Draft version March 13, 2023 年使用
AASTeX631 的 LaTeX 默认样式排版

arXiv:2303.06105v1 [astro-ph.SR] 10 Mar 2023

DKIST/ViSP 首次观测到太阳黑子中的色球波：本影闪光的结构

Ryan J. French,[1,2] Thomas J. Bogdan,[1] Roberto Casini,[3] Alfred G. de Wijn,[3] and Philip G. Judge[3]

[1] *National Solar Observatory, 3665 Innovation Drive, Boulder CO 80303*
[2] *Mullard Space Science Laboratory, University College London, Dorking, RH5 6NT, UK*[3] *HAO, National Center for Atmospheric Research, P.O. Box 3000, Boulder CO 80307-3000, USA*

（已被《天体物理学杂志快报》接收，2023年2月3日）

摘要

美国国家科学基金会丹尼尔·K·井上太阳望远镜（DKIST）的可见光谱偏振仪（ViSP）于2021年5月7日至8日采集了科学验证数据。该仪器同时观测太阳黑子大气的多个层次，使用Ca II 397 nm（H线）、Fe I 630 nm和Ca II854 nm通带，以0.041″ 的空间采样对该区域进行扫描，平均时间采样间隔为7.76秒，持续38.8分钟。狭缝以3.83千米/秒的速度在天球平面上向南移动。光谱偏振扫描呈现出明显的振荡“脊”结构，其方向几乎与狭缝移动方向（由北向南）垂直。这些脊在谱线强度、中心波长、线宽以及线偏振和圆偏振图中均清晰可见。同期的大气成像组件观测表明，这些脊纯粹具有时间特征，可能归因于人们熟知的色球3分钟本影振荡。

我们详细观测了太阳黑子本影中心附近一次稳定的本影闪光。尽管恶劣的视宁度限制了空间分辨率，但独特的高信噪比数据使我们能够估算激波马赫数（≈ 2）、传播速度（≈ 9 千米/秒），以及这些激波在 30 秒内对次级激波的纵向磁场（$\Delta B \approx 50$ G）、气体压力和温度（$\Delta T/T \approx 0.1$）的影响。我们还发现了稀疏波存在的证据，它们位于相邻的波列激波之间。除激波前沿通过前瞬间出现一次幅度为 1.5 千米/秒的急剧下降，以及通过后紧接着出现幅度相当的尖峰外，Ca II 854 nm 线宽在整个本影闪光过程中相当稳定。线宽的这种锯齿状变化以次级激波为中心，延伸范围为 0.4″。

关键词：活动色球；波传播

1. 引言

自 Beckers & Tallant（1969）和 Schultz & White（1974）发现本影闪光以来，已过去半个多世纪，我们对本影闪光的兴趣依然不减。它们仍是最引人注目的色球动力学现象之一，其根源深植于本影光球，甚至可能一直延伸至地下的磁对流层。它们跨越多个密度标高，并耦合不同的大气层。它们为向光学薄的色球、过渡区和低层日冕输送机械能提供了一种途径。Thomas & Weiss（2012）、Weiss & Proctor（2014）以及 Khomenko & Collados（2015）撰写的详尽专著和综述，全面总结并分析了21世纪第一个十年间有关本影闪光的研究。若要了解近年来从观测和理论角度开展的研究，可参阅例如 Madsen 等（2015）、L¨ohner-B¨ottcher（2016）、Song 等（2017）、Ku´zma 等（2017a）、Ku´zma 等（2017b）、Felipe 等（2018）、Houston 等（2018）、Stangalini 等（2018）、Joshi & de la Cruz Rodr´ıguez（2018）、Anan 等（2019a）、Bose 等（2019）、Henriques 等（2020）、Houston 等（2020）、Yurchyshyn 等（2020）、Stangalini 等（2021a）、Stangalini 等（2021b）、Felipe 等（2021）、Sadykov 等（2021）、Snow & Hillier（2021）以及 Molnar 等（2021）。以下较早发表的论文对后文尤其重要，值得一读：Lites（1992）、Centeno 等（2006）、Pietarila 等（2006）、Pietarila 等（2007）、Centeno 等（2009）、Bard & Carlsson（2010）以及 Felipe 等（2014）。

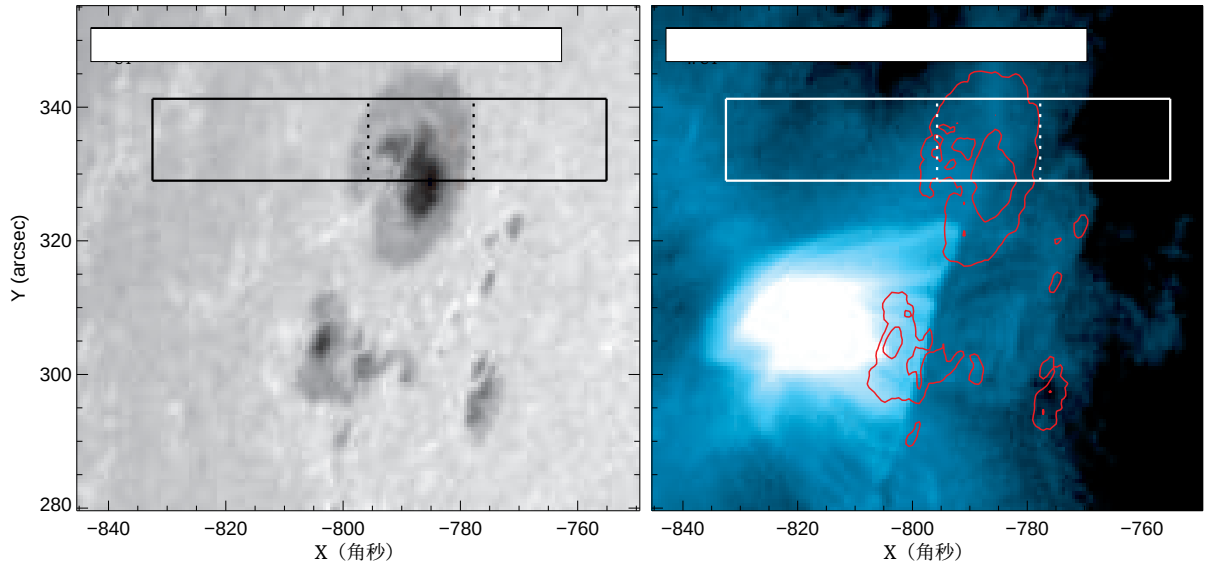


图 1。 左：HMI连续谱显示了活动区12822。实心黑色矩形标示 ViSP视场。插图中的虚线框显示了图 3 中使用的裁剪视场。右：AIA 131 ˚A 观测显示正在进行的太阳耀斑。与左图一样，白色/虚线矩形分别显示完整/裁剪后的 ViSP视场。红色轮廓标示了HMI连续谱（左图）中所见的太阳黑子位置。右图中的亮特征显示了一次 C级耀斑的耀斑环，其峰值出现在 ViSP 观测开始之前。

本文通过呈现对一个成熟的本影闪光在其一至两小时生命周期中十分钟时段的独特观测，为这一领域的知识积累添砖加瓦；观测兼具高空间、高光谱和高时间分辨率。我们采用了可见光谱偏振仪（ViSP，De Wijn 等，2022）搭载于美国国家科学基金会丹尼尔·K·井上太阳望远镜（DKIST，Rimmele 等，2020）所获取的首批科学验证（SV）数据。

