arXiv:2303.11001v1 [astro-ph.SR] 20 Mar 2023

慢太阳风源。四分视角下的高分辨率观测

Krzysztof Barczynski[1,2], Louise Harra[2,1], Conrad Schwanitz[1,2], Nils Janitzek[1,2], David Berghmans[3], Frédéric Auchère[4], Regina Aznar Cuadrado[5], Éric Buchlin[4], Emil Kraaikamp[3], David M. Long[6,7], Sudip Mandal[5], Susanna Parenti[4], Hardi Peter[5], Luciano Rodriguez[3], Udo Schühle[5], Phil Smith[6], Luca Teriaca[5], Cis Verbeeck[3], Andrei N. Zhukov[3,8],

[1] 苏黎世联邦理工学院，Hönggerberg 校区，HIT 大楼，Wolfgang-Pauli-Str. 27，8093 苏黎世，瑞士 电子邮件：krzysztof.barczynski@pmodwrc.ch [2] PMOD/WRC，Dorfstrasse 33，CH-7260 达沃斯多夫，瑞士 [3] 太阳-地球卓越中心 – SIDC，比利时皇家天文台，Ringlaan -3- Av. Circulaire，1180 布鲁塞尔，比利时 [4] 巴黎萨克雷大学，法国国家科学研究中心，空间天体物理研究所，91405，奥赛，法国 [5] 马克斯·普朗克太阳系研究所，Justus-von-Liebig-Weg 3，37077 哥廷根，德国 [6] 伦敦大学学院穆拉德空间科学实验室，霍尔姆伯里圣玛丽，多金，萨里，RH5 6NT，英国 [7] 天体物理学研究中心，数学与物理学院，贝尔法斯特女王大学，University Road，贝尔法斯特，BT7 1NN，北爱尔兰，英国 [8] 斯科别利岑核物理研究所，莫斯科国立大学，119992 莫斯科，俄罗斯

收到：xxx；接受：xxx

摘要

背景。 慢太阳风的起源仍是一个未解之谜。一种已有的推测是，活动区边缘的上流可能会对慢太阳风有所贡献。

目的。 我们旨在解释等离子体上流是如何产生的、哪些机制促成了这些上流，以及上流区的拓扑结构是什么样的。

方法。 我们利用成像数据研究了一个上流区。这些数据于2022年3月30日通过太阳轨道飞行器搭载的极紫外成像仪（EUI）/高分辨率成像仪（HRI）的174 Å 通道获取，具有前所未有的时间（3秒）和空间（2 像素 = 236 千米）分辨率。在此期间，EUI与地球轨道卫星（太阳动力学天文台、日出号和界面区成像光谱仪 IRIS）位于正交位置（~ 92°），从而提供了高分辨率立体视图。我们使用 Hinode/EIS（铁 xii）光谱数据，在活动区中寻找日冕上流区。IRIS狭缝颚式成像仪则提供了过渡区和色球层的高分辨率视图。

结果。 我们首次获得了能够以高空间分辨率观测日冕上流区四分视角的数据。我们发现，延伸环的根部位于日冕上流区。通过多普勒频移进行光谱测定的延伸环足点处等离子体上流，与四分视角成像中看到的表观向上运动相似。上流区小尺度结构的动力学可用于识别等离子体上涌的两种机制：机制 I 是高温日冕环与太阳日冕中的开放磁力线发生磁重联；机制 II 是小型色球环与色球层或过渡区中的开放磁力线发生磁重联。我们确定了机制 I 和 II 起作用的位置。

关键词。 太阳：大气 – 太阳：太阳风 – 方法：观测 – 技术：光谱

1. 引言

T太阳风是由太阳持续释放的带电粒子流，
t（Parker 1958；McComas 等，2003）。太阳——
l 太阳风是理解行星所在的日球层的维持机制和动力学的关键。McComas 等（2003）讨论了太阳活动峰年期间的三维太阳风。太阳风由两个组成部分构成。快速太阳风（在 1 天文单位处速度超过 500 km s^{-1}）起源于日冕洞（Temmer 2021）。慢太阳风（在 1 天文单位处速度低于 400 km s^{-1} ）有许多可能的来源，但这些来源仍存在争议。慢太阳风的来源问题十分复杂，其来源位于太阳活动带周围（Abbo 等，2016）。

活动区的多普勒速度图显示，在日冕温度下，可以观测到活动区边界处的上流（Sakao 等，2007；Doschek 等，2007，2008；Del Zanna 2008；Hara 等，2008；Harra 等，2008）。上流区域被认为是慢太阳风的潜在源区（Kojima 等，1999；Sakao 等，2007；Harra 等，2008），并在活动区形成的早期阶段出现，且在整个活动区寿命期间持续存在（Brooks 等，2021）。只要通过光谱观测日冕中的活动区，就总能观测到这些区域。

Barczynski 等人（2021）提出，至少有三种并行机制会形成上流区：（I）开放磁力线可在低日冕或上层过渡区与闭合热环发生磁重联；（II）开放磁力线可与小尺度色球环发生磁重联；（III）由于太阳大气中的波，开放磁力线从光球向日冕扩展，使色球等离子体能够逃逸至太阳日冕，

从而形成上流。Tian 等人（2011）讨论了波在上流中的作用。磁重联（机制 I 和 II）会释放太阳大气中的磁能。这一过程会加热周围的等离子体并驱动等离子体流。在太阳大气中，磁重联位置上方可观测到蓝移，位置下方则可观测到红移。磁重联应会在日冕强度随时间的变化中留下印记。低层太阳大气中的波也可能导致等离子体上涌（机制 III）。

此前对上流区域的研究（Sakao 等，2007；Doschek 等，2007、2008；Del Zanna 2008；Hara 等，2008；Harra 等，2008；Boutry 等人，2012；Brooks 等，2021；Bar-czynski 等人，2021）使用了地球轨道卫星获取的观测数据，也就是说，这些数据来自单一视角。两种方法可以获得上流区的立体视图：（1）在上流区随太阳旋转的过程中，对其进行数天的追踪（Démoulin 等人，2013）；（2）利用位于不同角位置的两颗卫星进行同步观测，例如 Solar Terrestrial Relations Observatory（STEREO）的两颗卫星（如 Aschwanden & Wülser 2011）。这两种方法都能研究上流区的长期变化，其特征时间尺度为数天（方法 1）；而 STEREO 观测的观测 cadence 至少为 2.5 分钟（方法 2）。

新一代卫星为对太阳大气进行高空间分辨率和高时间分辨率观测提供了独特机会。搭载于太阳动力学天文台（SDO；Pesnell 等人 2012）上的大气成像组件（AIA；Lemen 等人 2012）以 2 像素的高空间分辨率观测太阳圆面，相当于 1.2″；在距离为 1.0 天文单位时，这相当于 2 像素，即 872 km。AIA 的标准时间观测 cadence 为 12 s。2020年发射的太阳轨道飞行器任务（Müller 等人 2020）与绕地观测站相结合，为太阳轨道飞行器位于椭圆轨道适当位置时进行太阳正交观测提供了机会。搭载于太阳轨道飞行器上的极紫外成像仪（EUI；Rochus 等人 2020）通过全日面成像仪（FSI）和两台高分辨率成像仪（HRI）观测太阳。在 174 Å 通道中，HRI 望远镜（称为 HRI_{EUV}）提供 2 像素的空间分辨率，相当于 1″；在距离为 0.33 天文单位时，这带来了前所未有的空间分辨率：2 像素，即 236.8 km。HRI 的时间分辨率为 3 s。我们首次展示了利用高空间分辨率和高时间分辨率数据对日冕上流区进行的正交观测。

