

特色专题

“夸父一号”(ASO-S)卫星早期成果概述

甘为群^{1,2}, 苏杨¹, 封莉¹, 黄宇¹, 黎辉¹, 苏江涛³, 李瑛¹, 刘锁³

摘要 “夸父一号”(ASO-S)是中国首颗综合性太阳探测专用卫星,在轨测试和试运行近1年,2023年9月底正式进入科学运行阶段。以“夸父一号”卫星的3台载荷数据利用为主线,重点介绍了卫星科学运行不到一年半时间(截至2025年2月)所取得的初步观测研究成果: β 型黑子衰减的磁对消作用、耀斑硬X射线准周期震荡的综合诊断、双视角硬X射线成像联合分析、360 nm白光耀斑的观测特性、Ly α 卡林顿图等。未来,使用ASO-S观测数据,结合国内外其他先进太阳观测卫星数据,可联合开展多波段乃至立体观测研究,有望在“一磁两暴”的本质及关联性方面取得重要进展。

关键词 夸父一号;太阳空间探测;太阳耀斑;日冕物质抛射;太阳磁场

中国天文界早在20世纪70年代中后期就提出要发射中国自己的天文卫星,当时拟定的卫星名字为“天文一号”,主要科学目标是观测太阳耀斑及宇宙伽马暴。项目进行到一定阶段(相当于现在的工程样机阶段),由于多种原因而终止。之后,中国太阳物理界在太阳空间探测方面先后进行了多次尝试^[1],直到2021年10月14日和2022年10月9日,中国首颗太阳探测科学技术试验卫星“羲和号”(太阳H α 光谱与双超平台科学技术试验卫星, Chinese H α Solar Explorer, CHASE)^[2]和中国首颗综合性太阳探测专用卫星“夸父一号”(先进天基太阳天文台, Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)^[3-4]相继成功发射,开启了中国太阳空间探测的时代。

“夸父一号”卫星于2011年提出^[5-6],在中国科学院空间科学先导专项^[7]支持下,先后经历了预先研究

(2011—2013)、背景型号研究(2014—2016)、综合立项论证(2016—2017)、工程立项(2017年底)、方案设计阶段(2017年9月至2019年4月)、初样研制阶段(2019年5月至2021年8月)、正样研制阶段(2021年9月至2022年8月),于2022年10月9日在酒泉卫星发射中心成功发射。之后,开展了近1年的在轨测试,并于2023年9月底正式交付用户单位中国科学院紫金山天文台管理。一系列文献^[8-14]记载了ASO-S各个阶段的主要工作,更详细的记载参见ASO-S科学团队编制的“ASO-S科学简报”合订本。

“夸父一号”卫星的科学目标可简称为“一磁两暴”,即在一个卫星平台上同时观测太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射(CME),研究它们的形成、演化、相互作用和彼此关联。“夸父一号”卫星上共有3台有效载荷:“全日面矢量磁像仪”(FMG),用来观测全日面光球磁场;“硬X射线成像仪”(HXI),主要用来观测太阳耀斑所产生硬X射线(HXR)辐射;“莱曼阿尔法太阳望远镜”(LST),由3台望远镜(SDI:莱曼阿尔法波段全日面成像仪;WST:3600 Å白光全日面成像仪;SCI:莱曼阿尔法和白光双波段日冕仪)组成,主

1. 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文院重点实验室, 南京 210023

2. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135

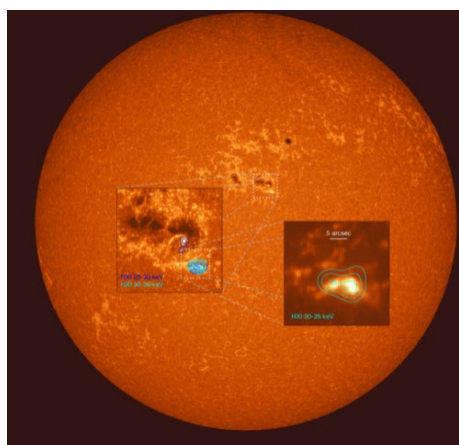
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

收稿日期: 2025-02-19; 修回日期: 2025-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(12233012, 12333010, 11921003); 中国科学院B类先导专项(XDB0560000); 科技部国家重点研发计划(2022YFF0503002)

作者简介: 甘为群, 研究员, 研究方向为太阳物理, 电子信箱: wqgan@pmo.ac.cn

引用格式: 甘为群, 苏杨, 封莉, 等. “夸父一号”(ASO-S)卫星早期成果概述[J]. 科技导报, 2025, 43(16): 43-61; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.02.00203



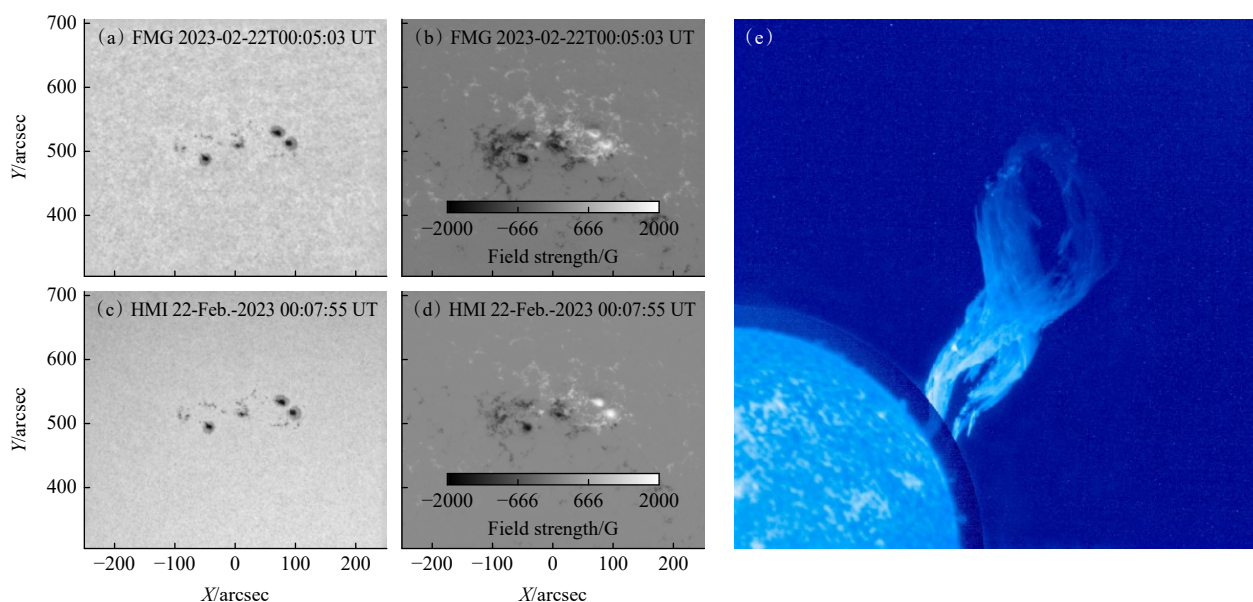
高能图像: ASO-S “夸父一号”/HXI
背景图像: SDO/AIA 1700 Å 2022-11-11 01:49:16 UT

图1 HXI/ASO-S 观测的 HXR 像(等值线)叠加在 AIA 171/SDO 像上(2022-11-11 01:49 UT)

要用来观测 CME 的形成、近日面传播及其他日面活动现象。图 1 显示了 HXI/ASO-S 早期观测的一个耀斑(2022-11-11 01:49 UT)HXR 像(等值线)叠加在 AIA(大气成像组件) 171/SDO(太阳动力学天文台)像上,展示了 HXI 的成像能力及空间分辨率;图 2 显示了 SDI/LST 和 SCI/LST 在莱曼阿尔法波段从日面到

日冕的日珥无缝观测图像举例(2023-03-07 21:06 UT),以及 FMG/ASO-S 观测的太阳局部像和视向磁图与 HMI(日震与磁场成像仪)/SDO 观测的太阳像和视向磁图比较(2023-02-22 00:05 UT)。

卫星发射前团队曾在《Research in Astronomy and Astrophysics》(《RAA》)和《天文学报》上发表过 2 期 ASO-S 专刊^[15-16],介绍卫星设计和研制的方方面面,尤其是《RAA》上的 ASO-S 专刊,详细介绍了卫星方案设计阶段成果和科学准备^[17-29]。截至 2025 年 2 月,有关 ASO-S 本身和利用其数据发表的论文合计 130 余篇。卫星发射后,在《Solar Physics》上组织了 ASO-S 在轨测试和早期成果专刊,共收录了 30 篇论文,包含正样卫星总体性能指标及卫星发射后各载荷的首图^[30]、FMG 在轨性能及定标^[31]、HXI 在轨性能及定标^[32]、LST 在轨性能及定标^[33],以及 ASO-S 数据运行和分析中心^[34]等 5 篇卫星在轨测试总体性文章,全面介绍了“夸父一号”在轨的状态和卫星科学团队所能提供的数据和服务。本文主要综述卫星交付不到一年半时间利用 ASO-S 数据及关于卫星本身的主要研究成果。



(a)(b)为 FMG/ASO-S 观测的太阳像和视向磁图(2023-02-22 00:05 UT)与(c)(d)HMI/SDO 观测的太阳像和视向磁图(2023-02-22 07:55 UT)的比较;
(e)为 SDI/LST/ASO-S 和 SCI/LST/ASO-S 在莱曼阿尔法波段从日面到日冕的日珥无缝观测图像(2023-03-07 21:06 UT)

图2 FMG 和 LST 观测举例

1 FMG 相关早期研究成果

1.1 FMG 有关定标工作

FMG 的设计是采用弱场近似来线性定标磁场,

但由于 ASO-S 卫星本身的轨道速度以及太阳本身的自转会影响观测谱线波长的位置,从而改变偏振信号的强弱,这样定标的磁场强度会受到卫星轨道速度变

化的调制。Liu 等^[35]通过 FMG 和 HMI 的交叉定标,研究了卫星轨道速度对磁场定标系数的影响,提出了随卫星轨道速度变化而修正的线性定标系数,从而解决了 FMG 磁场测量受 ASO-S 卫星轨道速度影响的问题,大大提高了 FMG 磁场测量的精度。

滤光器型磁像仪工作谱线必须是磁敏感谱线,FMG 沿用之前怀柔地面太阳磁场望远镜的工作谱线 FeI 5324.19 Å,但如何选择工作谱线中对磁场最敏感的具体波长位置进行单点偏振测量分析是关键,选择得好意味着能够获得更加可靠的磁场测量结果。Liu 等^[36]针对 FMG 为什么选择在 -0.08 Å 进行具体的偏振测量阐述了原因,包括从偏振辐射转移理论、怀柔地面太阳磁场望远镜实测数据以及 FMG 空间实测数据等方面进行了合理性分析。

FMG 针对太阳黑子中心的强磁场测量会显示表观变弱(又称磁饱和)的现象。Xu 等^[37]对此进行了研究并发展了一种校正方法,应用到 FMG 观测到的 20 个活动区,发现变弱在 705 G 开始显现,变弱最大可达 124%。校正后的 FMG 强磁场测量结果恢复了

预期的强度,与 HMI 的观测结果基本一致。Chen 等^[38]还研究了一种基于 Zeeman 分裂直接推求纵向磁场的方法,其对活动区的有效性可望直接应用于 FMG 的观测。

1.2 纵向磁场比较研究

作为磁像仪的 FMG,在轨工作后与地面和空间其他磁像仪观测结果的对比,无疑是重要的一步。对于太阳光球磁场,不同的仪器测量结果应该大体一致。Xu 等^[39]将 FMG 的观测与 HMI 以及怀柔地面太阳磁场望远镜(SMAT)的观测进行了对比,发现 3 台设备对太阳视向磁场结构和空间分布的观测结果基本一致,磁场相关系数达到 0.9;如果只考虑黑子半影,视向磁场相关系数则达到 0.98;在太阳宁静区,FMG 比 HMI 更能观测到弱的磁场信号,说明 FMG 具有更高的磁场信号灵敏度。图 3^[39]给出了一个例子,显示了 FMG 与 HMI、FMG 与 SMAT 以及 HMI 与 SMAT 的磁场相关性比较。正如前文所述^[38],由于饱和的原因,FMG 对黑子本影视向磁场强度的测量显得比 HMI 的测量结果要弱。

