太阳边缘 $d \approx 20$ Mm 的线性距离。

所有这些产生率都处于足以驱动宁静太阳和日冕洞日冕底部太阳风等离子体的范围内。因此，我们的分析支持这一观点：由磁重联驱动、普遍存在的小尺度喷流活动（微喷流）基本上能够解释太阳流失到太阳风中的全部质量和能量。

测量日冕底部由重联驱动的喷流时，一个关键因素是磁场数据和极紫外图像的分辨率。我们

预计，分辨率和偏振精度显著更高的磁场数据（例如来自 4 米丹尼尔·K·井上太阳望远镜（DKIST）的数据）将揭示更多重联事件，从而大幅提高喷流发生率。当然，这会影响对日冕太阳风等离子体加热和加速的估算。

4. 帕克太阳探测器观测及其与日冕的联系

利用尤利西斯号在太阳两极上方的快速太阳风测量（> 1 天文单位），Neugebauer 等(1995）发现，所谓的微流，即太阳风速度相对平均值偏离 > 20 kms^{-1} 的微流，源自太阳。历史上，人们认为微流与日冕羽流有关，尽管这种联系无法完全解释其特性。Neugebauer(2012）认为，微流与间歇性源而非准稳态源有关。基于Raouafi 等(2008）发现喷流与羽流之间存在因果关系的研究，（Neugebauer，2012）证实微流源自太阳；如果快速微流是日冕底部喷流活动的结果，那么其特性便可以得到解释。

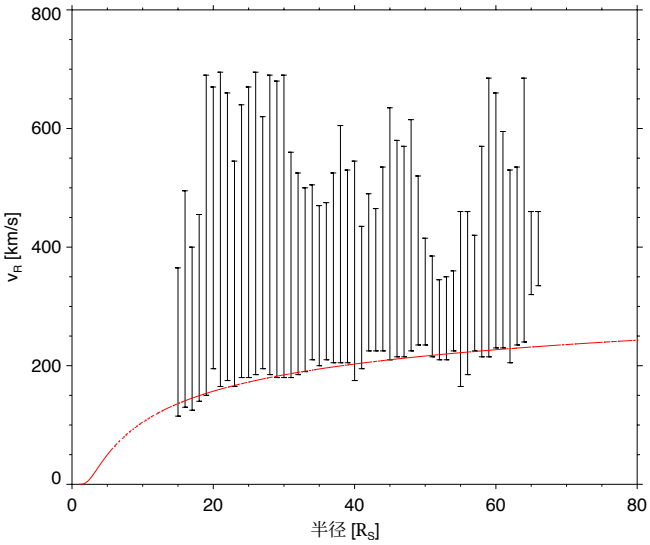


图4. 竖线显示了帕克太阳探测器在前十次近距离飞掠期间测得的太阳风速度随日心距的分布范围。红色曲线限定了测量值的低端，似乎表明基础太阳风的行为符合帕克模型（Parker 1958）。在这条边界之上，等离子体喷流主导着太阳风，这可能意味着太阳风中存在日冕喷流活动的示踪信号。

越靠近太阳，帕克太阳探测器在近日点遭遇期间观测到的主要是阿尔芬太阳风（包括高速和低速）（< 0.25 天文单位）。虽然已有关于非阿尔芬流的报道，但它们在观测中所占比例极小。内太阳风中阿尔芬流的普遍存在，是揭示太阳风从其源区涌出时特性的一个重要线索。在第一次近日点遭遇期间，一个小型赤道洞被确认为所观测到的低速太阳风的源区（Bale 等（2019））。对于其他几次遭遇，模型显示，航天器经常与极区日冕洞的边缘及其赤道延伸区磁连接。在太阳大气底部，目前只有遥感数据可用于评估太阳风流起源处可能发生的物理过程。当前数据的质量远高于过去几十年，因此，帕克太阳探测器如此接近太阳飞行，使得将原位测量与太阳大气低得多处的遥感观测联系起来，成为一种令人振奋的可能。