ViSP 是 DKIST 的首批观测仪器之一。本文分析了 ViSP 在 2021年5月8日 的 SV 观测活动期间获取的光谱偏振数据。ViSP 使用三个光谱臂和相机，在三个不同的光谱窗口中同时测量完整的偏振态（斯托克斯 I, Q, U, V）。在 SV 观测活动期间，该仪器配置为同时观测 Fe I 约 630 nm 处的光球谱线通带，以及 Ca II 在 397 nm 处的两条色球共振线之一（H线）和 854 nm 处的谱线（红外三重线的第二条）。望远镜指向活动区12822中最北端的太阳黑子（当时太阳圆面上唯一的活动区），该黑子位于太阳东北边缘附近。视线方向（LOS）相对于太阳黑子天顶方向倾斜 $63°$ ($\mu \approx 0.45$)，并偏离东西方向 $23°$ 。

2. 观测

ViSP偏振扫描于2021年5月8日18:52:39至19:31:19 UT进行。扫描由300个连续的狭缝位置组成，相邻位置间距为狭缝宽度0.041″。扫描覆盖南北方向12.3″ 的角范围。ViSP最低放大倍率光谱臂（vcc1）覆盖的视场（FOV）如图1所示。三个光谱臂沿狭缝方向的视场范围及探测器对应的空间采样各不相同：相机 vcc1（Fe I）为75.9″ ，采样间隔为0.030″/px；相机 vcc2（Ca II H线）为62.3″ ，采样间隔为0.024″/px；相机 vcc3（Ca II 854nm）为49.4″ ，采样间隔为0.019″/px。

每个狭缝位置的停留时间为 7.58 秒，由 25 个调制周期组成，每个周期包含 10 个状态，相机帧率为 33 Hz。由于三个光谱通道的强度水平和仪器通光效率值不同，三台相机的占空比差异显著，其中 Fe I 光谱窗口仅在 20% 的时间内进行积分，曝光时间为 6 毫秒。为在色球层 Stokes Q、 U 和 V 信号中获得足够的信噪比，两条 Ca II 谱线以 66% 的占空比进行观测（曝光时间为 20 毫秒）。积分完成后，狭缝沿一个完整的狭缝宽度（0.041″）前进，以进行新一轮积分。300 个步进中的每一步耗时 0.18 秒，因此狭缝位置之间的时间间隔为 7.76 秒，总光栅扫描时长为 38.8 分钟。对于本文分析的观测，ViSP视场经过 300 个步进的光栅扫描，总扫描时间为 38.8 分钟。这对应于投影到天球平面（POS）上的平均狭缝速度 $v_s = 3.83$ 千米/秒。

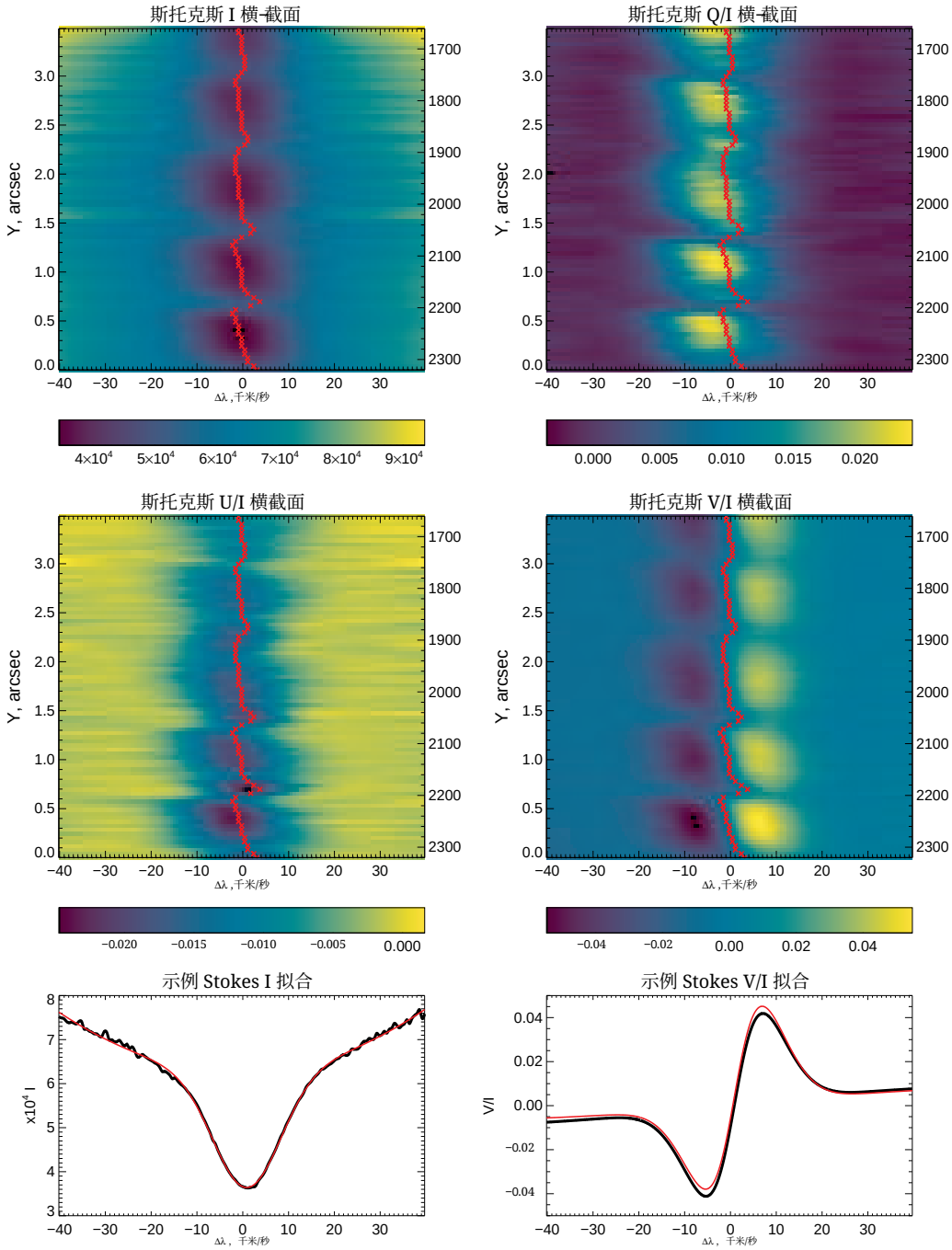


图 2。 在 X 位置观测到的完整电离钙 854.2 纳米光谱数据，以及沿 Y 范围的 Stokes 分数参数，对应图 3 中的洋红色虚线。红线追踪斯托克斯 I 的重心。底部面板展示了一个拟合示例：对于顶部面板中 Y=2150 秒处的光谱，红线为对斯托克斯 I 和 V/I 数据（黑色）的拟合。

ViSP 扫描覆盖的视场在图 1 中标出，并参照日震与磁成像仪（HMI，Schou 等，2012）的白光连续谱和大气成像组件（AIA，Lemen 等，2012）极紫外 131 ˚A 图像。就在 ViSP 数据采集开始前不久，活动区东南侧发生了一次 C8.6 级太阳耀斑。耀斑环的位置在世界时 18:45 达到辐射峰值，在图 1 的右侧面板中表现为亮特征。耀斑环最北端的足点与 ViSP 观测到的较大太阳黑子的半影相交。遗憾的是，扫描的时间持续期和空间覆盖范围都很短，因此无法区分耀斑诱发的日震与活动区中普遍存在的光球下本影波源

