

# 近月空间 粒子辐射环境

INTRODUCTION TO LUNAR PARTICLE  
RADIATION ENVIROMENT

中国科学院空间科学与应用研究中心 著  
王世金 主编

 经济科学出版社

# 近月空间粒子辐射环境

INTRODUCTION TO LUNAR PARTICLE  
RADIATION ENVIROMENT

中国科学院空间科学与应用研究中心 著  
王世金 主编

## 编委会

科学顾问 周国成

主 编 王世金

执行主编 王馨悦

编 委 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 王乃权 | 王 晶 | 刘慧莲 | 尧中华 | 李嘉巍 |
| 何兆海 | 汪 洋 | 张效信 | 张斌全 | 陈 涛 |
| 罗 静 | 钟 俊 | 秦 刚 | 郭建广 | 郭瑞龙 |
| 黄汉青 | 程永宏 | 谢 伦 | 濮祖荫 |     |



经济科学出版社

自 1958 年第一颗人造卫星飞向月球以来，人类走出地球、奔向月球、探索宇宙的活动始终没有停止过前进的步伐。进入 21 世纪后，重返月球，开发月球资源，建立月球基地成为当今世界航天活动的必然趋势和热点。2007 年 10 月 24 日，我国第一颗月球探测卫星“嫦娥一号”(CE-1)成功发射，标志着我国继人造地球卫星时代、载人航天时代之后步入了深空探测时代。

“嫦娥一号”卫星是我国第一颗绕月探测卫星，也是我国第一颗深空探测卫星。为了更好的利用“嫦娥一号”卫星的科学探测数据开展科学研究工作，国家科技部批准了国家 863 计划地球观测与导航技术领域重点项目“绕月探测工程科学数据应用与研究”项目的立项，2010 年 1 月开始，在“太阳活动与近月空间环境变化的关系与理论模型的研究”课题(2010AA122205)的支持下，中国科学院空间科学与应用研究中心、北京大学、国家卫星气象中心的相关专家学者共同编写了本书——《近月空间粒子辐射环境》。

本书旨在全面系统地介绍月球附近的粒子辐射环境，为航天工程安全设计提供月球空间环境状况相关的参考信息，为科学研究人员提供详尽的数据研究资料。

全文主要介绍了下列 4 部分内容。

第一部分概要介绍了月球的空间环境探测历史和现状、“嫦娥一号”卫星的空间环境探测、月球的天文参数、月球经历的辐射环境和月表的环境特征。

第二部分详细介绍了月球轨道空间的银河宇宙线粒子的特征、规律和模型。

第三部分详细介绍了太阳高能粒子事件的特征、规律和模型。

第四部分详细介绍了月球附近空间的太阳风等离子体、磁鞘和磁尾等离子体环境与频发的高能电子暴事件。

本书各章节的分工如下：

第一章 月球的空间环境概述，由王馨悦编写；

第二章 近月空间的银河宇宙线，由王晶、程永宏编写；宇宙线次级辐射，由张斌全编写；

第三章 太阳高能粒子事件，由秦刚、刘慧莲、汪洋编写；

第四章 近月空间太阳风等离子体环境，由谢伦、濮祖荫、钟俊、郭瑞龙、尧中华编写；近月空间磁鞘和磁层顶边界层等离子体环境，由李嘉巍、郭建广、张效信编写；地球磁尾等离子体环境与高能电子暴，由陈涛、王乃权、罗静、何兆海编写；

附录 国际探月大事记，由陈涛编写；地月空间相关坐标系，由陈涛、王馨悦编写。

月球空间环境可视化软件（书后光盘）由澳门科技大学的黄汉青等完成。

全书由王世金、王馨悦统稿。

本书在编写过程中，得多了许多同行的支持和帮助，特别感谢周国成研究员为本书评阅并提出了很多建设性的意见和指导。感谢“嫦娥一号”空间环境探测器工作团队设计、生产了太阳风离子探测器和太阳高能粒子探测器，产出了丰富、可靠的观测数据。

