

基于太阳与恒星比较研究 寻找恒星大气爆发源区的新探针

报告人：侯义军

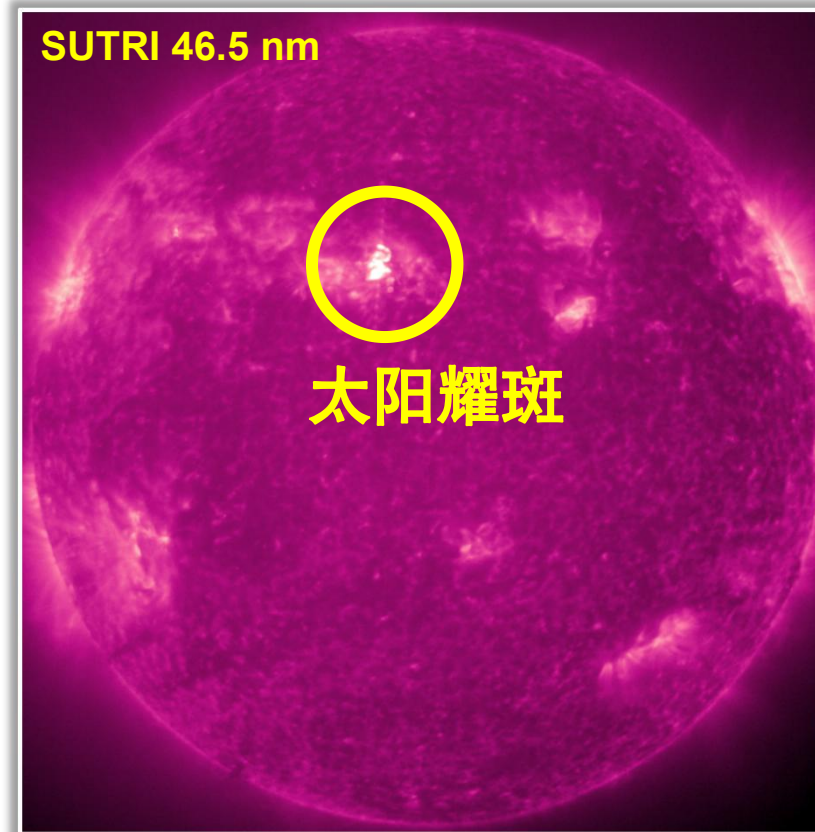
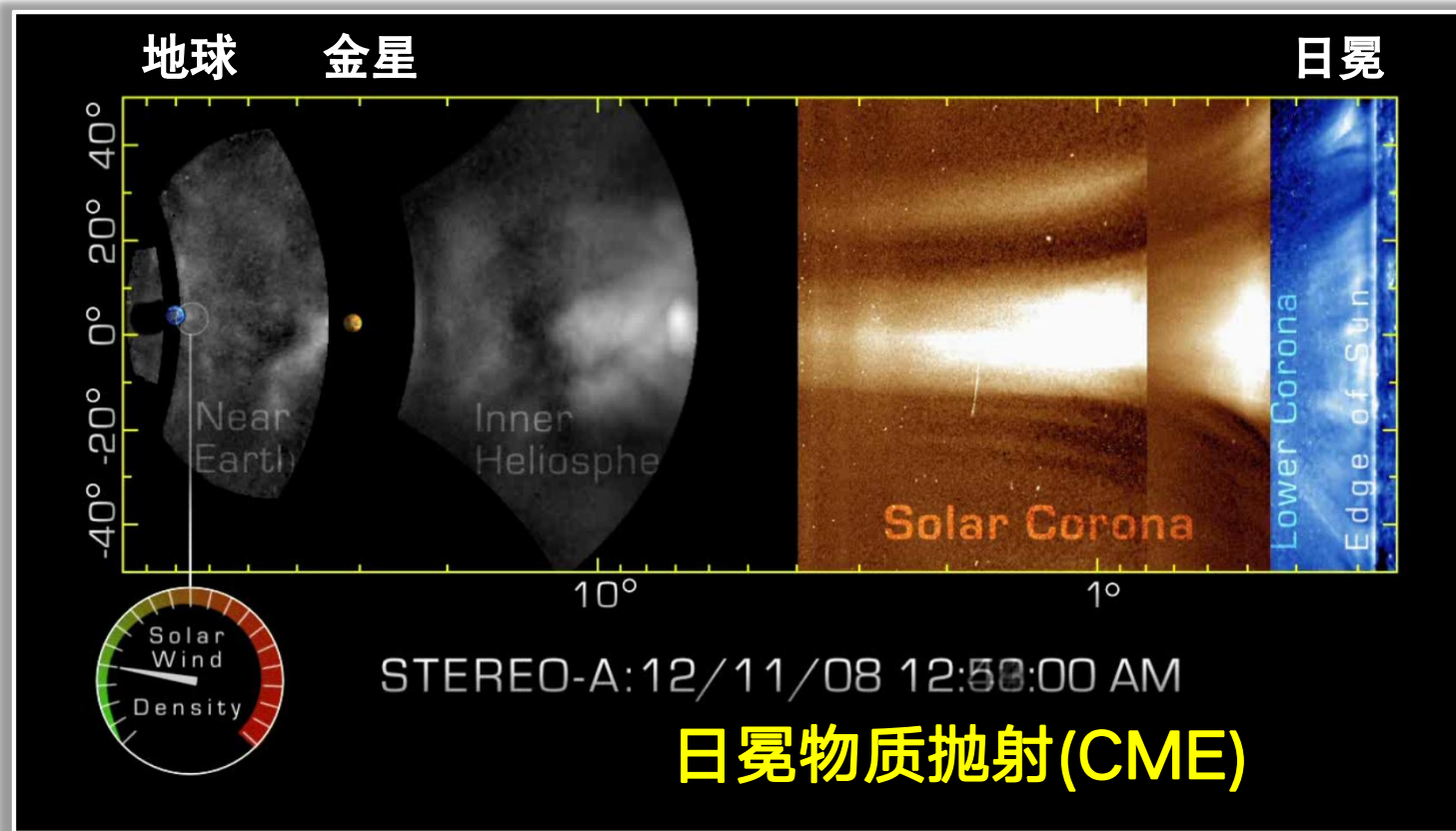
单位：中国科学院国家天文台

