

专题: 至 2035 年空间科学学科发展战略研究

编者按 习近平总书记强调,“浩瀚的空天还有许多未知的奥秘有待探索,必须推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展”。党的二十大报告明确“加快建设航天强国”,到 2035 年我国将“实现高水平科技自立自强,进入创新型国家前列”。为此,由中国科学院牵头,集我国空间天文、日球层物理、月球与行星科学、空间地球科学、微重力物理与空间生命科学领域的相关优势力量,围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星、太空格物等科学主题,开展了 10 个学科专业的发展战略研究。为让各界了解相关学科发展战略研究的成果,积极参与思考学科发展前沿和提出具有重大科学意义的空间科学任务,《空间科学学报》联合中国科学院国家空间科学中心论证中心,策划了《至 2035 年空间科学学科发展战略研究》专题,本期推出专题第 1 篇——王赤等:空间物理学科发展战略研究。

WANG Chi, WANG Yuming, TIAN Hui, LI Hui, NI Binbin, FU Huishan, LEI Jiuhou, XUE Xianghui, CUI Jun, YAO Zhonghua, LUO Bingxian, ZHANG Xiaoxin, ZHANG Aibing, ZHANG Jiaojiao, LI Wenya. Strategic Study for the Development of Space Physics (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, 43(1): 9–42. DOI:10.11728/cjss2023.01.yg01

空间物理学科发展战略研究*

王 赤¹ 汪毓明² 田 晖^{1,3} 李 晖¹
倪彬彬⁴ 符慧山⁵ 雷久侯² 薛向辉²
崔 峻⁶ 尧中华⁷ 罗冰显¹ 张效信⁸
张爱兵¹ 张佼佼¹ 李文亚¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

3(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

4(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

5(北京航空航天大学空间与环境学院 北京 100191)

6(中山大学大气科学学院 珠海 519082)

7(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

8(国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 空间物理学是人类进入空间时代后迅速发展起来的一门新兴的多学科交叉的前沿基础学科。其将太阳和太阳风控制的日球层空间作为一个系统,研究太阳/太阳风与行星/彗星的上层大气、电离层、磁层乃至星际介质之间的相互作用。空间物理学从本质上讲是一门实验科学,空间物理探测是空间物理学发展的基础。进入新世

* 国家自然科学基金项目资助(42142006)

2022-12-13 收到原稿,2023-01-08 收到修定稿

E-mail: cw@swl.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

纪,随着空间基础设施和人类高技术活动的日益频繁,空间物理学进入新的发展阶段,强调科学与应用的密切结合。近年来,空间物理学取得了一系列重要进展。本文对接国家自然科学基金委地球科学部“宜居地球——地球系统科学”的顶层战略设计,梳理总结近年来空间物理各学科发展动态和趋势,凝练中国空间物理学未来发展的重点领域,优化学科布局,推进空间物理各学科的高质量发展。

关键词 空间物理, 发展动态, 战略规划

中图分类号 P3

Strategic Study for the Development of Space Physics

WANG Chi¹ WANG Yuming² TIAN Hui^{1,3} LI Hui¹ NI Binbin⁴
 FU Huishan⁵ LEI Jiuhou² XUE Xianghui² CUI Jun⁶
 YAO Zhonghua⁷ LUO Bingxian¹ ZHANG Xiaoxin⁸
 ZHANG Aibing¹ ZHANG Jiaojiao¹ LI Wenya¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

3(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

4(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072)

5(School of Space and Environment, Beihang University, Beijing 100191)

6(School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082)

7(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

8(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract Space physics is a new interdisciplinary frontier basic discipline that has developed rapidly since mankind entered the space age. It regards the heliospheric space controlled by the sun and solar wind as a system to study the interaction between the sun/solar wind and the upper atmosphere, ionosphere, magnetosphere and even interstellar media of planets/comets. Space physics is essentially an experimental science, and space physics exploration is the basis for the development of space physics. In the new century, with the increasing space infrastructure and human high-tech activities, space physics has entered a new stage of development, emphasizing the close combination of science and application. In recent years, a series of important advances have been made in space physics at home and abroad. This paper connects with the top-level strategic design of “livable Earth——Earth system science” of the Department of Geoscience of the National Natural Science Foundation of China, teases out and summarizes the development trends of various disciplines of space physics at home and abroad in the past several years, condenses the key fields of future development of space physics in China, optimizes the discipline layout, and promotes the high-quality development of various disciplines of space physics.

Key words Space physics, Development trend, Strategic planning

0 引言

空间物理学是随着人造卫星进入太空而蓬勃发展起来的学科。空间物理学着重研究太阳、广阔的行星际空间、地球空间以及行星空间的物理过程和变化规律,是一门探测和理论并重的新兴多学科交叉的前沿基础学科,是当代自然科学领域最活跃的前沿学科之一。

太阳是太阳系空间环境主要的能量源和扰动源,其各种活动过程直接影响系统内各部分的状态。太阳的等离子体和磁场以太阳风的形式延伸到行星际空间,传播到地球以远的外日球层和日球层边界,形成了宜居地球在宇宙中的空间环境。太阳上经常发生的爆发活动会给行星际和行星空间环境带来剧烈的扰动,引发空间天气现象,并对近地航天活动、深空探测以及国家空间安全构成潜在威胁。地球空间包括磁层、电离层和中高层大气。磁层源于太阳风和地球内磁场的相互作用,是保护地球免受行星际高能辐射的天然屏障。电离层是指位于地球表面以上60~1000 km高度部分电离的区域。电离层的状态及其变化显著影响通信导航定位授时以及航天器的运行等。中高层大气是地球大气向太空过渡的关键节点区域,一方面受到来自太阳活动及相关的太阳风、磁层、电离层等日地空间环境扰动的影响,形成太阳/太阳风-磁层/电离层-中高层大气耦合这一链式过程;另一方面,中高层大气主要受到自下面的地面(包括岩石圈、地形等)因素与对流层气象活动因素的影响,形成“岩石圈/低层大气层-中高层大气垂直耦合”这一链式过程。这些过程驱动了高层大气环境中不同尺度的变化过程。行星空间环境作为行星圈层系统与外部太阳风物质能量系统之间发生交汇作用的关键区域,对于行星大气圈的长期演化,以及行星环境宜居性的演变都起着关键的作用。

近年来,随着空间探测技术的快速发展,利用遥感、就位探测等手段,结合数值模型,在太阳与日球层物理、磁层物理、电离层物理、中高层大气物理、月球与行星物理等方向取得了一系列重要进展。随着从太阳大气到近地空间的全球观测能力的快速提高,以及对空间天气主要物理过程认识的深化,空间天气预报研究向具有更坚实的物理基础、更高集成性和更高预报精度的空间天气因果链集成预报模式发展。在

卫星有效载荷方面,随着相关技术的发展,各类载荷性能指标和工程指标在不断提升,随着各领域科学研究的深入以及新探测需求的提出,对载荷也提出了更高的要求。

本文在对空间物理各方向近三年研究进展进行梳理的基础上,凝练中国空间物理学未来发展的重点领域,优化学科布局,推进空间物理各学科的高质量发展。

1 国外重要进展与成果

1.1 太阳与日球层物理

太阳对流区的流动对于理解和预测太阳活动周至关重要。Gizon 等^[1]指出子午环流是单圈环流的形式,而非之前一些学者提出的双圈环流。Hanasoge 等^[2]发现观测中对流区的流动由小尺度湍流占主导,且集中在赤道附近,这与现有对流区模型中的流动形式完全不同。此外,现有的模型会高估对流区流动的速度,部分学者认为这是由现有的对流区模型没有包括光球导致的,而 Hotta 等^[3]近期的研究表明太阳表面附近的流动并不会对对流区深处的流动产生影响。

耀斑和日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)等爆发活动一般发生在活动区,研究活动区的形成、演化过程以及重大爆发活动的物理规律,对空间天气预报至关重要。过去的磁流浮现数值模拟研究表明,只有那些纠缠性强的磁流管才可以从对流区浮现出来,形成活动区。然而这一结果还没有在观测中得到验证。MacTaggart 等^[4]通过引入一个新的物理量磁缠绕数(Magnetic Winding),首次从观测中认证出了磁绳从对流区浮现并形成活动区的过程。Cheung 等^[5]则通过磁流浮现的模拟建立了一个耀斑的三维辐射磁流体力学模型,重现了耀斑期间极紫外和 X 射线波段的许多观测特征。此外, Kusano 等^[6]通过统计研究,发现磁扭曲通量密度(Magnetic Twist Flux Density)可用来预测活动区内的 X 级耀斑。

太阳磁场测量对理解太阳大气中的各种物理过程至关重要,但目前磁场的常规测量还仅限于光球。近年来,太阳物理学者对色球和日冕的磁场测量进行了有益尝试。Ishikawa 等^[7]首次利用紫外偏振光谱观测,测量了高色球的磁场强度。耀斑期间的射电频

谱观测可用来诊断日冕磁场。基于此, Fleishman 等^[8]首次测量到太阳爆发期间的磁场减弱, 对应的磁能释放足够驱动物质抛射、粒子加速和等离子体加热, 这也是磁重联驱动太阳爆发的重要观测证据。Chen 等^[9]对同一观测的进一步分析表明, 耀斑期间重联电流片附近的磁场结构是一个“磁瓶”, 这一结构可能是高能粒子的源区。磁诱导跃迁理论则是一种有望用于活动区日冕磁场测量的新方法, Brooks 等^[10]认证出了一个太阳能量粒子事件的源区, 并利用磁诱导跃迁理论对该源区的日冕磁场进行了诊断。

太阳大气中存在大量的小尺度磁重联和丰富的波动等现象。Bahauddin 等^[11]通过分析 IRIS 卫星对过渡区小尺度增亮结构的光谱观测数据, 推测磁重联区域有离子回旋湍流过程。Stangalini 等^[12]首次在光球认证出扭转阿尔芬波的信号。Jess 等^[13]对一个太阳黑子进行了磁震学研究, 发现其上方的色球中存在共振空腔。Antolin 等^[14]和 Chen 等^[15]分析 IRIS 的观测显示, 日珥中的磁重联过程可以产生很小尺度的喷流。基于 Solar Orbiter 卫星的高分辨率观测, Berghmans 等^[16]发现日冕中存在大量小尺度瞬时增亮事件, 称为“篝火”(campfire); Chen 等^[17]构建了该现象的首个物理模型, 发现可能是日冕中的分量磁重联点亮了“篝火”。

帕克太阳探针 (Parker Solar Probe, PSP) 在 2018 年发射之后, 极大地增进了人们对内日球层物理过程的认识。Bale 等^[18]发现内日球层太阳风的磁场结构要比地球附近的太阳风复杂得多。其中, 太阳风中的磁场会出现持续时间为几分钟的偏折结构, 而且这些结构与等离子体径向速度的尖峰结构有关。Kasper^[19]发现内日球层的太阳风切向速度远远大于过去人们所认为的, 对现有的太阳风模型提出了挑战。Howard 等^[20]从白光观测中验证了太阳附近无尘区的存在。McComas 等^[21]则为太阳附近能量粒子的起源、加速与传播过程提供了直接的观测证据。

除此之外, Moses 等^[22]通过成像观测首次给出了日冕中氦丰度的全局性分布, 未来与 PSP 的局地探测相结合, 将有助于理解太阳风的起源与加速问题。Seaton 等^[23]利用大视场极紫外成像仪的观测则展示了日冕延伸到日心距三个太阳半径处的精细结构, 这为日冕与日球层的三维数值模型提供了重要的观测约束。

1.2 磁层物理

近年来, 针对磁层顶、磁鞘、弓激波、磁尾和内磁层等磁层区域, 国际上采用卫星观测、数值模拟与理论分析等研究手段, 取得了一系列重要成果。

磁层顶、磁鞘、弓激波方向上, Burch 等^[24]提供了电子扩散区入流和流出速度的精确测量, 并估算了重联率; Fargette 等^[25]利用 MMS 卫星数据发现磁重联普遍存在于磁层顶通量传输事件中; Nakamura 等^[26]通过数值模拟方法发现, 湍动磁场会增加磁层顶 K-H 波动的增长率和物质混合; Chaston 等^[27]发现磁鞘中的丝状结构可以有效地散射和加速粒子, 形成离子能量超热分布; Stawarz 等^[28]系统分析了磁鞘湍动与唯电子重联电流片的关系; Vega 等^[29]基于三维动力学模拟, 发现唯电子重联是动力学阿尔芬湍动的内禀属性; Aman 等^[30]发现在激波处电子会首先经历一个新型的随机漂移加速过程, 再通过一阶费米加速达到接近相对论能量; Oka 等^[31]发现激波处的低频哨声波能够有效地散射和束缚低能电子, 从而可以把电子加速到超热能段; Johlander 等^[32]发现激波处的离子加速效率取决于激波马赫数; Gingell 等^[33]分析了这些电流片特性, 发现磁场重联在激波处普遍存在。

磁尾方向上, Chen 等^[34]分析了不同引导场对电子扩散区结构的影响, 发现引导场可能引入使磁力线断裂的新机制; Sitnov 等^[35]发现磁尾重联具有多尺度特性, 磁尾重联呈现 2 个 X 线, 在靠近地球侧的 X 线附近具有更强的磁场扰动和不均匀电场, 同时重联触发后会演变为唯电子重联; 与之不同的是, Hubbert 等^[36]对比分析了磁尾唯电子重联、平静电流片以及传统磁重联的特征, 认为唯电子重联是平静电流片到传统重联的过渡阶段; Angelopoulos 等^[37]发现近地同步轨道附近发生的重联可以直接驱动磁暴; Merkin 等^[38]发现在亚暴触发阶段, 高速流的强度和发生率会显著增加; Sergeev 等^[39]发现在非亚暴阶段, 当等离子体片中出现多个高速流时, 高能粒子的通量也持续增长; Eriksson 等^[40]发现高速流内电子加速主要是费米加速和回旋加速; Bergstedt 等^[41]发现磁绳内的能量转化主要发生在平行方向, 而在磁绳外的能量转化则主要发生在垂直方向; Shustov 等^[42]分析了偶极化锋面附近的亚离子尺度磁洞, 发现这种结构是由气球模/交换模不稳定性导致的; Grigorenko 等^[43]发现偶极化锋面附件的哨声波可以导致能量转化, 并

调制电子投掷角分布; Alqeq 等^[44]发现偶极化锋面处能量转化普遍呈现不均匀特性; Schmid 等^[45]发现偶极化锋面在结构上呈现多尺度特征; Nakamura 等^[46]利用多卫星观测发现在高速流锋面后由于流反弹会形成薄电流片, 会对亚暴电流楔演化产生影响。

内磁层方向上, Claudepierre 等^[47,48]基于卫星观测和经验建模探究了多种波动机制联合作用下辐射带电子的生命周期; Li 等^[49]利用范阿伦和 ERG 卫星的数据给出了甚低频(VLF)波从低纬向高纬传播的直接观测证据, 并提出了朗道共振可能是产生哨声耦合声波双带结构的重要机制; Meredith 等^[50]的研究进一步表明这一传播过程和合声波进入内磁层的过程与波动频率密切相关; Omura 等^[51]发现, 亚暴期间通过斜合声波的非线性波粒相互作用可在几分钟内快速加速相对论电子; Zhang 等^[52]利用 ELFIN 微纳卫星的观测数据, 发现哨声波可以通过非线性波粒相互作用产生超速电子沉降事件; Zhao 等^[53]研究发现范阿伦卫星观测到的辐射带电子反转能谱的主要成因是嘶声波导致的散射效应, 这一发现对于深入理解内磁层中能量电子分布特征以及波粒相互作用具有重要意义; Joseph 等^[54]发现, 辐射带槽区 >700 keV 的相对论电子突然出现与高速太阳风、ICME 以及超低频(ULF)波活动有关; 通过观察相空间密度极值的演化过程, Allison 等^[55]证明局地加速机制能导致能量电子被加速到 7 MeV; Bruff 等^[56]统计研究了等离子体层顶对外辐射带电子通量上升的影响, 发现相对论电子快速增强事件之后, 其峰值位置位于等离子体层顶外一个 R_e 左右。

1.3 电离层物理

近几年, 欧美国家通过引入数字相控阵、固态发射等新技术研制了新的非相干散射雷达, 极大提高了运行时长。目前, 美国已经建成一部全新的相控阵非相干散射雷达, 连续运行了多年^[57]。欧洲正在升级 EISCAT 雷达系统, 将建设成为多站式相控阵非相干散射雷达系统, 有望在电离层体成像、极光物理等方面取得突破^[58]。

国际上正在广泛用于电离层研究的卫星计划主要有 ESA 的 Swarm, NASA 的 GOLD 成像仪、COSMIC-II 和 ICON 卫星^[59-62]。由三颗卫星组成星座的 Swarm 观测卫星, 主要用于地球内禀磁场、岩石圈及空间电流系的研究, 积累的磁场观测数据成为国

际地磁参考场模型重要的数据源^[63]。其中并排飞行的两颗卫星首次有效区分出了岩石圈磁场与多种电离层结构(例如场向电流)的细节特征^[64]。COSMIC-II 卫星利用掩星技术, 为电离层三维成像做出了重要贡献^[65]。GOLD 紫外成像仪位于地球同步轨道, 揭示了日落后赤道电离异常及赤道等离子体泡的演化细节^[66]。ICON 卫星具有等离子体密度、等离子体漂移和中性风场的综合观测, 为研究赤道和低纬电动力学过程提供了最新资料^[67]。

国际重视电离层模式化发展, 建立了各类经验参考电离层模型、电离层理论模型、电离层热层耦合理论模式^[68]。近年来的趋势是发展全大气耦合模式, 考虑与磁层耦合^[69]。先后发展了基于经验模型的电离层现报模式, 基于理论模式利用数据融合技术的电离层短临预报模式、电离层热层预报模式^[70,71]。

电离层实验室模拟研究在国际上得到了深入发展^[72]。美国、欧洲、俄罗斯以及部分中东国家建设了若干大型地面模拟装置, 聚焦攻关多个重要的电离层物理问题^[73-75]。具有代表性的有 KROT 装置。该装置真空室体积高达 80 m^3 , 是当前最大的空间物理地面实验装置。KROT 装置聚焦电离层主动加热实验研究, 在主动实验中密度扰动波导管形成、不均匀体激发与参量过程等方面取得突出成果^[76]。同时, 以意大利 INAF-IFSI 装置为代表的地面实验装置为电离层等离子体探测载荷标定提供了稳定环境^[74]。

国际上对近地空间多圈层进行大范围立体观测, 刻画从点到面、从二维到三维的大尺度空间能量传播过程。同时, 基于理论数值模拟, 甄别不同因素对电离层响应特征的贡献。以电离层不均匀体为例, 国际学者开展区域电离层综合探测, 建立短基线斜测网, 并结合 GOLD 紫外成像仪和 ICON 等卫星在轨探测, 在背景电离层属性和初始激发源研究中取得重要进展^[77,78]。

1.4 中高层大气物理

在中高层大气研究中关注的一个重要方向是太阳活动对其产生的影响。研究集中回答了如下几个问题: 太阳驱动中高层大气强度与变化如何, 太阳过程影响中高层大气的机制与耦合过程如何, 太阳影响中高层大气长期变化的不确定性如何。

太阳活动影响中高层大气的一个直接途径是通过高能粒子(质子或者电子)注入极区中高层大气来

实现^[79]。太阳高能粒子可通过直接影响平流层臭氧光化学过程来调制极区中高层大气。Denton 等^[80]通过分析北极臭氧观测数据发现,在太阳高能粒子事件开始后,平流层臭氧减少可持续 30 天以上,平均下降约 5%~10%^[81]。 NO_x 与大气近红外冷却增强有关,从而导致中高层大气的温度响应。

除高能粒子之外,太阳辐射也对中高层大气产生显著的影响。太阳辐射的影响包含长期(太阳活动周、太阳自转周)变化与太阳耀斑期间短时变化。Roy^[82]发现了太阳活动周与大气度气候模式之间关联的证据,提出太阳信号可以从平流层下传到对流层。但 Chiodo 等^[83]指出前人在研究北大西洋长周期 11 年太阳活动周的变化可能是偶然发生的,是由于气候系统内部变化导致的。这表明,目前人们对太阳周期对中高层大气影响的认识还有欠缺。伴随 NASA 的 GOLD 和 ICON 卫星发射,以及与此前 TIMED 和 SDO 卫星的协同观测,让科学家对太阳辐射对中高层大气的影响更加量化^[84]。