由于目前月球空间环境探测资料较少，且本书编写时间紧迫，资料的收集、整理和分析尚不够全面完善，肯定有诸多不足之处，甚至错误，诚请读者批评指正。

王世金

2012 年 7 月

# CONTENTS 目录

---

## 第一章 月球的空间环境概述

- 04 1.1 探月计划与近月空间环境探测
  - 04 1.1.1 月球探测及近月空间环境探测的历程
  - 06 1.1.2 “嫦娥一号”探月工程与空间环境探测
- 08 1.2 月球环境概述
  - 08 1.2.1 月球的天文参数
  - 09 1.2.2 月球经历的辐射环境
  - 11 1.2.3 月表环境特征
  - 14 1.2.4 近月空间环境
- 14 1.3 图表与解释

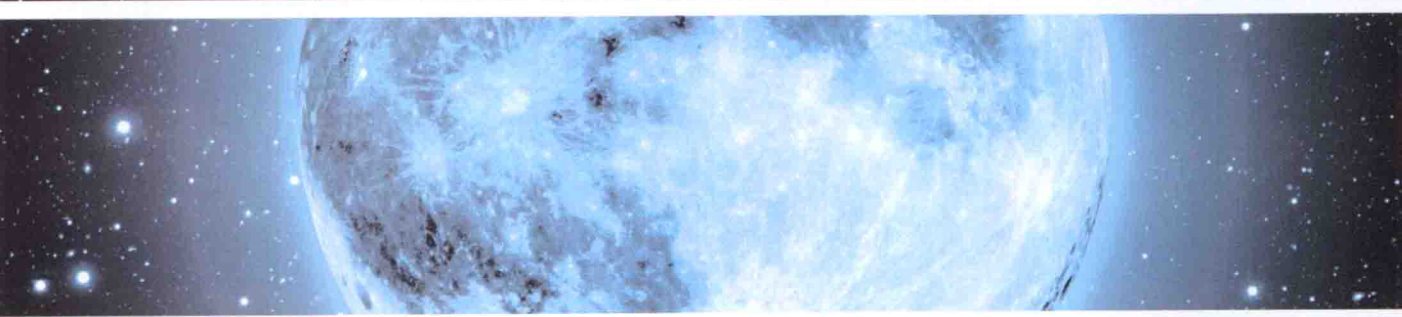
## 第二章 近月空间的银河宇宙线

- 22 2.1 定义和基本概念
  - 22 2.1.1 术语
  - 24 2.1.2 定义
- 25 2.2 特征和变化规律
  - 25 2.2.1 成分
  - 26 2.2.2 强度与时间变化

---

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| 27                        | 2.2.3 能谱               |
| 28                        | 2.2.4 太阳对银河宇宙线的调制      |
| 29                        | 2.2.5 银河宇宙线模型          |
| 31                        | 2.3 宇宙线次级辐射            |
| 31                        | 2.3.1 中子               |
| 31                        | 2.3.2 $\gamma$ 射线      |
| 32                        | 2.4 图表与解释              |
| <br><b>第三章 太阳高能粒子事件</b>   |                        |
| 50                        | 3.1 定义和基本概念            |
| 51                        | 3.2 特征和变化规律            |
| 57                        | 3.3 图表与解释              |
| 57                        | 3.3.1 观测数据             |
| 71                        | 3.3.2 月球环境下的太阳高能粒子模拟数据 |
| <br><b>第四章 近月空间等离子体环境</b> |                        |
| 84                        | 4.1 近月空间太阳风等离子体环境      |
| 84                        | 4.1.1 定义和基本概念          |
| 87                        | 4.1.2 特征和变化规律          |

