科学通报 2020 年 第 65 卷 第 14 期: 1305 ~ 1319
专题: “鸿鹄专项”中的行星科学研究 评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

行星空间环境光学遥感

何飞[1,2,3,4]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学创新研究院, 北京 100029;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京空间环境国家野外科学观测研究站, 北京 100029

E-mail: hefei@mail.iggcas.ac.cn

2019-12-09 收稿, 2020-03-16 修回, 2020-03-17 接受, 2020-03-31 网络版发表
中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA17010201)、国家自然科学基金(41674155)和中国科学院青年创新促进会(2017258)资助

摘要 行星空间环境是行星多圈层耦合系统的重要部分, 是行星与星际空间进行物质和能量交换的关键区域, 对行星环境演化具有重要影响. 行星空间内分布着不同成分的行星大气, 不同密度和能量的空间等离子体, 在太阳风变化或行星内部驱动力的驱动下发生不同时间/空间尺度的物质输运、能量沉积/耗散等过程. 从全局角度理解行星空间的物质和能量输运是研究行星物质逃逸的关键. 光学遥感手段可以弥补传统就位探测方法无法捕捉全貌、无法区分时空变化的不足. 本文介绍光学遥感的基本概念, 回顾国际国内行星光学遥感探测历史, 并根据我国行星科学科教融合发展规划, 提出行星空间环境光学遥感的发展思路, 特别是详细介绍了当前正在开展的“鸿鹄专项”球载行星光学遥感. 最后, 对我国行星空间环境光学遥感的未来发展进行了展望.

关键词 行星, 空间环境, 大气, 等离子体, 光学遥感, 鸿鹄专项

行星是一个包括内部、表面、大气和空间的多圈层耦合系统. 在太阳系行星中, 地球是圈层最齐全的行星, 也是唯一一颗拥有生命的行星. 行星空间环境是行星多圈层耦合系统的重要部分, 是行星与外界进行物质和能量交换的关键区域. 行星空间的大气、带电粒子、电磁场和辐射的短期变化(“天气”)与长期变化(“气候”)是理解行星环境演化的重要线索[1]. 太阳系行星存在丰富的多样性特征. 行星与太阳距离的远近、内禀磁场的强/弱或有/无、大气压与大气成分差异、地质历史差异等各方面因素造就了行星空间环境的巨大差异, 从而导致不同行星生存环境的巨大差异, 比如迥异的温度、湿度和辐射环境, 特别是造就了地球——这颗太阳系独一无二的生命欣欣向荣的宜居星球.

理解行星空间环境变化的不同驱动力和物理过程, 不仅有助于保护地球的生命、技术系统和基础设施, 更有助于我们认识地球宜居性的过去和未来. 行星空间作为行星大气圈向星际空间的过渡区, 其环境变化的驱动力既包括行星本身的控制(如引力和磁场), 也包括太阳活动的控制(如太阳风和行星际磁场), 甚至包括其卫星的影响(如木卫一火山活动影响木星磁层[2]). 内外驱动力的共同作用决定了行星空间——行星磁层的延伸范围, 而且其始终是动态变化的, 对行星空间环境的研究需要同时兼顾时间和空间变化. 行星空间内, 分布着不同成分的行星大气, 不同密度和能量的空间等离子体, 并在太阳风变化或行星内部驱动力的驱动下发生不同时间/空间尺度的物质输运、能量沉积/耗散等过程. 这些过程与行星物质的收支平衡密切相关, 如行星物质逃逸和吸积. 传统的场和粒子的就位观测很

引用格式: 何飞. 行星空间环境光学遥感. 科学通报, 2020, 65: 1305–1319
He F. Remote sensing of planetary space environment (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1305–1319, doi: 10.1360/TB-2019-0804

© 2020《中国科学》杂志社

难捕捉到物质和能量输运的全貌，也很难将空间等离子体动态变化的时间和空间信息进行分离，进而限制了人们对全局耦合特性的研究. 光学遥感手段是解决这一难题的重要途径.

在光学遥感手段出现之前，人类对空间环境的感知主要来源于人造卫星的就位探测. 就位探测对空间科学和行星科学的发展作出了不可磨灭的贡献. 比如美国“探险者1号”(Explorer-1)发现地球辐射带[3]，苏联“月球探测器2号”(LUNIK-2)发现地球等离子层顶[4]，美国“探险者12号”(Explorer-12)发现地球磁层顶[5]，美国“水手2号”(Mariner 2)证实太阳风等离子体的存在[6]，美国“先驱者11号”(Pioneer-11)发现木星辐射带[7]，美国“火星全球勘测者”(MGS)发现火星岩石剩磁全球分布[8]，欧洲太空局(ESA)“金星快车”(VEX)发现金星磁尾磁重联[9]，美国“卡西尼号”(Cassini)发现土星日侧磁重联[10]，等. 一系列重大发现揭开了行星空间环境的神秘面纱，大大促进了空间科学和行星科学理论的进步与完善. 但是对于行星空间环境的全球图景，人类还是缺乏足够的认识，原因就是就位探测很难拼合全球图像. 随着光学遥感技术的出现和进步，人类的视野得到了大大的拓展，有机会从全球角度理解行星空间环境的演化.

1 光学遥感简介

光学遥感是以光学辐射为媒介对物质状态进行感知的一种远距离探测手段. 光学遥感主要分为成像观测、光谱观测和光谱成像观测3种，如图1所示. 成像观测就像人的眼睛，直接将空间辐射投影到二维探测器阵面上，利用滤光片来控制光谱波段. 可以是单一谱线，也可以是连续谱段，其优点是在一定时间尺度内分离时间和空间变化，同时获取大范围空间内单一物质成分的分布状态，是进行全局时空演化研究的首选手段. 光谱观测利用色散元件或干涉仪将入射光色散分光，测量入射光强度与波长的函数关系，这种观测方式没有空间分辨能力，只能实现单点测量，但其优势是能区分不同物质成分，或表征同一种物质成分的不同状态(如温度、速度等)，是空间物质成分精细探测的主要手段. 光谱成像观测则结合了前两种观测方式，既有一定的空间分辨率能力(一般只能实现线视场)，也具有光谱分辨能力，通过扫描运动等方式实现空间覆盖. 从全局角度来看，虽然牺牲了一定的时间分辨率能力，但对于全局大尺度问题研究来说，越来越受到科学家的青睐.

光学遥感的主要衡量指标包括[11,12]:

(1) 视场角. 表征光学仪器的视野范围，视场角越大，视野就越大. 根据目标距离和视场角即可计算出光学仪器的空间覆盖范围.

(2) 焦距. 指平行于光学系统光轴的平行光束经过光学系统后的汇聚点(焦点)到光学系统像方主点的距离.

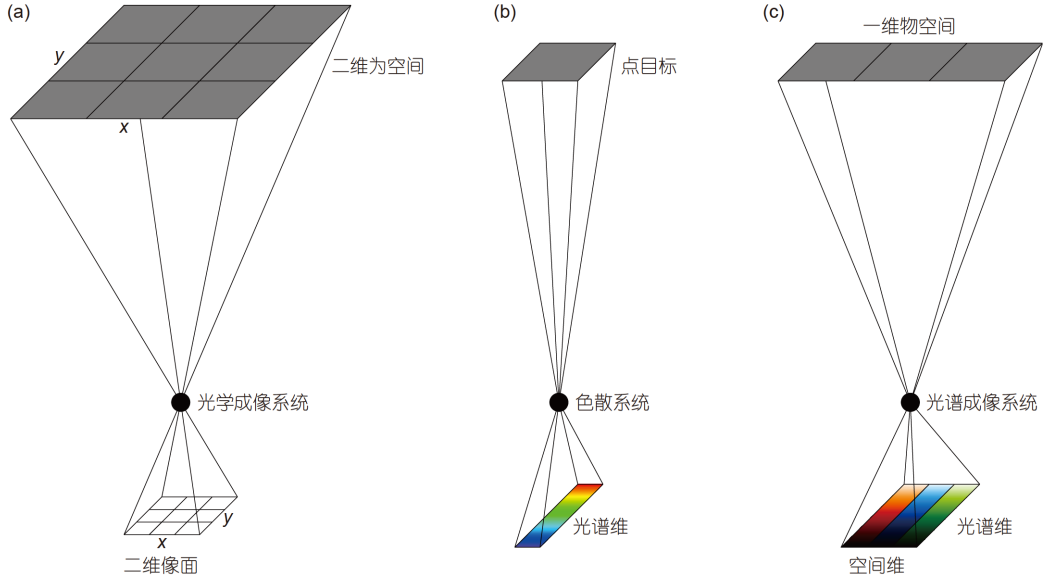


图 1 3种典型的光学遥感方法. (a) 成像观测; (b) 光谱观测; (c) 光谱成像观测

Figure 1 Three typical methods of optical remote sensing. (a) Imaging; (b) spectrograph; (c) spectrographic imaging

(3) 角分辨率. 表征光学仪器分辨物体细节的能力, 是指遥感器分辨开相邻两个物点像的弥散斑的能力. 光学仪器的极限角分辨率一般由瑞利判据给出, 是波长λ和入瞳口径D的函数, 根据衍射理论可以得到$\Delta\theta$=1.22/D.

(4) 像元分辨率. 指探测器单个像元对应的角度, 其与焦距f和探测器像元尺寸d的关系为: 2tan(d/2f). 一般容易将角分辨率和像元分辨率混淆, 角分辨率是表征光学仪器分辨率能力的, 而像元分辨率只是针对探测器物理像元尺寸而言的, 光学设计中需要根据信号强度、信噪比要求等匹配这两项参数. 根据Nyquist判据, 一般需要两个物理像元采样一个光学分辨率单元.