中高层大气研究关注的另一个问题是低层大气过程如何影响中高层大气。近年来,研究关注的主要科学问题包括:低层大气激发的波动如何影响中高层大气状态与演化,中高层大气中性成分与等离子体成分动力学与电动力学耦合过程如何,小尺度动力学过程如何影响中高层大气大尺度特征。自 2016 年以来,国际合作组织 SCOSTEP/VarSITI/ROSMIC 开展中高层大气联合观测 ICSOM(Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modeling),该联合观测中组织了全球从北极到南极的中间层-平流层-对流雷达(MST)、非相干散射雷达(IS),以及其他无线电与光学观测,开展中高层大气研究。通过地基多手段观测获取中高层大气温度、风场、成分等参数,有助于科研人员进一步理解中高层大气状态日变化、逐日变化、季节变化以及年际变化^[85]。流星雷达与荧光共振激光雷达是研究中高层大气动力学过程主要观测手段。

重力波是低层大气激发的一种中小尺度波动,在中高层大气动力学与电动力学耦合过程中扮演着非常重要的角色。卫星是获得全球重力波活动特性的最有效方式,近年来研究揭示了从安第斯山区到南极 Peninsula 高原是重力波活动的热点^[86]。地基的激光雷达、探空气球、无线电雷达等中高层大气探测手段

揭示了区域性重力波活动的特征,并发现高空大气次级重力波的激发现象^[87, 88]。

数值模式是研究重力波对中高层大气影响的另一种有效方式。在全大气环流模式中,由于模式自身网格精度的限制,小尺度的重力波影响一般通过参数化来实现。Medvedev 和 Yigit^[89]发展了一套新方法,将全球环流模式重力波参数化从地面推广至外逸层大气^[89]。利用高精度全大气环流模式,Liu 等^[90]证实了重力波的拖曳作用上传到热层,并在热层大气全球环流起到重要作用。Fritts 等^[91]通过解析模式研究中间层反转层重力波动力学过程,发现反转层可以使重力波在到达其饱和高度之前变得不稳定及破碎。

1.5 月球与行星物理

ARTEMIS 卫星对月球尾迹的远距离观测促进了对月球尾迹的全球与局部特征的进一步了解,Xu 等^[92]利用超过 7 年的 ARTEMIS 数据系统地研究当月球沉浸在太阳风中时,反射的质子如何影响月球尾迹电势结构。Rasca 等^[93]还研究了 2012 年 3 月 8 日穿越地球磁尾的日冕物质抛射(CME)过程中的月球尾迹响应,形成了双重扰动的月球尾迹。此外,月球附近的波动也是研究的热点之一,利用 ARTEMIS 卫星数据,Sawaguchi 等^[94]在月球附近观测到了离散上升调的哨声模波;Howard 等^[95]研究了太阳风与行星际磁场对月球附近 ULF 波动的影响。通过对 2011 年和 2013 年两次月球飞越的分析,发现电子双流不稳定性(ETSI)与电子回旋漂移不稳定性(ECDI)可能是驱动静电波的重要因素。

月球微磁层或迷你磁层是由太阳风与月球磁异常相互作用产生的,是月面天然的保护屏障。微磁层的观测证据主要来自卫星就位观测到的激波结构。然而,弓激波以内是怎样的,特别是微磁层在月面的源区结构是怎样的,目前由于观测数据匮乏仍然知之甚少。目前,国际上月球微磁层的研究热点集中在微磁层的内部结构是怎样的以及其与月面白斑(swirl)现象之间的联系。由于微磁层的尺度一般等于或小于离子回旋半径,需要借助 PIC 方法来进行数值模拟。最近,Deca 等^[96]对太阳风与 Reiner Gamma 磁异常的相互作用进行了三维 PIC 模拟,模拟结果很好地重现了 Reiner Gamma 地区的白斑结构,很好地支持了白斑形成的太阳风遮挡假说。Yeo 等^[97]利用地面实验,模拟了太阳风与小尺度磁场的相互作用。发

现只有电子被遮挡,离子由于是非磁化的,虽然被偏转但仍然有一部分可以穿过磁场。

水星不同于地球,其几乎不存在大气和电离层,因此水星的空间环境主要是磁层过程。而磁层能量释放时,所产生的磁场扰动和粒子加速过程却与水星有诸多的类似之处。信使号数据发现水星在磁尾与磁层顶都存在高频率的“通量管”事件^[98],说明水星可能存在通量管重联过程。BepiColombo 卫星已经开始了对水星的新探测,并将在不久的将来通过双星来同时探测太阳风与水星空间环境,从而建立系统的水星空间环境演化图像。信使号的数据还揭示太阳风“拾取”的钠离子,可能与高能粒子在水星表面的溅射过程密切相关^[99],这也是后续 BepiColombo 卫星重点关注的一个研究方向。

金星和火星没有明显的全球性磁场,其电离层和高层大气与太阳风发生直接相互作用,这种直接作用被认为是金星和火星失去大量水的原因之一。金星和火星是除地球外人类探测最多的两颗行星。但金星自 2015 年金星快车坠毁后再无空间探测卫星,火星近年探测卫星较多,特别是欧洲的火星快车、美国的火星探测器 MAVEN 和中国的天问一号都携带空间探测载荷,在持续增进对火星空间环境的认识。火星空间环境与金星的不同之一是火星空间受火星强岩石剩磁的影响。Weber 等^[100]发现只有离子没有被磁场紧密束缚住时岩石剩磁才会增加离子逃逸,其他情况下岩石剩磁会降低离子逃逸量。总体上,火星岩石剩磁对火星全球离子量只有适度影响。Weber 等^[101]指强太阳风动压会把感应磁场压缩到更低高度,使其与岩石剩磁重联,从而导致夜侧开放磁力线更多,这可能会增加离子逃逸通量。Cravens 等^[102]研究了碰撞对行星际磁场与火星岩石剩磁在电离层重联的影响。Girazian 等^[103]发现强太阳风动压会压缩火星电离层,导致电离层顶部感应磁场增强、等离子体减少,最终导致增加离子逃逸、减少高层电离层日侧向夜侧的等离子体输运。Sánchez-Cano 等^[104]研究了不同岩石剩磁上空的电离层顶,并发现火星电离层顶部一般是被磁化的状态。Nauth 等^[105]研究了磁场拓扑结构对火星磁尾热电子分布的影响,发现火星夜侧阴影区电子来自火星电离层,阴影区外电子来自向阳面,并指出岩石剩磁方向对阴影区电子密度也有影响。

卡西尼飞船于 2017 年 9 月结束探测之后,利用卡西尼探测数据的分析持续改写对土星的认知。Cao 等^[106]利用卡西尼飞船坠毁前的特殊轨道探测磁场资料,对土星磁场的全貌进行了描绘。通过综合分析旅行者号、先驱者号以及卡西尼飞船的长时间积累的探测资料,Moore 等^[107]提出土星内部磁场没有时间演化特征。利用卡西尼的高分辨电子投掷角探测数据,Jasinski 等^[108]分析了土星磁层的开闭磁力线边界特征。Delamere 等^[109]结合观测与模拟,揭示土星磁层顶附近的 KH 不稳定性产生的湍流加热效应。相比于土星,木星的探测则由于朱诺飞船持续采集的新数据而带来更多新的发现。O'Donoghue 等^[110]揭示了极光作为重要加热机制,加热区域向低纬扩散并最终影响木星全球高层大气的现象,并展示了太阳风影响下的极光的行星尺度加热特征。Mori 等^[111]揭示了木星高能电子受到随机加速产生硬 X 射线,而不是之前认为的电场加速。同时,发现 X 射线极光的产生机制在地球与木星具有相似性,并也可能发生在土星。Roussos 等^[112]发现木星的离子辐射带主要由大于 50 MeV 的氧、硫离子构成,其产生机制与地球和土星的不同,是由木星磁层内部的诸如低频等离子体波动等物理机制产生的。Bonfond 等^[113]通过分析朱诺飞船对木星夜侧极光的观测,揭示木星存在与地球类似的极光爆发过程,说明木星磁层动力学过程与地球类似之处远比此前预计的要多。

1.6 空间天气与效应

空间天气监测资料是空间天气研究及预报的基础。美国等航天大国一直十分重视空间天气变化的影响,已构建了天地配合、全方位多要素的空间天气监测系统。国际上地基空间天气监测拥有多类能够进行联网观测的业务型地面空间天气观测系统,包括全球日震监测网(GONG)、太阳电子光学观测网(SEON)、数字化电离层测高仪探测系统(DISS)、新一代电离层测高仪系统(NEXION)、电离层闪烁辅助决策系统(SCINDA)、GPS 连续运行参考站监测网(CORS)、全球 14 个实时地磁监测网等,可实施持续不间断的观测,获得太阳、电离层、地磁、宇宙线等多种探测数据,具有非常广泛的用途。欧美等国也拥有多颗业务型空间天气监测卫星进行多层次立体观测,以 GOES 系列卫星、SDO 卫星、SOHO 卫星、ACE 卫星、DSCOVR 卫星、STEREO 双星、POES 和

METOP 等应用卫星为典型代表,观测要素包括太阳、磁层高能粒子、电离层等。2019 年成功发射的 COSMIC-II 星座持续开展 GNSS 掩星探测,提供 0~60 km 大气温度、密度等数据,是全球临近空间中下部的主要探测数据来源。ICON (Ionospheric CONnection Explorer) 卫星也是 2019 年发射,其成功获取 90~300 km 大气风场。

近年来,以天地基空间天气监测系统为基础,欧美等国开发出了多种基于经验统计与数值模拟的空间环境预报模式,并逐渐开展研究模型向业务化应用转化的工作,也开始探索基于机器学习的智能化预报方法。同时,多个国际机构成立空间天气相关的专家组或服务中心,协调空间天气全球发展和服务。当前,已投入业务化应用的模型包括美国 NOAA 的空间环境预报中心 SWPC 的太阳风数值模型 WSA-ENLIL、美国密歇根大学的磁层数值模型 BAT-R-US 模式、辐射带电子数值模型 VERB 和 BAS 等、美国犹他州立大学研究的全球电离层观测同化模型 (USU GAIM)。

随着人工智能技术的迅速发展,近年来在空间天气基准数据集构建、空间天气现象的检测和特征提取、空间环境观测图像反演、空间环境及空间天气事件的预报等方面都探索了人工智能技术的应用。美国 NASA 已经召开了多届人工智能研讨会,大力发展人工智能技术在空间天气预报方面的应用;国际上多个研究团队都在开展基于深度学习系统的太阳爆发预报,国际上也组建了多个智能化空间天气预报研究团队,例如欧洲“地平线 2020”支持的 FLARECAST 计划,以及荷兰国家数学与计算机研究所 (CWI)、美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室 (JHU/APL)、加州大学洛杉矶分校 (UCLA)、麻省理工大学 (MIT) 与法国国家计算机科学与控制研究所 (INRIA) 多位专家共同组建的“基于机器学习的空间天气预报”团队等。

在预报服务方面,美国的空间天气预报业务由 NOAA 的空间天气预报中心 (SWPC) 和美国空军气象局 (AFWA) 联合开展,预报时间尺度涵盖实时、短期、中期、长期预报,预报内容主要是灾害性空间环境事件的警报、空间环境事件与空间环境参数的预报。此外,SWPC 还提供太阳活动、地磁活动以及 GOES 卫星的实时监测数据服务。其目前的空间天

气服务数据涵盖现报、预报、警报和定制服务等各个环节,可为卫星导航定位、在轨管理、通信系统和载人航天等提供空间环境信息保障,同时在航空、电力网系统、石油管道、地质勘探、保险公司与卫星制造等民用领域进行了广泛的商业应用。

在航天器空间天气效应研究方面,美国、欧洲、俄罗斯等国外航天大国一直致力于充放电防护和空间抗辐射技术研究,充放电防护与抗辐射加固对策贯穿整个航天任务始终,已经建立了完善的空间天气地面模拟、空间天气效应预测、空间天气效应防护研究技术体系。在卫星上搭载多类探测器,研发各种空间天气软件,深入研究效应机理,具有完善的模拟试验与评估规范标准以及基础设施,不断发展与新技术相适应的实用化技术,并通过在轨飞行试验验证防护技术的有效性。

1.7 空间探测有效载荷技术

在天基太阳探测、行星及其卫星探测、行星际探测领域,国际上近期主要探测任务有美国的帕克太阳探测器 (Parker Solar Probe) 和欧空局的太阳轨道器 (Solar Orbiter)、欧空局的木星系统探测任务 (JUperiter ICy moons Explorer, JUICE)、美国的星际测绘及加速探测器 (Interstellar Mapping and Acceleration Probe, IMAP) 等,这些任务配置的载荷是目前国外天基探测载荷的典型代表。在地基探测载荷方面,国际上多个研究单位在磁场/电场、电磁波(激光、无线电等)等方面开展了技术研究和设备研制。

1.7.1 粒子探测载荷

等离子体探测载荷。JUICE 配置了朗缪尔探针,探测 $10^{-4} \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 的电子密度以及 $1 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 的离子密度; Parker Solar Probe 配置了法拉第杯传感器,探测 100 eV~8 keV 的离子和 50 eV~2 keV 的电子; Parker Solar Probe, Solar Orbiter, JUICE, IMAP 均配置了基于静电分析器的等离子体探测载荷。Parker Solar Probe, Solar Orbiter, JUICE 均为三轴稳定平台,其配置的等离子体探测载荷均为大视场方案且具备离子成分探测功能。以 JUICE 为例, JDC (Jovian plasma Dynamics and Composition) 基于偏转系统+静电分析器+反射式飞行时间系统的方案,测量能量范围 0.001~41 keV 的离子和电子,视场 $360^\circ \times 90^\circ$, 质量分辨率 ($M/\Delta M$) 30; JEI (Jovian Electron and Ions) 基于偏转系统+静电分析器方案,

测量能量范围 1 eV~50 keV 的离子和电子, 视场 $360^\circ \times 90^\circ$ 。

能量带电粒子探测载荷。Parker Solar Probe, Solar Orbiter, JUICE 和 IMAP 均配置了能量带电粒子探测载荷。以 Parker Solar Probe 为例, ISIS(Integrated Science Investigation of the Sun)包括 EPI-Lo 和 EPI-Hi。EPI-Lo 基于飞行时间系统方案, 测量 0.02~15 MeV(总能量)以及 85 MeV 的 Fe(总能量)能量离子和 25~1000 keV 的能量电子、共 80 个探测单元实现半球形的大视场探测; EPI-Hi 基于半导体望远镜方案, 测量 1~100 MeV 的能量质子和 He, 以及 0.5~6 MeV 的能量电子。

能量中性原子探测载荷。JUICE 和 IMAP 均配置了能量中性原子探测载荷。以 IMAP 为例: 1 台 IMAP-Lo 基于掠入射电荷转换面+静电分析器+飞行时间系统的方案, 测量 5~1000 eV 的中性原子(分辨 H, He, D, O, Ne), 视场 $9^\circ \times 9^\circ$; 2 台 IMAP-Hi 基于透射电荷转换膜+静电分析器+飞行时间系统的方案, 测量 0.41~15.6 keV 的中性原子(分辨 H, He, C/N/O/Ne 组), 视场 $4^\circ \times 4^\circ$; 2 台 IMAP-Ultra 基于透射电荷转换膜+飞行时间系统的方案, 测量 3~300 keV 的中性原子(分辨 H 和 O), 视场 $90^\circ \times 120^\circ$, 角度分辨率 2° 。

中性大气探测载荷。JUICE 配置了 1 台中性大气探测载荷, 即 NIM(Neutral gas and Ion Mass spectrometer)。该载荷基于热灯丝电离+门控+反射式飞行时间系统方案, 测量能量 <5 eV 的中性气体分子, 质量范围 1~1000 amu, 质量分辨率($M/\Delta M$)1100。

尘埃探测载荷。IMAP 配置了 1 台尘埃探测载荷, 即 IDEX(Interstellar Dust Experiment)。该载荷基于撞击电离+反射式飞行时间系统方案, 测量星际尘埃的元素成分、速度和质量分布, 视场 $\pm 50^\circ$, 质量范围 1~500 amu, 质量分辨率($M/\Delta M$)200。

1.7.2 场探测载荷

天基磁场探测载荷。Parker Solar Probe, Solar Orbiter, JUICE 和 IMAP 均配置了磁场探测载荷。Parker Solar Probe 的磁场传感器有两类: 一是基于磁通门方案的磁通门磁强计(MAGi 和 MAGo), 用于测量变化速度较慢的磁场, 测量磁场三分量, 测量范围 ± 65536 nT, 带宽 140 Hz; 二是基于搜索线圈方案的搜索线圈磁强计(SCM), 用于测量变化迅速的磁

场, 测量磁场三分量, 测量范围 0.01~50 kHz。JUICE 的磁场传感器有两类: 一是基于磁通门方案的磁通门磁强计(JMAGOB 和 JMAGIB), 测量磁场三分量, 测量范围 ± 50000 nT; 二是基于耦合暗态方案的标量原子磁力仪(JMAGSCA), 测量标量磁场, 用于磁通门磁强计的在轨定标。

天基电场探测载荷。Parker Solar Probe, Solar Orbiter 和 JUICE 均配置了电场探测载荷。Parker Solar Probe 的 FIELDS Instrument 中的电场传感器基于单极子天线方案, 测量 DC 约为 1 MHz 的电场; Solar Orbiter 的 RPW(Radio and Plasma Waves)中电场传感器基于单极子天线方案, 测量 DC 约为几百 kHz 的电场; JUICE 的 RPWI(Radio and Plasma Wave Investigation)中电场传感器基于朗缪尔探针方案, 测量 DC 约为 1.6 MHz 的电场。

磁场和电场的地基探测载荷。乌克兰 LVLV 空间研究中心的磁通门磁力仪基于磁通门方案测量地磁场, 测量范围 ± 70000 nT、分辨率 0.1 nT、带宽 DC 约为 3.5 Hz; 美国 Campbell Scientific 公司的 CS110 电场仪基于往复快门方案, 可测量大气电场, 双量程 ± 21000 V·m⁻¹, ± 212000 V·m⁻¹, 分辨率分别为 3 V·m⁻¹ 和 30 V·m⁻¹。

1.7.3 电磁波探测载荷

天基 X 射线探测载荷。Solar Orbiter 配置了 1 台 X 射线探测载荷, 即 STIX(X-ray Spectrometer/Telescope)。该载荷基于傅里叶变换成像技术, 探测能量范围为 4~150 keV 的 X 射线, 视场 2° 。

天基紫外探测载荷。Solar Orbiter, JUICE 和 IMAP 均配置了紫外光探测载荷。以 Solar Orbiter 为例: EUV(Extreme Ultraviolet Imager)基于全日面成像+高分辨率成像的离轴望远镜方案。其中, 全日面成像探测 30.4 nm 和 17.4 nm 的紫外光、视场 $3.8^\circ \times 3.8^\circ$ 、分辨率 3072×3072 像素, 高分辨率成像探测 121.6 nm 和 30.4 nm 的紫外光、视场 $17' \times 17'$ 、分辨率 2048×2048 像素。

天基可见光探测载荷。Parker Solar Probe、Solar Orbiter 和 JUICE 均配置了可见光探测载荷。以 Solar Orbiter 为例, PHI(Polarimetric and Helioseismic Imager)基于离轴高分辨率望远镜(HRT)+折射全盘望远镜(FDT)方案, 测量 617.3 nm 的可见光(提供太阳光球层的磁矢量和视线速度信息), 视场为

$2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ (HRT), $\Phi 2^{\circ}$ (FDT), 2048×2048 像素。

天基红外探测载荷。JUICE 配置了 2 台红外光探测载荷, 均为可见+红外波段。以 MAJIS (Moons and Jupiter Imaging Spectrometer) 为例, 该载荷基于三镜消像散方案 (TMA), 测量 $0.4 \sim 5.7 \mu\text{m}$ 的可见光和红外光 (提供木卫表面成分以及木星大气等信息), 光谱分辨率 $3 \sim 7 \text{ nm}$, 视场 $\pm 1.7^{\circ}$, 400×508 像素。

天基微波探测载荷。JUICE 配置了 1 台微波探测载荷, 即 SWI (Sub-millimeter Wave Instrument)。该载荷基于离轴卡塞格林望远镜方案, 探测 $1080 \sim 1275 \text{ GHz}$ 和 $530 \sim 625 \text{ GHz}$ 两个波段的微波信号 (提供木星大气以及冰卫星的大气和表面信息), 增益 $69.21 \text{ dB} @ 1180 \text{ GHz}$ 和 $63.41 \text{ dB} @ 575 \text{ GHz}$, 谱分辨能力约为 10^7 。