|     |                             |
|-----|-----------------------------|
| 90  | 4.1.3 图表与解释                 |
| 105 | 4.2 近月空间磁鞘和磁层顶边界层等离子体环境     |
| 105 | 4.2.1 定义和基本概念               |
| 106 | 4.2.2 特征和变化规律               |
| 110 | 4.2.3 图表与解释                 |
| 117 | 4.3 地球磁尾等离子体环境与高能电子暴        |
| 117 | 4.3.1 磁尾                    |
| 118 | 4.3.2 太阳活动低年磁尾高能电子近月球轨道典型特征 |
| 125 | 4.3.3 图表与解释                 |
|     | <b>附录</b>                   |
| 142 | 一、国际探月大事记                   |
| 147 | 二、地月空间探测相关坐标系               |





INTRODUCTION  
TO LUNAR PARTICLE  
RADIATION ENVIROMENT

**月球的空间环境概述**

# 第一章 月球的空间环境概述

“皎皎空中孤月轮”，自古至今，月球的神秘和美丽吸引了无数探寻的目光，但是，人类真正开展月球科学研究的历史却并不久远。1610 年，伽利略第一次将望远镜对准月球，是人类系统认知和研究月球科学的开端。人类进入太空时代的 1959 年 1 月，第一颗人造卫星成功飞过月球；1969 年 7 月，人类第一次登上月球，逐渐摘下了月球神秘的面纱。当今，人类的理想是在月球上建立永久居留地，成为人类飞出地球，征服太阳系其他行星，迈向无垠宇宙的前哨站。

## 1.1 探月计划与近月空间环境探测

### 1.1.1 月球探测及近月空间环境探测的历程

人类的月球探测历史经历了高潮期、沉寂期、恢复期和新发展期。

第一次月球探测高潮兴起于冷战背景下，美国和苏联开展了以月球探测为中心的空间竞赛。1958 ~ 1976 年，美国和苏联共发射了 108 个月球探测器，其中成功或部分成功的有 52 次。较成功的卫星包括了苏联的 Luna 系列 16 颗、Zond 系列 4 颗；美国 Ranger 系列 3 颗、Surveyor 系列 4 颗、Lunar Orbiter 系列 5 颗、Apollo 系列 8 颗、Explore 系列 2 颗。实现了硬着陆、环绕、软着陆和取样返回与载人探测，月球探测获得了划时代的成就。

尽管苏联在登月竞赛中输给了美国，但是通过月球探测计划，苏联积累了大量的月球知识，并创造了人类航天史上的诸多奇迹：苏联发射了第一艘掠过月球的飞船、撞击月球的飞船和绕过月球背面并对其拍照的飞船；第一次在月球上实现软着陆、把轨道器送入月球轨道并最先发射绕月飞船且完成回收；实现了月面着陆并完成了自动采样和样品取回。

1969 年 7 月，美国 Apollo 11 号飞船实现了人类首次登月。在著名的庞大阿波罗登月计划中，通过对月球表面地形、地貌和岩石特征的研究，美国积累了有关月球起源、演化、月球地质特征和化学特征的丰富知识。阿波罗计划的科学实验包括了热流实验、引力实验、大气成分实验、微流星实验、月震轮廓实验、磁强计测量月表磁场强度、月表电性实验、月球中子探测实验和宇宙线观测实验等，大致认识了月球正面和背面月貌、环形山起源、地壳厚度和月壤等，发现月表没有水、稠密的大气或生命，月球没有辐射带且几乎没有磁场，通过研究基本上否定了月球是从地球分离出去的假说。

月球探测计划推动了美国和苏联科学技术上的飞速发展，不仅建立完善了庞大的航天工业和技术体系，相关科学技术在军事和民用领域的扩展、推广和二次开发，形成了一系列的高科技产业链，为两国带来了显著的经济效益。

