



晚型恒星极紫外和X射线探测的科学目标与初步方案

田晖^{1*}, 白先勇^{2*}, 邓元勇², 李文显², 陈亚杰¹, 杨子浩¹, 徐昱¹, 陈何超¹, 刘贤雨¹

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

*联系人, 田晖, E-mail: huitian@pku.edu.cn; 白先勇, E-mail: xybai@bao.ac.cn

收稿日期: 2022-01-17; 接受日期: 2022-03-03; 网络出版日期: 2022-10-18

国家重点研发计划(编号: 2021YFA0718600, 2021YFA1600500)资助项目

摘要 寻找地外生命是人类探索宇宙的核心目标之一. 为实现这一目标, 理解恒星及其周围宜居行星的联系非常关键. 近年来, 越来越多的学者意识到, 空间天气的现象(即类似太阳活动对地球空间环境的影响)在太阳系外的恒星-行星系统中也存在. 作为系外空间天气的主要源头, 宿主恒星(主要是晚型主序恒星)的星冕及其磁活动所产生的电磁和粒子辐射可改变行星大气成分、导致行星大气逃逸、损害生物组织, 进而影响系外行星上生命的起源与存续. 然而, 当前我们对星冕的了解极其匮乏, 这严重制约了相关研究. 本文建议尽快对宿主恒星的星冕及其活动规律进行全面、有效的监测. 要实现这一目标, 亟需建造新一代的极紫外和软X射线望远镜, 在大约1–350 Å的波段(特别是170–285 Å和90–140 Å的极紫外波段)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. 本文阐述了这些观测的详细科学目标, 并提出了技术指标需求和初步的探测方案. 利用这些观测, 有望确切地探测到星冕物质抛射、冕洞和活动区冕环系统等大尺度结构, 实现星冕磁场的常规测量, 并极大地丰富我们对恒星耀斑和星冕等离子体性质的认识. 此外, 通过观测系外行星“凌星”期间该波段辐射的变化, 还有望获得行星大气、电离层和磁层等关键信息. 基于这些观测, 将能实质性地推动太阳系外的空间天气研究, 并准确评估其在宜居世界形成过程中的作用.

关键词 晚型恒星, 极紫外辐射, X射线辐射, 系外行星, 系外空间天气

PACS: 95.55.Fw, 96.12.Hg, 97.10.-q, 97.10.Ex, 97.30.Nr

1 引言

寻找地外生命一直是人类探索宇宙的核心目标之一. 自20世纪90年代发现太阳系外的行星以来, 寻找宜

居行星逐渐被公认是实现这一目标的关键. 基于对地球上生命的认识, 人们普遍认为, 判断一颗行星是否宜居, 最重要的是看其表面是否存在液态水. 而液态水的存在与否主要取决于该行星与其宿主恒星(主要

引用格式: 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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 119511
Tian H, Bai X Y, Deng Y Y, et al. Scientific objectives and preliminary plans for EUV and X-ray observations of late-type stars (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 119511, doi: [10.1360/SSPMA-2022-0023](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0023)

是晚型恒星)的距离以及宿主恒星的光度. 基于此, 人们定义了宜居带, 指的是恒星周围的一个距离范围, 在这个范围内的岩石行星表面可以存在液态水^[1,2].

尽管这个条件对于类地生命来讲是必要的, 但它显然不是充分条件. 近年来, 越来越多的学者意识到, 一颗行星要适宜生命存在, 肯定还需要满足其他条件. 换句话说, 要寻找宜居行星, 除了寻找液态水外, 还需要考虑其他能够影响宜居性的因素. 这些因素至少包括行星的大气、磁场以及宿主恒星所产生的空间天气效应. 而后者近年来受到了越来越多的关注^[3,4].

在太阳系中, 空间天气一般指的是太阳磁场演化所产生的活动现象(简称磁活动)及其对地球空间环境造成的扰动. 爆发性的磁活动包括太阳耀斑和日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)等, 频繁发生的强烈爆发活动可以对通讯、导航、电力、航天等人类高技术系统造成严重损害. 作为太阳的最外层大气, 日冕一般被认为是太阳系中空间天气最主要的源头.

可以预期, 类似的空间天气现象在太阳系外的恒星-行星系统中也存在, 不妨将其简称为系外空间天气(图1). 正如太阳系中空间天气的主要源头是日冕, 系外空间天气的主要源头就是星冕了. 宿主恒星的星冕性质及其活动必定会影响其周围行星的大气及空间环境, 这将在一定程度上决定行星上是否适宜生命的生存. 具体来讲, 星冕所产生的极紫外和X射线等高能电

磁辐射、星风和星冕的爆发性活动可以通过改变行星大气的成分、导致大气逃逸、损害生物组织等方式来影响系外行星上生命的起源与存续. 相关研究课题也被称为“受空间天气影响的宜居带”^[3], 这里简称“空间天气宜居带”, 以区别于按照液态水是否存在所定义的传统意义上的宜居带.

系外空间天气对系外行星宜居性的影响可以通过星冕的电磁辐射、质量损失和高能粒子辐射三个方面来加以理解^[4].

(1) 电磁辐射: 与日冕类似, 大多数晚型(这里指F, G, K, M型)主序恒星的星冕也会产生极紫外和X射线辐射. 这些高能电磁辐射在耀斑期间通常还会大幅增强. 对于那些频繁发生超级耀斑(能量大于 10^{33} erg的耀斑, 比典型太阳耀斑的能量要高几个数量级)^[5]的恒星, 可以预期, 其所产生的极紫外和X射线辐射可能比太阳耀斑期间的还要强几个数量级. 这将导致周围行星的大气被频繁地加热和电离, 从而可能在较短的时间里就逃逸殆尽. 这样的行星显然是不适宜生命存续的.

(2) 质量损失: 主要包括星风和星冕物质抛射(恒星CME). 与日冕类似, 百万度甚至上千万度的星冕必定会持续往外膨胀, 形成长期存在的、超声速的星风, 充满了系外恒星——行星系统的空间环境(或称星球层, 与日球层类似). 恒星CME则是星冕中的大团等离子体瞬时往外抛射的现象. 强烈的星风和频繁发生的CME会剧烈压缩行星的磁层, 一方面导致行星大气更多地暴露在磁化的星风环境中, 并通过一些非热过程逃离行星(如通过恒星极紫外辐射导致的光致电离、星风/CME电子导致的碰撞电离、与星风/CME质子的电荷交换而成为正离子, 然后被星风磁场拾起带走; 或者星风/CME质子直接撞飞中性的原子或分子); 另一方面减弱行星磁场对高能粒子的屏蔽功能, 使得高能粒子可以长驱直入, 进入行星大气甚至表面.

(3) 高能粒子: 耀斑和CME等爆发性的星冕活动都可以有效地加速带电粒子. 因此, 频繁、强烈的星冕爆发活动将会产生大量高能粒子. 这些高能粒子是一把双刃剑: 一方面, 高能质子可以破坏行星大气中的 O_3 , 使对生命有害的紫外辐射更多地抵达行星表面; 大量高能质子也可能造成生物活性大分子(如蛋白质)断裂, 并可能改变细胞和组织中的生物化学反应而造成损伤, 从而对生命的存续产生不利的影响. 另一方

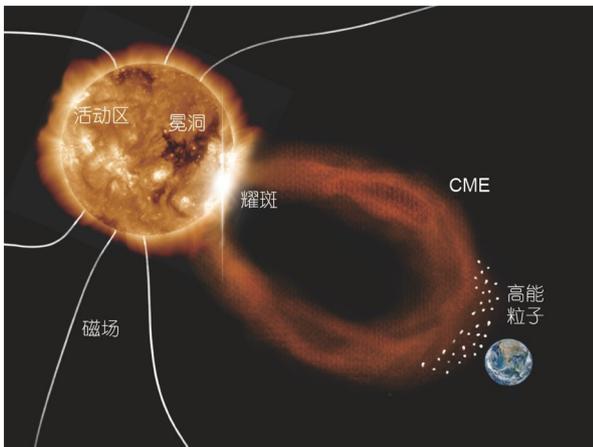


图1 (网络版彩图)系外空间天气示意图. 左上方的恒星图像取自太阳动力学天文台卫星(SDO)拍摄的太阳极紫外图像
Figure 1 (Color online) A cartoon showing space weather in star-exoplanet systems. The stellar image shown on the upper left part is represented by a EUV image of the Sun taken by the Solar Dynamics Observatory (SDO).

面, 这些高能粒子可以导致行星大气中 N_2 和 CO_2 等分解并产生强烈的温室气体 N_2O , 使行星变暖, 为液态水的存在创造条件; 同时它们还可能将简单分子转化为复杂的有机物, 从而为生命起源提供更有利的条件^[6].

由此可见, 星冕的性质决定了系外恒星-行星空间的物理状态, 源于星冕的系外空间天气对系外行星的宜居性有重要影响. 然而目前我们对星冕的了解极其匮乏. 比如, 在日冕里, 我们知道有辐射较强的活动区和辐射较弱的冕洞等大尺度结构, 磁场的演化还驱动日冕物质时不时被抛离太阳, 形成CME. 在其他恒星上, 类似的结构和现象还从来没有被确切地探测到, 星冕磁场也极少有人测量过. 这主要是因为过去对星冕的有限观测主要来自X射线天文台, 如CHANDRA和XMM-Newton, 它们对同一颗恒星的观测时间非常有限, 并且对星冕的光谱观测数据信噪比通常较低. 星冕观测数据的缺乏严重影响了我们对系外空间天气的探索. 正因如此, 当前“空间天气宜居带”的相关研究基本上全是模型计算. 这些模型都需要对星冕及其活动的相关物理参数作出一些假定. 由于缺乏观测数据, 很难判断这些假设是否合理, 因此, 这些模型的结果存在很大的不确定性(如文献[7,8]). 因此, 要想准确刻画星冕活动规律, 探索系外空间天气及其对系外行星宜居性的影响, 当务之急是要对星冕开展长期、有效的监测.

