

光学学报

空间 X 射线、极紫外、远紫外波段光学技术及应用(特邀)

王孝东, 龚博文, 王彭, 郭权锋, 何玲平, 刘世界, 宋克非, 陈波*

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 空间 X 射线、极紫外、远紫外波段光学技术是太阳、空间环境监测的有效手段之一, 利用该波段成像和光谱监测技术: 一方面可监测太阳耀斑爆发、磁场爆发和日冕物质抛射等对地球空间环境影响最大的太阳活动现象, 预报和预警太阳变化; 另一方面可监测地球磁层、等离子体层和电离层乃至高层大气的变化和分布, 预报和预警空间环境。简要回顾国际和我国该波段空间载荷的发展, 重点介绍中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在该波段的光学技术研究进展及其在空间环境监测中的应用。

关键词 X 射线; 极紫外; 远紫外; 空间光学技术; 空间天气

中图分类号 O434 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS241504

1 引言

随着航空、航天技术的发展以及通信、导航技术的普及, 迫切需要准确、及时的空间天气预报, 以减少灾害性空间天气事件对人类活动的影响。例如, 大的太阳爆发可能会引起地磁扰动, 引起磁暴和亚磁暴的发生, 造成航天活动终止、在轨航天器事故, 造成远距离输电线路损毁、输油管道破坏、通信导航中断等事件, 或造成飞跃极区的航班停飞等重大事件。为此, 需要

研制太阳和近地空间环境监测仪器, 以监测引起地球空间环境变化的太阳活动和地球空间环境变化。

自 20 世纪 70 年代起, 国际上就开始空间环境研究和预报, 研制多种观测仪器用于监测空间环境变化, 监测引起空间环境变化的主要因素——太阳的活动和变化, 并研制 X 射线、极紫外和远紫外波段空间载荷, 在这个太阳活动和地球空间环境变化极其敏感的波段实现对太阳和近地空间环境变化的监测。典型的 X 射线、极紫外和远紫外波段太阳监测载荷如表 1 所示, 多

表 1 太阳 X 射线-极紫外-远紫外波段监测载荷

Table 1 Summary of typical solar imagers in X ray-extreme ultraviolet-far ultraviolet bands

Satellite/imager (year)	Wavelength /nm	Angular resolution /(")	Time resolution /s	Spacecraft altitude /km	Reference
SKYLAB/EUV (1973)	28–135	5	300	407	Ref. [1]
Yohkoh/SXT (1991)	0.3–6.0	2.5	0.5	500	Refs. [2–4]
SOHO/EIT (1995)	17.1, 19.5, 28.4, 30.4	2.6	90	1.5×10^6	Refs. [5–7]
TRACE (1998)	17–29 (3 channels)	0.5	30	627	Refs. [8–9]
GOES ^a /SXI (2001)	0.6–6.0	5.0	60	35786	Ref. [10]
Hinode/XRT (2006)	0.2–20 (9 channels)	1.0	10	650	Refs. [11–12]
STEREO/EUVI (2006)	17.1, 19.5, 28.4, 30.4	1.59	60	Solar and high Earth orbiter	Ref. [13]
PROBA2/SWAP (2009)	17.4	3.17	60	720	Ref. [14]
SDO/AIA (2010)	9–34 (7 channels), UV, visible	0.6	10	35756	Refs. [15–16]
GOES ^b /SUVI (2016)	9.4–30.4 (6 channels)	2.5	0.4	35756	Refs. [17–18]
Solar Orbiter/EUI (2021)	17.4, 30.4, 121.6	4.5 (FSI), 0.5 (HRI)	10–600	0.3 AU (1 AU = 1.496×10^8 km)	Refs. [19–20]

Notes: a represents GOES-12, GOES-13, GOES-14, and GOES-15 satellites; b represents GOES-16 and GOES-17 satellites.

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-10-12; 录用日期: 2024-11-06; 网络首发日期: 2024-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(U1531106, U1631117, U1731114, U1931118, U2031122, 12273040)

通信作者: *chenb@ciomp.ac.cn

波段/多通道探测是此类载荷的趋势,可以节省空间,减轻重量。典型的太阳监测载荷 SDO 和 GOES-R 系列,分别有 7 个和 6 个极紫外波长。典型的地球空间环

境监测载荷可监测磁层、等离子体层和电离层,典型载荷如表 2 所示,这些载荷的探测波段集中在远紫外波段,包括 H 121.6 nm、OI 135.6 nm 和 N₂ LBH 带等。

表 2 空间环境监测载荷

Table 2 Summary of typical auroral imagers

Satellite/imager (year)	Angular/spatial resolution ^a [(°)/km]	Spacecraft altitude	Wavelength /nm	Image frame rate	Reference
DE-1/SAI (1981)	0.32/100	(1-4) R_E^b	121.6-630.0 (several filter)	12 min/frame	Ref. [21]
Polar/UVI (1996)	0.03/30	(1-8) R_E	130-190 (4 filter)	37 s/frame	Ref. [22]
IMAGE/WIC (2000)	0.18/120	(0.3-7) R_E	140-190	10 s/frame	Refs. [23-24]
IMAGE/SI (2000)	0.13/100	(0.3-7) R_E	135.6	5 s/frame	Ref. [25]
	0.26/200		121.6		
TIMED/GUVI (2001)	0.8/50	630 km	120-180 (spectrometer)	100 min/frame	Ref. [26]
DMSP/SSUSI (2003)	0.8/50	840 km	120-180 (spectrometer)	100 min/frame	Ref. [27]
GOLD/FUV (2018)	100	350 km	132-162	30 min/frame	Ref. [28]
ICON/FUVI (2019)	0.093/1	575 km	135.6, 157	12 s/frame	Ref. [29]

Notes: a represents that spatial resolution refers to resolution of image of projection disk; b represents that $R_E=6375.0$ km, which is solar radius.

我国自 2000 年初开始空间 X 射线、极紫外、远紫外波段成像载荷研制工作,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制出国际上第一台月基极紫外相机,于 2013 年 12 月发射,该相机首次在月球表面着陆,拍摄到地球等离子体层全景图像^[30]。之后,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 FY-3D 星广角极光成像仪,于 2017 年 11 月发射,首次在极轨道快速拍摄到 5000 km×5000 km 的极区图像^[31-32]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 FY-3E 星太阳 X-EUV 成像仪^[33],于 2021 年 7 月发射,在国际上首次实现一台仪器可在 X 射线和极紫外两个波段对太阳成像,拍摄到我国第一幅太阳 X 射线和 19.5 nm 极紫外图像^[33]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的中国科学院先导专项“夸父一号”莱曼阿尔法太阳望远镜^[34-35](LST),于 2022 年 10 月发射,可在 121.6 nm 波段对太阳全日面和 2.5 太阳半径的内日冕进行连续的成像观测。

风云三号黎明星上装载的多角度电离层光度计(Tri-IPM)是中国科学院国家空间科学中心研制的高灵敏度光学遥感探测载荷。Tri-IPM 设置日侧、夜侧、晨昏三个探头,实现对电离层-热层大气在跨越晨昏线时气辉大动态范围变化的监测。载荷探测波段为 OI 135.6 nm 和 N₂ LBH 带,夜侧探测灵敏度 >150 s⁻¹·Rayleigh⁻¹,日侧-晨昏侧探测灵敏度 >2 s⁻¹·Rayleigh⁻¹,空间分辨率为 30 km,测量气辉动态范围为 10⁻¹~10⁴ Rayleigh^[36]。

中国科学院国家天文台联合北京大学、同济大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院微

小卫星创新研究院研制的极紫外太阳成像仪(SUTRI)的工作波长是 46.5 nm,这是国际上首台 46.5 nm 极紫外多层膜成像仪^[37],并于 2023 年 1 月 11 日发布首批科学数据(<https://sun10.bao.ac.cn/SUTRI/>)。

中国科学院上海技术物理研究所和中国科学院国家天文台联合研制的爱因斯坦探针卫星(EP 卫星)的宽视场 X 射线望远镜(WXT),是一台毛细管透镜成像仪,可在 0.3 keV 到 10 keV 范围对宇宙空间的 X 射线源进行巡查^[38]。EP 卫星上的窄视场 X 射线望远镜(FXT)载荷的工作波段为 0.3 keV~10 keV,是一台 Wolter I 型 X 射线成像仪,视场范围为 1°×1°,这台载荷由中国科学院高能物理研究所牵头,联合中国科学院理化技术研究所和德国马克斯-普朗克研究所共同研制^[39]。

