

月表太阳风和粒子辐射环境——“嫦娥四号”观测新结果

王赤¹, 李磊¹, 张爱兵^{2,3}, 张坤毅^{2,3}, 侯东辉², 徐子贡⁴, 谢良海¹, 王慧姿⁵,
罗朋威⁶, 郭静楠⁴, 史全岐⁵, 张小平⁶

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学技术大学, 合肥 230026;
5. 山东大学 空间科学与物理学院, 威海 264209; 6. 澳门科技大学, 澳门 999078)

摘要: 太阳风、太阳高能粒子、银河宇宙线几乎可以无阻碍地到达月面, 与月表发生相互作用。太阳风粒子以能量中性原子的形式被月壤散射, 其过程与太阳风状态、月表电磁环境、局部地形、月壤特性等因素均有关系; 银河宇宙射线、太阳高能粒子与月壤相互作用, 产生以中子和伽马射线为主的反照辐射, 形成特殊的月表粒子辐射环境。文章介绍了“嫦娥四号”首次在月球背面原位所测量的能量中性原子、粒子辐射环境, 分析了月面ENA的能谱等特性、月球微磁层存在的观测证据及月面辐射环境的构成及其随时间的变化。结果表明, 月表能量中性原子观测为认识太阳风与月球的相互作用, 这为研究月球微磁层内部结构及成因提供了新的视角; 而月面辐射环境的测量为未来月球探测中航天员和设备的安全保障提供了重要依据。

关键词: 月球空间环境; 能量中性原子; 太阳风散射; 粒子辐射; 微磁层

中图分类号: P142

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)03-0239-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220020

引用格式: 王赤, 李磊, 张爱兵, 等. 月表太阳风和粒子辐射环境——“嫦娥四号”观测新结果[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 239-249.

Reference format: WANG C, LI L, ZHANG A B, et al. The solar wind and particle radiation environment on the surface of the Moon-new observations from Chang'E-4[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 239-249.

引言

月球没有全球性的偶极磁场和大气层, 太阳风、太阳高能粒子、银河宇宙线几乎可以无阻碍地到达月面, 与月表物质相互作用, 形成特殊的月表环境。

早年, 人们认为月壤能够吸收到达月面的所有太阳风粒子, 月球对上游的太阳风没有扰动, 但下游会形成太阳风的空腔。然而, 近年的观测表明, 太阳风并没有被完全吸收, 太阳风通量的0.1%~1%以质子的形式^[1-2], 更多的(约20%)则以氢原子的形式被月面散射^[4-8]。此外, 太阳风轰击月面还可从月壤中溅射出重原子^[9]。散射的太阳风氢原子和溅射的月壤重原子通常都具有较高的速度, 统称为能量中性原子(Energetic Neutral Atom, ENA)。

太阳风与月球相互作用形成ENA的过程, 不仅与太阳风来流的状态、月表电磁环境有关, 还涉及局部地形、月壤的物理化学特性等因素。“月船1号”

(Chandrayaan-1)观测结果显示, ENA并不是理论预期的前向散射, 而是以后向散射为主, 这可能与月表的微观结构有关^[3]。另外, ENA的能量近似呈Maxwell-Boltzmann分布, 其温度正比于入射太阳风的速度, 但散射率却与太阳风参数无相关性^[5]。进一步分析IBEX的数据发现, 只有当入射太阳风的能量较高时(>250 eV), ENA的散射率才呈现与太阳风能量的反相关性, 即ENA散射率随太阳风能量增大而减小^[8]。上述结果都是根据环月轨道上的观测得到的。由于观测位置距离ENA在月表的散射源大于数十km, 从数据中得到的是ENA在宏观尺度上的平均特征, 而太阳风在月面散射的微观过程还有待进一步观测研究。

另外, 月面散射的ENA的空间分布与月球磁场有关^[10-11]。月球虽然没有全球性的内禀磁场, 但月亮常有磁性(称为磁异常)。磁异常主要分布于月球背面, 强度为几十到几百nT, 水平方向的尺度约为100 km。

收稿日期: 2022-03-30 修回日期: 2022-05-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFE0202100); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2019-5); 国家自然科学基金(41941001, 42174216)

在磁异常区, Chandrayaan-1发现, 能量较高的ENA (150~600 eV) 的通量明显下降, 推测太阳风被磁异常偏转, 局地形成了微磁层^[11]。关于月球微磁层, 早期的观测证据来自LP卫星的原位测量。Lin等^[12]报道, 在磁异常区上空, 发现了与弓激波相关的磁场压缩及低频扰动现象。然而对于通常磁层应有的等离子体空腔, 至今只有LP卫星的1次观测。Chandrayaan-1间接证明了微磁层存在等离子体空腔, 然而, 目前仍然缺乏对微磁层内部的直接观测。在“嫦娥四号”之前, 还从未有过在月面观测微磁层的报道。

月表的粒子辐射环境由宇宙线、宇宙线的反照辐射以及月球放射性核素的辐射构成^[13]。一方面, 月表接近真空且缺乏全球性磁场的保护, 时刻遭受着宇宙线的轰击。银河宇宙射线由能量极高、通量极低的带电粒子组成, 其中质子和重离子占98%, 电子和正电子占2%。高能的重离子, 尤其是高原子序数的重离子, 有着非常高的线性能量传输谱(Line Energy Transfer, LET)和很强的穿透性, 会引起很强的生物辐射损伤效应。太阳高能粒子为偶发事件, 只有在太阳活动比较活跃, 如日冕物质抛射或太阳耀斑时, 才会发出大量高能粒子, 包括质子、电子和氦离子, 以及少量的重离子, 一般会持续几个小时到几天。银河宇宙射线一般与太阳活动反相关, 即当太阳活动增强时银河宇宙射线减弱。另外一方面, 银河宇宙射线和太阳高能粒子撞击月壤, 产生二次辐射, 主要为中子(包括能量1~20 MeV的快中子)和伽马射线, 其中一部分与月壤不发生作用或被月壤减速后逃离月表, 形成反照辐射。反照辐射取决于银河宇宙射线和太阳高能粒子的强度以及月壤条件, 随时间、地点均有变化。此外, 月球上天然放射性元素衰变是伽马射线的主要来源。

月面粒子辐射会严重威胁宇航员和精密仪器的安全。因此, 保障人类登月活动的安全, 离不开对月表辐射环境的全面准确认识。然而, 对月球及周边的辐射测量的研究并不多: 近年国内外主要有“嫦娥一/二号”、Chandrayaan-1和月球勘查轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)在环月轨道上监测月球空间粒子辐射环境^[22-24], 轨道高度一般不低于50 km。在“嫦娥四号”之前, 人类还没有在月表开展过辐射测量, 对月面辐射环境的认知完全依靠模型。以模型预测的银河宇宙射线和太阳高能粒子参数作为输入, 辐射传输模型计算得到的月表总吸收剂量或总剂量当量的不确定性较大^[22]。