参考日冕观测, 可以得知, 极紫外(约100–912 Å)和软X射线(约1–100 Å)应该是最有希望用来监测星冕的波段(图2). 软X射线的优势在于其基本不受星际介质吸收的影响. 该波段存在大量形成温度在数百万度到约两千万度的谱线, 可以观测星冕温度较高的恒星. 极紫外波段对于星冕观测更有利, 因为其具有X射线波段没有的一些独特优势, 这包括: 因谱线温度覆盖极宽(从一两万度到一两千万度)而能诊断恒星的色球、过渡区以及不同温度的星冕结构, 可开展对星冕磁场的测量, 适合类日恒星CME的探测等. 此外, 恒星极紫外辐射也是系外行星大气加热和电离最主要的能量来源, 因此是系外行星大气逃逸最主要的驱动源之一^[9]. 相较于X射线, 极紫外辐射因加热行星大气效率更高而能导致更有效的热逃逸^[10]. 然而, 极紫外是天文观测中尚未被充分开发的波段, 这主要是因其易被星际介质吸收的特性而较难探测. 但是星际介质对近邻恒星发出的短波长极紫外(约100–350 Å)辐射的吸

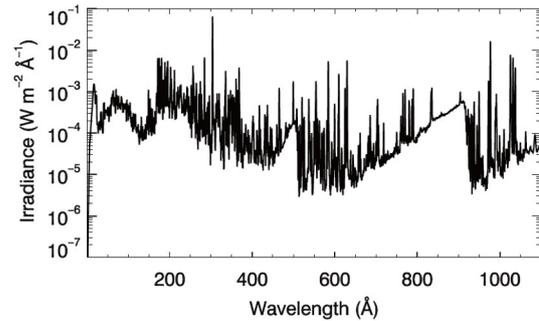


图2 太阳的软X射线和极紫外光谱. 数据来自2011年7月14日SDO/EVE (<https://lasp.colorado.edu/home/eve/data/>)和TIMED/SEE (<https://lasp.colorado.edu/home/see/data/>)两台光谱仪的观测

Figure 2 Soft X-ray and EUV spectrum of the Sun, as taken by the SDO/EVE (<https://lasp.colorado.edu/home/eve/data/>) and TIMED/SEE (<https://lasp.colorado.edu/home/see/data/>) instruments on July 14, 2011.

收并不显著^[10], 仍然可以利用该波段来观测近邻恒星的星冕及其活动. 因此, 极紫外波段将是未来恒星-系外行星系统探测不可或缺的一个关键窗口.

2 主要科学目标

对宿主恒星开展极紫外和X射线探测, 将能够全面揭示星冕的性质及其活动规律, 从而极大地推动正在全球范围内兴起的系外空间天气和“空间天气宜居带”研究.

2.1 诊断星冕等离子体

一般认为F, G, K, M型主序恒星普遍存在类似日冕的高温星冕, 其温度通常在百万度到一两千万度之间^[4]. 这主要是因为这些恒星内部对流层的发电机过程产生了全球尺度的磁场, 而与磁场相关的物理过程加热了星冕等离子体. 高温星冕持续往外膨胀, 形成充满星球层的星风, 因而可以说, 星冕等离子体的性质决定了星球层的物理环境.

极紫外和软X射线光谱可用于诊断星冕等离子体的密度、温度、速度、丰度等性质^[11]. 以往的星冕光谱观测比较少, 并且基本以X射线为主. 光谱观测的信噪比通常也比较低, 因此只能用来研究X射线辐射较强的星冕. 将望远镜的有效面积提高1–2个数量级, X射线光谱对星冕等离子体的诊断能力将得到大幅提升. 此外, 由于X射线波段的发射线形成温度普遍偏高(约数百万度到两千万度), 这些观测仅适合研究温度

较高的星冕(年轻和快速自转的恒星通常X射线辐射更强, 星冕温度也更高), 而难以诊断温度与日冕类似的星冕等离子体.

因此, 极紫外光谱观测显得尤其重要. 350 Å以下的极紫外波段存在大量形成于数万度到两千万度的谱线, 包括Fe VIII–Fe XXIV等不同价态的Fe离子谱线, 适合用于微分辐射量(DEM)反演进行温度诊断. 该波段也有着众多可用于密度诊断的谱线对, 如Fe X 174.53/175.26 Å, Fe XII 196.64/195.12 Å, Fe XIV 264.79/274.20 Å等^[12], 以及Fe XXI 102.22/128.73 Å, Fe XXII 114.41/117.17 Å等^[13]. 此外, Si和S分别具有较低和较高的第一电离势(First Ionization Potential, FIP), 因此Si X 258.37 Å/261.04 Å和S X 264.23 Å等强线可用于相对丰度(如FIP Bias)的测量^[14]. 该波段除了非常适合诊断不同温度的星冕等离子体外, 还包含了He II 304 Å/256 Å, O V 192.90 Å, O VI 184.12 Å, Mg VII 280.75 Å, Si VII 275.35 Å等可用于类日恒星色球和过渡区诊断的较强谱线. 结合这些低温谱线和来自Fe VIII–Fe XXIV等离子体的高温谱线, 将能够通过反演获得恒星大气完整的DEM, 这也是单靠X射线观测无法实现的.

作为天文和空间科学最重要的难题之一, 日冕加热机制数十年来一直是太阳物理研究的热点. 基于星冕等离子体诊断结果, 将能够刻画不同类型恒星的星冕性质及其在不同时间尺度上的演化, 并寻找其与恒星自转周期、质量、活动周期、磁场等基本参数之间可能的联系, 从而将日冕加热的课题拓展为星冕加热, 深化对恒星多样性的认识.

2.2 探测星冕大尺度结构

与日冕类似, 我们预期星冕中也存在活动区冕环系统、冕洞等重要的大尺度结构. 活动区是恒星上磁场最强的区域, 其星冕等离子体的密度也比较大, 是爆发性磁活动最容易发生的区域. 而冕洞则是星冕等离子体密度较低的区域, 是星风的主要源区. 由此可见, 活动区和冕洞与系外空间天气的起源密切相关. 然而迄今为止, 人们还没有在星冕观测中探测到这些基本的大尺度结构.

我们知道, 黑子的可见光辐射比较弱, 因此当黑子随着太阳自转从太阳背面转到正面时, 整个太阳积分的可见光辐射就会下降. 利用这一原理, 人们探测到

了一些恒星上的黑子(如文献^[15]). 类似的方法应该也可以应用到星冕结构的探测上, 只不过需要换成极紫外或软X射线波段. 活动区的冕环系统是星冕中极紫外和软X射线辐射很强的地方, 而冕洞则是极紫外和软X射线辐射很弱的地方. 通过观测极紫外或软X射线辐射强度随恒星自转的变化, 有望探测到这两类非常重要的大尺度星冕结构, 并研究它们的物理特性.

近期一项基于太阳观测的研究表明, 通过比较恒星自转过程中的星冕辐射曲线与光球/色球辐射曲线, 有望获得恒星黑子上方冕环系统的高度等重要信息^[16]. 这是因为冕环越高, 其从恒星背面转到正面时, 就会越早出现在恒星盘面的边缘之外, 因而恒星的极紫外或软X射线辐射就会越早开始增强(图3).

此外, 在系外行星“凌星”期间, 行星可能遮挡住恒星上的一些冕洞或活动区, 从而导致整个恒星总的极紫外/X射线辐射发生短时的变化. 通过分析这些光变曲线, 也有可能得到冕洞或活动区的大小等信息. 类似方法已用到了恒星黑子的探测上^[17].

2.3 测量星冕磁场

目前认为, 正是因为磁场, 星冕才得以产生和维持如此高的温度; 也正是因为磁场的演化, 才产生了各种各样的星冕活动, 进而驱动各种类型的系外空间天气现象. 此外, 星冕磁场随着星风的往外传输而充满了整个星球层, 可以说星冕磁场决定了系外行星临近空间的磁场环境. 因此, 星冕磁场的信息对于理解星冕活动规律、探索系外空间天气对行星宜居性的影响具有重要意义.

然而星冕磁场的测量极其困难. 实际上, 1908年海尔首次通过塞曼效应测得太阳光球磁场后, 长期以来日冕磁场的测量也都是非常困难的. 直到2020年才曙光初现, 在这一年, 三个独立的团队利用三种完全不同的方法初步实现了对日冕磁场的成像, 标志着日冕磁场测量的研究进入新的阶段. 2020年1月, 利用欧文斯谷太阳射电阵(EOVSA)观测数据, 人们得到了太阳耀斑发生过程中日冕磁场的空间分布^[18]. 2020年8月, 利用日冕多通道偏振仪(CoMP)的近红外光谱观测数据, 我们发展了一个基于磁流体波动观测和密度诊断的新方法, 成功测得第一幅日冕的全局性磁图^[19,20]. 2020年12月, 利用日出卫星(Hinode)携带的极紫外成像光谱仪(EIS)的观测, 太阳物理学者与原子物理学者

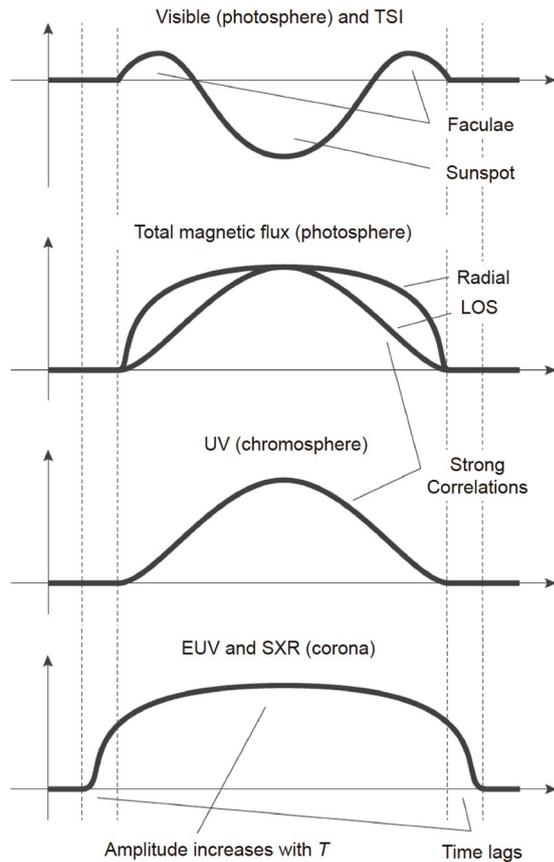


图3 太阳自转过程中光球辐射、光球总磁通、色球辐射、日冕辐射的变化. 图改自文献[16]

Figure 3 Temporal evolution of the photospheric radiation, photospheric magnetic flux, chromospheric radiation and coronal radiation as the Sun rotates. Adapted from ref. [16].

合作, 基于磁诱导跃迁这一原理, 得到了日面上活动区的日冕磁场分布图^[21].

利用磁诱导跃迁的物理原理测量日冕磁场的新方法最早由复旦大学和瑞典隆德大学等机构的研究人员于2015年前后提出^[22,23]. 其基本原理是, 当没有外磁场时, Fe X离子的 $3p^4 3d^4 D_{5/2}$ 和 $4D_{7/2}$ 激发态分别通过电偶极(E1)和磁四级(M2)跃迁到基态 $3p^5 \ ^2P_{3/2}$, 产生波长分别为257.259和257.261 Å的两条谱线. 后者因为是禁戒跃迁, 辐射一般很弱. 当有外磁场时, $4D_{5/2}$ 和 $4D_{7/2}$ 这两个具有相同磁量子数的磁能级将发生一定程度的混合, 这时 $4D_{7/2}$ 到基态的跃迁速率将随着磁场的增强而增大, 从而辐射增强, 称为磁诱导跃迁(MIT). 由于现

有光谱仪无法分出0.002 Å的波长差, 所以实际观测到的应该是E1, M2和MIT的混合线(257 Å). 通过测量Fe X 257 Å与另一条Fe X参考谱线强度的比值, 就可以得到日冕磁场强度(图4).

