

张辉, 张贤国, 曹晋滨. 2027. 月球带电粒子环境综述[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 58(1): 1-48. doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-061.

Zhang H, Zhang X G, Cao J B. 2027. Review of the lunar charged particle environment[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 58(1): 1-48 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2025-061.

月球带电粒子环境综述

张 辉^{1,2*}, 张贤国^{3*}, 曹晋滨^{4*}

1 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理学科中心, 北京 100029

2 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

3 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

4 北京航空航天大学 空间与地球科学学院, 北京 100191

摘要: 带电粒子是月球空间环境的主要要素之一. 它们的来源、成分与能量分布较为复杂, 其空间分布及动态变化又与较小尺度的电磁场结构耦合, 使得月球空间环境迥异于具有宏大磁场的地球或行星. 相比地球, 对月球空间环境的探测手段相对单一, 探测频次也较低, 特别是对月面及 20 km 高度以下空间的就位探测极少, 这都导致对月球空间带电粒子的起源、浓度、动态及其可能的空间效应和危害的理解并不全面. 本文尽可能多地收集并系统性整理了自阿波罗时代以来人类探测月球带电粒子的研究成果, 试图展示当前的探测研究的脉络. 由于对地外空间的认识强烈依赖各个国家深空探测项目的实施, 因此, 首先对各国的探月任务、载荷和科学目标进行罗列, 以期展示人类探月兴趣点的变迁. 由于月面电磁场与带电粒子之间难以分割的耦合关系, 本文随后对月球电磁场的现有认识做介绍. 对月球带电粒子环境综述的主体部分, 以“月球轨道背景空间环境与月球相互作用”和“月球空间带电粒子种类”为两条主线, 对探测研究成果进行系统性梳理. 可以看到有些探测和理论之间, 甚至是不同的探测结果之间, 都存在很大差别, 甚至相互矛盾. 这些不确定性可能正是未来探测研究需要关注的方向.

关键词: 月球; 空间环境; 带电粒子; 月球磁场; 月球电场; 太空风化; 月尘

doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-061

中图分类号: P354

文献标识码: A

Review of the lunar charged particle environment

Zhang Hui^{1,2*}, Zhang Xianguo^{3*}, Cao Jinbin^{4*}

1 Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

4 School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Charged particles constitute one of the essential physical elements within the lunar space environment. Their origins, compositions and energy spectra are remarkably complex, and their spatial distribution and temporal dynamics are intricately coupled with localized electromagnetic field structures, rendering the lunar space environment fundamentally distinct from that of Earth or other magnetized planetary bodies. Compared to Earth, our methods for probing the lunar space environment remain relatively limited, both in terms of observational tech-

收稿日期: 2025-12-14; 录用日期: 2026-01-19

Received Date: 2025-12-14; Accepted Date: 2026-01-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (42530207); 国家自然科学基金面上项目 (42474227)

Supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42530207) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42474227)

*通信作者: 张辉 (1978-), 男, 研究员, 主要从事月球空间物理与磁层物理的研究. E-mail: hzhang@mail.iggcas.ac.cn

张贤国 (1979-), 男, 研究员, 主要从事深空探测技术研究. E-mail: zhangxg@nssc.ac.cn

曹晋滨 (1964-), 男, 教授, 主要从事空间天气、磁层物理、空间环境探测技术研究. E-mail: jbcas@buaa.edu.cn



niques and detection frequency. Notably, in situ measurements within the critical region encompassing the lunar surface and the low-altitude zone below 20 kilometers are exceptionally sparse. These observational gaps have collectively led to a fragmented and incomplete understanding of the fundamental characteristics of lunar charged particles, including their genesis, density fluctuations, dynamic behavior, as well as their potential spatial effects and associated hazards for exploration infrastructure and human activity.

This review aims to synthesize and systematically organize the research findings from observations of lunar charged particles dating back to the Apollo era, endeavoring to present a coherent picture of the current state of knowledge and the trajectory of exploration. Recognizing that our comprehension of extraterrestrial space is profoundly shaped by the execution of national and international deep-space exploration programs, Section 1 begins by cataloging the key lunar missions undertaken by various nations, along with their primary scientific payloads and objectives. This historical overview is intended to illustrate the shifting priorities and evolving interests in lunar exploration over the decades. Given the inextricable coupling between charged particles and ambient electromagnetic fields, Section 2 provides a concise summary of the current understanding of lunar electromagnetic fields, encompassing both crustal magnetic anomalies and global fields, either transiently induced or permanently intrinsic.

The core of this review is structured along two parallel analytical threads. The first, covered in Sections 3 through 5, focuses on the "Background space environment along lunar orbit and its interactions with the Moon". This part examines the solar wind and geomagnetospheric plasma populations as they encounter and interact with the Moon, leading to phenomena such as absorption, reflection, and the formation of wake structures. The second thread, spanning Sections 6 to 11, is organized by "Types of charged particles in lunar space". Here, we systematically review observational results and theoretical models pertaining to specific particle populations, including photoelectrons, secondary electrons, exospheric neutrals, lunar dust, high-energy rays, and particles generated by human activities.

Throughout this synthesis, it becomes evident that significant discrepancies and even outright contradictions exist, not only between theoretical predictions and observational data but also among different observational datasets themselves. These inconsistencies highlight the challenges inherent in remote and in situ space physics measurements and point to critical gaps in our current knowledge. Such uncertainties and unresolved questions likely define the most promising and necessary directions for future targeted investigations, requiring more advanced instrumentation, coordinated multi-point measurements, and sustained observation campaigns to unravel the complex electrodynamic environment of our closest celestial neighbor.

Keywords: Moon; space environment; charged particles; lunar magnetic field; lunar electric field; space weathering; lunar dust

0 引言

带电粒子是理解月球空间环境的重要载体和线索. 月球每 29.5 天周期性地穿梭于太阳风和地球磁层环境. 月球与背景空间环境的相互作用过程不仅产生带电粒子, 而且还改变各类带电粒子的运动特性和空间分布, 并可能产生空间环境效应. 这里所指的月球带电粒子主要包括电子、氢离子及其他种类繁多、能量各异的其他离子以及带电月尘. 它们起源复杂, 可能直接来自太阳风或地球磁尾的背景等离子体, 也可能来自宇宙射线、太阳光、背景空间等离子体、流星体或微流星体轰击月面的产物或

次级产物. 它们的形成和动态受月球电场环境、磁场环境、甚至月面和内部物理化学性质影响; 反之, 它们的存在又改变月球电磁环境和月面性质.

本文尽可能多地收集阿波罗时代以来关于月球空间带电粒子的探测和研究成果, 并做系统性的整理. 随着探测技术手段的不断提升, 人们对月球的认识也不断更新, 本文尽力展示探测和研究的脉络, 但并不试图对探测和研究结果进行评判.

本文将首先简单罗列文中涉及的探测任务和探测设备. 因为月球电磁场与带电粒子高度耦合, 接着对月球轨道以及月面的磁场环境和电场环境做介绍. 然后, 综述月球空间带电粒子的探测研究, 按

照如下结构进行: 太阳风与月球; 磁层等离子体与月球; 月球轨道上其他空间结构与月球; 光电子; 次级电子; 月球逃逸层与电离层; 月尘; 高能粒子与月球; 人为和流星体撞击等离子体. 这些内容高度交叉, 这种结构安排并不能将目前的探测研究内容无重复地论述.

1 本文涉及的月球空间环境主要观测设备

1.1 Surveyor 系列任务 (1966—1968)

“勘测者号”(Surveyor)系列任务, 是美国国家航空航天局(NASA)为准备阿波罗登月任务而向月球发射的七艘航天器. 拍摄月面照片是这系列月球着陆器的主要任务之一, 因此, 月球地平辉光得以发现. Surveyor-1 是该系列中的第一艘飞船, 也是第一艘真正在月球上软着陆的航天器. 该任务的着陆信息为(Oceanus Procellarum; 2.474°S, 43.339°W; 1966-05-30). 在本文的后续章节中, 涉及到月球着陆信息时, 都以这种格式给出, 括号里分别为着陆点地名、月球地理坐标系经纬度以及着陆日期. Surveyor-1 在发射后大约 30 天时间内, 传送了 1.1 万多张照片, 以及月球表面的温度数据. Surveyor-2 (1966-09-20) 着陆失败. Surveyor-3 (Oceanus Procellarum; 3.015°S, 23.418°W; 1967-04-17), 对月壤进行了分析研究, 特别分析了着陆舱对月表的影响, 传回了 6000 多张周边环境的照片, 收集了月壤雷达反射率和热特性信息. Surveyor-4 (1967-07-14) 登陆器失联. Surveyor-5 (Sea of Tranquillity; 1.461°N, 23.195°E; 1967-09-08) 配备了用于分析月壤化学元素的设备, 是第一个在地球之外进行土壤分析的航天器. 三天内传回了两万多张照片, 并证实月表由玄武岩组成而不是呈现粉末状, 这对载人登月有重要价值. Surveyor-6 (Sinus Medii; 0.473°N, 1.427°W; 1967-11-07) 是第一个从月球表面发射航天器的月球登陆任务, 所发射的航天器飞行了 3 m 高、2.5 m 远, 进一步验证了月球土壤是玄武岩, 这是阿波罗任务规划者所急需的结果. 该航天器传回了近三万张月球照片, 其中一些是航天器登陆足迹的照片, 这有助于进一步确定月壤力学特性. Surveyor-7 (Tycho Crater Rim; 40.98°S, 11.509°W; 1968-01-07) 是该系列任务中唯一降落

在月面高地的航天器, 也是该系列中载荷最多的任务, 对高地化学成分进行了分析, 发现高地的月壤铁含量低于月海地区.

1.2 Explorer-35 (1967)

Explorer-35 于 1967 年 7 月 19 日发射, 其绕月轨道参数为 $5.4 \times 1.4 R_L$ (月球半径, $1 R_L = 1738 \text{ km}$), 轨道周期为 11.5 h. 卫星自旋稳定, 自转周期 2.5 s, 自转轴沿黄道面法向向南. 携带的粒子探测器载荷为 M.I.T 法拉第杯(modulated Faraday cup), 开孔在黄道面内, 垂直于卫星自转轴. 离子探测能量范围为 80~2850 eV; 电子探测具有 8 个能道, 能量范围覆盖 150 eV~3 keV (Lyon et al., 1967). 磁场探测为 Ames 磁强计 (Colburn et al., 1967; Ness et al., 1967).

1.3 Apollo 系列任务 (1969—1972)

本文涉及的阿波罗(Apollo)任务有 Apollo-11 (Mare Tranquillitatis; 0.688°N, 23.433°E; 1969-07-20)、Apollo-12 (Oceanus Procellarum; 3.198°S, 23.386°W; 1969-11-19)、Apollo-14 (Fra Mauro; 3.673°S, 17.465°W; 1971-02-05)、Apollo-15 (Hadley-Apennines; 26.101°N, 3.653°E; 1971-07-30)、Apollo-16 (Descartes; 8.991°S, 15.514°E; 1972-04-21)、Apollo-17 (Taurus-Littrow; 20.165°N, 30.766°W; 1972-12-11). 因为人们对月球自身形状的认识不断提高, 后续发布的登陆点的地理坐标略有修改.

LM (Grumman Apollo Lunar Module) 是阿波罗载人登月期间, 宇航员从月球轨道下降到月面, 以及宇航员从月表再次起飞并回到月球轨道的基地性设备.

CSM (Command and Service Modules) 是宇航员登陆月面前和离开月面后, 与 LM 对接的月球轨道器.

ALSEP (Apollo Lunar Surface Experiments Package) 是多次 Apollo 任务期间, 由宇航员安装在月面上的探测设备包. 每次任务中, 其包含的具体探测设备种类略有不同. 以 Apollo-12 的 ALSEP 为例, 它包含的探测设备有: ASE (Active Seismic Experiment)、CPLEE (Charged Particle Lunar Environment Experiment)、CCIG (Cold Cathode Ion Gauge)、HFE (Heat Flow Experiment)、LRRR (Laser Ranging Retroreflector)、LACE (Lunar Atmosphere Composition Experiment)、LEAM

(Lunar Ejecta and Meteorites Experiment)、LSPE (Lunar Seismic Profiling Experiment)、LSG (Lunar Surface Gravimeter)、LSM (Lunar Surface Magnetometer)、PSE (Passive Seismic Experiment)、PSEP (Passive Seismic Experiment Package)、SWS (Solar Wind Spectrometer Experiment) 和 SIDE (Suprathermal Ion Detector Experiment)。ALSEP 与粒子探测相关的设备为 CPLEE、SIDE 和 SWS; 与月尘探测相关的为 LEAM; 月面磁场数据来自 LSM。

以 Apollo-4 任务为例, CPLEE (O'Brien and Reasoner, 1971) 设备可以直接观测能量范围为 20 eV~50 keV 的电子和离子在给定方向速度分布。它有两个探头, 探头 A 垂直月面向上, 探头 B 由月面法向偏西 60°, 它们的粒子入射孔距离月面 26 cm 高, 可以有效观测月面向下的带电粒子。

SIDE 设备测量到达月球表面的正离子的能量和质量, 这些离子包括磁层离子、月球逃逸层光致电离产生的离子和太阳风/月球表面相互作用产生的离子 (University, 1975)。

SWS 是由 7 个法拉第杯探测器组成的, 每个探测器在 75~9600 eV 能量区间按 14 个对数等分的能量通道探测离子, 在 10~1400 eV 能量区间按 7 个能量通道探测电子, 每个能道稍有重叠, 这样可以覆盖整个能量区间。其中 7 号探测器基本垂直月面放置, 其余探测器环绕在其侧面, 倾角为 60°, 每个探测器的入射开孔半宽度为 27°。4 号探测器朝东; 1 号探测器朝西; 2、3 号探测器分别朝西北和东北; 5、6 号探测器朝东南和西南 (Neugebauer et al., 1972; Snyder et al., 1970)。

LEAM 用于探测撞击溅射物和陨石的设备。以 Apollo-17 任务期间的 LEAM 为例, 它拥有三个相同的探头, 每个探头呈方锥形, 半视场宽为 60°, 角分辨率为 26°, 构成 4×4 的探测器单元。三个探头分别指向东 (偏东北 25°)、朝上 (垂直月面) 和朝西 (偏西南 25°)。西向探头视场覆盖了太阳系在银河系中的运动方向 (solar apex), 可以观测来自黄道面的粒子。由于着陆点附近地形的影响, 东西两个方向探头的 60% 视场被山地遮挡。东向和朝上的探头结构是一样的, 从外向内都具有两组粒子探测器; 每组探测器都具有抑制板 (suppressor, 位于最外层, 负偏置电压, 屏蔽撞击生成的电子)、收集板 (collector, 位于外边第二层, 正偏置电压, 收集撞击电子)、胶卷框 (film frame, 位于中间, 负

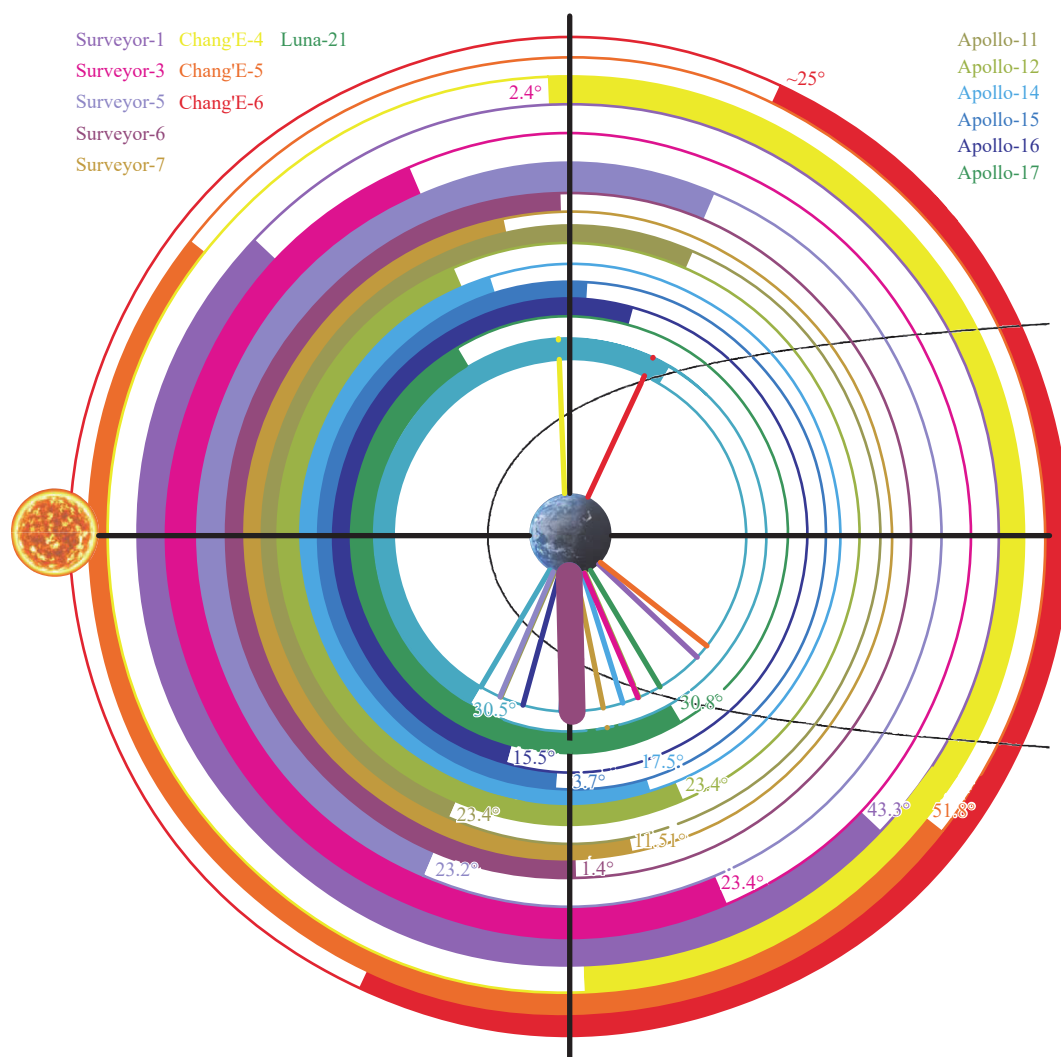
偏置电压, 收集撞击生成的离子, 信号强度由粒子能量决定)。两组探测器前后排列, 相隔 10 cm, 可以通过飞行时间确定入射粒子的速度和方向。设计探测尘埃的能量范围为 1~1000 Erg (1 Erg=10⁻⁷ J), 通量大于 0.0001 /m²/s, 飞行时间探测器可以测量的粒子速度范围为 2~72 km/s。在第二组探测器后部安有麦克风 (microphone)。如果入射粒子动量够大, 抵达麦克风, 可以产生振动信号, 从而可以根据振动强度反演入射粒子的剩余能量。朝西的探头与其他两个探头不一样, 它只由一组探测器和麦克风组成。这样的设计虽然不能分辨入射粒子的速度和方向, 但可以保证低速粒子在探测器处受到较少的阻滞, 并且可以抵达麦克风。Apollo-17 期间, LEAM 在日落、月夜和日出时分开机, 在月昼期间大约 8.3 个地球日因热保护而不开机 (见图 1)。

1.4 Luna 系列任务 (1971—1974)

Luna-19, 苏联的月球轨道器。1971 年 10 月 3 日发射, 轨道高度为 140×140 km, 轨道倾角 40.58°。主要科学目标: (1) 提供月球南纬 30°至 60°、东经 20°至 80°之间的山区全景图像; (2) 对月球重力场以及质量瘤进行探测; (3) 掩星测量月球 10 km 高度电子浓度。在经过一年约 4000 多次绕月轨道运行后, 1972 年 11 月 1 日失联。

Luna-21, 苏联的月球登陆器, 月球车名称为 Lunokhod-2。卫星于 1973 年 1 月 12 日发射, 1 月 15 日登陆月球, 着陆点信息为 (LeMonnier Crater; 25.850°N, 30.450°E; 1973-01-15)。1 月 16 日 01:14 UT, 月球车 Lunokhod-2 离开着陆舱。月球车利用钚-210 同位素热源维持月夜期间的设备温度。月球车携带 4 台全景摄像机、土壤力学测试、太阳 X 射线实验仪、可见光和紫外线天文光度计、以及安装在月球车前端 2.5 m 吊杆末端的磁力计、辐射计、和用于激光探测实验的光电探测器 (Rubin-1) 和法国提供的激光角反射器。本文涉及到的仪器为光度计 (Severny et al., 1975)。

Luna-22, 苏联的月球轨道器。1974 年 5 月 29 日发射。1974 年 6 月 2 日进入圆形月球轨道。在其 18 个月生命周期中进行了多次轨道调整, 最低轨道高度 25 km。该轨道器的载荷有全景相机, 还有用于研究月球磁场、表面伽马射线和月球表面岩石组成、引力场以及微陨石和宇宙射线的设备。机动燃料于 9 月 2 日耗尽, 任务于 11 月初结束。



注: 由图可以看到, 只有中国的 Chang'E-4 和 Chang'E-6 位于月球背面, 因此, 当地月昼时, 这两次任务的着陆点区域完全沉浸在太阳风等离子体中. 地球磁层顶的位置由 Shue 等 (1997) 模型给出, 输入其中的参数为太阳风典型值: 太阳风动压为 1.59 nPa、行星际磁场 B_z 分量为 0 nT. 图中 Chang'E-6 所示的位置大约为月球的轨道位置, 即 $60 R_L$, 其余任务的月球轨道只体现相对地球方位角或月球相位角, 与地球距离不具有物理意义. 图中平面大致为黄道面, 横坐标沿日地连线指向太阳; 纵坐标朝上指向地球公转方向. 图中数字表示着陆点位置日出时, 地月连线与图中纵坐标轴所夹的锐角; 图中射线指出着陆点日出时所在的月球轨道相位角.

图 1 中国、苏联和美国的月球着陆器昼夜随月球轨道相位角的分布示意图. 着色区域为着陆点当地的月夜; 空白区域为着陆点当地的月昼. 不同颜色表示不同任务

Fig. 1 A schematic diagram showing the distribution of lunar landers of China, the Soviet Union and the United States along with the lunar orbital phase angle throughout the lunar day and night. Colored areas represent the lunar night at the landing site. Blank areas represent the lunar day at the landing site. Different colors indicate different missions

1.5 Lunar Prospector (1998—1999)

NASA 的月球轨道器 LP (Lunar Prospector), 1998 年 1 月 7 日发射. 极轨卫星, 初始轨道高度 100 km, 轨道周期 118 min. 1998 年 12 月 10 日降低轨道至 40 km. 1999 年 1 月 28 日再次调整轨道至 15×45 km 高度. 1999 年 7 月 31 日 09:52:02 UT 人为操作将其撞击到月球表面 Shoemaker 撞击坑阴影区内, 地面望远镜对撞击产生的尘埃云进行了观测, 没有观测到水汽的光谱特征. 携带的载荷有: MAG/ER (Electron Reflectometer and Magnetome-

ter)、GRS (Gamma-ray Spectrometer)、NS (Neutron Spectrometer)、APS (Alpha Particle Spectrometer) 和 DGE (Doppler Gravity Experiment). 主要科学目标是编制完整的月球重力图、磁场和成分分布图. 中子谱仪探测到月表氢, 可能是极区水冰的证据. 磁力仪数据表明月球可能存在直径 600 km、富含铁的月核的迹象.

1.6 嫦娥工程 (2007—)

嫦娥工程是中国探月工程 (Chinese Lunar Exploration Program, CLEP) 的简称. 本文内容涉及

的探测来自于 Chang'E-1、Chang'E-2、Chang'E-4、Chang'E-5 和 Chang'E-6。

Chang'E-1 于 2007 年 10 月 24 日发射, 极轨卫星, 轨道高度大约 200 km, 轨道周期 127 min. 其携带的探测器包括微波探测仪系统、 γ 射线谱仪、X 射线谱仪、激光高度计、太阳高能粒子探测器、太阳风离子探测器、CCD 立体相机、干涉成像光谱仪。

Chang'E-2 于 2010 年 10 月 1 日在西昌卫星发射中心发射升空, 10 月 6 日进入环月轨道; 2011 年 8 月 25 日卫星进入拉格朗日 L2 点环绕轨道。2012 年 12 月 15 日 Chang'E-2 工程宣布收官。卫星携带的载荷有: CCD 立体相机、微波探测仪、太阳高能粒子探测器等多种载荷。

Chang'E-4 于 2018 年 12 月 8 日发射, 是人类第一个着陆月球背面的探测器, 首次实现了月球背面的软着陆和巡视勘察。本文涉及到其月球车 Yutu-2 上的 ASAN (Advance Small Analyzer for Neutrals) 设备, 可以探测月面中性原子。着陆地点信息为 (Von Kármán crater; 45.5°S, 177.6°E; 2018-12-08)。

Chang'E-5 于 2020 年 11 月 24 日发射升空, 是中国首个实施无人月面取样返回的月球探测器, 为中国探月工程三期的收官之战。2020 年 12 月 1 日 23 时 11 分, 探测器成功着陆在月球正面 (Mons Rumker; 43.0°N, 51.8°W; 2020-12-01)。本文涉及到该着陆点的返回样品。

Chang'E-6 于 2024 年 5 月 3 日在中国文昌航天发射场发射升空。探测器是作为嫦娥五号的备份一同研制, 其系统构成相同。嫦娥六号由轨道器、返回器、着陆器、上升器四部分组成, 开展月面自动采样并由返回器携带月壤最终返回地球。嫦娥六号着陆区为月球背面南极-艾特肯盆地 (South Pole Aitken Basin; 41.0~44.0°S, 150.0~158.0°W; 2024-05-03), 在该地点进行形貌探测和地质背景勘察, 发现并采集不同地域、不同时期的月球样品。为增进国际合作, 嫦娥六号任务搭载了法国的氦气探测仪、欧空局的负离子探测仪、意大利的激光角反射镜、巴基斯坦的立方星等四个国家的载荷和卫星项目。

1.7 Kaguya (2007—2009)

月亮女神号月球轨道器, 起初名称为 SELENE, 是日本的第二次月球轨道探测器 (Saito et al., 2008a)。它于 2007 年 9 月 14 日发射。它由一颗主

卫星和两颗子卫星组成 (Okina 和 Ouna)。Kaguya 主卫星运行轨道高度为 101×11741 km。2007 年 10 月 9 日释放两颗子卫星, 其轨道高度分别为 115×2399 km (Okina) 和 127×795 km (Ouna)。这样的位置安排有利于进行星星掩星测量。其空间载荷有: XRS (X-ray Spectrometer)、GRS (Gamma-ray Spectrometer)、MI (Multi-band Imager)、SP (Spectral Profiler)、TC (Terrain Camera)、LRS (Lunar Radar Sounder)、LALT (Laser Altimeter)、LMAG (Lunar Magnetometer)、CPS (Charged Particle Spectrometer)、PACE (Plasma Energy Angle And Composition Experiment)、RS (Radio Science Experiment)、UPI (Upper Atmosphere And Plasma Imager)、RSAT (Four-way Doppler Measurements By Relay Satellite And Main Orbiter Transponder)、VRAD (Differential VLBI Radio Source Experiment)、HDTV (High-definition Television)。主要科学目标是研究月球的起源和地质演化, 研究月球表面环境, 并进行无线电科学实验。

主卫星三轴稳定, 子卫星自旋稳定。本文涉及的掩星测量利用的是 LRS 子系统中的 NPW (Natural Plasma Wave Receiver) 和 WFC (Waveform Capture) 设备。与空间环境相关的设备为 LMAG 和 PACE。PACE 由四组设备组成: ESA (Electron Spectrum Analyzer) -S1 (<15 keV)、ESA-S2 (<15 keV)、IMA (Ion Mass Analyzer, <28 keV/q) 和 IEA (Ion Energy Analyzer, <28 keV/q)。每个粒子探测器均为半球视场, 由于 Kaguya 为三轴稳定卫星, ESA-S1 与 ESA-S2, IMA 与 IEA 分别形成电子和离子的全向探测能力。PACE 的科学目标包括: (1) 测量月球表面和月球大气中溅射的离子; (2) 利用 Kaguya 上的两个 ESA 和一个磁强计同时作为电子反射计测量月球表面的磁异常; (3) 解析月球-太阳风相互作用; (4) 解析月球-地球磁层相互作用; (5) 观测地球磁尾。

1.8 Chandrayaan 系列任务 (2008—2009)

Chandrayaan-1, 月船一号, 2008 年 10 月 22 日发射, 是印度的第一个深空任务。经过多次轨道修正后, 该卫星于 2008 年 11 月 12 日最终抵达确定的极轨, 轨道高度为 100 km。轨道器的载荷有: TMC (Terrain Mapping Camera)、HySI (Hyper Spectral Imager)、LLRI (Lunar Laser Ranging Instrument)、HEX (High Energy X-ray Spectrome-

ter)、CIXS (Chandrayaan-1 X-ray Spectrometer)、SIR-2 (Near Infrared Spectrometer)、SARA (Sub Kev Atom Reflecting Analyzer)、Mini SAR (Miniature Synthetic Aperture Radar)、M3 (NASA's Moon Mineralogy Mapper) 和 RADOM (Radiation Dose Monitor)。轨道飞行器还释放了一个故意撞向月球的撞击器, 轨道器则负责观测分析撞击过程。11 月 14 日, 月球撞击探测器 (Moon Impact Probe, MIP) 从轨道器分离, 并撞击在南极 Shackleton Crater 附近。MIP 上的探测设备有: Radar Altimeter、Video Imaging System、Chandra's Altitudinal Composition Explorer (Mass Spectrometer)。2009 年 9 月, 科学家公布美国 M3 仪器收集的数据结果, 声称该仪器检测到的极区谱线吸收特征表明月球极区富含羟基或水分子。这是该任务最重要的探测结果。2013 年 8 月又宣布月球表面矿物颗粒能够锁住水分子的证据, 这些水源自岩浆或源自月球内部深处。

本文提及的带电粒子和中性原子的探测研究中, 大多结果来自 SARA。SARA 是探测太阳风等离子体与月球表面相互作用的仪器, 它由两个传感器 (质谱仪) 组成: 太阳风离子监测器 (Solar Wind Ion Monitor, SWIM) 和月船 1 号高能中性分析仪 (Chandrayaan-1 Energetic Neutral Analyzer, CENA)。SWIM 测量来自太阳风的离子, 能量范围为 10 eV~15 keV; CENA 测量来自月球表面的中性原子, 能量范围为 10 eV~3.3 keV。两个传感器都有类似的设计: (1) 抑制部分确保只有具有特定特征的粒子才能进入系统; (2) 电离子系统在必要时将中性转化为离子; (3) 静电分析仪负责能量分析; (4) 飞行时间系统提供质量分析。

Chandrayaan-2, 月船二号, 2019 年 7 月 22 日发射, 是印度首次尝试在月球上软着陆的深空项目。这次任务包括轨道飞行器、着陆器和月球车。本文仅用到其与地面台站对月球电离层的掩星测量数据。

1.9 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) (2009)

LRO 于 2009 年发射, 极轨卫星, 轨道高度 50 km。主要科学目标是绘制月球表面高分辨率的 3D 地图, 以确定着陆点和潜在资源, 调查月球的辐射环境, 并为未来的自动化和人类任务验证新技术。本文涉及到卫星上的月球探测中子探测器 LEND (Lunar Exploration Neutron)、紫外光谱仪

LAMP (Lyman-Alpha Mapping Project) 以及 CRTER (Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation)。

1.10 ARTEMIS 卫星 (2011)

ARTEMIS 卫星计划, 由两颗卫星组成, 赤道星, 轨道高度多变, 但主要维持在 $100 \text{ km} \times 11 R_L$ 的椭圆轨道。ARTEMIS 计划是 NASA 的 THEMIS 地球轨道卫星的延续, 由 THEMIS 任务中的两颗远离地球的卫星变轨而来。携带的探测器主要进行空间环境探测, 具体包括: 电场探测仪 EFI (Electric Field Instruments)、磁通门磁强计 FGM (Fluxgate Magnetometers)、搜索线圈磁强计 SCM (Search Coil Magnetometers)、静电分析器 ESA (Electrostatic Analyzers)、高能粒子探测器 SST (Solid State Telescopes)。

1.11 LADEE (2013)

月球大气和尘埃环境探测器 (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE), 该卫星环绕月球并撞击月球, 以收集有关月球大气、月表附近空间环境以及环境对月球尘埃影响等信息。该卫星于 2013 年 9 月 6 日发射, 卫星运行于近圆轨道, 至 2014 年 4 月 18 日, 卫星按计划撞击月球, 项目结束。其撞击坑被 LRO 卫星相机拍摄。卫星的载荷有: NMS (Neutral Mass Spectrometer)、UVS (Ultraviolet/Visible Spectrometer)、LDEX (Lunar Dust Experiment)、LLCD (Lunar Laser Communications Demonstration)、LLST (Lunar Lasercom Space Terminal)、LLGT (Lunar Lasercom Ground Terminal)。本文中涉及到的设备有 NMS 和 LDEX。

NMS 主要观测 1~150 质量数范围的中性成分的丰度和变化, 这些中性原子包括: He (来自太阳风)、Ar-40 和 Rn-222 (来自月球内部)、K 和 Na (来自月球风化层) 等。

LDEX 旨在绘制月球环境中尘埃大小和密度分布的时空变化。LDEX 是一种撞击电离尘埃探测器, 可在 LADEE 轨道高度为 50 km 及以下的地方原位探测尘埃撞击, 具体探测参数为: 粒子质量 $m \geq 1.7 \times 10^{-16} \text{ kg}$ (粒径 $\geq 0.3 \mu\text{m}$); 撞击速度 $> 1.7 \text{ km/s}$ 。尘埃粒子撞击半球形探测器会产生电子和离子对。这些带电粒子在电场中聚焦和加速, 并在微通道板上被检测。LDEX 的探测器面积为 $\sim 0.01 \text{ m}^2$ 。

本文涉及到多个月面着陆器的观测. 大多数月面着陆器倾向于月昼开机, 而不同着陆点的月昼处于月球轨道的不同相位, 着陆区域环境到底由太阳风控制, 还是由地球磁层等离子体控制, 依赖着陆区的经度. 图 1 把多次着陆器着陆点的月球昼夜时段用月球轨道相位角标出, 以便更好地理解观测数据.

