月球轨道平台-门户的空间等离子体物理学科学机遇

Iannis Dandouras[1]*Matt G. G. T. Taylor[2], Johan De Keyser[3], Yoshifumi Futaana[4], Ruth A. Bamford[5], Graziella Branduardi-Raymont[6], Jean-Yves Chaufray[7], Dragos Constantinescu[8],Elisabetta De Angelis[9], Pierre Devoto[1], Jonathan Eastwood[10], Marius Echim[3], Philippe Garnier[1], Benjamin Grison[11], David Hercik[12], Helmut Lammer[13], André Laurens[14], François Leblanc[7], Anna Milillo[9], Rumi Nakamura[13], Lubomír Přech[15], Elias Roussos[16], Štěpán Štverák[17, 11], Julien Forest[18], Arnaud Trouche[18], Sébastien L. G. Hess[19], Jean-Charles Mateo- Vélez[19], James Carpenter[2], Josef Winter[2]

[1]天体物理学与行星学研究所，图卢兹大学 / 法国国家科学研究中心 / 图卢兹第三大学 / 法国国家空间研究中心，图卢兹，法国

[2]欧洲空间研究与技术中心 / 欧洲航天局，诺德韦克，荷兰

[3]比利时皇家空间航空学研究所，布鲁塞尔，比利时

[4]瑞典空间物理研究所，基律纳，瑞典

[5]卢瑟福·阿普尔顿实验室 太空 空，英国科学技术设施委员会，卢瑟福·阿普尔顿实验室，奇尔顿，迪德科特，牛津郡，英国

[6]穆拉德空间科学实验室 / 伦敦大学学院，英国霍姆伯里圣玛丽

[7]大气、介质与空间观测实验室（大气、介质与空间观测实验室）/ 皮埃尔-西蒙·拉普拉斯研究所，法国巴黎

[8]布伦瑞克工业大学，德国布伦瑞克

[9]空间天体物理与行星学研究所 / 意大利国家天体物理研究所，意大利罗马

[10]帝国理工学院，英国伦敦

[11]大气物理研究所 / 中国科学院，捷克布拉格

[12]scibit s.r.o.，利贝雷茨，捷克

[13]空间研究所 / 奥地利科学院，格拉茨，奥地利

[14]法国国家空间研究中心，图卢兹，法国

[15]查理大学，布拉格，捷克

[16]马克斯·普朗克太阳系研究所，哥廷根，德国

[17]天文研究所 / 中国科学院，布拉格，捷克

[18]Artenum，拉蒙维尔圣阿涅，法国

[19]ONERA，图卢兹，法国

*** 通信：**通信作者
Iannis.
Dandouras@irap.omp.eu

关键词：月球、门户、深空、空间等离子体、日球物理学、空间天气

摘要

月球轨道平台-门户（LOP-门户，或简称门户）是一个载人平台，将由美国国家航空航天局及包括欧洲航天局在内的国际合作伙伴组织自2020年代中期起在月球附近组装并运行。它将为基础科学和应用科学研究带来新的机遇。月球是研究深空等离子体环境的独特地点。此外，月球表面和表面束缚外逸层与这一环境相互作用，共同构成一个复杂的多尺度相互作用系统。本文探讨了门户上外部安装的有效载荷在空间等离子体物理学、日球物理学和空间天气领域所带来的机遇，同时也考察了空间环境对月球附近载人平台的影响。随后，本文介绍了模型有效载荷的概念设计，该有效载荷用于开展这些空间等离子体测量和观测。研究表明，门户非常适合开展空间等离子体物理研究。它能够助力实现一系列具有跨学科特性的科学目标。

1 引言

月球是研究深空等离子体环境的独特地点。在绕地球运行的大部分轨道周期内，月球都直接暴露于太阳风中。由于缺乏显著的固有磁场和碰撞大气，太阳风和太阳高能粒子（SEPs）几乎不会发生偏转或被吸收，因而直接撞击月球表面，并与月壤和稀薄的月球外逸层相互作用（例如，Geiss 等人，2004年；Futaana 等人，2018年）。银河宇宙射线（GCRs）也会出现同样的现象，其通量和能谱具有行星际空间的典型特征（例如，Sohn 等人，2014年）。在月球下游会形成结构复杂的等离子体本影和半影区，其特征是离子和电子密度逐渐降低（Bosqued 等人，1996年；Nishino 等人，2010年）。月球附近是研究银河宇宙射线、太阳风和太阳高能粒子的理想环境。除月球本身会阻挡银河宇宙射线这一事实外，该环境具有典型的深空特征（Plainaki 等人，2016年）。

然而，月球在每个轨道周期中有 5–6 天会穿越地球磁层的磁尾（**图 1**）。此时，月球暴露于地球磁尾等离子体环境，而非太阳风中，因此我们有机会开展磁尾动力学的原位研究，并探究其对太阳活动和地磁活动的依赖性（例如 Kallio 和 Facskó，2015；Kallio 等，2019）。因此，可以对诸如从近地磁尾释放并向背日方向传播的等离子体团、爆发性整体流（BBFs）、高能粒子暴、等离子体波、磁重联以及等离子体片动力学等现象进行原位研究（例如 Parks 等，2001年；Nakamura，2006；Taylor 等，2006；Nagai 等，2009年；Du 等，2011；Cao 等，2013年；Grigorenko 等，2019年；Sitnov 等，2019年；Kronberg 等，2021）。

因此，月球也非常适合研究地球大气逃逸至太空的过程（Lammer 等人，2008；Harnett 等人，2013；Wei 等人，2020；Dandouras，2021；André 等人，2021；Wang 等人，2021）：重离子从地球电离层上涌，随后被输送至深磁尾并在那里流失。THEMIS-ARTEMIS 和辉夜号（SELENE）航天器提供的大量数据，证实了在月球环境中观测到这类地球起源的离子（Poppe 等，2016；Terada等，2017年）。然而，THEMIS-ARTEMIS 数据未包含等离子体成分这一关键信息（Angelopoulos，2011），而辉夜号的等离子体测量任务仅持续不到两年，且仅测量低能等离子体（Saito 等，2010）。由

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

Geotail 航天器开展的远磁尾研究，为沿磁尾方向流动的离子束动力学提供了关键信息（Christon 等，1994、2020；Seki 等人，1998），但缺少低能量（低于 ~10 千电子伏）离子的成分测量。

当月球再次离开磁尾时，可以通过遥感监测地球磁层动力学，并采用多种磁层成像技术。这些技术包括高能中性原子（ENA）成像，可提供有关高能离子与地球外逸层相互作用的信息（例如 C:son Brandt 等人，2002；Vallat 等人，2004）；用于成像太阳风／磁鞘等离子体与地球外逸层相互作用的太阳风电荷交换X射线成像（Branduardi-Raymont 等人，2012；Sibeck 等人，2018）；等离子体层极紫外成像（Sandel 等人，2003）；以及外逸层莱曼-α 成像（例如 Zoennchen 等人，2017）。

但最重要的是，月球环境为研究月球表面束缚的外逸层（**图 2**）、其产生机制、动力学、与太阳风及地球磁尾等离子体的相互作用，以及其逃逸至太空的过程提供了独特的机会（Potter 等人，2000年；Wurz 等人，2007，2022年；Futaana 等人，2008；Leblanc 和 Chaufray，2011；Lammer 等人，2022年）。LADEE（月球大气与尘埃环境探测器）和 LRO（月球勘测轨道飞行器）的观测让我们得以一窥月球外逸层的复杂性及相关物理机制（Stern 等人，2013年；Elphic 等人，2014；Benna 等人，2015；Hodges，2016年；Hurley 等人，2016年）。

月球表面还为研究月壤中的高能离子注入（Ozima 等人，2005；Ireland 等人，2006）、太阳高能粒子与银河宇宙射线和月壤相互作用产生的反照高能粒子（Schwadron 等人，2016，2018；Zhang 等人，2020）、太阳风离子注入，或其在月壤中的中和与反射（Futaana 等人，2006，2012；Vorburger 等人，2015；Tucker 等人，2019）、含氢分子的形成（McCord 等人，2011；Stern 等人，2013；McLain 等人，2021），其中可能包括水（Schörghofer 等人，2021）、太阳风与地壳磁异常的相互作用（Poppe 等人，2015；Bamford 等人，2016）、月球拾取离子的产生（Poppe 等人，2012a；Wang 等人，2011），以及月球表面静电充电和尘埃悬浮（Stubbs 等人，2007；Hess 等人，2015；Popel 等人，2018）提供了令人振奋的研究机会，以上仅列举数例。

对月球表面源自地球大气层的植入粒子进行分析，也将揭示有关地球早期大气层的一些信息（Marty 等人，2003年；Ozima 等人，2005；Lammer 等人，2018，2022）。据预计，早期地球大气层中的氢、氧和碳（源自水和甲烷分子的解离）以及氮，因年轻太阳的极紫外辐射通量增加而大量逃逸（Lammer 等人，2018；Zahnle 等人，2019；Gebauer 等人，2020；Kislyakova 等人，2020；Johnstone 等人，2021）。正如 Marty 等人（2003年）所提出的，源自早期地球的氮曾植入月球表面。这一推断基于月壤中 N、He、Ne 和 Ar 惰性气体同位素植入量的大幅变化，变化幅度高达 30%（Ozima 等人，2005）。根据 Marty 等人（2003年）和 Ozima 等人（2005）的研究，这些增量无法仅用太阳风注入来解释。

月球也是研究行星表面风化的理想案例，这种风化由高能粒子照射引起，即表面与高能粒子之间的相互作用（例如 Hapke，2001年；Pieters 和 Noble，2016年；Nénon 和 Poppe，2020年）。鉴于银河宇宙射线几乎均匀地照射月球，由此产生的相互作用（包括发射出的反照粒子）若有差异，便表明表面具有不同的物理或化学性质（Schwadron 等人，2016年，2018年）。从

门户的视角来看，表面与银河宇宙射线之间的相互作用主要可通过反照粒子进行探测。

继承阿波罗任务以及近期月球探测任务（THEMIS- ARTEMIS、辉夜号、LADEE、月球勘测轨道飞行器、月船计划、嫦娥等）的传统，一系列月球探测任务正在筹备中或已开始运行，并在其卓越成果的基础上继续发展（Dandouras等，2020a）。

月球轨道平台-门户（LOP-门户，或简称门户）是一个载人平台，将由美国国家航空航天局和包括欧洲航天局在内的国际合作伙伴组织在月球附近组装和运行。首批舱段将于2020年代中期发射（第一阶段），并将在2020年代后期继续发射和组装其他舱段（第二阶段）。门户将为所有月球活动提供支持，包括旨在将人类送回月球的阿耳忒弥斯计划（阿耳忒弥斯三号科学定义小组报告，2020年）。它还将为基础科学和应用科学研究提供新的机遇（Carpenter等，2018；Dandouras等，2020a）。

为筹备科学载荷，欧洲航天局组建了国际科学团队，以制定并支持载荷研究的定义，其中包括空间等离子体物理学领域的专题团队。本文第一部分（第2节和第3节）介绍该专题团队的工作成果。该团队的名称为“月球轨道平台-门户空间等离子体物理科学机遇”。本部分重点介绍专题团队确定的科学目标（第2节），以及实现这些目标所需的相应仪器设备（第3节）。第二部分（第4节）介绍我们为欧洲航天局开展的“门户号上的空间等离子体物理有效载荷包”（SP4GATEWAY）概念设计研究，该研究旨在实现这些目标，并满足相关技术要求。

2 具体目标与宗旨

欧洲航天局于2019年组建了“月球轨道平台—门户空间等离子体物理科学机遇”专题团队，汇集了界定月球轨道上待测空间等离子体参数所需的关键专业力量，并确定了开展这些观测所需的适当仪器设备。团队确定的科学目标包括：

2.1 太阳风与月球高能粒子环境监测

由于月球缺乏显著的固有磁场和碰撞大气，因此会直接暴露于：

– 太阳风：~千电子伏粒子 – 太阳高能粒子（SEPs）：~兆电子伏粒子 – 银河宇宙射线（GCRs）：~吉电子伏粒子

在月球环境中监测太阳风（例如 von Steiger，2008），旨在评估太阳风对地球和月球外逸层动态、地球磁层动态，以及月球表面溅射和充电的驱动作用。

在月球轨道监测并表征太阳高能粒子和银河宇宙射线，旨在评估月球的辐射环境，并研究太阳高能粒子和银河宇宙射线作为月球表面溅射源所发挥的作用。由于月球没有显著的磁场，因此使用适当的粒子探测器，可以高精度测量银河宇宙射线能谱的低能部分（< 1 GeV）。

这是一份临时文件，并非最终排版的文章

相比之下，这一观测具有优势：大多数先进的银河宇宙射线观测站（如 PAMELA 和 AMS-02）都位于低地球轨道，而地球磁层会滤除银河宇宙射线能谱的这一低能部分。

太阳事件期间测得的典型太阳高能粒子质子强度如**图3**所示（改编自 Quinn 等人，2017年）。部分太阳高能粒子质子（能量范围为 ~MeV）可在高日冕中与部分剥离的日冕离子相互作用，与其发生电荷交换并产生 ~MeV 兆电子伏中性原子（高能中性原子）（Mewaldt 等人，2009年）。

银河宇宙射线氢核和氧核通量如**图4**所示，呈现出明显的太阳周期调制（改编自 Mrigakshi 等人，2012年）。这些太阳高能粒子和银河宇宙射线与月壤相互作用会产生反照高能粒子；利用现有仪器可分辨能量高达数 ~100 MeV 的粒子，其通量对月壤水合程度敏感（Looper 等人，2013年；Schwadron 等人，2016年；Zaman 等人，2022年），参见**图5**。因此，区分原始高能粒子通量与反照高能粒子（例如，分别采用天顶中心／天底中心观测方向）似乎是必要的，以便提供有关深空太阳高能粒子和银河宇宙射线环境，以及月壤与该环境相互作用的信息。

2.2 监测地球磁层和外逸层

月球位于地球磁尾内时，可以对等离子体片和等离子体片边界层的动力学进行原位测量，包括监测磁场、高能离子和电子，以及测量沿磁尾流动的地球起源高能离子。

O^+ 沿磁尾流动束流的通量随距地球尾向距离的变化如**图6**所示（引自 Seki 等人，1998）。在高地磁活动条件下，这些束流中包含重原子离子和分子离子（Christon 等，1994、2020）。在更靠近月球处，辉夜号月球轨道器观测到了 O^+ 沿磁尾流动束流（Terada 等，2017）。这些沿磁尾流动的 O^+ 离子的能谱特征清楚地区分了月球起源的 O^+ 离子（数十电子伏至 ~100 电子伏）与地球磁层的 O^+ 离子（数千电子伏），参见**图7**（改编自 Terada 等，2017）。Harnett 等人（2013）使用三维多流体模型进行的粒子追踪模拟，以及 Poppe 等人（2016）使用 MHD开放式全球地球空间环流模型进行的模拟表明，在高地磁活动事件期间，源自地球内磁层的重离子如何沿磁尾喷射，并在月球距离处达到数千至数万电子伏的能量，参见**图8**。

当月球位于磁尾之外时，可通过遥感监测地球磁层的动态及其对太阳风条件的响应。这包括：

– 通过成像由等离子体片或环电流中的高能离子（数个~千电子伏至数个~10 千电子伏）与地冕中的中性氢原子发生电荷交换所产生的能量中性原子，监测环电流和近地等离子体片，例如 Brandt 等（2004年）、Vallat 等（2004年）、Goldstein 等（2022年）。– 通过探测并成像太阳风电荷交换（SWCX）软X射线，监测磁层顶和尖点区。这些软X射线由源自太阳风的高电荷态重离子与外逸层中性原子发生电荷交换产生，例如 Branduardi-Raymont 等（2012年、2021年）、Sibeck 等（2018年）。– 通过等离子体层中的氦$^+$ 离子对太阳极紫外辐射（30.4 nm）的共振散射进行成像，观测等离子体层，例如 Sandel 等（2003年）、Darrouzet 等（2008年）、He 等（2016年）。

– 在 Lyman- α 121 6 1986 2017, (.nm) 波段对地冕成像，例如 Rairden 等（2022）、Zoennchen 等（）。

2.3 监测月球表面束缚外逸层

月球表面束缚外逸层构成了一个复杂的多尺度系统（**图 2**），其特征在于与太阳辐射、太阳风和地球磁尾等离子体、流星体通量、尘埃以及月壤之间的相互作用（Futaana 等人，2018年）。这种极其稀薄的大气，尤其是其中少数种类的数密度很低，加之源和损失机制的复杂性与多样性，导致人们对其了解甚少（Wurz 等人，2007年、2022年；Poppe 等人，2022年）。**图 9**给出了主要成分的高度密度廓线，分别展示从月壤中以热方式释放的原子和分子，以及通过溅射释放的原子。除原子氢和分子氢外，O、羟基、CH_4, 稀有气体（氦、氖、氩、Kr、Xe）、金属原子（Na、K、Mg、Al）和其他元素也存在于月球外逸层中（Leblanc 和 Chaufray，2011年；Benna 等人，2015年；Grava 等人，2015年、2016年、2021年；Halekas 等人，2015年；Hodges，2016年；Hurley 和 Benna，2018年；Leblanc 等人，2022年；Wurz 等人，2022年）。

这些外逸层中的中性原子和分子随后可被太阳紫外辐射电离，从而产生拾取离子。这些离子会在环境电场**E**的作用下迅速从其诞生位置加速，并横越磁场**B**漂移。拾取离子独特的轨道特性（摆线运动由**E** × **B**漂移与围绕**B**的回旋运动共同组成）使人们能够推断其来源的重要细节（Hartle and Killen，2006）。此类月球拾取离子已在地球磁尾瓣区（Poppe et al.，2012a）和太阳风中被探测到（Wang et al.，2011）。

正如搭载于LADEE和月球勘测轨道飞行器上的航天器所进行的测量所示，月球外逸层既可以通过使用中性粒子质谱仪进行原位测量来监测，也可以通过使用紫外光谱仪进行遥感来监测（Chin et al.，2007；Elphic et al.，2014）。

研究月球外逸层的其他技术包括：

– 通过探测并成像太阳风质子与外逸层中性原子之间发生电荷交换相互作用所产生的能量中性原子，对月球外逸层进行遥感（Futaana 等人，2008年）。这些能量中性原子的能量与母体太阳风质子的能量相当，即约为 ~千电子伏。– 通过探测并成像高电荷态重太阳风离子与外逸层中性原子发生电荷交换所产生的太阳风电荷交换软X射线，对月球外逸层进行遥感（Robertson 等人，2009年）。– 对新近电离、源自月球外逸层中性物质的拾取离子进行原位测量（Hartle 和 Killen，2006年；Yokota 等人，2009年；Wang 等人，2011年；Poppe 等人，2022年）。在月球表面上方的高空，例如门户轨道所在高度（参见第 4.1 节），与直接采样母体中性粒子相比，这种方法能够更灵敏地探测数密度较低的物种（Halekas 等人，2015年；Poppe 等人，2022年）。

2.4 太阳风与月球表面相互作用的监测

到达月球表面的太阳风质子可能被吸收或散射，也可能通过溅射或解吸从月壤中移除另一个原子（Wieser 等人，2009年；McComas 等人，2009a；Futaana 等人，2012年）。因此，太阳风质子中有很大一部分（最高可达 20%）会以中性氢原子（能量中性原子）的形式反射回太空。值得注意的是，反向散射

这是一份临时文件，并非最终排版的文章

中和的太阳风质子不仅会在月球处于原始太阳风中时产生，也会在月球进入地球磁鞘、暴露于受激波作用并热化的太阳风中时产生（Allegrini 等人，2013年）。

图10展示了典型的反射氢原子能中性原子能谱，并将其与母体太阳风质子的能谱进行了比较。如图所示，反射能中性原子的通量变化与母体质子群的通量变化密切相关。然而，这些能中性原子的能量仅为母体太阳风质子能量的一部分。

由于太阳风质子轨迹会受到表面静电势以及可能存在的局部磁场异常的调制（参见**图11**），探测与成像这些反射能中性原子，可用于研究月球表面的电场与磁场（Futaana 等人，2013；Vorburger 等人，2013、2015、2016；Bamford等人，2016）。局部地壳磁异常（或“月球旋涡”）构成“微型磁层”，可局部屏蔽月壤，使其免受太阳风质子及其造成的空间风化影响（Wieser 等人，2010；Wang 等人，2012；Deca 等人，2015；Glotch 等人，2015；Hemingway 等人，2015；Poppe 等人，2015；Pieters 和 Noble，2016；Hemingway 和 Tikoo，2018）。

未发生反向散射、而是被月壤（即月球颗粒顶部 20 – 30 nm）吸收的太阳风质子，会在月壤中扩散。随后，它们可以与月壤氧化物中的氧原子相互作用，形成羟基（McCord et al., 2011; Farrell et al., 2017; Tucker et al., 2019; McLain et al., 2021）。这些由太阳风产生的羟基自由基有助于分子水的形成和释放，从而促成月球上由太阳风诱发的水循环（Crider and Vondrak, 2003; Liu et al., 2012; Futaana et al., 2018; Jones et al., 2018; Honniball et al., 2021）。

月球表面暴露于太阳辐射和带电粒子通量中，也会导致表面静电充电。因此，月球表面与周围等离子体之间会形成电势，并在近表面形成等离子体鞘层，其尺度高度约为德拜长度（Halekas et al., 2011; Stubbs et al., 2013; Burinskaya, 2015; Harada et al., 2017）。在晨昏线附近，这一近表面电场变得极其复杂且高度多变：由于光电子发射，表面极性从昼侧以正电为主（数十伏）转变为夜侧和月球尾迹区的强负电（其量级与周围电子温度相当，即可达数百伏负电）（Farrell et al., 2007）。局部表面地形也是造成近表面静电与等离子体环境复杂化的一个因素，在永久阴影区陨坑附近尤其如此（Poppe et al., 2012b; Nénon and Poppe, 2021）。正如 THEMIS-ARTEMIS 的观测所示，即使绕月航天器距离月球表面数千千米，也能通过探测到的等离子体粒子能谱偏移，远程探测月球表面充电现象；这一现象发生在航天器穿越与月球表面相连的磁力线时（Halekas et al., 2011）。

尘埃是月球等离子体环境的另一个组成部分（Stubbs 等人，2007；Grün 等人，2011；Horányi 等人，2015；Popel 等人，2018，2022）。月球表面上（或附近）的尘埃颗粒，可能因行星际微流星体撞击而从月壤中喷出，也可能如上一段所述，因尘粒充电而静电悬浮。这形成了一个尘埃等离子体系统，其中包括月球外逸层中的中性粒子、太阳风离子和电子、地球磁尾中的离子和电子（当月球进入地球磁尾时）、太阳辐射与月球表面相互作用产生的光电子，以及在月球表面上方飞扬的带电尘埃颗粒。

3 测量要求

在确定了可利用月球轨道平台-门户（见第2节）上的仪器设备来研究的空间等离子体物理学领域科学目标后，ESA专题小组确定了实现这些目标所需测量的物理参数，以及开展相应观测所需的仪器设备。因此，专题团队提出了以下两个问题（Dandouras 等，2020b）：

– 在月球轨道平台-门户附近可以探究哪些空间等离子体物理科学问题？– 为实现这些科学目标，仪器／载荷需要满足哪些要求？

该研究确定了可从门户平台（月球轨道高度为

3 200 × km）直接开展

70 000

的测量，也确定了可通过平台释放并送入较低月球轨道的搭载仪器的立方体卫星开展的测量，以及可直接在月球表面开展的测量。本文将重点讨论由安装在门户上的仪器设备开展的测量，包括原位测量和遥感观测，随后简要提及另外两种可能性。可直接在月球表面开展的空间等离子体物理测量，将在一篇即将发表的专门论文中讨论。