“天关卫星时代的恒星X射线耀发研究” 2025学术研讨会·北京

2025/05/27

- **研究背景**
- **研究动机与思路**
- **研究进展**
- **总结与展望**

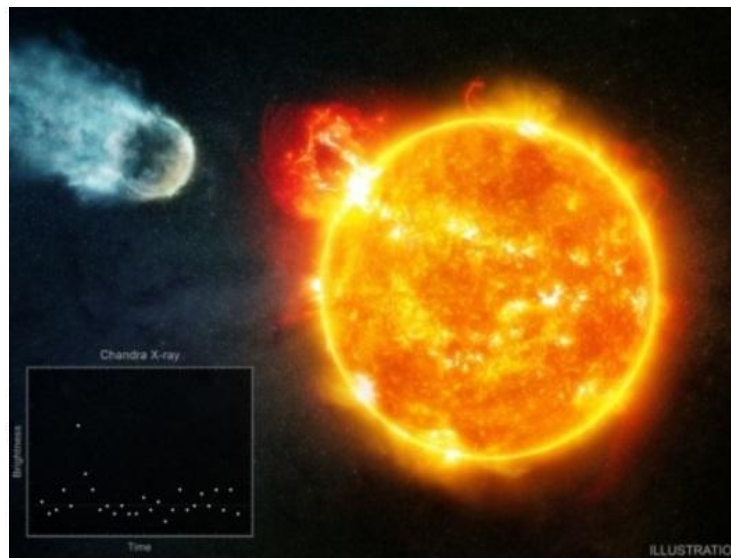
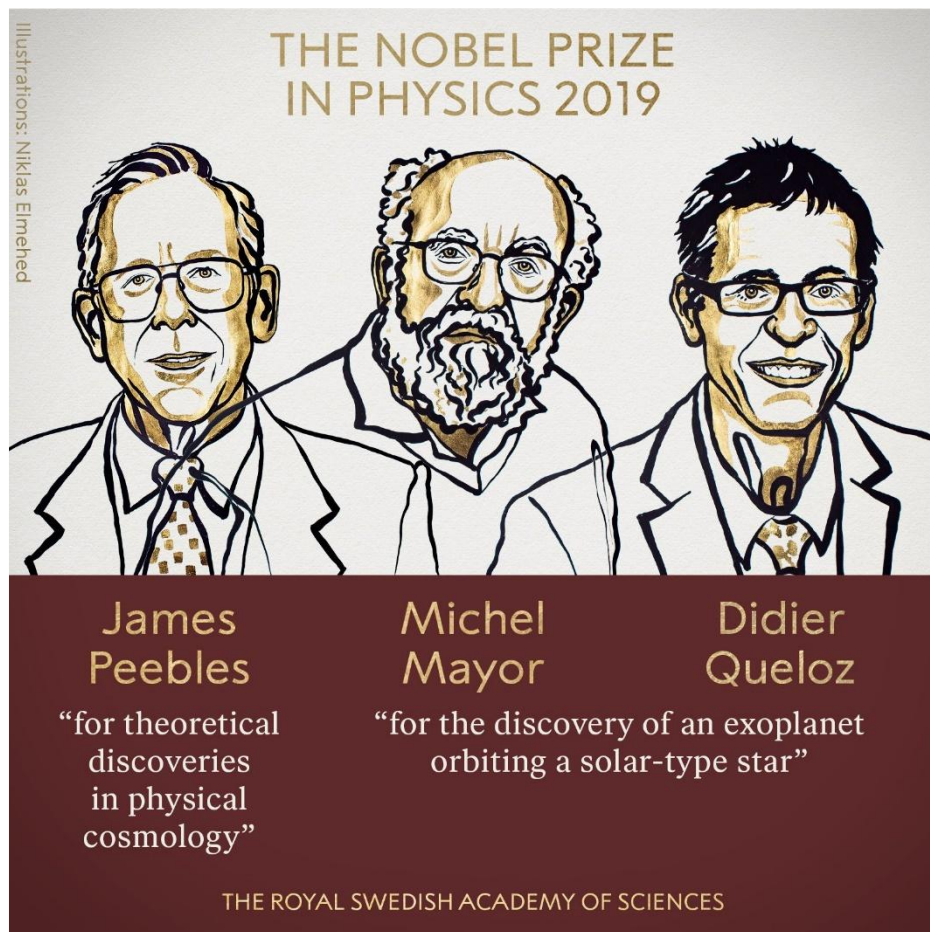
■ 太阳爆发活动可引起日地乃至整个太阳系空间环境的扰动



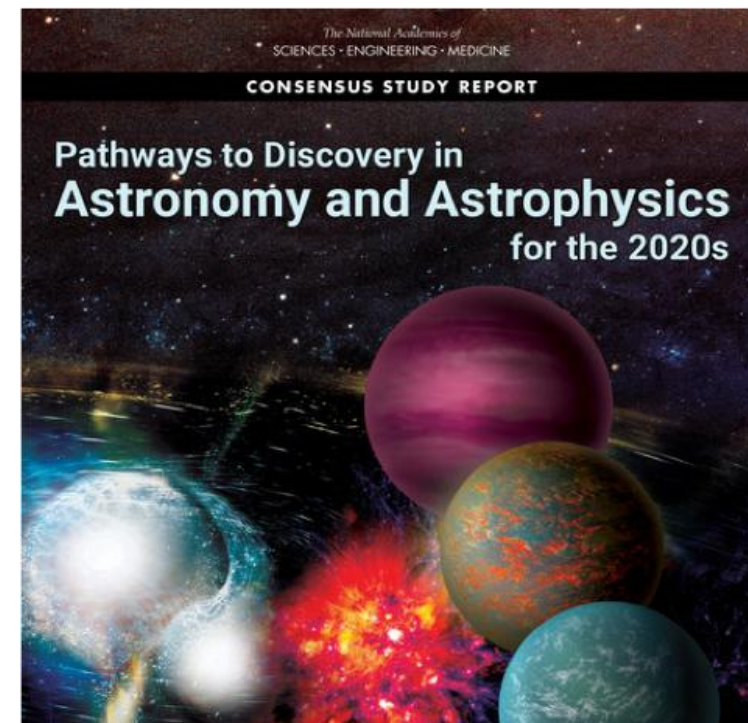
■ 事关近地航天活动、深空探测和国家空间安全，成为强国必争的战略高地

- 美国《空间天气法案》、《国家空间天气战略及行动计划》
- 中国《航天强国发展纲要》、《国家空间科学中长期发展规划（2024—2050年）》

■ 恒星大气爆发活动同样存在，它们也是宿主恒星影响行星的关键途径



Understanding the connections between stars and the worlds that orbit them, from nascent disks of dust and gas through formation and evolution, is an important scientific goal for the next decade. The effort to identify habitable Earth-like worlds in other planetary systems and search for the biochemical signatures of life will play a critical role in determining whether life exists elsewhere in the universe.