我们结合使用太阳轨道飞行器 HRI_{EUV} 数据、界面区成像光谱仪（IRIS；De Pontieu 等，2014）以及日之出极紫外成像光谱仪（Hinode/EIS；Culhane 等，2007）的观测数据（第 2 节）。这些数据展现了从色球层到日冕的上流足点，为成像数据提供了补充；成像数据则呈现了从上流区延伸而出的结构细节。由于正面观测太阳时日冕在光学上是稀薄的，因此很难通过成像观察到这些结构。我们利用多普勒成像，将上流区的视线方向等离子体速度，与在正交位置附近沿着根植于上流区的延伸环、在天空平面测得的日冕等离子体表观运动进行比较（第 3 节）。第 4 节讨论日冕辐射与其下方过渡区和色球层之间的关系。我们尤其关注在过渡区和色球层中观测到的小尺度特征的动力学。第 5 节讨论通过四分观测获得的日冕上流区特性，以及太阳日冕和太阳大气下层的等离子体动力学。最后，我们在第 6 节总结研究结果。

2. 观测与数据处理

2.1. EUI 观测

我们分析了由太阳轨道飞行器搭载的 EUI 获取的太阳大气图像。EUI 由三台望远镜组成：双波段 FSI 可在 174 Å 和 304 Å 波段观测整个太阳圆面；两台 HRIs 则分别在莱曼-α线 1216Å（$\mathrm{HRI}_{Ly\text{-}\alpha}$）和 174 Å 极紫外（EUV）波段（$\mathrm{HRI}_{EUV}$）观测太阳大气。我们使用了 HRI_{EUV} 的二级数据，这些数据呈现上部过渡区和下部日冕辐射（1 MK），辐射主要来自 Fe ix 和 Fe x 谱线。

我们分析了 HRI_{EUV} 于 2022年3月30日 00:08 UT 至 00:53 UT（时间以地球为准）观测到的活动区 NOAA 12974，观测 cadence 为 3 秒，曝光时间为 1.65 秒。太阳轨道飞行器位于距太阳 0.33 天文单位处。太阳轨道飞行器与太阳—地球连线之间的角距离为日面经度上的 92°，非常适合开展此类四分视角分析。HRI_{EUV} 的视场（FOV）为 2048×2048 像素，在 0.33 天文单位处的板尺度为 118.4 千米。

我们使用了由 EUI团队提供的二级 HRI_{EUV} 数据，这些数据作为“EUI数据发布5.0（2022-04）”的一部分发布。它们可供公众获取（Mampaey 等，2022）。

2.2. 大气成像组件观测

AIA 通过七个 EUV 通道和三个紫外通道，持续观测从光球层到太阳日冕的整个太阳圆面。EUV 图像的观测 cadence 为 12 秒，紫外图像的观测 cadence 为 24 秒。所有 AIA 通道的像素尺寸均为 0.6″（436 千米）。

我们使用了由联合科学运行中心（JSOC[1]）提供的预处理 SDO 数据。数据已校正视场尺度、偏移和旋转（相当于 1.5 级数据）。

我们使用 AIA 的 304 Å、171 Å 和 193 Å 通道图像，同时研究色球层、过渡区和太阳日冕。这些通道用于研究上流区的拓扑结构和动力学。

2.3. 界面区成像光谱仪观测

IRIS 是一种空间成像光谱仪，用于观测色球层和过渡区。IRIS 在两个远紫外（FUV）通道中提供光谱栅格数据，波长范围分别为 1332–1358 埃和 1390–1406 埃；此外，还在一个近紫外（NUV）通道中提供波长范围为 2786–2835 埃的数据。FUV 的光谱采样间隔为 12.8 毫埃，NUV 的光谱采样间隔为 25.6 毫埃。

IRIS 狭缝颚式成像仪（SJI）通过四种滤光器拍摄狭缝周围区域的图像。其中两种滤光器覆盖以电离碳 1334/1335 埃和 Si IV 1394/1403 埃为中心的宽通带。另外两种滤光器聚焦于较窄的 4 埃通带，中心分别位于 Mg II k 2796 埃和约 2830 埃处电离镁的翼部。

[1] http://jsoc.stanford.edu

我们分析了 2022年3月30日 00:23 世界时至 00:53 世界时期间通过 SJI 观测到的活动区。IRIS 采用大视场定点观测模式进行观测，并提供了 Si IV（1403 埃）和 Mg II k（2796 埃）滤光器拍摄的 SJI 图像。SJI 提供光谱仪狭缝下方位置周围区域的上下文图像。每种滤光器下，SJI 均以 4 秒的观测 cadence、1 秒的曝光时间获取了 488 张图像。SJI 图像的 FOV 为 $167'' \times 175''$。我们只分析 SJI 图像，因为我们希望研究目标在大视场内的时间演化。光栅定点观测模式使我们只能分析单个狭缝位置。

我们从 IRIS 数据库下载了 SJI 二级数据[2]。这些数据经过重新定向，使坐标轴保持一致：北向上（0° 滚转角），并进行了暗电流和平场校正。

2.4. Hinode EIS 观测

EIS 是一台光谱仪，可在两个波长范围内观测太阳大气：171–211埃和245–291埃。两个通道的光谱分辨率均为22.3毫埃。

我们分析了2022年3月30日00:32世界时至02:59世界时期间获取的 EIS 数据。EIS 提供的光谱数据采用 2″ 狭缝，视场为$50.0'' \times 152.0''$。

我们从 Hinode/EIS 档案下载了零级数据[3]。我们使用 Solar Software IDL 库中的标准校准程序 eis_prep 对数据进行了处理。该程序去除了探测器曝光中的 CCD 暗电流、宇宙射线图样以及高温和积尘像素，并将辐射定标为物理单位（erg cm^{-2} s^{-1} sr^{-2} 埃$^{-1}$）。数据还经过了狭缝倾斜校正（Warren 等，2014）。

我们重点研究了强日冕发射线铁 XII（195.12埃）。我们使用 eis_auto_fit 程序[4]，对每个空间像素处的铁 XII 谱线进行单高斯拟合。铁 XII 双线在 195.12 埃和 195.18 埃处各有一条谱线。我们发现单高斯拟合和双高斯拟合得到的 χ^2 及速度误差相同，因此采用了单高斯拟合。

我们利用拟合参数绘制了峰值强度图和多普勒速度图。非热速度图通过太阳软件中的 eis_width2velocity 程序计算。该程序使用的公式为 $\mathrm{FWHM}^2 = (\mathrm{FWHM}_{\mathrm{instr}})^2 + 4\ln 2\,(\lambda/c)^2(V_t + V_{nt}^2)$，其中 FWHM 为半高全宽，$\mathrm{FWHM}_{instr}$ 为仪器半高全宽，λ 为发射线峰值的波长，c 为光速，V_t 为热速度，V_{nt} 为非热速度。

2.5. 数据配准与重投影

我们使用互相关技术，对形成温度相近的谱线强度图进行配准。我们按照以下顺序对图像进行配准：SJI 2796 Å – SJI 1400 Å – AIA 304 Å – AIA 171 Å – AIA 193 Å – EIS 铁 XII。IRIS 与 AIA 数据之间的配准精度为一个 AIA 空间像素。Hinode/EIS 与 AIA 数据的配准精度为一个 Hinode/EIS 空间像素。

采用互相关方法对 HRI_{EUV} 图像进行共同配准，精度达到亚像素级。校正

[2] https://iris.lmsal.com/search/[3] http://solarb.mssl.ucl.ac.uk/SolarB/SearchArchive. jsp [4] 太阳软件；eis_auto_fit.pro