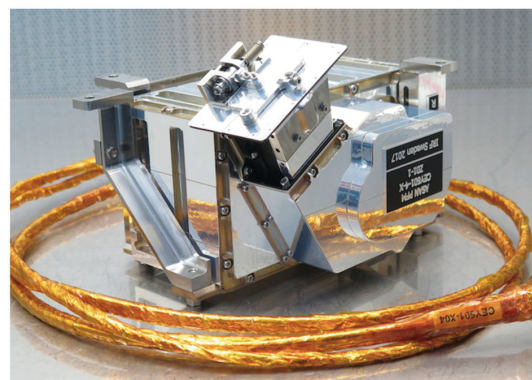
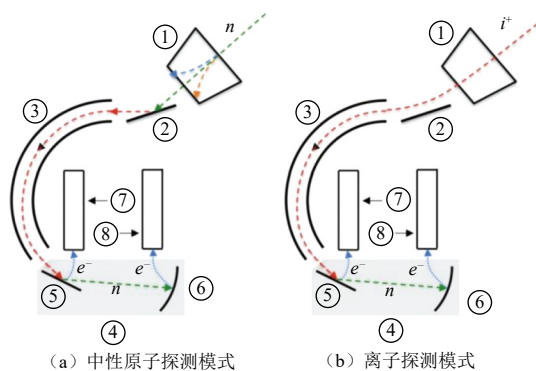
2019年1月2日, “嫦娥四号”成功着陆于月球背面

的南极-艾特肯盆地(South Pole-Aitken basin)内的冯·卡门撞击坑(Von Kármán crater), 在人类历史上首次开展月球背面的着陆和巡视探测。着陆器和巡视器分别搭载了月表中子与辐射剂量探测仪(Lunar Neutrons and Dosimetry, LND)和中性原子探测仪(Advanced Small Analyzer for Neutrals, ASAN), 为研究月表空间环境, 太阳风和宇宙线与月球及月壤的相互作用提供了难得的机遇。

1 月表太阳风ENA观测

1.1 中性原子探测仪(ASAN)

ASAN搭载在“嫦娥四号”巡视器上, 对月表的ENA和正离子的能量、通量和成分进行测量^[14]。ASAN传感器工作原理如图1所示。在中性原子模式下, ENA经过离子偏转系统后进入仪器内部, 被电荷转换面电离为正离子, 正离子通过静电分析器完成能量分析, 之后由飞行时间单元(离子打在起始面上产生二次电子, 并被电子倍增器放大产生的起始信号; 离子与起始面作用后生成的中性原子打在终止面上, 产生二次电子并被电子倍增器放大产生的终止信号)



(c) 飞行件(前部为传感器, 入口斜向上, 后部为电子学箱)

注: ①离子偏转系统; ②电荷转换面; ③静电分析器; ④飞行时间单元; 由⑤起始、⑥终止面、⑦起始电子倍增器、⑧终止电子倍增器组成。

图1 中性原子探测仪传感器工作原理^[14]

Fig. 1 Advanced Small Analyzer for Neutrals sensor optics^[14]

确定其速度, 通过能量和速度可以得到中性原子的质量(成分)信息。ASAN有两种工作模式: 中性原子探测模式和离子探测模式, 可分时探测中性原子和正离子, 中性原子为主要探测模式。在离子探测模式下, 离子偏转系统关闭, 可实现正离子探测^[14]。

中性原子探测仪安装在“玉兔二号”巡视器的+X舱板上^[15], 传感器的入口系统通过+X舱板的开孔伸出舱外, 视轴斜向下指向月表, 与水平方向夹角为30°, 视

场呈梯形, 面积约为1.57 m², 如图2, 图2(a)为ASAN安装在巡视器的+X舱板上示意图, +X方向为巡视器前进方向, ASAN垂直方向视场为37°, 视轴(点虚线)与水平面夹角为30°, 指向月面; 图2(b)为ASAN在月面上的的视场范围, 随着巡视器在月面的行走, ASAN可以在不同的太阳风入射角度下探测来自月面的ENA, 获取米级尺度的ENA分布, 用于研究太阳风与月壤相互作用的小尺度特征。

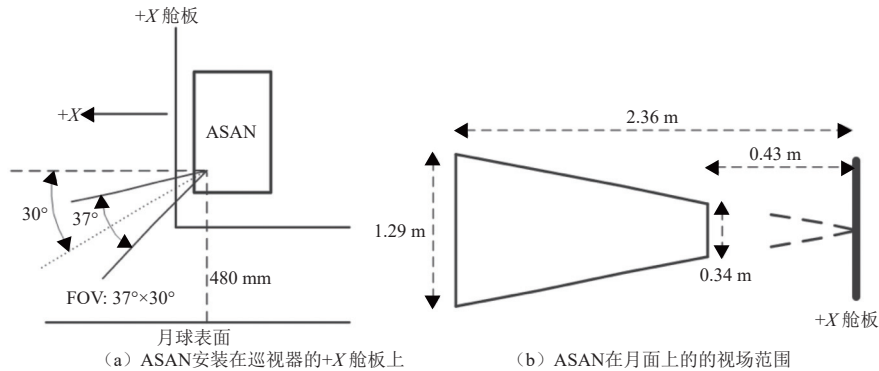


图2 “玉兔二号”上的中性原子探测仪^[15]

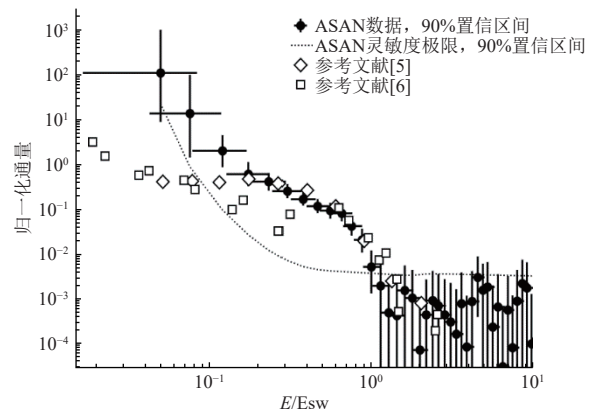
Fig. 2 ASAN on Yutu-2 rover^[15]

中性原子探测仪随“玉兔二号”在月面上开展巡视探测, 月昼开机, 每次科学探测的持续时间约为3 h。由于ENA计数率较低, 为了改善数据统计的质量, 将单次科学探测的原始计数进行积分, 扣除由巡视器放射性同位素热源(Radioisotope Heater Unit, RHU)产生的背景噪声(参见2.2节), 并将粒子计数转换为微分通量, 评估数据不确定性及其可能的原因^[15]。

1.2 月表ENA的观测结果

ASAN在月面获取的ENA典型能谱^[15]如图3所示, 图中还给出了Chandrayaan-1和IBEX从空间对月球ENA遥感观测的结果^[5-6], ENA的能量和通量分别用太阳风的能量和通量做了归一化。比对图中不同的能谱发现, 能量高于太阳风离子能量(E_{sw})的10%时, 氢ENA能谱与Chandrayaan-1和IBEX的观测数据一致性较好; 而在<0.1 E_{sw}时, ASAN测得的氢ENA通量要高于Chandrayaan-1和IBEX的结果。从能谱结构推测, ENA来自两个不同的生成过程: 能量高于0.1 E_{sw}的ENA主要是太阳风被月壤散射生成的氢ENA, 而能量低于0.1 E_{sw}的ENA则主要是被太阳风溅射的月壤物质ENA。月壤ENA通量随能量下降而迅速上升的原因, 可能是ENA溅射产率的变化以及月壤中氢含量的变化。相对于Chandrayaan-1和IBEX在轨道上对ENA的大尺度探测, ASAN的探测视场仅覆盖了月1.57 m²的面积, 局地月壤特性(如疏松程度、颗粒大小以及成分等)也可能对能谱有影响, 尤其是当ENA能量较低