总之,我国发射的空间 X 射线、极紫外和远紫外波段成像监测仪器,已经在月球表面、极轨轨道和太阳同步轨道上工作,在 X 射线、极紫外和远紫外波段实现对太阳和空间环境成像监测,用于科学研究和空间天气预报。本文将介绍中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在 X 射线、极紫外和远紫外波段的光学技术进展及其在空间环境监测中的应用。

2 空间 X 射线-极紫外-远紫外波段光学技术

X 射线-极紫外-远紫外波段一般是指 0.1~200 nm 波段,其光子能量覆盖 12.4 keV~6.2 eV,该波段光子能量较高,有一定的穿透能力。通常材料的反射率极低,只有千分之几到万分之几,无法直接使用。另外,

该波段的波长是可见光波段的三分之一到万分之一,该波段成像技术对光学元件表面粗糙度的要求很高,达到 0.1~0.4 nm。为了解决该波段聚焦能量和成像技术难题,需要研制高能量传输效率、高面形精度的光学元件,研制高灵敏度面阵探测器,掌握辐射计量方法,并研制辐射定标设备。

2.1 空间 X 射线-极紫外-远紫外波段光学元件研制

为了解决极紫外和远紫外波段高反射率反射镜技术难题,利用该波段辐射在多层膜界面产生的多光束相干叠加,提高特定波长的反射率,使得在可见光波段常用的光学系统可以应用到极紫外、远紫外波段。研制的极紫外波段多层膜反射镜的工作波长包括 9.4、17.1、19.5、21.1、30.4 nm 等。图 1(a) 给出了极紫外多

层膜的反射率曲线,在 9.4、17.1、19.5、21.1、30.4 nm 处的反射率分别为 28%、45%、35%、38%、38%,这些多层膜适合空间环境应用,为研制的载荷提供光学元件。图 1(b) 给出了 140~180 nm 多层膜的反射率实测分布结果。图 1(c) 是镀制的反射镜实物图,通过在一块超光滑表面反射镜基底上分别镀制工作波长为 9.4、17.1、21.1、30.4 nm 的 4 种多层膜,解决了膜层干扰和面形变化不一致的技术难题,得到波段范围和面形精度均满足要求的四波段极紫外多层膜反射镜。采用带宽展宽、导纳匹配和原位补偿技术,设计和制备了 140~180 nm 宽带非周期 LaF₃/MgF₂ 多层膜反射镜,该反射镜的带内平均反射率为 45%,具有很好的带外抑制能力^[40-41]。

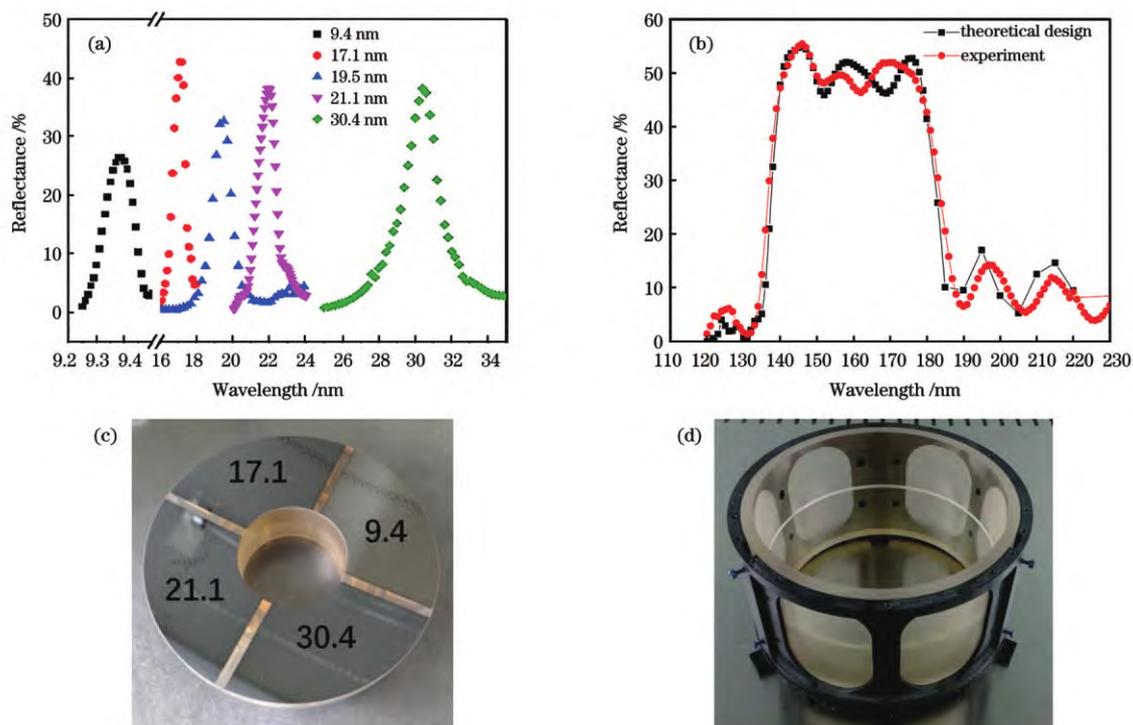


图 1 研制的该波段反射镜。(a)极紫外多层膜的反射率曲线;(b) 140~180 nm 多层膜的反射率曲线;(c)镀有 4 种极紫外多层膜的反射镜实物图;(d) X 射线掠入射光学反射镜的实物照片

Fig.1 Fabricated mirrors in these wavebands. (a) Reflectance curves of extreme ultraviolet multilayers; (b) reflectance curves of 140–180 nm multilayers; (c) picture of mirror with four extreme ultraviolet multilayers; (d) picture of X-ray grazing-incidence mirror

在 X 射线波段,主要是采用掠入射成像光学系统,利用 X 射线波段全反射特性,反射 X 射线辐射,实现对 X 射线的聚束和成像。典型的掠入射成像光学系统有 Kirkpatrick-Beaz、Wolter I 型和 Wolter II 型等类型^[42]。为了研制 X 射线掠入射光学系统,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所自 20 世纪 80 年代起,开始 X 射线掠入射光学元件加工、检测技术研究,解决了旋转非球面掠入射光学系统高精度成型、内表面超光滑表面抛光、高精度检测等关键技术问题,研制了亚纳米精度抛光设备,改造了检测设备,加工得到适合空间环境

应用的 Wolter I 型超光滑表面反射镜,并将其应用到 FY-3E 星太阳 X-EUV 成像仪上,反射镜实物照片如图 1(d) 所示。

2.2 单光子计数面阵探测器研制

X 射线-极紫外-远紫外波段的波长短,探测器在该波段几乎无响应,因此需要采用特殊制备工艺实现该波段的高光电转换效率,并研制该波段的成像探测器。目前,该波段的面阵探测器主要有 4 类。第 1 类是用于对较高亮度目标成像的探测器,常用的有背照射 CCD 或者 CMOS 探测器,这类探测器使用背照射

制备工艺去除感光面上的氧化层,提高在 X 射线、极紫外、远紫外的光电转换效率。第 2 类是对微弱目标成像的面阵探测器,通常采用电荷切割和时间分辨电子云分割方法。入射的 X 射线-极紫外-远紫外波段辐射,经光电阴极转换成光电子,光电子经过倍增后形成电子云团,最后由位敏阳极记录电子云团的位置,实现对单光子的记录。第 3 类是像增强 CCD 或者 CMOS (ICCD 或者 IC MOS),这类探测器是将电子倍增和 CCD 或者 CMOS 结合,利用微通道板 (MCP) 作为像增强器,将入射光转换成包含大量电子的电子云,在像增强后连接荧光屏,用于显示电子云的位置,再由可见光 CCD 或者 CMOS 记录电子云的位置,最终实现对该波段目标的成像。这类探测器具有较高的探测灵敏度,但是,CCD 或者 CMOS 在常温条件下噪声较大,无法长时间积分使用,这限制了这类探测器的探测灵敏度。第 4 类是电子轰击 CCD (EBCCD),这种 EBCCD 增加了电子倍增环节,可以对微弱目标进行成像,但是,电子倍增数不大,限制了探测灵敏度。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所针对探月工程和风云气象卫星载荷研制针对极紫外和远紫外波段微弱目标成像,解决了球面 MCP 制备、微条纹阳极刻划和微弱光电脉冲信号处理等关键技术难题,研制出适合空间环境的球面感光面单光子计数面阵探测器^[43-45],探测器如图 2 所示。探测器的工作原理:光子照射到探测器光电阴极上,产生光电子;光电子经过 MCP 倍增后形成电子云,约为 10^6 个电子;电子云在加速电场作用下,落到编码阳极上;根据编码阳极记录到的电荷比例关系,计算出电子云中心位置,得到光电子入射的位置。研制出的单光子计数面阵探测器的等效像元尺寸为 $45\ \mu\text{m}$,计数率为 $3.5 \times 10^5\ \text{s}^{-1}$,探测器的有效口径为 $\Phi 75\ \text{mm}$,对应的等效像元个数约为 1600×1600 。图 3 为单光子计数面阵探测器实测的分辨率板图像。研制的单光子计数面阵探测器的暗计数率和最高计数率等重要指标均比 SSUSI、GUVI 和 EUVI 等同类仪器上使用的单光子计数面阵探测器好。