数据还显示，帕克太阳探测器测得的太阳风速度帕克太阳探测器主要由叠加在背景帕克型太阳风之上的径向速度喷流构成（Kasper 等（2019））（见图4）。竖线表示这些等离子体喷流速度的分布范围。红色曲线标示这些速度的下限，显著呈现出帕克型太阳风的特征。内太阳风的结构以及原位等离子体喷流占主导地位，也可能表明太阳日冕底部存在小尺度磁重联和喷流活动的迹象。磁重联会产生阿尔fv´énfv´én波，这些波最终传播至高空，其耗散会加热并加速太阳风等离子体（例如，见 De Pontieu 等（2007）；McIntosh 等（2011））。

磁场折返是太阳风中普遍观测到的短暂磁场旋转。它们符合磁场局部折叠的特征，而非与太阳源区的磁连接发生变化（Bale 等（2019）；Kasper 等（2019））。在日冕底部观测到的大量普遍存在的喷发性喷流事件，为帕克太阳探测器观测到的磁场反转提供了可信的来源解释。微喷流是小时间和空间尺度上普遍存在的磁重联的直接产物。来自*SDO* 和*GOES-R*/SUVI 的极紫外图像以及来自 BBSO/GST 的磁场数据，清楚地证明这些区域以小尺度重联为主。极紫外图像，尤其是太阳极区的图像，显示出较亮和较暗日冕结构呈半规则间隔分布。较亮区域的微喷流发生率远高于较暗区域。因此，磁场反转的斑块性可由航天器与对重联事件易感性不同的区域之间磁连接的变化来解释。宁静期（极紫外图像中较暗）对应事件发生率较低的位置，而与事件发生率较高、微喷流／磁场折返更多的区域强磁连接的时段则与之相对应。

人们提出了不同模型来解释磁场折返的形成：（1）交换重联（例如，Fisk 与 Kasper（2020）；Sterling 与 Moore（2020）；He 等（2021）；Drake 等（2021）；Agapitov 等（2022））；（2）阿尔fv´én 波的陡化和／或阿尔fv´én 湍流（Squire 等（2020）；Mallet 等（2021）；Shoda 等（2021））；（3）由非线性 Kelvin-Helmholtz 不稳定性卷起所致——

性（Ruffolo 等（2020））；以及（4）通过连接较慢和较快太阳风源区之间的磁力线形成（Schwadron 和 McComas（2021））。我们推测，普遍存在的磁重联及其在日冕中引发的喷流，能够满足大多数（如果不是全部）已提出的磁场折返模型。磁重联会产生脉冲式等离子体喷流和阿尔fv´én 波，这些是大多数磁场折返模型的主要输入（例如阿尔fv´én 波、剪切流等）。

5. 结论：太阳风是如何产生的?

快速太阳风起源的日冕洞是开放磁场区域。（Hassler 等（1999））利用 Ne^{7+} 770 ˚A 谱线的日冕观测，发现强外流与色球网络边界相吻合。尽管他们没有讨论产生这些外流的物理机制，却推测太阳风的根源在于该网络的边界。（Tu 等（2005））认为这些区域与日冕相通，可能是太阳风的源头。当前数据表明，小尺度上存在间歇驱动的高温等离子体外流。这些小喷流无处不在，与太阳风相似，不受太阳黑子周相位的影响。在整个太阳圆面上，尤其是色球网络（即超米粒组织）的边界处，都存在低层太阳大气中磁重联的证据。尽管这些区域通常以单极磁场为主，但高分辨率磁场测量显示，少数极性侵入（即椒盐磁场）会在其中主动移动，并与主导极性磁场相互抵消，从而驱动小喷流。

我们认为，小尺度磁活动在塑造太阳大气、加热日冕和驱动太阳风方面发挥着主导作用。我们认为，本文分析的微喷流属于一个涵盖更小尺度现象的完整谱系。因此，随着空间和时间分辨率提高、仪器灵敏度增强，我们预计能够探测到更频繁、尺度更精细的磁重联特征。例如，DKIST将提供空间分辨率比BBSO/GST高三倍的观测数据。借助这些数据，我们预计能够识别出显著更多、更精细尺度的磁重联区域，它们将炽热且具有脉冲性的等离子体喷流输送至日冕和太阳风，从而对日冕加热和太阳风加速产生重要影响。

