

近红外光谱观测揭示日冕中的阿尔芬波

高宇航 田 晖*

(北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

近日, 一项由多国科研团队合作完成的研究成果发表于《自然·天文学》(*Nature Astronomy*), 报道了太阳和日球层物理学领域的一项重要突破。该团队利用美国国家科学基金会的丹尼尔·井上太阳望远镜(Daniel K. Inouye Solar Telescope, DKIST), 首次在太阳最外层大气——日冕中直接观测到普遍存在的扭转阿尔芬波(见图 1)^[1]。这一发现为回答“日冕为何能维持数百万度高温”的核心问题提供了新的观测证据, 也展示了近红外光谱观测在太阳和日球层物理研究中的独特优势。

自 20 世纪 40 年代诺贝尔物理学奖得主汉尼斯·阿尔芬(Hannes Alfvén)提出磁流体力学波理论以来, 阿尔芬波一直被认为是驱动日冕加热与太阳风加速的重要能量载体。然而, 阿尔芬波在日冕中以扭转震荡的形式存在, 其观测信号极为隐蔽——既不伴随明显的亮度变化, 也几乎不会引起可见的结构位移。唯一可探测的线索, 是磁流管(日冕中常见的柱状等离子体结构)两侧沿视线方向相反的多普勒速度信号。要在日冕中那些纤细的磁流管结构内分辨这种反相位的速度特征, 需要极高的空间分辨率, 而这正是过去太阳观测设备所难以实现的。

2022 年正式投入运行的 DKIST 望远镜拥有 4 m 口径, 是目前全球最大、分辨率最高的太阳光学望远镜。其配备的近红外日冕成像光

谱仪 Cryo-NIRSP 能够在 Fe XIII 1074.7 nm 谱线实现高灵敏度光谱测量, 为揭示日冕中阿尔芬波的存在提供了前所未有的窗口。

在 2023 年的一次观测中, 研究团队利用 DKIST 望远镜对日冕开放磁场区域进行了持续数小时的光谱观测。通过详细的数据分析, 他们在冕环结构两侧检测到周期性反相位的多普勒振荡信号, 完全符合扭转阿尔芬波的理论特征。为了验证观测结果的可靠性, 研究团队进一步开展了三维磁流体力学数值模拟, 并基于模拟结果合成了可观测的近红外谱线特征。模拟结果成功再现了观测中速度分布与时间演化的主要特征, 确认了观测分析结果的可靠性, 也为今后研究阿尔芬波的能量输运与耗散机制奠定了基础。

研究还表明, 这些扭转阿尔芬波信号在观测视场内普遍存在, 并可持续存在较长时间。基于初步估算, 观测到的扭转阿尔芬波及伴随的扭曲波(磁流管的横向摇摆振荡)携带的能量密度超过 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 足以满足宁静区日冕的加热需求, 展现出这些波动作为太阳大气能量输运通道的潜力。

这一成果凸显了在近红外波段开展太阳光谱观测的独特科学价值。传统的可见光观测主要针对太阳较低层大气(光球与色球), 而极紫外波段虽可用于日冕观测, 却需依赖太空卫星平台, 且受制于仪器口径和分辨率的限制。相

