

BAI Xianyong, TIAN Hui, DENG Yuanyong, CHEN Yajie, HOU Zhenyong, YANG Zihao, ZHANG Zhiyong, DUAN Wei, LI Wenxian, GUO Sifan.
Current Status and Future Perspectives of Solar Spectroscopic Observations at Extreme Ultraviolet Wavelengths (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, 43(3): 406–422. DOI:10.11728/cjss2023.03.220125010

太阳极紫外光谱探测的历史与展望*

白先勇^{1,3} 田 晖^{2,1} 邓元勇^{1,3} 陈亚杰²
侯振永² 杨子浩² 张志勇^{1,3}
段 帷^{1,3} 李文显¹ 郭思璠^{1,3}

1(中国科学院国家天文台 北京 100101)

2(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

3(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘 要 围绕国际一流科学目标,发展顶级探测设备是中国太阳物理位列国际先进行列的立足点。70 多年的空间太阳探测历程中,极紫外波段探测发挥了极其重要的作用,极紫外观测设备也几乎成为了太阳探测卫星的必备载荷之一。中国在极紫外探测,尤其是光谱探测方面的基础非常薄弱,导致相关科学研究几乎全部依赖国外数据,从而严重制约了中国太阳物理学科的发展。本文根据太阳极紫外探测的特点,系统分析了国外光谱探测的历史、现状以及未来发展趋势,并归纳了三类主要探测方式,即全日面积分光谱探测、低速光谱成像探测、快速光谱成像探测的当前水平,包括其技术方案及取得的部分科学成果。在此基础上,提出中国太阳极紫外光谱探测“三步走”的发展思路,并对每一步的科学目标、指标需求和候选探测方案提出建议。同时,展望了在太阳极紫外成像探测方面开展创新性尝试的思路。

关键词 太阳, 日冕, 极紫外, 空间探测, 光谱仪

中图分类号 P182

Current Status and Future Perspectives of Solar Spectroscopic Observations at Extreme Ultraviolet Wavelengths

BAI Xianyong^{1,3} TIAN Hui^{2,1} DENG Yuanyong^{1,3} CHEN Yajie²
HOU Zhenyong² YANG Zihao² ZHANG Zhiyong^{1,3}
DUAN Wei^{1,3} LI Wenxian¹ GUO Sifan^{1,3}

* 国家重点研发计划项目(2021YFA0718600, 2021YFA1600500), 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15018400)和中国科学院青年创新促进会项目(2023061)共同资助

2022-01-23 收到原稿, 2022-12-21 收到修定稿

E-mail: xybai@bao.ac.cn; huitian@pku.edu.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

2(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

3(School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract More than 70 years of the space-borne solar exploration clearly shows that Extreme Ultraviolet (EUV) wavelengths are very useful for observations of the solar transition region and corona. Because of this, almost all of the current and future solar space missions have EUV payloads. Unfortunately, China has never sent a solar EUV spectrometer to space so far, which significantly restricts the chance for Chinese solar physicists to have original discoveries and breakthroughs. Now it is the right time to develop our own payloads and contribute to space exploration of solar physics. In the paper, the characteristics of solar irradiance as well as the common optical elements at EUV wavelengths are introduced firstly. The history, current status and future perspectives of solar EUV spectroscopic observations are systematically reviewed, including the instrument designs and major scientific achievements. Three major types of spectroscopic observations are focused on, *i.e.*, full-disk integrated irradiance measurements, low-speed spectroscopic imaging observations with a certain spatial resolution and two-dimensional fast spectroscopic imaging. Then, a three-step development strategy is proposed to start Chinese solar EUV spectroscopic observations in space. The scientific objectives, observational requirements and candidate schemes of each step are discussed. Moreover, a solar EUV imager working at a wavelength that has never been done before is suggested. Once the above explorations are successfully implemented, major advances towards our understanding of many unsolved solar mysteries will be made, including the accurate speed estimation of coronal mass ejections and forecast of their arrival times at the Earth, the origin of solar wind and coronal heating mechanism, as well as the generation mechanism of solar eruptions. It will significantly elevate the level of key technologies involved in ultraviolet space explorations, too.

Key words Sun, Solar corona, Extreme Ultraviolet, Space exploration, Spectrograph

0 引言

极紫外指 $10\sim 91.2\text{ nm}$ (或 $10\sim 120\text{ nm}$)的电磁辐射。1946年,美国海军研究实验室利用V2火箭首次获得了太阳的紫外光谱,开创了人类利用紫外波段探测太阳的先河。6年后美国科罗拉多大学利用Aerobee火箭第一次将观测波段延伸到极紫外,探测到 $50\sim 250\text{ nm}$ 太阳光谱^[1]。70余年人类发射的飞船或人造卫星共携带了20余台太阳极紫外光谱仪、10余台太阳极紫外成像仪。1995年以来,国外发射的9颗主要太阳观测卫星中,7颗携带紫外成像/光谱观测设备,极紫外光谱仪数量高达6台。可以说,极紫外成像设备基本是当前太阳观测卫星的标配。国际上,多台新一代极紫外光谱和成像探测设备也在研

制或争取立项中。由此可见,无论过去、现在、还是未来,极紫外是空间太阳观测中不可或缺的核心波段。

70余年的科学观测表明,极紫外波段在诊断太阳高层大气(过渡区和日冕)方面具有独特优势,这正是太阳极紫外观测经久不衰的原因。当前,对日冕和过渡区的认识,在太阳风起源、日冕加热、太阳爆发机理等太阳物理重大科学难题方面取得的研究进展,有很大一部分源于极紫外成像和光谱探测。极紫外太阳观测特点可以归纳如下。

(1)该波段有大量发射线(见图1^[2]),其形成温度从几万度到两千万度,跨越三个数量级,可以诊断色球、过渡区、日冕等不同层次的等离子体温度、密度和元素丰度等参数^[3];利用多普勒效应,还可以诊断不同温度物质的运动速度。

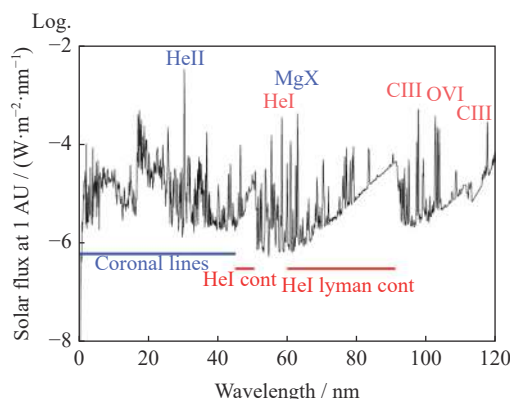


图1 2008年3—4月太阳极小年期间观测的太阳X射线和极紫外光谱(已认证部分发射线和连续谱)

Fig. 1 Solar Irradiance Reference Spectrum (SIRS) obtained at solar minimum in March and April 2008. (Important emission lines and continua are identified)

(2)基于磁场诱导跃迁的新方法,可以测量日冕磁场^[4,5]。

(3)可以同时探测太阳耀斑和日冕物质抛射(CME)两类剧烈的爆发现象^[6-8]。

(4)可以研究日冕中活动区、冕洞等大尺度结构的特征及演化^[9]。

尽管国际上多次开展太阳极紫外探测,但中国的太阳极紫外探测、尤其是光谱探测基础非常薄弱,导致该波段相关的科学研究几乎全部依赖国外数据,严重制约了中国太阳物理学的发展。中国2021年发射的“羲和号”卫星(太阳H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星)^[10]以及2022年10月发射的“夸父一号”卫星^[11](先进天基太阳天文台,含有远紫外波段的H I 121.6 nm观测,接近极紫外波段)均未携带极紫外成像或光谱观测设备。经过20余年的技术发展,2021年中国首台软X射线—极紫外太阳望远镜随风云三号E星成功发射,实现中国首次空间日冕探测,迈出了国内极紫外太阳成像探测^[12]的第一步。2022年,中国科学院空间新技术试验卫星上搭载的46.5 nm极紫外太阳成像仪实现了中国首次太阳过渡区探测^[13]。借鉴国际发展历史以及极紫外探测的科学优势,未来国内极紫外太阳探测要继续在成像观测方面发展并取得创新,实现从跟跑到领跑的跨越;同时,也要逐步攻克关键技术,早日实现太阳极紫外光谱探测零的突破。

为更好地推动中国太阳极紫外探测的发展,本文

分析了太阳极紫外探测的特点和面临的技术挑战,系统梳理了国外70余年间的探测历史和现状。结合未来的太阳探测计划以及当前太阳和日地物理领域的重大科学问题,提出了由易而难逐步开启中国太阳极紫外光谱探测“三步走”的发展思路,并提出了在极紫外太阳成像探测方面开展创新性尝试的途径。以期经过这些探测计划的实施,大幅提升中国太阳极紫外探测的技术能力和科学研究水平,助力深空探测和航天强国的国家战略。

1 太阳极紫外探测特点及面临的技术挑战

极紫外波段光学材料特性、太阳辐射特点与远/近紫外以及可见光波段存在显著差异,可用的成像和光谱探测方法也迥然不同。该波段的特点如下。

(1)太阳极紫外辐射约为可见光的万分之一,非常弱。为有效探测目标信号,需要具有大有效面积的望远镜和更灵敏的探测器。

(2)极紫外波段无透射材料,只能采用反射式望远系统,光谱探测分光元件通常采用光栅。当波长小于105 nm时,尚未有合适的透射元件,导致可见光和红外波段常用的双折射滤光器、法布里—珀罗干涉仪、迈克尔逊干涉仪等窄带滤光方法无法使用,也无法基于上述原理开展可调谐的成像光谱探测。

(3)正入射极紫外反射镜反射率很低,为获得更大的有效面积,常采用单反或两反系统。掠入射反射率高,可以采用多反系统,但偏离中心视场像质较差。如图2(a)所示,30 nm厚的镀金单层膜反射镜在正入射(3°入射角)时反射率随着波长增加而增大,在120 nm最大反射率仅20%左右,40 nm以下反射率小于5%,20 nm以下反射率可以忽略不计。而当掠入射(87°入射角)时,10~120 nm反射率均大于80%,所以早期太阳极紫外探测设备多采用掠入射光学系统,正入射光学系统仅开展过40~120 nm波段的探测。进入20世纪90年代,随着多层膜技术的出现(图2b)^[14],人类可以在40 nm以下波长范围获得窄带宽、较高反射率(40%)的多层膜反射镜,越来越多的太阳极紫外探测采用正入射系统实现高空间分辨率的窄带成像和光谱观测。

