

月球背面 低频射电天文观测的圣地

贾瑛卓 薛长斌 邹永廖

(中国科学院国家空间科学中心 101499)

一、引言

宇宙辐射电磁波谱的任何一个波段背后,都有天体的物理现象和机理,只要能感知到,就可以寻找它们的规律。20世纪30年代,美国贝尔实验室工程师卡尔央斯基在短波高频波段偶然收到来自地球之外的天体辐射,开启了射电天文的大门。自此,电磁波成为了天文学家观测天体辐射的核心手段之一。由于地球空间存在的比较浓密的电离层,能够反射短波和中波波段的无线电波,使得电磁波无法逃出地球范围。但与此同时,来自地球以外低于10兆赫兹的电磁辐射,也无法透过地球电离层到达地面。可以说,这个波段的天文观测窗口被地球电离层“屏蔽”了。与地球相比,月球的电离层非常稀薄,在其表面的射频观测下限可以达到500 kHz,在夜间还会更低。利用月球背面“干净”电磁环境开展低频射电探测,是全世界天文学家梦寐以求的事情,将填补低频射电观测的空白。因此,嫦娥四号月球着陆探测为科学家提供了在月球背面和月球空间开展低频射电天文研究的绝佳起步机会。

嫦娥四号任务采用“月球背面软着陆+巡视+中继”的方案,由中继星和着巡组合体组成,其中继星又搭载了微卫星,着巡组合体则由着陆器和巡视器组成;着巡组合体在月球背面软着陆并开展巡视探测。

为了在月球背面开展低频射电观测,嫦娥四号搭载三种低频射电探测仪器,分别是着陆器上的低频射电频谱仪,中继星上的中-荷低频射电探测仪,

以及用于月球轨道超长波天文观测的微卫星。这三种仪器将利用月球背面没有地球电磁波干扰和天然洁净的环境,具备在月球背面和月球轨道上连续、系统地监测到类地行星射电爆发和空间电磁波环境辐射变化特性监测的能力,包括对地球千米波辐射观测,获取月球边缘电离层分布特性,将有利于揭示地-月空间天气的规律特性,揭示地-月空间等离子体环境特征,研究太阳爆发、着陆区上空的月球空间环境,并“聆听”来自宇宙更深处的“声音”。着陆器上搭载的低频射电频谱仪还会与鹊桥中继卫星上携带的荷兰研发的低频射电探测仪(NCLE)(0.1~80 MHz)协同观测,互为验证和补充。

二、月球背面低频射电探测

宇宙天体起源演化是自然科学中的基本问题之一,利用射电望远镜对来自宇宙的射电辐射进行探测是研究这一问题的重要手段。20世纪中期开

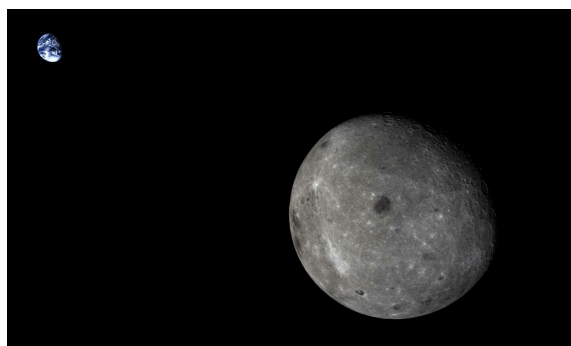


图1 嫦娥五号T1任务拍摄月球背面图,图中心黑色区域是莫斯科海,图左上角是地球

始,利用射电望远镜进行空间天文观测成为持续热点,1968年和1973年分别发射的两个射电天文探测器RAE-1和RAE-2,专门用于0.02~13.1 MHz低频射电观测^①。欧洲航天局(ESA)1997年进行了月球背面月面甚低频射电天文观测的研究,并于2015年1月提出了在月球背面着陆的FARSIDE计划,计划于2025年向月球背面发射着陆器,在着陆器上搭载用于低频射电信号观测的射电频谱仪,并与中继星搭载的低频射电频谱仪进行干涉测量。利用月球背面的着陆探测机会,布设低频射电频谱仪开展低频射电天文观测,对来自太阳系或宇宙的频率为0.1~40 MHz的低频射电辐射进行高时间-频谱分辨率的观测,实现对太阳系和太阳系以外宇宙空间低频辐射电场的观测,具有重要的科学意义。