天基无线电探测载荷。Parker Solar Probe, Solar Orbiter 和 JUICE 均配置了无线电探测载荷。以 JUICE 为例, RPWI (Radio and Plasma Wave Investigation) 基于单极子天线方案, 测量太阳射电信号, 包括 3 个 2.5 m 长的天线, 频率范围 $80 \text{ kHz} \sim 45 \text{ MHz}$ 。

在电磁波地基探测载荷方面: 可见光载荷主要有极光、激光雷达等设备, 以日本信州大学的激光雷达为例, 该设备基于钠荧光多普雷方案, 重复频率 100 Hz , 带宽小于 200 MHz , 脉宽 35 ns , 望远镜口径 35.5 cm , 视场角 1 mrad ; 无线电载荷包括各种频段的雷达及射电接收设备, 以平方公里阵列 (Square Kilometre Array, SKA) 的低频孔径阵列 (Low Frequency Aperture Array, LFAA) 为例, 该设备部署于澳大利亚, 观测 $50 \sim 350 \text{ MHz}$ 频率之间的无线电信号, 第一阶段将部署大约 250000 个相同的天线和放大器。

2 中国重要进展与成果

2.1 太阳与日球层物理

太阳活动周的准确预测依赖于太阳发电机模型研究的进展。Jiang^[114] 和 Jiao 等^[115] 发现对黑子出现的纬度和倾斜角的定量测量可以评估 Babcock-Leighton 型发电机模型的非线性强度, 强活动周黑子出现的纬度更高、倾斜角更小。基于深度学习模型融合技术, 并充分利用太阳观测数据的特征, Tang 等^[116,117] 开展了太阳黑子智能分类和耀斑高精度智能

预测, 通过与过去近 30 年的相关预测模型对比, 构建的模型预测精度接近最高水平。

耀斑期间的粒子加速与等离子体加热研究取得了重要进展。Kong 等^[118] 通过数值模拟研究了电子在耀斑终止激波处的加速过程。Samanta 等^[119] 则发现环顶上方下降流导致耀斑环加热的直接证据, 间歇性的加热还导致准周期脉动的产生。Chen 等^[120] 利用随机森林方法处理了第 24 太阳周最大面积超过 $400 \mu\text{h}$ 的 129 个活动区的矢量磁场及其耀斑产率数据, 建立了耀斑定量预报模型。该模型可滚动预报未来 24 h 、 48 h 和 72 h 内活动区的总耀斑产率和耀斑最大级别, 预报准确度超过 97% 。

对爆发磁绳的研究是理解 CME 初发过程的关键。Xing 等^[121] 提出了一种定量计算 CME 爆发前磁绳轴向通量的方法。Zhang 等^[122] 发现通量注入过程会使磁绳内的轴向磁通逐步积累, 并最终达到阈值产生爆发。Guo 等^[123] 开发了基于正则化 Biot-Savart 定律的日冕磁绳重构方法。Gou 等^[124] 发现了 CME 初发过程为电流片中等离子体团合并形成种子磁绳, 揭示了大尺度爆发磁绳与小尺度电流片磁绳之间跨尺度的物理联系。Ye 等^[125] 发现重联出流区的湍流可持续加热爆发磁绳。Jiang 等^[126] 首次在三维磁流体学数值模拟中重现了磁绳截断模型的图像^[123]。爆发的磁绳并不总能进入行星际空间形成 CME。Zhong 等^[127] 发现磁绳的非对称性会显著限制其爆发。Zhou 等^[128] 发现即使背景场衰减很快, 也可能因暗条旋转等原因爆发失败。Yan 等^[129] 发现一个失败爆发由暗条底部小尺度磁流浮现触发, 且爆发暗条物质传输到了周围的束缚磁场与暗条通道中。Li 等^[130] 基于统计分析, 提出活动区磁通量的增加会导致失败爆发比例上升。

针对 ASO-S 卫星的科学预研取得了重要成果。例如, Hong 等^[131] 利用辐射动力学模拟计算了耀斑期间 $\text{Ly}\alpha$ 谱线的轮廓特征。Ying 等^[132] 基于白光日冕仪数据得到 CME 的二维速度分布, 并发现将紫外与白光日冕仪数据结合可得 CME 速度、方向、电子密度、温度分布与演化。Xia 等^[133] 发现了耀斑高能电子的能谱中存在与粒子加速过程有关的高能、低能截止现象。

为理解太阳射电爆发辐射机制, 中国学者通过全电磁粒子模拟方法对等离子体辐射与电子回旋脉泽

辐射机制进行了研究,提出一种由损失锥类高能电子所激发的新型等离子体辐射机制,并找到一种脉泽辐射过程中有效激发二次谐波辐射的三波作用新机制^[134-136]。此外,Chen 等^[137]发现电子回旋脉泽辐射在 III 型射电暴激发机制中扮演重要角色,阿尔芬波调制电子回旋脉泽不稳定性的增长率产生了 III 型射电暴的精细条纹结构。

在宁静太阳大气的研究方面,中国学者也取得了重要进展。例如,Yang 等^[138,139]测得了世界上第一幅边缘日冕的全局性磁图。Chen 等^[140]通过正演验证了利用磁诱导跃迁理论测量日冕磁场的可行性。这为日冕磁场的常规测量带来了曙光。Zhou 等^[141]通过模拟发现太阳表面的湍流运动产生的随机加热会导致光球物质向日冕的蒸发过程中出现不均匀性,从而产生暗条细丝结构和双向流动。Shi 等^[142]在模拟中发现无衰减振荡的波能耗散很有希望平衡冕环辐射损失。Liu 等^[143]发现低层大气中存在许多阿尔芬涡旋。Yuan 等^[144]发现太阳大气中冷热等离子体流动之间会产生 KH 不稳定性,并可能导致加热。Samanta 等^[145]则观测到很多针状物由磁重联驱动并被加热到日冕温度的过程。

行星际日冕物质抛射(ICME)的特征及其传播过程还不完全清楚。Huang 等^[146]发现磁云中 Fe 和 O 等重离子的电离态均为双峰分布,且快磁云的重离子电离态更高。Song 等^[147]分析了 ICME 与太阳风氦丰度的分布,推测出 ICME 和低速太阳风的高氦丰度主要源自活动区。Lyu 等^[148]从对 CME 多视角的白光成像观测中实现了对 CME 三维结构的重构;利用类似的方法,Li 等^[149]给出了太阳风速度的径向分布。Liu 等^[150]发现 CME 驱动的激波在太阳附近的膨胀与高能粒子加速、激波到达地球的快慢是相关联的。Zhao 等^[151]指出 CME 主要减速发生在 0.6 AU 内。结合中国风云三号 E 星(FY-3E)首台空间太阳望远镜(X-ray and Extreme Ultraviolet Imager, X-EUVI)和国外望远镜的双视角、多波段协同观测^[152],Hou 等^[153]揭示了 CME 极紫外波的物理本质及其三维传播规律。该极紫外波最可能是 CME 驱动的快模磁流体动力学激波,在沿着太阳表面的传播过程中是向前倾斜的,并影响了太阳大气的多个层次。

在内日球层太阳风性质的研究方面,Huang 等^[154]发现了近日低速太阳风离子尺度湍动同时存在的动

力学阿尔芬波和离子回旋波。Zhu 等^[155]指出近日太阳风中惯性区的湍动中,外传阿尔芬扰动是主要成分,还有少量外传快波和内传阿尔芬波。Wu 等^[156]发现低频拐点扫频供能机制可以解释近日低速太阳风中质子的垂直加热和高速太阳风的加热。He 等^[157]提出在交换磁重联中引入导向场间断面的新模型,可重现阿尔芬扰动脉冲的观测特征并解释磁偏折的形成。Liu 等^[158]发现 0.13~0.9 AU 的太阳风中,随距离增加,间断面发生率下降,旋转与切向间断面发生率的比值也下降。Zhao 等^[159]发现磁螺度增加时,能谱更陡,质子温度明显增加,这可能是动力学阿尔芬湍流垂直加热太阳风质子的证据。Wang 等^[160]发现,在太阳活动强的时期内,34% 的低速太阳风具有高阿尔芬特性,与起源于冕洞的高速流性质相似。

在太阳能量粒子研究方面,Liu 等^[161]发现准垂直激波处的太阳风超热电子的加速机制主要是激波漂移加速,且电子能谱的双幂律谱中间的拐点是由激波厚度决定的。Wang 等^[162]发现太阳能量电子可能源于高日冕加速区处的上行电子,而对应的下行电子则在产生硬 X 射线辐射之前被二次加速。He 等^[163]则分析了湍流和磁场不均匀性对太阳能量粒子在外日球层传播的影响。

在银河宇宙线方面,Luo 等^[164]通过数值模拟系统研究了共转相互作用区对于宇宙线质子传播的影响,并精确拟合了 AMS-02 实验 2012—2013 年观测到的质子能谱。Shen 等^[165]讨论了宇宙线在日球层内的纬向调制效应。而对于异常宇宙线,Guo 等^[166]通过全球数值模拟发现其能显著改变终止激波与日球层顶的径向距离,为旅行者号两次较理论预期提前穿越日球层顶事件提供了重要解释。

2.2 磁层物理

中国的科研人员对磁层顶、磁鞘、弓激波、磁尾和内磁层这些区域也开展了系统性研究,近年来取得了一系列重要的科学成果。在磁层顶、磁鞘、弓激波方向上,Tang 等^[167]报道了磁层顶非重联电流片内的电子新月形分布;Li 等^[168]发现扩散区内的新月形电子分布可以激发电子 Bernstein 波动;Fu 等^[169,170]报道了磁层顶重联处哨声波加速电子的证据和电子扩散区内存在磁零点的证据;Wang 等^[171]首次实现了对磁层顶 X 线时空演化的重构;Sun 等^[172]基于全球 MHD 模拟发现了通量传输事件的发生率会随经度和

纬度的改变出现明显变化; Wang 等^[173]发现磁鞘磁重联电子扩散区内存在大尺度平行电场; Liu 等^[174]发现磁鞘中的切向间断面可以有效地加热电子; Huang 等^[175]利用结构函数方法证实了动理学尺度湍动由垂直方向波动占主导; He 等^[176]研究了磁鞘中湍流耗散率频谱, 发现在离子动理学尺度存在正的能量耗散; Yao 等^[177]发现磁洞中可以局地激发哨声波、静电孤立波以及回旋波等波模; Liu 等^[178]报道了一种嵌套磁洞, 并用 sounding 技术对这种磁洞实现了重构; Yang 等^[179]发现激波反射的离子会在相空间形成一个环束流, 并产生一个新的磁峰结构; Jiang 等^[180]利用 MMS 数据和 FOTE 方法, 发现激波前段的前兆激波处也能发生磁重联; Lu 等^[181]和 Guo 等^[182]利用三维混合模拟, 发现准平行激波上游的湍动会产生很多离子尺度的电流片, 并激发多 X 线重联。

在磁尾方向上, Lu 等^[183]发现磁尾重联首先是唯电子重联, 而后进一步发展为传统离子-电子重联; Chen 等^[184]在电子扩散区内发现了磁绳结构, 并在其中观测到很强的能量耗散; Zhou 等^[185]发现在弱引导场情况下, 电子在扩散区内被加速, 其能量增益有 50% 源于重联上游; Wang 等^[186]发现通量绳中会形成丝状电流并引起次级重联; Man 等^[187]在重联产生的大尺度磁绳边界也发现了以唯电子形态进行的次级重联; Ren 等^[188]发现这类电子束流还可以通过朗道共振激发斜传播的哨声波; Zhou 等^[189]利用 MMS 卫星数据在高速流内发现数个电子尺度垂直电流片, 并揭示出这些电流片可以承载能量转化过程; Wei 等^[190]发现高速流能够引发 dB/dt 的强扰动, 进而影响亚暴电流携的演化; Fu 等^[191]发现磁重联可以将高能电子的通量提升 1 万倍, 该效率远高于辐射带的电子加速效率; Fu 等^[192]发现偶极化锋面后存在一个时变的磁瓶, 该结构能够调制当地高能电子通量; Dai 等^[193]基于理论分析和卫星观测, 发现了离子被重联加速后的动力学痕迹; Ma 等^[194]定量研究了偶极化锋面处电子加速率, 并指出回旋加速占主导地位; Liu 等^[195]系统研究了磁尾高能电子投掷角分布, 揭示磁尾电子加速的全球特征; Chen 等^[196]研究了尾向高速流内电子加速过程, 发现电子主要是在流增长相获得回旋加速; Huang 等^[197]报道了磁绳内部存在极强的能量耗散过程; Jiang 等^[198]系统分析了磁绳结构中的能量转化, 揭示了次级磁绳与大尺度磁绳在能量转化

与粒子加速方面的区别; Xu 等^[199]研究了反偶极化锋面的电子动力学, 并揭示了锋面的电磁场精细特征与能量转化过程; Zhao 等^[200]分析了锋面后“擀面杖分布”的精细特征, 发现这种分布只出现在超热能段。

在内磁层方向上,^[175, 176]Liu 等^[201]报道了太阳风动压脉冲激发环向模超低频波, 并进而调制多种内磁层波动的现象; Zhu 等^[202]发现电离层外溢的氧离子进入磁层并加热后, 对磁层中的 EMIC 波有抑制或增长作用; Cao 等^[203]分析了 EMIC 波对环电流质子与辐射带电子的投掷角分布的影响; 进而, Ni 等^[204]发现利用低轨质子通量观测数据可以用于合理反演内磁层 EMIC 波的幅度信息; Zhou 等^[205]统计了 EMIC 波与 MS 波的全球分布特征; Tao 等^[206]提出了合声波扫频的 Trap-Release-Amplify (TaRA) 模型, 并合理解释了合声波的扫频过程及窄带与演化精细结构; Gao 等^[207]发现 2/3 的内磁层合声波在上下频段之间存在一个间隙; Gu 等^[208]揭示了相对论电子通量的动态变化与合声波的活动水平之间的关系; Ni 等^[209]通过参量性分析进一步证实嘶声波是产生辐射带电子反转能谱的源; Hua 等^[210, 211]和 Ni 等^[212]揭示了 Van Allen Probes 卫星就位观测到的人工甚低频台站信号能够散射沉降内辐射带电子, 从而很好地解释了近地空间能量电子分布的分叉现象; Gu 等^[213]利用首次报道的中国在南极长城站布置的哨声波监测仪数据, 发现地基哨声波观测可以作为监测磁暴期间磁层电子沉降对极区低电离层扰动影响程度的有效手段。Fu 等^[214]发现嘶声波的低频部分来源于合声波, 而高频成分则可能是局地激发的; Dai 等^[215]发现了亚暴质子注入对内磁层磁声波的抑制效应; Wu 等^[216]研究了磁声波高纬度激发现象, 为理解磁声波生成机制提供了新思路; Yuan 等^[217, 218]发现背景等离子体密度结构与内磁层磁声波的调制和激发过程有关; Ni 等^[219]详细分析并确定了磁声波对电子投掷角分布演化的贡献; Ren 等^[220]发现 ULF 波能对 $L=4\sim 7$ 、能量介于几 eV 至几百 eV 的电子造成影响, 而 Liu 等^[221]也再现了范艾伦卫星观测到的鱼骨状和回旋镖状电子投掷角分布; Hao 等^[222]与 Li 等^[223]发现, 在磁暴急始时, ULF 波能够迅速加速超相对论电子, 而 500~800 keV 的电子则呈现出一个持续 2~3 天的三带结构; Yue 等^[224, 225]研究了环电流粒子能谱的持续间隙结构, 发现质子持续间隙主要分布在午前扇区附近,

而氧持续间隙主要分布在下午扇区; Ren 等^[226] 在 $L=2\sim 5$ 处发现到了低能离子的楔形结构, 并将这一楔形结构归因于磁尾亚暴活动的瞬态注入。

2.3 电离层物理

经过多年建设, 中国电离层物理研究呈现深入发展态势。在电离层观测投入了大量资源, 国家重大科技基础设施项目“东半球空间环境地基综合监测子午链”(即子午工程)一期已经实施和运行, 二期正在建设^[227]。在国家高技术研究发展计划(简称 863 计划)支持下, 中国科学院国家空间科学中心完成了首部高频相干散射雷达—佳木斯高频雷达的自主研制, 于 2020 年加入国际超级双极光雷达网组织。利用该雷达观测到了磁暴期间强电离层对流、亚极光区极化流, 获取了中纬度电离层不规则体特征和运动图像^[228,229]。在子午工程二期资助下, 将在中国北方建设三站六部高频相干散射雷达实现对中国大范围连续电离层不规则体探测。

在国家自然科学基金委重大仪器专项资助下, 中国科学院地质与地球研究所牵头在海南三亚地区成功建设了相控阵非相干散射雷达^[230]。雷达实现了低纬电离层等离子体线、电离层二维对流等多电离层参量、电离层不均匀体及其他硬目标的初步探测^[231-233]。在子午工程二期的资助下, 对三亚雷达进行阵面扩充, 新建两个接收站。电离层部分电离的地面实验装置已经建设完成, 并在电离层主动干预实验与部分电离等离子体不稳定性激发等研究中取得系列进展^[234,235]。

在星载极光探测方面, 提出了双视场拼接的大视场高分辨率极光成像方案, 成功研制出低轨卫星上视场角最大同时分辨率最高的广角极光成像仪, 搭载于风云三号 04 星(也就是 FY-3D), 2018 年 1 月入轨运行。团队进一步解决了大视场高精度图像拼接与投影难题, 成功获得高质量的极光图像^[236]。利用风云三号卫星广角极光成像仪拍摄的大视场高分辨率极光图像, 首次发现了地球等离子体层顶表面波证据, 证明了表面波是锯齿极光的激发源, 并发现了磁层内波动激发的新的物质和能量传输模式, 更新了磁层物质和能量运输图像^[237]。

电离层天基观测卫星有张衡一号电磁监测试验卫星(CSES)和即将于 2023 年发射的澳科一号卫星。借助于 CSES 及国际上其他卫星的数据, 在低轨

道卫星定标、数据误差分析以及地磁场建模方面取得了良好进展^[238-240], 相关分析结果对卫星平台与载荷的材料及设计提供了重要参考。

风云三号 D 星(FY-3D) 搭载的电离层光度计(Ionospheric Photometer, IPM)首次实现了中国电离层光学遥感的业务化监测, 使中国成为继美国之后第二个拥有氧氮浓度比数据的国家, 更是世界上首次实现了高可靠度的氧原子夜气辉天基探测^[241]。开展了风云 3C 电离层掩星(GNOS)探测技术分析检验工作, 重点研究了 GPS 掩星和北斗掩星探测资料反演误差分布特点及其产生原因, 并发现在南大西洋异常区和极光椭圆带 E 层高度电离层电子浓度有夜间增强现象。相关研究成果发表在 IEEE TGRS 上, 在 2016 年国际卫星信标研讨会上获得最佳报告奖^[242]。

在数值模式方面, 近年来开发了热层电离层电动力学耦合模式^[243]; 发展高分辨率的电离层模式, 模拟中小尺度物理过程^[244]; 发展智能算法, 修正模式内部物理参数和过程参数化, 提出长期电离层热层长期预报方案^[245]; 发展基于集合卡尔曼滤波的电离层热层数据同化模式, 创新性地引入了稀疏矩阵法, 解决大规模计算和存储问题, 实现了利用普通工作站快速高效进行全球尺度电离层热层同化实验, 推进了电离层同化的业务化进程^[246]。开展基于深度学习技术的电离层高精度电子密度预测模型研究^[247-249], 以及作为电离层背景大气的热层大气中性密度预测模型研究^[250]。改进谱白化技术, 直接在频域上实现谱白化, 提高了电离层扰动提取方法的适应性^[251,252], 并进一步证明了该方法能十分有效地提取磁暴引起的电离层扰动。并且该效果不会因为磁暴水平和类型的差异而出现明显的性能下降^[253,254]。在提取扰动的基础上, 构建出了对磁暴响应具有高灵敏度的电离层天气行星尺度指数(J_p)和单站区域指数(J_s)^[255,256]。首次结合修正后的 IRI2016 模型, 提出将该模型与机器学习算法 XGBoost 相结合, 实现了可提前 24 h 预测中国区域 f_oF_2 二维分布地图的端到端集成算法^[257]。

