月基软X射线成像仪——对地球磁层的全景观测

郭亦鸿¹, 王赤^{1,2*}, 韦飞¹, 孙天然¹, 于锡峥¹, 彭松武¹,
Graziella BRANDUARDI-RAYMONT³, Steven SEMBAY⁴

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. Mullard Space Science Laboratory, University College London, Surrey RH5 6NT, UK;

4. Department of Physics and Astronomy, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK

* 通讯作者, E-mail: cw@nssc.ac.cn

收稿日期: 2020-12-25; 收修改稿日期: 2021-04-26; 接受日期: 2021-05-14; 网络版发表日期: 2021-06-11

国家自然科学基金项目(批准号: 41731070、41974211、41774173、42074202)、中国科学院前沿科学重点研究项目(编号: QYZDJ-SSW-JSC028)和中国科学院空间科学战略先导计划项目(编号: XDA15052500、XDA15350201)资助

摘要 文章提出以月球科研站为平台, 配置一台具有宽视场和高分辨观测能力的软X射线成像仪——月基软X射线成像仪(LSXI), 以实现地球磁层的全景成像。LSXI是一种宽视场的软X射线望远镜, 可以对太阳风电荷交换过程(SWCX)产生的软X射线进行动态成像, 通过软X射线图像获取地球磁层边界与结构特性。地球磁层全景观测对于理解太阳风-磁层相互作用的物理过程至关重要。LSXI将首次通过对弓激波、磁鞘区、磁层顶和极尖区等区域的同时连续观测, 监测太阳风作用下的空间天气演化过程。

关键词 软X射线成像仪, 月球, 磁层, 微孔光学

1 引言

太阳活动是影响地球空间环境(空间天气)的重要驱动因素。空间天气变化可能严重干扰地球通信、导航和航天技术系统的正常运行, 并对社会与经济活动产生广泛而深刻的影响。太阳风挤压或拉伸地球磁层的外边界, 与近地空间环境耦合, 引起地磁扰动和带电粒子的剧烈变化, 危及人类空间活动。从全局视角观测地球磁层可以显著提高空间天气预报的能力(Collier等, 2010)。在过去的半个世纪, 倚靠若干磁层观

测卫星, 我们对地球磁层的结构和物理演化过程有了革命性的认识。目前, 我们对磁层与太阳活动相互作用的了解, 主要来自于这些卫星在不同地点的就地观测和相关理论模型。例如, Cluster和“双星”等卫星任务提供了关于磁层等离子体的重要信息(Credland等, 1997; Liu等, 2005)。然而, 由于探测点数量有限, 很难全面揭示太阳风与地球磁层的相互作用的物理过程, 也难以预测其动力学过程。

近年来, 一种新型软X射线成像技术受到了研究者的关注, 其成像原理受到龙虾眼结构的启发(Bran-

中文引用格式: 郭亦鸿, 王赤, 韦飞, 孙天然, 于锡峥, 彭松武, Branduardi-Raymont G, Sembay S. 2021. 月基软X射线成像仪——对地球磁层的全景观测. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1009–1017, doi: 10.1360/N072020-0415

英文引用格式: Guo Y, Wang C, Wei F, Sun T, Yu X, Peng S, Branduardi-Raymont G, Sembay S. 2021. A Lunar-based Soft X-ray Imager (LSXI) for the Earth's magnetosphere. Science China Earth Sciences, 64(7): 1026–1035, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9792-5>

duardi-Raymont等, 2012; Collier等, 2012; Walsh等, 2016). 这种新型的成像仪是一种具有光谱分辨能力的宽视场软X射线望远镜. 即将发射的SMILE卫星(视场 $16^\circ \times 27^\circ$)和更小的微纳卫星CuPID任务(视场 $5^\circ \times 5^\circ$), 将搭载这种新型载荷. 未来, 这种技术也将成为在各种太阳风条件下研究地球空间环境的有力工具(Wang和Branduardi-Raymont, 2018; Camps, 2019). 但是受到卫星轨道和视场设计的限制, 人们还未能实现对磁层结构的全景成像. 因此, 迫切需要一个位于地球磁层之外、具有全景视场和长期观测能力的新一代X射线成像系统. 月球是放置该观测仪器的理想地点.

