



日球层物理学研究前沿进展与展望

王赤^{1,4*}, 汪毓明², 李晖^{1,4*}, 田晖³, 张清和¹, 王宇贤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, 深空探测全国重点实验室/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. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100190

* 联系人, E-mail: cw@swl.ac.cn; hli@swl.ac.cn

2025-06-27 收稿, 2025-10-16 修回, 2025-10-16 接受, 2025-10-17 网络版发表

民用航天预先研究项目(D010202, D010301)和国家自然科学基金(42188101, 42374198)资助

摘要 日球层物理学作为一门涵盖太阳物理学、空间物理学、空间天气学和等离子体物理学等多个领域的学科, 是当代自然科学中最为活跃的研究前沿之一。自1957年首颗人造卫星的成功发射开启空间科学的新纪元以来, 人类已经向太空发射了数百颗专门用于探测和研究日球层物理现象的卫星。利用遥感、原位探测等手段, 并结合天基和地基探测数据及数值模型, 取得了诸多突破性进展和重要成果, 显著提升了人类对自身生存环境的认知和理解。本文系统分析了日球层物理领域的国内外研究现状与发展态势, 综述了近年来取得的重要科研成果及前沿进展, 并围绕近期正式发布的《国家空间科学中长期发展规划(2024–2050年)》所梳理的我国日球层物理领域拟重点突破的十大关键科学问题进行了探讨与展望。

关键词 日球层, 行星物理, 日地空间, 空间天气

日球层物理学作为基础科学, 专注于研究太阳及其对太阳系内行星和行星际空间环境的影响, 涵盖包括太阳物理学、空间物理学、空间天气学和等离子体物理学等多学科领域, 是当代自然科学中最活跃的前沿学科之一。

日球层物理学研究聚焦于太阳、行星际空间乃至星际空间、磁层、电离层、热层与中高层大气的物理现象和规律。六十余年来, 该领域的迅速发展深刻改变了人类对地球生存环境的认知, 揭示出地球空间系统由大气层、电离层和磁层构成, 并与太阳大气及行星际介质形成一个高度耦合的日地系统。该系统的动态演化主要受太阳能量、动量和质量输出及其波动的驱动, 主导着地球空间环境的形成、结构和变化。然而, 目前对这一复杂系统中诸多基本物理过程的理解仍处

于初级阶段, 大量关键科学问题有待深入探索与解答。因此, 日球层物理不仅为具有重大原创性的科学研究提供了广阔天地, 也是认识自然和推动科学前沿发展的重要学科。

日地空间乃至整个太阳系不仅是人类科学探索的关键区域, 也是航天、通信、导航等高科技活动与空间安全需求高度集中的领域, 使得日球层物理与空间环境研究成为国际科技竞争的前沿热点之一。日球层物理学本质上是一门实验科学, 其发展高度依赖于观测、理论分析与数值模拟的紧密结合。鉴于太阳活动引发的空间天气现象可能对人类空间活动及生存环境造成严重威胁, 揭示日球层内空间环境的状态、基本过程及其演化规律, 深入理解并准确预测日球层物理现象的影响, 已成为该领域探测与研究的核心任务。

引用格式: 王赤, 汪毓明, 李晖, 等. 日球层物理学研究前沿进展与展望. 科学通报

Wang C, Wang Y, Li H, et al. Frontier advances and prospects in heliophysics (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-5161](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5161)

1 国内外态势分析

1.1 国外发展态势

1957年首颗人造卫星的成功发射,标志着国际空间科学新纪元的开启^[1].半个多世纪以来,国际上发射了数百颗卫星,致力于揭示从太阳到地球乃至整个太阳系的物理过程.当前,国际日球层物理研究发展态势可概括如下.

(1) 从“日地系统”向“日球层系统”逐步拓展.进入21世纪,随着美国以月球和火星探索为重点的空间探索任务的规划和实施,美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)将日球层物理探测的“日地联系计划”正式调整为“太阳-太阳系联系计划”,其目的在于将太阳、月球、地球、火星及整个日球层作为一个有机的、相互联系的系统进行探索研究,以服务于美国的国家目标和NASA新的空间探索计划.

(2) 大视场成像技术与天地一体化观测体系日趋完善,宏观与全局观测能力显著提升.为实现对空间环境宏观结构的全局性观测,发展大视场成像技术和多点布局成为重要趋势.中欧合作的“太阳风-磁层相互作用全景成像卫星(Solar wind-Magnetosphere-Ionosphere Link Explorer, SMILE)”便是这一趋势的杰出代表,将对太阳风与地球磁层相互作用的宏观全景进行成像^[2].2024年,美国国家科学院发布了最新的十年调查报告《太阳和空间物理探索的未来十年:探索和保护人类的太空家园(2024~2033年)》,其中明确强调了加强天基与地基融合的重要性,并倡导统筹管理该领域所有任务和计划的科学数据,以实现数据效用的最大化^[3].