图 2 单光子计数面阵探测器实物照片

Fig. 2 Picture of single photon counting array detector

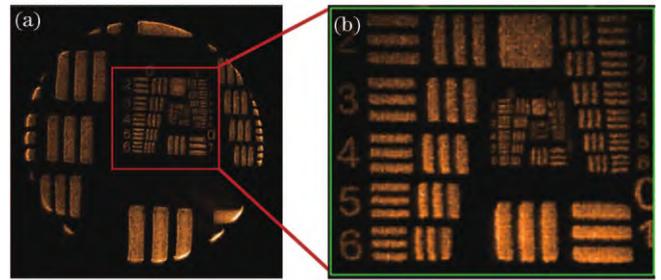


图 3 单光子面阵探测器拍摄到的分辨率板图像。(a) 全图; (b) 局部放大图

Fig. 3 Images of resolution plate taken by single photon plane array detector. (a) Whole image; (b) partial enlargement image

2.3 X 射线-极紫外-远紫外辐射计量

辐射计量是开展该波段光学研究的基础,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所自 20 世纪 80 年代起开始该波段的定标研究工作,开展了该波段的光学元件、光谱仪器、成像仪器、探测器等的检测、定标方法研究,研制了检测、定标装置,实现对该波段光学元件、探测器和整机性能的检测定标。

研制的 X 射线-极紫外-远紫外波段光学元件的检测、定标装置配备了空心阴极光源、激光等离子体光源 (LPP)、X 射线管等多种光源,其工作波段范围覆盖 $0.1 \sim 200\ \text{nm}$,光谱分辨率为 $0.1\ \text{nm}$,可进行光学元件反射率、透过率及光栅效率等的检测、定标,测量重复性为 1% ,波长精度为 $0.2\ \text{nm}$ ^[46]。X 射线-极紫外-远紫外波段光电元器件检测和定标装置的实物照片如图 4 所示。



图 4 X 射线-极紫外-远紫外波段光电元器件检测和定标装置
Fig. 4 Test and calibration device for optoelectronic components in X-ray-extreme ultraviolet-far ultraviolet bands

研制了该波段的整机性能检测、定标装置,该装置配有空间环境模拟装置,可在高真空环境下模拟 $-190 \sim 100\ ^\circ\text{C}$ 范围的不同温度环境,以检测该波段载荷的性能指标和环境适应性,并验证其在轨工作状态。X 射线-极紫外-远紫外波段整机性能指标检测、定标及环境实验装置如图 5 所示。该波段的辐射定标采用传递标准探测器。利用国际上通用的该波段传递标准探

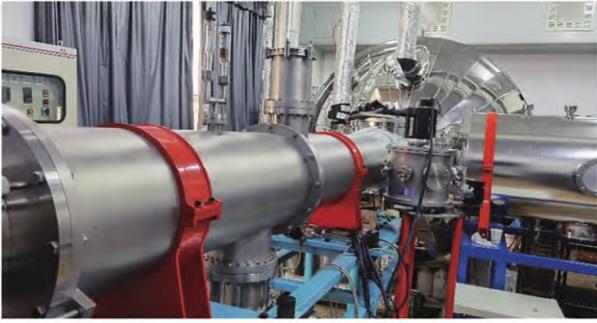


图 5 X 射线-极紫外-远紫外波段整机性能指标检测、定标及环境实验装置

Fig. 5 Performance test, calibration, and environment experimental device for overall unit in X ray-extreme ultraviolet-far ultraviolet bands

测器, 标定实验室的激光等离子体和气体放电空心阴极光源, 再用标定亮度的光源标定待定标设备, 完成空间载荷辐射定标。关于计量和定标的详细阐述请参考文献[33, 47], 这里限于篇幅, 不再详细介绍。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所是继美国劳伦斯伯克利国家实验室后, 又一个全面开展非同步辐射光源辐射计量研究的单位, 具备了反射率、透过率和量子效率测量能力, 可以进行 X 射线-极紫外-远紫外的绝对响应定标, 具备该波段的成像质量检测能力, 可在不同的温度环境下进行整机工作波段的检测、定标。

2.4 高精度指向与跟踪技术

为了保证太阳图像在监测仪器视场中心, 拍摄高

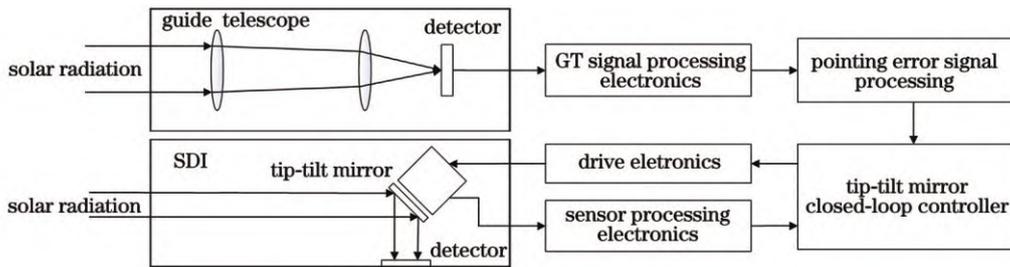


图 6 高精度、高速稳像原理框图

Fig. 6 Diagram of principle of high-precision and high-speed image stabilization

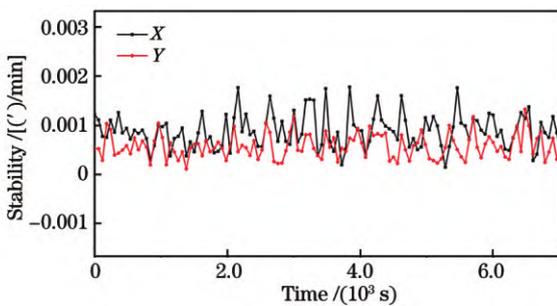


图 7 导行镜在轨实测对日指向信号变化

Fig. 7 Variance of solar pointing signal measured by guide telescope in orbit

分辨率太阳图像, 需要准确跟踪和高精度稳像系统, 使得望远镜实时指向太阳, 保证微小、高频振动不影响望远镜成像。太阳望远镜稳像系统的基本构成如图 6 所示, 其包含高精度对日指向偏差测量导行镜、导行镜信号处理电路、快速指向调整机构、压电陶瓷驱动的摆镜、位置传感电路、压电驱动电路以及控制器单元。首先通过导行镜测量整个望远镜的对日指向偏差, 太阳光经过导行镜光学系统成像在光电二极管上, 光电二极管可以探测太阳的边缘信号, 进而检测太阳像的位置变化, 得到指向误差信号, 然后基于该误差信号, 计算得到压电摆镜需要运动的角度, 进而驱动主光学系统的压电摆镜运动, 使得主光学系统成像稳定。压电陶瓷控制器采用闭环控制策略来保证控制精度。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的高精度太阳导行镜的视场范围为 $100'' \sim 200''$, 角分辨率为 $0.02''$ 。导行镜被安装到太阳望远镜上, 与二维指向机构配合, 大范围跟踪缓慢变化的太阳。FY-3E 星太阳 X-EUV 成像仪跟踪系统已经实现东西 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 和南北 $-10^\circ \sim 90^\circ$ 的跟踪范围, 保持太阳一直在太阳监测仪器中心, 指向误差小于 $20''$ 。高精度稳像系统可有效抑制 10 Hz 以下振动, 由导行镜获得的太阳位置信号与快速压电摆台配合, 实现对日指向 $0.1''$ 的跟踪精度, 指向更新速率大于 1 kHz 。高精度指向与跟踪技术已经用于 LST 和风云三号 E 星太阳 X-EUV 成像仪。LST 导行镜在轨监测太阳指向变化分布, 图 7 中 Y 曲线代表太阳东西方向指向随时间的变化, X 曲线代表太阳南北方向指向随时间的变化。

