

文章编号 1004-924X(2010)12-2564-10

# 月基观测地球等离子体层极紫外辐射特性

何 飞<sup>1,2</sup>, 陈 波<sup>1</sup>, 张效信<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 国家气象局 空间天气监测与预警中心, 北京 100081)

**摘要:**研究了地球等离子体层的极紫外辐射特性,结果表明从月球上探测时地球等离子体层顶位于35 081.75 km以内,等离子体层结构的典型尺度量级为637.85 km, He<sup>+</sup> 30.4 nm辐射强度为0.02~11.4 Rayleigh。讨论了月球轨道运动特性和月球表面环境特性,结果显示在一个月球公转周期内,总观测时间约为12个地球日,极紫外观测仪器对地指向的纬度最大偏移约为7°,经度最大偏移约为6°。对月面的极紫外辐射分析表明,太阳峰年月面散射的极紫外辐射强度约为2.0 Rayleigh,与地球等离子体层辐射量级相当。根据SELENE数据,描述了极紫外观测仪器所在的5个拟着陆区的地貌特征,证明了月面散射的极紫外辐射不会进入观测仪器,其中虹湾区的地形最为理想。根据Apollo-12和Apollo-15太阳风数据分析了月面质子和电子通量,结果显示在太阳峰年,一年内两者的总流量均为约 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。根据Apollo-12局地观测,在一个月球周期内,月面温度变化为80~390 K。得到的结果为月基极紫外观测仪器设计提供了重要依据。

**关键词:**地球等离子体层; 月基观测; 极紫外观测仪器; 月球环境

**中图分类号:**TH762;P354 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101812.2564

## Moon-based imaging of earth plasmaspheric extreme ultraviolet radiation

HE Fei<sup>1,2</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-xin<sup>3</sup>

(1. *Changchun Institution of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** The extreme ultraviolet radiation properties of the earth plasmasphere was firstly studied, which shows that the plasmopause is mainly located near 35 081.75 km, the typical scale of the plasmasphere structures is 637.85 km, and the He<sup>+</sup> 30.4 nm emission intensity is between 0.02 and 11.4 Rayleigh when the plasmasphere is detected from the moon. Then, the orbital characteristics and surface environmental properties of the moon were described and it is pointed out that the total imaging period of an extreme ultraviolet imager is 12 d, in which the maximum latitudinal drift of the positioning of the camera is 7° while the maximum longitudinal drift is 6°. The extreme ultraviolet radiation of the lunar surface was analyzed, and results indicate that the extreme ultraviolet radiation reflec-

收稿日期:2010-04-07; 修订日期:2010-05-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40774079, 40774098, 40890160); 公益性行业专项资助项目(No. CYHY06024)

ted by lunar surface is 2.0 Rayleigh at solar maximum, which has the same order in the magnitude as compared with the plasmasphere emission. Based on the SELENE observation data, topographic properties in the five planned landing sites were explored, it proves that the extreme ultraviolet radiation reflected by lunar surface in these sites can not enter the field of view of the camera. For the five sites, Sinus Iridum is the most ideal site for moon-based extreme ultraviolet imaging. The proton and electron fluxes on the lunar surface were analyzed using Apollo-12 and Apollo-15 SWC experiment data, results show that the total fluences of protons and electrons are both approximately  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  in one-year period. During a lunation, the lunar surface temperature changes from 80 K at lunar night to 390 K at lunar noon according to Apollo-12 observation. Above results provide an important basis for the design of moon-based extreme ultraviolet imagers.

**Key words:** earth plasmasphere; moon-based imaging; extreme ultraviolet imager; lunar environment

## 1 引 言

月基极紫外成像仪从月球上对地球等离子体层的  $\text{He}^+$  30.4 nm 辐射进行成像,用于研究地球等离子体层的粒子密度分布。 $\text{He}^+$  是地球等离子体层内除  $\text{H}^+$  (无光谱发射) 之外含量最高的粒子,因此  $\text{He}^+$  30.4 nm 辐射成像是地球等离子体层成像的最佳选择。地球等离子体层的  $\text{He}^+$  密度约为  $1 \sim 1\,000 \text{ cm}^{-3}$ , 约占等离子体层粒子总量的 20%<sup>[1-2]</sup>, 其共振散射的太阳 30.4 nm 辐射是线光谱,是等离子体层内最强的极紫外辐射,且磁层(Magnetosphere)对该谱线是光学薄的,背景辐射可忽略不计<sup>[3]</sup>,因此辐射光强直接正比于视线(LOS)方向  $\text{He}^+$  的积分柱密度,由此大大简化了光学探测系统,同时也便于将辐射光强分布反演为粒子密度分布,用于研究等离子体层动力学特性。

对等离子体层进行光学成像是监测地磁活动期间等离子体层等离子密度和分布变化的理想方法<sup>[4]</sup>。但光学探测方法由于受光学系统反射率的影响,直到上世纪末随着极紫外光学多层膜技术和光学加工技术的进步<sup>[5]</sup>,才被用于地球等离子体层探测。典型的观测仪器有 3 台。Planet-B 卫星在飞往火星的途中用搭载的 XUV 扫描仪对地球等离子体层 30.4 nm 辐射进行了扫描成像,首次获得了地球等离子体层 30.4 nm 辐射在子午面投影的局部光强分布<sup>[6]</sup>。IMAGE 卫星搭载的极紫外观测仪器从极轨大椭圆轨道远区域对等离子体层进行了全局探测<sup>[7]</sup>,首次获得了等离子体层 30.4 nm 辐射在磁赤道面投影的全局光