(3) 星座探测技术发展迅速,载荷时空分辨能力增强,中小尺度三维结构观测能力提升.为了揭示中小尺度的三维精细物理结构并区分时空变化,发展星座探测技术和提升载荷性能已成为国际共识.最近十年,国际上发射了以抵近观测太阳活动、探索磁层多尺度过程以及地球空间能量粒子等为代表的一系列日球层物理卫星探测任务,涵盖了太阳大气、行星际空间、磁层、电离层与中高层大气、月球和行星空间环境等多个领域^[1,2].

(4) 地球与行星空间环境比较研究逐步开展,地球空间环境的过去、现在和未来演化规律研究逐步深入.除地球外,国际上也系统性地开展了太阳系其他行星的探测任务.通过对不同行星空间环境的比较研究,有

助于更深刻地理解地球空间环境的独特性及其演化历史,并探索行星宜居性的普遍规律.

(5) 空间环境对航天活动、人类生存环境及行星宜居性影响研究日益重视.当前几乎所有的日球层物理探测任务都高度重视空间环境对人类活动(如航天、通信、导航)和生存环境的影响.美国国家科学院在2024年发布的十年调查报告中将空间天气作为独立维度进行系统论述,聚焦其对地球基础设施及人类健康的潜在影响评估^[3].

1.2 国内发展态势

我国日球层物理研究自1958年开始,初期主要依靠自主地基设备获取空间环境信息和数据.当前日球层物理的发展现状和态势可总结为:

(1) 地基监测网络已初具规模.包括2012年建成的我国空间科学领域第一个国家重大科技基础设施——“东半球空间环境地基综合监测子午链”(简称子午工程)、2019年启动建设的子午工程二期(“空间环境地基综合监测网”),以及在此基础上倡议和发起的“国际子午圈大科学计划”.除此之外,我国自20世纪80年代以来,陆续建设了北京怀柔、云南抚仙湖、内蒙古明安图等多个太阳观测基地.利用这些空间环境观测设备及其获取的空间环境信息和数据,深入研究地球空间系统传统和非传统自然灾害形成和演化的物理规律,为人类提供可靠且高效的预报与防范策略.

(2) 天基探测体系刚刚起步.2003与2004年,我国成功发射“地球空间双星探测计划”(简称双星计划)的两颗卫星,开创了我国空间科学卫星新纪元.在此后的近二十年间,我国在日球层物理探测领域的科学卫星陷入沉寂,相关天基观测主要依托“风云”等应用卫星搭载的空间环境监测设备开展.2021年羲和号卫星的成功发射,以及2022年夸父一号卫星的升空,实现了我国太阳探测科学卫星从“零”到“一”的突破.中欧合作的SMILE卫星预计于2026年发射,将首次实现对太阳风与地球磁层相互作用的全景成像.与此同时,月球与深空探测任务的稳步推进,为行星空间物理研究提供了新的发展机遇.随着嫦娥六号、嫦娥七号、嫦娥八号及天问四号等任务的推进与实施,我国行星空间物理研究将迎来快速发展的“黄金期”.目前,国际月球科研站、太阳系边际探测等重大工程正处于论证阶段或推动工程立项中.

(3) 学科基础不断夯实.经过五十余年的发展,我

国日球层物理事业也取得了长足发展。2005年成立了空间物理领域首个国家重点实验室——空间天气学国家重点实验室，开辟了我国空间天气探测和研究新方向。随后，于2021年启动太阳活动与空间天气全国重点实验室重组工作。全国十多个知名高校开设空间物理专业，研究团队不断壮大。培养和造就了一批领军人才，包括院士7人、国家级人才计划入选者80余人。国内外影响力逐步提升。

(4) 原创成果持续涌现。在国家自然科学基金委员会、科技部、中国科学院等部门的支持下，中国的日球层物理学取得了显著成就^[4]，在太阳风起源及其加热和加速、太阳爆发及其在行星际空间的传播、磁暴和亚暴产生机制、磁重联过程、太阳风与磁层相互作用、中高层大气动力学过程的探测与研究、电离层建模、多卫星分析方法以及空间天气预报方法研究等诸多国际研究前沿领域，都已取得重要进展或突破。近年来，我国在空间环境核心要素预报方面已取得显著进展，在地磁指数预报和电离层总电子含量预报等方面，已达到或接近国际先进水平^[5,6]。行星空间物理研究也逐渐从零星的跟踪研究过渡到规模化的团队研究，呈现出“起步晚、起点高、发展快、国际化”等特点，在行星高层大气和电离层、行星磁层和比较行星研究等多个方面取得了一批重要成果。