美国2020年代天文学发展规划理解**恒星与其周围宜居世界的关系**居三大优先发展方向之首

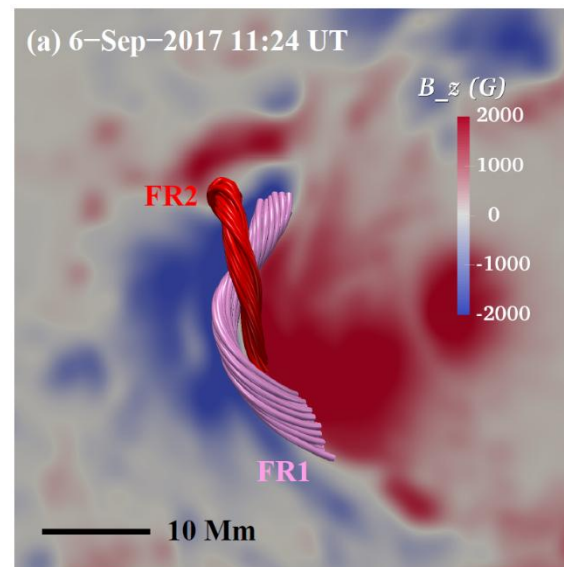
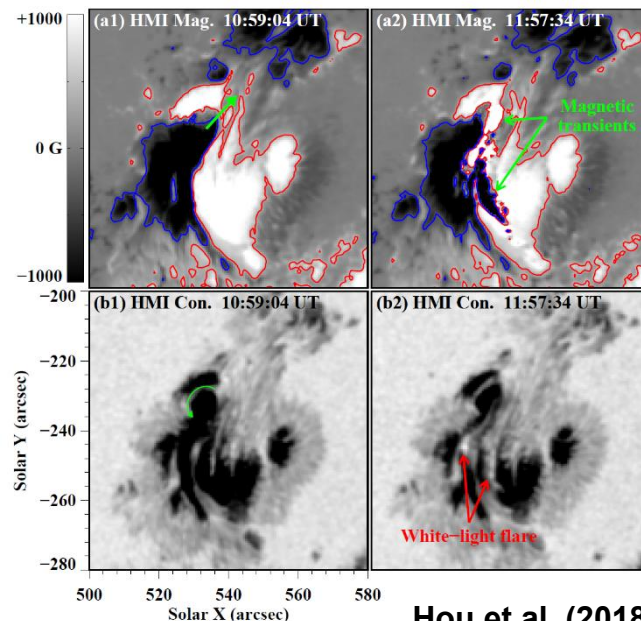
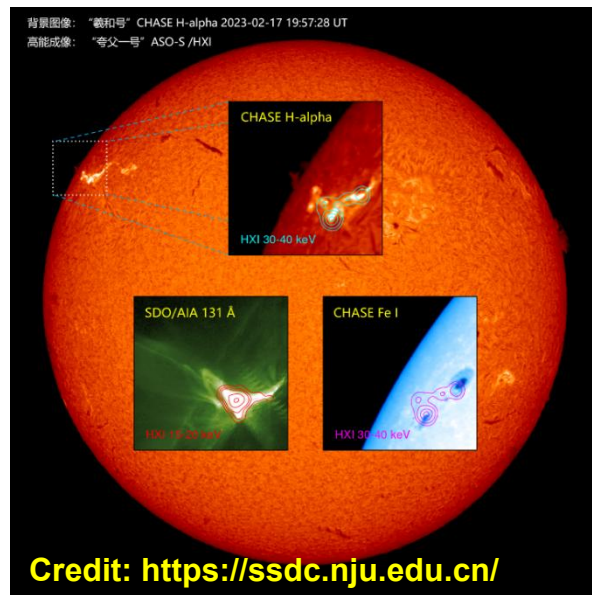
太阳物理

恒星物理

行星科学

空间天气学

□ 相关的研究在国内也发展迅速

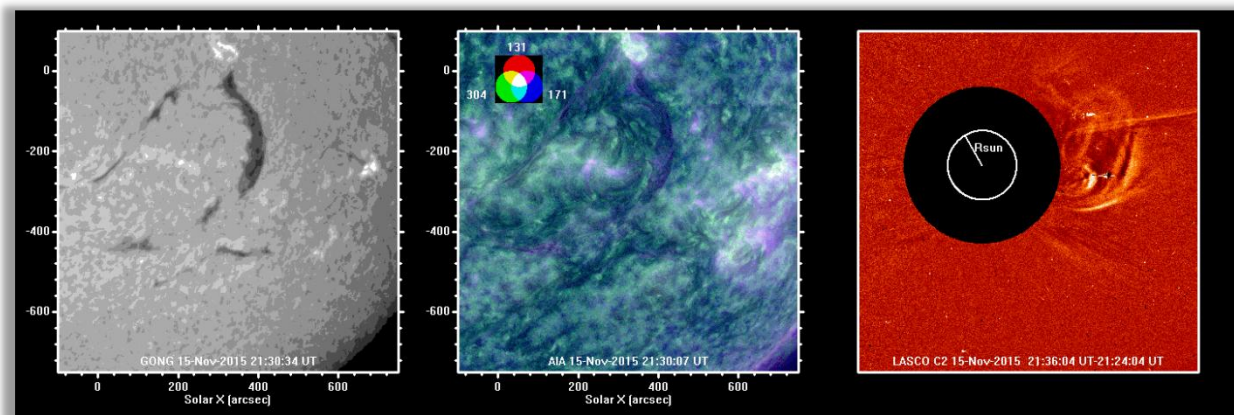


Hou et al. (2018, 2023)

爆发源区的多磁绳系统

近乎**全波段**对太阳爆发活动进行**有时空分辨率**的常规观测

- ❑ 太阳爆发源区: **磁场系统**+**等离子体系统**
- ❑ 磁场系统的**浮现**、**剪切**、**旋转运动**, **等离子体系统** (如暗条) 的动力学演化, 不断积累能量并最终驱动爆发活动
- ✓ **源区磁场**和**等离子体信息**的**准确获取**, 对于理解太阳爆发活动的物理机制**至关重要**



暗条感应/部分爆发

Hou et al. (2020, 2023)

恒星大气爆发活动研究现状

恒星大气爆发活动研究

基于测光

其他

基于光谱

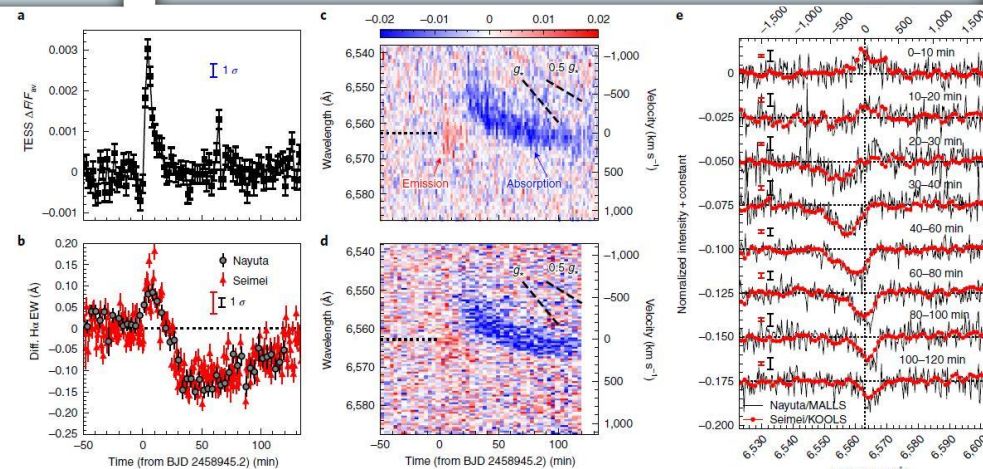
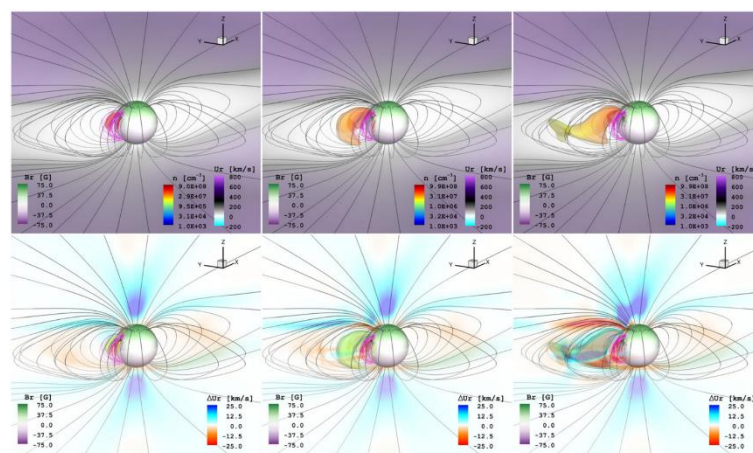
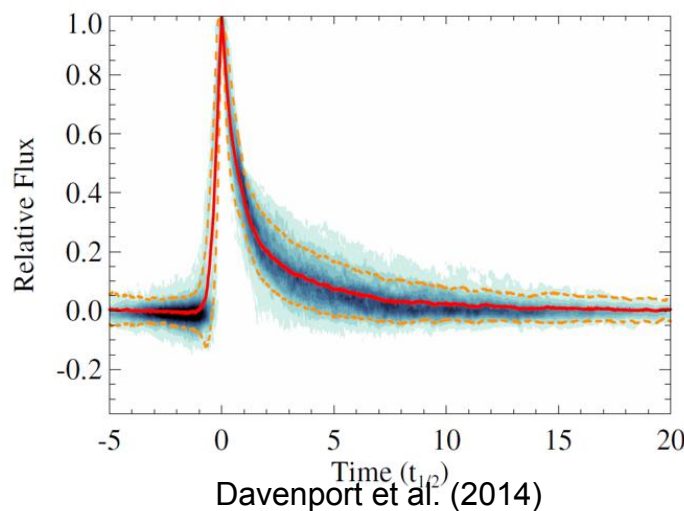
能量释放规律