表1概述了空间等离子体物理领域中已确定的物理参数／可观测量，这些参数／可观测量可由门户上的仪器设备进行监测。

表格2 和3分别列出了从较低月球轨道和月球表面进行长期观测的可能项目。

表4随后聚焦于可通过门户号上搭载的仪器解答的科学问题，并展示专题团队确定的各项科学目标如何转化为测量要求，进而转化为相应的仪器／有效载荷要求。

门户号上搭载的遥感仪器最终还可用于实现其他目标，并有助于寻找机会目标，包括：极光成像、日球层成像（通过能量中性原子成像仪），以及月球表面成像（例如流星撞击闪光）。

4 概念设 计：门户号上的空间等离子体物理载荷包 y

在专题团队开展工作并确定测量要求后，欧洲航天局发布了“深空门户等离子体物理有效载荷概念设计”的招标邀请（ESA AO/1-9789/19/NL/FC）。作为回应，我们向欧洲航天局提交了方案并成功入选，随后开展了“门户号上的空间等离子体物理有效载荷包”（SP4GATEWAY）的概念设计研究，以实现这些目标，同时满足技术要求。

首先，根据我们对门户及其等离子体环境之间相互作用的模拟（第 4.2 节），确定了最适合搭载原位测量等离子体仪器的门户舱段。第 4.3 节和第 4.4 节分别介绍了拟议的模型有效载荷及其在门户舱段上的安装配置。随后，通过模拟遥感仪器视场在门户轨道上的变化，分析了其在天空及天体上的投影（第 4.5 节）。

这是临时文件，并非最终排版的文章

4.1 门户配置、轨道与姿态

门户将在其生命周期内不断演变，并在项目的各个后续阶段增添不同舱段。本研究采用典型的“门户二期”构型，并安装猎户座飞船，如**图 12**所示。

门户将运行在月球周围的近直线晕轨道（NRHO）上，近月点 × 远月点高度为 3 200 × 70 000 km（Whitley and Martinez，2016年）。轨道周期为 ~6.5 个地球日，轨道倾角为 ~90°。近月点将位于月球北极上空。该轨道可确保始终能看到地球（与月球会合周期呈 9:2 共振）。

门户的姿态将使 +X 轴（纵轴，参见**图 12**）指向太阳。+Z 轴将垂直于月球轨道平面，指向南方。指向精度要求为：猎户座飞船保持尾部朝向太阳的姿态，偏差不超过 ±20°，即 +X 轴的指向精度为 ±20°。

4.2 门户等离子体环境的模拟

门户与等离子体环境之间相互作用的模拟由 ONERA 和 Artenum 公司完成（Hess 等人，2020年）。为表示门户，构建了一个包含约 64 000 个单元的三维网格模型，并考虑了不同门户舱段表面材料的特性。随后，使用 SPIS（航天器等离子体相互作用系统）软件工具，模拟门户与其周围等离子体环境的相互作用。该开源软件可从 https://www.spis.org 获取，它根据航天器与空间等离子体之间的电荷交换，计算航天器表面的电势；换言之，它模拟从等离子体中收集电荷，以及高能粒子撞击后光电子和次级电子的再发射。它还模拟这种静电充电对天然等离子体造成的扰动。该软件还经过进一步开发，用于模拟月壤充电和月球尘埃颗粒的运动（Hess 等人，2015），以及等离子体仪器因充电而导致的测量扰动（Sarrailh 等人，2015）。

模拟了两种情况，分别对应通常会遇到的两种情形：

1. 门户处于太阳风中（最常见的情况，参见第 1 节）。所考虑的典型太阳风条件为：太阳风密度：7 cm^{-3} 太阳风速度：450 km/s 离子和电子温度：10 eV

2. 地球磁尾中的门户（每个月球轨道周期为 5–6 天）。所考虑的等离子体环境对应于强地磁活动条件（会产生沿磁尾方向的等离子体流的条件，参见第 2.2 节）：等离子体密度：2.01 cm^{-3} H^+ 密度：2 cm^{-3} O^+ 密度：0.01 cm^{-3} 等离子体流速：250 km/s（远离地球）离子温度：200 eV 电子温度：15 eV

每种情况下均考虑了门户的标称姿态（门户主轴与太阳方向对齐，参见第 4.1 节）以及极端姿态偏转（门户主轴相对于太阳方向倾斜 20°）。模拟运行针对每种情况生成了静电势分布图（门户空间站环境中的体积值及门户舱段表面上的表面值），以及 H^+、O^+、光电子和次级电子的密度分布图。详情见 Hess 等人（2020年）的报告。

本研究的主要结果如下：

4.2.1 太阳风中的门户

门户处于太阳风中，且空间站长轴与太阳方向对齐（标称姿态）时，经过 600 s 的相互作用时间后，其体积静电势分布如**图13**所示。

门户结构达到 3.5 V 的平衡电势，而大部分太阳能电池板在朝日面达到 10 V 电势，在背面达到 -46 V 电势（**图13A**）。因此，搭载两块主要太阳能电池板的电力与推进组件（PPE）不适合用于低能等离子体的空间等离子体仪器设备。太阳风流导致的尾迹效应在主要太阳能电池板后方尤为明显，而空间站前部模块的电势扰动似乎较为温和。为突出远离太阳能电池板处的电势值（即应安装等离子体仪器的位置），还以介于 +5 V 和 -3 V 之间的饱和刻度绘制了表面和体积电势（**图13B**）。如图所示，在暴露于太阳风且远离太阳能电池板的空间站部分，等离子体流在门户周围形成的鞘层厚度通常为 ~1.8 m，静电势扰动较为温和（几伏）。这意味着离子和电子测量受到的影响很小，只有能量最低的粒子（< ~100 eV）会受到影响。能量通常为 ~1 keV 的太阳风离子几乎不会受到影响。这也意味着，长度为 ~2 – 3 m 的伸展杆足以将磁强计和波动天线等传感器安置在鞘层之外。

门户周围的环境质子密度如**图13C** 和 **13D**所示。左侧面板（**图13C**）对应门户的标称姿态（门户主轴与太阳方向对齐），右侧面板（**图13D**）则对应相对于太阳方向偏转 20° 的极端姿态偏差。请注意，在这两种情况下，空间站下游均存在等离子体尾迹。倾斜轴模拟显示，门户的受光侧与背光侧之间存在轻微不对称；不出所料，等离子体尾迹也发生了倾斜。

4.2.2 地球磁尾中的门户

此处，门户暴露于沿磁尾方向流动的地球等离子体片／磁鞘等离子体中。在这些条件下，空间站长轴与太阳方向对齐（标称姿态）时，经过 400 s 的相互作用时间后，体积静电势分布如**图14A**所示。此处的表面平衡电势为 6.5 V，而大部分太阳能电池板朝日面电势为 13 V，背面则为 -31 V。由于周围等离子体密度较低，空间站周围形成的鞘层延伸范围更大，但与太阳风情形相比，势垒较弱（-1.1 V），且分布更具各向同性。不过，整体结果并无太大差异，太阳风情形下得出的结论在此同样适用。**图14B**显示了发射出的光电子密度。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

周围的 H^+ 和 O^+ 离子密度（地磁活动期间沿磁尾方向流动的地球离子，参见第 2.2 节）分别见**图14C** 和 **14D** 。此处的 O^+ 密度分布与太阳风中的质子密度分布非常相似，由于离子质量较大，呈现出非常明显的尾迹效应。

4.2.3 门户—等离子体环境相互作用：综合

针对将会遇到的两种情况，对门户与其等离子体环境之间的相互作用进行了模拟：门户处于太阳风中，以及门户处于地球磁尾中。在这两种情况下，门户远离太阳能电池板的表面电势均处于中等水平（在太阳风中为 3.5 V，在磁尾中为 6.5 V）。等离子体流在门户周围形成了鞘层；对于太阳风情形，当门户与太阳方向对齐时，鞘层厚度为 ~1.8 m。然而，当门户主轴（X 轴）相对于太阳方向倾斜 20° 时——这对应于相对于标称姿态的极端偏离——该等离子体鞘层会变得不对称，并且在“阴影”侧明显增厚。

这些结果令人十分鼓舞，因为它们有助于确定受门户扰动最小的天然等离子体环境中的门户舱段，因此这些舱段非常适合安装等离子体仪器。**图 15**以颜色编码显示了已确定的仪器安装位置，从绿色（最有利）到红色（最不利的位置）。

美国居住舱和国际居住舱的表面充电较弱，周围有一层薄薄的等离子体鞘层，且不受任何等离子体尾迹效应的影响。因此，适合在此放置对静电充电敏感的等离子体仪器，例如磁层离子和电子能谱仪（图15中的绿色／浅绿色标记）。

然而，美国居住舱和国际居住舱圆柱表面上的这些位置与太阳风流相切。当门户相对于太阳方向倾斜时，太阳风流会偏离这些位置，因此无法在此测量（参见图13D）。太阳风测量不仅要求表面充电有限（低于~10 V）且不存在局部等离子体尾迹效应，还要求直接迎风暴露于太阳风。因此，后勤舱的+X侧（图15中的下方浅绿色标记）是放置太阳风仪器的最合适位置。

对于波与场仪器，将其安装在“绿色／浅绿色标记”处的~2 – 3m伸展杆上，可使其位于等离子体鞘层之外。

其余位置可用于安装高能粒子和磁层成像仪器，这些仪器不受等离子体充电影响。

最不适合放置等离子体仪器的位置（应避免的位置）是动力与推进组件（PPE）以及靠近它的居住与后勤前哨舱（HALO），见**图 15**中的红色标记。这是因为太阳能电池板面积较大，且相关电路系统会造成影响；它们位于太阳风流的“下游”；表面充电较强；并且靠近离子推进发动机。

4.3 模型有效载荷

为实现专题团队确定的科学目标，我们首先定义了一个模型有效载荷，由一组与**表4**（参见第3节）所示需求相对应的仪器组成。这些测量仪器大多基于现有的经过飞行验证的

仪器，并针对月球等离子体环境进行了调整；或基于经过测试和验证的实验室原型（技术成熟度等级（TRL）≥5）。**表5**列出了这些仪器，并概述了它们的主要特性。有关这些仪器特性的详细说明见三份欧洲航天局报告，分别为《需求清单》（De Keyser 等人，2020年）、《概念设计报告》（Devoto 和 Dandouras，2020年）以及《项目评估》（Futaana 等人，2020年）。本文介绍其主要特性。

4.3.1 cMAGF：三轴磁通门磁力计

该仪器将测量环境矢量磁场（包括太阳风、地球磁尾、月球附近、月球尾迹等区域）。拟议的磁力计组件由三种不同类型的装置组成。主要装置由三个安装在伸展杆上的三轴磁通门磁力计组成，安装于两根长~3 米的可伸缩吊杆上：每根吊杆尖端各有一个传感器，第三个传感器则安装在两根吊杆的共同根部。这样，两个主要传感器便可置于门户周围等离子体流形成的等离子体鞘层之外（参见第4.2节）；而吊杆根部的传感器则可通过梯度计技术消除门户引起的潜在扰动。两根吊杆尖端各安装一个传感器，还能进一步校正潜在扰动。这三个装置将提供主要测量数据，同时支持对测量数据进行清理和处理。

为更详细地监测空间站产生的扰动，将在空间站的多个位置直接安装若干个独立的磁力仪传感器（Constantinescu et al., 2020）。此外，我们提议安装两个电流监测器，用于监测太阳能电池板流出的电流；预计这些电流会造成最大的磁场扰动。

该磁力仪组件在门户上的安装配置方案及相应的CAD图，与其他仪器一样，见第4.4节。

磁通门磁力计具有深厚的应用基础，此类仪器已搭载于多个空间任务中，包括Cluster（Balogh et al., 2001）、卡西尼号（Dougherty et al., 2004）、THEMIS- ARTEMIS（Auster et al., 2008）、贝皮科伦坡号（Glassmeier et al., 2010）等。

4.3.2 cSWIS：太阳风离子能谱仪

cSWIS仪器是一台太阳风离子能谱仪，可测定太阳风离子的速度分布函数（VDF），并提供太阳风密度、速度和温度。

现考虑一种顶帽式静电分析器仪器，其覆盖 0.1–40 千电子伏/电子的能量范围，视场（FOV）为 96° × 48°，并与太阳风来向对齐：方位角方向的角范围为 96°（黄道面内从 +24° 到 -72°，因为门户指向太阳，但有时可能会偏离这一方向，随后再追赶上来），俯仰角方向为 48°（介于 -24° 和 +24° 之间）。方位角和俯仰角的空间分辨率均为 3°，能量分辨率为 $\Delta E/E = 8$ %。为了实现较高的 VDF 采集频率，我们提议采用太阳风束流跟踪方法，其原理类似于冷太阳风（CSW）仪器（Cara 等，2017年；De Keyser 等，2018年）。该仪器是为 THOR（湍流加热观测器）任务设计的，该任务曾作为 M4级中型任务向欧洲航天局提出。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

4.3.3 cSWFC：太阳风法拉第杯

cSWFC 仪器将用于确定太阳风密度、速度和相对阿尔法粒子含量，其依据是同时测量六个相同法拉第杯提供的收集器电流。

入射离子的能量由施加于控制栅极的高电压确定。法拉第杯分为三个单元，每个单元包含两个杯。第一个单元用于确定总离子通量矢量；第二个单元通过对控制栅极施加高电压，提供能量分布的两个点，用于在麦克斯韦近似下确定质子速度和温度。最后一个单元用于测量质子和α粒子的一维速度分布（积分分布）。六个法拉第杯的视场均为45° × 45°；与cSWIS仪器一样，其视场将与太阳风来向对齐。能量分辨率为1%（< 50 eV）。

拟议的cSWFC仪器基于BMSW（太阳风明亮监测器）法拉第杯仪器；该仪器曾搭载于Spektr-R任务飞行（Šafránková等，2013）。

4.3.4 cMISP：磁层离子能谱仪

cMISP 是一种质量甄别离子谱仪，用于确定环境等离子体离子的速度分布函数，包括地球磁层离子、月球外逸层拾取离子和太阳风离子。

拟议中的仪器是一台飞行时间离子质谱仪，可获取离子分布（约 10 eV/e 至 40 千电子伏/e），并以高分辨率确定质荷组成（$m/\Delta m > 15$）。通过扫描施加在旋转对称环形静电分析器两个半球之间的高电压，按离子的 E/q（单位电荷能量）比值对其进行筛选（360° ×5° 瞬时视场）。随后，离子经过约 5 kV 的后加速，进入飞行时间（TOF）区段，在此测量入射离子的速度，从而计算其 m/q（单位电荷质量）比值。仪器采用专门设计的薄型微通道板（MCP），离子穿过该板时，转换表面会产生“起始”TOF信号次级电子。“停止”TOF信号则由另一块MCP探测离子产生。该仪器可实现 $\Delta E/E$ ~7 % 的能量分辨率，以及 22.5° 的角分辨率。

cMISP基于MIMS（微通道板离子质谱仪）仪器。该仪器最初为ESCAPE（用于研究大气粒子逃逸的欧洲航天器）任务而设计，该任务曾作为M5级中型任务向欧洲航天局提出（Dandouras等，2018）。MIMS本身则基于IRAP开发的一种经过成功测试的原型仪器（Devoto等，2008）。MIMS是搭载于Cluster航天器上的CIS-CODIF仪器（Rème等，2001）的改进型，但具有更高的质量分辨率。

由于 MIMS 是为自旋航天器设计的，可利用航天器的自旋，在一次自旋周期内获取完整的三维离子分布；而门户上的 cMISP 则需要在仪器入口处增设静电偏转板，以便在 360° ×120° 立体角范围内扫描视场（相对于中央入口平面为 ±60°）。门户是一座三轴稳定空间站。

4.3.5 cMESP：磁层电子能谱仪

cMESP 是一台电子能谱仪，可测定太阳风电子（原生电子或经月壳磁场异常反射的电子）以及门户进入地球磁层时的等离子体片电子的速度分布函数（VDF）。

拟议采用一台顶帽式静电分析器仪器，覆盖从 ~5 电子伏到 ~20 千电子伏的能量范围。与 cMISP 仪器一样，需要在仪器入口处增设静电偏转板，以便在 360° ×120°立体角范围内扫描视场。

拟议的 cMESP 仪器以 SWEA（太阳风电子分析仪）为基础，该仪器搭载于 MAVEN航天器上飞行（Mitchell 等人，2016年）。

4.3.6 cENPD：高能粒子探测器

cENPD仪器将探测并测量高能带电粒子（离子和电子）的通量，包括太阳高能粒子（SEPs）、低能银河宇宙射线（GCRs）以及地球等离子体片高能粒子。该仪器还将研究次级高能离子的能谱；这些离子是在月球表面受到银河宇宙射线和/或太阳高能粒子辐照后释放出来的（反照高能粒子，参见第2.1节）。其离子能量范围为~40 千电子伏–~100 MeV，电子能量范围为~20 千电子伏–~30 MeV。其能量分辨率为$\Delta E/E \leq 10$ keV，并可测量离子的成分（从质子到铁原子核）。

为同时覆盖原生高能粒子和反照高能粒子，该仪器将由两个相同的探测头组成，各自具有 60° × 60°视场：一个朝向月球天顶，另一个朝向相反方向（月球天底）。每个探测头由一个准直器和一块厚度为1 cm^2, 1 mm的硅探测器组成。探测器前方设有滤轮，可放置厚箔、针孔或遮挡器，从而将探测头重新配置为不同的科学模式，用于测量电子和离子的组合能谱、测量电子能谱、保护探测器免受阳光照射或避免探测器饱和。

拟议的 cENPD 仪器将受益于 IPD 仪器的技术积累。IPD 仪器曾搭载于 DEMETER卫星（Sauvaud等人，2006年）；此外，还将受益于为 TARANIS卫星开发的 IDEE 仪器（Lefeuvre等人，2008年）。

4.3.7 cGCRD：银河宇宙射线探测器

cGCRD仪器将测量银河宇宙射线和太阳高能粒子的能谱及成分，覆盖 0.1 至 ~ 5 GeV 的能量范围。因此，它将与覆盖更高能量范围的 cENPD仪器形成互补。

拟议的 cGCRD仪器是 Mini.PAN 穿透粒子分析仪。该仪器属于已获批准的 H2020-FETOPEN 项目，该项目将为深空应用研制穿透粒子分析仪（PAN）的演示样机（Wu等，2019年）。

Mini.PAN 基于磁谱仪的粒子探测原理，采用新颖的布局和探测概念，以优化高通量和低通量粒子的测量精度。当粒子能量超过数百 MeV/nuc 时，测量粒子能量的标准方法（TOF、dE/dx、ΔE-E）效率会降低，因此采用磁谱测量作为主要粒子分析方法（根据带电粒子在磁场中轨迹的弯曲程度推导其能量）。在 Mini.PAN 中，粒子在磁场中的弯曲由

这是一份临时文件，并非最终排版的文章

精密硅条跟踪探测器测量，而粒子的元素身份则根据其电荷和Z确定，后者通过多点 dE/dx方法测量。Mini.PAN 旨在精确测量能量在 100 MeV/nuc 至数 GeV/nuc 之间的高能粒子的动量、电荷、方向和时间。

Mini.PAN 提供高得多的能量分辨率（相比于积分测量），尤其是在 > 100 MeV 范围内；它适用于 100 MeV/nuc 至低 GeV/nuc 范围内的精确能量和粒子种类测量，该范围涵盖反照粒子以及环境银河宇宙射线谱的低能部分。过去的太阳风观测站（例如 ACE）或低地球轨道上的大型银河宇宙射线探测器（例如 PAMELA）都无法很好地分辨这一部分。Mini.PAN 还是一种新型的小型化先进高能粒子探测器，可根据深空任务的需求进行改装和调整，以适应其质量限制。

此外，所提出的 cGCRD 探测器方案还可以探测兆电子伏中性原子（可能源自日球层，参见 Mewaldt 等人，2009年），因为其探测方法结合了强磁体、ΔE-E 技术，以及利用连续排列的像素化硅条探测器进行粒子跟踪。数兆电子伏的氢中性原子会在硅条探测器堆栈上产生特征性的 ΔE-E 信号，但其轨迹为直线，因为磁体不会影响它们；也就是说，它们可以与带电粒子种类（这些粒子也会被探测到）以及能量极高的银河宇宙射线（探测到的数量较少，但会穿透得更深）区分开来。

4.3.8 cHENA：高能中性原子成像仪

cHENA 是一台高能中性原子（Energetic Neutral Atoms，ENA）成像仪，用于探测并成像地球等离子体片或环电流中的高能离子与地冕中性氢原子发生电荷交换相互作用所产生的能量中性原子。其能量范围为 ~10 –500 千电子伏，并配备准直器，既可限定视场（120° × 90°或更窄），又可排除带电粒子。透过的能量中性原子随后通过飞行时间系统，并由微通道板（64 × 64 像素）探测。为使仪器光轴指向地球内磁层，cHENA 需要安装在方位角（1 轴）转动机构上。

拟议的 cHENA 仪器以 MIMI-INCA 中性原子成像仪和 HENA 中性原子成像仪为基础；前者搭载于卡西尼号（Krimigis 等人，2004年），后者搭载于 IMAGE 任务（Mitchell 等人，2000年）。

4.3.9 cMENA：中能中性原子成像仪

cMENA 是一台中能量能量中性原子成像仪，用于探测并成像由地球等离子体片离子与地冕中的中性氢原子发生电荷交换相互作用产生的能量中性原子。因此，它将与 cHENA 仪器形成互补，将观测范围扩展至更低能量（~1 千电子伏–100 千电子伏）。MENA 的另一项目标是在月球环境中探测并成像由太阳风质子与月球外逸层发生电荷交换相互作用产生的能量中性原子。这要求仪器指向具有灵活性（指向地球或月球），因此还需将 cMENA 安装在自身的方位角（1 轴）转动机构上。

拟议的仪器具有 90° × 10° 的瞬时视场，并与 cHENA 一样，使用准直器来限定视场并排斥带电粒子。准直器还包含紫外滤光片。该仪器的角分辨率为 5° × 10°，即能够提供一维图像。其设计借鉴了 TWINS 任务搭载的广角成像中性原子能谱仪（McComas 等，2009b），以及 BepiColombo 任务的 MPO 水星行星轨道器搭载的 SERENA-ELENA 中性原子成像仪（Orsini 等，2021）。

4.3.10 cLENA：低能中性原子成像仪

cLENA 通过覆盖最低能量范围（低至 ~10 eV），补齐了中性原子成像仪系列。这些低能中性原子主要有两个来源：太阳风质子与月球外逸层发生电荷交换相互作用，以及与月球表面发生电荷交换相互作用。因此，其视场必须指向月球。

拟议中的仪器具有 15° × 15° 的视场，由单个像素组成，并利用转换表面对入射的能量中性原子进行电离，然后将其送入静电波系统。该系统充当滤波器，只允许处于适当能量范围内的粒子通过。随后，粒子通过飞行时间系统。该仪器能够在 ~10 eV 至 ~3.3 千电子伏的能量范围内，以 ~50% $\Delta E / E$ 的能量分辨率，高频次观测太阳风与月球表面的相互作用。该仪器以为 Luna-Resurs-Orbiter（Luna 26）任务设计的 LNT仪器为基础。

4.3.11 cUVIS：紫外成像光谱仪

cUVIS 是一种紫外线／极紫外成像光谱仪，可探测特定发射线，用于观测地球外逸层（H：121.6 nm、He：58.4 nm、O：130.4 nm 和 N：120.0 nm）、地球等离子体层（He^+：30.4 nm、O^+：83.6 nm）以及月球外逸层（He：58.4 nm，以及其他元素的发射线）。因此，它将覆盖 30–130 nm 的波长范围，视场为 0.1° × 7.5°，角分辨率为 ~5 arcmin。从月球上观测时，这一分辨率对应等离子体层处约 0.15 R_E （地球半径）。