(5) 入瞳面积. 入瞳是限制入射光束的有效孔径, 是孔径光阑对前方光学系统所成的像. 入瞳面积决定了光学系统的成像范围和入射能量, 是衡量仪器灵敏度的一项重要指标.

(6) 工作波段. 表征光学仪器能响应的波长范围, 由光学系统的反射镜、滤光片、探测器的光谱响应曲线决定, 对于光谱类仪器, 还取决于色散元件特性(如光栅和棱镜).

(7) 光谱分辨率. 表征光学仪器分辨不同波长辐射的能力, 其需求一般根据观测目标的光谱特性提出.

(8) 像面照度分布. 表征均匀入射光经过光学系统后, 在像面响应的非均匀性. 由于大视场和光学系统像差等原因, 像面响应一般是非均匀的, 需要通过仪器定标过程测量出来, 在后期数据处理中去除其影响.

(9) 像元灵敏度. 表征光学仪器响应入射光强的能力. 灵敏度越高, 能探测的强度就越微弱. 其定义为充满入瞳面积的单位强度入射光(1 Rayleigh=$10^6/4\pi$ photon cm^{-2} s^{-1} sr^{-1})在单位时间内在探测器一个分辨率单元产生的计数个数或信号强度. 空间环境光学遥感中灵敏度(S, count s^{-1} Rayleigh^{-1} pixel^{-1})的计算公式一般定义为[13]

$$S(\lambda) = A\Omega\eta(\lambda) \times 10^6 / 4\pi, \quad (1)$$

其中, A为入瞳面积(cm^2), Ω为一个分辨率单元(像元分辨率或角分辨率)对应的空间立体角(sr), $\eta(\lambda)$为系统的透过率函数, 一般由系统光学元件的反射率、透过率、探测器量子效率等卷积得到.

(10) 曝光时间. 获取一幅光学图像的积分时间. 积分时间除受科学目标所需的时间分辨率限制外, 一般还要考虑信号强度和信噪比要求, 同时还要兼顾仪器稳定性对分辨率的影响.

(11) 定标精度. 定标精度是决定仪器测量数据精度的核心指标, 又可分为几何定标精度和辐射定标精度. 光学图像的几何误差主要来源于光学系统本身的畸变和装调误差, 几何定标的目的就是精确测量这些误差, 建立像元和几何空间的准确对应关系, 用于反演观测目标位置. 一般通过实验室对标准网格图像测试, 建立图像和物空间的投影矩阵, 目前常用的有多项式校正法和查表法. 辐射定标包括绝对辐射定标和相对辐射定标. 绝对辐射定标实际上就是精确测量灵敏度值, 而相对辐射定标则是测量灵敏度值在仪器视场范围内的分布不均匀性, 这两项指标是准确反演空间目标强度分布的关键.

以上指标是行星光学遥感任务设计中需要考虑的, 但针对特殊任务, 也不限于上述指标, 特别是针对不同的运行环境, 还需要考虑一系列环境适应性指标[14].

行星空间的大气和等离子体光学辐射是开展行星光学遥感的前提. 行星空间环境的光学辐射涵盖了从X射线到红外线的较宽波段, 不同的波长具有不同的产生机制, 并对应不同的物质成分或物质状态. 在地球空间, 从磁鞘至电离层的绝大部分磁层空间内, 不同特性的等离子体都有其特征的光学辐射, 如地球磁鞘和极尖区He^{2+}电荷碰撞交换产生的30.4 nm辐射、O^{7+}和C^{6+}等太阳风重离子电荷碰撞交换产生的软X射线辐射[13]; 等离子体层He^+共振散射太阳的30.4 nm辐射[15]; 磁层和电离层O^+共振散射太阳的83.4 nm辐射[16]; 热层N_2的LBH波段(140~180 nm)气辉[16]; X射线、121.6、135.6 nm和LBH波段极光[16]等. 在行星空间的中性成分和离子也存在可用的光学辐射, 如水星Na原子尾(sodium tail)589.3 nm辐射(D_1+D_2)[17]; 金星大气极紫外气辉[18]; 火星中性H原子的121.6 nm辐射[19]、电离层O^+的135.6 nm辐射、CO_2^+的紫外辐射[20]等; 木星等离子体环中S^{2+} 673.1 nm辐射[21]、木星钠原子尘埃589.3 nm辐射(D_1+D_2)[22]、木星极光的X射线-极紫外-远紫外辐射[23,24]等.

不同行星磁层范围具有巨大差异, 如表1所示[25], 采用不同波段进行不同方式的光学成像可用于解决不同的科学问题. 在30.4 nm或X射线波段对地球磁鞘进行全景成像(简称磁鞘全景成像), 可以可视化弓激波和磁层顶的三维形态结构, 揭示太阳风与地球磁层相互作用过程中太阳风物质和能量进入地球磁层空间的动态过程, 为近地空间天气效应研究提供准确的输入. 在

表 1 行星磁层参数[25]

Table 1 Parameters of planetary magnetosphere[25]

参数	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
日心距离(AU)[a)]	0.31~0.47	0.723	1	1.524	5.2	9.5	19	30
半径, R_P(km)	2439	6051	6373	3390	71398	60330	25559	24764
表面气压(atm)[b)]	$<10^{-14}$	90	1	0.006	>>1000	>>1000	>>1000	>>1000
磁矩(M_{Earth})[c)]	4×10^{-4}	—	1	—	20000	600	50	25
表面磁场, B_0(nT)	3×10^2	<2	3.1×10^4	<10	4.28×10^5	0.22×10^5	0.23×10^5	0.14×10^5
太阳风密度, ρ(cm^{-3})	35~80	16	8	3.5	0.3	0.1	0.02	0.008
磁层顶鼻点距离(R_{MP})[d)]	1.4~1.6	—	10	—	42	19	25	24
等离子体密度(cm^{-3})	~1	—	1~4000	—	>3000	~100	3	2
主要成分	H^+	—	O^+/H^+	—	O^{n+}/S^{n+}	$O^+/H_2O^+/H^+$	H^+	N^+/H^+
主要来源	太阳风	—	电离层[e)]	—	木卫一Io	环/卫星[f)]	大气	卫星[g)]
时间尺度	min	—	d/h[e)]	—	10~100 d	30 d~a	1~30 d	d
等离子体运动	太阳风驱动	—[h)]	转动/对流[e)]	—	转动	转动	对流/转动	转动/对流

a) 1 AU=1.5×10^8 km; b) 参考美国宇航局行星情况说明书: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planetfact.html; c) 以地球磁矩归一化, $M_{Earth}=7.906\times10^{15}$ T m^3; d) 磁层顶鼻点距离$R_{MP}=(B_0^2/2\mu_0\rho u^2)^{1/6}/R_P$, 采用表中典型太阳风密度和太阳风速度$u$ ~ 400 km s^{-1}计算, 对于外行星, 该计算值偏低; e) 等离子体层顶[15]内主要来自电离层, 主要受地球共转电场控制, 时间尺度为天量级, 等离子体顶外主要来自太阳风, 主要受太阳风对流电场控制, 时间尺度为小时量级; f) 土卫二: Enceladus, 土卫三: Tethys, 土卫四: Dione; g) 海卫一: Triton; h) "—"代表该行星不存在此项或无相关测量结果

30.4 nm波段对地球等离子体层进行全景成像(简称等离子体层全景成像), 可以观测地球磁层大尺度对流特征, 揭示地球物质分布的动态变化规律. 地球两极的圆环状极光区是太阳风高能粒子沿磁力线进入地球空间的投影, 在X射线-极紫外-远紫外波段对极光全景成像(简称极光成像), 通过将极光活动与空间物质能量输运建立对应关系, 就可以通过极光现象直接可视化磁层物质能量输运过程, 这将突破卫星就位观测的局限性. 将磁鞘全景成像、等离子体层全景成像、极光全景成像结合起来, 就可以得到地球磁层空间物质与能量传输的全景图像.

其他行星的空间环境的全球图景同样依赖于光学遥感. 例如, 水星钠原子尾在太阳风作用下拉伸至约1400个水星半径, 只有大视场成像仪才能捕捉其全貌, 并研究太阳风溅射过程(简称水星钠尾全景成像). 木卫一Io火山活动释放的物质在木星磁层中形成等离子体环, 环半径约7个木星半径, 控制了木星磁层动力学过程. 只有光学成像才能获取等离子体环的全局演化图像(简称Io等离子体环全景成像), 同时配合X射线和远紫外波段木星极光成像(简称木星极光成像), 可以研究Io活动如何影响磁层等离子体源的产生, 此后如何在木星磁层内演化.

总之, 光学遥感对于研究行星空间环境的全局演化具有不可替代的作用. 世界各国都在大力发展光学遥感技术, 建立了地基、空基和天基的空间环境光学遥感平台.

2 发展历史与现状

行星距离我们非常遥远, 行星科学的出现和蓬勃发展离不开光学遥感技术的发展, 特别是地基和天基光学遥感器的发展. 按不同的标准, 遥感器有不同的分类. 根据遥感器光学原理, 可分为折射式、反射式和折反式. 根据成像类型, 可分为单波段/多波段成像仪、光谱仪、光谱成像仪. 根据遥感器工作波段的不同, 又可细分为γ射线(工作波长λ<0.01 nm)、X射线(0.01 nm<λ<10 nm)、紫外(10 nm<λ<400 nm)、光学(400 nm<λ<750 nm)、红外(750 nm<λ<1 mm)、微波(1 mm<λ<1 m)和射电(1 m<λ<1 km). 对于紫外以下的工作波段, 由于有大气吸收的影响, 只能部署于空基或天基平台. 如前文所述, 行星空间环境中的辐射主要在X射线和红外之间, 因此, 本文将不涉及γ射线、微波和射电, 只关注与行星空间环境相关的光学遥感, 即行星空间的大气和等离子体.