中国于2004年启动了探月工程——“中国探月计划”(简称“CLEP”), 计划初步分为绕、落、回三个阶段. 2020年11月24日, 嫦娥五号发射升空, 并于12月17日完成月球采样返回地球, 标志着中国探月计划前三个阶段的胜利完成. 在此之前的2019年1月3日, 嫦娥四号月球探测器成功着陆月球背面, 并传回了世界首张近距离拍摄的月球背面图像(Wu等, 2020). 嫦娥四号是CLEP第四阶段的第一项任务, 开启了人类探月的新篇章. 最终, 中国将探索月球极地地区, 建立月球科学考察站, 支持长时段、较大规模的科学探测、技术试验与月球资源开发利用(Li等, 2019; Zhao和Wang, 2019; Xu等, 2019).

CLEP第四阶段任务其中的一个应用目标是基于月球的对地观测和研究. 在此, 本文提出以月球为平台, 布置一台月基软X射线成像仪(Lunar-based Soft X-ray Imager, LSXI), 对地球磁层进行全景成像观测. 该任务由中国科学院国家空间科学中心发起, 英国伦敦大学学院穆拉德空间科学实验室、英国莱斯特大学以及其他研究机构和大学作为合作方共同参与.

2 科学目标

2.1 太阳风电荷交换过程

太阳风和地球磁场相互作用形成了地球磁层. 磁鞘区和极尖区软X射线发射的物理机制是太阳风电荷交换(Solar wind charge exchange, SWCX)过程(图1), 近年来被认为是太阳系X射线发射的重要来源(Bhardwaj等, 2007). 最初提出SWCX理论是用于解释由ROSAT卫星观测到的Hyakutake彗星X射线辐射(Lisse等, 1996; Cravens, 1997). XMM-Newton和Suzaku也在地球

图1 太阳风电荷交换机制

磁层附近探测到了这种辐射(Snowden等, 2004; Fujimoto等, 2007). 在地球空间环境中, 太阳风中的高价态重离子与地球大气层外的中性原子或分子发生碰撞. 重离子跃迁到激发态得到一个电子(式(1)), 然后衰变到较低的能态辐射软X射线(式(2)).

$$A^{q+} + B \rightarrow A^{(q-1)*} + B^+, \quad (1)$$

$$A^{(q-1)*} \rightarrow A^{(q-1)} + h\nu, \quad (2)$$

其中A是太阳风中的重离子, 例如氧. B是中性原子, 如地球外逸层中的氢. SWCX的光谱特征是与太阳风中存在的离子种类对应的发射线. 太阳风中含有C、O、Mg、Fe和Ne等重元素, 元素的相对丰度取决于太阳的条件(Schwadron和Cravens, 2000). SWCX机制产生的软X射线能量主要集中在0.2~2.5 keV.

在给定视线方向上, SWCX产生的X射线通量I可以通过体积发射率P的线积分来估算(Cravens, 2000):

$$I = \frac{1}{4\pi} \int P dr \\ = \frac{1}{4\pi} \int \alpha n_H n_{sw} \langle g \rangle dr (\text{keV cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}), \quad (3)$$

式中, α 为效率因子(Cravens, 1997), n_H 和 n_{sw} 为地冕氢原子和太阳风质子的数量密度. $\langle g \rangle$ 是由太阳风速度 u_{sw} 和热速度 u_{th} 估算的碰撞速度: $\langle g \rangle = \sqrt{u_{sw}^2 + u_{th}^2}$ (Sun等, 2015). 太阳风等离子体在弓激波后受到压缩, 基本上不能直接穿透磁层顶. 它会在磁层顶形成一个尖锐的边界, 在那里强烈的软X射线光子被发射出来. 太阳风可以直接进入地球的极区, 因此在这个区域X射线辐射率高(Robertson和Cravens, 2003). SWCX的辐射信号中还蕴含着太阳风元素组成的信息. SWCX的发现为磁层成像探测提供了一种新方法, 也为研究太阳风-磁层耦合提供了新途径(Branduardi-Raymont等, 2012). 这些观测将有助于评估空间环境的影响并验证

日地相互作用的全球模型.