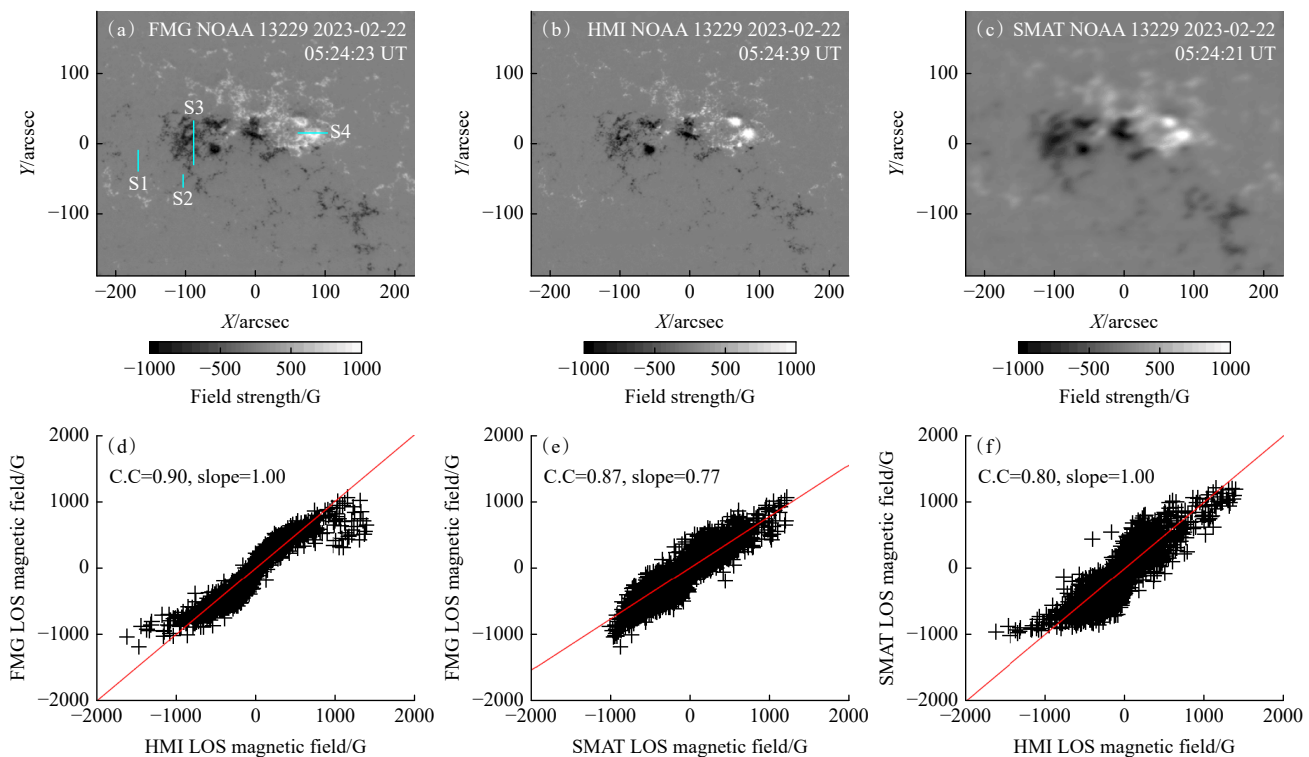


图3 FMG 与 HMI、FMG 与 SMAT 以及 HMI 与 SMAT 的纵向磁场相关性比较

1.3 磁场演化与太阳爆发

FMG 视向磁场观测结果在多波段太阳爆发现象

研究中发挥重要作用。如 Hou 等^[40]研究了一个太阳暗条部分爆发事件,通过对多波段观测资料的分析,

全方位展示了暗条爆发前的结构及形成过程,构建了包含 2 个磁流绳的新的一类“双层”暗条形成图像,FMG 纵向磁场及单色像观测结果结合 HMI 的矢量磁场观测结果,在诊断暗条磁拓扑结构和性质方面发挥了作用。Sun 等^[41]研究了一个造成强地磁暴的太阳源头(SOL2023-11-28)情况,使用多设备(包括 FMG 和 ASO-S 上其他设备)观测结果,分析出日面上存在 3 个磁流绳,发现它们的滑动和相互作用导致 2 个耀斑和 2 个 CME 的形成,而 2 个 CME 在传输过程中的相互作用使地磁暴变强。Song 等^[42]研究了一个初

始过程不同于以往的特殊暗条爆发,横跨活动区的大尺度暗条的爆发受到下面 2 个稍小尺度暗条爆发的驱动,如此多暗条爆发还导致了一个 M6.4 级耀斑的产生, AIA 观测到的暗条叠加在 FMG 视向磁图上(图 4^[42])清楚显示出暗条与磁场的空间位置关系,暗条 F1 和 F2 先爆发, F1、F2 及与大暗条 F3 的相互作用致 F3 爆发,该事件还伴随着一个晕状 CME,并产生了强烈的地磁效应。这类爆发不仅为理解太阳爆发提供了一个新的样本,也为从观测上预报空间天气提供了一条新的线索。

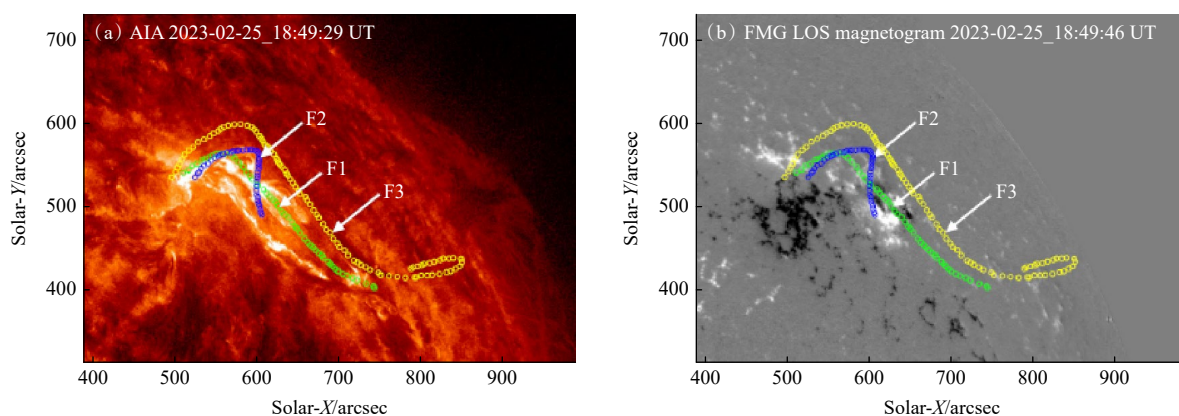


图4 NOAA 13229 活动区暗条 F1、F2 和 F3 分别叠加在 AIA 304(a)和 FMG 视向磁图(b)上

Idrees 等^[43]利用 FMG 和 HMI 观测数据详细研究了活动区 NOAA 13229 中 β 型黑子的衰减,包括黑子面积的衰减和磁通量的衰减,分别考察了磁对消、磁消散、碎片化、水平流汇聚和水平流旋转等因素对黑

子衰减的影响,不同黑子的衰减主导机制可以不同,衰减时间也大不相同,如图 5^[43]中的 S2 黑子的衰减中磁对消发挥主要作用,而 S1 黑子的衰减则是碎片化和磁消散起主要作用。

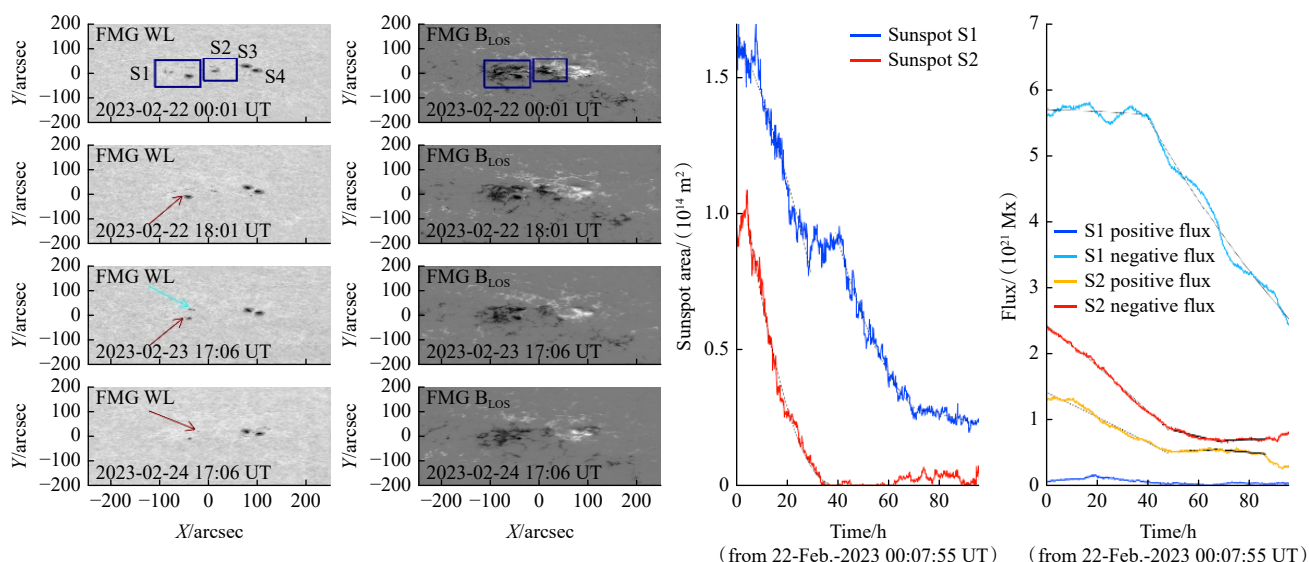


图5 FMG 观测的黑子面积及磁通量衰减

磁螺度是反映日冕磁场结构和演化的一个重要参数,磁螺度的积累与非势磁能相关,最终导致耀斑和 CME 等爆发现象。Yang 等^[44]尝试利用 FMG 视向磁场观测数据来推求磁螺度流量,并将所得结果与基于 HMI 的结果进行对比,两者符号相同且相关性达到 0.98,这一结果表明,FMG 的视向磁场观测数据可以用来可靠计算磁螺度。

2 HXI 早期研究成果

2.1 HXI 原理、标定及算法研究

HXI 是基于空间调制的傅里叶变换间接成像设备,成像最高空间分辨率达到 3.1"。调制函数的获取直接决定图像重构的质量,其中涉及一系列的影响因素。Jiang 等^[45]首先在理想假设下,针对 HXI 构造了一个可以用来全面分析调制函数的完备数学解析模型,进而拓展到含入准直器的变形(扭曲、倾斜、平移)和光栅的厚度等多种非理想因素,其结果不仅得到 GEANT4 模拟的证实,也与之前在地面开展的 HXI 一系列试验结果相吻合。该模型应该是迄今为止这类望远镜最完备的数学模型,直接指导了地面束流实验的方案改进,成功获得了 HXI 准直器正样的调制曲线,国际上首次实现全系统端到端硬 X 射线束流调制测试。该模型在基于 HXI 在轨观测数据的图像重构中发挥了重要作用。

HXI 记录的是来自 91 对光栅的计数,要实现成像还需要选择一定的算法来进行图像重构。在对拉马第高能太阳分光镜成像探测器(RHESSI)的数据处理中,国际上已经发展了超过 10 种具体的成像算法。实际观测中由于不知道真实的源到底怎样,难以判断不同成像算法结果的优劣。Yu 等^[46]采用 AIA/SDO 观测到的极紫外像计算出 DEM(微分发射度),将由此推得的热 X 射线源作为输入图像,结合模拟的点源、双足点源、环状源等,在 RHESSI 框架下通过图像重建来全面比较 10 种成像算法,对图像重建质量的评估采用了多种方法,包括了 Li 等^[47]针对硬 X 射线调制成像新提出的 QuIX 方法。结果显示,EM、PIXON 和 CLEAN 算法最好。该工作还展示了 HXI 的现有算法和成像结果,分析了 CLEAN 算法的一个重要参数 CLEAN beam size,并分别为 RHESSI 和