我们提出的这一情景显然最适用于快速太阳风。快速太阳风起源于日冕洞区域，那里的磁场是开放的。因此，日冕洞开放磁场上的喷流能够直接通往日球层，从而可以直截了当地解释快速太阳风。相比之下，慢太阳风的起源尚不明确，但有证据表明，它起源于闭合磁场区域，和/或开放磁场与闭合磁场区域的边界。由于闭合磁场区域中也会出现喷流/微喷流，我们预计它们不仅是快速太阳风的源，也是慢太阳风的源。不过，仍需进一步分析来证实这一点。我们希望通过未来的帕克太阳探测器观测澄清这些问题。

帕克太阳探测器在靠近太阳处进行测量，一个关键发现是，观测到的太阳风几乎全部都具有很强的阿尔芬性。´观测到的太阳风的阿尔芬性´似乎与太阳风类型无关。这或许表明，太阳风起源处存在一种共同的物理过程，而慢风与快速风之间的差异可能是高空演化的结果。Wang& Sheeley(1990)提出，日冕磁场的超径向膨胀可能产生慢太阳风，例如出现在日冕洞边界处的慢风（另见Panasenco 等 2019）。未来帕克太阳探测器在即将到来的最近近日点期间开展的测量，加上太阳轨道飞行器和DKIST的观测，有望证实小尺度磁活动与太阳风之间的联系；我们希望能够由此推断出小尺度磁重联或其他磁事件与太阳风中小尺度结构之间的直接关联。

我们感谢 Valentin Martinez Pillet 博士提出的建设性意见和建议，这些意见和建议有助于提升论文的质量。

帕克太阳探测器由约翰·霍普金斯大学应用物理实验室设计、建造，目前也由该实验室负责运行，是美国国家航空航天局“与恒星共生”（LWS）计划的一部分（合同编号 NNN06AA01C）。LWS 管理团队和技术团队的支持对帕克太阳探测器任务的成功发挥了关键作用。

SDO 是美国国家航空航天局“与恒星共生”（LWS）计划发射的首个任务。SDO/AIA 和太阳动力学天文台/日震与磁成像仪的数据由联合科学运行中心（JSOC）的科学数据处理中心（SDP）提供。

由环境科学合作研究所（CIRES）附属作者在国家环境信息中心（NCEI）开展的太阳紫外成像仪（SUVI）产品开发、分析、校准、验证和数据管理工作，得到了美国国家海洋和大气管理局合作协议（编号 NA17OAR4320101）的支持。

我们谨此感谢能够使用大熊太阳天文台（BBSO）的古德太阳望远镜（GST）数据。BBSO 的运行由美国国家科学基金会 AGS- 1821294 项目资助，并得到新泽西理工学院的支持。GST 的运行部分由韩国天文与空间科学研究院和首尔国立大学支持。

附录

A. BBSO/GST 磁场数据。

利用具有 308 个子孔径的自适应光学系统进行高阶校正（Cao 等，2010）以及太阳散斑干涉数据重建技术（W¨oger, 2008，观测在 ∼16:34 – 18:38 协调世界时期间，在有利的视宁度条件下达到了衍射极限分辨率。由于视宁度较差，在 18:07 – 18:27 协调世界时之间有 ∼ 20分钟的观测间断。NIRIS 对中性铁 1.56 μ米进行了光谱偏振测量，空间分辨率为 0″. 24，时间采样间隔为 42 秒。

由于宁静太阳区域的偏振信号较弱，因此将 GST 观测中的 Stokes- V 轮廓求和，以增强信噪比，从而得到视线方向（LOS）磁图。磁场强度按照同时期的 HMI 磁场测量值进行缩放。基于时间序列磁图之间的相似性启发式方法，使用西南自动磁识别套件（SWAMIS；DeForest 等，2007）追踪小尺度磁元，据此检测磁消失事件并计算相应的磁通量。

B. 磁重联产生的能量和粒子通量

本节估算小尺度重联事件产生的磁能通量。该能量通量以整体流动和加热的形式传递给等离子体。我们从观测到的向日冕和太阳风中抛射的粒子和动能速率入手，采用以下平均微喷流特性：