第一次月球探测高潮结束后，月球探测差不多沉寂了近 20（1976-1994）年，在此期间，世界上没有开展过成功的月球探测计划。

1994-2006 年是月球探测的恢复期，沉寂已久的月球空间再度繁荣起来，1994 年 1

月 25 日,美国发射月球探测器 Clementine-1 号,首次在月球上发现有水冰存在;1998 年 1 月 6 日,美国发射 Lunar Prospector(LP),它搭载了  $\alpha$  粒子光谱仪,  $\gamma$  射线光谱仪,中子光谱仪,电子反射仪和磁强计等;2003 年 9 月 27 日,欧洲第一个月球探测器 SMART-1 发射升空,这标志着欧洲月球探月计划的正式开始。

从 2007 年开始,月球探测进入了新的大发展时期,中国、日本、美国,英国、德国、俄罗斯等更多的国家和地区都制定了自己的月球探测计划,“重返月球”成为人类航天的新口号,新的月球探测高潮来临了。2007 年 9 月 14 日,日本月球探测卫星 Kaguya (SELENA) 发射升空,观测月球表面地形、元素分布和月球附近的空间环境等。2008 年 10 月 22 日,印度发射首颗无人月球探测器 Chandrayaan-1 并将国旗送上了月球表面,标志着印度“登月计划”正式起步。2007 年 10 月,中国的嫦娥一号卫星发射成功。2010 年 10 月,中国发射了嫦娥二号探月卫星。2009 年 6 月,美国发射了 Lunar Reconnaissance Orbiter(LRO),寻找月球最适合的着陆点、研究月球辐射环境及其对人类的影响,同年,美国发射了 LCROSS 卫星,寻找月球上的水,接下来美国将发射 GRAIL 计划的两颗卫星和 LADEE 卫星,探测月球重力场、月表环境状况并研究环境要素对月尘的影响。在上述月球探测计划中,多搭载有探测月球附近空间环境中的等离子体、宇宙线以及粒子辐射效应的科学探测仪器,空间环境探测已成为月球探测计划的重要组成部分。

2004 年 1 月 14 日,美国总统布什宣布,美国将实施重返月球及未来登陆火星的太空计划,2020 年美国宇航员再次登陆月球,并建立长期居留地,以月球为跳板,于 2030 年前把宇航员送上火星乃至更遥远的宇宙空间;2010 年 4 月 15 日,美国总统奥巴马公布了美国的新太空探索计划,表示美国航天局今后 5 年将增加 60 亿美元,将近地小行星和火星作为美国载人航天计划的目的地,奥巴马解释说,对小行星、月球、火星卫星的探索,都只是登陆火星的“跳板”。欧洲空间局的月球战略计划提出于 2020 年前进行无人月球探测,2020-2025 年实现载人登月,并建立长期居留地,2035 年将宇航员送上火星。欧空局 2010 年 9 月 16 日宣布,将在 2018 年向月球南极发射一个大型着陆器,探测月面环境、试验新技术,为载人登月做准备。日本拟于 2018 年发射月球取样返回探测器,2025 年用机器人在月球表面建立无人探测基地,并在 2030 年将人类送上月球。印度也制定了 2015 年宇航员登月的目标。俄罗斯则在美国宣布“太空探索新构想”后将月球、日地关系、行星探测研究列为航天活动首要发展方向之一,并准备在 2015 年后建立月球基地。人类建立月球基地的研究已经进入了实质性的阶段。

人类“重返月球”意义重大。月球是行星科学的天然实验室、是观测宇宙的平台,是

提供人类在地球或星际空间消耗的能量和资源的巨大源泉，也是天然的空间站和中转站，让人类学会如何在宇宙空间生活和工作的最佳场所、使人类从月球出发奔向宇宙更深处。此外，涉及到运载、飞船、软着陆、返回和月球车技术等相关技术的发展，可带动多领域高科技的发展。