1609年, 伽利略(G. Galilei)制成人类历史上第一台

天文望远镜, 观测了月亮、恒星、银河, 发现了木星的卫星、太阳黑子、金星相位变化等, 开启了人类天文和行星科学新时代. 1668年, 牛顿(I. Newton) 发明第一台反射式望远镜, 为研制更大口径的望远镜奠定了基础. 1789年, 英国科学家威廉·赫瑟尔(F. W. Herschel)研制成功首台口径超过1 m的大型反射望远镜, 并用它发现了天王星及其两颗卫星. 随着科学家对更远更弱目标观测需求的日益增长, 望远镜的口径和光学性能成为限制发展的主要因素. 直到19世纪中叶, 高面型精度大口径反射镜加工技术的突破、光学系统像差校正技术的成熟、主动光学和自适应光学的应用, 使得地基大口径望远镜呈现出井喷式发展, 并产生了大量观测成果. 地基行星空间环境光学遥感由于受地球大气层吸收影响, 主要局限于近紫外、可见光和红外波段, 而且由于空间辐射很微弱, 一般需要大口径的望远镜才能实现. 在大口径望远镜和自适应光学出现之前, 主要是进行光谱测量, 之后才出现了成像观测, 而人造卫星上天以后, 突破了波段限制, 大大促进了光学遥感对行星科学发展的贡献. 下面针对不同行星分别论述其光学遥感发展情况.

2.1 水星空间环境

水星距离太阳只有0.31~0.47 AU, 受太阳强辐射影响, 地基观测比较困难, 卫星也很难抵近观测, 但国际上也开展了一系列观测, 并发现水星大气含有6种主要气态成分, 即H、He、O、Na、K、Ca. 在“水手10号”飞越水星前, 科学家就推测水星存在极其稀薄的大气, 并且通过地基红外光谱仪证实存在微量CO_2和CO等成分[26]. “水手10号”3次飞越水星, 其携带的紫外光谱仪虽然没有观测到CO_2和CO等成分, 但观测到了水星大气中H、He和O的存在[27]. Potter和Morgan[28,29]使用得克萨斯大学麦克唐纳天文台2.7 m望远镜, 配合高精度的阶梯光栅光谱仪, 相继发现了水星大气中的Na和K. 之后, Bida等人[30]使用位于夏威夷的口径更大的10.5 m Keck I望远镜观测到了水星大气中的Ca. 通过这些光谱观测, 借助谱线的精细结构, 还推测出Na原子温度比水星表面温度高700 K以上[31]. 大量的地基光谱遥感观测发现这些H和He的主要来源是太阳风, 而Na、K和Ca的主要来源可能是水星表面金属矿物在高温下蒸发、太阳风粒子溅射或光溅射[32]. 这些不同的机制会产生不同的Na蒸汽分布, 而观测和模拟表明极区增强和晨昏不对称性无法用以上机制解释[33]. 二维成像的出现, 才发现水星磁层对于Na蒸汽的非对称分布具有重要影响[34], 而且还发现Na原子尾在太阳风和光辐射压力的作用下, 延伸至背阳面约1400个水星半径处[17].

地基观测虽然做出了重大发现, 但对于水星大气和空间环境的认识还远远不足. 为了解决太阳系最内侧这颗行星中的6个基础问题: (1) 什么样的行星形成过程导致水星如此高的金属和硅酸盐比值? (2) 水星有什么样的地质历史? (3) 水星磁场的起源? (4) 水星内核的结构和状态? (5) 水星两极雷达反射物是什么? (6) 水星附近的重要挥发分及其源和汇? 2004年8月3日, NASA发射了“信使号”水星探测器(MESSENGER)[35], 经过3次飞越后, 成为第一个环绕水星的人造卫星. 除了传统的粒子和场探测器之外, “信使号”搭载的主要光学遥感仪器包括: 水星大气与表面成分光谱仪(MASCS)、水星双通道成像系统(MDIS)、X射线光谱仪(XRS)和水星激光高度计(MLA). 与水星空间环境相关光学仪器是MASCS, 其亮点是首次发现水星大气中存在Mg[36], 并且通过多年观测, 发现了水星外层大气的季节变化特性[37], 并成为“信使号”的十大科学发现之一(http://messenger.jhuapl.edu/).

由于水星外层动力学异常复杂, 涉及多种因素的相互作用, 如太阳风、太阳辐射、大气、磁层、行星磁场和行星表面等. 紧跟“信使号”的步伐, ESA和日本宇宙航空开发机构JAXA共同推出了水星综合探测任务——“贝皮科伦布”水星探测器(BepiColombo)[38], 载荷配置比“信使号”更加全面. 这是一项多学科交叉探测任务, 由两艘飞船构成, 一艘为水星行星轨道器(MPO), 另一艘为水星磁层轨道器(MMO), 分别由ESA和JAXA负责研发. BepiColombo上搭载的用于空间探测的光学遥感器包括水星大气钠光谱成像仪(MSASI)和外层探测紫外光谱仪(PHEBUS), 这些光学仪器将在其他就位探测载荷的配合下, 对水星空间环境开展更深入的研究. BepiColombo于2018年10月20日发射深空, 并将于2025年12月正式进入水星轨道, 开展科学任务.

2.2 金星空间环境

金星是第一个被证明有可探测大气的除太阳外的地外天体, 由俄罗斯博学家米哈伊尔·罗蒙洛索夫(Mikhail Lomonosov)在1761年6月6日金星凌日期间, 在圣彼得堡用一台1.4 m长的望远镜观测到环绕金星的亮

环, 并推测是由金星大气折射产生. 与水星的极稀薄大气形成鲜明的对比, 金星则具有稠密的大气, 表面大气压约为90 atm (地球为1 atm), 表面温度高达470°C, 导致在可见光波段金星表面完全不可见, 大气成分也一直是个谜.

在可见光波段, 金星大气看上去一片明亮, 并无明显结构特征, 直到1911年出现近紫外观测后, 金星大气的神秘面纱才被逐渐揭开. 1927年, Frank E. Ross在威尔逊山天文台利用一架60英寸(约1.5 m)望远镜首次拍摄了金星大气在紫外波段的图像, 并推测金星外层大气存在薄层卷云, 而内层大气极厚且为淡黄色. 这段时间内也出现了一些低光谱分辨率观测, 试图解析金星大气成分, 但都没有明确定论. 直到1932年, 高分辨率红外光谱仪问世后, 才发现金星大气含有大量CO_2[39]. 后来利用气球平台[40]和飞机平台[41]避开地球大气中水气影响而开展的高分辨率光谱观测均发现金星大气中水的存在. 借助更高精度的迈克尔逊干涉仪, Connes等人[42]发现了金星大气中HCl和HF等存在, 使得金星大气成分表现得更复杂. 在同一时期, 二维成像也做出了重大发现, 比如地基紫外波段成像首次揭示了金星云层最著名的运动和形态学特征——“水平Y形结构”[43]. 通过长期的地基光学遥感探测和苏联卫星就位测量(如“金星号”和“维伽号”), 获得了目前广泛认可的金星大气成分和分层结构, 目前已发现的金星大气从远紫外到微波的可探测谱段及其对应成分、区域可参考Peralta等人[44]的综述文章.

从20世纪60年代后期开始, 在美苏太空竞赛的背景下, 大量的卫星开始飞越或环绕观测金星空间环境, 甚至着陆金星. 这些卫星搭载的光学遥感设备配合就位探测设备, 逐渐解开了金星大气和空间环境的秘密. “水手”系列任务多次飞越金星, 例如“水手5号”在飞越金星过程中, 利用其携带的光栅光谱仪测得的光谱揭示了金星大气中H、He、C和O原子的存在[45]; 而“水手10号”则拍摄了高分辨率的金星大气可见和近紫外图像, 确认了金星大气环流4 d的周期, 而且发现纬度越高环流速度越快[46]. 苏联的“金星号”系列飞船环绕和着陆探测, “维伽号”哈雷彗星探测器在金星大气层释放的气球, 在揭示金星大气成分、大气分层结构、温度结构、地表特征等方面作出了巨大贡献[47~49], 特别是“金星13号”软着陆后利用全景相机首次获得了金星地表的彩色图像. “先驱者”金星探测器和“金星快车”的长期环绕探测, 大大提升了对金星空间环境的认识. 通过紫外和红外波段的光谱、成像观测, 并辅助就位探测, 揭示了金星如何演化到如今与地球完全不同的环境, 包括: (1) CO_2引起的失控温室效应[50]; (2) 金星大气的D/H比是地球的100倍, 表明金星历史上曾经富含水[51]; (3) 太阳风离子和辐射剥蚀金星大气、表面大气相互作用和不同的行星旋转速度导致的金星大气环流的流型[52]; (4) 金星水滴形电离层分布[53], 如图2所示.