3 太阳成像监测

太阳作为空间天气变化的源头, 其变化和爆发会引发剧烈的空间天气变化, 影响人类的活动。为了更准确地监测、预报和预警太阳活动和变化, 研制出 FY-3E 星太阳 X 射线-极紫外成像仪和中国科学院先导专项莱曼阿尔法太阳望远镜, 用于监测太阳在 X 射线、极紫外和远紫外波段的变化, 为科学研究和空间天气预报提供数据。

3.1 太阳 X-EUV 成像仪

FY-3E 星太阳 X 射线-极紫外成像仪采用了 X 射

线掠入射光学与极紫外多层膜正入射光学有机结合的设计方案^[33],光路如图 8 所示^[33]:在掠入射光学系统中心安装正入射光学系统,通过光路切换装置将 X 射线光束和极紫外光束分别成像在共同的探测器上,两套

光学系统共光轴,共用探测器,一台仪器起到两台仪器的作用,这样可节省空间,减轻重量。该双波段太阳成像仪的工作波段覆盖 0.6~8.0 nm 的 X 射线波段和 19.5 nm 极紫外波段,视场范围为 42',角分辨率为 5"。

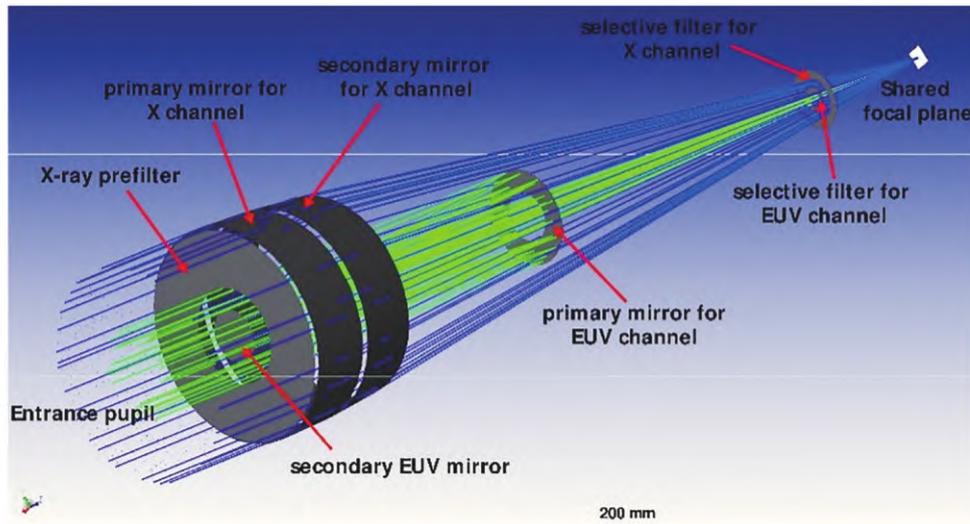


图 8 X 射线-极紫外双波段成像仪的光机结构示意图^[33]

Fig. 8 Sketch of optomechanical structure for X ray-extreme ultraviolet dualband imager^[33]

FY-3E 星太阳 X-EUV 成像仪已经于 2020 年 7 月发射,并拍摄到我国首幅太阳 X 射线-极紫外图像,于 2020 年 9 月 2 日由中国气象局发布首图,如图 9 所示^[33],观测数据已经进入中国气象局空间天气监测与预警中心业务系统。

可以在轨与该成像仪同时工作,监测相同时刻、相同波段的 X 射线-极紫外照度。利用太阳 X-EUV 照度数据定标太阳 X 射线-极紫外图像^[33],获得绝对照度分布的太阳 X 射线-极紫外图像,如图 9 所示。X 射线-极紫外流量计还可以实时监测太阳照度的变化,为预报和预警太阳活动和爆发提供数据。

为了实现对太阳绝对照度分布的测量,该成像仪还配有相同波段的 X 射线-极紫外光度计^[33],

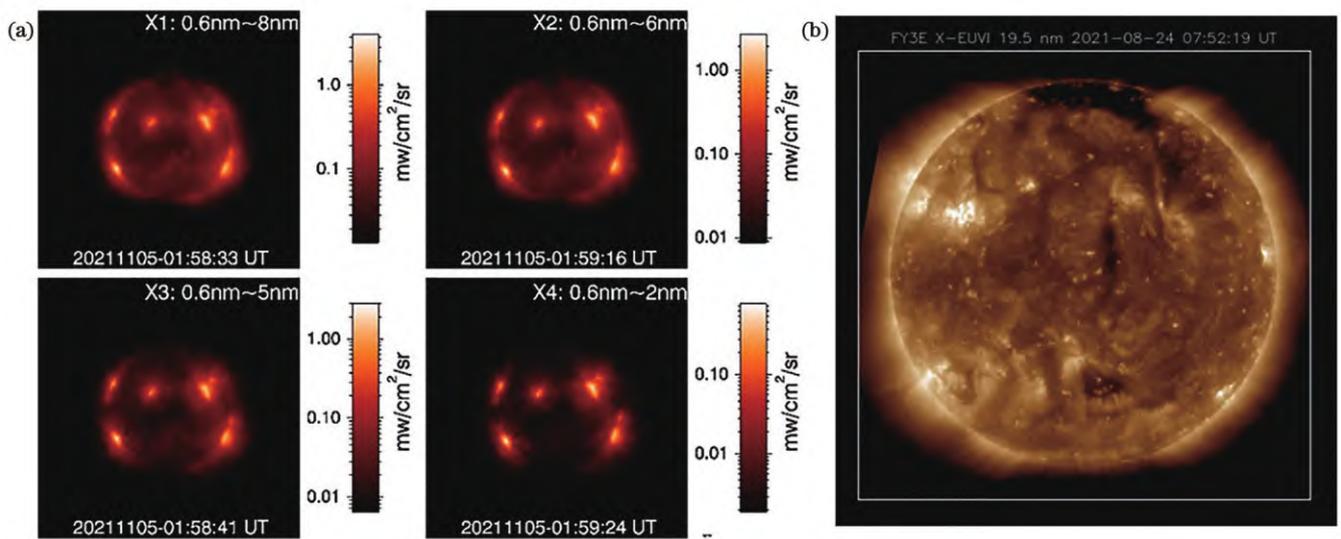


图 9 FY-3E 星太阳 X-EUV 成像仪拍摄的阳光图像^[33]。(a) 0.6~8.0 nm X 射线图像;(b) 19.5 nm 极紫外图像

Fig. 9 Solar images captured by solar X-EUV imager of FY-3E^[33]. (a) 0.6~8.0 nm X ray images; (b) 19.5 nm extreme ultraviolet image

X 射线-极紫外光度计由多层膜的正入射光学和 X 射线掠入射光学构成。使用标定过的传递标准探测器,实现对太阳照度的绝对测量。聚焦光学系统可

收集更多能量,提高光度计探测灵敏度,实现在常温下对 X 射线和极紫外波段的监测。如图 10(a)所示,X 射线光度计由铝膜滤光片、X 射线掠入射光学系

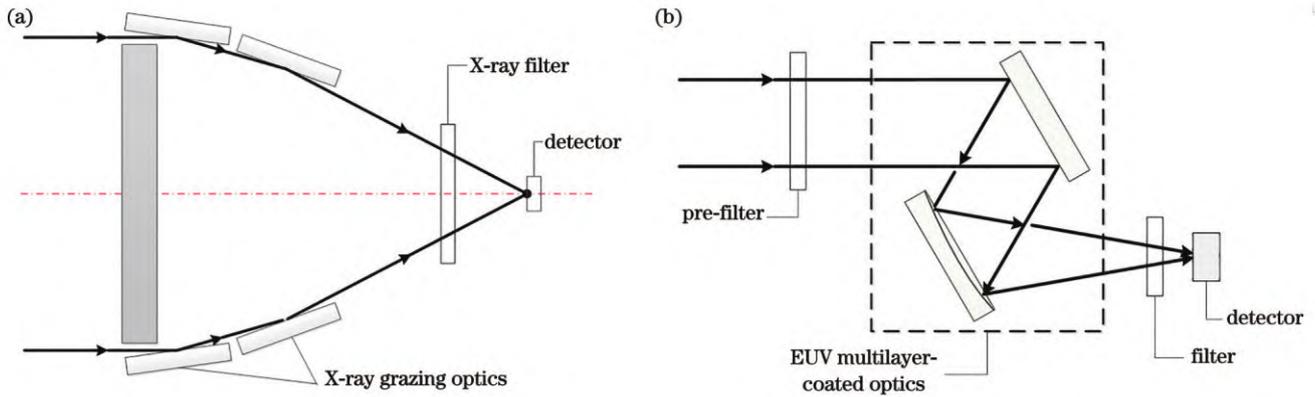


图 10 光度计的光路结构示意图。(a) X 射线通道; (b) 极紫外通道

Fig. 10 Sketches of optical paths of spectrometer. (a) X ray channel; (b) extreme ultraviolet channel

