

TIAN Hui, BAI Xianyong, FENG Li, XIONG Ming, CHEN Yajie, HOU Zhenyong, WANG Yamin. Coronal Explorer for the Sun and Nearby Stars (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 881–898. CSTR:32142.14.cjss.2025-0060. DOI:10.11728/cjss2025.04.2025-0060

空间天气探源计划 (探冕计划)*

田 晖^{1,4} 白先勇^{2,4} 封 莉³ 熊 明⁴
陈亚杰⁵ 侯振永¹ 王亚敏⁶

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

2(中国科学院国家天文台 北京 100101)

3(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

4(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

5(马普学会太阳系研究所 哥廷根 37077)

6(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201203)

摘 要 空间天气探源计划 (探冕计划) 将在同一颗卫星平台上实现对太阳和晚型恒星的同步观测, 以揭示太阳系内外空间天气的源头——日冕和星冕的物理性质及爆发规律. 卫星拟工作在约 720 km 高度的太阳同步轨道, 同时对日冕和星冕开展长期、连续的观测. 通过搭载日面极紫外光谱仪、极紫外光谱日冕仪、恒星极紫外光谱仪、恒星极紫外测光望远镜等载荷, 该计划将在三个方面取得重要突破: 第一, 通过首次开展全日面视场的日冕光谱观测, 刻画日冕外流和爆发的源区特性, 推动太阳系空间天气的精准预报; 第二, 通过填补当前太阳系外极紫外探测的空白, 探明星冕爆发规律, 从而开拓太阳系外空间天气的新疆域; 第三, 通过对太阳和其他恒星同步开展点源极紫外探测, 并结合模型, 建立空间天气影响行星宜居性的新认知.

关键词 极紫外辐射, 日冕, 星冕, 空间天气, 行星宜居性

中图分类号 P354

Coronal Explorer for the Sun and Nearby Stars

TIAN Hui^{1,4} BAI Xianyong^{2,4} FENG Li³ XIONG Ming⁴
CHEN Yajie⁵ HOU Zhenyong¹ WANG Yamin⁶

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

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

3(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

4(State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

5(Max-Planck Institute for Solar System Research, Göttingen 37077)

* 国家自然科学基金项目资助 (12425301)

2025-04-16 收到原稿, 2025-06-06 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

6(Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203)

Abstract We propose to launch the first Extreme-Ultraviolet (EUV) space science mission in China, the Coronal Explorer for the Sun and nearby Stars (CESS), to explore the sources of space weather both within and beyond the solar system, specifically the solar and stellar coronae. The CESS mission is designed to observe the Sun and nearby late-type stars from a single satellite platform. The spacecraft will operate in a 720-km-altitude sun-synchronous orbit, enabling continuous and uninterrupted solar coronal observations. Simultaneously, observations of nearby stars will be achieved using an alt-azimuth mount for precise pointing and long-term tracking, facilitating continuous monitoring of stellar coronae. The primary scientific objects of this mission are as follows. (1) Characterize the physical properties of the source regions of solar coronal outflows and eruptions through full-disk EUV spectroscopy of the Sun. (2) Fill the current observational gap in extrasolar EUV observations, detect stellar coronal eruptions through long-term EUV photometric and spectroscopic monitoring of the coronae of selected nearby late-type stars, and pioneer a new frontier in understanding extrasolar space weather (space weather in star-exoplanet systems). (3) Explore the role of space weather in the formation of a habitable world through point-source EUV observations of the Sun and other stars, and provide crucial clues for addressing the profound question: are we alone in the universe? To fulfill these scientific goals, the spacecraft will be equipped with four key science payloads: an EUV solar-disk spectrometer (comprising a Sun-as-a-star spectrometer and a multi-slit spectrometer with a full-disk field of view), an EUV spectroscopic coronagraph, a stellar EUV spectrometer, and a stellar EUV photometer. The CESS mission will contribute to the precise prediction of space weather in the solar system, uncover the origin of exosolar space weather, and offer crucial clues for the search for potentially habitable worlds and extraterrestrial life.

Key words Extreme ultraviolet radiation, Solar corona, Stellar coronae, Space weather, Planetary habitability

0 引言

空间天气通常指耀斑和日冕物质抛射等太阳爆发活动引起的日地乃至整个太阳系空间环境的扰动(见图1)。一方面,太阳爆发和空间天气的机理作为空间科学重大前沿课题,已成为国际空间科学探测的核心科学目标。另一方面,空间天气可以影响航天、通信、导航、电力等技术系统的正常运行,因此其研究和预报具有重要的战略意义。

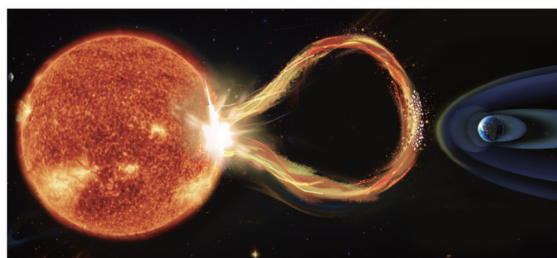


图1 空间天气示意

Fig. 1 Schematic diagram of space weather

在太阳系外的恒星-行星系统中,空间天气的现象肯定也是存在的,一些学者也将其称为系外空间天气^[1,2]。系外空间天气能通过改变行星大气成分、导致大气逃逸、损害生物组织等方式来影响系外行星的宜居性^[2,3]。近年来,随着系外行星研究的兴起,系外空间天气的研究开始受到越来越多的关注。关于空间天气,至少有三个关键的科学问题有待解决。

(1) 如何精准预报太阳系空间天气。空间天气预报事关深空探测和载人航天等人类高技术活动的安全,其不仅是国家的重大战略需求,也是国内外空间科学界想要重点突破的难题。在《国家空间科学中长期发展规划(2024—2050年)》《中国天文学2035发展战略》《中国空间科学2035发展战略》和美国国家航空航天局(NASA)《日球物理路线图(2009—2030)》中,空间天气预报都被列为空间科学的重点或优先发展方向。空间天气的主要源头在日冕,其驱动源包括太阳风和太阳爆发活动等。高温日冕物质持续往外流动,形成太阳风,高速太阳风与低速太阳风相互作用

形成共转相互作用区, 可对地球和行星空间环境造成剧烈扰动. 而空间天气最重要的驱动源则是包括耀斑和日冕物质抛射 (CME) 在内的太阳爆发活动, 日冕中的能量释放导致了这些爆发活动, 并通过增强的电磁辐射、粒子辐射和等离子体云等方式扰动地球和行星的空间环境. 对这些日冕外流和爆发现象的源区特性、传播规律的正确认识是精准预报日地和太阳系空间天气的关键.

(2) 系外空间天气是如何起源的. 随着系外行星研究的迅猛发展, 以及日球物理的学科边界逐渐被拓展到系外恒星-行星系统, 系外空间天气正成为恒星物理、行星物理和日球物理的重大前沿交叉研究方向. 《中国天文学 2035 发展战略》明确提出, 要基于日地关系与日球物理研究成果, 研究恒星系统的空间天气、空间气候及其对系外行星宜居性的影响. 《国家空间科学中长期发展规划 (2024—2050 年)》也将太阳与恒星磁活动 (特别是日冕和星冕活动) 的多样性及其机理列为日球层物理领域最重要的前沿科学问题之一. 与太阳系空间天气主要源自日冕类似, 系外空间天气的源头应该主要在晚型恒星的星冕. 然而, 由于观测很少, 对星冕的物理性质及爆发活动的理解还非常有限, 急需实施专门的星冕探测任务, 来探明不同类型恒星的星冕物理性质和爆发规律.

(3) 空间天气如何影响行星宜居性. 在美国《2020 年代天文学和天体物理学发展规划》中, 恒星与其周围宜居世界 (行星) 的关系位居三大优先发展方向之首. 而空间天气是宿主恒星影响行星的关键途径, 在地球/行星宜居环境的形成和生命起源过程中占有重要地位^[2,4]. 因此, 空间天气的研究对于理解地球和行星宜居环境的形成、回答“人类在宇宙中是否孤独”这一重大问题是不可或缺的. 但对空间天气影响行星宜居性的具体方式和机理, 理解得还非常初步. 由于日地系统是当前唯一已知的宜居系统, 因此开展日/星冕的比较研究是回答这一问题的必经之路.

由此可见, 要回答上述三个关键科学问题, 对空间天气主要源头——日冕和星冕物理性质及爆发活动的观测非常关键.

1 日/星冕的观测与研究现状

1.1 日冕观测

极紫外成像仪和白光日冕仪是监测日冕及其爆

发的两种主要仪器. 近 30 年来, 欧美国家发射的 SOHO^[5], STEREO^[6], SDO^[7], Solar Orbiter^[8] 等大型太阳观测卫星都携带了这两类仪器, 来对日冕及 CME 等日冕爆发活动开展常规的成像观测. 美国于 2025 年 3 月 11 日发射的 PUNCH^[9] 卫星也搭载了白光日冕仪.

作为日地乃至整个日球空间环境最主要的扰动源, CME 在太阳系空间天气过程中占有核心地位^[10], 对其速度等物理参数测量的准确与否直接关系到空间天气预报的精度. 然而, 单视角的成像观测只能给出 CME 运动结构投影在天空平面 (垂直于视线方向的平面) 的速度分量, 无法获得 CME 真实速度和传播方向的准确信息, 这极大地制约了 CME 传播路径和对地效应的预报精度. STEREO 双子星虽然能利用双视角的优势较为准确地得到 CME 的速度矢量及其演化信息, 但也只有在两颗卫星与太阳连线的夹角在一定范围时才适合此类研究. 此外, 极紫外成像难以获得日冕等离子体密度信息; 而白光日冕仪难以获得日冕温度信息, 也无法观测日面上的日冕活动. 由于爆发源区的速度、密度、温度等物理参数是理解 CME 起源 (例如前身结构、触发机制、加速过程等) 的重要依据, 也是日冕爆发三维数值模型的重要约束, 因此这些物理参数的缺失限制了对 CME 起源过程的理解, 制约了空间天气预报精度的提升.