2.2 科学目标和问题

太阳风-磁层耦合及其动力学过程是空间天气的基本驱动因素. 要掌握其物理内涵, 就必须理解其全球尺度的响应过程、质量和能量运输过程以及区域间的耦合过程. 然而, 通过单点或多点的就地探测不足以掌握太阳风扰动对全球的影响, 这是了解太阳如何影响和控制等离子体和空间天气的关键.

有待解决的科学问题包括但不限于地球磁层的全景X射线成像, 总结如表1.

3 载荷的设计概念

3.1 成像原理

软X射线波长范围为0.1nm~10nm(对应光子能量124eV~12.4keV). 其只能在掠入射光学系统中发生反射聚焦. 传统的X射线成像方法(如Wolter-I型望远镜)视场在1°左右. 为实现大视场观测, 月基软X射线成像仪采用由Angel(1979)提出的龙虾眼结构的 optics 设计. 成像元件为球面微通道板, 其由数百万个立方体形状的微通道组成, 微通道的超光滑内壁用于X射线反射(图2). 入射的X射线通过两侧垂直的壁面依次反射聚焦, 实现成像功能. 该成像系统理论上视场可以扩展到4π.

当X射线平行光或点源通过微通道板聚焦, 在焦平面上会产生一个十字叉形的聚焦光斑(图3a). 入射的X射线光线可以分为三种: 第一种光线(标记为OO)从相邻的孔壁反射奇数次, 并聚焦在十字叉的中心;

图 2 月基软X射线成像仪光学设计

左图和中图展示了龙虾眼睛的特写结构; 右图为人造微通道板(www.nasa.gov)

第二种光线(标记为OE和EO)具有奇偶反射模式, 最常见的是单壁反射, 聚焦于十字叉臂上; 其他光线, 要么直接通过(即光线标记EE), 要么反射偶数次, 形成成像的背景. 点的颜色表示光线在微通道中受到的反射次数, 如散点图所示(图3b), 反射次数不同的光线被反射到不同的区域, 经过两次反射(用绿色标记)的光线聚焦到十字叉中心. 十字交叉臂是由光线在微通道中一次(用蓝色标记)或三次(用红色标记)反射形成的, 没有反射的光线(用黑色标记)形成背景. 龙虾眼成像系统既能对有限距离的目标成像, 也能对无穷远处的目标成像. 由于结构对称, 平行X射线光束球面微通道板后聚焦于球面半径约1/2处, 焦点与球面中心连线平行于平行X射线光束方向, 因此, 龙虾眼成像系统对于任何方向的成像能力都是相同的. 与传统的掠入射反射光学系统相比, 龙虾眼成像系统视场比Wolter-I型望远镜要大、集光效率比准直器型成像仪要高, 但空间分辨率较Wolter-I型望远镜低.

3.2 载荷设计

LSXI是一个具有大视场的成像仪, 设计的对X射线光子能量探测范围是200eV~2.5keV. LSXI的设计视

表 1 科学目标和问题

科学目标	问题
在整个日侧磁层顶区域揭示太阳风-磁层相互作用的基本模式	(1) 磁层顶磁场重联区域的全球尺度特征是什么?
	(2) 磁层顶磁场重联在整个日侧磁层顶的不同区域(不同经纬度)是如何发展的?
	(3) 稳态和非稳态磁层顶磁场重联分别在何时何地起主导作用?
给出能量、质量或动量由太阳风通过极尖区进入磁层的整个路径	(1) 从高高极尖区到低高极尖区的能量、质量或动量运输过程是怎样的?
	(2) 在与极尖区相互作用后, 磁重联过程如何发展?
	(3) 极尖区/磁层顶不对称性的产生机制有哪些(如偶极倾角、非稳态重联等)?
探究地球空间对太阳风扰动的响应规律	(1) 太阳风条件的变化如何影响太阳风-磁层相互作用的基本模式?
	(2) 太阳风条件如何影响能量、质量或动量的运输过程?
	(3) 地球空间环境对极端太阳风扰动的全球尺度响应是什么?