为了进一步探究金星大气环流和云层演化信息, 日本于2010年发射了一颗纯光学遥感卫星——“拂晓号”金星气候轨道器(Akatsuki)[54]. 搭载了5种光学遥感器, 原计划与“欧洲金星快车”形成赤道和极轨的协同配合, 但由于轨道控制原因, 2015年才正式入轨. 近几年的观测也取得了一些新发现, 例如中低云层的赤道喷流为解释金星大气的超级旋转提供线索[55]、行星尺度弓形静态重力波[56]和地形波[57]提供理解行星表面与大气相互作用的线索. 金星大气和空间环境演化还有很多秘密等待揭开, 比如金星硫酸云之上可能宜居区域是否存在生命, 其演化历史对地球宜居环境演化的

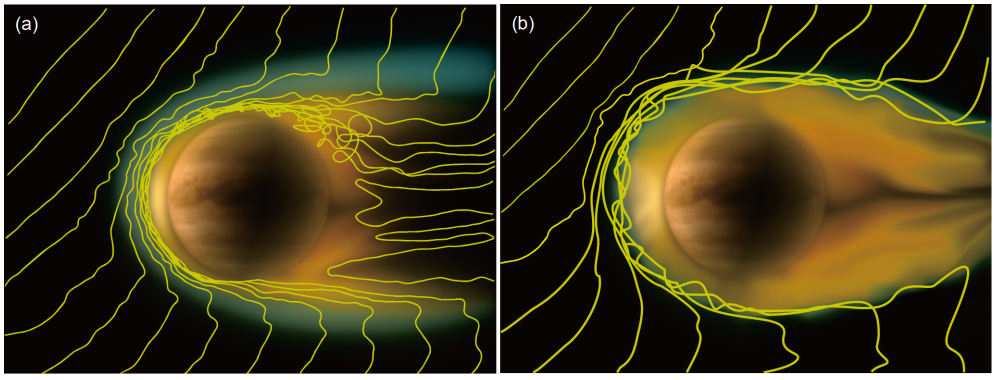


图 2 不同太阳风条件下金星电离层形态. (a) 正常电离层; (b) 水滴形电离层. 图片来源: 魏勇博士

Figure 2 Shapes of ionosphere at Venus under different solar wind conditions. (a) Normal ionosphere; (b) tear-dropped ionosphere. Source: Dr. Yong Wei

启示意义也将随着研究的不断深入而逐渐明晰.

2.3 地球空间环境

在20世纪50年代之前, 几乎没有人认为地球的电离层之外还存在等离子体物质, 地球的高层大气与星际介质直接作用. 地基的哨声观测发现距地球12000 km高度的电子浓度高达400 cm^{-3}, Storey[58]推测这是由电离层向上扩散产生的. 随着空间时代的到来, 苏联和美国的一系列探测器逐渐发现了地球大气之外存在丰富的等离子体区域, 如等离子体层、辐射带、环电流、磁层顶、攻击波、磁尾等, 并逐渐形成了磁层的概念[59].

当太阳风裹挟着行星际磁场[9]冲击地球偶极磁场时, 其速度减慢, 并改变流向, 压缩并绕过地球磁场, 形成磁层腔. 超声速太阳风在磁层前方减速后形成弓激波, 大部分动能转化为热能, 使弓激波后面磁鞘中的亚音速等离子体流加热, 而磁鞘与磁层之间的边界就是磁层顶[8]. 太阳风动压使日侧地磁场被压缩, 而夜侧被向下游拉伸形成磁尾. 关于空间物理和日地空间环境, 可以在很多文献中查到, 如《空间物理导论》[59]和《日地空间环境指南》[60].

对于地球空间环境全局的物质和能量传输这一核心科学问题来说, 光学遥感是最理想的手段. 如前文所述, 通过磁鞘全景成像、等离子体层全景成像、极光全景成像等有机结合, 为科学家提供更广阔的研究视野. 从20世纪70年代开始, 各种光谱仪和成像仪对地球的热层、电离层、极光、等离子体层等开展了详细的光学遥感研究, 下面列举一些比较典型的光学探测.

(1) 地基方面. 主要是覆盖北美的THEMIS地基观测台, 通过一个沿极光卵排列的全天空相机阵列, 在可见光波段监测北极光活动. 中国的北极黄河站、南极中山站也都安装了全天空相机用于监测极光. 中低纬度地区还分布着广泛的全天空相机(如中国华北地区的气辉监测网)、F-P干涉仪、激光雷达等, 用于研究中高层大气动力学.

(2) 天基方面. 60年来, 人类发射了上千颗人造地球卫星上天, 研究地球这颗行星. 这里仅仅列举一些典型的天基光学探测. 1972年, Apollo 16号首次从月球上拍摄了远紫外波段的极光、赤道气辉带和全球气辉分布[61]. 2000年, 美国磁层顶-极光全球成像探测卫星(Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration, IMAGE)搭载的极紫外成像仪首次实现了对地球等离子体层的全景成像, 首次从全局角度证明了磁层大尺度对流理论[62], 搭载的远紫外成像系统通过日侧极光发现连续磁层顶磁重联[63]. 与Polar卫星可见光成像系统联合发现南北半球极光非对称现象[64], 发现了赤道气辉带的经度四波结构并揭示了大气潮汐的控制作用[65,66]. 2013年, 中国"嫦娥二号"着陆器搭载了一台极紫外相机[67], 在月球表面首次从侧面获取了地球等离子体层极紫外图像, 如图3所示. 2017年, 中国"风云三号"极轨气象卫星搭载了目前低轨卫星上分辨率最高、视场范围最大的远紫外极光成像仪[68], 获得了高分辨率的极光图像, 如图4所示, 将有助于磁层-电离层耦合动力学研究.

正在研发的中欧合作卫星——太阳风-磁层相互作用全景成像(SMILE)卫星将在极轨大椭圆轨道上运行, 其搭载的磁鞘X射线成像仪和远紫外极光成像仪将在太阳风-磁层耦合作用研究中作出更大的贡献.

2.4 火星空间环境

火星位于地球外侧, 是离太阳最远的一颗类地行星, 其在视觉上莹莹如火, 中国古代称之为"荧惑". 天文学家早在18世纪就通过观测火星上的云推测火星大

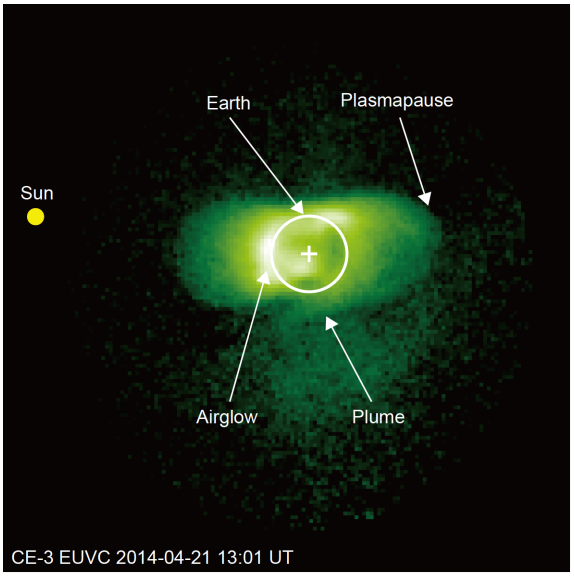


图 3 "嫦娥三号"极紫外相机观测的地球等离子体层侧面图像. 白色圆圈代表地球, 太阳方位由黄色圆形标出. 图像中的典型结构由箭头标示

Figure 3 Side view of the Earth's plasmasphere imaged by the Extreme Ultraviolet Camera onboard the Chang'E-3 lunar lander. The Earth's size is marked by the white circle and the Sun is denoted by the filled yellow circle. Typical structures in the image are marked by white arrows

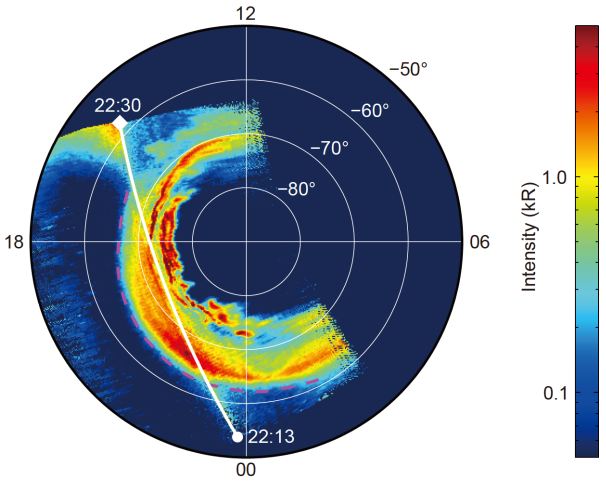


图 4 “风云三号”广角极光成像仪拍摄的远紫外极光图像. 坐标系为磁纬度和磁地方时

Figure 4 Far ultraviolet auroral image observed by the wide-field auroral imager onboard the Fengyun-3D satellite. The coordinate system is magnetic latitude and magnetic local time

气的存在. 借助利克天文台(位于美国加利福尼亚州汉密尔顿山)的摄影测量, 1926年首次发现了火星存在大气的定量证据. 直到1947年, Kuiper[69]利用地基近红外光谱观测, 才首次发现了火星大气中存在CO_2, “水手6号”则进一步证实火星大气主要由CO_2组成[70,71], 并最终由“海盗号”准确测定了火星大气成分[72]. 这一时期, “水手6号”还首次证实了火星存在电离层[70]. 地基观测的另一大重要贡献就是利用近红外光谱观测发现了火星大气中的水[73]和甲烷(CH_4)[74], 欧洲“火星快车”上的傅立叶光谱仪也几乎同时探测到了火星大气中的甲烷(CH_4)[75]. 这些重大发现, 包括火星接近24 h的自传周期, 使得早期科学家们认为火星环境与地球相似, 甚至认为火星上存在生命, 这也使火星成为人类探索次数最多的类地行星. 有关火星的空间探测历史, 可参阅欧阳自远和邹永廖[76]主编的《火星科学概论》.