(4)因反射镜反射率低,光谱探测通常采用同时

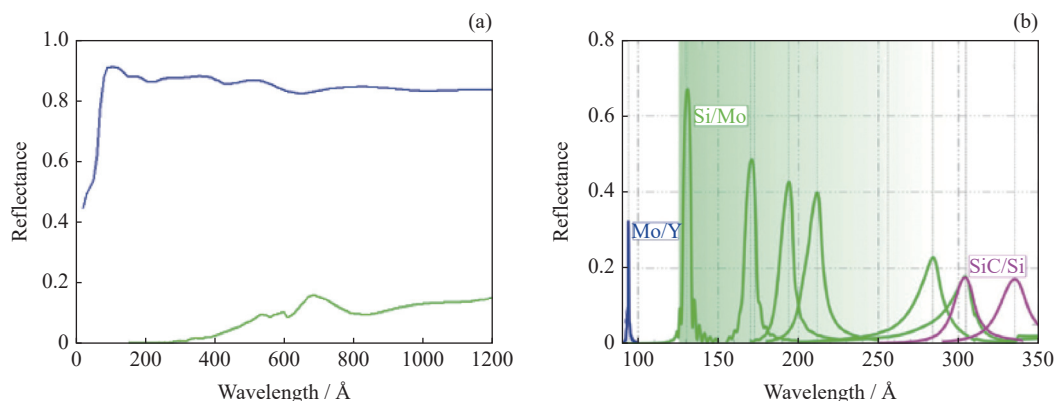


图2 (a) 30 nm 厚的镀金单层膜反射镜在入射角 3° (正入射, 绿色) 和 87° (掠入射, 蓝色) 时对极紫外辐射的反射率; (b) 不同材料多层膜在极紫外波段的反射率

Fig. 2 (a) Reflectance of the Au coated mirror with a thickness of 30 nm at the incident angle of 3 (normal incidence, green curve) and 87 degrees (grazing incidence, blue curve) at EUV wavelengths.
(b) Reflectance of the EUV multilayer mirrors with various materials

具有准直、聚焦和色散功能的凹面光栅。为同时获得更好的空间和光谱分辨能力, 可以采用非球面、变线距光栅, 但显著增加了光栅研制难度。

(5) 极紫外波长短, 散射光强, 对光学元件表面粗糙度要求更高, 需要超光滑加工。

(6) 为抑制近紫外、可见光和红外波段强太阳辐射的影响, 通常采用厚度仅有数十或数百纳米的薄膜滤光片。这种滤光片研制难度大, 且极易破损, 因此对运输和存储也提出了极高要求。

(7) 极紫外辐射无法在空气中传播, 只能通过空间卫星或探空火箭开展探测, 地面相关试验需要在真空环境下开展。此外, 光学元件或探测器表面有机污染物会引起强烈的极紫外吸收, 观测系统对污染敏感, 因而需要考虑真空、密封、防污染等措施, 这些都极大地增加了载荷研制成本和难度。

正因上述特点, 太阳极紫外探测始于光谱探测, 直到 1995 年 SOHO 卫星才实现常规的窄带成像观测。未来, 随着太阳物理对空间、时间、光谱分辨率和灵敏度的更高追求, 更大口径、更宽波长覆盖或更窄带宽的多层膜、超光滑反射镜、更大口径的薄膜滤光片、更高性能的光栅和探测器将是制约极紫外太阳成像和光谱探测成功实施的关键技术。

2 国外太阳极紫外光谱探测历史

过去 70 余年, 太阳极紫外光谱探测经历了三个

发展阶段。第一阶段(1950—1970 年)探索期, 以探空火箭和轨道太阳天文台(OSO 系列)为主要平台, 通过单狭缝和无缝太阳光谱探测, 认证了太阳发射的一些极紫外谱线, 探测到了冕洞、耀斑等日冕结构和活动现象; 第二阶段(1970—1995 年), 以轨道太阳天文台、地球大气研究卫星、太阳观测卫星为主要平台, 把太阳作为一个点源, 开展全日面积分光谱探测, 研究太阳极紫外辐射的长、短周期变化及其对地球气候、地球中高层大气的影响, 同时开展低空间分辨率光谱探测; 第三阶段(1995 年至今), 以太阳观测卫星为主要平台, 开展角秒级空间分辨率的太阳光谱成像探测和多波段动态、窄带成像观测, 研究太阳大气多时空尺度的活动现象及物质和能量传输机制, 在太阳风起源、日冕加热、太阳爆发物理机制等太阳物理重大科学难题方面取得了显著进展。迄今, 越来越多的学者意识到极紫外波段的观测对理解太阳过渡区和日冕层具有非常重要的意义。下面从全日面积分光谱探测、低速光谱成像探测、快速光谱成像探测三个角度梳理其采用的探测方案、当前探测水平以及取得的部分科学成果。

2.1 全日面积分光谱探测

不同于较为恒定的可见光辐射, 太阳极紫外辐射在活动峰年和谷年变化显著(图 3a^[15]), 而后者是导致地球热层大气和电离层状态发生改变的主要原因, 决定着地球上层大气的加热、电离等物理和化学过程。二战以后, 人类发现瞬变的太阳爆发活动经过行星际

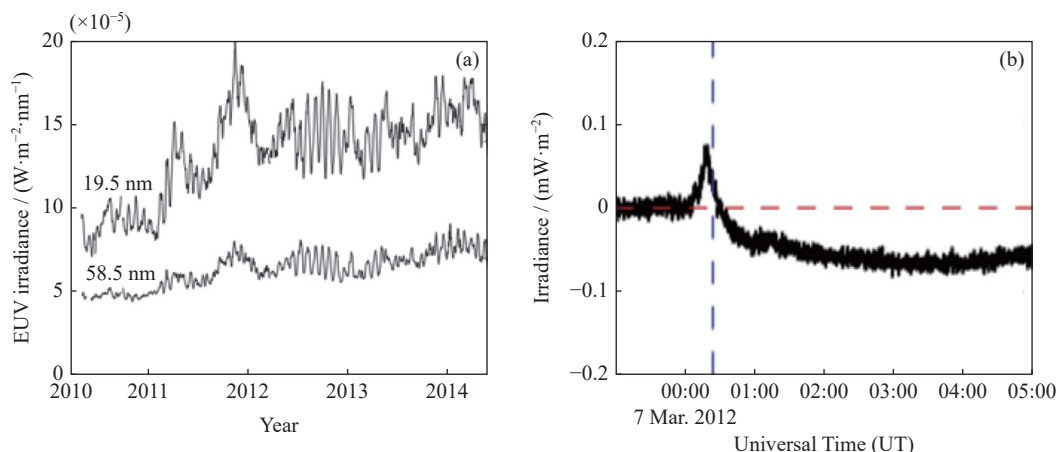


图3 (a) SDO/EVE 观测的 Fe XII 19.5 nm 和 He I 58.5 nm 太阳辐射在 2010—2014 年的变化。(b) SDO/EVE 观测的全日面积分 Fe IX 17.1 nm 辐射在 6 h 内的变化, 蓝色虚线处辐射增强对应太阳耀斑, 红色虚线代表宁静背景辐射, 耀斑后辐射相比宁静背景辐射的减弱即为日冕物质抛射导致的日冕暗化

Fig. 3 (a) Evolution of solar EUV irradiance observed by SDO/EVE from 2010 to 2014 at the wavelengths of Fe XII 19.5 and He I 58.5 nm. (b) Evolution of solar EUV irradiance for Fe IX 17.1 nm within six hours. Radiance enhancement indicated by the blue dashed line corresponds to the solar flare while the red dashed line represents the background radiation of quiet sun. The radiance weakening relative to the background radiation is the corona dimming induced by the coronal mass ejection

空间到达地球后, 会引发空间环境的扰动, 显著影响地面通信、导航、卫星等高技术系统的正常运行。而全日面积分极紫外光谱仪可以同时探测耀斑(辐射增强)和 CME(辐射减弱)这两类主要的爆发活动(图 3b^[6]), 进而有效实现太阳爆发活动的监测预警。因此, 全日面积分极紫外光谱观测既是太阳物理、日地空间物理和地球大气科学研究的需要, 也有规避太阳爆发活动对高科技装备损害的应用需求。表 1 给出了 1960 年以来主要的全日面积分极紫外太阳光谱观测设备。自 1976 年 AE-E 星发射以来, 欧美等发达国家从未间断极紫外太阳光谱辐照度的观测, 至今累积了长达 4 个(第 21~24)太阳活动周的数据。

全日面积分光谱观测是将二维太阳面源辐射积分起来, 因而没有空间分辨率。通过全日面积分过程, 得到太阳作为一颗恒星(点源)的光谱辐射, 更适合研究太阳整体的辐射强度或活动水平, 研究注入地球上层大气的总能量。此外, 通过点源辐射观测, 并结合有空间分辨率的太阳观测, 还将有助于更好地理解恒星活动现象。其主要观测参数为波长范围、光谱分辨率(光谱仪整机可分辨的最小波长间隔 $\Delta\lambda$, 其值最少是像素光谱分辨率的两倍)和时间分辨率。由表 1 可知, 过去开展过的这类观测波长范围较宽

(5~120 nm, 涵盖整个极紫外波段), 光谱分辨率较低(约 0.1~5 nm, 对应光谱分辨本领 $\lambda/\Delta\lambda$ 几十到几百)。时间分辨率则因采用的探测方案不同而有所差别, 在数秒到数分钟的量级。

太阳是面源, 使用聚焦成像的光谱观测系统会得到二维太阳像, 焦面后狭缝光谱仪只透过一维信息, 难以开展全日面积分光谱观测。因此, 多数全日面积分光谱探测没有前置望远系统。图 4 给出了常用的 4 类探测方案。图 4(a)^[29] 为单凹面光栅方案, 整个系统由入射狭缝、滤光片、光栅和探测器 4 部分组成。全日面(约 32.6', 对应 F 数约为 105)视场太阳光直接进入狭缝, 经薄膜滤光片抑制紫外、可见和红外辐射。根据光栅方程, 不同波长的极紫外辐射经光栅后衍射角不同, 在谱面上形成了狭缝光谱, 把狭缝方向光谱积分起来即可得到全日面积分光谱。因 10~40 nm 正入射反射率很低, 通常采用掠入射系统。狭缝、探测器和光栅结构布局主要有两种方式, 一种为狭缝和探测器都在罗兰圆(直径等于球面光栅的曲率半径)上, 此时谱面为曲面。不同波长的辐射需要使用点源探测器、并沿着罗兰圆扫描得到, 因而时间分辨率较低(数分钟), 例如 OSO 1/3/5 等卫星上的 GIS 载荷。对于太阳辐射对地球中高层大气影