强分布以及光强分布随时间的演化特征<sup>[8]</sup>。SELENE 卫星搭载的 UPI 成像仪<sup>[9]</sup>从环月轨道上对地球等离子体层进行成像,首次实现了从侧面对等离子体层的长期观测。这 3 颗卫星对等离子体层的探测虽然较以前的局地观测和探空火箭观测有着质的飞跃,但也存在着局限性。Planet-B 卫星由于运行周期和视场角的限制,只在其近地停泊轨道(1998 年 7 月~1999 年 1 月)上获得了等离子体层局部的光强分布;IMAGE 卫星工作于自旋平台,由于受轨道高度和视场角限制,只能在轨道远区域(2000~2005 年)进行观测,这些局限性导致了探测结果的不连续性和结构的不完整性。SELENE 卫星上的 UPI 视场角仅为  $5^\circ \times 10^\circ$ ,且 SELENE 有一半时间处于月球背面,即使采用扫描的方法也无法探测等离子体层整体结构<sup>[10]</sup>。目前还没有极紫外探测器在轨运行,而地球等离子体层研究及空间天气预报的发展,急需一种稳定连续的全局光学探测方法,月基极紫外探测可谓当前最佳选择。

本文首先根据地球等离子体层观测的要求,研究了地球等离子体层极紫外辐射特性,月球轨道特性和极紫外观测仪器的指向偏移规律。然后根据 Apollo、SELENE 等卫星的实地观测数据,研究极紫外观测仪器拟着陆区的地形地貌特征,极紫外辐射特征,粒子辐射特征和温度变化特征,分析了这些特征对月基极紫外观测的影响。

## 2 地球等离子体层观测需求

月基极紫外观测仪器提供了地球等离子体层的  $\text{He}^+$  30.4 nm 辐射全景图,本文将根据等离子

体层辐射特性和结构特性,结合目前等离子体层研究中仍待解决的问题,分析地球等离子体层极紫外观测需求。

IMAGE 卫星的观测结果大大拓展了人们对等离子体层的认识<sup>[11-16]</sup>,但由于其观测局限性,目前仍存在一些待解决的问题。例如,磁暴期间等离子体层通量管沿纬度方向分布特征如何变化?磁暴期间被刻蚀的等离子体流向何处?重填过程中的等离子体又来自何处?以及磁层对流电场和等离子体层局部电场如何影响这两个过程?等离子体层尾在纬度方向的动力学特性如何?等离子体层如何响应太阳风和行星际磁场(IMF)变化?由于目前并没有从侧面观测的等离子体层 30.4 nm 辐射的全景图像,本文采用动态全球核心等离子体层模式(DGCPM)<sup>[17]</sup>模拟了月基极紫外观测仪器可能得到的地球等离子体层 30.4 nm 辐射光强分布(图 1)<sup>[18]</sup>。从月球观测时,地球等离子体层具有以下特性:

(1) 地球等离子体层在赤道面上位于 35 081.75 km 以内,在子午面上位于 25 514 km 以内,等离子体层顶、等离子体层肩和等离子体层尾的典型尺度量级为 637.85 km。进行月基极紫外观测时需要的极紫外观测仪器视场角为 15°(以地月平均距离 384 110 km 计算),空间分辨率为 637.85 km 或 0.095°。

(2) IMAGE 卫星观测的磁暴等离子体层顶收缩或扩张的平均速率约为 4 465 km/h,10 min 对应的尺度量级约 637.85 km,与空间分辨率相当,因此成像的时间分辨率(或曝光时间)应为

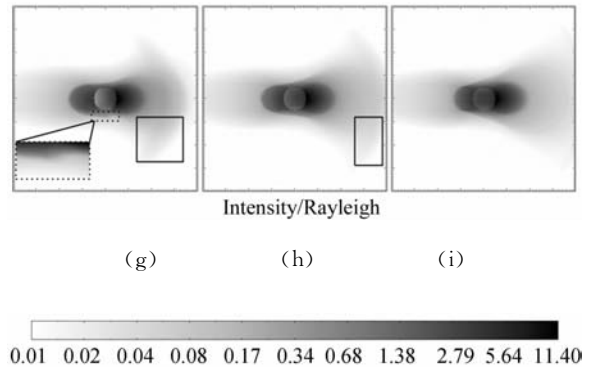
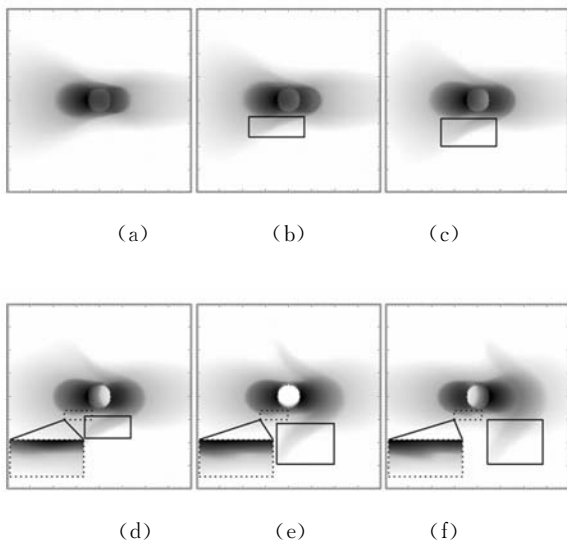


图 1 从月球轨道不同位置模拟观测的地球等离子体层  $\text{He}^+$  30.4 nm 辐射光强分布,黑色实线框代表的区域为等离子体层尾,黑色虚线框代表的区域为等离子体层肩,(d)~(g)右下角虚线框区域为等离子体层肩放大图,(a)~(i)分别代表不同月球轨道位置<sup>[18]</sup>。

Fig. 1 Intensity distribution of the earth's plasmaspheric  $\text{He}^+$  30.4 nm emission simulated from different positions of the lunar orbit. The black rectangle regions represent the plasmaspheric plumes, the black dashed rectangle regions represent the plasmaspheric shoulders, the dashed rectangle regions in the lower corners of (d) to (g) represent the amplified shoulders and (a) to (i) represent different positions of the lunar orbit<sup>[18]</sup>.