等离子体运动特征

- 光变轮廓(Davenport et al. 2014; Kashapova et al. 2021)
- 能量、时标分布(Maehara et al. 2012; Hawley et al. 2014; Namekata et al. 2017; Yang & Liu 2019; Okamoto et al. 2021; Yang et al. 2023; Vasilyev et al. 2024)
- 准周期脉动(Nakariakov et al. 2006; Cho et al. 2016; McLaughlin et al. 2018; I.V. Zimovets et al. et al. 2021)

- 射电频谱观测研究(Zhang et al. 2023; Callingham et al. 2024)
- 耀斑辐射机制的模拟研究(Kowalski 2023; Yang et al. 2023)
- 星冕物质抛射的模拟研究(Alvarado-Gomez et al. 2018, 2019; Xu et al. 2024)

- 低温色球、暗条物质的运动(Namekata et al. 2022; Wu et al. 2022; Ma et al. 2024; Lu et al. 2025)
- 高温等离子体的流动(Argiroffi et al. 2019; Chen et al. 2022; Inoue et al. 2024)
- 星冕物质抛射(Argiroffi et al. 2019; Wang et al. 2021; Lu et al. 2022; Tian et al. 2023; Yang et al. 2024)



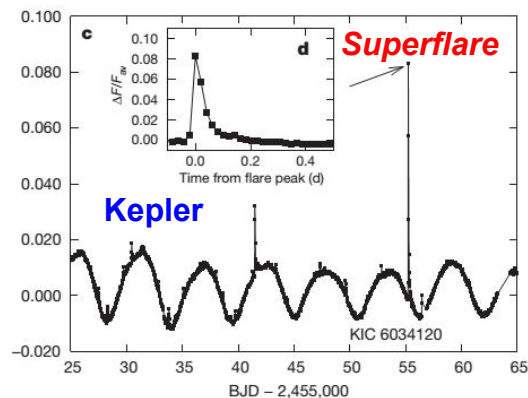
■ 目前学界普遍认为：太阳与恒星大气爆发活动的物理机制相同 (Benz & Gudel 2010; Kowalski 2024)

- 研究背景
- 研究动机与思路
- 研究进展
- 总结与展望

恒星大气爆发活动研究

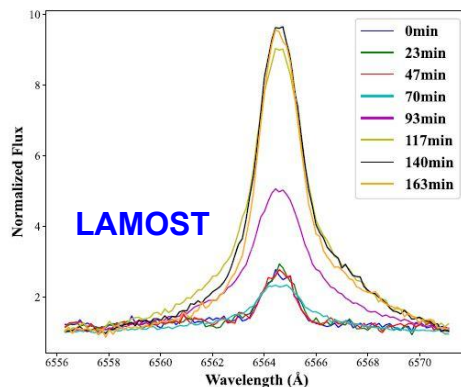
■ 基于恒星整体的测光/光谱观测数据

基于测光



Maehara et al. (2012)

基于光谱



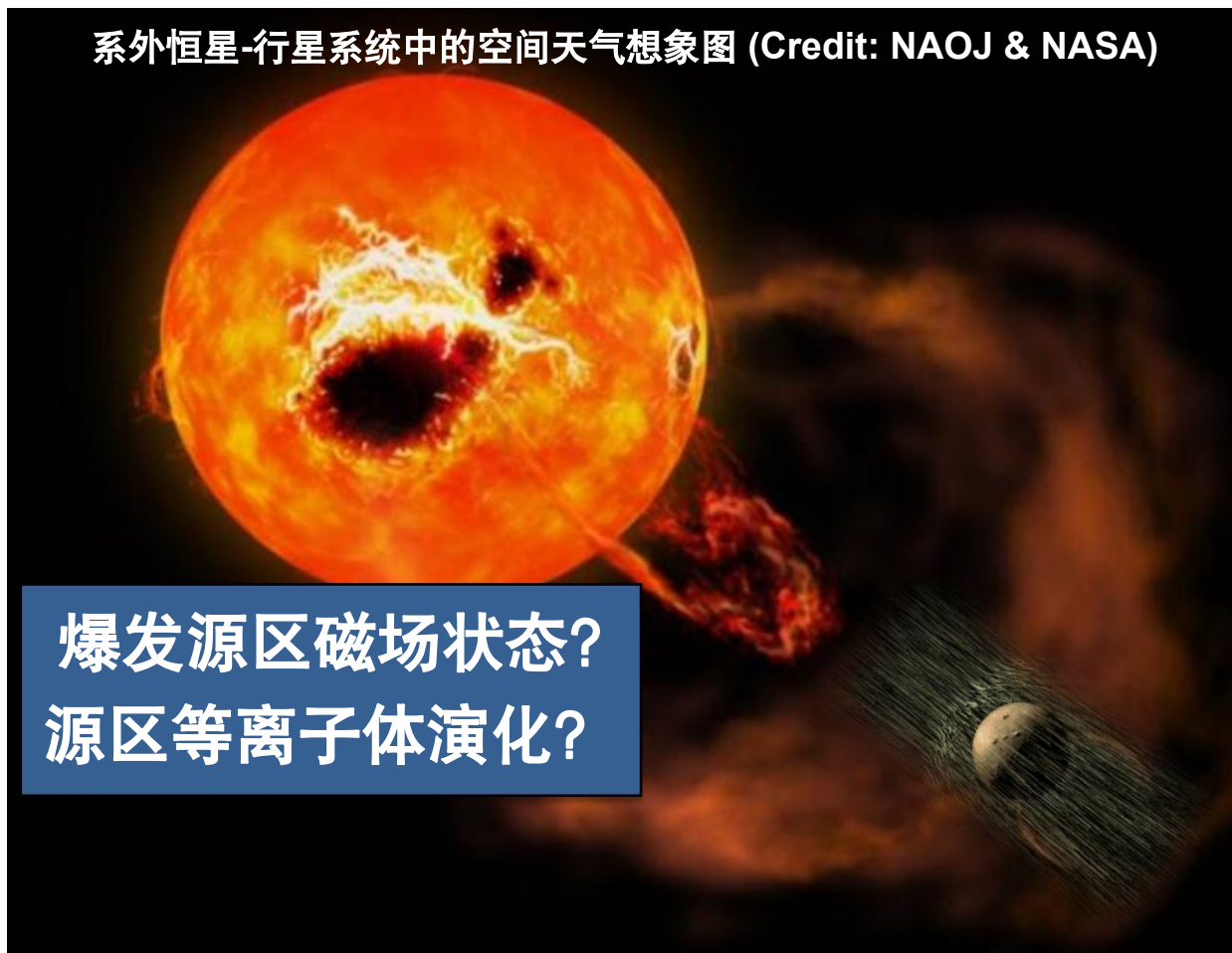
Wu et al. (2022)