12822—例如，Kosovichev 与 Sekii (2007), Besliu-Ionescu 等 (2017), Millar 等 (2021）。粗略检查同期的 HMI 和 AIA 数据，也未能发现任何明显且可明确归因于该耀斑的振荡变化。

在接下来的分析中，我们将注意力限定在视场的裁剪部分，该区域位于太阳黑子上方，预期存在强磁场和明显的偏振信号。附近的两条垂直虚线$X = -795$ 和 $X = -775$ 标示了该感兴趣区域（ROI）的东西边界。

2.1. 数据处理

图2 展示了使用 vcc3 相机获得的典型光谱偏振数据横截面。四个斯托克斯参数中均存在明显的振荡信号。强度轮廓由一个狭窄的高斯核心（$\Delta\lambda \approx 20$ 千米/秒）和宽阔的洛伦兹翼组成。

在2021年5月8日的 SV 观测期间，ViSP 准直器轻微失焦，导致远离利特罗配置的光谱配置出现明显像散。由于 vcc1 接近利特罗配置（3.31°），实际上几乎没有受到光谱失焦的影响；而 vcc2 和 vcc3 相机的光谱分辨率（分别位于利特罗位置的 $7.52°$ 和 $20.07°$ 处）则受到显著影响。因此，我们没有尝试对 Ca II 854 nm 的 Stokes 光谱进行完整反演，而是仅对强度和 $I \pm V$光谱的谱线核心及近翼部分进行单高斯拟合，以估算谱线核心强度、中心波长、线宽和塞曼分裂。图 2展示了一个具有代表性的高斯拟合。假设 Stokes I、Q 和 U 的谱线中心位于相近的波长位置，则高斯拟合还可给出 Stokes Q 和U 发射峰的位置和强度。该假设对视场中的大部分区域成立，但也存在局限性，详见第 2.2节。根据这些线偏振测量结果，我们计算线偏振度和方位角，

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}\,, \tag{1}$$

$$\Phi = \frac{1}{2}\arctan\frac{U}{Q}\,. \tag{2}$$

当线偏振由塞曼效应主导时，方位角 Φ 也给出磁场在 POS 上的投影方向（但存在 $180°$ 模糊性）。圆偏振的斯托克斯 V 信号给出纵向磁场强度 $B_{\rm LOS} \equiv B\cos\Theta$，其中 Θ 为磁场矢量与视线方向之间的夹角。简单应用弱场近似（例如，Landi Degl'Innocenti & Landolfi 2004；Centeno 2018）似乎足以使轮廓拟合达到偏振信号的噪声水平（在这些观测中，约为斯托克斯 I的 0.2%），因此我们用它来估算 $B_{\rm LOS}$。

要恰当地描述 ViSP 观测时的大气动力学，必须对光谱数据进行适当的波长校准。由于 Fe I 630 nm 光谱范围内可见许多陆地（即地球大气中的）分子谱线，因此 vcc1 数据的波长校准相对容易实现。相比之下，Ca II 854nm 光谱中缺少强烈的陆地谱线，使得 vcc3 数据难以进行精确的波长校准。这些数据因 ViSP 像散而产生的显著光谱模糊进一步增加了处理难度。为了对 ViSP 数据中的色球层动力学进行有意义的估算，我们采用了以下步骤：

1. 我们在太阳黑子东侧识别出一处较小的（$\sim 3'' \times 4''$）静日面区域，其中光球层动力学由米粒组织主导，因此对于 629.8 纳米和 630.1 纳米处的 Fe I 谱线，正、负多普勒位移幅度的分布高度对称，该区域的平均视线速度实际上为零。以 629.8 纳米处的 O_2 地球大气谱线为参考对这两条谱线进行校准后，我们估算出光球蓝移为 1.65 千米/秒，这与观测日心坐标处预期的太阳自转速度一致；

2. 我们确定了 vcc3 数据中 Fe I 853.8 纳米谱线的重心，并假定其相对于 vcc1 中 FeI 谱线所探测的光球处于静止状态；

3. 最后，我们以 Fe I 853.8 纳米谱线的光球参考为基准，对色球层 Ca II 854.2 纳米谱线的重心进行了校准。

这一波长校准的结果是，与静日面光球层相比，图 3 中 Ca II 854.2 纳米多普勒图的零速度参考值（对整幅图取平均）红移约 1.53 千米/秒。

Felipe 等人最近的研究 (2021)指出，利用 Ca II 854 纳米谱线不易检测到磁场振荡。然而，由于该太阳黑子的位置靠近太阳边缘，由 Stokes V 得出的 $B_{\rm LOS}$ 测量结果未必与 $|\boldsymbol{B}|$的变化相关，也可能包含磁场方向的波动。

图 3 展示了 ViSP 对图 1所示太阳黑子感兴趣区域进行偏振扫描所得的数据。顶排显示光球 Fe I 630 nm 谱线线芯处的强度及其视线方向多普勒速度。第二排展示色球 Ca II 854 nm 谱线的相同数据；推导出的磁场参数呈现在第二至第四排。最后，底部面板展示 Ca II H 397nm 的强度。

细黑/白轮廓线表示根据 Fe I 630nm 谱线强度确定的本影-半影边界的大致位置。这是光球层本影与半影之间的边界。预计 Ca II 共振线形成于该谱线上方 700 - 1400 千米处。由于视线方向倾斜角很大，投影到 POS 后，Ca II 信号的位置相对于正上方的 Fe I 信号会向东偏北（ENE）偏移约半至一角秒。随波长变化的大气折射也会使色球和光球信号在 POS 上发生偏移。一条光桥将东侧的卫星本影与较大的中央本影分隔开。东侧（左侧）本影中有一条竖直的 ViSP 刻线，用于仪器相机之间的校准。

在图3中，绘出了每个 X 值所对应的 ViSP 栅格扫描数据，采用 Y 表示，并分别以狭缝位置（左轴）和数据采集时间（右轴）为坐标。为便于分析和展示，我们选取了合适的时间原点和南北向狭缝位置原点。下文中我们交替使用这两种坐标，以强调 ViSP 通过步进狭缝进行扫描，必然会混合南北向空间变化与时间变化。

2.2. 扫描摘要

光球 Fe I 630 nm 强度图清晰呈现了太阳黑子的结构：中央较大的本影和东侧较小的卫星本影（左侧）（HMI 图中也可见，图1），两者由一条狭窄的光桥隔开。这些区域的北侧和西侧（右侧）可见周围的半影。我们的感兴趣区域中没有宁静太阳。多普勒速度扫描显示了光球中预期的艾弗谢德流，以及上方反向的色球流入（例如，Teriaca 等，2008）。

在 CaII 扫描图中，显著可见一系列嵌套脊状结构，它们几乎平行于图像中的水平东西方向延伸。这些脊在多普勒速度和 P 扫描图中尤为醒目。在谱线宽度、方位角、 $B_{\rm LOS}$和强度图中也能看到它们。在 H 线强度图中，我们也看到了这些相同的脊。在 Y 中，这些脊的平均南北间距约为 $0.5''$。在 Fe I 扫描图中，还能辨认出第二组间隔更大的水平脊。它们的南北间距略大于 $1''$。两组脊都并非严格水平，但在南北方向上跨越 300 像素的范围内清晰可辨，且结构丰富——从东到西呈现出弯曲形态，以及亮度和厚度的变化。