10 min 或优于 10 min。由于磁暴发生周期(起始相-膨胀相-恢复相)一般为 3~4 d 量级,平均每月至少发生一次(一般是受到太阳自转周期调制),亚暴发生周期(亚暴起始-膨胀-恢复)一般为 1~2 h 量级,平均每天至少发生一次,有时一天发生多次。因此,为了全程监测磁暴、亚暴活动期间地球等离子体层的变化特征,极紫外观测仪器的连续成像时间应达到 4 d 以上。

(3) 从月球上观测时,等离子体层顶内(包括部分等离子体层尾) 30.4 nm 辐射强度为 0.1~11.4 Rayleigh,等离子体层顶外辐射强度为 0.02~0.1 Rayleigh,极紫外观测仪器的响应范围需满足此要求。由于等离子体层极紫外辐射光强相对较弱,30.4 nm 多层膜峰值反射率约为 20%,因此极紫外观测仪器光学系统结构应尽可能简单,同时探测器灵敏度应较高,以减少光学系统对光强的损耗和误差。

### 3 月球环境特性

月球轨道是椭圆轨道,偏心率为 0.0549,公转平均线速度为 1.02 km/s,如图 3(b),地月平均距离为 384 403.0 km,轨道稳定,绕地球公转和自转周期均为 27 d7 h43 min11.556 s,这一特性导致了月球朝向地球一面始终朝向地球,为月基极紫外观测提供了优越的平台。

#### 3.1 极紫外观测仪器指向变化规律

由于月球公转轨道面与黄道面夹角为  $5^{\circ}9'$ ,月球赤道面与公转轨道面夹角为  $6^{\circ}41'$ ,因此,月球朝向地球的一面并不是静止的,而会在纬度和经度方向发生不同程度的扰动。本文计算了当月基极紫外观测仪器分别位于 5 个拟着陆区时(参数见表 1)对地心指向的纬度和经度偏移规律,如图 2 所示,起始时间为月球正午,计算时间为一个月球周期。

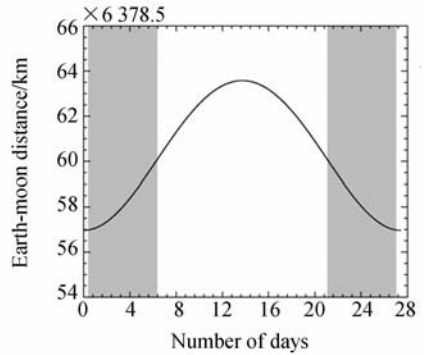
表 1 拟着陆区参数<sup>[19]</sup>

Tab. 1 Parameters of planned landing sites<sup>[19]</sup>

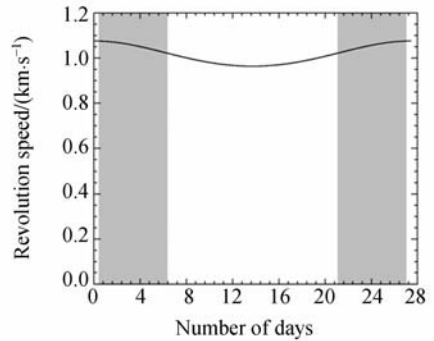
英文名	中文名	纬度	经度	直径/km
Sinus Iridum	虹湾	44.1°N	31.5°W	236
Aristillus	阿里斯基尔	33.9°N	1.2°E	55
Mare Nectaris	酒海	15.2°S	35.5°E	333
Mare Humorum	湿海	24.4°S	38.6°W	389
Kepler	克普勒	8.1°N	38.0°W	31

在一个月球周期内,适合进行极紫外观测的时间由以下条件决定:避免太阳光直接射入极紫外观测仪器;处于月球白昼,探测器平台能提供足够的能源。由图 2(c)可知,极紫外观测仪器圆视场为  $15^{\circ}$  时(由于月球半径和地月距离相比很小,对应夹角仅为  $0.25^{\circ}$ ,因此,着陆点变化对极紫外观测仪器法线与太阳光线夹角几乎无影响,图 2(c)中 5 个着陆区的曲线基本重合, $0^{\circ}$  代表极紫外观测仪器正对太阳, $180^{\circ}$  代表极紫外观测仪器背向太阳),月昼期间太阳辐射能直接进入相机视场角的时间是  $0\sim 0.4$  地球日和  $27.04\sim 27.44$  地球日。扣除月夜时间和月晨时仪器及探测器系统的预热时间约 0.5 地球日,总观测时间为 12 地球日(图 2 中阴影区域),非常适合观测等离子体层从磁暴初始相到膨胀相再到恢复相的全过程,是其