表 1. 分析中使用的 Hinode/EIS、IRIS、EUI 和 SDO/AIA 谱线或通带。“用途”栏中的缩写分别表示速度测量（速度）以及上流区子结构动力学研究（动力学）中的用途。

谱线/通道	波长 [埃]	log(T/K)	仪器	用途
铁 XII	195.12	6.2	EIS	速度，动力学。
AIA 193	193	6.1	AIA	dyn.
EUI 174	174	5.8	EUI	速度，动力学。
AIA 171	171	5.8	AIA	dyn.
AIA 304	304	4.7	AIA	dyn.
SJI 1400	1400	3.7-5.2	IRIS	dyn.
SJI 2796	2796	3.7-4.2	IRIS	dyn,

HRI_{EUV} 数据是必要的，可减少航天器抖动的影响。

对于两颗卫星间的分离角为 92° 的一次观测，我们使用重新投影法来确定太阳圆面上同一感兴趣区域（ROI）的位置。我们使用世界坐标系（WCS；Greisen与Calabretta，2002）和太阳软件WCS例程，将在 Hinode/EIS 中定义的点的位置重新投影到 HRI_{EUV} 图中对应的位置。

3. 正交观测中的上流区拓扑结构与速度

首次，利用 SDO/AIA 171 Å（图 1a）和 HRI_{EUV} （图 1b）同时获得的太阳日冕观测，以高空间分辨率和高时间分辨率，并从较大的角距离（92°）展示了一个活动区。根据以铁 XII 呈现的 EIS多普勒速度图（图 2），我们将速度低于$v < -5$ $\mathrm{km\,s^{-1}}$的区域定义为上流区。Hinode/EIS图（图 2a-c）中以黑色轮廓标出了上流区。我们将空间位置与利用 Hinode/EIS 获得的上流速度$v < -5\,\mathrm{km\ s^{-1}}$ 相对应的区域定义为感兴趣区 A（ROI-A）（图 2b）。多普勒速度测量的误差与拟合有关，在上流区内约为 $\pm 2\,\mathrm{km\,s^{-1}}$。所得误差并非绝对误差，因为 EIS 获得的铁 xii 多普勒速度缺少绝对定标。我们使用 SSW IDL程序 eis_get_fitdata 获得速度测量误差。铁 XII 强度图（图 2a）显示，从盘面视角看，日冕上流区内没有大型高温日冕环。非热速度图（图 2c）显示，上流区内的非热速度高于周围区域。这种现象广为人知，且此前已有观测记录（例如 Chen等人，2011）。

ROI-A（图 1，黑色轮廓）位于活动区 NOAA 12974 的边缘。从 HRI_{EUV} 图中的侧视图可以看到，延伸环的根部位于 ROI-A （图 1a ）。AIA 171 埃中的正视图（图 1b ）显示，ROI-A 的强度低于周围区域。

HRI_{EUV} 观测的放大图（图 3a）显示了一个强度较高、且有许多以 ROI-A 为根部的延伸环的子区域。HRI_{EUV} 成像数据显示了与 EIS光谱图处于正交位置的 ROI-A。时间分析表明，增亮现象沿着延伸环从 ROI-A 中心向外移动（见 Movie1）。延伸环（图 3a，红色箭头）很明亮，其强度随时间的相对变化较弱。为识别强度变化，

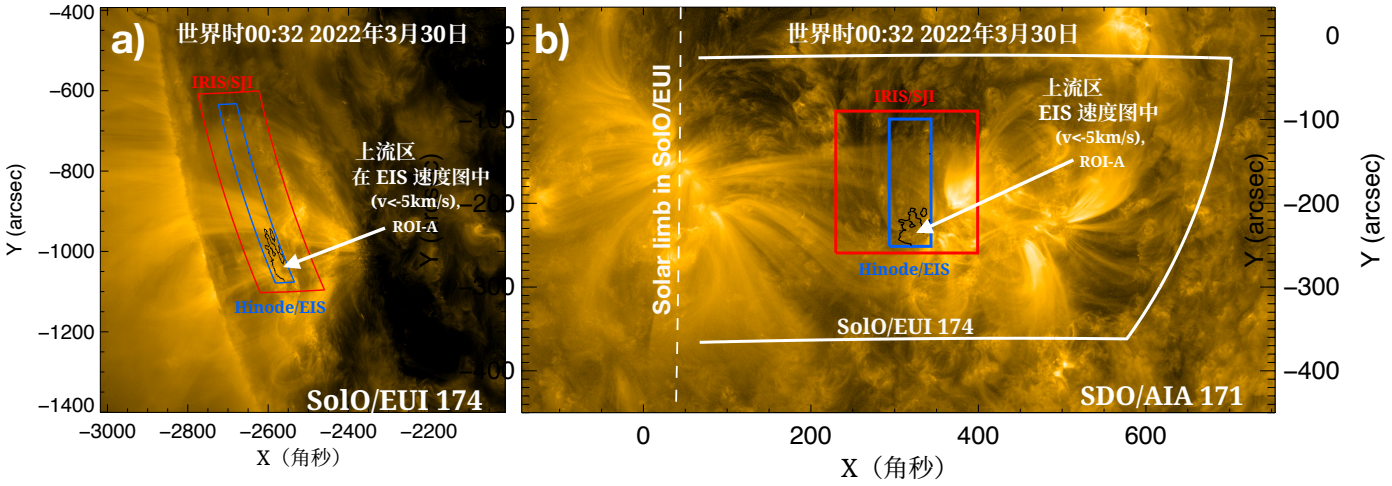


图 1. 太阳轨道飞行器/EUI 和 HRI_{EUV} 望远镜在 174 Å (a) 和 AIA 171 Å (b) 下对活动区的观测概览。IRIS/SJI 和 Hinode/EIS 的视场分别用红色和蓝色方框标出。黑色等高线标示 ROI-A，其空间位置与图 2 中定义的 Hinode/EIS 上流区相对应。在面板 (b) 中，白线表示面板 (a) 中太阳圆面的边缘位置，该位置由 WCS_LIMB 太阳软件程序计算得出，随后转换至 SDO/AIA 视角。EUI/FSI 174 Å 中观测到的边缘（面板 a）在 171 Å 图（面板 b）中以虚线标出。

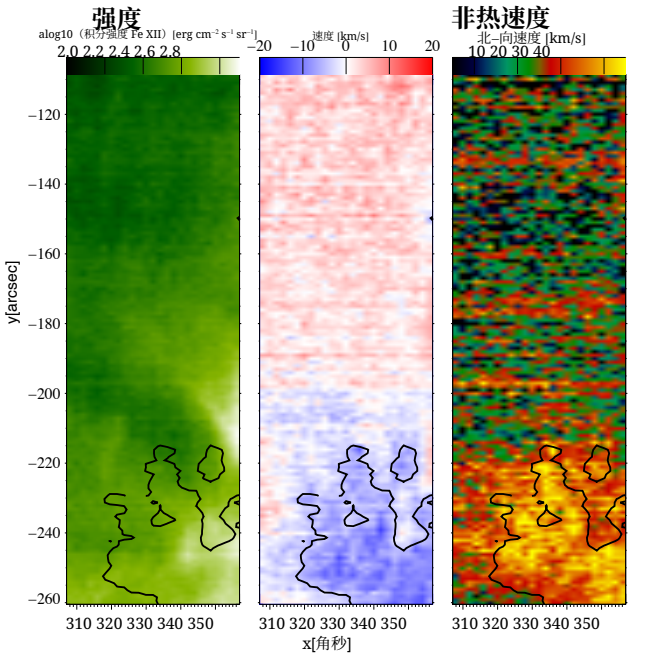


图 2. 2022年3月30日世界时00:32，日出号/Hinode/EIS观测到的日冕上流区。各面板分别显示铁 XII发射线（1.0 MK）的强度（左列）、多普勒速度（中列）和非热速度（右列）。黑色等高线表示多普勒速度为 -5 km s^{-1}。多普勒速度小于v_{-5} km s^{-1} 的区域定义为上流区。