2 月球电磁场环境

2.1 月球的磁场环境

2.1.1 月球返回样品的磁场测量

Apollo-11 采样返回样品的质量磁化率为 $10^{-3} \sim 10^{-7} \text{Gs}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$, 主要源于金属铁颗粒的热剩余磁化 (Fuller, 1974). 这些金属铁颗粒主要源自月面铁镁硅酸盐的撞击还原过程 (Fuller, 1974; Hood et al., 2001). 虽然月壤中这些磁化颗粒并不能在月面产生大尺度的局域磁场 (Dyal et al., 1973), 但它们的剩磁记录了月球内部动力学的发展历史 (Dyal et al., 1974). 此后对 Apollo 系列任务以及中国 Chang'E-5 的返回样品的磁测结果表明, 在 42 亿年前的月球形成早期, 月球拥有全球性的内禀磁场, 月面磁场强度约为 $(0.4 \sim 1.0) \times 10^4 \text{nT}$; 随后磁场强度持续衰减, 至 10 亿年前, 月球全球性磁场基本消失 (Cai et al., 2025). 而来自月球背面的 Chang'E-6 返回样品磁测数据则表明, 月球全球性磁场不是单调衰减的, 在大约 28 亿年前, 有重启增强的过程.

2.1.2 月面磁场就位测量

Dyal 等 (1974) 对阿波罗任务期间月表磁场和月表上方磁场的所有观测数据与分析结果进行了综述.

月面磁场就位探测一般是单点的 (在月面的活动范围至多为数千米). Apollo-12 登陆于风暴洋的东部边缘, 其 ALSEP 上的磁强计首次探测到月面局域磁场, 其强度为 $38 \pm 3 \text{nT}$. 对月面磁场的水平梯度分析结果表明这些磁场在水平方向延伸的空间尺度至少为 5 km. 因此, 它们应该是起源于地下磁性物质的宏观磁场, 而不可能是人为因素造成的扰动磁场. 此后, Apollo-14 ($103 \pm 5 \text{nT}$; $43 \pm 6 \text{nT}$)、Apollo-15 ($3.4 \pm 2.9 \text{nT}$)、Apollo-16 ($112 \sim 327 \text{nT}$, 磁场水平梯度较小, 对应 100 km 较大的空间尺度) 的登陆点均观测到了月球的内源磁场. Apollo-12 与

Apollo-16 登陆点的同步观测表明, 月面磁场的强度受到太阳风等离子体的压缩. 目前, Apollo-16 着陆点探测到的磁场是就位探测到的月面最强磁场 (Dyal et al., 1974).

2.1.3 绕月轨道磁场测量

当月球运行于地球磁尾的尾瓣时, 月球上方区域 (Russell et al., 1974b), 或者当月球运行于太阳风时, 月球尾迹区域, 均具有极为稀薄等离子体, 它们与月面磁场相互作用不能产生额外的磁场. 因此, 如果月面磁场足够强, 能够延伸到月面上方卫星轨道高度, 那么卫星观测到的磁场则为背景环境磁场与月球自身磁场的简单叠加, 此时, 月球磁场更容易从背景磁场中分离 (Hood et al., 1981; Kurata et al., 2005). 此外, 绕月卫星, 特别是极轨卫星, 其磁场测量能覆盖全球, 因而便于对月球现有磁场的全貌特征展开探测和研究.

到目前为止, 在月面上方低高度空间 ($< 20 \text{km}$) 对磁场的就位观测很少. 阿波罗时期针对这一高度的偶尔几次的磁测数据表明, 临近月面空间的磁场随高度有显著的变化. Apollo-15 与 Apollo-16 轨道器磁测数据的统计结果表明, 月面剩磁的径向分量受月面高度控制, 但仅在 30 km 高度内, 变化最为显著 (Russell et al., 1974a). 当月球位于磁鞘等离子体中时, Apollo-16 轨道器在撞击月面前最后 8 个绕月轨道上 (相邻轨道卫星高度下降 0.5 km), 在月球尾迹区域观测到月面磁场径向分量随高度的变化情况: 它们在距离月面 2 km 的高度范围内显著增强 (Coleman et al., 1972).

LP 是一颗低高度的月球极轨卫星, 其探测覆盖了整个月面. 在其绕月飞行的 1 年半时间内, 其轨道从 120 km 下降到最低的 15 km. Richmond 和 Hood (2008) 挑选 LP 卫星位于月球尾迹和地球磁尾尾瓣时段的低轨道高度观测数据, 对月球全球磁场三分量进行了建模研究. 模型结果表明, 月面磁场具有局地性, 其月面横向空间尺度一般为数百千米, 月面磁场强度在数百纳特之内, 这些月面局域磁场被称为磁场异常 (magnetic anomaly). 它们中一部分的月面位置与撞击坑有关联: 位于撞击坑侧翼或位于撞击坑月球对跖点. 这种位置关联导致人们提出不同的撞击磁化理论机制: 熔融溅射物热剩余 (thermoremanent)、撞击冲击磁化 (shock-induced magnetization)、撞击等离子体云成磁 (Crawford and Schultz, 1991; Crawford, 1992; Gold

and Soter, 1976; Hood and Huang, 1991; Srnka et al., 1979b). Hood 等 (2001) 利用 LP 的轨道磁测数据, 认为: 月球正面的强磁场位于 Rima Sirsalis 和 Reiner Gamma 区域, 这两个区域的磁场分布走向都指向 Imbrium Crater 的中心, 这可能表明形成 Imbrium Crater 的撞击溅射物被抛射很远, 可能是月球正面磁场异常的起源, 虽然它们的大部分已经被月海玄武岩所覆盖; 月球背面有两处磁场异常聚集区, 它们分别位于 Ingenii Basin (月球背面南半球中心区域, 月球上面积最大的磁异常聚集区) 和 Gerasimovic Crater (月球背面东南部, 该处上空 LP 探测到轨道上最强的磁场), 这两簇磁场异常分别位于 Imbrium Basin 和 Crisium Basin 的月球对跖点. 事实上, 形成于 38~36 亿年前的较为年轻的 Imbrium、Orientale、Serenitatis 和 Crisium 等四个撞击坑的对跖点, 都有磁场异常. LP 轨道上测量的月面最强磁场位于南极-艾肯盆地附近 Imbrium Basin 的对跖点, 磁场强度达到 300~500 nT. Gold 和 Soter (1976)、Syal 和 Schultz (2015) 认为彗星撞击月面时, 被彗星电离大气压缩的行星磁场还可以磁化撞击溅射物, 从而形成磁场异常. 他们以这种方式解释 Reiner Gamma 区域的白斑和剩磁. 此外, Rima Sirsalis 区域的磁场异常的延伸与当地的地堑走向明显一致 (Anderson et al., 1977), 这导致 Srnka 等 (1979a) 认为地下火成岩的入侵可能是月球剩磁的来源. 然而, 月球正面以玄武岩为主的月海区域, 其玄武岩中缺乏足够的铁颗粒, 没有表现出明显的磁场异常, 这一结果与地堑中火成岩侵入造成磁异常的结论不一致 (Hood et al., 2001). 不管哪种机制, 月球现存的磁场都是月球古代磁场在外部或内部动力学过程中磁化月面物质的遗迹, 从这个意义上讲, 月面的现存磁场也被称为剩余磁场.

当然, 撞击过程本身往往让当地物质退磁 (demagnetization), 因此磁场难以在撞击坑内部残余 (Halekas et al., 2002). Richmond 和 Hood (2008) 的结果却表明: 在 Crisium 和 Moscoviense 撞击坑内存在弱磁场. 一些孤立的磁场异常, 比如 Reiner Gamma、Rima Sirsalis、Descartes 和 Airy 等区域的磁异常没有与之对应的周边撞击坑.

Tsunakawa 等 (2010) 利用 Kaguya 卫星的磁场观测数据, 也构建了全月的磁场分布图, 他们宣称弱剩磁覆盖了月面大多数区域, 他们认为这种弱磁性是全球性古月磁残余的证据.

除了利用轨道器直接观测的磁场数据, 通过球

谐函数建模, 从而对月面磁场进行反演外, 如果月面磁场的空间尺度大于电子的回旋尺度, 月面磁场还可以通过电子反射技术对与卫星磁连接区域的磁场进行遥感测量 (详情请见“电场测量”部分) (Halekas et al., 2001). 需要注意的是, 无论是利用较低轨道卫星数据进行球谐函数建模从而获得月面磁场信息, 还是通过电子反射技术探测而获得月面磁场数据, 都无法准确掌握月面磁场信息. 前一种方法中高阶部分是非常不准确的, 因为小尺度的磁场在空间上衰减极快, 在轨道高度上很弱; 如果磁场的尺度小于轨道高度, 则轨道器无法准确测量小尺度磁场强度 (Blakely, 1995). 后一种方法则受限于电子回旋尺度, 因为磁场尺度小于电子回旋尺度 (~10 km) 时, 电子反射技术失效 (Halekas et al., 2010). 基于当前技术的局限, Halekas 等 (2010) 估计月面个别地方的磁场最强可以达到数千纳特.

2.1.4 月球星体对外部磁场的响应

在阿波罗时期的卫星数据分析中, 人们非常关心月球是否还有残余的全球性内禀偶极场或全球性感应磁场. 比如, Russell 等 (1974b) 利用 Apollo-15 轨道器在 100 km 高度上的磁场观测, 计算出月球的整体磁导率 $\mu < 1.0$, 具有抗磁特性. 他们认为这一个结果可能提示月球弱电离层的存在, 但随后他们又指出, 这一抗磁效果是月核感应电流引起的感应磁场 (Goldstein and Russell, 1975).

月球对外部背景磁场的响应, 可以看成是以下几个过程的叠加.

首先是类似导体切割磁力线的情形. 当月球位于太阳风中时, 如果背景磁场 (行星际磁场) 不随时间变化 ($\partial \mathbf{B} / \partial t = 0$), 即月球在恒定的行星际磁场中穿越, 此种情形可以与导体在均匀恒定磁场中做切割磁力线运动的情形相类比 (Sonett and Colburn, 1967): 月球作为“导体”处理, 其内部各处的自由电子在洛伦兹力 ($\mathbf{F}_L = q\mathbf{V} \times \mathbf{B}$, 这里 $\mathbf{V}$ 是自由电子跟随月球相对太阳风的运动速度) 的作用下, 产生横向运动而聚集在月球一侧, 在月球内部产生电场. 该电场在月球内部驱动电流 ($\mathbf{F}_E = q\mathbf{E}$), 并与月球外部超导等离子体形成闭合回路. 如果月球内部电导率足够高, 该电流足够强, 可以在月球外部产生可观测的磁场扰动. 可以通过观测的磁场扰动, 推导出月球内部的电导率. 当然, 在上述过程达到稳定状态时, 即 $\mathbf{F}_L = \mathbf{F}_E$ 时,

可以用霍尔发电机效应来描述. 当月球内部电导率分布比较复杂时, 比如具有分层结构, 最终电流强度和月球外部的磁场扰动强度则是由电导率最低的圈层决定的 (一般认为月壳的电导率最低, 内部电流必须经由这一层, 与太阳风形成闭合回路), 因此, 该方式实际测量的应该是月壳的电导率 (Hollweg, 1968). 当月亮里存在水或者水冰时 (Gold, 1966), 或者月海浅表存在熔岩流时 (Kuiper, 1966), 其电导率应该可以高达 (England et al., 1968) $\sigma \sim 10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. 实际上, Apollo 时期的观测都表明, 月球周边的这种磁场扰动没有超过设备的观测误差, 而且也没有观测到与此感应磁场相关的月球弓激波 (Hollweg, 1968). 基于观测误差的水平, 可以估算出月球内部 (月壳) 的平均电导率的上限 (Blank and Sill, 1969) 为 $\sigma < 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.

其次是类似导体静置于稳态磁场中被磁化的情形. 磁层磁尾的尾瓣区域: 背景磁场稳定 ($\partial \mathbf{B} / \partial t = 0$) 且均匀 ($\nabla \times \mathbf{B} = 0$); 背景等离子体几乎消失 (磁场不“运动”). 此时, 背景磁场磁化月球. 通过测量月球被磁化而产生的磁场, 可以计算月球整体的磁导率 (μ , magnetic permeability). 这一参数与月球整体的金属铁含量有密切关联 (Dyal et al., 1974; Parkin et al., 1974). Behannon (1968) 通过 Explorer-35 在较大绕月轨道高度上的测量数据, 比较了月球位于磁尾等离子体片南侧和北侧尾瓣区域时的磁场差别, 试图获得月球的磁化磁场. 他们发现实际观测的差别在设备的测量误差之内, 但他们给出的月球整体磁导率的上限为 $\mu \sim 1.8$ (真空中为 $\mu \sim 1.0$). 阿波罗计划期间, 月面 ALSEP 和绕月卫星 (Apollo 轨道器或 Explore-35) 的磁强计, 使得天地联合磁场观测成为可能: 轨道器测量背景磁场; ALSEP 磁强计测量月球的扰动磁场. Parkin 等 (1974) 比较了 Explorer-35 与 Apollo 月面登陆点的磁测数据, 计算出月球整体磁导率 $\mu = 1.012 \pm 0.006$ [此时, 由于背景尾瓣磁场强度仅为 10 nT, $\mu = B/H$ 不再表现为磁滞回线形式, 而退化为直线 (Ellwood, 1934)]; 与此数值相对应的月球整体金属铁含量应该在 2.5 wt% 附近, 这一极低的磁导率也排除了月壳浅表存在富铁圈层的可能性 (在居里温度之下, 铁表现为铁磁性, 其磁导率在 3.5 附近). 然而, Russell 等 (1974b) 利用 Apollo-15 轨道器在 100 km 高度上的磁测数据, 计算出月球的整体磁导率 $\mu < 1.0$. 这结果表明在月面与轨道器之间存在一个抗磁的区域 (这可能是月球的

弱电离层). 由此, 他们认为先前计算的月球内部磁导率被低估了; 修正电离层影响之后, 月球内部的磁导率可能达到 $\mu = 1.017 \pm 0.006$, 相应的月球内部金属铁的含量应该提升至 3.9 wt% (Dyal et al., 1974).

最后是类似导体位于时变磁场中的情形. 当月球的背景磁场随时间变化时, 即 $\partial \mathbf{B} / \partial t \neq 0$, 月球的响应表现为内部的感应电场 ($\nabla \times \mathbf{E} = \partial \mathbf{B} / \partial t$). 该电场会在月球内部驱动电流涡流. 由磁感应方程可知, 由于电阻的存在, 这些电流涡旋存在的时间尺度 (或者说磁场扩散的时间尺度, Cowling Time) 为 $\tau_e = \mu \sigma L^2$, 其中 L 为导体体系的尺度 (Blank and Sill, 1969; Dyal et al., 1974). 这里建立了导体尺度 L 与对磁场响应时间尺度 τ_e 的关系. 当月球在太阳风中时, 其磁场的特征周期由太阳自转和行星际磁场结构决定 ($T \sim 14$ 天). 根据这一理论, 如果月核位于 600 km 深度之下, 即 $L \sim 2000$ km, 且它能够对变化周期为 $\tau_e \sim 14$ 天的行星际磁场响应, 那么, 月核内部的电导率应为 $\sigma \sim 1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. 由于温度是月核电导率的决定性因素, 对月球内部电导率的深度剖面进行分析, 可以获得月核内部的温度剖面信息 (Dyal et al., 1974; Hood et al., 1982). Fatemi 等 (2015a) 给出了背景磁场变化强度、月球内部超导区域大小与月球感应磁矩之间的简单关系式, 他们通过等离子体混合 (hybrid) 模拟检验了该感应磁场与太阳风相互作用的过程. 他们发现: 如果月球存在感应磁场, 在向阳面, 这些磁场仅存在于月壳之下 (月壳中产生感应电流); 在晨昏线附近, 这些磁场可以伸出月面, 被太阳风压缩, 并在下游月球尾迹边缘形成类似“侧翼压缩区” (limb compression) 的结构. Haviland 等 (2019) 的混合模拟的结果与 Fatemi 等 (2015a) 的结果类似. 这些结果表明: 如果月球存在感应磁场, 月面晨昏线处是检测它们的最好选择.

当然, 上述三种情形, 只是前人对月球感应磁场所做的探索. 目前, 尚未观测到月球自身对背景磁场响应的确切证据. 这或许表明月球内部电导率事实上很低, 整个月球可以当做绝缘体来处理; 又或者, 目前尚未做到正确测量月球的磁响应. 未来, 在月面或临近月面的空间 (< 20 km) 开展磁场普查或许能解开这一谜题.

2.2 月球的电场环境

月球表面和月表上方空间都存在电场 E . 电场

是电势的空间梯度,常常是通过测量单位距离上电势差 ($E = \Delta\Phi/L$) 而获得. 月表电势 Φ 主要由环境等离子体轰击、太阳光电效应、次级电子发射、甚至微流星体撞击等多个过程积累净电荷而形成. 月表上方空间的电势,则主要是由等离子体动力学过程而产生. 理解月面电势的难点在于它们是多个物理过程竞争的产物,这些过程不仅受制于环境要素(背景等离子体、太阳辐照、高能射线、流星体撞击),还受制于物质成分、粗糙度、磁场等月表特征. 理解月表上方空间电势分布的难点源于该空间等离子体的复杂性,它们是由背景离子体、光电子、次级电子、月球电离层粒子、带电月尘、甚至撞击产生的等离子体组合而成的复杂等离子体体系.

2.2.1 月球电势/电场的测量方式

受限于测量平台自身鞘层的影响,在实际观测中,对月面电场的直接测量并不容易,需要将探头伸出测量平台的等离子体鞘层之外,才能排除平台自身的干扰. 电势 Φ 本身具有相对性,实际测量的都是电势差 $\Delta\Phi$, 因此,每次测量应当明确零电位基准. 比如,在通过测量粒子速度分布函数的改变而反演电势时,一定要明确所测粒子的来源. 反演的电势实际是粒子源区与探测平台所在位置的电势差.

通过观测月面带电粒子速度分布的改变来确定月面电势,是一种比较常用的探测手段 (Wang X et al., 2008). 如果月面带正电,在月面上方空间,可以通过观测向下运动的月面光电子的截止能量来实现 (Reasoner and Burke, 1972): 假设光电子达成均衡分布(比如麦克斯韦分布),能量较低的光电子会被带正电的月面吸引而重新回到月面,而能量较高的光电子则可以逃脱月面的势井而不再回来,因而在向下运动的光电子中形成截止型的分布,截止能量即为月面电势. 如果月面带正电,也可以在轨道卫星上通过观测向上运动的月面光电子能量来实现 (Kato et al., 2025): 通过比较光电子发射理论模型给出的光电子分布函数和卫星观测到的光电子速度分布函数而实现. 如果月面带负电,在月面上,可以通过电离层离子的速度分布来反演 (Benson and Freeman, 1976a; Benson, 1977): 月球稀薄大气被光致电离后,被负电月面吸引而加速,从而得到能量,该能量即为月面负电位. 如果月面带负电,在轨道卫星上,还可以通过依赖能量的电子损失锥来实现: 背景空间电子中,能量较高的,可以

穿透月面势垒,轰击月面并被吸收,而能量较低的,则被月面势垒反射,从而形成依赖能量的电子损失锥. 这种方式在文献中常被称为电子反射法 (Halekas et al., 2005, 2008b, 2011b).

利用带电粒子的速度分布来反演月面电势,有以下两点值得注意.

其一,对于月面上的探测而言,由于观测的限制,一般都要对粒子源区的初始分布,甚至对被探测到的粒子的全向分布进行假设,才能反演月面电势. 月面的探测平台,由于自身基本固定(不像卫星可以自旋),一般很难实现对粒子全向分布进行测量. 像 Apollo-14 的 ALSEP 上的 CPLEE 探测器,只能测量月面朝上两个给定方向上的带电粒子通量,而 SIDE 只能测量月面朝下半球、角分辨率很低的带电粒子分布. 因此,在获取观测数据之后,常使用假设(比如各向同性)来获得粒子通量,从而计算月面应有的电势. 而这些假设往往是没有根据的,从而导致一些计算结果令人费解. 比如,日下点附近,无论在磁尾等离子体片、磁鞘,还是在太阳风里,得到的都是 +10 V 的相对稳定的电势,虽然入射电子的通量可以差 1 个量级 [等离子体片 (Rich et al., 1973); 磁鞘 (Reiff and Reasoner, 1975)], 这一结论可能源自电子速度分布的错误假设. 再比如,月球位于磁尾时,ALSEP 的磁场和离子数据表明当地月面已经位于等离子体片了,但却观测不到等离子体片电子 (Rich et al., 1973),它们可能不存在,也可能它们在设备的探测方向的通量被月球遮挡了. 由此可以看到,使用各向同性的假设是不合适的. Reiff (1976) 指出,月球对背景环境中带电粒子有三种基本的遮挡形式: (1) 月球星体自身的遮挡(比如,尾迹;再比如,在磁尾等离子体片中,月面正面观测不到地向高速流); (2) 粒子源与探测器之间存在磁镜(和电势); (3) 月面的粒子回旋遮挡(这取决于粒子的回旋尺度和磁场的方向). 特别是第(3)个形式,在月面曲率半径远大于粒子回旋尺度的情况下,会严重影响月面粒子的速度分布观测和由此计算的月面电势.

其二,对于轨道器上的探测而言,最大的问题在于确定观测到带电粒子的起源;而在实际应用中,一般都认为或者默认静电荷附着在月面,电势在德拜尺度内衰减,而这不一定正确. 比如,在 Kato 等 (2023) 和 Xu 等 (2023) 等利用 ARTEMIS 的光电子测量月面电势时,假设这些电子来自月面. 然而,这些电子可能不是起源于月面,

月球逃逸层, 甚至浮扬在月面的月尘也可以被电离并产生光电子. 再比如, Halekas 等 (2011b) 和 Halekas 等 (2005) 利用 LP 和 ARTEMIS 的电子反射数据, 认为“月面”具有很强的负电势; 而 Burinskaya (2014, 2015)、Lisin 等 (2014) 以及 Poppe 等 (2011) 通过数值模拟都指出, 月面上方电势随高度呈现非单调的变化; 月面发射的光电子或次级电子, 形成电子云悬浮在月面上方, 它们才是电势最低处. 因此, 利用电子反射法测得的电势差不能简单地被认为就是卫星与月面之间的电势差, 它们可能是月面上方悬浮的光电子云或次级电子云与卫星之间的电势差. 此外, 通过月面电势 $\Delta\Phi$ 来确定月面电场时, 无论月球轨道器测得, 还是在月面测得, 往往都假设测得的月面电势在德拜鞘高度内 (这里, $L = \lambda_D$) 衰减完毕, 因此电场 E 可以通过 $E = \Delta\Phi/\lambda_D$ 来计算. 事实上, 电子反射法给出的 $\Delta\Phi$ 只是电子反射源区与卫星之间的电势差, 而不能给出 Φ 随高度分布的剖面, 因此, 在知晓电势剖面分布之前, 无法计算出电场 E .

2.2.2 太阳风中月面及空间电势分布

Freeman 和 Ibrahim (1975) 通过阿波罗时代月面粒子探测的结果, 综述了月球位于太阳风中时月表的电势环境 (相对于无穷远处的电势差). Stubbs 等 (2014) 对月球位于太阳风中时, 向阳面和晨昏线的月面电势做了建模研究. 总体而言, 日下点处的电势在 +10~+18 V, 随着太阳天顶角的增加而衰减; 达到晨昏线时, 月面电势变为 -10 V 至 -100 V (Chandran et al., 2013; Lindeman et al., 1973). 正负电势的转换区域位于太阳天顶角 50° 附近; 该转换区域, 月面电场很小, 不能扬起月尘, 故而被称作 dust dead zone (Stubbs et al., 2014). 随着太阳风参数的不同, 该转换区域的位置也会改变 (Farrell et al., 2007); Orger 等 (2018) 的计算表明, 该转换区域可以从太阳天顶角 50° 位置变化到 90° 位置. 根据向阳面月表的太阳风等离子体和光电子分布, 估算月面等离子体德拜鞘厚度从日下点的 1 m 增至晨昏线处的 10~100 m, 与之相对应, 垂直于月表的电场强度从日下点的 10 V/m (向上) 减少至晨昏线的 1~10 V/m (向下). 这些电场数值远大于背景太阳风的对流电场 (~1 mV/m). 在月球背面, 由月球尾迹等离子体扩散而产生的双极电场, 可以将月表电势降低至 -500 V 至 -1000 V; 但该电势降的空间跨度甚至超过 1 R_L , 因而与

之对应的电场强度很弱, 只有 ~1 mV/m 的量级 (Halekas et al., 2008b).

月球位于太阳风中时, 也有一些特殊情况, 可以产生月面电势的异常. 比如, 太阳 CME (coronal mass ejection) 事件期间, 太阳风电子温度极大提高, 太阳风等离子体的热效应超越了光电效应, 可以让月球日下点区域带上负电 (Farrell et al., 2013). 再比如, Xu 等 (2020) 根据 ARTEMIS 的观测, 发现月球向阳面反射的离子会被太阳风对流电场加速而进入月球尾迹深处, 它们会极大降低尾迹中电势, 甚至出现非单调的尾迹电势降.

2.2.3 磁尾中月面及空间电势分布

月球轨道处的地球磁鞘中, 由于等离子体速度依然是超声速的, 温度略高于太阳风, 此时月面电势与太阳风中的情形类似. Wang X Y 等 (2012) 报道称, 当月球位于地球磁层的磁鞘内时, 中国 Chang'E-1 卫星在月面 200 km 高度偶尔观测到 100 keV 以上电子月向通量的爆发事件, 与此同时观测到太阳风离子的加速, 他们认为高能电子注入可以让月面产生了 -5.4 kV 的电势, 这也是离子加速的原因. 然而, 在这样高能电子的轰击下, 究竟是热效应为主 (使得月面带负电), 还是次级电子效应为主 (使得月面带正电)? 相关电场为何可以从月面延伸至 200 km 高度? 这些问题都值得进一步分析.

与月球位于太阳风/磁鞘时的情形相比, 月球位于磁尾时, 太阳辐照没有变化 [月全食时除外, 此时太阳辐照全部或部分被地球遮挡 (Reasoner and Burke, 1972)], 而环境等离子体变化较大: 或替换为温度高 2 个量级的等离子体片等离子体, 其热效应远大于太阳风 (Halekas et al., 2005; Poppe et al., 2012b); 或替换为类真空的尾瓣, 此时等离子体效应消失, 只有光电效应.

在等离子体片中热等离子体的作用下, 夜侧月面电势可以为负几百伏特 (Saito et al., 2014) 直至负数千伏特 (Knott, 1973). 向阳面的电势则存在争议: 温度较高的等离子体片等离子体一方面可以通过热效应让月面带上更多负电荷, 向阳面的电势也可达负数百伏特 (Burinskaya, 2015; Halekas et al., 2005; Poppe et al., 2011, 2012b); 另一方面, 由于电子能量较高 (>100 eV), 它们轰击月面可以产生次级电子, 且次级电子产率可以在 1 附近 (即注入一个环境热电子后, 发射次级电子的数目

可以与 1 相比), 因此可与等离子体热效应竞争, 成为决定月面电势的因素 (Horanyi et al., 1998). Poppe 等 (2011) 指出, 等离子体热效应和次级电子效应可能同时发生在月面, 他们的数值模拟结果表明, 当月球位于磁尾等离子体片中时, 月面向阳面可以获得极高的负电位 (等离子体热效应), 而产生的大量次级电子悬浮于月面, 导致电势随高度呈非单调的变化. Burinskaya (2014, 2015) 则认为光电子也可以悬浮于月面, 造成了这种非单调电势分布. Collier 等 (2017) 通过 Apollo-14 安置在月面的 SIDE 设备观测到阶梯状的离子微分分布, 他们认为这是月面非单调电势的证据.

在尾瓣中时, Apollo-14 的 ALSEP 上的 CPLEE 粒子探测器观测到月面光电子的能谱, 根据能谱计算出的月面向阳面的电势 (Reasoner and Burke, 1972) 可达 +40~+200 V. Harada 等 (2013a) 通过 ARTEMIS 卫星在尾瓣区域观测到的来自月面的高能光电子 (速度分布具有月面遮挡形成的回旋不对称性), 以及来自月面的、被背景磁场拾起、但在磁力线平行方向被加速的离子 (拾起离子本应该只在垂直磁力线方向被加速), 推测月球位于尾瓣时, 月面向阳面的电势为正, 且强度达到数十伏特. 月球背阳面, 似乎只可以产生微弱的负电势 (没有光照, 但可能存在难以被观测到的冷等离子体). Poppe 等 (2021) 通过 ARTEMIS 观测到尾瓣的背景等离子体, 计算出的背阳面电位为 -100~-200 V; 但通过电子反射技术遥测的电势数值则比理论值低很多. 电子反射测量结果的统计分析表明, 月球背面负电势的绝对值普遍比计算值低, 而且空间分布具有不对称性: 晨侧电势绝对值比昏侧低. 他们认为晨侧较低的电势绝对值是微流星体轰击月球背阳面造成: 它们撞击月面产生等离子体, 其中离子被负电位月面吸收, 而电子则逃出月面, 电子和离子形成的电流可以降低月面的负电位. 与太阳系黄道面内存在的星际尘埃不同, 这些微流星体的通量不是各向同性的 (Horanyi et al., 2015), 它们从既定方向轰击月球背阳面 (撞击效应主要发生在晨侧), 从而产生了背面电势的不对称分布.

2.2.4 晨昏线区域和极区电势的特点

月球晨昏线位置是月尘观测证据比较集中的区域. 一般认为, 此位置电场较强, 这些强电场浮扬了月尘, 因此晨昏线区域的电势或电场倍受研究者关注. 事实上, 晨昏线处的月面电势的分布也远比

月球其他区域复杂 (Colwell et al., 2007; Farrell et al., 2007).

原因之一, 是月面坑洼不平的地貌特征. 当太阳光以很低的入射角照射月面时, 起伏月面的向阳面会被强烈照射 (patchy illumination), 从而产生强光电效应 (带正电); 起伏区域的背阳面, 可以产生微型尾迹的效应 (带负电) (Piquette and Horanyi, 2017; Sana and Mishra, 2023; Xie et al., 2024; Zimmerman et al., 2011, 2012, 2013). 这两者都会在局地产生非垂直月面方向的电场结构. Farrell 等 (2010) 和 Poppe 等 (2012c) 提出, 由于对太阳风等离子体的阻挡, 晨昏线处的撞击坑中, 会形成微型尾迹和双极扩散电场结构, 可以使得撞击坑内带负电的月壤颗粒喷射出撞击坑. Rhodes 和 Farrell (2019) 指出, 晨昏线撞击坑内的电势和电场, 不能用传统的等离子体扩散理论来描述, 撞击坑内存在离子空腔, 该区域被电子云完全占据 (电子完全决定电势与电场). 微型尾迹中的这种电子云团 (没有离子), 会造成撞击坑内壁的持续充电, 直至背景等离子体中的所有电子都被屏蔽在外; 然而事实情况并非如此: Farrell 等 (2010) 指出撞击坑内可以通过扬起带负电荷的月尘来释放上述的电荷积累; Mishra 和 Bhardwaj (2020) 则认为撞击坑内的最细小的颗粒, 可以在颗粒间强电场的作用下, 产生量子力学隧穿效应, 释放大量电子, 从而缓解负电荷的积累; Poppe 等 (2021) 认为微流星体轰击撞击坑内, 也可以发射电子, 从而缓解负电荷的积累.