2 前沿进展

2.1 太阳和日球层

得益于观测技术的革新与理论模型的深化，当前太阳和日球层研究已迈入一个多信使、全波段、全时域、高分辨、多尺度、多视角和高精度探测的新纪元^[7,8]。太阳对流区和活动区是预测太阳活动周和开展空间天气预报的关键区域，近年来在这些领域已取得显著进展。在对流区方面，卫星观测和数值模拟增进了对太阳对流区子午环流模式及小尺度湍流分布特征的理解，这些发现对现有的对流区模型提出了重大挑战^[9-11]。在活动区方面，Tang等人^[12]基于深度学习模型，开展了太阳黑子智能分类和耀斑高精度预报；通过引入新物理量磁缠绕数，首次提供了磁绳从对流区浮现并形成活动区的证据^[13]，构建了可重现耀斑期间多个观测特征的三维辐射磁流体力学模型^[14]。研究发现，磁扭缠通量密度可用于活动区X级耀斑的预报^[15]。

在太阳大气多层次磁场测量方面也取得了较大进

展：首次利用紫外偏振光谱观测获得了高色球的磁场强度^[16]，首次初步实现了日冕磁场的常规测量，揭示了日冕磁场在约8个月时间内的演化规律^[17]；并利用射电频谱数据首次观测到太阳爆发期间的磁场减弱现象，提供了磁重联驱动太阳爆发的重要观测证据^[18]；磁诱导跃迁理论也被应用于活动区日冕磁场的测量^[19]。

太阳大气中存在大量的小尺度磁重联和丰富的波动现象^[20]。研究发现，普遍存在的阿尔芬脉冲是由光球层激发并传输向色球层^[21]。基于IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph)卫星的光谱数据，发现磁重联区域可能存在离子回旋湍流过程^[22]，日珥中的磁重联过程可以产生小尺度的喷流^[23]。Stangalini等人^[24]首次在光球辨识出扭转阿尔芬波信号。Solar Orbiter卫星的高分辨率观测表明，日冕中存在大量小尺度瞬时增亮事件^[25]，研究表明这可能源于分量磁重联。在色球莫尔顿波起源研究方面，Zheng等人^[26]和Zhong等人^[27]发现莫尔顿波主要源于太阳活动区边缘，相应爆发的高度倾斜位型是其形成关键。羲和号卫星发现太阳大气的自转速度从里往外越来越快^[28]。Gou等人^[29]揭示了日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)初发过程中大尺度爆发磁绳和小尺度磁绳间的物理关联(图1)，并发现爆发结构在早期爆发过程中发生了复杂的重构演化^[30]。

在太阳大气以外的内日球层中，物理过程高度动态且复杂。自2018年帕克太阳探针(Parker Solar Probe, PSP)发射以来，该探测器的近太阳观测显著增进了我们对该区域物理过程的理解^[31]。PSP首次穿越太阳风阿尔芬临界层“进入日冕”，揭示了太阳风等离子体的能量传输和离子尺度加热；首次探测到从赤道冕洞吹出的高度结构化的慢太阳风以及近日太阳风中的高能粒子^[32]；发现F冕的衰减和K冕精细结构^[33]，以及远大于理论预期的近日太阳风切向速度和太阳风磁场的回弯结构(switchback)(图2(a))^[34]；首次证实了太阳附近无尘区的存在^[33,35]，并为太阳附近能量粒子起源、加速和传播过程提供了直接观测证据^[36]；利用WIND数据揭示了switchback现象与大振幅阿尔芬波之间的紧密联系^[37]；发现太阳色球网络组织边界处的小尺度交换磁重联活动是速度脉冲和switchback形成的关键驱动因素(图2(b))^[38]。

外日球层探测自进入卫星时代以来一直是人类长期关注的研究重点^[8,39]。旅行者1号与2号飞船相继穿越日球层顶，成功进入恒星际介质^[40,41]。在飞向日球层顶