时。此外ENA能谱还会随着太阳天顶角(Solar Zenith Angle, SZA)和观测极角变化^[3], 因此, 特定的观测角度也可能会导致不同的能谱结构。



注: 黑色实心圆: 2019/5/UTC 06:18~10:45 ASAN观测的ENA能谱; 垂直误差棒: 对应90%的置信区间(C.I.); 水平误差棒: 对应能谱响应的半高宽虚线为90%置信区间, 在这个区间之下ASAN有效信号将无法与噪声区分; 空心菱形: Chandrayaan-1的氢ENA能谱^[5]; 空心正方形: IBEX的氢ENA能谱^[6]。

图3 ENA能谱, 相对于太阳风能量(E_{sw})和通量作了归一化^[15]

Fig. 3 ENA energy spectrums, normalized by the solar wind energy (E_{sw}) and flux^[15]

Wang等^[16]分析了2019/1/11—2020/10/12期间23个月昼的ENA能谱, 结合同期太阳风观测数据, 发现的ENA微分通量与太阳风参数如通量、密度及动压呈正相关关系。ENA能量在100~600 eV时, 相关系数较高, 大约在140~333 eV相关性最好; 能量较低的

ENA(<100eV), 相关性不明显。ASAN观测的ENA存在两种来源, 能量小于100 eV的ENA可能来自月壤和仪器内表面材料溅射物的ENA, 而大于100 eV的ENA才是被月面散射的氢ENA。这一结论与文献[15]的分析一致。

1.3 ENA观测发现月球微磁层的证据

Xie等^[17]分析了UT 2019/1/11—2020/04/28期间46个ENAN能谱数据, 考察了ASAN观测结果与月球地方时的关系(月球地方时定义如下: 日下点为12点, 日下点的对跖点为24点)这其中, 有26个能谱的观测地方时为07:00—09:30; 其它地方时为14:30—17:00。鉴于能量低于100 eV的ENA可能被月壤溅射物污染^[15-16], 只考虑100 eV以上的ENA。结果发现, 无论是上午还是下午时段, ENA的微分通量 J_{ENA} 与 $J_{SW,N}$ (月球上游未扰太阳风在月表的法向通量)均有较好的线性关系, 如图4所示。然而, 关键问题是, 为什么下午时段的 J_{ENA} 整体上小于上午时段的 J_{ENA} ?

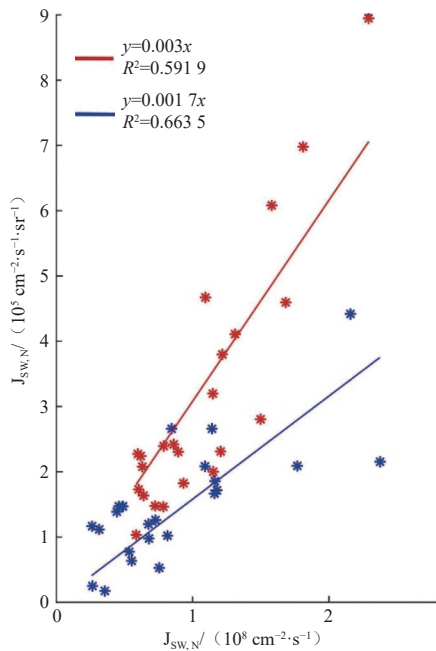


图4 月球地方时上午(红)和下午(蓝)时段, 能量高于100 eV的ENA通量随未扰动太阳风月表法向通量的变化^[17]及ASAN观测结果
Fig. 4 ENA flux variation with the undisturbed solar wind normal incidence flux^[17], measured by ASAN in mornings (red) and afternoons (blue), lunar local time

“嫦娥四号”着陆点位于艾特肯盆地的中部(177.6°E, 45.4°S), 西北方向是月球最强的磁异常区——雨海对跖区(Imbrium antipode)。该磁异常区半径达600 km, 中心位于(162°E, 33°S)^[18], “嫦娥四号”刚好位于该磁异常区的东南边缘。由图5可知, 下午时段, 太阳风从西边吹过来时, “嫦娥四号”位于磁异常的下游, 这时如果上游磁异常区形成微磁层,

“嫦娥四号”可能被包裹在微磁层的磁尾里。而上午时段, “嫦娥四号”位于雨海对跖区磁异常区的上游。这意味着上午/下午不同时段观测结果的差异很可能和太阳风与磁异常的相互作用有关。如果形成了微磁层, 当“嫦娥四号”位于磁异常的下游时, 就可能被包裹在微磁层的磁尾里。由于微磁层对太阳风的屏蔽作用, 到达月面的太阳风通量就会降低, 相应月面散射的ENAN通量也会降低。

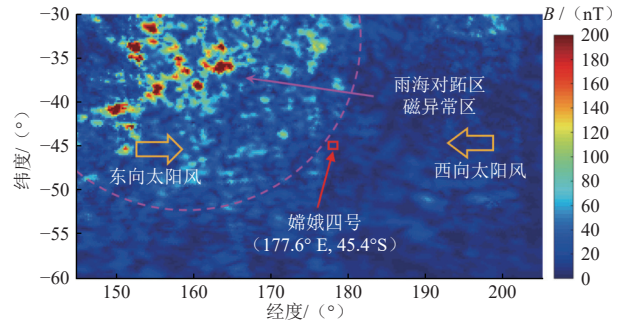


图5 “嫦娥四号”着陆点周围的磁场大小分布^[17]
Fig. 5 Magnetic field strength around the landing site of Chang'E-4^[17]

为了进一步确定上下午观测差异的原因, Xie等^[19]针对“嫦娥四号”的观测场景, 利用全球Hall-MHD模型, 模拟计算了太阳风与月球的相互作用。模拟结果证实了上文的推测: 雨海对跖区磁异常区形成了微磁层, 下午时段, “嫦娥四号”位于磁异常区的下游, 微磁层的磁尾延伸到了“嫦娥四号”的位置, 太阳风被微磁层遮挡, 造成ENA通量的下降(图6, 表明雨海对跖

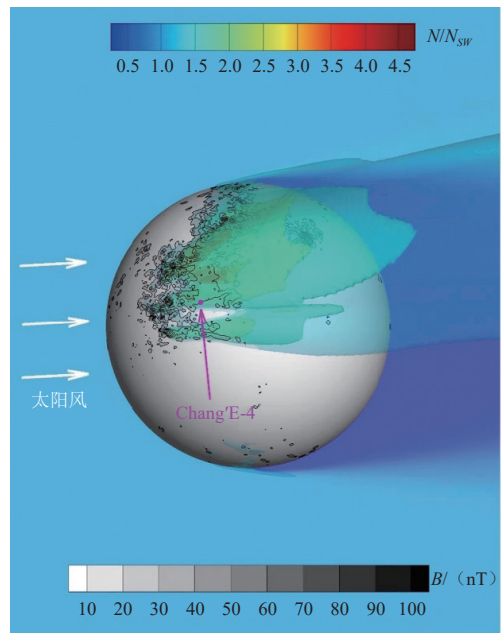


图6 太阳风与月球相互作用Hall-MHD模拟结果
Fig. 6 Solar wind interacts with the Moon, simulated by the Hall-MHD model^[17].