HXI 获得了该参数的最佳初始设置。这一工作对 HXI 成像算法的开发和改进具有直接的指导意义,已经体现在 HXI 分析软件中。

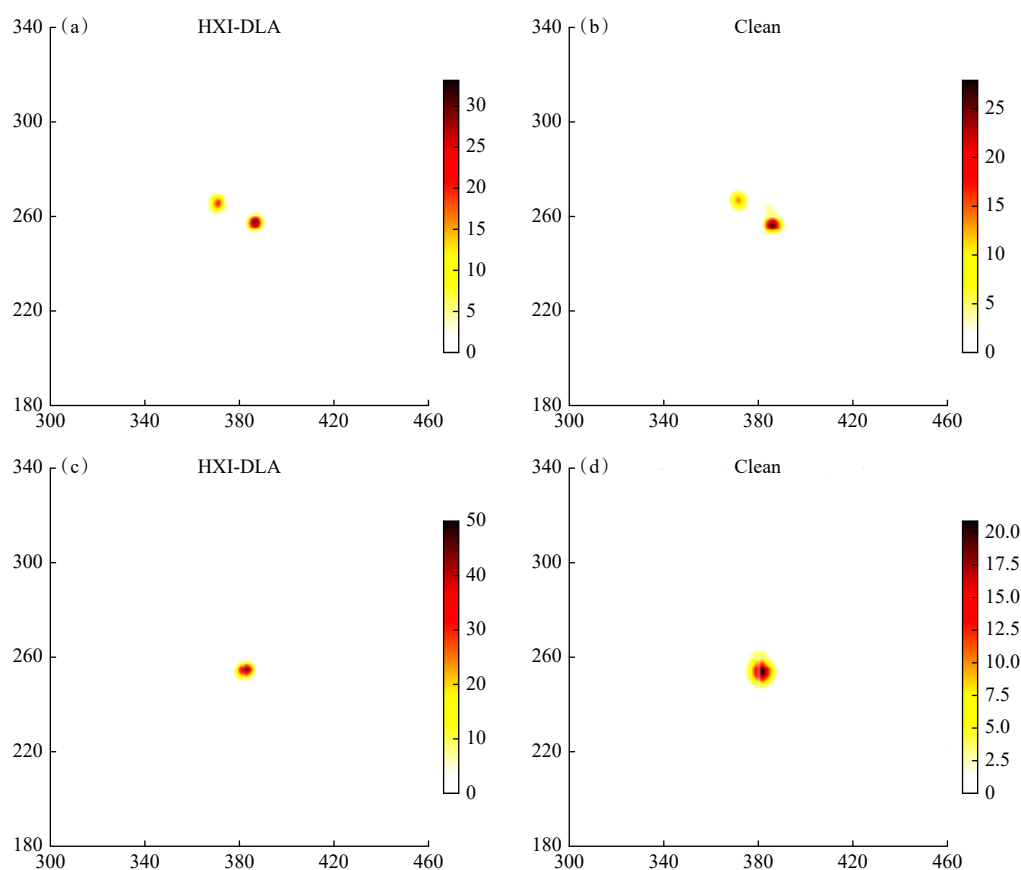
Xia 等^[48]提出了一个基于深度学习的图像重构新算法(DLA),通过 HXI 光栅响应函数和模拟观测数据构建训练集,获取满意的深度学习模型,进而应用到 HXI 实际观测的耀斑事例中,所得耀斑硬 X 射线图像与传统方法 CLEAN 所得结果可以相比拟甚至更好(图 6^[48]),成像过程速度极快且无需额外参数。基于深度学习的该算法的提出是国际上首次,经过进一步的改进和完善,将为用户提供一个全新的选择,成为 HXI 图像重构的基本软件之一。

不同的太阳 HXR 探测器观测同一个对象,应该得到相同的结果。这个看似简单的问题实际证明起来却并不容易,这需要就实际观测的合适样例进行交叉定标,只有完成了交叉定标,才能在不同的观测结果之间进行物理上的比较,这对于不同视角方向上的立体观测比较,得到可靠的诸如加速电子的方向性和三维结构方面的结论尤为重要。Li 等^[49]将 HXI 与在轨的太阳轨道飞行器上的 X 射线成像光谱仪(STIX/SolO)、费米伽马射线太空望远镜上的爆发监测器(GBM/Fermi)、Konus-Wind 等设备进行了能谱的交叉定标研究,这种绝对效率的定标由于不同设备探测器的材料、设计、电子学、轨道环境的差异往往显得非常困难。通过 HXI 多探测器的自定标和多设备间的交叉定标,他们改进了其中一个探测器 D94 的响应矩阵(适当含入铝蒙皮的影响),结果显示 HXI 与其他设备观测的耀斑能谱达到可以接受的一致性。这为接下来不同设备之间的联合研究,尤其是 STIX/SolO 和 HXI 首次 HXR 联合立体诊断加速电子的方向性提供了基础,人们对这一重要成果予以期待。

此外,这期间还产出了一些 HXI 技术相关的成果,如:HXI 副镜的设计、测试、算法和在轨状态^[50-51];HXI 量能器测试系统^[52];HXI 准直器系统^[53];束流实验^[54-55]等。

2.2 HXR 时变及有关研究

HXI 提供了具有空间分辨的不同能量的 HXR 像,这使得研究 HXR 源随时间的变化成为可能。作为 HXI 的一个重要研究成果,Chen 等^[56]详细研究了



(a)(c)为 DLA 算法重构的图像, (b)(d)为 CLEAN 结果

图6 HXI 观测到的 2 个耀斑中 DLA 新算法和 CLEAN 算法的成像比较

HXI 观测到的一个 M6.5 级耀斑 (SOL2023-05-09 03:54 UT) 空间分辨 HXR 源的准周期震荡 (QPP)。HXR 源沿着耀斑带滑动, 滑动过的地方随即出现 EUV 增亮, 通过对图像的小波分析显示 HXR 流量呈现约 23 s 的 QPP 特征, 更惊人的发现是, 耀斑带所在地方的磁场强度和磁通量具有大概相同周期的 QPP 变化。三维 MHD 模拟自洽重现了这一 QPP 重联过程, 从而第一次细致展现了 QPP 的一种全新的图像: HXR 的 QPP 来自耀斑带的滑动磁重联的准周期能量释放, 而 QPP 磁重联本身磁场呈现出周期性的变化, 图 7^[56]显示了该耀斑的总体情况。

HXR 的 QPP 受到很多人的关注。Li 等^[57]和 Shi 等^[58]分别研究了 HXI 观测到的另外 2 个 X 级耀斑的 QPP: X1.1 (SOL2023-06-20 16:42 UT) 和 X1.2 (SOL2023-01-06 00:57 UT)。结合 AIA/SDO 等其他观测, 前者呈现出日冕环的无衰减 Kink 震荡, 先后连续 5 个脉动振幅没有明显衰减 (图 8^[57]), 紫外、HXR、微波等多波段光变均显示周期在 100~130 s 的 QPP

特征, 不同温度的日冕环具有相同周期的震荡且与脉冲相 HXR 的 QPP 同时观测到, 意味着能量的重复释放是触发这类 QPP 的主要原因; 后者从 HXI 对足点成像中找到约 27 s 的 HXR QPP, 且与 HXR 流量成负相关的 HXR 能谱指数也呈同周期 QPP 特征, 说明注入耀斑环足点的非热电子束本身是观测 QPP 的原因。一个对 HXI 观测到的更长准周期 (200 s) X6.4 耀斑 (SOL2024-02-22 22:08 UT) 研究^[59]也显示, 其 QPP 同样是由周期性磁重联致电子加速所造成的。

HXR 光变研究的另一个例子是耀斑 Neupert 效应。Li 等^[60]利用 HXI 最初 7 个月所获得的 149 个耀斑事例, 统计研究了太阳活动 25 周上升期的耀斑 Neupert 效应。通过 20~50 keV 的 HXR 时间积分 (fluence) 与 GOES 软 X 射线 (SXR) 流量比较, 证明 HXI 观测到太阳活动 25 周上升期的耀斑满足 Neupert 效应。

2.3 HXI 与 STIX 联合研究

自从 HXI 投入观测以来, HXI 与 STIX 同时观测

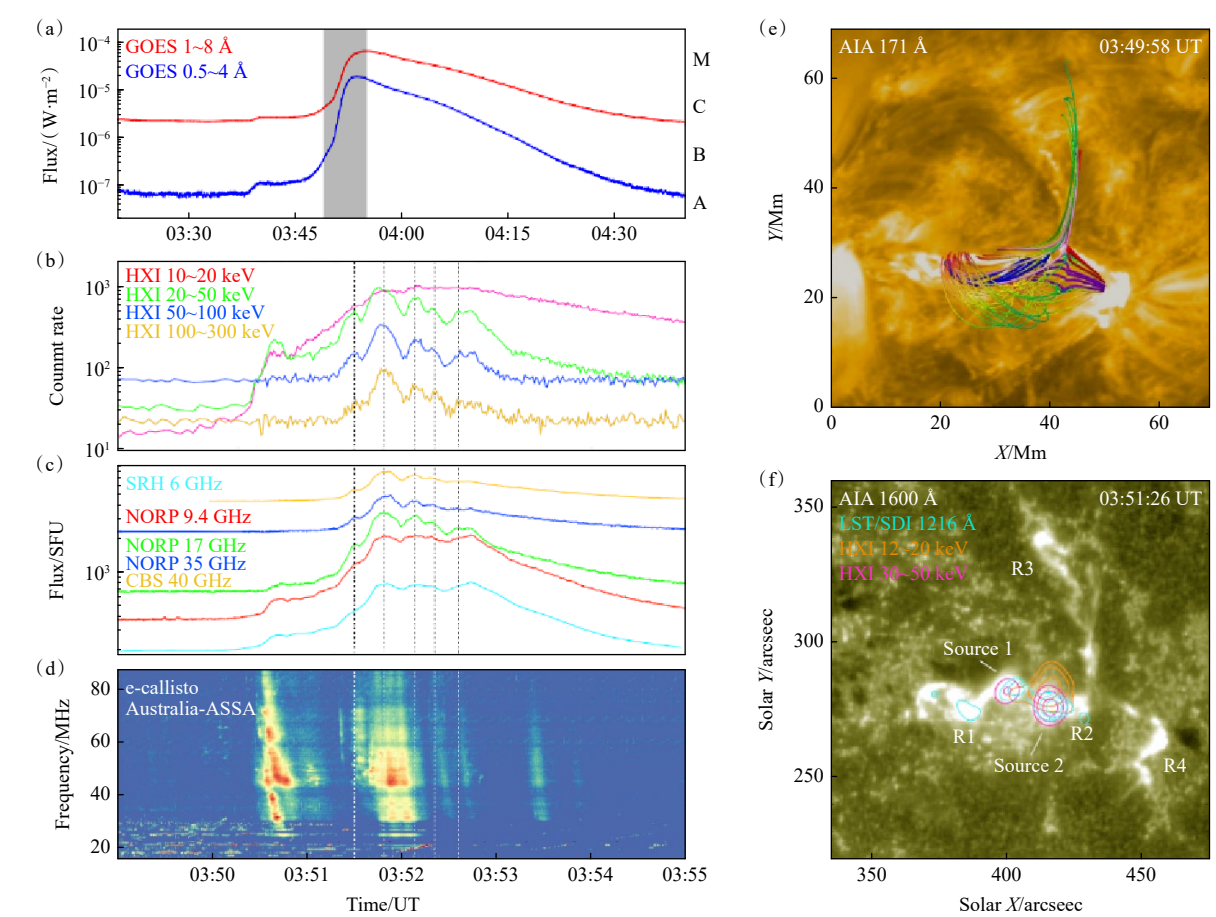


图7 用滑动磁重联来解释 HXI 观测到的 QPP

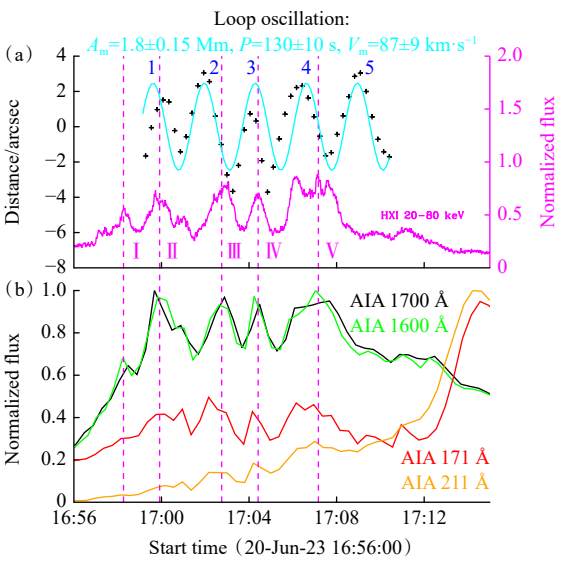


图8 耀斑环震荡与 HXI 光变的比较

到的耀斑已达数百例,其中不乏时间结构完整和观测视角合适的事例。结合能谱和图像交叉定标结果的进展,这些事例为接下来的立体成像联合诊断耀斑加速粒子机制和三维结构提供了史无前例的机会。