在月球背面开展空间低频射电观测,与地球相比,月球的电离层非常稀薄,在其表面的射频观测下限可以达到500 kHz,在夜间还会更低;月球背面无地球上的无线电、闪电和极光等的干扰。月夜,强大的太阳风在月球背面也被屏蔽(如图2所示)。

月球背面是很好的低频射电观测平台,其仅有的灵敏度限制来源于银河系射电背景辐射,甚至这些信号也可以通过宽频和长时间的积分而进一步降低。作为此前从未探测过的电磁频段,月球背面的低频射电探测将阐明许多过程(如图3所示),

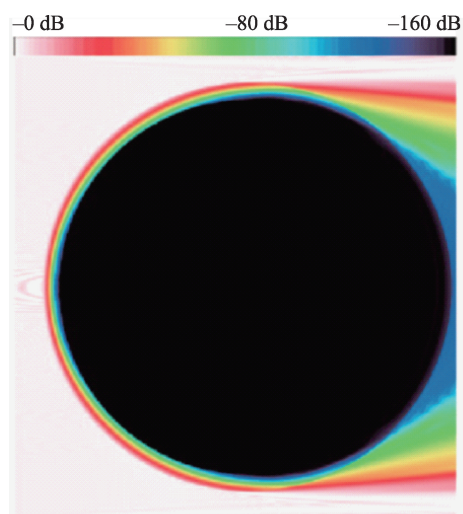


图2 60 kHz连续平面无线电波传播通过月亮及其周围时产生的衰减(左侧入射)。在月球背面,维度朝赤道方向的夹角约为45°,源自地球、太阳和木星的大功率射电信号的强度衰减因子可以达到 10^{10} ^②

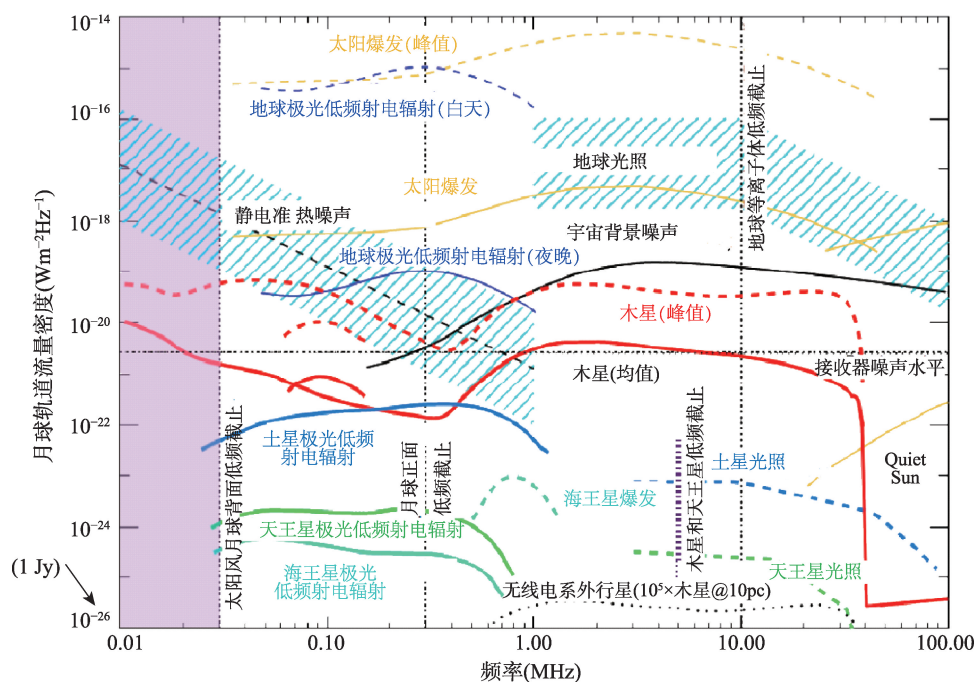


图3 月球表面上行星、太阳和已预测的外星系射电辐射水平与单偶极探测器探测到的银河背景辐射相比较。月球背面无地球(紫色/浅蓝色)干扰^③,观测范围在0.2~0.5 MHz以上。低于1MHz的波段主要受限于静电准热噪声(QTN)影响,也就是太阳风在月球轨道位置的等效密度(其上下限分别对应2~20 m的天线)。在没有太阳散射(橙色)影响的月夜,探测下限可以扩展到太阳风的截止限30 kHz。月球背面的夜晚,没有太阳辐射(橙色)。一半的月球月时间内木星(红色)的干扰是被屏蔽的