□ 恒星数据无空间分辨率、观测波段有限

恒星大气爆发活动的源区信息未知
极大地限制了相关研究的广度与深度

亟需寻找可诊断源区信息的有效探针

系外恒星-行星系统中的空间天气想象图 (Credit: NAOJ & NASA)

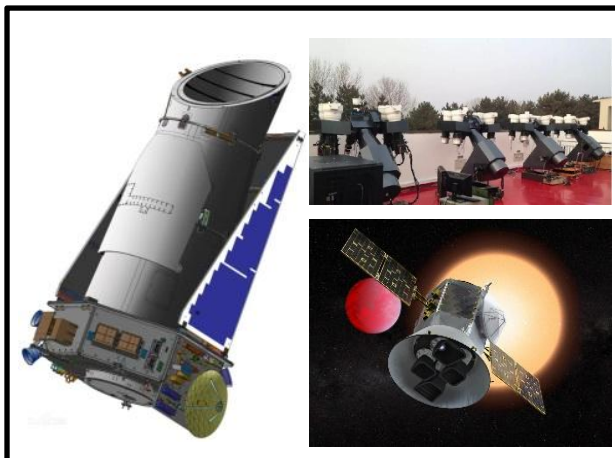


爆发源区磁场状态?
源区等离子体演化?

突破方向：比较研究太阳与恒星大气爆发活动，从已知的太阳物理规律出发，寻找恒星大气爆发源区磁场与等离子体的有效探针

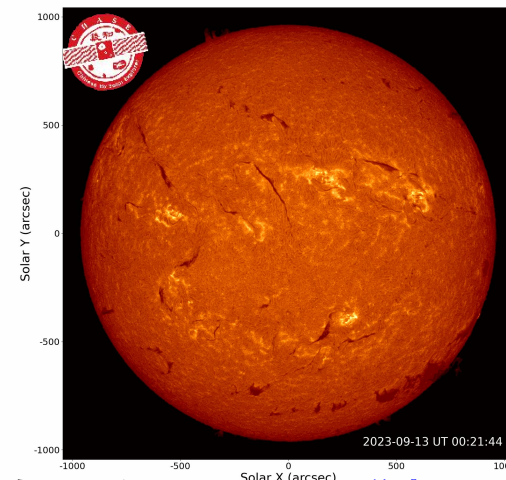
寻找恒星大气爆发源区的新探针

基于测光数据的比较研究

基于大样本白光耀斑测光数据的恒星大气爆发
源区磁场探针研究测光数据蕴含着爆发源区磁能释放机制的重要信息
是诊断爆发源区磁场的潜在探针

丰富的恒星白光耀发测光数据 丰富的太阳白光波段数据

基于时序光谱的比较研究

基于Sun-as-a-star光谱分析的恒星大气爆发
源区等离子体演化探针研究爆发源区的等离子体动力学过程信息
隐藏在时序光谱观测中丰富的太阳与恒星爆发活动时序H α 光谱数据

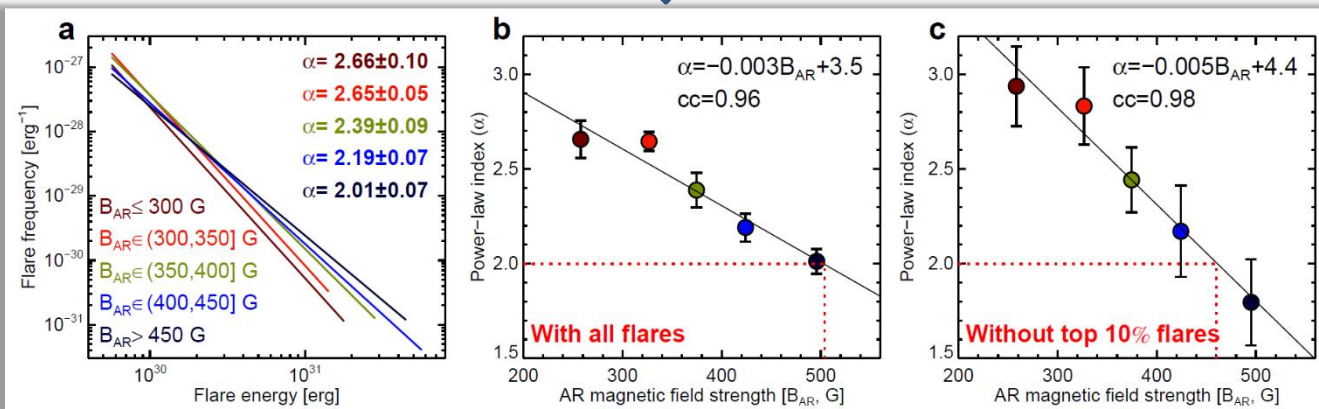
- 研究背景
- 研究动机与思路
- 研究进展
- 总结与展望

源区磁场探针：磁场强度与测光参数之间的量化关系

统计分析3000+太阳耀斑软X射线辐射流量测光数据



根据源区磁场强度对耀斑分组并计算各自能量幂律指数



Hou et al. (2025, under revision)