极紫外光谱观测原则上能解决上述问题. 基于多普勒效应, 可以给出 CME 等结构在初始传播阶段的视向运动速度 (见图 2^[11]). 图 2 所示给出了二条红色虚线, 左侧虚线代表爆发结构引起的辐射分量, 右侧虚线代表背景日冕的辐射分量, i_1/i_2 , v_1/v_2 , w_1/w_2 分别是二者峰值强度、多普勒速度 ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) 和展宽 ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) 之比. 而极紫外波段有很多谱线对可用于密度诊断. 此外, 该波段有形成于不同温度下的众多谱线, 可通过微分辐射量 (DEM) 反演得到日冕的温度结构. 然而, 传统的极紫外狭缝光谱仪, 例如欧空局 Solar Orbiter 卫星上的 SPICE^[12] 和日本将于 2027 年发射的 Solar-C 卫星上的 EUVST^[13], 都只能观测很小的视场, 扫描一个活动区通常需数小时; 并且由于望远镜指向是提前选定的, 难以捕捉瞬时发生的太阳爆发现象. 美国计划 2027 年发射的 MUSE 卫星^[14] 将用 37 条狭缝在 12 s 内扫描完 $170'' \times 170''$ 的小区域, 同样因视场太小, 较难捕捉太阳爆发, 就算碰巧捕捉

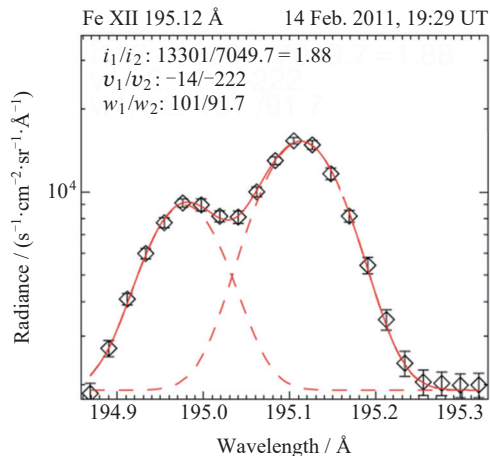


图2 极紫外光谱观测对 CME 初始传播阶段视向速度的诊断 (经 AAS 许可复制)^[11]

Fig. 2 EUV spectroscopic observation providing the line-of-sight velocity during a CME initial propagation phase (Reproduced by permission of the AAS)^[11]

到,也较难覆盖完整的爆发结构.因此,要对日冕等离子体参数和 CME 视向传播进行常规监测,需大视场的光谱观测.美国研究建议的 COSIE 望远镜通过无缝光谱观测的方式来获得大视场的日冕光谱信息,但无缝光谱必然会有谱线高度混叠,从而影响等离子体诊断能力的问题.此外,近期基于磁流体力学数值模型的正演研究表明, COSIE 难以对活动区以外的区域进行密度诊断,且难以准确测量小于 $50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度^[15].

此外, SOHO/UVCS^[16] 是迄今唯一对日轮边缘外的内日冕进行过等离子体诊断的狭缝光谱日冕仪,其观测大大增进了人们对 CME 等爆发活动的理解.但由于 UVCS 是单狭缝观测,对 CME 不同高度的观测具有不同时的缺陷,且其已退役多年,因而迫切需要一个多狭缝的光谱型日冕仪来对爆发活动的物理性质和能量转化机制进行研究,以弥补白光日冕仪的不足.其获取的内日冕等离子体参数也将为 CME 及其激波、高能粒子的数值预报提供重要的观测约束,助力空间天气的精准预报.

经过最近 20 多年的发展,中国对太阳低层大气活动的监测已在逐渐赶上国际先进水平.然而,对于日冕,中国的探测基础还相当薄弱,相关科学和应用研究严重依赖国外数据.2021 年以来, X 射线-极紫外太阳成像仪^[17] 和 46.5 nm 极紫外太阳成像仪^[18] 这

两台极紫外望远镜分别搭载在风云三号 E 星和中国科学院空间新技术试验卫星上.然而,二者均为单波段的成像设备,无法开展光谱观测,得不到日冕及其爆发结构的视向速度,也无法对日冕等离子体的密度、温度等进行诊断.羲和卫星^[19] 携带了一台光谱仪,可利用 $\text{H}\alpha$ 等可见光波段的谱线对全日面进行快速扫描,从而监测温度较低 (7000 K 左右) 的日珥爆发;但其难以适应对 CME 的监测需求,因为 CME 主体通常是日冕和过渡区温度 (几万到两三百万 K) 的等离子体.夸父一号卫星^[20] 搭载的莱曼阿尔法太阳望远镜 (LST^[21]) 可在远紫外 ($\text{Ly}\alpha$ 121.6 nm) 和可见光波段对日冕结构和 CME 爆发进行成像观测.但因没有极紫外观测, LST 无法对日面上的日冕辐射进行监测;因无光谱观测,也无法测量 CME 的视向速度,难以详细诊断日冕爆发源区的物理性质.此外,中国在丽江有两台日冕仪,一台是日本赠送的可工作在 $\text{H}\alpha$ 波段的日冕仪,另一台是在子午工程二期支持下研制的、可观测日冕绿线和红线的日冕仪,二者都是滤光器型的日冕仪,难以得到准确的 CME 视向速度等信息,也无法观测日面上的日冕辐射.

1.2 星冕观测

光谱型为 F, G, K, M 的晚型恒星通常具有类似日冕的高温星冕结构.当前,对星冕的了解还非常匮乏;仅有的少量观测主要来自 X 射线望远镜.在 X 射线波段通常只能观测那些温度远高于日冕温度的星冕.且这些望远镜对同一颗恒星的单次连续观测一般只持续几小时,难以捕捉瞬时发生的星冕爆发活动.此外,按照对太阳系空间天气驱动源的认识,恒星 CME 很可能是系外空间天气最主要的驱动源,但迄今还没有学界公认的、确切的恒星 CME 观测证据^[22].近年来,在一些恒星上发现的 $\text{H}\alpha$ 谱线不对称性^[23,24]、X 射线/极紫外暗化^[25]、多普勒蓝移^[26,27] 等信号被认为可能是恒星 CME 造成的,但由于星冕观测时长太短等原因,尚有不同程度的争议.星冕观测的匮乏极大地制约了系外空间天气的研究.

近 30 年的日冕观测表明,极紫外波段 (波长 10 ~ 100 nm) 应该非常适合用于星冕观测.该波段有形成温度从数万到两千万 K 的大量发射线,可观测各种温度的星冕,能够兼顾耀斑和 CME 等不同类型爆发活动的观测.此外,宿主恒星的极紫外辐射也是行星大气电离和加热的主要原因,因此监测恒星极紫外辐

射对研究行星大气逃逸、理解行星宜居性也非常重要. 尽管银河系介质对恒星极紫外辐射有一定的吸收作用, 但吸收的程度在不同方向、不同波段是不一样的. 研究表明, 在 $10\sim 30\text{ nm}$ 的短波极紫外波段, 30 pc 以内恒星极紫外辐射的吸收并不严重. 例如, 对于典型柱密度 10^{18} cm^{-2} , 该波段极紫外辐射的透过率达 $60\%\sim 95\%$ ^[28].

过去针对系外天体的极紫外观测很少, 且基本上都是在 2001 年前开展的. 其中最重要的观测来自 EUVE 卫星^[29], 其 1992—2001 年在轨运行, 携带的掠入射测光望远镜探测到了数百个极紫外源, 有大约一半是星冕^[30]. 其还携带了一台工作在 $6\sim 70\text{ nm}$ 波长范围的光谱仪, 光谱分辨本领约为 200, 有效面积为 1 cm^2 左右, 数据信噪比很低, 仅获取约 15 颗晚型主序星的光谱 (见图 3)^[31]. 需要说明的是, 当时系外行星探测刚刚起步, 到 EUVE 退役时, 人类发现的系外行星才几十颗, 且都不在宜居带内, 因此还没有太多人关注星冕活动及其驱动的系外空间天气对系外行星的影响, 也就没有这方面的探测需求. 此外, X 射线天文卫星 CHANDRA^[32] 携带的 LETGS 光谱仪的工作波长可以延伸到 17.5 nm 左右, 但同样有效面积很小, 对晚型恒星的观测极少, 数据信噪也比较低.

在 EUVE 退役后, 有研究提出了一些新的天文

极紫外望远镜设想. 例如, 美国提出的 ESCAPE 项目曾得到 NASA 的概念研究支持^[28], 但迄今仍没能通过卫星工程遴选. 其主要目标是测量宿主恒星的宽波段极紫外和远紫外辐射 ($7\sim 180\text{ nm}$), 并通过极紫外暗化的方式探测恒星 CME. ESCAPE 仍采用掠入射系统, 但计划使用多层嵌套主镜, 最外层主镜口径 50 cm , 设计的有效面积比 EUVE 提高两个量级, 但光谱分辨本领仅与 EUVE 相当.

欧洲提出的 SIRIUS 项目^[33] 计划获取系外天体在 $17\sim 26\text{ nm}$ 范围内的极紫外光谱, 以此来研究白矮星演化、星冕活动、星际气体结构与电离过程等. 该项目将采用过去 30 年在太阳极紫外观测中得到广泛应用的正入射多层膜系统, 有效面积可达 EUVE 的 $5\sim 10$ 倍, 预期光谱分辨本领也高达 5000. 然而该项目一直没能立项.

美国近年来还提出了 NExtUP 项目^[34], 该项目计划用几个极紫外波段对一些晚型恒星开展测光观测, 计划采用多层膜滤光技术实现滤光, 建议的几个波段分别是 $17.0\sim 20.3\text{ nm}$, $22.6\sim 30.2\text{ nm}$, $28.8\sim 32.3\text{ nm}$, $38.1\sim 40.9\text{ nm}$, $60.0\sim 92.1\text{ nm}$, 带宽均比较宽. 该项目刚提出不久, 尚未得到资助.

在地球附近观测遥远的系外恒星, 当前基本只能是点源观测. 要建立日冕和星冕活动之间的联系, 从而对太阳系内外的空间天气进行比较研究, 须将太阳

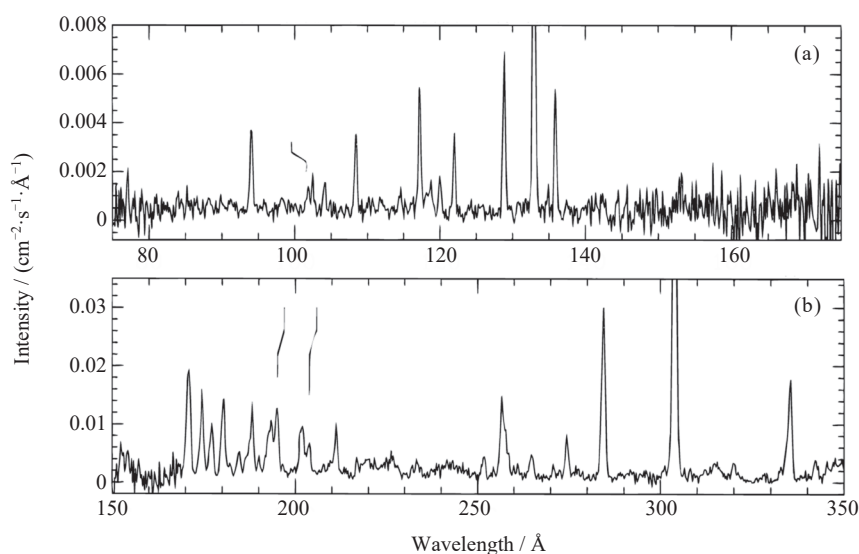


图 3 EUVE 卫星观测的星冕极紫外光谱示例. 光谱分别来自两颗具有不同星冕温度的恒星 (经 AAS 许可复制)^[31]

Fig. 3 EUV spectra of stellar coronae observed by EUVE. Show coronal emission from two stars with different coronal temperatures, respectively (Reproduced by permission of the AAS)^[31]

作为一个点源来进行观测. SDO 卫星上的 EVE 载荷^[35]可以得到全日面积分的太阳极紫外光谱, 其中 EVE 的 MEGS-A 仪器工作在 5~37 nm 波长, 能获得日冕积分光谱及其时间演化. 但该仪器在 2014 年后无法工作. 此外, MEGS-A 的光谱分辨本领较低, 在 20 nm 附近只有约 200, 难以直接测量 CME 的视向速度, 也会因一些相邻谱线混在一起而对等离子体诊断产生较大影响.