Dyadechkin 等 (2015) 利用 PIC (particle-in-cell) 模型计算了各种地形条件下 (具有与德拜尺度相当的尺度) 月面的电势分布情况. Miyake 和 Nishino (2015) 则利用 PIC 模型, 计算了圆柱状月面洞在各种太阳高度角下的电势变化, 这些结果可以用于描述月面熔岩管洞的情形. Nakazono 和 Miyake (2025) 则认为, 当月面凹陷尺度小于德拜尺度时, 由于离子电流主导, 在凹陷内部会形成很强的正电势, 这也类似于月面熔岩管道的情形.

原因之二, 是因为月球的光学阴影与太阳风离子阴影区的偏离. 月球以 29 ± 1 km/s 的速度相对太阳公转, 因此, 在月球看来, 太阳风不是沿着太阳的径向轰击月球, 太阳风的入射方向与太阳径向存在向月球运动的反方向 4° 的偏置, 这造成离子阴影与光学阴影的偏离. 4° 径向偏离, 对应赤道月面的径向宽度为 121 km. 因此, 在早晨, 存在一个离子能轰击到、但阳光照射不到的 121 km 区域 (该区

域等离子体热效应影响月面电势,但完全没有光电效应);而在黄昏,则存在一个离子轰击不到、但阳光能照射到的 121 km 区域(这个区域实际上是尾迹部分,但还存在光电效应). Neugebauer 等 (1972) 在晨昏线后方的月面,利用 Apollo-12 的 ALSEP 的 SIDE 设备观测到太阳风可能就是这个原因造成的.

原因之三,晨昏线后方是等离子体密度极低、温度升高的尾迹区域.尾迹形成过程中,电子速度分布中能量较高的电子首先进入尾迹并撞击月面,这个过程产生的最强电场可以达到 400 mV/m (Farrell et al., 2008b).此外,Popel 等 (2015, 2016b) 认为晨昏线前的向阳面上方,主要是浮扬尘埃和光电子构成的尘埃等离子体,这些等离子体在晨昏线上方空间形成很强的平行于月面的梯度.当它们向晨昏线后方空间扩散时,光电子扩散极快,而尘埃扩散很慢.该扩散过程的后果是,造成晨昏线前方空间电荷主要为带正电的月尘.这些正电荷与晨昏线前的月面(带负电)可以形成约 300 V/m 的极强电场.

原因之四,可能起源于月球的自转.如果月面充电时间尺度与自转的速度达成一定条件,可能月面会出现超级充电的情况 (Wang et al., 2007b).

关于晨昏线上方空间电势/电场的分布,文献中提及较少. Horanyi 等 (2008) 通过实验,测量了由光电效应引起月面晨昏线处的电势和电场分布情况.虽然他们的实验不一定能真实反映月面的情形(实验中明亮区域的太阳直射辐照),但有一个情形值得关注:当明亮区域被偏置一个负电压时(这是月面晨昏线的情形,因为晨昏线等离子体热效应占主导,月面带负电),明暗区之间电势差最小.这与常常提及的晨昏线处水平电场很强是矛盾的. Popel (2015, 2016b) 提及的晨昏线前的向阳面上方悬浮的尘埃和光电子的扩散图景,只用来解释晨昏线处很强的垂直于月面的电场,但这种扩散可能导致的水平电场则没有受到关注. Orger 等 (2018) 则指出,没有理由认为晨昏线处的电势随高度具有非单调的特性.利用晨昏线前 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 月面热离子的观测数据 (ALSEP 的 SIDE), Benson 和 Freeman (1976a) 认为其能谱反映了月球大气电离后被月向电场加速的过程,推演月面电势为 -50 V,并给出月面上方电势随高度的分布.他们指出,该位置月面较低电势,与太阳风温度和密度的增加有关;但月面电势的屏蔽高度达到了 1 km 的高度,

比等离子体理论预测的德拜屏蔽尺度高 2 个量级,但具体物理机制未知.

月球的极区,虽然也属于晨昏线区域,但更为特殊,某些区域为永久阴影区.对于工作在极区的设备,可能存在较高的放电风险.这些区域长时间暴露于黑暗之中,月表温度极低,月面的电导率也极为降低;这些区域的空间电流也因缺乏等离子体而减少.这种环境下,因为没有释放设备积累电荷的渠道,积累电荷的耗散时间尺度从白天或弱光晨昏线的 1 ms 增长到 100 s,极容易造成放电风险 (Farrell et al., 2008a).但 Borisov 和 Zakharov (2015) 却认为月面极为有限的电导率,就会极大抑制月面电势、电场. Kuznetsov 等 (2018) 对不同太阳天顶角条件下月面着陆器周边的电势和月尘分布情况进行了模拟研究.

2.2.5 剩磁区域月面电势的特点

在向阳面,剩磁下方月面可能带有比光电效应更高的正电,可能原因是离子相比电子更容易穿透剩磁结构而抵达月面 [对于 Cusp 型磁场 (Poppe et al., 2012a) 和横跃月面的磁场 (Wang X et al., 2012) 都是这样]. Howes 等 (2015) 通过实验室试验,检验了剩磁(偶极场)位形对月面电势的影响,他们发现:仅在太阳风的轰击下,剩磁下月面带正电,主要原因是非磁化的离子比磁化的电子更容易抵达剩磁下月面;当偶极磁矩与月面平行时,月面电势远大于光电效应的正电势;当偶极磁矩垂直于月面时,月面正电势则小得多. Deca 等 (2016) 通过三维 PIC 模型,对垂直月面的偶极剩磁进行了模拟,也发现更多离子轰击月面,从而让剩磁区域下方带正电.离子轰击月面时,会后向散射出中性氢原子,它们的温度与入射太阳风速度之间呈线性关系, Futaana 等 (2013) 利用 Chandrayaan-1 观测的中性原子数据,发现它们的温度低于未受扰动的背景太阳风轰击所造成的中性原子的温度,他们推测剩磁下方应该存在 150 V 的正电势,它们显著降低了入注月面的太阳风速度. Kallio 等 (2012) 利用 PIC 模拟模型,对剩磁下月面的光电子德拜鞘做了模拟,他们假设太阳风被剩磁完全屏蔽,模拟中只包含光电子,结果表明月面电势比非磁化区域更低,且德拜鞘更薄. Wang X 等 (2012) 则通过实验室设备模拟了剩磁与太阳风相互作用的情形(没有光电子),他们发现剩磁可以屏蔽磁冻结的电子,但却不能完全屏蔽非冻结的离子,由于离子轰击剩磁下方月面,

使得该处月面电势高于周边区域. Wang 等 (2013) 通过试验, 发现月面以及迷你磁层内的电势分布受到磁场位形的强烈控制, 偶极子磁轴垂直月面时, 电势高于其他情形.

剩磁上方空间的电势和电场分布比较复杂, 由空间等离子体与剩磁相互作用形成, 或为电荷分离电场、或为电子离子运动解耦电场 (霍尔电场), 抑或表现为类似弓激波的结构. 剩磁上方空间的电场情况将在第 3.5 节中详细讨论.

3 太阳风与月球

月球在太阳风中时, 并没有产生全球性的弓激波 (Lyon et al., 1967). 无论对太阳风等离子体流, 还是对行星际磁场, 月球都没有形成有效的阻挡, 使它们堆积. 这表明月球内部的电导率如此之小, 行星际磁场在月球内部的扩散时间尺度 τ_e (crawling time) 小于或相当于太阳风跨越月球所需的时间 (大约 8 s), 其内部的感应电流不能在月球外部产生显著影响太阳风运动的磁场. 因此, 整体而言, 通常将月球可以当做绝缘体球, 它与太阳风相互作用的基本方式为向阳月面对太阳风的吸收.

Kallio 等 (2019) 利用混合模型模拟的地球磁层, 研究了一个月球轨道周期内, 太阳风氢离子对月面的轰击情况. 结果表明, 由于地球磁层的存在 (内部也有太阳风氢离子, 数密度低, 但能量高) 以及月球与地球的相位锁定, 氢离子累计注入月面通量最强的区域为月球背面, 入注月面氢离子能量最强的区域为月球正面; 当月球位于磁尾时, 单位时间注入全月面的太阳风氢离子总数最低. 这可能对月面太阳风引起的太空风化效应产生不对称性分布.

当然, 在月球向阳面, 太阳风也不是完全没有扰动的. Neugebauer 等 (1972) 利用 Apollo-12 ALSEP 的 SIDE 在月面的观测发现, 中低纬晨昏线附近月面上观测到的太阳风常常表现出明显异常, 太阳风离子通量会间歇性地突增, 它们可能被归因于 Apollo-12 落点月面剩磁 (38 ± 3 nT) 的遮挡或偏转效应.

3.1 太阳风与月面微观作用

阿波罗时代的观测数据表明, 太阳风离子入注月面 (非磁化) 效应包括 (Johnson and Baragiola, 1991; McComas et al., 2009): 改变月壤颗粒外层

的同位素丰度和化学成分; 太阳风高能离子还能在月壤颗粒内部产生径迹 (tracks) 和裂隙 (spallation); 入射太阳风可以在月壤中产生新的离子和中性粒子, 并把它们溅射出去 (sputtering), 这些粒子的初始能量仅为几个电子伏特 (~ 1 eV); 0.1%~1% 的入射氢离子依然以离子的形式, 保持原有能量 (~ 1 keV), 被反射到太阳风中去 (reflection) (Saito et al., 2008b); $\sim 10\%$ 的太阳风离子在月面被电子复合, 后向散射, 形成距离月球很远处可以观测到的能量中性原子 (energetic neutral atoms, ENA) (backscatter), 这些中性原子能谱较宽, 最高能量与入射太阳风氢离子能量类似 (~ 1 keV).

太阳风氢离子在高孔隙度的月面应该被完全吸收, 因此, 有显著通量的氢离子以中性原子的形式被后向散射是令人费解的. McComas 等 (2009) 利用地球 IBEX 卫星轨道接近月球时 ENA 的观测数据, 估算月表后向散射的氢原子占据太阳风通量的 10%. 因此, 每年应有 150 吨的氢原子从月面释放. Allegrini 等 (2013) 则估算了月球位于磁鞘时后向散射氢原子, 他们发现磁鞘中氢原子通量总体更高, 主要源于稍低能量位置 (~ 0.6 倍太阳风离子能量) 通量增强, 背景等离子体的马赫数可能控制着通量增强的强度. Funsten 等 (2013) 则利用 IBEX 卫星观测数据分析了月面中性原子的反照率 (ENA albedo, 即中性氢原子产率, 或后向散射率), 他们发现月面中性氢原子的散射率与太阳风速度呈线性反相关: 当太阳风速度从 300 km/s 增加到 700 km/s 时, 散射率从 0.2 降到 0.08, 而散射原子的平均能量从 30 eV 升到 40 eV. 他们指出, 这些中性原子被再次电离后, 太阳风对其拾起和加速, 离子速度可以 3 倍于太阳风速度 (能量则高一个量级), 从而改变太阳风离子能谱. Futaana 等 (2013) 指出, 观测到 ENA 呈现热力学均衡的麦克斯韦-玻尔兹曼分布, 温度高达 60~140 eV.

月面太阳风后向散射形成的 ENA 通量受到月面剩磁的调制. Wieser 等 (2010) 利用安装在 Chandrayaan-1 上 SARA 的观测数据发现: 150 eV 以上 ENA 在剩磁内部较低, 而剩磁周边区域较高; 但 150 eV 以下 ENA 则没有这个月面分布特征. Futaana 等 (2012) 基于 Chandrayaan-1 的观测, 意外发现 ENA 的特征能量或温度与太阳风速度而不是太阳风能量线性相关. Futaana 等 (2013) 则利用 ENA 温度与入射太阳风速度之间的线性关系,

通过观测的 ENA 来反推磁场异常区域月面太阳风的入射速度, 发现剩磁下方应该存在+150 V 的电势, 它们显著降低了入注月面的太阳风速度. Vorburger 等 (2013) 利用 Chandrayaan-1 上 SARA 和 SWIM 的观测数据, 对 80% 月面 (主要为月球背面) 的高能 (>30% 太阳风能量) 和低能 (<30% 太阳风能量) 的 ENA 进行了月面填图, 他们发现: ENA 的后向散射率高达 16%; 后向散射率受到月面磁场的调控, 强磁区域散射率低; 低散射率区域, 太阳风氢离子的反射率高, 而且月面光学反射率也高. Vorburger 等 (2013) 的这些结果说明月面磁场对太阳风与月面相互作用的控制. Vorburger 等 (2015) 利用 Chandrayaan-1 观测数据对地形地貌特征丰富的南极-艾肯盆地 (South Pole Aitken Basin, SPA) 的 ENA 做了专门研究, 发现该区域 ENA 通量降低, 他们认为这主要由 SPA 区域的剩磁决定的, 而其它月面特征, 包括孔隙度、粗糙度、化学成分和空间风化程度等, 对散射原子的贡献不明显. Wang 等 (2021a) 利用安装在 Chang'E-4 巡视器 Yutu-2 上的 ASAN 设备, 在其月球背面着陆点, 观测太阳风与月面相互作用产生的 ENA, 他们发现着陆区域位于晨侧时的 ENA 通量高于昏侧; 比对 ARTEMIS 观测到太阳风参数, 他们发现晨侧较高的 ENA 通量, 与晨侧较高的太阳风离子通量、密度、动压相关; 晨侧 ENA 的最低能量和温度也高于昏侧, 他们认为这是着陆点附近的剩磁与太阳风相互作用的结果.

太阳风氢离子入注月面能产生水, 是一个有争议的话题, 遥感手段探测到的月球极区的水或羟基需要进一步的确认 (Starukhina and Shkuratov, 2000; Zimmerman et al., 2013). Mitrofanov 等 (2010) 利用 LRO 卫星上的月球中子探测器 LEND 对月球南极区的中子进行测量, 结果显示, 来自部分区域的超热中子通量被抑制, 表明当地月面氢含量的增加, 对应水冰的估计含量为 0.5~4.0 wt%, 具体水冰含量还取决于覆盖月表干燥的风化层的厚度. 他们认为水冰可能来源于彗星, 或来自太阳风注入氢产生的水. Dubinskii 和 Popel (2019) 认为月面最主要的物质为二氧化硅, 在有银离子的情况下, 太阳风氢离子注入则会产生水. Garrick-Bethell 等 (2019) 通过混合模拟模型, 认为月球拥有古磁场, 那时, 太阳风氢离子可以在磁极区 (polar cusp) 汇聚, 产生的挥发性物质也沉积在极区.

3.2 月球尾迹

尾迹是超声速等离子体流与月球作用的产物, 可以用等离子体流体观点来理解: 太阳风轰击月球时, 在向阳面被吸收, 而在背阳面形成等离子体空腔 (Beers, 1972); 由于太阳风是超声速的, 周边未受扰动的太阳风不能及时回填, 向内收缩的等离子体空腔得以维持; 太阳风的回填过程, 会在背景太阳风中形成向外扩展的稀疏区 (太阳风密度降低, 有时也称膨胀区). 等离子体空腔和稀疏区被统称为月球尾迹. 尾迹截面整体呈现椭圆形, 体现出磁流体波动传播相对背景磁场的各向异性 (Schubert and Lichtenstein, 1974; Zhang et al., 2014).

月球对太阳风的最大的磁扰动存在于尾迹中. 在尾迹中心区域, 平均而言, 磁场强度增强到行星际磁场的 1.3 倍; 而在尾迹边缘区域的等离子体稀疏区则相对背景磁场强度降低. 这是尾迹等离子体抗磁效应的证据 (Colburn et al., 1967; Zhang et al., 2014). 从流体观点看, 磁场的增强与减弱, 也可以看成是周边太阳风等离子体回填尾迹时, 对尾迹中心区域磁场的压缩和对周边磁场的稀疏. 该过程中, 磁力线应向尾迹中心弯曲, 是显而易见的 (Beers, 1972; Zhang et al., 2014). Zhang 等 (2014) 详细分析了尾迹磁扰动的极大值和极小值 (中心区增强; 稀疏区减弱) 受控于背景太阳风的 β 值; Poppe 等 (2014) 利用 ARTEMIS 的数据报道称, 当 β 值很大时 (>10), 尾迹中磁场可以增强到原先的 2 倍. Zhang 等 (2016) 通过分析 ARTEMIS 的观测数据, 发现尾迹中磁力线还向月球方向鼓起, 他们认为这是阿尔芬翅的表现, 他们提出尾迹中的压强梯度是产生这种阿尔芬翅的新机制 (传统机制与太阳风拾起过程相关). 早在阿波罗任务前, Explorer-35 卫星就偶尔观测到, 尾迹磁场会突然增强或减小, 有证据表明它们与尾迹的抗磁效应相关 (Colburn et al., 1971); Guo 等 (2019) 认为向阳面剩磁区域反射的太阳风离子可以以较大通量直接进入尾迹, 它们的抗磁效应产生了尾迹磁场的突降.

太阳风等离子体向尾迹中填充的过程是涉及尾迹的最重要的物理过程, 这个过程的快慢, 决定着尾迹的长度. 观测、理论和模拟都表明 (Birch and Chapman, 2001; Halekas et al., 2014a; Samir et al., 1983): 尾迹中电子的快速填充, 会产生双极电场和势阱 (Samir et al., 1983; Xu et al., 2019); 与之相伴随的对流性电子束 (Halekas et al., 2011a; Xu et

al., 2020)、双流不稳定、速度空间电子洞 (Malaspina and Hutchinson, 2019) 和静电波动 (Sreeraj et al., 2018; Tao et al., 2012), 都会限制电子的快速填充; 离子束则被双极电场加速进入尾迹, 也产生对流离子束, 但受到电子双流不稳定性产生的电势的强烈调制. 太阳风离子被双极电场加速而进入尾迹的过程被称为“方式一” (Nishino et al., 2009). 这些离子作为流体而言, 需要 30 s 方可注入到尾迹中心, 此时太阳风已经向下游运动 $6 R_L$. 也就是说, 从尾迹两侧来的离子在此时此处才能相遇, 这已经被 WIND 卫星观测到 (Ogilvie et al., 1996). 但在双极电场的作用下, 离子回填速度更快, 尾迹中心的对向流动的太阳风离子在月球下游 $3.5 R_L$ 处就出现了 (Halekas et al., 2011a). Futaana 等 (2010) 利用 Chandrayaan-1 卫星在紧贴月面的尾迹区域观测到沿磁力线传播的速度与背景太阳风速度相当的质子束流; Hutchinson (2013) 认为需要在 Samir 等 (1983) 提出的一维扩散模型中, 考虑月球作为球体的影响, 才能增强扩散电场, 理解这些质子束的加速过程. Fatemi 等 (2012) 利用混合模拟程序 (离子作为粒子、电子作为流体处理), 发现月球尾迹中距离月面 100 km 高度上, 高能离子可以普遍存在, 但它们的速度分布受到月面吸收的调制. 月球尾迹中的双极电场可以如此之强, 将回填的太阳风电子反射出去, 它们沿着磁力线向外传播, 甚至在与尾迹磁连接的月球上游区域都可以被观测到 (Futaana et al., 2001). 目前为止, 对尾迹观测的最远距离为 WIND 卫星在月球下游 $25 R_L$ 处实施 (Clack et al., 2004). 在这些大距离区域, 尾迹中的离子表现出双束流特性, 每股束流都具有很强的温度各向异性 ($T_{\perp} \sim 10 T_{\parallel}$), 在尾迹中心最为明显, 这是离子在填充尾迹过程中的绝热不变量守恒造成的.

相对于扩散电场驱动的“方式一”, Nishino 等 (2009) 根据 Kaguya 的观测数据, 提出月球向阳面反射的离子可以在被太阳风电场加速后, 以与月球尺度相当的回旋半径直接进入尾迹, 他们把这种离子回填尾迹的方式称为“方式二”. Dhanya 等 (2013) 则通过印度 Chandrayaan-1 卫星的观测数据发现, 当行星际磁场与太阳风准平行时 (此时太阳风电场很弱), 太阳风速度分布函数中高能端的离子, 具有很大尺度回旋半径, 它们可以绕过月球直接进入尾迹中. 离子进入尾迹的这个过程, 被称为“方式三”. Dhanya 等 (2016) 对这三种方式进

入尾迹的离子速度分布做了统计研究, 发现高能质子轰击月面, 可以对夜侧月面的粒子溅射 (中性原子)、静电环境产生可以观测的影响. Vorburger 等 (2016) 利用 Chandrayaan-1 上 CENA 的中性原子数据, 观测到进入月球夜侧的太阳风所激发的中性原子.

当月球位于地球磁层的磁鞘区域时 (一般也是超声速的), 尾迹也可以被观测到 (Clack et al., 2004). 此时, 尾迹最大的观测特征是尾迹中心区域的磁场增强, 而稀疏区的磁场减弱以及尾迹外缘的磁场压缩区难以在磁鞘扰动的磁场背景中鉴别出来.

3.3 电子遮挡区

尾迹是从离子角度对月球-太阳风相互作用的描述, 它以质子密度降低为标志, 实际上是月球对质子的遮挡 (吸收) 效应造成的. 在文献中, 太阳风电子与月球相互作用过程所受的关注较少. 由于电子运动速度极快 (太阳风电子热速度 $V_s \sim 2000$ km/s), 迁移率很高, 人们可能默认月球周边的太阳风电子基本呈未扰动状态. 实际情况并非如此. 比如, 利用电子反射法在距月球很远的区域遥感月面电势时, 就是利用了月球对电子的遮挡效应以及由此诱发的电场对它们的调制 (Halekas et al., 2005, 2011b). 月球对太阳风电子的遮挡效应也以电子密度降低为标志, 但遮挡区域的形态与尾迹极为不同, 它们基本是沿着行星际磁场而拓展的翅状结构: 依赖行星际磁场的位形, 这些遮挡区可以出现在上游的太阳风中 (Bale, 1997). 无论是尾迹, 还是电子遮挡区, 都是月球吸收的耗空区在背景太阳风 (V_{sw}) 中的传播 (V_s) 造成的, 因此它们的具体结构极度依赖各自的声速马赫数, 即 $M_s = V_{sw}/V_s$. 从速度分布函数角度看, 电子密度降低是由于电子速度分布函数的截断造成的 (只有冲向月球的电子, 背离月球的电子被月面吸收). 电子速度分布偏离均衡状态, 必然会导致月球周边强烈的电磁波动. 比如, 月球位于地球弓激波上游时偶发的剧烈的静电扰动 (Cairns, 1987; Filbert and Kellogg, 1979). Harada 等 (2014b) 利用 ARTEMIS 在月球上游观测的电子分布, 计算哨声波增长率, 成功再现了 ~ 100 Hz 窄带振荡和更低频率的频谱特征. 统计表明, 电子各向异性和哨声波强度随着月面高度而衰减, 但在 $6 R_L$ (~ 10000 km) 甚至更高高度上仍保持较高水平. 电子各向异性和哨声波强度与地壳磁

场呈明显的反相关, 表明磁场异常抑制了哨声波的生成 (此处电子处于磁化状态, 不能跨越剩磁的磁力线抵达月面而被吸收). 他们还发现, 太阳风电子在 $< 1 R_L$ 时, 偶尔呈现为各向同性, 但伴随着宽带静电波, 可能有不稳定性激发. 本文作者特别指出, 电子与质子遮挡区的空间覆盖区域的不同, 可能有两个后果: 在未来探测中, 不能默认月球周边的等离子体, 特别是电子具有均衡的分布 (这会影晌电子密度的计算); 其次, 除了静电扰动, 静电的直流分量, 也就是说大尺度的静电场, 可能也是一个不可忽略的问题.

月球对电子的遮挡, 除了发生在沿磁力线方向上, 还可以表现在垂直磁力线方向上. Harada 等 (2010) 发现, 当月球位于磁尾等离子体片中时 (此时等离子体温度较高), 在地球磁场与月面相切的区域, 运行于 100 km 高度的 Kaguya 卫星可以观测到电子速度分布存在空洞, 呈现回旋非对称结构. 他们把这种现象解释为等离子体片中的部分热电子 (回旋尺度与 Kaguya 卫星高度相当) 在回旋过程中被月面遮挡吸收造成的. 他们声称, 由此产生的静电分离电场可以达到 10 mV/m. 虽然这些结果是月球位于等离子体片中观测到的, 在太阳风中也应该存在类似的情况, 唯一的区别是, 太阳风温度较低, 电荷分离尺度较小 (电子回旋尺度大约 10 km). 目前尚未有卫星长期稳定运行于这个低高度区域. Harada 等 (2012) 利用 Kaguya 卫星的观测数据, 计算了这种遮挡效应产生的抗磁电流及磁场扰动、月表充电、垂直磁力线的电场, 他们发现遮挡效应与太阳风、尾瓣和等离子体片的不同背景等离子体环境有关, 在磁尾等离子体片时这些效应尤为明显, 可以产生 5 mV/m 的电场.

如果没有其他过程参与, 月球遮挡电子的后果应该是: 朝向月面的电子依然如故, 但背离月面运动的电子被月球遮挡而消失 (电子速度分布呈现半球形损失锥). 然而, 月球周边的静电环境会对这一图景进行修正. 比如, 月面具有负电势 (起始于晨昏线之前的向阳月面直至尾迹之中), 或者具有局域的磁场异常 (散落于月面各处), 朝着这些月面运动的电子中, 一部分会被月面电势或磁场反射, 调转方向做背离月面的运动, 由此形成独特的能量依赖的电子损失锥 (Halekas et al., 2005, 2008b, 2011b):

$$\sin^2 \alpha_e = \frac{B_{SW}}{B_M} \left(1 + \frac{e\Phi_m}{W - \Phi_{SC}} \right) \quad (1)$$

其中, α_e 为卫星观测到的给定能量 (W) 的电子的损失锥; B_{SW} 为卫星所在处的行星际磁场强度; B_M 为月面电子反射处的磁场强度; Φ_m 与 Φ_{SC} 分别为月面和卫星自身的浮动电位. 从公式的形式可以看出, 当电子的能量远高于月面电势能时, 即 $W \gg \Phi_m$, 该公式退化成磁镜损失锥公式 (不依赖能量). 此时该公式提供了“遥感”月面磁场的有效手段, 根据观测到的 α_e 和 B_{SW} , 获得 B_M . 当 E 较低时, 不同能量电子的损失锥不再相同; 损失锥消失时的电子能量 (W), 则可以计算出 Φ_m . 此时, 该公式提供了“遥感”月面电势的有效手段 (只有 $\Phi_m < 0$ 时). Halekas 等 (2011b) 利用该方法, 在远离月球 8000 km 距离上, 测得了月球位于磁尾等离子体片和尾瓣中时, 月面向阳面存在 100~200 V 的负电位 (这与传统的光电效应不一致). Poppe 等 (2011) 认为, 当月球位于磁尾等离子体片中时, 月球向阳面上方的极强负电位, 表明月面上存在非单调电势高度分布. Halekas 等 (2012) 指出, 在磁连接的月球上游太阳风中, LP 卫星除了观测到依赖能量的电子损失锥, 还常常观测到离开月球的低能电子通量的增强事件, 它们表现为束流或者是电子锥的形式. 这些结构出现在月球上游太阳风中, 因此, 他们把这些电子结构称为月球与太阳风相互作用的“前兆” (precursor). 他们认为这些低能电子与月面的磁镜反射或非单调电势结构有关, 可能是被运动的反射体反射 (类似于费米加速), 或者被束流不稳定性或者哨声不稳定性加速而形成的. Halekas 等 (2012) 利用 ARTEMIS 的观测, 发现这些电子和波动的“前兆”也可以在地球磁尾尾瓣区域观测到.

3.4 晨昏线及尾迹边缘磁场突增

虽然没有全球性的弓激波, 但月球尾迹的边缘区域却常常观测到磁场突然增强事件 (Ness et al., 1968). Explorer-35 在距离晨昏线下游 $0.3 \sim 4.7 R_L$ 范围内, 发现这些磁场突增通常发生在尾迹稀疏区的外侧. Apollo 轨道器在 ~ 100 km 轨道高度上, 发现这些磁场突增也可以发生在晨昏线之前或者之上. 文献中对这些磁场突增有多个名称, 比如“半影区增强 (penumbral increases)”、“外部最大值 (external maxima)”、“侧翼激波 (limb shock)”或“侧翼压缩区 (limb compression)”等. 多个名字反映出对其产生机制的不解 (Colburn et al., 1971; Halekas et al., 2008a; Schubert and Lichtenstein, 1974;

Srnka et al., 1975; Whang, 1969), 文献中的不同机制有 (Srnka et al., 1975): 月面剩磁偏转太阳风的激波作用; 月球大气; 高能光电子对局部等离子体加热; MHD 边界层中的热黏滞; 粒子动力学效应; 月球感应磁场作用. Halekas 等 (2008a) 报道称, LP 卫星在月球侧翼观测到磁场增强, 它们与 100 eV 电子通量的增强相关, 表现出类似地球弓激波的情况; 他们还观测到低频波动 (或宽频或窄带) 的出现, 往往与电子加速 (有时能到 1 keV) 同时出现. 他们认为磁场增强、电子加速、低频波动的同时出现, 是激波 (或许没有充分形成) 的证据. 如今, 虽然第一个机制最为流行, 然而 Sonett 和 Mihalov (1972)、Russell 和 Lichtenstein (1975) 给出的侧翼压缩区的位置与月面剩磁, 似乎没有一一对应的关系. Srnka 等 (1975) 指出, 月面地形地貌可以给出另一个补充机制: 当月面高坡度区域 (高山或撞击坑) 在晨昏线附近被太阳辐照时, 当地产生异常的光电子和电场可能对侧翼磁场压缩起作用 [由此可以产生离子偏转、反射甚至扬起的月尘, 它们被太阳风拾起 (pickup) 时, 可能会产生磁场压缩 (Xie et al., 2024)]. 利用 LP 在 20~120 km 高度上的磁场观测数据, Zhang T X 等 (2020) 发现, 月面侧翼的磁场增强集中分布在太阳风对流电场所偏向的一侧, 他们提出太阳风对月面反射离子的拾起作用可以产生月球侧翼的磁场压缩. Haviland 等 (2019) 与 Fatemi 等 (2015a) 的数值模拟结果表明, 如果月球内部存在弱感应磁场, 它们与太阳风相互作用, 也可以在晨昏线和下游尾迹边缘形成磁场突增.

3.5 迷你磁层

阿波罗时代就在月面剩磁区域对磁场和太阳风等离子体进行了协同测量. 结果显示, 部分太阳风可以穿透磁场抵达月面, 但太阳风的特征被极大修正. ALSEP 的 SIDE 仪器是最早探测月表等离子体的设备, 它在 Apollo-12 和 Apollo-15 登陆任务中被宇航员安装在月面. 这两次任务落点区域的磁场不同, 前者磁场达到 38 nT, 而后者则只有 3 nT. SIDE 设备具有 7 个粒子 (电子/离子) 探头, 沿月面法向向上探测, 覆盖几乎 90° 锥角范围的入射月面的粒子 (Neugebauer et al., 1972). 当月球位于太阳风中时, Apollo-15 落点的 SIDE 仪器观测到的太阳风等离子体与上游的特征没有区别 (月面剩磁很弱); 但 Apollo-12 的 SIDE 仪器观测到太阳风等

离子体则与上游太阳风的特征有明显区别 (剩磁较强). 观测表明 (Clay et al., 1975; Neugebauer et al., 1972): 月面等离子体速度大幅度低于 (最多达 ~70 km/s) 或等于上游太阳风速度; 且密度常有显著升高; 太阳风流速偏转最多达 10°; 离子通量被汇聚或者被散射达 3 倍左右; 质子被加热 2 倍左右, 远超磁场被压缩时的绝热效应. 日下点月面仅为 10 V 的正电位, 不足以造成如此显著的等离子体减速; 由于 SIDE 粒子入射开孔向上, 速度的降低也不会由反射离子造成; 月面观测到的电子则被加速到 120 eV. 这些观测表明月面上方剩余磁场, 特别是剩磁结构内部的霍尔电场或者是静电场, 可能是离子减速/电子加速的原因. Dyal 等 (1973) 展示了月球位于太阳风中时, Apollo-12 与 Apollo-16 在月面同时观测到月球内源磁场以及太阳风, 并发现两者压强的同步变化, 表明即使在月面剩磁区域, 而且剩磁可以很强时 [Apollo-12 (38±3 nT), Apollo-16 (112~327 nT)], 太阳风依旧可以抵达月面 (不能完全屏蔽). Borisov 和 Mall (2003) 的计算表明, 在太阳风穿透这些磁异常的过程中, 可以产生明显的低混杂频率的静电扰动, 波动的振幅由周边背景磁场的方向控制, 与此静电扰动相对应的极化电流, 可以产生明显的磁扰动.