随着中国电离层地基观测网络建设, 研究基于自主观测数据, 结合模式, 获得了近地空间多圈层耦合能量传播引起的电离层扰动高时空分辨率图像。探究不同高度区域电离层随太阳辐射、地磁活动等的变化特性, 揭示其物理过程, 以及电离层与其他圈层的相互耦合机理^[258,259]; 揭示耀斑与日食触发的磁层—电

离层耦合系统的变化^[260],证实了太阳辐射瞬态变化的电离层效应可通过电动力学耦合扩展并影响到整个地球空间^[261];结合观测和模式分离不同物理参数与过程在电离层不均匀体产生中的主导作用^[262, 263];尝试利用机器学习等方法,基于关键参数发展电离层与热层大气相关模型^[264, 265]。这些研究更新了对电离层-热层系统、对极区和磁层物质和能量交换过程的认知。

2.4 中高层大气物理

中国虽然针对专门用于中高层大气探测的卫星的研究还是空白,但在地基观测方面,随着国家投入的增加,自主的中高层大气探测主被动光学、无线电手段得以充分发展,建设了若干中高层大气综合观测观测站,并形成了具体特色中高层大气观测网络(见表1)。2019年,国家重大基础设施子午工程二期的启动,进一步推动中高层大气多层次、连续的、综合观测,将极大地丰富中国地基中高层大气探测的深度和广度,适应不同科学问题研究的需要。

在地磁扰动期间,Yu等^[266]分析了热层高度成分(O , N_2)对磁暴的响应规律,提出水平输运和垂直输运是主导磁暴期间中热层成分扰动最主要的因素,分子扩散作用相对较小,化学过程和湍流扩散作用基本可以忽略。Li等^[267]利用TIME-GCM模式模拟研究表明,在磁暴期间,极区和中纬度中间层-低热层大气温度和风场都存在明显的响应,并且可以引起全球大气环流发生变化。太阳风携带的高能粒子的沉降可以对平流层顶部至低热层大气的化学成分(例如 HO_2 、 O_3 和气辉等)产生重要影响^[268]。

在中高层大气中间层和低热层高度,每天都有大量流星、微流星和尘埃物质注入,其烧蚀后形成的金属离子是电离层E区不规则体(E_s)的主要成分。观测发现全球偶发E层在经度上具有明显的四波结构和行星波周期振荡^[269-271]。Yu等^[272]首次发现大气水平环流显著地影响大气金属离子输运过程,并提出三维风剪切偶发E层的形成理论。

流星烧蚀后形成的金属成分在中间层和低热层高度还形成金属原子/离子富集的金属层,主要位于中间层顶附近(80~110 km)。近年来,中国学者发展了可以开展多种金属成分观测的激光雷达,并发现金属层存在百公里量级的空间不均匀性,可以延展到200 km高度,可以使得中性大气温度、风场的探测向

热层高度拓展^[273,274]。Wu等^[275]将金属离子的全球输运过程扩展到全大气耦合模式WACCM-X中,开发出首个自洽的热层金属层全大气耦合模式。

重力波的动量能量传输对中高层大气的环流和热结构起着重要作用。在重力波传播研究方面,Xu等^[276]首次发现了90 km高度处的大气重力波受地形强烈调制的定量观测证据,发现雷暴引起的中高层大气波动通过导管可以水平传播上千公里。Liu等^[277,278]对大气重力波破碎及其产生次级波的过程,以及背景大气稳定性与重力波强度的关系等方面开展了相关研究,提供了次级波全球分布的观测依据。在重力波能谱研究方向,中国学者利用无线电探空仪、MST雷达、激光雷达和卫星多年观测资料,广泛研究了重力波的波参数分布、重力波谱指数的高度、纬度和季节变化特征^[279-281],可用于评估环流模式中重力波参数化是否与实际相符。

潮汐波是中高层大气另一种重要的动力学过程。基于TIMED/SABER温度观测数据,Li等^[282]研究了MLT区域(70~120 km)大气温度的经度波数谱结构,发现其波数谱的主导成分是四波成分,而该成分是由非迁移潮汐DE3和SE2驱动的。进一步研究发现,非迁移大气潮汐能够在天气学尺度上控制电离层经度四波结构,为研究大气波动对电离层四波结构贡献提供一种有效的思路^[283,284]。

大气行星波和季节内振荡是全球尺度的大气扰动,也是中高层大气重要的动力学过程。有关行星尺度波的传播和耦合特征,并结合多种观测与再分析研究,揭示了低层大气对流活动激发的准27天振荡对重力波进行调制,而被调制的重力波上传到中间层低热层大气中通过耗散驱动了27天振荡的全过程^[285,286]。

热带海温变化导致的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)与平流层风场的准两年振荡(QBO)之间的耦合会显著影响大气动力学过程,并驱动环流影响中高层大气。在中高纬度中间层,Li等^[287]利用多种地基观测和再分析数据分析了冬季中间层北极区小尺度重力波(GW)传播方向特征,指出强ENSO事件和QBO对小尺度重力波的发生存在影响。此外,ENSO和QBO的相互作用还会影响中高层大气温度、迁移和非迁潮汐以及电离层四波结构^[288-290]。

除了热带海洋温度变化,30~60天周期的热带大

表 1 中国现有高层大气台站与设备分布
Table 1 Distribution of existing upper atmosphere stations and equipments in China

台站/经纬度	设备	探测参量*	探测高度/km	单位
漠河 53.5°N, 122.3°E	流星雷达 FP干涉仪	U, V, T	75~110 250, 97, 87	IGGCAS
河北兴隆 40.4°N, 117.6°E	FP干涉仪 全天空气辉成像仪	U, V, T {OH}, {O}	87, 94, 250 87, 94, 250	NSSC
北京延庆 40.2°N, 116.2°E	瑞利-钠激光雷达	$T, \rho, [\text{Na}]$	30~70 80~110	NSSC
河北廊坊 39.5°N, 116.7°E	窄带钠激光雷达 全天空气辉成像仪 中频雷达	$\rho, [\text{Na}]$ {OH} U, V T, U, V	80~110 87 80~100	NSSC
北京 40.3°N, 116.2°E	流星雷达	U, V, T	75~110	IGGCAS
河北香河 39.8°N, 116.9°E	MST雷达	U, V	10~40 70~120	IAPCAS
山西岚县 38.7°N, 111.6°E	FP干涉仪	U, V, T	250, 97, 87	NCSW
山西五寨 38.9°N, 111.8°E	中频雷达	U, V	60~100	NCSW
青岛 36.0°N, 120.2°E	钠激光雷达	$\rho, [\text{Na}]$	80~100	CIRWP
合肥 31.8°N, 117.3°E	瑞利-钠激光雷达 测风激光雷达 窄带钠激光雷达 全天空气辉成像仪	$T, \rho, [\text{Na}]$ U, V $T, U, V, [\text{Na}]$ {OH}, {O}	30~70 80~110 0~60 80~105 87, 94, 250	USTC
武汉 30.5°N, 114.4°E	钠激光雷达 铁激光雷达 钙激光雷达 MST雷达 瑞利-钠双波长激光雷达	$T, \rho, [\text{Na}]$ $T, [\text{Fe}]$ $[\text{Ca}], [\text{Ca}^+]$ U, V $T, \rho, [\text{Na}]$	30~70 80~110 0~70 80~110 80~110 10~40, 70~120 30~70 80~110	WHU WIPM
武汉 30.5°N, 114.4°E	流星雷达	U, V, T	75~110	IGGCAS
云南曲靖 25.6°N, 103.8°E	流星雷达 中频雷达 全天空气辉成像仪	U, V, T U, V {OH}, {O}	75~110 60~100 87, 94, 250	CIRWP NSSC
深圳 22.6°N, 114.1°E	FPI干涉仪	U, V, T	250, 97, 87	NCSW
海口 20.0°N, 110.4°E	瑞利-钠激光雷达	$T, \rho, [\text{Na}]$	30~70 80~110	NSSC
富克 19.5°N, 109.1°E	流星雷达 全天空气辉成像仪	U, V {OH}, {O}	80~100 87, 94, 250	NSSC
三亚 18.3°N, 109.6°E	流星雷达	U, V, T	75~110	IGGCAS

* U 为东西向风速, V 为南北向风速, T 为大气温度, ρ 为大气密度, $[x]$ 为金属成分密度, $\{x\}$ 为气辉强度。

尺度对流降雨活动 Madden–Julian Oscillation (MJO) 也会跨半球影响平流层和中间层温度、风场和 O_2 ^[291]。

进一步, Sun 等^[289]提出了 MJO 驱动的行星波–背景风场–重力波耦合影响极区中高层大气的机制。

此外,基于地基和卫星的长期观测,研究了中高层大气各种参数的长期变化趋势。利用沿 120°E 子午线部署的流星雷达链, Ma 等^[292]对中间层和低热层区域的平均风场进行了统计研究。结果表明,年振荡和半年振荡是主要的低频分量,水平风模式与观测风场在冬季期间以及低纬地区展现出较大的差异。Liu 等^[293]结合全球温度的卫星观测和位于赤道附近的流星雷达测量的风场,结合平衡风理论给出了月平均纬向风场的数据集。结合无线电探空仪、卫星观测数据和再分析资料, Bai 等^[294]分析了气候学尺度低纬地区纬向风、温度和臭氧的准两年振荡的异常变化,根据热风平衡及热力学关系,解释了温度和臭氧准两年振荡的异常结构。

2.5 月球与行星物理

月球是人类探索太空的第一站,关于月球资源的利用一直是学界关注的焦点。Wang 等^[295]通过结合 M3 卫星遥感观测与 ARTEMIS 卫星的就位探测资料,揭示 OH/H₂O 的比值在月球进入地球磁尾区域的期间没有显著变化,提出来地球风在此期间产生了类似太阳风的成水效果。此外,关于月球空间物理的研究也从宏观尺度向微观尺度延伸, Zhang 等^[296]研究了月球小尺度剩磁区域与太阳风相互作用,并发现了低频哨声波扰动沿磁力线传播。

太阳风与月球相互作用,在月表外部产生了能量中性原子(Energetic Neutral Atoms, ENA)。最新研究表明,当嫦娥四号位于磁异常下游时,中性原子探测器测量到的粒子通量整体低于其位于磁异常上游时的测量值。结合全球 Hall MHD 模拟, Xie 等^[297]证实了月球微磁层是造成通量差异的原因,并且该研究还发现微磁层对太阳风的作用主要是偏转和减速,月球微磁层仅在离子回旋半径较小(<120 km)时才可形成,部分太阳风质子仍可穿透微磁层,穿透效率在 0.23~0.78 之间,且正比于太阳风动压。

月球上粒子辐射环境较为复杂,除了银河宇宙射线、太阳高能粒子以外,还有银河宇宙射线或太阳粒子事件与月壤产生的反照辐射,以及天然放射性核素。嫦娥 4 号着陆器搭载的月表中子与辐射剂量探测器(LND)测量月球表面的辐射剂量率、通量以及月球表面快中子的能谱。LND 的主要目的是获取月球表面的剂量率随时间的变化,以及线性能量转移(LET)谱,为人类登月做准备,同时还可开展日球层

物理的研究。Luo 等^[298]比较了太阳平静期(2019 年 1 月至 2020 年 2 月)LND 和近地航天器(ACE, SOHO 和 STEREO-A)的观测数据,在 10~100 MeV/nuc 能量范围内 LND 的宇宙线能谱与近地航天器得到的能谱是一致的。Xu 等^[92]利用搭载在嫦娥四号着陆器上的月球中子和辐射剂量仪器(LND)在月球背面探测到了一个太阳高能粒子事件(SEP)。

近年来,随着中国嫦娥探月任务的持续推进,月尘环境研究得到了快速发展,在理论模型、就位观测、地面实验三方面都取得了一系列研究成果。理论研究方面, Li 等^[299]对不同地方时、不同太阳风条件下的月面电位及电场进行了理论计算,并分析了月尘在月面等离子体鞘中的动力学特征。观测方面, Xie 等^[300]分析了 LADEE 的尘埃电流信号,发现月球晨昏线附近不存在浓密的尘埃外逸层;进一步分析发现,所谓的浓密尘埃外逸层(或地平辉光现象)只存在于一些比较陡的撞击坑周围,其形成原因为地形遮挡带来的尘埃静电喷泉活动。Li 等^[301]利用中国嫦娥三号微量天平数据,发现嫦娥三号着陆点附近并不存在显著的尘埃活动,平均的年沉积率大约只有 21.4 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,其原因可能跟嫦娥三号着陆点处地质年龄较年轻有关。

MESSENGER 卫星在 2011—2015 年间对水星进行了系统的环绕探测,提供了高质量的磁场和等离子体观测数据。Zhong 等^[302]发现行星际磁场对磁场顶的尺度有明显的调制效果,也即准平行情况下磁层顶会膨胀,而准垂直情况下磁层顶会变小。水星的磁层顶在太阳风的作用下会产生低频波动,并且低频波动会在磁尾的晨昏方向进行传播^[296]。Zhong 等^[303]发现水星存在大尺度的通量绳结构,并认为这种强时空动力学过程是强太阳风驱动的结果。Zhao 等^[304]近期提出来水星存在与地球类似的西向环电流,而 Shi 等^[305]的分析也认为西向环电流并不存在,取而代之的是压力平衡情况下对应的东向环电流。

金星快车在 2006—2014 年间对金星的磁层进行了系统的探测,并充分覆盖了 0~3 个金星半径区域的空间环境。Gao 等^[306]金星电流片的磁重联离子扩散区直接观测证据说明金星的动态变化性适合触发磁重联过程。Wang 等^[307]研究了火星电离层顶 K-H 不稳定性的演化,证明了 K-H 不稳定性对火星离子逃逸的重要性。Dang 等^[308]通过自主发展的三维

数值模拟程序,揭示金星三维图像下的 KH 不稳定性所产生的氧离子逃逸过程,对理解行星大气逃逸有重要意义。

与金星显著不同的是,火星存在明显的局地剩磁,因此与太阳风带电粒子产生丰富的电磁相互作用。利用 MAVEN 飞船的探测,Liu 等^[309]统计分析了火星上游太阳风参数及其与太阳活动强弱的关系。Cao 等^[310]统计分析了火星夜侧光电子事件,发现夜侧光电子事件发生概率约为 30%,且随太阳天顶角增加而急剧减少,并指出夜侧光电子是从向阳面源区沿磁力线传输到夜侧的。关于火星大气研究,在过去数年取得重大进展,其中包括太阳旋转调制、光电子边界和磁层顶边界的关系^[311,312]等。通过分析 MAVEN 飞船数据,Guo 等^[313]发现火星磁尾的绝热减速物理过程。在火星的剩磁方面,Chai 等^[314]通过统计研究提出了磁尾的环形磁场特征。Cui 等^[315]分析了火星夜侧高层大气能量电子的耗尽事件,指出太阳风电子沉降是夜侧大气和电离层变化的一个重要外部驱动。

天问一号卫星的数据正在陆续传回来,并且已经发表了部分数据成果。Fan 等^[316]确认了等离子体仪器在太阳风进行有效的观测。Xie 等^[317]提出电离层的非均匀挤压效应会造成磁力线打转,并建立了多流体 MHD 模型,成功解释了金星非磁化电离层中出现的磁通量绳。Xie 等^[318]进一步将该多流体 MHD 模型应用到火星,发现离子回旋半径与磁通量绳半径的比值对这种电离层中的磁通量绳的产生过程至关重要,并发现电离层离子会从磁通量绳的两端逃逸,逃逸率可达 $2.06 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$,约占火星离子总逃逸率的 10%,从而成为火星离子逃逸的重要通道。

关于巨行星空间物理进展的主要研究在土星和木星领域。磁场重联以及磁重联的相关物理过程是巨行星空间物理的焦点问题。利用朱诺飞船和哈勃太空望远镜联合探测,Yao 等^[319]发现木星磁层的磁重联驱动木星极光晨暴,并产生了随后的极光注入。利用类似的联合观测,Guo 等^[320]发现主极光上的“双带”结构的形成与磁层重联过程相关联。巨行星领域的另一个焦点问题则是等离子体波动特征及其对磁层能量耗散的影响。通过对卡西尼飞船长达 13 年的磁场数据分析,Pan 等^[321]对土星磁层的低频波进行了系统的分析,并获得不同太阳风活动背景下的波动

统计分布特征。结合哈勃太空望远镜与朱诺飞船的联合观测,利用卡西尼和朱诺飞船的射电探测仪器,Wu 等^[322]和 Ye 等^[323]分别对土星和木星的射电辐射特征进行分析。巨行星的另一个关注点则是其高能量的辐射带环境,通过数据分析和模型计算,中国的研究团队在过去几年对木星的辐射带物理过程进行了重要的研究^[324]。

2.6 空间天气与效应

在空间天气监测方面主要包含地基监测与天基监测两种手段。

2.6.1 地基监测

子午工程二期在东经 100°和北纬 40°附近增加两条观测链,最终构成两纵两横“井”字形的监测网络,包括 31 个综合台站和近 300 台监测设备(包含一期),将在国际上首次实现对日地空间环境全圈层、多要素综合的立体式地基探测,使得中国的空间环境地基监测能力进入世界先进行列。以子午工程为基础,中国正积极推进“空间天气国际子午圈计划”^[325]即与东经 120°沿线的俄罗斯、澳大利亚等国家,以及西经 60°附近巴西等国家的空间环境监测台站联网,构建环绕地球一周的、完整的空间环境监测子午圈。这极有利于获取全球的地基监测数据,也将大幅提升中国在日地关系领域的国际地位。

在子午工程二期等国家项目中,中国正在部署、建设若干台流星雷达、激光雷达、双通道光学干涉仪等临近空间环境监测设备。相关单位也正在发展覆盖 20~100 km 综合性的临近空间大气温度、密度、风场激光雷达探测技术。

中国科学院国家天文台、紫金山天文台和云南天文台等单位已建成多台国际先进的地基太阳观测仪器,同时拥有一批传统太阳观测仪器。其中,包括北京怀柔观测基地的太阳磁场望远镜、新建成的国际领先的明安图射电频谱日像仪(MUSER),以及位于云南澄江的世界上口径最大的真空红外太阳望远镜。

2.6.2 天基监测

中国已发射的实践系列卫星、北斗系列卫星搭载有空间环境监测设备,风云系列卫星实现了对空间环境的业务化监测,载人航天工程、探月工程也进行了系列的空间环境搭载监测。目前,针对临近空间环境的天基探测,主要是风云卫星上搭载的 GNSS 掩星探测仪、臭氧总量探测仪,风云 3C, 3D, 3E 卫星已实现

GNSS 掩星的三星组网观测,对中国持续获取 60 km 以下大气环境信息具有重要意义。

中国已纳入规划在研的有两颗中国科学院空间科学战略性先导专项卫星,即太阳风-磁层相互作用全景成像卫星(SMILE)和先进天基太阳天文台(ASO-S)。SMILE 卫星致力于首次实现对地球磁层的整体成像观测,揭示磁层大尺度结构及其对太阳风扰动的响应,将帮助人类进一步了解太阳活动对地球等离子体环境和空间天气的影响。ASO-S 卫星将是中国首颗太阳综合探测卫星,可同时观测对地球空间环境具有重要影响的太阳上两类最剧烈的爆发现象——耀斑和日冕物质抛射,研究耀斑和日冕物质抛射的相互关系和形成规律;观测全日面太阳矢量磁场,研究太阳耀斑爆发和日冕物质抛射与太阳磁场之间的因果关系;观测太阳大气不同层次对太阳爆发的响应,研究太阳爆发能量的传输机制及动力学特征。

中国现有的空间天气预报以人工经验和统计模式为主,也在大力发展空间环境数值预报模式,建模与预报能力有了长足的进步,初步形成了空间环境服务保障体系,并在国际合作开始牵头发挥引领作用。

中国开发和获取了一些数值预报模式,包括行星际太阳风和日冕物质抛射数值模型 SIP-AMR-CESE 模型和 IN-TVD 模型、太阳质子事件数值预报模式、三维辐射带电子扩散模型 STEERB、PPMLR-MHD 地球磁层全球磁流体力学数值模式、20~200 km 临近空间大气数值预报技术。部分数值模型在向业务化运行转化的过程中。

在空间天气预测与人工智能技术融合领域,中国也开展了大量探索工作,尤其是在空间天气现象的特征提取和空间天气事件的预报方面取得了重要成果。近年来,利用深度学习方法,中国科学院国家空间科学中心对 SDO 观测的高时空分辨率的活动区图像,开展了活动区磁分类的自动探测^[5],基于 SDO/HMI 日面磁场观测图像建立的耀斑预报模型^[326],均取得了较好的效果。南京大学、紫金山天文台和中国科学技术大学合作,利用卷积神经网络方法研究了 CME 的自动探测和跟踪技术^[327]。