统、X 射线滤光片轮构成,其工作时,入射 X 射线辐射经过前置滤光片后,紫外和可见波段辐射被滤除,接着 X 射线辐射照射到掠入射光学系统,掠入射光学系统只反射较低能量的 X 射线辐射并滤除高能辐射,X 射线辐射再经过探测器前的 X 射线滤光片,带外辐射被滤除,最后由光电二极管记录特定波段 X 射线辐射。

极紫外波段光度计光机结构如图 10(b)所示。该光度计由入射滤光片、极紫外多层膜光学元件、波段选择滤光片和光电探测器构成。光度计工作时,入射光线首先经过入射滤光片,由其滤掉紫外、可见光辐射,再由多层膜反射镜反射特定波段的极紫外辐射,并将其聚焦到传递标准探测器上;在光电探测器前安装波段选择滤光片,再次滤掉带外辐射,实现对单一波长的极紫外波段探测。利用 FY-3E 星上的极紫外光度计,已经探测到太阳在 19.5 nm 波段的辐射。长期观测结果与 AIA 上的类似波段光度计观测到的太阳辐射变化一致。监测到的 2022—2023 年的太阳 X 射线、19.5 nm 波段辐射变化如图 11 所示。光电流与太阳照度对应

系数见文献[33]。

该成像仪实现 X 射线掠入射和极紫外多层膜正入射成像光学系统的结合,一台仪器覆盖两个波段,同时配有相同波段的 X 射线和极紫外波段光度计,实时监测太阳绝对流量,对太阳 X 射线和极紫外图像进行绝对定标,获得绝对照度分布的太阳图像,在轨定标精度为 15%。

3.2 莱曼阿尔法波段太阳望远镜

LST 是国际上继欧洲航天局(ESA)研制的 Solar Orbiter^[48]上的 METIS 和 EUV 后,又一台 121.6 nm 太阳日面和内日冕观测仪器。但是,太阳莱曼阿尔法全日面成像仪(SDI)的视场范围为 38.5',覆盖全日面,是欧洲 Solar Orbiter/EUV 观测范围的 4 倍左右,可以实时监测全日面上太阳活动和爆发,监测所有日珥爆发现象,有较大观测和预报优势。利用该仪器监测到的太阳活动如图 12 所示。

LST 上的 121.6 nm 内日冕成像仪(SCI)采用了离轴反射设计方案,其光学结构如图 13 所示。入射太阳辐射由主镜 M1 聚焦到次镜 M2 上,太阳像由次镜中心的光阱吸收;1.1 太阳半径至 2.5 太阳半径的内日冕经过次镜,再由三镜 M3 分别成像到 121.6 nm 远紫外探测器 CMOS1 和 700 nm 探测器 CMOS2 上。日冕仪可以同时两个波段监测内日冕变化。A2 为 Lyot 光阑,用于遮挡入瞳 A1 产生的衍射;M4 为远紫外分束镜,用于反射 121.6 nm 辐射,透过 700 nm 辐射;M5 为反射镜,用于反射 700 nm 辐射,使其进入 700 nm 探测器 CMOS2 上。日冕仪的角分辨率为 4.8",比在轨运行的 Solar Orbiter 上的 METIS 提高了 8 倍左右^[49],可以监测到 121.6 nm 波段更精细的日冕、日珥变化,如图 14 所示。

“夸父一号”首图于 2022 年 12 月由中国科学院发布,监测数据已经向全球开放,可由 <http://aso-s.pmo.ac.cn/sodc/imageBrowser.jsp> 网站下载。

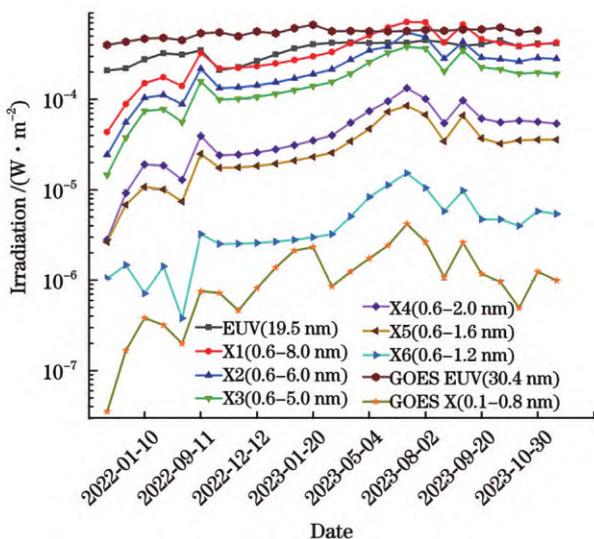


图 11 2022—2023 年太阳 X 射线和 19.5 nm 辐射分布图
Fig. 11 Solar X ray and 19.5 nm irradiances in 2022 and 2023

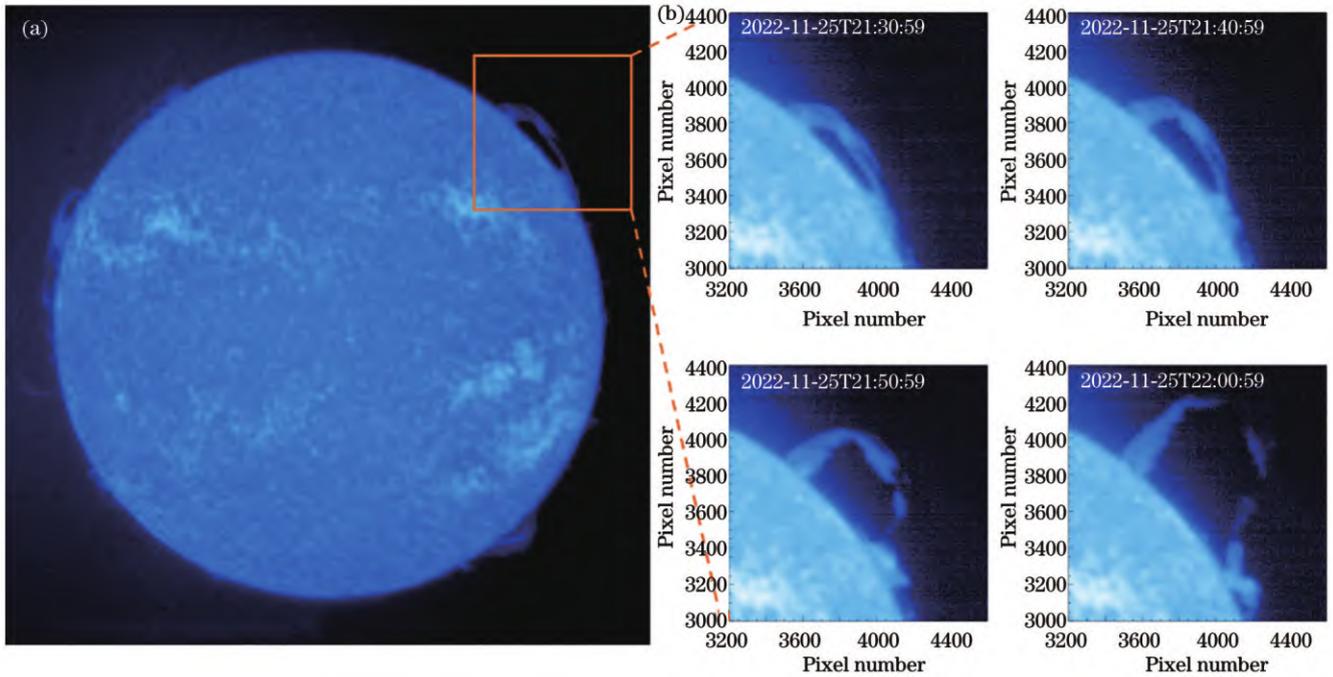


图 12 SDI 发布的首图(2022 年 11 月 25 日 121.6 nm 太阳图像)。(a) 全图; (b) 局部放大图

Fig. 12 First solar images captured by SDI (12.6 nm solar images on November 25, 2022). (a) Whole image; (b) partial enlargement images