对类似振荡脊状结构的观测（有时称为“鱼骨”图案），最早见于光球层，包括 Thomas 等人 (1984) 和 Lites 等人 (1998) 等人的研究；随后，Balasubramaniam 等人（2008）利用 Dunn 太阳望远镜/水平光栅光谱仪在色球层中也观测到了这类结构。

移动狭缝产生的图像扫描可能既非纯时间变化，也非纯空间变化，而是两者的混合。仅凭这些观测，无法判断这些脊究竟源于整个本影的大尺度相干时间脉动，还是源于移动狭缝扫过静态的空间起伏，抑或源于沿太阳黑子向北或向南传播的正弦扰动。以往对“鱼骨状”脊的观测采用定点观测，生成以 x 对 t 的图像。由于 ViSP 的移动狭缝生成的图像在垂直轴上卷积了空间和时间信息（形成以 x 对 y 和 t 的图像），我们在本节提出论证，说明 ViSP 观测到的脊并非空间分辨结构，而是时间分辨结构，与以往定点观测的结果类似。

考虑一个以速度 c 向北横穿 POS 传播的振荡扰动，其空间波长为 λ_c，时间周期为 T_c。步进式移动狭缝的平均向南速度与传播扰动之间的相对速度，决定了 Y中脊的间距。真实波长和周期（下标为“c”）与观测波长和周期（无下标）之间的关系（分别为 λ_c、 λ 和 T_c、 T）如下：

$$\frac{v_s + c}{c} = \frac{T_c}{T} = \frac{\lambda_c}{\lambda}\frac{v_s}{c}, \tag{3}$$

$$c = \frac{v_s}{T_c/T - 1} = v_s\left(\frac{\lambda_c}{\lambda} - 1\right). \tag{4}$$

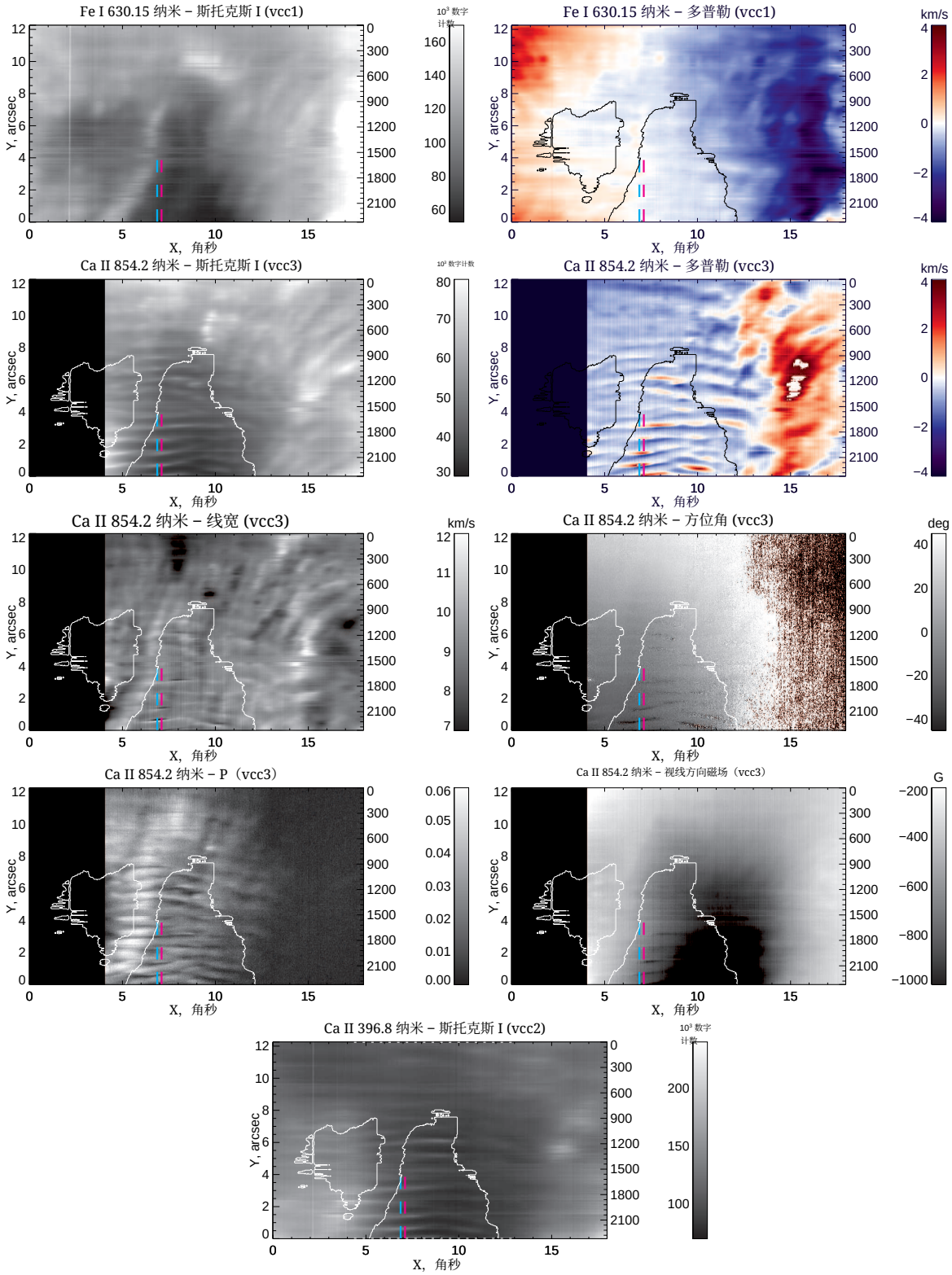


图 3. ViSP SV 观测活动期间的活动区扫描图。图中显示的是完整视场的裁剪子集，如图 1 所示。每幅图均标注了谱线和观测参数。青色和品红色虚线标出了图 4 中所分析的本影闪光横截面位置。实心白色/黑色轮廓表示根据 Fe I 630 nm 强度（左上图）确定的太阳黑子本影位置。由于该区域拟合效果不佳产生伪影，我们省略了 4″ 以下的电离钙 854.2 数据。

观测到的周期 T 和波长 λ 之间的关系为 $\lambda = Tv_s$，其中 λ 是 ViSP 扫描中脊之间的实际距离，而 T 是两次观测到这些脊之间的时间间隔。对于向南传播的振荡扰动，只需在这些表达式中用 $-c$ 替换 c。

请注意，在整个太阳黑子发生相干空间脉动这一极端情况下（λ_c、$c \to \infty$），移动狭缝记录到的就是实际周期 $T = T_c$。同样，对于静态空间起伏（$T_c = \infty$），移动狭缝测得的就是实际波长 $\lambda = \lambda_c$。在这两个极端情况之间，记录到的波长和周期都不会与其实际 POS 值相符。

为区分空间行为和时间行为，我们将 ViSP 观测与 HMI（强度和多普勒测量）和 AIA（304 Å、1600 Å 和 1700 Å）获得的光球/色球背景（同时期）观测进行比较。这些数据的空间和时间分辨率（每个狭缝位置）较低，但它们的优势在于不会混淆空间和时间信息，并且其覆盖范围（在空间和时间上）都远超 ViSP 扫描。这些数据表明，太阳黑子本影中存在位置固定、空间相干的亮度振荡斑块。这与色球3分钟本影振荡的典型行为完全一致（Khomenko & Collados 2015）。由于 AIA 亮度振荡的周期与 ViSP 观测到的振荡周期相符，因此 ViSP 脊并未因移动狭缝而发生多普勒频移。这表明这些脊并非由穿过 POS 的空间分辨波所产生，而是 ViSP 狭缝移过脉动区域时呈现出的纯时间特征。