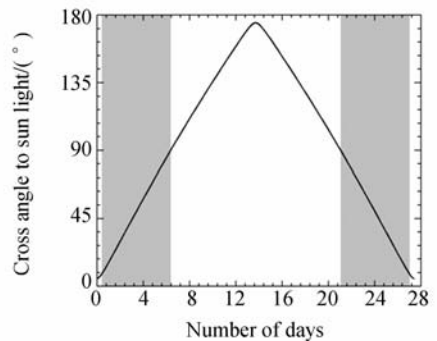
他轨道卫星无法比拟的。在这一成像时间段内,相机对地心指向的最大纬度偏移约为  $7^{\circ}$ ,最大经度偏移约为  $6^{\circ}$ ,变化规律见图 2(d)和图 2(e)(其中纬度向北偏移为正,经度向东偏移为正)。考虑这一纬度和经度偏移后,极紫外观测仪器法线与当地月面法线的夹角变化规律如图 2(f)所示,最小值为  $27.5^{\circ}$ ,最大值为  $55.5^{\circ}$ 。这要求安装于着



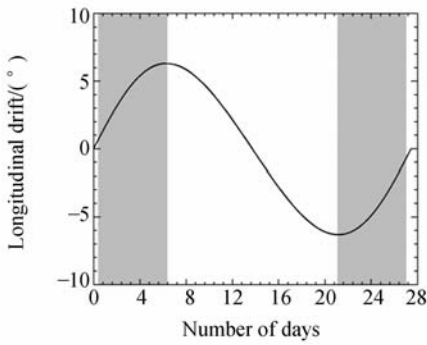
(a) 地月距离  
(a) Earth-moon distance



(b) 月球公转速度  
(b) lunar revolution speed

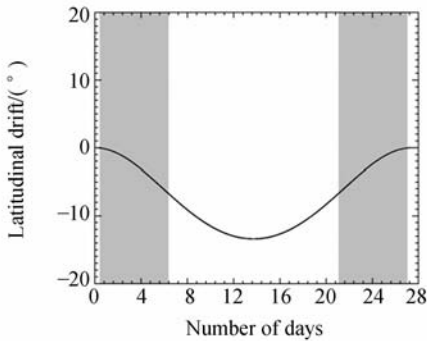


(c) 极紫外观测仪器法线与太阳光线夹角  
(c) Cross angle between sunlight and normal of extreme ultraviolet imager



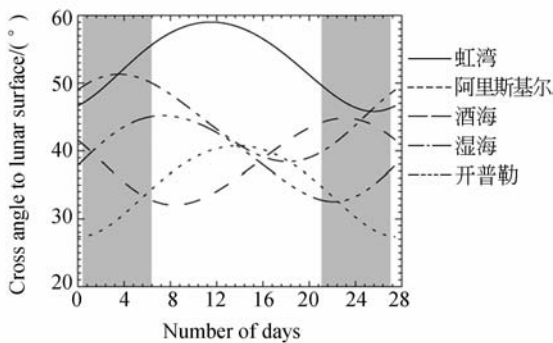
(d) 经度漂移

(d) Longitudinal drift



(e) 纬度漂移

(e) latitudinal drift



(f) 极紫外观测仪器法线与月面法线夹角

(f) Cross angles between normal of lunar surface and normal of extreme ultraviolet imager for five planned landing sites

图 2 一个月球周期内极紫外观测仪器随月球运行的指向变化规律

Fig. 2 Directionality changing laws of extreme ultraviolet imager versus lunar positions in one lunar revolution period

陆器上的极紫外观测仪器沿纬度方向的调整范围达到 $55.5^\circ$ , 经度方向的扫描范围达到 $\pm 6^\circ$ 。

### 3.2 月面极紫外辐射环境

月球表面没有大气, 不会影响地球等离子体层极紫外辐射, 但月球表面会散射太阳的极紫外辐射。在 30.4 nm 波段, 太阳辐射通量为<sup>[20]</sup>

$$\pi F_\lambda = (\pi F_\lambda)_0 \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / \Delta\lambda_n^2], \quad (1)$$

其中  $\Delta\lambda_n = 0.0072 \text{ nm}$  为太阳 30.4 nm 谱线的半高宽 (FWHM),  $\lambda_0 = 30.4 \text{ nm}$  为中心波长,  $(\pi F_\lambda)_0$  为谱线中心的辐射通量, 在太阳活动极大年和极小年的值分别为  $1.0 \times 10^{12}$  和  $5.4 \times 10^{11} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ 。将式(1)对全区间积分并转化为辐射强度单位 (Rayleigh), 得到太阳极大年和极小年时 30.4 nm 辐射强度分别为 1015.5 和 548.4 Rayleigh。该强度分别是地球等离子体层最大辐射光强的 89 倍和 48 倍, 因此必须防止太阳光直射入相机。

月面对太阳极紫外辐射的反射率约为 0.2%<sup>[21]</sup>, 根据以上计算, 月面直接反射太阳 30.4 nm 辐射的强度在太阳极大年和极小年分别约为 2.0 和 1.0 Rayleigh, 与地球等离子体层 30.4 nm 辐射强度量级相当, 因此必须考虑这部分反射光能否进入极紫外观测仪器。由图 2(f) 知, 极紫外观测仪器法线与着陆器所在位置月面法线的夹角范围是  $[27.5^\circ, 55.5^\circ]$ , 而极紫外观测仪器周围反射体高度  $H$  与反射体距极紫外观测仪器距离  $L$  之间的关系为:

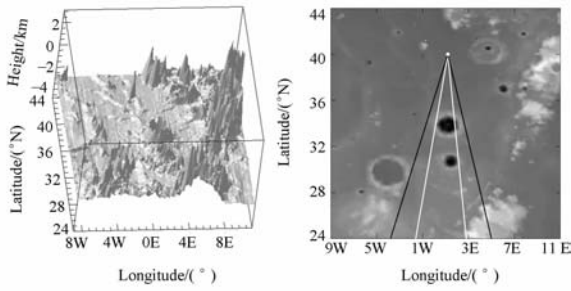
$$H = L \tan(\theta), \theta \in [27^\circ, 55^\circ], \quad (2)$$

其中,  $\theta$  为反射体对极紫外观测仪器所在位置的仰角 (忽略着陆器高度), 即  $0.51 \leq H/L \leq 1.43$  时反射体反射的光线会进入极紫外观测仪器。任何情况下极紫外观测仪器背面的反射体总是不影响极紫外成像。位于极紫外观测仪器前方 ( $15 \pm 6^\circ$ ) 范围内的反射体, 如果高度和距离满足以上关系式, 则其反射太阳光进入极紫外观测仪器的同时也遮挡了地球等离子体层的极紫外辐射, 这样极紫外观测仪器成像就无法进行。位于极紫外观测仪器前方 ( $15 \pm 6^\circ$ ) 之外反射体不会遮挡地球等离子体层极紫外辐射, 也不会反射太阳光进入极紫外观测仪器。下面采用 SELENE 卫星激光高度计 (LALT) 月球地形数据<sup>[22]</sup> 分别就 5 个拟着陆区进行分析 (本文中所以使用月球地形数据由日本空间局 (JAXA) 和 SELENE 卫星研究组提供, 网

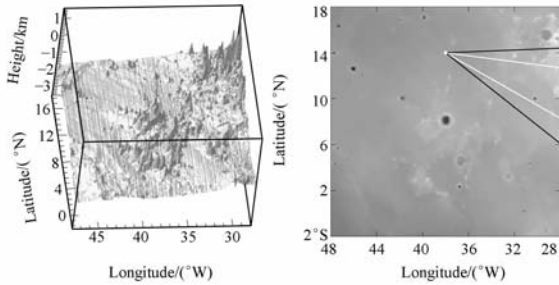
址: <http://www.kaguya.jaxa.jp/en/index.htm>。

### 3.2.1 阿里斯基尔撞击坑(Aristillus)

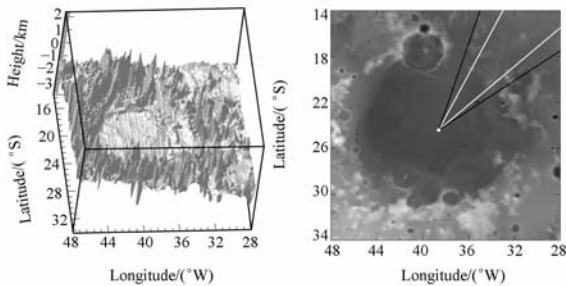
在阿里斯基尔撞击坑西北部(36°N~44°N)存在较开阔平坦的地带(如图 3(a)左图所示),假设极紫外观测仪器位于此区域,如图 3(a)右图中白色圆点所示,则极紫外观测仪器的视场覆盖区如图中的白线(正常视场覆盖)和黑线(指向偏移引入的附加视场)所示。在黑线区域内,反射体高度与反射体与极紫外观测仪器距离的最大比值  $H/L_{max}=0.011 \ll 0.51$ ,因此,视场内的月面不会反射光线进入极紫外观测仪器。



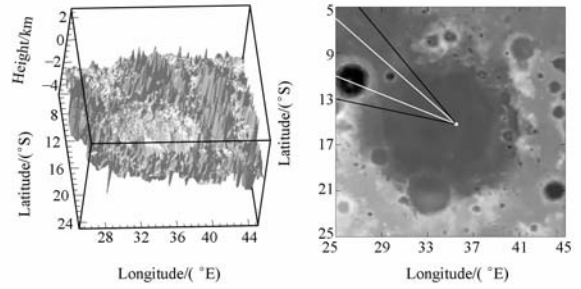
(a)阿里斯基尔撞击坑  
(a) Aristillus



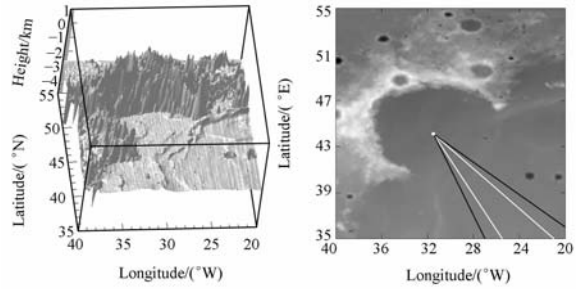
(b)克普勒撞击坑  
(b) Kepler



(c)湿海  
(c) Mare Humorum



(d)酒海  
(d) Mare Nectaris



(e)虹湾  
(e) Sinus Iridum

图 3 5 个拟着陆区的地貌特征(左图)和极紫外观测仪器视场覆盖范围(右图)

Fig. 3 Topographies (left) and FOV covering areas of the EUV imager (right) for five planned landing sites

### 3.2.2 克普勒撞击坑(Kepler)

克普勒撞击坑地势总体上从东北角往西南角倾斜,同样在西北部(10°N~16°N)存在较开阔平坦的地带(如图 3(b)左图所示),假设极紫外观测仪器位于此区域,如图 3(b)右图中白色圆点所示,则极紫外观测仪器的视场覆盖区如图中的白线和黑线所示。在黑线区域内,反射体高度与反射体与极紫外观测仪器距离的最大比值  $H/L_{max}=0.007 \ll 0.51$ ,因此,视场内的月面不会反射光线进入极紫外观测仪器。