我们分析了影片（movie1），并制作了图 3b 所示的堆叠图。

堆叠图（图 3b）显示了虚线沿线的强度随时间的变化（图 3a）。虚线始于环脚点（图 2b 中的红色十字）。剖面线的起点对应堆叠图中的 0Mm 距离（图 3c）。从 00:32:30世界时到堆叠图时间轴结束（00:37:00世界时），参考线上的强度传播随时间呈线性变化。为确定这种强度传播的速度，我们确定了每个时刻的最大强度点，这些点沿参考线分布在 0–3 Mm 的距离范围内。然后，我们对这些最大强度点进行线性函数拟合。拟合参数描述了等离子体流或波传播导致的延伸环上的强度移动。拟合误差被视为速度测量的误差。强度增加以 9.6 ± 0.4 kms^{-1} 的速度沿延伸环传播。

在日出号/Hinode/EIS 和 EUI 协同观测的 20 分钟内，我们识别出延伸环的五个足点，以及沿这些延伸环的等离子体流。我们计算了 EIS 在足点处的多普勒速度，以及 EUI 测得的沿延伸环的速度。表2汇总了这些测量结果。表2中的测量 4 和 5 是针对同一足点以及延伸环上同一参考线位置获得的，但测量时间相邻。因此，它们呈现出不同的传播情况，但起源于同一区域。上流区的多普勒速度与以往的上流研究结果一致（例如 Barczynski 等，2021）。要描述这种传播并验证其是否可能具有周期性，还需要更长时间序列的数据。

由 EIS 计算的多普勒速度，以及根据 EUI 观测到的延伸环计算的沿环速度，都可能受到投影效应的影响。延伸环相对于垂直于太阳表面的方向倾角越大，等离子体上涌的实际速度就越高于测得的速度。因此，表2中列出的结果应理解为速度的下限。

4. 上流区特征的动力学

4.1. 立体视图下的上流区域动力学

正交观测显示，在 AIA 171 Å 和 HRI_{EUV} 的日冕图中，EIS 上流区域存在小尺度结构。我们重点关注世界时00:32至00:52期间获得的观测。这些观测显示，在 AIA 171 Å 和 HRI_{EUV} 获得的日冕图中，ROI-A 内的强度随时间显著变化。我们绘制了 AIA 171 Å（图 4a）和 HRI_{EUV}（图 4b）观测中强度随时间变化的标准差空间图，以识别具有

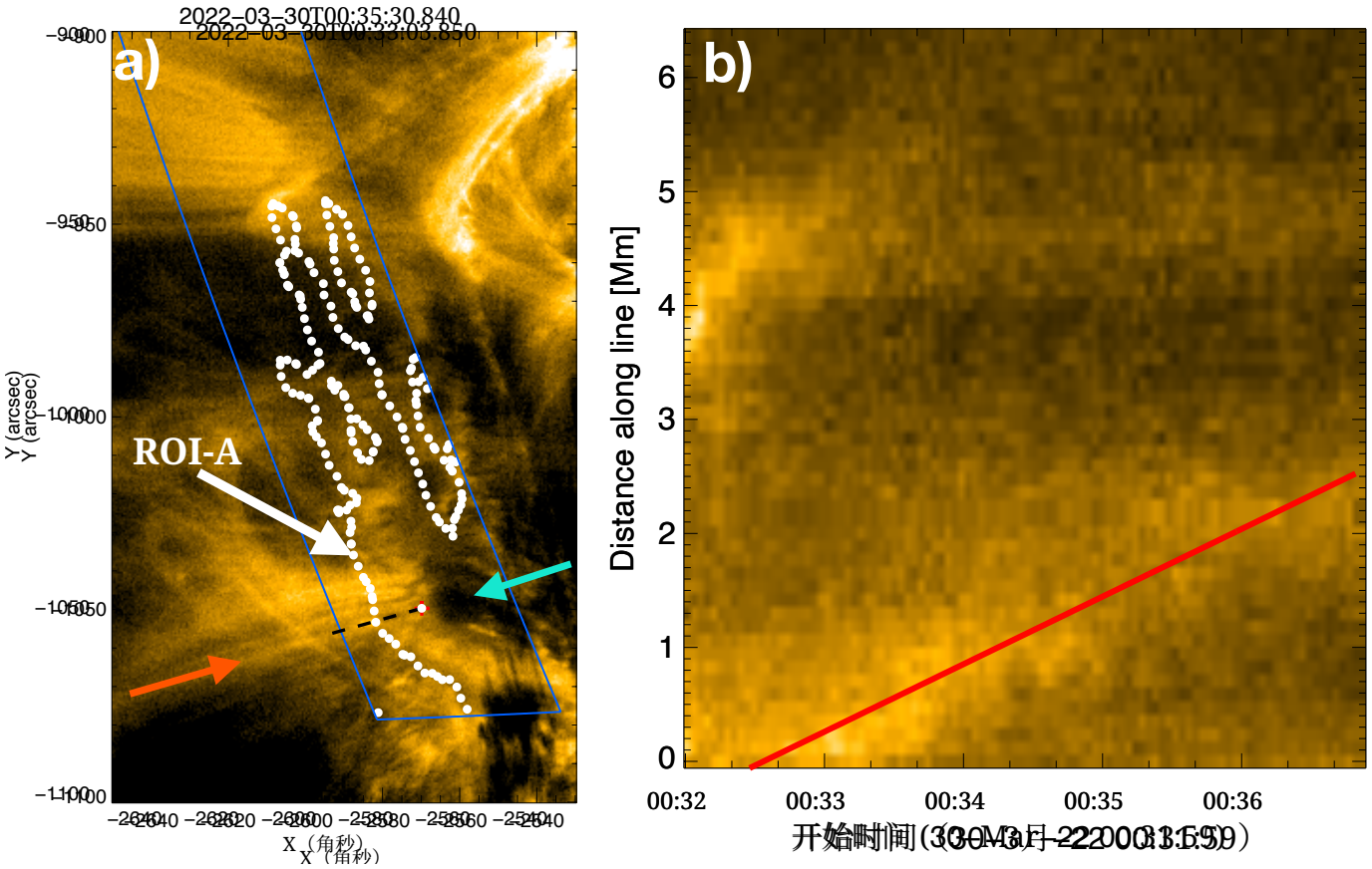


图 3. HRI_{EUV}强度图，显示与 Hinode/EIS 上流区及其周围区域（图 2）对应的范围。在面板 (a) 中，白色等值线标示重新投影后的 ROI-A，它对应于 Hinode/EIS 多普勒上流速度为 $v < -5$ km s^{-1} 的上流区。黑色虚线标示用于测量沿环速度的单像素宽线的位置。红色箭头标出了延伸环。蓝色箭头显示上流区内的低强度区域。面板 (b) 显示了根据 HRI_{EUV}观测获得的延伸环强度随时间的变化（见左侧图中的剖面线）。红线拟合了强度最高的位置，其速度为 9.9 ± 0.4 km s^{-1}。所有面板均采用相同的强度范围（900–2300 DN/s）。延伸环足点的多普勒速度由日出号 EIS 测得，为 −8.6 ± 2.3 km s^{-1}（图 2）。