火星没有全球性内禀磁场, 只有地壳磁场[8], 因此火星空间环境与太阳风相互作用类似金星, 但大气尺寸、环境和磁场环境的差异也使得火星空间环境存在明显的独特性. 火星空间环境的主要科学问题包括: (1) 太阳风与火星空间的相互作用区如何形成和维持? (2) 太阳风与火星空间相互作用如何影响火星高层大气结构和逃逸? (3) 火星地壳磁场如何从局部或全球影响太阳风与火星空间相互作用? (4) 火星空间环境与太阳系其他行星空间环境比较研究. 光学遥感技术对解决这些问题发挥了重要作用, 2000年以来, 比较典型的探测任务有“火星快车”(MEX)和“火星大气与挥发分演化探测器”(MAVEN).

MEX上搭载的空间环境光学遥感仪器包括紫外与红外大气光谱仪(SPICAM)和行星傅立叶光谱仪(PFS). SPICAM聚焦火星大气光化学, 0~150 km大气密度和温度结构, 高层大气和电离层与太阳风相互作用及其逃逸过程. PFS则聚焦火星低层大气全球三维温度场长期监测, 火星大气微量成分(H_2O和CO)与D/H比测量, 确定火星气溶胶、尘云、冰云和霾的尺寸分布、化学成分和光学特性, 以及研究火星大气环流和动力学. MEVEN上搭载的主要空间环境光学遥感器是紫外成像光谱仪(IUVS)和太阳极紫外监测仪(EUV). 这些遥感仪器在就位探测设备协同观测下, 在火星空间环境变化方面获得一系列重要发现.

(1) 火星极光的发现[77]. 在此之前, 除地球极光之外, 科学家在太阳系具有内禀磁场的行星(木星[78]、土星[79]、天王星[80]和海王星[81])和没有内禀磁场的金星[82]都发现了不同形态极光的存在. 地球和巨行星极光均产生于磁极周围的磁场足点处, 主要由带电粒子沿磁力线沉降到行星高层大气激发. 金星夜侧弥散极光表现为不同尺寸的亮块, 主要由太阳耀斑或行星际激波产生的超热电子与金星高层大气相互作用产生. 火星弥散极光主要产生于具有地壳磁场的地区, 太阳高能粒子沿磁力线穿透到火星大气激发[77], 而最近发现的火星日侧质子极光则由太阳高能质子与火星氢冕中的中性氢原子电荷交换碰撞产生的高能中性原子辐射[83]. 这些发现丰富了我们对太阳风粒子与行星大气相互作用过程的认识.

(2) 太阳风与火星空间相互作用过程. 火星低层和高层大气之间的耦合, 高层大气向星际空间的损失, 导致了今天火星稀薄、寒冷、干燥的大气. 在这一漫长的历史演化过程中, 太阳风与火星空间相互作用扮演了关键角色. 太阳风粒子与火星大气相互作用形成了具有不同能量、密度和成分的等离子体区域和边界[84], 这些等离子体区域在太阳风的持续作用下, 发生粒子逃逸. 相比地球偶极磁场对大气的保护[85], 对于火星而言, 在太阳风扰动和火星地壳场的共同作用下, 太阳风粒子会深度穿透火星大气, 使火星高层大气直接暴露在太阳风中, 并发生逃逸, 逃逸速率随着太阳风活动强度增强而增大[86].

(3) 火星空间环境的季节变化. 大量观测和模拟研究表明, 火星空间环境与太阳风动压和太阳极紫外辐

射通量密切相关. MEX和MAVEN的长期观测进一步表明了火星空间环境存在明显的季节变化. 在太阳风-火星空间环境相互作用中起重要作用的氢冕存在显著的季节变化[87], 这种季节变化可能来自太阳风输入的变化, 也可能与火星低层大气的季节效应相关. 火星弓激波也存在显著的年际变化, 这种年际变化对太阳极紫外辐射更敏感[88].

尽管目前对火星大气和空间环境已有了相当的了解, 很多难题仍有待新的探测任务去解答, 例如火星大气的演化和太阳风与火星大气的耦合机制等. 这些问题的回答需要首先从全球角度描绘火星空间环境, 光学遥感将发挥不可替代的作用.

2.5 其他行星空间环境

在火星轨道之外, 依次分布着两颗气态巨行星(木星、土星)和两颗冰态巨行星(天王星、海王星). 这4颗行星都有类似地球的偶极磁场, 但它们独特的卫星系统和行星环, 使得巨行星空间环境表现出与地球磁层巨大的差异.

土星和木星磁层与其他行星磁层(譬如水星和地球)最大的区别在于其内部等离子体源的主导贡献. 木卫一(Io)的火山活动和土卫二(Enceladus)水喷雾给木星和土星磁层提供了主要的物质来源. 在木卫一和土卫二的卫星轨道附近也因此形成高密度的等离子体环.

1973年,“先驱者10号”传回来的木星近距离观测照片所揭示的细节是从地球轨道无法获得的.“先驱者11号”飞船所携带的照相偏振测量仪则对土星成像直接发现了土星的F环[89]. 1979年拍摄的木卫一的火山喷发照片也成为“旅行者1号”飞船诸多里程碑式发现的一个亮点成果. “旅行者2号”的光学仪器更是为人类的太空探索立下了汗马功劳, 被认为是行星探测成果最丰富的卫星计划. 其中亮点的光学成果包括了: (1) 揭示了木星大红斑风暴的转动结构; (2) 给出了木卫二的纵横交错纹理结构; (3) 给出木卫四表面残留的古老陨石坑. 此外,“旅行者2号”还对天王星和海王星系统做了丰富的观测, 为之后人类探索天王星、海王星提供了宝贵的基础资料. 2006年,“卡西尼”飞船的紫外光谱成像仪直接观测到了土卫二的液态水喷雾过程, 改写了人类对巨行星卫星系统生物宜居环境的认知[90]. “卡西尼”飞船2006~2017年的极光观测让我们对土星极光演化有了系统的认知, 尤其是2016~2017年在“卡西尼”坠毁前的最后篇章中, 临近行星表面的观测揭示出诸多的极光精细结构, 对于我们理解土星极光的驱动过程有着重要的指导意义[91]. 2017年开始, “朱诺”卫星首次观测木星夜侧的极光活动, 正在逐步改写学界对木星极光辐射过程相对稳定的传统观点. “朱诺”卫星的紫外极光仪器观测揭示出木星极光在夜侧的动态爆发增强要远远超过日侧, 并且与地球和土星的极光存在诸多的类似特征. “朱诺”卫星红外相机揭示出, 木星复杂的红外极光特征以及木卫一在木星上的足迹存在交换不稳定性的精细结构特征[92].

此外, 木星作为太阳系内少有的具有软X射线极光爆发的行星, 揭示出木星系统超高能量重离子相关的独特物理过程. 钱德拉X射线望远镜和牛顿-XMM望远镜对木星X射线极光的观测资料显示出其X射线的数十分钟周期性变化, 以及神秘的南北半球完全不同的周期变化[23,93]. 值得一提的是, 目前的X射线对木星的遥感观测都是从地球轨道来实施的, 因此单位时间内光通量相对很低, 所获得的观测需要积分较长时间, 因而无法得到理想的时间和空间变化规律, 对于我们理解木星X射线对应的高能物理有极大的限制. 木星轨道的X射线仪器将是这个领域获得进一步提升的关键手段, 也是国际学界在过去一段时间内力推的木星项目之一.

3 我国的行星科学发展规划

从国际行星科学发展的400多年历程来看, 无论是地基探测还是天基探测都取得了巨大的成就. 地基望远镜从最初的几厘米口径发展到几十米口径, 分辨率和灵敏度都有数量级的提升. 各种先进的卫星搭载的先进遥感和就位探测仪器, 使得我们对行星环境的认识达到前所未有的高度. 但也不难看出, 在这一发展进程中, 特别是空间时代以来的60余年, 鲜有中国的身影和声音. 从2007年“嫦娥一号”成功发射以来的多次探月工程任务, 特别是“嫦娥四号”任务于2019年1月3日实现国际首次在月球背面着陆, 使我国深空探测的水平上了一个台阶, 大大提升了我国深空探测的影响力. 在我国首次月球探测工程总结表彰大会上, 胡锦涛同志曾指出“中国首次月球探测工程的成功, 开启了中国人走向深空探索宇宙奥秘的时代, 标志着我国已经进入世界具有深空探测能力的国家行列”. “十三五”规划纲要已明确将深空探测作为国家战略之一. 习近平总书记在会见“嫦娥四号”参研参试人员时指出, “探索浩瀚宇宙是全人类的共同梦想, 太空探索永无止境. 希望

广大科技工作者、航天工作者要为实现探月工程总目标乘胜前进, 为推动世界航天事业发展继续努力, 为人类和平利用太空、推动构建人类命运共同体贡献更多的中国智慧、中国方案和中国力量!”

在《2016中国的航天》白皮书中明确提出, 我国的深空探测在空间环境方面面临两大任务. 一是在深空轨道上对地球空间环境、地月系统进行深入的探测; 二是以火星、木星环境探测为主的类地行星探测, 帮助人类研究太阳系及宇宙的起源、结构、演化和现状, 进一步认识地球宜居环境的形成和演化, 认识空间现象和地球自然系统之间的关系. 在国家航天局新发布的未来10年深空探测任务中, 包括了月球科研站建设(嫦娥5~8号, 2019~2027年)、首次火星探测(2020年)、火星采样返回(2028年)、木星探测(2029年)和载人登月(2030年). 面对如此密集的深空探测任务, 科学的规划和准备对于任务的成功实施和科学成果产出来说非常重要, 而行星科学研究团队的建设尤为重要.