表 1 1960 年至今主要的全日面积极紫外光谱探测设备及其参数(仪器类型见图 4a~d)
Table 1 Representative instruments for solar EUV irradiance measurements and their corresponding parameters since 1960 (Instrumental types are summarized in Fig.4a~d)

载荷	卫星	国家或地区	观测时间	设备类型	波长范围/nm	光谱分辨率/nm	时间分辨率/min	探测器
GIS	OSO-1 ^[16]	美国	1962	4(a)	1~40	0.17	/	/
GIS	OSO-3 ^[17]	美国	1967—1969	4(a)	2~40	约0.06	32	点源扫描光谱
GIS	OSO-5 ^[18]	美国	1969	4(a)	2.5~40	约0.03	约30	点源扫描光谱
EUVS	Aeros A/B ^[19]	德国/美国	1972—1973 1974—1975	4(c)	16~106	约1	/	点源扫描光谱
EUVS	AE-C/E ^[20]	美国	1973—1974 1976—1981	4(c)	14~185	约0.3	/	点源扫描光谱
SUSIM	UARS ^[21]	美国	1991—2005	/	115~410	约1	/	/
SOLSTICE	SORCE ^[22]	美国	2003—现在	/	125~320	约7	10	/
SEE	TIMED ^[23]	美国	2002—现在	4(b)	27~194	约0.4	每天1次	64×1024位敏 阳极
SUFR	CORONAS-F ^[24,25]	俄罗斯	2001	/	1~130	约12	7	/
SEM	SOHO ^[26]	美国	1995—现在	4(d)	25~34	5	1	点源
ACE	ISS ^[27]	欧洲	2008—现在	4(c)	16~220	0.5~2.3	每天1次	点源扫描
EUVS	GOES-R ^[28]	美国	2016—现在	4(a)	25~32 117~141	0.6	3	线阵
EVE-MEGS	SDO ^[29]	美国	2010—现在	4(a)/4(b)	5~121	0.1	10	面阵CCD
EVE-ESP	SDO ^[30]	美国	2010—现在	4(d)	18~37	4	0.25	线阵

注 符号“/”表示不属于这类设备或查不到具体指标。

响方面的研究,由于时间分辨率要求不高,可以采用此类探测方式,许多载荷甚至每天仅开机观测几次。另一种结构布局为狭缝和探测器不在罗兰圆上,此时优势在于谱面为平面,更适用于近年快速发展的二维平面探测器,比如,2010年SDO/EVE上的MEGS-A就采用了非罗兰圆结构(图4a)。面阵探测器一次曝光即可得到不同波长的辐射,时间分辨率大大提高,使得研究全日面积分极紫外光谱的短时间演化成为可能。

在40~120 nm波段,单层膜反射镜正入射反射率较高,可以使用正入射系统,但目前尚未有合适的窄带滤光片抑制高次谐波。因此,SDO/EVE的MEGS-B采用了第二种方案,即图4(b)^[29]展示的双凹面光栅方案。两面光栅的刻线方向相互垂直,太阳光经狭缝和第一块光栅后不同波长的辐射色散开来,在第一级衍射光谱位置放置光阑,选择出目标波段,后经第二块凹面光栅二次色散,得到无高次谐波影响的全日面积分极紫外光谱。

第三种方案为无狭缝掠入射平面光栅(图4c)^[27],如德国和美国联合研制的Aeros A/B卫星上搭载

EUVS载荷。全日面太阳光经矩形光阑后照射到平面光栅上,通过准直器选择出光栅衍射后的单色(特定衍射角)波长,并经点源探测器接收。通过同时转动准直器和探测器,得到不同波长的全日面积分极紫外光谱,因此时间分辨率也较低。2008年,国际空间站上搭载的欧洲贡献的SORCE载荷也采用了该方案。与Aero-A/B的不同之处在于,SORCE在平面光栅基础上增加了掠入射抛物镜(图4c),经平面光栅衍射后近似平行的极紫外单色光通过掠入射抛物镜汇聚在点源探测器上,通过同时转动抛物镜和探测器得到不同波长的辐射。这类探测方案优点为:入射光阑为矩形,相比图4(a)和4(b)(凹面光栅)中的狭缝光阑集光面积更大,采用掠入射抛物镜,衍射光还可以汇聚到一点,大大增加了探测器接收的光子数。因采用掠入射抛物镜,在探测器上可以得到太阳像,存在谱像混合,所以光谱分辨率不高。此外,获得宽波段光谱需要光栅扫描,耗时长,不适合诊断极紫外太阳光谱的快速变化。

除了反射光栅,全日面积分极紫外光谱探测也采用过透射光栅(见图4d^[26]),系统由准直器、狭缝、滤

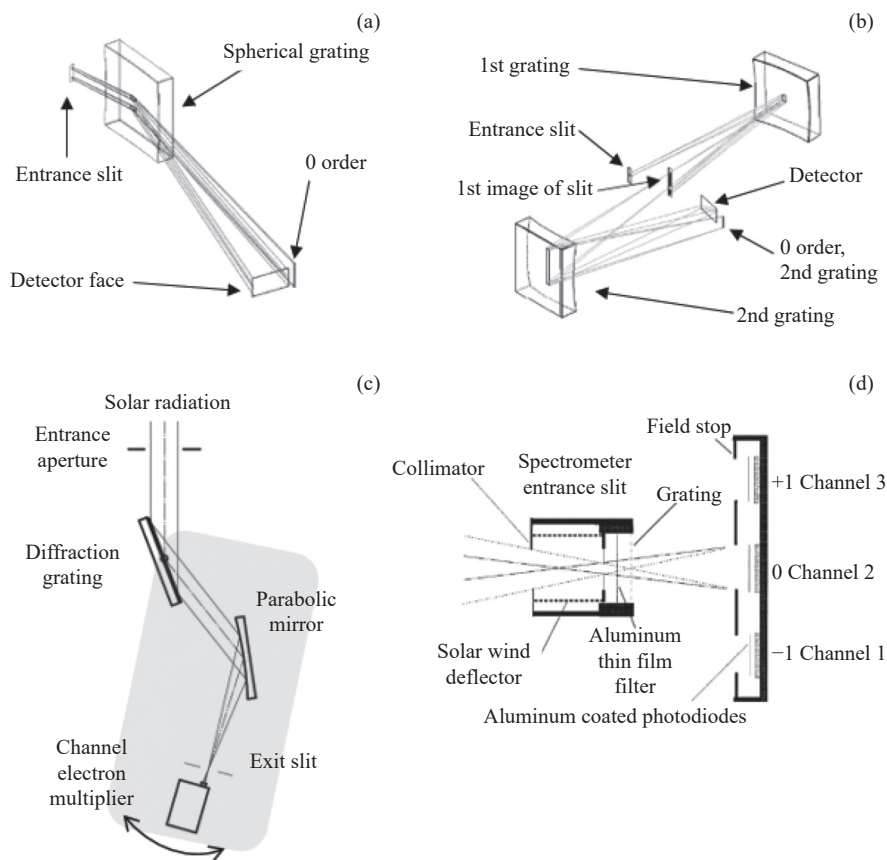


图4 全日面积分光谱探测采用的4种光学系统。(a)掠入射单凹面光栅,(b)交叉色散正入射凹面光栅,(c)掠入射平面光栅+聚焦镜,(d)透射式光栅

Fig. 4 Four types of optical layouts used for solar EUV irradiance measurements. (a) Single concave grating for grazing incidence. (b) Cross-dispersed double-Rowland circle grating for normal incidence. (c) Grazing incidence planar grating with the parabolic mirror. (d) Transmission grating

光片、透射光栅和探测器组成。全日面视场的太阳光经透射光栅后,不同波长辐射沿着不同衍射角传播,并由硅基线阵或多个点源探测器接收,如SOHO/SEM,GOES/EUVS等采用这种方案。此时,一次拍摄可以获得宽波段全日面积分光谱,时间分辨率高,但通常光谱分辨率很低。

此外,特定波长、较窄波段的全日面积分辐射也可通过极紫外光度计实现,此时光谱分辨率更低,例如欧空局PROBA 2卫星上的LYRA载荷^[30]以及中国风云三号E星上携带的19.5 nm光度计^[31]等。

美国SDO卫星上搭载的全日面积分极紫外光谱仪(MEGS-A和MEGS-B)可以获得高时间分辨率的全日面积分光谱,代表了当前探测的最高水平,取得了许多有影响力的科学发现。比如,EVE观测表明,耀斑引起的辐射增强以及CME导致的暗化可以清楚

地呈现在全日面积分的极紫外光变曲线上(图3b),并可以借助谱线强度下降的深度和速度分别得到CME的质量和速度^[32,33]。据此推论,星冕物质抛射将伴随着冕层特征谱线强度的减弱^[34],借助恒星光变暗化寻找星冕物质抛射,已经成为探测星冕物质抛射的一个重要方向,并被美国提议中的ESCAPE卫星探测计划作为其首要立项依据^[34],同时也是本文提出的恒星极紫外卫星探测计划的主要科学目标之一^[35]。

2.2 低速光谱成像探测

相比全日面积分光谱观测,有空间分辨率的光谱成像观测可以得到日面特征的二维分布,进而可以分辨活动区、冕洞等大尺度结构,或日冕亮点、微耀斑、喷流等小尺度活动。借助多条形成于不同温度的谱线,可以得到不同温度下的日面二维辐射强度图、二维视向速度图、二维谱线宽度图等,借助光谱信息还

可以得到电子密度、电子温度和相对丰度等参数的二维空间分布, 结合这些热力学参数二维图的演化, 特别适合研究太阳大气中的物质和能量传输过程。表 2 给出了过去 50 多年主要的此类探测设备的指标参数。