月球的辐射环境是月球科学探测研究的重要课题之一，在超过 80% 的时间内，月球处于太阳风中，其它时间则位于地球磁层磁尾，由于没有内禀磁场和稠密大气的保护，月球可以直接受到周围宇宙线粒子和等离子体的轰击。环境对生物及设备的影响是无处不在的，迄今为止，人们对月球附近和月表复杂、恶劣的空间环境状况了解的尚不够深刻。新一轮的探月高潮兴起后，以建立月球基地为目标的月球轨道器和着陆器计划在世界范围内兴起，对认知月球辐射环境提出了更进一步的需求。因此，在当前及未来更长的时间内，空间环境的科学探测和监控都将是月球探测不可或缺的重要组成部分，并对建立月球基地等人类进入深空的活动产生着深远的影响。

### 1.1.2 “嫦娥一号” 探月工程与空间环境探测

#### (1) “嫦娥一号” 探月工程

中国的探月工程命名为“嫦娥工程”，整个工程可分为“绕”，“落”，“回”三个阶段。

第一步为“绕”，实现月球探测卫星绕月飞行，获取月球表面高精度三维立体影像，探测月球表面有用元素含量和物质类型，探测月壤特性与厚度，并探测地月空间环境。第二步为“落”，即月球软着陆探测与自动巡视勘察，时间定于 2013 年。第三步为“回”，即月面自动采样返回，时间定于 2020 年左右。发射月球软着陆器，对月球样品自动取样并返回地球。

中国的月球探测工程于 2004 年 1 月正式立项启动，2007 年 10 月 24 日，西昌卫星发射中心成功发射了“嫦娥一号”绕月探测卫星。“嫦娥一号”卫星首次月球探测的成功，标志着我国已步入具深空探测能力的国家行列。“嫦娥一号”绕月探测工程有 4 项科学目标：

第一项是获取月球表面三维影像。第二项是分析月球表面元素含量和物质类型的分布特点。第三项是探测月壤特性。第四项是探测地月空间环境，为此，“嫦娥一号”卫星搭载了两大类有效载荷，即太阳高能粒子探测器和太阳风离子探测器来完成科学探测任务。2009年3月1日，嫦娥一号卫星受控落月于东经52.36度、南纬1.50度的丰富海区域，在轨共运行495天，为科学家们开展月球科学和相关领域科学研究工作积累了宝贵的第一手资料。

## (2) “嫦娥一号”卫星的空间环境探测概况

“嫦娥一号”是国际上第一颗在200公里极月轨道观测空间中带电粒子的卫星。“嫦娥一号”空间环境探测分系统由太阳高能粒子探测器和太阳风离子探测器（2台）组成。太阳高能粒子探测器通过对轨道空间高能带电粒子（电子、质子和重离子）的探测，得到高能粒子的能谱、成分和通量以及分布特征。太阳风离子探测器用于探测太阳风等离子体的能谱，即太阳风等离子体的能量分布函数，从中引出太阳风等离子体的主要参数，如太阳风的体速度、离子温度以及数密度等。

### 1) 太阳高能粒子探测器 HPD

“嫦娥一号”卫星搭载的太阳高能粒子探测器(HPD)由中国科学院空间科学与应用研究中心空间环境探测研究室研制。太阳高能粒子探测器传感器系统由三块半导体硅探测器组成，图1是太阳高能粒子探测器的照片。太阳高能粒子探测器的观测能道为6道质子(4 ~ 400MeV)、2道电子( $\geq 0.1$ ,  $\geq 2$ MeV)以及包括氦(13 ~ 105MeV)、锂(34 ~ 210MeV)、碳(117 ~ 590MeV)的3道重离子。

### 2) 太阳风离子探测器 SWID-A/B

“嫦娥一号”卫星太阳风离子探测器(SWID-A/B)由中国科学院空间科学与应用研究中心空间环境探测研究室设计生产。图2是太阳风离子探测器的照片。太阳风离子探测器包含了相同设计的两台单机，它们各有12个探测方向，称为12个极角。太阳风离子探测器的总视场为 $6.7^\circ \times 180^\circ$ ，每个极角的观测视场为 $6.7^\circ \times 15^\circ$ ，观测月球附近0.04 ~ 20 keV的离子。