月面剩磁与太阳风的相互作用的空间区域有个特定的名称 “迷你磁层” (mini-magnetosphere). 这个命名的背后逻辑是将该相互作用与地球等行星磁场与太阳风相互作用相类比. 激波是超音速流体与障碍物相互作用的标志性特征. Harnett 和 Winglee (2003) 的 MHD 数值模拟再现了这种流体相互作用模式, 磁层顶前的弓激波也毫不意外地出现 (Kuncic and Cairns, 2004). 他们还发现, 通过单个偶极场模拟出的迷你磁层比实际观测的要更大 (太阳风流体没有能充分压缩月球剩余磁场); 而多个偶极并列, 迷你磁层变得更大 (磁场被压缩的程度更低). Xie 等 (2022) 根据 Chang'E-4 在月面观测到的穿透剩磁的太阳风, 以及 ARTEMIS 在更下游月面上空观测到的磁场压缩结构, 认为一组磁异常相继与太阳风相互作用, 可以在月面产生激波结构. 此种做法, 实际上增大了磁场异常的空间尺度, 但又没有增加磁场强度. Lin 等 (1998)、Halekas 等 (2008a) 报道称在月球侧翼观测到磁场增强, 它们与 100 eV 电子通量的增强和低频波动 (或宽频或窄带) 相关, 他们认为这些现象是类激波结构 (或许激波没有充分形成). Xie 等 (2015) 通过

Hall-MHD 模型的模拟计算,发现弓激波在太阳风动压足够大时可以消失;如果弓激波存在,则它与磁层顶融合而难以分辨,这主要是由于太阳风离子可以穿过磁层顶而进入剩磁控制区域(不存在离子空腔)而造成的;太阳风电子则被屏蔽在磁层顶之外(电子空腔)。

实际观测中,月球剩磁上方的激波不常见,充分说明 MHD 可能不是描述这一相互作用的有效手段.由于月球剩磁的空间尺度较小,它们决定着相互作用的具体物理过程可能不是完全的磁流体过程,而是存在更小尺度的等离子体过程. Fatemi 等 (2015b) 利用混合模拟模型(离子为粒子;电子为流体)和 LP 观测的磁场,对 Gerasimovich 剩磁区域的太阳风相互作用进行了研究,他们发现在低高度(<3 km)扩散电场对离子反射起到主要作用,而在更高高度上,则霍尔电场起主导作用. Zhang 等 (2021a) 认为超声速太阳风与剩磁相互作用过程中,高速离子保持粒子性,虽然电子保持流体性,但其为亚声速,因此激波也不能形成. Halekas 等 (2014b) 利用 ARTEMIS 卫星在月球晨昏线附近观测到的磁场压缩,太阳风密度增强、加热、速度偏转和减速(从超声速下降到亚声速),以及波动现象,他们认为这些现象与无碰撞激波相关.他们还认为,剩磁反射的太阳风离子与太阳风相互作用,而不是剩磁本身,是产生这种激波结构的原因。

迷你磁层内部的结构和太阳风离子通量的变化,可以对月面太空风化效应产生明显影响. Hood 和 Schubert (1980) 第一次把月面剩磁下太阳风通量的降低与月面的白斑联系起来,他们认为 80 nT 的磁场可以有效屏蔽太阳风离子轰击,从而产生月面白班(lunar swirls). 文献中对这种相互作用做了大量的模拟、观测和实验研究. 模拟研究的结果基本都是揭示了迷你磁层的外部区域,存在一个类似弓激波或霍尔效应的区域,太阳风性质经由该区域后产生极大的变化. Bamford 等 (2016) 通过 PIC 模型对 Reiner Gamma 区域的强剩磁与太阳风相互作用进行了模拟研究,他们发现: Reiner Gamma 区域剩磁的位形控制太阳风粒子轰击月面的通量,具有横跃磁场的月面上方粒子通量降低,但在具有垂直方向磁场的月面,粒子通量增强,通量增减区域与月面白班的暗区和明区相对应,从而形成月球上最显眼的大白斑 (Colwell et al., 2007);月面磁场被太阳风压缩不是十分的明显;剩磁上方形成粒子耗空、电场增强、磁场堆积的类似弓激波

的无碰撞激波结构. Bamford 等 (2012) 还通过实验装置实验得到了类似的结果. Poppe 等 (2016) 利用混合(hybrid simulation)模型,针对 Reiner Gamma 地区进行了模拟,发现该区域的暗条与垂直月面的磁场位形有关;而白斑区域则位于横跃月面的磁力线下方. Deca 等 (2014, 2016) 利用 PIC 模拟发现,迷你磁层上方可以形成一个电荷分离的“halo”结构[与 Bamford 等 (2016) 的结果类似],并且迷你磁层对月面的粒子屏蔽效率是随时间衰减的. Deca 等 (2018) 利用 PIC 模型,专门针对 Reiner Gamma 磁异常做了模拟,他们的结果表明磁异常与太阳风相互作用,产生了该区域的大白斑. Kallio 等 (2012) 利用混合模拟模型,也对剩磁与太阳风相互作用做了模拟,发现月球剩磁下方月面,太阳风离子通量、密度以及整体速度都有所下降;而剩磁周边月面,质子密度和通量则高于太阳风. 从观测研究方面,太阳风离子被剩磁偏转并在剩磁侧翼汇聚的特点,已经被印度 Chandrayaan-1 卫星观测到的高能氢原子通量增强所证明 (Wieser et al., 2009). Wang X Q 等 (2012) 利用中国 Chang'E-2 的观测数据,发现磁异常上空 100 km 高度太阳风离子通量显著降低、温度显著升高,他们认为这是剩磁屏蔽太阳风的结果. 虽然他们没有给出剩磁的磁场位形,但离子密度降低、温度升高,也可能与 Bamford 等 (2016) 提及的无碰撞激波结构相一致. Saito 等 (2012) 根据 Kaguya 的观测结果指出,卫星在 100 km 高度观测到磁场异常、太阳风离子减速和加热、磁镜反射离子和电子加热. 当 Kaguya 卫星运行于 25 km 高度时, Saito 等 (2012) 观测到太阳风离子在垂直磁力线方向的减速、电子在沿磁力线方向的加速(加速能量与离子相同),他们认为这些观测证据表明,在 Kaguya 卫星上方的迷你磁层空间,存在背向月球的电场结构,该电场与源自电子离子运动解耦的霍尔电场一致. 他们还观测到反射太阳风离子的加热、整体速度比入射太阳风低,这表明在卫星高度以下存在非绝热的过程. 实验方面, Wang X 等 (2012) 通过实验装置,发现剩磁相互作用区上方电势更为复杂,随高度呈非单调分布,存在一个电势极小区域,这有可能与 Bamford 等 (2016) 数值模拟发现的类弓激波结构类似。

剩磁与太阳风的相互作用一般集中在向阳面,而剩磁在尾迹中的表现则较少提及. Nishino 等 (2015) 利用 Kaguya 在尾迹中 14~15 km 高度的

等离子体和磁场数据,观测到 Crisium Antipode 剩磁处的等离子体分布情况:等离子体空腔没有出现在剩磁最强区域,而是出现在剩磁附近;剩磁区域电子通量异常增强,在较低能量范围 (<150 eV) 偶尔出现沿着磁力线的反向束流(可能是夜侧月面的次级电子),但 $150\sim 300$ eV 的电子,则具有双损失锥分布特征(剩磁镜点间反弹运动的电子,来源未知)。

月面剩磁还可能与背景太阳风中的行星际磁场发生重联相互作用. Sawyer 等 (2023) 利用只有 15 km 高度的 ARTEMIS 卫星数据,观测到月面剩磁区域磁化的电子与非磁化的离子(霍尔效应),他们还发现卫星飞越过程中,磁力线位形发生变化,而且太阳风电子出现在闭合磁力线区域,他们认为这是月面剩磁与行星际磁场发生了磁场重联的结果. Rovige 等 (2024) 通过实验室装置复刻了小尺度剩磁与背景行星际磁场重联的场景,并与 Sawyer 等 (2023) 的观测进行了比较,他们认为,由于离子是非磁化的,这种重联完全由电子动力学决定. 实验表明电子压强梯度可能是重联的原因. Stanier 等 (2024) 对这种亚离子尺度的重联进行了动力学模拟,也发现该重联完全由电子动力学控制,并可以持续产生磁岛结构。

3.6 粒子反射

无论在磁化还是非磁化月面,部分太阳风离子和电子都会被反射. 文献中提及的月面电子反射较少,目前只看到 Xu 等 (2023) 利用 ARTEMIS 观测到的电子能谱数据,在分离光电子通量之后,研究了月面后向散射(反射)电子的能谱. 他们发现了散射系数随能量变化的规律;特别地,散射系数还与当地磁场的倾角有关,在磁化环境下,部分散射电子还会回到月面。

文献中提及的月面粒子反射,一般都是以离子为讨论对象. 据观测,非磁化月面的离子反射率只有 $0.1\%\sim 1\%$,但在剩磁处的反射率平均为 10% ,强剩磁上方反射率最高可达 50% (Lue et al., 2011; Poppe et al., 2017). 月面离子的反射形式以镜面反射或镜面漫反射为主,这一现象提示这是一种与电场有关的反射过程 (Poppe et al., 2017; Zhang et al., 2021a). 在剩余磁场上方,霍尔电场或双极扩散电场,是主要的电场形式 (Fatemi et al., 2015b). Poppe 等 (2012a) 利用 PIC 模型专门模拟了磁场极尖区的太阳风粒子的动力学过程,发现在双极扩

散电场、月面鞘层电场以及磁镜的共同作用下,太阳风离子被部分反射,并且在 cusp 区域产生了非单调的电势分布. Deca 等 (2016) 发现垂直月面的偶极剩磁的 cusp 区域,反射太阳风离子的效率达到 25% ,4 倍于偶极场平行月面的情形. Fatemi 等 (2015b) 根据混合模拟结果提出,月面剩磁对太阳风的屏蔽效率依赖太阳风动压:当太阳风动压低时,剩磁可以有效屏蔽太阳风,在月面上方 20 km 以内形成离子空洞,剩磁上方离子反射率达到 5% ;当太阳风动压增强时,剩磁不能有效屏蔽太阳风,月面依然有太阳风离子抵达,剩磁上方反射率也增加到 25% 。

太阳风离子被月面反射之后,会被太阳风对流电场加速,做大尺度的回旋运动,会对月球全球性空间环境产生影响. Harada 等 (2015) 利用 ARTEMIS 的数据,直接观测到月球前方太阳风中存在背离月球运动的离子(它们可能是月面反射离子,也可能是被电离的大气),他们发现这些离子与月球周边的 0.01 Hz、 1 Hz 的波动密切相关. 这些波动的空间分布被行星际磁场控制,且表现出向外传播的特征. 根据印度 Chandrayaan-1 卫星 SARA 设备在月球晨昏线上方观测到 H^+ 和 He^+ 离子的增强事件, Holmstrom 等 (2010) 通过数值模拟,发现月球向阳面产生的反射离子对月球周边大范围内的等离子体环境产生了影响. Baek 等 (2021) 通过研究 LP 观测到的 ULF 波动 (ultra-low frequency waves), 并对比 Kaguya 的观测数据,认为这种波动可能是剩磁反射的太阳风离子束引起的不稳定性. Chu 等 (2021) 利用 ARTEMIS 的观测数据,发现了剩磁上方的高频静电波动,这些波动伴随着电子加热. Harada 等 (2021) 则利用 Kaguya 卫星对电子和静电波的观测,发现这两者都与月面剩磁反射的电子和离子有关,且受行星际磁场调控. Halekas 等 (2014b) 利用 ARTEMIS 卫星在月球晨昏线附近观测到的磁场压缩,太阳风密度增强、加热、速度偏转和减速(从超声速下降到亚声速),以及波动现象,认为剩磁反射的离子被太阳风抬起过程中,可以产生激波. Zhang T X 等 (2020) 利用 LP 在 $20\sim 120$ km 高度上的磁场观测数据,发现月面侧翼的磁场增强集中分布在太阳风对流场所偏向的一侧,他们提出太阳风对月面反射离子的抬起作用可以产生月球侧翼的磁场压缩。

向阳面反射的离子以“方式二”进入尾迹,在尾迹中也可以产生扰动. Nishino 等 (2009) 根据

Kaguya 的观测数据,发现月球向阳面被月面或磁异常区域反射的太阳风离子,在经历太阳风拾起和加速后,可以以很大的回旋半径,直接抵达月球背面临近月面的尾迹中,他们把离子进入尾迹的这种方式称为“方式二”,认为以这种方式轰击月球背面的高能离子,可能会影响月球背面的电磁环境. Xu 等 (2020) 根据 ARTEMIS 的观测,发现以“方式二”进入尾迹的离子,会极大降低尾迹中电势降,甚至出现非单调的尾迹电势降;与之相伴,还可以观测到沿着磁场向尾迹加速的电子束流. Guo 等 (2019) 认为被月球向阳面磁异常反射的太阳风离子以“方式二”进入背阳面尾迹,形成尾迹中局部较高的数密度 ($0.20\sim0.47\text{ cm}^{-3}$),其抗磁效应,可以让尾迹磁场具有 $22\%\sim70\%$ 不等的衰减. Wang 等 (2010) 利用从晨昏线向月球背面尾迹深处运行的中国 Chang'E-1 卫星,也观测到离子束,其能量从 200 eV/q 提升到 $600\sim1500\text{ eV/q}$. 他们认为这是向阳面反射离子以“方式二”进入尾迹并受到了扩散电场的加速. Nakagawa 等 (2015) 利用 Kaguya 卫星的 LMAG (lunar magnetometer) 设备,在月球尾迹低高度上观测到了甚低频波 (extremely low-frequency, ELF). 这些波动表现出压缩性、非单色、非极化特征,常出现在尾迹中与月球不相连的磁力线上,并且与以“方式二”进入尾迹的离子相伴. Zhang 等 (2021b) 利用 ARTEMIS 的观测数据,发现月球向阳面反射的离子,可以通过太阳风拾起过程进入尾迹,并通过横向动量交换,使得尾迹摆动,表现为尾迹中磁场强度、离子温度、横向速度在沿尾迹方向上呈现空间上的周期性变化.

4 磁层等离子体与月球

在一个轨道周期的 29.5 天中,大约有 5 天时间,月球运行于地球磁尾 (见图 1). 此外,月球轨道运动还存在为期 18.6 年的轨道进动,因此,它们每次经过磁尾,位于磁尾等离子体片、尾瓣或太阳风的时间长度也存在 18.6 年的周期性调制. 通过模型计算, Hapgood (2007) 指出,从 1960 年至 2030 年期间,在每个 18 年周期中,月球每个月暴露于等离子片的总时间在 10 h 至 40 h 之内变化. 由于等离子体片中热等离子体轰击月球表面,暴露时间的长短可能对月面电荷积累和空间风化产生深远的影响. 反之,月球也会对周边磁层等离子体环境产生影响. Liuzzo 等 (2022) 利用从 2011 年 8

月 8 日至 2021 年 11 月 14 日共 126 次月球穿越地球磁尾时 ARTEMIS 的观测数据,对磁尾区域,包括等离子体片、尾瓣和磁鞘的等离子体和磁场特征进行了详细的统计分析,详细展示了各种影响.

4.1 等离子体片中的月球

月球是测量中、远磁尾等离子体属性的优良平台. 1967—1968 年, Explorer-35 在月球轨道运行了 11 个月球日,因此有机会系统地测量月球周边地球磁尾的空间环境以及月球对它们的影响. Prakash (1975) 认为 $150\sim3000\text{ eV}$ 能量范围电子积分通量的增强,是 Explorer-35 进入磁尾等离子体片的标志,它们发现电子速度分布是非麦克斯韦的,而是呈现具有高能电子通量尾巴的 Kappa 分布特征 ($k=8$). Prakash (1975) 发现, Explorer-35 在月球轨道上,其离子探测器可以观测到磁尾等离子体片中的地 (向) ($\sim1\text{ keV}$, $\sim200\text{ km/s}$, 通量 $\sim10^6/\text{cm}^2/\text{s}$) 与尾向质子流;尾向流被认为来自近地重联点;而地向高速流被认为来自远地重联点. Explorer-35 的离子探测器甚至还观测到月球轨道位置磁尾等离子体片的流反转现象,可能是卫星进入了磁场重联区域. Apollo-14 ALSEP 中的 CPLEE 探测器,对月球位于地球磁尾等离子体片时月面等离子体做了全面的探测. Rich 等 (1973) 的统计分析表明:月球轨道处磁尾等离子体的厚度通常在 $5\pm2 R_E$ (地球半径),地磁活动会降低观测到磁尾等离子体片的概率,可能由等离子体的摆动或变薄造成的;月表等离子体的特征参数为 $n=0.10\pm0.05$ ($0.05\sim0.20$) cc, $kT_e=200\pm50$ ($175\sim325$) eV, $kT_i=2.5\pm0.75$ ($1\sim5$) keV, $P_i=150\sim350\text{ eV/cm}^3$. Saito 等 (2014) 利用 Kaguya 卫星在月球向阳面 200 km 高度上观测到的等离子体片中冷离子的尾向加速过程.

地球磁层亚暴期间,当月球位于磁尾中性片附近时,位于月面的粒子探测器 (Apollo-12 ALSEP 的 SIDE 仪器) 可以观测到 $10\sim3000\text{ eV}$ 离子通量增强事件 (Garrett et al., 1971): 每次增强持续时间为 $0.5\sim1.0\text{ h}$; 离子通量从背景的 $10^6\text{ \#/cm}^2/\text{s/sr}$ 增至 10^7 甚至 $10^9\text{ \#/cm}^2/\text{s/sr}$; 通量峰值能量大都在 $10^2\sim10^3\text{ eV}$ 之间,而且可以表现为双峰结构 (H^+ 的全向通量为 $10^8\sim10^9\text{ \#/cm}^2/\text{s}$, He^{2+} 约 $10^7\text{ \#/cm}^2/\text{s}$). SIDE 设备探测离子的入射角度有限 ($\sim0.01\text{ sr}$),因此不能观测到离子在不同方向的分布. 如果假设 SIDE 观测到的等离子体片背景离子各向同性分布,它们的全向通量应该比太阳风低一个量级;而通量

剧增期间, 离子通量可以达到甚至超过太阳风水平. 这些离子长时间高效率地入注月面, 应该可以产生与太阳风相当的太空风化. 究竟是离子通量还是离子能量对空间风化有更大影响, 是一个值得探讨的问题.

抵达月面的等离子体片等离子体会对月球形成影响. Gold (1972) 认为 300 eV 以上的磁层电子持续轰击月球正面 (而且只轰击正面), 可以迁移月面灰尘, 这造成了月球正面比背面更光滑. Terada 等 (2017) 通过 Kaguya 卫星观测到 1~10 keV 的 O^+ , 这些氧离子只有在月球位于等离子体片中时才出现; 他们鉴别出这些氧离子来源于地球高层大气, 他们认为这些离子能够注入月表颗粒大约数十纳米的深度, 因此, 几十亿年前的地球大气层的成分可能保存在现今月表之上. Wei 等 (2020) 认为来自地球大气的标志性粒子, 特别是 ^{15}N , 可能在月球表面富集; 在地球长期演化的过程中地球磁层的大小可能变化, 磁尾中来自地球大气的离子可以从正面轰击月球, 也可以从背面轰击月球, 如果能够获取这些离子在月球正面和背面的富集情况, 甚至可以提取地球磁场演化的信息. Wang 等 (2021b) 通过分析 Chandrayaan-1 卫星 M^3 (Moon Mineralogy Mapper) 关于月球水 (OH/H_2O) 的观测数据, 发现水含量从低纬向高纬提升; 并且当月球位于地球磁尾时, 极区水含量维持了其在太阳风中时的水平. 他们认为地球风 (磁层的离子, 可以来源于地球电离层或太阳风, 包括 H^+ 、 He^+ 、 O^+ 、 N^{2+} 、 NO^+ 、 O^{2+}) 补充了由于热扩散而造成的月球水的损失. 同样利用 Chandrayaan-1 卫星 M^3 的观测数据, Li 等 (2023) 发现当磁鞘太阳风通量增加时, 位于磁鞘的月球正面水含量显著增加; 当月球位于磁尾中心区域时, 月球中纬区域的水含量基本维持不变, 他们认为等离子体片中的热电子维持了水含量水平.

月球位于太阳风中时, 电子能量只有~10 eV, 电子主导的晨昏线附近的电势仅为-10 V; 而在磁尾等离子体片中时, Poppe 等 (2012b) 指出: 月球向阳面的电势可以低至-300 V, 这主要是等离子体片中的热电子造成的; 磁尾等离子体片中离子温度比电子高出 20 倍, 因此, 离子对月面电势也进行调制.

月球的存在, 也对背景等离子体环境进行了调制. Rich 等 (1973) 认为, 月表没有明显影响等离子体片等离子体特征参数, 特别地, 月面没有对等

离子体产生遮挡效应, 这一现象可能主要因为磁尾磁力线相对月球的快速随机的运动而产生, 也可能由于等离子体片内热电子的快速扩散而产生. 然而, Lin (1968) 报道称, 当等离子体片的磁通量管与月面相连时, 月面对电子在沿磁力线方向的遮挡效应在高能电子中 (>20 keV) 已经被观测到; 这种高能电子的遮挡效应甚至被用于估算月球轨道处地球磁尾的对流电场 (Anderson, 1970). Harada 等 (2010) 则发现在地球磁场与月面相切的区域, 运行于 100 km 高度的 Kaguya 卫星可以观测到电子速度分布存在空洞, 认为这是月面在垂直磁力线方向上的遮挡效应; 等离子体片中的部分热电子在回旋过程中被月面遮挡吸收造成的. Harada 等 (2010) 则认为, 由这种回旋遮挡造成的静电分离可以产生 10 mV/m 的电场. 在磁尾等离子体片中, Apollo-15 的轨道卫星观测到磁场的独特结构: 月球日侧 100 km 高度的平均磁场相对背景增强. 磁场的这种变化可能与等离子体片中等离子体的地向运动有关, 产生类似于尾迹的结构. 与月球相连的磁通管的地球一侧等离子体被耗竭, 其抗磁效应可以解释磁场的增强 (Schubert and Lichtenstein, 1974; Schubert et al., 1974). Harnett 和 Winglee (2013) 通过多流体模型, 对磁尾等离子体片大尺度磁绳结构尾向穿越月球过程进行了模拟, 他们发现相互作用过程可以产生类似尾迹的结构. Rasca 等 (2021) 根据 ARTEMIS 的观测, 结合 MHD 和混合模型模拟, 认为 CME 压缩地球磁层期间, 在地球磁尾中也可以观测到尾迹现象. 由于超热等离子体的存在, 相比通常太阳风中的尾迹, 此时磁层中的月球尾迹离子回填更快, 尾迹更短, 夜侧月面的负电位可能更大.

Harada 等 (2013b) 利用 Kaguya 卫星在 23 km 高度上的观测数据, 发现磁尾等离子体片中的热电子可以被月面剩磁散射, 他们对 Kaguya 观测到的电子进行反向追踪, 获得了月面磁场强度千米尺度的分布图.

Harada 等 (2014a) 利用 Chandrayaan-1 中 CENA 的中性原子和 SWIM 的太阳风离子观测数据, 分析了月球位于等离子体片中时的磁层离子的后向散射, 他们发现后向散射率为~0.1, 峰值通量位于 100 eV, 这些特征与太阳风中后向散射的中性原子特征相似. 然而, 他们发现等离子体片中月球的散射率没有显著的南北半球差异 (南半球存在一个大而强的磁化区, 太阳风在南半球的后向散射

率比北半球下降 50%)。他们认为, 由于等离子体片质子的速度分布较宽 (温度高), 对于这些高能离子, 剩磁的屏蔽效果远不如太阳风中时有效。

4.2 尾瓣中的月球

地球尾瓣区域以热等离子体缺乏和磁场稳定为特征. 没有地球或太阳风等离子体杂质, 由热等离子体与月面或剩磁相互作用产生的磁干扰也很小, 是月面观测磁场 (Benson and Freeman, 1976a; Richmond and Hood, 2008; Russell et al., 1974b) 和起源于月球的带电粒子 (Harada et al., 2013a; Zhou et al., 2014) 的良好区域. 但实际上, 尾瓣也不是真空的, 其间可能充斥着不能被观测的冷等离子体。

在月球轨道和月面经常可以观测高速的冷等离子体, 这些等离子体可能起源于地球. 这些等离子体的出现成偶发态, 它们出现的概率和位置受行星际磁场, 特别是 B_y 和 B_z 分量的控制 (Hardy et al., 1979). Hardy 等 (1977) 报道称, 当月球位于尾瓣中时, 位于月球向阳面的 SIDE 设备还能观测到离子双峰结构: 主峰位于 100 eV, 次峰位于 1~2.75 keV. 两股离子束流的温度都很低 (10 eV). 由于 SIDE 不能区分子成分, 它们的起源有两个解释: 如果它们都是氢离子, 则它们的能量主要由于整体速度不同造成, 因此两个峰中的离子则起源于不同的区域; 如果两者具有相同的整体速度 (电场漂移运动), 它们的能量差别则主要由离子的质量不同造成, 根据计算, 此时两个峰的离子质量比为 1:14~1:16, 则次峰很可能是地球电离层的氧离子 [该假设下, 氧离子的密度应该在 $5 \times (10^{-5} \sim 10^{-3}) \text{ cc}$].

月球在尾瓣中时, 周边也可能充斥着月球电离层等离子体, 因此, 尾瓣也是观测月球起源的离子的优良区域. Liuzzo 等 (2021) 根据 ARTEMIS 卫星在尾瓣的观测, 结合混合模型数值模拟, 认为尾瓣中暗藏的、可能起源于地球电离层的、极冷的等离子体 (尾瓣暗物质) 可以产生月球尾迹状的结构. 这种尾迹结构与月球的光学阴影并不完全重合, 因此这些冷的等离子体也可以存在于光学阴影里. 他们由此提议, 在光学阴影和冷等离子体的背景下, 卫星浮动电位很低 (为负), 可以成为直接测量这些冷等离子体的最佳机会. Harada 等 (2013a) 利用 ARTEMIS 的观测数据, 发现当月球位于尾瓣时, 起源于月球的离子和电子可以在月球向阳面数百千米的高度上被观测到, 离子被较强的月面正电势所

加速, 电子速度分布则表现出明显的月面遮挡效应. Zhou 等 (2014) 利用两颗 ARTEMIS 卫星磁测数据的对比, 认为月球大气电离出的重离子, 沿着磁力线离开月面, 可以产生场向电流, 强度为 0.5 nA/m^2 . Cao 等 (2020) 则与 Hardy 等 (1977) 的假设不同, 他们认为 ARTEMIS 观测到的起源于月球的离子的加速, 是由于磁场梯度力和张力造成, 而不是由背景等离子体的对流电场 (拾起) 提供。

5 月球轨道上其他空间结构与月球

Nishino 等 (2011) 利用 Kaguya 卫星与 Chang'E-1 的联合观测, 发现当月球穿越地球弓激波时, 弓激波在月球向阳面 100 km 高度上没有受到明显影响; 但在月球背面的尾迹中, 由于等离子体被吸收, 弓激波不能维持, 原先激波面的磁场梯度趋于平缓. Xu 等 (2017) 则通过 ARTEMIS 的观测, 发现地球弓激波穿越尾迹时, 背景太阳风可以异常快地注入到尾迹中。

一般而言, 在月球向阳面, 光电子对月面电势的产生占主导地位, 导致月面较小的正电位. 但当月球位于地球的激波前兆区时, 地球弓激波反射的电子会在月面产生明显的次级电子, 并影响月面的电势强度 (Collier et al., 2011)。

Nabatov 等 (2023) 分析认为, 当月球穿过太阳风磁绳的等离子体结构时, 磁绳电流能强烈地改变月球日夜两侧的电势; 当磁绳轴向指向太阳时, 可能在月面产生厚度为电子回旋半径数量级的环电流等离子体层。

6 光电子

光电子是月面在太阳光, 特别是在紫外波段以下高能光子的轰击下, 释放出的低能电子. 光电子的能量主要取决于入射光子能量与激发光电子的功函数之差, 光电子主要通量集中在 20 eV 以下 (Popel et al., 2014)。

目前最早的月面光电子探测来源于 Apollo-14 上 ALSEP 中的 CPLEE 设备. 该设备可以直接观测能量范围为 20 eV~50 keV 的电子和离子在给定方向速度分布. 它有两个探头, 探头 A 垂直月面向上, 探头 B 由月面法向偏西 60° , 它们的粒子入射孔距离月面 26 cm 高, 可以有效观测月面向下的光电子通量, 即 $j_{\text{down}}(E)$. 当月球位于磁尾尾瓣中时, 其背

景环境几近真空, 不受背景电子的影响, 是观测月面光电子的良好环境 (Reasoner and Burke, 1972). CPLEE 在日照下的月面观测到能量在 200 eV 以下向下运动的光电子, 它们持续稳定存在于 26 cm 的高度上, 且表现出各向同性的特征 (探头 A 与探头 B 没有差别), 在 CPLEE 的能量范围内, 光电子通量与能量呈指数关系, 即 $j_{\text{down}}(E) = j_0(E/E_0)^{-\mu}$, 这里 $\mu \sim 3.5 \sim 4$; 在真空环境下 (磁尾尾瓣), 月面的电势是由下行光电子的最高能量决定的 (能量更高的光电子不能在向下方向观测到, 它们不能被月面电势束缚, 已经逃逸; 当然, 在截止能量以内应该有 $j_{\text{down}}(E) = j_{\text{up}}(E)$); 当 CPLEE 设备进入日食的半影区过程中, 这些电子通量持续线性地下降 (表明日面紫外光源的均匀分布), 直至进入本影区光电子通量下降到背景噪音水平.

通过朗缪尔探针, 也可以探测月面附近光电子的速度分布函数 (这里需要假设各向同性的分布), 从而获得光电子的密度和温度 (Druyvesteyn, 1930). 探测过程中, 需要获得探针与光电子源, 即 “月面” 之间的电势差, 然而, 真实的月面是难以实现接地的. Wang X 等 (2008) 指出, 除了在月面放置镍栅格网, 通过连接金属网格来实现接地之外 (Freeman et al., 1973), 还可以通过非对称的双探针模式来探测月面光电子: 其一端为光电子探测端 (小球形或细圆柱状, 都覆盖以石墨, 防止其发射光电子); 另一端为金属钎 (高光电子产率且在高温下蒸发少) 平板, 放置在临近月面处, 来代替月面.

Poppe 等 (2012b) 利用 ARTEMIS 卫星的观测数据, 在地球磁尾等离子体片中观测到能谱极窄的电子束 (能量在 100 eV 左右), 他们认为这是月面光电子被月面负电位加速后到达了月球上方很高的高度.

光电子在月面分布的理论有两个, 即流体静力模型和光电子产率理论.

流体静力模型中, 认为光电子的速度分布达成稳态, 它们的静电力与流体压力达成平衡, 可以获得光电子随高度分布的完备方程组 (Reasoner and Burke, 1972):

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -\frac{ne}{\epsilon_0} \\ en \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \frac{P}{n^\gamma} = C \end{cases} \quad (2)$$

其中, γ 为多方指数. 可以解出:

当 $\gamma \neq 2$ 时,

$$n(x) = n_0 \left(1 - \frac{\gamma - 2}{\gamma} \frac{x}{\lambda} \right)^{2/(\gamma-2)} \quad (3)$$

当 $\gamma = 2$ 时,

$$n(x) = n_0 e^{-x/\lambda} \quad (4)$$

其中, λ 为类似标高的特征长度:

$$\lambda = (P_0 / 2\pi e^2 n_0^2)^{1/2} \quad (5)$$

可以看到, 要理解月面上方光电子的密度随高度的分布, 需要事先知道月面 ($x = 0$) 处光电子的 n_0 和 P_0 . 由于月面上不同太阳天顶角位置, 单位面积月面获得的光子通量不同, Popel 等 (2015) 给出光电子密度随高度和太阳天顶角分布的经验公式:

$$n(x) = n_0 \frac{\cos \theta}{\left[1 + \sqrt{\cos \frac{\theta}{2}} \left(\frac{h}{\lambda_D} \right) \right]^2} + n_e (h/h_1)^p \quad (6)$$

当然, 根据该理论, Φ 和 P 在月面上方随高度的分布也可以解出, 但同样需要事先通过观测确定月面 ($x = 0$) 处光电子的 n_0 和 P_0 .