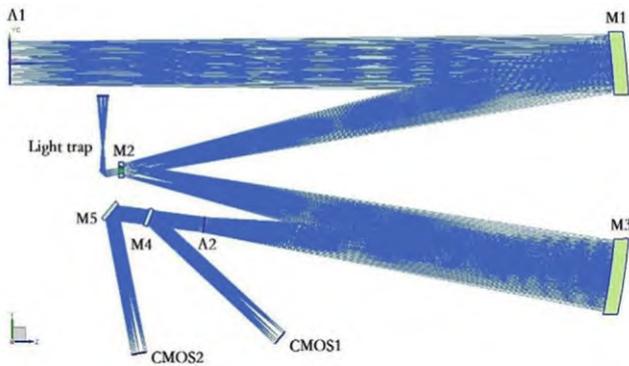


图 13 LST/SCI 双波段太阳日冕仪光路图^[49]

Fig. 13 Optical system of LST/SCI dualband solar coronagraph^[49]

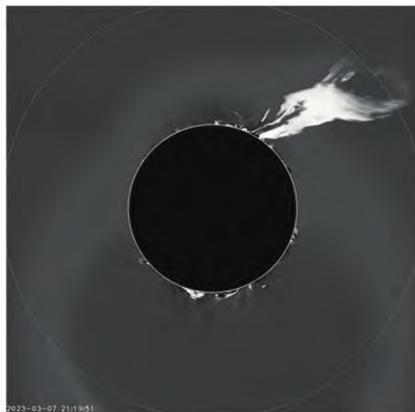


图 14 2023 年 3 月 7 日 SCI 拍摄的 121.6 nm 日珥图像

Fig. 14 121.6 nm prominence picture captured by SCI on March 7, 2023

4 空间环境监测

4.1 嫦娥三号极紫外相机

为了探索地球空间环境变化,研究太阳活动对地球空间环境的影响,在嫦娥三号(CE-3)着陆器上安装了极紫外相机,其采用单球面多层膜反射镜与球面单光子计数面阵探测器,使用最少的反射面实现 15° 圆视场范围的高灵敏度成像。CE-3 极紫外相机光路示意图如图 15 所示,地球等离子体极紫外谱线通过入瞳,经极紫外多层膜反射镜反射,到达焦点处的光子计数成像探测器上,极紫外光子转变为光电子信号。该系统减少了反射面的个数,有效提高了极紫外相机的灵敏度。该相机可以在月球表面极其恶劣的空间环境和很大的温差范围内存储和工作。该相机解决了大的温

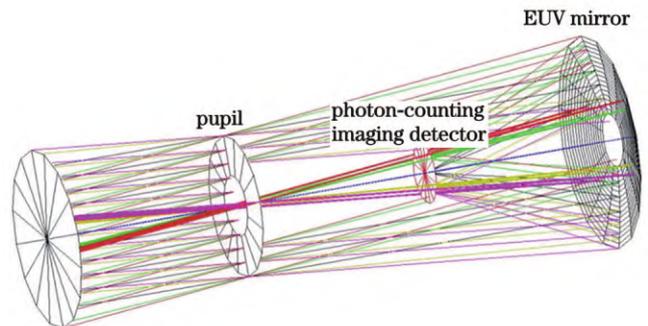


图 15 嫦娥三号极紫外相机光路示意图

Fig. 15 Diagram of optical path of extreme ultraviolet camera of Chang'e-3

差范围($-140\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)的存储和工作、月尘污染、月夜无能源供给的困难,突破了多项关键技术瓶颈,研制出 CE-3 着陆器极紫外相机^[50]。它是国际上第一台在月球表面着陆的极紫外相机,首图于 2014 年 1 月由国家航天局探月与航天工程中心发布,如图 16 所示。利用 CE-3 极紫外相机观测数据,发现了地磁亚暴期间等离子体层顶剥蚀随地方时的传播规律,这对地球等

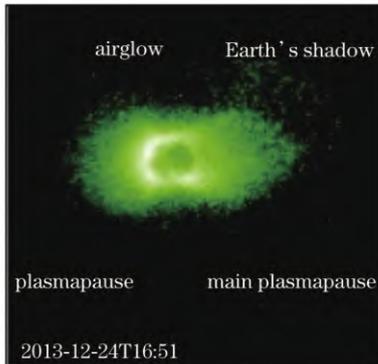


图 16 嫦娥三号极紫外相机在月球表面拍摄的 30.4 nm 地球等离子体层全景图像

Fig. 16 30.4 nm panorama image of Earth's plasmasphere captured by extreme ultraviolet camera of Chang'e-3 on lunar surface

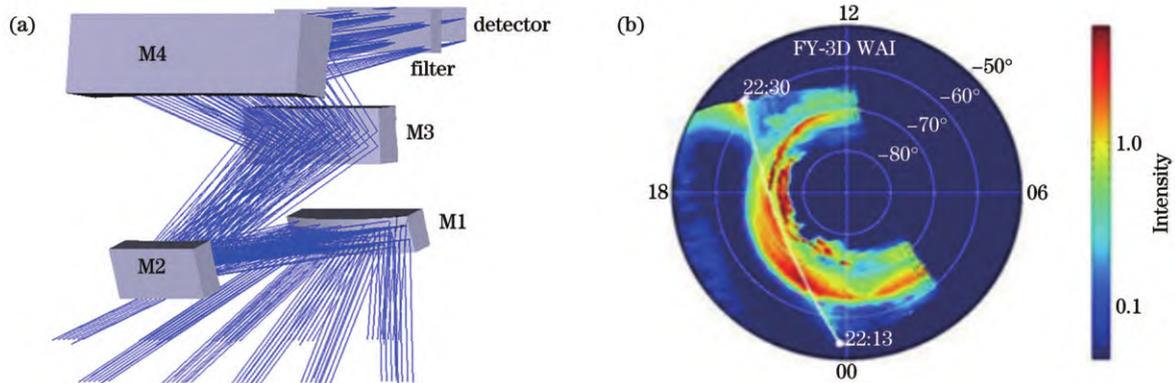


图 17 FY-3D 星广角极光成像仪。(a)光路图;(b)拍摄到的极光卵图像

Fig. 17 Wide-field auroral imager of FY-3D. (a) Optical path; (b) captured auroral image

5 结 论

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所经过几十年的研究和积累,在 X 射线-极紫外-远紫外波段光学技术上有很大进步,掌握了 X 射线-极紫外-远紫外波段光学元件加工检测、探测器研制和辐射计量等关键技术。但是,目前在轨运行的探测器种类还较少,空间分辨率不高,需要研制更高分辨率(十几个微米量级)的单光子计数面阵探测器;还未实现该波段的高性能光栅,还需要解决超光滑表面处理和镀膜等关键技术问题,研制高刻线密度(几千 line/mm)、高效率(30% 以上)光栅;还未实现该波段的辐射亮度基准源,需要研究辐射定标方法,建立辐射定标标准。

离子层建模和预报研究具有重要意义。相关研究参考文献[51-52]。

4.2 广角极光成像仪

太阳爆发时产生太阳风,严重影响地球空间环境。尤其是在地磁场作用下,部分带电粒子被地磁场箍缩到地球南北两极区域,沉降到大气层中。带电粒子在沉降过程中与大气中的粒子碰撞,产生极光。尤其是 140~180 nm LBH 波段辐射是极光卵分布、变化的重要标识,是空间天气预报的重要参数。FY-3E 星上的远紫外广角极光成像仪就是监测极光卵的快速、大视场、全极区的成像仪器。图 17(a)给出了 FY-3D 星广角极光成像仪的光路图,它是一个离轴四反光学系统,极光谱线分别经 M1~M4 非周期多层膜反射镜反射,通过滤光片进入光子计数探测器^[32]。该仪器的瞬时视场范围为 $130^{\circ}\times 10^{\circ}$,通过沿轨面扫描,可以在 2 min 内完成极区成像,拍摄到 $5000\text{ km}\times 5000\text{ km}$ 的全部极区范围^[31-32],拍摄到的极光卵图像如图 17(b)所示。与在轨运行的 DMSP/SSUSI 和 TIMED/GUVI 上同类载荷相比,该成像仪具有时间分辨率高的特点,在 850 km 极轨轨道可实现 2 min 获得一幅全部极区图像,有一定的空间天气预报和科学研究的优势。