表2。 延伸环足点的速度测量，以及等离子体沿延伸环传播的速度。起始和结束位置（第五列和第六列）是在图3a的HRI_{EUV}图中测量的

No.	时间（Hinode/EIS）2022年3月30日	EIS位置（x，y）[角秒]	EIS速度 [千米 秒$^{-1}$]	起始位置 (x, y) [角秒]	结束位置 (x, y) [角秒]	速度 EUI [公里/秒$^{-1}$]
1	00:32:02 - 00:36:55 世界时	(319.0, −241.7)	−8.6 ± 2.3	(−2569.8, −1049.7)	(−2596.0, −1057.0)	9.9 ± 0.4
2	00:32:02 - 00:36:55 世界时	(324.2, −232.1)	−6.7 ± 2.3	(−2576.0, −1021.7)	(−2596.9, −1020.9)	10.1 ± 1.5
3	00:36:55 - 00:41:48 世界时	(325.2, −238.8)	−9.6 ± 2.0	(−2567.4, −1041.0)	(−2655.7, −1072.4)	7.7 ± 1.6
4	00:36:55 - 00:41:48 世界时	(327.0, −239.2)	−9.3 ± 2.1	(−2565.2, −1041.0)	(−2602.2, −1048.8)	12.1 ± 1.7
5	00:41:48 - 00:46:41 世界时	(327.0, −239.2)	−9.0 ± 2.0	(−2565.2, −1041.0)	(−2602.2, −1048.8)	10.1 ± 1.7
6	00:46:41 - 00:51:34 世界时	(319.4, −238.4)	−12.0 ± 2.0	(−2573.6, −1040.0)	(−2594.6, −1045.3)	4.1 ± 0.5

更强动力学活动的区域。为此，我们分别计算了每个像素位置处强度随时间变化的标准差。我们使用 IDL 程序 STDDEV[5]，，该程序将标准差计算为强度随时间变化方差的平方根。HRI_{EUV} 和 AIA 171Å 的观测 cadence、曝光时间及仪器响应各不相同，因此我们可以定量比较 AIA 171 Å 或 HRI_{EUV} 各自标准差图中的数值，但不能比较这两幅图之间的数值。不过，我们可以定性识别出这些区域较强且较低的标准差，并比较这些区域在 HRI_{EUV} 和 AIA 171埃通道中的位置。

HRI_{EUV} 和 AIA 171埃通道均显示 ROI-A 中强度波动的标准差增强。不同仪器中，标准差增强值的空间分布有所不同。在 AIA 171埃通道中，ROI-A 区域的大部分显示出较高的强度标准差，只有 ROI-A 的北部强度标准差低于其余部分；HRI_{EUV} 的 ROI-A 图显示，ROI-A 的南部和东部标准差较高（图 4c，橙色箭头）；ROI-A 的西部标准差较低

[5] https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/stddev.html

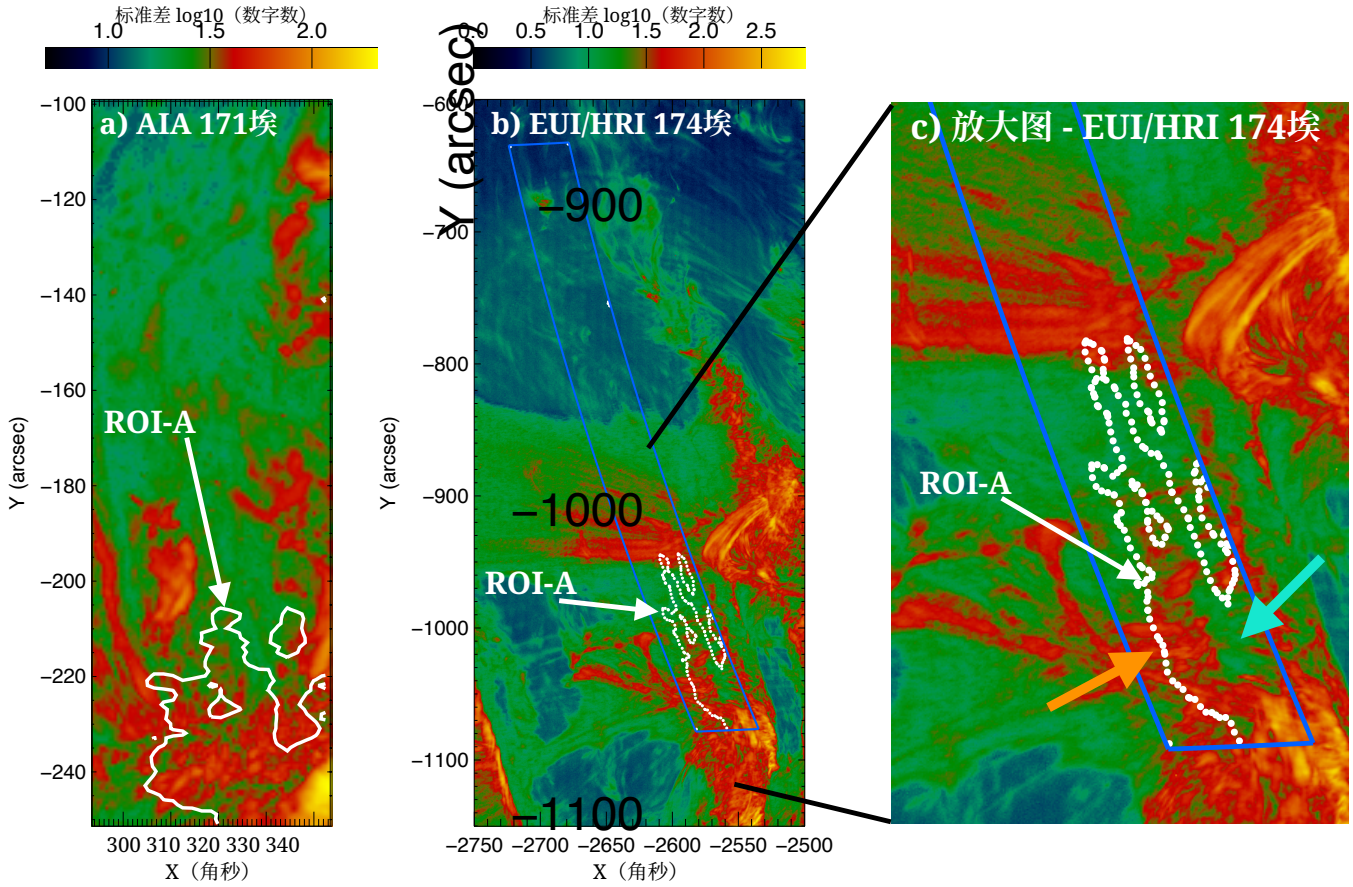


图 4. 利用 (a) AIA 171 Å 和 (b) HRI_{EUV} 观测得到的日冕强度标准差随时间变化图。(c) 图显示了 HRI_{EUV} 所观测到的上流区放大图。这些图基于 2022年3月30日 00:32 至 00:52 世界时的时间范围计算得出。轮廓线标出了 ROI-A，它在空间上对应于 Hinode/EIS 图中的上流区（速度 $v < -5$ 千米 秒$^{-1}$）（图 2b）。在 (c) 图中，橙色箭头指示扎根的延伸环所在区域（另见图 5），该区域的标准差高于周围区域。蓝色箭头指示标准差强度值低于延伸环足点区域的区域。低标准差区域对应于日冕图中的低强度区域（见图 5）。