最近, 我们进一步发展和完善了该诊断方法^[24], 并基于恒星全球模型的正演研究, 提出磁诱导跃迁方法还可以用来测量一些强磁场恒星(比活动高年的太阳磁场强3倍以上)的星冕磁场^{[25] 1)}. 由于MIT谱线的强度同时还跟电子密度有关, 在测量磁场之前, 还需要用Fe X 174/175 Å等谱线对来诊断星冕的电子密度. 因此, 如果建造一台能同时观测Fe X 174, 175, 257 Å谱线的极紫外光谱仪, 光谱分辨本领达到2000以上(以分辨出257 Å谱线及其周围的其他谱线), 有望对一些恒星的星冕磁场进行常规测量. 而在过去, 星冕磁场的测量极少, 只有零星的通过射电观测进行诊断的尝试.

2.4 探测恒星耀斑

如前所述, 恒星耀斑导致极紫外和X射线辐射大幅增强, 频繁发生的耀斑将能使系外行星大气被频繁、有效地加热和电离, 从而导致行星大气的逃逸. 此外, 大耀斑通常会大量高能质子, 这些质子进入系外行星大气后, 可以通过改变大气化学成分、损害生物组织等方式来影响生命的起源与存续.

在恒星磁活动方面, 过去恒星耀斑的研究算是相对比较多的. 对恒星耀斑的观测波段通常有可见光、射电和X射线. 得益于Kepler, TESS等卫星对大量恒星的观测, 人们通过可见光连续谱辐射探测的耀斑相对较多(如文献[5,26]). 很多恒星耀斑呈现的可见光连续谱增强幅度在1%的量级, 甚至10%以上; 其持续时间一般为数小时. 然而在太阳上, 耀斑期间的可见光连续谱增强大多非常微弱, 其持续时间通常只有几分钟或更短, 而且一般仅限于耀斑区域内很小的面积(如文献[27]), 这些耀斑被称为白光耀斑, 其产生的高度一般在色球或光球层(如文献[28]). 在全日面积分的可见光连续谱上, 通常探测不到白光耀斑. 由此可见, 人们目前在可见光连续谱上探测到的大量恒星耀斑与太阳耀斑的性质存在巨大差异. 这些恒星上的白光辐射来自恒星大气的哪个层次? 其产生机制是什么? 可能不能

1) Liu X Y, Tian H, Chen Y J, et al. Forward modeling of magnetic-field measurements at the bases of stellar coronae through extreme-ultraviolet spectroscopy. *Astrophys J*, 2022.

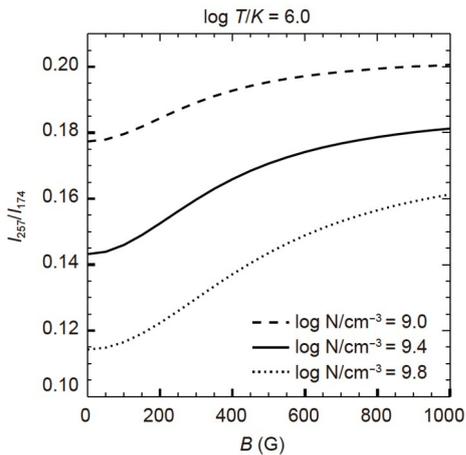


图4 Fe X 257和174 Å谱线强度之比与磁场的关系, 不同线型代表不同电子密度下的结果. 图改自文献[24]

Figure 4 Dependence of the Fe X 257/174 Å line ratio on the magnetic field strength. Different line styles represent the results under different electron densities. Adapted from ref. [24].

简单地用太阳白光耀斑的理论来解释. 这一巨大差异也暗示, 太阳和恒星耀斑期间不同高度大气的加热机制以及粒子加速机制可能也存在较大差异. 因此, 太阳耀斑过程中白光辐射与其他波段辐射的关系可能也不能简单地外推到恒星耀斑上. 这说明, 在包括X射线和极紫外的更波长范围内对恒星耀斑进行观测是非常有必要的.

CHANDRA和XMM-Newton等先进的X射线天文台对恒星耀斑的X射线辐射做了很多观测. 然而由于观测资源的限制, 这些望远镜对同一颗晚型恒星的连续观测时间大多只有几个小时, 超过两天的连续观测几乎没有, 使得难以研究这些恒星上耀斑发生的统计规律, 进而限制了对耀斑影响行星宜居性的准确评估. 另外, 现有X射线光谱观测设备的有效面积也不高, 灵敏度和数据信噪比较低, 几乎可以肯定, 恒星上发生的数量更多、相对较弱的耀斑没有被探测到. 换句话说, 这些望远镜只探测到冰山一角, 这严重限制了对恒星耀斑的全面认识. 因此, 有必要建造新的、高灵敏度的、为宿主恒星量身定做的X射线望远镜, 来准确刻画恒星耀斑的发生规律和统计特征.

不同波段的电磁辐射实际上来自耀斑过程中的不同阶段和耀斑区域中的不同结构. 因此, 要全面理解耀斑过程, 必须要用不同波段来观测耀斑. 然而遗憾的是, 过去几乎没有对恒星耀斑的极紫外观测. 事实上,

在1995年以前, 人们对太阳耀斑的理解几乎全部是通过X射线和可见光波段的观测所获得的; 而最近20多年来, 大量的极紫外观测大大增进了对太阳耀斑的认识, 目前极紫外已经成为太阳耀斑研究不可或缺的波段(如文献[29]). 对于恒星耀斑, 可能将来我们也会经历这样一个过程.

基于太阳耀斑的观测, 我们知道, X射线辐射通常来自耀斑区温度较高的部分, 比如高温的耀斑环. 而可见光波段的一些色球谱线辐射通常来自耀斑带(耀斑环的足点). 相较于X射线和可见光, 极紫外光谱涵盖了很宽的温度范围, 能对耀斑区不同温度的部分进行全面的观测, 并能探测在其他波段不易探测到的一些现象. 比如, SDO卫星的观测表明, 极紫外波段的Fe XXI 129 Å谱线非常适合探测耀斑重联区的动力学过程(如文献[30]). 全日面积分的极紫外光谱也被证明适合诊断耀斑过程中包括色球蒸发、色球压缩、冕雨在内的多种温度各异的物质流动(如文献[31]). 另外, 很多耀斑在其X射线峰值后的几小时会出现较强的极紫外辐射(图5), 称为耀斑后相^[32]. 有些耀斑后相产生的总极紫外辐射与主相期间的在同一量级, 从而对周围行星的大气加热和电离产生不可忽视的影响. 因此, 如果利用极紫外这个新窗口来对恒星耀斑开展光谱和测光观测, 可以预期将能看到耀斑过程中的很多新“风景”.

2.5 探测恒星CME

CME是恒星上除耀斑之外的另一类主要的爆发性磁活动. 在漫长的恒星演化过程中, 频繁发生的CME可能对恒星的质量和角动量损失有重要贡献. 此外, 恒星CME前端激波产生的高能粒子可以改变行星大气成分, CME在压缩行星磁层后也会导致行星大气的非热逃逸急剧增强^[33]. 近期的一项研究发现, 恒星CME导致的系外行星大气逃逸率远比耀斑导致的高^[8]. 然而迄今为止, 人们还没有探测到恒星CME的确切证据, 仅报道了少数CME候选体.

在太阳上, 耀斑和CME有较大概率是相伴发生的, 而且级别越大的耀斑同时伴随CME的概率越大^[34]. 然而在恒星上, 二者相互关联的概率有多大还无从得知. 比如近期的一些研究表明, 在一些活跃的M型恒星上, 尽管耀斑可以频繁发生, 但由于磁场的束缚作用很强, CME发生的概率可能很小^[35]. 此外, 太阳上耀斑和CME能量之间的关系可能也不能简单地外推到其他

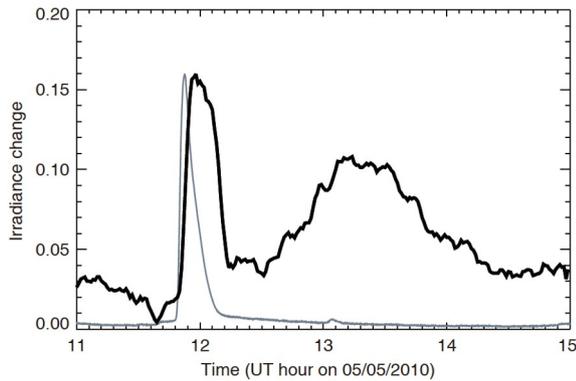


图5 2010年5月5日发生的一次太阳耀斑期间软X射线(灰色, GOES卫星观测的1–8 Å辐射)和极紫外(黑色, SDO/EVE光谱仪观测的Fe XVI 335 Å谱线)辐射随时间的变化

Figure 5 Light curves of the Soft X-ray flux (1–8 Å) measured by GOES (grey) and EUV flux (Fe XVI 335 Å) measured by SDO/EVE (black) during a solar flare on May 5, 2010.

恒星上^[36]. 因此, 我们无法根据恒星耀斑的观测来推测恒星CME的性质. 恒星CME的探测至少与恒星耀斑探测同等重要, 因为二者分别反映的是质量损失和电磁辐射, 它们对系外行星宜居性的影响方式截然不同. 实际上, 自20世纪90年代中期开始, 人们已经认识到太阳CME是灾害性空间天气最主要的驱动源, 其对日地空间环境的扰动效应比耀斑更甚^[37]. 如果在其他恒星-行星系统中也有类似结论, 那么恒星CME的探测可能比恒星耀斑探测意义更大.

极紫外和软X射线是非常有希望探测到恒星CME的波段. 基于对太阳CME的理解, 至少可以通过两种方式探测恒星CME.

第一种方式是通过星冕暗化来探测CME. 以太阳为例, CME本质上是日冕物质抛离太阳, 也就是日冕物质损失了, 很显然, 其源区的密度会下降, 相应的日冕极紫外和软X射线辐射就会下降, 称为日冕暗化(如文献^[38]). 在SDO卫星携带的EVE光谱仪获取的全日面积分极紫外光谱中, 观测到了此类暗化^[39]. 比如, 从图6中可以看到, 日冕爆发之后Fe IX 171 Å谱线的辐射强度有明显的下降. 需要说明的是, 暗化通常出现在那些形成温度与日冕典型温度一致的谱线上, 即形成温度大约在 $10^{5.8}$ – $10^{6.3}$ K范围的谱线(如文献^[40]). 进一步的研究表明, 这些极紫外谱线的暗化是区分爆发耀斑(伴随CME)和束缚耀斑(不伴随CME)的最明显的特征之一^[41]. 对多个事件的分析还表明, Fe IX 171 Å谱线

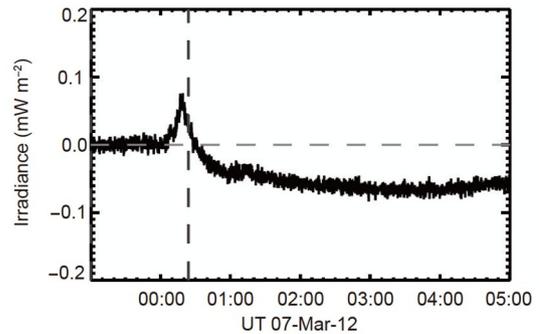


图6 全日面积分的Fe IX 171 Å谱线强度随时间的变化, 竖线表示耀斑软X射线辐射峰值时刻, 横线表示爆发前的辐射水平. 日冕物质抛射发生后, 谱线强度有明显下降. 图引自文献^[41]

Figure 6 Temporal evolution of the full Sun integrated Fe IX 171 Å line intensity. The vertical and horizontal lines mark the occurrence time of a CME and the pre-eruption intensity level, respectively. After eruption, the intensity clearly drops. Adapted from ref. ^[41].