中国对晚型恒星的观测主要集中在可见光和近紫外波段. 例如 LAMOST^[36]等几个地面望远镜能观测晚型恒星发射的 H α 等谱线辐射^[37]. 嫦娥三号月基紫外望远镜主要在 245~345 nm 波段监测各种天文变源, 观测到了一些恒星的近紫外辐射^[38]. 推动中的紫瞳卫星计划在近紫外和可见光波段 (280~400 nm 和 400~900 nm) 观测系外行星及其宿主恒星的活动^[39]. 此外, 推动中的莱曼紫外发射线成像探索小卫星项目 (CAFE) 拟在 124~130 nm 和 102~108 nm 的远紫外波段对星系等进行成像, 可能也可以观测晚型恒星. 但在这些波段, 一般只能观测恒星的色球和光球活动, 无法观测星冕. 2024 年发射的鹊桥二号中继星上携带了一台极紫外相机, 主要在 30.4 nm 和 83.4 nm 两个波段观测地球空间环境. 在定标过程中, 该望远镜也观测到了一些恒星源, 但基本都是 A 和 B 型的早型星, 迄今尚未观测到晚型主序星; 另外, 此二波段也不含星冕谱线, 不合适星冕观测.

2 科学目标

如前所述, 极紫外是监测日冕和星冕的最佳波段之一. 对于太阳极紫外观测来说, 目前的主要不足是缺乏大视场光谱观测, 因而难以获得日冕爆发的源区性质及其在日地连线方向上传播的信息, 这大大阻碍了空间天气预报精度的提高. 而对系外天体的极紫外观测极少, 在 2001 年 EUVE 卫星退役后, 已基本停顿 20 多年, 但这 20 年却是系外行星研究突飞猛进的时期. 因此, 要研究星冕活动引起的系外空间天气对行星宜居性的影响, 重开极紫外观测窗口已刻不容缓. 而要有效开展日/星冕及太阳系内/外空间天气的比较研究, 须对太阳和一些有代表性的恒星进行高分辨率、高信噪比、类似方式 (点源)、类似波段的极紫

外光谱观测.

针对过去观测的不足, 在 2021 年建议开展空间天气探源计划 (探冕计划), 通过发射中国首颗极紫外科学卫星, 揭示太阳系内外空间天气的主要源头——日冕和星冕的物理性质及爆发规律. 该计划已入选《国家空间科学中长期发展规划 (2024—2050 年)》, 是发展路线图中第二阶段 (2028—2035 年) 候选的中小型和机遇型任务之一. 通过实现如下三大科学目标, 空间天气探源计划将分别推动前述三个关键科学问题的解决.

2.1 刻画日冕外流和爆发的源区特性, 推动

太阳系空间天气的精准预报

日冕的物质外流 (太阳风) 和爆发活动是太阳系空间天气的驱动源, 然而迄今仍难以准确预报其发生及对地效应. 这是因为当前的监测几乎都是成像的方式, 而成像设备难以诊断日冕爆发源区和爆发结构的等离子体参数, 难以监测 CME 的视向传播, 这极大地限制了对 CME 起源 (例如前身结构、爆发机制、加速过程等) 和传播规律的认识, 进而严重影响了 CME 对地效应的预报精度. 而极紫外光谱观测可以测量源区的密度、温度、视向速度等物理参数. 但已有的日冕光谱观测视场都很小, 且一次观测通常要花费很长时间, 无法监测全球活动, 难以逮住瞬时爆发. 因此建议对太阳进行全日面视场的快速极紫外光谱观测. 这样在整个日面上的每个点, 都能几乎同时得到日冕光谱. 再通过光谱诊断, 便可得到日冕密度、温度、速度等物理参数的全球分布图, 为空间天气预报模型提供重要的约束. 此外, 这一观测还将在如下三个方面取得重要突破.

(1) 测量 CME 的速度矢量. 由于全日面视场的光谱观测能给出日面上每个点的多普勒速度, 因此有望首次实现对 CME 爆发过程中视向传播速度的常规监测, 而成像观测能给出 CME 在天空平面的速度. 结合这两个速度分量, 有望得到 CME 在初始传播阶段的速度方向和真实大小, 从而为 CME 速度矢量测量的难题提供一种方案. 这有望提高对 CME 运动轨迹的预报精度, 从而帮助人类准确研判 CME 能否以及什么时候撞击地球/行星.

(2) 认证太阳风源区. 日冕温度和视向速度对于太阳风源区的认证非常关键^[40-42]. 例如, 行星际太阳风的冻结温度反映了其日冕源区的电子温度, 因此通

过对比太阳风离子电荷态和日冕温度的空间分布, 可以将行星际太阳风流溯源到日冕结构中. 此外, 在太阳风源区, 形成于低日冕的谱线通常表现为明显的蓝移 (见图 4^[43], 对应的观测总共耗时长达 48 h). 图 4(b) 中绿线和红线分别是光球磁场外推得到的日冕开放和闭合磁力线. 基于快速极紫外光谱观测, 每隔几分钟便可获得日冕温度和视向速度等参数的全日面分布, 从而实现对太阳风源区的高效定位.

(3) 寻找耀斑前兆. 过去小视场的光谱观测显示, 在耀斑发生前几小时, 日冕谱线的多普勒速度和展宽可能会明显增强^[44-46] (见图 5^[44]). 基于全日面视场的快速极紫外光谱观测, 将能对整个日面上发生的类似现象进行常规监测, 这为高效预报耀斑提供了一种可能的途径.

2.2 探明星冕爆发规律, 揭示系外空间天气的起源

作为晚型恒星的最外层大气, 星冕的温度通常在百万到数千万 K. 如前所述, 极紫外是观测星冕的最佳波段之一, 然而已有的极紫外观测基本都是 2001 年之前的, 其光谱分辨率和有效面积都很小, 难以满足对星冕观测的需求. 因此, 急需填补当前星冕极紫外探测的空白, 发射有效面积更大 ($10 \sim 100 \text{ cm}^2$ 量级)、光谱分辨率更高 (光谱分辨能力 > 500) 的望远镜, 对具有代表性的一些近邻晚型恒星开展长期、连续的测光和光谱观测, 以探明星冕爆发规

律. 主要的星冕爆发活动包括恒星 CME 和耀斑, 其也是系外空间天气的主要驱动源.

(1) 系统地探测星冕物质抛射. 星冕物质抛射 (恒星 CME) 可以压缩系外行星的磁层, 导致行星大气的非热逃逸, 其产生的高能粒子还能分解臭氧和损害生物组织, 影响行星上生命的存续. 然而, 目前尚无公认的恒星 CME 观测证据, 仅探测到少数候选体^[25-27]. 由于 CME 本质上是从星冕抛射出来的物质, 因此其极紫外光谱会产生多普勒频移或频移导致的谱线不对称性^[47]; CME 爆发后, 星冕由于物质损失, 其自身的极紫外辐射强度会下降, 产生所谓暗化现象^[11]. 在对太阳的积分极紫外观测中, CME 产生的多普勒蓝移和暗化现象都被发现过 (见图 6^[48,51]), 证实了这两种信号确实可用于从点源恒星观测数据中搜寻 CME^[48,49]. 因此, 通过对少数恒星开展长期、连续的极紫外光谱和测光观测, 有望首次系统地探测恒星 CME, 并找到其发生规律, 诊断其性质, 以探讨系外空间天气的起源. 这将是开启系外空间天气研究的重中之重.

(2) 揭示恒星耀斑的星冕过程. 太阳耀斑发生和影响的区域涉及不同层次的太阳大气, 耀斑的完整图像是基于多波段的观测来构建的. 例如白光辐射主要来自低层大气, 而日冕中的物理过程需要极紫外、软 X 射线等波段的观测来揭示 (见图 7^[52]). 如果只是在