Mrozek 等^[61]对一个失败暗条爆发所伴随的 M1.5 级耀斑(SOL2023-02-08 20:05 UT)初步尝试了 HXI 和 STIX 立体观测三维形态诊断研究,当时 ASO-S 和 SoLo 观测的夹角为 31.5° ,如此大的夹角足以反映立体探测形态上的差异。图 9^[61]显示了 HXI 和 STIX 各自成像的结果(图 9(a)),图 9(c)是卡通式解释两者观测结果在三维结构上的一致性,即 HXR 源所在的耀斑环并不垂直于太阳表面,两者观测的自治性可以定出耀斑环真实的三维结构。

Ryan 等^[62]研究了 HXI 和 STIX 同时观测到的另一个 X5.0 级大耀斑(SOL2023-12-31 21:55 UT),ASO-S 和 SoLo 当时观测视角差为 18° ,虽然视角差不大,但 HXI 和 STIX 的观测时间段相对完整,成像细节上的差异仍能反映出三维几何信息,联合 HXI 和 STIX 立体成像(图 10^[62]),精确获取了热环顶源和 2 个非热足点源的位置,得到耀斑环为椭圆几何形状且与法向存在 22.8° 的夹角。随着仪器交叉定标的完善,三维联合观测研究将呈现更多重要的结果。

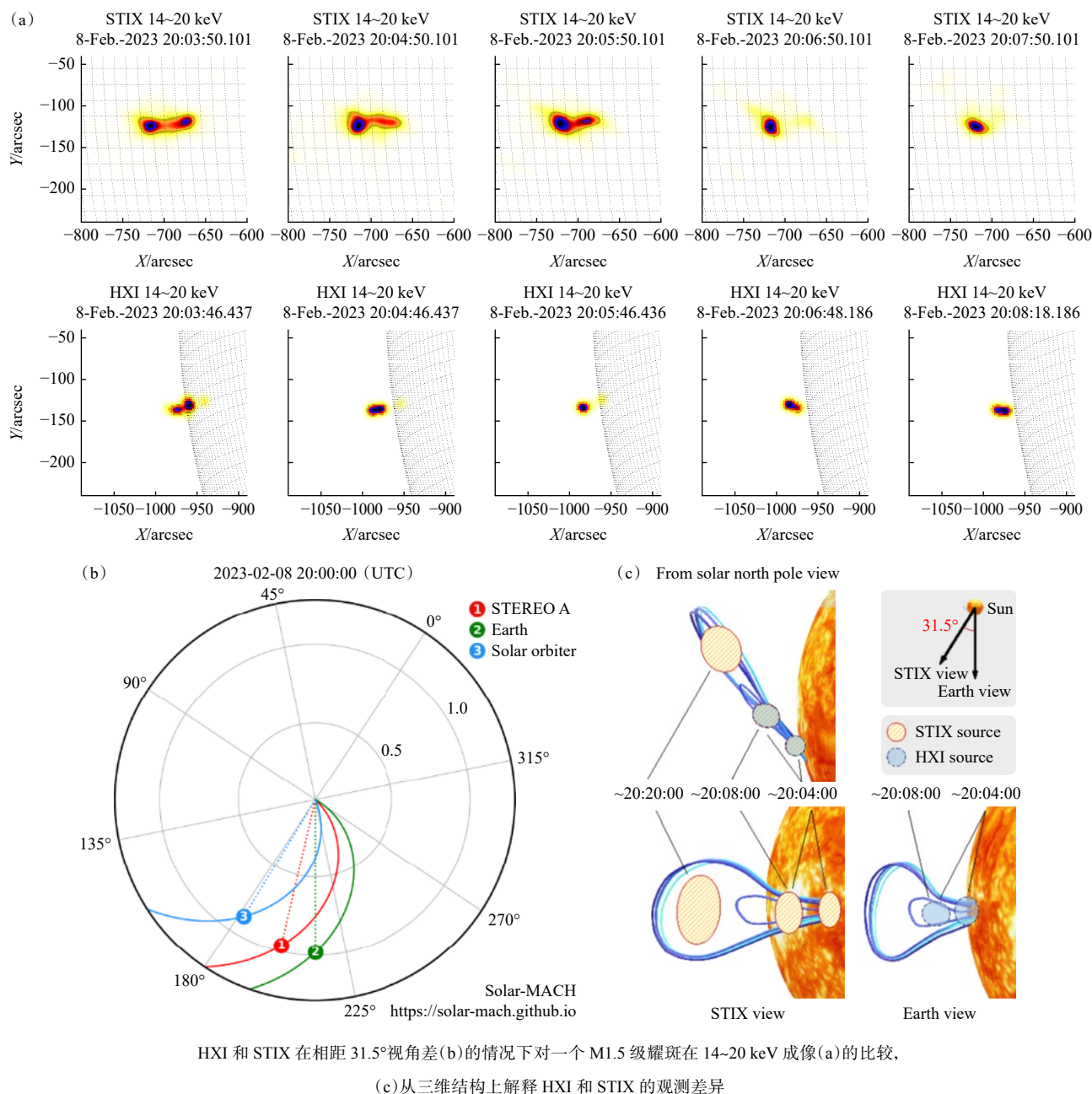


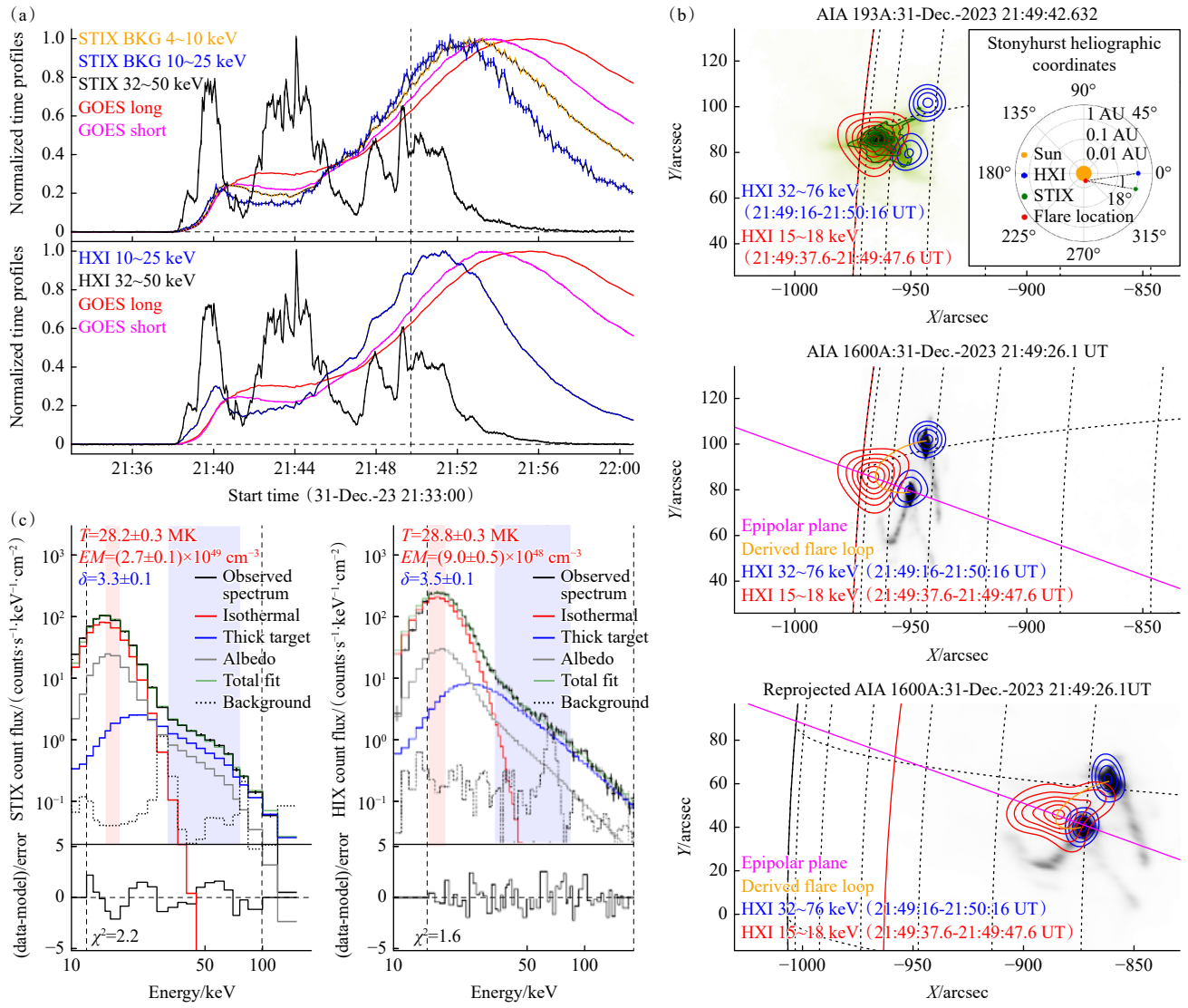
图9 HXI 和 STIX 从不同视角同时观测 1 个耀斑及推测的三维结构

2.4 HXI 相关多波段研究

Shamsutdinova 等^[63]利用西伯利亚射电日像仪 (SRH) 和 HXI 对一个 C6.6 级东边缘耀斑 (SOL2023-02-5 3:36 UT) 的同时观测, 研究了耀斑能量释放过程的自洽经验模型。通过对微波和 HXR 能谱和成像的分析, 得到耀斑主要能量释放结构是一个致密的环, 谱分析显示耀斑早期是热辐射, 很快由加热转为粒子的加速, 推求的微波和 HXR 能谱一致性说明它们来自同源的加速粒子束, 且呈现典型的软硬软变化特征。

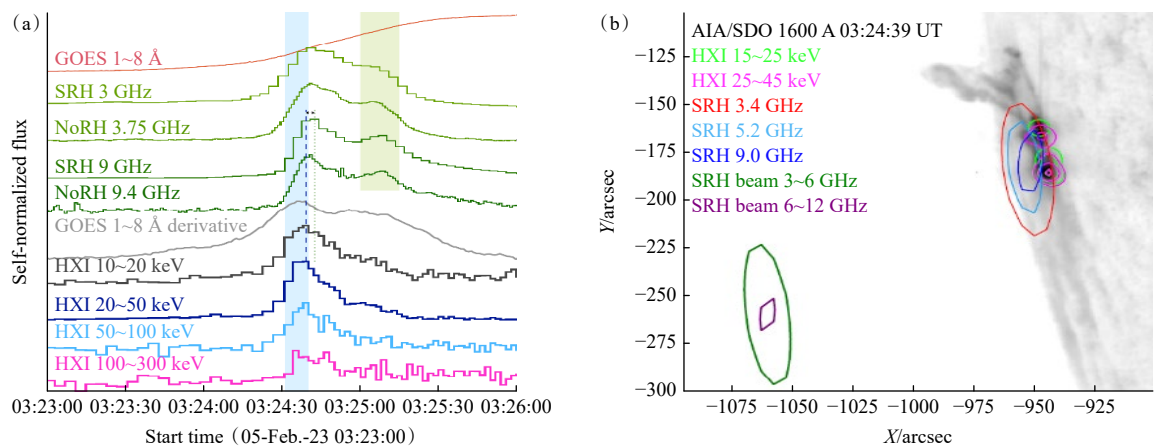
图 11^[63]显示了该耀斑 SRH 微波、HXI HXR 及 GOES SXR 光变曲线的比较, 以及 SRH 微波和 HXI HXR 像的比较。Kuznetsov 等^[64]对 SRH 观测到的一个 M5.8 耀斑 (SOL2023-03-06 2:32 UT) 以及 Wu 等^[65]对 SRH 观测到的一个 M6.5 耀斑 (SOL2023-05-09 03:54 UT) 研究中也使用了 HXI 的观测, 前者阐述了耀斑与暗条爆发的关系, 后者揭示耀斑加速电子起源于环顶。

Zheng 等^[66]从另一个侧面研究了 X5.0 级大耀斑



(a)HXI 和 STIX 在相距 18°视角差的情况下对一个 X5 级耀斑观测到的光变及热和(b)非热成像结果比较
(为保持图像分辨率一致性, HXI 未使用全部探测器); (c)能谱拟合的比较

图 10 HXI 和 STIX 观测联合诊断



(a)C6.6 级耀斑 SRH 微波、HXI HXR 及 GOES SXR 光变曲线的比较; (b)SRH 微波和 HXI HXR 像的比较

图 11 HXI 与 SRH 观测联合诊断

(SOL2023-12-31 21:55 UT), 提出了爆发日珥瓦解的“双响鞭炮”模型, 即爆发日珥的瓦解伴生了 CME 两个不同的核分量。在这个图像中, HXI 光变所表征的能量释放过程以及 SCI/LST 在弥补 CME 演化视场空缺方面发挥了一定的作用。Zhang 等^[67]在对 2023 年 9 月 11 日暗条相互作用产生 CME 及 II 型射电暴研究中, 使用了 HXI 光变来标定暗条的爆发。Hou 等^[68]利用多波段观测诊断耀斑电流片双向流, 以及 Gou 等^[69]研究一个 M1.2 耀斑中日冕喷流与迷你暗条的关系时, 均采用了 HXI 观测对耀斑进行 HXR 成像, 以确定耀斑的源区。