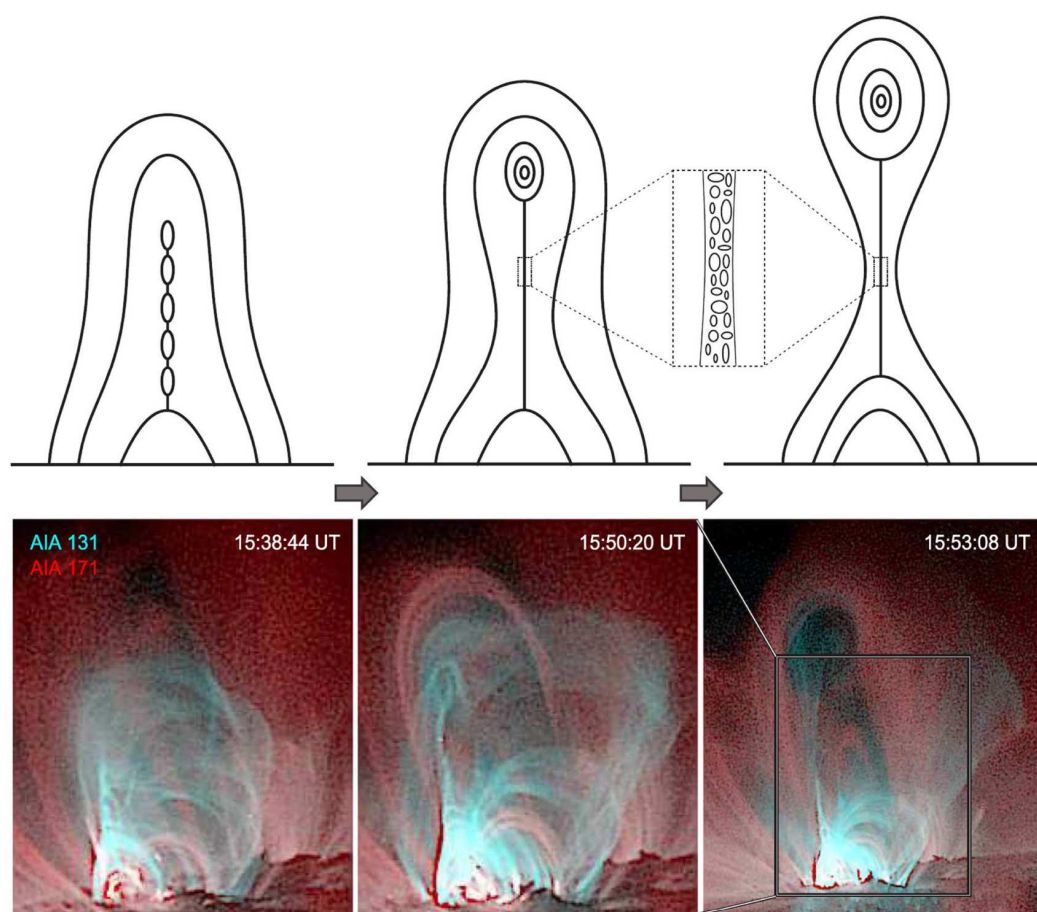


图1 (网络版彩色)日冕物质抛射(CME)启动过程示意图^[29]

Figure 1 (Color online) Schematic view of the CME initiation process^[29]

途中,首次探测到终止激波,并发现了日鞘区耗散层^[42].新视野号首次飞掠冥王星^[43],测得拾起离子、大气成分和雾霾分层结构数据,并持续开展日球层拾起离子能谱观测^[44],同时对柯伊伯带天体进行了近距离探测^[45].此外,星际边界探测器(Interstellar Boundary Explorer, IBEX)首次遥感绘制了日球层-星际边界区域地图^[46],发现了能量中性原子彩带结构^[47].

2.2 地球磁层

结合卫星数据、数值模拟和理论分析等手段,国内外学者针对地球磁层物理过程开展了系统研究,并取得了一系列重要进展^[1,2].利用磁层多尺度(magnetospheric multiscale, MMS)任务的超高精度数据,磁场重联的电子尺度过程首次被精确观测,揭示了对称与非对称重联电子扩散区中的电子动力学行为和重联电场特征^[48].

在磁层顶和弓激波研究方面,研究人员观测到磁层顶非电流片区域存在的电子新月形分布^[49],并发现此类电子分布可激发电子Bernstein波动^[50],发现了磁层顶重联处哨声波加速电子的观测证据^[51].基于卫星数据发现了一种嵌套磁洞,并采用回波技术(sounding)对其进行了重构^[52].基于数值模拟发现通量传输事件的发生率随经纬度显著变化^[53];模拟研究揭示了磁鞘湍流的典型特征及其对磁层顶Kelvin-Helmholtz (KH)波动、粒子加速和磁重联过程的影响^[54~56];揭示了弓激波处电子和离子加速的物理机制和主导因素^[57~59],发现弓激波下游湍流等离子体中小尺度电流片相干结构起源于上游波动^[60],发现激波反射的离子在相空间可能产生一个环束流,并产生新的磁峰结构^[61].