有空间分辨率的光谱成像探测需要配置望远系统, 以得到日面二维辐射信息。因正入射反射镜反射率很低, 人类早期通常采用掠入射望远系统以覆盖更宽波段范围, 例如 OSO-4/6/7, Skylab^[36,37] 空间站上的极紫外光谱仪和 SOHO 卫星上的日冕诊断光谱仪 (Coronal Diagnostic Spectrometer, CDS)^[39] 等。CDS 中掠入射部分的基本组成如下。Wolter 型掠入射望远镜将太阳像成在焦面上, 焦面位置放置小孔选择观测点源视场, 目标视场辐射经掠入射或正入射罗兰圆光栅得到 15~78 nm 光谱辐射, 探测器采用胶片或极紫外像增强器。因采用掠入射系统像差较大, 观测数据的空间分辨率差为 5"; 有效集光面积也很小, 观测数据的灵敏度不高。因是点源视场, 需要通过扫描镜或改变望远镜指向实现二维视场的扫描观测, 耗时很长 (在数十小时的量级或更长时间)。CDS 目标谱段中包括过渡区和日冕谱线, 但因扫描成像的时间分辨率很低, 在短时标太阳爆发活动方面的科学成果有限。

当波长大于 40 nm 时, 正入射反射镜有一定反射率(图 2a), 所以欧空局 1995 年发射的 SOHO 卫星上的太阳紫外辐射测量仪 (Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation, SUMER)^[38] 采用了正入射狭缝光谱仪开展 40~160 nm 观测, 光路图见图 5(b)。太阳光先经过离轴抛物镜成像在焦面上, 焦面位置放置狭缝选择线源观测视场, 目标视场辐射进入后续光谱分光系统。光谱分光系统由一面准直镜、

平面反射镜和凹面光栅组成, 线源观测视场的太阳辐射经准直镜后变为平行光, 经平面镜反射后进入凹面光栅 (沃茨沃尔 Wartworth 结构使用), 不同波长辐射最终成像在二维面阵探测器上。因采用正入射系统, SUMER 的有效面积比 CDS 更大、空间分辨率 (约 3") 更高。SUMER 的光谱分辨率 (优于 0.01 nm) 比表 1 中的全日面积分光光谱观测高 1~3 个量级, 是当前 40~120 nm 极紫外光谱观测中最高的。得益于高光谱分辨率, SUMER 观测数据中谱线混合影响非常小。SUMER 单狭缝观测曝光时间一般在分钟量级, 二维视场扫描时间在小时量级。40~160 nm 宽光谱辐射需要通过旋转光谱分光系统中的平面反射镜得到, 因此宽波长范围的光谱耗时比较长。SUMER 40~160 nm 波段范围内包含众多形成于过渡区温度的谱线, 大大加深了对过渡区的认识。

随着极紫外探测技术的快速发展, 20 世纪 90 年代人类已经通过多层膜技术获得窄带反射镜, 并用于 10~40 nm 的极紫外成像探测中, 如 SOHO 卫星上的极紫外成像望远镜 (EIT) 以及 TRACE 卫星等^[42,43]。2006 年, 日本 HINODE 卫星携带的极紫外成像光谱仪 (EUV Imaging Spectrometer, EIS) 即采用正入射的光谱成像探测方案 (图 5c)^[40]。EIS 采用两反系统, 由离轴抛物面主镜和凹面光栅组成, 离轴抛主镜在焦面狭缝处选择线源观测视场, 后由超环面凹面光栅色散, 17~21 nm 和 25~29 nm 两段目标光谱辐射通过背照式 CCD 探测器接收。可见、红外和近紫外光谱辐射通过前置薄膜滤光片抑制。为增强目标谱段反射率, 主镜和光栅上分区镀制两种不同类型的多层膜, 满足窄带宽的同时拥有较高的反射率。EIS 的空间分辨率与 SUMER 相近, 约 3", 但其观测波段比

表 2 过去 50 年主要的太阳极紫外光谱成像探测设备
Table 2 Representative solar EUV imaging spectrometers used in the past fifty years

设备	国家或地区	年代	空间分辨率/"	观测波段/nm	光谱分辨率/nm	成像方式	光栅类型	探测器类型
OSO-4/6/7 ^[36]	美国	1967	差于60	15~140	约 0.3	掠入射, 点源光谱	罗兰圆	点源/扫描光谱
Skylab-SO82A ^[37]	美国	1973	差于5	17~63	≥0.003(存在谱像耦合)	正入射无缝光谱	球面固定线距	胶片
SOHO/SUMER ^[38]	欧洲	1995	约3	50~161	约0.0042, 80	正入射, 狭缝光谱	球面固定线距	像增强器
SOHO/CDS ^[39]	欧洲	1995	约6	15~78	约0.021	掠入射, 点源光谱	球面固定线距	像增强器
HINODE/EIS ^[40]	日美英	2006	约3	17~21 25~29	约0.006, 26	正入射, 狭缝光谱	超环面固定线距	背照式CCD
SO/SPICE ^[41]	欧洲	2020	约4	70~79 97~104	约0.026, 74	正入射, 狭缝光谱	超环面变线距	像增强器

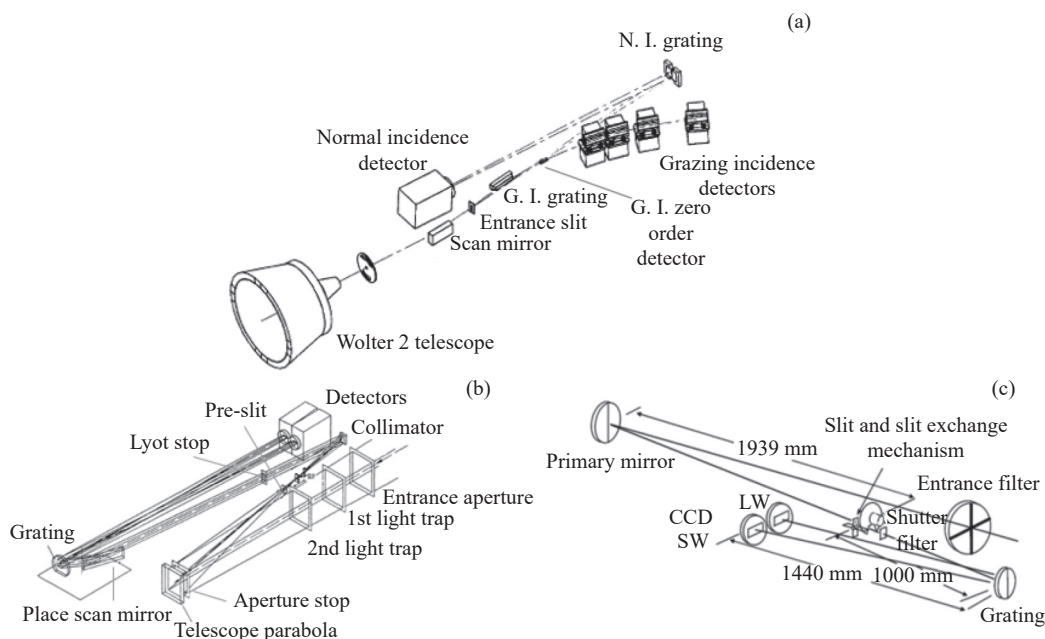


图 5 (a) SOHO/CDS 光路, (b) SOHO/SUMER 光路, (c) HINODE/EIS 光路

Fig. 5 Optical layouts for SOHO/CDS (a), SOHO/SUMER (b), HINODE/EIS (c)

SUMER 更短,观测的主要是日冕高温谱线,更适合开展日冕的观测研究。EIS 的光谱分辨率约 0.007 nm,是当前 17~30 nm 波段太阳极紫外探测中最高的,也可以分辨出很多日冕强线,受谱线混合的影响很小。EIS 单狭缝光谱观测的曝光时间约 30 s,二维视场狭缝扫描在小时量级,与 SUMER 类似。

综上所述,目前国际上有空间分辨率的光谱观测已实现的典型空间分辨率为 3"~5",光谱分辨本领在 3000~10000 的量级,扫描二维视场的时间在小时到天量级。基于上述有空间分辨率的光谱观测,大大促进了人类对太阳大气不同尺度活动现象的理解。SUMER 的光谱观测显示,低过渡区和高过渡区的辐射结构和流场都存在巨大差异^[44-46]。在高过渡区,谱线的平均多普勒频移从红过渡到蓝(过渡处对应的温度大约为 50 万度),表明其在太阳大气的物质和能量传输过程中占有关键地位,可能是太阳风起源的区域^[47,48]。利用 SUMER 的观测, Hassler 等^[49]首次观测到高过渡区谱线在色球网络组织处呈现明显的蓝移,从而提出高速太阳风起源于色球网络组织。Tu 等^[48]结合 SUMER 观测和日冕磁场外推,进一步发现高速太阳风是沿着漏斗状的磁场结构往外流动的。利用 SUMER 观测数据, Innes 等^[50]发现太阳过渡区中存在很多高速的双向喷流,表明小尺度磁重联

过程在太阳高层大气中普遍存在,为日冕加热的纳耀斑模型提供了关键的支持,并极大地推动了日冕加热的观测研究。

EIS 的日冕光谱观测发现活动区边界存在持续的蓝移,可能是低速太阳风初始流动的信号^[51]。Brooks 等^[52]利用 EIS 的全日面扫描观测,找出了日面上所有的日冕谱线呈现蓝移和 FIP bias 值为 3 左右的区域,从而首次认证出了低速太阳风的在整个日面上的全部源区。De Pontieu 等^[53]结合 EIS 的极紫外光谱观测和其他望远镜的成像观测,发现色球中的一部分针状物可以持续加热到日冕温度,从而提出日冕中的百万度等离子体源于色球的新观点,引领了日冕加热研究的新方向。借助 EIS 的光谱观测, Brooks 等^[3]结合 EIS 对 Si/S 丰度比值的诊断结果和行星际高能粒子的实地测量结果,发现超级太阳活动区 11944 中产生的高能粒子主要源于该活动区核心区域高温冕环的足点。基于 EIS 对 Fe X 25.7 nm 等谱线的观测,他们还利用磁诱导跃迁的原理,发现该区域的日冕磁场高达数百高斯。此外, EIS 的观测还表明,极紫外光谱在诊断 CME 等太阳爆发活动方面也有强大的能力^[54]。