由于 ViSP 观测到的脊在时间上具有空间相干性和周期性，因此它们不可能是本影内精细空间结构的结果，例如冷热等离子体元混杂（Socas-Navarro 等，2000、2009）、丝状结构（Socas-Navarro 等，2009）、双成分本影结构（Centeno 等，2005；de la Cruz Rodríguez 等，2013）、小尺度动态纤维（Rouppe van der Voort 与 de la Cruz Rodríguez，2013）、冷喷流状结构（Yurchyshyn 等，2014）等。

在本影西北侧的半影中，脊更宽，且相对于 X和 Y方向有明显倾斜。此处狭缝很可能采样到了传播型半影波所对应的某种时间和空间变化组合。

3. 本影闪光

图 4 展示了色球脊状结构的一部分，让我们得以近距离观察。这里我们绘制了沿图 3 中青色和品红色虚线线段的 Ca II 参数南北向横截面。品红色线段的光谱偏振横截面见图 2。图 4 的下方坐标轴采用数据采集的时间 Y 坐标，上方坐标轴则采用获取数据时狭缝的南北向空间位置。除多普勒速度外，所有参数均经过多项式拟合去趋势处理，以抑制感兴趣区域内的缓慢变化，并突出振荡信号。我们还注意到，在该区域内，Stokes Q 的谱线中心与 Stokes I 相差约 3 千米/秒，如图 2所示。Stokes U 和 V 的谱线质心仍遵循 I。

这些数据展示了一个极具说明性的色球本影闪焰实例：大多数 Ca II 参数中都出现了激波与稀疏波组成的波列。对于色球强度，延展的激波压缩区以及其间的稀疏波截面宽阔、分辨清晰，并且围绕峰值和谷值呈对称分布。图 4 中的竖直虚线标出了目视识别的激波大致位置。CaII 854 纳米多普勒速度和线宽时间序列与强度剖面显著不同。我们看到的并非对称的上升和下降轮廓，而是陡峭上升后骤然下降，这正是嵌入其中的薄亚激波的特征。事实上，$Y = 2200$ 秒附近最大的变化仅发生在 4 Y 个像素/时间步内。线宽在亚激波附近呈现出范围稍宽的锯齿状变化。

在洋红色截面中，视线方向磁场（即斯托克斯 V）与强度参数的振荡相位相差 180 度。方位角和线偏振也与亚激波有很强的相关性，但信噪比较低。有迹象表明，在多普勒宽度达到最大正向偏移（相当于多普勒速度负向偏移）时，它们会出现负尖峰。

对同期 AIA 和 HMI 数据进行仔细分析后发现，本影闪光仅局限于 Y小于 3 至 4 角秒的范围内，并且在整个 ViSP 数据采集期间，它一直在此处振荡，时间频率缓慢变化。图 4 中振荡振幅从左向右增大，这与狭缝向南移动、进入这一静止且稳定的本影闪光较强核心区域的情况相符。图 4 中出现的时间振荡频率与这一时段从 AIA 数据中获得的频率相同，这意味着它

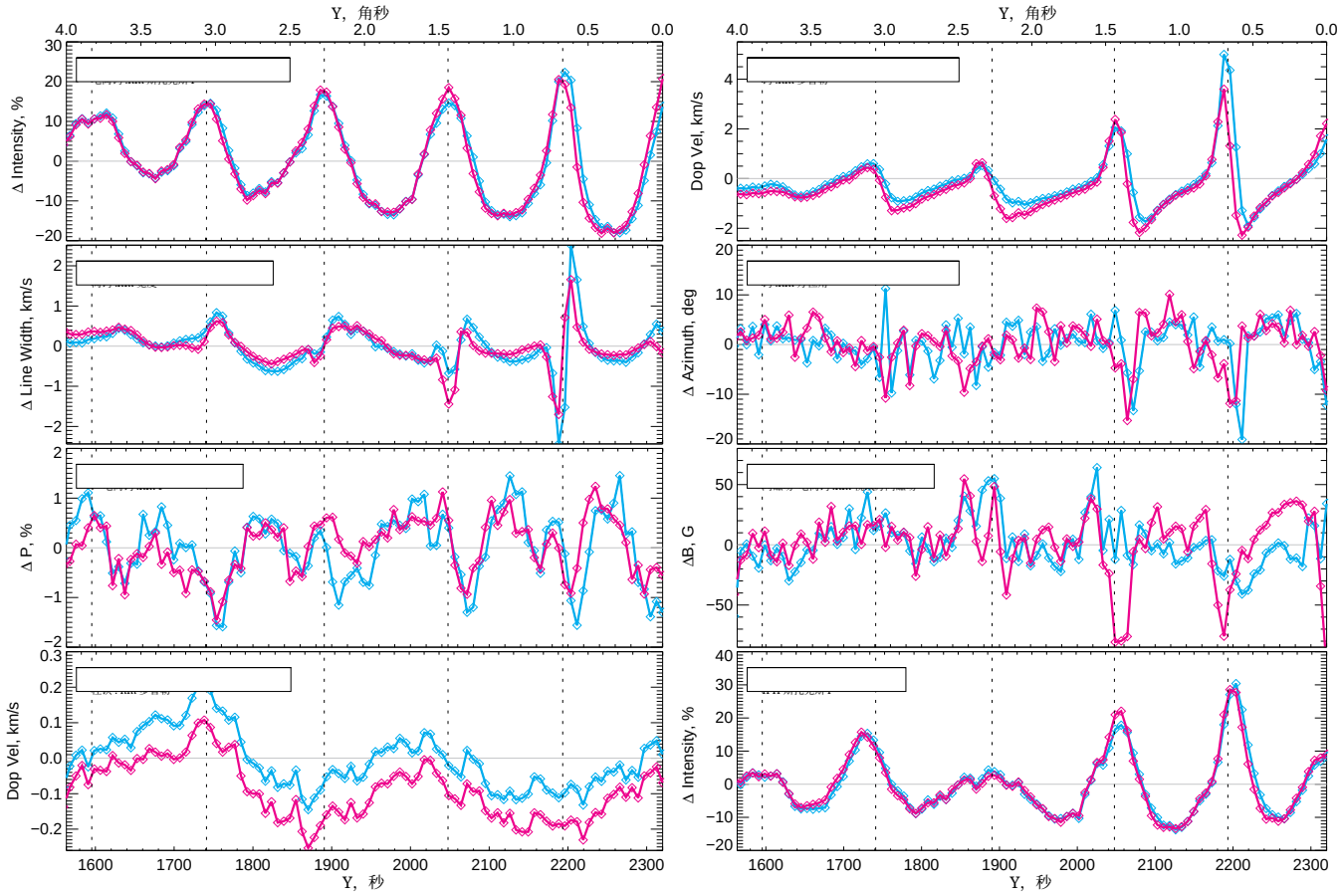


图 4。 图中青色和洋红色虚线位置处的去趋势强度、线宽、方位角、P 和视线方向磁场剖面，以及原始多普勒剖面 3。竖直虚线表示电离钙II 854 nm 强度峰的大致位置。