Hudson 等^[70]使用了包括 HXI 和 SDI 在内的观测数据, 研究了一个早期脉冲耀斑的地磁效应, 该地磁效应耀斑与通常地磁效应耀斑不同, 后者的电离层过电离往往与耀斑 SXR 时间轮廓相对应, 而所研究的 SOL2024-03-10(M7.4)地磁效应耀斑却与耀斑早期脉冲高能辐射相对应。这被认为是一种新现象。此外, HXI 观测也被应用到太阳高能粒子(SEP)事件的研究中, Firoz 等^[71]研究了 2023 年 8 月 5 日与 M1.6 和 X1.6 耀斑相对应的 2 个 SEP 事件, HXI 光变和成像对判断 SEP 是源于耀斑还是 CME 起到关键作用。

3 LST 早期研究成果

3.1 白光耀斑研究

白光耀斑(WLF)研究应该是现阶段 ASO-S 卫星的一个标志性观测研究成果之一。众所周知, WLF 曾经被认为是一个比较罕见的现象, 后来随着观测事例逐渐增多, WLF 慢慢褪去神秘的面纱, 但实际上, 有关 WLF 的观测和研究非常有限。Jing 等^[72]利用 WST/LST 最初约 7 个月的观测数据, 提取了共 205 个 M1.0 以上耀斑, 从中发现有 49 个耀斑存在 360 nm 连续谱增强, 即 23.9% 的 M1.0 级以上耀斑是 WLF, 这一结果给出了白光耀斑不再罕见的一个具体指标, 《Solar Physics》主编为此推荐该文为亮点文章。此外, 他们还发现耀斑级别越高, 是 WLF 的概率越大, 大于 X1.0 的 7 个耀斑样本均是 WLF; 360 nm 连续谱增强平均为 19.4%; 平均持续时间为 10.3 min; 平均增强和平均持续时间均与 SXR 峰值流量具有一定的相关性; 连续谱增强的峰值在时间上与 HXR 峰值相对

应; WLF 呈现边缘增多(图 12^[72])且连续谱增强也临边变大的趋势等。这一系列的结果, 大大丰富了人们对 WLF, 特别是对巴尔末连续谱 WLF 的认识。

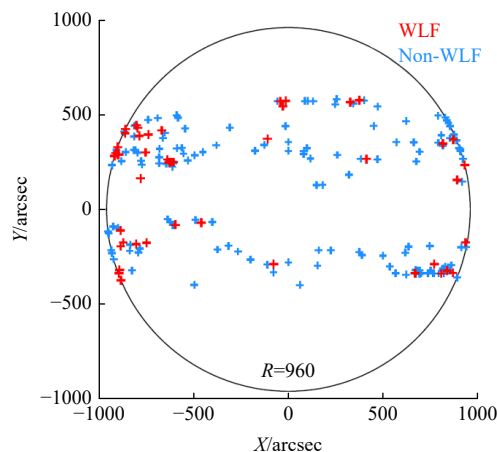


图 12 WST/LST 在轨 7 个月观测到的所有 M1.0 以上耀斑

作为 WLF 重要成果的组成部分, Li 等^[73]对 WST/LST 观测到的一个 C2.3 级 WLF(SOL2022-12-20 04:10 UT)开展个例研究, 辅以 CHASE 和 HMI 观测, 获得了在宽波段范围连续谱的增强: 对白光增强区 1, 在 360 nm、617.3 nm、656.9 nm 连续谱增强分别为 4.7%、3.2%、3.9%; 对白光增强区 2, 在 360 nm、617.3 nm、656.9 nm 连续谱增强分别为 1.9%、3.0%、4.3%。结合 HXI 对该耀斑的观测, 发现白光增强区与 HXR 足点在空间位置上相一致, 说明是非热电子束加热大气深层致连续谱增强。

除了小级别 WLF 个例研究, Li 等^[74]研究了 WST 观测到的 2 个 X 级 WLF: X2.1 (SOL2023-03-03 17:52 UT) 和 X1.5 (SOL2023-08-07 20:46 UT), 前者连续谱增强来自于耀斑带(图 13^[74]), 连续谱增强极大与 HXR 峰在时间上相对应, 说明是非热电子束直接加热或间接加热致连续谱增强; 后者发生在日面边缘, 连续谱增强来自耀斑环, 其连续谱光变与 1700 Å 像对应且持续到耀斑后相, 与耀斑热等离子体紧密相关。X2.1 WLF 连续谱平均增强为: 56%(360 nm)、13%(617.3 nm)、30%(656.9 nm)。Li 等^[75]在一个 X6.4 (SOL2024-02-22 22:08 UT) 的 WLF 连续谱光变中还发现长周期的 QPP 现象, 研究得出白光 QPP 是由于逃逸自黑子半影中慢磁声波的调制。2024 年 5 月, NOAA 13664 活动区连续产生了 12 个 X 级耀斑, 这

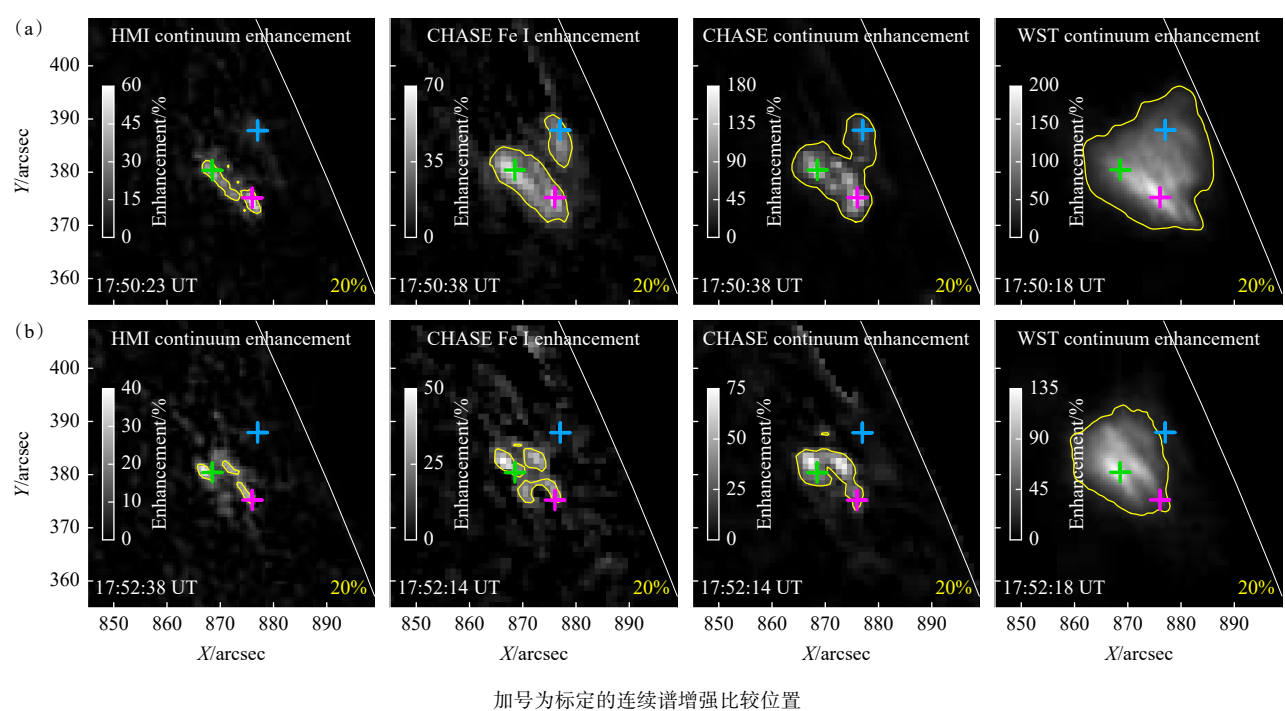


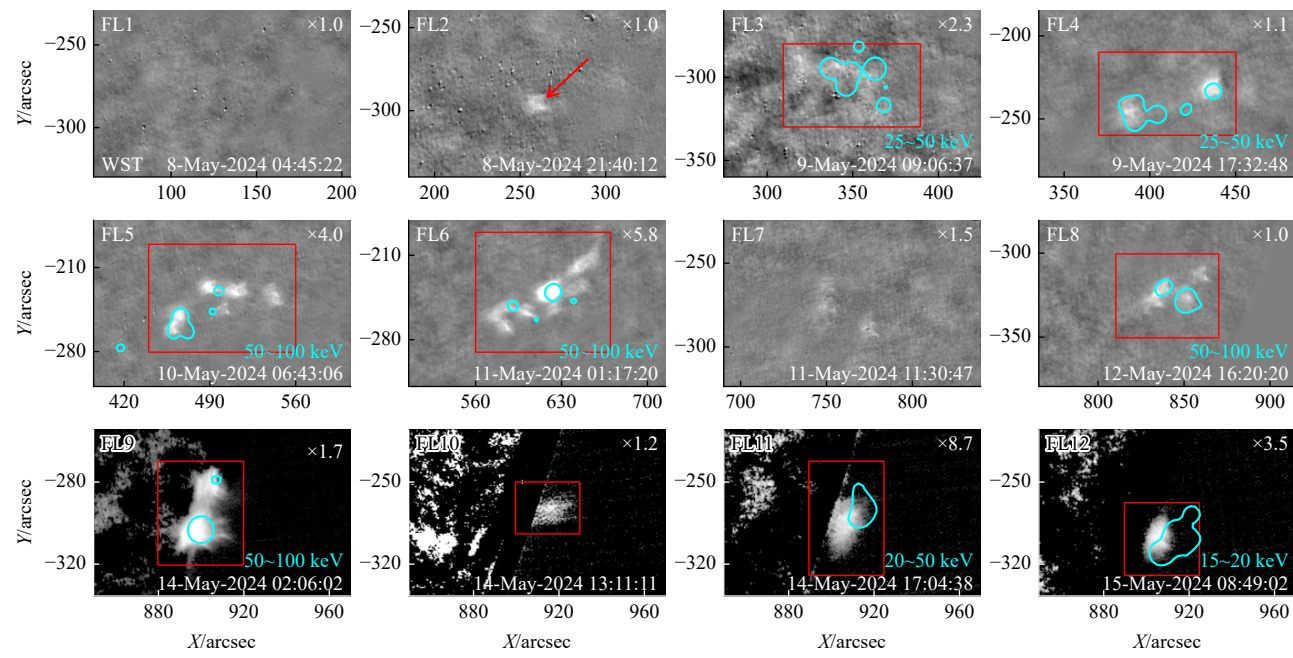
图 13 WST/LST 观测到的 X2.1 白光耀斑形态和连续谱增强(最右边)与其他观测的比较

为研究 WLF 提供了非常好的样本,Li 等^[76]发现其中 11 个有白光连续谱增强, 360 nm(WST/ASO-S)和 617.3 nm(HMI/SDO)增强区可发生在黑子外、半影区和本影区,可来自耀斑带和耀斑环(乃至物质喷发),且前者的持续时间、强度增强水平,甚至与 HXR 的关

联都比后者要显著。图 14^[76]显示了 WST/ASO-S 观测到的这 12 个耀斑 360 nm 差分像,图中蓝色等值线 (20%)是 HXI/ASO-S 观测到的 HXR 源区。

3.2 莱曼阿尔法谱线及 LST 有关研究

ASO-S 卫星发射前,针对 LST 莱曼阿尔法观测



蓝色等值线(20%)是 HXI/ASO-S 观测到的 HXR 源区

图 14 WST/ASO-S 观测的 2024 年 5 月 12 个 X 级耀斑 360 nm 差分像

解释的预先研究就已经开展。例如, Zhao 等^[77]利用日珥—暗腔的 MHD 模拟结果作为输入, 合成了日珥—暗腔莱曼阿尔法辐射, 以模拟日面边缘 SCI/LST 观测视场内的爆发日珥情况, 展示出 LST 可以观测到从爆发日珥到 CME 产生, 特别是 CME 的亮核和空洞结构, 这在 LST 后来的观测中得到证实。Ying 等^[78]为了获取 CME 的温度, 精确计算了莱曼阿尔法波段的强度, 在三维 MHD 模拟 CME 和其所驱动的激波基础上, 通过合成了 UV、WL 像的形态研究它们与各种假设的关系, 得到诸如日面莱曼阿尔法强度如何影响日冕莱曼阿尔法强度、几何散射对日冕莱曼阿尔法强度的影响以及不同温度假设对 CME 结构莱曼阿尔法强度的影响等一系列有意义的结果, 这些结果可望应用到 LST 观测中。