与 cHENA 和 cMENA 一样，地球指向要求将仪器安装在其专用的方位角（单轴）转动机构上。该转动机构还可根据每个观测时段的科学目标，使仪器指向月球。

拟议的仪器基于 BepiColombo 任务中 MPO 水星行星轨道器搭载的 PHEBUS 紫外/极紫外成像光谱仪的技术积累（Chassefière 等，2010年）。

4.3.12 cLPEF：朗缪尔探针与电场

cLPEF 是一种用于环境等离子体诊断的朗缪尔探针仪器：将一个导电探针（可施加偏压或处于浮置状态）置于等离子体中，电子/离子通量到达导电表面后产生的电流或相对于航天器的电压测量值，可用于推导主要等离子体特性，包括等离子体密度、电场或航天器浮动电势。为获得不受扰动的等离子体测量结果，探针必须置于航天器周围形成的等离子体鞘层之外足够远处；该鞘层厚度与局部德拜长度成正比。

拟议的cLPEF仪器将使用两个球形探针（直径为~ 8 – 10 cm），分别安装在一根可伸缩吊杆的末端。由于这项要求与cMAGF仪器的两个主磁力仪传感器完全相同，为优化资源并简化整个空间等离子体载荷的接口，建议将这两种仪器的传感器合并，并在两个朗缪尔球形探针内各装设一个三轴磁通门磁力仪传感器（CAD图见第4.4节）。这种朗缪尔探针/磁力仪组合概念最初是在拟议的月球着陆器任务框架下、根据欧洲航天局合同编号4000103352/11/NL/AF开展的等离子体与尘埃综合载荷研究中提出的，也是欧洲航天局彗星拦截器任务所采用的方案（Ratti等人，2022年）。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

另一种可能的方案是偶尔在Gateway外部机械臂的末端安装一个独立的朗缪尔探针，利用该机械臂在不同位置研究围绕各个门户舱段形成的等离子体鞘层特性。

朗缪尔探针受益于多项空间任务中已飞行仪器的技术积累，包括卡西尼号上的RPWS仪器（Gurnett等，2004年）、DEMETER卫星上的ISL（Lebreton等，2006年）、PROBA-2卫星上的DSLP等。

4.3.13 cWAVE：Waves射电仪器

cWAVE是一种电磁波仪器，用于研究发生在极光区的地球极光千米辐射。该仪器将利用月球掩星法；这一方法最初由Radio Astronomy Explorer-2任务采用（Kaiser和Alexander，1976年）。另一项研究目标是研究太阳日冕和太阳风中加速粒子产生的无线电辐射。

拟议的cWAVE仪器将测量交流电场（一个分量：16.5 MHz快速电场波形、64.5 kHz降采样电场波形）和交流磁场（一个分量：64.5 kHz磁场波形）。这三种数据产品将以波形（事件模式）和/或平均频谱（巡测模式，采用机载快速傅里叶变换计算）的形式提供。

与 cMAGF 和 cLPEF 仪器一样，cWAVE 传感器也需要安装在专用可伸缩吊杆的末端。

无线电波仪器得益于曾搭载于多个空间任务的仪器所积累的经验，包括搭载于 Cluster 上的 STAFF（Cornilleau-Wehrlin 等，2003年）、搭载于卡西尼号上的 RPWS 仪器（Gurnett 等，2004年）等。

4.3.14 可伸缩吊杆

如上所述，组合式 cMAGF 和 cLPEF 仪器以及 cWAVE 仪器的传感器安装共需三根可伸缩吊杆，每根长 ~3 米。在任务开始和结束时，必须收起这些吊杆，以确保仪器处于分配的空间范围内，并能通过气闸转运。我们建议使用 Oxford Space Systems 开发的紧凑型可展开和可收回吊杆：Astrotube吊杆。它最多可展开至 3 米，技术成熟度等级为9。

4.3.15 概念设计研究中未包含的仪器

上述基准有效载荷仪器（另见**表5**）能够充分满足专题团队定义的仪器要求（另见**表4**）。不过，有两种仪器未纳入本次概念设计研究：MeV能量中性原子成像仪和软X射线成像仪。

未纳入MeV能量中性原子成像仪，是因为据我们所知，欧洲尚无针对这些极高能量能量中性原子的成熟仪器或原型。不过，如上所述，拟议的cGCRD仪器（Mini.PAN）能够探测数MeV的氢中性原子，将其与能量相近的质子区分开来，并提供该粒子群的单像素图像。

对于X射线成像，曾考虑采用一台视场宽广的软X射线成像仪，使用龙虾眼光学系统和位置敏感型微通道板探测器，在 0.1 – 2 千电子伏的X射线通带内工作（cMXRI 仪器）。该仪器以曾搭载于

探空火箭任务的 DXL/STORM 软X射线成像仪原型为基础（Collier 等人，2015）。然而，该仪器的尺寸（长 78 厘米）似乎与用于安装外部载荷的门户接口不兼容。这表明，该X射线成像仪无法作为这套仪器的一部分搭载。不过，建议将 cMXRI 作为大型欧洲月球着陆器的有效载荷提出。

4.4 仪器安装

仪器概念设计及其在门户上的安装配置所用的CAD模型，是与法国国家空间研究中心的 CNES PASO（轨道系统架构平台）合作建立的，并借助其并行工程设施（CIC：并行工程中心），尤其使用了IDM-CIC（集成设计模型）和IDM-View工具（https://idm.virtual-it.fr/）。

仪器 在门户舱段上的安装配置必须满足若干要求 :

– 原位测量用低能等离子体仪器必须安装在静电充电较弱的区域（参见第 4.2 节）。– 具有视场的仪器的指向要求（参见**表 5**）。– 这些仪器的视场不得受到遮挡。– cGCRD 带有会干扰低能等离子体测量的强永磁体，因此不应安装在这些仪器附近。– 条件允许时，应将仪器分组，组成独立的“仪器套件”：将仪器安装在共用平台上，尽量减少与门户的接口，并使用单个 SORI（外部小型轨道更换单元接口）连接件将其安装在门户上。

我们提出的仪器安装配置符合上述要求，将仪器分组安装在一个主平台和一个次级平台上。这两个平台的尺寸均约为 0.8 m × 0.8 m，通过 SORI 连接件安装在外部，且均为双面结构，即平台两侧都安装仪器。当然，这种安装配置目前仅为初步设想，可能会根据门户的工程和项目限制进行调整。

两个平台均位于后勤舱上，分别安装在其直径两端相对的位置，即 +X 侧（主仪器平台）和 –X 侧（次级仪器平台），参见**图16**。

主平台的两侧如**图17**所示。主平台位于后勤舱的 +X 侧，可无遮挡地观测太阳风来向（**图 13C** 和 **13D**），并能利用有利的静电环境（**图15**）。因此，它非常适合安装太阳风仪器（cSWFC 和 cSWIS），分别如**图18**和**图19**所示。

主仪器平台还搭载:

– 磁层粒子仪器 cMESP 和 cMISP 分别如**图19**和**图19**所示。– 高能粒子探测器 cENPD 如**图 20**所示，安装在平台的 –Y 边缘。cENPD 有两个方向相反的视场，一个沿 +Z 轴，另一个沿 –Z 轴。因此，在近拱点飞越期间，一个视场朝向天顶方向，用于

这是临时文件，并非最终排版的文章

监测向月球表面沉降的原始高能粒子，另一个则朝向天底方向，用于监测反照高能粒子；这些粒子是沉降的高能粒子与月壤相互作用的结果（参见第 4.5 节）。此外，两个探测器头部的 +Z / –Z 朝向可避免阳光直射进入探测器（太阳位于 +X 方向）。

– 图18和图19分别展示了两台“紧凑型”遥感仪器 cMENA 和 cLENA。cMENA 使用专用的方位角（1轴）转动机构。在近月点飞越期间，cLENA 的朝向可观测月球表面和等离子体环境。

– 磁通门磁强计组件（cMAGF）包含两根伸展杆，正如第4.3.1节所述，该组件由三种不同类型的单元组成。主要类型是两套桅杆安装式双磁通门磁强计（两个 ~3 米伸展杆尖端各安装一个传感器，伸展杆根部安装一个传感器）。这两根可伸缩吊杆安装在主仪器平台的–Z侧（图18）。安装在伸展杆尖端的 cMAGF 传感器与朗缪尔探针（cLPEF仪器）集成在一起。这些单元将提供主要测量数据。为了更详细地监测空间站附近源所产生的扰动，还将在空间站周围的不同位置安装若干（~5+）个单独的磁力仪传感器（图中未示出）。– cWAVE仪器也安装在一根可伸缩吊杆上，该吊杆位于主仪器平台的 +Z侧（图19）。

次级平台的两侧如**图 21**所示。该平台安装在后勤舱的 –X 侧，始终处于阴影中。这样，便不会有直射阳光干扰安装在平台上的两台仪器进行测量。次级平台的两侧各有一台遥感仪器：一侧是 cUVIS，另一侧是 cHENA。这两台仪器分别安装在专用的方位转动机构（单轴）上。

由于 cGCRD仪器内装有强磁体（0.4 特斯拉），若与其他仪器距离过近，该磁体会使其他仪器要测量的带电粒子发生偏转，因此它没有安装在两台仪器平台中的任何一台上，而是作为一台“独立”仪器安装在后勤舱 +Z侧的 SORI连接件上（**图 22**）。其视场朝径向外侧，在近月点附近可观测到反照高能粒子；这些粒子是入射银河宇宙射线粒子与月壤相互作用的产物。在轨道其余时段（大部分时间），它的视场指向开放天空。

4.5 仪器视场模拟

通过模拟视场沿门户轨道的演变，分析了遥感仪器和高能粒子仪器的视场在天空及天体上的投影，以确定其合适的朝向。此项模拟由法国国家空间研究中心 PASO 合作完成，并使用 VTS 软件工具（https://logiciels.cnes.fr/en/content/vts）。

在近月点掠过期间，cENPD仪器两个朝向相反的传感器头的视场如**图23**所示。如图所示，其中一个传感器头朝向当地天顶，可无遮挡地观测原始高能粒子通量（紫色视场）；另一个则朝向天底，其视场主要覆盖来自月球的反照高能粒子（黄色视场）。因此，cENPD仪器的探测能力涵盖了这两类粒子（原始高能粒子和反照高能粒子）。

对于cGCRD仪器这一单传感器头GCR探测器，近月点掠过期间的视场如**图24**左图所示（浅蓝色视场）。如图所示，近月点附近，其视场主要覆盖来自月球的反照率银河宇宙射线粒子。不过，在轨道其余大部分时间（右图），它都能无遮挡地观测开放天空，从而探测原始GCR环境。

在轨道的某一位置，cMENA仪器的视场范围（FOR），即考虑到仪器所安装的单轴转动机构旋转后可到达的总视场，如**图 25A**所示。方位旋转机构使仪器能够观测天空中一条非常宽广的“带状”区域，其中包括地球环境和月球环境。随后，可以利用单轴转动机构提供的灵活性，根据每个观测时段的科学目标，对准这两个主要目标中的任意一个。

图 25B展示了近月点附近的 cLENA仪器视场在天空中的投影（该仪器没有转动机构）。如图所示，仪器在门户上的安装方式使其在近拱点飞越期间能够观测月球表面及其外逸层和等离子体环境。

cUVIS仪器的视场如**图 25C**所示。如图所示，专用转动机构还可使该仪器指向地球空间环境（等离子体层、外逸层）、月球空间环境（外逸层）或开放天空中的目标。该仪器瞬时视场的宽度较窄（0.1°），结合转动机构，还可对月球外逸层进行高度剖面扫描。

5 结论

月球是研究深空等离子体环境的独特地点。月球轨道平台-门户将于2020年代中期起在月球附近组装并运行，是一座载人空间站，可为空间等离子体物理学领域的基础研究和应用研究带来新的机遇。这些研究具有多学科特性，包括：

– 研究月球空间环境及其与太阳风和地球磁尾等离子体的相互作用。– 地球空间天气：通过遥感技术监测地球磁层和外逸层对太阳活动事件的响应。– 行星空间天气：通过原位测量和遥感监测月球空间环境对太阳活动事件的响应。– 辐射物理：描述月球高能粒子环境的特征，包括对这些粒子群及其变化进行能量与质谱分析；尤其要考虑到阿耳忒弥斯载人任务前往月球以及相关的辐射风险。– 通过对沿磁尾流动的离子进行原位测量，研究地球电离层中的重离子逃逸，以及这种逃逸对地球大气成分长期演化（及其宜居性）的作用。– 研究由月壤、受其限制的外逸层和行星际空间环境构成的复杂相互作用多尺度系统，并将其作为无磁行星体与太阳风相互作用的典型范例。– 研究月球“月球旋涡”上方形成的微型磁层；它们可能是太阳系中最小的磁层。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

– 理解月球表面在复杂且相互作用的等离子体环境中形成的表面电场，以及这些电场在月尘静电悬浮中的作用。– 行星学：通过对反照高能粒子进行光谱测量，了解月壤的成分及其水合情况。

为筹备月球轨道平台-门户的科学载荷，我们首先在欧洲航天局的支持下组建了一个专题团队，负责制定并支持空间等离子体物理领域载荷研究的定义工作。借此，我们确定了可在月球轨道平台-门户上开展研究的科学目标、为实现这些目标所需测量的物理参数，以及用于进行相应原位测量和遥感观测的仪器设备。

随后，我们为欧洲航天局开展了“门户号上的空间等离子体物理有效载荷包”（SP4GATEWAY）的概念设计研究，旨在实现专题团队确定的目标，同时满足技术要求。该概念设计以典型的“门户二期”构型为基准。

作为这项概念设计研究的第一部分，我们模拟了门户与其等离子体环境之间的相互作用，分别考虑门户位于太阳风中以及位于地球磁尾中的情况。借此，我们确定了受门户影响、天然等离子体环境扰动最小的门户舱段，因此这些舱段最适合安装原位测量等离子体仪器。

随后，我们根据相关要求定义了一个模型有效载荷，由一套用于原位测量和遥感观测的仪器组成。这些测量仪器大多基于现有的经过飞行验证的仪器，并针对月球等离子体环境进行了改造，或基于经过测试和验证的实验室原型。我们已确定这些仪器的主要特性，并 elaborated 出仪器的计算机辅助设计概念方案。不过，在后续的 A 阶段研究中，还需进一步完善这些仪器的测量特性。

下一步是研究如何将这一模型有效载荷安装到门户舱段上，同时考虑各种约束，尤其是各门户舱段的表面与体积充电、它们暴露于周围等离子体的情况，以及仪器的指向和视场要求。由此形成了一套集成计算机辅助设计方案，其中包括门户及仪器；这些仪器被分组安装在后勤舱两侧的两个平台上。

随后，通过模拟遥感仪器和高能粒子仪器的视场沿门户轨道的变化，分析了这些视场在天空及天体上的投影情况。这有助于验证视场的方向是否合适，以及能否覆盖观测科学目标。

通过这项针对门户号上的空间等离子体物理有效载荷包的概念设计研究，可以得出结论：门户非常适合开展空间等离子体物理研究，并有助于实现一系列相关科学目标。

6 表格

表 1 | 门户上的监测物理参数／可观测量

原位测量	太阳风（粒子 + 场）
	地球前震区
	太阳高能粒子、银河宇宙射线（月球产生的原始次级粒子，来自不同方向）
	高能电子
	磁尾、磁鞘等离子体（粒子、场）
	流出的地球离子（离子能谱测量）
	月球拾取离子（离子能谱测量）
	门户诱导的等离子体与磁场环境
	月球尾迹
成像	兆电子伏中性原子：由太阳高能粒子产生
	能量中性原子：地球环电流和等离子体片
	低能中性原子（来自太阳风和月球）
	太阳风电荷交换X射线：磁鞘／磁层顶 + 尖点区 + 行星机会目标
	紫外线／极紫外线：地球等离子体层
	紫外线／极紫外线：地冕、月球外逸层、太阳极紫外辐射测量
	极光成像、行星成像
	日球层成像
	月球表面微流星体撞击
主动实验	气体释放和电离

这是临时文件，并非最终排版的文章

表格 2 | 从低月球轨道监测的物理参数/可观测量

原位测量	地壳磁异常（等离子体 + 磁场 + 能量中性原子 + 电子反射测量）
	太阳风离子中和
	月球外逸层／电离层（原位测量）
	尘埃等离子体
成像	月球外逸层／电离层（成像）

表格 3 | 从月球表面监测的物理参数／观测量

原位测量	高能离子注入 / 反射
	月球表面静电充电 + 尘埃
	地壳磁异常
	磁层射电辐射
	月球外逸层
成像	太阳风电荷交换X射线：磁鞘/磁层顶 + 尖点区 + 行星机会目标

表 4 | 科学目标及相应的测量和仪器要求（从门户上）

科学目标	测量要求	原位测量仪器	遥感仪器
监测作为驱动因素的太阳风 地球……动力学 磁层、地球的 月球外逸层、月球表面 溅射和充电	太阳风密度和输运速度 1 – 10^2 厘米$^{-3}$、0.1 – 40 千电子伏离子 200–1000 千米/秒，$\Delta E/E < 17\%$	法拉第杯 静电分析器	-
	行星际磁场：100 nT 仪器量程 1 nT / 0.1 nT 绝对 / 相对分辨率	磁强计	-
监测并表征 太阳高能粒子和银河宇宙射线 辐射环境 以及月球表面溅射源	40 千电子伏至 100 兆电子伏离子（太阳高能粒子） 最高达 ~5 GeV（银河宇宙射线） 50 兆电子伏/核子，用于成分 ~40 千电子伏至 ~30 兆电子伏电子	高能粒子探测器	MeV能量中性原子成像仪
监测并表征 地球 磁层对 太阳风的响应，并利用宽广的 覆盖范围 f 地球空间	探测并成像太阳风电荷交换X射线 0.2 – 2.0 千电子伏 视场 10° × 10° 角分辨率： 距月球 0.3 R_E	-	软X射线成像仪
	探测并成像地球磁层能量中性原子 ~1 – 300 千电子伏，视场 ~ 20° × 20°		能量中性原子成像仪
监测太阳风与 月球外逸层的相互作用， 月壤和磁异常	探测并成像低能中性原子：0.1 – 10 千电子伏，30 % $\Delta E/E$， 视场 ~ 20° × 20°，~5° 分辨率 强紫外抑制：10^{-8}	-	LENA成像仪
揭示太阳风 附近的离子动力学 月球磁异常	探测并成像低能中性原子：0.01 – 3 千电子伏，30 % $\Delta E/E$， 视场 ~ 5° × 120°，~5° 分辨率	-	LENA成像仪
监测地球 和月球外逸层， 等离子体层	探测并成像极紫外辐射 30.4、83.6、121.6 和 130.4 nm ~5 角分辨率	离子质谱仪 （月球拾取离子）	紫外线／极紫外线成像光谱仪
监测周围等离子体 不同环境 （太阳风／磁鞘／ 地球磁尾／ 月球尾迹）	等离子体密度和温度 ~0.01–40 千电子伏，10^{-3} –10^2 厘米$^{-3}$ 离子成分：$m/\Delta m > 15$	朗缪尔探针 离子质谱仪 电子能谱仪	-
	磁场：1000 nT 量程 1 nT / 0.1 nT 绝对/相对分辨率	磁强计	-
监测磁层的 和行星射电辐射			射电仪器

这是一份临时文件，并非最终排版的文章

表格 5 | SP4Gateway基准有效载荷仪器

仪器 首字母缩略词	仪器	Mass (kg)	功率 (W)	FOV	视场指向
cMAGF	磁力计	3.5	4.3	N/A	N/A
cSWIS	太阳风离子能谱仪	5	7	96° × 48°	Sun
cSWFC	太阳风法拉第杯	5	4	45° × 45° (×6)	Sun
cMISP	磁层离子能谱仪	7	8	360° × 120°	N/A
cMESP	磁层电子能谱仪	3	6	360° × 120°	N/A
cENPD	高能粒子探测器	3	6	60° × 60°（×2）	月球 / 天空
cGCRD	银河宇宙射线探测器	10	20	71° × 71°	月球 / 天空
cHENA	高能中性原子成像仪	15	12	120° × 90°, 转动	地球
cMENA	中能中性原子成像仪	5	15	90° × 10°, 转动	地球 / 月球
cLENA	低能中性原子成像仪	4	10	15° × 15°	Moon
cUVIS	紫外成像光谱仪	10	15	0.1° × 7.5°, 转动	地球 / 月球
cLPEF	朗缪尔探针与电场	1.2	5	N/A	N/A
cWAVE	Waves射电仪器	5.6	8.6	N/A	N/A

质量和功率：标称值，不含裕度，且这些值已包含伸展杆和关节机构；*FOV*：视场；*N/A*：不适用

7 利益冲突

作者声明，本研究是在不存在任何可能被视为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下开展的。

8 作者贡献

ID 是专题团队“月球轨道平台-门户空间等离子体物理学科学机遇”的协调员、SP4GATEWAY 项目的协调员，也是本文的主要作者。MGGT 是专题团队和 SP4GATEWAY 项目的欧洲航天局支持科学家。JDK、YF、RAB、GBR、JYF、DG、BG、HL、FL、AM、RN 和 ER 是专题团队及 SP4GATEWAY 项目团队成员。PD 是 SP4GATEWAY 项目的首席工程师。EDA、JE、ME、PG、DH、LP 和 ŠŠ 是 SP4GATEWAY 项目团队成员。AL 负责计算机辅助设计。JF、AT、SLGH 和 JCMV 开展了门户—等离子体环境模拟。JC 是欧洲航天局载人和机器人探索（HRE）联络人。JW 是欧洲航天局 SP4GATEWAY 项目的经理。

9 资助

“月球轨道平台-门户空间等离子体物理学科学机遇”专题团队获得了欧洲航天局通过合同编号 4000128802 / 19/NL/PG/pt 提供的支持。SP4GATEWAY 项目由欧洲航天局通过合同编号 4000128461/19/NL/FC 资助。IRAP 的相关活动也获得了法国国家空间研究中心通过订单 4500065232 提供的支持。

10 致谢

我们感谢 CNES PASO 对 SP4GATEWAY概念设计研究的支持。

11 参考文献

Allegrini, F., Dayeh, M. A., Desai, M. I., 等（2013）。星际边界探测器（IBEX）测得的月球高能中性原子（ENA）能谱。《行星与空间科学》，85，doi: 10.1016/j.pss.2013.06.014 André, M., Toledo-Redondo, S., 和 Yau, A. W.（2021）。磁层中的冷电离层离子。太阳系中的磁层，地球物理专著 259，第 15 章，doi: 10.1002/9781119815624.ch15 Angelopoulos, V.（2011）。ARTEMIS 任务。《空间科学评论》，doi: 10.1007/s11214-010-9687- Artemis III 科学定义团队报告（2020），美国国家航空航天局报告 NASA/SP-20205009602 Auster, H. U., Glassmeier, K. H., Magnes, W., 等（2008）。THEMIS 磁通门磁力计。《空间科学评论》，141，doi: 10.1007/s11214-008-9365-9 Balogh, A., Carr, C. M., Acuña, M. H., Dunlop, M. W., Beek, T. J., Brown, P., Fornacon, K.-H., Georgescu, E., Glassmeier, K.-H., Harris, J., Musmann, G., Oddy, T., 和 Schwingenschuh, K.（2001年）。Cluster 磁场调查：在轨性能和初步结果概述。《*Annales Geophysicae*》，19，1207–1217，doi: 10.5194/angeo-19-1207-2001 Bamford, R. A., Alves, E. P., Cruz, F., Kellett, B. J., Fonseca, R. A., Silva, L. O., Trines, R. M. G. M., Halekas, J. S., Kramer, G., Harnett, E., Cairns, R. A.; 和 Bingham, R.（2016年）。三维粒子网格法