✓ 耀斑能量分布的幂律指数与源区磁场强度之间存在线性关系：源区磁场强度数值越大，则指数 α 越小

爆发源区磁场强度与爆发测光参数特征之间存在量化关系，作为爆发源区磁场的新探针

磁场重联理论

$$E \sim fE_{\text{mag}} \sim fB^2 L^3$$

$$\tau \sim \tau_{\text{rec}} \sim \tau_A / M_A \propto L / v_A / M_A$$

$$v_A = \tilde{B} / \sqrt{4\pi\rho}$$

$$\tau \propto E^{1/3} B^{-5/3} \rho^{1/2}$$

能量-时标关系
可量化诊断耀
发源区磁场

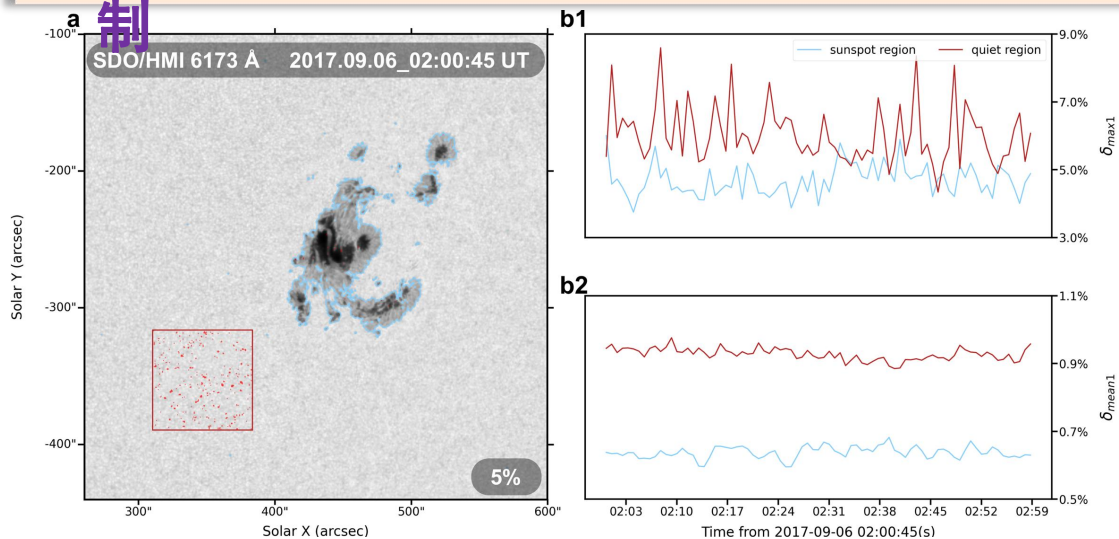
目前面临的首要问题

- 量化关系从未在太阳白光波段被深入研究过
- 太阳白光耀斑样本数量少
- 能量、时标等参量难以准确测量

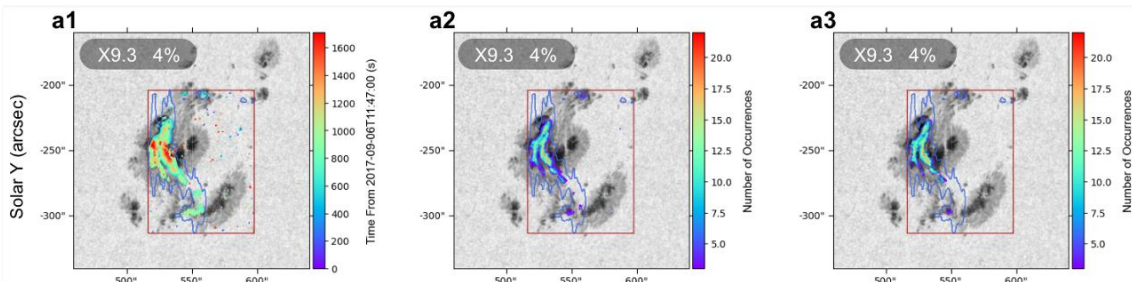
我们提出的解决方案

- 优化识别，建立大样本太阳白光耀斑数据库
- ✓ 获得准确的能量和时标参量
- ✓ 开展太阳/恒星白光耀斑的统计与比较研究

□ **优化方案：采用本征阈值**（依据每个像素点本征波动进行单独设置）+ **考虑潜在真实信号的典型时空分布特征作为限制**

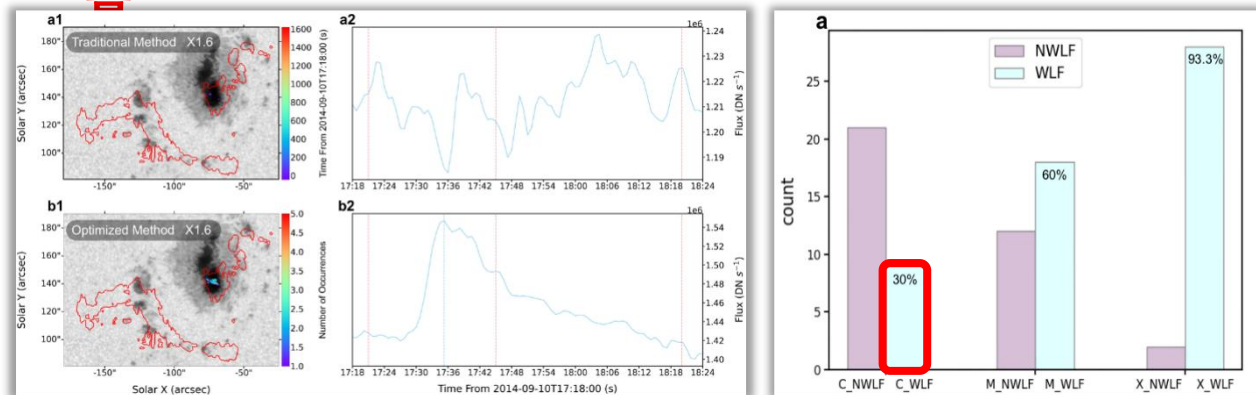


强磁场区的本征波动要明显弱于宁静区



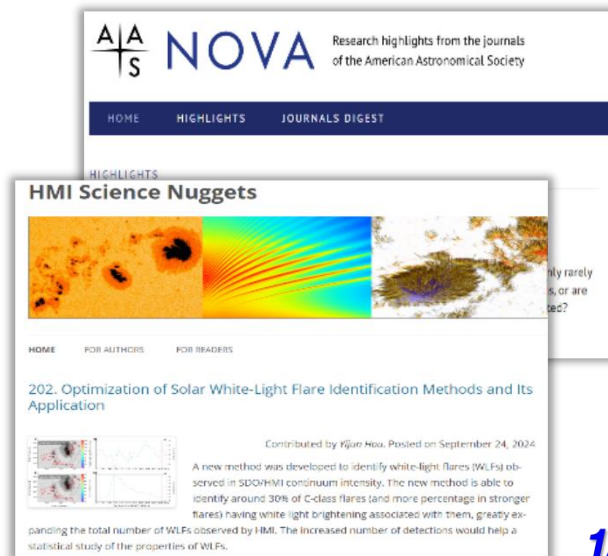
时空分布特征：空间上聚集分布；时间上反复、连续出现

- ✓ 有效识别微弱的真实信号、排除非耀斑产生的强伪信号、优化积分光变，获取更准确的物理参数
- ✓ **30%**的C级太阳白光耀斑识别率，**目前已有研究中最**