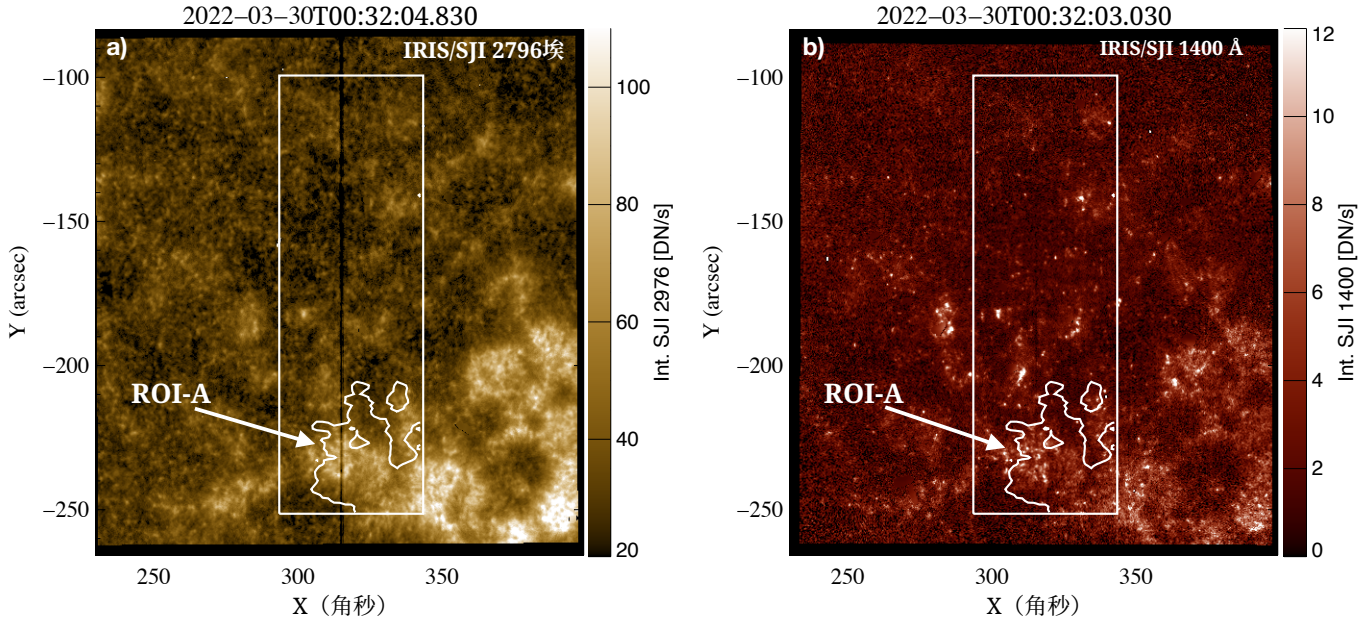


图 5. 利用 IRIS SJI 2796（面板 a）和 IRIS SJI 1400（面板 b）观测到过渡区中高度动态的小尺度结构。矩形框表示 Hinode/EIS 视场。矩形框内的轮廓线标示 ROI-A，其空间位置与日冕上流区相对应，投影速度为$v < -5$ km s^{-1}。

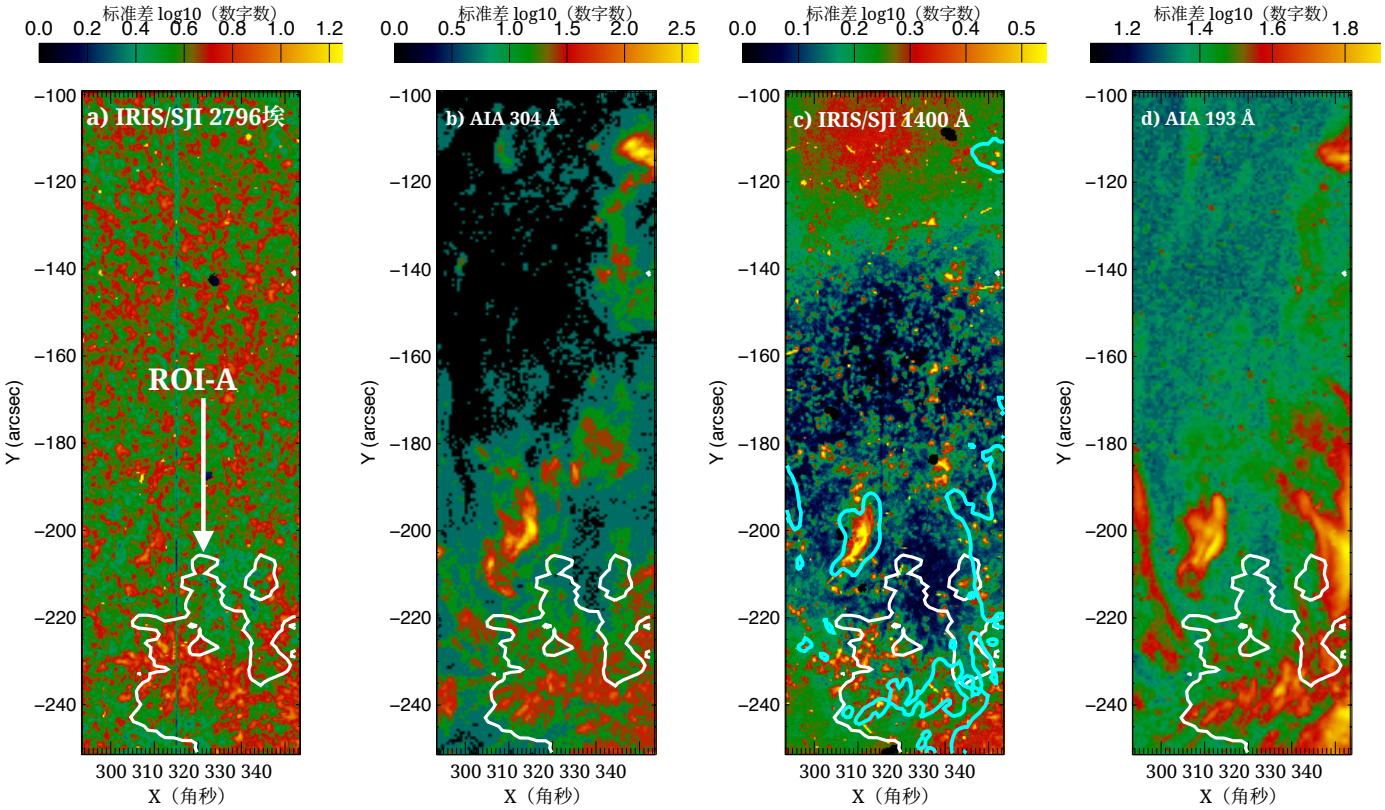


图 6。色球层（a、b）、过渡区（c）和日冕（d）的标准差图。图中数据取自2022年3月30日世界时00:32至00:52。白色等值线表示 ROI-A，其空间位置与日冕上流区相对应，该区域的速度为 $v < -5\,\mathrm{km\ s^{-1}}$。面板（c）中的蓝色等值线表示 AIA 193 Å 强度的标准差较大，为 20 DN/s（面板 d）。

（图 4c，蓝色箭头）。HRI_{EUV} 的强度图像（图 3a）显示，许多延伸环扎根于 ROI-A 东侧。这些延伸环及其足点的演化，导致 HRI_{EUV}观测到的 ROI-A 东部和南部区域出现较大的标准差。

尽管 HRI_{EUV} 和 AIA 171 Å 显示的是同一区域，且具有相似的峰值温度响应，但 HRI_{EUV} 和 AIA 171 Å 通道中强度标准差的空间分布差异十分明显。我们认为，HRI_{EUV} 与 AIA 171 Å 之间的这种差异可能与投影效应有关。从侧视图和正视图观测到的上流区呈现出对应的结构，但观测角度不同。因此，侧视图和正视图的视线不同，这意味着沿视线积分的强度存在差异。从不同方位角观测到的强度随时间的演化也有所不同，这意味着 HRI_{EUV} 和 AIA 171 Å 观测的强度标准差图存在差异。