并未因移动的 ViSP 狭缝而发生 多普勒频移 （公式 4）。这与本影闪光在本影中心附近一个固定的空间区域内原地振荡的情况相符。换言之，狭缝的运动不会使观测频率偏离真实的振荡频率。然而，空间波长（底部横坐标刻度）完全是静止观测步进法造成的伪象，其值为 T_c/v_s。

可以估算这些激波的参数。例如，考虑 $Y = 2200$ 附近的蓝色曲线。我们发现， $Y = 2190$ 处的峰值 POS 激波前下流速度为 5.22 千米/秒。激波后的上流速度为 1.70 千米/秒。除以倾角的余弦值（0.443），并假设运动沿着本影中心附近的垂直磁通管进行，可得激波前下流速度为 $u_+ = 11.8$ 千米/秒，激波后上升流速度为 $u_- = 3.83$ 千米/秒。

假设激波以 v 千米/秒的速度沿垂直磁通管向上运动。在激波的静止参考系中，上游与下游速度之比（以及下游与上游密度之比）由通常的气体动力学兰金-雨贡纽关系给出，

$$\frac{v + u_+}{v - u_-} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{2 + (\gamma - 1)M^2} = \frac{\rho_-}{\rho_+} , \tag{5}$$

其中， $M = (v + u_+)/c_s$ 为上游马赫数， c_s 为绝热声速， γ 为比热比。令 $v + u_+ = c_s M$，并将 α 定义为 $\alpha = c_s/(u_+ + u_-)$，即可得到马赫数的表达式：

$$M = \frac{(\gamma + 1)}{4\alpha} + \sqrt{1 + \frac{(\gamma + 1)^2}{16\alpha^2}} . \tag{6}$$

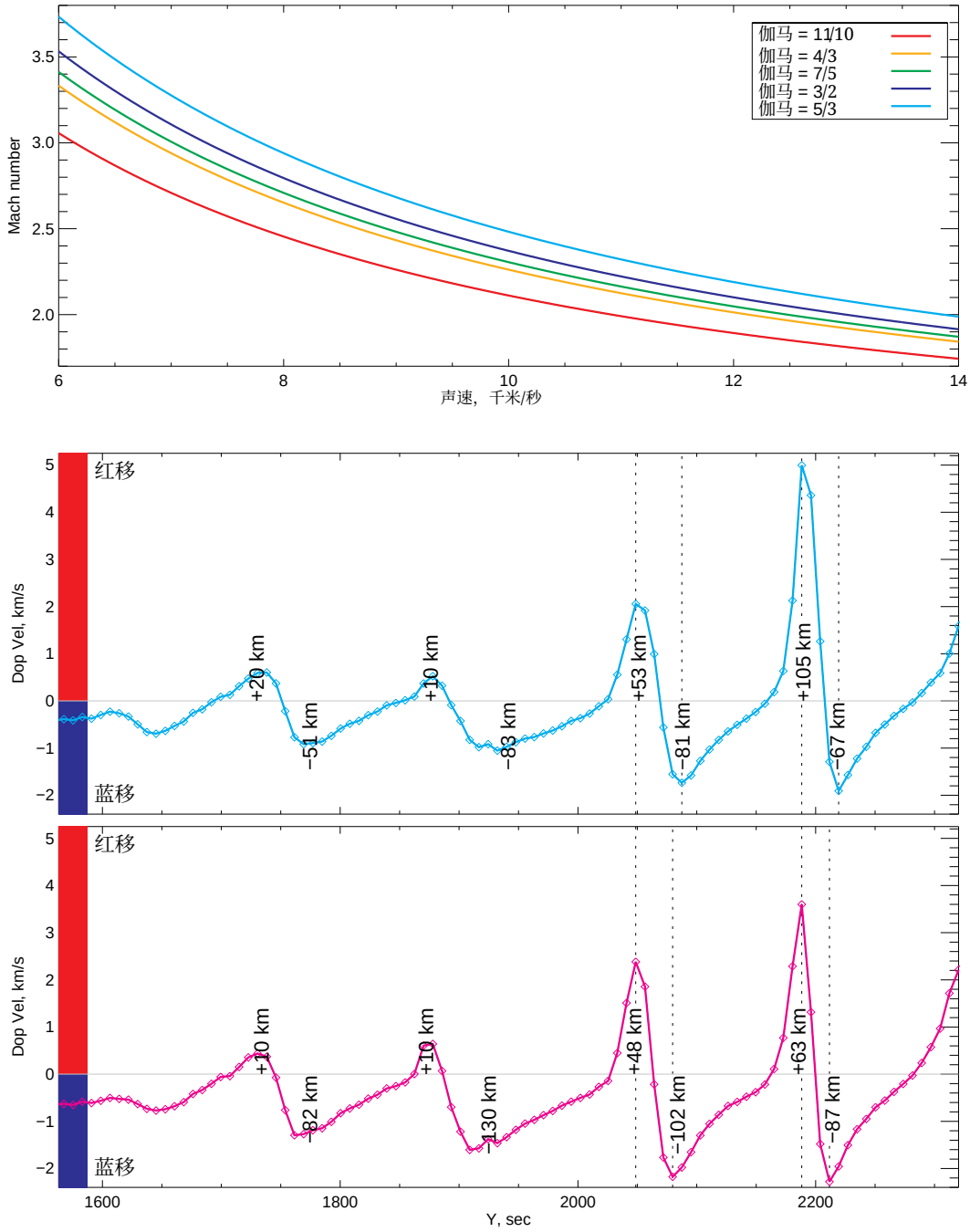


图5。 上：观测中最大激波的马赫数（在 Y≈ 2200 秒处的青色截面上），对应合理范围内的声速和 γ 值。中/下：沿图 3 中青色（中）和品红色（下）截面的电离钙 854.2 纳米多普勒速度剖面。虚线标示激波位置。沿时间观察，可以看到非线性脉冲后方从蓝移到红移的减速几乎恒定。激波形成时，向红移方向的减速加剧，随后迅速加速转为蓝移，并在下一个激波处重复这一过程。

求得 M 后，即可轻松计算激波速度 v，以及下游与上游气体压力之比

$$\frac{p_-}{p_+} = \frac{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}\,, \tag{7}$$

以及相应的温度比。

ViSP 观测给出的速度为 $u_+ + u_- = 15.6$ 千米/秒，是图 4 中所示最强的蓝移激波。以 $\gamma = 1.1$ 考虑氢电离，并取 $c = 10$ 千米 秒$^{-1}$，可得： $M = 2.11$， $v = 9.3$ 千米/秒，$\rho_-/\rho_+ = 3.82$， $p_-/p_+ = 4.62$，以及 $T_-/T_+ = 1.21$。较大的声速会产生较弱、传播速度较快的激波；较大的比热比则会产生较强、传播速度也较快的激波。图 5 上图展示了这一观测到的最强蓝移激波（$u_+ + u_- = 15.6$ 千米/秒）的马赫数（纵坐标），对应不同的上游声速（c，横坐标）和若干绝热指数（彩色曲线）。需要指出的是，这些参数只是估算值，因为兰金–雨贡纽关系假设激波是理想化的无限平面激波，并沿恒定均匀的磁场传播。我们观测到激波后方磁场强度略有下降，这一事实并不影响这些估算的有效性。

斯托克斯 V 和线偏振 P 信号总体上与磁通管横截面积适度扩张（磁场强度减弱）相符；根据激波后的气体压力升高，预计会出现这种情况。名义磁场强度约为 500–600 G，因此 $\Delta B/B \approx 0.1$。正如这种解释所预期的那样，只有在最强的激波中才能检测到磁场波动。