在工程研制方面,我国已经实现了在极轨轨道和太阳同步轨道对太阳的实时监测,实现了在极轨轨道对极光卵的全尺度、快速成像监测。2026 年前后,我国将在发射的 FY-4 号静止轨道气象卫星上安装太阳极紫外多波段成像仪,并在 9.4、17.1、21.1 和 30.4 nm 4 个波段对太阳进行实时监测;我国还将在 FY-3 号 10 星上继续安装太阳 X 射线-极紫外成像仪,它将接替目前在轨运行的 FY-3E 星上的载荷,继续在极轨轨道上对太阳进行 X 射线和极紫外双波段成像监测,成为少数在轨运行的太阳 X 射线波段成像载荷之一,用于监测太阳在 X 射线波段的变化;2025 年,我国将在发射的 FY-3 号 08 星上安装新型广角极光成像仪,在 140~160 nm 和 160~180 nm 两个波段对全部极区进行成

像,升级现有的FY-3D星单波段广角极光成像仪,监测全部极区极光卵分布和变化,并监测太阳变化对地球的影响。到2027年前后,我国将形成以风云气象卫星轨道为主,配合月球轨道、不同的深空轨道、太阳极轨等不同的空间轨道,覆盖不同波段、不同轨道位置的空间X射线、极紫外、远紫外波段监测体系,实时监测空间天气的源头太阳,监测近地空间天气变化和行星际空间变化,为及时、准确的空间天气预报提供监测数据。

在后续的研制工作中,我国还将实现极紫外波段日冕监测技术、几十皮米高光谱分辨率、亚角秒高空间分辨率及高性能成像光谱技术,进行全日面到内日冕高分辨率成像监测,以及几个太阳半径到几十个太阳半径日冕区域的成像监测。在日地连线上方轨道,从太阳极区方向直接监测抛向地球的CME,可更准确、有效地监测太阳变化对地球空间天气的影响。将全日面监测与局部日面高分辨率成像光谱相结合,可实时监测太阳爆发局部区域高空间分辨率和高光谱分辨率太阳,研究太阳物理过程机理,建立自主计算模式,准确预报空间天气。

参 考 文 献

- [1] Reeves E M, Noyes R W, Withbroe G L. Observing programs in solar physics during the 1973 ATM Skylab program[J]. *Solar Physics*, 1972, 27(2): 251-270.
- [2] Tsuneta S, Acton L, Bruner M, et al. The soft X-ray telescope for the SOLAR: a mission[J]. *Solar Physics*, 1991, 136(1): 37-67.
- [3] Shimojo M, Hashimoto S, Shibata K, et al. Statistical study of solar X-ray jets observed with the Yohkoh soft X-ray telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 1996, 48 (1): 123-136.
- [4] Ogawara Y. Yohkoh (Solar-A) observations of solar activity[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1995, 57(12): 1361-1368.
- [5] Domingo V, Fleck B, Poland A I. SOHO: the solar and heliospheric observatory[J]. *Space Science Reviews*, 1995, 72 (1): 81-84.
- [6] Martens P C H, Muglach K. Scientific highlights from the solar and heliospheric observatory[M]//Nagendra K N, Stenflo J O. *Solar polarization. Astrophysics and space science library*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999, 243: 325-336.
- [7] Delaboudinière J P, Artzner G E, Brunaud J, et al. EIT: extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO mission[J]. *Solar Physics*, 1995, 162(1): 291-312.
- [8] Strong K, Bruner M, Tarbell T, et al. Trace: the transition region and coronal explorer[J]. *Space Science Reviews*, 1994, 70 (1): 119-122.
- [9] Handy B N, Bruner M E, Tarbell T D, et al. UV observations with the transition region and coronal explorer[J]. *Solar Physics*, 1998, 183(1): 29-43.
- [10] Bruner M E, Catura R C, Harvey J E, et al. Design and performance predictions for the GOES SXI telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3442: 192-202.
- [11] Shimizu T, Team S B. Solar-B[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 29(12): 2009-2015.
- [12] Kosugi T, Matsuzaki K, Sakao T, et al. The hinode (solar-B) mission: an overview[J]. *Solar Physics*, 2007, 243(1): 3-17.
- [13] Wuelser J P, Lemen J R, Tarbell T D, et al. EUVI: the STEREO-SECCHI extreme ultraviolet imager[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5171: 111-122.
- [14] Seaton D B, Berghmans D, Nicula B, et al. The SWAP EUV imaging telescope part I: instrument overview and pre-flight testing[J]. *Solar Physics*, 2013, 286(1): 43-65.
- [15] Cheimets P, Caldwell D C, Chou C, et al. SDO-AIA telescope design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7438: 74380G.
- [16] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, 275(1): 17-40.
- [17] Team H R, Al-Janabi K, Antolin P, et al. Achievements of Hinode in the first eleven years[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2019, 71(5): R1.
- [18] Lee J Y, Raymond J C, Reeves K K, et al. Nonequilibrium ionization effects on solar EUV and X-ray imaging observations [J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 879(2): 111.
- [19] Marsch E, Fleck B, Schwenn R. Solar orbiter: a high resolution mission to the sun and inner heliosphere[M]//COSPAR Colloquia Series. Amsterdam: Elsevier, 2001: 445.
- [20] Rochus P, Auchere F, Berghmans D, et al. The solar orbiter EUVI instrument: the extreme ultraviolet imager[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 642: A8.
- [21] Frank L A, Craven J D, Ackerson K L, et al. Global auroral imaging instrumentation for the Dynamics Explorer mission[EB/OL]. [2024-08-09]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19980200997>.
- [22] Torr M R, Torr D G, Zukic M, et al. A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission[J]. *Space Science Reviews*, 1995, 71(1): 329-383.
- [23] Mende S B, Heeterds H, Frey H U, et al. Far ultraviolet imaging from the image spacecraft. 1. System design[M]//Burch J L. *The image mission*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000: 243-270.
- [24] Mende S B, Heeterds H, Frey H U, et al. Far ultraviolet imaging from the image spacecraft. 2. Wideband FUV imaging [M]//Burch J L. *The image mission*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000: 271-285.
- [25] Mende S B, Heeterds H, Frey H U, et al. Far ultraviolet imaging from the image spacecraft. 3. Spectral imaging of Lyman- ∞ and OI 135.6 nm[M]//Burch J L. *The image mission*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000: 287-318.
- [26] Christensen A B, Walterscheid R L, Ross M N, et al. Global ultraviolet imager (GUVI) for the NASA thermosphere-ionosphere-mesosphere energetics and dynamics (TIMED) mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2266: 451-466.
- [27] Paxton L J, Meng C, Fountain G, et al. Special sensor ultraviolet spectrographic imager: an instrument description[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1745: 2-15.
- [28] Eastes R W, McClintock W E, Burns A G, et al. The global-scale observations of the limb and disk (GOLD) mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1): 383-408.
- [29] Mende S B, Frey H U, Rider K, et al. The Far Ultra-Violet imager on the ICON mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212: 655-696.
- [30] He F, Zhang X X, Chen B, et al. Determination of the Earth's plasmopause location from the CE-3 EUVC images[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(1): 296-304.
- [31] Zhang X X, Chen B, He F, et al. Wide-field auroral imager onboard the Fengyun satellite[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 47.
- [32] Guo Q F, Chen B, Liu S J, et al. Optomechanical design of a wide-field auroral imager on Fengyun-3D[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(12): 3349-3356.
- [33] Chen B, Zhang X X, He L P, et al. Solar X-ray and EUV imager on board the FY-3E satellite[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 329.