- 横向尺度（即宽度）： $L_J \approx 3'' \approx 2000$ 千米
- 速度： $V_J \approx 150$ 千米/秒$^{-1}$
- 寿命： $\tau \approx 5$ 分钟 $= 300$秒
- 密度： $n \approx 5 \times 10^8$ 厘米$^{-3}$

小喷流的速度由时距图确定。它是天空平面上的投影速度，应视为小喷流实际速度的下限。对于电子密度，我们采用了日冕底部的典型羽流密度。小喷流的密度可能更高，甚至可达其 4 倍（Sterling 与 Moore（2020）），但为了保守起见，我们采用周围日冕密度。小喷流的宽度（L_J）和寿命（τ）至少存在 2 倍的变化，这会降低或提高我们对小喷流太阳风贡献的估算，进而影响驱动全部太阳风通量所需的小喷流数量。对于这些贡献，无法精确到超过约 2 倍的误差范围。本文旨在表明，保守估算的小喷流对太阳风的贡献，与太阳总质量和能量通量的估算值相当。相关数值见论文正文。

日冕中的重联磁场强度远低于测得的宁静太阳光球平均磁通量密度$B_{ph} \approx 100$ G，在日冕洞边界区域则略高。由于我们没有直接的日冕磁场测量，因此必须推断重联磁场的强度 B_R。为此，我们要求磁重联释放的磁能足以驱动小喷流外流，并提供假定等量的等离子体加热。为简化起见，我们忽略释放的磁能可能对加速非热粒子所作的贡献；这一贡献虽未知但合理，并且是大型日冕物质抛射和耀斑中磁重联一个非常重要且众所周知的结果。

磁重联流入速度 V_R假定为阿尔fv´én 速度$V_A = B_R/\sqrt{4\pi\rho}$的 0.1 倍，该速度与重联磁场强度 B_R相关。这个无量纲重联率（即流入阿尔fv´én 马赫数）已通过快速磁重联的数值磁流体力学模拟得到充分证实，其中包括专门针对磁重联驱动日冕喷流的模拟（Karpen 等（2017））。磁重联发生在横向尺度 L_R 上，该尺度定义了日冕中重联区的宽度，可能小于 L_J 小喷流的宽度。有关磁重联理论的更多细节，请参见Lin 和 Lee(1993)。

整体外流中的动能通量密度和总释放率为

$$w_{KE} = \frac{1}{2}\rho V_J^2 V_J, \tag{B1}$$

$$W_{KE} = w_{KE} L_J^2 \tag{B2}$$

由此得到 $w_{KE} \approx 1.2 \times 10^6$ erg cm^{-2} s^{-1} 和 $W_{KE} \approx 5 \times 10^{22}$ erg s^{-1}。假设一半的磁能以加热的形式传递给等离子体，则重联期间的总磁能释放率 W_{ME} 满足$W_{ME} = 2\, W_{KE} \approx 1 \times 10^{23}$ erg s^{-1}。我们有

$$w_{ME} = \frac{1}{4\pi}\, B_R^2\, V_R = \frac{0.1}{4\pi}\, B_R^2\, \frac{B_R}{\sqrt{4\pi\rho}}, \tag{B3}$$

$$W_{ME} = w_{ME}\, L_R^2, \tag{B4}$$

$$w_{ME} = W_{ME}/L_R^2 = 2\, W_{KE}/L_R^2 = 2\, w_{KE}\, L_J^2/L_R^2, \tag{B5}$$

由此可解出重联磁场强度，

$$B_R^3 = 80\,\pi^{3/2}\,\sqrt{\rho}\,w_{ME} \tag{B6}$$

$$= 160\,\pi^{3/2}\,\frac{L_J^2}{L_R^2}\,w_{KE}. \tag{B7}$$

代入上述数值，我们得到 $B_R \approx 5\,(L_J/L_R)^{2/3}$ G。正如预期，推算出的磁场强度取决于重联区与最终形成的小喷流中特征尺度之比。最小强度约为 5 G，是平均光球磁通量密度 ~ 100 G 的 5%，对应于 $L_R = L_J$。对于日冕磁场而言，这是一个合理的数值。若假设 $L_R = L_J/3$，推算出的磁场强度将增至约 10 G。