Lu 等^[79]针对 SDI/LST 观测如何自动识别太阳耀斑事件, 提出了一个新的算法, 该算法基于当地的强度变化, 可以自动提取包括事件的位置、开始时间、结束时间, 特别是可以提取同时发生的不同事件。以一个月的 SDI 观测为例, 共识别出 226 个事件, 与 GOES 同期结果相比较, M 级以上事件的重合率为 73%。这一差异隐含着 SXR 事件和莱曼阿尔法事件背后物理的不同, 值得深入研究。李敬伟等^[80]展示了 WST 和 SDI 在轨平场定标的偏摆方案及获得的平场图像和随时间的演化情况。

有关 LST 观测数据改进的一个重要进展是数据重构, SDI/LST 和 WST/LST 在轨结果显示实际空间分辨率远未达到设计和地面的测试值, 这使得基于 LST 观测研究日面细节困扰纷纷。Liu 等^[81]采用点扩散函数和一个特别的图像优化方法(SPIBOA)来改善 SDI 的观测数据, 在无法获取在轨点扩散函数的情况下, 借鉴机器学习, 估算出比较准确的点扩散函数, 进而反卷积获得校正后的 SDI 图像, 通过大量数据实验, 证明校正后的 SDI 空间分辨率可以提高 3 倍以上。该校正算法已经集成到 SDI 常规数据处理软件中, 为基于 SDI 观测研究提供了一个强有力的支撑。

实际上, 目前已经存在一些太阳莱曼阿尔法波段观测, 但基本上都局限于总流量观测, Greator 等^[82]以 3 个 M 级耀斑为例, 比较了不同仪器观测结果, 发现不同仪器间相对流量差异有限, 但流量增强等参数

差异可以很大, 甚至相差 5 倍, 这可能与仪器光谱响应及波段范围等因素有关, 这一结果更加说明 SDI 在莱曼阿尔法波段成像的重要性。

3.3 基于 LST 的观测研究

Lya 卡林顿图可提供跨越 360°经度范围的全球日面莱曼阿尔法辐射强度分布, 是日冕莱曼阿尔法辐射的关键输入源, 为国内外莱曼阿尔法日冕观测设备提供更准确的入射日面辐射数据, 从而精确诊断太阳爆发如日冕物质抛射、日珥爆发的相关物理过程。但之前并没有直接的莱曼阿尔法波段辐射的卡林顿图, 有关莱曼阿尔法卡林顿图是从 30.4 nm 的卡林顿图推演出来。基于 SDI/LST 观测, Li 等^[83]首次获取了直接的莱曼阿尔法卡林顿图(图 15^[83]), 这是 LST 的代表性成果之一。与之前用间接方法所得到的结果进行对比, 发现有 38% 的差异; 与磁场的卡林顿图比较, 活动区呈现的莱曼阿尔法辐射较强, 但黑子本影处莱曼阿尔法辐射弱。

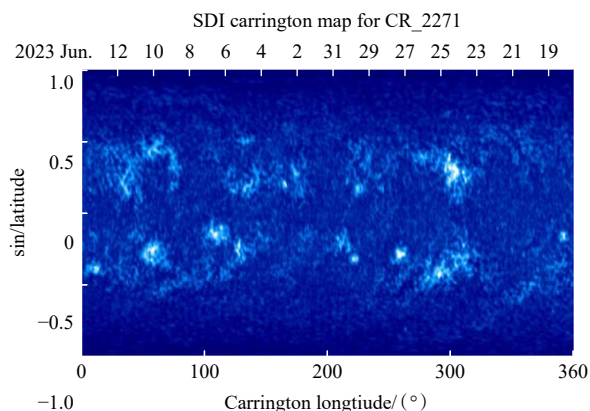
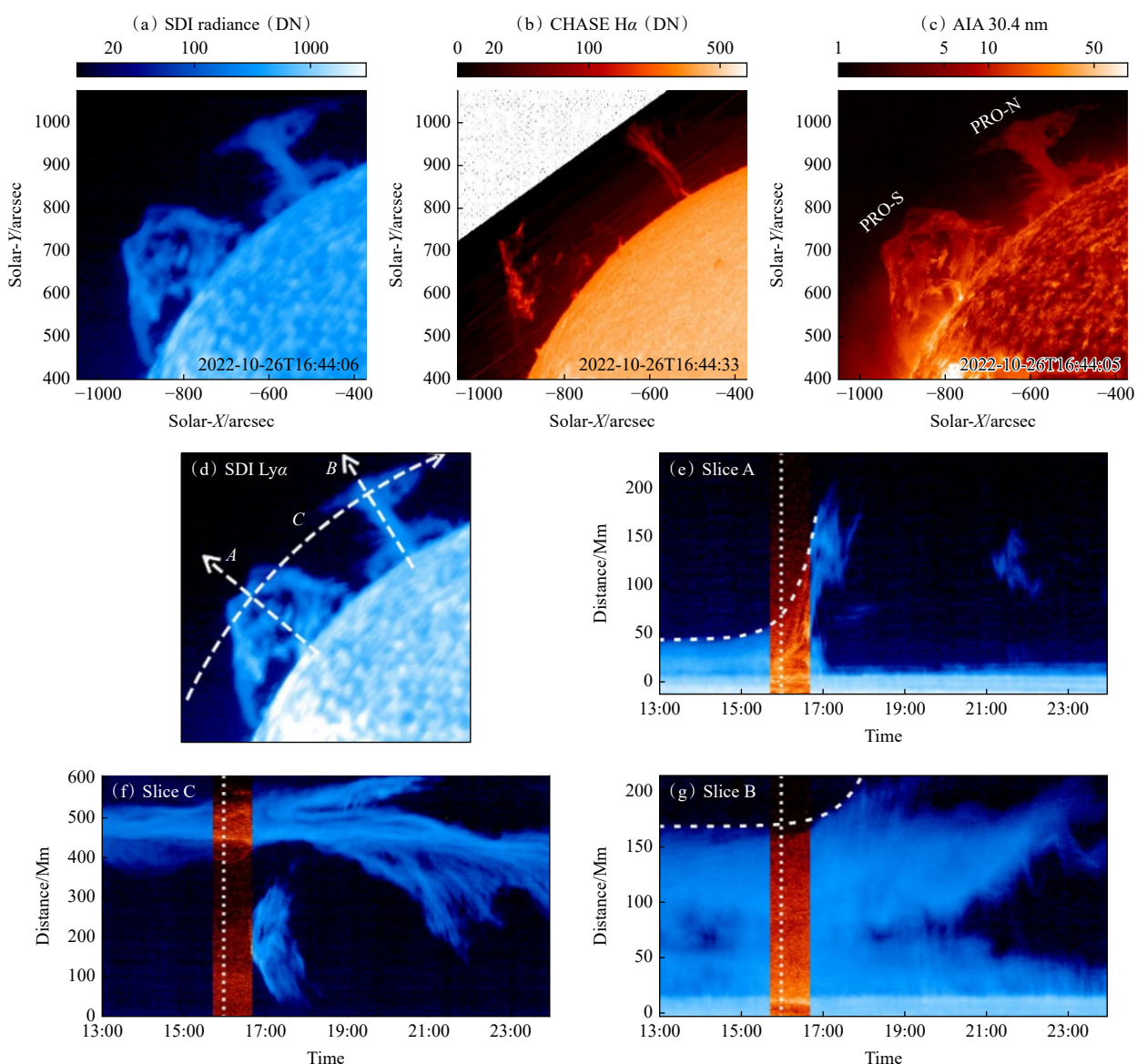


图 15 基于 SDI/LST 观测获得的国际上首幅莱曼阿尔法卡林顿图

Xue 等^[84]研究了 2022 年 10 月 26 日 2 个感应的失败日珥爆发(图 16^[84]), 这也是 LST 开机后最早观测到的莱曼阿尔法日珥案例。2 个看似无关的日珥实际上联系紧密, 南边的日珥由于 Kink 不稳定性而爆发, 解扭曲过程中形成下面的耀斑带, 但随后发生的磁重联使得爆发失败。南边的日珥上方与北边的日珥有磁流管相通, 爆发带动北面的日珥也出现上升, 但由于南面日珥爆发出现的质量“真空”, 使得北边日珥的物质通过磁流管灾变式向南边日珥排放。这就提出了一个新的图像, 日珥爆发可以终止于通过磁流管的质量排放。



(a) 2个日珥的SDI观测; (b) 2个日珥的CHASE观测; (c) 2个日珥的SDO观测; (d) 切片图; (e)~(g) 2个日珥演变过程及联系

图16 2022年10月26日2个日珥的SDI和CHASE及SDO观测

Wei等^[85]研究了SDI观测到的一对相交的日珥(图17^[85]),它们同时上升。下方的日珥在上升过程中上部出现扭曲增加并随后消失,很可能通过重联传递到上方日珥,这一扭曲的转移导致下方日珥爆发失败,而上方日珥开始出现转动,且腿部出现剪切运动。这说明,扭曲的转移和释放在限制日珥爆发方面具有重要作用。

Shi等^[86]利用SDI观测研究了一个X射线源在耀斑双带上不对称的耀斑(C4.4, SOL2023-03-20 15:34 UT),这个耀斑热辐射占主导,X射线辐射在一个带上很弱(图18^[86])。结合AIA 304和STIX/Solo观测结果,并通过非线性磁场外推,结果显示环顶距离双带

足点的距离相差很大,热电子更容易注入距离较近的足点,从而对X射线源不对称性给出一个解释,即环顶距离两足点的不对称性是造成X射线源不对称性的主要原因,磁镜效应占次要因素。

此外,Zhang等^[87]在多波段研究耀斑触发的EUV波引起周边宁静暗条震荡时用到SDI观测到的光变曲线;宁静暗条随后失去平衡,上升到SCIUV/ASO-S观测到的直至2.2个太阳半径处的形态(图19^[88]),进而形成一个典型三分量结构的CME^[88];Chi等^[89]研究了相继发生的3个CME及激波与CME的相互作用,其中SCIUV/ASO-S观测到第2个CME形成早期的形态。