强度下降幅度的平方根与CME质量、下降速率与CME速度均具有大致线性的关系^[42], 因此借助观测到的极紫外谱线辐射下降的比例和速率, 有望估算出CME的质量和速度.

日冕暗化的研究对恒星CME的探测具有重要的启示. 我们完全可以预期, 星冕物质抛射发生后, 星冕密度的降低将导致星冕特征谱线辐射强度的下降. 对于星冕温度跟日冕类似的恒星, 这些特征谱线的形成温度大约在 $10^{5.8}$ – $10^{6.3}$ K, 主要在极紫外波段. 而对于那些星冕温度更高的恒星, 暗化将出现在形成温度更高的谱线上, 可以在极紫外或软X射线波段. 即使得到的光谱没有空间分辨(即点源恒星观测), 依旧可能根据星冕暗化的观测来大致估计CME两个最重要的参数——速度和质量.

最近, 基于全球星冕磁流体数值模型, Jin等人^[43]计算出了CME爆发期间整个恒星积分的极紫外谱线辐射, 证实了恒星CME确实可以导致星冕特征谱线的暗化. 而Veronig等人^[44]则从CHANDRA, XMM-Newton和EUVE的观测数据中, 发现了一些恒星上的瞬时暗化现象, 并将其解释为恒星CME. 但由于观测时间太短, 星冕宁静期的辐射水平难以准确确定, 因此其结论还有争议. 要想确切地探测到大量的恒星CME, 未来急需对一些恒星开展高信噪比、长时间的连续观测.

第二种方式是通过星冕谱线的多普勒频移或不对

称性来探测CME. CME是从太阳或其他恒星表面往外抛射的大团高温等离子体, 由于多普勒效应, 这团抛射物产生的谱线辐射会发生波长移动(通常是蓝移). 这一现象在太阳正面的极紫外光谱观测中得到了证实, 利用Hinode卫星上极紫外光谱仪EIS的观测, Tian等人^[40]发现在一次太阳爆发过程中, 抛射物所在位置的典型日冕和过渡区谱线(形成温度约 $10^{5.5}$ – $10^{6.3}$ K范围)的轮廓均呈现明显的两个高斯分量. 其中一个分量的中心波长接近谱线的静止波长, 显然是来自背景日冕的辐射; 而另一个分量则是来自抛射物的辐射, 其约200 km/s的蓝移便是观测时刻抛射物在视线方向的速度.

由于恒星观测一般属于点源观测, 我们探测到的是对整个恒星积分的辐射. 为了研究能否从整个恒星积分的光谱中检测出CME所产生的辐射分量, 我们近期构建了一个CME从恒星往外传播的解析模型, 并从该模型计算出了CME发生期间整个恒星积分的Fe XII 195 Å, Fe XV 284 Å等谱线轮廓^[45]. 结果显示, 当分辨率较低时, 较强的背景星冕辐射分量和较弱的CME辐射分量的叠加可能仅会导致整个谱线轮廓的微小蓝移, 而难以呈现明显的谱线不对称性; 而当极紫外光谱仪分辨本领在大致500以上时, 这些极紫外谱线会呈现明显的蓝移分量或蓝翼增强, 利用双高斯拟合或不对称性分析方法, 能够比较精确地得到CME的视向速度(图7). 由于抛射物中不仅包含星冕温度的等离子体, 也包含了一部分过渡区和色球温度的物质, 因此这一现象在不同形成温度的很多谱线上都可能会有所呈现.

利用光谱分辨本领较低的全日面积分光谱仪EVE(在200 Å附近约为200)的观测数据, 人们已经发现, 在太阳上的一些物质抛射发生期间, 很多谱线的轮廓都会产生一个整体的蓝移, 其蓝移速度在10–100 km/s之间^[46,47]. 而近期基于EVE观测的一项研究发现, 爆发耀斑发生期间经常有一些日冕谱线存在明显的10–30 km/s的蓝移, 而束缚耀斑则无此现象²⁾. 因此, 低分辨率的极紫外光谱仪在判断CME是否发生这方面具有一定潜力, 但难以测得CME真实的视向速度. 要确切地探测到抛射物的视向速度, 需要提高光谱分辨率. 如2021年10月28日的一个晕状CME爆发期间,

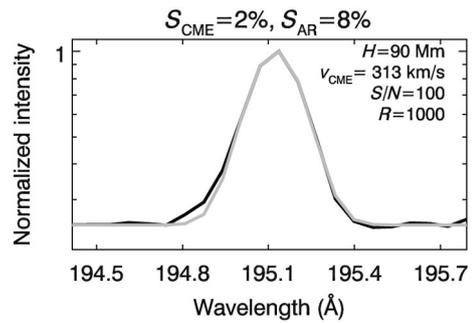


图7 模型预测的CME爆发期间整个恒星积分的Fe XII 195 Å谱线轮廓(黑线)及其高斯拟合结果(灰线). 从蓝翼的增强可得到CME的视向速度

Figure 7 Predicted stellar Fe XII 195 Å line profile during a CME eruption (black). The grey curve represents a Gaussian fit to the line profile. The CME speed in the line of sight direction can be inferred from the blue wing enhancement.

EVE的O V 629 Å (该波长附近光谱分辨本领约为700)谱线轮廓呈现比较明显的两分量, 其中蓝移分量对应的多普勒速度高达450 km/s左右, 从而首次利用全日面积分极紫外光谱仪测量到CME的视向速度^[48]. 但由于629 Å附近的恒星光谱受到星际介质的严重吸收, 因此要测量恒星CME的速度, 还是应该致力于提高350 Å以下波段观测的光谱分辨率.

对于星冕温度在数百万到两千万度的恒星, 除了极紫外波段的一些高温谱线如Fe XXI 129 Å外, 软X射线波段的一些谱线也可用于探测CME. 比如, CHANDRA卫星观测到一颗巨星的O VIII 18.97 Å谱线在耀斑的衰减相出现较大蓝移(~100 km/s, 远大于自转速度), 被解释为可能的CME信号^[49]. 该巨星的星冕温度远高于日冕温度, 因此抛射物在软X射线波段也有较强辐射.

2.6 探测行星大气和电离层、磁层

行星的大气和空间环境(主要包括电离层和磁层)是类地生命能够存在的重要条件. 但由于距离遥远, 现有手段难以直接通过成像观测分辨出它们. 而行星“凌星”提供了一种可以探测系外行星大气和电离层、磁层性质和特征的方式. 在观测恒星时, 如果碰上行星“凌星”, 由于行星大气对星光的选择吸收等作用, 人们往往能通过观测到的光谱变化来推测该行星大气的性质. 这已经成为刻画系外行星大气特征的主要方式

2) Cheng Z X, Zhou G P, et al. in preparation, 2022.

之一. 近年来, 在红外和可见光等波段, 这一方法得到了广泛的应用.

由于观测数据的缺乏, 关于极紫外和X射线波段的“凌星”研究极少. 一般认为, 恒星的极紫外和X射线辐射进入系外行星大气后, 在电离层峰值电子密度对应的高度附近就已经被吸收得所剩无几了^[50]. 而恒星的可见光辐射则几乎不受行星大气的吸收. 因此, 当一颗系外行星“凌星”时, 极紫外/X射线波段辐射的下降程度应该比可见光波段的更大. 根据这一差异, 可以得到系外行星电离层的高度信息. 这在CHANDRA卫星对一次“凌星”事件的观测中得到了证实^[51]. 当然, 极紫外/X射线辐射的下降有些可能是由星冕结构和活动造成的, 但通过分析多次“凌星”的数据, 可以将此因素的影响降到较低水平^[52].

此外, “凌星”期间的极紫外/X射线辐射可能还能用来探测一些系外行星上的大气逃逸. 在一颗海王星质量的系外行星“凌星”期间, 哈勃望远镜观测到氢原子Ly α 谱线蓝翼强度的下降程度远超可见光波段的下降程度, 并且持续时间是可见光波段的6倍, 该观测被解释为大量氢原子正从该行星上往外逃逸^[53]. 如果用极紫外来观测, 由于氢原子对该波段的辐射也有吸收, 可能在很宽的波长范围内也会出现类似的强度下降.

行星大气和空间环境中的离子也可能在“凌星”期间被探测到. 对于离宿主恒星很近的行星, 由于公转速度很大, 在其轨道运动的前方可能会形成弓激波, 从而形成一个磁层. 在该激波区域附近或从激波到行星表面的区域中, 被压缩的电离气体可能对恒星的辐射产生选择吸收. 哈勃望远镜发现, 在一颗系外行星的“凌星”过程中, 近紫外的Mg II谱线强度下降的时间早于光学波段强度下降的时刻, 这一观测被解释为激波区域的Mg⁺对恒星Mg II辐射的吸收效应, 根据时间差可以估算出激波与行星的距离(大致反映了磁层的大小)^[54]. 考虑到Mg⁺和He⁺相差不大的离化温度, 激波区域可能也存在He⁺离子, 因此极紫外波段的He II 304 Å谱线可能有类似的诊断价值.

哈勃望远镜还发现, 在一颗海王星大小的系外行星“凌星”过程中, 远紫外的C II 1334 Å谱线出现了蓝翼减弱的现象^[55]. 该观测被解释为从该行星上往外逃逸的C⁺离子对恒星C II 1334 Å辐射的吸收. 光谱观测显示逃逸速度为每秒数十公里. 结合模型, 还能给出大气逃逸导致的质量损失率. 同样, C⁺和He⁺存在的温

度条件也类似, 因此逃逸的大气中可能也存在He⁺, 这样极紫外波段的He II 304 Å谱线也有望能做同样的诊断.

2.7 开展“空间天气宜居带”研究

在最近公布的美国2020年代天文学发展规划中, 理解恒星及其周围宜居世界的关系被列为三大科学主题和优先发展领域(Priority Area)之一^[56]. 其中, 主要源自星冕的空间天气与行星宜居性的关系是一个关键环节. 我国制定的《天文学科及前沿领域发展战略研究(2021–2035)》也明确指出, 未来我们需要研究恒星活动与系外行星宜居性的关系, 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. 因此, 可以预期, “空间天气宜居带”这一新兴研究领域将很快在全球范围内迎来迅猛发展.