2.3 快速光谱成像探测的前期探索

单狭缝光谱仪扫描二维视场耗时长,限制了人们

对短时标太阳爆发活动的相关研究。要想充分发挥光谱观测对太阳爆发等瞬时现象观测的优势,需要快速光谱成像观测。早在 20 世纪 70 年代,美国就在 SKYLAB^[37] 卫星上开展了探索,采用仅由一面凹面光栅和探测器组成的沃茨沃尔(Wartworth)光谱成像系统(图 6a,引自 MOSES^[55,56])。太阳光进入凹面光栅,目标波长衍射角为 0,入射角根据光栅方程得到,这样在满足高光谱分辨率的同时,还可以获得最佳的空间分辨率。因无狭缝,一次拍照在 1 级衍射谱面处同时得到二维太阳像和光谱信息。因无视场光阑,谱面处为混合的全日面太阳像及其光谱。因不同日面位置入射角稍有差别,相同波长辐射在探测器上位置也不同。典型观测结果如图 6(b)^[37] 所示,探测器接收数据中存在谱像混合,仅在少数孤立的、辐射较强的发射线,例如 He II 30.4, Ne VII 46.5 nm 等波长位置可以获得较好的观测结果。

为降低谱像混合的影响,2006 年美国蒙大拿州立大学提出一种新的无缝光谱探测方案^[55,56](图 6a),并应用在美国的探空火箭多级太阳极紫外光谱仪(Multi-Order Solar EUV Spectrograph, MOSES)上。与 SKYLAB 类似,他们也采用单凹面光栅无缝光谱方案。与 SKYLAB 仅记录 1 级光谱不同, MOSES 采用三个探测器,可以同时记录 0 级宽带像和 ± 1 级色散后的混合谱像图。因同时得到更多谱像耦合($0, \pm 1$ 级别)信息,借助平滑乘法代数重建(Smooth Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)算法,或电子计算机断层扫描图像重建领域常用的傅

里叶反向投影(Fourier Backprojection)、像元模型重建(Pixon Reconstruction)等算法进行后期数据处理, MOSES 原则上可以得到了强度和速度场的信息,然而迄今仅有极少数文献展示了获取的很小视场的速度分布^[56]。其中一个可能的原因是, MOSES 仅能获得少数衍射级的信息,基于 MOSES 反演物理参数属于病态反演。基于模拟数据的测试结果表明,上述算法反演的 MOSES 速度场大小相比真实值约低估 40%^[56],因此 MOSES 反演的二维速度场与狭缝光谱仪的结果还有较大差别。因此,该方法在获取二维速度场方面的精度、可靠性和实际可行性都有待进一步论证。

另外,为快速获得太阳的光谱成像信息,基于单狭缝光栅光谱仪,2014 年美国西南研究院设计了一种快速扫描的方案,并应用在快速成像光谱装置(Rapid Acquisition Imaging Spectrograph Experiment, RAISE)上,并通过探空火箭验证了技术可行性^[57]。RAISE 与 SUMER 和 EIS 类似,采用单狭缝光谱仪方案。通过选择紫外波段辐射最强的 Ly α 121.6 nm 谱线,同时利用较大口径的主镜(20 cm)增加有效面积,可以显著缩短单次曝光时间(几十 ms)。RAISE 采用单狭缝观测,观测光谱中无谱像混合的影响;通过配置高帧频的极紫外 CMOS 图像传感器可以快速扫描到二维日面信息(1 min 内得到了约 $3.3' \times 2'$ 视场的光谱成像图)。这类方案需要采用强发射线,以降低单次曝光时间,进而实现快速扫描,不太适用于辐射较弱的日冕谱线。此外,仅采用一个狭缝,若要覆

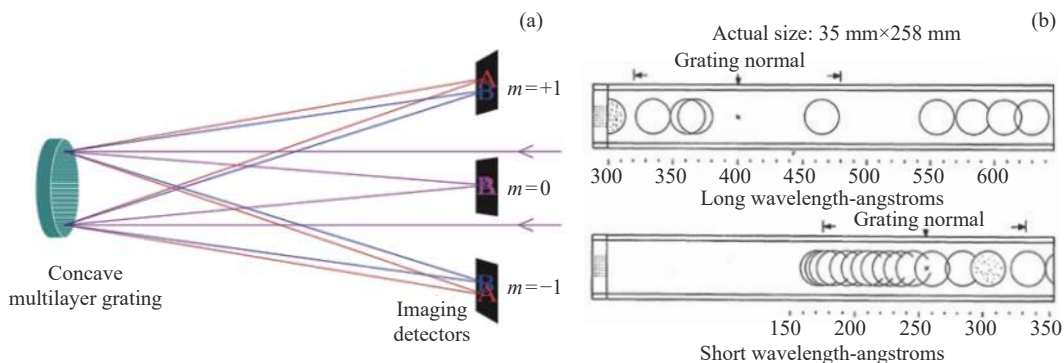


图 6 (a) 无缝光谱成像观测系统。(b) 焦面谱像耦合示意, 圆圈代表日面大小, 不同圆圈代表不同波长日面辐射位置, 多个圆圈交叉代表存在谱像耦合, 交叉越多代表谱像耦合越严重

Fig. 6 (a) Slitless solar imaging spectroscopy. (b) Schematic diagram of focal plane spectral image coupling. Circles represent the solar image and different circles represent the one with diverse spectral lines. The smaller the distance between multiple circles, the more impact of spectral lines from neighboring solar positions

盖较大的观测视场(例如全日面),扫描时间仍然较长。

MOSES 或 RAISE 仅是二维快速光谱扫描的前期探索,上述方案仅在探空火箭上开展过技术验证,尚未在卫星上应用。也就是说,目前国际上已有卫星的极紫外设备尚不具备二维快速光谱成像探测能力。

3 国外极紫外太阳光谱探测发展趋势

最新的数值模拟结果表明,无论是波还是纳耀斑机制加热日冕,现有角秒量级空间分辨的光谱成像观测很难看到模型预测的一些核心特征^[58]。太阳耀斑等爆发现象的能量释放和转换过程也经常体现在亚角秒的空间尺度以及数十秒甚至更短的时间尺度上^[59]。因此,未来要在日冕加热和太阳爆发机理等太阳物理重大科学难题上取得突破性进展,需要将空间分辨率提升到亚角秒量级。同时,也需要同时覆盖更宽温度范围(色球、过渡区和日冕温度),以更好地理解太阳不同层次大气之间的耦合过程。此外,还需要在活动区尺度观测视场(约 3')内提高时间分辨率,以诊断瞬时爆发现象。可见,高空间(亚角秒)、时间、光谱分辨率和宽光谱范围覆盖、高灵敏度观测是国际未来太阳极紫外光谱探测的发展趋势^[60]。

为提高空间分辨率,2020 年欧空局发射的 Solar Orbiter 卫星采用了小口径、近距离的深空探测方式,飞船与太阳之间最近距离只有 0.28 AU,其携带的日冕环境极紫外光谱成像仪(Spectral Imaging of the Coronal Environment, SPICE)^[41] 依然采用单狭缝光栅光谱仪。距离太阳越近,接收到的辐射越强,所以 SPICE 主镜口径只有 4.35 cm×4.35 cm。其空间分辨率(用角度表示)约为 4",在 0.28 AU 处可分辨最小日面尺度约 750 km,比 EIS 2000 km 左右的可分辨尺度提高了 2 倍多。SPICE 在 SUMER、CDS 和 EIS 探测基础上重点选择了形成于高过渡区的谱线,例如分别形成于 16, 25, 32, 63, 80 万度的 O IV 78.77 nm, O V 76.04 nm, O VI 103.19/103.64 nm, Ne VIII 77.04 nm 和 Mg VIII 77.23 nm 谱线。SPICE 还包含一些低温色球谱线以及高温日冕谱线,因此其观测可以覆盖 1 万度~100 万度温度。SPICE 仪器设计与 HINODE/EIS 类似,采用两反系统,技术上的改进之处主要包括:(1)采用超环面变线距光栅,可以提高光栅放大率,进而有效缩短载荷大小,以适应深

空探测卫星小型化、轻量化的要求;(2)采用的工作波段硅基探测器光电转换效率低,读出噪声大,因而探测器采用了读出噪声更小、空间分辨率更高的基于 CMOS 图像传感器的像增强器。相比 SUMER, SPICE 可以同时获得更宽温度范围的光谱,空间和时间分辨率更高,原则上更有利于研究太阳大气中的小尺度活动。

为提高空间分辨率,近期刚刚立项的由日本、欧洲和美国联合研制的极紫外光谱望远镜(EUV High-Throughput Spectroscopic Telescope, EUVST)^[61] 则利用近地轨道卫星,但显著增加了望远镜口径的方式。望远镜口径达 30 cm,焦距长达 22.4 m,空间分辨率高达 0.4"。EUVST 发射后将是迄今空间分辨率最高的极紫外太阳光谱仪。为同时覆盖色球、过渡区和日冕谱线, EUVST 采用了 4 个探测器同时记录 17~21, 69~85, 92.5~107.5, 111.5~124.5 nm 波长范围。相比 EIS, EUVST 涵盖了色球和高过渡区谱线;相比 SUMER, 涵盖了高温日冕谱线;相比 SPICE, EUVST 不同形成温度的谱线更多,空间分辨率更优。因口径大集光面积强,其设计的单狭缝时间分辨率高达 1 s,比 EIS 高一个量级。EUVST 仪器设计与 EIS 类似,采用两反系统,区别在于主镜口径更大、焦距更长,光栅采用了消像差能力更强的椭球面变线距光栅,因波段范围涵盖整个极紫外波段的不同部分, EUVST 采用了两种类型探测器(背照式 CMOS 图像传感器和基于 CMOS 的像增强器)。

对日冕加热等问题的研究,仅有线源高空间分辨率观测还不够,还需要短时间内完成二维成像光谱测量(角分量级小视场,时间分辨率优于 1 min)。为实现上述目标,美国 De Pontieu 等^[62] 提出多缝极紫外光谱仪(Multi-slit Approach to Coronal Spectroscopy with the Multi-slit Solar Explorer, MUSE),通过采用多条狭缝来缩短扫描时间。MUSE 计划采用的狭缝数量多达 37 条,单狭缝宽度 0.4",相邻狭缝间距 4.45",其焦面处狭缝的放置情况及模拟的观测效果如图 7^[62] 所示。按照上述设计扫描 170"×170"活动区视场仅需 12 s。为减小多狭缝观测谱像混合的影响, MUSE 选择带宽极窄的多层膜反射镜,目标谱线附近滤光片宽度仅有 1 nm。为进一步移除数据中残留的谱像混合,他们团队也提出了对应的解耦方法^[63]。该卫星计划近期已经工程立项。