### 3.2.3 湿海(Mare Humorum)

湿海周围是峭壁,并在东北角存在一个缺口(如图 3(c)左图所示),当极紫外观测仪器位于湿海中央时,视场覆盖区如图 3(c)右图所示,在该区域内,反射体高度和反射体与极紫外观测仪器距离的最大比值  $H/L_{max}=0.012 \ll 0.51$ ,因此,视场内的月面不会反射光线进入极紫外观测仪器。

### 3.2.4 酒海(Mare Nectaris)

酒海地形与湿海相似,只是酒海的缺口位于西北角(如图 3(d)左图所示),当极紫外观测仪器位于酒海中央时,视场覆盖区如图 3(d)右图所示,在该区域内,反射体高度和反射体与极紫外观测仪器距离的最大比值  $H/L_{\max} = 0.013 \ll 0.51$ ,因此,视场内的月面不会反射光线进入极紫外观测仪器。

### 3.2.5 虹湾(Sinus Iridum)

虹湾是一个直径约为 236 km 的盆地,地势总体呈斜坡状,如图 3(e)左图所示。盆地边缘处的高山最高相对海拔约为 4 000 m,位于北纬  $46^\circ$  附近,即在极紫外观测仪器背面,不影响成像。而在极紫外观测仪器视场覆盖区内(如图 3(e)右图所示),反射体高度和反射体与极紫外观测仪器距离的最大比值为  $H/L_{\max} = 0.008 \ll 0.51$ ,因此,视场内的月面也不会反射光线进入极紫外观测仪器,更不会遮挡地球等离子体层极紫外辐射。综上所述,虹湾着陆区的地貌环境不影响极紫外观测仪器正常成像。

总体而言,虹湾的地形地貌最为理想,其他 4 个地区地貌特征较复杂,如果实际着陆点选取不当,将会影响极紫外观测。在极紫外观测仪器视场内,虹湾地势最平坦,最适合进行月基极紫外观测。

## 3.3 月面粒子辐射环境

空间粒子辐射会对空间运行的仪器产生各种影响<sup>[23]</sup>,见表 2。根据图 4 可知(图中弓激波和磁层顶位置由 Chao 模式计算<sup>[24]</sup>),在一个月球公转周期内(月夜除外),极紫外观测仪器有约一半时间处于太阳风中,另有一半时间处于弓激波和磁层之内。当极紫外观测仪器处于太阳风中时,太阳风中的质子和电子,太阳能量粒子(或太阳宇宙射线)和银河系宇宙射线粒子通量较大,而当极紫外观测仪器处于磁层内时,各种粒子辐射通量均较小。根据 Apollo-12 和 Apollo-15 的局地观测<sup>[25]</sup>结果(观测周期正好处于第 20 太阳周期的峰年,而极紫外观测仪器的拟运行周期正好处于第 24 太阳周期的峰年,因此 Apollo 的观测结果可以作为极紫外观测仪器运行期间的参考,本文中所使用数据由美国 NASA-GSFC-CDAWEB 提供,网址: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>),在月球表面质子和电子通量平均值约为  $4 \times 10^8$

$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,能量分别为 keV 和 10 eV 量级,在一年内总质子剂量约为  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ,总电子剂量约为  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。

表 2 空间粒子辐射环境对空间仪器的影响

Tab. 2 Effects of space particle radiation environment on space instrument

空间环境	对空间仪器的主要影响
宇宙射线高能粒子 (质子,100 MeV ~ 1 GeV)	电离、非电离剂量效应
太阳高能粒子 (质子,100 keV ~ 300 MeV,甚至 GeV)	组件和材料退化、活细胞损伤,单粒子事件
太阳风等离子体 (电子:10 eV; 质子:0.1~1.0 keV)	静电势

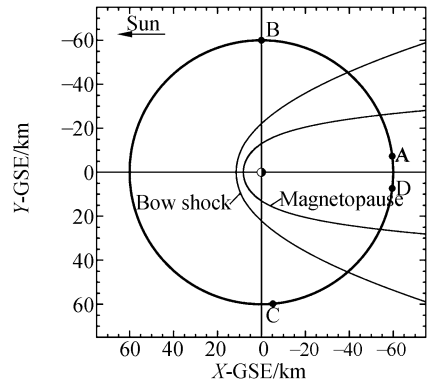


图 4 月球轨道所处空间区域示意图。其中沿逆时针方向,AB 和 CD 段为极紫外观测仪器工作区域;BC 段为月夜关机区域;DA 段为避开太阳直射区域,图中 1 格= $5 \times 6 \ 378.5 \text{ km}$

Fig. 4 Schematic of different spatial regions of lunar orbit, in which, along the anti-clockwise direction, AB and CD sectors represent the working sector of the extreme ultraviolet imager, BC sector represents the shut down sector, and DA sector represents the region where sunlight should be avoided(in the Fig, 1 div= $5 \times 6 \ 378.5 \text{ km}$ )

在太阳活动峰年,太阳质子事件会明显增加,其质子能量为  $10 \sim 100 \text{ MeV}$ ,能量大于  $10 \text{ MeV}$  的质子通量峰值可达  $10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 。根据薛炳森等<sup>[26]</sup>对第 24 太阳活动周太阳质子事件的预测,在太阳活动峰值期(2012~2015 年),年质子事件数将达 10 次,年平均质子通量( $>10 \text{ MeV}$ )约  $4.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ,最大年通量约  $1.0 \times 10^{10}$