如宇宙的暗黑时代以及黎明时期,全天 21 cm 辐射的分布、暗物质与暗能量,高能宇宙射线起源等。在低频射电波段对来自宇宙空间背景、银河系、太阳、行星的信号进行测量,可为探究这些问题做出独特的贡献^{③④}。

三、嫦娥四号搭载用于低频射电探测的科学载荷

着陆器低频射电频谱仪的科学探测任务,是在月昼期间对太阳低频射电特征进行探测,对月表低频辐射环境进行探测^⑥。其功能要求是在月昼期间,在 0.1~40 MHz 的频率段探测太阳爆发产生的低频电场,给出太阳爆发低频电场的幅度随频率变化的特性,并通过观测月球电离层对太阳发电场的截止特性研究着陆点上空月球电离层的特性,并反演着陆点上空电离层等离子体频率峰值和电子总含量,同时在月昼期间监测月表低频辐射电场的变化情况^⑦。

搭载于鹊桥中继星上的低频射电探测仪,将与嫦娥四号低频射电探测仪协同观测。由于处在地月拉格朗日 L2 点,中继星上的探测仪可以探测研

究太阳低频射电特征和地月空间低频射电环境,连续监测地球千米波辐射爆发,探究其带来的空间扰动,还有望在行星际激波、日冕物质抛射和高能电子束的产生机理等方面取得原创性成果。除了观测太阳、地球、月球,低频射电探测仪还有望观测到银河系中普遍存在的宇宙线电子,揭示宇宙线的起源与传播过程,同时探测银河系电离气体云的分布^⑧。在银河系之外,射电星系的辐射往往来自中心大质量黑洞活动时产生的喷流。这些喷流逐渐冷却,其辐射频率也逐渐降低,因此低频观测还可能看到更古老的喷流,从而加深对黑洞活动的认识^⑨。更激动人心的可能性,是用低频射电探测仪观测探索宇宙大爆炸结束后的黑暗时代,以及此后第一代恒星形成时的宇宙黎明。

月球轨道超长波天文观测微卫星的科学探测任务是开展全天图像获取和全天射电频谱测量等超长波天文探索研究,获取高分辨率超长波段天空图像,研究射电源低频辐射性质,观测全天射电频谱,探索宇宙黑暗时代,观测太阳和系内行星超长波射电活动等。两颗月球轨道超长波天文观测微卫星采用绕月编队飞行的形式,在轨形成分布式干涉仪,利用月球背面优越的射电环境,进行超长波射电观测,构建全球首个星间干涉射电天文观测系统。