激波两侧线宽之字形变化的起伏颇为显著且稳定。它在强激波中也最为明显，而在非线性脉冲中则大多不存在。目前我们还无法为其找到令人信服的物理解释。多普勒速度从蓝移（负值）转为红移（正值）时斜率发生剧烈变化，这表明激波之间可能存在准自由落体稀疏波前。随之而来的物质快速膨胀会导致冷却，也可能使后激波流中形成的湍流运动受到拉伸或延展。这两种效应都可能使线宽减小。同样，激波下游线宽的增大可能是压缩加热与后激波湍流共同作用的结果。另一方面，我们必须承认，谱线源函数可能涉及非平衡和动力学方面的复杂因素，例如，在 K 线中观测到的类似 K2V和K2R发射过程。要对这种线宽之字形变化作出确切解释，还需要进行仔细的光谱合成。

Stokes I 缺乏不对称性，表明在激波压缩附近，谱线核心中的辐射转移是光学厚的。Stokes I 的最大值与最小值之比接近 3/2——该数值的四次方根为 1.10，与我们上文给出的 T_-/T_+ 估值 1.21 相当，但明显低于该估值。

可以计算未经去趋势处理的多普勒速度曲线下的积分，以确定在一个振荡周期内，是否有物质沿磁通管发生净流动。图5底部面板给出了蓝色和洋红色曲线的 POS 多普勒速度过零点之间的面积（以千米表示）。我们没有除以视线方向与视线方向之间倾角的余弦值（0.443）。考虑这一系数 2.25 后可以发现，每个振荡周期内向上和向下的位移范围均不超过一个密度标高。较弱的非线性脉冲会使物质在每个周期内产生净向上运动。这种行为与普遍观点一致：非线性波会产生向上的压力梯度，并倾向于使磁通管中的物质相对于其中性静水平衡高度上升。而在后一种情况下，存在强烈局部激波，激波前方物质骤然发生的准自由落体红移可能使物质下落得比激波后方随之而来的上升流上升得更远。的确，不禁猜想，随着时间推移，非线性脉冲最终会将过多等离子体抬升到其中性高度之上，而随后在准自由落体下降流中形成强激波，正是成熟的本影闪光应对这一难以为继局面的方式。

色球与光球振荡之间复杂的投影效应和大气折射造成的 POS 偏移，使得研究本影闪光可能的光球根源变得困难。尽管如此，Fe I多普勒速度似乎在色球激波通过的时间附近达到最大蓝移和红移。换言之，其下方的光球振荡周期接近 5 分钟，几乎是色球中激波间隔（150 秒）的两倍。这让人联想到高度非线性系统中常见的周期/频率倍增现象。

4. 结论

本文分析了 DKIST/ViSP 科学验证（SV）观测，以评估太阳黑子中色球和光球振荡的高空间分辨率、高时间分辨率光谱偏振观测。我们探测到普遍存在的传播型半影波、色球层 3分钟振荡和一次本影闪光；ViSP 移动狭缝的运动影响了探测到的周期。所有这些现象都已被观测和研究了数十年。然而，这些振荡数据还包括色球层 Ca II 854.2 nm 谱线的 Stokes {v1}和线偏振（{v2}），为本影闪光提供了丰富的光谱偏振特征。

数十年来，人们一直在观测和研究这些现象。然而，这些振荡数据中包含色球层 Ca II 854.2 nm 谱线的 Stokes V和线偏振（$P = \sqrt{U^2 + Q^2}/I$），为本影闪光提供了丰富的光谱偏振特征。

由于 SV 观测活动期间仍存在残余的光谱仪像散，数据未能达到足够的光谱分辨率，因此不足以对 Ca II 854 nm 进行详细的斯托克斯反演。尽管存在这些不足，SV 观测仍为此前未知的空间、时间和光谱行为提供了令人振奋的线索，这些行为与太阳黑子本影中的动力学过程有关。具体而言，我们发现了偏振证据，表明激波与稀疏波构成的波列以 0.16 秒的时间尺度出现；据作者所知，此类现象此前尚未被探测到。在这一激波序列中，我们发现了 $M = 1.88$、 $v = 10.6$ 千米/秒$^{-1}$、 $\rho_-/\rho_+ = 3.15$、 $p_-/p_+ = 3.66$以及 $T_-/T_+ = 1.16$等数值。这些参数与其他研究（例如Anan 等人 (2019b)）计算出的激波参数范围一致。

随着 ViSP 于 2022 年开始科学调试并投入常规运行，新的观测将进一步突破本文所报告数据在空间和光谱方面的限制，从而更清晰地揭示色球和光球中发现的动态振荡。

致谢

我们衷心感谢 C. Beck 和 A. Eigenbrot（均来自 NSO/DKIST），他们在开发、测试和改进 ViSP 数据校准流程方面发挥了关键作用，该流程生成了本研究分析的科学观测数据集。我们还感谢所有为获取这组数据集作出重要贡献的 DKIST 和 NSO 团队，包括望远镜控制、偏振分析与校准、数据中心团队，以及波前校正器仪器团队；在 ViSP 观测活动期间，正是他们负责锁定观测目标。RJF 感谢 STFC 博士生奖学金、NCAR Newkirk 研究员奖和 Brinson Prize Fellowship 的支持。TJB 衷心感谢国家太阳天文台授予其特别关注人员任命。本研究所报告的成果部分基于使用 Daniel K. Inouye 太阳望远镜（DKIST）收集的数据；该望远镜是国家太阳天文台（NSO）的一项设施。NSO 由大学天文研究协会管理，并由美国国家科学基金会资助。本出版物中表达的任何观点、研究结果、结论或建议均属于作者所有，不一定反映美国国家科学基金会或大学天文研究协会的观点。DKIST 坐落于夏威夷原住民视为具有精神和文化意义的土地上。我们怀着感恩与尊重之心，利用这一重要场所推进科学知识。本文研究使用了 NASA 天体物理数据系统。本材料所述工作得到美国国家大气研究中心的支持；该中心是一项由美国国家科学基金会根据合作协议编号 1852977 资助的主要设施。

参考文献

Anan, T., Schad, T. A., Jaeggli, S. A., & Tarr, L. A. 2019a, 《天体物理学杂志》, 882, 161, doi: 10.3847/1538-4357/ab357f—. 2019b, 《天体物理学杂志》, 882, 161, doi: 10.3847/1538-4357/ab357fBalasubramaniam, K. S., Pevtsov, A. A., & Olmschenk, S. 2008, 载于《太平洋天文学会会议系列》第383卷《太阳活动的地下与大气影响》，编者 R. Howe 、 R. W. Komm 、 K. S. Balasubramaniam 和 G. J. D. Petrie，279 Bard, S., & Carlsson, M. 2010, 《天体物理学杂志》, 722, 888, doi: 10.1088/0004-637X/722/1/888Beckers, J. M., & Tallant, P. E. 1969, 《太阳物理学》, 7, 351, doi: 10.1007/BF00146140Besliu-Ionescu, D., Donea, A., & Cally, P. 2017, 《太阳与地圈》, 12, 59