光电子产率模型则根据物质和入射光的性质, 直接解出光电子的发射通量. CPLEE 能够获取月面 26 cm 高度上向下运动的光电子的能谱 $j_{\text{down}}(E)$, 如果假设向上和向下的能谱相同, 即 $j_{\text{up}}(E) = j_{\text{down}}(E)$ [当然, 在一定能量之外, $j_{\text{down}}(E)$ 具有截止能量], 还可以建立基于月面物质特性的更为物理的模型 (Reasoner and Burke, 1972). 在月面上方光电子各向同性的假设下, 根据刘维定理, 可以获得月面及月面上方光电子速度分布函数之间的关系, 即:

$$f(E, x) = f(E_0, x = 0) \quad (7)$$

此处, $E = E_0 + e[\Phi_0 - \Phi(x)]$. 月面向上的光电子通量 $j_{\text{up}}(E)$, 显然是由月面的物质特性与光源决定的. 月面上, 向上的光电子微分通量, 可以写成:

$$j_{0,\text{up}}(E_0) dE_0 = \left[\int_W^\infty I(h\nu) d h\nu \cdot Y(h\nu) \cdot \rho(E_0, h\nu) \right] dE_0 \quad (8)$$

其中, $I(h\nu) d h\nu$: 表示能量位于 $h\nu$ 至 $h\nu + d h\nu$ 的光子通量; $Y(h\nu)$: 即光电子产率, 表示每个能量为 $h\nu$ 的光子能激发的光电子数目; $\rho(E_0, h\nu) dE_0$: 每个能量为 $h\nu$ 的光子激发的光电子在 E_0 至 $E_0 + dE_0$ 能谱范围的概率密度, 当然, 对给定能量 $h\nu$ 的光子, ρ 符合归一化条件, 即 $\int_0^\infty \rho(E_0, h\nu) dE_0 = 1$; W : 月面物质的功函数, 即电离能, $h\nu < W$ 时, 是不能产生

光电子的. 由此, 月面光电子向上的积分通量可以写成:

$$S_{\text{up}}(x=0) = \int_0^{\infty} j(E_0) dE_0 \quad (9)$$

月面光电子向上的积分通量 S_{up} 还可以根据定义直接写出:

$$\begin{aligned} S_{\text{up}}(x=0) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} f v^3 \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi dv \\ &= \pi \int_0^{\infty} \frac{2E_0}{m^2} f(E_0, x=0) dE_0 \end{aligned} \quad (10)$$

综合这两个表达式, 可以得到光电子速度分布函数与微分通量之间的关系, 即:

$$f(E_0, x=0) = \frac{m^2}{2\pi E_0} j(E_0) \quad (11)$$

根据刘维定理, 应有:

$$f(E, x) = \frac{m^2}{2\pi E} j(E) \quad (12)$$

光电子的密度可以根据定义直接写出:

$$n(x) = \int f(E, x) dv = 4\pi \int_0^{\infty} \left(\frac{2E}{m^3} \right)^{1/2} f(E, x) dE \quad (13)$$

密度随高度分布的函数与月面光电子通量之间的关系, 即:

$$\begin{aligned} n(x) &= 4\pi \int_0^{\infty} \left(\frac{2(E_0 + e[\Phi_0 - \Phi(x)])}{m^3} \right)^{1/2} f(E_0, x=0) dE_0 \\ &= 2 \int_{-e[\Phi_0 - \Phi(x)]}^{\infty} (2m(E_0 + e[\Phi_0 - \Phi(x)]))^{1/2} \frac{j(E_0)}{E_0} dE_0 \end{aligned} \quad (14)$$

将泊松方程与 $\partial\Phi/\partial x$ 相乘, 可以得到:

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x} \right)^2 = -\frac{2e}{\varepsilon_0} \int_{\Phi(x)}^0 n(\Phi') d\Phi' = -\frac{2e}{\varepsilon_0} \int_x^{\infty} n(x') \frac{\partial\Phi}{\partial x'} dx' \quad (15)$$

联立这两个方程, 可以得到 $\Phi(x)$, 前提是需要事先知道月面的 $j(E_0)$ 和 Φ_0 . 当然, 月面的 $j(E_0)$ 可以被观测到, 也可以由月面物质特性得到. 或者说, 从两个方式得到的 $j(E_0)$ 应该一致. 此后, 就可以获得 Φ_0 .

月面电势 Φ_0 常常是研究者非常关心的物理量. 从上面的两个理论推导可以看到, 月面电势信息还可以通过测量月面的光电子的能谱间接获得.

在光电子的产率理论中, 与光电子效率最为密切的月面属性是物质的功函数 W 和光电子产率

$Y(h\nu)$. 然而, 月面物质的这两个属性没有全面测量过.

在空间测量方面, Xu 等 (2021) 和 Kato 等 (2023) 利用 ARTEMIS 的电子观测数据, 发现月球位于太阳风和磁层中时, 都可以观测到以俄歇电子 (Auger electron) 为特征的光电子, 他们利用大高度上观测电子能谱, 结合上述光电子产率模型 (假设不同的 ρ), 计算了月面光电子产率在 0.01 至 1 之间变化 (受控于月面电位和卫星电位).

Walbridge (1973) 给出了月面物质这两个属性的经验描述, 而 Popel 等 (2015) 则将其公式化为如下形式:

$$\begin{aligned} W &= 6 \text{ eV} \\ Y(h\nu) &= \begin{cases} 0, & h\nu < W \\ 0.02 + 0.06(h\nu - W), & W \leq h\nu \leq 9 \\ 0.2, & h\nu \geq 9 \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

实验室测量也是获得光电子产率参数的手段. Gan 等 (2015) 在实验室测定了月面代表性物质橄榄石矿物表面的功函数 W . 他们发现 W 主要受表面形貌和晶体取向的影响, 其变化范围为 7.3~8.5 eV. 与此相对应, 在 X 射线和太阳紫外线照射下, 月面橄榄石矿物发射光电子所需的最小波长为 171 nm, 对应 $W=7.25$ eV; 光电子发射可以在月面形成 5~10 V 的正电势. Horanyi 等 (2008) 列出了月面观测以及实验室复现的月面光电子通量、能量以及与之相关的电势电场情况 (见该文献的表 1). Sternovsky 等 (2008) 根据上述的光电子产率模型, 计算了不同太阳活动条件下 (太阳活动极小期、极大期、以及太阳耀斑期间, <200 nm 电磁辐射谱有较大差别), 月面光电子通量、能量以及与之相关的电势电场情况 (见该文献的表 1). Poppe 和 Horanyi (2010) 根据光电子的不同分布函数 (麦克斯韦分布或实验测定的分布)、太阳活动水平 (极大期、极小期和耀斑), 模拟了月面以上的光电子鞘层情况 (光电子密度、电势和电场的分布), 发现: 光电子鞘层里电势的非均匀分布. Harada 等 (2017) 通过建模复刻了月球位于磁尾尾瓣中时, 月球向阳面 Apollo 和 ARTEMIS 对光电子的观测结果, 他们发现, 月球正面的电势一般为数十伏特, 但在强太阳耀斑期间, 该电势可以增强 2~3 倍.

这些结果表明, 月面静电环境是随着太阳活动变化的, 因此, 月面扬尘及迁徙, 可能也受到这些变化的控制 (Sternovsky et al., 2008).

7 次级电子

月面的物质成分和表面性质,除了决定光电子的产率外,还能在周边热电子的轰击下发射次级电子.由于背景电子轰击月面,对月面电势可以产生两方面的影响:电子注入月面,使得月面带负电;次级电子发射,则使得月面带正电.在仅有热电子轰击的背景下,月面究竟带何种电荷极性,依赖次级电子的产率,即入射一个电子,可以产生多少次级电子.Vaverka 等(2016)认为当背景入射电子的能量为 $<10\text{ eV}$ 时,热效应起主导作用,月面带负电;而当能量 $>20\text{ eV}$ 时,次级电子发射为主要效应,月面带正电.

确定入射电子对次级电子的产率函数是主要研究内容.Chow 等(1993)通过对一个球形尘埃颗粒的物理建模,详细分析了尘埃粒径与背景入射电子能量对次级电子产率的关系,他们发现:尘埃粒径越小,次级电子峰值产率越高,从 $1\text{ }\mu\text{m}$ 尘埃的1.5增加到 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 的5;不管粒径如何,峰值产率出现在入射粒子能量为 1 keV ($0.05\text{ }\mu\text{m}$ 尘埃的峰值产率延展能量较宽至 2 keV).Chandran 等(2017)对 SEP 期间高能电子轰击下尘埃粒子的带电进行了建模分析,建立了尘埃电位、次级电子产率与背景电子温度和尘埃粒径的关系,发现次级电子产率在 500 eV 达到峰值2.5.Horanyi 等(1998)和Katz 等(1977)都对三维电子分布轰击下物质的次级电子产率进行了分析,得到了入射电子通量、能量与次级电子产率之间的关系.通常模型中,月尘颗粒被假设为球形,这是不真实的.Vaverka 等(2013)则采用了具有不同尺寸、材料和表面粗糙度的粉尘颗粒,建模研究了次级电子发射,他们发现次级电子产率得以提高.Willis 等(1973)和Horanyi 等(1998)分别对整团的月壤样品和一个月壤颗粒进行了二次电子产率测定.Halekas 等(2009)则利用 LP 卫星磁连接到月球背面时 ER 探测器的电子观测数据,对二次电子通量进行了就位探测.他们认为:月面次级电子的发射能量应该为几个 eV,他们被月球夜侧朝向月面的电场加速,在 LP 的观测高度上,能量达到 $200\sim 300\text{ eV}$,且在能量和投掷角上呈现一定的扩散(可能与等离子体的束流不稳定性相关);观测到的次级电子通量仅为 Willis 等(1973)和Horanyi 等(1998)对月壤样品实测结果的 $1/3$.

在月球向阳面,一般而言,光电子通常占主导

地位(光电子产率一般远小于1,但其通量远高于背景电子),导致月面较小的正电位,向阳面的热电子产生的次级电子则可以加强这一正电位.

当月球位于太阳风中时,由于尾迹电子扩散,月球背阳面应该带上较强的负电荷;但次级电子发射则可能成为主导的过程,根据夜侧月面不同的风化层性质,次级电子的产率大为不同,可以导致月球背阳面的电势从 $0\sim -1800\text{ V}$ 不等的调制(Knott, 1973).月球位于地球的激波前兆区时,地球弓激波反射的高能电子会在月面背面产生明显的次级电子,并影响月面的电势(Collier et al., 2011).Nishino 等(2017)通过分析 Kaguya 的观测数据,认为当月球位于地球弓激波上游前兆区时,弓激波反射的离子及相关的电子进入月球尾迹,会激发次级电子,从而提升夜侧月面的电位.

8 月球逃逸层与电离层

8.1 逃逸层

探测表明,月球周边存在中性逃逸层.在其他行星上,逃逸层往往是指大气的最外层,其间气体分子的运动速度极高,部分粒子的速度可以超过星体的逃逸速度,从而永久摆脱星体引力束缚,散逸到行星际空间.文献中有时也将月球逃逸层称为月球的稀薄大气.月球逃逸层被认为来源于热解吸(thermal desorption),光子、太阳风、磁层高能粒子和微流星体的撞击,月球内部放射性衰变的产物,火山喷发时的去气过程(outgassing),甚至人为活动释放的中性气体(Daily et al., 1977; Hodges, 1975; Poppe et al., 2024; Tanaka et al., 2009; Tucker et al., 2021; Wilson et al., 2006).被微流星体撞击或静电作用扬起的月尘,也是月球逃逸层的一部分(Popel et al., 2015).月球逃逸层总密度低于 10^6 cc (相比而言,地球大气 10^{19} cc ,火星大气 10^{17} cc),成分复杂,不同过程可以产生不同的标志性的中性成分(Poppe et al., 2013b).某种逃逸层成分也可能具有多种来源,以钠逃逸层为例,它们可以起源于微流星体撞击气化、离子轰击溅射、光子轰击、热解吸等多个过程,而且具体过程对某个大气成分的贡献是不同的.Poppe 等(2013b)列出了月球逃逸层多种成分的数密度、各种过程对数密度的贡献率、以及各自的电离率(见该文中的表1).LADEE 卫星上的 NMS (Neutral Mass Spec-

trometer) 设备专门用于月球周边月球大气成分的变化 (Mahaffy et al., 2014), Halekas 等 (2015) 利用 NMS 的离子观测数据, 鉴别出多种大气成分, 还发现大气中存在碳原子. Stern (1999) 对 2000 年以前月球逃逸层的观测和理论进行了系统性总结. Wurz 等 (2022) 对月球和水星上非热解吸过程进行了综述.

热解吸过程 (thermal desorption) 是指由于月球表面自身温度的升高, 导致吸附在月球表面或者风化层最表层的中性粒子和挥发物, 获得足够动能而从月球表面脱离的过程. CH_4 、 NH_3 和 CO_2 等挥发物可能少量存在于日出晨昏线上方, 但由于月球表面的快速吸附, 它们基本上不存在于夜侧大气中. 此外, 虽然一些碱金属原子的主要产生机制是光致解析 (Wurz et al., 2022), 但热解吸过程也可能有贡献. 比如, 钠原子可以在热力作用下热解吸, 从而形成钠逃逸层的部分来源 (Mura et al., 2009).

等离子体轰击月面时, 离子轰击可以后向散射出氢原子 (backscattering), 也可以溅射出月面物质中的原子 (sputtering); 而电子轰击则可以产生贯穿效应, 产生次级电子 (见第 7 节). 等离子体轰击可以形成大气的主要成分: 氢、氦、氖和氩 (^{36}Ar). Grava 等 (2021) 利用 LRO 卫星上的紫外光谱仪 LAMP (Lyman-Alpha Mapping Project) 对月球周边的 He 原子进行成像测量, 结合 ARTEMIS 对上游太阳风 α 粒子 (He^{2+}) 的观测, 他们证实: 逃逸层 79% 的 He 来源于太阳风的 α 粒子; 而 21% 的 He 则来自月球内部 $[(1.49 \pm 0.08) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}]$, 这些 He 在月表具有晨昏不对称性, 晨昏密度比为 1.8; 当月球进入地球磁层时, He 的密度呈指数衰减, 衰减时间尺度为 4.5 天. Lue 等 (2016) 分析了月面剩磁对后向散射粒子的影响, 他们发现: 当月球位于磁鞘时, 非磁化月面的中性原子的后向散射与月球位于太阳风中的情形没有差别; 磁化月面的中性原子散射被月面剩磁降低, 而且降低程度受到太阳天顶角的调制.

当月球位于地球磁层时, 高能磁层离子可以轰击出 Na 和 K 等碱性金属成分, 这些中性原子的速度可以与月球的逃逸速度比拟 (2.4 km/s), 因此它们中的一部分可以逃逸出月球, 而另一部留在月面附近, 形成紧贴月表的逃逸层 (surface-boundary-exosphere, SBE). Wilson 等 (2006) 选择月球位于地球磁尾时的月全食期间, 对月面附近的 Na 层进行了光学观测, 他们发现 Na 层的亮度与月球

位于磁尾等离子体片中的时间密切相关, 充分说明背景等离子体环境对月球 SBE 强度的影响. 当月球进入地球磁层时, He 的密度指数衰减, 衰减时间尺度为 4.5 天 (Grava et al., 2021).

Tanaka 等 (2009)、Yokota 等 (2009) 则选择月球位于磁尾尾瓣时的独特时段 (此时没有热等离子体的轰击), 利用运行于 100 km 高度的 Kaguya 卫星, 鉴别出 H^+ 、 He^{++} 、 He^+ 、 C^+ 、 O^+ 、 Na^+ 、 K^+ 和 Ar^+ 多种逃逸成分 (它们是被光致电离的逃逸层粒子). 这些成分的分布与月面的太阳天顶角有密切关联: 日下点远高于晨昏线, 表明太阳光致电离是它们的主要成因. Tenishev 等 (2013) 通过对钠逃逸层的观测和建模, 发现月球的钠逃逸层在太阳光压的作用下, 可以形成非对称的结构 “钠尾”; 当月球位于地球上游时, 钠尾可以延伸至地球轨道, 并在地球重力的影响下发生形变.

月球逃逸层光致电离后, 可以被背景电场加速后轰击月面, 产生次级大气. Poppe 等 (2013b) 通过建模发现, 月球大气中的各种成分被光解电离之后, 可以被背景的磁层和太阳风电场拾起而加速, 并轰击月面, 还可以产生次级大气, 他们根据模型计算了月球轨道不同区域的大气产率, 指出大气的这种来源不可忽视: 平均而言, 在等离子体片中时, 向阳面产率可以等于或超过等离子体片粒子轰击月面的产率; 在太阳风中时, 局部地区产率甚至超过太阳风离子或微流星轰击月面的产率.

此外, ^{40}K 放射性衰变形成的 ^{40}Ar 也可以从月表排出.

Poppe 等 (2024) 提出, 随着人类在月面活动的增加, 释放的中性气体也可能影响月球逃逸层的浓度.

8.2 逃逸层的损失

热逃逸、表面吸附和光致电离, 是月球大气的三个重要的损失机制 (Tenishev et al., 2013). 这些过程导致月面逃逸层各种成分的日变化.

Tenishev 等 (2013) 分析了早期火山去气过程形成的毫巴级别稀薄的 CO 大气的逃逸情况, 他们认为如果逃逸层底部温度低于 400 K, 太阳引起的非热逃逸占主导, 大气寿命长达百万年; 但如果逃逸底部温度高于 400 K, 热逃逸占主导, 大气寿命只有数百年. 在热逃逸为主要损失机制时, 可导致大气较轻的成分氢、氦的快速损失; 根据星球的逃逸速度, 热逃逸可能限定了大气的温度. 由于氢、

氦主要来源于太阳风, 当月球位于磁尾时, 这些质量小的原子浓度快速降低. 较重的惰性气体热逃逸慢, 它们的浓度由光电离率决定; 由于它们的电离率很低, 一般能留存较长时间, 因此它们可以在月球位于磁尾中时以较高的浓度存在. 基于 SIDE 的观测数据, Benson 和 Freeman (1976b) 计算出磁尾中月球向阳面的氦和氙的含量分别为 10^5 和 10^4 cc. 这些数值都具有不确定性, 比 Hodges 等 (1974) 给出的数值高 1~2 个量级. 氙是由月面 ^{40}K 放射性衰变形成, 因此, 无论在磁尾还是在太阳风中, 其浓度基本不受影响.

Farrell 等 (2015) 认为极区撞击坑内可能存在一些特殊的挥发物, 它们在太阳风离子或微流星体的撞击下, 可以从撞击坑内释放出来, 并有一部分附着在撞击坑周边的月面上. 他们建议通过撞击坑的这些周边区域, 而非下到坑内, 就可以探索坑内挥发物.

光致电离也是月球逃逸层的重要损失机制之一. 该过程可能形成月球电离层, 在下节详细介绍.

8.3 月球电离层

8.3.1 电离层离子

光电离可以在月球周边形成稀薄的电离层. Ambili 和 Choudhary (2022) 基于 10 种中性成分, 建立了光化学时变大气模型, 可以用于计算 16 种离子的时空分布特征.

新电离的离子能够引发周边的空间环境效应. Poppe 等 (2013a) 利用月球位于磁尾尾瓣时 ARTEMIS 观测到的源自逃逸层电离的离子, 追踪了它们的起源, 并且对逃逸层的电离率和磁层尾瓣的对流电场进行了限定. 虽然 ARTEMIS 卫星的 ESA 探测器不能分辨离子成分, Zhou 等 (2013) 利用观测到的粒子能量分布和等离子体电中性假设, 对重离子的质量数进行了估计, 确认了 Poppe 等 (2013a) 的主要离子成分为 Al^+ 和 Si^+ 的说法. Poppe 等 (2013b) 则发现, 月球大气中的各种成分被光致电离之后, 可以被背景的磁层和太阳风电场拾起而加速, 如果轰击月面, 可以产生浓度很高的次级大气. 当月面带较高正电势时 (比如月球位于尾瓣区时), Poppe 等 (2013b) 指出被电离的大气离子被反射而不能回到月面; 月面带负电位时, Benson (1977) 则指出, 光致电离的离子可以加速轰击月面, 根据它们的能谱, 可以测量月面负

电位数值. Halekas 等 (2015) 利用 LADEE 的 NMS 的观测数据, 鉴别出多种大气成分, 它们的通量和电离率符合光电理论的预期; 他们还发现了大气中存在碳原子. 他们特别指出, NMS 设备的开孔从月面指向月外, 因此确保了他们观测的这些离子是大气成分被光电离而产生, 而不是从月面直接溅射出的离子. Halekas 等 (2016) 利用 ARTEMIS 卫星位于月球晨昏线上方 5000~7000 km 高度观测到的、与行星际磁场转向相关的、带有能量色散的离子能谱, 认为色散是由不同质量数的重离子的飞行时间效应而产生的 (重离子速度低, 到达卫星需要更长时间), 并由此追踪了它们的来源. 这些大高度的重离子应该是起源于逃逸层的电离, 推演的逃逸层空间分布具有很大的标高, 并且具有不对称性, 这些特征源自各向异性的微陨石轰击, 或者月面非对称性的剩磁分布 (剩磁会降低溅射原子的通量). Lipatov 等 (2012) 利用混合模拟模型模拟太阳风与月球相互作用, 并且融入光电离、电子碰撞电离和电荷交换等影响月球逃逸层的物理过程, 结果表明, 太阳风对 Na^+ 和 He^+ 离子拾起过程非常重要, 造成了不对称的密度分布、磁场分布和马赫锥 (尾迹).

Collier 等 (2014) 研究 ROSAT 卫星对月面 X 射线的观测数据, 认为太阳风中的高价重离子进入月球的逃逸层时, 可以与中性成分电荷交换, 该过程可以让重离子处于激发态而辐射软 X 射线或极紫外 (~ 1 keV). 他们认为, 虽然太阳风中的高价重离子只占太阳风总离子通量的 0.1%, 但因为太阳风通量绝对数值较高 ($3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 重离子的实际通量也不低. 当然, 太阳 X 射线被月面散射, 以及热电子轰击月面产生韧致辐射, 都可以产生 X 射线.

Poppe 等 (2024) 认为释放气体后, 这些气体的电离率在 0.1~10 倍于自然大气时, 这些离子与太阳风相互作用的场景与自然电离层的场景别无二致; 但电离率提升到 100~1000 倍时, 太阳风对这些离子的拾起效应将会显著增加, 明显影响太阳风与电离层相互作用的场景.

8.3.2 电离层电子

月球电离层应该还可以表现为浓度高、温度低的电子. 苏联月球卫星 Luna-19 和 Luna-22 的掩星实验 (Vyshlov and Savich, 1978), 首次发现了月球上空的稀薄的电离层 (以额外电子的存在为

基础), 它主要存在于月球向阳面, 据估算其电子柱密度在月面以上 10 km 区域可以达到 $4 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ (对应的数密度大约为 10^3 cc)。目前关于电子浓度测量值到底是多少存在争议; 观测的较高电子浓度与较低离子浓度之间的不均衡也是争议点之一; 此外, 高浓度的电离层离子缘何没有对背景太阳风产生影响, 也是未解难题。总之, 电子电离层是否存在, 还没有定论。

Ando 等 (2012) 讨论了各种来源电离层的可能强度。(1) 月球逃逸层的电离 (Stubbs et al., 2011): 逃逸层主要中性成分为氦, 浓度 $10^4 \sim 10^5 \text{ cc}$ (Stern, 1999), 理论电离率 10^{-6} s^{-1} , 理论计算电子密度为 $0.06 \sim 0.6 \text{ cc}$ 。(2) 月球局地剩余磁场, 可以屏蔽太阳风 (因此太阳风不能将电离层电子带走), 磁场内部的磁镜结构会束缚月球电离层电子 (Savich, 1976); Tripathi 等 (2025) 利用 Chandrayaan-2 的掩星观测数据, 发现月面存在 $2.5 \times 10^4 \text{ cc}$ 的电离层电子, 他们认为只有月球位于地球磁尾时月面剩磁区域才可以产生如此高的电子密度。(3) 尘埃逃逸层电离 (Popel et al., 2015): 在晨昏线附近, 月尘在月面带负电, 但它们在向上加速过程逐步被太阳辐照电离, 形成正电荷, 其电量与太阳光子通量、尘埃粒径、光子吸收率、光电子产率、尘埃数密度和电离电子存在时长有关, 计算结果表明粒径为 0.01、0.1 和 $1.0 \mu\text{m}$ 的尘埃电离所产生的电子密度分别为 10、0.2 和 0.3 cc 。Stubbs 等 (2011) 根据 Apollo-15 的光学观测, 计算了浮扬月尘发射的光电子和次级电子, 他们认为这两个过程可以产生 Luna-19 和 Luna-22 的掩星实验所观测到的 10^3 cc 的电子。Shen 等 (2023) 利用 ARTEMIS 对电离层电子进行了就位测量, 统计结果表明, 在 $10 \sim 50 \text{ km}$ 高度内, 电子密度上限为 35 cc 。目前的观测中, 电子密度在 $1 \sim 1000 \text{ cc}$ 以内, 但离子的观测通常在 $1 \sim 10 \text{ cc}$, 从电中性的角度看, 这里显然是有问题的 (Withers et al., 2021)。

月球电离层电子可能会达到非常的高度。当月球位于地球磁尾尾瓣区域时, 因为没有背景等离子体电场的影响, 是就位测量月球大气、电离层及其对电磁场影响的良好时机, 虽然此时大气和电离层浓度比在太阳风里时更低。此时, 月球电离层似乎不能由流体静力平衡来表示, 主要原因是重力的影响远小于压力, 或者说, 月球电离层的标高非常大。当月球位于地球磁尾时, Halekas 等 (2018) 通过 ARTEMIS 观测到的等离子体震荡频率, 反演出

月球向阳面很大高度 (5000 km) 存在 $0.1 \sim 0.3 \text{ cc}$ 的电离层电子。他们认为, 这种日夜不对称以及晨昏对称性, 表明这些电子是逃逸层被光电离的产物 (日下点最强)。本文作者指出, 月面的光电子和次级电子都可以沿着磁力线到达月面上方很大的高度 (Halekas et al., 2008b 中图 5, Halekas et al., 2009 中图 1), 它们在月面的空间分布, 可能强烈依赖行星际磁场的位形; 它们在 30 km 以下高度处的密度值得关注。

在地面上对月球电离层进行掩星测量是困难的, 它们常被地球电离层总电子含量的波动所掩盖。日本的 Kaguya 项目, 设置了一颗主星与两颗子卫星, 可以通过三星配置, 消除地球电离层的影响, 实现月球电离层的测量 (Imamura et al., 2008; Nabatov et al., 2003; Oyama et al., 2002): 星地联合 [一颗星测量太阳风、地球等离子体中的总电子含量 (total electron content, TEC), 另一颗星测量太阳风、地球等离子体和月球电离层, 两者之差为月球电离层]; 星星联合 (用两颗星直接临边测量月球电离层 TEC)。Imamura 等 (2010) 利用 Kaguya 的两颗子卫星的掩星数据指出: 当视线高度从 0 提升到 40 km 高度时, TEC 存在 0.1 TECU (10^{16} m^{-2}) 的降低, 他们认为这是月球电离层的反应。Ando 等 (2012) 分别利用星地联合与星星联合的方式, 对月球电离层进行了测量, 他们发现月球电离层在晨昏线附近区域可以偶然地存在, TEC 达到 0.06 TECU (虽然视线 TEC 一直处于大幅度的扰动之中)。Wang 等 (2015a, 2015b) 利用 Kaguya 子卫星的星地联合的掩星测量, 报道了月球电离层事件, 他们认为月面电离层 TEC 可以达到 0.02 TECU 。Withers 等 (2021) 分析了利用 LRO 对月球电离层进行星地掩星观测的可能性。Goto 等 (2011) 则提出, Kaguya 卫星 LRS 子系统内的 NPW 和 WFC 设备在观测地球极光千米辐射时 (AKR), 经常会出现地球极光区直接发射的波动与月球表面或月球电离层 (如果存在的话) 反射的波动之间的干涉现象, 他们提议通过比较观测的干涉图样与射线追踪理论构造的干涉图样, 来评估月表以上的电子密度分布。

现有的观测还没有揭示月球电离层的存在对月球磁导率和电导率的影响, 它们似乎还处于可以观测水平之下。正如前文所述, Russell 等 (1974b) 利用 Apollo-15 轨道器在 100 km 高度上的磁场观测, 计算出月球的整体磁导率 $\mu < 1.0$, 具有抗磁特性。这一个结果提示月球弱电离层的存在, 但随后他们又

指出,这一抗磁效果是由于月核的感应电流引起的 (Goldstein and Russell, 1975). 此外,月球周边没有观测到背景等离子体与月球电离层相互作用的任何信息. Choudhary 等 (2016) 利用 Kaguya 卫星的掩星数据,发现月面电离层电子密度可以达到 300 cc, 他们的计算表明: 如果这些电子对应于惰性元素的离子, 比如 He^+ 、 Ne^+ 、 Ar^+ , 它们会易于被背景太阳风拾起而消失, 密度只能达到 2~3 cc; 如果电子来源于分子性离子, 比如 H_2O^+ 、 CO_2^+ 和 H_3O^+ , 则难以被太阳风拾起, 而产生 250 cc 的数密度, 与电子密度相一致.

9 月 尘

9.1 月壤成熟度与月面白斑

Colwell 等 (2007) 给出了月表风化层 (lunar regolith)、月壤 (lunar soil) 和月尘 (lunar dust) 的定义.

月表风化层是覆盖整个月面、深度至少几米、附着于月球基岩上的一层未固结的岩石、鹅卵石和尘埃, 大部分由流星体轰击而产生. 在风化层之下 (直至 2~3 km 深), 是由较大流星体撞击而形成的破碎的基岩 (由 1 m 甚至更大的岩石构成), 岩石缝隙中填满了风化层的颗粒. 一般而言, 月球高地 (颜色较浅富含长石) 的风化层要比月海 (颜色较深富含玄武岩) 风化层更厚. 月球上所有的载人 和无人探测都是在这层厚厚的尘埃、颗粒和岩石碎片上进行的.

月表风化层来源于微流星体的撞击 (Colwell et al., 2007). 在 1 AU 的地球轨道上, 流星体的粒径整体分布呈现幂律指数分布状态, 但在 20~150 μm 粒径范围出现峰值 (Grün et al., 1985). 因此, 这些微流星体是撞击月球的主要粒子 (Colwell et al., 2007), 它们的质量为 10^{-10} ~ 10^{-8} kg, 它们的撞击速度最大可达 72 km/s. 它们撞击月面时, 可以溅射出 10^3 ~ 10^6 倍的月面物质: 撞击岩石时溅射物质少, 但出射速度高; 撞击月壤时溅射物质多, 但速度低. 撞击溅射物的粒径要比微流星的粒径要小得多, 这是月壤具有极细小颗粒的主要原因.

月壤是月表风化层中粒径小于 1 cm 的颗粒, 在月面厚度从几米至 15~20 m 不等, 中间夹杂着破碎的岩石和撞击溅射物 (Colwell et al., 2007). 它们被撞击和月球地震压实, 但压实程度在月球表

面上有很大变化, 这对月表人类活动会有较大影响.

通常用月壤成熟度 (maturity) 来描述月壤受流星体或太阳风轰击的程度, 因此可以表征月壤的年龄, 或者更确切地说, 表征月壤在地表暴露或者在地表附近受影响的时间. 月壤成熟度可以由两个量化的指标来表述: 纳米铁丰度和颗粒的粒径分布. 撞击过程 (流星体和太阳风), FeO 可以被还原而产生纳米铁, 它们在 10 nm 月壤颗粒中占据主导地位. 通过月壤样品相对于 FeO 的铁磁共振强度可以测定纳米铁的丰度, 从而量化月壤的成熟度. 纳米铁的含量还会影响月面的光学反照率: 全月面的月壤成熟度分布已经通过 Clementine 卫星观测到的全月光学特征, 特别是反射光谱而测定. 此外, 月面暴露时间越长, 粒径分布的峰值越小, 可以测定粒径分布来反演月壤成熟度. 但通过月壤粒径来判断成熟度可能存在的问题, 原因是月面电场可以迁移细小月尘, 从而改变粒径的分布. 因此, 月面粒径的大小不能完全代表微流星的撞击程度. 比如, Gold (1972) 认为, 当月球位于地球等离子体片时, 300 eV 以上的磁层电子持续轰击月球正面 (而且只轰击正面), 由此形成的较强电势可以迁移月面灰尘, 这造成了月球正面比背面更光滑. 目前, 没有看到全月面月壤颗粒粒径分布的信息.