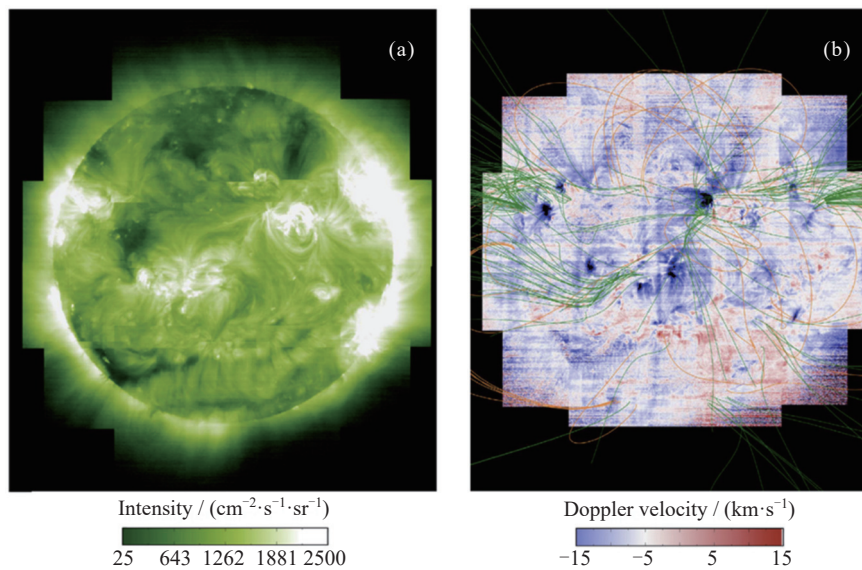
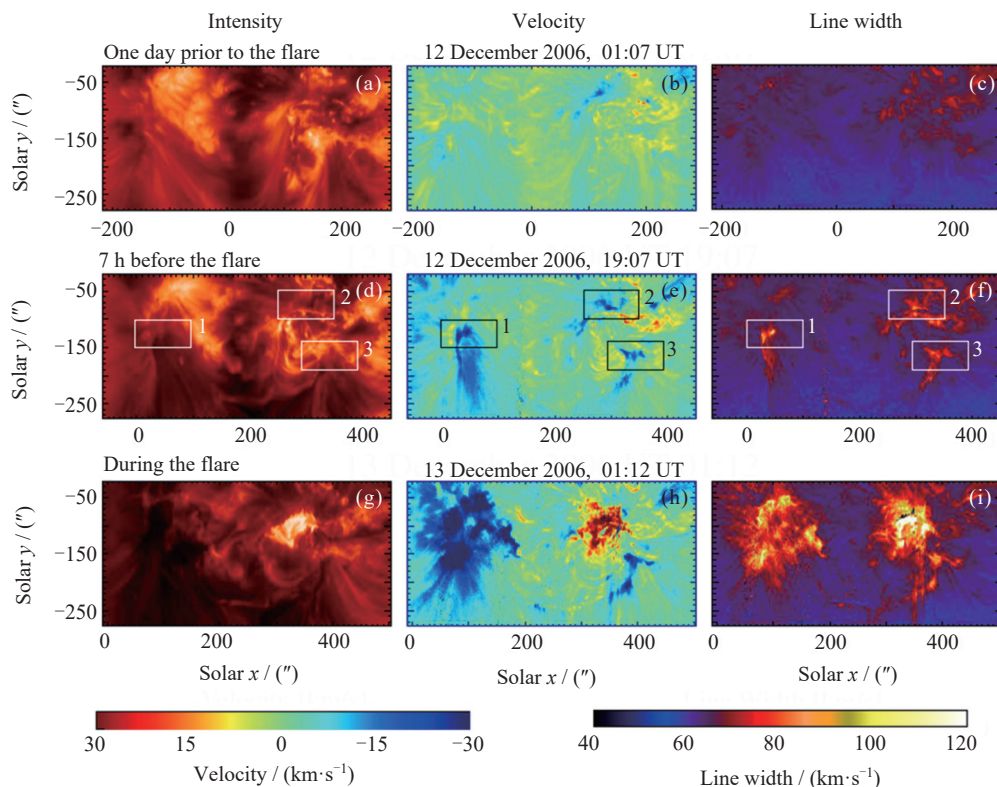
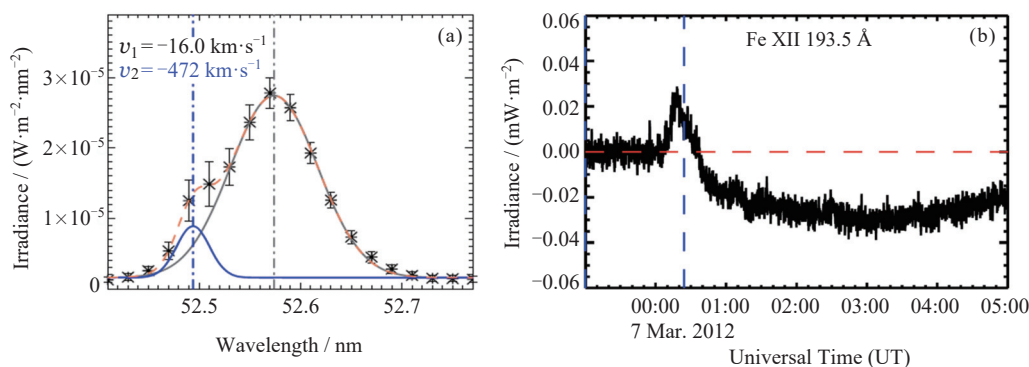


图 4 通过多次狭缝扫描拼接而成的全日面 Fe XIII 20.2 nm 辐射强度 (a) 和视向速度 (b) 分布^[43]

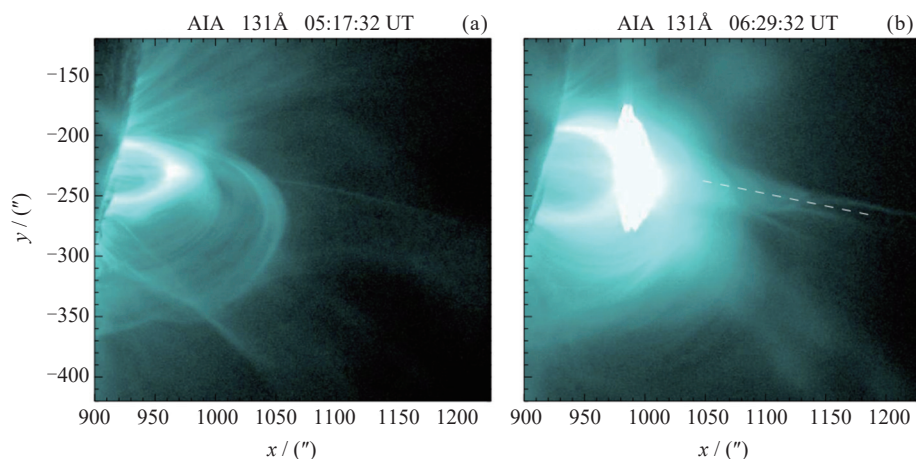
Fig. 4 Full-disk Fe XIII 20.2 nm mosaic maps of the line intensity (a) and Doppler velocity (b) constructed from multiple raster scans^[43]

图5 Fe XII 19.5 nm 谱线的辐射强度、多普勒速度、谱线展宽分布^[44]Fig. 5 EIS Fe XII 19.5 nm observations of intensity, velocity, and line width^[44]图6 太阳积分极紫外光谱观测的 CME 引起的多普勒蓝移和暗化 (左图经 AAS 许可复制)^[48,51]Fig. 6 Doppler shifts and coronal dimming caused by CMEs in the Sun-as-a-star EUV spectroscopic observations (the left panel is reproduced by permission of the AAS)^[48,51]

某一个波段来观测,则好比盲人摸象,无法对耀斑有整体和全面的认识.对于恒星耀斑,目前以白光观测为主^[50].其他波段的观测相对较少,尤其是极紫外波段,几乎是空白.通过极紫外这一新窗口,将能揭示其星冕物理过程,更好地理解耀斑准周期振荡、色球蒸发、耀斑环的加热和冷却、磁重联和电子加速等重要物理过程,从而实现对恒星耀斑的全面认识.

2.3 建立空间天气影响宜居性的新认知,为搜索地外生命提供重要线索

(1) 厘清日/星冕性质及爆发活动的异同.行星宜居性在很大程度上取决于行星周围的电磁和粒子环境,而这一环境主要是由日/星冕性质和爆发活动所决定的.由于日地系统是目前已知的唯一宜居系统.因此,要理解行星宜居环境的形成,对日冕和星冕进

图 7 极紫外波段观测到的太阳耀斑典型结构^[52]Fig. 7 Typical structures of solar flares in EUV observations^[52]

行比较研究不可或缺, 但这一研究其实很难开展, 主要是因为目前太阳和恒星的观测方式、波段有很大差异. 例如对日冕活动的认识很多是通过极紫外观测获得的, 而其他恒星几乎没有极紫外观测; 太阳观测关注空间分辨, 而其他恒星基本都是点源. 这些差异制约了人类对日/星冕的比较研究. 因此, 急需对太阳和恒星开展类似方式、类似波段的观测. 因此, 建议对太阳和其他恒星同步开展点源极紫外光谱探测, 以厘清日/星冕性质及爆发活动的异同, 理解不同恒星系统中空间天气的多样性.

(2) 系统地探测系外行星的电离层. 对恒星-行星系统的极紫外观测也有望用来探测系外行星的电离层, 并刻画其性质. 系外行星“凌星”时, 由于行星对恒星电磁辐射的部分遮挡, 观测接收到的恒星辐射会下降, 这一方法在系外行星搜寻中得到了广泛应用. 由于行星电离层对恒星极紫外辐射的吸收, 因此在极紫外波段观测时, 遮挡恒星辐射的面积会比在可见光观测时更大, 所以恒星极紫外辐射的下降程度会比可见光的更大. 根据这一差异, 有望推算行星电离层的一些主要性质, 例如高度. 类似的信号在恒星 X 射线观测中曾被发现过^[53].

(3) 探索空间天气在宜居世界形成过程中的作用. 星冕爆发活动和星风压缩系外行星磁层、驱动系外行星大气逃逸, 进而影响系外行星的气候和宜居性. 极紫外观测结果可以为恒星-行星相互作用的模型提供关键的输入或约束. 由此将能理解多样性的空间天气对行星大气、磁场等的作用规律, 探索其对宜居性的

不同影响, 深入理解空间天气在宜居世界形成过程中的作用 (见图 8^[54]), 从而建立空间天气影响宜居性的新认知, 这对于搜索地外生命将具有重要的指导意义. 比如, 不仅可以理解不同性质的星冕爆发导致大气逃逸过程的巨大差异, 也能理解空间天气在早期地球宜居环境形成过程中是否起到了重要作用.

3 载荷配置方案

为实现上述三大科学目标, 建议 4 台核心载荷: 日面极紫外光谱仪 (含全日面多缝快速扫描光谱仪和全日面积分光谱仪)、极紫外光谱日冕仪、恒星极紫外光谱仪、恒星极紫外测光望远镜.

针对科学目标 1, 需要探测日面和太阳临边区域的日冕光谱. 为监测整个日面上的太阳风源区, 并尽可能逮住所有发生在太阳正面的耀斑和 CME, 需利用全日面多缝快速扫描光谱仪和极紫外光谱日冕仪对整个日轮和日轮边缘外的内日冕进行大视场的极紫外光谱观测, 以通过多普勒效应得到视向速度, 利用谱线对的强度比值求得电子密度, 通过 DEM 反演等方法得到电子温度信息, 并通过多普勒暗化等方法得到临边日冕的径向速度、离子温度等信息.