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

月球磁异常处无碰撞激波的模拟及其在形成月球旋涡中的作用。《天体物理学杂志》，doi: 10.3847/0004-637X/830/2/146 Benna, M., Mahaffy, P. R., Halekas, J. S., Elphic, R. C., 和 Delory, G. T.（2015年）。LADEE 中性气体与离子质谱仪观测到的月球外逸层中氦、氖和氩的变化。《地球物理研究快报》，doi: 10.1002/2015GL064120 Bosqued, J. M., Lormant, N., Rème, H., d'Uston, C., Lin, R. P., Anderson, K. A., Carlson, C. W., Ergun, R. E., Larson, D., McFadden, J., McCarthy, M. P., Parks, G. K., Sanderson, T. R., Wenzel, K.-P.（1996年）。月球—太阳风相互作用：WIND/3DP 实验的首批结果。《地球物理研究快报》，doi: 10.1029/96GL00303。Brandt, P. C:son, Roelof, E. C., Ohtani, S., Mitchell, D. G., 和 Anderson, B.（2004年）。IMAGE 高能中性原子成像仪：2002年10月1日磁暴期间的压力和电流分布。《*Adv. Space Res.*》，doi: 10.1016/S0273-1177(03)00633-1 Branduardi-Raymont 等（2012年）。AXIOM：磁层的先进X射线成像。《实验天文学》，doi: 10.1007/s10686-011-9239-0 Branduardi-Raymont, G., Berthomier, M., Bogdanova, Y. V. 等（2021年）。探索太阳—地球

l

通过多个成像观测器进行相互作用观测。实验天文学，doi：10.1007/s10686-021-09784-y Burinskaya, T. M. (2015). 暴露于……的月球向阳面上方的非单调电势

e

太阳辐射。《行星与空间科学》，doi: 10.1016/j.pss.2015.03.004 Cao, J., Ma, Y., Parks, G., Rème, H., Dandouras, I., and Zhang, T. (2013)。等离子体片中爆发性整体流能量输运的动力学分析。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/2012JA018351 Cara, A., Lavraud, B., Fedorov, A., De Keyser, J., DeMarco, R., Marcucci, M. F., Valentini, F., Servidio, S., and Bruno, R. (2017)。用于高时间、能量和角分辨率太阳风质子测量的静电分析器设计。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1002/2016JA023269 Carpenter, J., Speak, C., Chouker, A., Talevi, M., Nakamura, R., Santangelo, A., Crawford, I., Cullen, D., Bussey, B., and Grenouilleau, J. (2018)。深空门户的研究机遇：研讨会和创意征集活动的发现，ESA-HSO-K-RP-0284 Chassefière, E., Maria, J.-L., Goutail, J.-P., Quémerais, E., Leblanc, F., 等（2010）。PHEBUS：用于观测水星外逸层的双紫外光谱仪。《行星与空间科学》，doi: 10.1016/j.pss.2008.05.018 Chin, G., Brylow, S., Foote, M., Garvin, J., Kasper, J., Keller, J., Litvak, M., Mitrofanov, I., Paige, D., Raney, K., Robinson, M., Sanin, A., Smith, D., Spence H., Spudis, P., Stern, S. A., and Zuber, M. (2007)。月球勘测轨道飞行器概述：仪器套件与任务。《空间科学评论》，129, 391–419, doi: 10.1007/s11214-007-9153-y Christon, S. P., Gloeckler, G., Williams, D. J., Mukai, T., McEntire, R. W., Jacquey, C., Angelopoulos, V., Lui, A. T. Y., Kokubun, S., Fairfield, D. H., Hirahara, M., and Yamamoto, T. (1994)。远距离磁尾流向反转事件中观测到的电离层源高能原子离子和分子离子。《地球物理研究快报》，21(25), 3023–3026 Christon, S. P., Hamilton, D. C., Mitchell, D. G., Plane, J. M. C., and Nylund, S. R. (2020)。地球、木星和土星及其附近的超热磁层原子重离子和分子重离子：观测与鉴定《地球物理研究杂志》，125, doi: 10.1029/2019JA027271

Collier, M. R., 等（2015）。首次搭载龙虾眼光学系统宽视场软X射线成像仪的太空飞行：仪器说明与初步飞行结果。《科学仪器评论》， doi: 10.1063/1.492725 Constantinescu, O. D., Auster, H.-U., Delva, M., Hillenmaier, O., Magnes, W., and Plaschke, F. (2020)。利用最大方差梯度仪技术从磁场数据中去除航天器产生的干扰。《地球科学仪器、方法与数据系统》， doi: 10.5194/gi-9- 451-2020 Cornilleau-Wehrlin, N., Chanteur, G., Perraut, S., Rezeau, L., 等（2003）。Cluster STAFF实验获得的首批成果。《地球物理年鉴》， doi: 10.5194/angeo-21-437-2003 Crider, D. H., and Vondrak, R. R. (2003)。空间风化对月球冷阱沉积物的影响。《地球物理研究杂志》， doi: 10.1029/2002JE002030 C:son Brandt, P., Mitchell, D. G., Ebihara, Y., Sandel, B. R., Roelof, E. C., Burch, J. L., and Demajistre, R. (2002)。IMAGE 高能中性原子成像仪对环电流的全球观测：对行星际磁场的快速响应以及环电流与等离子体层的相互作用实例。《地球物理研究杂志》， doi: 10.1029/2001JA000084 Dandouras, I., Yamauchi, M., De Keyser, J., 等（2018）。ESCAPE：提交给ESA-M5的任务提案，旨在利用欧洲、日本和美国的仪器，系统研究外逸层与大气逃逸。*ISAS*研讨会论文集，日本，2018年 https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/876320Dandouras, I., Blanc, M., Fossati, L. 等（2020a）。关于测定地球、月球和类地行星元素及同位素组成的未来任务。《空间科学评论》， 216, doi: 10.1007/s11214-020-00736-0 Dandouras, I., Bamford, R. A., Branduardi-Raymont, G., Chaufray, J.-Y., Constantinescu, D., De Keyser, J., Futaana, Y., Lammer, H., Milillo, A., Nakamura, R., Roussos, E., Grison, B., and Taylor, M. G. G. T. (2020b)。ESA专题小组报告："月球轨道平台-门户空间等离子体物理科学机遇"。*ESA*报告Dandouras, I. (2021)。地球磁层中的离子外流与逃逸：Cluster的新进展。《地球物理研究杂志》， doi: 10.1029/2021JA029753 Darrouzet, F., Gallagher, D. L., André, N. 等（2008）。等离子体层密度结构与动力学：Cluster和IMAGE任务的观测特性。《空间科学评论》， doi: 10.1007/s11214-008-9438-9 Deca, J., Divin, A., Lembège, B., Horányi, M., Markidis, S., and Lapenta, G. (2015)。基于三维粒子网格模拟的太阳风与月球磁异常相互作用的一般机制和动力学，《地球物理研究杂志》， doi : 10.1002/2015JA021070De Keyser, J., Lavraud, B., Přech, L., Neefs, E., Berkenbosch, S., Beeckman, B., Fedorov, A., Marcucci, M. F., De Marco, R., and Brienza, D. (2018)。利用高能量和角分辨率快速获取太阳风速度分布函数的束流跟踪策略

s.

《*Annales Geophysicae*》, 36, 1285–1302, doi: 10.5194/angeo-36-1285-2018 De Keyser, J., et al.,（2020年）。深空门户空间物理载荷（SP4GATEWAY）：需求清单。*ESA*报告, SP4GATEWAY-REQ-i01r05 Devoto, P., Médale, J.-L., 和 Sauvaud, J.-A.（2008年）。空间仪器表面的分布式离子散射所产生的二次电子发射。*Rev. Sci. Instr.*, 79, 046111, doi: 10.1063/1.2912821

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

Devoto, P., 和 Dandouras, I.（2020年）。SP4Gateway概念设计报告。*ESA*报告, SP4G-IRAP-TN-001 Dougherty, M. K., Kellock, S., Southwood, D. J. 等（2004年）。卡西尼磁场探测。*Space Sci. Rev*., 114, doi: 10.1007/s11214-004-1432-2 Du, A. M., Nakamura, R., Zhang, T. L., Panov, E. V., Baumjohann, W., Luo, H., Xu, W. Y., Lu, Q. M., Volwerk, M., Retinò, A., Zieger, B., Angelopoulos, V., Glassmeier, K.-H., McFadden, J. P.

以及 Larson, D.（2011）。亚暴期间等离子体片边界层中的快速尾向流 m
于2008年3月9日：THEMIS观测。《地球物理研究杂志》，doi：10.1029/2010JA015969 Elphic, R. C.、Delory, G. T.、Hine、Butler P.、Mahaffy, P. R.、Horanyi、Colaprete、A.、Benna, M.

以及 Noble, S. K.（2014）。月球大气与尘埃环境探测器任务。太空 *ce*
科学评论，doi：10.1007/s11214-014-0113-z Farrell, W. M.、Stubbs, T. J.、Vondrak, R. R.、Delory, G. T. 和 Halekas, J. S.（2007）。月球晨昏线附近的复杂电场：近表面尾迹与加速尘埃。《地球物理研究快报》，doi：10.1029/2007GL029312 Farrell, W. M.、Hurley, D. M.、Esposito, V. J.、McLain, J. L. 和 Zimmerman, M. I.（2017年）。月球磁异常内太阳风羟基化的统计力学

以及在火卫一上。*J. Geophys. Res*., doi: 10.1002/2016JE005168 Futaana, Y., Barabash, S., Holmström, M., and Bhardwaj, A.（2006）。月球的低能中性原子成像。*Planetary and Space Sci*., 54, doi: 10.1016/j.pss.2005.10.010 Futaana, Y., Nakano, S., Wieser, M., and Barabash, S.（2008）。高能中性原子掩星：研究月球外逸层的新型遥感技术. *J. Geophys. Res*., doi: 10.1029/2008JA013356 Futaana, Y., et al.（2012年）。来自月壤的中和太阳风质子的经验能谱. *J. Geophys. Res*., doi: 10.1029/2011JE004019 Futaana, Y., Barabash, S., Wieser, M., Lue, C., Wurz, P., Vorburger, A., Bhardwaj, A., and Asamu ra,

K. (2013). 月球磁异常上方电势的远程高能中性原子成像。《地球物理研究快报》, doi: 10.1002/grl.50135 Futaana, Y., et al. (2018). SELMA任务：无大气天体如何与空间环境相互作用？月球：可利用的实验室。《*Planet. Space Sci.*》, doi: 10.1016/j.pss.2017.11.002 Futaana, Y., et al. (2020). SP4Gateway计划评估。*ESA*报告, SP4G_IRF-TN-001 Gebauer, S., Grenfell, J. L., Lammer, H., Paul de Vera, J.-P., Sproß, L., Airpetian, V. S., Sinnhuber, M., and Rauer, H. (2020 20, 1413 1426, 101089 20192212). 地球上生命演化时的大气氮。天体生物学, – doi: . /ast. . Geiss, J., Bühler, F., Cerutti, H., Eberhardt, P., Filleux, Ch., Meister, J., and Signer, P. (2004). 阿波罗太阳风成分实验：结果、结论与影响。《空间科学评论》, doi: 10.1023/B:SPAC.0000023409.54469.40 Glassmeier, K.-H., Auster, H.-U., Heyner, D., Okrafka, K., Carr, C., et al., (2010). 贝皮科伦坡水星轨道飞行器的磁通门磁力仪。行星与空间科学, doi: 10.1016/j.pss.2008.06.018 Glotch, T., Bandfield, J., Lucey, P. et al. (2015). 由磁场支撑形成月球旋涡 ff

太阳风。《自然通讯》，doi：10.1038/ncomms7189

Goldstein, J., Valek, P. W., McComas, D. J. 和 Redfern, J.（2022年）。平均环电流响应 t o 太阳风驱动因素：对61天ENA图像的统计分析。《地球物理研究杂志》， doi: 10.1029/2021JA029938 Grava, C., Chaufray, J.-Y., Retherford, K. D., Gladstone, G .R., Greathouse, T.K., Hurley, D. M., Hodges, R .R., Bayless, A. J., Cook, J. C., and Stern, S. A. (2015). 月球外逸层氩建模。《伊卡洛斯》， doi: 10.1016/j.icarus.2014.09.029 Grava, C., Retherford, K. D., Hurley, D. M., Feldman, P. D., Gladstone, G. R., Greathouse, T. K., Cook, J. C., Stern, S. A., Pryor, W. R., Halekas, J. S., and Kaufmann, D. E. (2016). 与ARTEMIS协同观测的LRO/LAMP月球外逸层氦。《伊卡洛斯》， doi: 10.1016/j.icarus.2015.10.033 Grava, C., Killen, R. M., Benna, M. et al. (2021). 内太阳系表面束缚外逸层中的挥发性物质和难熔物质。《空间科学评论》， doi: 10.1007/s11214-021-00833-8 Grigorenko, E. E., Runov, A., Angelopoulos, V., and Zelenyi, L. M. (2019). 根据ARTEMIS近月观测研究磁分离面附近的粒子束。《地球物理研究杂志》， 124， doi: 10.1029/2018JA026160 Grün, E., Horanyi, M., and Sternovsky, M. (2011). 月尘环境。《*Planet. Space Sci.*》， doi: 10.1016/j.pss.2011.04.005 Gurnett, D. A., Kurth, W. S., Kirchner, D. L., Hospodarsky, G. B., et al. (2004). 卡西尼号无线电与等离子体波科学调查，《空间科学评论》， 114， doi: 10.1007/s11214-004-1434-0 Halekas, J. S., Delory, G. T., Farrell, W. M., Angelopoulos, V., McFadden, J. P., Bonnell, J. W., Fillingim, M. O., and Plaschke, F. (2011). ARTEMIS首次实现月球表面充电的遥感测量：向阳面表面上方存在非单调鞘层电势的证据。《地球物理研究杂志》， doi: 10.1029/2011JA016542 Halekas, J. S., Benna, M., Mahaffy, P. R., Elphic, R. C., Poppe, A. R., and Delory, G. T. (2015). LADEE中性粒子质谱仪探测到的月球外逸层离子。《地球物理研究快报》， doi: 10.1002/2015GL064746 Hapke, B. (2001). 从水星到小行星带的空间风化。《地球物理研究杂志》， 106， 10039

10073, doi: 10.1029/2000JE001338 Harada, Y., Poppe, A. R., Halekas, J. S., Chamberlin, P. C., and McFadden, J. P.（2017年）。地球磁尾瓣区月球昼侧表面的光电子发射和静电势。《地球物理研究快报》, doi: 10.1002/2017GL073419 Harnett, E. M., Cash, M., and Winglee, R. M.（2013年）。月球位于地球磁层内时，亚暴和磁暴期间的电离层粒子通量。《伊卡洛斯》, doi: 10.1016/j.icarus.2013.02.022 Hartle, R. E., and Killen, R.（2006年）。测量拾取离子以表征行星天体的表面和外逸层：月球应用。《地球物理研究快报., 33, doi: 10.1029/2005GL024520 He, F., Zhang, X.-X., Chen, B., Fok, M.-C., and Nakano, S.（2016年）。根据嫦娥三号极紫外相机图像确定地球等离子体层顶位置。*J. Geophys. Res*., doi: 10.1002/2015JA021863 Hemingway, D. J., Garrick-Bethell, I., and Kreslavsky, M. A.（2015年）。能谱的纬度变化

月海的性质及其对空间风化的意义。《伊卡洛斯》， doi: 10.1016/j.icarus.2015.08.004

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

Hemingway, D. J., and Tikoo, S. M.（2018）。月球旋涡形态对月球磁异常的几何形状、磁化特征及起源的约束。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/2018JE005604 Hess, S. L. G., Sarrailh, P., Matéo-Vélez , J.-C., Jeanty-Ruard, B., Cipriani, F., Forest, J., Hilgers, A., Honary, F., Thiébault, B., Marple, S. R., and Rodgers, D.（2015）。用于模拟尘埃静电荷电、输运及其对月球探测器污染的 SPIS 新功能。《*IEEE*等离子体科学汇刊，43（9），2799–2807，doi: 10.1109/TPS.2015.2446199 Hess, S. L. G., Sarrailh, P., Villemant, M., and Trouche, A.（2020）。月球轨道平台-门户静电环境建模。*ONERA - Artenum* 报告，SPACESUITE-2020-IRAP-RF Hodges, R. R., Jr.（2016）。月球外逸层中的甲烷：对太阳风碳逃逸的启示。《地球物理研究快报》，doi: 10.1002/2016GL068994 Honniball, C.I., Lucey, P.G., Li, S. 等（2021）。SOFIA 在受阳照射的月球上探测到分子水。《自然天文学》，doi: 10.1038/s41550-020-01222-x Horányi, M., Szalay, J., Kempf, S. 等（2015）。月球周围永久存在的不对称尘埃云。《自然》，doi: 10.1038/nature14479 Hurley, D. H., Cook, J. S., Benna, M., Halekas, J. S., Feldman, P. D., Retherford, K. D., Hodges, R. R., Grava, C., Mahaffy, P., Gladstone, G. R., Greathouse T., Kaufmann, D. E., Elphic, R. C., and Stern, S. A.（2016）。利用月球勘测轨道飞行器、LADEE 和 ARTEMIS 的同步观测，了解月球氦大气在时间和空间上的变化。《伊卡洛斯》，273，doi: 10.1016/j.icarus.2015.09.011 Hurley, D. H., and Benna, M.（2018）。流星体撞击引发的月球外逸层水事件模拟。《*Planetary Space Sci.*》，doi: 10.1016/j.pss.2017.07.008 Ireland, T. R., Holden, P., Norman, M. D., and Clarke, J.（2006）。月壤中来自太阳风粒子的 ^{17}O 和 ^{18}O 同位素丰度增强。《自然快报》，doi: 10.1038/nature04611 Johnstone, C. P., Lammer, H., Kislyakova, K. G., Scherf, M., and Güdel, M.（2021）。年轻太阳的 XUV 活动对地球太古宙大气中 CO_2下限的约束。《地球与行星科学快报》，576，117197，doi: 10.1016/j.epsl.2021.117197 Jones, B. M., Aleksandrov, A., Hibbitts, K., Dyar, M. D., and Orlando, T. M.（2018）。太阳风驱动的月球水循环。《地球物理研究快报》，doi: 10.1029/2018GL080008 Kaiser, M. L., and Alexander, J. K.（1976）。从月球轨道测得的地球千米波辐射源位置。《地球物理研究快报》，doi: 10.1029/GL003i001p00037 Kallio, E., and Facskó, G.（2015）。磁尾中月球附近等离子体的性质。《*Planet. Space Sci.*》，doi: 10.1016/j.pss.2014.11.007 Kallio, E., S. Dyadechkin, P. Wurz, and M. Khodachenko（2019）。月球空间风化：月球背面与正面太阳风沉降不对称。《*Planet. Space Sci.*》，166，9–22，doi: 10.1016/j.pss.2018.07.013 Kislyakova, K. G., Johnstone, C. P., Scherf, M., Holmström, M., Alexeev, I. I., Lammer, H., Khodachenko, M. L., and Güdel, M.（2020）。地球极区外流从太古宙中期至今的演化。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/2020JA027837

Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Hamilton, D. C., Livi, S., Dandouras, J., Jaskulek, S., 等（2004年）。卡西尼号任务前往土星/土卫六的磁层成像仪（MIMI）。《空间科学评论》，114, doi: 10.1007/s11214-004-1410-8 Kronberg, E. A., Daly, P. W., Grigorenko, E. E., Smirnov, A. G., Klecker, B., and Malykhin, A. Y.（2021）。地球磁层中的高能带电粒子：Cluster/RAPID 的研究结果。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/2021JA029273 Lammer, H., Kasting, J. F., Chassefière, E., Johnson, R. E., Kulikov, Y. N., and Tian, F.（2008）。类地行星和卫星的大气逃逸与演化。《空间科学评论》，doi: 10.1007/s11214-008-9413-5 Lammer, H., Zerkle, A. L., Gebauer, S., Tosi, N., Noack, L., Scherf, M., Pilat-Lohinger, E., Güdel, M., Grenfell, J. K., Godolt, M., and Nikolaou, A.（2018）。早期金星、地球和火星大气层的起源与演化。《天文学与天体物理学评论》，26:2，doi: 10.1007/s0015

9-

018-0108-y Lammer, H.、Scherf, M.、Ito, Y.、Mura, A.、Vorburger, A.、Guenther, E.、Wurz, P.、Erkaev, N. V.，和 d

Odert, P.（2022年）。外逸层作为边界：内 er

太阳系及更远区域中无大气天体的起源与演化，包括具有硅酸盐大气的行星。《空间科学评论》，218:15，doi: 10.1007/s11214-022-00876-5 Leblanc, F. 和 Chaufray, J. Y.（2011年）。水星和月球氦外逸层：分析与建模。《伊卡洛斯》，doi: 10.1016/j.icarus.2011.09.028 Leblanc, F., Schmidt, C., Mangano, V. 等（2022年）。水星与月球钠、钾外逸层的比较。《空间科学评论》，218，doi: 10.1007/s11214-022-00871-w Lebreton, J.-P., Stverak, S., Travnicek, P., Maksimovic, M. 等（2006年）。DEMETER上的ISL朗缪尔探针实验处理：科学目标、描述及初步结果。《*Planet. Space Sci.*》，54，doi: 10.1016/j.pss.2005.10.017 Lefeuvre, F., Blanc, E., Pinçon, J. L. 等（2008年）。TARANIS——专门研究瞬态发光事件和地面伽马射线闪物理学的卫星项目。《空间科学评论》，137，doi: 10.1007/s11214-008-9414-4 Liu, Y., Guan, Y., Zhang, Y. 等（2012年）。月壤中羟基的直接测量及月球表面水的起源。*Nature Geosci.*，doi: 10.1038/ngeo1601 Looper, M. D. 等（2013年）。月球表面附近的辐射环境：CRaTER观测与Geant4模拟。*Space Weath.*, 11，doi: 10.1002/swe.20034 Marty, B., Hashizume, K., Chaussidon, M. 和 Wieler, R.（2003年）。月球上的氮同位素：太阳和行星对内太阳系贡献的档案。《空间科学评论》，106，175 196，101023 1024689721371 – doi: . /A: McComas, D. J., Allegrini, F., Bochsler, P. 等（2009a）。月球反向散射与中和

e

太阳风：来自月球的中性原子的首次观测。《地球物理研究快报》，36，doi: 10.1029/2009GL038794 McComas, D. J., Allegrini, F., Baldonado, J., 等（2009b）。双宽视场成像中性原子能谱仪（TWINS）美国国家航空航天局机会任务。《空间科学评论》，142，doi: 10.1007/s11214-008-9467-4 McCord, T. B., Taylor, L. A., Combes, J-P., Kramer, G., Pieters, C. M., Sunshine, J. M. 和 Clark, R. N.（2011）。月球矿物制图仪（M^3）揭示的月壤中羟基/水的来源及其相关物理过程。《地球物理研究杂志》，116, doi: 10.1029/2010JE003711

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

McLain, J. L., Loeffler, M. J., Farrell, W. M., Honniball, C. I., Keller, J. W. 和 Hudson, R.（2021）。太阳风质子对阿波罗17号土壤样本78421的羟基化。《地球物理研究杂志》，126, doi: 10.1029/2021JE006845 Mewaldt, R. A., Leske, R. A., Stone, E. C., Barghouty, A. F., Labrador, A. W., Cohen, C. M. S., Cummings, A. C., Davis, A. J., von Rosenvinge, T. T. 和 Wiedenbeck, M. E.（2009）。STEREO对2006年12月5日太阳耀斑期间高能中性氢原子的观测。《天体物理学杂志》，doi: 10.1088/0004-637X/693/1/L11 Mitchell, D., Jaskulek, S., Schlemm, C. 等（2000）。IMAGE任务的高能中性原子（HENA）成像仪。《空间科学评论》，91, doi: 10.1023/A:1005207308094 Mitchell, D. L., Mazelle, C., Sauvaud, J. A. 等（2016）。MAVEN太阳风电子分析仪。《空间科学评论》，200，doi: 10.1007/s11214-015-0232-1 Mrigakshi, A. I., Matthiä, D., Berger, T., Reitz, G. 和 Wimmer-Schweingruber, R. F.（2012）。银河宇宙射线模型评估。《地球物理研究杂志》，117，doi: 10.1029/2012JA017611 Nagai, T., Tsunakawa, H., Shibuya, H., Takahashi, F., Shimizu, H., Matsushima, M., Nishino, M. N.