C. 补充材料

补充材料包包含五个视频文件，可在此处下载此处

影片 M1： *SDO*/AIA 和 *GOES-R*/SUVI 171 ˚A 图像序列的合成影像，展示了太阳日冕底部的小尺度活动及其向高空的延伸。影片始于 2021 年 4 月 28 日 00:00:09，结束于同日 09:57:09。实时播放时长为 8 秒。

影片 M2： *SDO*/AIA 171 ˚A 图像序列，展示了太阳日冕底部的小尺度活动。影片从 2021 年 4 月 28 日 00:00:09 开始，于同日 09:57:09 结束。实时播放时长为 8 秒。

影片 M3： 放大显示 *SDO*/AIA 171 ˚A 的太阳北极区图像序列，其中小尺度活动清晰可见。影片从 2021 年 4 月 28 日 00:00:09 开始，于同日 09:57:09 结束。实时播放时长为 8 秒。

影片 M4： 放大显示 *SDO*/AIA 171 ˚A 的太阳南极区图像序列，其中小尺度活动清晰可见。影片从 2021 年 4 月 28 日 00:00:09 开始，于同日 09:57:09 结束。实时播放时长为 8 秒。

影片 M5： 来自 BBSO/GST-NIRIS 仪器的高分辨率磁图动画，展示了小尺度上高度动态的磁场。抵消双极磁区的数量远多于 1″ 分辨率下的数量。影片始于 2018 年 6 月 29 日协调世界时 16:32:18，止于同日协调世界时 18:38:36。影片的实时播放时长为 14 秒。

参考文献

Abbo, L. 等，2016，《空间科学评论》，201，55；Agapitov, O. V. 等，2022，《天体物理学杂志》，925，213；Axford, W. I. 与 McKenzie, J. F.，1992，载于《第七届太阳风学术讨论会》，E. Marsch 与 R. Schwenn 编，1；Bale, S. D. 等，2019，《自然》，576，237；Bale, S. D. 等，2021，《天体物理学杂志》，923，174；Balogh, A.、Forsyth, R. J.、Lucek, E. A.、Horbury, T. S. 与 Smith, E. J.，1999，《地球物理研究快报》，26，631；Beckers, J. M.，1968，《太阳物理学》，3，367；Beckers, J. M.，1972，《天文学与天体物理学年评》，10，73；Belcher, J. W. 与 Davis, J., Leverett，1971，《地球物理研究杂志》，76，3534；Bourouaine, S.、Perez, J. C.、Raouafi, N. E.、Chandran, B. D. G.、Bale, S. D. 与 Velli, M.，2022，《天体物理学杂志快报》，932，L13；Bruno, R. 与 Carbone, V.，2005，《太阳物理学综述》，2，4；Canfield, R. C.、Reardon, K. P.、Leka, K. D.、Shibata, K.、Yokoyama, T. 与 Shimojo, M.，1996，《天体物理学杂志》，464，1016；Cao, W.、Gorceix, N.、Coulter, R.、Ahn, K.、Rimmele, T. R. 与 Goode, P. R.，2010，《天文学报》，331，636；Chandran, B. D. G.、Dennis, T. J.、Quataert, E. 与 Bale, S. D.，2011，《天体物理学杂志》，743，197；Chen, P. F.，2011，《太阳物理学综述》，8，1