中国科学院国家空间科学中心是中国首个对外提供空间天气预报服务的专业机构,具有完善的空间环境产品设计、标准制定能力,针对不同用户的不同需求,建立定制的产品和服务平台、标准,过去几年为

载人航天、月球与深空探测、空间科学先导专项提供了专项空间环境保障服务。

中国电子科技集团公司第二十二研究所是专门从事电波环境特性观测和应用技术研究的国家级专业研究所,建有电离层骚扰预警中心,是电离层骚扰预报发布的国家授权单位,对太阳爆发引起的电离层扰动事件具有一定的业务预报与保障服务能力。

中国气象局国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心)是国家级空间天气业务机构。该中心形成了基于风云系列卫星、气象观测台网的空间天气业务化监测网,具备规范化、量化的空间天气预报预警业务能力,定期开展决策、专业和公众结合的专业化空间天气应用服务工作。2021 年,中俄联合体全球空间天气中心在京揭牌,由中国气象局、中国民用航空局和俄罗斯联邦水文气象与环境监测局共同建设运行,为国际民航组织提供服务。

中国空间天气效应研究涉及航天产品研制、试验、效应机理研究等生产、教学、科研、使用单位,以中国科学院、中国航天科技集团、中国电子科技集团、中国工程物理研究院以及多所高校为代表的科研院所经过多年研究,取得了大量的创新成果,为中国航天器在轨可靠运行提供了重要的技术支撑。主要进展和成果如下。

效应机理:针对 65 nm 及以上工艺节点器件的辐射效应机理开展了大量研究,揭示了 0.18 μm SOI 工艺器件总剂量辐射损伤机制,阐明了双极器件空间辐射损伤机理,建立了低剂量损伤增强效应加速评估方法。

防护加固设计:建立了 0.18 μm , 0.13 μm 和 65 nm 等工艺等专用抗辐射加固集成电路研制平台,研制了以抗辐射 FPGA、CPU 等核心器件为代表的数百款产品,基本构建了中国抗辐射加固集成电路谱系;针对航天员、元器件发展了富氢、层状金属等新型屏蔽防护材料。

试验模拟技术:建立了空间总剂量效应、单粒子效应、位移损伤效应、充放电效应模拟试验装置及方法,为航天器在轨长期可靠运行提供了重要支撑。

2.7 空间探测有效载荷技术

在天基太阳探测、行星际探测、行星及其卫星探测方面,近期中国已经实施或正在实施的探测任务有中国科学院先导专项 ASO-S 卫星、天问一号/中国科

学院先导专项 SMILE 计划/风云三号 E 星/嫦娥七号/电磁试验卫星 02 星/空间站、小天体探测任务等。在地基探测载荷方面,近期的主要任务有子午工程二期等任务。此外,基金委、中国科学院等单位也支持了一些天基和地基载荷的关键技术攻关任务。

2.7.1 粒子探测载荷

等离子体探测载荷。电磁试验卫星 02 星/空间站配置了朗缪尔探针和阻滞势分析仪(基于法拉第杯),探测 $5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 电子/离子密度;小天体探测任务配置了法拉第杯,探测 $5 \text{ eV} \sim 5 \text{ keV}$ 的离子;天问一号/中国科学院先导专项 SMILE 计划/气象卫星/嫦娥七号、小天体探测任务均配置了基于静电分析器的等离子体探测载荷,以天问一号为例:火星离子与中性粒子分析仪基于偏转系统+静电分析器+飞行时间系统的方案,测量能量范围 $5 \text{ eV} \sim 25 \text{ keV}$ 的离子,视场 $360^\circ \times 90^\circ$,质量分辨率 ($M/\Delta M$)4。

能量带电粒子探测载荷。天问一号/风云三号 E 星/电磁试验卫星 02 星/嫦娥七号等均配置了能量带电粒子探测载荷。以风云三号 E 星为例:中能电子探测器和中能质子探测器(各 2 台)均基于半导体小孔成像方案,分别探测 $30 \sim 600 \text{ keV}$ 和 $30 \text{ keV} \sim 5 \text{ MeV}$ 的中能电子和质子,视场分别为 $135^\circ \times 15^\circ$ 和 $180^\circ \times 20^\circ$;高能带电粒子探测器(3 台)基于半导体望远镜方案,探测 $200 \text{ keV} \sim 5.7 \text{ MeV}$ 的高能电子和 $3 \sim 300 \text{ MeV}$ 的高能质子,视场分别为 30° 和 50° 锥角。

能量中性原子探测载荷。天问一号/嫦娥七号均配置了能量中性原子探测载荷,各 1 台。以天问一号为例:火星离子与中性粒子分析仪基于掠入射电荷转换面+静电分析器+飞行时间系统的方案,测量能量范围 $50 \text{ eV} \sim 3 \text{ keV}$ 的中性原子,视场 $360^\circ \times 15^\circ$,分辨 H, He, O。

中性大气探测载荷。嫦娥七号/小天体探测任务等均配置了中性大气探测载荷。以小天体探测任务为例:气体与离子分析仪基于热灯丝电离+门控+反射式飞行时间系统方案,测量彗星中性气体分子及电离层离子,质量范围 $1 \sim 350 \text{ amu}$,质量分辨率 ($M/\Delta M$)300。

尘埃探测载荷。嫦娥七号和小天体探测任务各配置了 1 台尘埃探测载荷。以嫦娥七号为例:月尘探测载荷基于激光 MIE 散射+石英晶体微量天平方案

测量月表尘埃,尘埃粒径 $1 \mu\text{m} \sim 5 \text{ mm}$,尘埃速度 $0.01 \sim 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,尘埃累积质量 $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

2.7.2 场探测载荷

天基磁场探测载荷。天问一号/中国科学院先导专项 SMILE 计划/风云三号 E 星/嫦娥七号/电磁试验卫星 01 星/02 星、小天体探测任务均配置了磁场探测载荷。以电磁试验卫星 02 星为例:一是基于磁通门方案的磁通门磁强计,测量磁场三分量,测量范围 $\pm 65000 \text{ nT}$, $\text{DC} \sim 15 \text{ Hz}$;二是基于耦合暗态方案的标量原子磁强计,测量标量磁场,测量范围 100000 nT ;三是基于搜索线圈方案的搜索线圈磁强计,测量磁场三分量,测量范围 $10 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$ 。

天基电场探测载荷。电磁试验卫星 02 星配置了电场探测载荷,该载荷基于朗缪尔探针方案,测量 $\text{DC} \sim 3.5 \text{ MHz}$ 的电场。

磁场和电场的地基探测载荷。子午工程二期配置了多台套磁场和电场探测设备。宽频磁场波动监测仪基于磁通门+搜索线圈方案,3 个测量范围为 $\pm 65000 \text{ nT}$ ($0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$), $\pm 100 \text{ nT}$ ($1 \sim 100 \text{ Hz}$), $\pm 100 \text{ pT}$ ($100 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$),频率范围 $0.1 \text{ mHz} \sim 20 \text{ kHz}$ 。大气电场仪基于旋转叶片方案,测量范围为 $-50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1} \sim +50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,分辨率 $10 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2.7.3 电磁波探测载荷

天基 X 射线探测载荷。ASO-S/SMILE/风云三号 E 星均配置了各 1 台 X 射线探测载荷。以 SMILE 为例,软 X 射线成像仪(SXI)为中欧合作的 X 射线探测载荷。该载荷基于新型的龙虾眼光学技术,探测能量范围为 $0.2 \sim 5 \text{ keV}$ 的 X 射线,视场 $16^\circ \times 27^\circ$ 。

天基紫外探测载荷。ASO-S/SMILE/风云三号 E 星/嫦娥七号/电磁试验卫星 02 星均配置了紫外探测载荷。以 SMILE 为例,极紫外成像仪(UVI)基于同轴四反方案,探测波段 $160 \sim 180 \text{ nm}$,视场 $10^\circ \times 10^\circ$,分辨率 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。

天基可见光探测载荷。ASO-S/天问一号/嫦娥七号/小天体探测任务均搭载了可见光探测载荷。以 ASO-S 为例,全日面矢量磁像仪(FMG)基于成像光学+偏振光学方案,测量 532.4 nm 的可见光(提供太阳光球层的磁矢量信息),视场为 33.5 角分,分辨率 $4000 \text{ pixel} \times 4000 \text{ pixel}$ 。

天基红外探测载荷。天问一号/风云三号 E 星/嫦娥七号/小天体探测任务均配置了红外探测载荷。

以小天体探测任务为例,可见红外成像光谱仪基于三镜消像散方案(TMA),测量 $0.45\sim 4.5\ \mu\text{m}$ 的可见光和红外光,光谱分辨率 $8\ \text{nm}$ ($0.5\sim 1\ \mu\text{m}$), $15\ \text{nm}$ ($1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$), $25\ \text{nm}$ ($2.5\sim 4.5\ \mu\text{m}$),视场范围 $\pm 7.5^\circ$ (单次测量视场 $32\ \text{mrad}$),线阵推扫像素数 1024×1 ($0.5\sim 1\ \mu\text{m}$), 320×1 ($1\sim 4.5\ \mu\text{m}$)。

天基微波探测载荷。天问一号/嫦娥七号/风云三号 E 星/电磁试验卫星 02 星均配置了微波载荷。以风云三号 E 星为例,全球导航卫星掩星探测仪(II 型)基于 GPS/GALILEO/GLONASS/BDS 信号接收方案,探测大气温度/湿度及电离层电子密度,工作频点分别为 L1($1575.42\ \text{MHz}$), L2($1227.60\ \text{MHz}$), L5($1176.45\ \text{MHz}$), B1($1575.42/1561.098\ \text{MHz}$), B3($1268.52\ \text{MHz}$)。

天基无线电探测载荷。天问一号/小天体探测任务各配置了一台无线电探测载荷。以天问一号为例,环绕器次表层探测雷达基于双频段发射+双极化接收方案,测量火星表面地形以及行星际甚低频射电频谱,包括 5 个天线(最长 $5\ \text{m}$),工作频率 $10\sim 20\ \text{MHz}$ 和 $30\sim 50\ \text{MHz}$ 。

电磁波地基探测载荷。子午工程二期配置了多台套可见光探测设备(包括可见光波段的激光雷达)、红外光探测设备(包括激光雷达)、微波设备、和无线电设备。激光雷达发射激光 $532\ \text{nm}$ (带宽 $100\ \text{MHz}$)、脉冲能量 $900\ \text{mJ}$ 、脉冲宽度 $5\sim 6\ \text{ns}$ 、重复频率 $30\ \text{Hz}$,接收 N2 转动拉曼谱线 ($535.749\ \text{nm}$, $533.479\ \text{nm}$), $1\ \text{m}$ 口径+ $0.3\ \text{m}$ 口径两个望远镜。阵列式大口径激光雷达基于亚稳态氦原子荧光探测方案,工作波段为 $1083\ \text{nm}$ ($1083\ \text{nm}$ 为主要波段,还有 $532\ \text{nm}$ 和 $589\ \text{nm}$ 两个波段),通过 6 个 $1\ \text{m}$ 望远镜进行红外单光子测量,可探测 $1000\ \text{km}$ 高度的中性氦原子。电离层 TEC 及闪烁监测仪基于 GPS 信号接收方案,探测电离层中小尺度扰动,工作在 $1.15\sim 1.28\ \text{GHz}$ 、 $1.56\sim 1.60\ \text{GHz}$ 两个频段。圆环阵太阳射电成像望远镜基于阵列天线方案(313 个天线单元均匀分布在直径 $1\ \text{km}$ 的圆周上),探测 CME 的分布、位置及结构,工作在 $150\sim 450\ \text{MHz}$ 频段,探测灵敏度 $700\ \text{K}$ 。

3 空间物理未来重点发展方向

目前,空间物理研究和探测正朝着整体性、系统

化、精细化方向发展。随着探测手段和技术的进一步提升,未来 $5\sim 15$ 年空间物理各方向将迎来新的发展机遇。

未来 5 年,中国将利用地球空间“微笑计划”(SMILE)卫星、ASOS 卫星、“天问一号”卫星观测数据,重点在太阳爆发、太阳风-磁层相互作用以及火星空间环境探测方向开展研究。

未来 $10\sim 15$ 年,中国计划完成在行星际-磁层-电离层-中高层大气空间天气连锁变化过程探测的全覆盖,并取得关键空间物理过程的重点突破;利用中国月球和深空探测任务在地月空间物理过程的整体观测研究、太阳风与木星磁层以及星际介质相互作用探测研究中取得重要进展。为此,空间物理未来 $10\sim 15$ 年拟重点发展的研究方向如下。

(1)太阳极区磁场特性及其形成和演化。太阳是目前唯一可以实现立体观测的恒星,如何获得完全解决 180° 不确定性的最精准太阳全日面磁场,尤其是太阳极区磁场,是尚未解决的重大科学问题之一。亟待解决的关键科学问题包括:如何理解太阳内部结构和内部输运等动力学过程;如何理解和预测太阳活动周演化规律;如何深刻认识类太阳恒星以及行星宜居性的演化规律;如何解释日面磁场等特性结构全生命期的演化规律;太阳大气结构如何,如何理解子午环流和发电机原理;日冕加热机理难题如何破解;太阳爆发活动的起源、储能与释放物理机制是什么;如何通过高纬地区探测和环日探测等方法对太阳磁场的形成和演化;如何对日冕和太阳风暴多尺度结构进行立体成像和不同纬度的原位探测;如何确定日冕物质抛射在黄道面投影;如何监测太阳物理和日地空间环境;如何把握太阳爆发及能量传播物理过程、构建数据驱动空间天气预报模型。

(2)太阳风-磁层关键区域跨尺度过程和机理。太阳风与地球磁层相互作用存在丰富复杂的跨尺度过程,对其的深入研究可提升对空间无碰撞等离子体中的能量转换和粒子加速机制这一基本性问题的认识。亟待解决的关键科学问题包括:磁场重联在宏观尺度、中间尺度和微观尺度上的典型性物理过程有哪些;三种尺度的过程如何耦合;磁场重联是到底如何触发、发展和停止的;重联率的关键控制因素是哪个;重联线的空间尺度是零散断续还是大尺度连续演化;太阳风能量通过磁重联进入磁层的效率如何;等离子

体波动在重联区域的分布、等离子体波动对于重联触发是否有贡献;激波、湍流与重联过程如何耦合;磁场能量如何通过重联耗散、电子和离子各获取多少比例;离子和电子如何在重联、湍流和激波等过程中获得加速;核心区域在哪,关键物理机制是什么;亚暴电流中断机制是什么;磁暴电流体系如何形成及演化;磁暴亚暴是怎样的关系。

(3)太阳风-星际介质相互作用的过程和机理。探索研究太阳风与星际介质的环境特性及其相互作用,能提升人类对整个日球系统和太阳系宜居性的演化规律的全面认知、构建和扩展太阳系知识体系。亟待解决的关键科学问题包括:如何界定日球层的整体形态是球泡形、磁层形,还是羊角形;突破人类对终止激波、内外日鞘区、日球层顶、彩带、氢墙等宏观结构的认知,日球鼻尖是否存在弓激波或弓形波;日球尾部未知领域结构特性如何;如何理解日球层全球动力学过程;宇宙射线如何被加速、日球层对其如何调制;拾起离子特性如何;对日球层结构特性有何影响;太阳风在日球层的加热机理是什么;湍动特性如何;超热离子如何演化;太阳风等离子体结构在日球层的传播、演化和最终命运是什么;如何探测星际磁场、中性原子、等离子体和尘埃等介质和物理量;彩带如何形成;日球迎风侧无尘区和背风侧引力聚焦锥如何形成和演化;日球层边界动态变化及不稳定性与星际环境存在什么关联。

(4)太阳风扰动的三维传播特性及南向磁场的预测。研究太阳风扰动结构的三维传播特性以及对行星际南向磁场的准确预测,能提升对太阳爆发、日冕物质抛射的传播规律和地磁扰动的认知。亟待解决的关键科学问题包括:如何准确将太阳风扰动结构的磁力线回溯到日面、确定其足点位置、理解其起源以及与太阳爆发活动的关联;什么因素造成行星际南向磁场增强并对地磁环境造成严重影响;如何获得南向磁场与太阳活动水平、太阳风动压、磁场强度等参量的统计关系;如何通过行星际空间极轨、环日和拉格朗日 L5 点等卫星任务,联合地球磁层卫星任务共同开展对日面源区的监测、对行星际的扰动和磁场结构的传播,开展日地全景成像跟踪、并获取地球磁层响应;如何准确预报南向磁场引起的地磁活动指数变化;如何理解太阳风扰动结构及南向磁场对地球磁层重联、地磁活动、亚暴和极光等现象的外因、理解太

阳风-地球耦合系统的能量输运机理。

(5)内磁层波粒相互作用如何影响辐射带三维结构与演化。内磁层是各类在轨卫星和飞行器运行的重要空间区域,其中能量粒子和波动活动丰富且复杂。进行内磁层各种波、粒现象和物理机制的系统研究,有助于深入、全面理解辐射带粒子的加速与损失过程及其对各种太阳活动与地磁活动的响应演变特征,明晰内磁层空间的波粒能量转化机制与效应,对在轨空间环境安全维护具有重要应用价值。亟待解决的关键科学问题包括:如何对内磁层各类等离子体和辐射带高能粒子开展立体探测;波粒相互作用如何影响辐射带三维结构和演化;如何获得内磁层中典型等离子体波动的精确时空动态全球分布、辐射带不同能量离子和电子的三维时空分布特征,真实磁层状态下波粒相互作用过程、机理及效应,不同空间天气环境下辐射带、环电流和等离子体层粒子输运、加速与损失过程的主导性物理要素、条件与机制,不同时空尺度下内磁层波粒能量转化过程与效应的动态特征和宏观/微观演化机理。

(6)磁层-电离层-热层耦合过程及极区粒子动力学。磁层-电离层-热层耦合的关键区亟待解决的关键科学问题包括:电离层上行粒子流的源区、加速机制和传输规律。电离层和热层的物质外流在磁层空间暴触发与演化过程中所起的作用,磁层空间暴引起的电离层和热层全球性多尺度扰动特征,磁层-电离层-热层系统相互作用的关键途径和变化规律,太阳风暴引起空间环境变化和空间天气事件的因果链和规律。极光加速区在地球空间圈层耦合系统中处于承上启下的特殊位置,研究其空间结构和特性,有助于厘清极光加速区粒子加速的物理机制及其能量沉积效应,是认识磁层-电离层耦合过程和规律、构建完善近地空间天气预报系统的基础。亟待解决的关键科学问题包括:如何通过多点探测方法理解极光粒子的传输、加速和沉降过程;如何实现不同高度全球空间物理场和等离子体参量的同步探测。

(7)电离层/热层多尺度扰动结构的成因与变化规律。在地磁扰动期,太阳风携带的能量可直接进入极盖区,或通过太阳风-磁层-电离层耦合过程进入极光区,引起近地空间环境的剧烈变化。因此,亟需厘清以太阳辐射变化、磁暴、亚暴等典型空间天气事件的发生如何触发电离层/热层扰动、太阳风能量如何

耦合至磁层与电离层,并通过焦耳加热的形式产生热层扰动;同时,探究高纬电离层/热层扰动向中低纬传播的机制机理、中低纬暴时扰动的响应规律,以及电离层中的各种等离子体不稳定性及非线性过程,例如,电离层中产生的不同尺度的等离子体不均匀体会导致通过电离层传播的电磁波幅度和相位出现随即起伏,即电离层闪烁现象。电离层闪烁引起卫星通信质量下降、卫星导航信号失锁、雷达不能有效工作等。因此,亟需厘清电离层等离子体不稳定性及其触发过程,以及电离层等离子体不稳定性导致的电离层闪烁的基本特性与规律,评估电离层扰动对不同观测系统的影响,并建立可应用的修正模型。

(8)地球活动-大气层-电离层的耦合过程与机理。发生在岩石圈、地表、海洋及近地大气的各种气象活动,其能量可以通过大气波动传播、电动力学耦合等过程输运到顶部大气层及电离层高度上,引起不同尺度的热层/电离层扰动,这也是近地空间天气的一个重要来源。因此,亟需厘清岩石圈-大气层-电离层可能存在的耦合过程与机理,包括岩石圈与低层大气活动的耦合机制,底部和顶部大气之间、中高层大气与电离层之间的相互耦合作用等对电离层和热层大气的调制,以及物质、能量和动量在热层大气中的传播特性,研究全球气候变化与中高层大气动力学过程的关系。