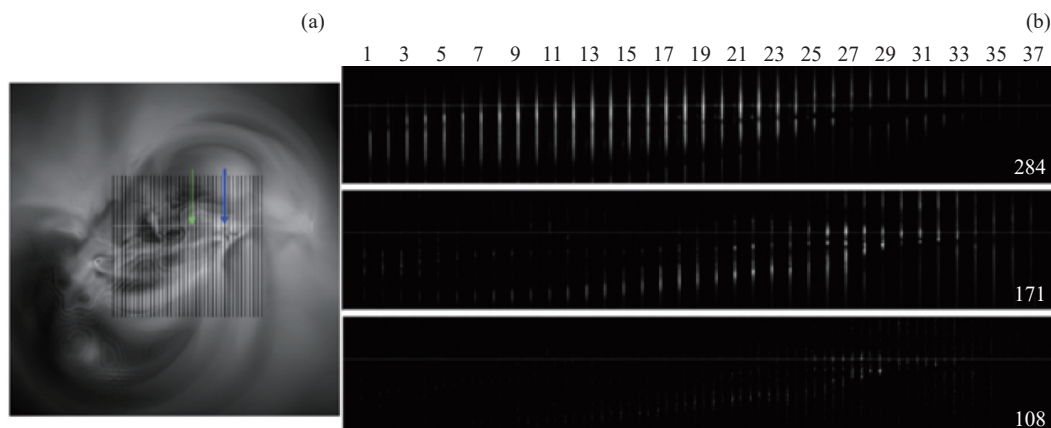


图 7 (a) 极紫外多缝光谱仪狭缝放置, 背景为模拟的 Fe IX 17.1 nm 辐射。(b) 模拟的 Fe XIX 10.8 nm, Fe IX 17.1 nm, Fe XV 28.4 nm 多缝光谱观测效果

Fig. 7 (a) Synthetic Fe IX 17.1 nm image overlaid with slits of MUSE. (b) Simulated detector images of the Fe XIX 10.8 nm, Fe IX 17.1 nm and Fe XV 28.4 nm lines

4 中国太阳极紫外光谱探测发展建议

科学探索只有第一, 服务科学目标的探测设备也是独一无二的, 照搬或照抄国外已有的探测计划或许会提升国内极紫外探测技术, 但难以产出国际领先的重大原创性科学成果。这是因为国外也在实施同类探测计划。由于数十年的积累, 国外的载荷研制、运行和维护水平、科学数据处理能力和相关科学准备都远强于中国。照搬国外探测计划将使中国错失重大科学发现的机会, 不利于实质性提升中国太阳物理在国际上的影响力。也就是说, 只有在准确把握国际已有以及未来规划探测的基础上, 跳出他们的发展思路, 结合中国的实际水平, 梳理出具有国际一流水平的科学目标, 并研制出独一无二的探测设备, 才能真正有利于提升中国在极紫外探测方面的整体实力。

由前两节分析可知, 对于全日面积极紫外光谱, 当前光谱分辨本领相比有空间分辨率的光谱观测差很多, 导致观测谱线中存在光谱混合, 还无法基于多普勒效应测量多数色球、过渡区和日冕谱线的视向速度, 而基于多普勒蓝移探测日冕物质抛射对空间天气预报来讲非常重要, 类似探测计划尚未见相关报道。对于有空间分辨率的光谱观测, 无论是刚发射的 SPICE 还是在研的 EUVST, 都瞄准亚角秒空间分辨率的观测, 其目前的谱线选择中, 缺乏形成温度为 50 万度左右的过渡区谱线, 而这个温度区域对太阳风起源非常关键。对于二维快速光谱成像观测, 国际目

前重点在发展高空间分辨率、小视场的探测, 并不具备对大尺度活动区、冕洞等太阳风暴源头的探测能力。

此外, 日冕磁场测量是 21 世纪太阳物理最大的挑战之一^[36,64-67], 也是各国太阳物理未来发展的重点方向之一。极紫外包含众多日冕谱线, 可用的日冕谱线总数比可见和红外波段高数个量级。可惜的是, 当前极紫外光谱探测仍处在运动学和热力学参数诊断阶段。因而, 利用极紫外谱线进行日冕磁场的探索也将是未来太阳极紫外探测的新方向。

总之, 国际已实施的和推动中的太阳极紫外光谱探测仍存在许多不足, 中国仍有在短期内进入国际第一方阵的机会。因此, 建议由易而难逐步开启国内的太阳极紫外光谱探测。第一步, 建议开展高光谱分辨率的全日面积分光谱探测; 第二步, 建议对 10 万度以上太阳高层大气开展亚角秒空间分辨率的成像和光谱扫描探测, 以和当前太阳低层大气优于 0.3" 的空间分辨率大致匹配, 并尝试基于极紫外光谱测量日冕磁场; 在上述基础上, 第三步开展二维快速大视场光谱探测, 研究速度甚至密度和磁场等参数的二维分布及其快速演化, 以更好地理解太阳爆发机理和物质能量传输机制, 更好地服务空间天气监测和预报。

4.1 高光谱分辨率全日面积分探测

对于全日面积极紫外光谱探测, 其主要的科学目标如下。

(1) 监测太阳极紫外光谱及其演化, 通过一些典

型谱线强度的增加和暗化来探测耀斑的发生和 CME 的起源时刻,以极小资源需求研究太阳作为一颗恒星的活动规律,推动正在兴起的恒星磁活动和系外空间天气^[35]研究;

(2)尝试通过谱线蓝翼增强探测 CME 初始传播阶段的视向速度^[54,68],进而有望结合极紫外成像或日冕仪观测到的 CME 在天空平面的速度,得到 CME 的真实速度和传播方向等关键信息,从而提升 CME 传播和对地效应预报的精度。

除上述科学目标外,参考 SDO 卫星的 EVE 载荷,还可在耀斑加热机制、日冕暗化、日冕元素丰度的长期演化、电离层对太阳活动的响应等方面取得新进展。

基于对已有 EVE/MEGS-A 和 MEGS-B 数据分析结果,初步建议的目标波段为 18~27 nm,该波段内包含了形成温度($\lg T = 5.6 \sim 6.4$ K)之间的多条谱线。这些谱线来自于不同元素的不同价态离子,不同元素具有不同的第一电离势,并且存在对密度敏感的谱线对,可以用于定量诊断日冕等离子体的密度、温度和相对丰度(FIP bias)。结合 EVE 观测以及 Yang 等^[68]的模拟结果,如果要准确探测到 CME 视向速度,光谱分辨本领需高于 500,在目标波段至少要比 EVE 的高 2~3 倍。这样的光谱分辨本领也可以确保关键谱线基本不受其他谱线混合的影响。

值得一提的是,MEGS-A 在 2014 年后停止观测,而第 25 个太阳活动周峰年即将来临,国际上当前尚无类似设备计划观测这个波段的全日面积分光谱,这为中国提供了绝佳契机。所以第一步总结为国际上最高分辨率的全日面积分光谱探测。载荷方案可

以参考图 4(a)的单凹面光栅,仅有滤光片、狭缝、光栅和探测器 4 个核心部件组成,体积小、组成元器件少,需要的重量和功耗小,特别适合立方星搭载,或在未来各类太阳探测卫星上搭载,有利于快速积累空间极紫外光谱探测的经验。

4.2 高层大气亚角秒分辨率光谱成像探测

对于高层大气亚角秒分辨率光谱成像观测,其科学目标如下。

(1)开展高过渡区的光谱成像探测,研究太阳风起源和日冕加热机制。高过渡区是衔接低层大气和日冕的关键区域,也是目前太阳大气各层中唯一没有被详细观测过的区域。迄今为止,该区域几乎还没有直接成像的观测,也没有高空间分辨率(优于 3")的光谱观测^[46,60]。

(2)开展日冕的高空间分辨率观测,研究日冕加热与太阳风起源机制,并尝试对日冕磁场进行测量。当前,日冕磁场测量仍是世界难题,中国复旦大学和瑞典隆德大学等结构的研究人员提出基于磁场诱导跃迁的原理测量日冕磁场的原创方法^[69,70],近年来引起了国内外的广泛关注。基于这一原理,最近国外学者基于 HINODE/EIS 的历史数据初步得到了日冕磁场及其二维分布^[5,3,71],Chen 等^[4]还利用正演模型开展了基于这一方法测量磁场的可靠性验证,并开展了相关实验室测量,初步梳理出了相应的观测需求。

为了实现上述科学目标,需要的观测参数如表 3 所示。日冕磁场观测可选择 17~21, 25~29, 33~36 nm 波段,涵盖了 Fe X 25.7 nm 磁场诱导跃迁谱线及测量磁场需要的温度、密度诊断谱线^[63];另一个波段 40~47 nm,涵盖形成于高过渡区的关键谱线

表 3 中国未来太阳极紫外光谱探测设备及其指标需求建议

Table 3 Suggestion on the future solar EUV spectrographs and their observational requirements in China

探测阶段	探测名称	工作谱线/波段/nm	视场/(')	空间分辨率/(")	狭缝数量	光谱分辨本领($\lambda/\Delta\lambda$)	时间分辨率/s
第一步	高光谱分辨率全日面积极紫外光谱仪	18~27	$\geq \phi 33$	—	1	≥ 500	约 60
第二步	高空间分辨率狭缝光谱仪	17~21/25~29 33~36/42~47	$> 0.0042 \times 3$	约 0.5	1	≥ 4000	约 30
	高空间分辨率成像仪	Fe XII 19.5/Fe IX 17.1/ Ne VII 46.5	约 3×3	约 0.2	0	≤ 1 nm @19.5/17.1 nm ≤ 3 nm @46.5 nm	约 10
第三步	全日面多缝快速扫描光谱仪	Fe XII 19.5/Ne VII 46.5/Ly- α 121.6/He II 30.4 (候选的重点谱线)	约 42×42 (单狭缝约 0.67×42)	约 6	≥ 5	≥ 3000	约 240

Ne VII 46.5 nm, 其形成温度约 50 万度, 正好位于平均多普勒频移从红移往蓝移过渡的关键区域^[45,46], 也是 SO/SPICE 和 EUVST 没有覆盖的谱段。