点磁异常区形成了微磁层, 下午时段, “嫦娥四号”位于磁异常区的下游时, 被微磁层包裹, 图中展示了归一化的太阳风密度 (N/N_{sw}), 以及月表的磁场强度 (B) [17]。

1.4 微磁层的特性

根据图4, 下午时段 J_{ENA} 的测量值虽低于上午时段的观测值, 但仍正比于 $J_{sw,N}$, 这说明微磁层可能只屏蔽了部分太阳风, 另一部分太阳风仍可穿透微磁层到达月表。这里, 定义太阳风穿透率为微磁层内的太阳风通量/未扰动太阳风通量。假设太阳风的散射率与其能量和方向无关, 利用上午时段与下午时段 $J_{ENA}/J_{sw,N}$ 的比值, 可计算太阳风的穿透率。由图4的拟合曲

线可知, 上午时段没有微磁层, $J_{ENA}/J_{sw,N}$ 平均约为0.003。假设ASAN的观测覆盖了所有的散射方向, $J_{ENA}/J_{sw,N}$ 除以0.003, 就得到了微磁层的穿透率 η_{sw} 。图7(a)为基于下午时段的观测数据, 给出的穿透率与太阳风离子惯性长度 L_{pi} 的关系。当离子惯性长度较大时 ($L_{pi} > 120$ km), η_{sw} (绿色星号) 可能接近、甚至大于1.0, 这意味着此时微磁层不存在, 或者由于大部分离子穿透进入磁层, 微磁层结构被破坏了。因此, 将下午时段数据分为2类, 在磁层内 (图7(a)蓝色星号) 和不在磁层内 (图7(a)绿色星号)。排除不在磁层内的事件, 重新计算微磁层的穿透率, 为0.23~0.78, 平均值为0.57 [16]。

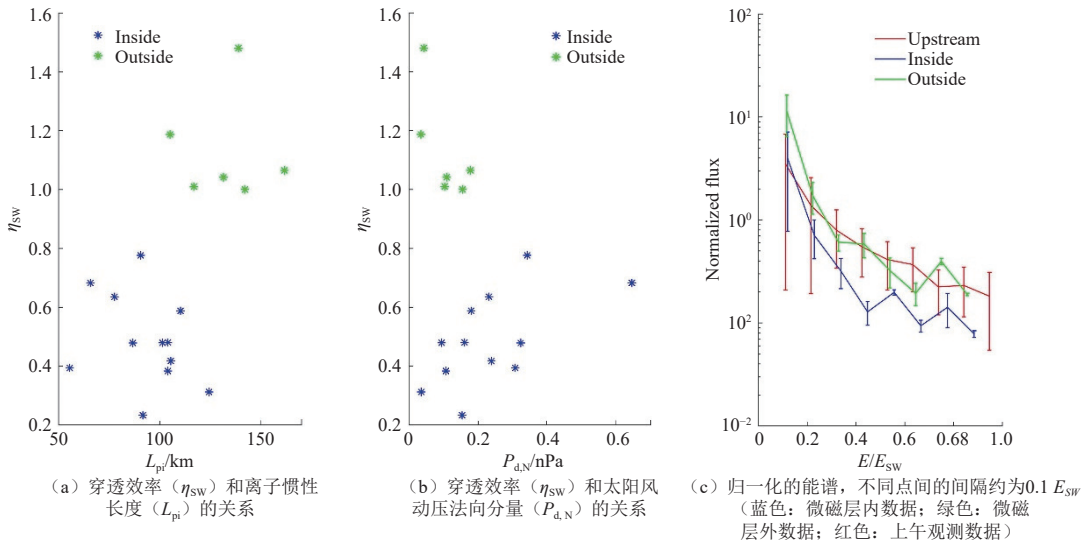


图7 ASAN观测结果 [16]

Fig. 7 Results based on ASAN observations [16]

此外, 比较图7(c)中3类事件的能谱, 微磁层内的ENA通量 (蓝色) 整体低于上游ENA通量 (红色, 上午时段观测数据), 并且这种差异在高能段更明显。这表明离子在穿过微磁层到达月表时已经减速, 从而高能段通量向低能段转移。下午观测中不在微磁层内的数据 (绿色), 与上游观测结果在 高能段相差不多, 但是低能段 (低于 $0.2 E_{sw}$) 的ENA通量比上游结果还高。这部分额外的低能粒子可能是在上游或周边被磁异常偏转或减速的太阳风粒子, 有待进一步研究。

按理论预测, 磁异常区上空形成微磁层时, 离子因其惯性长度大, 会穿透微磁层, 而电子被屏蔽在微磁层外, 因而产生电荷分量, 形成静电场, 使得穿入磁层的离子减速 [20]。因此, 下午事件的截止能量低于上午事件 (见图8, 这里ENA的截止能量为ASAN能分辨的最高ENA能量, 对应图3中虚线以上能量的最大

值, 图8中虚线表示95%置信区间, 矩形显示了两个分别在上、下午观测的太阳风能量 (约680 eV) 相似的

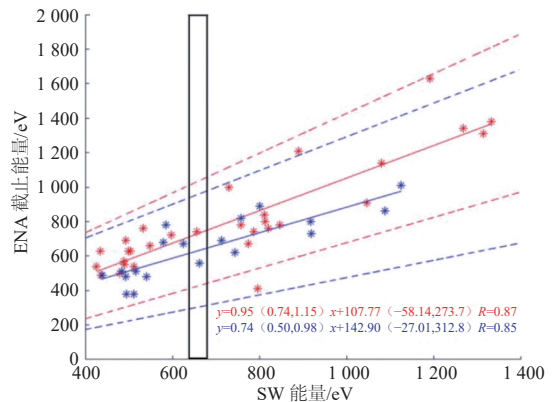


图8 上午时段(红)和下午时段(蓝)太阳风能量与ENA截止能量的关系 [16]

Fig. 8 ENA cut-off energy as a function of the solar wind energy in mornings (red) and afternoons (blue) [16]

事件)。Wang等^[16]根据ASAN上、下午观测事件中ENA截止能量之差,估算太阳风的减速率为12%~18%,对应的静电势范围在50~260 V。

2 月表粒子辐射环境

2.1 月表中子与辐射剂量探测仪(LND)

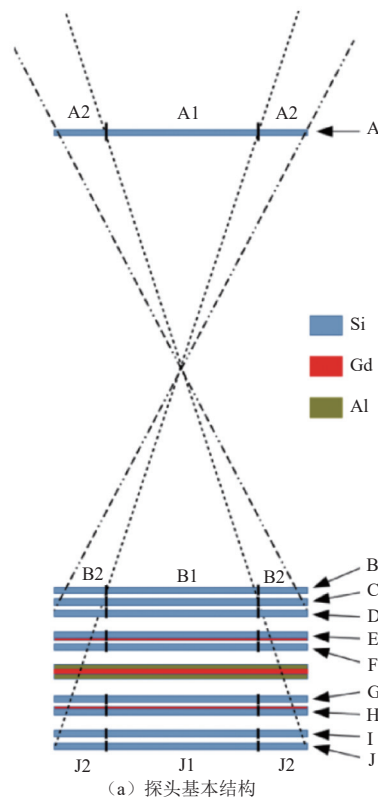
月表中子与辐射剂量探测仪^[21]用于测量月球表面带电粒子的辐射剂量率、通量,以及月球表面快中子的能谱,包括0.5~数MeV的电子、8~35 MeV的质子、17~75 MeV/nuc的重核,获取月球表面的剂量率随时间的变化,以及线性能量转移LET谱。