(9)巨行星系统空间天气环境与物质能量循环机理。木星是太阳系体积最大的行星,木卫一有爆发的活火山,木卫二、三、四可能存在地下海洋。研究木星系统对认识太阳系的起源与演化、木卫系统水冰和生命存在性和宜居性等具有重要意义。亟待解决的关键科学问题包括:木星系统如何起源和演化,木星及其卫星系统的物质能量如何循环,最恶劣辐射环境中辐射带等离子体加速和分布特性,木星的最强磁场起源和特性,太阳风-巨行星系统的磁层-电离层相互作用,最活跃的大气动力学及大气成分和特性。木卫的火山活动、地下海洋和内禀磁场特性如何,是否存在宜居性,最原始卫星演化和不规则卫星俘获机理。巨行星还包括天王星和海王星等冰巨星系,其是太阳系仅剩的未探知巨行星系统。亟待解决关键问题有:冰巨星起源演化和能量循环、其磁层、大气、海洋结构,太阳风-冰巨星旋转磁层相互作用和粒子捕获、加速和逃逸。冰卫星地下海洋和空间环境宜居性的发

展演化。

(10)空间天气对行星宜居性环境的影响和机理。如何从源头感知太阳风暴,即如何通过多点、多地探测手段获得日面磁场和爆发现象,从源头对爆发现事件进行预警;如何预报太阳风暴的传播,即如何实现对太阳爆发现事件的日地全景成像和全时段监测;如何通过自主数据和物理模式准确获得爆发物的三维结构和传播特性;如何理解太阳风暴高能粒子的加速机理和传播特性;如何认识耀斑和日冕物质抛射产生的太阳射电暴的发生机理;如何借助数值模型、大数据和机器学习等研究方法实现精准的空间天气预警和预报。如何全面认知太阳风暴,即如何联合深空探测任务了解太阳风暴在整个太阳系的传播、演化及最终命运,理解太阳风暴对行星磁层大气、小天体、日球层、星际空间的影响,从而把太阳系作为一个相互联系的有机系统来建立空间天气事件从源头到效应的因果链模式,发展空间天气事件的预警和预报系统以及研究对卫星的空间环境效应,探索应对空间天气影响的防护手段。

(11)空间物理有效载荷的发展。为满足被测对象特征参数的宽范围和高分辨率探测需求、获得更准确的探测结果,空间探测有效载荷需向宽量程、高分辨率和高准确度方向发展;为实现高效费比的探测(尤其是天基探测载荷),集成化、轻小型化、长寿命也是空间探测有效载荷发展的重要趋势;将最新的材料、电子以及工艺等方面的发展成果应用于空间探测有效载荷设计,有望在探测原理和方法方面突破传统设计思路,更好地满足未来探测需求。此外,结合有效载荷的探测能力,设计更精妙的整体探测方案,可获得更好的探测效果。

致谢 本文撰写过程中得到了空间物理学科多位专家的指导、支持和建议,他们是傅绥燕、宗秋刚、何建森、曹晋滨、肖伏良、邓晓华、夏利东、陈耀、史全岐、王劲松、张绍东、吴健、杨惠根、徐寄遥、戴磊等;中国科学院国家空间科学中心王玮对本文的整理付出了大量努力。

参考文献

- [1] GIZON L, CAMERON R, POURABDIAN M, *et al.* Meridional flow in the Sun's convection zone is a single cell in each hemisphere[J]. *Science*, 2020, **368**: 1469-1472
- [2] HANASOGE S, HOTTA H, SREENIVASAN K. Turbu-

- lence in the Sun is suppressed on large scales and confined to equatorial regions[J]. *Science Advances*, 2020, **6**: eaba9639
- [3] HOTTA H, IJIMA H, KUSANO K. Weak influence of near-surface layer on solar deep convection zone revealed by comprehensive simulation from base to surface[J]. *Science Advances*, 2019, **5**: eaau2307
- [4] MACTAGGART D, PRIOR C, RAPHALDINI B, *et al.* Direct evidence that twisted flux tube emergence creates solar active regions[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 6621
- [5] CHEUNG M, REMPEL M, CHINTZOGLOU G, *et al.* A comprehensive three-dimensional radiative magnetohydrodynamic simulation of a solar flare[J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**: 160-166
- [6] KUSANO K, IJU T, BAMBA Y, *et al.* A physics-based method that can predict imminent large solar flares[J]. *Science*, 2020, **369**: 587-591
- [7] ISHIKAWA R, BUENO J, ALEMAN T, *et al.* Mapping solar magnetic fields from the photosphere to the base of the corona[J]. *Science Advances*, 2021, **7**(8): eabe8406
- [8] FLEISHMAN G, GARY D, CHEN B, *et al.* Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare[J]. *Science*, 2020, **367**: 278-280
- [9] CHEN B, SHEN C, GARY D E, *et al.* Measurement of magnetic field and relativistic electrons along a solar flare current sheet[J]. *Nature Astronomy*, 2020, **4**(12): 1140-1147
- [10] BROOKS D H, YARDLEY S L. The source of the major solar energetic particle events from super active region 11944[P]. 2021-03-25
- [11] BAHAUDDIN S, BRADSHAW S, WINEBARGER A. The origin of reconnection-mediated transient brightenings in the solar transition region[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**: 1-9
- [12] STANGALINI M, ERDÉLYI R, BOOCOCK C, *et al.* Torsional oscillations within a magnetic pore in the solar photosphere[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(7): 691-696
- [13] JESS D B, SNOW B, HOUSTON S J, *et al.* A chromospheric resonance cavity in a sunspot mapped with seismology[J]. *Nature Astronomy*, 2020, **4**: 220-227
- [14] ANTOLIN P, PAGANO P, TESTA P, *et al.* Reconnection nanojets in the solar corona[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**: 1-9
- [15] CHEN H, ZHANG J, PONTIEU B, *et al.* Coronal Mini-jets in an Activated Solar Tornado-like Prominence[P]. 2020-08-07
- [16] BERGHMANS D, AUCHÈRE F, LONG D M, *et al.* Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2021, **656**: L4
- [17] CHEN Y, PRZYBYLSKI D, PETER H, *et al.* Transient small-scale brightenings in the quiet solar corona: A model for campfires observed with Solar Orbiter[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2021, **656**: L7
- [18] BALE S P, BADMAN S T, BONNELL J W, *et al.* Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole[J]. *Nature*, 2019, **576**: 1-6
- [19] KASPER J C, BALE S D, BELCHER J W, *et al.* Alfvénic velocity spikes and rotational flows in the near-sun solar wind[J]. *Nature*, 2019, **576**: 1-4
- [20] HOWARD R A, VOURLIDAS A, BOTHMER V, *et al.* Near-Sun observations of an F-corona decrease and K-corona fine structure[J]. *Nature*, 2019, **576**: 1-5
- [21] MCCOMAS D J, CHRISTIAN E R, COHEN C, *et al.* Probing the energetic particle environment near the Sun[J]. *Nature*, 2019, **576**: 223-227
- [22] MOSES J D, ANTONUCCI E, NEWMARK J, *et al.* Global helium abundance measurements in the solar corona[J]. *Nature Astronomy*, 2020, **4**: 1134-1139
- [23] SEATON D B, HUGHES J M, TADIKONDA S K, *et al.* The Sun's dynamic extended corona observed in extreme ultraviolet[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**: 1-7
- [24] BURCH J L, WEBSTER J M, HESSE M, *et al.* Electron inflow velocities and reconnection rates at Earth's magnetopause and magnetosheath[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(17): e2020GL089082
- [25] FARGETTE N, LAVRAUD B, OIEROSET M, *et al.* On the ubiquity of magnetic reconnection inside flux transfer event-like structures at the Earth's magnetopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(6): e86726
- [26] NAKAMURA T K M, STAWARZ J E, HASEGAWA H, *et al.* Effects of fluctuating magnetic field on the growth of the Kelvin-Helmholtz instability at the Earth's magnetopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**: e2019JA027515
- [27] CHASTON C C, TRAVNICEK P. Ion scattering and energization in filamentary structures through Earth's magnetosheath[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(15): e2021GL094029
- [28] STAWARZ J E, EASTWOOD J P, Phan T D, *et al.* Properties of the turbulence associated with electron-only magnetic reconnection in Earth's magnetosheath[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **877**: L37
- [29] VEGA C, ROYTERTSHEYN V, DELZANNO G L, *et al.* Electron-only reconnection in kinetic-Alfvén turbulence[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **893**(1): L10
- [30] AMANO T, KATOU T, KITAMURA N, *et al.* Observational evidence for stochastic shock drift acceleration of electrons at the Earth's bow shock[J]. *Physical Review Letters*, 2020, **124**(6): 065101
- [31] OKA M, OTSUKA F, MATSUKIYO S, *et al.* Electron scattering by low-frequency whistler waves at Earth's bow shock[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **886**: 53

- [32] JOHLANDER A, BATTARBEE M, VAIVADS A, *et al.* Ion acceleration efficiency at the Earth's bow shock: observations and simulation results[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **914**: 82
- [33] GINGELL I, SCHWARTZ S J, EASTWOOD J P, *et al.* Statistics of reconnecting current sheets in the transition region of Earth's bow shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**: 1-14
- [34] CHEN LJ, WANG S, HESSE M, *et al.* Electron diffusion regions in magnetotail reconnection under varying guide fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(12): 6230-6238
- [35] SITNOV M I, MOTOBA T, SWISDAK M. Multiscale nature of the magnetotail reconnection onset[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**: 1-6
- [36] HUBBERT M, RUSSELL C T, QI Y, *et al.* Electron-only reconnection as a transition phase from quiet magnetotail current sheets to traditional magnetotail reconnection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): 1-18
- [37] ANGELOPOULOS V, ARTEMYEV A, Phan T D, *et al.* Near-Earth magnetotail reconnection powers space storms[J]. *Nature Physics*, 2020. DOI: 10.1038/s41567-019-0749-4
- [38] MERKIN V G, PANOV E V, SORATHIA K A, *et al.* Contribution of bursty bulk flows to the global dipolarization of the magnetotail during an isolated substorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(11): 8647-8668
- [39] SERGEEV V A, SUN W, YANG J, *et al.* Manifestations of magnetotail flow channels in energetic particle signatures at low-altitude orbit[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(15): 1-10
- [40] ERIKSSON E, VAIVADS A, ALM L, *et al.* Electron acceleration in a magnetotail reconnection outflow region using magnetospheric multiScale data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(1): 1-8
- [41] BERGSTEDT K, JI H, JARA-ALMONTE J, *et al.* Statistical properties of magnetic structures and energy dissipation during turbulent reconnection in the Earth's magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(19): e2020GL088540
- [42] SHUSTOV P I, ZHANG X J, PRITCHETT P L, *et al.* Statistical properties of sub-ion magnetic holes in the dipolarized magnetotail: formation, structure, and 2 dynamics 3[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(1): 342-359
- [43] GRIGORENKO E E, MALYKHIN A Y, SHKLYAR D R, *et al.* Investigation of electron distribution functions associated with whistler waves at dipolarization fronts in the Earth's magnetotail: MMS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(9): 1-18
- [44] ALQEEQ S W, CONTEL O, CANU P, *et al.* Investigation of the homogeneity of energy conversion processes at dipolarization fronts from MMS measurements[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, **29**: 012906
- [45] SCHMID D, VOLWERK M, PLASCHKE F, *et al.* Dipolarization fronts: tangential discontinuities? On the spatial range of validity of the MHD jump conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(12): 9963-9975
- [46] NAKAMURA R, BAUMJOHANN W, NAKAMURA T K M, *et al.* Thin current sheet behind the dipolarization front[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**: A029518
- [47] CLAUDEPIERRE S G, MA Q, BORTNIK J, *et al.* Empirically estimated electron lifetimes in the Earth's radiation belts: Van Allen Probe observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(3): e2019GL086053
- [48] CLAUDEPIERRE S G, MA Q, BORTNIK J, *et al.* Empirically estimated electron lifetimes in the Earth's radiation belts: Comparison with theory[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**: e2019GL086056
- [49] LI J, BORTNIK J, AN X, *et al.* Origin of two-band chorus in the radiation belt of Earth[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**: 1-9
- [50] MEREDITH N P, BORTNIK J, HORNE R B, *et al.* Statistical investigation of the frequency dependence of the chorus source mechanism of plasmaspheric hiss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021(6): e2021GL092725
- [51] OMURA Y, HSIEH Y K, FOSTER J C, *et al.* Cyclotron acceleration of relativistic electrons through Landau resonance with obliquely propagating whistler-mode chorus emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**: 2795-2810
- [52] ZHANG X J, ARTEMYEV A, ANGELOPOULOS V, *et al.* Superfast precipitation of energetic electrons in the radiation belts of the Earth[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 1-8
- [53] ZHAO H, NI B, LI X, *et al.* Plasmaspheric hiss waves generate a reversed energy spectrum of radiation belt electrons[J]. *Nature Physics*, 2019, **15**(4): 367
- [54] JOSEPH J, JAYNES A N, BAKER D N, *et al.* Van Allen belt punctures and their correlation with solar wind, geomagnetic activity, and ULF waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(1): e2020JA028679
- [55] ALLISON H J, SHPRITS Y Y. Local heating of radiation belt electrons to ultra-relativistic energies[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 4533
- [56] BRUFF M, JAYNES A N, ZHAO H, *et al.* The role of the dynamic plasmopause in outer radiation belt electron flux enhancement[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(7): e2020GL086991

- [57] VALENTIC T, BUONOCORE J, COUSINS M, *et al.* AMISR the advanced modular incoherent scatter radar[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology. IEEE: Waltham Massachusetts, 2013
- [58] WANNBERG G, ANDERSSON H, BEHLKE R, *et al.* EISCAT_3 D-a next-generation European radar system for upper atmosphere and geospace research[J]. *Radio Science Bulletin*, 2010, **332**(1): 75-88
- [59] OLSEN N. The swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and swarm data products[J]. *Earth Planets Space*, 2012, **65**: 1189-200
- [60] ANTHES R, BERNHARDT P, CUCURULL L, *et al.* The COSMIC/Formosat-3 mission: early results[J]. *Bulletin of The American Meteorological Society-BULL AMER METEOROL SOC*, 2008, **89**: 313-333
- [61] EASTES R, MCCLINTOCK W, BURNS A, *et al.* The Global-Scale Observations of the Limb and Disk (GOLD) mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**: 383-408
- [62] IMMEL T, ENGLAND S, MENDE S, *et al.* The ionospheric connection explorer mission: mission goals and design[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **214**(1): 12-47
- [63] SABAKA T, TOFFNER-CLAUSEN L, OLSEN N, *et al.* A Comprehensive Model of Earth's Magnetic Field Determined From 4 Years of Swarm Satellite Observations[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**: 130
- [64] MARCHETTI D, DE SANTIS A, SHEN X, *et al.* Possible Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling effects prior to the 2018 Mw=7.5 Indonesia earthquake from seismic, atmospheric and ionospheric data[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, **188**: 104097
- [65] ANTHES R. Exploring earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2011, **4**(6): 1077-1103
- [66] EASTES R W, SOLOMON S, DANIELL R, *et al.* Global-scale observations of the equatorial ionization anomaly[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(16): 9318-9326
- [67] IMMEL T, HARDING B, HEELIS R, *et al.* Regulation of ionospheric plasma velocities by thermospheric winds[J]. *Nature Geoscience*, 2021, **14**(12): 893-900
- [68] REN Z. Upper atmosphere modeling: from Earth to planet[J]. *Chinese Sci Bull*, 2020, **65**(14): 1320-1335 (任志鹏. 高层大气建模: 从地球到行星[J]. *科学通报*, 2020, **65**(14): 1320-1335)
- [69] LIU Y, LEI J, YU P, *et al.* Laboratory excitation of the Kelvin-Helmholtz instability in an ionospheric-like plasma [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(5): 1-8
- [70] CHARTIER A, MATSUO T, ANDERSON J, *et al.* Ionospheric data assimilation and forecasting during storms [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(1): 764-778
- [71] MATSUO T, FEDRIZZI M, FULLER-ROWELL T, *et al.* Data assimilation of thermospheric mass density[J]. *Space Weather*, 2012, **10**: 5002
- [72] LIU Y, SHI P, ZHANG X, *et al.* Laboratory plasma devices for space physics investigation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, **92**: 071101
- [73] GANGULI G, CRABTREE C, FLETCHER A, *et al.* Behavior of compressed plasmas in magnetic fields[J]. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2020, **4**: 12
- [74] GIAMMARIA F, VANNARONI G, BRUNO R, *et al.* The INAF-IFSI Large Plasma Chamber. Technical Report INAF/IFSI-2019-18, Institute for Space Astrophysics and Planetary; National Institute for Astrophysics, 2009
- [75] MIRZAEI H R, KAZEMI M, ETAATI G, *et al.* Analysis and design of microwave resonant plasma source for Iranian Space Plasma Simulation Chamber[J]. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 2022, **16**(3): 162221
- [76] AIDAKINA N, GALK A, GUNDORIN V, *et al.* Simulation of physical phenomena in the ionosphere and magnetosphere of the Earth on Krot plasma device. some results and prospects[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, **58**: 314-324
- [77] KARAN D, DANIELL R, ENGLAND S, *et al.* First zonal drift velocity measurement of equatorial plasma bubbles (EPBs) from a geostationary orbit using GOLD data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**: 1-11
- [78] PARK J, HUANG C S, EASTES R, *et al.* Temporal evolution of low-latitude plasma blobs identified from multiple measurements: ICON, GOLD, and Madrigal TEC[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): 1-14
- [79] MAHER P, GERBER E, MEDEIROS B, *et al.* Model hierarchies for understanding atmospheric circulation[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(2): 250-280
- [80] DENTON M H, KIVI R, ULICH T, *et al.* Solar proton events and stratospheric ozone depletion over northern Finland[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, **177**: 218-227
- [81] NISCHAL N, OBERHEIDE J, MLYNCZAK M, *et al.* Solar cycle variability of nonmigrating tides in the 5.3 μm and 15 μm infrared cooling of the thermosphere (100-180 km) from SABER[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(3): 2338-2356
- [82] ROY I. Solar cyclic variability can modulate winter Arctic climate[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 4864
- [83] CHIODO G, OEHRLEIN J, POLVANI L, *et al.* Insignificant influence of the 11-year solar cycle on the North Atlantic Oscillation[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**: 94-99
- [84] EASTES R, MCCLINTOCK W, AKSNES A, *et al.* Global-scale Observations of the Limb and Disk (GOLD)