，

Yokota, Y., Asamura, K., Tanaka, T., Saito, Y., and Amm, O. (2009). 多次起始亚暴中的等离子体团形成：日本月球探测任务“辉夜号”的观测。《*Annales Geophysicae*》., 27, doi: 10.5194/angeo-27-59-2009 Nakamura, R. (2006). 亚暴及其太阳风成因。*Space Sci. Rev*., doi: 10.1007/s11214-006-9131-9 Nénon, Q., and Poppe, A. R. (2020). 太阳风重微量离子对无大气天体表面的长期风化作用：离子观测和SRIM模拟带来的启示。*Planet. Sci. J*., doi: 10.3847/PSJ/abbe0c Nénon, Q., and Poppe, A. R. (2021). 黄道面外离子对月球极区陨石坑内部的轰击：ARTEMIS观测。*Planet. Sci. J.*, doi: 10.3847/PSJ/abfda2 Nishino, M. N., et al. (2010). 太阳风质子进入月球最深处尾迹的影响。*Geophys. Res. Lett*., doi: 10.1029/2010GL043948 Orsini, S., Livi, S.A., Lichtenegger, H. et al. (2021). SERENA：用于确定贝皮科伦坡号太阳—水星相互作用的粒子仪器套件。*Space Sci. Rev*., 217, doi: 10.1007/s11214-020-00787-3 Ozima, M., Seki, K., N. Terada, K., Miura, Y. N., Podosek, F. A., and Shinagawa, H. (2005). 月壤中的地球氮和稀有气体。《自然》, doi: 10.1038/nature03929 Parks, G., Chen, L., Fillingim, M., et al. (2001). 等离子体片动力学的动力学特征。*Space Sci. Rev*., 95, doi: 10.1023/A:1005206701965 Pieters, C. M., and Noble, S. K. (2016). 无大气天体的空间风化。《地球物理研究杂志》, doi: 10.1002/2016JE005128 Plainaki, C., Lilensten, J., Radioti, A., Andriopoulou, M., Milillo, A., Nordheim, T. A., Dandouras, I., Coustenis, A., Grassi, D., Mangano, V., Massetti, S., Orsini, S., and Lucchetti, A. (2016). 行星空间天气：科学方面与未来展望。*J. Space Weather Space Clim*., doi: 10.1051/swsc/2016024 Popel, S. I., Zelenyi, L. M., Golub, A. P., and Dubinskii, A. Yu. (2018). 月尘与尘埃等离子体：最新进展、发展与未解难题。*Planet. Space Sci*., doi: 10.1016/

Popel、S. I.、Golub、A. P.、Kassem、A. I. 和 Zelenyi、L. M.（2022年）。月尘中的尘埃动力学 y
等离子体：磁场和尘埃电荷变化的影响。等离子体物理学，doi: 10.1063/5.0077732
Poppe, A. R., Samad, R., Halekas, J. S., Sarantos, M., Delory, G. T., Farrell, W. M., Angelopoulos, V., 和 McFadden, J. P. (2012a). ARTEMIS 对地球磁尾瓣区月球拾取离子的观测。地球物理研究快报，doi: 10.1029/2012GL052909 Poppe, A. R., Piquette, M., Likhanskii, A., 和 Horányi, M. (2012b). 表面地形对月球光电子鞘层和静电尘埃输运的影响。《伊卡洛斯》，doi: 10.1016/j.icarus.2012.07.018 Poppe, A. R., Fatemi, S., Garrick-Bethell, I., Hemingway, D., 和 Holmström, M. (2015). 太阳风
d
与赖纳伽马地壳磁异常的相互作用：将源磁化与表面风化联系起来。《伊卡洛斯》，doi: 10.1016/j.icarus.2015.11.005 Poppe, A. R., Fillingim, M. O., Halekas, J. S., Raeder, J., and Angelopoulos, V. (2016). ARTEMIS 对月球处地球电离层分子离子外流的观测。《地球物理研究快报》，doi: 10.1002/2016GL069715 Poppe, A. R., Halekas, J. S., and Harada, Y. (2022). 月球处拾取离子形成的综合模型。《地球物理研究杂志》，127，doi: 10.1029/2022JE007422 Potter, A. E., Killen, R. M., and Morgan, T. H. (2000年). 月球穿越地球磁尾期间月球钠的变化。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/1999JE001213 Quinn, P. R., Schwadron, N. A., Townsend, L. W., Wimmer-Schweingruber, R. F., Case, A. W., Spence, H. E., Wilson J. K., and Joyce, C. J. (2017年). 使用 PREDICCS 对地球—月球—火星辐射环境中的屏蔽效果进行建模：2012年的五次太阳事件。《空间天气与空间气候》，doi: 10.1051/swsc/2017014 Rairden, R. L., Frank, L. A., and Craven, J. D. (1986). 使用 Dynamics Explorer 进行地冕成像
.
《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/JA091iA12p13613 Ratti, F., Stankov A., Wirth, K., Agnolon, V., Rando, N., Corral, C., Kueppers, M., Asquier, J., Ertel H. 和 Wielders, A.（2022年）。彗星拦截器欧洲航天局任务上的仪器。载于：*2022年4S*研讨会论文集Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J.M., Dandouras, I., 等（2001年）。利用相同的Cluster离子能谱仪（CIS）实验，首次在地球磁层内及其附近开展多航天器离子测量。《*Annales Geophysicae*》，doi: 10.5194/angeo-19-1303-2001 Robertson, I. P. 等（2009年）。通过月球外逸层观测到的太阳风电荷交换。《地球物理研究快报》，36，doi: 10.1029/2009GL040834 Šafránková, J., Němeček, Z., Přech, L. 等（2013年）。快速太阳风监测仪（BMSW）：描述与初步结果。《空间科学评论》，175，doi: 10.1007/s11214-013-9979-4 Saito, Y. 等（2010年）。SELENE（辉夜号）上的等离子体能量、角度与成分实验（PACE）的在轨性能和初步结果。《空间科学评论》，doi: 10.1007/s11214- 010-9647-x Sandel, B. R., Goldstein, J., Gallagher, D. L. 和 Spasojević, M.（2003年）。极紫外成像仪对等离子体层结构和动力学的观测。《空间科学评论》，109，doi: 10.1023/B:SPAC.0000007511.47727.5b

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

Sarrailh, P., Matéo-Vélez, J.-C., Hess, S. L. G., Roussel, J.-F., Thiébault, B., Forest, J., Jeanty-Ruard ,

B., Hilgers, A., Rodgers, D., Cipriani, F. 和 Payan D.（2015）。SPIS 5：面向科学任务的全新建模能力与方法。《*IEEE*等离子体科学汇刊》，43（9），2789–2798，doi: 10.1109/TPS.2015.2445384 Sauvaud, J. A., Moreau, T., Maggiolo, R., Treilhou, J.-P. 等（2006）。DEMETER星载高能电子探测：IDP光谱仪的介绍及内辐射带的首批结果。《行星与空间科学》，doi: 10.1016/j.pss.2005.10.019 Schörghofer, N., Benna, M., Berezhnoy, A. A., Greenhagen, B., Jones, B. M., Li, S., Orlando, T. M. ,

Prem, P., Ticker, O. J., and Wöhler, C.（2021）。月球、水星和谷神星的水族外逸层与表面相互作用。《空间科学评论》，217，doi: 10.1007/s11214-021-00846-3 Schwadron, N. A., Wilson, J. K., Looper, M. D., 等（2016）。月球质子反照中的挥发性物质特征。《伊卡洛斯》，doi: 10.1016/j.icarus.2015.12.003 Schwadron, N. A., Wilson, J. K., Jordan, A. P., 等（2018）。利用来自月球的质子辐射，探寻月壤氢化的周日变化。《行星与空间科学》，162，doi: 10.1016/j.pss.2017.09.012 Seki, K., Terasawa, T., Hirahara, M., and Mukai, T.（1998）。利用 Geotail 数据量化磁尾瓣/磁尾幔中的尾向冷 O^+ 束流：对极区 O^+ 外流的约束。《地球物理研究杂志》，103(A12)，29371–29382, doi: 10.1029/98JA02463 Sibeck, D. G., Allen, R., Aryan, H. 等（2018）。对太阳风与中性粒子发生电荷交换所产生的软 X 射线中的等离子体密度结构进行成像。空间科学评论，214, doi: 10.1007/s11214-018-0504-7 Sitnov, M., Birn, J., Ferdousi, B., 等（2019）。爆发性磁尾活动。《空间科学评论》，215

,

doi: 10.1007/s11214-019-0599-5 Sohn, J., Oh, S., and Yi, Y. (2014). 月球号和月球勘测轨道飞行器任务期间的月球宇宙射线辐射环境。《*Adv. Space Res*》., doi: 10.1016/j.asr.2014.05.011 Stern, S. A. (1999). 月球大气：历史、现状、当前问题及背景。《*Rev. Geophys*》., 37 (4), 453–491, doi: 10.1029/1999RG900005 Stern, S. A., Cook, J. C., Chaufray, J-Y., Feldman, P. D., Gladstone, G. R., and Retherford, K. D. (2013). 月球勘测轨道飞行器搭载的 LAMP 紫外光谱仪探测到月球大气中的 H_2。《伊卡洛斯》, 226, 1210–1213, doi: 10.1016/j.icarus.2013.07.011 Stubbs, T. J., Vondrak, R. R., and Farrell, W. M. (2007). 月球外逸层尘埃的动态喷泉模型。行星系统中的尘埃, ESA SP-643 Stubbs, T. J., Farrell, W. M., Halekas, J. S., Burchill, J. K., et al. (2013). 月球表面充电对太阳风等离子体条件和太阳辐照的依赖性。行星与空间科学， do

i:

10.1016/j.pss.2013.07.008 Taylor, M. G. G. T., 等（2006）。Cluster 在亚暴期间遭遇高能电子束。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/2006JA011666 Terada, K., Yokota, S., Saito, Y., Kitamura, N., Asamura, K., 和 Nishino, M. N.（2017）。地球的生物成因氧随磁层离子流输送至月球。《*Nature Astronomy*》，doi: 10.1038/s41550-016-0026

Tucker, O. J., Farrell, W. M., Killen, R. M., 和 Hurley, D. M.（2019）。太阳风注入月壤：对存在缺陷的表面上氢滞留和氢气外逸层的蒙特卡罗模拟。《地球物理研究杂志》，doi: 10.1029/2018JE005805 Vallat, C., Dandouras, I., C:son Brandt, P., Mitchell, D. G., Roelof, E. C., deMajistre, R., Rème, H., Sauvaud, J.-A., Kistler, L., Mouikis, C., Dunlop, M., 和 Balogh, A.（2004年）。首次比较了

f

利用 ENA 磁层图像反演在内磁层进行局部离子测量：Cluster-CIS 和 IMAGE-HENA 观测。《地球物理研究》，doi: 10.1029/2003JA010224 von Steiger, R. (2008). 太阳活动周中的太阳风。载于《太阳活动周期中的日球层》，Springer Praxis Books，第 3 章，doi: 10.1007/978-3-540-74302-6_3 Vorburger, A., Wurz, P., Barabash, S., Wieser, M., Futaana, Y., Lue, C., Holmström, M., Bhardwaj, A., Dhanya, M. B., and Asamura, K. (2013). 月球表面的高能中性原子成像

.

《地球物理研究》，doi: 10.1002/jgra.50337 Vorburger, A., Wurz, P., Barabash, S., Wieser, M., Futaana, Y., Bhardwaj, A., and Asamura, K. (2015). 背散射中性氢原子成像南极–艾特肯盆地。《*Planet. Space Sci.*》，doi: 10.1016/j.pss.2015.02.007 Vorburger, A., Wurz, P., Barabash, S., Futaana, Y., Wieser, M., Bhardwaj, A., Dhanya, M. B., and Asamura, K. (2016). 太阳风等离子体向月球夜侧表面的输运。《地球物理研究快报》，doi: 10.1002/2016GL071094 Wang, H. Z., et al. (2021). 地球风作为月球表面水合的一种可能外源。《*Astrophys. J. Lett.*》，doi: 10.3847/2041-8213/abd559 Wang, X.-D., Zong, Q.-G., Wang, J.-S., Cui, J., Rème, H., Dandouras, I., et al. (2011), 在月球等离子体环境中探测到 m/q = 2 拾取离子：外逸层 H_2^+ 的踪迹。《地球物理研究快报》，doi: 10.1029/2011GL047488 Wang, X.-Q., Cui, J., Wang, X.-D., Liu, J.-J., Zhang, H.-B., Zuo, W., Su, Y., Wen, W.-B., Rème, H., Dandouras, I., Aoustin, C., Wang, M., Tan, X., Shen, J., Wang, F., Fu, Q., Li, C.-L., and Ouyan

g,

Z.-Y.（2012）。太阳风与月球磁异常的相互作用：嫦娥二号在澄海对跖点附近等离子体数据的案例研究。《空间研究进展》，doi: 10.1016/j.asr.2011.12.003 Wei, Y., Zhong, J., Hui, H., Shi, Q., Cui, J., He, H., Zhang, H., Yao, Z., Yue, X., Rong, Z., He, F., Chai, L. 和 Wan, W.（2020）。地球大气离子注入月球正面和背面月壤：对地核发电机演化的启示。《地球物理研究快报》，47，e2019GL086208，doi: 10.1029/2019GL086208 Whitley, R. 和 Martinez, R.（2016）。地月空间停泊轨道的选择。*2016*年 *IEEE*航空航天会议，1–9，doi: 10.1109/AERO.2016.7500635 Wieser, M., Barabash, S., Futaana, Y., Holmström, M., Bhardwaj, A., Sridharan, R., Dhanya, M. B., Wurz, P., Schaufelberger, A. 和 Asamura , K.（2009）。太空中月壤以中性氢原子形式对太阳风质子的极高反射率。《行星与空间科学》，doi: 10.1016/j.pss.2009.09.012 Wieser, M., Barabash, S., Futaana, Y., Holmström, M., Bhardwaj, A., Sridharan, R., Dhanya, M. B., Schaufelberger, A., Wurz, P. 和 Asamura, K.（2010）。利用高能中性原子首次观测到月球磁异常上方的微型磁层。《地球物理研究快报》，doi: 10.1029/2009GL041721

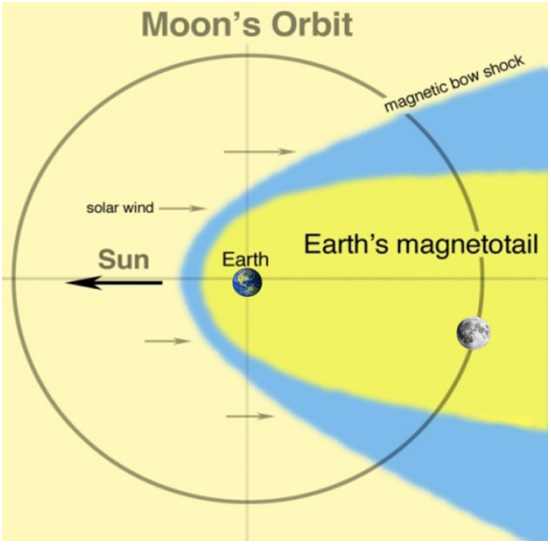
Wu, X., Ambrosi, G., Azzarello, P., Bergmann, B., 等（2019）。穿透粒子分析仪（PAN）。《空间研究进展》，doi: 10.1016/j.asr.2019.01.012 Wurz, P., Rohner, U., Whitby, J. A., Kolb, C., Lammer, H., Dobnikar, P. 和 Martín-Fernández, J.A .
(2007年). 月球外逸层：溅射的贡献。《伊卡洛斯》，doi: 10.1016/j.icarus.2007.04.034 Wurz, P., Fatemi, S., Galli, A. 等 (2022年). 粒子和光子作为月球和水星表面粒子释放的驱动因素。《空间科学评论》，doi: 10.1007/s11214-022-00875-6 Yokota, S. 等 (2009年). 通过 SELENE（辉夜）搭载的 MAP-PACE IMA 首次直接探测到源自月球的离子。《地球物理研究快报》，36, doi: 10.1029/2009GL038185 Zahnle, K. J., Gacesa, M. 和 Catling, D. C. (2019年). 奇特的信使：氙所讲述的地球氢历史新篇章。《地球化学与宇宙化学学报》244, 56–85, doi: 10.1016/j.gca.2018.09.017 Zaman, F. A., Townsend, L. W., de Wet, W. C., Looper, M. D., Brittingham, J. M., Burahmah, N. T. ,
等（2022年）。月球辐射环境建模：FLUKA、Geant4、HETC-HEDS、MCNP6 和 PHITS 之间的比较。空间天气，doi: 10.1029/2021SW002895 Zhang, S., Wimmer-Schweingruber, R. F., Yu, J., Wang, C. 等（2020年）。首次测量月球表面的辐射剂量。科学进展，doi: 10.1126/sciadv.aaz1334 Zoennchen, J. H., Nass, U., Fahr, H. J. 和 Goldstein, J.（2017年）。利用 TWINS 立体莱曼-α 数据研究地磁扰动对 3 至 8 Re 范围内氢地冕的影响。《*Annales Geophysicae*》.，doi: 10.5194/angeo-35-171-2017 Zoennchen, J. H., Connor, H. K., Jung, J., Nass, U. 和 Fahr, H. J.（2022年）。结合 UVIS/HDAC 和 TWINS 莱曼-α 数据得到的 3–15R_E 范围内地球外逸层昼侧氢密度剖面。《*Annales Geophysicae*》.，doi: 10.5194/angeo-40-271-2022

1 数据可用性声明

N/A.

2 图

这是一个临时文件，并非最终排版的文章



图示 1 | 月球相对于地球磁层的轨道。地球和月球的大小未按比例绘制。（改编自：Tim Stubbs / 马里兰大学 / GSFC）。

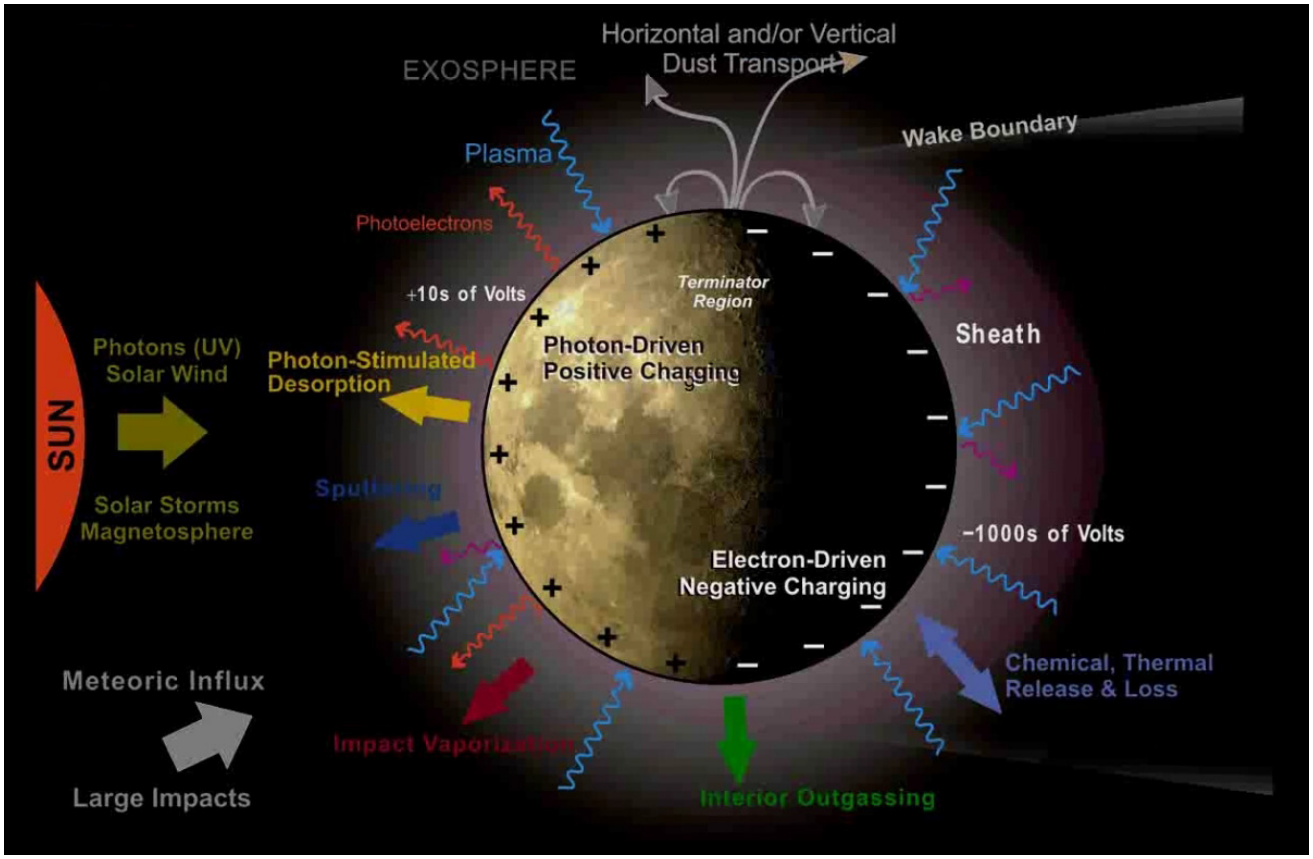


图 2 | 月球环境中，太阳辐射、空间等离子体、流星体通量、尘埃、外逸层与表面之间存在复杂的相互作用（图片来源：Jasper Halekas）。

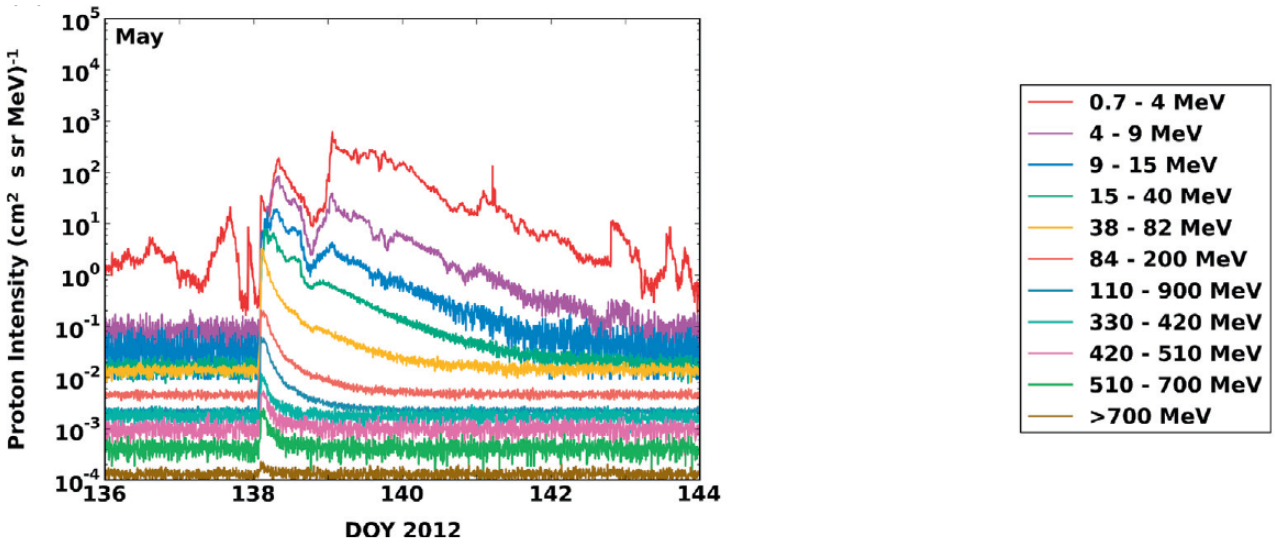


图 3 | 典型的太阳高能粒子（SEP）质子强度：GOES-13/EPS/HEPAD 在 2012年5月太阳事件期间测得的质子强度五分钟平均值。（来源：Quinn等人，2017年）。