月壤成熟度在月面的分布并不均匀, 局部月面的月壤成熟度可远低于周边地区, 可以从光学观测中看到所谓的月面白斑现象 (lunar swirl), 它们通常表现为月面的一些白黑相间的条纹结构. 这些成熟度较低的区域, 常与月面剩磁相关联. 白斑形成的主流观点为月球剩磁屏蔽还原性太阳风氢离子入注月面, 导致纳米铁含量较低, 从而表现出白斑结构 (Bamford et al., 2012). 也有研究将月面白斑的形成归因为彗星撞击月面 (Syal and Schultz, 2015), 他们认为彗星撞击过程产生的挥发性物质吹走月面细颗粒月壤, 从而产生局地的光学高反照率, 并且撞击过程可以解释局地磁场的形成.

Reiner Gamma Swirls 是月面最明显的白斑, 该地区典型的局地太空风化特征, 吸引着各国科学家的研究兴趣, 是今后低空卫星甚至地面探测的热门地点之一. Waller 等 (2022) 利用 FUV 和 NUV 波长的光谱观测, 确认了 Reiner Gamma 地区的月壤成熟度的不均匀性, 但暗条区域没有表现出太阳风汇聚后应该形成的“过成熟”的特征. 他们提议 Lunar Vertex 计划, 向该地区发射着陆器进行专门

探测. Hu 等 (2024) 针对 Reiner Gamma 地区开展了地质调查研究, 包括地形地貌、元素矿物以及 1:10000 地质填图分析, 总体认为该地区地质环境稳定, 主要受海玄武岩充填影响, 构造结构相对较小, 周边冲击盆地较少, 是未来地面着陆任务的理想地点. 到目前为止, 还未实现低空 (低于 20 km) 的、甚至地面的磁场、磁源和等离子体环境进行全面测量, 对太阳风与磁异常相互作用和白斑形成机制的理解, 目前主要还是通过数值模拟来实现的. Deca 等 (2020) 通过 PIC 数值模拟, 专门比较了在一个月球日过程中, Reiner Gamma 大白斑区域月面亮度与轰击月面的太阳风离子 (主要成分为 H^+ 与 He^{2+}) 的积分通量, 他们发现两者之间具有很好的相关性. Deca 等 (2021) 还通过 PIC 数值模拟, 详细分析了 Reiner Gamma 大白斑处等离子体环境受太阳风条件和天顶角的影响.

在第 3.5 节, 看到月面和空间的观测、剩磁与太阳风相互作用的数值模拟结果都表明, 剩磁不能完全屏蔽太阳风注入月面, 而只是改变 (或增加或减少) 其注入月面的通量. 本文作者指出, 剩磁下方月面太阳风入射通量虽然降低, 在月球长期的演化历史中, 这些通量的时间累积竟然没有达到某个阈值而使得其下方月面正常风化. 这说明, 入注离子的累积通量可能并不是影响风化的关键因素. 从后向散射原子观测可以看到, 剩磁区域一般带正电, 入注离子的能量降低. 粒子的瞬时通量 (比如某个极强的历史时期或事件) 或者粒子能量, 而非粒子的历史累计通量, 是否可能是月面黑白相间的条纹结构的起因, 这是一个值得研究的问题.

月尘是月表风化层中粒径小于 100 μm 的颗粒. 它们是星体表面之上的重要环境要素, 也是彗星周边和行星环中的主要粒子. 它们可能来自流星和微流星体撞击星体表面产生的溅射物, 也可能来自星体表面的土壤颗粒 (Zakharov et al., 2020). 在地球和火星等具有大气的星体上, 风可能是它们迁徙的主要方式; 但在月球等无大气的星体上, 撞击过程和星体表面电场力是它们在月面分布改变的主动力量 (Gold, 1955). 理论分析认为, 在多次撞击之后, 月尘的粒径满足 Kolmogorov 分布 (Adushkin et al., 2007; Popel et al., 2015).

月尘是月面上人类活动和设备运行的主要危害之一 (Zelenyi et al., 2021). Hirabayashi 等 (2023) 提出不同的静电除尘技术, 包括静电防尘罩、表面静电集尘和电子束轰击除尘技术等.

9.2 月尘的探测方式

目前文献中提及的月尘的探测方式有: 直接测量尘埃粒子 (Berg et al., 1976; Horanyi et al., 2015; Li et al., 2019)、测量细小尘埃与太阳风作用产生的中性原子 (低能中性原子成像) (Collier and Stubbs, 2009) 和测量尘埃粒子的散射光 (Rennison and Criswell, 1974) 等方式. 目前文献报道的月尘直接测量有三次.

第一次是 Apollo-17 登月期间在月面的直接测量. 宇航员在着陆点放置了 LEAM 设备, 原本的科学目标为在月面探测星际尘埃的撞击参数. 然而, 在实际的数据中, 发现了低速的 ($V < 100$ m/s, 远小于月球逃逸速度 2.4 km/s)、高充电 (10^{-12} C) 的尘埃粒子 (Horanyi et al., 2008). 因为速度低于月球逃逸速度, 它们只能起源于月面; 通量也远高于已知的星际尘埃及溅射物. 因此, 它们被认为是起源于月面的月尘 (Berg et al., 1976), 这是人类第一次在月面就位观测到了月尘粒子. Berg 等 (1976) 总结了这些月尘的观测结果: 无论是东向、西向还是向上的探头都探测到日出时的事件数目多于日落时; 日出时东向和向上的探头探测到事件数目远多于西向探头, 但西向探头事件更多分布在日出之前的更早时间; 假设每个尘埃粒子质量为 10^{-15} kg, 那么 LEAM 的东向探头测到的通量为 4×10^{-21} g/cm²/s (换算到 45 亿年的月球历史, 总通量为 0.6 g/cm²). 虽然 Berg 等 (1976) 给出的结果给人一种日出尘埃多于日落的印象, 但是, 本文作者指出, LEAM 所观测到的尘埃并不一定是正在逃离月面的颗粒 (因为 LEAM 的探头覆盖月面朝上的半球), 而可能是正在迁徙或者正在回落的尘埃, 这些数据可能并不能说明尘埃更倾向于日出晨昏线处被扬起. 如果更有效的加速发生在日落处, 它们逃离月面并到达更大的高度 [正如 Apollo-17 轨道器上的宇航员所看到的那样 (McCoy and Criswell, 1974)], 可能 LEAM 就不能观测到显著的事件. 本文作者还指出, 没有证据表明这些探测到的月尘不是流星体撞击的溅射物 [它们也是微米尺度, 速度也可以在 2.3 km/s 以下, 当然也可存在于水平方向 (Gruen et al., 2011)]. Farrell 等 (2007) 分析认为, 晨昏线处的由于地形坑洼不平, 局地的光照条件和微型尾迹结构会导致非垂直于月面的电场产生, 这是观测到水平方向灰尘的原因. 此外, 值得注意的是, LEAM 的西向探头与东向和朝上的两个探测

结构不一样,也可能是导致不同方向通量不一样的原因。

第二次测量为 LADEE 在月球轨道上对月球尘埃实施的直接测量。观测结果揭示了月球周围数百千米高度上存在一个持续的、不对称的尘埃云。这是人类第一次在月面高空就位观测到月尘颗粒 (Horanyi et al., 2014)。Horanyi 等 (2015) 认为这个高度上的粒径 $>0.3 \mu\text{m}$ 的尘埃不是由月面电场产生的,也不是由微流星体撞击形成的,而是由高速彗星尘埃粒子在偏心轨道上的撞击月球造成的。起源于小行星的、沿着近圆形的路径运动的微流星体,在月球轨道呈现各向同性的速度分布,它们撞击下产生的月尘应该是相对月球对称的、时间持续很久的分布状态;静电作用下形成的大高度月尘,应该是时变的、空间分布不均匀的状态 (Horanyi et al., 2008)。

第三次直接测量为中国 Chang'E-3 着陆器实施的。Li 等 (2019) 利用中国 Chang'E-3 着陆器距离月面 1.9 m 高度上的温控黏性石英晶体微天平,测量到 12 个月球白昼中月尘的持续积累,累计质量为 0.0065 mg/cm^2 ,等效的年沉积质量为 $21.4 \mu\text{g/cm}^2$ 。Zhang H 等 (2020) 分析了 Chang'E-3 着陆器的第一个月昼的月尘沉积质量为 0.83 mg/cm^2 ,他们认为这主要是由于着陆器登陆和巡视器运动造成的,这些数据低于 Apollo 的观测,可能是因为 Chang'E-3 着陆点是最年轻的月面,低月尘通量可能是由于月面太空风化程度低,风化层薄而造成的。Golub 和 Popel (2021) 认为这些沉积的月尘主要由于微流星体轰击月面溅射,而不是由静电作用,抵达并吸附在 1.9 m 高度的探测器,但他们的理论计算的质量通量比 Chang'E-3 的探测结果大了 7 倍,他们认为这可能是因为微流星体撞击溅射的月尘主要尺度为微米级,与更小的尘埃相比,它们的范德华黏滞力较小而不能吸附在探测器上。

通过低能中性原子成像对月尘进行测量,目前停留在理论计算阶段。Collier 和 Stubbs (2009) 通过模型计算,发现在一般太阳风的轰击下, $0.1 \mu\text{m}$ 以下尘埃粒子可以通过电荷交换生成中性氢原子,其产率在 10^{-5} ,但在高速太阳风的轰击下,产率可以达到 10^{-3} 。他们认为这种中性成分的通量,是可以通过现有的低能中性成像设备 (low energy neutral atom imager, LENA) 来测量,从而反演得到细小尘埃密度的高度分布。

为 Luna-26 设计的法拉第杯 (Faraday cup),

其原本的科学目标为探测太阳风参数,但 Nouzak 等 (2021) 分析认为该设备对 $0.2 \sim 60 \text{ km/s}$ 的月尘具有很好的灵敏度和探测效率,因此,也可以用于探测月尘。

当前,月尘存在的主要证据普遍来源于光学观测。这些观测在下文详细叙述。

9.3 低高度月尘

在月球上,月尘最早期的证据来自 Surveyor 系列任务观测到的沿月球日落地平线扩展的“地平辉光” (horizon glow)。这些辉光是局部的,横向延展仅数米的尺度,在垂直月面方向仅 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 的尺度。在 Norton 等 (1967) 提供的 Surveyor-1 月面着陆器的最早观测中,这些“地平辉光”一度被当做是月球临边观测到的日冕结构 [特别是这些辉光中还有一些向上延伸的射线状结构 (streamers)]。

Rennilson 和 Criswell (1974) 对 Surveyor-5、Surveyor-6 和 Surveyor-7 着陆器所观测到的月球西侧日落地平线上“地平辉光”作了总结:认为地平辉光是被月尘颗粒 (粒径: $10 \mu\text{m}$, 柱密度: 50 cm^{-2}) 前向散射的太阳光;这些尘埃颗粒短暂存在于晨昏线上方,形成尘埃云 (持续时间 $< 3 \text{ h}$);它们是带电的,被很强的静电场 ($> 500 \text{ V/cm}$) 悬浮在尘埃云中,静电输运可能是月球表面细小颗粒主要的局部输运机制;动态扬尘机制单位时间喷射的粒子大于 10^7 个,远高于微型陨石撞击所产生的通量。Rennilson 和 Criswell (1974) 认为,由于月面地势起伏,局地高出地面区域 (比如一块大岩石) 在日落时分,仍然被太阳光直射,可以发射能量高达 $500 \sim 1000 \text{ eV}$ 的高能光电子,它们中的一些会回到月面并聚集在附近的阴暗处。由于月面基本绝缘,故而在明暗处 (厘米尺度) 形成非常强的局部电场 ($\sim 1000 \text{ V/cm}$),正是这些强电场造成了月壤颗粒的局部输运。Rennilson 和 Criswell (1974) 也指出,给定月面在每个月球日中都以固定的模式经过晨昏线,月面月壤分布应该被扬尘改造,因此月表月壤理应呈现特殊模式的分布。然而,这些改造痕迹却没有被看到过。可能原因是:扬尘只出现在特定月面 (坑洼不平的月面) 上方,而 Surveyor 着陆器也好, Apollo 宇航员也好,可能都是选择的一些平缓的月面区域着陆,因此,月面月尘分布改造痕迹没有被实地看到。

目前所有的观测和理论分析都认为晨昏线处是月面扬尘最容易出现的区域。详细分析请参考第

2.2 节. 本文作者特别指出: Surveyor 系列登月任务中强调地平辉光出现在“日落”时分, 而非“日出”地平辉光. 这可能并不是物理原因造成, 而仅仅是 Surveyor 着陆器的视场方向便于观测“日落”, 而不便对“日出”晨昏线进行有效观测. 此外, 根据 Surveyor-7 着陆地点的地形地貌分析 (Rennilson and Criswell, 1974), 可以看到地平辉光位于着陆器日落方向 200 m 处, 横向延展 6° (20 m), 正好位于当地的小型撞击坑上方. 在后续的研究中, Xie 等 (2024) 指出, 位于晨昏线附近的撞击坑中, 等离子体的双极扩散电场可能是这种局域扬尘的驱动机制. 显然, 这种说法与 Rennilson 和 Criswell (1974) 的解释是不同的.

9.4 大高度月尘

月尘扬起高度可能不止数米高度, 这一结论最早来自于 Luna-21 任务中的 Lunokhod-2 月面巡视器上光度计的观测. 当 Lunokhod-2 位于晨昏线后方 1° , 其光度计记录的光强, 在消除所有背景光之后, 还有明显的亮度. Severny 等 (1975) 推断, 这些光是散射的太阳光; 然而, 此时太阳光只存在于距离月面 260 m 的高度以外, 它们可能被位于这些高度上的尘埃散射. 然而, Glenar 等 (2014) 利用 Clementine 卫星上星敏仪对月球进行了临边测量, 在扣除太阳、地球和背景太空的杂散光之后, 他们没有看到明显的大高度月尘的散射光. 他们认为由静电不能将月尘抛射到大高度而形成可以观测到前向散射光, 他们由此给出 $0.1 \mu\text{m}$ 大高度月尘的柱密度上限为 $5 \sim 30 \text{ cm}^{-2}$.

Apollo-17 号宇航员观察到伴随当地日出的射线状结构的高空“飘带”辉光 (streamers) (McCoy and Criswell, 1974), 它们在位于 120 km 高度月球轨道宇航员的视野中向上延展了 30° 范围. 如果是太阳日冕等离子体结构的散射光, 它们将对应 $1.5 \sim 13$ 个太阳半径的空间范围; 这个范围内突然出现的日冕辉光, 应该表明太阳等离子体在 $75 \times 10^6 \text{ km}$ 范围内突然并且同步地出现 (这个距离光传播需要 4 min). McCoy 和 Criswell (1974) 排除了这些辉光由太阳等离子体散射太阳光的可能性, 认为它们是航天器轨道高度 120 km 处的 $0.1 \mu\text{m}$ 月尘散射的太阳光. 这些飘带结构具有偶发性, 在 Apollo-10、Apollo-17 轨道上被看到, Apollo-8、Apollo-15 轨道上也可能看到, 但它们在 Apollo-16 飞行期间却没有出现 (McCoy and Criswell, 1974). 正如 Ster-

novsky 等 (2008) 的计算结果所得到的, 月面静电环境是随着太阳活动变化的, 月面扬尘及迁徙可能也受这些变化而控制.

9.5 月尘静电迁移理论

9.5.1 月面鞘层

月面扬尘有两个可能机制: 流星体和微流星体撞击月面产生的溅射物; 静电扬起的月壤颗粒. 流星体撞击的内容请参见第 11 节. 下面主要讨论静电扬尘.

静电扬尘并不是一个广泛接受的图景, 主要原因是对月球周边的等离子体静电环境和月尘的充电情况缺乏充分的观测 (Hartzell et al., 2013). 宇航员在月面活动时, 宇航服上吸附的月尘明显具有静电属性, 它们也会对宇航员月面活动产生危害 (Chou et al., 2019a, 2019b). 静电扬尘机制涉及到两个方面: 月面的静电鞘层是什么样的? 月壤颗粒的充电情况如何? 对这两个问题, 目前没有确切的答案.

月面的静电鞘层比较复杂, 受背景等离子体、太阳辐照、地形地貌、月球经纬度等因素控制, 详细情况请参见第 2.2 节. 这里仅给出稳定情况下, 等离子体鞘层的经验公式, 由光电子形成的鞘层见第 6 节. Nitter 和 Havnes (1992) 在仅考虑等离子体热效应的假设下, 对月面电势 Φ_s 做了理论分析. 结果表明, 月面电势与电子的温度 T_e 以及离子注入德拜鞘层的速度 V_i 有关:

$$\frac{e\Phi_s}{kT_e} = -2.84 + \ln M \quad (17)$$

其中, $M = V_i / (kT_e / m_i)^{1/2}$ 是德拜鞘边界上离子的声速马赫数. 要存在稳定的德拜鞘, 要求 $M > 1$ (Bohm 准则). 根据月面典型的太阳风条件, 由等离子体诱发的月面电势应该在 -10 V 左右. Nitter 和 Havnes (1992) 认为超声速的太阳风使得月面自动满足 Bohm 准则. 本文作者指出, 很显然, 在亚声速的等离子体中 ($M < 1$), 德拜鞘也是存在的, 这就需要在德拜鞘外存在一个预鞘层 (pre-sheath), 对离子进行预加速, 以满足 Bohm 准则, 从而形成稳定的德拜鞘.

9.5.2 月面和尘埃充电

月尘充电过程非常复杂, 涉及到以下过程: 等离子体热效应、光电效应、次级电子、摩擦起电 [这个可能在有风的火星上是重要的尘埃充电机制

(Sickafoose et al., 2001)]。Borisov (2024) 认为月面介电常数对月面上尘埃颗粒的充电也有影响, 在一些特别的区域, 尘埃可能带上更多的电荷。实际上, 对月尘充电的分析, 难以综合考虑多种要素, 比如同时考虑等离子体热效应、光电效应(月面和灰尘)和二次电子发射(Horanyi, 1996)。在实验室通过月壤样品或者模拟月壤, 测定它们的充电情况时, 一般充电源都比较单一, 而且往往认为尘埃粒子处于充电平衡状态(Horanyi et al., 1995, 1998; Wang et al., 2007a, 2007b)。但实际上, 一般都存在多个充电机制同时作用, 而且粒子带电也可能处于动态变化状态(非稳恒), 因此, 要描述真实的充电过程并不容易(Horanyi, 1996)。

实验室实验是理解尘埃充电的重要手段。Wang 等(2016)、Schwan 等(2017)通过实验发现, 月球表面的颗粒间形成微观空隙, 即使月面暴露在太阳光或热等离子体里而发射光电子或次级电子, 但由于空隙可以吸收更多的光电子和次级电子, 使得空隙周边月尘颗粒带上负电荷。这些相互临近的带负电的尘埃粒子可以相互排斥而脱离月面。实验表明, 它们可以以 0.6 m/s 的速度离开实验室界面, 实验室的跳跃高度对应到月面可以达到 0.11 m。Orger 等(2018)的理论计算表明, 这种微观充电机制可提供克服尘埃颗粒间范德华力的机制, 从而将月尘颗粒以数米每秒的初速度从月面弹射出去。

理论分析也是理解月尘带电的重要手段, 但对此准确描述还面临一些问题: 首先, 颗粒的形状对充电有很大的影响。在一般的分析中, 都把月尘作为球形颗粒来处理, 然而这与真实情形大相径庭, 实际上的月尘是尖锐的。其次, 在理论分析中, 一般总假设特定的月尘颗粒处于充电放电平衡状态, 每个尘埃带确定的电荷总量, 而事实上, 月尘颗粒的带电量可以随着背景等离子体的电势而不断改变; 如果尘埃的充电平衡达成的时间较长, 尘埃的充电平衡不容易达成。

特别是在晨昏线附近, 充电时间尺度特别关键, 它会影响颗粒的实际带电量(Orger et al., 2018): 月球晨昏线横扫月面的速度大约为 4.1 m/s (经度方向扫过月面 4°, 大约需要 8.216 h)。Pines 等(2009)通过理论分析认为, 月尘颗粒的带电是各向异性的, 主要由于太阳风和太阳光照的定向性决定; 月尘颗粒的充电过程可能很漫长, 依赖粒径和背景太阳风速度, 从数分钟至数小时不等(大颗粒时间短而小颗粒时间长)。Vaverka 等

(2016)通过建模, 发现月面的充电时间尺度大约为 1 s; 而月尘充电达到平衡的时间尺度随粒径减小而增加, 对亚微米的颗粒, 充电平衡时长为数个小时。Orger 等(2018)认为月壤孔隙周边颗粒吸收二次电子或光电子的充电时长也因粒径大小而不同, 微米的颗粒充电饱和时间为数秒至数分钟, 而亚微米颗粒的时长则从数分钟至数小时不等。如果月尘充电时间与月球自转时间尺度或月尘运动的时间尺度相比更长, 那么月尘颗粒的电量在扬起过程或者在随月球自转则不会变化, 但它们可能会存在强烈的晨昏不对称性(晨侧由夜侧进入白天; 昏侧则由白天进入夜侧)。

9.5.3 静电扬尘

静电扬尘的文献很多, 但大多数工作中只考虑重力与静电力的关系, 从而决定尘埃的运动。

基于不断改变带电量的假设, Nitter 和 Havnes (1992)计算了带电尘埃在月面上方的受力和运动情况, 他们认为脱离月面的带电尘埃有三种命运: 回到月面、悬浮在月面上方(在月面鞘层内弹跳)、也可以逃离月面。Popel 等(2022)认为月尘颗粒在上方鞘层运动的过程中, 电量会发射变化, 尘埃会在月面上下弹跳, 且振幅逐步耗散而变小。

一些工作给出了月尘颗粒带电与颗粒粒径之间的简单关系式(因此达成充电平衡, 电量不再变化), 因此可以通过数值模拟的方式, 计算出月尘的迁移过程(Wang J et al., 2008)。Orger 等(2018)基于月面尘埃空隙充电的微观电场计算, 发现该微观电场可以克服范德华力将尘埃颗粒剥离月面, 但他们的计算表明, 因为没有后续的加速, 所有颗粒在达到 5 km 的最大高度后, 都在重力作用下回到月面。

为了解释大高度的月尘, Stubbs 等(2006)提出了月尘的动态喷泉模型, 他们根据月面静电力与重力, 计算和比较了月面不同区域不同粒径的月尘提升情况(主要影响因素是月面电势和德拜尺度的不同), 发现晨昏线后方是最有利的月尘扬起区域, 粒径 0.1 μm 可以被 10 m 高的德拜鞘层电场抛射到数千米的高度。

实际上, 扬尘动力学中, 月尘尚未离开月面时, 除了重力与静电力, 还受到范德华力黏滞力的作用。如果静电力不能克服范德华力, 即使其可以克服重力, 也不能让尘埃颗粒剥离月面。颗粒之间的黏滞力可以表达如下(Perko et al., 1996):

$$F_{co} = CS^2d \quad (18)$$

其中, $C=D/(3.3 \times 10^{-18}) \text{ m}^2$, $D=4.3 \times 10^{-20} \text{ J}$ (月壤); S 为粉尘洁净度无量纲指标, 变化范围从 0 至 1, 是尘埃颗粒之间吸附分子厚度的量度; d 为尘埃粒径. 对范德华黏滞力的讨论, 还可以参见 Scheeres 等 (2010). 重力的表达式为:

$$F_g = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho g_M \quad (19)$$

其中, ρ 为月尘整体密度; g_M 为月表重力加速度. 静电力表达式为:

$$F_E = QE \quad (20)$$

其中, Q 为尘埃带电量; E 为电场强度. 对于月面而言, 除了电场或者电势结构纷繁复杂, 尘埃带电量也是不容易测定的关键物理量, 在文献中有不同的表达式. 有文献认为 (比如: Scheeres et al., 2010) Q 可以由高斯定律给出:

$$Q = EA\epsilon_0 \quad (21)$$

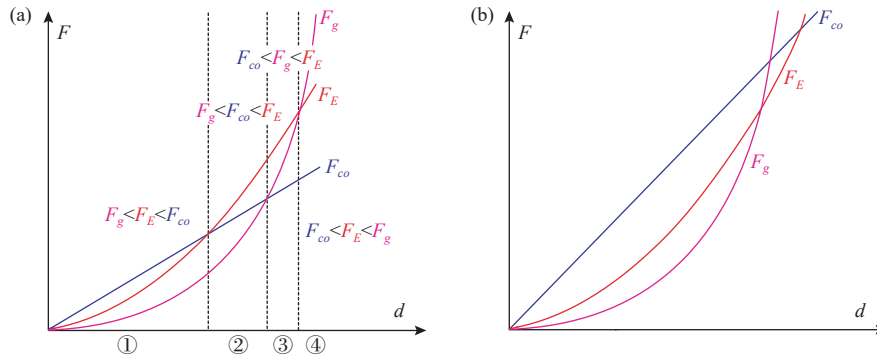
其中, E 为背景电场; A 为月尘的表面积; ϵ_0 为真空介电常数. 很显然, 如果假设月尘为球形颗粒, 可以看到月尘的带电量正比于 d^2 , 尘埃受到的静电力可以表达为:

$$F_E = E^2 \pi d^2 \epsilon_0 \quad (22)$$

可以看到, 只有在 $F_E > F_g + F_{co}$ 时, 月尘颗粒才可能离开月面.

尘埃的受力与粒径有明显不同的依赖关系: $F_{co} \sim d$; $F_E \sim d^2$; $F_g \sim d^3$. 从图 2a 可以看出, 当范德华力对粒径的依赖系数较低时: 粒径 d 很小 (很大) 时, 区间① (④) 向下的范德华力 F_{co} (重力 F_g) 远超其它力, 尘埃颗粒不能被扬起; 只有当粒径中等大小时, F_E 才能克服 F_{co} (区间②) 或 F_g (区间③), 月尘才可以扬起. 特别地, 在区间②, 由于 $F_{co} > F_g$, 月尘一旦离开月面, F_{co} 消失, 则可能 $F_E \gg F_g$, 月尘在月表上方空间可以被显著加速. 从图 2b 还可以看出, 如果范德华力对粒径依赖系数较大, 则可能出现静电力不可能扬起月尘的情况. Hartzell 等 (2013) 通过实验室实验, 发现的确存在最利于被静电扬起的中间粒径区间, 对月球的情况大约分布在 $15 \mu\text{m}$ 附近.

Wang 等 (2016)、Schwan 等 (2017) 基于实验发现的月面空隙微观充电可能提供克服范德华力的有效手段. Nichols 和 Scheeres (2022) 认为这种微观充电方式可以达成尘埃颗粒的超级充电状态. Orger 等 (2018) 对月面空隙微观充电作了理论计算, 结果表明: 月尘颗粒间的静电力足以克服范德华力而将月尘以一定的初速度脱离月面; 因为充电时间尺度依赖粒径, 大颗粒月尘 (微米) 比小颗粒月尘 (亚微米) 被微观充电机制弹出月面更为频繁, 大颗粒月尘的弹起高度更依赖于它们在月面发射的初始速度, 而小颗粒月尘的弹起高度则更依赖于月



注: 从图 a 可以看到, 当范德华力随粒径增长较慢时, 三个力大小相对关系存在 4 个区间: ①粒径很小时, 范德华力占主导地位, 尘埃颗粒吸附于月面, 不能扬起; ②随着粒径增加, 尘埃带电量 and 电场力变大, 强于范德华力与重力, 尘埃可以剥离月面, 并被静电力抛向空中; ③粒径更大, 则电场力直接克服重力, 将尘埃颗粒扬起; ④重力占主导, 尘埃不能扬起. 从图 b 可看到, 当范德华力随粒径增长较快时, 无论粒径大小如何, 电场力或小于重力, 或小于范德华力, 尘埃颗粒无法离开月面.

图 2 月面尘埃受力相对大小示意图. 横坐标为粒径, 纵坐标表示受力大小. (a) 当范德华力对粒径的依赖关系斜率较低时, 重力、电场力和范德华力对粒径依赖关系及它们的相对大小. (b) 当范德华力对粒径的依赖关系斜率较高时, 三种力的相对大小. 此时, 尘埃颗粒不能被扬起

Fig. 2 Diagram showing the relative magnitudes of forces on lunar dust grains. The d -axis represents grain size, and the F -axis indicates the magnitude of the force. (a) When the slope of the dependence of van der Waals force on grain size is low, the dependence of gravity, electric field force, and van der Waals force on grain size and their relative magnitudes. (b) When the slope of the dependence of van der Waals force on grain size is high, the relative magnitudes of the three forces. At this time, the dust grains cannot be lifted

面电场;月面静电场本身不能将月尘抛射到很大高度,因为月尘在月面鞘层内没有足够的时间和距离得以足够的加速.

Mishra (2020)、Mishra 和 Sana (2021) 则认为月尘颗粒对次级电子/光电子的发射和吸收,让尘埃颗粒的充电处于非均匀状态,颗粒的带电量的起伏,可以导致 10 kV/m 的微观电场.该电场可以克服范德华力而让尘埃颗粒剥离月面. Mishra 和 Bhatt (2023) 的计算表明,对于 0.1 μm 的尘埃,其起伏的电量,可以导致 10 MV/m 的微观电场,可以将该尘埃以 5 m/s 的速度弹出月面.

需要指出的是,无论在理论分析还是实验室实验中,往往将尘埃颗粒当成球形来处理,而实际月尘是非常尖锐和非对称的,理论和实验结果只能作为参考.

总之,由于月面电场和月尘颗粒带电的复杂性和不确定性,这也导致人们怀疑月尘的静电迁移机制是否真的有效.

9.6 尘埃等离子体

当带电月尘数密度比较低时,正如上文扬尘机制中提及的,尘埃可以用试验粒子 (a test particle) 的方法来处理.这种情形,可以被描述成 “a dust in plasma”,尘埃对背景等离子体的影响常被忽略.然而,当尘埃数密度达到一定的阈值,带电尘埃则不能当做试验粒子来处理,它们可以代替电子或离子,成为等离子体的成分.此时的等离子体可以被称为 “a dusty plasma” (尘埃等离子体).由于它们一般荷质比与电子、离子差别极大,因而等离子体动力学,特别是波动特征,会产生很大影响.这两个体系可以根据尘埃的数目密度 (用粒间距 a 表示) 与德拜尺度 (λ_D) 的关系来判断 (Shukla and Mamun, 2002): 当 $d < \lambda_D < a$ 时为 ‘a dust in plasma’; 而 $d < a < \lambda_D$ 时,为 ‘a dusty plasma’ (d 为月尘粒径).

目前关于月球尘埃的文献中偶尔提及尘埃等离子体 (dusty plasma) 时,大多数是指尘埃在背景等离子体中的运动,而不是指尘埃自身的集体效应 (Popel et al., 2013a, 2013b; Popel and Zelenyi, 2013, 2014).

也有一些工作注意到月尘可能参与了等离子体的行为. Morozova 等 (2015)、Mishra (2021a, 2021b) 讨论了带电月尘产生尘埃等离子体声波的情况. Izvekova 等 (2018) 认为尘埃等离子体声波可能对地球磁尾磁力线的重联产生影响. Kopnin 和

Popel (2021) 理论分析了尘埃等离子体声波不稳定 (声孤波).

10 高能带电粒子

无论月球运行在太阳风中,还是运行于地球磁尾区域,它都暴露在宇宙射线的辐射之下.月球轨道的宇宙射线主要指太阳高能粒子事件 (solar energetic particles, SEP) 和银河宇宙射线 (galactic cosmic rays, GCRs). 它们对在地球近地轨道以外的宇航员构成了重大的辐射危害.长期接触这些高能粒子可导致癌症发病率大幅增加 (Wilson et al., 1995, 1997). GCR 具有较硬的光谱,最大通量位置接近于 1 GeV,其通量在太阳极小期和极大期之间大约有 10 倍的变化. SEP 能谱较软,但它们的通量可以在小时时间尺度上变化超过四个量级,持续数天,并产生比 GCR 更高的通量.地球轨道附近的 GCR 和 SEP 与月球轨道处类似,特别是在 SEP 通量提升后,常呈现出各向同性的特征 (Winglee and Harnett, 2007). 月球基地如果具有极厚的墙体,是可以屏蔽这些高能粒子,但它们产生的次级粒子也是重要的危害源.从这个意义上看,如果月面能建立合适的磁屏蔽区域,可能是非常好的选择,因为这种屏蔽不会产生次级粒子.