- [C]//AGU Spring Meeting. Acapulco Mexico: AGU, 2007
- [85] CRIDDLE N, PAUTET P D, YUAN T, *et al.* Evidence for Horizontal Blocking and Reflection of a Small-Scale Gravity Wave in the Mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(10): e2019JD031828
- [86] ERN M, TRINH Q T, PREUSSE P, *et al.* GRACILE: A comprehensive climatology of atmospheric gravity wave parameters based on satellite limb soundings[J]. *Earth System Science Data*, 2018, **10**: 857-892
- [87] MINAMIHARA Y, SATO K, TSUTSUMI M. Intermittency of gravity waves in the antarctic troposphere and lower stratosphere revealed by the PANSY radar observation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(15): e2020JD032543
- [88] BAUMGARTEN K, GERDING M, BAUMGARTEN G, *et al.* Temporal variability of tidal and gravity waves during a record long 10-day continuous lidar sounding[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**: 371-384
- [89] MEDVEDEV A, YIGIT E. Gravity waves in planetary atmospheres: their effects and parameterization in global circulation models[J]. *Atmosphere*, 2019, **10**: 531
- [90] LIU H L. Variability and predictability of the space environment as related to lower atmosphere forcing[J]. *Space Weather*, 2016, **14**(9): 634-658
- [91] FRITTS D, LAUGHMAN B, WANG L, *et al.* Gravity wave dynamics in a mesospheric inversion layer: 1. reflection, trapping, and instability dynamics: GW dynamics in a MIL: part 1[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **123**: 1-23
- [92] XU Z, GUO J, WIMMER-SCHWEINGRUBER R, *et al.* First Solar Energetic Particles Measured on the Lunar Far-side[P]. 2020-08-08
- [93] RASCA A, FATEMI S, FARRELL W, *et al.* A double disturbed Lunar plasma wake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): 1-13
- [94] SAWAGUCHI W, HARADA Y, KURITA S. Discrete rising tone elements of whistler-mode waves in the vicinity of the Moon: ARTEMIS observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **48**(1): e2020GL091100
- [95] HOWARD S K, HALEKAS J S, FARRELL W, *et al.* Solar wind and interplanetary magnetic field influence on ultra low frequency waves and reflected ions near the moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**: e2019JA027209
- [96] DECA J, HEMINGWAY D J, DIVIN A, *et al.* Simulating the reiner gamma swirl: the long-term effect of solar wind standoff[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, **125**: e2019JE006219
- [97] YEO L, HAN J, WANG X, *et al.* Laboratory simulation of solar wind interaction with lunar magnetic anomalies [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(1): 1-8
- [98] SUN W J, SLAVIN J, DEWEY R M, *et al.* MESSENGER observations of mercury's nightside magnetosphere under extreme solar wind conditions: reconnection-generated structures and steady convection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(3): 1-27
- [99] JASINSKI J, REGOLI L, CASSIDY T, *et al.* A transient enhancement of Mercury's exosphere at extremely high altitudes inferred from pickup ions[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 1-9
- [100] WEBER T, BRAIN D, XU S, *et al.* Martian crustal field influence on O^+ and O_2^+ escape as measured by MAVEN[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): 1-20
- [101] WEBER T, BRAIN D, MITCHELL D, *et al.* The influence of solar wind pressure on martian crustal magnetic field topology[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(5): 2347-2354
- [102] CRAVENS T, FOWLER C, BRAIN D, *et al.* Magnetic Reconnection in the Ionosphere of Mars: The Role of Collisions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(9): 1-16
- [103] GIRAZIAN Z, HALEKAS J, MORGAN D, *et al.* The Effects of Solar Wind Dynamic Pressure on the Structure of the Topside Ionosphere of Mars [P]. 2019-08-16
- [104] SANCHEZ-CANO B, NARVAEZ C, LESTER M, *et al.* Mars' Ionopause: A matter of pressures[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(9): 1-19
- [105] NAUTH M, FOWLER C, ANDERSSON L, *et al.* The influence of magnetic field topology and orientation on the distribution of thermal electrons in the Martian magnetotail[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**: 1-16
- [106] CAO H, DOUGHERTY M, HUNT G, *et al.* The landscape of Saturn's internal magnetic field from the Cassini Grand Finale[P]. 2019-11-01
- [107] MOORE K, BOLTON B, CAO H, *et al.* No evidence for time variation in saturn's internal magnetic field[J]. *The Planetary Science Journal*, 2021, **2**: 181
- [108] JASINSKI J, ARRIDGE C, BADER A, *et al.* Saturn's open-closed field line boundary: a Cassini electron survey at Saturn's magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(12): 18-35
- [109] DELAMERE P, NG C, DAMIANO P, *et al.* Kelvin-Helmholtz-related turbulent heating at Saturn's magnetopause boundary[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): 1-11
- [110] O'DONOGHUE J, MOORE L, BHAKYAPAIBUL T, *et al.* Global upper-atmospheric heating on Jupiter by the polar aurorae[J]. *Nature*, 2021, **596**: 54-57
- [111] MORI K, HAILEY C, BRIDGES G, *et al.* Observation and origin of non-thermal hard X-rays from Jupiter[J].

- Nature Astronomy*, 2022, **6**: 442-448
- [112] ROUSSOS E, COHEN C, KOLLMANN P, *et al.* A source of very energetic oxygen located in Jupiter's inner radiation belts[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(2): eabm4234
- [113] BONFOND B, YAO Z, GLADSTONE G, *et al.* Are dawn storms Jupiter's auroral substorms[J]. *AGU Advances*, 2021, **2**: 1-14
- [114] JIANG J. Nonlinear mechanisms that regulate the solar cycle amplitude[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **900**: 19
- [115] JIAO Q, JIANG J, WANG Z F. Sunspot tilt angles revisited: dependence on the solar cycle strength[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **653**: 1-14
- [116] TANG R X, ZENG X W, CHEN Z, *et al.* Multiple CNN variants and ensemble learning for sunspot group classification by magnetic type[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, **257**: 38-47
- [117] TANG R X, LIAO W T, CHEN Z, *et al.* Solar flare prediction based on the fusion of multiple deep-learning models[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, **257**: 50-62
- [118] KONG X, GUO F, SHEN C, *et al.* The acceleration and confinement of energetic electrons by a termination shock in a magnetic trap: an explanation for nonthermal loop-top sources during solar flares[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **887**(2): 1-8
- [119] SAMANTA T, TIAN H, CHEN B, *et al.* Plasma heating induced by tadpole-like downflows in the flaring solar corona[J]. *The Innovation*, 2021, **2**: 100083
- [120] CHEN A, YE Q, Wang J. Flare index prediction with machine learning algorithms[J]. *Solar Physics*, 2021, **296**: 150
- [121] XING C, CHENG X, DING M. Evolution of the toroidal flux of CME flux ropes during Eruption[C]//American Astronomical Society Meeting. Honolulu: American Astronomical Society, 2020
- [122] ZHANG Q, WANG Y, LIU R, *et al.* Eruption of solar magnetic flux ropes caused by flux feeding[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **898**(1): L12
- [123] GUO Y, XU Y, DING M D, *et al.* The magnetic flux rope structure of a triangulated solar filament[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **884**(1): 1-8
- [124] GOU T, LIU R, KLIEM B, *et al.* The birth of a coronal mass ejection[J]. *Science Advances*, 2019, **5**: eaau7004
- [125] YE J, CAI Q, SHEN C, *et al.* Coronal wave trains and plasma heating triggered by turbulence in the wake of a CME[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **909**(1): 45
- [126] JIANG C, FENG X, LIU R, *et al.* A fundamental mechanism of solar eruption initiation[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**: 1126-1138
- [127] ZHONG Z, GUO Y, DING M. The role of non-axisymmetry of magnetic flux rope in constraining solar eruptions[J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1): 2734
- [128] ZHOU Z, CHENG X, ZHANG J, *et al.* Why do torus-unstable solar filaments experience failed eruptions?[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **877**(2): L28
- [129] YAN X, XUE Z, CHENG X, *et al.* Triggering mechanism and material transfer of a failed solar filament eruption[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **889**: 106
- [130] LI T, HOU Y, YANG S, *et al.* Magnetic flux of active regions determining the eruptive character of large solar flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **900**: 128
- [131] HONG J, LI Y, DING M D, *et al.* The response of the Ly α line in different flare heating models[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **879**(2): 128
- [132] YING B, BEMPORAD A, GIORDANO S, *et al.* First determination of 2D speed distribution within the bodies of coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **880**(1): 41
- [133] XIA F, SU Y, WANG W, *et al.* Detection of energy cutoffs in flare-accelerated electrons[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **908**(1): 111
- [134] NI S, CHEN Y, LI C, *et al.* Plasma emission induced by electron cyclotron maser instability in solar plasmas with a large ratio of plasma frequency to gyrofrequency[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **891**(1): 125
- [135] CHEN Y, ZHANG Z, NI S L, *et al.* Plasma emission induced by electron beam in weakly magnetized plasmas[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, **924**: L34
- [136] NING H, CHEN Y, NI S, *et al.* Harmonic electron-cyclotron maser emissions driven by energetic electrons of the horseshoe distribution with application to solar radio spikes[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **651**: 9
- [137] CHEN L, MA B, WU D, *et al.* An interplanetary type IIIb radio burst observed by parker solar probe and its emission mechanism[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **915**(1): L22
- [138] YANG Z, BETHGE C, TIAN H, *et al.* Global maps of the magnetic field in the solar corona[J]. *Science*, 2020, **369**: 694-697
- [139] YANG Z, TIAN H, TOMCZYK S, *et al.* Mapping the magnetic field in the solar corona through magnetoseismology[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, **63**(11): 2357-2368
- [140] CHEN Y, LI W, TIAN H, *et al.* Forward modeling of solar coronal magnetic-field measurements based on a magnetic-field-induced transition in Fe X[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **920**: 116
- [141] ZHOU Y, CHEN P, HONG J, *et al.* Simulations of solar filament fine structures and their counterstreaming flows[J]. *Nature Astronomy*, 2020, **4**: 994-1000
- [142] SHI M, VAN DOORSSELAERE T, GUO M, *et al.* The first 3 D coronal loop model heated by MHD waves

- against radiative losses[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **908**: 233
- [143] LIU J, NELSON C J, SNOW B, *et al.* Evidence of ubiquitous Alfvén pulses transporting energy from the photosphere to the upper chromosphere[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**: 3504
- [144] YUAN D, SHEN Y, LIU Y, *et al.* Multilayered Kelvin–Helmholtz instability in the solar corona[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **884**(2): 1-5
- [145] SAMANTA T, TIAN H, NAKARIAKOV V M. Evidence for vortex shedding in the sun’s hot corona[J]. *Physical Review Letters*, 2019, **123**: 1-6
- [146] HUANG J, LIU Y, FENG H Q, *et al.* A statistical study of the plasma and composition distribution inside magnetic clouds: 1998–2011[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **893**: 136
- [147] SONG H, CHENG X, LI L, *et al.* Comparison of helium abundance between ICMEs and solar wind near 1 AU[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **925**: 137
- [148] LYU S, WANG Y, LI X, *et al.* Three-dimensional reconstruction of coronal mass ejections by the correlation-aided reconstruction technique through different stereoscopic angles of the solar terrestrial relations observatory twin spacecraft[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **909**(2): 182
- [149] LI X, WANG Y, GUO J, *et al.* Radial velocity map of solar wind transients in the field of view of STEREO/HI1 on 3 and 4 April 2010[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2021, **649**: 58
- [150] LIU Y, ZHU B, ZHAO X. Geometry, kinematics, and heliospheric impact of a large CME-driven shock in 2017 September[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **871**: 8
- [151] ZHAO X, LIU Y D, HU H, *et al.* Quantifying the propagation of fast coronal mass ejections from the sun to interplanetary space by combining remote sensing and multi-point *in situ* observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **882**(2): 122
- [152] CHEN B, ZHANG XX, HE LP, *et al.* Solar X-ray and EUV imager on board the FY-3 E satellite[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, **11**: 329
- [153] HOU Z, TIAN H, WANG JS, *et al.* Three-dimensional propagation of the global extreme-ultraviolet wave associated with a solar eruption on 2021 October 28[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **928**: 28
- [154] HUANG S Y, ZHANG J, SAHRAOUI F, *et al.* Kinetic scale slow solar wind turbulence in the inner heliosphere: coexistence of kinetic Alfvén waves and Alfvén ion cyclotron waves[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **897**(1): L3
- [155] ZHU X, HE J, VERSCHAREN D, *et al.* Wave composition, propagation, and polarization of magnetohydrodynamic turbulence within 0.3 AU as observed by parker solar probe[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **901**(1): L3
- [156] WU H, TU C, WANG X, *et al.* Energy supply by low-frequency break sweeping for heating the fast solar wind from 0.3 to 4.8 AU[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **912**(2): 84-89
- [157] HE J, ZHU X, YANG L, *et al.* Solar origin of compressive Alfvénic spikes/kinks as observed by parker solar probe[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **913**: L14
- [158] LIU Y Y, FU H S, CAO J B, *et al.* Characteristics of Interplanetary Discontinuities in the Inner Heliosphere Revealed by Parker Solar Probe[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **916**: 65
- [159] ZHAO G Q, LIN Y, WANG X Y, *et al.* Magnetic helicity signature and its role in regulating magnetic energy spectra and proton temperatures in the solar wind[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **906**(2): 123
- [160] WANG X, ZHAO L, TU C, *et al.* Alfvénicity of quiet-sun-associated wind during solar maximum[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **871**: 204
- [161] LIU Z, WANG L, SHI Q, *et al.* Case study of solar wind suprathermal electron acceleration at the earth’s bow shock[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **889**: L2
- [162] WANG W, WANG L, KRUCKER S, *et al.* Solar energetic electron events associated with hard X-Ray flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **913**(2): 89
- [163] HE H Q, WAN W. Propagation of solar energetic particles in the outer heliosphere: interplay between scattering and adiabatic focusing[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **885**(2): L28
- [164] LUO X, POTGIETER M S, BINDI V, *et al.* A numerical study of cosmic proton modulation using AMS-02 observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **878**(1): 6-17
- [165] SHEN Z, YANG H, ZUO P, *et al.* Solar modulation of galactic cosmic-ray protons based on a modified force-field approach[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **921**(2): 109
- [166] GUO X, FLORINSKI V, WANG C. A global MHD simulation of outer heliosphere including anomalous cosmic-rays[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **879**(2): 87
- [167] TANG B, LI W, GRAHAM D, *et al.* Crescent-shaped electron distributions at the nonreconnecting magnetopause: magnetospheric multiscale observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(6): 3024-3032
- [168] LI W Y, GRAHAM D B, KHOTYANTSEV Y Y, *et al.* Electron Bernstein waves driven by electron crescents near the electron diffusion region[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 141
- [169] FU H S, PENG F Z, LIU C M, *et al.* Evidence of electron acceleration at a reconnecting magnetopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(11): 5645-5652

- [170] FU H S, CAO J B, CAO D, *et al.* Evidence of magnetic nulls in electron diffusion region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(1): 48-54
- [171] WANG Z, FU H S, VAIVADS A, *et al.* Monitoring the spatio-temporal evolution of a reconnection X-line in space[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **899**: L34
- [172] SUN T R, TANG B B, WANG C, *et al.* Large-scale characteristics of flux transfer events on the dayside magnetopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(4): 2425-2434
- [173] WANG S, WANG R, LU Q, *et al.* Energy dissipation via magnetic reconnection within the coherent structures of the magnetosheath turbulence[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(4): 1-13
- [174] LIU Y Y, FU H S, LIU C M, *et al.* Parallel electron heating by tangential discontinuity in the turbulent magnetosheath[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **877**: L16
- [175] HUANG S Y, XIONG Q Y, YUAN Z G, *et al.* Multi-spacecraft measurement of anisotropic spatial correlation functions at kinetic range in the magnetosheath turbulence[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(5): 1-10
- [176] HE J, DUAN D, WANG T, *et al.* Direct measurement of the dissipation rate spectrum around ion kinetic scales in space plasma turbulence[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **880**: 121
- [177] YAO S, SHI Q, YAO Z, *et al.* Waves in kinetic-scale magnetic dips: MMS observations in the magnetosheath [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(2): 523-533
- [178] LIU H, ZONG Q G, ZHANG H, *et al.* MMS observations of electron scale magnetic cavity embedded in proton scale magnetic cavity[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1): 1-11
- [179] YANG Z, LIU Y, JOHLANDER A, *et al.* MMS direct observations of kinetic-scale shock self-reformation[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **901**: 1-6
- [180] JIANG K, HUANG S Y, FU H S, *et al.* Observational evidence of magnetic reconnection in the terrestrial foreshock region[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **922**(1): 56
- [181] LU Q, WANG H, WANG X, *et al.* Turbulence-driven magnetic reconnection in the magnetosheath downstream of a quasi-parallel shock: a three-dimensional global hybrid simulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(1): 1-6
- [182] GUO Z, LIN Y, WANG X, *et al.* Magnetic reconnection inside solar wind rotational discontinuity during its interaction with the quasi-perpendicular bow shock and magnetosheath[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(12): 1-13
- [183] LU S, WANG R, LU Q, *et al.* Magnetotail reconnection onset caused by electron kinetics with a strong external driver[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 5049
- [184] CHEN Z Z, FU H S, WANG Z, *et al.* First observation of magnetic flux rope inside electron diffusion region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**: e2020GL089722
- [185] ZHOU M, DENG X H, ZHONG Z H, *et al.* Observations of an electron diffusion region in symmetric reconnection with weak guide field[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **870**: 34
- [186] WANG S, WANG R, LU Q, *et al.* Direct evidence of secondary reconnection inside filamentary currents of magnetic flux ropes during magnetic reconnection[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 3964-3971
- [187] MANH Y, ZHOU M, YI Y Y, *et al.* Observations of electron-only magnetic reconnection associated with macroscopic magnetic flux ropes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**: e2020GL089659
- [188] REN Y, DAI L, LI W, *et al.* Whistler waves driven by field-aligned streaming electrons in the near-earth magnetotail reconnection[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(10): 5045-5054
- [189] ZHOU M, HUANG J, MAN H Y, *et al.* Electron-scale vertical current sheets in a bursty bulk flow in the terrestrial magnetotail[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **872**: L26
- [190] WEI D, DUNLOP M W, YANG J, *et al.* Intense dB/dt variations driven by near-Earth Bursty Bulk Flows (BBFs): a case study[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(4): e2020GL091781
- [191] FU H S, XU Y, VAIVADS A, *et al.* Super-efficient electron acceleration by an isolated magnetic reconnection[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **870**: L22
- [192] FU H S, ZHAO M J, YU Y, *et al.* A new theory for energetic electron generation behind dipolarization front[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(6): e2019GL086790
- [193] DAI L, WANG C, LAVRAUD B. Kinetic imprints of ion acceleration in collisionless magnetic reconnection[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **919**: 15
- [194] MA W, ZHOU M, ZHONG Z, *et al.* Electron acceleration rate at dipolarization fronts[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **903**: 84
- [195] LIU C, FU H, LIU Y, *et al.* Electron pitch-angle distribution in earth's magnetotail: pancake, cigar, isotropy, butterfly, and rolling-pin[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(4): e2020JA027777
- [196] CHEN G, FU H, ZHANG Y, *et al.* Energetic electron acceleration in unconfined reconnection jets[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **881**: L8
- [197] HUANG S Y, JIANG K, YUAN Z G, *et al.* Observations of flux ropes with strong energy dissipation in the magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(2): 580-589

- [198] JIANG K, HUANG S Y, YUAN Z G, *et al.* Statistical properties of current, energy conversion, and electron acceleration in flux ropes in the terrestrial magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(11): e2021GL093458
- [199] XU Y, FU H S, CAO J, *et al.* Electron-scale measurements of antipolarization front[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(6): e2020GL092232
- [200] ZHAO M J, FU H S, LIU C M, *et al.* Energy range of electron rolling pin distribution behind dipolarization front[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(5): 2390-2398
- [201] LIU N, SU Z, GAO Z, *et al.* Magnetospheric chorus, exohiss, and magnetosonic emissions simultaneously modulated by fundamental toroidal standing Alfvén waves following solar wind dynamic pressure fluctuations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(4): 1900-1910
- [202] ZHU M, YU Y, JORDANOVA V K. Simulating the effects of warm O^+ ions on the growth of electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, **224**: 105737
- [203] CAO X, NI B, SUMMERS D, *et al.* Sensitivity of EMIC wave-driven scattering loss of ring current protons to wave normal angle distribution[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(2): 590-598
- [204] NI B, HUA M, GU X, *et al.* Artificial modification of Earth's radiation belts by ground-based very-low-frequency (VLF) transmitters[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**: 391-413
- [205] ZHOU R, NI B, FU S, *et al.* Global distribution of concurrent EMIC waves and magnetosonic waves: a survey of van allen probes observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(1): 1-11
- [206] TAO X, ZONCA F, CHEN L. A "Trap-Release-Amplify" model of chorus waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(9): e2021JA029585
- [207] GAO X, CHEN L, LI W, *et al.* Statistical results of the power gap between lower-band and upper-band chorus waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(8): 4098-4105
- [208] GU X, XIA S, FU S, *et al.* Dynamic responses of radiation belt electron fluxes to magnetic storms and their correlations with magnetospheric plasma wave activities[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **891**: 127
- [209] NI B, HUANG H, ZHANG W, *et al.* Parametric Sensitivity of the Formation of Reversed Electron Energy Spectrum Caused by Plasmaspheric Hiss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(8): 4134-4143
- [210] HUA M, LI W, NI B, *et al.* Very-Low-Frequency transmitters bifurcate energetic electron belt in near-earth space[J]. *Nature communications*, 2020, **11**: 4847
- [211] HUA M, NI B, LI W, *et al.* Statistical distribution of bifurcation of Earth's inner energetic electron belt at tens of keV[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(3): e2020GL091242
- [212] NI B, ZHANG Y, GU X. Identification of ring current proton precipitation driven by scattering of electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Fundamental Research*, 2022, **2**: 2667
- [213] GU X, WANG Q, NI B, *et al.* First results of the wave measurements by the WHU VLF wave detection system at the Chinese great wall station in Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(9): e2022JA030784
- [214] FU H, YUE C, MA Q, *et al.* Frequency-dependent responses of plasmaspheric hiss to the impact of an interplanetary shock[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(20): e2021GL094810
- [215] DAI G, SU Z, LIU N, *et al.* Quenching of equatorial magnetosonic waves by substorm proton injections[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(12): 6156
- [216] WU Z, SU Z, LIU N, *et al.* Off-equatorial source of magnetosonic waves extending above the lower hybrid resonance frequency in the inner magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(6): e2020GL091830
- [217] YUAN Z, YAO F, YU X, *et al.* An automatic detection algorithm applied to fast magnetosonic waves with observations of the van Allen probes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(5): 3501-3511
- [218] YUAN Z, YAO F, YU X, *et al.* Ionospheric signatures of ring current ions scattered by magnetosonic waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**: e2020GL089032
- [219] NI B, YAN L, FU S, *et al.* Distinct formation and evolution characteristics of outer radiation belt electron butterfly pitch angle distributions observed by van allen probes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**: e2019GL086487
- [220] REN J, ZONG Q G, ZHOU X Z, *et al.* Cold plasmaspheric electrons affected by ULF waves in the inner magnetosphere: a van Allen probes statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(10): 7954-7965
- [221] LIU Z, ZONG Q G, ZHOU X Z, *et al.* Pitch angle structures of ring current ions induced by evolving poloidal ultra-low frequency waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**: e2020GL087203
- [222] HAO Y Z, ZONG Q G, ZHOU X Z, *et al.* Global scale ULF waves associated with SSC accelerate magnetospheric ultra-relativistic electrons: ULF ultra-relativistic electron[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(3): 1525-1538
- [223] LI Y X, YUE C, HAO Y X, *et al.* The characteristics of three-belt structure of sub-MeV electrons in the radiation belts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*,