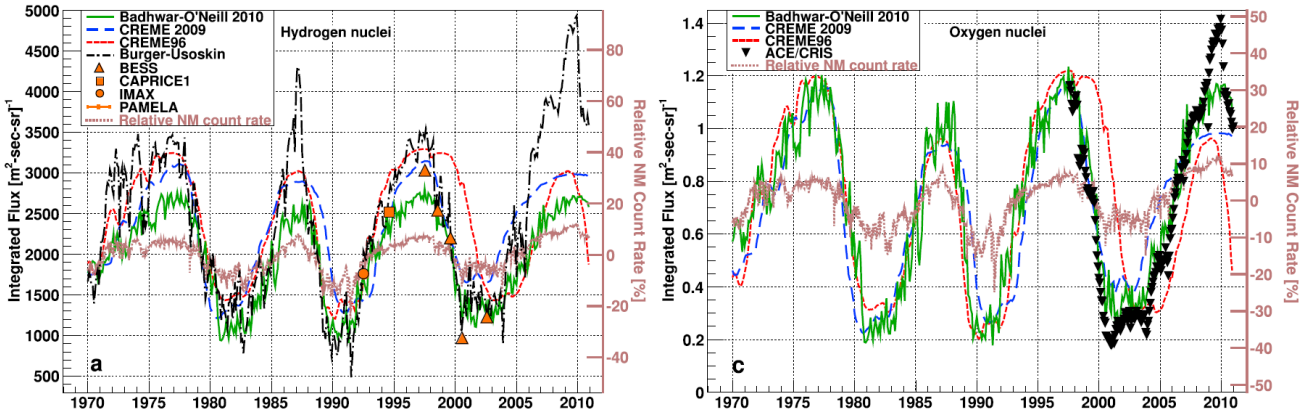
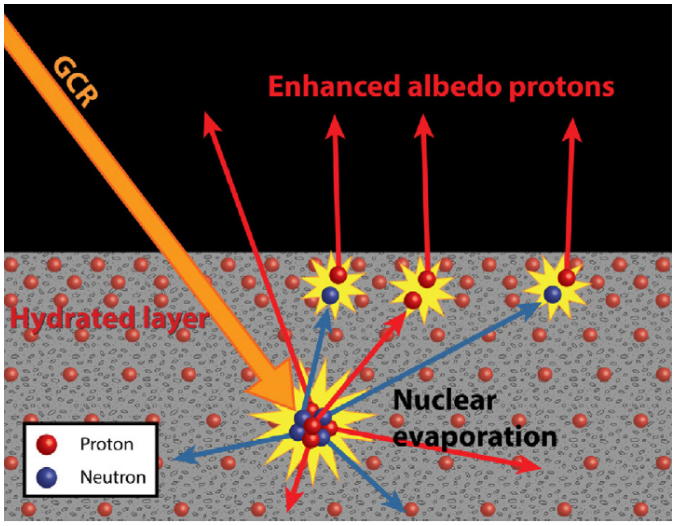


图 4 | 典型的银河宇宙射线（GCR）氢原子核（左）和氧原子核（右）通量。（来源：Mrigakshi 等，2012年）。

A



B

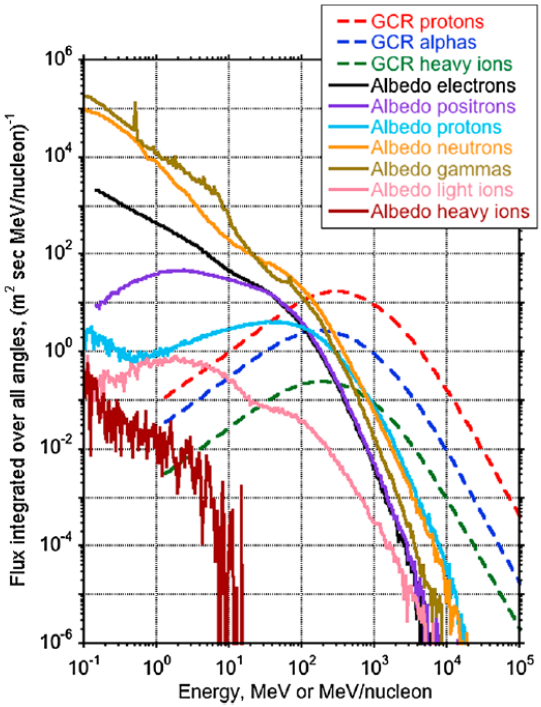


图 5 |（A）：月壤水合层对银河宇宙射线反照（次级）质子产生过程影响的示意图。月壤深处的核蒸发过程会向各个方向产生大量次级粒子。（来源：Schwadron 等人，2016年）。**（B）**：使用 Geant4 模拟工具包计算得到的原始银河宇宙射线物种能谱（虚线）和月球反照物种能谱（实线）。（来源：Looper 等人，2013年）。

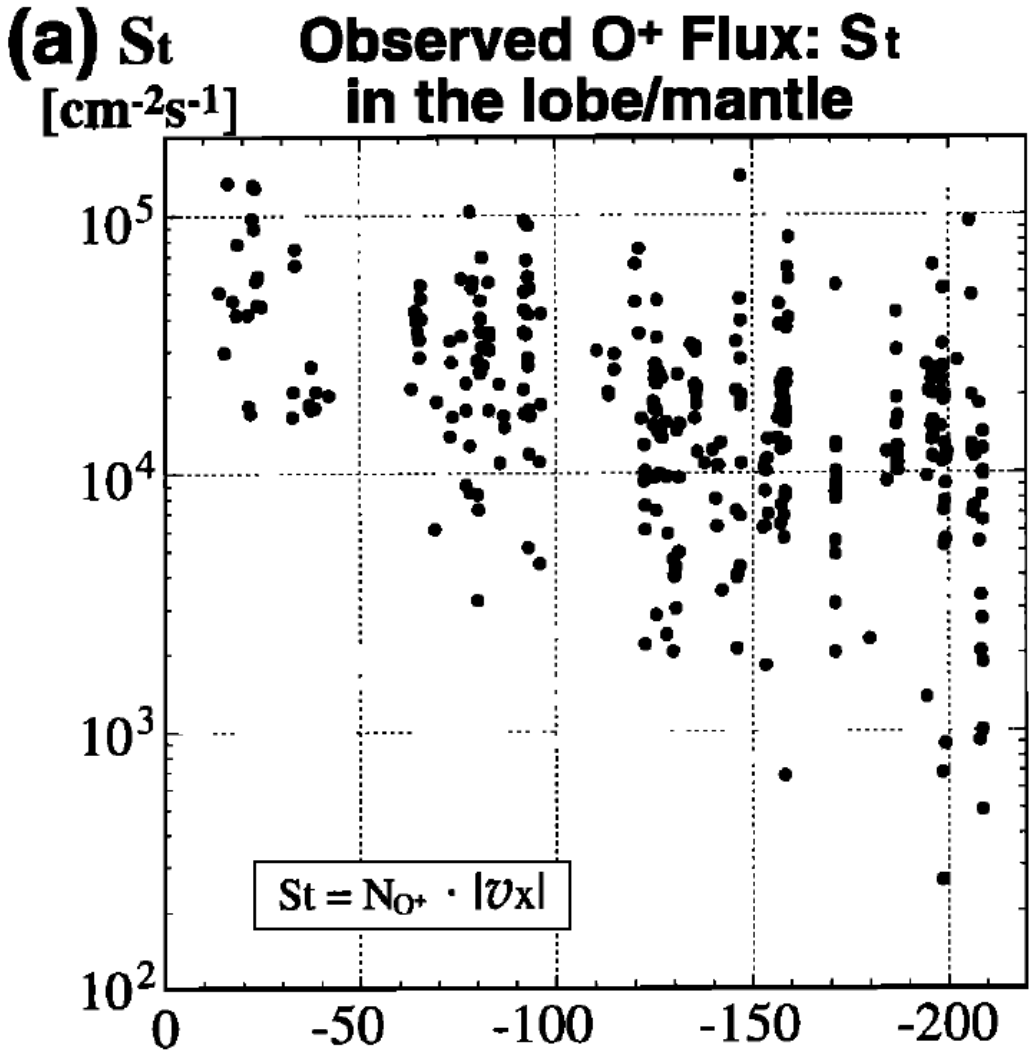


图 6 | Geotail 航天器在磁尾瓣和等离子体片边界层观测到的冷 O^+ 束流通量与距地球的尾向距离（X_{GSM}，单位为 R_E）的关系。月球位于 $X_{GSM} \approx -60\ R_E$（地球半径）处。（来源：Seki 等人，1998 年）。

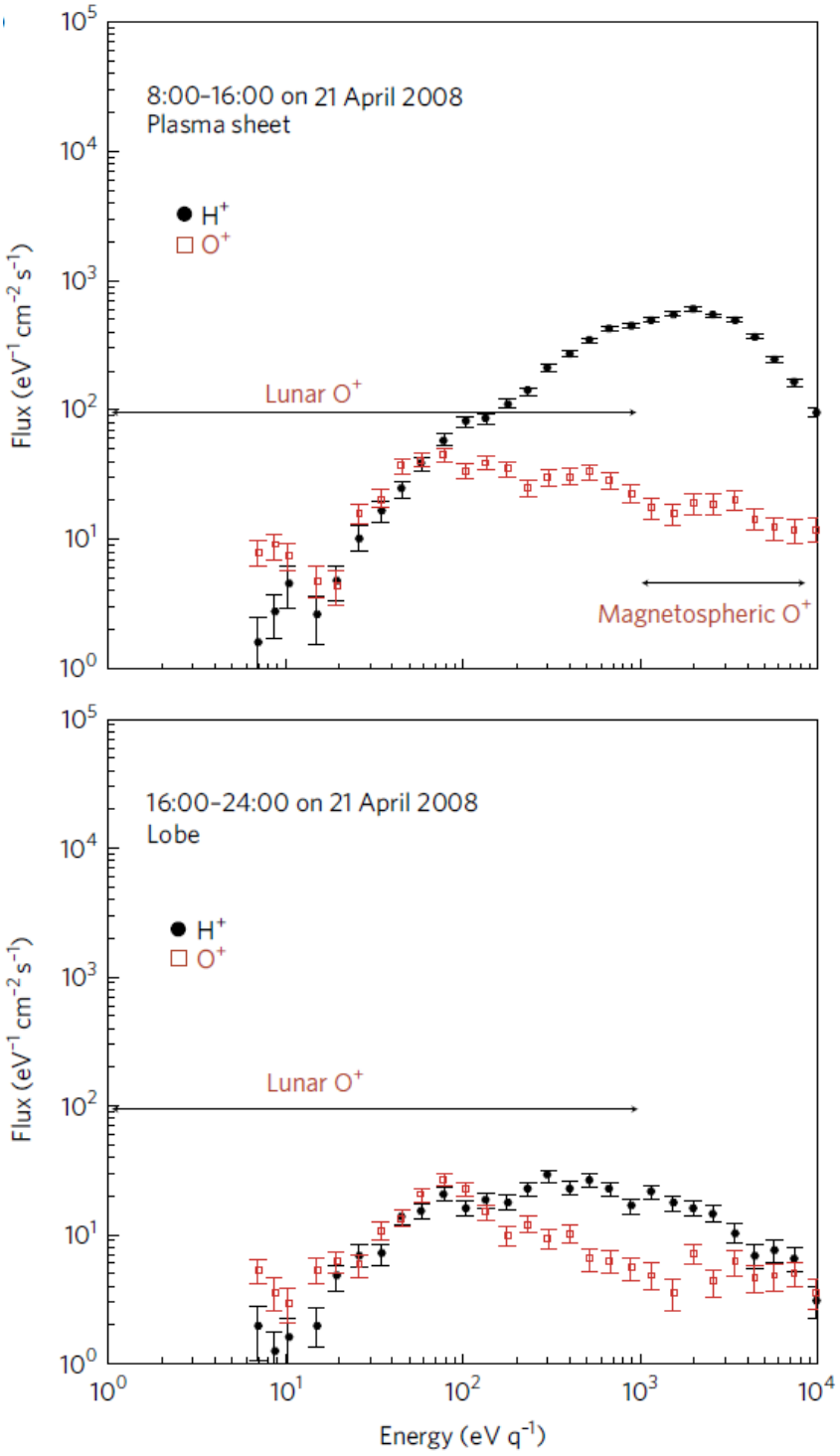


图 7 | 辉夜号月球轨道器搭载的IMA传感器在地球磁尾中测得的H^+ 和O^+ 离子的能量分布。在等离子体片遭遇期间（上图），与在磁尾瓣中测得的离子相比，高能（1 – 10 千电子伏）O^+ 离子有所增强。在等离子体片遭遇期间，这些磁层O^+ 离子的计算密度和净通量分别为1.2×10^{-3} cm^{-3} 和2.6×10^{4} cm^{-2} s^{-1} 。（来源：Terada等，2017年）。

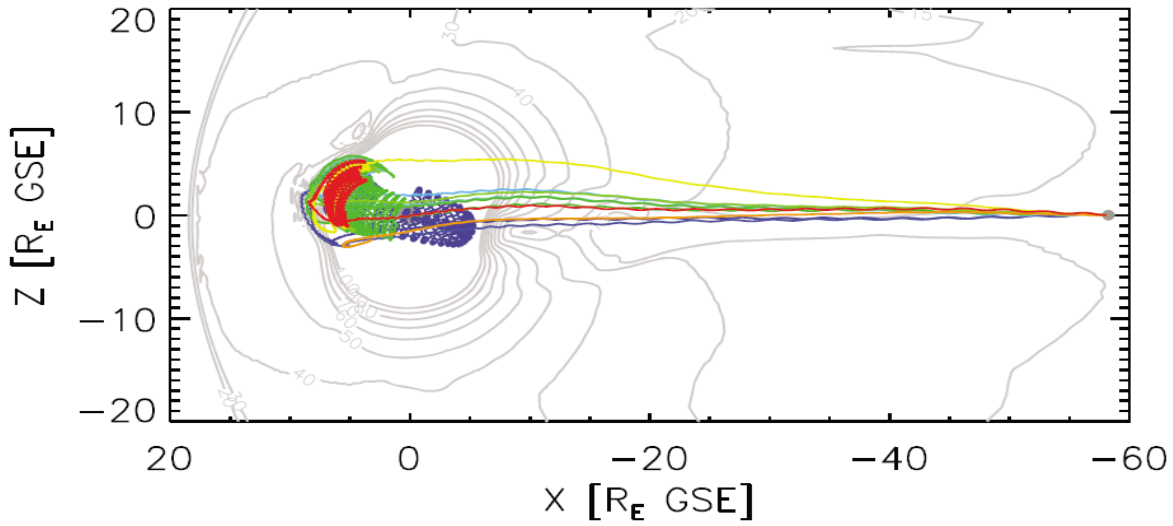


图 8 | MHD开放式全球地球空间环流模型模拟（反向粒子追踪）表明，在高地磁活动事件期间，于月球环境中观测到的重离子（位于 $X_{GSE} \approx -60\ R_E$），可能源自内磁层。地月输运时间为 ~2 – 3 小时。（来源：Poppe 等，2016）。

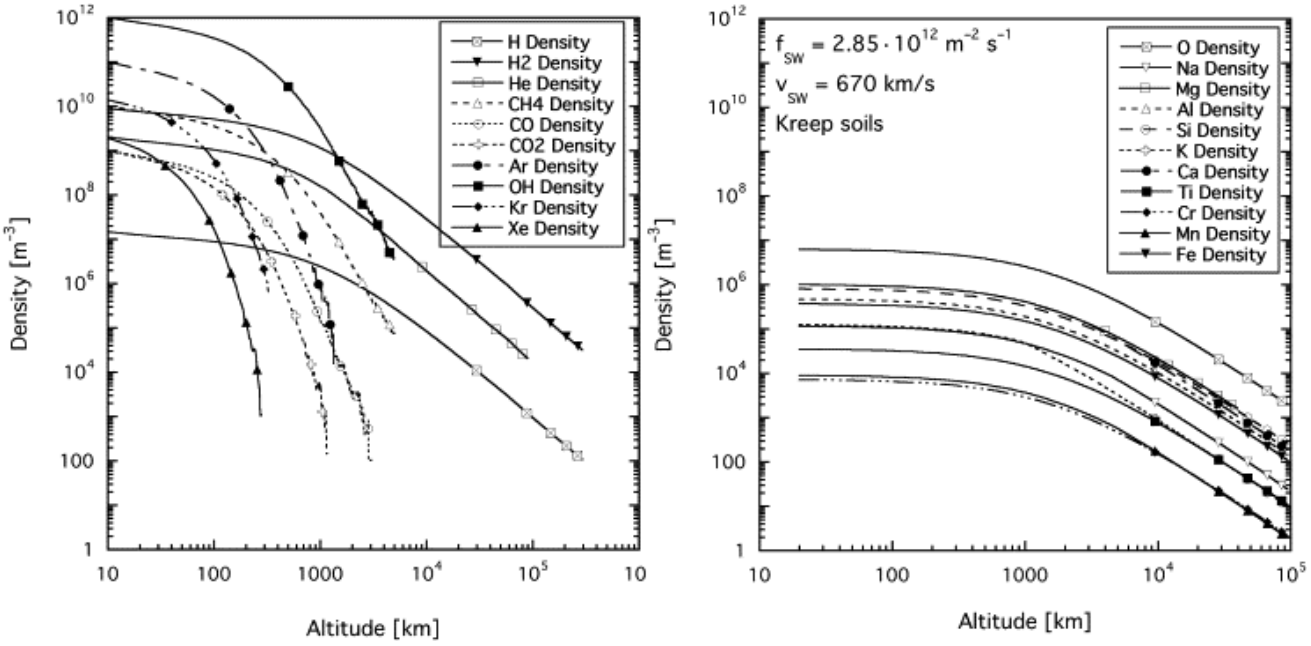


图9 | 左：从表面热释放的原子和分子的月球外逸层密度分布；依据 Stern（1999）的外逸层表面密度。右：通过溅射释放的原子的月球外逸层密度分布。两项计算均针对日下点进行。（引自：Wurz 等，2007）。

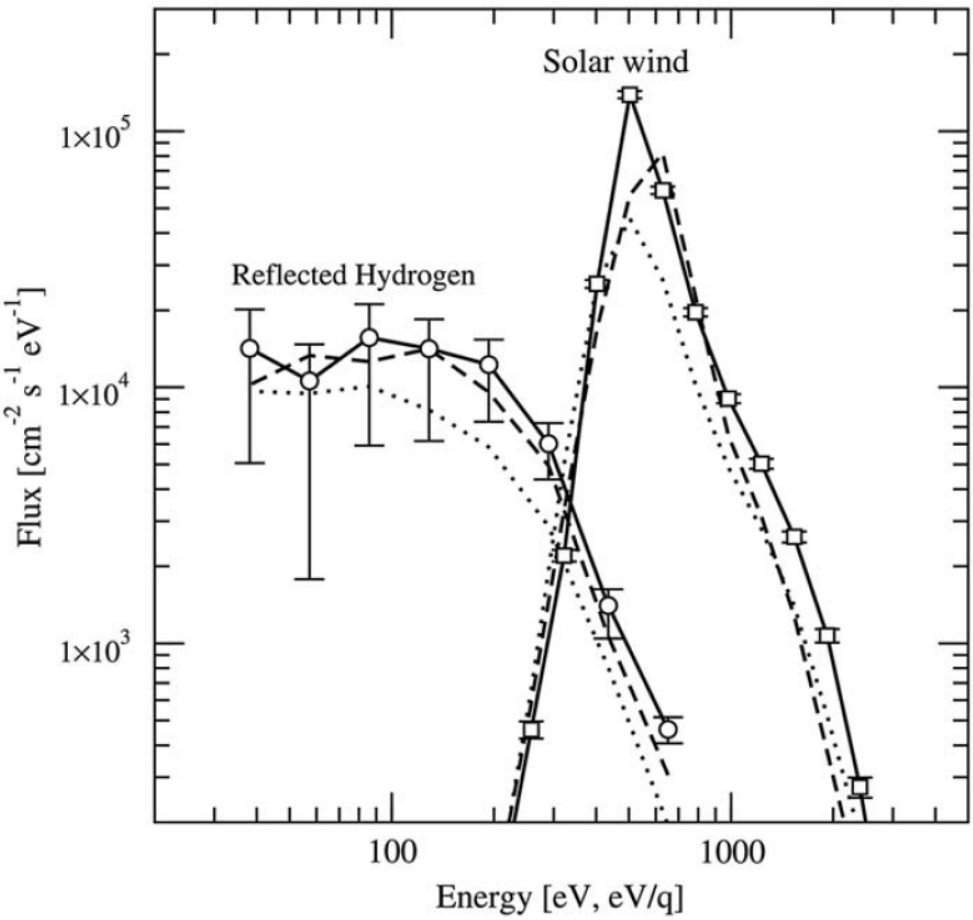


图 10 | SARA仪器搭载于月船1号航天器，对太阳风离子（右侧，空心方块）及月壤反射的相应高能氢原子（左侧，空心圆）测得的典型能谱。请注意，反射的高能中性粒子通量与太阳风通量变化之间具有良好的相关性。（来源：Wieser等，2009年）。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

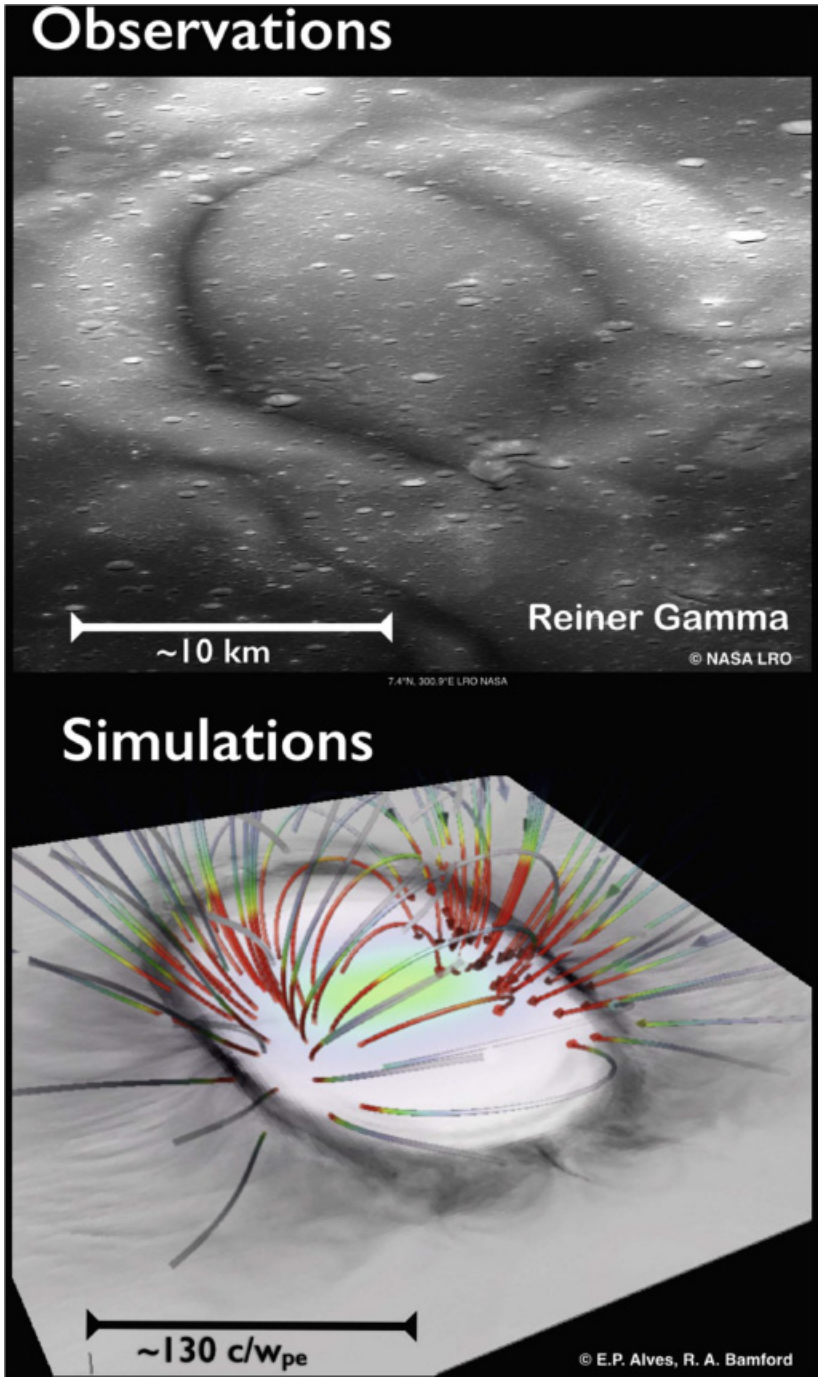


图 11 | 上图：由月球勘测轨道飞行器拍摄的雷纳伽马构造月球旋涡中心区域图像。下图：通过三维模拟获得的该月球旋涡上方相对太阳风质子密度的切片图，其中初始磁力线对应于单个地下偶极子。（来源：Bamford等人，2016年）。