通过对宿主恒星开展长期的极紫外和X射线观测, 对星冕性质及其活动规律将会有个全面的了解, 并有望获得系外行星大气逃逸和电离层、磁层的关键信息. 这些观测将为“空间天气宜居带”的理论建模提供关键的输入和约束. 在此基础上, 系外空间天气和“空间天气宜居带”的研究将能够取得实质性的突破. 相关研究至少可以包括如下4个方面.

(1) 基于星冕大尺度结构、星冕等离子体和磁场的诊断结果, 发展不同类型宿主恒星(尤其是F, G, K, M型主序恒星)的星风模型, 并探讨星风与不同类型系外行星相关作用的结果, 如行星磁层的结构和大气的非热逃逸.

(2) 基于星冕磁场的诊断和恒星CME的大量观测结果, 发展不同类型恒星所产生的CME在星球层传播并与行星磁层/大气相互作用的三维数值模型, 定量评估具有不同物理性质和发生频次的恒星CME对系外行星大气长期演化和剥蚀的影响.

(3) 基于对恒星极紫外/X射线辐射强度的测量和对恒星耀斑的多波段观测, 结合系外行星大气模型, 定量研究恒星的极紫外/X射线辐射对系外行星大气逃逸的影响.

(4) 基于恒星CME和耀斑的观测结果, 探索不同类型宿主恒星产生高能粒子的规律, 研究高能粒子在改变行星大气成分和影响行星气候等方面的作用, 评估其对生命起源和存续所产生的有利和不利的影响.

由于存在相似的物理过程和效应, 系外空间天气和“空间天气宜居带”的研究将可以借鉴日地空间天气研究的很多方法和思路. 一些重要的模型, 如太阳风/日冕物质抛射与地球磁层相互作用的模型、地球大气对耀斑响应的模型等, 将能在系外恒星-行星系统的研究中得到进一步的发展和應用(图8).

由于目前已知的系外行星很多都位于M型恒星的周围, 而M型恒星传统意义上的宜居带通常离恒星较近, 与太阳系中宜居世界的情形有所不同. 因此, 研究M型恒星系统的空间天气及其对行星宜居性的影响可能是未来的一个重点方向. 由于M型恒星的对流层较深, 发电机效率高, 因此星冕活动通常比较剧烈^[33], 这是否意味着其对行星宜居性的负面影响比正面影响要大? 目前还不得而知. 有学者提出, 也许F, G, K型恒星周围更容易形成宜居世界^[4]. 然而所有这些都尚无定论, 因为星冕活动影响行星宜居性的过程非常复杂, 需要在对星冕进行充分观测的前提下, 来开展进一步的深入研究.

3 初步探测方案

如前所述, 为了探索星冕性质及其活动规律, 研究

系外空间天气及其对系外行星宜居性的影响, 急需在极紫外和软X射线波段对一些F, G, K, M型主序恒星开展长期、连续的监测. 重点探测目标将是邻近太阳系的宿主恒星, 包括但不限于一部分已知潜在宜居行星的宿主恒星. 在已发现的5000多颗系外行星中, 潜在的宜居行星仅有60颗左右, 其中约25颗在66光年(或20 pc)的距离以内, 15颗在26光年(或8 pc)的距离以内, 8颗在13光年(或4 pc)的距离以内, 最近的一颗距离为4.2光年(或1.3 pc)^[57]. 其宿主恒星均为晚型的主序恒星.

需要指出的是, 过去的X射线和极紫外天文望远镜如CHANDRA, XMM-Newton, EUVE等并不是专门观测晚型主序恒星的, 其仪器设计和观测模式也没有针对宿主恒星进行优化. 因此, 它们只用各自很少的观测时间来对晚型主序恒星进行监测, 并且对同一颗恒星的连续观测很少超过10 h. 未来, 需要实施专门针对星冕的极紫外和X射线探测计划, 选择少数恒星作为重点探测目标, 保证对每个重点探测目标都有连续数天到数月的不间断光谱观测. 与此同时, 还可以通过宽波段测光的方式对这些恒星的极紫外和软X射线辐射进行更高时间分辨率的连续监测. 唯有如此, 才能较好地将对日冕的研究思路和方法全面拓展到星冕研究中, 在星冕大尺度结构、恒星CME和耀斑的探测等方

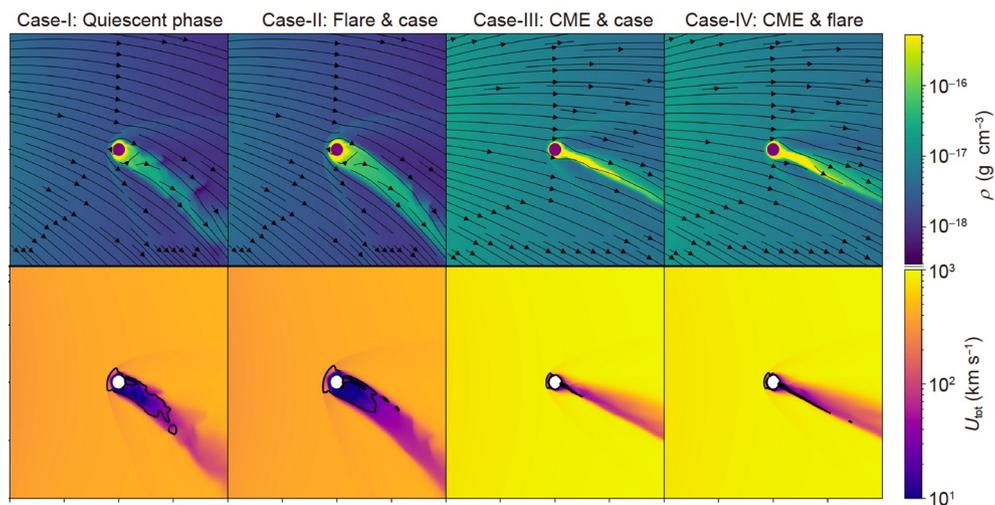


图8 (网络版彩图)模拟恒星不同状态下的行星大气逃逸, 从左到右分别对应宁静星冕(只有星风)、耀斑、CME、耀斑+CME作用下行星大气的物理状态. 上图为密度分布, 下图为速度分布. 模型假设CME的密度和速度分别是星风的4倍和2.4倍. 视场范围为40×40个行星半径. 图改自文献[8]

Figure 8 (Color online) Total density and velocity of an exoplanet atmosphere under different coronal conditions of the host star, as calculated from a 3D radiation hydrodynamic model. From left to right: quiescent case (only stellar wind), flare case, CME case, CME & flare case. The CME density (upper) and velocity (lower) are assumed to be 4 times and 2.4 times of the stellar wind parameters, respectively. The field of view is 40×40 planetary radii for each panel. Adapted from ref. [8].

面取得实质性的突破.

3.1 极紫外探测

恒星的极紫外辐射是系外行星大气电离和加热最主要的能量来源. 过去仅有的少量天文极紫外探测基本都是在2001年之前开展的, 那时系外行星的相关研究刚刚起步, 2001年1月之前人类仅发现不到50颗系外行星, 并且都在基于液态水定义的宜居带之外, 因此恒星活动对系外行星影响方面的探测需求几乎没有. 而最近20年来系外行星研究突飞猛进, 理解恒星与行星宜居性的关系已经成为当前和未来10年天文学领域最重要的任务之一, 因此通过重开极紫外这一探测窗口来对宿主恒星进行长期、连续的监测已刻不容缓.

过去开展过的极紫外天文探测包括成像(测光)和光谱探测两种方式. 由德国领衔发射的ROSAT卫星上搭载了一台由英国研制的大视场相机WFC^[58], 它采用掠入射光学系统, 于20世纪90年代在60–200 Å的波段开展了极紫外巡天观测, 发现了400多个极紫外源^[59]. 而EUVE卫星是在较宽的极紫外波段对系外天体进行过系统观测的唯一卫星^[60]. EUVE 1992年发射, 2001年结束任务. 它利用三台掠入射测光望远镜在不同的波段开展了巡天观测, 共发现了700多个极紫外源, 绝大多数是热白矮星和晚型恒星^[59]. 此外, EUVE还携带了一台光谱仪, 工作波长范围是60–700 Å, 光谱分辨本领约为200. EUVE只获取了大约15颗晚型主序恒星的光谱^[10], 再加上有效面积较小(约为1 cm²)、信噪比较低, EUVE对这些恒星的观测结果并不理想, 但在星冕等离子体诊断方面仍取得了重要的成果. 此外, CHANDRA的LETGS光谱仪覆盖了2–175 Å的波长范围^[61], 在100–175 Å的极紫外波段, 尽管光谱分辨本领超过了1000, 但有效面积与EUVE相当, 因此其对晚型主序恒星的观测数据质量也不理想.

美国宇航局在2020年资助了一个名为ESCAPE的恒星探测项目开展概念研究. 其主要科学目标是通过探测宿主恒星的极紫外和远紫外辐射(70–1800 Å), 来探索邻近太阳系的宜居带的高能辐射环境^[10]. 该项目的一个重要目标是通过星冕暗化的方式来探测恒星CME. ESCAPE延续EUVE卫星的设计思想, 因70–570 Å波段正入射反射率很低, 采用掠入射系统(图9). 与EUVE卫星单层Wolter-Schwarzschild主镜方案不

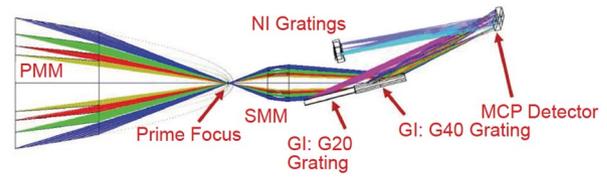


图9 (网络版彩图)美国ESCAPE望远镜的光路图. 图引自文献[10]

Figure 9 (Color online) Optical layout of the ESCAPE telescope. Adapted from ref. [10].

同, ESCAPE计划采用四层、共焦的掠入射抛物面嵌套主镜(PMM), 最外层主镜口径50 cm. 因采用多层嵌套, ESCAPE的有效面积很大, 预计比EUVE提高100倍. 主镜焦点后光线经掠入射多层嵌套椭圆面次镜(SMM), 再经两块掠入射光栅(GI)衍射后得到70–570 Å恒星光谱. 对于600–1800 Å光谱, 因正入射反射率较高, 由掠入射光栅的0级辐射经平面镜和正入射凹面光栅衍射后得到. ESCAPE在极紫外波段设计的光谱分辨本领约为300, 与EUVE相当, 因此难以通过多普勒频移/不对称性的方式来测量恒星CME速度, 也不能利用磁诱导跃迁的方法来测量星冕磁场.

为了实现前述科学目标, 亟需发射有效面积大(10–100 cm²的量级)、光谱分辨本领高(500–2000的量级)的适合宿主恒星观测的极紫外望远镜. 由于星冕的极紫外辐射主要集中在350 Å以下, 并且星际介质对短波长极紫外辐射的吸收并不显著, 因此极紫外光谱探测大致可选取90–350 Å的波长范围. 该波段存在大量形成温度从几万到两千万度的较强谱线, 非常适合用于星冕等离子体和磁场的诊断以及星冕爆发活动的监测, 并能同时探测恒星色球和过渡区. 优先考虑的两个波段为170–285 Å和90–140 Å. 前者包括很多形成于典型日冕环境中的谱线, 适合对类日恒星的探测; 后者包括一些Fe XVIII–Fe XXIII等高次电离的Fe离子谱线, 适合诊断更活跃恒星的星冕等离子体性质以及各种类型恒星上的耀斑过程.