LND采用10片硅固体探测器(A~J)构成一个粒子望远镜,传感器的基本结构如图9(a)所示。每片硅固体探测器有两个灵敏区如图9(b),斜线部分为外探测器,网格部分为内探测器,可以输出两个独立的信号,分别用1、2标识,如探测器A1、A2。探测器A的正上方覆有一个挡光层;探测器B、C、D用于测量中性粒子(快中子和伽马射线);探测器E、F之间以及探测器G、H之间夹有很薄的钽片(红色部分),分别测量来自LND上方和下方的热中子;探测器F、G之间有一个厚钽片,用于吸收来自LND下方的热中子,防止其干扰E-F三明治结构探测器的测量。总吸收剂量和剂量率通过探测器B测量,中性粒子的吸收剂量和剂量率通过探测器C1测量,紧密靠近的探测器B、D以及探测器C2作为反符合用于区别带电粒子。如上文所述,LET谱由 dE/dx 确定。这里的 dE/dx 可通过有不同计数率和平均路径长度的3种探测器逻辑组合方式测量得到。穿透粒子的测量需要10片探测器中均有信号产生。

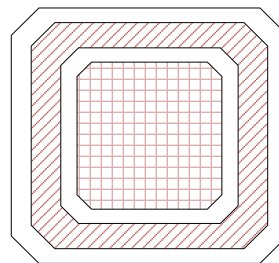
2.2 着陆器放射源的干扰校正

LND安装在“嫦娥四号”着陆器上。然而,着陆器上还有4个为仪器提供热量和动力的放射源,包括一个放射性同位素热电发生器(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)和3个放射性同位素加热器装置(RHU),在工作过程中会持续不断地释放中子/伽马射线。来自RTG/RHUs的辐射若穿透着陆器的屏蔽结构,入射到LND中,就成为LND数据的本底干扰。由于RTG/RHUs的辐射相对稳定,如在“嫦娥四号”发射前,通过地面实验测量RTG/RHUs对LND的本底干扰,并假定“嫦娥四号”落月后来自RTG/RHUs的辐射不变,那么后期数据处理时将地面测试的本底值减去,即可获得月表环境的数据。

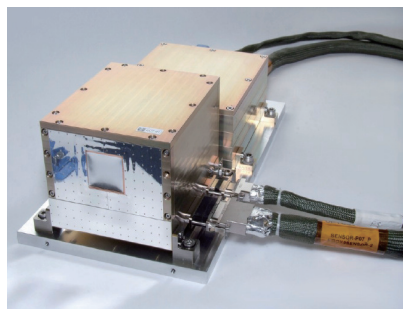
然而,由于实验室测试环境和月面条件差异较大,比如地面宇宙线辐射的影响、实验室墙壁的作用



(a) 探头基本结构



(b) 硅固体探测器分区



(c) 飞行产品(前为探头,后为电子学箱)

图9 月表中子与辐射剂量探测仪^[21]

Fig. 9 Lunar Neutron and radiation detector^[21]

等等,地面实验数据无法直接用于校正LND在月面的观测结果。HOU等^[25]提出了一种实验和仿真相结合的方法:通过有放射源与无放射源时地面辐射实验结果的对比,确定了地面宇宙射线对实验的干扰;搭建地面实验场景,经GEANT4仿真得到RTG/RHUs在LND探测器B中产生的总剂量率本底为 5.20 ± 0.56

$\mu\text{Gy/h}$, 而中性粒子 (中子和伽马射线) 的剂量率本底为 $1.69 \pm 0.46 \mu\text{Gy/h}^{[13]}$ 。在此基础上, 可对LND月面观测的总剂量率进行校正。

2.3 月表辐射环境观测

图10展示了“嫦娥四号”着陆后最初两个月昼内 (2019年1~2月) LND的观测数据^[26], 图中从上到下依次为总剂量率 (a)、中性粒子剂量率 (b)、带电粒子剂量率 (c) 以及穿透性粒子通量 (d) 随时间变化的结果。(a) 和 (c) 的剂量率以及 (d) 的穿透性粒子通量与B的中性粒子剂量率相比, 显示出更大的波动。中性粒子剂量率测量时, 记录的主要是中子与探测器C1中Si发生核反冲作用时转移到Si中的反冲能量, 及低能伽马射线 ($E_\gamma < 1 \text{ MeV}$) 在探测器C1中的能量沉积。因没有方向信息, 此测量的几何因子比穿透性粒子测量的大得多。因此, 在 (a)、(b) 和 (d) 中

看到的波动是对总剂量率有贡献的氦核, 甚至是重离子的数量波动引起的。另外, LND测量的LET谱具有显著的不变性。图11展示的是第一次月昼不同时间段的LET谱^[26]。由于LET谱只测量了带电粒子, 因此其不变性和图10 (c) ~ (d) 的现象一致, 即在LND工作期间带电粒子剂量率以及通量几乎没有变化。这说明前两个月昼中总剂量率的明显变化是中性粒子剂量率变化引起的。

根据图10及图11的测量数据 (图11中, 黑色圆圈是在着陆器巡视器分离前的结果; 红色方框是巡视器离开着陆器, 但是舱门仍然关闭时的结果; 紫色正三角为舱门打开后的测量结果; 蓝色倒三角表示热循环系统工作后的结果), 可得到在硅中的平均总剂量率为 $13.2 \pm 0.7 \mu\text{Gy/h}$, 平均中性粒子剂量率为 $3.1 \pm 0.5 \mu\text{Gy/h}$ 。根据2.2节给出的RTG/RHUs引起的LND本底, 表1给出

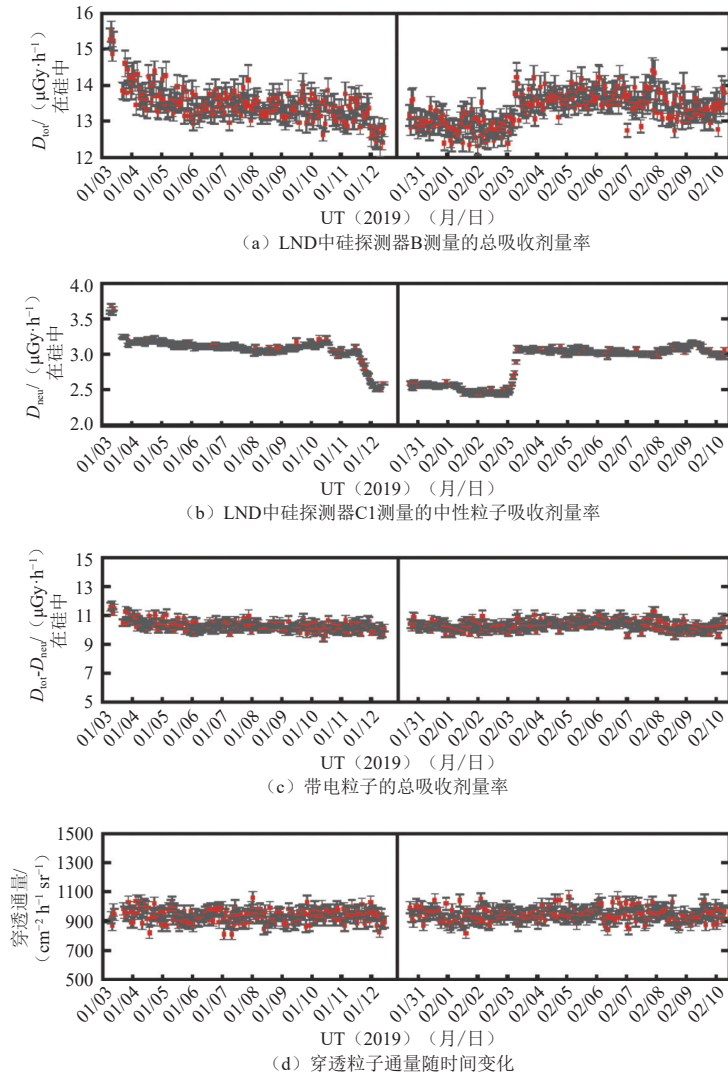


图 10 “嫦娥四号”着陆后前两个月昼LND测量的月球辐射环境随时间的变化^[26]