4 展望

在 ASO-S 完成在轨测试和交付不到 1 年半的时

间节点上,总结了利用 ASO-S 观测数据或与 ASO-S 仪器性能本身有关的研究成果。基于 ASO-S 观测数据所展开的研究工作呈现蓬勃发展之势,其学术产出

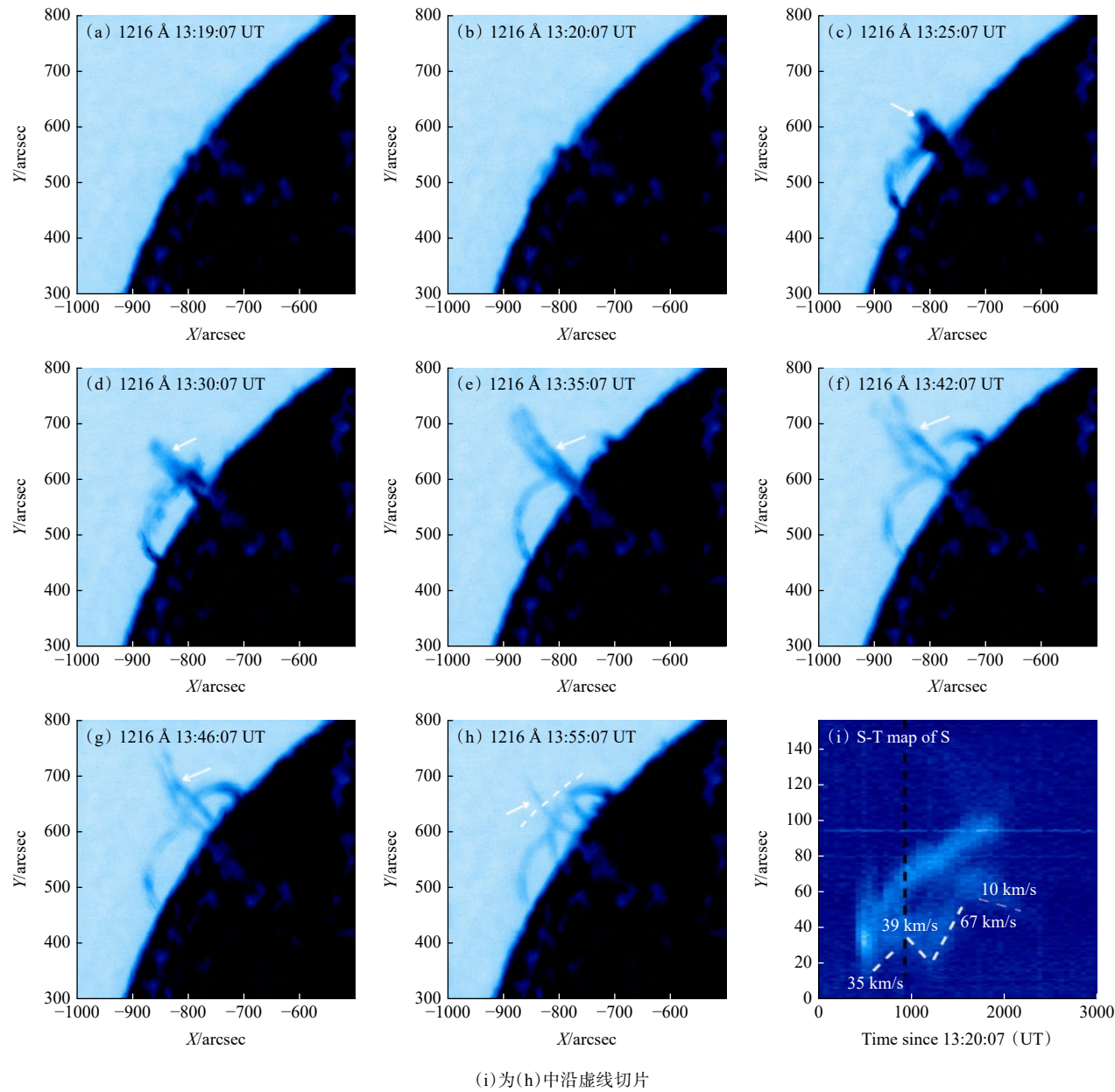
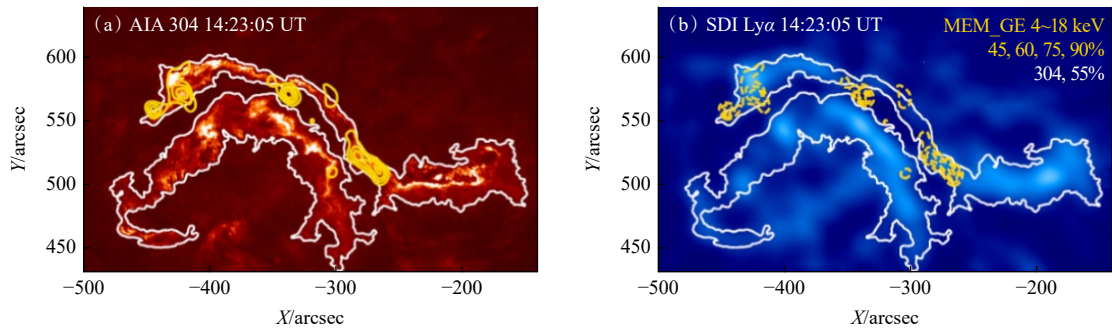
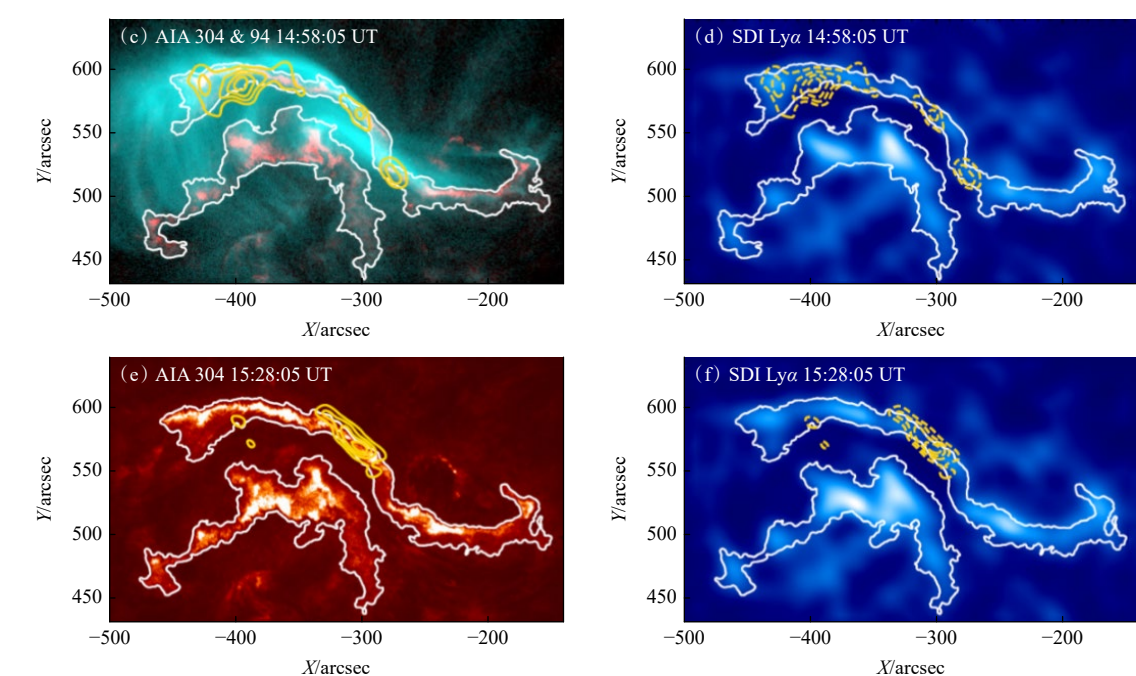


图 17 SDI/LST 观测到的交叉双日珥随时间的演化





HXR 源呈现明显的不对称性

图 18 2023 年 3 月 20 日 C4.4 级耀斑的 SDI 和 AIA 观测

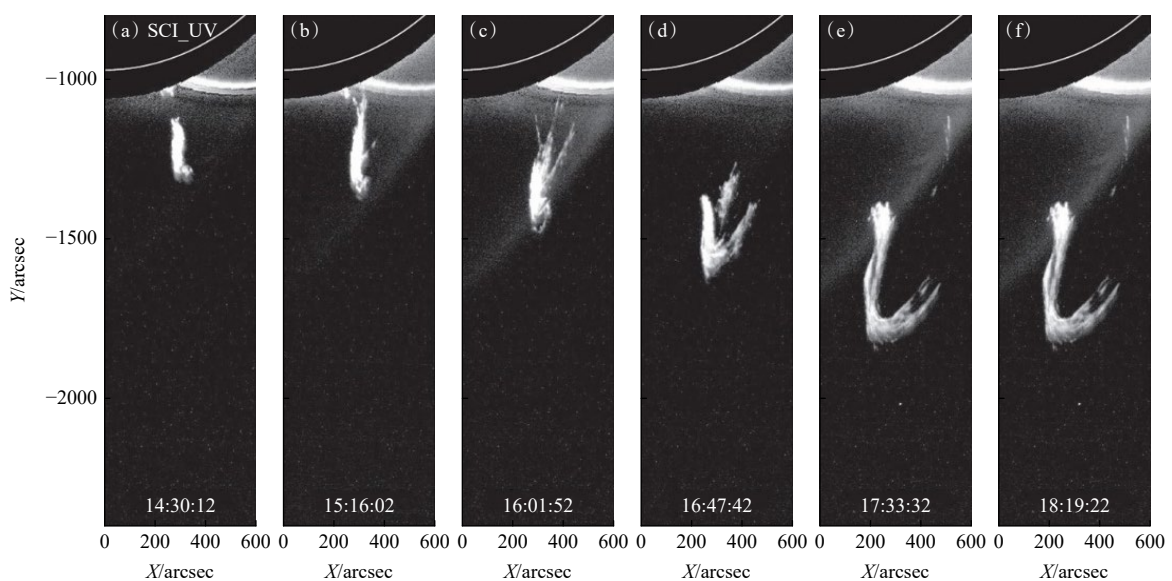


图 19 SCIUV/ASO-S 观测到的宁静暗条爆发形成 CME 的早期过程

与科学影响持续扩大。随着 ASO-S 数据分析中心服务功能的进一步完善,特别是 ASO-S 在完成 HXI 定标和 SCI 非正常观测数据处理能力进一步提升之后,可以预期越来越多的国内外同行将使用 ASO-S 观测数据开展研究,结合国际上其他先进的太阳观测卫星及中国的“羲和号”卫星、“风云 3 号”卫星、搭载仪器“SUTRI”以及地面观测设备,联合开展多波段乃至立体观测研究,可望在“一磁两暴”的本质及关联性方面

取得重要进展。ASO-S 设计寿命为 4 年,期待它能在轨运行更长的时间,以完整覆盖太阳活动 25 周峰年,最终实现 ASO-S 卫星“一磁两暴”的科学目标。

参考文献(References)

[1] 甘为群, 常进, 马宇蓓. 中国空间太阳物理40年[J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 76-83.
[2] Li C, Fang C, Li Z, et al. The Chinese Ha solar explorer

- (CHASE) mission: An overview[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65(8): 289602.
- [3] Gan W Q, Zhu C, Chen B, et al. China's first comprehensive space solar observatory[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2023, 47(2): 441–445.
- [4] Gan W Q, Feng L, Su Y. A Chinese solar observatory in space[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6(1): 165.
- [5] Gan W Q, Deng Y Y, Li H, et al. ASO-S: Advanced space-based solar observatory[C]//*Proceedings of Solar Physics and Space Weather Instrumentation VI*. Washington: SPIE, 2015, 9604: 96040T.
- [6] Gan W Q, Feng L. Exploring solar eruptions and their origins[J]. *Taikong*, 2015, 5: 1–11.
- [7] 吴季, 王赤, 范全林. 中国科学院空间科学战略性先导科技专项实施11年回顾与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(8): 1019–1030.
- [8] Zhang S N, Yan Y H, Gan W Q. China's space astronomy and solar physics in 2011–2012[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2012, 32(5): 605–617.
- [9] Gan W Q. Space solar physics in 2012–2014[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(5): 563.
- [10] Gan W Q. Space solar physics in China: 2014–2016[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, 36(5): 636–638.
- [11] Gan W Q, Fan Q L. Space solar physics in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(5): 662–664.
- [12] Gan W Q. Status of the advanced space-based solar observatory[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(5): 704–706.
- [13] Gan W Q. Progress report on ASO-S[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(4): 565–567.
- [14] Gan W Q. Progress report on ASO-S: 2022–2024[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(4): 687–689.
- [15] Gan W Q, Ding M D, Huang Y, et al. Preface: Advanced space-based solar observatory (ASO-S)[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 155.
- [16] 黄宇, 陈鹏飞, 甘为群. ASO-S中文专辑: 序言[J]. *天文学报*, 2020, 61(4): 32.
- [17] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. Advanced space-based solar observatory (ASO-S): An overview[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 156.
- [18] Deng Y Y, Zhang H Y, Yang J F, et al. Design of the full-disk MagnetoGraph (FMG) onboard the ASO-S[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 157.
- [19] Li H, Chen B, Feng L, et al. The Lyman-alpha solar telescope (LST) for the ASO-S mission: I. scientific objectives and overview[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 158.
- [20] Chen B, Li H, Song K F, et al. The Lyman-alpha Solar Telescope (LST) for the ASO-S mission: II. design of LST[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 159.
- [21] Zhang Z, Chen D Y, Wu J, et al. Hard X-ray imager (HXI) onboard the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 160.
- [22] Su J T, Bai X Y, Chen J, et al. Data reduction and calibration of the FMG onboard ASO-S[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 161.
- [23] Feng L, Li H, Chen B, et al. The Lyman-alpha Solar Telescope (LST) for the ASO-S mission-III. data and potential diagnostics[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 162.
- [24] Su Y, Liu W, Li Y P, et al. Simulations and software development for the hard X-ray imager onboard ASO-S[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 163.
- [25] Huang Y, Li H, Gan W Q, et al. The science operations and data center (SODC) of the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 164.
- [26] Li C, Fang C, Li Z, et al. Chinese H-alpha Solar Explorer (CHASE)-a complementary space mission to the ASO-S[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 165.
- [27] Vial J C. The synergy between the payloads on the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 166.
- [28] Krucker S, Hurford G J, Su Y, et al. Joint hard X-ray observations with ASO-S/HXI and SO/STIX[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 167.
- [29] Vourlidas A. Ly-alpha science from the LST aboard the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 168.
- [30] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. The Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S)[J]. *Solar Physics*, 2023, 298: 68.
- [31] Bai X Y, Deng Y Y, Zhang H Y, et al. Calibration and performance of the full-disk vector MagnetoGraph (FMG) on board the advanced space-based solar observatory (ASO-S)[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(11): 157.
- [32] Su Y, Zhang Z, Chen W, et al. The tests and calibrations of the hard X-ray imager aboard ASO-S[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(10): 153.
- [33] Chen B, Feng L, Zhang G, et al. LST inflight performances and Calibrations[J]. *Solar Physics*, 2024, 299: 118.
- [34] Huang Y, Li Y P, Liu S, et al. Science operation and data analysis center of the advanced space-based solar observatory (ASO-S) mission[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(9): 135.