图 1 太阳高能粒子探测器



图 2 太阳风离子探测器

## 1.2 月球环境概述

月球是地球的唯一天然卫星，是距离地球最近的天体。月表的环境特征记录了月球的起源以及月球与外部环境相互作用的历史。在 80% 的时间内，月球运行于太阳风中。每月大概有 4 天左右，月球运动于地球磁尾。月球的重力加速度只有地球的 1/6，使得它无法保持大气层，因而月球大气非常稀薄。月球没有全球性的偶极磁场，只在岩石中存在较明显的剩余磁场。月球的平均反照率为 0.09，即只有 9% 的光被月球反射。月表昼夜温差非常大，夜晚和白天的温差可达 300℃。由于没有大气，空间中的各种辐射可以直接到达月表并与月壤相互作用。

### 1.2.1 月球的天文参数

月球的轨道特征决定了月球经历的空间环境。月球围绕地球旋转，地球和月球构成了地月系，以它们的公共质心共同围绕太阳运动，它们的轨道距离太阳 1 个天文单位 (1AU)，149,597,870km。月球轨道平面称白道面，白道和黄道交角平均值为  $5^{\circ} 09'$ ，可以近似的认为，月球在黄道面中运动。因此，月球经历的太阳风环境和宇宙线环境与地球几乎相同。

月球绕地球的平均公转周期称为“恒星月”，是月球在天球上相对于恒星背景运行一

周的时间间隔，月球自转一周的时间等于一个恒星月。由于月球自转和围绕地球公转的周期相同，使得月球总是同一面朝向地球，称为“同步旋转”。月球反射太阳光以及日、地、月的相对位置周期性的变化使得月球出现了月相的更迭，称为“朔望月”，也使得月球周期性的进入到地球磁尾中。

在极区，太阳仰角只有  $\pm 1^{\circ} 32'$ ，导致半年白天、半年夜晚，也使得一些位于南极的坑洞成为了永久阴影区（约占月球表面的 2%）。光照和外界等离子体环境使得不受稠密大气与内禀磁场保护的裸露月球表面充电，对月球附近的空間环境造成了一定的影响。

## 1.2.2 月球经历的辐射环境

月球的辐射环境包括电磁辐射环境和电离辐射环境。太阳系内所有电磁辐射基本上均来源于太阳，太阳的电磁辐射在 1AU 处平均能量密度大约为  $1360\text{W/m}^2$ ，可以近似认为与月球轨道附近相等。太阳风、地球磁尾等离子体、太阳宇宙线 (SCR) 和银河宇宙线 (GCR) 是月球遭遇的主要电离辐射环境类型。在 80% 的时间内，月球处于太阳风等离子体中，每月大约有 4 天，月球在地球磁尾，见示意图 1。满月的时候，月球到达地球磁层的磁尾中心，新月的时候，月球恰好在太阳和地球之间。