根据Hinode/EIS观测的太阳宁静区和活动区典型光谱^[62], 我们估算了在类日恒星观测中170–285 Å范围内一些谱线的光子数. 假设活动区占整个恒星正面面积的20%, 光谱仪仪器展宽0.1 Å (在200 Å附近对应光谱分辨本领约为2000), 像元分辨率0.04 Å, 有效面积100 cm², 曝光时间1 h, 则可以估算单次曝光每个像元光子数的平均值(表1). 实际上, 恒星的极紫外谱线辐

表1 基于太阳观测结果预测的恒星极紫外光谱观测单次曝光落到单个波长像素的平均光子数**Table 1** Predicted photons per pixel for some EUV spectral lines in stellar observations, based on solar observations

谱线 (Å)	1.3 pc	4 pc	8 pc	20 pc
Fe X 174	758.6	80.1	20.0	3.2
Fe X 175	73.8	7.8	2.0	0.3
Fe X 184	2110.9	222.9	55.7	8.9
Fe X 257	561.3	59.3	14.8	2.4
Fe VIII 185	167.2	17.6	4.4	0.7
Fe IX 171	1334.9	141.0	35.2	5.6
Fe XI 188	826.6	87.2	10.9	1.7
Fe XII 195	506.2	53.5	26.8	4.2
Fe XII 196	102.9	10.8	2.7	0.4
Fe XIII 202	540.9	57.1	14.3	2.3
Fe XIV 264	475.7	50.2	12.6	2.0
Fe XIV 274	443.7	46.8	11.7	1.9
Fe XV 284	1767.8	186.7	46.7	7.5
Fe XVI 262	83.4	8.8	2.2	0.4
Si X 258	294.6	31.1	7.8	1.2
Si X 261	111.2	11.8	2.9	0.4
S X 264	65.5	6.9	1.7	0.3
He II 256	46.6	4.9	1.2	0.2

射强度与其半径、丰度、星冕密度和温度、磁场与活跃度等都有关系。当前的太阳属于不太活跃的恒星, 大量恒星比太阳更活跃, 而一般认为这些活跃恒星的极紫外辐射比当前太阳的更强, 因此观测这些恒星时, 我们可能接收到更多的光子, 甚至比表1所列光子数要高1–2个数量级^[63,64]。当耀斑发生时, 不同谱线的预期光子数也会不同程度地增加(如文献[39])。此外, 前述科学目标中多数只需一些强线观测即可实现, 如用 Fe X 184 Å来探测8 pc以内类日恒星的CME, 光谱分辨本领和有效面积分别在1000和10 cm²左右便能满足需求。少数科学目标如星冕磁场测量对光谱分辨率和信噪比的要求较高。由于磁场等星冕物理参数的诊断通常无需太高的时间分辨率, 因此我们可以通过长曝光、多帧叠加等方式来提高信噪比, 从而实现既定的科学目标。另外, 在未来的一些极紫外探测任务中, 如果星冕磁场测量不是优先科学目标, 则一方面可以把光谱分辨本领降到500–1000, 从而进一步增加单个像元的光子数, 另一方面Fe X 175 Å等较弱谱线也就不需要了。

表2 基于AB Dor观测结果预测的恒星极紫外光谱观测单次曝光落到单个波长像素的平均光子数**Table 2** Predicted photons per pixel for some EUV spectral lines in stellar observations, based on AB Dor observations

谱线 (Å)	1.3 pc	4 pc	8 pc	20 pc
Fe XVIII 94	2268.0	239.6	59.9	9.6
Fe XIX 108	1919.1	202.7	50.7	8.1
Fe XXII/XXI 117	2093.6	221.1	55.3	8.8
Fe XX 122	1570.2	165.9	41.5	6.6
Fe XXI 129	2442.5	258.0	64.5	10.3
Fe XX/XXIII 133	6629.7	700.3	175.1	28.0
Fe XXII 136	1744.6	184.3	46.1	7.4

根据EUVE卫星对活跃恒星AB Dor (距离15.8 pc) 的观测结果^[65], 我们预测了在不同距离处的活跃恒星发射的90–140 Å范围内一些谱线的光子数(表2)。这里所用的仪器参数同上。这些谱线的形成温度普遍较高, 对于像当前的太阳一样不太活跃的恒星, 在非耀斑期间这些谱线可能很弱或者没有信号。对于年轻的类日恒星, 因为比较活跃, 并且体积更大, 预期能接收到的光子数更多。

结合上述分析, 恒星极紫外光谱探测的关键指标需求可以初步总结为: (1) 观测视场: $\leq 0.5^\circ$, 以区别于大视场巡天观测; (2) 空间分辨率: $\leq 1'$, 高于WFC和EUVE的; (3) 观测波段: 90–350 Å, 优先考虑170–285 Å和90–140 Å; (4) 光谱分辨本领: 约500–2000; (5) 时间分辨率: 约1 h; (6) 单目标观测时长: 至少数天到数月; (7) 有效面积: 约10–100 cm²。为了满足这些需求, 可以采用类似ESCAPE的多层嵌套掠入射系统, 也可以采用正入射多层膜系统。本文重点讨论后者。过去30多年, 极紫外波段多层膜技术迅猛发展, 80–400 Å正入射多层膜反射镜的反射率比单层膜的提高了1–2个量级^[66,67], 使得大有效面积、高空间和光谱分辨率、小体积的正入射系统有望用在恒星极紫外探测中。

图10给出了两种可能的正入射光谱探测方案。方案一采用正入射两反系统, 由多层膜主镜、狭缝、凹面光栅、薄膜滤光片和探测器组成。因恒星观测中光子数较少, 因此需要采用单光子计数探测器, 此时探测器附加噪声可以忽略, 信噪比主要受限于光子噪声。恒星发出的极紫外辐射经主镜汇聚在主焦点, 主焦点处放置狭缝以有效抑制其他视场背景辐射, 同时通过调节狭缝宽度获得需要的光谱分辨本领; 经狭缝后的

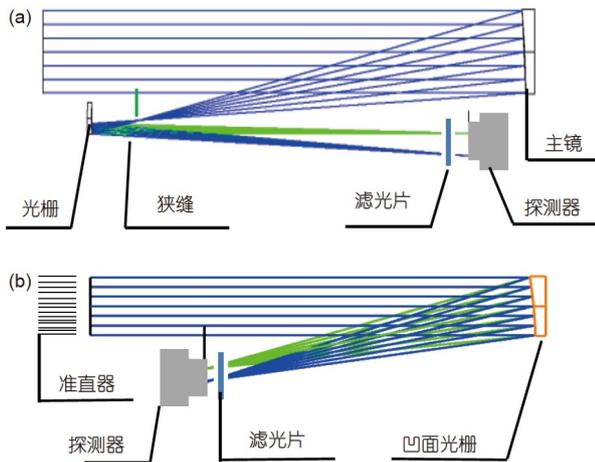


图10 (网络版彩图)大有效面积、高光谱分辨率的恒星极紫外光谱探测可采用的两种方案。(a) 正入射两反系统; (b) 正入射单反系统

Figure 10 (Color online) Two possible schemes for stellar EUV spectrometers with high effective area and spectral resolution. (a) Normal-incidence two-mirror system; (b) normal-incidence single-mirror system.

恒星辐射由多层膜凹面光栅色散到探测器上, 探测器前滤光片用于抑制短波高次谐波以及恒星长波辐射. 方案二为正入射单反系统, 由准直器、凹面光栅、滤光片和探测器组成. 恒星发出的极紫外辐射经准直器选择出较小的观测视场, 多层膜凹面光栅(无缝沃茨沃尔系统)选择出高光谱分辨率的目标辐射, 最终由单光子计数探测器接收. 以方案二为例, 假设多层膜反射率为0.5 (SDO/AIA望远镜的多层膜在131和171 Å反射率高于0.5^[67]), 薄膜滤光片透过率为0.6, 闪耀光栅衍射效率为0.8, 探测器量子效率为0.5, 采用35 cm凹面光栅, 则整个系统的有效面积可达115 cm²左右, 满足科学上的需求.

因单层掠入射系统集成面积有限, ESCAPE采用多层嵌套方式增加有效面积, 但多层嵌套有效面积仍远小于望远镜的几何面积. 上述正入射方案可以充分利用望远镜的几何面积, 与此同时, 通过多层膜技术提高反射镜反射率, 进而获得大的有效面积. 类似的“正入射+多层膜”方案曾在英国和美国联合实施的探空火箭项目J-PEX (图10(b), 方案二)上得到了成功的验证^[68]. 因多层膜带宽较窄(10–50 Å), 如果要覆盖170–285 Å和90–140 Å目标波段, 可以同时采用多台类似J-PEX的望远镜, 每个望远镜用来观测不同波段的光谱. 欧洲学者建议的SAGE和SIRIUS卫星概念即计

划采用这种方案^[69,70], 但遗憾的是这两个项目都没能成功立项. 需要指出的是, 近20年国外发射的80–400 Å极紫外太阳成像和光谱探测设备全部采用正入射系统, 相关技术已相当成熟. 国内在多层膜反射镜方面也有近20年的技术储备, 并成功应用在2021年发射的风云三号E星的X射线-极紫外成像仪上^[71]. 另外, 我国嫦娥三号卫星搭载了对地观测的极紫外成像仪, 该设备成功应用了具备单光子探测能力的位敏阳极探测器^[72]. 而对于光谱观测所需的多层膜凹面光栅, 国内相关基础则较弱, 未来需进一步加强研究.

而极紫外成像(测光)大致可选择如下几个波段: (1) 295–315 Å, 主要包括较强的He II 304 Å, 可探测恒星的色球和过渡区; (2) 260–290 Å, 含多条Fe XIV-Fe XVI离子的谱线, 如Fe XV 284 Å, 可诊断星冕中温度在2.5 MK左右的结构; (3) 165–200 Å, 含多条Fe IX-Fe XII离子的谱线, 如Fe IX 171 Å, 可诊断星冕中温度在1 MK左右的结构; (4) 90–130 Å, 含多条Fe XVIII-Fe XXII离子的谱线, 如Fe XVIII 94 Å和Fe XXI 129 Å分别可诊断星冕中温度约6和10 MK的结构. 相比光谱观测, 测光观测因带宽更宽, 且省去了光栅, 故在相同曝光时间内单个像元能接收到的光子数更多, 因此可以大幅缩减曝光时间到5 min量级甚至更短, 有利于探测星冕中快速变化的物理过程. 预期极紫外测光将在恒星耀斑和恒星CME (星冕暗化)的探测方面取得重要突破. 测光探测也可采用正入射方案实现(两反或单反系统), 美国学者最近建议的极紫外测光小卫星探测计划NExTUP即采用这种方案^[73], 其计划采用的波段与我们建议的有部分重叠, 此外其带宽大于我们建议的10 Å左右. 相比EUVIE采用的掠入射系统, 这种方案体积小, 需要卫星资源少, 技术较为成熟, 成本也相对较低, 也可以通过立方星或搭载的方式实现.