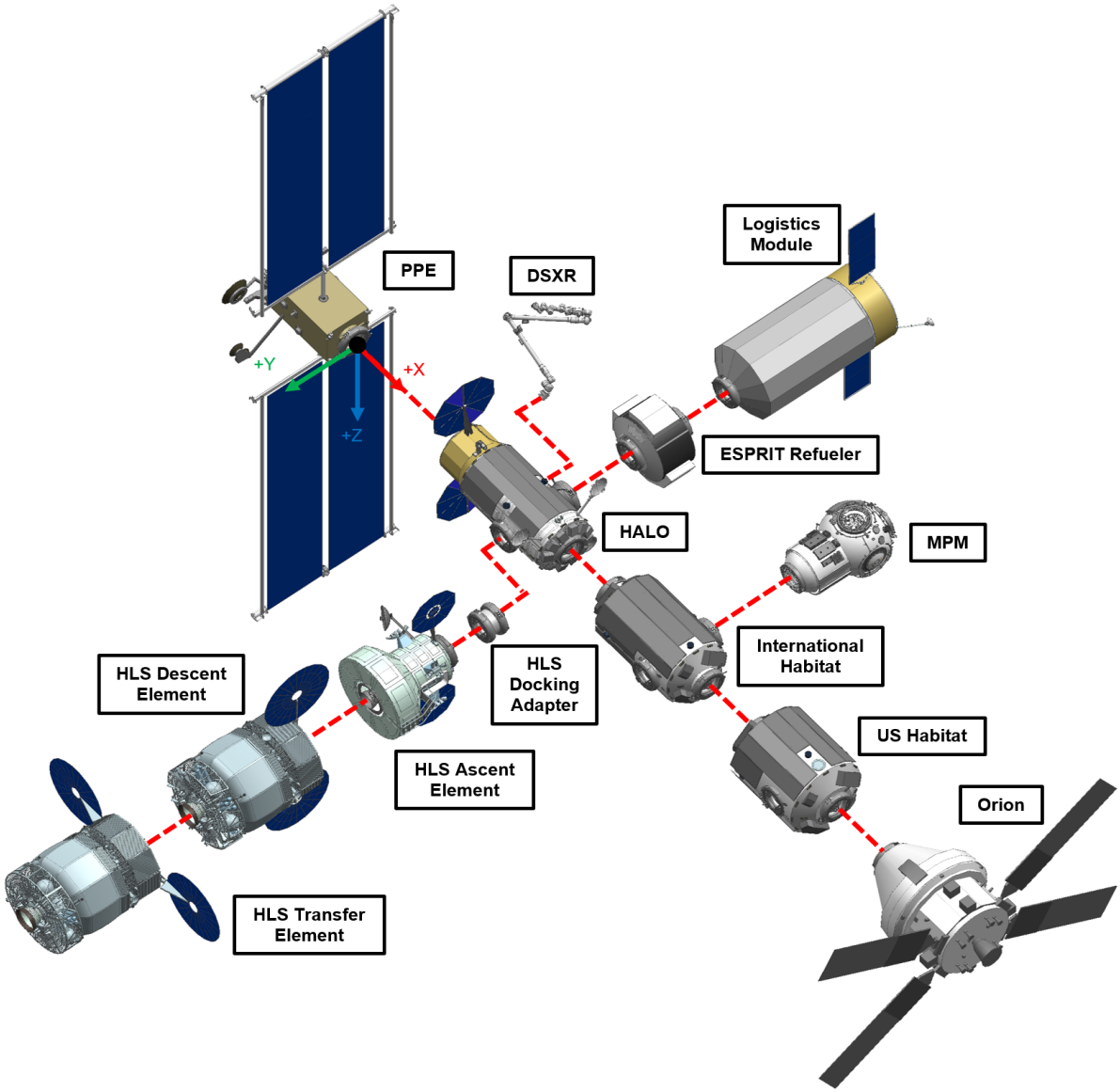


图12 | 门户配置。动力与推进组件：动力与推进组件；载人着陆系统：载人着陆系统；居住与后勤前哨舱：居住与后勤前哨舱（图片来源：美国国家航空航天局）。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

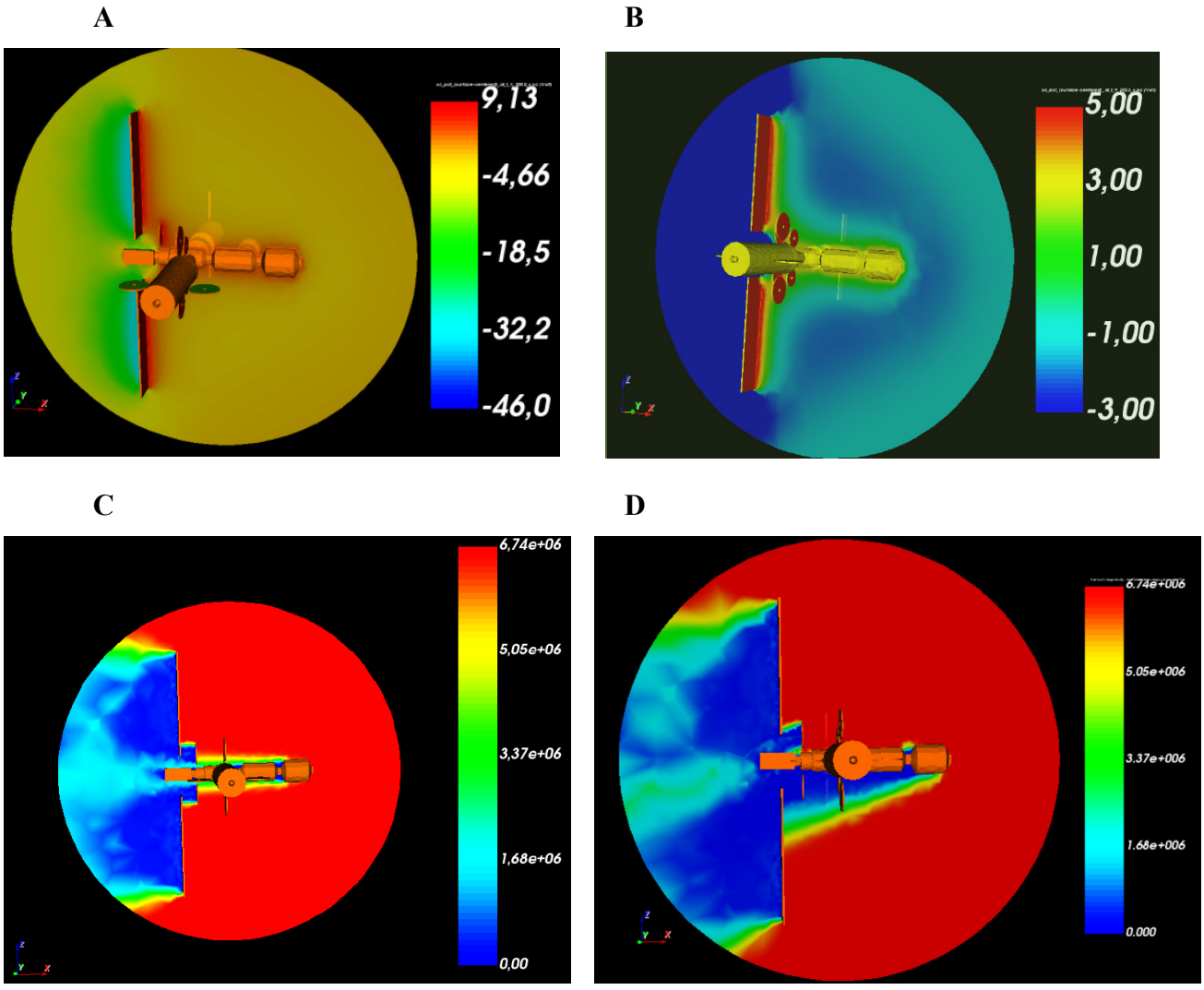


图13 | 上排：在太阳风中，门户与太阳方向对齐时，SPIS（航天器等离子体相互作用系统）模拟得到的体积静电势分布（单位：V）。**(A)**：完整电势范围。**(B)**：电势范围截断于 +5 / -3 V，以突出显示远离太阳能电池板处的电势值。下排：在太阳风中，门户与太阳方向对齐**(C)** 以及门户主轴相对于太阳方向倾斜 20°**(D)**时的质子密度（单位：m^{-3}）。请注意空间站下游的等离子体尾迹。

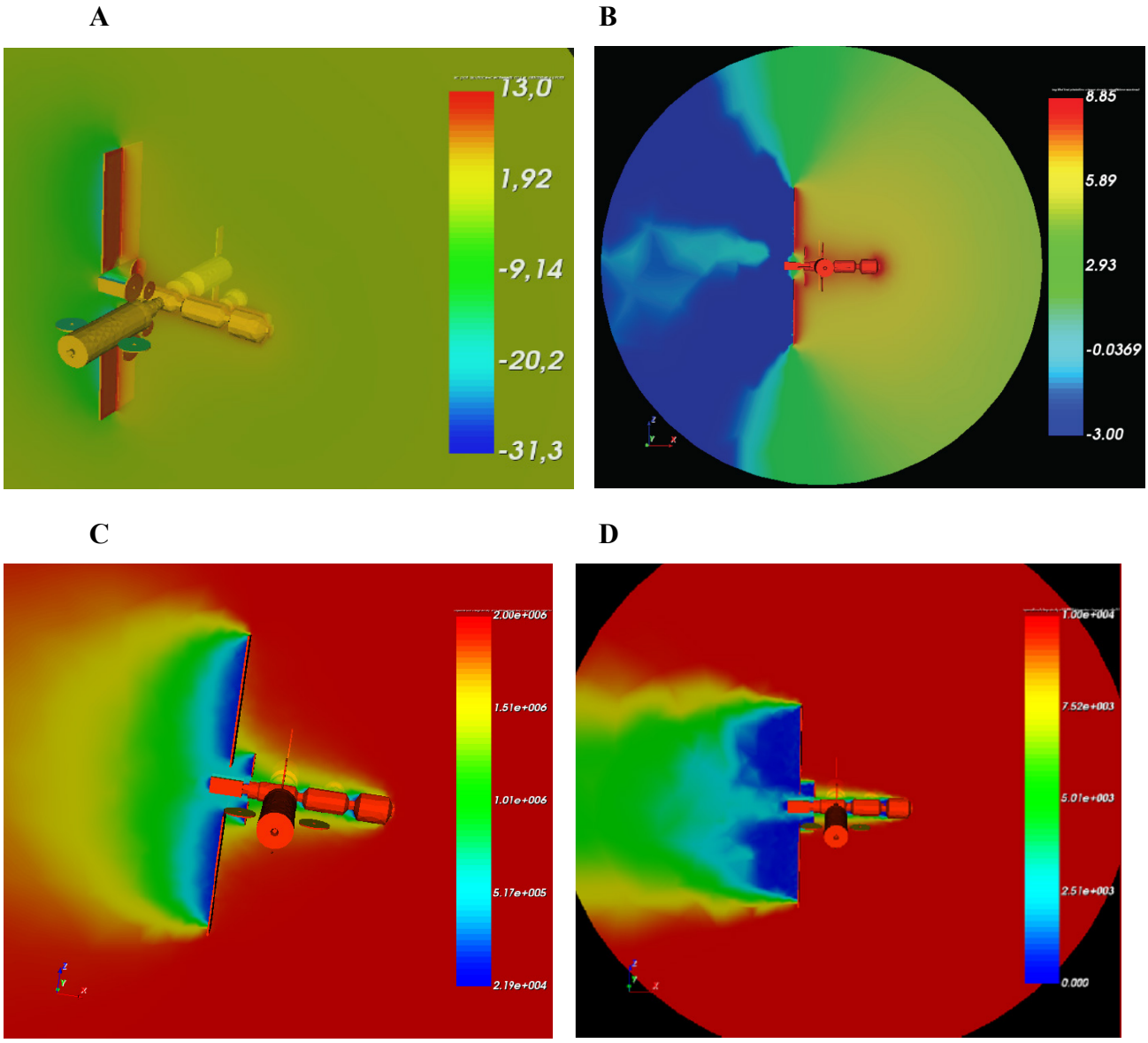


图 14 | SPIS 对地球磁尾中的体积静电势分布（单位：V）进行的模拟**(A)**，图中门户与太阳方向对齐；在相同条件下的光电子密度（对数刻度）**(B)**。地球磁尾中的 H^+ 离子密度**(C)**和 O^+ 离子密度**(D)**（单位：m^{-3}），显示了空间站下游的等离子体尾迹。