2019年1月6日, 经过中国科学院地质与地球物理研究所(以下简称“中科院地质地球所”), 中国科学院地球与行星物理重点实验室牵头论证, 中国科学院大学学位委员会审议通过了自主设立行星科学一级学科方案, 并上报国务院学位委员会, 标志着我国的行星科学发展迎来崭新的历史机遇期. 2019年7月2日, 由中国科学院大学地球与行星科学学院发起, 全国27所高校相关学院在北京成立了中国高校行星科学联盟. 联盟宗旨为围绕深空探测国家战略重大需求, 建立健全我国行星科学学科布局, 完善我国行星科学人才培养与科学研究体系, 促进行星科学与探测技术协同发展, 加快我国成为行星科学与深空探测并重的世界科技强国, 为实现中华民族伟大复兴而奋斗. 以此为契机, 依托我国密集的深空探测任务, 开展地基、空基和天基行星空间环境光学遥感探测, 将大大促进我国行星科学的科教融合发展[94~97].

为了支撑我国的木星探测计划, 中科院地质地球所将率先建立一个地基行星光学遥感平台——行星地质活动观测平台. 目前世界上所有的光学望远镜几乎都是有天文学家主导建立的, 还没有一台专用于行星科学研究的地基望远镜. 该望远镜计划2021年左右建成, 将聚焦木卫一Io与木星磁层的相互作用, 研究Io——太阳系地质活动最活跃的天体——火山地质活动如何影响木星磁层中的物质和能量传输. 该望远镜将充分开展国际/国内合作, 如比利时列日大学和国家天文台, 力争在科学目标、望远镜指标、台址选取、观测运行等方面达到最对优化, 保证科学产出, 支撑我国和国际木星探测计划(如NASA的木卫二探测计划“欧罗巴快帆”Europa Clipper和ESA的“木星冰卫星探测者”JUICE).

作为中国自主的行星空间环境光学遥感的先行者, 中国科学院于2018年率先启动了我国首个行星光学遥感任务. 依托特殊的临近空间浮空器平台, 对太阳系木星轨道内(含木星)的行星空间环境开展多波段光学成像, 比较研究行星大气与等离子体耦合多样性特征. 详细情况将在第4节论述.

此外, 在我国未来的深空探测任务中, 将论证部署多种光学遥感器, 包括不同波段的光谱仪和成像仪(X射线、极紫外、远紫外、可见和红外), 对行星大气和等离子体环境、行星表面环境进行全方位成像研究, 为深空探测科学目标实现和行星科学发展做出积极贡献. 目前中科院地质地球所已牵头开展了中国空间站木星远紫外多光谱成像的可行性论证工作, 计划利用我国空间站长期连续稳定运行的优势, 开展木星极光的长期连续观测, 揭示木星空间环境中目前还未清楚理解的高能粒子动力学过程.

4 “鸿鹄专项”球载行星光学遥感

行星空间环境中的关键成分, 比如金星SO和SO_2、火星CO_2等, 其主要的特征辐射均在近紫外波段(200~400 nm). 由于大气的剧烈吸收与抖动, 这些波长在地面均无法开展观测. 而高空气球可以升高到35 km以上, 避开99.9%的大气, 避开臭氧层峰值吸收(机载平台由于高度一般低于20 km, 无法避开臭氧吸收峰), 实现200~400 nm波段的观测. 由于近紫外波段Rayleigh散射不复存在, 大气视宁度大大改善, 可以实现衍射极限成像, 大大提高分辨率. 在地球日侧, 基于高空气球平台避开Rayleigh散射的区域开展观测也意味着可以在任何太阳地方时获取数据, 也可以对内行星(水星和金星)开展观测, 波段也可扩展至近紫外. 此外, 气球平台发放灵活、载荷可安全回收, 大大降低了观测成本, 提高了观测的效费比.

早在20世纪60年代, 以美国为首的西方国家就开展了基于高空气球的行星观测. 比如, 1964年, Bottema等人[40]就利用26.5 km高度的气球观测, 确认了金星大气中气态H_2O的含量. 1985年, 苏联、法国和美国合作, 通过“维伽号”哈雷彗星探测器在金星大气层中释放了

两个科学气球，对金星大气气压、温度、风场等的垂直结构和动力学研究作出了重要贡献[47~49].

为了实现我国行星光学遥感的突破，2018年3月12日，中国科学院启动了一项A类战略性先导科技专项——临近空间科学实验系统(简称“鸿鹄专项”). “鸿鹄专项”的科学目标之一是突破临近空间浮空器平台关键技术, 开展球载行星光学遥感研究. 行星光学遥感研究课题全称为“行星大气等离子体耦合及比较研究”, 由中科院地质地球所牵头，负责科学目标论证、总体方案设计论证和科学成果产出，高飞行高度、长航时、高稳定性浮空器平台由“鸿鹄专项”依托单位中国科学院空天信息研究院研发，并负责飞行实验的组织和实施, 核心载荷行星大气光谱望远镜(planetary atmospheric spectroscopic telescope, PAST)则由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所负责研制.

2018年该课题已完成系统总体设计，通过系统分析太阳系木星轨道以内主要行星的轨道运动特性、大气和等离子体分布特性、光谱辐射特性，并综合考虑飞行可行性, 确定了系统的关键参数, 包括: (1) 飞行高度: 不低于35 km; (2) 望远镜口径: 0.8 m; (3) 望远镜工作波段: 280~680 nm (7个紫外谱段和4个可见谱段); (4) 视场角: 15′; (5) 角分辨率: 0.5″; (6) 平台指向稳定性: 优于0.5″/10 min; (7) 同时配备一台星冕仪, 可避开行星本体强辐射, 观测行星周围微弱的大气和等离子体辐射.

2019年PAST将进入工程实施阶段. 气球飞行平台、望远镜和星冕仪等的研制将全面展开. 按计划于2021年初开展工程验证飞行实验，2021年下半年开始至2022年底，择机在国内西北地区实施多次长航时飞行实验，并计划条件具备时开展北极环极区长航时飞行，观测目标涵盖木星、火星(可与中国第一次火星探测任务协同)、金星和水星，有望在国际上首次基于浮空器平台实现行星空间环境紫外-可见波段的高分辨率成像观测.

“鸿鹄专项”行星空间环境光学遥感的实施，不仅将提高我国行星科学研究的国际知名度，也将探索出一条中国特色的行星科学科教融合发展之路，为行星科学一级学科培养一批行星空间环境探测和研究方面的人才，为我国后续深空探测任务规划和实施奠定重要基础.

5 国际合作前景

行星科学是无国界的, 即使在冷战时期, 东西方的行星科学家也频繁合作, 比如交换月球样品, 协调彼此任务协同观测哈雷彗星等. 现在，几十年过去了，行星科学真正成为一项需要全球贡献的学科. 行星探测飞船将不单单来自NASA和ESA, 中国、印度、日本等国家也在积极规划行星探测任务. 考虑到其他具备空基能力的国家，包括使用卫星数据、建造卫星仪器、运行相关地基设施，或以其他渠道推动行星科学发展的国家, 行星科学已覆盖全世界.

2018年2月，来自全球14个主要空间国家的航天机构组成的国际空间探索协调组(International Space Exploration Coordination Group, ISECG)发布了第三版《全球探索路线图》, 采用了“从近地轨道, 到月球, 再到火星”的循序渐进的深空探测发展思路. 月球探测是目前深空探测的前沿，是主要深空探测国家的首要探测目标，中国、俄罗斯、美国、欧盟、日本等国家或地区均规划了2025年前实施月球探测任务，并将在月面建设大型科研基础设施，以此为基地开展地月空间环境、行星空间环境的观测研究.

“鸿鹄专项”也在积极开展国际合作，特别是与欧盟“地平线2020”计划中的科学基础设施建设项目“欧洲平流层气球观测台”(ESBO)开展国际合作. ESBO也是在2018年启动，计划搭载0.5 m口径的小型望远镜进行技术验证飞行, 主要开展天文和行星观测. 目前中科院地质地球所收到了ESBO项目负责人德国斯图加特大学Philipp Maier教授的邀请, 讨论两个项目在协同观测、科学目标拓展方面的深度合作. “鸿鹄专项”总体在2018年已与瑞典Kiruna气球发放站签署了战略合作协议, 未来将在Kiruna站进行气球的发放、环北极长航时飞行和回收, 大大提高观测效率, 提升科学成果产出. 我们的气球望远镜平台还计划与国际探测计划合作, 通过地球轨道的遥感观测与太空飞船的就位探测相结合(譬如与BepiColombo卫星计划的金星飞越和水星环绕探测相结合), 做出国际高水平的研究成果.

6 展望

早在2400多年前，墨子就阐释了光的直线传播原理, 这是光学成像的重要基础. 我国目前最大的地基望远镜是位于北京兴隆的郭守敬望远镜，口径约为4 m, 而欧洲南方天文台正在规划建设的欧洲极大望远镜(E-ELT)口径已经达到39 m. 美国1990年就向太空发射了口径2.4 m的著名哈勃太空望远镜(HST)，中国空间站多功能光学设施计划2025年左右发射，口径为2 m，届

时美国口径6.5 m的詹姆斯韦伯太空望远镜(JWST)也已在轨运行. 中国科学家在正视差距的同时, 应积极努力为我国行星科学的发展规划和布局, 在我国深空战略的支撑下, 积极谋划构建地基、空基、天基和月基“四位一体”的行星光学遥感探测体系. 在行星光学遥感发展过程中, 应深入贯彻科教融合思想, 努力为我国行星科学一级学科培养探测技术和科学研究人才, 使我国早日成为行星科学强国.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所尧中华博士对本文的宝贵建议. 感谢中国科学院地质与地球物理研究所魏勇博士提供图2. “风云三号”广角极光成像仪图像数据来源于国家卫星气象中心. “嫦娥三号”极紫外相机数据来源于中国科学院国家天文台探月工程地面应用系统.