除了狭缝扫描光谱观测, 还可参考 IRIS 卫星, 利用狭缝监视像开展高分辨率过渡区和日冕成像观测, 目标谱线可以选择 Ne VII 46.5 nm 和 Fe XII 19.5 nm, 一个形成在 50 万度左右的高过渡区, 一个形成在 150 万度左右的日冕层, 空间分辨率至少要优于 0.5", 最好能达到 0.2"的量级。此外, 也可以单独针对一些主要谱线, 例如 Ne VII 46.5 nm, Fe IX 17.1 nm, Fe XV 28.4 nm 等, 设计高分辨率的成像观测系统。对于形成于 50 万度左右的 Ne VII 46.5 nm 谱线, 国际上尚无动态成像观测。目前, 中国在 Ne VII 46.5 nm 观测所需要的窄带多层膜反射镜^[72]和探测器等方面都取得了显著进展, 在中科院空间新技术试验卫星上的 46.5 nm 极紫外太阳成像仪搭载试验也取得了预期的结果。

第二步探测的特色: 一是基于磁场诱导跃迁对日冕磁场尝试开展常规测量, 二是对 50 万度左右的高过渡区进行高分辨率的成像光谱观测, 三是对日冕实现常规的 0.2"分辨率观测。这三点在国际上均尚未实现, 并与国外已有的 SO 和 EUVST 等卫星探测计划互补。探测方案可以参考 HINODE/EIS(图 5c)、SO/SPICE 设计, 采用正入射两反系统, 并引入椭球面凹面光栅等新技术以提高空间和光谱分辨率。对于极紫外成像, 可以采用类似 AIA 或 TRACE 的正入射成像系统。

4.3 全球尺度二维快速极紫外光谱成像探测

对于二维快速极紫外光谱成像探测, 核心科学目标为: 在较短时间内获得整个日面的二维光谱成像信息, 从而获得太阳大气等离子体的视向速度、密度等物理参数的二维分布及其快速演化, 大大促进 CME 起源、视向传播以及对地效应预报相关的研究。

表 3 列出了全日面多缝快速扫描光谱仪观测参数。计划选择辐射较强、周围谱线较少并且多层膜反射率高、带宽窄的波段, 候选目标波段的主要谱线如 Fe XII 19.5 nm, Ne VII 46.5 nm, Ly-a 121.6 nm, He II 30.4 nm 等。观测视场至少大于全日面视场, 空间分辨率约 6", 可以观测冕洞、活动区等日冕结构以及日冕物质抛射、耀斑等爆发性活动。以 Fe XII 19.5 nm 目标谱线为例, 例如采用 5 个狭缝, 缝宽 4",

扫描步长 4", 全日面扫描 630 步左右可以覆盖 42'的视场, 分配到单个狭缝为 126 步, 假设单步曝光时间 1.5 s, 采用快速读出的 CMOS 图像传感器, 则可以在 4 min 内扫描整个日面, 基本满足耀斑和 CME 等爆发活动观测对时间分辨率的需求。

全球尺度二维快速极紫外光谱探测方案可以参考 HINODE/EIS, SPICE 或 MUSE 的设计, 区别在于全日面多缝快速扫描光谱仪的观测视场更大, 与美国近期立项的小视场多缝光谱仪 MUSE 互补, 这也正是该设备的探测特色。与 MUSE 专注日冕加热、需要高空间分辨率不同, 全日面多缝快速扫描光谱仪的主要监测目标是大尺度日冕结构和太阳爆发活动, 因此主要强调大视场, 空间分辨率无须太高。

5 总结与展望

极紫外光谱探测是太阳探测的核心手段之一, 在诊断太阳高层大气物理过程方面具有独特优势。尽管美国、欧洲、日本等已开展了长达 70 年的相关探测, 仍存在许多重要的未解之谜。例如, CME 的传播方向和真实速度如何精确确定, 如何有效诊断日冕磁场, 太阳风是如何起源的, 日冕是如何被加热到百万度高温的。通过太阳极紫外光谱探测, 可以更好地理解太阳风暴源头——日冕的性质, 为有效预报灾害性空间天气事件提供关键的观测支持。同时, 也为认识、理解当前知之甚少的“千亿颗”恒星的星冕活动及其与系外行星宜居性的关系提供重要的启示。

正因如此, 太阳极紫外光谱成像探测领域正处于发展前景看好、大有可为的阶段。遵循原创性科学发现出现的规律, 不能照搬国外发展思路, 直接移植国外观测设备的指标, 而应准确把握未来科学发展趋势, 分析国外在研和已有探测计划的不足, 并结合中国的科学优势和技术基础, 制定切实可行的科学目标和探测方案。

基于上述考虑, 本文首先总结了极紫外太阳辐射的特点和元器件特性, 为光谱或成像探测方案论证提供参考。其次, 从全日面积分光谱、低速光谱成像、快速光谱成像三个角度梳理了过去 70 余年的太阳极紫外光谱探测历程, 总结了每种探测方式当前水平、未来趋势、采用的技术方案及每种方案的优缺点, 并介绍了近年取得的部分科学成果。在此基础上, 认为

对于全日面积分极紫外光谱观测,未来可以提高光谱分辨率,以测量 CME 的视向速度。这类观测设备体积、重量、功耗较小,研制难度也较低。考虑到中国极紫外光谱探测基础较为薄弱,可以由易而难。在未来五年内首先实现全日面积分极紫外光谱探测,迈出极紫外太阳光谱探测的第一步。对于低速光谱成像观测,未来可以围绕 50 万度左右的太阳过渡区和日冕开展光谱成像探测。同时,瞄准日冕磁场测量这一世纪难题,未来还可以用 Ne VII 46.5 nm 等新波段对太阳大气进行动态成像观测。对于快速光谱成像探测,未来可以聚焦大视场观测,以更好地理解日冕大尺度结构和爆发现象,从而增进对 CME 视向传播规律的理解。这两种观测需要的单狭缝或多缝光谱成像仪体积、重量和功耗较大,研制难度也很高,可以在未来 10~15 年内实现。与之类似的探测计划国外尚未提出,且国外未来 5~10 年极紫外光谱探测的重点在 EUVST 和 MUSE 两个项目上,这为中国开展上述有特色的极紫外太阳光谱探测提供了重要契机。除上述思路,中国科学院紫金山天文台还提出在 SOHO/UVCS 单缝日冕光谱仪基础上发展极紫外多狭缝光谱日冕仪,获得临边日冕光谱(94~109 nm)及其时空演化,进而实现对内日冕的物质流动和磁重联、CME 的加热和初始加速等物理过程的诊断。上述计划一旦成功实施,并充分发挥中国拥有精通太阳极紫外科学的人员优势,不仅可以大大提升太阳物理研究的整体实力,还可显著提升极紫外探测的技术水平,并有助于攻克相关卡脖子技术(例如,极紫外光刻机需要多层膜反射镜)。

依托风云三号 X 射线-极紫外太阳成像仪、中国科学院空间新技术试验卫星 46.5 nm 极紫外太阳成像仪,中国在太阳极紫外成像探测方面迈出了自主探测的第一步,在多层膜反射镜^[31]、探测器等核心部件、整机研制^[12,13]、在轨定标^[13]等方面奠定了坚实基础。相比成像观测,极紫外光谱探测信号更弱,需要更灵敏的探测器;需要更高性能的凹面光栅(国外依次采用球面固定线距光栅→超环面固定线距光栅→超环面变线距光栅→椭球面变线距光栅),为增强正入射系统反射率,还需要多层膜光栅。因此,探测器和光栅是制约未来任务实施的关键因素,亟需开展关键技术攻关。关键技术取得突破后,可以开展试验样机研制,并积极寻求试验卫星搭载,在轨验证相关

技术。在此基础上,未来争取搭载立方星或专用太阳观测卫星,最终实现上述科学目标。

参考文献

- [1] TOUSEY R. Solar spectroscopy from Rowland to SOT[J]. *Vistas in Astronomy*, 1986, **29**: 175-199
- [2] LINSKY J L, FONTENLA J, FRANCE K. The intrinsic extreme ultraviolet fluxes of F5 V to M5 V stars[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2013, **780**(1): 61
- [3] BROOKS D H, YARDLEY S L. The source of the major solar energetic particle events from super active region 11944[J]. *Science Advances*, 2021, **7**(10): eabf0068
- [4] CHEN Y J, LI W X, TIAN H, et al. Forward modeling of solar coronal magnetic-field measurements based on a magnetic-field-induced transition in Fe X[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **920**(2): 116
- [5] LANDI E, HUTTON R, BRAGE T, et al. Hinode/EIS measurements of active-region magnetic fields[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **904**(2): 87
- [6] MASON J P, WOODS T N, WEBB D F, et al. Relationship of EUV irradiance coronal dimming slope and depth to coronal mass ejection speed and mass[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, **830**(1): 20
- [7] ASCHWANDEN M J, WUELSEY J P, NITTA N V, et al. Solar flare and CME observations with STEREO/EUVI[J]. *Solar Physics*, 2009, **256**(1): 3-40
- [8] ZHANG J, TEMMER M, GOPALSWAMY N, et al. Earth-affecting solar transients: A review of progresses in solar cycle 24[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, **8**(1): 1-102
- [9] TORIUMI S, AIRAPETIAN V S, HUDSON H S, et al. Sun-as-a-star spectral irradiance observations of transiting active regions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **902**(1): 36
- [10] LI C, FANG C, LI Z, et al. Chinese Ha Solar Explorer (CHASE) - a complementary space mission to the ASO-S[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**(11): 165
- [11] 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
- [12] ZHANG P, HU X Q, LU Q F, et al. FY-3 E: The first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, **39**(1): 1-8
- [13] BAI X, TIAN H, DENG Y, et al. The solar upper transition region imager (SUTRI) onboard the SATech-01 satellite[EB/OL]. 2023: arXiv: 2303.03669. <https://arxiv.org/abs/2303.03669>
- [14] WINDT D L. EUV multilayer coatings for solar imaging and spectroscopy[C]//SPE Optical Engineering + Applications. California: SPIE, 2015, 9604: 161-172
- [15] VOURLIDAS A, BRUINSMA S. EUV irradiance inputs to thermospheric density models: Open issues and path for-