$\text{cm}^{-2}$ , 质子事件峰值通量可达  $10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 。而在太阳活动峰年, 银河系宇宙射线质子通量 ( $> 100 \text{ MeV}$ ) 约  $0.01 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ , 可忽略不计。极紫外观测仪器关键部件 (滤光片、多层膜、探测器等) 需要按以上剂量进行辐照试验, 并采取相应加固措施, 保证极紫外观测仪器正常工作。

### 3.4 月面温度

月球表面温度由所吸收的太阳辐射和来自其内部的热量所决定。月面极限温度为  $90 \sim 420 \text{ K}$ , 并根据纬度和月球昼夜周期变化。目前还没有对月球温度分布规律的统一认识, 但普遍认为温度随纬度升高而降低。根据 Apollo 12 月球探测器的观测<sup>[27]</sup>, 月球日出时, 月表温度开始急剧上升, 并在月球正午时达到最大值约  $390 \text{ K}$ , 之后

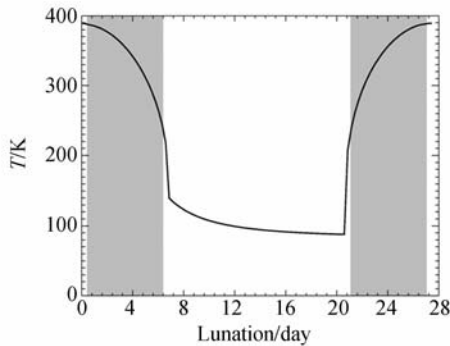


图 5 一个月球周期内的月球表面环境温度变化规律, 阴影区域代表极紫外观测仪器工作时段。

Fig. 5 Changes of the lunar surface temperature during one lunation and the gray regions represent the working period of the extreme ultraviolet imager.

开始缓慢下降, 且在进入月夜后急剧下降, 最终保持在约  $80 \text{ K}$  水平, 如图 5 所示。极紫外观测仪器位于月球朝向地球一面, 在月昼工作期间, 须经受约  $400 \text{ K}$  的高温, 进入月夜关机后, 须保证相机不被  $80 \text{ K}$  的低温冻坏。

## 4 结 论

本文研究了地球等离子体层  $30.4 \text{ nm}$  辐射特性和月球环境特性, 结果表明: 月基极紫外观测仪器视场角达到  $15^\circ$ , 空间分辨率达到  $637.85 \text{ km}$ , 动态响应范围达到  $10^3$  以上, 仪器俯仰调节范围大于  $28^\circ$ , 方位调节范围大于  $12^\circ$  时, 可确保观测到整个等离子体层; 此时虹湾区的地形地貌最简单, 地势也最平坦, 最适合进行月基极紫外观测; 月面散射的太阳  $30.4 \text{ nm}$  辐射最大强度约为  $2.0 \text{ Rayleigh}$ , 且不会进入仪器视场, 着陆区地形也不会遮挡地球等离子体层; 月面质子 (几  $\text{keV}$ ) 和电子通量 (几十  $\text{eV}$ ) 的年流量均为  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , 仪器辐射防护须满足此剂量; 月球正午时月面温度最高 (约为  $390 \text{ K}$ ), 子夜时月面温度最低 (约为  $80 \text{ K}$ ), 仪器热控须保证白天工作时能充分散热, 夜晚关机后能安全储存。本文的研究为极紫外观测仪器设计和观测模式确定提供了重要依据。

## 参考文献:

[1] FARRUGIA C J, GEISS J, YOUNG D T, *et al.*. GEOS-1 observations of low-energy ions in the earth's plasmasphere: a study on composition, and temperature and density structure under quiet geomagnetic conditions [J]. *Advances in Space Research*, 1988, 8(8): 25-33.

[2] FARRUGIA C J, GEISS J, BALSIGER H, *et al.*. The composition, and temperature and density structure of cold ions in the quiet terrestrial plasmasphere: GEOS-1 results [J]. *Journal of Ge-*

*ophysical Research*, 1989, 94(A9): 11865-11891.

[3] BRANDT J C. Interplanetary gas, VI, on diffuse extreme ultraviolet helium radiation in the night and day sky [J]. *The Astrophysical Journal*, 1961, 134(2): 975-980.

[4] CARPENTER D L. Remote sensing the Earth's plasmasphere [J]. *Radio Science Bulletin*, 2004, 308(1): 13-29.

[5] YOSHIKAWA I, NAKAMURA M, HIRAHARA M, *et al.*. Observation of the He II emission from the plasmasphere by a newly developed EUV telescope on board sounding rocket S-520-19 [J]. *Jour-*