为实现科学目标 2, 需要探测星冕的光谱和宽波段辐射. 恒星 CME 在极紫外谱线上可表现为多普勒频移、不对称性和暗化等信号. 恒星耀斑则通常表现为极紫外谱线辐射的增强. 不同恒星的星冕温度有所不同, 因此需选取不同的极紫外波段对具有不同温度 (通常为 0.6~20 MK) 的星冕进行光谱观测. 同时, 也

应进行极紫外测光, 因测光对一定波段范围辐射进行积分, 相比光谱观测光子数更多, 可以实现更高的时间分辨率。

而科学目标 3 的实现需要比较星冕光谱和日冕积分光谱。全日面积分光谱仪和恒星极紫外光谱仪可分别获取太阳和恒星的点源光谱。通过设置部分重叠的波长范围和类似的光谱分辨率, 将可以比较日冕和星冕密度、温度、丰度等性质以及爆发活动的异同, 再结合理论模型来理解空间天气如何影响地球/行星宜居性。

四台核心载荷的配置覆盖了所有科学目标, 满足所有科学指标的需求。科学目标、探测内容和载荷的对应关系如图 9 所示。下面分别对这些载荷的功能和主要技术指标进行简要说明。

3.1 日面极紫外光谱仪

日面极紫外光谱仪的任务是探测日面上的日冕光谱及其时空演化, 获得日冕等离子体及其爆发结构的速度等物理信息, 以理解 CME 在初始传播阶段的视向传播规律, 并高效认证日面上可能的太阳风源区, 尝试寻找耀斑前兆, 由此推动太阳系空间天气的精准预报, 并服务日/冕物理性质及爆发活动的比较研究。

为实现上述目标, 日面极紫外光谱仪具备的功能包括: 对整个日面的快速光谱成像观测能力, 以获得日冕等离子体及其爆发结构的温度、密度和视向速度的二维空间分布; 全日面积分极紫外光谱观测能力, 通过一些典型谱线强度的增加和暗化来探测耀斑和 CME, 能与恒星点源观测进行比较。

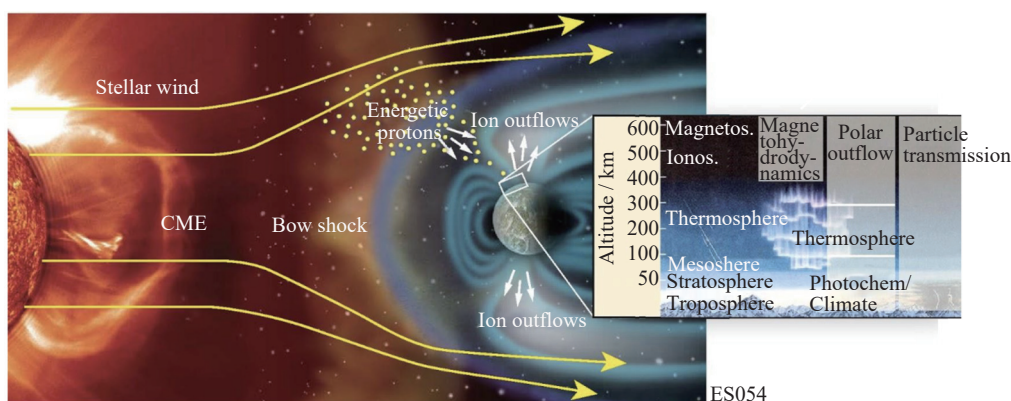


图 8 系外空间天气对宜居性的影响^[54]

Fig. 8 Impact of extrasolar space weather on habitability^[54]

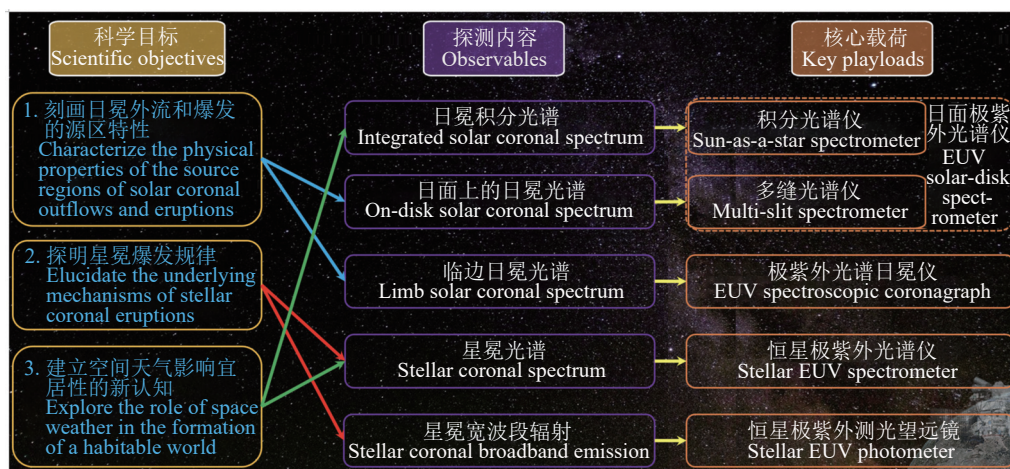


图 9 科学目标、探测内容与载荷的对应关系

Fig. 9 Relationships between the scientific objectives, detection contents, and payloads

为实现这两个功能, 日面极紫外光谱仪将包括全日面多缝快速扫描光谱仪 (简称多缝光谱仪) 和全日面积分光谱仪 (简称积分光谱仪) 两台设备, 技术指标列于表 1. 其中多缝光谱仪采用 5 条狭缝, 通过快速的狭缝扫描, 来实现全日面视场的光谱成像^[55,56]. 观测波段初步选为 18.4~19.7 nm, 是单缝极紫外光谱仪 Hinode/EIS 工作波段的一部分. 该波段含有大量发射线, 可用于日冕密度、温度和速度诊断. 其中 Fe VIII 18.5 nm 和 Fe X-XIII 的谱线可用于温度诊断, Fe XII 18.688/19.512 nm 和 Fe XII 19.664/19.512 nm 可做密度诊断. 密度诊断谱线需避免其他谱线混合的影响, 要求光谱分辨本领 ≥ 1000 . 初步研究表明, 对于 15 cm 口径的望远镜, 针对所选波段, 19.1 nm 附近的有效面积可达 1.61 cm², 这大致是 EIS 的 8 倍 (EIS 是双波段, 且光谱范围要宽得多)^[56]. 由于主要目的是开展全日面的日冕等离子体诊断, 而不是超精细结构, 因此初步设定狭缝宽度和狭缝方向的像元均为 4", 这样可以获得约 8" 的空间分辨率, 典型日冕结构如日冕亮点、冕羽、冕环均可得到较好的采样. 为了对日冕爆发进行充分采样, 需要在较短的时间内完成一次全日面光谱成像. 耀斑上升相的典型持续时间约为 10 min^[57], 而 EIS 的耀斑观测模式 (小区域多次扫描) 也经常采用 5~6 min 的时间分辨率. 因此, 初步计划在 5 min 内完成一次全日面光谱成像. EIS 对宁静区和冕洞的观测表明, 当用 2" 宽度的狭缝时, 曝光时间需要在 120 s 左右才能开展可靠的光谱诊断^[58]. EIS 的光谱分辨本领在 4000 左右, 在保证主要谱线不会有明显混叠效应的前提下, 可以将光谱分辨本领降至 2000 左右. 考虑到空间和光谱分辨率以及有效面积的差别, 曝光时间至少要在 2 s 才能保证可靠的光谱诊断. 可以选择与 SDO/AIA 类似的

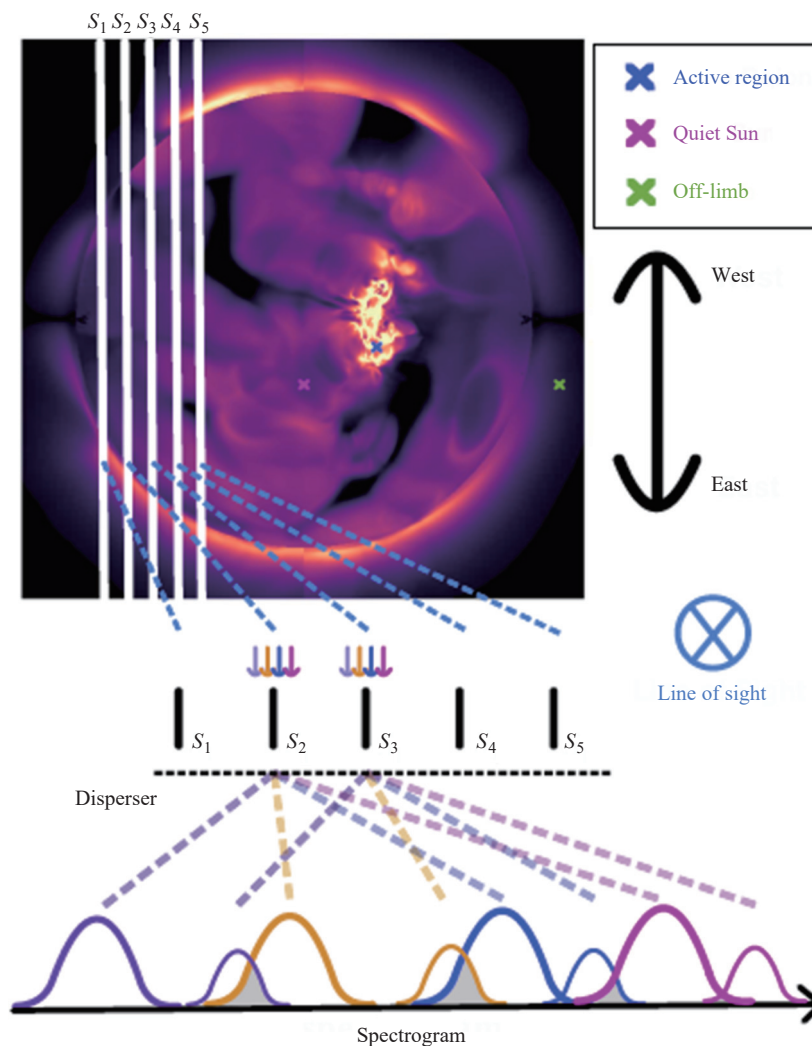
视场范围, 2400"×2400", 这样扫描步数需要 600 步, 如果使用 5 条狭缝同时扫描, 每条狭缝需扫描 120 步, 总曝光时间为 240 s. 考虑到狭缝移动时间和读出时间, 5 min 内可扫描全日面一次. 为减小多个活动区的光谱混在一起的效应, 狭缝可以置于东西方向, 沿南北方向扫描. 图 10^[55] 给出了多缝光谱仪的工作模式, 5 条白色竖线代表 5 条狭缝 ($S_1 \sim S_5$), 不同颜色的高斯轮廓代表不同谱线. 基于模型正演的研究表明, 利用近年来发展的光谱解耦方法^[59], 叠加在一起的透过 5 条狭缝的光谱可以被有效解耦^[55].

除此之外, 还可考虑加上一台太阳大视场极紫外成像仪载荷, 其提供的日冕强度分布图不仅可以帮助实现更加准确的光谱解耦^[55], 还能用于测量日冕爆发结构如 CME 在天空平面的速度分量, 从而服务 CME 初始传播阶段速度矢量测量的目标.