Fig. 10 Temporal variation of the lunar radiation environment within the first two lunar days after Landing of Chang'E-4^[26]

了校正后的测量结果以及相对误差,来自RTG/RHUs的本底误差被认为是系统误差,并在“最终结果”列中按二次方相加扣除。中性粒子对总剂量率的贡献为 $23\% \pm 8\%$ 。减去中性粒子的贡献后,带电粒子引起的硅中剂量率为 $10.2 \pm 0.9 \mu\text{Gy/h}$ 。将硅中的LET谱转换为水中LET谱,计算得到平均品质因子为 $\langle Q \rangle = 4.3 \pm 0.7$ 。将上述带电粒子吸收剂量率(水中)与 $\langle Q \rangle$ 相乘得到来自GCR带电粒子的计量当量率为 $57.1 \pm 10.61 \mu\text{Sv/h}^{[26]}$ 。

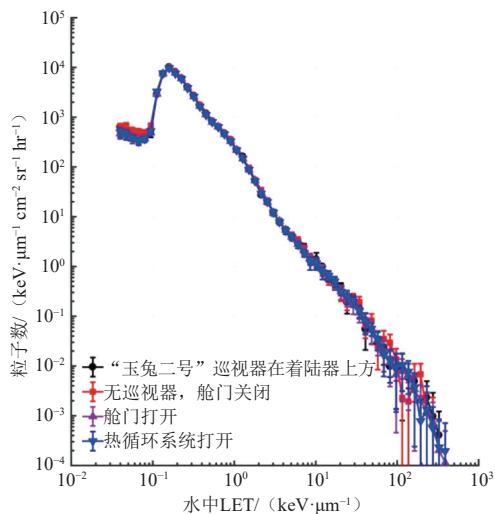


图 11 线性能量转移谱(LET, 已转化到水中LET)^[26]

Fig. 11 LET spectrum (converted to LET in water)^[26]

表 1 月球表面剂量率($\mu\text{Gy/h}$)测量结果汇总^[16]

Table 1 Results of dose rates($\mu\text{Gy/h}$) measured on the lunar surface^[16]

剂量率/ $(\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1})$	测量值	本底	最终结果(硅)
总剂量	18.4 ± 0.4	5.2 ± 0.6	13.2 ± 0.7
中性粒子剂量	4.7 ± 0.1	1.7 ± 0.5	3.1 ± 0.5
带电粒子剂量	13.7 ± 0.4	3.5 ± 0.8	10.2 ± 0.9

比较太阳平静期(UT 2019.01—2020.02) LND和近地航天器(ACE、SOHO和STEREO-A)的观测数据,在约 $10 \sim 100 \text{ MeV/nuc}$ 能量范围内, LND的宇宙线能谱与近地航天器得到能谱是一致的^[27]。具体说, LND与近地航天器对H和CNO的观测结果在误差范围内是一致的, 通量比的平均值分别为 (1.05 ± 0.15) 和 (1.08 ± 0.16) ; 对于He和重离子, 近地航天器与LND的观测结果在 1.7σ 内相当, 通量比的平均值分别为 (1.30 ± 0.18) 和 (1.24 ± 0.21) 。因此, 可得出结论: 对于低能宇宙线的能谱, 月表环境对它们的影响是可以忽略的。考虑到更高能的宇宙线更不易受到月表环境的影响, 因此可以将该结论进一步推广为: 月

表环境对这些宇宙线能谱的影响是可以忽略的^[17]。

此外, Luo等^[27]还提取了 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 的通量比, 发现在约 12 MeV/nuc 时有显著增强。LND的观测还证实了宇宙线通量的晨昏对称性。这些结果中, LND测量的宇宙线能谱, 特别是质子能谱, 它与广泛使用的CRÈME模型给出的预测值之间存在显著差异: 对于CRÈME96和CRÈME2009模型^[28-29], LND与它们之间的通量比值的平均值分别达到 (1.69 ± 0.17) 和 (2.25 ± 0.23) (如图12)。这能为CRÈME模型的改进提供很强的约束, 这些宇宙线能谱也能为其它相关的理论模型提供检验和约束。当然, 这些宇宙线能谱最直接的作用是能够直接为月背的宇宙线及与其相关的研究提供输入数据, 进而促进对月表的质子、中子和伽马发射能谱的了解。此外, LND测得的 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 通量比值与GALPROP模型给的预测值之间存在很显著的差异, 这也为GALPROP模型以及其它相关的理论模型提供很强的约束。LND对月表宇宙线通量的晨昏对称性的证实将为未来的载人登月任务着陆时间和宇航员月表出舱活动时间选择提供重要指引。

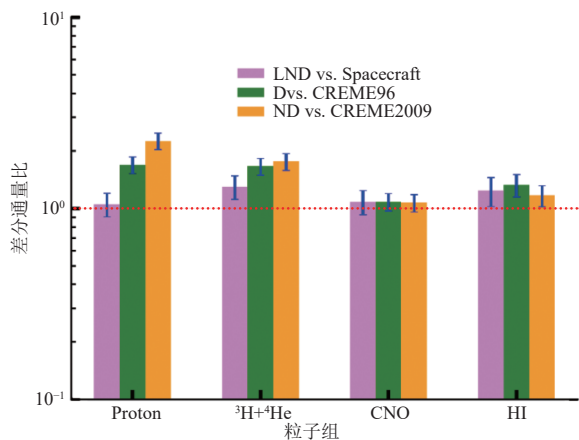


图 12 LDN对宇宙线各组分的通量测量与近地航天器观测结果的比值平均值(紫色)^[27]; LDN对宇宙线各组分的通量测量与CRÈME模型预测值的比值平均值^[28-29](绿色对应CRÈME96, 橙色对应CRÈME2009); 红色虚线表示比值为1.0

Fig. 12 Averaged ratio of GCR compositions from LND, to those from the near Earth spacecrafts (magenta)^[27], and model predictions^[28-29] (Green CRÈME96, orange CRÈME2009). Red dashed line marks the ratio of 1.0

根据LND两年内(UT 2019.01—2020.12)的观测数据, 月表粒子辐射在硅中的平均总吸收剂量率为 $12.66 \pm 0.45 \mu\text{Gy/h}$, 其中, 中性粒子吸收剂量率为 $2.67 \pm 0.16 \mu\text{Gy/h}$ 。辐射剂量率在两年内随时间出现缓慢的下降, LET谱的变化则很小。另外, 2020年12月的太阳活动末期, 由于银河宇宙线福布斯下降, 辐射剂量率降低了10%左右(如图13)^[30]。