4.2. 色球层、过渡区和太阳日冕中的上流区域动力学

ROI-A 的色球层（图 5a）、过渡区（图 5b）和日冕强度图（图 3）显示出许多快速演化的小尺度结构。随附的色球层（影片2）、过渡区（影片3）和太阳日冕（影片4）影片展示了这些结构在 20 分钟内的演化。我们识别出 ROI-A 中这些小尺度结构高密度和低密度的子区域。

我们在色球层、过渡区和日冕图中发现了这些子区域（影片1-4）。我们认为，可以根据标准差图定位机制 I（太阳日冕中高温日冕环与开放磁力线发生磁重联）和机制 II（色球层/过渡区中小型色球环与开放磁力线发生磁重联）发生的位置。低日冕或上部过渡区中的开放磁力线与闭合热环发生磁重联，应会导致强度显著增加，并使日冕结构的动力学增强；预计这还会在其中产生强烈的等离子体流，从而使太阳大气这些区域的标准差增大。同理，色球层中的磁重联应会增大色球层温度图中的强度标准差。低日冕/上部过渡区中强度的标准差较大，表明机制 I，即太阳日冕中高温日冕环与开放磁力线发生磁重联。色球层中强度的标准差较大，则表明机制 II，即色球层/过渡区中小型色球环与开放磁力线发生磁重联。

我们绘制了色球层（图 6a、b）、过渡区（图 6c）和日冕（图 6d）强度随时间变化的标准差空间分布图。强度随时间变化的标准差图有助于识别强度变化最显著的位置。在所有分析的通道中，ROI-A 的强度标准差均高于宁静太阳区域。

太阳日冕强度标准差图显示，ROI-A 中心的波动比周围区域更强。在过渡区和色球层中，我们发现了一些标准差较高的位置，它们与日冕中强度标准差较高的位置相对应。蓝色等值线在过渡区图（图 6c）中标出了日冕（AIA193；图 6d）强度标准差较高的区域。我们认为，位于蓝色等值线之外、但仍处于与日冕上流区（白色等值线）空间对应区域内的过渡区强度标准差较高的位置，其上流机制可能不同于蓝色等值线以内区域。这是因为蓝色等值线所标示区域中的强度演化过程发生在太阳日冕中；例如，热日冕环与开放磁场结构发生磁重联。仅在过渡区图中出现的高标准差表明，导致强度变化的过程发生在太阳大气的这一层中。例如，这可能是小尺度色球层/过渡区环与开放磁力线之间发生磁重联。要更好地理解上流机制，还需要进一步分析类似的观测。

5. 讨论

我们分析了一个活动区，这个活动区首次在正交位置通过高空间和时间分辨率数据进行了观测。为此，我们使用了太阳动力学观测台搭载的 AIA 171埃成像数据，以及太阳轨道飞行器搭载的 HRI_{EUV} 成像数据。此外，我们还使用了 IRIS 和 Hinode/EIS 获得的同步光谱观测。Hinode/EIS 观测了日冕温度下的等离子体，使我们能够研究等离子体流。我们将上流区定义为 Hinode/EIS 观测到的铁 XII谱线中多普勒速度$v < -5\,\mathrm{kms}^{-1}$ 对应的紧凑区域。在 HRI_{EUV} 强度的日冕图中，我们发现有延伸环根植于 Hinode/EIS 图中与上流区相对应的区域。沿延伸环测得的等离子体流速（使用 HRI_{EUV} 测量）与 Hinode/EIS 多普勒速度图中所示这些环脚点处的多普勒速度相似。随后，我们研究了日冕上流区的动力学，以及太阳大气中空间位置相对应的下层区域。通过 IRIS 和 AIA 获得的高分辨率观测显示，在与 Hinode/EIS 观测到的日冕上流区相对应的位置，色球层和过渡区中存在大量小尺度结构。标准差图使我们能够区分机制 I（高温日冕环与开放磁场之间的磁重联）和机制 II（色球层小环与开放磁场之间的磁重联）占主导作用的区域。

本文在此总结研究结果。从太阳边缘视角看，活动区的高分辨率正交位置观测显示，延伸环根植于日冕多普勒速度图中对应上流区的区域（第 5.1 节）。延伸环的日冕足点呈现上流多普勒速度（Fe XII 谱线，Hinode/EIS），与从侧视图沿膨胀的日冕环测得的等离子体速度（太阳轨道飞行器，HRI_{EUV}）相似（第 5.2 节）。空间上对应日冕上流区的区域，其强度图显示色球层、过渡区和日冕中的小尺度结构具有显著的动力学特征（第 5.2 节）。太阳轨道飞行器上的两台仪器在相对于太阳的正交位置进行观测（HRI_{EUV} 与 AIA 171），结果显示出不同的变化。这可能是由日冕中视线不同所致（第 5.3 节）。

5.1. 太阳圆面四分观测中的上流区拓扑

我们在正交位置对一个活动区进行的观测显示，日冕中有延伸环，其根部位于与 Hinode/EIS 多普勒速度图中日冕上流区相对应的位置（第 3 节）。成像观测表明，延伸环与上流区有关，但投影效应会显著影响对日冕环等细长且延展结构位置的准确判定。因此，要确认这些延伸环确实扎根于太阳日冕中与 Hinode/EIS 观测到的上流区空间对应的区域，对该活动区进行高分辨率同步成像观测至关重要。此外，负磁场极性总是与正磁场极性相连，因为磁单极子并不存在。所谓的开放磁力线在太阳表面仍连接着两个相反的磁场极性，并向日球层延伸。因此，这些磁力线被称为开放磁力线。延伸环与所谓的开放磁通管相似。延伸环可以延伸至太阳日冕之外很远的地方，因此也可能对慢太阳风有所贡献。这意味着等离子体可以从上流区沿着延伸环传播。这一结果与先前关于上流区磁场拓扑结构的研究一致（例如 Baker等，2017年）。

5.2. 正交观测中的等离子体上流测量

上流区的多普勒速度图显示，速度范围为 $-20\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ 至 $-5\,\mathrm{km\,s^{-1}}$。我们选取了五个足点，这些足点位于 HRI_{EUI} 观测到的膨胀日冕环上，且扎根于与 Hinode/EIS 观测到的上流区相对应的区域。我们测量了这些足点处的等离子体多普勒速度，以及从这些足点延伸出去的延伸环上的速度；这些足点处的多普勒速度也在此测量。对于足点处的等离子体上涌以及沿延伸环传播的等离子体，我们测得的速度均约为 $10\,\mathrm{km\,s^{-1}}$。采用两种不同方法测得的上流等离子体速度相近，这表明我们从盘面视角和近临边视角观测到的是同一等离子体流。

我们的结果首次通过四分观测测量了活动区上流区中的等离子体速度。要全面了解通过正交观测测得的上流区等离子体流，还需要对更多上流区进行分析。应将这一方法应用于太阳轨道飞行器搭载的日冕环境光谱成像仪（SPICE；SPICE联盟等人，2020年）的数据，以首次获得上流区的四分光谱观测（Podladchikova 等人，2021年）。SPICE 于2022年3月30日世界时 00:00 对该上流区进行了观测。对这些 SPICE 数据的分析，很大程度上取决于能否充分校正 SPICE 光谱中的点扩散函数，从而获得可靠的多普勒频移（Plowman 等人，2022年）。