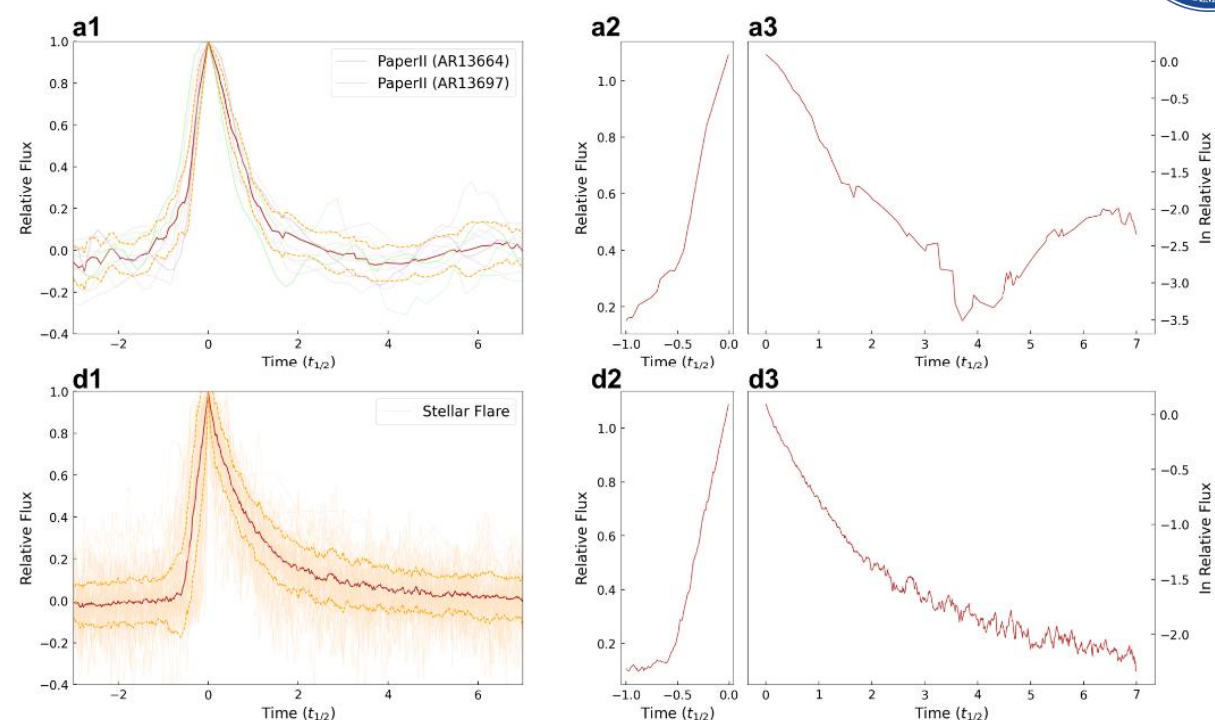
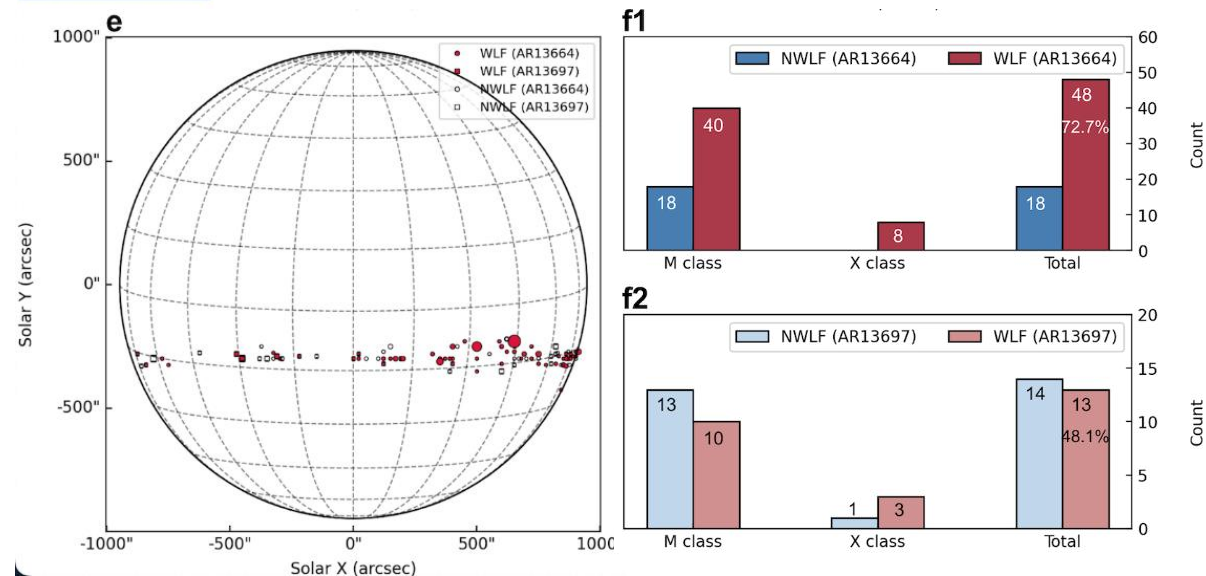


Cai, Hou# et al. 2024, ApJ

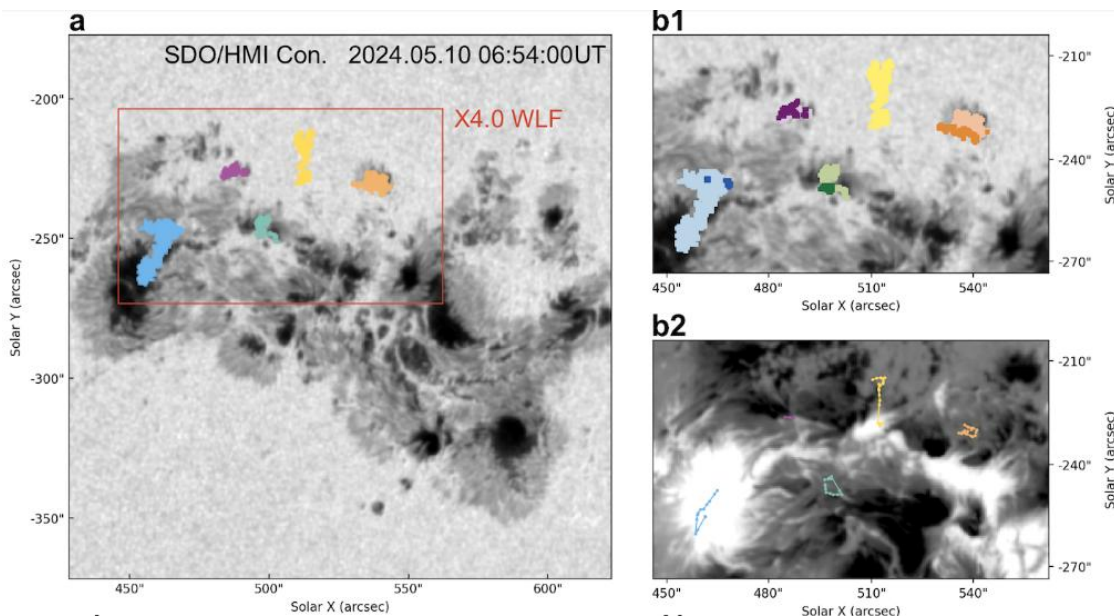
意义：优化识别方案的应用结果，有力证实**太阳白光耀斑并不罕见；**未来开展基于**大样本**的**太阳/恒星白光耀斑量化关系研究成为可能**