- [35] Liu S, Su J T, Bai X Y, et al. The magnetic-field calibration of the full-disk magnetograph onboard the advanced space based solar observatory (ASO-S/FMG)[J]. Solar Physics, 2023, 298(12): 141.
- [36] Liu S, Su J T, Bai X Y, et al. A study on magnetic-sensitivity wavelength position of the working line used by the full-disk magnetograph onboard the advanced space based solar observatory (ASO-S/FMG)[J]. Solar Physics, 2024, 299(5): 70.
- [37] Xu H Q, Su J T, Liu S, et al. Correction for the weakening magnetic field within the sunspot *Umbra* observed by ASO-S/FMG[J]. Solar Physics, 2024, 299(6): 82.
- [38] Chen J, Su J T, Xie W B, et al. Direct measurement of the longitudinal magnetic field in the solar photosphere with the Zeeman effect[J]. Solar Physics, 2025, 300(4): 49.
- [39] Xu H Q, Su J T, Liu S, et al. Comparison of line-of-sight magnetic field observed by ASO-S/FMG, SDO/HMI and HSOS/SMAT[J]. Solar Physics, 2024, 299(2): 17.
- [40] Hou Y J, Li C, Li T, et al. Partial eruption of solar filaments. I. Configuration and formation of double-decker filaments [J]. The Astrophysical Journal, 2023, 959: 69.
- [41] Sun Z, Li T, Hou Y J, et al. The solar origin of an intense geomagnetic storm on 1 December 2023: Successive slipping and eruption of multiple magnetic flux ropes[J]. Solar Physics, 2024, 299(6): 93.
- [42] Song Y L, Su J T, Zhang Q M, et al. Observation of a large-scale filament eruption initiated by two small-scale erupting filaments pushing out from below[J]. Solar Physics, 2024, 299(6): 85.
- [43] Idrees S, Su J T, Chen J, et al. Investigation of decaying- β -configuration sunspot in active region NOAA 13229[J]. Solar Physics, 2024, 299(6): 91.
- [44] Yang S B, Liu S, Su J T, et al. Comparison of relative magnetic helicity flux calculation results based on the line-of-sight magnetograms of ASO-S/FMG and SDO/HMI [J]. Solar Physics, 2025, 300(3): 26.
- [45] Jiang X K, Wu J, Chen D Y, et al. Construction and validation of a geometry-based mathematical model for the hard X-ray imager[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2023, 23(2): 025004.
- [46] Yu W H, Su Y, Li Z T, et al. Research on X-ray Imaging algorithms and reconstruction parameters for RHESSI and ASO-S/HXI[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2025, 25: 035010.
- [47] Li Z T, Yu W H, Su Y, et al. Assessing the Quality of Solar X-ray Images Reconstructed by HXI onboard ASO-S[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2025, 25: 035009.
- [48] Xia Y H, Su Y, Liu H, et al. A new solar hard X-ray image reconstruction algorithm for ASO-S/HXI based on deep learning[J]. Solar Physics, 2024, 299(11): 158.
- [49] Li Z T, Su Y, Liu W, et al. Spectral cross-calibrations of ASO-S/HXI with other X-ray missions[J]. Solar Physics, 2025, 300(5): 56.
- [50] Yu J R, Ruan P, Su Y, et al. Inverse Calculation and Regularization Process for the Solar Aspect System (SAS) of HXI Payload on ASO-S Spacecraft[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2024, 24: 045003.
- [51] Yu J R, He Y H, Tao J Y, et al. The solar aspect system of the hard X-ray imager onboard ASO-S[J]. Solar Physics, 2024, 299(9): 122.
- [52] 陈娇龙, 张永强, 张岩, 等. 硬X射线成像仪量能器测试系统的设计与实现[J]. 天文学报, 2024, 65(3): 108-119.
- [53] Chen D Y, Wang H X, Hu Y M, et al. Design and ground characterization of HXI collimator onboard Chinese ASO-S mission[C]//Proceedings of Ground-based and Airborne Telescopes X. Washington: SPIE, 2024, 13094: 1309450.
- [54] Chen D Y, Zhang Z, Jiang X K, et al. Development of an X-ray modulation characterization system for HXI payload onboard ASO-S mission[J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43: 747.
- [55] Jiang X K, Zhang Z, Hu Y M, et al. X-ray beam experiment for the Hard X-ray Imager onboard ASO-S[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1053: 168379.
- [56] Chen C X, Su Y, Guo Y, et al. Hard X-ray imaging of slipping reconnection and quasi-periodic pulsations in a solar flare[J]. Nature Communication, 2025.
- [57] Li D, Li Z T, Shi F P, et al. Observational signature of continuously operating drivers of decayless kink oscillation[J]. Astronomy & Astrophysics, 2023, 680: L15.
- [58] Shi F P, Li D, Ning Z J, et al. Multiwavelength observations of quasi-periodic pulsations in the impulsive phase of an eruptive flare with the hard X-ray imager on board ASO-S and other instruments[J]. Solar Physics, 2024, 299(3): 30.
- [59] Li D, Hong Z X, Hou Z Y, et al. Localizing quasiperiodic pulsations in hard X-ray, microwave, and $\text{Ly}\alpha$ emissions of an X6.4 flare[J]. The Astrophysical Journal, 2024, 970(1): 77.
- [60] Li D, Dong H Y, Chen W, et al. A statistical investigation of the neupert effect in solar flares observed with ASO-S/HXI[J]. Solar Physics, 2024, 299(5): 57.
- [61] Mrozek T, Li Z T, Karlický M, et al. Kink-and-disconnection failed eruption in 3D[J]. Solar Physics, 2024, 299(6): 81.

- [62] Ryan D F, Massa P, Battaglia A F, et al. Triangulation of hard X-ray sources in an X-class solar flare with ASO-S/HXI and solar orbiter/STIX[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(8): 114.
- [63] Shamsutdinova J N, Kashapova L K, Li Z T, et al. Spatial and spectral evolution of microwave and X-ray sources during the solar limb flare on February 5, 2023[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(6): 80.
- [64] Kuznetsov A, Wu Z, Anfinogentov S, et al. Electron acceleration and transport in the 2023-03-06 solar flare[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2024, 11: 1407955.
- [65] Wu Z, Kuznetsov A, Anfinogentov S, et al. A multipeak solar flare with a high turnover frequency of the gyrosynchrotron spectra from the loop-top source[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, 968(1): 5.
- [66] Zheng R S, Liu Y H, Zhang L, et al. Disintegration of an erupting solar prominence as the “double-bang firecracker” of New Year 2025[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2025, 68, 279611.
- [67] Zhang L, Zheng R S, Chen Y. A type II radio burst associated with solar filament-filament interaction[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, 691: A4.
- [68] Hou Z Y, Tian H, Madjarska M S, et al. Numerous bidirectionally propagating plasma blobs near the reconnection site of a solar eruption[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, 687: A190.
- [69] Gou T Y, Liu R, Su Y, et al. High-resolution observation of blowout jets regulated by sunspot rotation[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(7): 99.
- [70] Hudson H S, Cliver E, Fletcher L, et al. An impulsive geomagnetic effect from an early-impulsive flare[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 532: 3220–3125.
- [71] Firoz K A, Li Y P, Gan W Q. On the possible mechanisms of the SEP event and electron enhancement over the SEP decay phase on 2023 August 5[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, 977(2): 248.
- [72] Jing Z C, Li Y, Feng L, et al. A statistical study of solar white-light flares observed by the white-light solar telescope of the lyman-alpha solar telescope on the advanced space-based solar observatory (ASO-S/LST/WST) at 360 nm[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(2): 11.
- [73] Li Q, Li Y, Su Y, et al. Spectral and imaging observations of a C2.3 white-light flare from the advanced space-based solar observatory (ASO-S) and the Chinese H α Solar explorer (CHASE)[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(5): 73.
- [74] Li Y, Jing Z C, Song D C, et al. The white-light emissions in two X-class flares observed by ASO-S and CHASE[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 963(1): L3.
- [75] Li D, Wang J C, Huang Y. Very long-periodic pulsations detected simultaneously in a white-light flare and sunspot penumbra[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 972(1): L2.
- [76] Li Y, Liu X F, Jing Z C, et al. Various features of the X-class white-light flares in super active region NOAA 13664[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 972(1): L1.
- [77] Zhao J, Zhang P, Gibson S E, et al. Synthetic Lyman- α emissions for the coronagraph aboard the ASO-S mission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, 665: A39.
- [78] Ying B L, Shi G L, Feng L, et al. Parameter effects on the total intensity of H I Ly α line for a modeled coronal mass ejection and its driven shock[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(6): 92.
- [79] Lu L, Tian Z Y, Feng L, et al. Automatic solar flare detection with ASO-S/SDI UV imager[J]. *Solar Physics*, 2024, 299: 72.
- [80] 李敬伟, 黎辉, 封莉, 等. “夸父一号”卫星莱曼阿尔法太阳望远镜在轨平场定标偏摆方案及结果[J]. *天文学报*, 2025, 66(1): 106–122.
- [81] Liu H, Li H, Zou S Z, et al. Improving image quality of the solar disk imager (SDI) of the Lyman-alpha solar telescope (LST) onboard the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2025, 25(2): 025005.
- [82] Greatorex H J, Milligan R O, Dammasch I E. On the instrumental discrepancies in lyman-alpha observations of solar flares[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(11): 162.
- [83] Li S T, Feng L, Ying B L, et al. Carrington maps in H I ly α and their relationships with extreme-ultraviolet and magnetic-field maps[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 969(1): L16.
- [84] Xue J C, Feng L, Li H, et al. Association between a failed prominence eruption and the drainage of mass from another prominence[J]. *Solar Physics*, 2024, 299: 89.
- [85] Wei H Y, Huang Z H, Zhang Q M, et al. Rising of two crossing prominences and the resulting oscillations[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(5): 64.
- [86] Shi G L, Feng L, Chen J, et al. Asymmetric thermal-dominated hard X-ray radiation of two ribbons in a C-class flare[J]. *Solar Physics*, 2024, 299: 104.
- [87] Zhang Q M, Lin M S, Yan X L, et al. Two successive EUV waves and a transverse oscillation of a quiescent prominence[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 533(3): 3255–3262.

[88] Li S Y, Zhang Q M, Ying B L, et al. Sympathetic solar eruption on 2024 February 9[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2025, 25(1): 015006.

[89] Chi Y T, Shen C L, Zhang Z Y, et al. Direct observations of a shock traversing preceding two coronal mass ejections[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2024, 795: L25.

Brief review on early achievements of ASO-S in orbit

GAN Weiqun^{1,2}, SU Yang¹, FENG Li¹, HUANG Yu¹, LI Hui¹, SU Jiangtao³, LI Ying¹, LIU Suo³

1. Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China
3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract Kuafu-1, also known as the Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S), is China's first comprehensive solar exploration satellite. It was successfully launched on October 9, 2022, from the Jiuquan Satellite Launch Center. After nearly one year of in-orbit testing, the satellite was delivered to the Purple Mountain Observatory of the Chinese Academy of Sciences at the end of September 2023 and officially entered the scientific operation phase. This article summarizes in brief the preliminary observational research results achieved in less than one and a half years, up to February 2025, following the mission's delivery. Some findings are highlighted, including the pivotal role of magnetic cancellation in the dissipation of β -type sunspots, an exhaustive diagnostic on quasi-periodic pulsations (QPP) in flaring hard X-ray emissions, a joint analysis of dual-angle observed hard X-ray imagery, the features of white-light flares at 360 nm wavelength, Carrington maps in the Lyman-alpha ($\text{Ly}\alpha$) band, and so on. In the future, by utilizing observation data from ASO-S and integrating it with data from other advanced solar observation satellites both domestically and internationally, joint research on multi-wavelength and even stereoscopic observations can be carried out. This is expected to yield significant progress in understanding the nature of and correlations between the "one magnetic field and two storms" (i.e., the solar magnetic field, solar flares, and coronal mass ejections).

Keywords ASO-S; solar space mission; solar flare; CME; solar magnetic field ●



(责任编辑 王丽娜)