Cirtain, J.W., 等 2007,《科学》, 318, 1580 D'Amicis, R., & Bruno, R. 2015,《天体物理学杂志》, 805, 84 D'Amicis, R., Matteini, L., & Bruno, R. 2019,《皇家天文学会月刊》, 483, 4665 de Pontieu,B.,等 2007,《日本天文学会出版物》, 59, S655 De Pontieu, B., 等 2007,《科学》, 318, 1574 De Pontieu, B., 等 2014,《太阳物理学》, 289, 2733 DeForest, C.E., Hagenaar, H. J., Lamb, D. A., Parnell, C. E., & Welsch, B.T. 2007,《天体物理学杂志》, 666, 576 DeForest, C.E., Plunkett, S. P., & Andrews, M. D. 2001,《天体物理学杂志》, 546, 569 Domingo, V., Fleck, B., & Poland, A. I. 1995,《空间科学评论》,72, 81 Drake, J. F., 等 2021,《天文学与天体物理学》, 650, A2 Fargette, N., 等 2021,《天体物理学杂志》, 919, 96 Fisk, L. A. 2003,《地球物理研究杂志（空间物理学）》, 108, 1157 Fisk, L. A., & Kasper, J. C. 2020,《天体物理学杂志快报》, 894, L4 Gallet,F.,Charbonnel, C., Amard, L., Brun, S., Palacios, A.,& Mathis, S. 2017,《天文学与天体物理学》, 597, A14 Gosling,J. T., Tian, H., & Phan, T. D. 2011,《天体物理学杂志快报》, 737, L35 Grappin, R.,Velli, M., & Mangeney, A. 1991,《地球物理年刊》, 9, 416