图3 龙虾眼结构成像原理(a)和焦平面散射图分布(b)

场初步设为 $15^{\circ} \times 30^{\circ}$, 可覆盖从日地连线上的磁层顶到部分磁尾区域, 以及南北极间区. 空间分辨率约为 6 arc-min (FWHM) , 空间尺度相当于 $\sim 0.1 R_E$ (R_E 为地球半径), 满足分辨率 $0.5 R_E$ 的科学要求. 时间分辨率以分钟为单位以跟踪磁层的动态运动. LSXI的镜头为一个球面微通道板的拼接阵列(图4a), 焦距为 $R/2$. 微通道板具有超光滑的内壁, 表面镀有金属铱, 以增加X射线反射率(图4b). 类似的微通道板已用于SMILE、Einstein Probe和SVOM等卫星任务的有效载荷(Gotz等, 2015; Yuan等, 2018).

微通道板的曲率与有效面积成正比. 在光学设计中需要考虑成像灵敏度和仪器的紧凑性, 根据科学目标和可用的有效载荷资源, 在有效面积最大化和视场最大化之间存在权衡(Peng等, 2019). 图5a为有效面积在能量 0.5 keV 条件下随曲率半径变化, 曲率半径越大, 有效面积越大, 三条曲线代表了不同微通道板的参数条件. 微通道板参数为: 微孔宽 $40 \mu\text{m}$, 厚度分别为 1.2 、 1.6 和 2 mm . 仪器的最终设计参数将在后续研究中详细分析后确认.

LSXI焦平面将采用大面阵X射线CCD. 焦平面的大小是光学几何面积的四分之一. 仪器的焦平面由若干个探测器拼接而成. 微通道板几何参数和CCD传感器共同决定仪器的空间分辨率和时间分辨率. CCD传感器的数据传输速率和信号读出处理系统的能力应优于 10 s . 预期的能量分辨率应该达到 50 eV ($@ 0.5 \text{ keV}$). 光学有效面积(黑色线)随X射线入射能量变化如图所示(图5b). 红色曲线表示仪器总有效面积随X射线能量的变化, 即仪器的响应曲线. 在此处微通道板的曲率半径为 60 cm ; 平板厚度 1.2 mm , 微孔宽度 $40 \mu\text{m}$. 同时考虑

图4 微通道板的拼接机械结构示意图(a)和镀铱的微通道板(b)

了复合滤光片($\text{Al } 80 \text{ nm} + \text{聚酰亚胺 } 200 \text{ nm}$)和探测器量子效率(QE)的影响(图5c, 5d). LSXI主要性能参数如表2.

LSXI由四部分组成(图6): X射线望远镜、跟踪转台和两个电子学箱. 望远镜镜头上将设置遮光罩, 以遮挡来自地球和太阳的直射光. 当月地相对位置发生变化时, 转台将跟踪观测区域, 并保持仪器的稳定. 成像仪和转台的电子箱用于设备的电源管理、工作模式控制、数据存储和远程命令执行.

4 LSXI观测结果仿真

4.1 轨道比较

与SMILE卫星的大椭圆极轨道相比, LSXI将从月球观测地球磁层, 对磁层的观测范围不同. SMILE的视场为 $16^{\circ} \times 27^{\circ}$, 在轨道远地点约 $20 R_E$ 处, 对应观测区域约 $5.3 R_E \times 10.6 R_E$. LSXI将在 $60 R_E$ 的距离以类似视场进行观测, 对应观测区域约为 $14.5 R_E \times 29 R_E$. 在大椭圆轨

图 5 有效面积随曲率半径(a)和X射线入射能量(b)变化曲线、滤光片传输效率曲线(c)和CCD量子效率曲线(d)

表 2 LSXI主要性能参数

参数	数值
能量范围	200eV~2.5keV
空间分辨率	~6arcmin(FWHM)
镀膜	铱
能量分辨率	50eV @ 0.5keV

道观测模式下, 地球南北极尖区会发生重叠, 不利于极尖区区域观测. 而从赤道轨道观测则可以清楚地分离出南北极尖区, 并同时二者纳入视场范围. 此外, 如果SMILE卫星与月基软X射线成像仪相互配合同时探测, 将更有利于磁层顶的三维结构反演.