- nal of Geophysical Research*, 1997, 102 (A9): 19897-19902.
- [6] NAKAMURA M, YOSHIKAWA I, YAMAZAKI A, *et al.*. Terrestrial plasmaspheric imaging by an extreme ultraviolet scanner on Planet-B [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(2):141-144.
- [7] SANDEL B R, BROADFOOT A L, CURTIS C C, *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the image mission [J]. *Space Science Reviews*, 2000, 91(1):197-242.
- [8] SANDEL B R, GOLDSTEIN J, GALLAGHER D L, *et al.*. Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere [J]. *Space Science Reviews*, 2003, 109(1):25-46.
- [9] YOSHIKAWA I, YAMAZAKI A, MURAKAMI G, *et al.*. Telescope of extreme ultraviolet (TEX) onboard SELENE: science from the Moon [J]. *Earth, Planets and Space*, 2008, 60(4):407-416.
- [10] YOSHIKAWA I, MURAKAMI G, OGAWA G, *et al.*. Plasmaspheric EUV image seen from the lunar orbit: initial result of extreme ultraviolet telescope onboard KAGUYA spacecraft [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(A04217):1-5.
- [11] BURCH J L, MITCHELL D G, SANDEL B R, *et al.*. Global dynamics of the plasmasphere and ring current during magnetic storms [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(6):1159-1162.
- [12] SANDEL B R, KING R A, FORRESTER W T, *et al.*. Initial results from the IMAGE extreme ultraviolet imager [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8):1439-1442.
- [13] GOLDSTEIN J, SPIRO R W, REIFF P H, *et al.*. IMF-driven overshielding electric field and the origin of the plasmaspheric shoulder of May 24, 2000 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(16):661-664.
- [14] GOLDSTEIN J, SANDEL B R, FORRESTER W T, *et al.*. IMF-driven plasmasphere erosion of 10 July 2000 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(3):461-464.
- [15] GOLDSTEIN J, SANDEL B R, HAIRSTON M R, *et al.*. Control of plasmaspheric dynamics by both convection and subauroral polarization stream [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24):SSC61-SSC65.
- [16] SPASOJEVIĆ M, GOLDSTEIN J, CARPENTER D L, *et al.*. Global response of the plasmasphere to a geomagnetic disturbance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (A9), 1340: SMP401-SMP414.
- [17] OBER D M, HORWITZ J L, GALLAGHER D L. Formation of density troughs embedded in the outer plasmasphere by subauroral ion drift events [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (A7):595-602.
- [18] HE F, ZHANG X X, CHEN B, *et al.*. Calculation of the extreme ultraviolet radiation of the earth's plasmasphere [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(1):200-205.
- [19] ARCHINAL B A, ROSIEK M R, KIRK R L, *et al.*. The Unified Lunar Control Network 2005[R/OL]. U. S. Geological Survey, 2006[2006-11-20]. <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1367/UL-CN2005-OpenFile.pdf>.
- [20] MEIER R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere [J]. *Space Science Reviews*, 1991, 58(1):1-185.
- [21] FLYNN B C, VALLERGA J V, GLADSTONE G R, *et al.*. Lunar reflectivity from Extreme Ultraviolet Explorer imaging and spectroscopy of the full Moon [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(17):3253-3256.
- [22] ARAKI H, TAZAWA S, NODA H, *et al.*. Observations of the lunar topography by the laser altimeter LALT on board Japanese lunar explorer SELENE [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2):317-322.
- [23] BOTHER V, DAGLIS I A. *Space Weather-Physics and Effects* [M]. Chichester: Praxis Publishing Ltd., 2007.
- [24] CHAO J K, WU D J, LIN C H, *et al.*. Models for the size and shape of the earth's magnetopause and bow shock [C]. *Proceedings of COSPAR-34 on Space Weather Study Using Multipoint Techniques, Taiwan*, 2002:127-136.
- [25] GEISS J, BÜHLER F, CERUTTI H, *et al.*. The APOLLO SWC experiment: results, conclusions, consequences [J]. *Space Science Reviews*, 2004, 110(2):307-335.
- [26] 薛炳森, 叶宗海. 太阳质子事件长期预报方法研究 [J]. *载人航天*, 2007, 7(3):47-53.
- XUE B S, YE Z H. Research on the long-term prediction method of solar proton events [J]. *Manned Spaceflight*, 2007, 7(3):47-53. (In Chi-

nese)

[27] CREMERS C J, BIRKEBAK R C, WHITE J E.

Lunar surface temperatures from Apollo12 [J].  
*The Moon*, 1971,3(3):346-351.

## 作者简介:



何 飞(1984—),男,四川汉源人,博士研究生,主要从事空间物理学和空间短波段光学成像技术的研究。E-mail: kahifly@163.com



张效信(1963—),男,山东昌乐人,研究员,博士生导师,1987年于吉林大学获得学士学位,1990年于中科院空间科学与应用研究中心获得硕士学位,2003年于美国 Auburn 大学获得博士学位,主要从事空间物理学及其空间天气效应的研究。E-mail: xxzhang@cma.gov.cn

## 导师简介:



陈 波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软 X 射线-极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:严 寒)

## ●下期预告

## 基于白光共焦光谱的金属薄膜厚度测量技术

马小军,高党忠,杨蒙生,赵学森,叶成钢,唐永建

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

为了精密检测自支撑金属薄膜厚度及其厚度分布,建立了基于白光共焦光谱传感器的金属薄膜厚度检测技术。本文详细讨论了该技术的测量原理及系统结构,对系统的测量不确定度进行了研究。该技术利用相向对顶安装的白光共焦传感器组、精密位移平台并结合自制的薄膜厚度校准样品,可实现对厚度在  $10\sim 100\ \mu\text{m}$  之间的自支撑金属薄膜厚度及其分布的精密检测;通过研究系统的传感器测量不确定度、薄膜厚度校准样品不确定度、上下传感器安装误差及系统重复性测量误差,获得了系统的测量不确定度数据。试验结果表明:该系统测量不确定度在  $0.12\ \mu\text{m}$  左右,基本满足 ICF 靶参数测量所需的稳定性好高、测量精度高、非破坏性测量等要求。