这是临时文件，并非最终排版稿

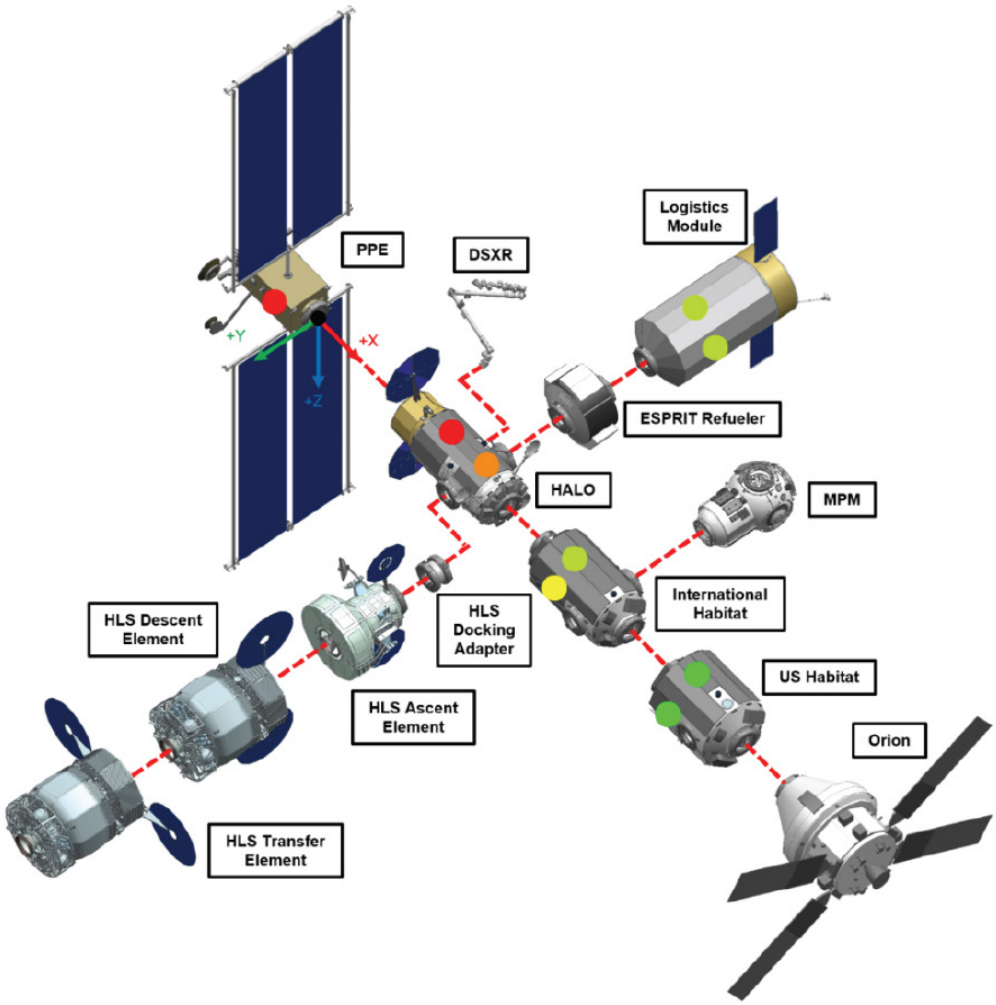


图15 | 门户上不同位置用于安置空间等离子体仪器的适宜程度。

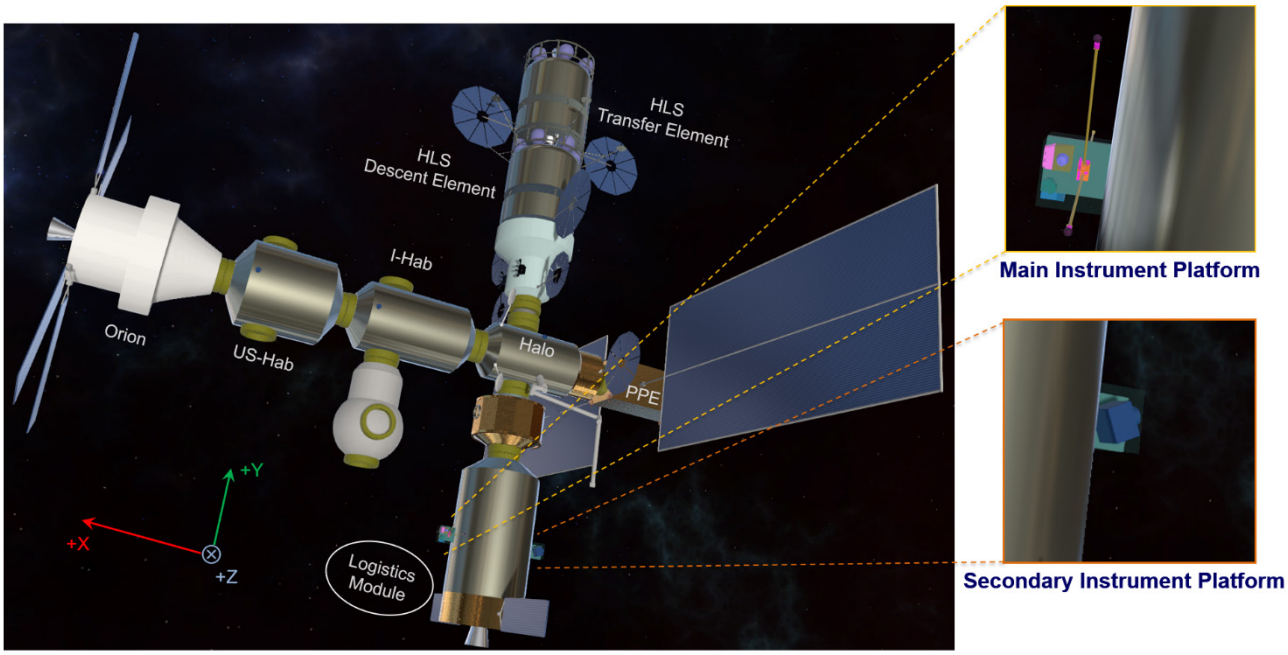


图 16 | 主仪器平台和次级仪器平台分别安装在后勤舱的 +X 侧和 –X 侧。

这是临时文件，并非最终排版的文章

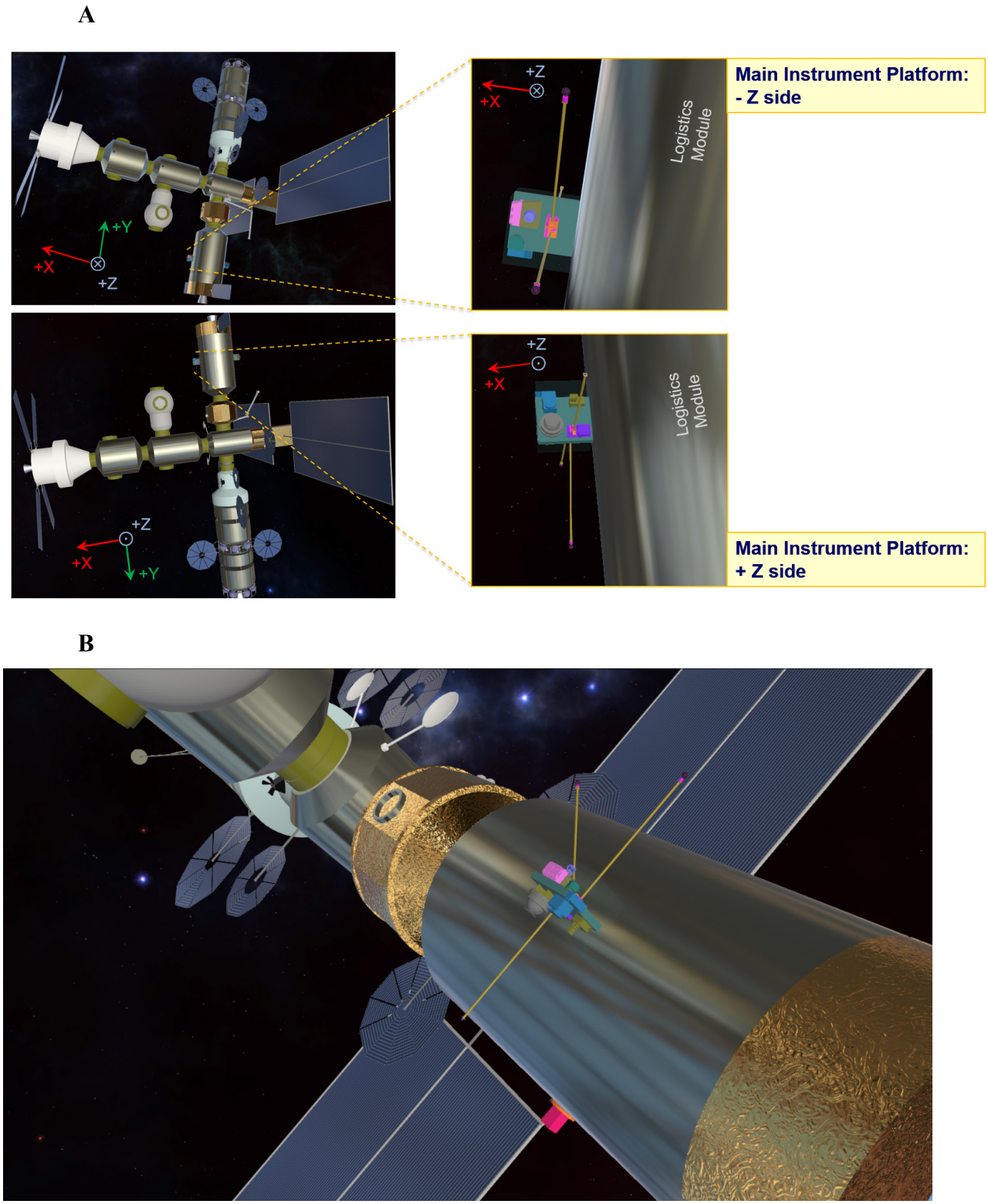


图17 | 安装在后勤舱上的双面主仪器平台 （**A**），以及其透视图 （**B**）。后勤舱侧面的“洋红色立方体”是独立式 cGCRD 仪器。

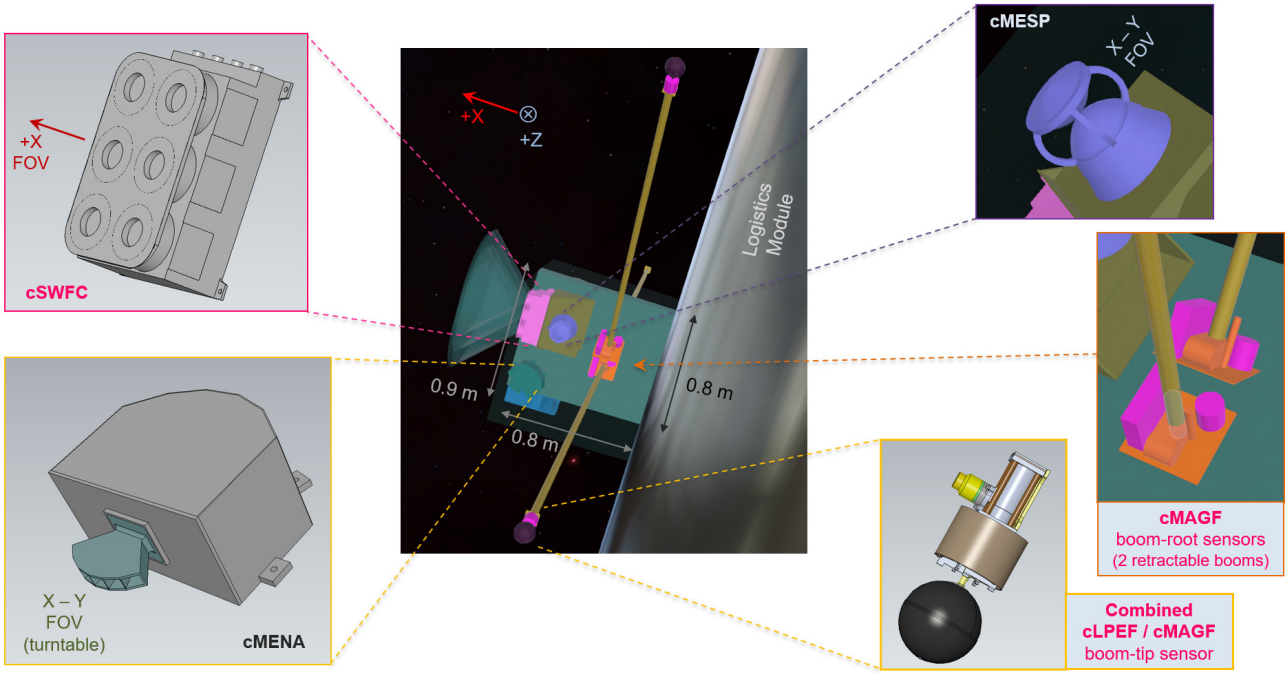


图18 | 主仪器平台——Z侧，所有伸展杆均已展开。

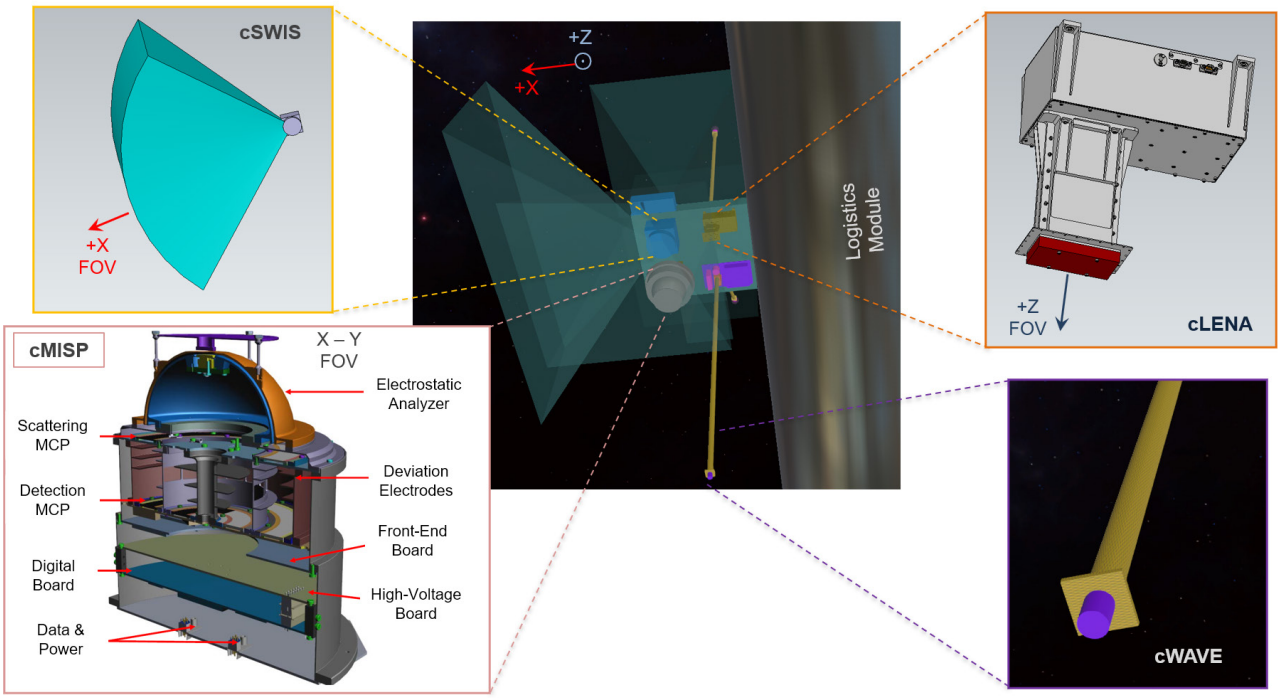


图 19 | 主仪器平台 +Z侧。cSWIS仪器插图（左上）中的青绿色立体角表示仪器视场（FOV）。

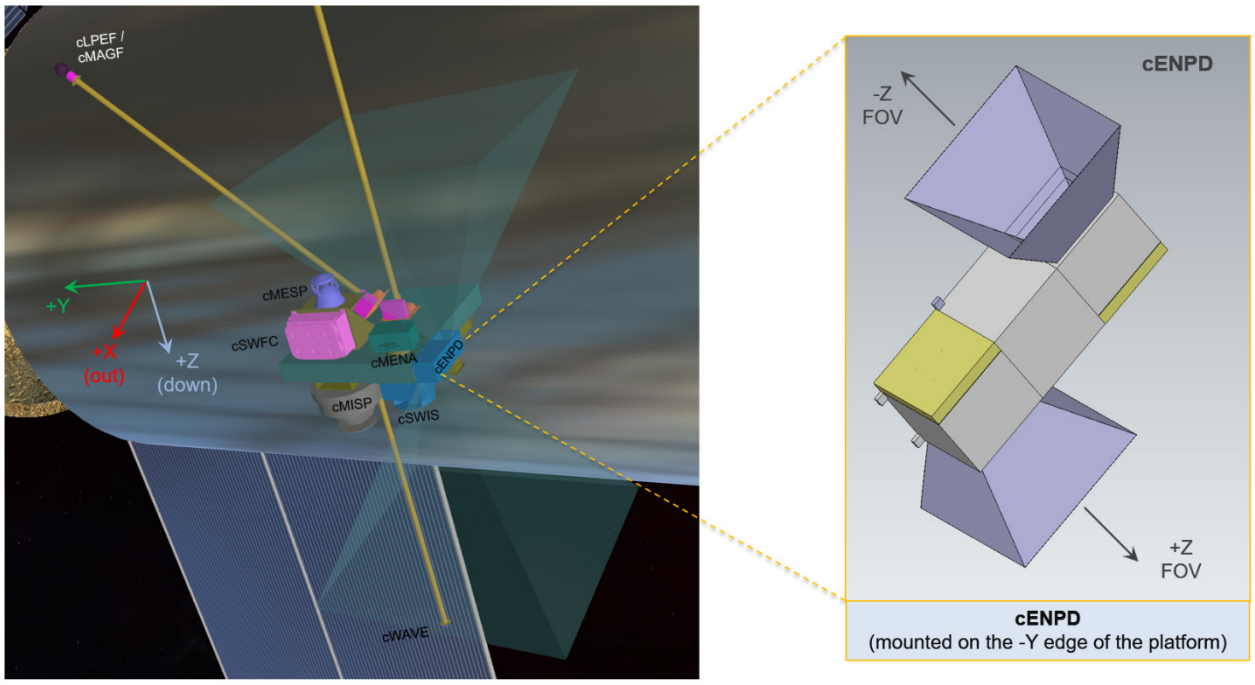


图 20 | 主仪器平台 +X / –Y边缘。cENPD仪器安装在该平台的边缘，以便无遮挡地观测+Z和–Z两个方向。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

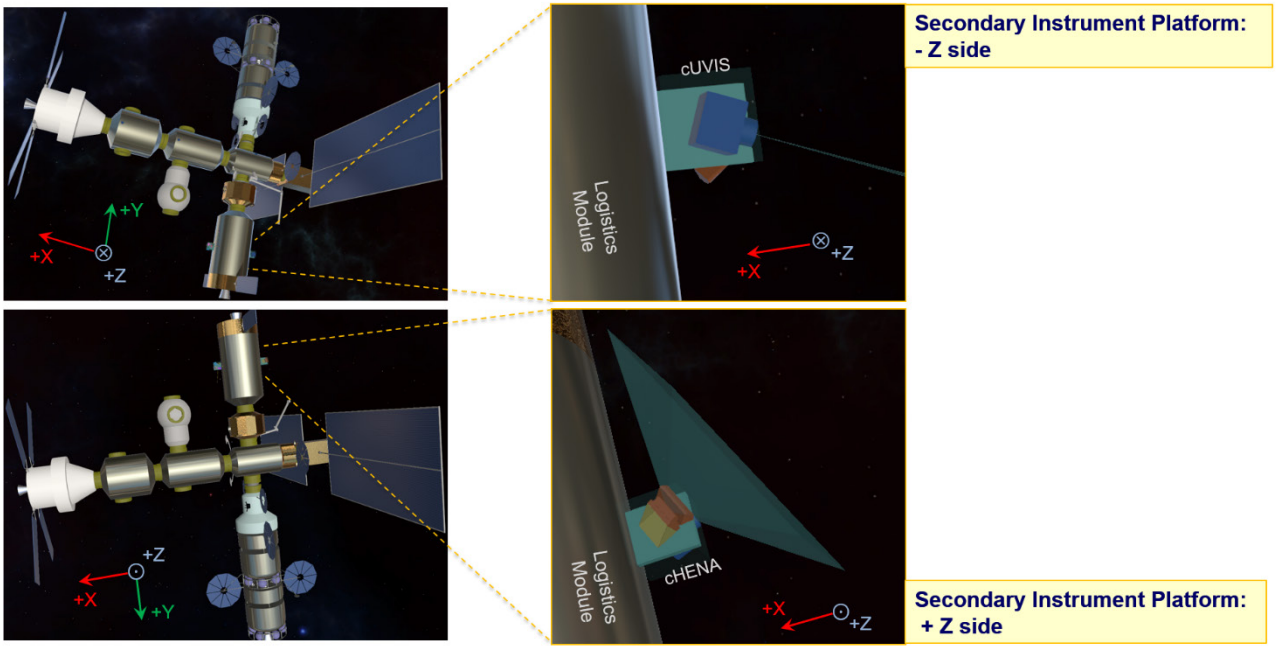


图 21 | 第　　安装在后勤舱上的双面次级仪器平台　　.

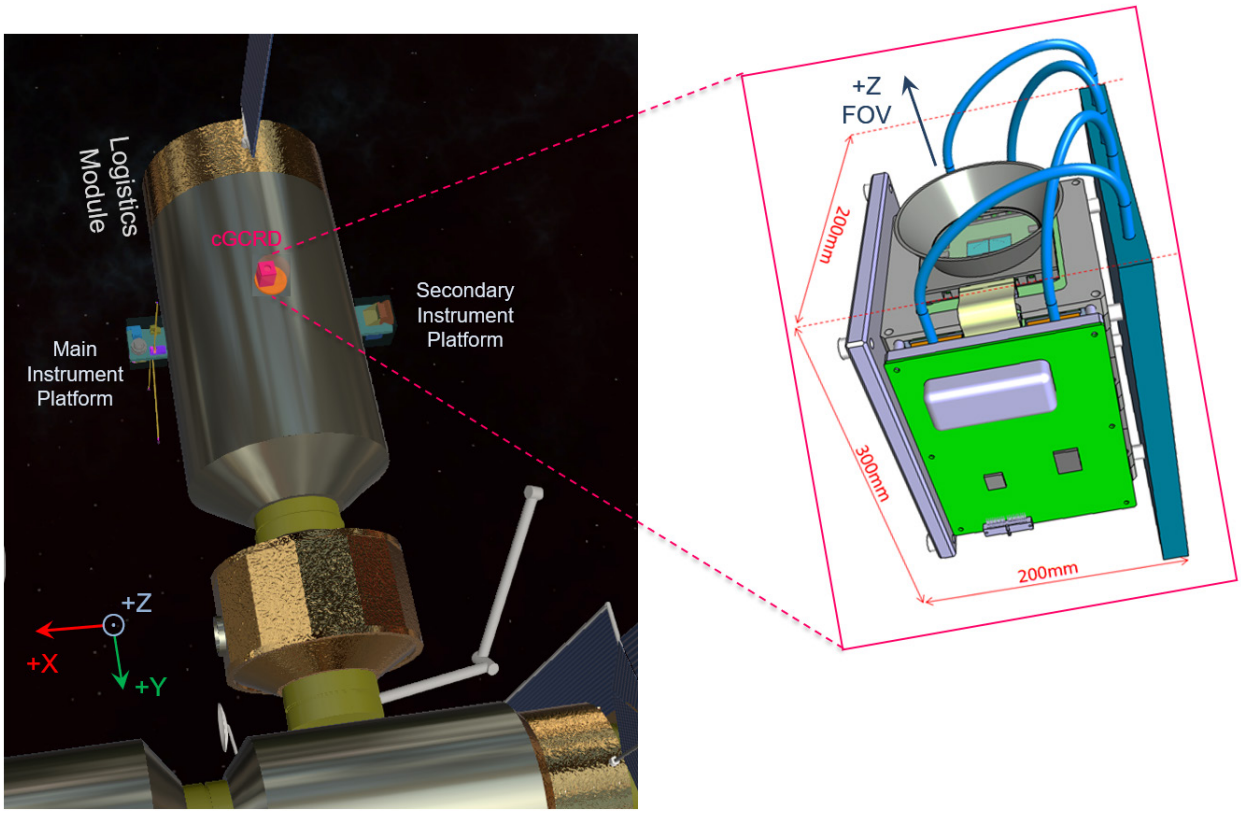


图22 | cGCRD作为“独立”仪器安装在后勤舱上。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

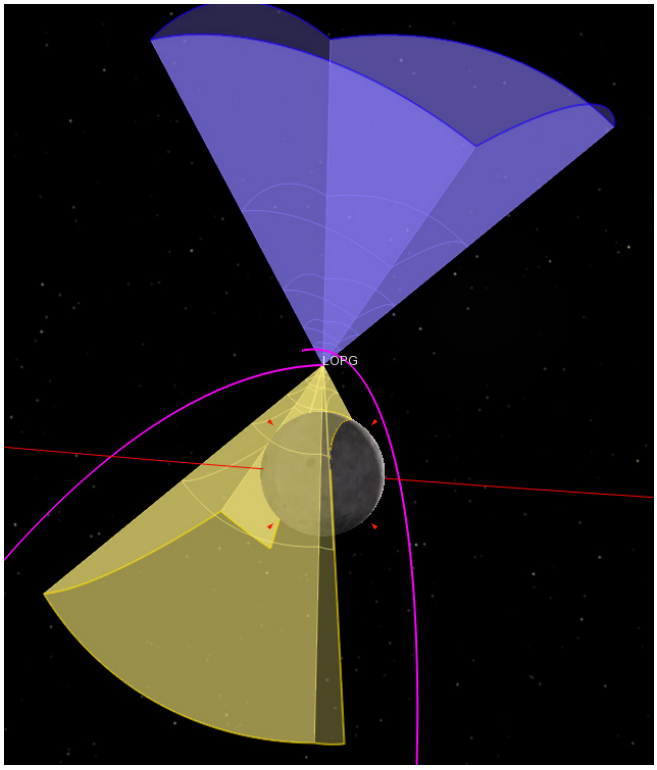


图23 | 近月点附近，两个朝向相反的传感器头的 cENPD 瞬时视场。紫色视场：原始高能粒子通量。黄色视场：月球反照高能粒子通量。洋红色线表示视场中心沿门户轨道的轨迹。

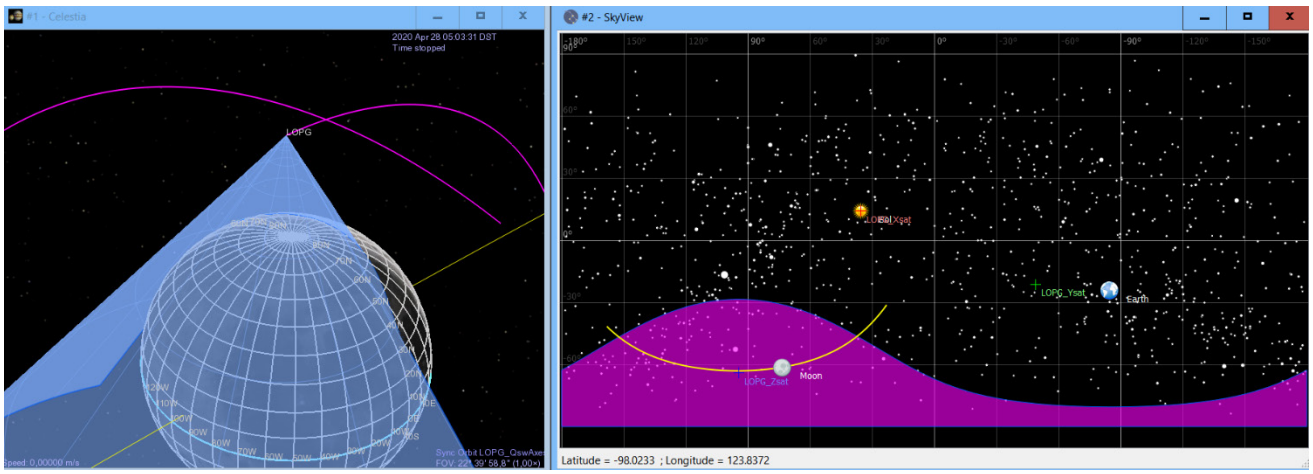


图 24 | cGCRD视场。左：近月点附近的 cGCRD 视场（浅蓝色圆锥），以来自月球（网格球体）的反照率银河宇宙射线粒子为主。右：沿门户轨道（洋红色）投影到天空上的 cGCRD 视场。

这是一个临时文件，并非最终排版的文章

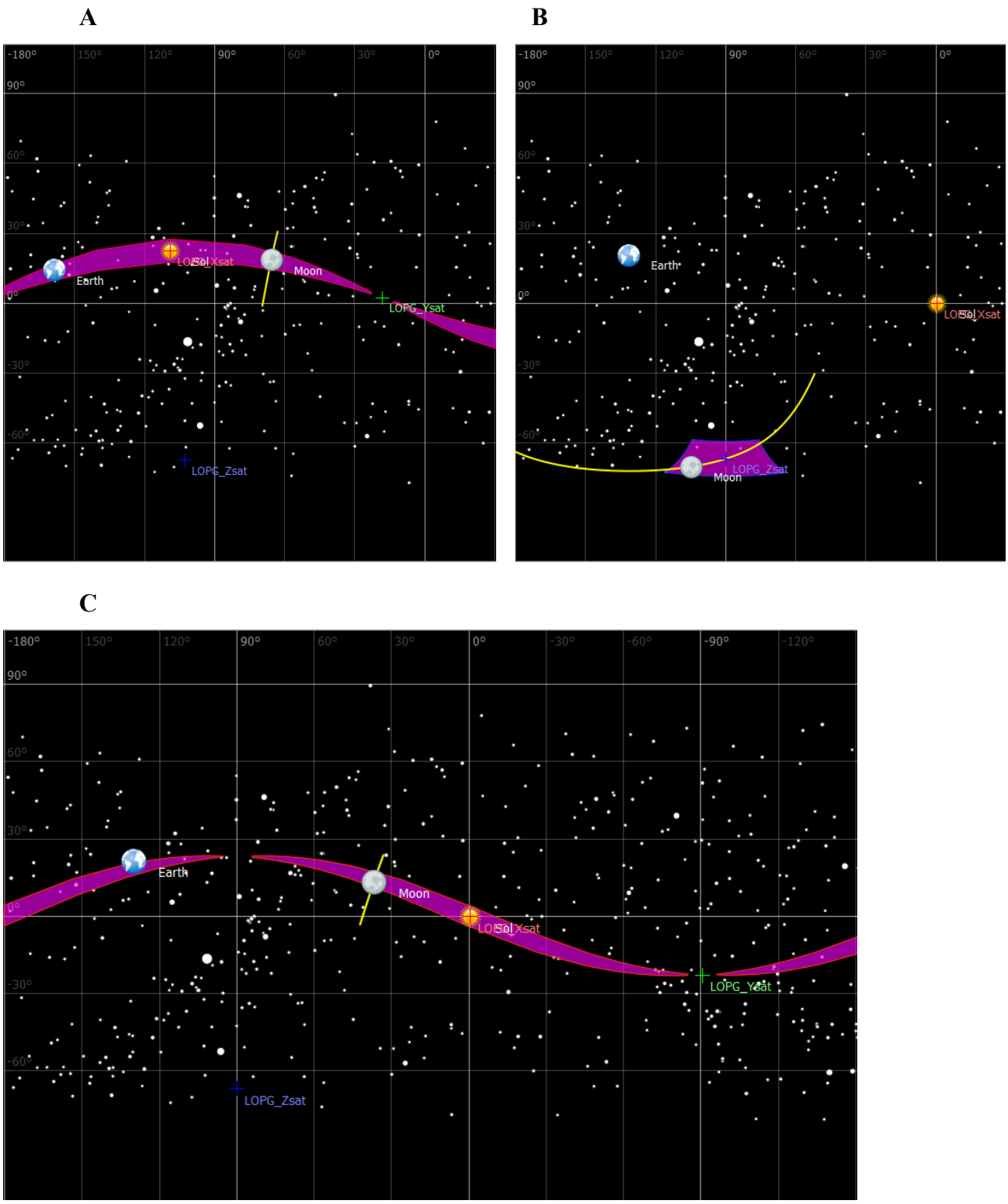


图 25 | **（A）**：在轨道上的某个位置，cMENA仪器的视场范围（总可访问视场，已考虑仪器安装所在的1轴转动机构的转动）。投影到天空上的视场范围（FOR）以洋红色显示。**（B）**：近月点附近的cLENA视场（以洋红色显示）。黄色线条表示轨道中靠近近月点部分的视场中心轨迹在天空上的投影。**（C）**：cUVIS仪器的视场范围在天空上的投影，以洋红色显示。