收稿日期: 2025-11-03

DOI: 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.11.002

作者简介(Biography): 高宇航(1999-), 男, 安徽亳州人, 博士研究生, 主要研究方向为太阳物理。

*通讯作者(Corresponding Author): 田晖(1982-), 男, 湖北蕲春人, 教授, 主要研究方向为太阳物理。

E-mail: huitian@pku.edu.cn

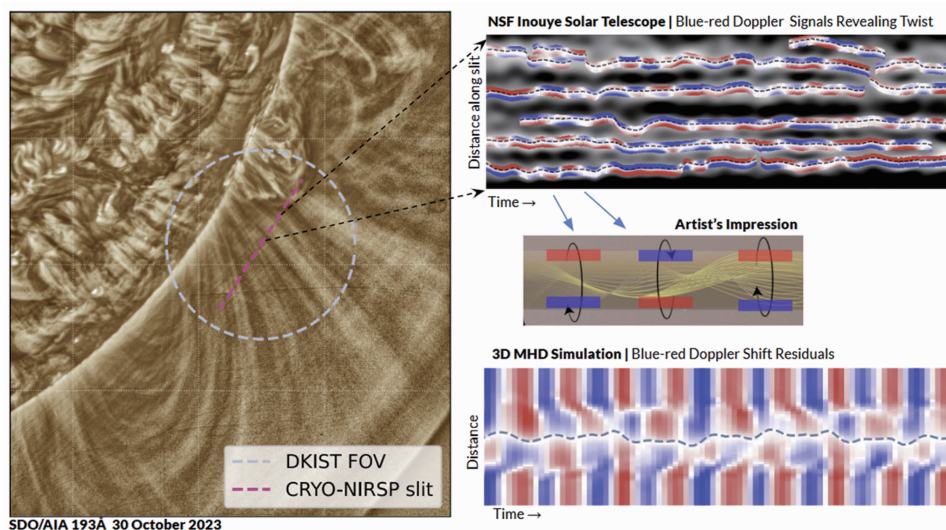


图 1 日冕扭转阿尔芬波观测。左图显示了DKIST望远镜的观测区域和仪器狭缝位置。右上图所示为沿着狭缝辐射强度和 Doppler 速度随时间的变化。右中图为扭转阿尔芬波示意图。右下图所示为数值模拟的结果，再现了观测中磁流管两侧的反相位 Doppler 信号（图片源自美国国家太阳天文台，由 Tom Schad 和 John Williams 根据文献[1]的相关内容制作）

比之下，近红外波段既能在地面进行高分辨率观测，又包含在高温日冕中形成的“禁线”辐射（如 Fe XIII 1074.7 nm 谱线，对应温度约为 1.6 MK），因此成为研究日冕动力学与磁场的理想窗口。

此外，近红外观测同样为日冕磁场测量——太阳物理领域的另一长期难题——提供了突破途径。2020 年，我国学者领衔的合作团队利用日冕多通道偏振仪 (CoMP) 的近红外光谱观测，首次绘制了全局性日冕磁图^[2-3]。他们通过 Fe XIII 1074.7 nm 与 1079.8 nm 两条谱线的强度比值诊断日冕密度，并结合 CoMP 观测到的扭曲波传播速度反演磁场强度。在此基础上，该团队进一步于 2022 年 2 月至 10 月连续获取了百余幅全局性日冕磁图，实现了约每两天一次的日冕磁场监测频率，初步完成了日冕磁场的常规测量^[4]。这一成果使太阳磁场测量范围从光球层延伸至约 1.6 个太阳半径，为研究太阳磁场演化及空间天气预测奠定了基础。

从 DKIST 望远镜首次探测到扭转阿尔芬波，到 CoMP 实现日冕磁场测量，近红外光谱观测正成为日冕物理研究的新前沿。这些研究成果共同构成了理解日冕加热与太阳活

动本质的重要拼图。随着地面与空间观测设备的持续发展，人类正一步步接近获得“日冕之谜”的最终答案。可以预见，在未来几年中，高分辨率近红外光谱仪器和其他新一代设备的联合观测，将进一步推进我们对太阳磁活动及其与地球/行星相互作用规律的理解。

参考文献

- [1] Morton R J, Gao Y, Tajfirouze E, et al. Evidence for small-scale torsional Alfvén waves in the solar corona [J/OL]. *Nature Astronomy*, 2025 [2025-10-24]. <https://doi.org/10.1038/s41550-025-02690-9>.
- [2] Yang Z H, Bethge C, Tian H, et al. Global maps of the magnetic field in the solar corona [J]. *Science*, 2020, **369**(6504): 694-697.
- [3] Yang Z H, Tian H, Tomczyk S, et al. Mapping the magnetic field in the solar corona through magnetoseismology [J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, **63**(12): 2357-2366.
- [4] Yang Z, Tian H, Tomczyk S, et al. Observing the evolution of the Sun's global coronal magnetic field over 8 months [J]. *Science*, 2024, **386**(6670): 76-82.