4.2 模拟结果

LSXI在月球轨道上不同位置的观测状态如图(图7). 在蓝色轨道部分, 成像仪处于工作模式. 在红色部分, 仪器处于待机状态.

在之前的工作中, 我们建立了龙虾眼成像系统模型, 并开发了基于磁流体动力模型(MHD)为输入的仪器仿真软件(Peng等, 2018; Sun等, 2019, 2020). 本文中, 我们使用MHD结果模拟地球日侧面X射线强度分布(Wang等, 2013). 图8显示了在A、B、C位置(图7)观测到的磁层的X射线强度分布图. 在GSM坐标系中, A (58.61, 1.33, -2.94) R_E , B(44.06, -36.56, -6.39) R_E , C (0.2, -57.69, 7.78) R_E . 太阳风条件为: 太阳风数密度

图6 LSXI概念结构图(a)和跟踪转台结构(b)

图7 轨道的周期观测视角

$N=20\text{cm}^{-3}$, 速度 $V_X=400\text{km s}^{-1}$, 和行星际磁场(IMF) $B_X=0$, $B_Y=0$, $B_Z=-5\text{nT}$. MHD模拟的分辨率为每像素 0.5° , 视场为 $40^\circ \times 40^\circ$. 每幅MHD图像由 81×81 个点组成, 每个像素作为点光源. 成像仪根据MHD图像作为输入进行仿真(图9), 仿真方法参见前期工作(Peng等, 2018). 成像仪光学参数: 曲率半径为 60cm ; 微孔宽度和板厚分别为 $40\mu\text{m}$ 和 1.2mm ; 镀膜材料为铱, 表面粗糙度为 0.5nm ; 积分时间为 300s , X光的平均能量为 0.5keV . 仿真结果不包括背景和仪器“噪声”的影响.

成像仪的信噪比会受到太阳风条件变化的影响而发生较大的变化. 以图8c为例, 根据MHD模型估计的磁鞘区软X射线的最大发射强度约为 $100\text{keV s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$. 通过成像仪后, 考虑滤光片和CCD探测器量子效率的影响, 在 300s 的积分时间内, 一个像素 (0.5°) 的计数率约为40. 同时, 观测结果还会受到宇宙背景和仪器“噪声”的影响(在软X射线波段, 宇宙背景主要是宇

宙中的弥散X射线; 在大尺度观测的条件下, 宇宙中离散的X射线点源的贡献较小, 在此不考虑. 在成像仪工作过程中CCD探测器将被制冷到较低的温度, 暗噪声将降低到较低的水平). 美国宇航局高能天体物理学档案研究中心(HEASARC)提供了一个X射线宇宙背景工具包, 可以从ROSAT巡天结果中计算出平均宇宙背景X射线计数. 宇宙背景会因A、B、C三个位置的视角不同而不同(图7). 使用上述工具, 在LSXI的探测能量范围内, 宇宙背景软X射线强度估计约为 $50\text{keV s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$, 则对应的计数约为20. 由于宇宙背景软X射线与SWCX产生的软X射线有着类似的光谱, 宇宙背景的软X射线发射强度约为SWCX机制产生软X射线发射强度的一半, 宇宙背景相应的计数率也为观测目标即磁层顶区域的一半. 由此可以得到一个近似信噪比 $40 / \sqrt{40+20}$, 约 5σ (积分时间 300s). 宇宙背景噪声对观测结果的影响应在最终成像结果中去除.

4.3 选址分析

由于月球轨道的特殊性, 通过在月球上设置软X射线成像仪, 可以实现连续且长期的观测. LSXI的选址原则如下: 首先, 要保证设备的安全性和可用性; 其次, 保证科学目标的实现(Mendell, 1985). 月球基地选址的影响因素包括地形、观测时间、通信能力和能源需求等. 在月球表面观测磁层目标, 需要满足两个基本条件: 保持磁层顶的日下点在视场内, 并且避免太阳光直接射入光学系统.