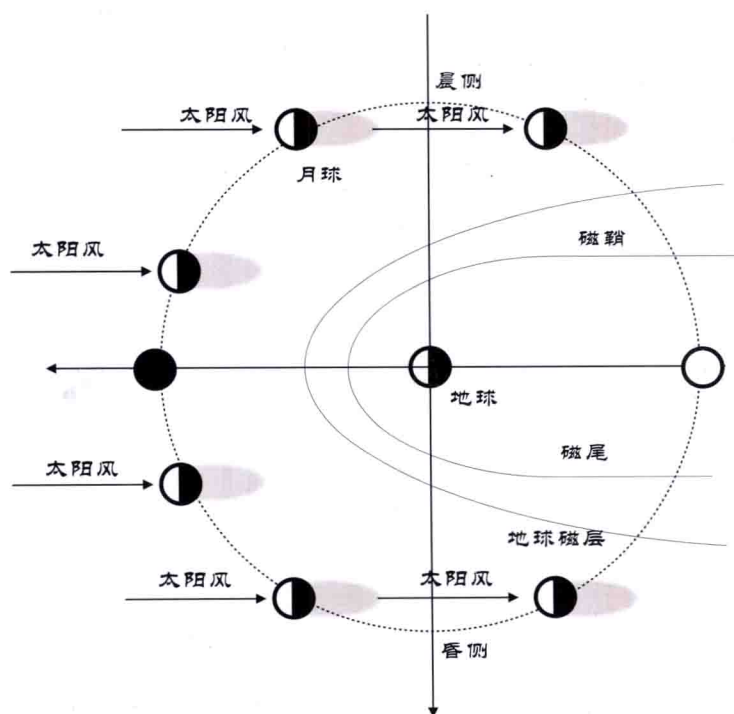


图 1 月球经历的空间等离子体区域的示意图

## (1) 太阳风

太阳风是从太阳稳定流出的稀薄热等离子体。太阳风的主要成分为电子和质子，占95%以上；重离子成分则主要是氦核，约占4.8%；其他成分如氧离子、铁离子等含量很少，太阳风的离子和电子电荷数基本相当。典型的太阳风速度变化范围是300 ~ 700km/s，太阳风粒子密度约1 ~ 20/cm<sup>3</sup>，质子的流量变化范围是1 ~ 8 · 10<sup>8</sup> 质子 /cm<sup>2</sup> · s。太阳风电子平均温度为1.4 · 10<sup>5</sup>K，质子平均温度为1.2 · 10<sup>5</sup>K，太阳风的磁场平均约为7nT。太阳风是月球大气表面几种不稳定元素的主要来源，如H、He、C、N等。太阳风造成了月表的侵蚀和风化。太阳风等离子对月球的主要效应是在月球的阴影区域产生一个等离子体腔，这种情况完全不同于太阳风与地球的相互作用。

## (2) 地球磁尾

地球磁尾是地球磁层背阳面向后面延伸的区域。地球磁层是指电离层以上受地磁场控制的广大稀薄等离子体区域，其外边界称为磁层顶，向阳面磁层顶的外形像一略微压扁的半球，在日地连线方向上距离地心平均10-11个地球半径(Re)，背阳面磁层的延伸区域磁尾可以延伸至数百至上千个地球半径(Re)。磁尾中心的热等离子体区域成为等离子体片，它把磁尾分成南北尾瓣。月球经历的磁尾区域距离地球大约60Re，属于中磁尾区域。在月球轨道，等离子体片密度约为0.1 ~ 1.0cm<sup>-3</sup>，尾瓣密度约为0.01cm<sup>-3</sup>。

## (3) 太阳宇宙线 / 太阳高能粒子

日球层里的高能粒子包括：来自太阳系以外的银河宇宙线(GCRs)，来自太阳终止激波的异常宇宙线(ACRs)，来自日冕共转作用区(CIRs)的高能粒子以及来自太阳的太阳高能粒子(SEPs)。通过研究这些粒子的能谱、带电荷数以及不同成分的丰度可以获得它们源的特性、加速机制以及传播特性，从而更好地研究太阳以及预报高能粒子辐射，为宇航员以及卫星工作提供安全保障。太阳高能粒子是指由发生在太阳上的事件加速而来的高能粒子，包括高能电子(~1keV-tens of MeV)以及高能离子(~50keV/nucleon-10GeV)。太阳高能粒子强度的突然增强被称为太阳高能粒子事件。太阳高能粒子主要和太阳耀斑或太阳日冕物质抛射事件相关。太阳高能粒子的主要核子成分是质子以及一些α粒子，由于主要成份是高能质子，这类事件也叫做太阳质子事件(SPE)。一个完整的太阳高能粒子事件还包括粒子强度下降到背景水平这一过程，该过程持续时间在不同事件中有所不同，大