- [34] Chen B, Li H, Song K, 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.
- [35] Chen B, Feng L, Zhang G, et al. Inflight performance and calibrations of the Lyman-alpha solar telescope on board the advanced space-based solar observatory[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(8): 118.
- [36] Jiang F, Mao T, Zhang X X, et al. Nightside 135.6 nm emission enhancements of mid/low latitudes during geomagnetic storms as observed by the ionosphere PhotoMeter (IPM) on the Chinese meteorological satellite FY-3D[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(6): 2781-2798.
- [37] Wang Z S, Yu J, Qi R Z, et al. Design, fabrication and assembly of the solar upper transition region imager (SUTRI)[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23(9): 095009.
- [38] Chen Y F, Sun X J, Li Z D, et al. Detection system of the lobster eye telescope with large field of view[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(29): 8813-8818.
- [39] Chen Y, Cui W, Han D W, et al. Status of the follow-up X-ray telescope onboard the Einstein Probe satellite[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11444: 114445B.
- [40] Wang X D, Zhou P, Ren S, et al. Far ultraviolet mirrors for aurora imaging: design and fabrication[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(10): 2629-2635.
- [41] Wang X D, Chen B, Yao L. Design and fabrication of far-ultraviolet reflective broadband filter based on dielectric materials [J]. *Applied Spectroscopy*, 2018, 72(6): 943-946.
- [42] Attwood D, Sakdinawat A. X-rays and extreme ultraviolet radiation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [43] 何玲平, 岳巾英, 刘世界, 等. 光子计数位置灵敏探测器畸变多项式校正[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0604002.
He L P, Yue J Y, Liu S J, et al. Polynomial correction of photon-counting position-sensitive detector's distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0604002.
- [44] 何玲平, 岳巾英, 张宏吉, 等. 基于电容分割的光子计数成像探测器读出阳极优化设计及仿真[J]. *中国光学*, 2019, 12(6): 1303-1310.
He L P, Yue J Y, Zhang H J, et al. Optimization and simulation for photon-counting imaging detector readout anode based on capacitance division[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1303-1310.
- [45] 何玲平, 尼启良, 李敏, 等. 楔条形阳极光子计数探测器成像性能的检测[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2699-2704.
He L P, Ni Q L, Li M, et al. Image performance of photon-counting imaging detector with wedge-and-strip anode[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2699-2704.
- [46] Wang H F, Wang X D, Chen B, et al. EUV multilayer mirrors in solar X-EUV Imager[J]. *Optik*, 2020, 204: 164213.
- [47] 何玲平, 陈波, 张宏吉, 等. 极紫外波段空间相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1036-1041.
He L P, Chen B, Zhang H J, et al. Radiation calibration of EUV space cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1036-1041.
- [48] Marsden R G, Müller D, StCyr O C. Solar orbiter-close-up view of the Sun[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1539: 448-453.
- [49] Zhang G, Wang Y Q, He L P, et al. Stray-light suppression of the internally occulted reflecting solar corona imager[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 890197.
- [50] Chen B, Song K F, Li Z H, et al. Development and calibration of the moon-based EUV camera for Chang'e-3[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1654-1663.
- [51] Zhang X X, He F, Chen B, et al. Correlations between plasmopause evolutions and auroral signatures during substorms observed by Chang'e-3 EUV Camera[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2017, 1(1): 35-43.
- [52] Xiao C, He F, Shi Q Q, et al. Evidence for lunar tide effects in Earth's plasmasphere[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 486-491.

Space Optical Technology in X-ray, Extreme Ultraviolet, and Far Ultraviolet Regions and Its Applications (Invited)

Wang Xiaodong, Gong Bowen, Wang Peng, Guo Quanfeng, He Lingping, Liu Shijie, Song Kefei, Chen Bo*

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China

Abstract

Significance With the development of aerospace technologies and the widespread adoption of communication and navigation systems, accurate and timely space weather forecasting has become increasingly urgent to mitigate the influence of catastrophic space weather events on human activities. Since the 1970s, space weather has been actively studied and applied. Many observational instruments have been developed to monitor solar activity and space environment variations. In particular, a series of space payloads have been developed for the extremely sensitive wavebands of X-ray, extreme ultraviolet (EUV), and far ultraviolet (FUV) to monitor changes in the Sun and the terrestrial space environment. Since the 1980s, several key technological breakthroughs have been achieved at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (CIOMP), including optical elements, single-photon-counting imaging detectors, and radiometry for X-ray, EUV, and FUV regions. A number of optical elements and detectors have been fabricated, and calibrations are applied to space payloads.

Progress EUV multilayer mirrors have been fabricated with working wavelengths including 9.4, 17.1, 19.5, 21.1, and 30.4 nm, with reflectance of 28%, 45%, 35%, 38%, and 38%, respectively [Fig. 1(a)]. Broadband, aperiodic FUV LaF₃/MgF₂ multilayer mirrors have also been prepared, with a working wavelength range of 140–180 nm and an in-band average reflectance of 45%. These mirrors also exhibit good out-of-band reflectance suppression [Fig. 1(b)]. For observing weak EUV and FUV targets, a single-photon-counting imaging detector with a spherical photosensitive surface and excellent adaptability to space environments has been developed. This includes key technological advancements such as the fabrication of spherical microchannel plates, the carving of micro-strip anodes, and the processing of weak optoelectronic pulse signals. The detector has an equivalent pixel size of 45 μm, a counting rate of $3.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, an effective aperture of $\Phi 75 \text{ mm}$, and approximately 1600×1600 equivalent pixels. Test and calibration devices for optical element measurements in X-ray, EUV, and FUV regions have been established. These devices are equipped with a hollow cathode source, a laser-produced plasma source, and an X-ray tube. The device's working wavelength range is from 0.1 nm to 200 nm, with a spectral resolution of 0.1 nm, a test repeatability of 1%, and a wavelength precision of 0.2 nm. These have been used to measure the reflectance and transmittance of optical elements and grating efficiencies. To obtain high-resolution solar images, a high-precision pointing and imaging stabilization technology has been developed. A solar guide telescope (GT) has been developed at CIOMP, achieving a pointing accuracy of $0.1''$ and a data update speed of 1 kHz. The GT is used in payloads onboard FengYun meteorological satellites and the Kua Fu advanced space-based solar observatory satellite (ASO-S). Based on the breakthroughs in the above key technologies, four payloads have been developed at CIOMP and are employed in space weather forecasting, warning, and scientific research. An innovative X-ray and EUV double-wavelength solar imager is developed, which combines an EUV multilayer of normal-incidence optics in the central part of an X-ray grazing-incidence imaging optics for the FY-3E satellite. This imager covers the 0.6–8.0 nm X-ray waveband and 19.5 nm EUV dual wavelengths. The instrument serves the function of two separate instruments. The imager is also equipped with a sensor for the same wavelengths which measures solar irradiance and regularly calibrates the X-ray and EUV solar images. Figure 9 shows solar images with absolute brightness. A Lyman α solar telescope (LST) has been developed for solar flare and coronal mass ejection (CME) observations, including a solar corona imager (SCI), a solar disk imager (SDI), and a white light solar telescope (WST). SCI utilizes a special design combining off-axis reflective optics and an FUV beam splitter to achieve inner corona imaging in dual wavebands of 121.6 and 700 nm. On-orbit test results indicate SCI achieves an angular resolution of $4.8''$, which is about one-eighth that of METIS/Solar Orbiter. The SDI's field of view (FOV) is $38.5'$, allowing for full solar disk observation. The solar observation area of the SDI is approximately four times larger than that of EUV/Solar Orbiter. LST is the first to achieve imaging observation of all regions, from the full solar disk to the inner corona, at Lyman- α , monitoring the real-time process of fine corona and prominence. These observations have been used for space weather forecasting and scientific research. The AEUV camera onboard Chang'e-3, as part of the mission's payload, is the first EUV instrument to be used for observing Earth's plasmasphere from lunar orbit. These Earth plasma images are released by the Lunar Exploration and Space Program Center of China National Space Administration in January 2014. Figure 16 shows the panorama image of Earth's plasmasphere captured from the lunar surface. The wide-field auroral imager onboard FY-3D has been developed to monitor aurora in the 140–180 nm waveband and can image the entire polar region ($5000 \text{ km} \times 5000 \text{ km}$) in two minutes. Compared with DMSP/SSUSI and TIMED/GUVI, it has a higher temporal resolution, offering an advantage for forecasting and scientific research.

Conclusions and Prospects A series of core space optical technologies in the X-ray, EUV, and FUV wavebands have been mastered, including the manufacture, testing, and calibration of instruments. A research system has been established at CIOMP. Several payloads in these wavebands have been developed and launched into lunar orbit, polar orbit, and sun-synchronous orbit. These payloads play an important role in space weather forecasting and scientific research.

Key words X-ray; extreme ultraviolet; far ultraviolet; space optical technology; space weather