- ward[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(1): 5-15
- [16] BEHRING W E. A spectrometer for observations of the solar extreme ultraviolet from the OSO-I satellite[J]. *Applied Optics*, 1970, **9**(5): 1006-1013
- [17] HINTEREGGER H E, HALL L A. Solar extreme ultraviolet emissions in the range 260-1300 Å observed from OSO-III[J]. *Solar Physics*, 1969, **6**(2): 175-182
- [18] KASTNER S O, NEUPERT W M, SWARTZ M. Solar-flare emission lines in the range from 66 to 171 Å; transitions in highly ionized iron[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1974, **191**: 261
- [19] SCHMIDTKE G, RAWER K, BOTZEK H, *et al.* Solar EUV photon fluxes measured aboard Aeros A[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(16): 2423-2427
- [20] HINTEREGGER H E, BEDO D E, MANSON J E. The EUV spectrophotometer on atmosphere explorer[J]. *Radio Science*, 1973, **8**(4): 349-359
- [21] ROTTMAN G J, WOODS T N. Upper atmosphere research satellite (UARS) solar stellar irradiance comparison experiment (SOLSTICE)[C]//SPIE's 1994 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. San Diego: SPIE 1994, 2266: 317-327
- [22] WOODS T N, ROTTMAN G, VEST R. XUV photometer system (XPS): Overview and calibrations[J]. *Solar Physics*, 2005, **230**(1): 345-374
- [23] WOODS T N, ROTTMAN G J, ROBLE R G, *et al.* Thermosphere-ionosphere-mesosphere energetics and dynamics (TIMED) solar EUV experiment[C]//SPIE's 1994 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. San Diego: SPIE, 1994, 2266: 467-478
- [24] NUSINOV A A, KAZACHEVSKAYA T V, KATYUSHINA V V, *et al.* Measurement of extreme ultraviolet solar radiation in different wavelength intervals onboard the CORONAS satellites: Instruments and main results[J]. *Solar System Research*, 2005, **39**(6): 470-478
- [25] AVAKYAN S V, BARANOVA L A, LEONOV N B, *et al.* Space Solar Patrol data and changes in weather and climate, including global warming[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(8): 085301
- [26] JUDGE D L, MCMULLIN D R, OGAWA H S, *et al.* First Solar EUV Irradiances Obtained from SOHO by the CELIAS/SEM[M]//Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle 22. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998: 161-173
- [27] SCHMIDTKE G, BRUNNER R, EBERHARD D, *et al.* SOL-ACES: Auto-calibrating EUV/UV spectrometers for measurements onboard the international space station[J]. *Advances in Space Research*, 2006, **37**(2): 273-282
- [28] EPARVIER F G, CROTSEY D, JONES A R, *et al.* The extreme ultraviolet sensor (EUVS) for GOES-R[C]//SPIE Optical Engineering + Applications. San Diego, California: SPIE, 2009, 7438: 31-38
- [29] WOODS T N, EPARVIER F G, HOCK R, *et al.* Extreme ultraviolet variability experiment (EVE) on the solar dynamics observatory (SDO): Overview of science objectives, instrument design, data products, and model developments[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**(1/2): 115-143
- [30] DOMINIQUE M, HOCHEDÉZ J F, SCHMUTZ W, *et al.* The LYRA instrument onboard PROBA2: Description and In-flight performance[J]. *Solar Physics*, 2013, **286**(1): 21-42
- [31] WANG H F, WANG X D, CHEN B, *et al.* EUV multilayer mirrors in solar X-EUV Imager[J]. *Optik*, 2020, **204**: 164213
- [32] MASON J P, WOODS T N, CASPI A, *et al.* Mechanisms and observations of coronal dimming for the 2010 August 7 event[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, **789**(1): 61
- [33] HARRA L K, SCHRIJVER C J, JANVIER M, *et al.* The characteristics of solar X-class flares and CMEs: A paradigm for stellar superflares and eruptions[J]. *Solar Physics*, 2016, **291**(6): 1761-1782
- [34] FRANCE K, FLEMING B T, DRAKE J J, *et al.* The extreme-ultraviolet stellar characterization for atmospheric physics and evolution (ESCAPE) mission concept[C]//SPIE Optical Engineering + Applications. San Diego, California: SPIE, 2019, 11118: 38-51
- [35] TIAN Hui, BAI Xianyong, DENG Yuanyong, *et al.* Scientific objectives and preliminary plans for EUV and X-ray observations of late-type stars[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, **52**(11): 119511 (田晖, 白先勇, 邓元勇, 等. 晚型恒星极紫外和X射线探测的科学目标与初步方案[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, **52**(11): 119511)
- [36] DEL ZANNA G, MASON H E. Solar UV and X-ray spectral diagnostics[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2018, **15**(1): 5
- [37] TOUSEY R, D F BARTOE J, BRUECKNER G E, *et al.* Extreme ultraviolet spectroheliograph ATM experiment S082 A[J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(4): 870-878
- [38] WILHELM K, CURDT W, MARSCH E, *et al.* SUMER - solar ultraviolet measurements of emitted radiation[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1/2): 189-231
- [39] HARRISON R A, SAWYER E C, CARTER M K, *et al.* The Coronal Diagnostic Spectrometer for the solar and heliospheric observatory[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1): 233-290
- [40] CULHANE J L, HARRA L K, JAMES A M, *et al.* The EUV imaging spectrometer for hinode[J]. *Solar Physics*, 2007, **243**(1): 19-61
- [41] SPICE Consortium. The solar orbiter SPICE instrument. An extreme UV imaging spectrometer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **642**: A14
- [42] 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
- [43] HANDY B N, ACTON L W, KANKELBORG C C, *et al.* The transition region and coronal explorer[J]. *Solar Physics*, 1999, **187**(2): 229-260

- [44] PETER H, JUDGE P G. On the Doppler shifts of solar ultraviolet emission lines[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1999, **522**(2): 1148-1166
- [45] XIA L D, MARSCH E, WILHELM K. On the network structures in solar equatorial coronal holes[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, **424**(3): 1025-1037
- [46] TIAN H, HARRA L, BAKER D, *et al.* Upflows in the upper solar atmosphere[J]. *Solar Physics*, 2021, **296**(3): 1-36
- [47] TIAN H. Probing the solar transition region: Current status and future perspectives[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2017, **17**(11): 110
- [48] TU C Y, ZHOU C, MARSCH E, *et al.* Solar wind origin in coronal funnels[J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 519-523
- [49] HASSLER D M, DAMMASCH I E, LEMAIRE P, *et al.* Solar wind outflow and the chromospheric magnetic network[J]. *Science*, 1999, **283**(5403): 810-813
- [50] INNES D E, INHESTER B, AXFORD W I, *et al.* Bi-directional plasma jets produced by magnetic reconnection on the Sun[J]. *Nature*, 1997, **386**(6627): 811-813
- [51] HARRA L K, SAKAO T, MANDRINI C H, *et al.* Outflows at the edges of active regions: Contribution to solar wind formation?[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2008, **676**(2): L147-L150
- [52] BROOKS D H, UGARTE-URRA I, WARREN H P. Full-Sun observations for identifying the source of the slow solar wind[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 5947
- [53] DE PONTIEU B, MCINTOSH S W, CARLSSON M, *et al.* The origins of hot plasma in the solar corona[J]. *Science*, 2011, **331**(6013): 55-58
- [54] TIAN H, MCINTOSH S W, XIA L D, *et al.* What can we learn about solar coronal mass ejections, coronal dimmings, and extreme-ultraviolet jets through spectroscopic observations?[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, **748**(2): 106
- [55] LEWIS FOX J, KANKELBORG C C, THOMAS R J. A transition region explosive event observed in he ii with the Moses sounding rocket[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, **719**(2): 1132-1143
- [56] LEWIS FOX J. Snapshot imaging spectroscopy of the solar transition region: The Multi-Order Solar EUV Spectrograph (MOSES) sounding rocket mission[D]. Bozeman, MT, USA: Montana State University, 2011
- [57] LAURENT G T, HASSLER D M, DEFOREST C, *et al.* The rapid acquisition imaging spectrograph experiment (RAISE) sounding rocket investigation[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2016, **5**(1): 1640006
- [58] DE PONTIEU B, TESTA P, MARTÍNEZ-SYKORA J, *et al.* Probing the physics of the solar atmosphere with the multi-slit solar explorer (MUSE). I. coronal heating[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, **926**(1): 52
- [59] CHEUNG M C M, MARTINEZ-SYKORA J, TESTA P, *et al.* Probing the physics of the solar atmosphere with the Multi-slit Solar Explorer (MUSE). II. Flares and Eruptions[J]. *Astrophysical Journal*, 2022, **926**(1): 32
- [60] YOUNG PETER R. Future prospects for solar EUV and soft X-ray spectroscopy Missions[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2021, **8**: 662790
- [61] SHIMIZU T, IMADA S, KAWATE T, *et al.* The solar-C_EUVST mission[C]//Proceedings of SPIE 11118, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXI. San Diego: SPIE, 2019: 1111807-11
- [62] DE PONTIEU B, MARTÍNEZ-SYKORA J, TESTA P, *et al.* The multi-slit approach to coronal spectroscopy with the multi-slit solar explorer (MUSE)[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **888**(1): 3
- [63] WINEBARGER A R, WEBER M, BETHGE C, *et al.* Unfolding overlapped slitless imaging spectrometer data for extended sources[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **882**(1): 12
- [64] 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
- [65] 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**(11): 2357-2368
- [66] DENG Yuanyong, GAN Weiqun, YAN Yihua, *et al.* Current situation and prospect of solar magnetic field exploration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(11): 3788/IRLA20200278 (邓元勇, 甘为群, 颜毅华, 等. 太阳磁场探测现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(11): 3788/IRLA 20200278)
- [67] YAN Y H, TAN B L, MELNIKOV V, *et al.* Diagnosing coronal magnetic fields with radio imaging-spectroscopy technique[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2019, **15**(S354): 17-23
- [68] YANG Z, TIAN H, BAI X, *et al.* Can we detect coronal mass ejections through asymmetries of Sun-as-a-star extreme-ultraviolet spectral line profiles? [EB/OL]. 2022: arXiv: 2204.03683. <https://arxiv.org/abs/2204.03683>
- [69] LI W X, GRUMER J, YANG Y, *et al.* A novel method to determine magnetic fields in low-density plasma facilitated through accidental degeneracy of quantum states in Fe^{9+} [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2015, **807**(1): 69
- [70] LI W X, YANG Y, TU B S, *et al.* Atomic-level pseudo-degeneracy of atomic levels giving transitions induced by magnetic fields, of importance for determining the field strengths in the solar corona[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, **826**(2): 219
- [71] SI R, BRAGE T, LI W X, *et al.* A first spectroscopic measurement of the magnetic-field strength for an active region of the solar corona[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **898**(2): L34
- [72] WU J L, QI R Z, WANG Z S, *et al.* Structure and stability of Sc/Si multilayers with different thickness ratio for wavelength at 46.5 nm[C]//SPIE Optical Engineering + Applications. Online Only: SPIE, 2020, 11491: 9-14