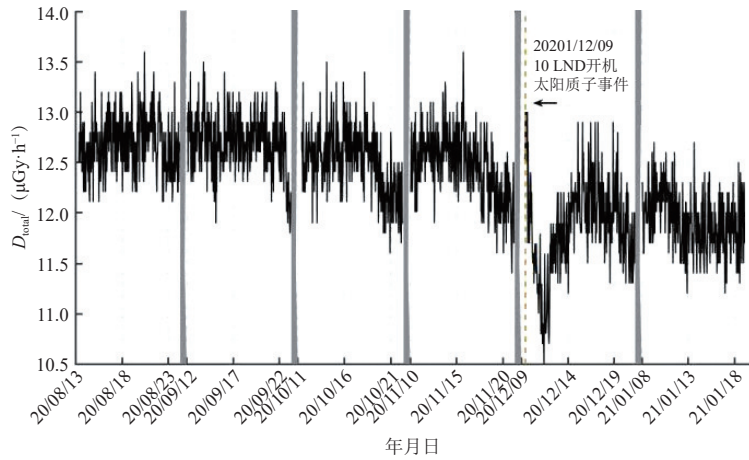


图 13 太阳质子爆发期间辐射剂量的变化情况^[30]
Fig. 13 Radiation changes in the solar energetic particle events^[30]

2.4 对太阳高能粒子事件的观测

LND不仅能测量辐射剂量, 还能探测太阳高能粒子, 监控太阳爆发活动及其对日地空间环境的影响。太阳爆发(如耀斑、太阳日冕物质抛射)产生的太阳高能粒子可直接到达月球表面。2019年5月6日, LND在月球背面探测到了第一个太阳高能粒子(Solar Energetic Particle, SEP)事件^[31]。这个事件峰值流量非常小, 持续时间也很短, 是典型的脉冲型太阳高能粒子事件(impulsive SEPs)。根据不同能量段的粒子流量曲线, Xu等^[31]计算了电子和质子开始到达月球的时间, 开始时间和对应的速度($1/\beta=c/v$)见图14。可以发现, 无论是电子还是质子速度都呈现出弥散分布, 也即速度快的粒子先到达, 速度慢的粒子后到达。对图14数据点进行线性拟合, 可推出粒子从加速区释放时间以及粒子到达月球前在行星际空间的传输距离。结果显示电子释放比质子要早1 h。Xu等^[31]还进一步分析了该SEP事件的质子能谱, 结合SOHO卫星和LND数据, 拟合了能量从几百keV~20 MeV的质子能谱; 并用常用的破折幂律谱对其进行了拟合, 发现能量拐点约为2.5 MeV。

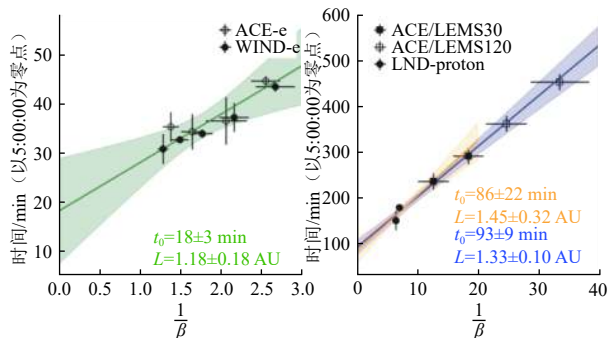


图 14 粒子事件开始的时间和粒子能量的关系^[31]

Fig. 14 The start time of the SEP event is related with the particle energy^[31]

这次SEP事件起源于一个M1.0级耀斑。结合模型, Xu等^[31]发现太阳源区距离地球的磁力线足点非常远, 超过110°。一般认为脉冲型SEP会处在磁场连接性比较好的位置, 因为加速的粒子可很快有效地传播至观测点, 形成一个脉冲型的时间曲线。但是这个事件完全不属于经典的范畴。原因可能跟日冕物质抛射驱动的激波有关。激波可以加速粒子, 激波在向外传播的过程中和地球的磁力线链接了起来。另外一种解释是剧烈变化的磁场为粒子的传输搭建了一个临时通道, 完全不同大结构的太阳势场。但目前尚未有任何观测能证实以上两种解释。

3 结束语

“嫦娥四号”首次在月面开展了能量中性原子和粒子辐射环境的探测:

1) 相比于以往的遥测观测, “嫦娥四号”测量的ENA反射率较高, 通量向低能段(低于100 eV)聚集; 太阳风能量在100~600 eV能段, ENA微分通量与太阳风参数如通量、密度及动压呈正相关关系; 月球地方时下午时段ENA的通量、截止能量和温度均低于上午时段。

2) “嫦娥四号”观测结合Hall MHD数值模拟, 证明微磁层是造成不同地方时时段ENA差异的原因, 但月球微磁层仅在太阳风离子惯性长度较小(<120 km)时才可形成。“嫦娥四号”在月面获取了微磁层内部的观测证据, 发现微磁层使到达月面的太阳风通量减小、速度降低, 但部分太阳风质子仍可穿透微磁层, 穿透效率0.23~0.78, 且正比于太阳风动压。

3) “嫦娥四号”测量了月表的辐射总剂量率、中性粒子剂量率、带电粒子剂量率以及穿透性粒子通量

随着时间的变化,转换为硅中的平均总剂量率为 $13.2\pm 0.7\ \mu\text{Gy/h}$,平均带电粒子剂量率为 $10.2\pm 0.9\ \mu\text{Gy/h}$,中性粒子剂量率为 $3.1\pm 0.5\ \mu\text{Gy/h}$,中性粒子对总剂量率的贡献为 $23\%\pm 8\%$ 。比对太阳平静时期LND与近地航天器的观测数据,发现LND的质子、CNO能谱与近地航天器观测一致,说明月表环境对宇宙线能谱没有影响;但LND的质子能谱与模型预测值有明显差异,LND为模型改进提供了强约束。

目前ASAN和LND仍在月球背面正常工作,源源不断地向地面输送观测数据。LND长期的观测不仅可获取更多事件的观测资料,同时还可得到宇宙线和太阳风长期变化带来的月表环境的变化;随着“玉兔二号”的月面巡视,ASAN的观测将实现更大的空间覆盖,探寻ENA轨道器遥感与月球车原位观测之间的关系,建立从月表到月球空间的环境整体图像,为未来月球科研站建设提供空间环境信息参考。这些结果加深了人类对月表环境的认识。