而积分光谱仪则把日面上不同位置的光谱都加起来, 也就是把太阳作为一个点源来观测. 积分光谱仪的观测可用于研究太阳作为一颗恒星的活动规律, 用于日/星冕物理性质和活动规律的比较研究. 由于不同的日冕结构或爆发活动具有不同的典型温度, 需选择多个工作波段. 例如 17.0~20.5 nm 波段有 Fe VIII-Fe XIII 的多条强线, 25.5~29.0 nm 波段有 Fe XIV-Fe XVI 的多条强线, 前者形成温度在 1 MK 左右, 后者在 2 MK 左右. 当日面上宁静区/冕洞占绝对主导时, 前者一般辐射较强, 后者辐射较弱. 但当日面上出现多个活动区时, 后者辐射会大大增强. 94.0~109.0 nm 波段则有数条很强的过渡区谱线, 例如 C III 97.7 nm 和 O VI 103.2/103.8 nm, 这些过渡区谱线适合用于爆发暗条/CME 的监测^[48,60]. 上述所有谱线均可用于诊断耀斑期间的等离子体流动^[61], 而形成温度高达 2000×10^4 K 的 Fe XXIV 19.2 nm 谱线还

表 1 日面极紫外光谱仪主要技术指标
Table 1 Key technical specifications of the EUV solar-disk spectrometer

设备	多缝光谱仪	积分光谱仪
观测物理量	视向速度、密度、温度	视向速度、密度、温度
观测视场	$\geq 40' \times 40'$	$\geq \Phi 40'$
空间分辨率	$\leq 8''$	—
狭缝视场	$4'' \times 40' / \text{条}$, 5条	—
观测波段	18.4~19.7 nm	17.0~20.5 nm, 25.5~29.0 nm, 94.0~109.0 nm
光谱分辨本领	$\geq 1000@19.5 \text{ nm}$	$\geq 500@19.5 \text{ nm}$
时间分辨率	$\leq 300 \text{ s}$	$\leq 60 \text{ s}$

图 10 多缝光谱仪的工作模式 (经 AAS 许可复制)^[55]Fig. 10 Operating mode of the multi-slit spectrometer (Reproduced by permission of the AAS)^[55]

可以用于诊断极端高温的耀斑等离子体. 此外, 基于几何模型的计算表明, 对于 Fe XII 19.5 nm 和 Fe XV 28.4 nm 等典型日冕谱线, 当光谱分辨本领大于 500 左右时, 还有可能探测到 CME 所产生的明显蓝翼增强信号^[62].

3.2 极紫外光谱日冕仪

极紫外光谱日冕仪将获得临边日冕光谱及其时空演化. 初步选择在 94.0~109.0 nm 波段同时获取大视场的高分辨率光谱数据, 实现对中日冕的太阳风加热和加速、CME 的加速和初始演化等物理过程的诊断. 结合从光谱数据得到的视向速度和从成像数据得到的天空平面速度分量, 可估算 CME 早期演化时的三维速度, 为空间天气预报提供重要输入.

为实现上述目标, 极紫外光谱日冕仪将在不同高

度处设置多条狭缝来获得太阳风和 CME 物理参数的二维分布. 已退役的 SOHO/UVCS 是唯一对中日冕进行过详细等离子体诊断的光谱型日冕仪. 多狭缝光谱日冕仪将避免 UVCS 单狭缝扫描视场有限且观测不同时的缺陷, 可认为是 UVCS 的优化升级版本. 极紫外光谱日冕仪的技术指标列于表 2.

极紫外光谱日冕仪通过一个遮掩系统来遮挡日盘强辐射, 其视场如图 11 中 5 条狭缝所覆盖的区域所示 (绿色虚线表示日面边缘位置), 垂直于狭缝和沿狭缝方向分别覆盖 $3 R_s$ 和 $4 R_s$, 径向从 $1.3 R_s$ 开始, 与日面光谱观测的外视场正好衔接. 为了探测数万度到百万度的等离子体辐射, 波段范围选择在 94.0~109.0 nm, 里面含有 Fe XVIII 在 97.5 nm ($\lg T/K = 6.9$) 的高温谱线, Ly β 在 102.5 nm ($\lg T/K =$

4.1) 和 C III 在 97.7 nm ($\lg T/K = 4.9$) 的低温谱线, 还有 O VI 在 103.2 nm 和 103.7 nm 处的谱线对 ($\lg T/K = 5.5$). 这些谱线将可观测从冷的日珥到热的电流片等丰富日冕结构. UVCS 的观测经验也表明这些谱线, 特别是 O VI 线对, 经常能在 CME 中被探测到^[63]. 日面积分光谱仪同谱线的观测, 能够为日冕共振散射辐射提供输入. 此外, 94.0~109.0 nm 的带宽和 5 条狭缝的高度选择能够保证在满足光谱分辨率的同时, 狭缝像不重叠. O VI 线对可用来诊断电子密度, 结合白光日冕仪观测, 可用来诊断电子温度和等离子体速度. 如果资源允许, 可以增加 Ly α 通道的谱线观测, 来提高等离子体诊断的范围和精度. 光谱日冕仪的内视场从约 $1.3 R_s$ 开始, 来覆盖太阳风加速、CME 加速和初始演化区域. 空间像元分辨率 7.5"/pixel, 能分辨冕羽、冕流、磁偏折以及 CME 及

其激波结构. 时间分辨率约 6 min, 以捕捉太阳风和 CME 的演化过程.

3.3 恒星极紫外光谱仪

恒星极紫外光谱仪主要探测临近太阳系的宿主恒星的极紫外光谱及其随时间的变化 (见图 12), 用于诊断星冕等离子体参数, 探测恒星 CME, 解释恒星耀斑的星冕物理过程, 并服务日/星冕物理性质及爆发活动的比较研究.

为实现上述目标, 恒星极紫外光谱仪需具备如下功能: 可以通过谱线的多普勒频移 (包括谱线不对称性) 或暗化来探测恒星 CME; 可以诊断恒星耀斑区的星冕物理性质和等离子体流动.

要实现上述目标, 要求恒星极紫外光谱仪具备至少在 9.0~13.0 nm, 17.0~20.5 nm, 25.5~29.0 nm 三个极紫外波段实现超过 1000 的高光谱分辨本领, 技术指标列于表 3. 这三个波段内的谱线非常适合诊断不同温度的星冕结构, 主要谱线的形成温度覆盖 0.6~20 MK. 对于星冕温度与日冕温度类似 (约 1 MK) 的恒星, 可主要用 17.0~20.5 nm 波段进行观测. 对于星冕温度为 2~3 MK 的恒星, 主要可用 25.5~29.0 nm 波段进行观测. 而对于星冕温度更高 (例如 5~20 MK) 的恒星, 主要可用 9.0~13.0 nm 波段进行观测. 这几个波段也含有多对可用于星冕密度诊断的谱线^[2], 例如 Fe X 174.53/175.26 Å, Fe XII 196.64/195.12 Å, Fe XIV 264.79/274.20 Å, Fe XXI 102.22/128.73 Å, Fe XXII 114.41/117.17 Å. 此外, Si X 261.04 Å 和 S X 264.23 Å 可用于测量日冕等离子体的相对丰度 (FIP Bias)^[46].

因恒星距离遥远, 能接收到的极紫外辐射非常微弱, 因此需要通过增大有效面积、长时间曝光等方式来提高信噪比. 初步计算表明^[2], 要能开展可靠的光谱诊断, 满足主要科学目标, 光学系统的有效面积需比 EUVE 的高 1~2 个量级, 至少要在 20 cm^2 ; 曝光时间需在小时量级. 为实现高灵敏度的恒星观测, 需采用单光子计数探测器. 由于太远天体的极紫外辐射会被星际介质吸收, 因此在地球附近能观测到的极紫外辐射源数量应该远少于可见光等其他波段的辐射源数量, 这样空间分辨率就无需太高, 初步设定为 40".

此外, 还可考虑增加一台宽波段极紫外光谱仪, 以获得光谱分辨率较低 (光谱分辨本领约 100) 但完

表 2 极紫外光谱日冕仪主要技术指标
Table 2 Key technical specifications of the EUV spectroscopic coronagraph

观测物理量	速度、温度、密度
观测波段	94~109 nm
垂直狭缝方向视场	0~3 R_s (径向从 $1.3 R_s$ 开始)
沿狭缝方向视场	-2 ~ 2 R_s
狭缝条数	5
狭缝宽度	不小于 25" (50 μm)
探测器参数	像素大小 25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 面阵大小 1024 pixel $\times$ 2048 pixel
光谱分辨本领	约 2000@103 nm
空间像元分辨率	7.5"/pixel
时间分辨率	6 min

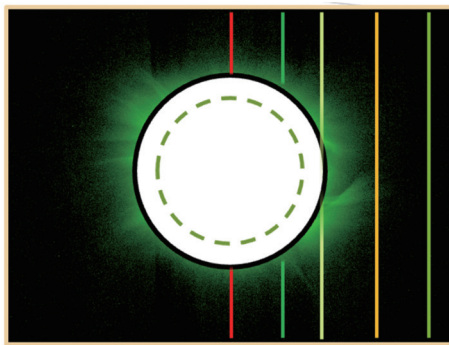


图 11 极紫外光谱日冕仪的狭缝位置

Fig. 11 Slit positions for the EUV spectroscopic coronagraph

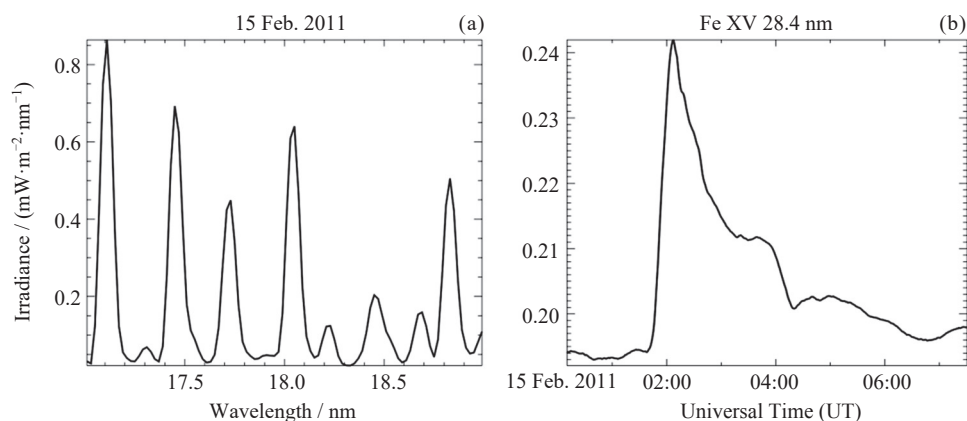


图 12 恒星极紫外光谱仪 (a) 和恒星极紫外测光望远镜 (b) 预期观测结果示例 (数据来自 SDO/EVE)

Fig. 12 Examples of expected observations from the stellar EUV spectrometer (a) and the stellar EUV photometer (b). Data from SDO/EVE

表 3 恒星极紫外光谱仪主要技术指标

Table 3 Key technical specifications of the stellar EUV spectrometer

观测物理量	视向速度、密度、温度
观测视场	$\geq 5'$
空间分辨率	$\leq 40''$
观测波段	9.0~13.0 nm, 17.0~20.5 nm, 25.5~29.0 nm
光谱分辨本领	$\geq 1000@19.5$ nm
有效面积	$\geq 20 \text{ cm}^2$
时间分辨率	约 60 min

整 (10~120 nm) 的恒星极紫外光谱. 这对于系外行星大气逃逸等相关研究非常重要, 也能与前述高分辨率但波段较窄的极紫外光谱仪在功能和科学目标上正好互补.