- 2021, **126**(7): 1-11
- [224] YUE C, ZHOU X Z, BORTNIK J, *et al.* Sustained oxygen spectral gaps and their dynamic evolution in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(4): 1-11
- [225] YUE C, LIU Y, ZHOU X, *et al.* MLT-dependence of sustained spectral gaps of proton and oxygen in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(12): 1-9
- [226] REN J, ZONG Q G, YUE C, *et al.* Simultaneously formed wedge-like structures of different ion species deep in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(12): 1-11
- [227] WANG C, XU J Y, DAREN L, *et al.* Construction progress of Chinese meridian project phase II[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**: 539-45
- [228] ZHANG J J, WANG W, WANG C, *et al.* First observation of ionospheric convection from the jiamusi HF radar during a strong geomagnetic storm[J]. *Earth and Space Science*, 2020, **7**: e2019EA000911
- [229] WANG W, ZHANG J J, WANG C, *et al.* Statistical characteristics of mid-latitude ionospheric irregularities at geomagnetic quiet time: observations from the jiamusi and hokkaido east superDARN HF radars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(1): e2021JA029502
- [230] YUE X N, WAN W X, NING B Q, *et al.* An active phased array radar in China[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**: 619
- [231] YUE X N, WAN W X, XIAO H, *et al.* Preliminary experimental results by the prototype of Sanya Incoherent Scatter Radar[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**: 1-9
- [232] LI M Y, YUE X N, WANG Y H, *et al.* Moon imaging technique and experiments based on Sanya incoherent scatter radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 1-14
- [233] ZHANG N, YUE X N, DING F, *et al.* Initial tropospheric wind observations by Sanya incoherent scatter radar[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**: 3138
- [234] LIU Y, ZHANG Z K, LEI J H, *et al.* Design and construction of Keda Space Plasma Experiment (KSPEX) for the investigation of the boundary layer processes of ionospheric depletions[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(9): 1-9
- [235] LING Y M, LIU Y, LEI J H, *et al.* Laboratory evidence of a pre-existing instability that can enhance the ionospheric heating efficiency[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(9): 1-8
- [236] ZHANG X X, CHEN B, HE F, *et al.* Wide-field auroral imager onboard the Fengyun satellite[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, **8**: 47
- [237] HE F, GUO R L, DUNN W R, *et al.* Plasmapause surface wave oscillates the magnetosphere and diffuse aurora[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 1668
- [238] SHEN X H, ZHANG X M, YUAN S G, *et al.* The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(5): 634-642
- [239] YAN R, ZHIMA Z, XIONG C, *et al.* Comparison of electron density and temperature from the CSES satellite with other space-borne and ground-based observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(10): 1-17
- [240] YANG Y Y, HULOT G, VIGNERON P, *et al.* The CSES Global Geomagnetic Field Model (CGGM): An IGRF type global geomagnetic field model based on data from the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, **73**(1): 45
- [241] WANG Y, FU L, JIANG F, *et al.* Far-ultraviolet airglow remote sensing measurements on Feng Yun 3-D meteorological satellite[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, **15**: 1577-1586
- [242] MAO T, SUN L, YANG G, *et al.* First ionospheric radio-occultation measurements from GNSS occultation sounder on the Chinese Feng-Yun 3 C satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, **54**(9): 5044-5053
- [243] REN Z P, WAN W X, LIU L B. GCITEM-IGGCAS: A new global coupled ionosphere-thermosphere-electrodynamics model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, **71**: 2064-76
- [244] DANG T, ZHANG B Z, LEI J H, *et al.* Azimuthal averaging-reconstruction filtering techniques for finite-difference general circulation models in spherical geometry[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, **14**: 859-873
- [245] REN D X, LEI J H. A long-range forecasting model for the thermosphere based on the intelligent optimized particle filtering[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **65**: 75-86
- [246] HE J H, YUE X N, WANG W B, *et al.* EnKF ionosphere and thermosphere data assimilation algorithm through a sparse matrix method[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**: 7356-7365
- [247] CHEN Z, JIN M, DENG Y, *et al.* Improvement of a deep learning algorithm for total electron content maps: image completion[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(1): 790-800
- [248] CHEN Z, LIAO W, LI H, *et al.* Prediction of global ionosphere TEC base on deep learning[J]. *Space Weather*, 2021, **20**: e2021SW002854
- [249] TANG R X, ZENG F T, CHEN Z, *et al.* The comparison of predicting storm-time ionospheric tec by three methods: ARIMA, LSTM, and seq2 seq[J]. *Atmosphere*, 2020,

- 11: 316
- [250] WANG P, CHEN Z, DENG X, *et al.* The comparison of predicting storm-time thermospheric mass density by LSTM-based ensemble learning and NRLMSISE-00[J]. *Space Weather*, 2022, **20**: e2021SW002950
- [251] WANG J S, CHEN Z, HUANG C M. A method to identify aperiodic disturbances in the ionosphere[J]. *Annals of Geophysics*, 2014, **32**(5): 563-569
- [252] CHEN Z, WANG J S, DENG Y, *et al.* Extraction of the geomagnetic activity effect from TEC data: a comparison between the spectral whitening method and 28 day running median[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017a, **122**(3): 3632-3639
- [253] CHEN Z, WANG JS, DENG X, *et al.* Study on the relationship between the residual 27 day quasiperiodicity and ionospheric Q disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017b, **122**(2): 2542-2550
- [254] LI H, CHEN Z, XIE L, *et al.* A qualitative study of the ionospheric weak response to super geomagnetic storms[J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(6): 635
- [255] CHEN Z, WANG JS, HUANG CM, *et al.* A new pair of indices to describe the relationship between ionospheric disturbances and geomagnetic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(12): 156-163
- [256] LI H, WANG J S, CHEN Z, *et al.* The contribution of geomagnetic activity to ionospheric f_0F_2 trends at different phases of the solar cycle by SWM[J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(6): 616
- [257] SONG Q, YE Q, ZHANG X X, *et al.* Performance evaluation of modified IRI2016 and its application to the 24 hr ahead forecast f_0F_2 mapping over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**: e2022JA030873
- [258] LIU L B, WAN W X. Recent ionospheric investigations in China (2018–2019)[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**: 179-205
- [259] LIU L, LEI J, LIU J. Ionospheric investigations conducted by Chinese mainland scientists in 2020–2021[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 653-683
- [260] LIU J, WANG W X, QIAN L Y, *et al.* Solar flare effects in the Earth's magnetosphere[J]. *Nature Physics*, 2021, **17**: 807-812
- [261] CHEN X T, DANG T, ZHANG B Z, *et al.* Global effects of a polar solar eclipse on the coupled magnetosphere-ionosphere system[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(23): e2021GL096471
- [262] LI G Z, NING B Q, OTSUKA Y C, *et al.* Challenges to equatorial plasma bubble and ionospheric scintillation short-term forecasting and future aspects in east and southeast Asia[J]. *Surveys in Geophysics*, 2021, **42**: 201-238
- [263] LI Z, LEI J, ZHANG B. Numerical considerations in the simulation of equatorial spread F[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(10): 1-15
- [264] CHEN X T, LEI J H, DEXIN R, *et al.* A deep learning model for the thermospheric nitric oxide emission[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(3): e2020SW002619
- [265] ZHAO X K, LI G Z, XIE H Y, *et al.* The prediction of day-to-day occurrence of low latitude ionospheric strong scintillation using gradient boosting algorithm[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(12): e2021SW002884
- [266] YU T, WANG W, REN Z, *et al.* Middle-low latitude neutral composition and temperature responses to the 20–21 November 2003 superstorm from GUVI dayside limb measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): 1-13
- [267] LI J, WANG W, LU J, *et al.* A modeling study of the responses of Mesosphere and Lower Thermosphere (MLT) winds to geomagnetic storms at middle latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(5): 3666-3680
- [268] ZHU Y J, KAUFMANN M, CHEN Q, *et al.* A comparison of OH nightglow volume emission rates as measured by SCIAMACHY and SABER[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, **13**: 3033-3042
- [269] LIU Z D, LI Q F, FANG H X, *et al.* Longitudinal structure in the altitude of the sporadic E observed by COSMIC in low-latitudes[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**: 4714
- [270] LIU Z D, FANG H X, YUE X N, *et al.* Wavenumber-4 patterns of the sporadic E over the middle- and low-latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): 1-13
- [271] TANG Q, ZHAO J Q, YU Z B, *et al.* Occurrence and variations of middle and low latitude sporadic E layer investigated with longitudinal and latitudinal chains of ionosondes[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(12): e2021SW002942
- [272] YU T T, WANG W B, REN Z P, *et al.* The response of middle thermosphere (~ 160 km) composition to the 20–21 November 2003 superstorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(10): 1-21
- [273] ANDRIOLI V, XU J Y, BATISTA P, *et al.* Nocturnal and seasonal variation of Na and K layers simultaneously observed in the MLT region at 23°S[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**: e2019JA027164
- [274] XUN Y C, YANG G T, SHE C Y, *et al.* The first concurrent observations of thermospheric Na layers from two nearby central midlatitude lidar stations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(4): 1892-1899
- [275] WU J F, WUHU F, LIU H L, *et al.* Self-consistent global transport of metallic ions with WACCM-X[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**: 15619-15630
- [276] XU J Y, LI Q Z, SUN L C, *et al.* The Ground-Based Airglow Imager Network in China: Recent Observational

- Results [M]// American Geophysical Union. Upper Atmosphere Dynamics and Energetics. New Orleans: American Geophysical Union, 2021: 365-394
- [277] LIU X, XU J Y, YUE J, *et al.* Orographic primary and secondary gravity waves in the middle atmosphere from 16- year SABER observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(8): 4512-4522
- [278] LIU X, XU J Y, YUE J. Global static stability and its relation to gravity waves in the middle atmosphere[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**: 1-9
- [279] YANG Z X, HUANG K M, WANG R, ZHANG S D. An observational study of inertia gravity waves in the lower stratosphere over the Arctic[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(8): 2793-2805
- [280] NING W, HUANG K M, ZHANG S, *et al.* A statistical investigation of inertia gravity wave activity based on MST radar observations at Xianghe (116.9°E, 39.8°N), China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(1): 1-19
- [281] HUANG K M, YANG Z, WANG R, *et al.* A statistical study of inertia gravity waves in the lower stratosphere over the arctic region based on radiosonde observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(10): 4958-4976
- [282] LI X, WAN W X, CAO J B, *et al.* Wavenumber-4 spectral component extracted from TIMED/SABER observations[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**: 1-13
- [283] LI X, WAN W X, CAO J B, *et al.* Meteorological scale correlation relationship of the ionospheric longitudinal structure wavenumber 4 and upper atmospheric daily DE3 tide[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(3): 2046-2057
- [284] CHEN T, WAN W, XIONG J, *et al.* A Statistical Approach to quantify atmospheric contributions to the ITEC WN4 structure over low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(3): 2178-2197
- [285] GONG Y, MA Z, LI C, *et al.* Characteristics of the quasi-16-day wave in the mesosphere and lower thermosphere region as revealed by meteor radar, Aura satellite, and MERRA2 reanalysis data from 2008 to 2017[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**: 274-284
- [286] CHENG H, HUANG K M, LIU A, *et al.* A quasi-27-day oscillation activity from the troposphere to the mesosphere and lower thermosphere at low latitudes[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, **73**: 183
- [287] LI J, LI T, WU Q, *et al.* Characteristics of Small-Scale Gravity Waves in the Arctic Winter Mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(6): 1-12
- [288] ZHAO X R, SHENG Z, SHI H, *et al.* Middle atmosphere temperature changes derived from SABER observations during 2002–2020[J]. *Journal of Climate*, 2021, **34**(1): 7995-8012
- [289] SUN C, YANG C Y, LI T. Dynamical influence of the Madden-Julian oscillation on the Northern Hemisphere mesosphere during the boreal winter[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**: 1254-1266
- [290] SUN Y Y, LIU H X, MIYOSHI Y B, *et al.* Niño–southern oscillation effect on ionospheric tidal/SPW amplitude in 2007–2015 FORMOSAT-3/COSMIC observations[J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, **71**: 35
- [291] YANG C Y, SMITH A, LI T, *et al.* The effect of the madden-julian oscillation on the mesospheric migrating diurnal tide: a study using SD-WACCM[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(10): 5105-5114
- [292] MA Z, GONG Y, ZHANG S, *et al.* Study of mean wind variations and gravity wave forcing via a meteor radar chain and comparison with HWM-07 results[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(17): 9488-9501
- [293] LIU X, XU J, YUE J, *et al.* Gravity-wave-perturbed wind shears derived from SABER temperature observations[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2020, **20**: 14437-14456
- [294] BAI X Y, HUANG K M, ZHANG S D, *et al.* Anomalous changes of temperature and ozone QBOs in 2015–2017 from radiosonde observation and MERRA-2 reanalysis[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**: 1-10
- [295] WANG H Z, XIAO C, SHI Q Q, *et al.* Energetic neutral atom distribution on the lunar surface and its relationship with solar wind conditions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **922**: L41
- [296] ZHANG B, DELAMERE P A, YAO Z, *et al.* How Jupiter's unusual magnetospheric topology structures its aurora[J]. *Science Advances*, 2021, **7**(15): eabd1204
- [297] XIE L H, LI L, ZHANG A B, *et al.* Inside a lunar mini-magnetosphere: first energetic neutral atom measurements on the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(14): e2021GL093943
- [298] LUO P X, ZHANG X P, FU S, *et al.* First measurements of low-energy cosmic rays on the surface of the lunar farside from Chang'E-4 mission[J]. *Science Advances*, 2022, **8**: 1760
- [299] LI L, ZHANG Y T, ZHOU B, *et al.* Lunar surface potential and electric field[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**: 15-22
- [300] XIE L H, ZHANG X P, LI L, *et al.* Lunar dust fountain observed near twilight craters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(23): e2020GL089593
- [301] LI D T, WANG Y, ZHANG H, *et al.* In situ measurements of lunar dust at the Chang'E-3 landing site in the northern mare Imbrium[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, **124**(8): 2168-2177
- [302] ZHONG J, SHUE J H, WEI Y, *et al.* Effects of orbital

- eccentricity and IMF cone angle on the dimensions of mercury's magnetosphere[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **892**: 2
- [303] ZHONG J, WEI Y, LEE L C, *et al.* Formation of macro-scale flux transfer events at mercury[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **893**: L18
- [304] ZHAO J T, ZONG Q G, YUE C, *et al.* Observational evidence of ring current in the magnetosphere of Mercury[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 1-10
- [305] SHI Z, RONG Z J, FATEMI S, *et al.* An eastward current encircling mercury[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(10): 1-10
- [306] GAO J W, RONG Z J, PERSSON M, *et al.* In situ observations of the ion diffusion region in the venusian magnetotail[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(1): 1-13
- [307] WANG X J, XU X, YE Y D, *et al.* MAVEN observations of the Kelvin-Helmholtz instability developing at the ionopause of Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(7): e2022GL098673
- [308] DANG T, LEI J H, ZHANG B Z, *et al.* Oxygen ion escape at Venus associated with three-dimensional Kelvin-Helmholtz instability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(6): e2021GL096961
- [309] LIU D, RONG Z, GAO J W, *et al.* Statistical properties of solar wind upstream of Mars: MAVEN observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **911**(2): 113-122
- [310] CAO Y T, CUI J, WU X H, *et al.* A survey of photoelectrons on the nightside of Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(2): e2020GL089998
- [311] WU S Q, WU X S, CUI J, *et al.* Species-dependent solar rotation effects on the Martian ionosphere[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, **513**: 1293-1299
- [312] HAN Q Q, FAN K, CUI J, *et al.* The relationship between photoelectron boundary and steep electron density gradient on Mars: MAVEN observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(10): 8015-8022
- [313] GUO Z, FU H, CAO J, *et al.* Betatron cooling of electrons in Martian magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(13): 1-10
- [314] CHAI L H, WAN W X, WEI Y, *et al.* The induced global looping magnetic field on Mars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **871**(2): L27-1233
- [315] CUI J, NIU D D, HAO G, *et al.* Energetic electron depletions in the nightside Martian upper atmosphere revisited[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(4): e2019JA027670
- [316] FAN K, YAN L M, WEI Y, *et al.* The solar wind plasma upstream of Mars observed by Tianwen-1: comparison with Mars express and MAVEN Mars orbiter magnetometer of China's First Mars Mission Tianwen-1 the solar wind plasma upstream of Mars observed by Tianwen-1: comparison with Mars express and MAVEN[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(4): 759-768
- [317] XIE L H, LEE L C. A new mechanism for the field line twisting in the ionospheric magnetic flux rope[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(5): 3266-3275
- [318] XIE L H, LEE L C, LI L, *et al.* Multifluid MHD studies of the ionospheric magnetic flux ropes at Mars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **915**(1): 6-10
- [319] YAO Z H, BONFOND B, CLARK G, *et al.* Reconnection and dipolarization driven auroral dawn storms and injections[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(8): 1-13
- [320] GUO R L, YAO Z H, GRODENT D, *et al.* Jupiter's double-arc aurora as a signature of magnetic reconnection: simultaneous observations from HST and Juno/Jupiter's double-arc aurora as a signature of magnetic reconnection: simultaneous observations from HST and Juno[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(14): 1-14
- [321] PAN D X, YAO Z H, GUO R L, *et al.* A statistical survey of low-frequency magnetic fluctuations at saturn[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): 1-9
- [322] WU S Y, YE S Y, FISCHER G, *et al.* Statistical study on spatial distribution and polarization of saturn narrow-band emissions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **918**(2): 64-68
- [323] YE S Y, AVERKAMP T, KURTH W, *et al.* Juno waves detection of dust impacts near Jupiter[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, **125**(6): e2019JE006367
- [324] HAO Y X, SUN Y X, ROUSSOS E, *et al.* The formation of saturn's and Jupiter's electron radiation belts by magnetospheric electric fields[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **905**(1): 10-22
- [325] LIU Weining, BLANC M, WANG Chi, *et al.* Scientific challenges and instrumentation for the International Meridian Circle Program[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(12): 2090-2097 (刘维宁, BLANC M, 王赤, 等. 国际子午圈计划的科学挑战和观测系统[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, **51**(12): 2056-2062)
- [326] WANG J J, LIU S Q, AO X Z, *et al.* Parameters derived from the SDO/HMI vector magnetic field data: potential to improve machine-learning-based solar flare prediction models[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **884**(2): 175-182
- [327] WANG P Y, ZHANG Y, FENG L, *et al.* A new automatic tool for CME detection and tracking with machine-learning techniques[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, **244**(1): 9-19