GCR 和 SEP 可以穿透月表,抵达深处,导致深层电介质充电,充电情况取决于 GCR 和 SEP 流量、月壤电导率和介电常数. Jordan 等 (2014) 利用 LRO 卫星 CRTER 设备,对 GCR 的观测数据和 Advanced Composition Explorer 卫星上的 EPAM (Electron, Proton, and Alpha Monitor) 的 SEP 数据,构建月球极区永久阴影区 (自然放电很慢,时间尺度为 20 天) 深部充电模型,发现:太阳极小期时, GCR 可在永久阴影区浅表形成 700 V/m 的电场;而 SEP 事件中,则短暂形成 10^6 V/m 的强电场,甚至可以导致介质击穿,从而影响永久阴影区的月壤化学特性.

当月球运行于磁层等离子体片区域时,地球磁场可以对月面的宇宙射线辐射提供一定的屏蔽作用 (Winglee and Harnett, 2007). 屏蔽水平取决于行星际磁场的方向和月球基地的位置.总体而言:赤道区域的屏蔽强于极区 (极地暴露在 2 倍的辐射下);北向行星际磁场时的屏蔽强于其他行星际磁场条件.对于磁层活动期间 (磁暴、亚暴),内磁层散射的高能粒子,甚至内磁层自身加速形成的高

能粒子辐射,也是月面宇航员活动的重要危害来源.

Liuzzo 等 (2024) 利用 ARTEMIS 观测的 30~700 keV 的太阳高能电子,发现在地球磁尾中它们的通量与能谱,与 WIND 卫星在上游太阳风中的测量基本一致;唯一的区别是,在磁尾中,这些高能电子更趋于各向同性,而在太阳风中,它们更加趋向于沿着磁力线分布;这些电子轰击月球,可以在月球周边形成电子阴影区.

11 人为和流星体撞击等离子体

Apollo-14 的 LM 是第三艘成功登陆月球的载人航天器.它搭载了两位宇航员和月面实验包 ALSEP,于 1971 年 2 月 5 日 04:50:44 UT 与指令舱 CSM 分离,并于 09:18:11 UT 在月面着陆.停留 33 小时 31 分钟后,LM 于 2 月 6 日 18:48:42 UT 从月球升空,并将月面实验包 ALSEP 留在月面.此后,它与 CSM 成功对接.2 月 7 日 00:45:25 UT,LM 被丢弃并撞击月面.撞击点位于 Apollo-12 着陆点和 Apollo-14 着陆点之间,距离 Apollo-12 着陆点以西 66 km.撞击时,登月舱速度为 1.68 km/s,质量约为 2303 kg,其中有 180 kg 以二甲基肼燃料 ($\text{CH}_3\text{NHNHCH}_3$) 和四氧化二氮 (N_2O_4) 为主的挥发性推进剂残余物.大约 1 min 之后, Apollo-14 的 ALSEP 上的 CPLEE 探测器观测到低能电子与离子通量同时增强大约 1 个数量级 (此时 CPLEE 开启了介于 40~200 eV 之间 5 个电子能量通道、1 个 70 eV 附近的离子通道) (Reasoner and O'Brien, 1972).正负带电粒子通量同时增强,且电子通量无色散,这些等离子体被认为是 LM 撞击月面产生的等离子体云.同时, Apollo-12 的 ALSEP 上的 SIDE 探测器 (位于登月舱撞击点西侧),也观测到了离子通量的增强.分析表明,该等离子体云可能是撞击造成的中性气体云,在膨胀过程中被电离和加速而形成的 (Reasoner and O'Brien, 1972).

Srnka 等 (1979b)、Crawford 和 Schultz (1991) 与 Crawford (1992) 指出,流星体的高速撞击不仅能在月面产生剩磁,还能产生等离子体云. Artem'eva 等 (2001)、Yanagisawa 和 Kisaichi (2002) 都报道称,狮子座流星雨撞击月面时,可以产生在地球表面可以观测到的闪光. Popel 等 (2016a, 2017) 通过建模,分析了微流星体撞击而成的月尘的粒径分布和高度分布. Popel 等 (2018) 通过 LADEE 卫星于 2015 年 2 月 26 日拍摄到的流星体撞击月面时

的闪光 (optical flash) 照片,发现撞击过程可以产生两类尘埃云团:一类由溅射的风化层颗粒或碎片组成;另一类为撞击过程中熔融物的凝滴组成.两个尘埃云团具有不同的尘埃粒径、数密度、带电量、总体质量和扩散速度,因此它们可以在连续的光学照片中被清楚地区分开来.

Horanyi 等 (2015) 利用 LADEE 卫星的观测结果,揭示了月球周围数百千米高度上存在一个持续的、不对称的尘埃云,他们认为这个高度上的粒径 $>0.3 \mu\text{m}$ 的尘埃粒子是由高速彗星尘埃粒子沿着偏心轨道撞击月球而造成,而不是由起源于小行星的粒子沿着近圆形以较低速度撞击月球而形成.

Syal 和 Schultz (2015)、Gold 和 Soter (1976) 认为彗星撞击月面过程中产生的挥发性物质可以吹走月面细颗粒月壤,被撞击的月面剩余的月壤颗粒粒径较大,使得月面具有较高反照率 (白斑, lunar swirl),并且撞击过程中被彗星电离大气压缩的行星磁场还可以磁化撞击溅射物,从而形成磁场异常.他们以这种方式解释 Reiner Gamma 区域的白斑和剩磁.

12 总 结

本文对阿波罗时代以来对月球空间的带电粒子的探测研究进行了综述.这些带电粒子主要包括:电子、各类离子和带电月尘.可以看到,它们来源复杂,密度或通量多变,能量跨度很大,且运动受到多个过程制约.影响这些带电粒子的起源、特性和月面分布的月球外部因素有:太阳风、地球磁层、太阳光照、太阳质子事件、宇宙射线、流星体和微流星体、甚至人为活动;而影响它们的月球内部因素则主要是月面物质成分与月面剩磁.这些带电粒子动态变化,还通过它们自身形成的自洽的月面电场,相互耦合在一起.只有在月面、月面临近空间和背景空间对带电粒子、电场、磁场、辐射以及月面物质成分进行系统性地探测,才能解开它们之间的耦合关系,从而掌握各个过程的具体机理和贡献,提升对月球空间环境的认识.

References

- Adushkin V V, Pernik L M, Popel S I. 2007. Nanoparticles in experiments on destruction of rocks by explosion[J]. *Doklady Earth Sciences*, 415(1): 820-822.
- Allegri F, Dayeh M A, Desai M I, et al. 2013. Lunar energetic neutral

- atom (ENA) spectra measured by the interstellar boundary explorer (IBEX)[J]. *Planetary and Space Science*, 85: 232-242.
- Ambili K M, Choudhary R K. 2022. Three-dimensional distribution of ions and electrons in the lunar ionosphere originated from the photochemical reactions[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510(3): 3291-3300.
- Anderson K A. 1970. Method to determine sense and magnitude of electric field from lunar particle shadows[J]. *Journal of Geophysical Research*, 75(13): 2591-2594.
- Anderson K A, Lin R P, McGuire R E, et al. 1977. Linear magnetization feature associated with Rima-Sirsalis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 34(1): 141-151.
- Ando H, Imamura T, Nabatov A, et al. 2012. Dual-spacecraft radio occultation measurement of the electron density near the lunar surface by the SELENE mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117: A08313.
- Artem'eva N A, Kosarev I B, Nemtchinov I V, et al. 2001. Light flashes caused by Leonid meteoroid impacts on the lunar surface[J]. *Solar System Research*, 35(3): 177-180.
- Baek S M, Kim K H, Seough J, et al. 2021. ULF waves observed by lunar prospector[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(10): e2021JA029680.
- Bale S D. 1997. Shadowed particle distributions near the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A9): 19773-19778.
- Bamford R A, Kellett B, Bradford W J, et al. 2012. Minimagnetospheres above the lunar surface and the formation of lunar swirls[J]. *Physical Review Letters*, 109(8): 081101.
- Bamford R A, Alves E P, Cruz F, et al. 2016. 3D PIC simulations of collisionless shocks at lunar magnetic anomalies and their role in forming lunar swirls[J]. *Astrophysical Journal*, 830(2): 146.
- Beers B L. 1972. Numerical calculation of lunar wake in a magnetohydrodynamic model[J]. *Physics of Fluids*, 15(8): 1450-1456.
- Behannon K W. 1968. Intrinsic magnetic properties of lunar body[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(23): 7257-7268.
- Benson J, Freeman J W. 1976a. Direct measurement of plasma screening length and surface-potential near lunar terminator[J]. *Transactions-American Geophysical Union*, 57(12): 967.
- Benson J, Freeman J W. 1976b. A two gas model of solar wind accelerated lunar exospheric ions and its implications for models of the surface distribution of a non-considerable gas[C]// Proceedings of the 7th Lunar Science Conference.
- Benson J. 1977. Direct measurement of plasma screening length and surface-potential near lunar terminator[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 82(13): 1917-1920.
- Berg O E, Wolf H, Rhee J. 1976. Lunar soil movement registered by the apollo 17 cosmic dust experiment[C]// Interplanetary Dust and Zodiacal Light. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 233-237.
- Birch P C, Chapman S C. 2001. Detailed structure and dynamics in particle-in-cell simulations of the lunar wake[J]. *Physics of Plasmas*, 8(10): 4551-4559.
- Blakely R J. 1995. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511549816.
- Blank J L, Sill W R. 1969. Response of Moon to time-varying interplanetary magnetic field[J]. *Journal of Geophysical Research*, 74(3): 736-743.
- Borisov N, Mall U. 2003. Interaction of the solar wind with a localized magnetic barrier: Application to lunar surface magnetic fields[J]. *Physics Letters A*, 309(3-4): 277-289.
- Borisov N, Zakharov A. 2015. The influence of the surface conductivity on the local electric fields and the motion of charged dust grains on the Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 117: 295-302.
- Borisov N D. 2024. Influence of the lunar dielectric permittivity on charging by the solar wind plasma of dust grains on the surface of the Moon[J]. *Plasma Physics Reports*, 50(11): 1421-1427.
- Burinskaya T M. 2014. Influence of the solar wind on the distribution of the electric potential near the Moon's surface[J]. *Plasma Physics Reports*, 40(1): 14-20.
- Burinskaya T M. 2015. Non-monotonic potentials above the day-side lunar surface exposed to the solar radiation[J]. *Planetary and Space Science*, 115: 64-68.
- Cai S, Qin H F, Wang H P, et al. 2025. Persistent but weak magnetic field at the Moon's midstage revealed by Chang'e-5 basalt[J]. *Science Advances*, 11(1): eadp3333.
- Cairns I H. 1987. The electron distribution function upstream from the Earth's bow shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 92(A3): 2315-2327.
- Cao X, Halekas J, Poppe A, et al. 2020. The acceleration of lunar ions by magnetic forces in the terrestrial magnetotail lobes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(6): e2020JA027829.
- Chandran S B R, Renuka G, Venugopal C. 2013. Plasma electron temperature variability in lunar surface potential and in electric field under average solar wind conditions[J]. *Advances in Space Research*, 51(9): 1622-1626.
- Chandran S B R, Rajesh S R, Abraham A, et al. 2017. SEP events and wake region lunar dust charging with grain radii[J]. *Advances in Space Research*, 59(1): 483-489.
- Chou K, Wang A, Yu W, et al. 2019a. Laboratory experiments on dusty spacesuit charging and arcing in plasma[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(8): 3898-3904.
- Chou K, Wang A, Yu W, et al. 2019b. Laboratory investigations of charging/arcing risks for astronauts on lunar surface[C]// AIAA Science and Technology (SciTech) Forum and Exposition, San Diego, CA.
- Choudhary R K, Ambili K M, Choudhury S, et al. 2016. On the origin of the ionosphere at the Moon using results from Chandrayaan-1 S band radio occultation experiment and a photochemical model[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(19): 10025-10033.
- Chow V W, Mendis D A, Rosenberg M. 1993. Role of grain-size and particle-velocity distribution in secondary-electron emission in-space plasmas[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 98(A11): 19065-19076.
- Chu F, Halekas J S, Cao X, et al. 2021. Electrostatic waves and electron heating observed over lunar crustal magnetic anomalies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(4): e2020JA028880.
- Clack D, Kasper J C, Lazarus A J, et al. 2004. Wind observations of extreme ion temperature anisotropies in the lunar wake[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(6): L06812.

- Clay D R, Goldstein B E, Neugebauer M, et al. 1975. Lunar-surface solar-wind observations at Apollo 12 and Apollo 15 sites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 80(13): 1751-1760.
- Colburn D S, Currie R G, Mihalov J D, et al. 1967. Diamagnetic solar-wind cavity discovered behind Moon[J]. *Science*, 158(3804): 1040-1042.
- Colburn D S, Mihalov J D, Sonett C P. 1971. Magnetic observations of the lunar cavity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 76(13): 2940-2957.
- Coleman P J, Lichtenstein B R, Russell C T, et al. 1972. The particles and fields subsatellite magnetometer experiment[R]// Apollo 16 Preliminary Science Report. NASA Special Publication, 315: 23-21-23-13.
- Collier M R, Stubbs T J. 2009. Neutral solar wind generated by lunar exospheric dust at the terminator[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114: A01104.
- Collier M R, Hills H K, Stubbs T J, et al. 2011. Lunar surface electric potential changes associated with traversals through the Earth's foreshock[J]. *Planetary and Space Science*, 59(14): 1727-1743.
- Collier M R, Snowden S L, Sarantos M, et al. 2014. On lunar exospheric column densities and solar wind access beyond the terminator from ROSAT soft X-ray observations of solar wind charge exchange[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(7): 1459-1478.
- Collier M R, Newheart A, Poppe A R, et al. 2017. Stair-step particle flux spectra on the lunar surface: Evidence for nonmonotonic potentials?[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(1): 79-87.
- Colwell J E, Batiste S, Horanyi M, et al. 2007. Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics[J]. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2006.
- Crawford D A, Schultz P H. 1991. Laboratory investigations of impact-generated plasma[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 96(E3): 18807-18817.
- Crawford D A. 1992. The production and evolution of plasma and associated magnetic fields during hypervelocity impacts: Implications for planetary paleomagnetism[D]. Providence: Brown University.
- Daily W D, Barker W A, Clark M, et al. 1977. Ionosphere and atmosphere of Moon in geomagnetic tail[J]. *Journal of Geophysical Research*, 82(33): 5441-5451.
- Deca J, Divin A, Lapenta G, et al. 2014. Electromagnetic particle-in-cell simulations of the solar wind interaction with lunar magnetic anomalies[J]. *Physical Review Letters*, 112(15): 151102.
- Deca J, Divin A, Wang X, et al. 2016. Three-dimensional full-kinetic simulation of the solar wind interaction with a vertical dipolar lunar-magnetic anomaly[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(9): 4136-4144.
- Deca J, Divin A, Lue C, et al. 2018. Reiner Gamma albedo features reproduced by modeling solar wind standoff[J]. *Communications Physics*, 1: 12.
- Deca J, Hemingway D J, Divin A, et al. 2020. Simulating the Reiner Gamma swirl: The long-term effect of solar wind standoff[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(5): e2019JE006219.
- Deca J, Poppe A R, Divin A, et al. 2021. The plasma environment surrounding the Reiner Gamma magnetic anomaly[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(9): e2021JA029180.
- Dhanya M B, Bhardwaj A, Futaana Y, et al. 2013. Proton entry into the near-lunar plasma wake for magnetic field aligned flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(12): 2913-2917.
- Dhanya M B, Bhardwaj A, Futaana Y, et al. 2016. Characteristics of proton velocity distribution functions in the near-lunar wake from Chandrayaan-1/SWIM observations[J]. *Icarus*, 271: 120-130.
- Druyvesteyn M J. 1930. Der Niedervoltbogen[J]. *Zeitschrift für Physik*, 64(11): 781-798.
- Dubinskii A Y, Popel S I. 2019. Water formation in the lunar regolith[J]. *Cosmic Research*, 57(2): 79-84.
- Dyadechkin S, Kallio E, Wurz P. 2015. New fully kinetic model for the study of electric potential, plasma, and dust above lunar landscapes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(3): 1589-1606.
- Dyal P, Parkin C W, Daily W D. 1973. Surface magnetometer experiments: Internal lunar properties[C]// Proceedings of the 4th Lunar Science Conference, Houston, TX.
- Dyal P, Parkin C W, Daily W D. 1974. Magnetism and interior of Moon[J]. *Reviews of Geophysics*, 12(4): 568-591.
- Ellwood W B. 1934. A new ballistic galvanometer operating in high vacuum[J]. *Review of Scientific Instruments*, 73: 300-305.
- England A W, Simmons G, Strangway D. 1968. Electrical conductivity of the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(10): 3219-3226.
- Farrell W M, Stubbs T J, Vondrak R R, et al. 2007. Complex electric fields near the lunar terminator: The near-surface wake and accelerated dust[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(14): L14201.
- Farrell W M, Stubbs T J, Delory G T, et al. 2008a. Concerning the dissipation of electrically charged objects in the shadowed lunar polar regions[J]. *Geophysical Research Letters*, 35(19): L19104.
- Farrell W M, Stubbs T J, Halekas J S, et al. 2008b. Loss of solar wind plasma neutrality and affect on surface potentials near the lunar terminator and shadowed polar regions[J]. *Geophysical Research Letters*, 35(5): L05105.
- Farrell W M, Stubbs T J, Halekas J S, et al. 2010. Anticipated electrical environment within permanently shadowed lunar craters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115: E03004.
- Farrell W M, Poppe A R, Zimmerman M I, et al. 2013. The lunar photoelectron sheath: A change in trapping efficiency during a solar storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(5): 1114-1122.
- Farrell W M, Hurley D M, Zimmerman M I. 2015. Spillage of lunar polar crater volatiles onto adjacent terrains: The case for dynamic processes[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(9): 3160-3165.
- Fatemi S, Holmstrom M, Futaana Y. 2012. The effects of lunar surface plasma absorption and solar wind temperature anisotropies on the solar wind proton velocity space distributions in the low-altitude lunar plasma wake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117: A10105.
- Fatemi S, Fuqua H A, Poppe A R, et al. 2015a. On the confinement of lunar induced magnetic fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(17): 6931-6938.
- Fatemi S, Lue C, Holmstrom M, et al. 2015b. Solar wind plasma interaction with Gerasimovich lunar magnetic anomaly[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6): 4719-4735.

- Filbert P C, Kellogg P J. 1979. Electrostatic noise at the plasma frequency beyond the Earth's bow shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 84(A4): 1369-1381.
- Freeman J W, Fenner M A, Hills H K. 1973. The electric potential of the Moon in the solar wind[C]// Grard R J L. Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space. Astrophysics and Space Science Library, vol 37. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Freeman J W, Ibrahim M. 1975. Lunar electric-fields, surface-potential and associated plasma sheaths[J]. *Moon*, 14(1): 103-114.
- Fuller M. 1974. Lunar magnetism[J]. *Reviews of Geophysics*, 12(1): 23-70.
- Funsten H O, Allegrini F, Bochsler P A, et al. 2013. Reflection of solar wind hydrogen from the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(2): 292-305.
- Futaana Y, Machida S, Saito Y, et al. 2001. Counterstreaming electrons in the near vicinity of the Moon observed by plasma instruments on board NOZOMI[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A9): 18729-18740.
- Futaana Y, Barabash S, Wieser M, et al. 2010. Protons in the near-lunar wake observed by the Sub-keV Atom Reflection Analyzer on board Chandrayaan-1[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115: A10248.
- Futaana Y, Barabash S, Wieser M, et al. 2012. Empirical energy spectra of neutralized solar wind protons from the lunar regolith[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117: E05005.
- Futaana Y, Barabash S, Wieser M, et al. 2013. Remote energetic neutral atom imaging of electric potential over a lunar magnetic anomaly[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(2): 262-266.
- Gan H, Li X, Wei G, et al. 2015. Work function measurements of olivine: Implication to photoemission charging properties in planetary environments[J]. *Advances in Space Research*, 56(11): 2432-2438.
- Garrett H B, Hill T W, Fenner M A. 1971. Plasma-sheet ions at lunar distance preceding substorm onset[J]. *Planetary and Space Science*, 19(11): 1413-1418.
- Garrick-Bethell I, Poppe A R, Fatemi S. 2019. The lunar paleo-magnetosphere: Implications for the accumulation of polar volatile deposits[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(11): 5778-5787.
- Glenar D A, Stubbs T J, Hahn J M, et al. 2014. Search for a high-altitude lunar dust exosphere using Clementine navigational star tracker measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(12): 2548-2567.
- Gold T. 1955. The lunar surface[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 115(6): 585-604.
- Gold T. 1966. The Moon's Surface[M]// Hess M N, Menzel D H, O'Keefe J A. The Nature of the Lunar Surface. Baltimore: The Johns Hopkins Press.
- Gold T. 1972. Erosion, Transportation and the Nature of the Maria[M]// Runcorn S K, Urey H C. The Moon. Dordrecht: Springer Netherlands: 55-67. doi: 10.1007/978-94-010-2861-5_8.
- Gold T, Soter S. 1976. Cometary impact and magnetization of Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 24(1): 45-54.
- Goldstein B E, Russell C T. 1975. On the apparent diamagnetism of the lunar environment in the geomagnetic tail lobes[C]// Proceedings of the 6th Lunar Science Conference: 2999-3012.
- Golub A P, Popel S I. 2021. On the fluxes of dust particles detected near the lunar surface by the Chang'e 3 lander[J]. *Solar System Research*, 55(5): 389-397.
- Goto Y, Fujimoto T, Kasahara Y, et al. 2011. Lunar ionosphere exploration method using auroral kilometric radiation[J]. *Earth Planets and Space*, 63(1): 47-56.
- Grava C, Hurley D M, Feldman P D, et al. 2021. LRO/LAMP observations of the lunar helium exosphere: Constraints on thermal accommodation and outgassing rate[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(3): 4438-4451.
- Gruen E, Horanyi M, Sternovsky Z. 2011. The lunar dust environment[J]. *Planetary and Space Science*, 59(14): 1672-1680.
- Grün E, Zook H A, Fechtig H, et al. 1985. Collisional balance of the meteoritic complex[J]. *Icarus*, 62(2): 244-272.
- Guo D, Zhang X, Xie L, et al. 2019. Diamagnetic plasma clouds in the near lunar wake observed by ARTEMIS[J]. *Astrophysical Journal*, 883(1): 149.
- Halekas J S, Mitchell D L, Lin R P, et al. 2001. Mapping of crustal magnetic anomalies on the lunar near side by the lunar prospector electron reflectometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E11): 27841-27852.
- Halekas J S, Mitchell D L, Lin R P, et al. 2002. Evidence for negative charging of the lunar surface in shadow[J]. *Geophysical Research Letters*, 29(10): 1435.
- Halekas J S, Lin R P, Mitchell D L. 2005. Large negative lunar surface potentials in sunlight and shadow[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(9): L09102.
- Halekas J S, Brain D A, Lin R P, et al. 2008a. Solar wind interaction with lunar crustal magnetic anomalies[J]. *Advances in Space Research*, 41(8): 1319-1324.
- Halekas J S, Delory G T, Lin R P, et al. 2008b. Lunar prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A9): A09102.
- Halekas J S, Delory G T, Lin R P, et al. 2009. Lunar prospector measurements of secondary electron emission from lunar regolith[J]. *Planetary and Space Science*, 57(1): 78-82.
- Halekas J S, Lillis R J, Lin R P, et al. 2010. How strong are lunar crustal magnetic fields at the surface? Considerations from a reexamination of the electron reflectometry technique[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115(E3): E03006.
- Halekas J S, Angelopoulos V, Sibeck D G, et al. 2011a. First results from ARTEMIS, a new two-spacecraft lunar mission: Counterstreaming plasma populations in the lunar wake[J]. *Space Science Reviews*, 165(1-4): 93-107.
- Halekas J S, Delory G T, Farrell W M, et al. 2011b. First remote measurements of lunar surface charging from ARTEMIS: Evidence for nonmonotonic sheath potentials above the dayside surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116: A07103.
- Halekas J S, Poppe A R, Farrell W M, et al. 2012. Lunar precursor effects in the solar wind and terrestrial magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117: A05101.
- Halekas J S, Poppe A R, McFadden J P. 2014a. The effects of solar wind velocity distributions on the refilling of the lunar wake: ARTEMIS observations and comparisons to one-dimensional theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(7):

- 5133-5149.
- Halekas J S, Poppe A R, McFadden J P, et al. 2014b. Evidence for small-scale collisionless shocks at the Moon from ARTEMIS[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(21): 7436-7443.
- Halekas J S, Benna M, Mahaffy P R, et al. 2015. Detections of lunar exospheric ions by the LADEE neutral mass spectrometer[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(13): 5162-5169.
- Halekas J S, Poppe A R, Farrell W M, et al. 2016. Structure and composition of the distant lunar exosphere: Constraints from ARTEMIS observations of ion acceleration in time-varying fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121(6): 1102-1115.
- Halekas J S, Poppe A R, Harada Y, et al. 2018. A tenuous lunar ionosphere in the geomagnetic tail[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(18): 9450-9459.
- Hapgood M. 2007. Modelling long-term trends in lunar exposure to the Earth's plasmasheet[J]. *Annales Geophysicae*, 25(9): 2037-2044.
- Harada Y, Machida S, Saito Y, et al. 2010. Interaction between terrestrial plasma sheet electrons and the lunar surface: SELENE (Kaguya) observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 37: L19202.
- Harada Y, Machida S, Saito Y, et al. 2012. Nongyrotropic electron velocity distribution functions near the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117: A07220.
- Harada Y, Machida S, Halekas J S, et al. 2013a. ARTEMIS observations of lunar dayside plasma in the terrestrial magnetotail lobe[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(6): 3042-3054.
- Harada Y, Machida S, Saito Y, et al. 2013b. Small-scale magnetic fields on the lunar surface inferred from plasma sheet electrons[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(13): 3362-3366.
- Harada Y, Futaana Y, Barabash S, et al. 2014a. Backscattered energetic neutral atoms from the Moon in the Earth's plasma sheet observed by Chandrayaan-1/Sub-keV Atom Reflecting Analyzer instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(5): 3573-3584.
- Harada Y, Halekas J S, Poppe A R, et al. 2014b. Extended lunar precursor regions: Electron-wave interaction[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(11): 9160-9173.
- Harada Y, Halekas J S, Poppe A R, et al. 2015. Statistical characterization of the forenoon particle and wave morphology: ARTEMIS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6): 4907-4921.
- Harada Y, Poppe A R, Halekas J S, et al. 2017. Photoemission and electrostatic potentials on the dayside lunar surface in the terrestrial magnetotail lobes[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(11): 5276-5282.
- Harada Y, Kasahara Y, Nishino M N, et al. 2021. Global maps of solar wind electron modification by electrostatic waves above the lunar day side: Kaguya observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(17): e2021GL095260.
- Hardy D A, Freeman J W, Hills H K. 1977. Double-peaked ion spectra in lobe plasma-evidence for massive ions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 82(35): 5529-5540.
- Hardy D A, Hills H K, Freeman J W. 1979. Occurrence of the lobe plasma at lunar distance[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 84(NA1): 72-78.
- Harnett E M, Winglee R M. 2003. 2.5-D fluid simulations of the solar wind interacting with multiple dipoles on the surface of the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A2): 1088.
- Harnett E M, Winglee R M. 2013. Flux rope passage at the Moon while in the terrestrial magnetotail[J]. *Advances in Space Research*, 52(2): 243-250.
- Hartzell C M, Wang X, Scheeres D J, et al. 2013. Experimental demonstration of the role of cohesion in electrostatic dust lofting[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(6): 1038-1042.
- Haviland H F, Poppe A R, Fatemi S, et al. 2019. Time-dependent hybrid plasma simulations of lunar electromagnetic induction in the solar wind[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(8): 4151-4160.
- Hirabayashi M, Hartzell C M, Bellan P M, et al. 2023. Electrostatic dust remediation for future exploration of the Moon[J]. *Acta Astronautica*, 207: 392-402.
- Hodges R R, Hoffman J H, Johnson F S. 1974. Lunar atmosphere[J]. *Icarus*, 21(4): 415-426.
- Hodges R R. 1975. Formation of lunar atmosphere[J]. *Moon*, 14(1): 139-157.
- Hollweg J V. 1968. Interaction of solar wind with Moon and formation of a lunar limb shock wave[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(23): 7269-7276.
- Holmstrom M, Wieser M, Barabash S, et al. 2010. Dynamics of solar wind protons reflected by the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115: A06206.
- Hood L L, Schubert G. 1980. Lunar magnetic-anomalies and surface optical-properties[J]. *Science*, 208(4439): 49-51.
- Hood L L, Russell C T, Coleman P J. 1981. Contour maps of lunar remanent magnetic-fields[J]. *Journal of Geophysical Research*, 86(NB2): 1055-1069.
- Hood L L, Herbert F, Sonett C P. 1982. The deep lunar electrical-conductivity profile- structural and thermal inferences[J]. *Journal of Geophysical Research*, 87(NB7): 5311-5326.
- Hood L L, Huang Z. 1991. Formation of magnetic-anomalies antipodal to lunar impact basins: Two-dimensional model calculations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B6): 9837-9846.
- Hood L L, Zakharian A, Halekas J, et al. 2001. Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using lunar prospector magnetometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E11): 27825-27839.
- Horanyi M, Robertson S, Walch B. 1995. Electrostatic charging properties of simulated lunar dust[J]. *Geophysical Research Letters*, 22(16): 2079-2082.
- Horanyi M. 1996. Charged dust dynamics in the solar system[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 34: 383-418.
- Horanyi M, Walch B, Robertson S, et al. 1998. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E4): 8575-8580.
- Horanyi M, Wang X, Robertson S, et al. 2008. Surface-plasma interaction on the moon[C]// AIP Conference Proceedings, 1041: 113-116.