需要说明的是, 载荷设计方案和仪器指标后续需要根据可用的国内外探测器动态范围和量子效率、滤光片透过率、多层膜反射率、光栅尺寸和衍射效率等能达到的相关参数来进行优化. 此外, 不同距离处不同谱线预期光子数的变化范围较大, 在尽可能选择大动态范围探测器的同时, 也需要通过调整曝光时间或基于多帧不同曝光时间图像合成高动态范围图像等手段来解决. 我们已经初步选出约130颗20 pc距离内的宿主恒星作为候选观测目标. 这些恒星要么是已知的极紫外或X射线源, 要么周围有岩石行星, 并且除了少数

几颗外都是单星. 综合考虑上述因素、科学目标的优先级、恒星光谱型和活跃度的分布等, 将最终选出数十颗重点观测的目标恒星.

另外, 也注意到, 极紫外天文探测不仅对晚型恒星-系外行星系统的研究至关重要, 同时也对理解白矮星、中子星、超新星遗迹、星系团等天体中的关键物理过程有重要价值^[59]. 因此, 在过去20多年极紫外探测技术取得革命性进展的基础上, 重开极紫外这一重要的系外天文观测窗口已迫在眉睫.

3.2 X射线探测

相比于极紫外探测, 已有的恒星X射线探测则要多得多. X射线难以用来测量星冕磁场, 也不太适合探测温度与日冕温度类似的星冕物质抛射. 但与90–140 Å的极紫外波段类似, 软X射线波段仍可以用来探测恒星耀斑和温度比日冕温度高数倍以上的星冕物质抛射. 然而正如前文所述, 已有的X射线望远镜仅有非常少的时间是用来观测晚型主序恒星的, 并且其探测灵敏度和数据信噪比都不太满足研究星冕活动的需求. 因此, 未来需要建造为宿主恒量身定做的软X射线望远镜, 提高仪器的灵敏度和信噪比, 对选定目标开展长期、连续的监测, 而不是以巡天为主.

X射线成像和光谱探测可以参考CHANDRA和XMM-Newton的设计方案, 成像观测由掠入射多层嵌套主镜、滤光片和探测器组成, 将光栅切入多层嵌套主镜与探测器之间用于开展光谱观测. 由于X射线基本不受星际介质吸收的影响, 因此在同一方向上的X射线源可能比极紫外源更多、更密集. 这导致X射线探测的空间分辨率需求比极紫外的高. 参考CHANDRA和XMM-Newton, 空间分辨率可定为1"–15"的量级^[74,75]. 我国的天文X射线探测已经开启^[76], 近年来也涌现出一些新的X射线探测方案, 比如我国爱因斯坦探针(EP)卫星采用龙虾眼微孔光学技术, 可以实现超大视场的X射线成像观测^[77]. 我国增强型X射线时变与偏振探测(eXTP)空间天文台计划采用9台多层嵌套望远镜(单台直径51 cm), 在6.4 Å有效集光面积高达7400 cm²^[78]. 下一代X射线天文台Lynx携带的X射线光栅光谱仪, 通过采用更大口径(直径3 m)、更多层嵌套的单台掠入射主镜增加集光面积, 主镜后切入多层嵌套掠入射反射光栅(锥形衍射)在6.4–64 Å波段内集光面积高达4000 cm², 光谱分辨本领高达5000^[79].

4 总结

随着对宜居行星和地外生命的探索越来越深入, 人们逐渐意识到, 宿主恒星(主要是F, G, K, M型主序恒星)的磁活动会通过空间天气的形式对系外行星的宜居性产生重要影响. 具体来讲, 宿主恒星的星冕持续往外发射星风, 并间歇性地产生恒星耀斑和星冕物质抛射等爆发性现象, 在此过程中还会产生高能的带电粒子, 这些电磁和粒子辐射可以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生命的起源与存续. 相关研究也被称为“空间天气宜居带”研究, 以区别于按照液态水是否存在所定义的传统意义上的宜居带.

由于缺乏星冕及其活动的有效观测数据, 对太阳系外空间天气的了解严重不足. 因此, 当前“空间天气宜居带”的研究方式主要是模型计算, 这通常需要将星冕、星风和爆发性活动的相关参数作为模型的输入. 由于对这些参数的观测极其不充分, 导致模型的结果存在极大的不确定性.

为了全面探索星冕活动规律, 理解系外空间天气及其对行星宜居性的影响, 亟需建造专门用来观测宿主恒星的极紫外和软X射线望远镜, 在1–350 Å的波段对邻近太阳系的少数宿主恒星开展长期、连续的高分辨率光谱和测光观测. 需优先考虑的波段是170–285 Å和90–140 Å, 除了可以采用多层嵌套掠入射光学系统外, 也可以采用正入射光学系统、多层膜光栅和单光子计数探测器, 来同时实现高灵敏度和高分辨率的恒星极紫外探测. 而在软X射线波段, 则可以采用大口径的多层嵌套望远镜或多台中等口径多层嵌套望远镜, 同时采用更高衍射效率的光栅, 提高观测数据的信噪比和光谱分辨率.

这些观测将开创星冕研究的新时代. 通过对恒星的极紫外和软X射线辐射进行长期、系统的监测, 将可以把日冕的研究方法和思路全面推广到星冕, 从而有望首次探测到星冕物质抛射、冕洞、活动区冕环系统等的确切证据, 实现星冕磁场的常规测量, 并极大地丰富对恒星耀斑和星冕等离子体性质的认识.

利用这些设备, 也将首次开展常规的极紫外/软X射线“凌星”观测. 通过观测系外行星“凌星”过程中恒星辐射强度和光谱的变化, 有望估算出行星大气逃逸的速度和质量损失率、电离层的高度和磁层的大小等关键信息.

基于这些观测, 也将开辟系外空间天气研究的新领域. 在充分理解星冕性质及其活动规律的基础上, 将能把日地空间天气的研究思路和方法推广到系外恒

星-行星系统. 同时, 这些观测将为“空间天气宜居带”的理论建模提供关键的输入, 并最终为地外生命的探索做出重要的贡献.

致谢 感谢郭建恒、东苏勃、何玲平、刘继峰、何建森、程鑫、周桂萍、侯义军、宋谦、魏建彦、施建荣、陈果等人的有益讨论.

参考文献

- Huang S S. Occurrence of life in the universe. *Am Scient*, 1959, 47: 397
- Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 1993, 101: 108–128
- Airapetian V S, Glocer A, Khazanov G V, et al. How hospitable are space weather affected habitable zones? The role of ion escape. *Astrophys J*, 2017, 836: L3
- Linsky J. Host Stars and Their Effects on Exoplanet Atmospheres: An Introductory Overview. Heidelberg: Springer Nature, 2019
- Maehara H, Shibayama T, Notsu S, et al. Superflares on solar-type stars. *Nature*, 2012, 485: 478–481
- Airapetian V S, Glocer A, Gronoff G, et al. Prebiotic chemistry and atmospheric warming of early Earth by an active young Sun. *Nat Geosci*, 2016, 9: 452–455
- Dong C, Jin M, Lingam M, et al. Atmospheric escape from the TRAPPIST-1 planets and implications for habitability. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 260–265
- Hazra G, Vidotto A A, Carolan S, et al. The impact of coronal mass ejections and flares on the atmosphere of the hot Jupiter HD189733b. *Mon Not R Astron Soc*, 2022, 509: 5858–5871
- Linsky J L, Fontenla J, France K. The intrinsic extreme ultraviolet fluxes of F5 V to M5 V stars. *Astrophys J*, 2014, 780: 61
- France K, Felming B T, Drake J J, et al. The Extreme-ultraviolet Stellar Characterization for Atmospheric Physics and Evolution (ESCAPE) mission concept. *Proc SPIE*, 2019, 11118: 1111808
- Güdel M, Nazé Y. X-ray spectroscopy of stars. *Astron Astrophys Rev*, 2009, 17: 309–408
- Young P R, Del Zanna G, Mason H E, et al. EUV emission lines and diagnostics observed with Hinode/EIS. *Publ Astron Soc Jpn*, 2007, 59: S857–S864
- Sanz-Forcada J, Brickhouse N S, Dupree A K. The structure of stellar coronae in active binary systems. *Astrophys J Suppl S*, 2003, 145: 147–179
- Brooks D H, Baker D, van Driel-Gesztelyi L, et al. A solar cycle correlation of coronal element abundances in Sun-as-a-star observations. *Nat Commun*, 2017, 8: 183
- Vogt S S. A method for unambiguous determination of starspot temperatures and areas—Application to II Pegasi, BY Draconis, and HD 209813. *Astrophys J*, 1981, 250: 327–340
- Toriumi S, Airapetian V S, Hudson H S, et al. Sun-as-a-star spectral irradiance observations of transiting active regions. *Astrophys J*, 2020, 902: 36
- Silva-Valio A, Lanza A F, Alonso R, et al. Properties of starspots on CoRoT-2. *Astron Astrophys*, 2010, 510: A25
- Fleishman G D, Gary D E, Chen B, et al. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare. *Science*, 2020, 367: 278–280
- Yang Z H, Tian H, Tomczyk S, et al. Mapping the magnetic field in the solar corona through magnetoseismology. *Sci China Technol Sci*, 2020, 63: 2357–2368
- Yang Z, Bethge C, Tian H, et al. Global maps of the magnetic field in the solar corona. *Science*, 2020, 369: 694–697
- Landi E, Hutton R, Brage T, et al. Hinode/EIS measurements of active-region magnetic fields. *Astrophys J*, 2020, 904: 87
- Li W, 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+} . *Astrophys J*, 2015, 807: 69
- Li W, Yang Y, Tu B, 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. *Astrophys J*, 2016, 826: 219
- 24 Chen Y, Li W, Tian H, et al. Forward modeling of solar coronal magnetic-field measurements based on a magnetic-field-induced transition in Fe X. *Astrophys J*, 2021, 920: 116
- 25 Chen Y, Liu X, Tian H, et al. Measurements of the magnetic field strengths at the bases of stellar coronae using the magnetic-field-induced transition theory. *Astrophys J Lett*, 2021, 918: L13
- 26 He H, Wang H, Zhang M, et al. Activity analyses for solar-type stars observed with *Kepler*. II. Magnetic feature versus flare activity. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 236: 7
- 27 Song Y, Tian H. Investigation of white-light emission in circular-ribbon flares. *Astrophys J*, 2018, 867: 159
- 28 Ding M D, Fang C, Gan W Q, et al. Optical spectra and semi-empirical model of a white-light flare. *Astrophys J*, 1994, 429: 890
- 29 Su Y, Veronig A M, Holman G D, et al. Imaging coronal magnetic-field reconnection in a solar flare. *Nat Phys*, 2013, 9: 489–493
- 30 Samanta T, Tian H, Chen B, et al. Plasma heating induced by tadpole-like downflows in the flaring solar corona. *Innovation*, 2021, 2: 100083
- 31 Cheng Z, Wang Y, Liu R, et al. Plasma motion inside flaring regions revealed by doppler shift information from *SDO/EVE* observations. *Astrophys J*, 2019, 875: 93
- 32 Woods T N, Hock R, Eparvier F, et al. New solar extreme-ultraviolet irradiance observations during flares. *Astrophys J*, 2011, 739: 59
- 33 Khodachenko M L, Sasunov Y, Arkhypov O V, et al. Stellar CME activity and its possible influence on exoplanets' environments: Importance of magnetospheric protection. *Proc IAU*, 2013, 8: 335–346
- 34 Yashiro S, Gopalswamy N. Statistical relationship between solar flares and coronal mass ejections. *Proc IAU*, 2008, 4: 233–243
- 35 Alvarado-Gómez J D, Drake J J, Cohen O, et al. Suppression of coronal mass ejections in active stars by an overlying large-scale magnetic field: A numerical study. *Astrophys J*, 2018, 862: 93
- 36 Moschou S P, Drake J J, Cohen O, et al. The stellar CME-flare relation: What do historic observations reveal? *Astrophys J*, 2019, 877: 105
- 37 Gosling J T. The solar flare myth. *J Geophys Res*, 1993, 98: 18937–18949
- 38 Xing C, Cheng X, Ding M D. Evolution of the toroidal flux of CME flux ropes during eruption. *Innovation*, 2020, 1: 100059
- 39 Mason J P, Woods T N, Caspi A, et al. Mechanisms and observations of coronal dimming for the 2010 August 7 event. *Astrophys J*, 2014, 789: 61
- 40 Tian H, McIntosh S W, Xia L, et al. What can we learn about solar coronal mass ejections, coronal dimmings, and extreme-ultraviolet jets through spectroscopic observations? *Astrophys J*, 2012, 748: 106
- 41 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? *Sol Phys*, 2016, 291: 1761–1782
- 42 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. *Astrophys J*, 2016, 830: 20
- 43 Jin M, Cheung M C M, DeRosa M L, et al. Coronal dimming as a proxy for stellar coronal mass ejections. *Proc IAU*, 2019, 15: 426–432
- 44 Veronig A M, Odert P, Leitzinger M, et al. Indications of stellar coronal mass ejections through coronal dimmings. *Nat Astron*, 2021, 5: 697–706
- 45 Yang Z H, Tian H, Bai X, et al. Can we detect coronal mass ejections through asymmetries of Sun-as-a-star extreme-ultraviolet spectral line profiles? *Astrophys J*, 2022, 260: 36
- 46 Chamberlin P C. Measuring solar doppler velocities in the He ii 30.38 nm emission using the EUV variability experiment (EVE). *Sol Phys*, 2016, 291: 1665–1679
- 47 Brown S A, Fletcher L, Labrosse N. Doppler speeds of the hydrogen Lyman lines in solar flares from EVE. *Astron Astrophys*, 2016, 596: A51
- 48 Xu Y, Tian H, Hou Z, et al. Sun-as-a-star spectroscopic observations of the line-of-sight velocity of a solar eruption on 2021 October 28. *Astrophys J*, 2022, 931: 76
- 49 Argiroffi C, Reale F, Drake J J, et al. A stellar flare-coronal mass ejection event revealed by X-ray plasma motions. *Nat Astron*, 2019, 3: 742–748
- 50 Reale F, Gambino A F, Micela G, et al. Using the transit of Venus to probe the upper planetary atmosphere. *Nat Commun*, 2015, 6: 7563
- 51 Poppenhaeger K, Schmitt J H M M, Wolk S J. Transit observations of the Hot Jupiter HD 189733b at X-ray wavelengths. *Astrophys J*, 2013, 773: 62
- 52 Llama J, Shkolnik E L. High energy exoplanet transits. *Proc IAU*, 2016, 12: 356–362
- 53 Ehrenreich D, Bourrier V, Wheatley P J, et al. A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b. *Nature*, 2015, 522: 459–461
- 54 Vidotto A A, Jardine M, Helling C. EARLY UV ingress in WASP-12b: Measuring planetary magnetic fields. *Astrophys J*, 2010, 722: L168–L172