参考文献

1 Wei Y, Yue X A, Rong Z J, et al. A planetary perspective on Earth’s space environment evolution. Earth Planet Phys, 2017, 1: 63–67
2 Brown M E, Bouchez A H. The response of Jupiter’s magnetosphere to an outburst on Io. Science, 1997, 278: 268–271
3 van Allen J A, Frank L A. Radiation around the Earth to a radial distance of 107400 km. Nature, 1959, 183: 430–434
4 Cahill L J, Amazeen P G. The boundary of the geomagnetic field. J Geophys Res, 1963, 68: 1835–1843
5 Gringauz K I. The structure of the ionized gas envelope of earth from direct measurements in the U.S.S.R. of local charged particle concentrations. Planet Space Sci, 1963, 11: 281–296
6 Neugebauer M, Snyder C W. Solar plasma experiment. Science, 1962, 138: 1095–1097
7 Van Allen J A, Randall B A, Baker D N, et al. Pioneer 11 observations of energetic particles in the Jovian magnetosphere. Science, 1975, 188: 459–462
8 Acuna M H, Connerney J E P, Ness N F, et al. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment. Science, 1999, 284: 790–793
9 Zhang T L, Lu Q M, Baumjohann W, et al. Magnetic reconnection in the near Venusian magnetotail. Science, 2012, 336: 567–570
10 Guo R L, Yao Z H, Wei Y, et al. Rotationally driven magnetic reconnection in Saturn’s dayside. Nat Astron, 2018, 2: 640–645
11 Yang Z J, Wang L, Fang J H. Space Optical Instruments and Their Calibration and Measurement Techniques (in Chinese). Beijing: China Metrology Publishing House, 2009. 13 [杨照金, 王雷, 范纪红. 空间光学仪器设备及其校准检测技术. 北京: 中国计量出版社, 2009. 13]
12 Yu D Y, Tan H Y. Engineering Optics (in Chinese). 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2014. 16 [郁道银, 谈恒英. 光学工程. 第四版. 北京: 机械工业出版社, 2016. 16]
13 He F, Zhang X X, Wang X Y, et al. EUV emissions from solar wind charge exchange in the Earth’s magnetosheath: Three-dimensional global hybrid simulation. J Geophys Res Space Phys, 2015, 120: 138–156
14 Yang X N, Yang Y. Space Environment Engineering for Spacecraft. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018. 2 [杨晓宁, 杨勇. 航天器空间环境工程. 北京: 北京理工大学出版社, 2018. 2]
15 He F, Zhang X X, Chen B, et al. Moon-based EUV imaging of the Earth’s plasmasphere: Model simulations. J Geophys Res Space Phys, 2011, 118: 7085–7103
16 Meier R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere. Space Sci Rev, 1991, 58: 1–185
17 Baumgardner J, Wilson J, Mendillo M. Imaging the sources and full extent of the sodium tail of the planet Mercury. Geophys Res Lett, 2008, 35: L03201
18 Nara Y, Yoshikawa I, Yoshioka K, et al. Extreme ultraviolet spectra of Venusian airglow observed by EXCEED. Icarus, 2018, 307: 207–215
19 Chaffin M S, Chaufray J Y, Deighan J, et al. Three-dimensional structure in the Mars H corona revealed by IUVS on MAVEN. Geophys Res Lett, 2015, 42: 9001–9008
20 Leblanc F, Chaufray J Y, Lilensten J, et al. Martian dayglow as seen by the SPICAM UV spectrograph on Mars Express. J Geophys Res, 2006, 111: E09S11
21 Schneider N M, Trauger J T, Wilson J K, et al. Molecular origin of Io’s fast sodium. Science, 1991, 253: 1394–1397
22 Mendillo M, Flynn B, Baumgardner J. Imaging obsearvations of Jupiter’s sodium magneto-nebula during the Ulysses encounter. Science, 1992, 257: 1510–1512
23 Gladstone G R, Waite Jr J H, Grodent D, et al. A pulsating auroral X-ray hot spot on Jupiter. Nature, 2002, 415: 1000–1003
24 Grodent D, Bonfond B, Yao Z, et al. Jupiter’s aurora observed with HST during Juno orbits 3 to 7. J Geophys Res Space Phys, 2018, 123: 3299–3319
25 Kivelson M G, Bagenal F. Planetary magnetosphere. In: McFadden L A, Weissman P R, Johnson T V, eds. Encyclopedia of the Solar System. 2nd

ed. New York: Academic Press, 2007. 519–540
26 Fink U, Larson H P, Poppen R F. A new upper limit for an atmosphere of CO_2, CO on Mercury. Astrophys J, 1974, 187: 407–415
27 Broadfoot A L, Kumar S, Belton M J S, et al. Mercury's atmosphere from Mariner 10: Preliminary results. Science, 1974, 185: 166–169
28 Potter A, Morgan T. Discovery of sodium in the atmosphere of Mercury. Science, 1985, 229: 651–653
29 Potter A E, Morgan T H. Potassium in the atmosphere of Mercury. Icarus, 1986, 67: 336–340
30 Bida T A, Killen R M, Morgan T H. Discovery of calcium in Mercury's atmosphere. Nature, 2000, 404: 159–161
31 Killen R M, Potter A, Fitzsimmons A, et al. Sodium D2 line profiles: Clues to the temperature structure of Mercury's exosphere. Planet Space Sci, 1999, 47: 1449–1458
32 Goldstein B E, Suess S T, Walker R J. Mercury: Magnetospheric processes and the atmospheric supply and loss rates. J Geophys Res, 1981, 86: 5485–5499
33 Killen R M, Potter A E, Morgan T H. Spatial distribution of sodium vapor in the atmosphere of Mercury. Icarus, 1990, 85: 145–167
34 Potter A E, Morgan T H. Evidence for magnetospheric effects on the sodium atmosphere of Mercury. Science, 1990, 248: 835–838
35 Solomon S C, McNutt Jr R L, Gold R E, et al. MESSENGER mission overview. Space Sci Rev, 2007, 131: 3–39
36 Zurbuchen T H, Raines J M, Gloeckler G, et al. MESSENGER observations of the composition of Mercury's ionized exosphere and plasma environment. Science, 2008, 321: 90–92
37 Merkel A W, Cassidy T A, Vervack Jr R J, et al. Seasonal variations of Mercury's magnesium dayside exosphere from MESSENGER observations. Icarus, 2017, 281: 46–54
38 Benkhoff J, van Casteren J, Hayakawa H, et al. BepiColombo—Comprehensive exploration of Mercury: Mission overview and science goals. Planet Space Sci, 2010, 58: 2–20
39 Adel A, Slipher V M. Concerning the carbon dioxide content of the atmosphere of the planet Venus. Phys Rev, 1934, 46: 240
40 Bottema M, Plummer W, Strong J. Water vapor in the atmosphere of Venus. Astrophys J, 1964, 139: 1021–1022
41 Fink U, Larson H P, Kuiper G P, et al. Water vapor in the atmosphere of Venus. Icarus, 1972, 17: 617–631
42 Connes P, Connes J, Benedict W S, et al. Traces of HCl and HF in the atmosphere of Venus. Astrophys J, 1967, 147: 1230–1237
43 Dollfus A. Venus: Evolution of the upper atmospheric clouds. J Atmos Sci, 1975, 32: 1060–1070
44 Peralta J, Lee Y J, McGouldrick K, et al. Overview of useful spectral regions for Venus: An update to encourage observations complementary to the Akatsuki mission. Icarus, 2017, 288: 235–239
45 Barth C A, Pearce J B, Kelly K K, et al. Ultraviolet emissions observed near Venus from Mariner V. Science, 1967, 158: 1675–1678
46 Murray B C, Belton M J S, Danielson G E, et al. Venus: Atmospheric motion and structure from Mariner 10 pictures. Science, 1974, 183: 1307–1315
47 Reese D E, Swan P R. Venera 4 probes atmosphere of Venus. Science, 1968, 159: 1228–1230
48 Keldysh M V. Venus exploration with the Venera 9 and Venera 10 spacecraft. Icarus, 1977, 30: 605–625
49 Sagdeev R Z, Linkin V M, Kerzhanovich V V, et al. Overview of VEGA Venus balloon *in situ* meteorological measurements. Science, 1986, 231: 1411–1414
50 Rasool S I, De Bergh C. The runaway greenhouse and the accumulation of CO_2 in the Venus atmosphere. Nature, 1970, 226: 1037–1039
51 Bertaux J L, Clarke J T. Deuterium content of the Venus atmosphere. Nature, 1989, 338: 567–568
52 Svedhem H, Titov D V, Taylor F W, et al. Venus as a more Earth-like planet. Nature, 2007, 450: 629–632
53 Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, et al. A teardrop-shaped ionosphere at Venus in tenuous solar wind. Planet Space Sci, 2012, 73: 254–261
54 Nakamura M, Imamura T, Ishii N, et al. Overview of Venus orbiter, Akatsuki. Earth Planet Sp, 2011, 63: 443–457
55 Horinouchi T, Murakami S Y, Satoh T, et al. Equatorial jet in the lower to middle cloud layer of Venus revealed by Akatsuki. Nat Geosci, 2017, 10: 646–651
56 Fukuhara T, Futaguchi M, Hashimoto G L, et al. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus. Nat Geosci, 2017, 10: 85–88
57 Navarro T, Shubert G, Lebonnois S. Atmospheric mountain wave generation on Venus and its influence on the solid planet's rotation rate. Nat Geosci, 2018, 11: 487–491
58 Storey L R O. Protons outside the Earth's atmosphere. Ann Geophys, 1958, 14: 144–153
59 Russell C T. A brief history of solar-terrestrial physics. In: Kivelson M G, Russell C T, eds. Introduction to Space Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 1–26
60 Kamide Y, Chian A C L. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 355–488
61 Carruthers G R, Page T. Apollo 16 far-ultraviolet camera/spectrograph: Earth observations. Science, 1972, 177: 788–791
62 Sandel B R, Goldstein J, Gallagher D L, et al. Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere. Space Sci Rev, 2003, 109: 25–46
63 Frey H U, Phan T D, Fuseller S A, et al. Continuous magnetic reconnection at Earth's magnetopause. Nature, 2003, 426: 533–537