参 考 文 献

- [1] WANG X D, BIAN W, WANG J S, et al. Acceleration of scattered solar wind protons at the polar terminator of the Moon: results from Chang'E-1/SWIDs[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37: L07203.
- [2] SAITO Y, YOKOTA S, TANAKA T, et al. Solar wind proton reflection at the lunar surface: low energy ion measurement by MAP-SPACE onboard SELENE (KAGUYA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24205.
- [3] SCHAUFELBERGER A, WURZ P, BARABASH S, et al. Scattering function for energetic neutral hydrogen atoms off the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(22): L22202.
- [4] WIESER M, BARABASH S, FUTAANA Y, et al. Extremely high reflection of solar wind protons as neutral hydrogen atoms from regolith in space[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(14/15): 2132-2134.
- [5] FUTAANA Y, BARABASH S, WIESER M, et al. Empirical energy spectra of neutralized solar wind protons from the lunar regolith[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E5): E05005.
- [6] ALLEGRINI F, DAYEH M A, DESAI M I. Lunar Energetic Neutral Atom (ENA) spectra measured by the Interstellar Boundary Explorer (IBEX)[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 85: 232-242.
- [7] VORBURGER A, WURZ P, BARABASH S, et al. Energetic neutral atom imaging of the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(7): 3937-3945.
- [8] FUNSTEN H O, ALLEGRINI F, BOCHSLER P A, et al. Reflection of solar wind hydrogen from the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(2): 292-305.
- [9] WURZ P, ROHNER U, WHITBY J A, et al. The lunar exosphere: the sputtering contribution[J]. *Icarus*, 2007, 191(2): 486-496.
- [10] VORBURGER A, WURZ P, BARABASH S, et al. Energetic neutral atom observations of magnetic anomalies on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117(A7): A07208.
- [11] WIESER M, BARABASH S, FUTAANA Y, et al. First observation of a mini-magnetosphere above a lunar magnetic anomaly using energetic neutral atoms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5): L05103.
- [12] LIN R P, MITCHELL D L, CURTIS D W, et al. Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from lunar prospector[J]. *Science*, 1998, 281(5382): 1480-1484.
- [13] HALEKAS J S, DELORY G T, BRAIN D A, et al. Density cavity observed over a strong lunar crustal magnetic anomaly in the solar wind: a mini-magnetosphere?[J]. *Planetary and Space Science*, 2008, 56(7): 941-946.
- [14] WIESER M, BARABASH S, WANG X D, et al. The Advanced Small Analyzer for Neutrals (ASAN) on the Chang'E-4 rover Yutu-2[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216: 73-75.
- [15] ZHANG A D, WIESER M, WANG C, et al. Emission of energetic neutral atoms measured on the lunar surface by Chang'E-4[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 189: 104970.
- [16] WANG H Z, XIAO C, SHI Q Q, et al. Energetic neutral atoms distribution on the lunar surface and its relationship with solar wind conditions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 922(2): L41.
- [17] XIE L, LI L, ZHANG A, et al. Inside a lunar mini-magnetosphere: first energetic neutral atom measurements on the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2021GL093943.
- [18] MITCHELL D L, HALEKAS J S, LIN R P, et al. Global mapping of lunar crustal magnetic fields by lunar prospector[J]. *Icarus*, 2008, 194(2): 401-409.
- [19] XIE L H, LI L, ZHANG Y T, et al. Three-dimensional hall MHD simulation of lunar minimagnetosphere: general characteristics and comparison with Chang'E-2 observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(8): 6559-6568.
- [20] SAITO Y, NISHINO M N, FUJIMOTO M, et al. Simultaneous observation of the electron acceleration and ion deceleration over lunar magnetic anomalies[J]. *Earth, Planets and Space*, 2012, 64(2): 4-9.
- [21] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, YU J, BTTCHEER S I, et al. The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) experiment on Chang'E 4[J]. *Space Science Review*, 2020, 216: 104.
- [22] 王馨悦, 荆涛, 张坤毅, 等. “嫦娥一号”卫星太阳高能粒子探测器的首次观测结果[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(6): 2289-2295.
- [22] WANG X Y, JING T, ZHANG S Y, et al. The first results of Chang'e-1 high energetic particles detector[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(6): 2289-2295.
- [23] DACHEV T P, TOMOV B T, MATVIICHUK Y N, et al. An overview of RADOM results for Earth and Moon radiation environment on Chandrayaan-1 satellite Adv[J]. *Space Res.* 2011, 48: 779.
- [24] SPENCE H E, CASE A W, GOLIGHTLY M J, et al. CRaTER: the cosmic ray telescope for the effects of radiation experiment on the lunar reconnaissance orbiter mission[J]. *Space Sci Rev.*, 2010, 150: 243-284.
- [25] HOU D H, ZHANG S, YU J, et al. Removing the dose background from radioactive sources from active dose rate measurements in the Lunar Lander Neutron & Dosimetry (LND) experiment on the Chang'E 4[J]. *Journal of Instrument*, 2020, 15: P02032.
- [26] QUAN Z, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, KULKARNI S R, et al. First measurements of the radiation dose on the lunar surface[J]. *Science Advances*, 2020(6): 39-45.
- [27] LUO P W, ZHANG X P. First Measurements of low energy cosmic rays on the surface of the lunar far side from Chang'E-4 mission[J]. *Science Advances*, 2022, 8(2): 1760.
- [28] TYLKA A J. CREME96: a revision of the cosmic ray effects on microelectronics code[J]. *Ieee Transactions on Nuclear Science*, 1997, 44: 2150-2160.
- [29] ADAMS J H. CREME: the 2011 revision of the cosmic ray effects on

- micro-electronics code[J]. *Ieee Transactions on Nuclear Science*, 2021, 59: 3141-3147.
- [30] XU Z G, GUO J N, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, et al. First solar energetic particles measured on the lunar far-side[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 902: L30.
- [31] 张坤毅, 侯东辉, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, 等. LND两年月表辐射剂量测量结果[J]. *空间科学学报*, 2021(3): 439-444.
- ZHANG SY, HOU D H, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, et al.

Radiation dose of LND on the lunar surface in two years[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021(3): 439-444.

作者简介:

王赤(1967-), 男, 中国科学院院士, 主要研究方向: 空间物理。

通讯地址: 北京中关村南二条1号(100190)

电话: (010)62576921

E-mail: cw@spaceweather.ac.cn

The Solar Wind and Particle Radiation Environment on the Surface of the Moon—New Observations from Chang'E-4

WANG Chi¹, LI Lei¹, ZHANG Aibing^{2,3}, ZHANG Shenyi^{2,3}, HOU Donghui², XU Zigong⁴, XIE Lianghai¹, WANG Huizi⁵, LUO Pengwei⁶, GUO Jingnan⁴, SHI Quanqi⁵, ZHANG Xiaoping⁶

(1. State Key Laboratory for Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

5. School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209, China;

6. Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China)

Abstract: The solar wind, solar energetic particles and the galactic cosmic rays can reach the Moon almost unhindered, and interact with the lunar surface. The solar wind is partly scattered by the lunar regolith as hydrogen energetic neutral atoms, and the solar wind can also sputter heavy energetic neutral atoms out of the lunar regolith as well. While the albedo radiation, resulting from impact of the solar energetic particles and the galactic cosmic rays on the lunar regolith, are mainly composed of neutrons and gamma rays, features of the lunar surface radiation environment. The first ever in situ measurements of energetic neutral atoms and particle radiation have been carried out by Chang'E-4 on the lunar farside. Results reveal that a mini-magnetosphere is formed in the vicinity of the Moon, suggesting ENA is a new perspective to study the solar wind - Moon interaction. While the radiation measurements provide valuable information to guarantee the health of future robotic or manned missions to the Moon.

Keywords: lunar space environment; energetic neutral atom; solar wind scattering; particle radiation; mini-magnetosphere

Highlights:

- Chang'E-4 carried out first time in situ measurements of ENA and particle radiation environment on the lunar surface
- Observations reveal that low energy (<100 eV) ENA has high flux; while 100 - 600 eV ENA flux exhibits linear correlation with the solar wind parameters. Thus reduced ENA flux in the afternoon section (lunar local time) suggests the surface might be partly shielded by the mini-magnetosphere formed over the Imbrium antipodal magnetic anomalies. The solar wind penetration into the mini-magnetosphere depends on the inertial length of solar wind protons.
- The lunar surface radiation parameters and their variations over time are measured, supplying valuable information for lunar surface mission design. The lunar surface does not affect the galactic ray spectrum under quiet solar conditions, while the neutral components, resulting from galactic ray and solar energetic particle interaction with the lunar regolith, contributes ~23 % to the lunar surface radiation.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 刘勇]