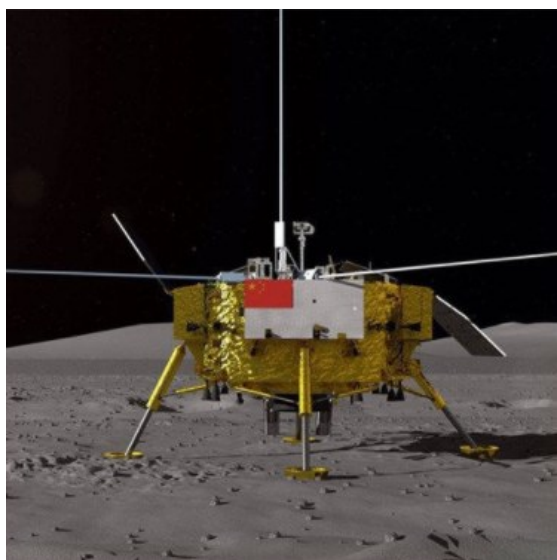


图4 低频射电频谱仪3根5米长的天线,可以分别接收电磁波信号三个相互垂直分量

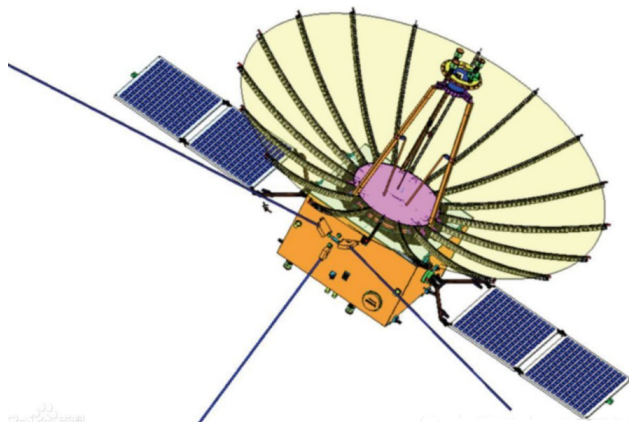


图5 中继星上的低频射电探测仪3根天线

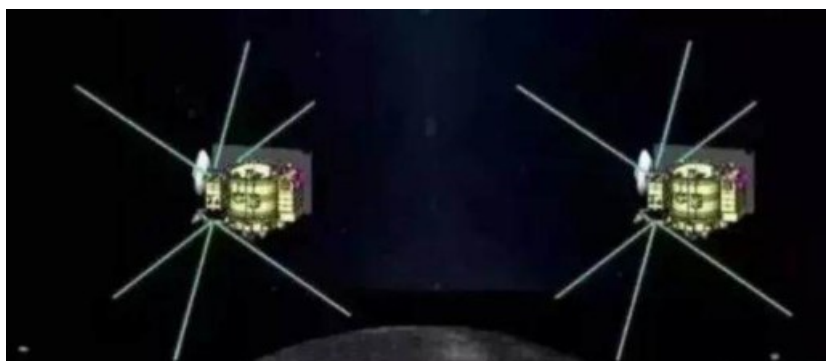


图6 与嫦娥四号任务“鹊桥”中继星一同发射的两颗月球轨道超长波天文观测微卫星,搭载了由中国科学院国家空间科学中心研制的低频射电探测仪,探测1~30 MHz的频谱信息,开展全天空辐射谱等试验与科学研究

四、小结

月球背面低频射电观测将极大推动对宇宙的发生、发展、演化、结局等重要的科学问题的思考和研究。嫦娥四号任务搭载的三种低频射电探测科学载荷所开展的探测活动,是月基低频射电探测方法的初步探索和尝试,也是天文观测领域的一次技术创新,如果能获取科学探测数据,将丰富人类对宇宙的认识,引爆空间科学及天文学领域国际研究热点。

参考文献

- ① Alexander, J.K., M. L. Kaiser, J. C. Novaco, F. R. Grena, and R. R. Weber (1975). Scientific instrumentation of the Radio-Astronomy-Explorer-2 satellite, *Astron. Astrophys.*, 40, 365-371.
- ② Takahashi, Y. D. (2003). New astronomy from the Moon: A lunar based very low frequency array, M.Sc. thesis, University of Glasgow, 90pp.
- ③ Bely P.Y., R. J. Laurance, S. Volonte, R. R. Ambrosini, A. Ardenne, C. H. Barrow, J.-L. Bougeret, J. M. Marcaide, and G. Woan (1997). Very Low Frequency Array on the Lunar Far Side. *ESA report SCI(97)2*, European Space Agency.
- ④ Jester, S., and H. Falcke (2009). Science with a lunar low-frequency array: From the dark ages of the Universe to nearby exoplanets, *New Astron. Rev.*, 53, 1-26.
- ⑤ Zarka, P., J.-L. Bougeret, C. Briand, B. Cecconi, H. Falcke, J. Girard, J.-M. Griessmeier, S. Hess, M. Klein-Wolt, A. Konvalenko, L. Lamy, D. Mimoun, and A. Aminaei (2012). Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon, *Planet. Space Sci.*, 74, 156-166.

- ⑥ Yingzhuo Jia, Yongliao Zou, Jinsong Ping, Changbin Xue, Jun Yan, Yuanming Ning. The scientific objectives and payloads of Chang'e-4 mission, *Planetary and Space Science*, Volume 162, 2018, Pages 207-215, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.02.011>.
- ⑦ Zarka, P., J.-L. Bougeret, C. Briand, B. Cecconi, H. Falcke, J. Girard, J.-M. Griessmeier, S. Hess, M. Klein-Wolt, A. Konvalenko, L. Lamy, D. Mimoun, and A. Aminaei (2012). Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon, *Planet. Space Sci.*, 74, 156-166.
- ⑧ Takahashi, Y. D. (2003). New astronomy from the Moon: A lunar based very low frequency array, M.Sc. thesis, University of Glasgow, 90pp.
- ⑨ Lamy, L. (2011). Variability of Southern and Northern SKR periodicities, in "Planetary Radio Emissions VII", H. O. Rucker et al. eds., Austrian Acad. Sci. Press, Vienna, pp. 39-50.