Hassler, D. M., Dammasch, I. E., Lemaire, P., Brekke, P., Curdt, W., Mason, H. E., Vial, J.-C.,& Wilhelm,K.1999, 《科学》, 283, 810 He, J., Zhu, X., Yang, L., Hou, C., Duan, D., Zhang, L., & Wang, Y. 2021, 《天体物理学杂志快报》, 913, L14 Horbury, T. S., Matteini, L., & Stansby, D. 2018, 《皇家天文学会月刊》, 478, 1980 Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M., St. Cyr, O. C., Guhathakurta, M., & Christian, E. 2008, 《空间科学评论》, 136, 5 Karpen, J. T., DeVore, C. R., Antiochos, S. K., & Pariat, E. 2017, 《天体物理学杂志》, 834, 62 Kasper, J. C., 等 2019, 《自然》, 576, 228 Kosugi, T., 等 2007, 《太阳物理学》, 243, 3 Kumar, P., Karpen, J. T., Uritsky, V. M., Deforest, C. E., Raouafi, N. E., & Richard DeVore, C. 2022, 《天体物理学杂志》, 933, 21 Lin, Y., & Lee, L. C. 1993, 《空间科学评论》, 65, 59 L¨uftinger, T., G¨udel, M., & Johnstone, C. 2014, 《国际天文学联合会会刊》, 10, 333–339 Madjarska, M. S. 2019, 《太阳物理学综述》, 16, 2 Mallet, A., Squire, J., Chandran, B. D. G., Bowen, T., & Bale, S. D. 2021, 《天体物理学杂志》, 918, 62 Marsch, E., Rosenbauer, H., Schwenn, R., Muehlhaeuser, K. H., & Denskat, K. U. 1981, 《地球物理研究杂志》, 86, 9199 McIntosh, S. W., de Pontieu, B., Carlsson, M., Hansteen, V., Boerner, P., & Goossens, M. 2011, 《自然》, 475, 477 McIntosh, S. W., 等 2014, 《天体物理学杂志》, 792, 12 M¨uller, D., 等 2020, 《天文学与天体物理学》, 642, A1 Neugebauer, M. 2012, 《天体物理学杂志》, 750, 50 Neugebauer, M., Goldstein, B. E., McComas, D. J., Suess, S. T., & Balogh, A. 1995, 《地球物理研究杂志》, 100, 23389 Neugebauer, M., & Snyder, C. W. 1962, 《科学》, 138, 1095 Nitta, N. V., Mason, G. M., Wiedenbeck, M. E., Cohen, C. M. S., Krucker, S., Hannah, I. G., Shimojo, M., & Shibata, K. 2008, 《天体物理学杂志快报》, 675, L125 Panasenco, O., Velli, M., & Panasenco, A. 2019, 《天体物理学杂志》, 873, 25 Panesar, N. K., Sterling, A. C., Moore, R. L., Tiwari, S. K., De Pontieu, B., & Norton, A. A. 2018, 《天体物理学杂志快报》, 868, L27 Panesar, N. K., 等 2019, 《天体物理学杂志快报》, 887, L8 Paraschiv, A. R., Bemporad, A., & Sterling, A. C. 2015, 《天文学与天体物理学》, 579, A96 Parker, E. N. 1958, 《天体物理学杂志》, 128, 664 Parker, E. N. 1988, 《天体物理学杂志》, 330, 474 Perrone, D., D'Amicis, R., De Marco, R., Matteini, L., Stansby, D., Bruno, R., & Horbury, T. S. 2020, 《天文学与天体物理学》, 633, A166 Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. 2012, 《太阳物理学》, 275, 3 Raouafi, N. E., 等，2016，《空间科学评论》，201，1 Raouafi, N. E., Petrie, G. J. D., Norton, A. A., Henney, C. J., & Solanki, S. K. 2008，《天体物理学杂志快报》，682，L137 Raouafi, N. E., & Stenborg, G. 2014，《天体物理学杂志》，787，118 Raouafi, N. E., Vourlidas, A., Zhang, Y., & Paxton, L. J., 编，2021，太阳物理与太阳风（第1版），地球物理专著丛书（威利） Roberts, M. A., Uritsky, V. M., DeVore, C. R., & Karpen, J. T. 2018，《天体物理学杂志》，866，14 Rouppe van der Voort, L., Leenaarts, J., de Pontieu, B., Carlsson, M., & Vissers, G. 2009，《天体物理学杂志》，705，272 Ruffolo, D., 等，2020，《天体物理学杂志》，902，94 Samanta, T., Pant, V., & Banerjee, D. 2015，《天体物理学杂志快报》，815，L16 Savcheva, A., 等，2007，《日本天文学会出版物》，59，S771 Scherrer, P. H., 等，2012，《太阳物理学》，275，207 Schwadron, N. A., & McComas, D. J. 2021，《天体物理学杂志》，909，95 Seaton, D. B., 等，2021，《自然·天文学》，5，1029 Shibata, K., 等，1992，《日本天文学会出版物》，44，L173 Shibata, K., & Magara, T. 2011，《太阳物理学综述》，8，6 Shoda, M., Chandran, B. D. G., & Cranmer, S. R. 2021，《天体物理学杂志》，915，52 Sow Mondal, S., Klimchuk, J. A., & Sarkar, A. 2022，《天体物理学杂志》，937，71 Squire, J.,Chandran, B. D.G.,& Meyrand, R. 2020，《天体物理学杂志快报》，891，L2 Sterling, A. C. 2000，《太阳物理学》，196，79 Sterling, A. C., & Moore, R. L. 2020，《天体物理学杂志快报》，896，L18 Tian, H., 等，2014，《科学》，346，1255711 Tu, C.-Y., Zhou, C., Marsch, E., Xia, L.-D., Zhao, L., Wang, J.-X., & Wilhelm, K. 2005，《科学》，308，519 Uritsky, V. M., DeForest, C. E., Karpen, J. T., DeVore, C. R., Kumar, P., Raouafi, N. E., & Wyper, P. F. 2021，《天体物理学杂志》，907，1 Uritsky, V. M., Roberts, M. A., DeVore, C. R., & Karpen, J. T. 2017，《天体物理学杂志》，837，123 van de Hulst, H. C. 1950，《荷兰天文学研究公报》，11，150 von Steiger, R., 等，2000，《地球物理研究杂志》，105，27217 Wang, J., Lee, J., Liu, C., Cao, W., & Wang, H. 2022，《天体物理学杂志》，924，137 Wang, Y. M. 2016，《天体物理学杂志快报》，833，L21 Wang, Y. M. 2020，《天体物理学杂志》，904，199 Wang, Y. M., Pick, M., & Mason, G. M. 2006，《天体物理学杂志》，639，495 Wang, Y. M., & Sheeley, J., N. R. 1990，《天体物理学杂志》，355，726 Wang, Y. M., 等，1998，《天体物理学杂志》，508，899 Wang, Y. M., 等，1997，《天体物理学杂志快报》，484，L75 Wilhelm, K., 等，2011，《天文学与天体物理学评论》，19，35 W¨oger, F., von der L¨uhe, O., & Reardon, K. 2008，《天文学与天体物理学》，488，375