我们选择月球表面的三个典型位置来估计对科学目标的观测时间. 它们是赤道地区(纬度: 0° , 经度: 0°)、北极地区(纬度: 80°N , 经度: 0°)和南极地区(纬度: 80°S , 经度: 0°). 我们计算了2021年1月1日至2024年1月1日共1095天中, 磁层顶、南北极尖区的观测时间统计. 在赤道地区, 磁层顶和极尖区的独立观测时间在750天左右, 两者能同时观测时间为727天; 在极地地区, 同时观测时间减少到590天左右(表3). 一个月的连续观测时间可达20天. 总体而言, 无论是在赤道地区还是在极地地区, 都可以获得足够的观测时间. 以上估计也考虑到太阳角度的约束.

在南极地区建立月球基地有几个潜在的优势. 与月球其他区域相比, 此地区月球热环境良好, 陨石坑为辐射防护提供了自然条件(贾瑛卓和邹永廖, 2016).

图 8 磁暴事件中软X射线强度分布的MHD模拟图像
(a)、(b)、(c)分别为图7中在A、B、C位置对应的MHD仿真结果

图 9 对应图8的SXI仿真结果

表 3 三个不同地点的观测时间统计

地点(纬度, 经度)	视场	观察时间(天)			
		磁层顶	N-极尖区	S-极尖区	磁层顶+极尖区
赤道区(0°, 0°)	15°×30°	752	738	740	727
北极区(80°N, 0°)	15°×30°	752	742	593	583
南极区(80°S, 0°)	15°×30°	752	599	743	590

在探月工程第四阶段计划中, 科学家们提出了在月球南极建立一个科学研究站的设想. 根据分析(表3), 月球的南极地区可以作为LSXI的安置点. 更全面的选址分析将在后续的研究中继续进行.

5 任务介绍

在初步设计中, LSXI将被放置在月球的南极地区. 为了获得地球磁层的全景视图, 视场暂定为15°×30° (图10).

与其他轨道观测方案相比, 以月球为平台有许多优点. 首先, 月球与地球同步自转, 因此月球总是同一

面朝向地球, 实现对全景磁层区域进行连续观测. 其次, 月球离地球大约38万公里(60 R_E), 15°×30°的视场可以覆盖包括弓激波、磁层顶和极尖区在内的整个磁层顶区域, 使监测全景太阳风-磁层相互作用的动态过程成为可能. 第三, 有别于卫星平台较短的寿命, 月球是一个稳定的观测平台. 这就使得月基观测能够覆盖一个或多个的太阳活动周期. 为了降低月尘对仪器的影响, 将在LSXI镜头前设置一个屏蔽门. 载荷着陆后, 待扬起的月尘落下, 屏蔽门开启, 载荷开始工作. 同时屏蔽门也可以在运输过程中作为仪器的防护. 此外, 还计划在微通道板镜头前设置电磁屏蔽罩, 持镜头表面清洁, 延长仪器的使用寿命(Diaz Gilete, 2014). 跟踪转台使

成像仪指向磁层顶, 根据观测要求, 还可以根据地面指示设置观测计划, 以适应不同太阳风条件的变化. 整个仪器重约35公斤(不包括转台和电池或太阳能电池板). 探测器通常需要冷却到 $\sim 100^{\circ}\text{C}$ 以下才能获得最佳性能, 因此需要一个主动冷却系统. 估计总功耗约为50w. 月球绕地球公转大约需要29.5天, 公转面与黄道面几乎重合. 在一个轨道周期内(图7), LSXI可连续观测约22天. 图11为随月球位置变化的3D模拟示意图, 给出了当月球移动到磁层的正面、侧面和背面时的观测情况. 图中红色/蓝色的球代表南北极尖区, 黄色球为磁层顶日下点位置, 黄色直线为日地连线(图11).