5.3. 与日冕上流区对应区域内小尺度特征的动力学

色球层、过渡区和太阳日冕图显示，在空间上与日冕上流区对应的区域内存在许多小尺度特征。标准差图使我们能够识别出该区域内的一个子区域，其强度波动比周围区域更强。

Barczynski 等人（2021）讨论了三种能够产生等离子体上流的机制。我们认为，机制 I——低日冕或上部过渡区中的开放磁力线与闭合热环发生磁重联——可能会使强度显著增加，并增强日冕结构的动力学活动，从而在太阳日冕中产生强等离子体流。因此，我们预计，在太阳日冕中，靠近磁重联位置处的强度标准差会高于远离该位置处的标准差。机制 II 是色球层和低过渡区中的开放磁力线与小尺度环之间发生磁重联（Barczynski 等人，2021）。

在过渡区中识别出的强度标准差较大的区域，在太阳日冕中的强度标准差却较低，这表明等离子体上涌由机制 II 驱动。IRIS 通过两种模式提供色球层和过渡区的多普勒速度图：定点观测模式和光栅扫描。为了比较上流区的 Hinode/EIS 和 IRIS 多普勒速度图，我们需要使用同步的光栅扫描模式观测。然而，在正交位置观测期间，IRIS 采用的是定点观测模式，因此无法比较 IRIS 和 Hinode/EIS 的速度图。

6. 结论

我们首次展示了太阳日冕的高分辨率正交观测，观测区域对应于活动区边缘在 Fe XII 195Å 多普勒速度图中测得的等离子体上涌区。观测结果显示，延伸环的根部位于日冕上流区。这些环此前曾在日冕边缘观测中被观测到，但未曾在盘面观测中出现。我们的观测显示，等离子体团沿着延伸结构从上流区流出。

临近日面边缘的太阳圆面日冕图像显示，等离子体沿这些延伸环流动的速度，与从盘面视角通过多普勒法测得的这些环足点处等离子体上涌速度相似。这表明，在上流区边界产生等离子体上涌的机制，可能也会导致等离子体沿延伸环传播。此外，延伸环可延伸至太阳日冕之外很远，因此也可能对慢太阳风有所贡献。要更好地了解导致活动区边界处等离子体上涌的机制，还需要基于对活动区进行的同步高分辨率正交观测开展进一步分析。

上流区小尺度结构的动力学可用于识别驱动等离子体上涌的机制。根据太阳大气不同层中强度随时间变化的标准差图，可以区分太阳日冕中高温日冕环与开放磁力线之间的磁重联（机制 I），以及色球层/过渡区中小型色球环与开放磁力线之间的磁重联（机制 II）。要更好地了解导致活动区边界处等离子体上涌的机制，还需要基于对活动区进行的同步高分辨率正交观测开展进一步分析。

致谢。太阳轨道飞行器是欧洲空间局与美国国家航空航天局开展国际合作的空间任务，由欧洲空间局运行。EUI仪器由CSL、IAS、MPS、MSSL/UCL、PMOD/WRC、ROB和LCF/IO研制，资金来自比利时联邦科学政策办公室（BELSPO/PRODEX PEA 4000134088、4000112292、4000136424和4000134474）、法国国家空间研究中心（CNES）、英国航天局（UKSA）、德国联邦经济与能源部（BMWi）通过德国航空航天中心（DLR），以及瑞士航天局（SSO）。太阳动力学天文台（SDO）的数据由美国国家航空航天局/SDO及AIA、EVE和HMI科学团队提供。IRIS是由LMSAL研制并运行的美国国家航空航天局小型探索者任务，任务运行由NASA艾姆斯研究中心负责，下行通信方面的主要贡献经费由欧洲空间局和挪威空间中心提供。日出号是由ISAS/JAXA研制并发射的日本任务，NAOJ为国内合作伙伴，美国国家航空航天局和STFC（英国）为国际合作伙伴。该任务由这些机构与欧洲空间局和NSC（挪威）合作运行。经费由法国国家空间研究中心通过MEDOC数据与运行中心提供。D.M.L.感谢科学技术与设施理事会授予其欧内斯特·卢瑟福研究员计划资助（ST/R003246/1）。ROB团队感谢比利时联邦科学政策办公室（BELSPO）在欧洲空间局（ESA）PRODEX计划框架下提供资金支持，合同编号为4000134474、4000134088和4000136424。

参考文献

Abbo, L., Ofman, L., Antiochos, S. K., 等. 2016, 《空间科学评论》, 201, 55;
Aschwanden, M. J. & Wülser, J.-P. 2011, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 73, 1082;
Baker, D., Janvier, M., Démoulin, P., & Mandrini, C. H. 2017, 《太阳物理学》, 292, 46;
Barczynski, K., Harra, L., Kleint, L., Panos, B., & Brooks, D. H. 2021, 《天文学与天体物理学》, 651, A112;
Boutry, C., Buchlin, E., Vial, J. C., &Régnier, S. 2012, 《天体物理学杂志》, 752, 13;
Brooks, D. H., Harra, L., Bale, S. D., 等. 2021, 《天体物理学杂志》, 917, 25;
Chen, F., Ding, M. D., Chen, P. F., & Harra, L. K. 2011, 《天体物理学杂志》, 740, 116

Culhane, J. L., Harra, L. K., James, A. M., 等. 2007, 《太阳物理学》, 243, 19；De Pontieu, B., Title, A. M., Lemen, J. R., 等. 2014, 《太阳物理学》, 289, 2733；Del Zanna, G. 2008, 《天文学与天体物理学》, 481, L49；Démoulin, P., Baker, D., Mandrini, C. H., & van Driel-Gesztelyi, L. 2013, 《太阳物理学》, 283, 341；Doschek, G. A., Mariska, J. T., Warren, H. P., 等. 2007, 《天体物理学杂志》, 667, L109；Doschek, G. A., Warren, H. P., Mariska, J. T., 等. 2008, 《天体物理学杂志》, 686, 1362；Greisen, E. W. & Calabretta, M. R. 2002, 《天文学与天体物理学》, 395, 1061；Hara, H., Watanabe, T., Harra, L. K., 等. 2008, 《天体物理学杂志》, 678, L67；Harra, L. K., Sakao, T., Mandrini, C. H., 等. 2008, 《天体物理学杂志》, 676, L147；Kojima, M., Fujiki, K., Ohmi, T., 等. 1999, 《地球物理研究杂志》, 104, 16993；Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., 等. 2012, 《太阳物理学》, 275, 17；Mampaey, B., Verbeeck, F., Stegen, K., 等. 2022, 0 2022 5 04 SolO/EUI 数据发布 . - McComas, D. J., Elliott, H. A., Schwadron, N. A., 等. 2003, Geo- phys. Res. Lett., 30, 1517；Müller, D., St. Cyr, O. C., Zouganelis, I., 等. 2020, 《天文学与天体物理学》, 642, A1； Parker, E. N. 1958, 《天体物理学杂志》 , 128, 664； Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. 2012, 《太阳物理学》, 275, 3；Plowman, J. E., Auchère, F., Aznar Cuadrado, R., 等. 2022, arXiv 电子预印本, arXiv:2211.16635；Podladchikova, O., Harra, L., Barczynski, K., 等. 2021, 《天文学与天体物理学》, 655, A57；Rochus, P., Auchère, F., Berghmans, D., 等. 2020, 《天文学与天体物理学》, 642, A8；Sakao, T., Kano, R., Narukage, N., 等. 2007, 《科学》, 318, 1585；SPICE联盟, Anderson, M., Appourchaux,T.,等.2020,《天文学与天体物理学》,642,A14；Temmer, M. 2021, 《太阳物理学评论》, 18, 4；Tian, H., McIntosh, S. W., & De Pontieu, B. 2011, 《天体物理学杂志》, 727, L37；Warren, H. P., Ugarte-Urra, I., & Landi, E. 2014, 《天体物理学杂志增刊》, 213, 11