3.4 恒星极紫外测光望远镜

恒星极紫外测光望远镜主要探测近邻宿主恒星的极紫外辐射强度及其变化 (见图 12), 用于探测恒星 CME, 监测恒星耀斑等活动现象, 支撑系外空间天气的起源及其对行星宜居性影响的研究. 该载荷的功能主要是捕捉星冕辐射增强或暗化的瞬时光变信号, 揭示恒星耀斑和恒星 CME 等爆发活动的规律.

不同恒星的星冕温度各不相同, 因此恒星极紫外测光望远镜应具有多波段观测能力, 技术指标列于表 4. 初步选取的波段包括 9.4 nm, 12.9 nm, 17.4 nm, 28.4 nm 四个波段, 各波段中的主要谱线分别为 Fe XVIII 9.4 nm, Fe XXI 12.9 nm, Fe X 17.4 nm, Fe XV 28.4 nm, 其形成温度分别约为 6 MK, 10 MK,

1 MK, 2.5 MK, 因此可用于探测具有不同特征温度的星冕以及星冕中不同温度的结构, 覆盖了不同活动水平的晚型恒星. 为保证光谱纯度, 带宽应尽量窄, 四个波段的带宽基本都应小于 1 nm. 空间分辨率和有效面积的需求与恒星极紫外光谱仪的类似. 测光观测能探测到的光子数比光谱观测的要多, 因此可以将曝光时间缩减到 10 min 的量级.

值得注意的是, 正入射多层膜系统可大幅提升太阳极紫外探测的效率 (提高反射镜反射率) 和分辨率, 在过去 30 年的太阳观测中已经得到了广泛应用, 中国在这一技术上也积累了丰富的经验. 但这一技术还基本没有在系外天体的探测中应用过. 恒星极紫外测光望远镜完全可以采用这一技术.

4 卫星轨道和平台设计

4.1 卫星轨道

空间天气探源计划将在至少 4 年的寿命内, 对太阳系内外空间天气的主要源头——日冕和星冕同步开展连续的极紫外探测, 以揭示其物理性质及爆发规律, 并开展日/星冕性质及活动的比较研究. 工作轨道需求如下.

(1) 具备全天候不间断观测日冕能力, 阴影时间尽可能短.

(2) 具备同时观测太阳和恒星的能力.

(3) 最大限度地降低地球大气对极紫外吸收的影响.

综上所述, 卫星拟工作在约 720 km 高度的晨昏

太阳同步轨道, 可以实现几乎全天候、不间断的日冕观测, 同时在背离太阳方向观测近邻的晚型恒星. 此时每年有长达 7 个月时间可以开展 24 h 不间断的太阳观测, 剩余 5 个月每轨阴影最长时间仅有 23 min (约 1/5 轨道周期), 满足对日载荷长时间观测需求. 此外, 该轨道卫星在太阳指向坐标系下, 恒星的运动速度很低 (每天约 1°), 利用二维转台跟踪恒星时转台运动速度也很低, 因而容易实现高精度的恒星指向和跟踪.

4.2 观测指向需求

空间天气探源计划的观测目标包括两类: 太阳和其他晚型恒星.

(1) 太阳指向需求. 卫星平台需具备三轴稳定, 长期对日指向和跟踪能力, 初步考虑指向精度约 $25''$, 稳定度约 $2''\cdot s^{-1}$. 两台太阳观测的载荷指向信息一致. 因极紫外光谱日冕仪采用固定狭缝, 一次只能有效观测一半天区内的日冕及其爆发结构. 当日面有大活动区、爆发活动可能发生在另一半天区时, 卫星平台可绕日心旋转 180° 以完整观测日冕爆发的源头及其早期传播过程.

(2) 恒星指向需求. 恒星光谱仪和测光望远镜将对少数邻近太阳系的、不同光谱型的宿主恒星 (包括但不限于一部分已知潜在宜居行星的宿主恒星) 开展长期、连续的光谱和测光观测. 初步选择了 20 pc 距离以内, 历史上有过 X 射线/极紫外观测或周围有系外行星的 100 多颗晚型恒星. 这些恒星在 J2000 坐标系下的位置信息见图 13, 蓝、黑、紫、红分别代表 F, G, K, M 型恒星, 绿色方框的十字符号表示有潜在宜居行星, 无十字符号的方框表示没有 X-ray/EUV 的观测, 黑色菱形是有 EUV 或者 X-ray 辐射的 F 和 G 型恒星. 虚线表示一年内太阳在 J2000 坐标系下的

表 4 恒星极紫外测光望远镜主要技术指标
Table 4 Key technical specifications of the stellar EUV photometer

观测参数	辐射强度
观测视场	约 $5^\circ \times 5^\circ$
空间分辨率	$\leq 40''$
工作波段	9.4 nm, 12.9 nm, 17.4 nm, 28.4 nm
带宽	≤ 1 nm
有效面积	≥ 20 cm ²
时间分辨率	约 10 min

位置变化. 为跟踪观测绝大多数的这些目标, 初步考虑卫星平台应具备的恒星指向和跟踪能力为: 高度方向至少覆盖 $-40^\circ \sim +40^\circ$ 天区, 方位方向至少覆盖背离太阳方向 $\pm 90^\circ$ 天区, 指向精度 $30''$, 不同恒星位置指向切换时间 ≤ 30 min; 跟踪精度 $20''\cdot h^{-1}$.

4.3 卫星构型与布局

卫星采用分舱设计, 平台指标与夸父一号卫星类似. 两台太阳载荷对日观测, 同时通过二维转台来实现两台恒星载荷的指向跟踪.

平台舱采用框架面板式构型, 继承夸父一号卫星的设计. 载荷舱中放置 4 台核心载荷, 由支撑结构、光学基准板、二维转台构成. 太阳观测载荷安装在光学基准板上, 保证载荷光轴的相对指向精度. 恒星观测载荷安装在光学基准板之上, 由二维转台支撑, 实现 40° 俯仰角和 $\pm 90^\circ$ 方位角运动. 转台旋转范围为高度角 $\pm 40^\circ$, 方位角背离太阳方向 $\pm 90^\circ$. 卫星平台布局如图 14 所示.

5 结论

通过发射中国首颗极紫外科学卫星, 空间天气探源计划 (探冕计划) 将揭示太阳系内外空间天气的源头——日冕和星冕的物理性质及其爆发规律. 其具体科学目标如下.

(1) 对日冕进行全日面视场的极紫外光谱观测, 以刻画日冕外流和爆发的源区特性, 并由此推动太阳系空间天气的精准预报.

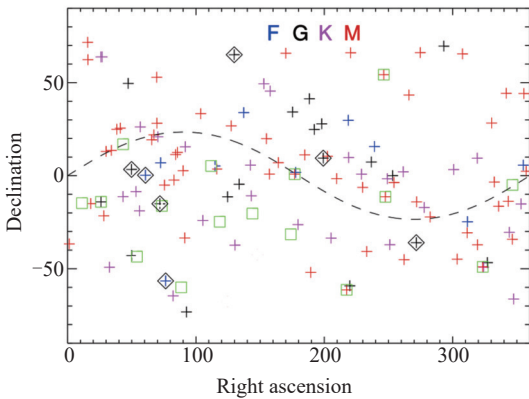


图 13 初步选取的候选恒星目标源在 J2000 坐标系下的位置信息

Fig. 13 Positions of tentatively selected candidate stellar targets in the J2000 coordinate system

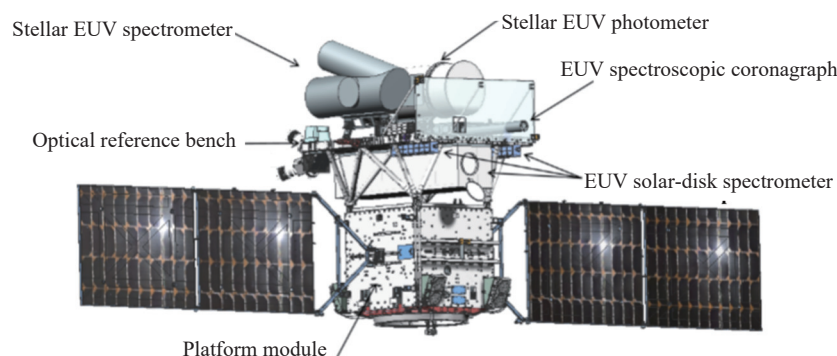


图 14 卫星平台布局

Fig. 14 Satellite platform configuration

(2) 对近邻晚型恒星的星冕进行极紫外光谱和测光观测, 以探明星冕爆发规律, 由此揭示系外空间天气的起源.

(3) 对太阳和其他恒星同步开展点源极紫外探测, 并结合模型, 探索空间天气在宜居世界形成过程中的作用, 为搜索地外生命、回答“人类在宇宙中是否孤独”这一重大问题提供重要的线索.

由于极紫外波段是最适合观测日冕和星冕的波段之一, 为了实现上述科学目标, 计划搭载如下 4 个工作在极紫外波段的核心载荷: 日面极紫外光谱仪(含积分光谱仪和多缝光谱仪)、极紫外光谱日冕仪、恒星极紫外光谱仪、恒星极紫外测光望远镜.

积分光谱仪将实现迄今最高光谱分辨率的太阳极紫外积分光谱探测; 而多缝光谱仪将利用 5 条狭缝的扫描来对全日面进行快速的光谱成像. 极紫外光谱日冕仪将对边缘日冕进行大视场光谱观测. 两台太阳载荷结合起来, 将在国际上率先实现全球视场的日冕光谱观测, 首次对日冕物质抛射和初生太阳风的视向速度及其源区物理性质进行常规监测, 从而显著提高空间天气监测水平和早期预报能力, 满足深空探测和航天强国建设的迫切需求.

恒星极紫外光谱仪和恒星极紫外测光望远镜将对一些近邻的宿主恒星分别开展长期、连续的光谱和测光观测, 从而在国际上率先对晚型恒星-系外行星系统开展系统的极紫外探测, 由此首次系统地探测星冕物质抛射, 揭示恒星耀斑的星冕物理过程, 并首次系统地探测系外行星的电离层, 从而开拓系外空间天气的新疆域, 促进恒星、行星和空间天气科学的前沿交叉.

除此之外, 还可配置太阳大视场极紫外成像仪和

恒星宽波段极紫外光谱仪等载荷. 前者与日面极紫外光谱仪结合, 服务 CME 初始传播阶段速度矢量测量的目标. 后者与窄波段的恒星极紫外光谱仪互补, 服务系外行星大气逃逸等相关研究.