Bose, S., Henriques, V. M. J., Rouppe van der Voort, L., & Pereira, T. M. D. 2019, 《天文学与天体物理学》, 627, A46, doi: 10.1051/0004-6361/201935289Centeno, R. 2018, 《天体物理学杂志》, 866, 89, doi: 10.3847/1538-4357/aae087Centeno, R., Collados, M., & Trujillo Bueno, J. 2006, 《天体物理学杂志》, 640, 1153, doi:10.1086/500185—. 2009, 《天体物理学杂志》, 692, 1211, doi: 10.1088/0004-637X/692/2/1211Centeno, R., Socas-Navarro, H., Collados, M., & Trujillo Bueno, J. 2005, 《天体物理学杂志》, 635, 670, doi: 10.1086/497393de la Cruz Rodríguez, J., Rouppe van der Voort, L., Socas-Navarro, H., & van Noort, M. 2013, 《天文学与天体物理学》,556, A115, doi:10.1051/0004-6361/201321629

De Wijn, A. G., Casini, R., Carlile, A., & etal. 2022, 太阳物理学, 297, 22 Felipe, T., Socas-Navarro, H., & Khomenko, E. 2014, 《天体物理学杂志》, 795, 9, doi: 10.1088/0004-637X/795/1/9 Felipe, T., Socas-Navarro, H., & Przybylski, D. 2018, 《天文学与天体物理学》, 614, A73, doi: 10.1051/0004-6361/201732169 Felipe, T., Socas Navarro, H., Sangeetha, C. R., & Milic, I. 2021, 《天体物理学杂志》, 918, 47, doi: 10.3847/1538-4357/ac111c Henriques, V. M. J., Nelson, C. J., Rouppe van der Voort, L. H. M., & Mathioudakis, M. 2020, 《天文学与天体物理学》, 642, A215, doi: 10.1051/0004-6361/202038538 Houston, S. J., Jess, D. B., Asensio Ramos, A., et al. 2018, 《天体物理学杂志》, 860, 28, doi: 10.3847/1538-4357/aab366 Houston, S. J., Jess, D. B., Keppens, R., et al. 2020, 《天体物理学杂志》, 892, 49, doi: 10.3847/1538-4357/ab7a90 Joshi, J., & de la Cruz Rodr´ıguez, J. 2018, 《天文学与天体物理学》, 619, A63, doi: 10.1051/0004-6361/201832955 Khomenko, E., & Collados, M. 2015, 《太阳物理学综述》, 12, 6 Kosovichev, A. G., & Sekii, T. 2007, 《天体物理学杂志快报》, 670, L147, doi: 10.1086/524298 Ku´zma, B., Murawski, K., Kayshap, P., et al. 2017a, 《天体物理学杂志》, 849, 78, doi: 10.3847/1538-4357/aa8ea1 Ku´zma, B., Murawski, K., Zaqarashvili, T. V., Konkol, P., & Mignone, A. 2017b, 《天文学与天体物理学》,597, A133, doi: 10.1051/0004-6361/201628747 Landi Degl' Innocenti, E., & Landolfi, M. 2004, 谱线偏振, Vol. 307, doi: 10.1007/978-1-4020-2415-3 Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., et al. 2012, 《太阳物理学》, 275, 17, doi: 10.1007/s11207-011-9776-8 Lites, B. W. 1992, in 北约高级研究所 (ASI) Series C, Vol. 375, 太阳黑子. Theory and Observations, ed. J. H. Thomas & N. O. Weiss, 261 Lites, B. W., Thomas, J. H., Bogdan, T. J., & Cally, P. S. 1998, 《天体物理学杂志》, 497, 464, doi: 10.1086/305451 L¨ohner-B¨ottcher, J. 2016, 博士论文, 弗赖堡阿尔贝特-路德维希大学, Germany Madsen, C. A., Tian, H., & DeLuca, E. E. 2015, 《天体物理学杂志》, 800, 129, doi: 10.1088/0004-637X/800/2/129 Millar, D. C. L., Fletcher, L., & Milligan, R. O. 2021, 《皇家天文学会月刊》,503, 2444, doi: 10.1093/mnras/stab642 Molnar, M. E., Reardon, K. P., Cranmer, S. R., et al. 2021, 《天体物理学杂志》, 920, 125, doi: 10.3847/1538-4357/ac1515 Pietarila, A., Socas-Navarro, H., & Bogdan, T. 2007, 《天体物理学杂志》, 663, 1386, doi: 10.1086/518714 Pietarila, A., Socas-Navarro, H., Bogdan, T., Carlsson, M., & Stein, R. F. 2006, 《天体物理学杂志》, 640, 1142, doi: 10.1086/500240 Rimmele, T. R., Warner, M., Keil, S. L., et al. 2020, 《太阳物理学》, 295, 172, doi: 10.1007/s11207-020-01736-7 Rouppe van der Voort, L., & de la Cruz Rodr´ıguez, J. 2013, 《天体物理学杂志》, 776, 56, doi: 10.1088/0004-637X/776/1/56 Sadykov, V. M., Kitiashvili, I. N., Kosovichev, A. G., & Wray, A. A. 2021, 《天体物理学杂志》, 909, 35, doi: 10.3847/1538-4357/abd9c7 Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., et al. 2012, 《太阳物理学》, 275, 229, doi: 10.1007/s11207-011-9842-2 Schultz, R. B., & White, O. R. 1974, 《太阳物理学》, 35, 309, doi: 10.1007/BF00151951 Snow, B., & Hillier, A. 2021, 《皇家天文学会月刊》, 506, 1334, doi: 10.1093/mnras/stab1672 Socas-Navarro, H., McIntosh, S. W., Centeno, R., de Wijn, A. G., & Lites, B. W. 2009, 《天体物理学杂志》, 696, 1683, doi: 10.1088/0004-637X/696/2/1683 Socas-Navarro, H., Trujillo Bueno, J., & Ruiz Cobo, B. 2000, 《科学》, 288, 1396, doi: 10.1126/science.288.5470.1396 Song, D., Chae, J., Yurchyshyn, V., et al. 2017, 《天体物理学杂志》, 835, 240, doi: 10.3847/1538-4357/835/2/240 Stangalini, M., Jafarzadeh, S., Ermolli, I., et al. 2018, 《天体物理学杂志》, 869, 110, doi: 10.3847/1538-4357/aaec7b Stangalini, M., Baker, D., Valori, G., et al. 2021a, 《伦敦皇家学会哲学汇刊: A辑》, 379, 20200216, doi: 10.1098/rsta.2020.0216 Stangalini, M., Jess, D. B., Verth, G., et al. 2021b, 《天文学与天体物理学》, 649, A169, doi: 10.1051/0004-6361/202140429 Teriaca, L., Curdt, W., & Solanki, S. K. 2008, 《天文学与天体物理学》, 491, L5, doi: 10.1051/0004-6361:200810209 Thomas, J. H., Cram, L. E., & Nye, A. H. 1984, 《天体物理学杂志》, 285, 368, doi: 10.1086/162514 Thomas, J. H., & Weiss, N. O. 2012, 《太阳黑子与恒星黑子》（剑桥，英国：剑桥大学出版社）, doi: 10.1017/CBO9780511536342 Weiss, N. O., & Proctor, M. R. E. 2014, 磁对流（剑桥，英国：剑桥大学出版社）, doi: 10.1017/CBO9780511667459 Yurchyshyn,V., Abramenko, V., Kosovichev, A., & Goode, P. 2014, 《天体物理学杂志》, 787, 58, doi: 10.1088/0004-637X/787/1/58 Yurchyshyn,V., Kilcik, A., S¸ahin, S., Abramenko, V., & Lim, E.-K. 2020, 《天体物理学杂志》, 896, 150, doi: 10.3847/1538-4357/ab91b8