图 10 从月球表面观测磁层概念图

图 11 月球位置变化的3D模拟观测图

6 总结

在成功实施探月工程前三期任务之后, 中方正制定第四期任务的研究计划. 在此背景下, 我们提出了月基软X射线成像仪任务概念. 利用地球和月球之间观测位置的优势, LSXI将使用最先进的成像技术, 从多个角度对地球磁层全景图像进行长时间的连续观测. 此外, 结合天基和地基探测数据, 其观测结果将给磁层物理研究带来深刻启发, 并将应用于空间气象灾害性事件的预报和应对. 该任务计划于2027年发射执行.

致谢 在此感谢LSXI团队的所有成员, 感谢一直关心该项目并提出宝贵建议的朋友.

参考文献

- 贾瑛卓, 邹永廖. 2016. 月基对地观测对月球基地选址需求分析. 航天器工程, 25: 116–121
- Angel J R P. 1979. Lobster eyes as X-ray telescopes. In: Proceedings of Space Optics Imaging X-Ray Optics Workshop. Huntsville, 184: 84–85
- Bhardwaj A, Elsner R F, Randall Gladstone G, Cravens T E, Lisse C M, Dennerl K, Branduardi-Raymont G, Wargelin B J, Hunter Waite Jr. J, Robertson I, Østgaard N, Beiersdorfer P, Snowden S L, Kharchenko V. 2007. X-rays from solar system objects. *Planet Space Sci*, 55: 1135–1189
- Branduardi-Raymont G, Sembay S F, Eastwood J P, Sibeck D G, Abbey T A, Brown P, Carter J A, Carr C M, Forsyth C, Kataria D, Kemble S, Milan S E, Owen C J, Peacocke L, Read A M, Coates A J, Collier M R, Cowley S W H, Fazakerley A N, Fraser G W, Jones G H, Lallement R, Lester M, Porter F S, Yeoman T K. 2012. AXIOM: Advanced X-ray imaging of the magnetosphere. *Exp Astron*, 33: 403–443
- Camps A. 2019. Nanosatellites and applications to commercial and scientific missions. *Satellites and Innovative Technology*. IntechOpen
- Collier M R, Porter F S, Sibeck D G, Carter J A, Chiao M P, Chornay D J, Cravens T, Galeazzi M, Keller J W, Koutroumpa D, Kuntz K, Read A M, Robertson I P, Sembay S, Snowden S, Thomas N. 2012. Prototyping a global soft X-ray imaging instrument for heliophysics, planetary science, and astrophysics science. *Astron Nachr*, 333: 378–382
- Collier M R, Sibeck D G, Cravens T E, Robertson I P, Omid N. 2010. Astrophysics noise: A space weather signal. *Eos Trans AGU*, 91:

- 213–214
- Cravens T E. 1997. Comet Hyakutake X-ray source: Charge transfer of solar wind heavy ions. *Geophys Res Lett*, 24: 105–108
- Cravens T E. 2000. Heliospheric X-ray emission associated with charge transfer of the solar wind with interstellar neutrals. *Astrophys J*, 532: L153–L156
- Credland J, Mecke G, Ellwood J. 1997. The Cluster mission: ESA's spacefleet to the magnetosphere. *Space Sci Rev*, 79: 33–64
- Diaz Gilete S. 2014. Use of electrodynamic screens for performance optimization of optics and solar panels on the Moon's surface. Dissertation for Master's Degree. Universitat Politècnica de Catalunya
- Fujimoto R, Mitsuda K, Mccammon D, Takei Y, Bauer M, Ishisaki Y, Porter S F, Yamaguchi H, Hayashida K, Yamasaki N Y. 2007. Evidence for solar-wind charge-exchange X-ray emission from the Earth's magnetosheath. *Publ Astron Soc Jpn*, 59: S133–S140
- Gotz D, Adami C, Basa S, Beckmann V, Burwitz D, Chipaux R, Cordiera B, Evans P, Godet O, Goosmann R, Meidinger N, Meuris A, Motchh C, Nandrad K, O'Brien P, Osborn J, Perinat E, Raud A, Willingalef R, Mercier J K, Gonzalez F. 2015. The microchannel x-ray telescope on board the SVOM satellite. arXiv: 1507.00204
- Li C, Wang C, Wei Y, Lin Y. 2019. China's present and future lunar exploration program. *Science*, 365: 238–239
- Lisse C M, Dennerl K, Englhauser J, Harden M, Marshall F E, Mumma M J, Petre R, Pye J P, Ricketts M J, Schmitt J, Trumper J, West R G. 1996. Discovery of X-ray and extreme ultraviolet emission from comet C/Hyakutake 1996 B2. *Science*, 274: 205–209
- Liu Z X, Escoubet P, Cao J B. 2005. A Chinese-European multiscale mission: The double star program. In: *Multiscale Coupling of Sun-Earth Processes*. Amsterdam: Elsevier Science BV. 509–514
- Mendell W W. 1985. Lunar bases and space activities of the 21st century. In: *Lunar and Planetary Institute*. Houston
- Peng S, Wei F, Guo Y, Ye Y. 2019. Preliminary geometric parameters optimization of lobster-eye-type wide field of view soft x-ray imager. *Opt Eng*, 58: 093101
- Peng S, Ye Y, Wei F, Yang Z, Guo Y, Sun T. 2018. Numerical model built for the simulation of the earth magnetopause by lobster-eye-type soft X-ray imager onboard SMILE satellite. *Opt Express*, 26: 15138–15152
- Robertson I P, Cravens T E. 2003. X-ray emission from the terrestrial magnetosheath. *Geophys Res Lett*, 30: 1439
- Schwadron N A, Cravens T E. 2000. Implications of solar wind composition for cometary x-rays. *Astrophys J*, 544: 558–566
- Snowden S L, Collier M R, Kuntz K D. 2004. *XMM-Newton* observation of solar wind charge exchange emission. *Astrophys J*, 610: 1182–1190
- Sun T R, Wang C, Sembay S F, Lopez R E, Escoubet C P, Branduardi-Raymont G, Zheng J H, Yu X Z, Guo X C, Dai L, Liu Z Q, Wei F, Guo Y H. 2019. Soft X-ray imaging of the magnetosheath and cusps under different solar wind conditions: MHD simulations. *J Geophys Res-Space Phys*, 124: 2435–2450
- Sun T R, Wang C, Wei F, Sembay S. 2015. X-ray imaging of Kelvin-Helmholtz waves at the magnetopause. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 266–275
- Sun T, Wang C, Connor H K, Jorgensen A M, Sembay S. 2020. Deriving the magnetopause position from the soft X-ray image by using the tangent fitting approach. *J Geophys Res-Space Phys*, 125: e28169
- Walsh B M, Collier M R, Kuntz K D, Porter F S, Sibeck D G, Snowden S L, Carter J A, Collado-Vega Y, Connor H K, Cravens T E, Read A M, Sembay S, Thomas N E. 2016. Wide field-of-view soft X-ray imaging for solar wind-magnetosphere interactions. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 3353–3361
- Wang C, Branduardi-Raymont G. 2018. Progress of solar wind magnetosphere ionosphere link explorer (SMILE) mission. *Chin J Space Sci*, 38: 657–661
- Wang C, Guo X C, Peng Z, Tang B B, Sun T R, Li W Y, Hu Y Q. 2013. Magnetohydrodynamics (MHD) numerical simulations on the interaction of the solar wind with the magnetosphere: A review. *Sci China Earth Sci*, 56: 1141–1157
- Wu W, Yu D, Wang C, Liu J, Tang Y, Zhang H, Zhang Z. 2020. Technological breakthroughs and scientific progress of the Chang'e-4 mission. *Sci China Inf Sci*, 63: 200201
- Xu L, Zou Y L, Qin L. 2019. Overview of China's Lunar Exploration Program and Scientific Vision for Future Missions. In: *50th Lunar and Planetary Science Conference*. Woodlands, (2132): 2440
- Yuan W, Zhang C, Ling Z, et al. 2018. Einstein Probe: A lobster-eye telescope for monitoring the x-ray sky. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray*. International Society for Optics and Photonics. Pasadena, 10699: 1069925
- Zhao W, Wang C. 2019. China's lunar and deep space exploration: Touching the moon and exploring the universe. *Natl Sci Rev*, 6: 1274–1278

(责任编辑: 傅绥燕)