上述载荷可配置于一颗卫星上, 从而实现对日冕和星冕的同步观测. 卫星拟工作在 720 km 左右高度的太阳同步轨道, 以实现全天候、不间断的日冕观测. 与此同时, 通过自带的二维转台实现对恒星的指向和跟踪, 从而对一些邻近太阳系的晚型恒星开展长期、连续的观测.

参考文献

- [1] AIRAPETIAN V S, GLOCER A, KHAZANOV G V, *et al.* How hospitable are space weather affected habitable zones? the role of ion escape[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, **836**(1): L3
- [2] TIAN Hui, BAI Xianrong, 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)
- [3] LINSKY J. Host Stars and their Effects on Exoplanet Atmospheres: An Introductory Overview[M]. 2nd ed. Springer Nature Switzerland: Springer, 2025
- [4] AIRAPETIAN V S, GLOCER A, GRONOFF G E, *et al.* Prebiotic chemistry and atmospheric warming of early Earth by an active young Sun[J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(6): 452-455
- [5] DOMINGO V, FLECK B, POLAND A I. The SOHO mission: an overview[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**: 1-37
- [6] KAISER M L, KUCERA T A, DAVILA J M, *et al.* The STEREO mission: an introduction[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **136**(1/2/3/4): 5-16

- [7] PESNELL W D, THOMPSON B J, CHAMBERLIN P C. The Solar *Dynamics Observatory* (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**: 3-15
- [8] MÜLLER D, ST CYR O C, ZOUGANELIS I, *et al.* The solar orbiter mission-science overview[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **642**(1): A1
- [9] DEFOREST C, KILLOUGH R, GIBSON S, *et al.* Polari-meter to UNify the corona and heliosphere (PUNCH): science, status, and path to flight[C]//2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky: IEEE, 2022: 1-11
- [10] GOSLING J T. The solar flare myth[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A11): 18937-18949
- [11] 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*, 2012, **748**(2): 106
- [12] ANDERSON M, APPOURCHAUX T, AUCHÈRE F, *et al.* The solar orbiter SPICE instrument. an extreme UV imaging spectrometer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **642**: A14
- [13] SHIMIZU T, IMADA S, KAWATE T, *et al.* The Solar-C (EUVST) mission: the latest status[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2020, **11444**: 114440N
- [14] 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*, 2020, **888**(1): 3
- [15] WINEBARGER A R, WEBER M, BETHGE C, *et al.* Unfolding overlapped slitless imaging spectrometer data for extended sources[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **882**(1): 12
- [16] KOHL J L, ESSER R, GARDNER L D, *et al.* The Ultraviolet Coronagraph Spectrometer for the Solar and Heliospheric Observatory[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1/2): 313-356
- [17] 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
- [18] BAI X Y, TIAN H, DENG Y Y, *et al.* The Solar Upper Transition Region Imager (SUTRI) onboard the SATech-01 satellite[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, **23**(6): 065014
- [19] LI C, FANG C, LI Z, *et al.* The Chinese H α Solar Explorer (CHASE) mission: an overview[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, **65**(8): 289602
- [20] GAN W Q, ZHU C, DENG Y Y, *et al.* The Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S)[J]. *Solar Physics*, 2023, **298**(5): 68
- [21] 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
- [22] TIAN Hui, XU Yu, CHEN Hechao, *et al.* Observations and simulations of stellar coronal mass ejections[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2023, **53**(12): 2021-2038 (田晖, 徐昱, 陈何超, 等. 星冕物质抛射的探测与建模 [J]. 中国科学: 技术科学, 2023, **53**(12): 2021-2038)
- [23] NAMEKATA K, MAEHARA H, HONDA S, *et al.* Probable detection of an eruptive filament from a superflare on a solar-type star[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**: 241-248
- [24] LU H P, TIAN H, ZHANG L Y, *et al.* An extreme stellar prominence eruption observed by LAMOST time-domain spectroscopy[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2025, **978**(2): L32
- [25] VERONIG A M, ODERT P, LEITZINGER M, *et al.* Indications of stellar coronal mass ejections through coronal dimmings[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**: 697-706
- [26] ARGIROFFI C, REALE F, DRAKE J J, *et al.* A stellar flare-coronal mass ejection event revealed by X-ray plasma motions[J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**: 742-748
- [27] CHEN H C, TIAN H, LI H, *et al.* Detection of flare-induced plasma flows in the corona of EV lac with X-Ray spectroscopy[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **933**(1): 92
- [28] FRANCE K, FLEMING B T, DRAKE J J, *et al.* The Extreme-ultraviolet Stellar Characterization for Atmospheric Physics and Evolution (ESCAPE) mission concept[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2019, **11118**: 1111808
- [29] BOWYER S, MALINA R F. The extreme ultraviolet explorer mission[J]. *Advances in Space Research*, 1991, **11**(11): 205-215
- [30] BARSTOW M A, CASEWELL S L, HOLBERG J B, *et al.* The status and future of EUV astronomy[J]. *Advances in Space Research*, 2014, **53**(6): 1003-1013
- [31] CRAIG N, ABBOTT M, FINLEY D, *et al.* The extreme ultraviolet explorer stellar spectral atlas[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1997, **113**(1): 131
- [32] WEISSKOPF M C, TANANBAUM H D, VAN SPEYBROECK L P, *et al.* Chandra X-ray Observatory (CXO): overview[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2000, **4012**: 2-16
- [33] BARSTOW M A, KOWALSKI M P, EVES S, *et al.* Observatory-class science with a low-cost EUV astronomy mission[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2012, **8443**: 844303
- [34] DRAKE J J, CHEIMETS P, GARRAFFO C, *et al.* NExTUP: the normal-incidence extreme ultraviolet photometer[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2021, **11821**: 1182108
- [35] 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
- [36] CUI X Q, ZHAO Y H, CHU Y Q, *et al.* The Large sky Area Multi-object fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST)[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, **12**(9): 1197-1242
- [37] LU H P, TIAN H, ZHANG L Y, *et al.* Possible detection of coronal mass ejections on late-type main-sequence stars in LAMOST medium-resolution spectra[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, **663**: A140

- [38] MENG X M, HAN X H, WEI J Y, *et al.* NUV star catalog from the lunar-based ultraviolet telescope survey: first release[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, **16**(11): 168
- [39] LIU Huigen, ZHOU Jilin, HUO Zhuoxi, *et al.* Ultraviolet-visible stellar activity and habitable exoplanet survey — the UVEYES satellite[J]. *Journal of Space Science and Experiment*, 2024, **1**(1): 23-32 (刘慧根, 周济林, 霍卓玺, 等. 恒星活动与系外宜居行星探索卫星——“紫瞳”科学卫星 [J]. 空间科学与试验学报, 2024, **1**(1): 23-32)
- [40] 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
- [41] TU C Y, ZHOU C, MARSCH E, *et al.* Solar wind origin in coronal funnels[J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 519-523
- [42] TIAN H, HARRA L, BAKER D, *et al.* Upflows in the upper solar atmosphere[J]. *Solar Physics*, 2021, **296**(3): 47
- [43] 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**(1): 5947
- [44] IMADA S, BAMBA Y, KUSANO K. Coronal behavior before the large flare onset[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2014, **66**(SP1): S17
- [45] HARRA L K, WILLIAMS D R, WALLACE A J, *et al.* Coronal nonthermal velocity following helicity injection before an X-class flare[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, **691**(2): L99-L102
- [46] JEFFREY N L S, FLETCHER L, LABROSSE N, *et al.* The development of lower-atmosphere turbulence early in a solar flare[J]. *Science Advances*, 2018, **4**(12): 2794
- [47] YANG Z H, TIAN H, ZHU Y J, *et al.* Is it possible to detect coronal mass ejections on solar-type stars through extreme-ultraviolet spectral observations?[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **966**(1): 24
- [48] XU Y, TIAN H, HOU Z Y, *et al.* Sun-as-a-star spectroscopic observations of the line-of-sight velocity of a solar eruption on 2021 October 28[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **931**(2): 76
- [49] 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*, 2014, **789**(1): 61
- [50] MAEHARA H, SHIBAYAMA T, NOTSU S, *et al.* Superflares on solar-type stars[J]. *Nature*, 2012, **485**(7399): 478-481
- [51] 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
- [52] LIU R. Dynamical processes at the vertical current sheet behind an erupting flux rope[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, **434**(2): 1309-1320
- [53] POPPENHAEGER K, SCHMITT J H M M, WOLK S J. Transit observations of the hot jupiter HD 189733b at X-ray wavelengths[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **773**(1): 62
- [54] AIRAPETIAN V S, BARNES R, COHEN O, *et al.* Impact of space weather on climate and habitability of terrestrial-type exoplanets[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2020, **19**(2): 136-194
- [55] CHAN L, TIAN H, LIU X Y, *et al.* Global coronal plasma diagnostics based on multislit extreme-ultraviolet spectroscopy[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **967**(2): 162
- [56] FENG Y F, BAI X Y, GUO S F, *et al.* Optical optimization of a multi-slit extreme ultraviolet spectrograph for global solar corona diagnostics[J]. *Experimental Astronomy*, 2024, **58**(3): 13
- [57] TAMBURRI C A, KAZACHENKO M D, KOWALSKI A F. The relationships among solar flare impulsiveness, energy release, and ribbon development[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **966**(1): 94
- [58] TIAN H, TU C Y, MARSCH E, *et al.* The nascent fast solar wind observed by the EUV imaging spectrometer on board hinode[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, **709**(1): L88-L93
- [59] CHEUNG M C M, DE PONTIEU B, MARTÍNEZ-SYKORA J, *et al.* Multi-component decomposition of astronomical spectra by compressed Sensing[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **882**(1): 13
- [60] LU H P, TIAN H, CHEN H C, *et al.* Full velocities and propagation directions of Coronal Mass Ejections inferred from simultaneous full-disk imaging and Sun-as-a-star spectroscopic observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **953**(1): 68
- [61] CHENG Z X, WANG Y M, LIU R, *et al.* Plasma motion inside flaring regions revealed by doppler shift information from SDO/EVE observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **875**(2): 93
- [62] YANG Z H, TIAN H, BAI X Y, *et al.* Can we detect coronal mass ejections through asymmetries of sun-as-a-star extreme-ultraviolet spectral line profiles?[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, **260**(2): 36
- [63] GIORDANO S, CIARAVELLA A, RAYMOND J C, *et al.* UVCS/SOHO catalog of coronal mass ejections from 1996 to 2005: spectroscopic proprieties[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(3): 967-981

作者简介



田 晖 (第一作者和通信作者)

1982年8月出生于湖北蕲春, 北京大学地球与空间科学学院教授, 博士生导师, 主要从事太阳物理、恒星磁活动、空间极紫外探测等方面的研究, 在日冕加热机制和磁场测量原理、星冕物质抛射的搜寻和建模等方面取得了一系列研究成果。

E-mail: huitian@pku.edu.cn