- 55 Ben-Jaffel L, Ballester G E, Muñoz A G, et al. Signatures of strong magnetization and a metal-poor atmosphere for a Neptune-sized exoplanet. *Nat Astron*, 2022, 6: 141–153
- 56 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s. Washington DC: The National Academies Press, 2022
- 57 The Habitable Exoplanets Catalog. Planetary Habitability Laboratory. University of Puerto Rico at Arecibo. 2021
- 58 Sims M R, Barstow M A, Pye J P, et al. XUV wide field camera for ROSAT. *Opt Eng*, 1990, 29: 649–657
- 59 Barstow M A, Casewell S L, Holberg J B, et al. The status and future of EUV astronomy. *Adv Space Res*, 2014, 53: 1003–1013
- 60 Bowyer S, Malina R F. The extreme ultraviolet explorer mission. *Adv Space Res*, 1991, 11: 205–215
- 61 Wood B E, Laming J M, Warren H P, et al. A *Chandra*/LETGS survey of main-sequence stars. *Astrophys J*, 2018, 862: 66
- 62 Brown C M, Feldman U, Seely J F, et al. Wavelengths and intensities of spectral lines in the 171–211 and 245–291 Å ranges from five solar regions recorded by the extreme-ultraviolet imaging spectrometer (EIS) on *Hinode*. *Astrophys J Suppl S*, 2008, 176: 511–535
- 63 Ribas I, Guinan E F, Gudel M, et al. Evolution of the solar activity over time and effects on planetary atmospheres. I. High-energy irradiances (1–1700 Å). *Astrophys J*, 2005, 622: 680–694
- 64 Chadney J M, Galand M, Unruh Y C, et al. XUV-driven mass loss from extrasolar giant planets orbiting active stars. *Icarus*, 2015, 250: 357–367
- 65 Craig N, Abbott M, Finley D, et al. The *extreme ultraviolet explorer* stellar spectral atlas. *Astrophys J Suppl S*, 1997, 113: 131–193
- 66 Seely J F, Freund A K, Macrander A T, et al. Review of multilayer normal-incidence gratings operating at 9- to 40-nm wavelengths. International Symposium on Optical Science Technology. Seattle: SPIE, 2002. 224
- 67 Fineschi S, Fennelly J, Windt D L. EUV multilayer coatings for solar imaging and spectroscopy. Solar Physics & Space Weather Instrumentation VI. International Society for Optics and Photonics. San Diego: SPIE, 2015. 96040P
- 68 Barstow M A, Blades J C, Siegmund O, et al. The Joint Astrophysical Plasmadynamic EXperiment (J-PEX): A high-resolution rocket spectrometer. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Waikoloa: SPIE, 2003. 459810
- 69 Barstow M A, Kowalski M P, Cruddace R G, et al. Stellar and galactic environment survey (SAGE). *Exp Astron*, 2009, 23: 169–191
- 70 Barstow M A, Kowalski M P, Eves S, et al. Observatory-class science with a low-cost EUV astronomy mission. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Amsterdam: SPIE, 2012. 844303
- 71 Wang H, Wang X, Chen B, et al. EUV multilayer mirrors in solar X-EUV Imager. *Optik*, 2020, 204: 164213
- 72 Ni Q, Song K, Liu S, et al. Curved focal plane extreme ultraviolet detector array for a EUV camera on Chang’e lander. *Opt Express*, 2015, 23: 30755
- 73 Drake J, Cheimets P, Carraffo C, et al. NExtUP: the Normal-incidence extreme ultraviolet photometer. UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXII. Proc SPIE, 2021, 11821: 1182108
- 74 Weisskopf M C, Tananbaum H D, Van Speybroeck L P, et al. Chandra X-Ray Observatory (CXO): Overview. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Munich: SPIE, 2000, 4012: 391545
- 75 Aschenbach B, Briel U, Haberl F, et al. Imaging Performance of the XMM-Newton X-ray telescopes. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Munich: SPIE, 2000, 4012: 391615
- 76 Zhang S-N, Li T P, Lu F J, et al. Overview to the hard X-ray modulation telescope (*Insight*-HXMT) satellite. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 249502
- 77 Yuan W, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein Probe: Exploring the ever-changing X-ray Universe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039502 [袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039502]
- 78 Zhang S N, Santangelo A, Feroci M, et al. The enhanced X-ray timing and polarimetry mission—eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029502
- 79 McEntaffer R L. Reflection grating concept for the Lynx X-Ray Grating Spectrograph. *J Astron Telesc Instrum Syst*, 2019, 5: 1

Scientific objectives and preliminary plans for EUV and X-ray observations of late-type stars

TIAN Hui^{1*}, BAI XianYong^{2*}, DENG YuanYong², LI WenXian², CHEN YaJie¹,
YANG ZiHao¹, XU Yu¹, CHEN HeChao¹ & LIU XianYu¹

¹ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

² National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Searching for extraterrestrial life is one of the most important targets for exploration of the universe. To achieve this goal, it is of critical importance to understand the connection between host stars (mainly cool dwarf stars) and habitable exoplanets. In recent years, more and more researchers have realized that the space weather phenomenon (i.e., solar activity and its impact on the Earth space environment) should also exist in star-planet systems beyond the solar system. As the main sources of space weather, various types of magnetic activity in host stars' coronae can produce strong electromagnetic and particle radiation that could damage biological tissues, change the chemical composition and lead to the erosion of the planetary atmospheres, thus affecting the origin and survival of life. However, our understanding of the stellar coronae is very limited, which greatly hampers our understanding of the impact of space weather on habitability. Thus, we suggest effectively probing the physical parameters of the coronae and monitoring various types of coronal activity of host stars as soon as possible. To achieve this, we need to build next-generation dedicated EUV and X-ray (1–350 Å, most importantly 170–285 Å and 90–140 Å) telescopes to perform long-term and continuous spectroscopic and photometric observations of nearby host stars (including but not limited to the host stars of some potentially habitable exoplanets). We describe detailed scientific objectives for such observations, propose the required technical specifications to achieve these scientific goals, and provide preliminary designs of the optical systems. With these telescopes, we could unambiguously detect stellar coronal mass ejections, probe large-scale coronal structures such as coronal holes and active region loop systems, routinely measure the coronal magnetic field, and largely enrich our understanding of stellar flares and coronal plasma properties. By monitoring changes in the stellar emission during exoplanet transits, we may also infer critical information about exoplanetary atmospheres, ionospheres and magnetospheres. Based on these observations, we can substantially improve our understanding of exoplanetary space weather and accurately evaluate its role in forming a habitable world.

late-type star, extreme ultraviolet radiation, X-ray radiation, exoplanet, exoplanetary space weather

PACS: 95.55.Fw, 96.12.Hg, 97.10.-q, 97.10.Ex, 97.30.Nr

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0023](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0023)