64 Laundi K M, Østgaard N. Asymmetric auroral intensities in the Earth's Northern and Southern hemispheres. Nature, 2009, 460: 491–493
65 Sagawa E, Immel T J, Frey H U, et al. Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV. J Geophys Res, 2005, 110: A11302
66 Immel T J, Sagawa E, England S L, et al. Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides. Geophys Res Lett, 2006, 33: L15108
67 Chen B, Song K F, Li Z H, et al. Development and calibration of the Moon-based EUV camera for Chang'e-3. Res Astron Astrophys, 2014, 14: 1654–1663
68 Zhang X X, Chen B, He F, et al. Wide-field auroral imager onboard the Fengyun satellite. Light Sci Appl, 2019, 8: 47
69 Kuiper G P. The Atmospheres of the Earth and Planets. 2nd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1952. 360
70 Kliore A, Cain D L, Levy G S, et al. Occultation experiment: Results of the first direct measurement of Mars's atmosphere and ionosphere. Science, 1965, 149: 1243–1248
71 Barth C A, Fastie W G, Hord C W, et al. Mariner 6: Ultraviolet spectrum of Mars upper atmosphere. Science, 1969, 165: 1004–1005
72 Nier A O, McElroy M B. Structure of the neutral upper atmosphere of Mars: Results from Viking 1 and Viking 2. Science, 1969, 194: 1298–1300
73 Spinrad H, Münch G, Kaplan L D. The detection of water vapor on Mars. Astrophys J, 1963, 137: 1319–1321
74 Krasnopolsky V A, Maillard J P, Owen T C. Detection of methane in the Martian atmosphere: Evidence of life? Icarus, 2004, 172: 537–547
75 Formisano V, Atreya S, Encrenaz T, et al. Detection of methane in the atmosphere of Mars. Science, 2004, 306: 1758–1761
76 Ouyang Z Y, Zou Y L. Introduction to Mars Science (in Chinese). Shanghai: Shanghai Science Technology and Education Press, 2015. 15–52 [欧阳自远, 邹永廖. 火星科学概论. 上海: 上海科技教育出版社, 2015. 15–52]
77 Schneider N M, Deighan J I, Jain S K, et al. Discovery of diffuse aurora on Mars. Science, 2015, 350: aad0313
78 Broadfoot A L, Belton M J S, Takacs P Z, et al. Extreme ultraviolet observations from Voyager 1 encounter with Jupiter. Science, 1979, 204: 979–982
79 Broadfoot A L, Sandel B R, Shemansky D E, et al. Extreme ultraviolet observations from Voyager 1 encounter with Saturn. Science, 1981, 212: 206–211
80 Bhardwaj A, Gladstone G R. Auroral emissions of the giant planets. Rev Geophys, 2000, 38: 295–353
81 Broadfoot A L, Atreya S K, Bertaux J L, et al. Ultraviolet spectrometer observations of Neptune and Triton. Science, 1989, 246: 1459–1466
82 Philips J L, Stewart A I F, Luhmann J G. The Venus ultraviolet aurora: Observations at 130.4 nm. Geophys Res Lett, 1986, 13: 1047–1050
83 Deighan J I, Jain S K, Chaffin M S, et al. Discovery of a proton aurora at Mars. Nat Astron, 2018, 2: 802–807
84 Nagy A F, Winterhalter D, Sauer K, et al. The plasma environment of Mars. Space Sci Rev, 2004, 111: 33–114
85 Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, et al. Enhanced atmospheric oxygen outflow on Earth and Mars driven by a corotating interaction region. J Geophys Res, 2012, 117: A03208
86 Jakosky B M, Grebowsky J M, Luhmann J G, et al. MAVEN observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection. Science, 2015, 350: aad0210
87 Halekas J S. Seasonal variability of the hydrogen exosphere of Mars. J Geophys Res Planets, 2017, 122: 901–911
88 Hall B E S, Lester M, Sánnchez-Cano B, et al. Annual variations in the Martian bow shock location as observed by the Mars Express mission. J Geophys Res Space Phys, 2016, 121: 11474–11494
89 Gehrels T, Baker L R, Beshore E, et al. Imaging photopolarimeter on pioneer saturn. Science, 1980, 207: 434–439
90 Hansen C J, Esposito L, Stewart A I F, et al. Enceladus' water vapor plume. Science, 2006, 311: 1422–1425
91 Palmaerts B, Radioti A, Grodent D, et al. Auroral storm and polar arcs at Saturn—Final Cassini/UVIS auroral observations. Geophys Res Lett, 2018, 45: 6832–6842
92 Mura A, Adriani A, Connerney J E P, et al. Juno observations of spot structures and a split tail in Io-induced aurorae on Jupiter. Science, 2018, 361: 774–777
93 Dunn W R, Branduardi-Raymont G, Ray L C, et al. The independent pulsations of Jupiter's northern and southern X-ray auroras. Nat Astron, 2017, 1: 758–764
94 Wei Y, Yao Z, Wan W. China's roadmap for planetary exploration. Nat Astron, 2018, 2: 346–348
95 Wan W X, Wei Y, Guo Z T, et al. Toward a power of planetary science from a giant of deep space exploration (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 748–755 [万卫星, 魏勇, 郭正堂, 等. 从深空探测大国迈向行星科学强国. 中国科学院院刊, 2019, 34: 748–755]
96 Wei Y, Zhu R X. Planetary science: Frontier of science and national strategy (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 756–759 [魏勇, 朱日祥. 行星科学: 科学前沿与国家战略. 中国科学院院刊, 2019, 34: 756–759]
97 Rong Z J, Cui J, He F, et al. Status and prospect for Chinese planetary physics (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 760–768 [戎昭金, 崔峻, 何飞, 等. 我国行星物理学的发展现状与展望. 中国科学院院刊, 2019, 34: 760–768]

Summary for “行星空间环境光学遥感”

Remote sensing of planetary space environment

Fei He[1,2,3,4]

[1] *Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
[2] *Innovation Academy of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
[3] *College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
[4] *Beijing National Observatory for Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
E-mail: hefei@mail.iggcas.ac.cn

Planetary space, a critical region of mass and energy exchange between the planet and the interplanetary space, is an integral part of the planetary multi-layer coupling system. Atmospheres of different compositions and plasmas of different densities and energies exist in planetary space, where mass transportation at different temporal and spatial scales and various energy deposition and dissipation processes occur. These processes are driven by the changes in the solar wind and the internal driving forces of the planet. Knowledge pertaining to the global mass and energy transportation in planetary space is essential to investigate the mass escape from the planets. Understanding the forces and physical processes that drive changes in the planetary space environment is not only beneficial to protecting the life, technical systems, and infrastructures on the Earth, but is also helpful in understanding the past and future. In this regards, the systematic and overall view of planetary space environments is necessary for planetary science.

Optical remote sensing implies a measurement made by indirect or “remote” means, which relies upon either emitted, reflected, or scattered optical radiation. There are three main types of optical remote sensing technologies, namely imaging (photography), spectrograph, and spectrographic imaging. Scientific application of optical remote sensing dates back to 1906 when G. Galilei constructed the first astronomical telescope, using which he discovered the four Galilean satellites of Jupiter and the phase variation of Venus. Since then, several discoveries in planetary science have been made by means of optical remote sensing, such as the discovery of new planets and their moons, the discovery of the primary compositions of planetary atmospheres, global convection of cold plasma in Earth’s space, the discovery of planetary aurora (Earth, Mars, Jupiter, Saturn) and volcanic activity on Io, and water eruption on Enceladus. The optical remote sensing method overcomes the difficulties of capturing global views and distinguishing spatial and temporal variations in *in-situ* particle and field detections.

Furthermore, through an overview of the history of planetary optical remote sensing, we propose a development strategy for planetary optical remote sensing, in China, based on the national deep-space exploration plan. A “Quaternity” planetary optical detection system that integrates ground-based, balloon-borne, space-based, and moon-based optical remote sensing is proposed. For example, the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (IGGCAS) is planning to construct a ground-based optical telescope with an aperture of ~1.5 m in Northwest China to monitor the volcanic activity on Io and to conduct other planetary observations.

As the first planetary optical remote sensing project in China, the balloon-borne planetary optical remote sensing for the Scientific Experiment System in Near Space (SENSE) Program is introduced in detail. The SENSE Program is a five-year Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, which began in 2018. A balloon-borne Planetary Atmospheric Spectroscopic Telescope (PAST) with an aperture of 0.8 m will be launched into the stratosphere at the height of 35–40 km to image the planetary atmosphere and plasma in the ultraviolet and visible range. The main scientific target of PAST is to comparatively study the diversity of the planetary space environment and their different drivers. Test and scientific flights are scheduled in 2021 and 2022 in Northwest China and potentially in polar regions. By using the data from PAST and in combination with other data (such as Jupiter’s auroral images from the Hubble Space Telescope, Mars’ space environment data from Mars Atmosphere and Volatile Evolution mission, and Jupiter’s space environment data from Juno mission), the couplings between planetary atmosphere and plasma will be investigated to characterize the diversity of the evolution of the planetary space environment.

planet, space environment, atmosphere, plasma, optical remote sensing, Scientific Experiment System in Near Space (SENSE) Program

doi: 10.1360/TB-2019-0804