源区磁场探针：超级活动区13664的独特样本



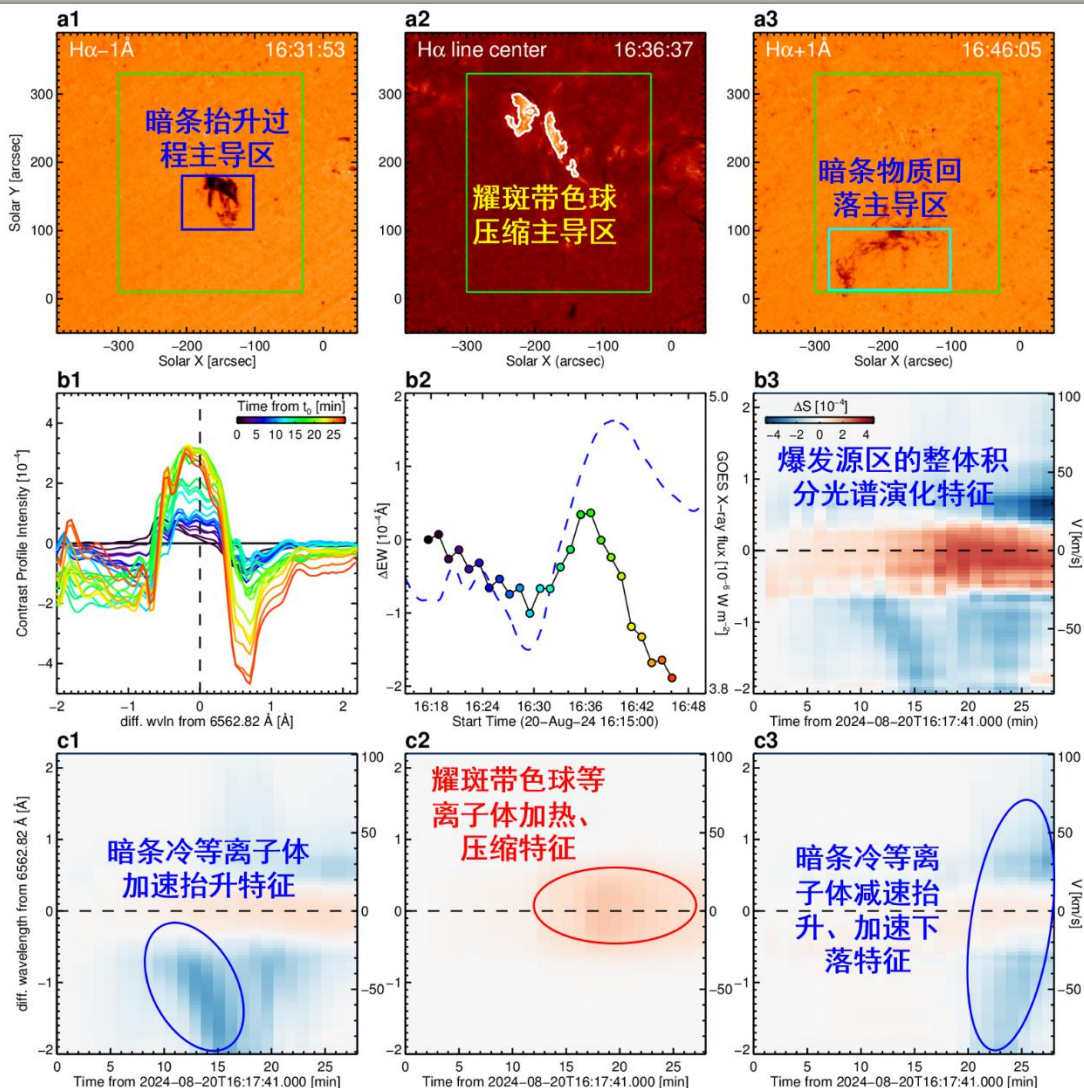
- ✓ 不同活动区&活动区不同磁场演化阶段的白光耀斑比较
- ✓ 首次给出白光辐射增强信号时空分布的统计规律
- ✓ 首次获得太阳白光耀斑的光变轮廓模板



耀斑带色球压缩/蒸发、暗条抬升/回落等相关物理过程共同塑造了全日面/源区积分光谱特征

问题：如何提炼不同物理过程的典型光谱特征？

思路：对爆发源区不同物理过程各自占主导的区域分区进行H α 积分光谱分析，解构不同物理过程对爆发Sun-as-a-star光谱特征的贡献



- ✓ 在不同的爆发事件中，相同物理过程所主导的局部区域，表现出了类似的H α 时序积分光谱特征
- ✓ 作为“钥匙”，为从恒星整体光谱数据中解构出爆发源区可能存在的类似物理过程指明方向

Liu, Hou[#] et al. (2025, under revision)

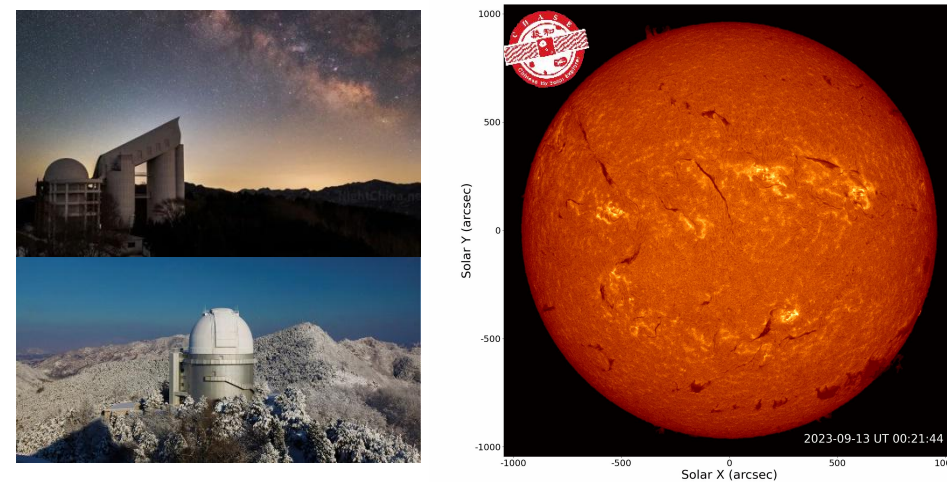
- 研究背景
- 研究动机与思路
- 研究进展
- 总结与展望

基于大样本白光耀斑测光数据的恒星大气爆发源区磁场探针研究



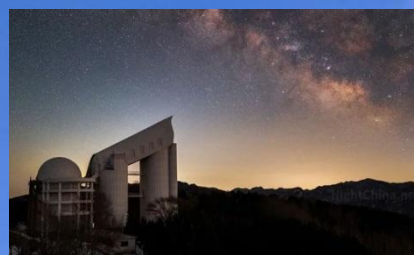
爆发源区磁场强度与爆发测光参数特征之间**存在量化关系**，作为**爆发源区磁场的新探针**

基于Sun-as-a-star光谱分析的恒星大气爆发源区等离子体演化探针研究



不同等离子体动力学过程的**典型时序光谱特征**，作为**爆发源区等离子体的新探针**

- 扩样本（太阳白光耀斑数量增加一个数量级 $\sim 10^3$ ；TESS观测到的恒星白光耀发）
- 加波段（开展 $H\alpha$ 、白光、紫外、X射线等多波段光变比较分析；EP恒星耀发）
- 完善恒星大气爆发物理图像（搜寻观测特征异于太阳爆发活动的恒星爆发活动）



感谢支持，期待合作！