- Horanyi M, Sternovsky Z, Lankton M, et al. 2014. The lunar dust experiment (LDEX) onboard the lunar atmosphere and dust environment explorer (LADEE) mission[J]. *Space Science Reviews*, 185(1-4): 93-113.
- Horanyi M, Szalay J R, Kempf S, et al. 2015. A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon[J]. *Nature*, 522(7556): 324-326.
- Howes C T, Wang X, Deca J, et al. 2015. Laboratory investigation of lunar surface electric potentials in magnetic anomaly regions[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(11): 4280-4287.
- Hu J, Liu J, Liu J, et al. 2024. The geological investigation of the lunar Reiner Gamma magnetic anomaly region[J]. *Remote Sensing*, 16(22): 4153.
- Hutchinson I H. 2013. Near-lunar proton velocity distribution explained by electrostatic acceleration[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(5): 1825-1827.
- Imamura T, Oyama K, Iwata T, et al. 2008. The possibility of studying the lunar ionosphere with the SELENE radio science experiment[J]. *Earth Planets and Space*, 60(4): 387-390.
- Imamura T, Iwata T, Yamamoto Z, et al. 2010. Studying the lunar ionosphere with SELENE radio science experiment[J]. *Space Science Reviews*, 154(1-4): 305-316.
- Izvekova Y N, Morozova T I, Popel S I. 2018. Interaction of the Earth's magnetotail with dusty plasma near the lunar surface: Wave processes and turbulent magnetic reconnection[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46(4): 731-736.
- Johnson R E, Baragiola R. 1991. Lunar surface sputtering and secondary ion mass spectrometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 18(11): 2169-2172.
- Jordan A P, Stubbs T J, Wilson J K, et al. 2014. Deep dielectric charging of regolith within the Moon's permanently shadowed regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(8): 1806-1821.
- Kallio E, Jarvinen R, Dyadechkin S, et al. 2012. Kinetic simulations of finite gyroradius effects in the lunar plasma environment on global, meso, and microscales[J]. *Planetary and Space Science*, 74(1): 146-155.
- Kallio E, Dyadechkin S, Wurz P, et al. 2019. Space weathering on the Moon: Farside-nearside solar wind precipitation asymmetry[J]. *Planetary and Space Science*, 166: 9-22.
- Kato M, Harada Y, Xu S, et al. 2023. Modeling photoelectron and auger electron emission from the sunlit lunar surface: A comparison with ARTEMIS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(10): e2023JA031707.
- Kato M, Harada Y, Saito Y, et al. 2025. Inhomogeneous electrostatic potentials on the dayside lunar surface in the terrestrial magnetotail lobes: The role of lunar crustal magnetic fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130(2): e2024JA033545.
- Katz I, Parks D E, Harvey M J, et al. 1977. A three dimensional dynamic study of electrostatic charging in materials[R]. NASA-CR-135256.
- Knott K. 1973. Electrostatic charging of lunar-surface and possible consequences[J]. *Journal of Geophysical Research*, 78(16): 3172-3175.
- Kopnin S I, Popel S I. 2021. Dust acoustic solitons in the plasma of the dusty exosphere of the Moon[J]. *Technical Physics Letters*, 47(6): 455-458.
- Kuiper G P. 1966. The Surface Structure of the Moon[M]// Hess W N, Menzel D H, O'Keefe J A. The Nature of the Lunar Surface. Baltimore: The Johns Hopkins Press.
- Kuncic Z, Cairns I H. 2004. Radio emission from mini-magnetospheres on the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(11): L11809.
- Kurata M, Tsunakawa H, Saito Y, et al. 2005. Mini-magnetosphere over the Reiner Gamma magnetic anomaly region on the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(24): L24205.
- Kuznetsov I A, Hess S L G, Zakharov A V, et al. 2018. Numerical modelling of the Luna-Glob lander electric charging on the lunar surface with SPIS-DUST[J]. *Planetary and Space Science*, 156: 62-70.
- Li D, Wang Y, Zhang H, et al. 2019. In situ measurements of lunar dust at the Chang'E-3 landing site in the northern Mare Imbrium[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(8): 2168-2177.
- Li S, Poppe A R, Orlando T M, et al. 2023. Formation of lunar surface water associated with high-energy electrons in Earth's magnetotail[J]. *Nature Astronomy*, 7(12): 1427-1435.
- Lin R P. 1968. Observations of lunar shadowing of energetic particles[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(9): 3066-3071.
- Lin R P, Mitchell D L, Curtis D W, et al. 1998. Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: Results from lunar prospector[J]. *Science*, 281(5382): 1480-1484.
- Lindeman R A, Freeman J W, Vondrak R R. 1973. Ions from the lunar atmosphere[C]// Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference, Houston, TX: 2889.
- Lipatov A S, Cooper J F, Sittler E C Jr, et al. 2012. Effects of Na⁺ and He⁺ pickup ions on the lunar-like plasma environment: 3D hybrid modeling[J]. *Advances in Space Research*, 50(12): 1583-1591.
- Lisin E A, Tarakanov V P, Petrov O F, et al. 2014. Effect of the solar wind on the formation of a photoinduced dusty plasma layer near the surface of the Moon[J]. *Jetp Letters*, 98(11): 664-669.
- Liuzzo L, Poppe A R, Halekas J S, et al. 2021. Investigating the Moon's interaction with the terrestrial magnetotail lobe plasma[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(9): e2021GL093566.
- Liuzzo L, Poppe A R, Halekas J S. 2022. A statistical study of the Moon's magnetotail plasma environment[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(4): e2022JA030260.
- Liuzzo L, Poppe A R, Lee C O, et al. 2024. Solar energetic electron access to the Moon within the terrestrial magnetotail and shadowing by the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 51(14): e2024GL110228.
- Lue C, Futaana Y, Barabash S, et al. 2011. Strong influence of lunar crustal fields on the solar wind flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 38(3): L03202.
- Lue C, Futaana Y, Barabash S, et al. 2016. Scattering characteristics and imaging of energetic neutral atoms from the Moon in the terrestrial magnetosheath[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(1): 432-445.
- Lyon E F, Bridge H S, Binsack J H. 1967. Explorer 35 plasma measurements in vicinity of Moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 72(23): 6113-6117.
- Mahaffy P R, Hodges R R, Benna M, et al. 2014. The neutral mass spectrometer on the lunar atmosphere and dust environment ex-

- plorer mission[J]. *Space Science Reviews*, 185(1-4): 27-61.
- Malaspina D M, Hutchinson I H. 2019. Properties of electron phase space holes in the lunar plasma environment[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(7): 4994-5008.
- McComas D J, Allegrini F, Bochsler P, et al. 2009. Lunar backscatter and neutralization of the solar wind: First observations of neutral atoms from the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 36: L12104.
- McCoy J E, Criswell D R. 1974. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust[C]// Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 3: 2991-3005.
- Mishra S K. 2020. Role of photoelectric charge fluctuation in dust detachment from the lunar surface[J]. *Physics of Plasmas*, 27(5): 052901.
- Mishra S K, Bhardwaj A. 2020. Electrostatic charging of permanently shadowed craters on the Moon[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496(1): L80-L84.
- Mishra S K. 2021a. Nonlinear dust acoustic perturbations within dusty plasma over sunlit lunar surface[J]. *Physics of Plasmas*, 28(3): 033702.
- Mishra S K. 2021b. On the possibility of dust acoustic waves over sunlit lunar surface[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 503(3): 3965-3974.
- Mishra S K, Sana T. 2021. Distribution of charge on floating dust particles over sunlit locations on Moon[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508(3): 4332-4341.
- Mishra S K, Bhatt A. 2023. Estimating optimum launch velocity of electrostatically detached dust particles over sunlit locations on Moon[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(1): 85-90.
- Mitrofanov I G, Sanin A B, Boynton W V, et al. 2010. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND[J]. *Science*, 330(6003): 483-486.
- Miyake Y, Nishino M N. 2015. Electrostatic environment near lunar vertical hole: 3D plasma particle simulations[J]. *Icarus*, 260: 301-307.
- Morozova T I, Kopnin S I, Popel S I. 2015. Wave processes in dusty plasma near the Moon's surface[J]. *Plasma Physics Reports*, 41(10): 799-807.
- Mura A, Wurz P, Lichtenegger H I M, et al. 2009. The sodium exosphere of Mercury: Comparison between observations during Mercury's transit and model results[J]. *Icarus*, 200(1): 1-11.
- Nabatov A S, Imamura T, Savich N A, et al. 2003. Detectability of Lunar Plasma Clouds from SELENE Radio Occultations[M]// Duke M B. Moon: Science, Exploration and Utilisation. San Diego: Univelt Inc.: 2369-2375. doi: 10.1016/s0273-1177(03)00548-9.
- Nabatov A S, Zakharov A I, Efimov A I. 2023. Formation of a plasma layer during the passage of the Moon through the magnetic ropes of the solar wind[J]. *Solar System Research*, 57(1): 52-60.
- Nakagawa T, Nakashima T, Wada T, et al. 2015. ELF magnetic fluctuations detected by Kaguya in deepest lunar wake associated with type-II protons[J]. *Earth Planets and Space*, 67(1): 50.
- Nakazono J, Miyake Y. 2025. Size-dependent surface charging of lunar cavities exposed to the solar wind[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130(2): e2024JA033490.
- Ness N F, Behannon K W, Searce C S, et al. 1967. Early results from magnetic field experiment on lunar Explorer 35[J]. *Journal of Geophysical Research*, 72(23): 5769-5778.
- Ness N F, Behannon K W, Taylor H E, et al. 1968. Perturbations of the interplanetary magnetic field by the lunar wake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(11): 3421-3440.
- Neugebauer M, Snyder C W, Clayton E M, et al. 1972. Solar-wind observations on lunar-surface with Apollo-12 Alsep[J]. *Planetary and Space Science*, 20(10): 1577-1597.
- Nichols K D, Scheeres D J. 2022. Electrostatic lofting conditions for supercharged dust[J]. *Astrophysical Journal*, 931(2): 122-137.
- Nishino M N, Fujimoto M, Maezawa K, et al. 2009. Solar-wind proton access deep into the near-Moon wake[J]. *Geophysical Research Letters*, 36: L16103.
- Nishino M N, Wang X D, Fujimoto M, et al. 2011. Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: Joint measurement by Chang'E-1 and SELENE[J]. *Planetary and Space Science*, 59(5-6): 378-386.
- Nishino M N, Saito Y, Tsunakawa H, et al. 2015. Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake[J]. *Icarus*, 250: 238-248.
- Nishino M N, Harada Y, Saito Y, et al. 2017. Kaguya observations of the lunar wake in the terrestrial foreshock: Surface potential change by bow-shock reflected ions[J]. *Icarus*, 293: 45-51.
- Nitter T, Havnes O. 1992. Dynamics of dust in a plasma sheath and injection of dust into the plasma sheath above Moon and asteroidal surfaces[J]. *Earth Moon and Planets*, 56(1): 7-34.
- Norton R H, Gunn J E, Livingston W C, et al. 1967. Surveyor 1 observations of solar coron[J]. *Journal of Geophysical Research*, 72(2): 815-817.
- Nouzak L, James D, Nemecek Z, et al. 2021. Detection of dust particles using faraday cup instruments[J]. *Astrophysical Journal*, 909(2): 132-142.
- O'Brien B J, Reasoner D L. 1971. Charged particle lunar environment experiment[R]// Apollo 14 Preliminary Science Report. Washington: NASA.
- Ogilvie K W, Steinberg J T, Fitzenreiter R J, et al. 1996. Observations of the lunar plasma wake from the WIND spacecraft on December 27, 1994[J]. *Geophysical Research Letters*, 23(10): 1255-1258.
- Orger N C, Alarcon J R C, Toyoda K, et al. 2018. Lunar dust lofting due to surface electric field and charging within micro-cavities between dust grains above the terminator region[J]. *Advances in Space Research*, 62(4): 896-911.
- Oyama K I, Nabatov A S, Savich N A, et al. 2002. Cislunar plasma exploration with the SELENE radio science system[J]. *Advances in Space Research*, 30(8): 1915-1919.
- Parkin C W, Daily W D, Dyal P. 1974. Iron abundance in the Moon[C]// The 5th Lunar Science Conference. Houston, Tex.
- Perko H A, Nelson J D, Sadeh W Z. 1996. Surface Cleanliness Effects on Lunar Regolith Shear Strength[M]// Johnson S W. Engineering, Construction, and Operations in Space. New York: American Society of Civil Engineers: 689-698. doi: 10.1061/40177(207)95.
- Pines V, Zlatkowski M, Chait A. 2009. Interactions of solar wind

- plasma with dust grains: Effects of strong plasma anisotropy[J]. *Advances in Space Research*, 43(1): 152-163.
- Piquette M, Horanyi M. 2017. The effect of asymmetric surface topography on dust dynamics on airless bodies[J]. *Icarus*, 291: 65-74.
- Popel S I, Kopnin S I, Golub A P, et al. 2013a. Dusty plasma at the surface of the Moon[J]. *Solar System Research*, 47(6): 419-429.
- Popel S I, Morfill G E, Shukla P K, et al. 2013b. Waves in a dusty plasma over the illuminated part of the Moon[J]. *Journal of Plasma Physics*, 79: 1071-1074.
- Popel S I, Zelenyi L M. 2013. Future lunar missions and investigation of dusty plasma processes on the Moon[J]. *Journal of Plasma Physics*, 79: 405-411.
- Popel S I, Golub A, Zelenyi L. 2014. Photoelectron distribution function over the illuminated part of the Moon[J]. *European Physical Journal D*, 68(9): 245.
- Popel S I, Zelenyi L M. 2014. Dusty plasmas over the Moon[J]. *Journal of Plasma Physics*, 80: 885-893.
- Popel S I, Zelenyi L M, Atamaniuk B. 2015. Dusty plasma sheath-like structure in the region of lunar terminator[J]. *Physics of Plasmas*, 22(12): 123701.
- Popel S I, Golub A P, Lisin E A, et al. 2016a. Impacts of fast meteoroids and the separation of dust particles from the surface of the Moon[J]. *Jetp Letters*, 103(9): 563-567.
- Popel S I, Zelenyi L M, Atamaniuk B. 2016b. Dusty plasma in the region of the lunar terminator[J]. *Plasma Physics Reports*, 42(5): 543-548.
- Popel S I, Golub A P, Zelenyi L M, et al. 2017. Impacts of fast meteoroids and a plasma-dust cloud over the lunar surface[J]. *Jetp Letters*, 105(10): 635-640.
- Popel S I, Golub A P, Zakharov A V, et al. 2018. Formation of dusty plasma clouds at meteoroid impact on the surface of the Moon[J]. *Jetp Letters*, 108(6): 356-363.
- Popel S I, Golub A P, Kassem A I, et al. 2022. Dust dynamics in the lunar dusty plasmas: Effects of magnetic fields and dust charge variations[J]. *Physics of Plasmas*, 29(1): 013701.
- Poppe A, Horanyi M. 2010. Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115: A08106.
- Poppe A, Halekas J S, Horanyi M. 2011. Negative potentials above the day-side lunar surface in the terrestrial plasma sheet: Evidence of non-monotonic potentials[J]. *Geophysical Research Letters*, 38: L02103.
- Poppe A R, Halekas J S, Delory G T, et al. 2012a. Particle-in-cell simulations of the solar wind interaction with lunar crustal magnetic anomalies: Magnetic cusp regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117: A09105.
- Poppe A R, Halekas J S, Delory G T, et al. 2012b. A comparison of ARTEMIS observations and particle-in-cell modeling of the lunar photoelectron sheath in the terrestrial magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 39: L01102.
- Poppe A R, Piquette M, Likhanskii A, et al. 2012c. The effect of surface topography on the lunar photoelectron sheath and electrostatic dust transport[J]. *Icarus*, 221(1): 135-146.
- Poppe A R, Halekas J S, Samad R, et al. 2013a. Model-based constraints on the lunar exosphere derived from ARTEMIS pickup ion observations in the terrestrial magnetotail[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(5): 1135-1147.
- Poppe A R, Halekas J S, Sarantos M, et al. 2013b. The self-sputtered contribution to the lunar exosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(9): 1934-1944.
- Poppe A R, Fatemi S, Halekas J S, et al. 2014. ARTEMIS observations of extreme diamagnetic fields in the lunar wake[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(11): 3766-3773.
- Poppe A R, Fatemi S, Garrick-Bethell I, et al. 2016. Solar wind interaction with the Reiner Gamma crustal magnetic anomaly: Connecting source magnetization to surface weathering[J]. *Icarus*, 266: 261-266.
- Poppe A R, Halekas J S, Lue C, et al. 2017. ARTEMIS observations of the solar wind proton scattering function from lunar crustal magnetic anomalies[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(4): 771-783.
- Poppe A R, Xu S, Liuzzo L, et al. 2021. ARTEMIS observations of lunar nightside surface potentials in the magnetotail lobes: Evidence for micrometeoroid impact charging[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(15): e2021GL094585.
- Poppe A R, Prem P, Fatemi S, et al. 2024. Hybrid plasma simulations of the solar wind interaction with an anthropogenic lunar exosphere[J]. *Advances in Space Research*, 74(11): 6172-6182.
- Prakash A. 1975. Magnetospheric protons and electrons encountered by Moon in plasma sheet[J]. *Moon*, 14(1): 71-78.
- Rasca A P, Fatemi S, Farrell W M, et al. 2021. A double disturbed lunar plasma wake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(2): e2020JA028789.
- Reasoner D L, Burke W J. 1972. Characteristics of lunar photoelectron layer in geomagnetic tail[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(34): 6671-6687.
- Reasoner D L, O'Brien B J. 1972. Measurement on lunar-surface of impact-produced plasma clouds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(7): 1292-1299.
- Reiff P H, Reasoner D L. 1975. Magnetosheath electron population at lunar distance: General features[J]. *Journal of Geophysical Research*, 80(10): 1232-1237.
- Reiff P H. 1976. Magnetic shadowing of charged-particles by an extended surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 81(19): 3423-3427.
- Rennilson J J, Criswell D R. 1974. Surveyor observations of lunar horizon-glow[J]. *The Moon*, 10(2): 121-142.
- Rhodes D J, Farrell W M. 2019. Steady-state solution of a solar wind-generated electron cloud in a lunar crater[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(7): 4983-4993.
- Rich F J, Reasoner D L, Burke W J. 1973. Plasma sheet at lunar distance-characteristics and interactions with lunar-surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 78(34): 8097-8112.
- Richmond N C, Hood L L. 2008. A preliminary global map of the vector lunar crustal magnetic field based on lunar prospector magnetometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E2): E02010.
- Rovige L, Cruz F D, Dorst R S, et al. 2024. Laboratory study of magne-

- tic reconnection in lunar-relevant mini-magnetospheres[J]. *Astro-physical Journal*, 969(2): 124-131.
- Russell C T, Coleman P J, Lichtenstein B R, et al. 1974a. Apollo 12 and 16 subsatellite magnetometer measurements of the lunar magnetic field[J]. *Advances in Space Research*, 14: 629-634.
- Russell C T, Coleman P J, Schubert G. 1974b. Lunar magnetic-field-permanent and induced dipole-moments[J]. *Science*, 186(4166): 825-826.
- Russell C T, Lichtenstein B R. 1975. Source of lunar limb compressions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 80(34): 4700-4711.
- Saito Y, Yokota S, Asamura K, et al. 2008a. Low-energy charged particle measurement by MAP-PACE onboard SELENE[J]. *Earth Planets and Space*, 60(4): 375-385.
- Saito Y, Yokota S, Tanaka T, et al. 2008b. Solar wind proton reflection at the lunar surface: Low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 35(24): L24205.
- Saito Y, Nishino M N, Fujimoto M, et al. 2012. Simultaneous observation of the electron acceleration and ion deceleration over lunar magnetic anomalies[J]. *Earth, Planets and Space*, 64(2): 83-92.
- Saito Y, Nishino M N, Yokota S, et al. 2014. Night side lunar surface potential in the Earth's magnetosphere[J]. *Advances in Space Research*, 54(10): 1985-1992.
- Samir U, Wright K H, Stone N H. 1983. The expansion of a plasma into a vacuum: Basic phenomena and processes and applications to space plasma physics[J]. *Reviews of Geophysics*, 21(7): 1631-1646.
- Sana T, Mishra S K. 2023. Electrostatic charging of crater's surface over sunlit Moon[J]. *Plasma Physics Reports*, 49(1): 97-104.
- Savich N A. 1976. Cislunar plasma model[J]. *Advances in Space Research*, 16: 941-943.
- Sawyer R P, Halekas J S, Bonnell J W, et al. 2023. Does magnetic reconnection occur in the near lunar surface environment?[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(16): e2023GL104733.
- Scheeres D J, Hartzell C M, Sánchez P, et al. 2010. Scaling forces to asteroid surfaces: The role of cohesion[J]. *Icarus*, 210(2): 968-984.
- Schubert G, Lichtenstein B R. 1974. Observations of Moon-plasma interactions by orbital and surface experiments[J]. *Reviews of Geophysics*, 12(4): 592-626.
- Schubert G, Lichtenstein B R, Russell C T, et al. 1974. Lunar dayside plasma sheet depletion: Inference from magnetic observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1(3): 97-100.
- Schwan J, Wang X, Hsu H W, et al. 2017. The charge state of electrostatically transported dust on regolith surfaces[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(7): 3059-3065.
- Severny A B, Terez E I, Zvereva A M. 1975. Measurements of sky brightness on Lunokhod-2[J]. *Moon*, 14(1): 123-128.
- Shen H W, Halekas H S, Poppe A R. 2023. Limits on the density of the lunar ionosphere: ARTEMIS observations[J]. *Astrophysical Journal*, 958(2): 165-174.
- Shue J H, Chao J K, Fu H C, et al. 1997. A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A5): 9497-9511.
- Shukla P K, Mamun A A. 2002. Introduction to Dusty Plasma Physics[M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, et al. 2001. Experimental investigations on photoelectric and triboelectric charging of dust[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A5): 8343-8356.
- Snyder C W, Clay D R, Neugebauer M. 1970. The solar-wind spectrometer experiment[R]// Apollo 12 Preliminary Science Report. National Aeronautics and Space Administration (NASA): 75-81.
- Sonett C P, Colburn D S. 1967. Establishment of a lunar unipolar generator and associated shock and wake by solar wind[J]. *Nature*, 216(5113): 340-343.
- Sonett C P, Mihalov J D. 1972. Lunar fossil magnetism and perturbations of solar-wind[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(4): 588-603.
- Sreeraj T, Singh S V, Lakhina G S. 2018. Electrostatic waves driven by electron beam in lunar wake plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 25(5): 052902.
- Smka L J, Criswell D R, Wollenhaupt W R. 1975. Lunar topography and limb compression source regions[J]. *Moon*, 14(1): 59-69.
- Smka L J, Hoyt J L, Harvey J V S, et al. 1979a. Study of the rima siralis lunar magnetic anomaly[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 20(2-4): 281-290.
- Smka L J, Martelli G, Newton G, et al. 1979b. Magnetic-field and shock effects and remanent magnetization in a hyper-velocity impact experiment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(1): 127-137.
- Stanier A, Chen L J, Le A, et al. 2024. Intermittent electron-only reconnection at lunar mini-magnetospheres[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 963(1): L11.
- Starukhina L V, Shkuratov Y G. 2000. The lunar poles: Water ice or chemically trapped hydrogen?[J]. *Icarus*, 147(2): 585-587.
- Stern S A. 1999. The lunar atmosphere: History, status, current problems, and context[J]. *Reviews of Geophysics*, 37(4): 453-491.
- Sternovsky Z, Chamberlin P, Horanyi M, et al. 2008. Variability of the lunar photoelectron sheath and dust mobility due to solar activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A10): A10104.
- Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. 2006. A dynamic fountain model for lunar dust[J]. *Advances in Space Research*, 37(1): 59-66.
- Stubbs T J, Glenar D A, Farrell W M, et al. 2011. On the role of dust in the lunar ionosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 59(13): 1659-1664.
- Stubbs T J, Farrell W M, Halekas J S, et al. 2014. Dependence of lunar surface charging on solar wind plasma conditions and solar irradiation[J]. *Planetary and Space Science*, 90: 10-27.
- Syal M B, Schultz P H. 2015. Cometary impact effects at the Moon: Implications for lunar swirl formation[J]. *Icarus*, 257: 194-206.
- Tanaka T, Saito Y, Yokota S, et al. 2009. First in situ observation of the Moon-originating ions in the Earth's magnetosphere by MAP-PACE on SELENE (KAGUYA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 36: L22106.
- Tao J B, Ergun R E, Newman D L, et al. 2012. Kinetic instabilities in

- the lunar wake: ARTEMIS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A3): A03106.
- Tenishev V, Rubin M, Tucker O J, et al. 2013. Kinetic modeling of sodium in the lunar exosphere[J]. *Icarus*, 226(2): 1538-1549.
- Terada K, Yokota S, Saito Y, et al. 2017. Biogenic oxygen from Earth transported to the Moon by a wind of magnetospheric ions[J]. *Nature Astronomy*, 1(2): 0026.
- Tripathi K R, Choudhary R K, Ambili K M. 2025. Lunar ionosphere in the geotail region as observed by Chandrayaan-2 orbiter using two-way radio occultation measurements[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 980(2): L41.
- Tsunakawa H, Shibuya H, Takahashi F, et al. 2010. Lunar magnetic field observation and initial global mapping of lunar magnetic anomalies by MAP-LMAG onboard SELENE (Kaguya)[J]. *Space Science Reviews*, 154(1-4): 219-251.
- Tucker O J, Killen R M, Johnson R E, et al. 2021. Lifetime of a transient atmosphere produced by lunar volcanism[J]. *Icarus*, 359: 114304.
- University R. 1975. The Apollo lunar surface experiment package suprathermal ion detector experiment[R]// Lunar and Planetary Exploration. NASA-CR-144544.
- Vaverka J, Richterova I, Pavlu J, et al. 2013. Numerical calculation of an equilibrium dust grain potential in lunar environment[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(4): 740-744.
- Vaverka J, Richterova I, Pavlu J, et al. 2016. Lunar surface and dust grain potentials during the Earth's magnetosphere crossing[J]. *Astrophysical Journal*, 825(2): 133-142.
- Vorburger A, Wurz P, Barabash S, et al. 2013. Energetic neutral atom imaging of the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(7): 3937-3945.
- Vorburger A, Wurz P, Barabash S, et al. 2015. Imaging the South Pole-Aitken Basin in backscattered neutral hydrogen atoms[J]. *Planetary and Space Science*, 115: 57-63.
- Vorburger A, Wurz P, Barabash S, et al. 2016. Transport of solar wind plasma onto the lunar nightside surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(20): 10586-10594.
- Vyshlov A S, Savich N A. 1978. On investigation of lunar occultations by radio sources and characteristics of the cislunar plasma[J]. *Advances in Space Research*, XVI: 551-556.
- Walbridge E. 1973. Lunar photoelectron layer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 78(19): 3668-3687.
- Waller C D, Cahill J T S, Retherford K D, et al. 2022. Ultraviolet and magnetic perspectives at Reiner Gamma and the implications for solar wind weathering[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9: 926018.
- Wang H Z, Xiao C, Shi Q Q, et al. 2021a. Energetic neutral atom distribution on the lunar surface and its relationship with solar wind conditions[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 922(2): L41.
- Wang H Z, Zhang J, Shi Q Q, et al. 2021b. Earth wind as a possible exogenous source of lunar surface hydration[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 907(2): L32.
- Wang J, He X, Cao Y. 2008. Modeling electrostatic levitation of dust particles on lunar surface[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36(5): 2459-2466.
- Wang X, Colwell J, Horanyi M, et al. 2007a. Charge of dust on surfaces in plasma[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35(2): 271-279.
- Wang X, Horanyi M, Sternovsky Z, et al. 2007b. A laboratory model of the lunar surface potential near boundaries between sunlit and shadowed regions[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(16): L16104.
- Wang X, Horanyi M, Robertson S. 2008. Plasma probes for the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A8): A08108.
- Wang X, Horanyi M, Robertson S. 2012. Characteristics of a plasma sheath in a magnetic dipole field: Implications to the solar wind interaction with the lunar magnetic anomalies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117: A06226.
- Wang X, Howes C T, Horanyi M, et al. 2013. Electric potentials in magnetic dipole fields normal and oblique to a surface in plasma: Understanding the solar wind interaction with lunar magnetic anomalies[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(9): 1686-1690.
- Wang X, Schwan J, Hsu H W, et al. 2016. Dust charging and transport on airless planetary bodies[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(12): 6103-6110.
- Wang X D, Bian W, Wang J S, et al. 2010. Acceleration of scattered solar wind protons at the polar terminator of the Moon: Results from Chang'E-1/SWIDs[J]. *Geophysical Research Letters*, 37: L07203.
- Wang X Q, Cui J, Wang X D, et al. 2012. The solar wind interactions with lunar magnetic anomalies: A case study of the Chang'E-2 plasma data near the serenitatis antipode[J]. *Advances in Space Research*, 50(12): 1600-1606.
- Wang X Y, Zhang A B, Zhang X G, et al. 2012. Bursts of energetic electron induced large surface charging observed by Chang'E-1[J]. *Planetary and Space Science*, 71(1): 1-8.
- Wang Z, Wang N, Ping J S. 2015a. Electron content near the lunar surface using dual-frequency VLBI tracking data in a single lunar orbiter mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15(5): 753-763.
- Wang Z, Wang N, Ping J. 2015b. Research on the lunar ionosphere using dual-frequency radio occultation with a small VLBI antenna[J]. *Astrophysics and Space Science*, 356(2): 225-230.
- Wei Y, Zhong J, Hui H, et al. 2020. Implantation of Earth's atmospheric ions into the nearside and farside lunar soil: Implications to geodynamo evolution[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(3): e2019GL086208.
- Whang Y C. 1969. Field and plasma in the lunar wake[J]. *Physical Review*, 186(1): 143-150.
- Wieser M, Barabash S, Futaana Y, et al. 2009. Extremely high reflection of solar wind protons as neutral hydrogen atoms from regolith in space[J]. *Planetary and Space Science*, 57(14): 2132-2134.
- Wieser M, Barabash S, Futaana Y, et al. 2010. First observation of a mini-magnetosphere above a lunar magnetic anomaly using energetic neutral atoms[J]. *Geophysical Research Letters*, 37: L05103.
- Willis R F, Anderegg M, Feuerbacher B, et al. 1973. Photoemission and Secondary Electron Emission from Lunar Surface Material[M]. Dordrecht: Springer Netherlands.

- Wilson J K, Miller J, Konradi A, et al. 1997. Shielding strategies for human space exploration[C]// NASA Conference Publication: 3360.
- Wilson J K, Mendillo M, Spence H E. 2006. Magnetospheric influence on the Moon's exosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7): A07207.
- Wilson J W, Thibeault S A, Cucinotta F A, et al. 1995. Issues in protection from galactic cosmic rays[J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 34(4): 217-222.
- Winglee R M, Harnett E M. 2007. Radiation mitigation at the Moon by the terrestrial magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(21): L21103.
- Withers P, Stubbs T J, Mazarico E. 2021. A theoretical assessment of the feasibility of potential lunar reconnaissance orbiter radio occultation observations of the lunar ionosphere[J]. *Advances in Space Research*, 67(12): 4099-4109.
- Wurz P, Fatemi S, Galli A, et al. 2022. Particles and photons as drivers for particle release from the surfaces of the Moon and Mercury[J]. *Space Science Reviews*, 218(3): 10.
- Xie L, Li L, Zhang Y, et al. 2015. Three-dimensional Hall MHD simulation of lunar minimagnetosphere: General characteristics and comparison with Chang'E-2 observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(8): 6559-6568.
- Xie L, Li L, Zhang A B, et al. 2022. Multipoint observation of the solar wind interaction with strong lunar magnetic anomalies by ARTEMIS spacecraft and Chang'E-4 rover[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 937(1): L5.
- Xie L, Li L, Wang J, et al. 2024. Three-dimensional electrostatic hybrid particle-in-cell simulations of the plasma mini-wake near a lunar polar crater[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(8): e2024JA032764.
- Xu S, Poppe A R, Halekas J S, et al. 2019. Mapping the lunar wake potential structure with ARTEMIS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(5): 3360-3377.
- Xu S, Poppe A R, Halekas J S, et al. 2020. Reflected protons in the lunar wake and their effects on wake potentials[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(7): e2020JA028154.
- Xu S, Poppe A R, Harada Y, et al. 2021. Lunar photoemission yields inferred from ARTEMIS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(6): e2020JE006790.
- Xu S, Poppe A R, Szabo P S, et al. 2023. Characteristics of lunar surface electrons inferred from ARTEMIS observations: 1. Backscattered electrons[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(10): e2023JE007983.
- Xu X, Wong H C, Ma Y, et al. 2017. Anomalously high rate refilling in the near lunar wake caused by the Earth's bow shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(9): 9102-9114.
- Yanagisawa M, Kisaichi N. 2002. Lightcurves of 1999 Leonid impact flashes on the Moon[J]. *Icarus*, 159(1): 31-38.
- Yokota S, Saito Y, Asamura K, et al. 2009. First direct detection of ions originating from the Moon by MAP-PACE IMA onboard SELENE (KAGUYA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 36: L11201.
- Zakharov A V, Zelenyi L M, Popel S I. 2020. Lunar dust: Properties and potential hazards[J]. *Solar System Research*, 54(6): 455-476.
- Zelenyi L M, Zakharov A V, Kuznetsov I A, et al. 2021. Moondust as a risk factor in lunar exploration[J]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 91(6): 637-646.
- Zhang H, Khurana K K, Kivelson M G, et al. 2014. Three-dimensional lunar wake reconstructed from ARTEMIS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(7): 5220-5243.
- Zhang H, Khurana K K, Kivelson M G, et al. 2016. Alfvén wings in the lunar wake: The role of pressure gradients[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(11): 10698-10711.
- Zhang H, Wang Y, Chen L P, et al. 2020. In-situ lunar dust deposition amount induced by lander landing in Chang'E-3 mission[J]. *Science China Technological Sciences*, 63(3): 520-527.
- Zhang H, Wei Y, Zhong J, et al. 2021a. Whistler wings and reflected particles during solar wind interaction of lunar magnetic anomalies[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(8): e2021GL092425.
- Zhang H, Zhong J, Zhang T, et al. 2021b. A meandering lunar wake produced by the pickup of reflected solar-wind ions[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(24): e2021GL096039.
- Zhang T X, Zhang H, Lai H R, et al. 2020. Asymmetric lunar magnetic perturbations produced by reflected solar wind particles[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 893(2): L36.
- Zhou X Z, Angelopoulos V, Poppe A R, et al. 2013. ARTEMIS observations of lunar pickup ions: Mass constraints on ion species[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(9): 1766-1774.
- Zhou X Z, Angelopoulos V, Poppe A R, et al. 2014. Lunar dayside current in the terrestrial lobe: ARTEMIS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(5): 3381-3391.
- Zimmerman M I, Farrell W M, Stubbs T J, et al. 2011. Solar wind access to lunar polar craters: Feedback between surface charging and plasma expansion[J]. *Geophysical Research Letters*, 38: L19202.
- Zimmerman M I, Jackson T L, Farrell W M, et al. 2012. Plasma wake simulations and object charging in a shadowed lunar crater during a solar storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117: E00K03.
- Zimmerman M I, Farrell W M, Stubbs T J. 2013. Recursive plasma wake formation on the Moon and its effect on polar volatiles[J]. *Icarus*, 226(1): 992-998.