在地球磁尾方面,研究人员分析了引导场对磁重联电子扩散区的影响,发现了磁尾重联的多尺度特性^[62~64],指出磁尾重联首先是电子重联,而后发展为

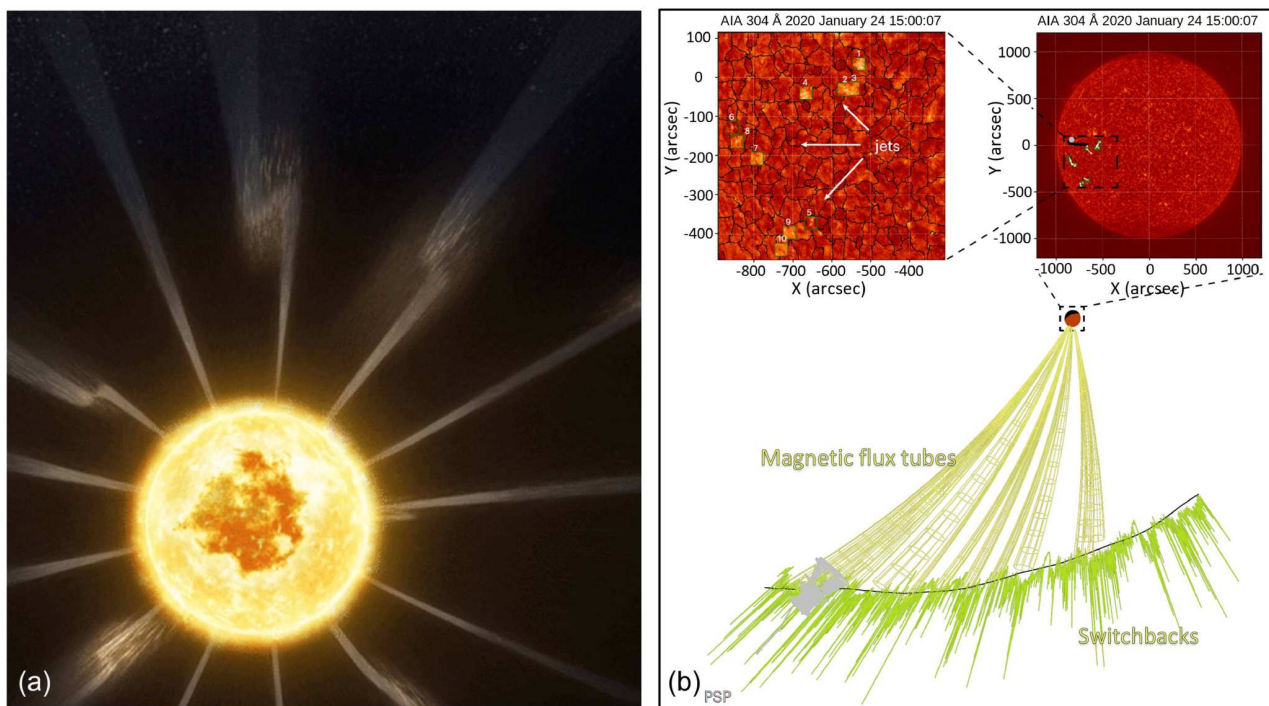


图 2 (网络版彩色)太阳风磁场回弯结构. (a) 回弯结构示意图, Credit: NASA's Goddard Space Flight Center/Conceptual Image Lab/Adriana Manrique Gutierrez; (b) 回弯结构与色球层网络边界喷流关联示意图^[38]

Figure 2 (Color online) Magnetic switchbacks in the solar wind. (a) Illustration of magnetic switchbacks. Credit: NASA's Goddard Space Flight Center/Conceptual Image Lab/Adriana Manrique Gutierrez. (b) The relationship between switchbacks and solar jets near chromospheric network boundaries^[38]

传统的离子-电子重联^[65], 发现重联扩散区可以演化为湍流状态, 电子在湍流态的扩散区内可被有效加速至几百keV^[66], 首次获得了地球磁尾高速电子流的统计特征, 揭示了其与重联的密切联系^[67].

在内磁层方面, 研究人员对亚暴期间不同阶段的高速流特性及其相关的带电粒子加速特征进行了细致研究^[68,69]; 研究表明磁绳内外的能量转化分别发生在不同磁场方向^[70], 发现磁绳内部可能形成丝状电流结构并触发次级磁场重联^[71]; 对偶极化锋面附近的能量转化特性进行了深入研究^[72]; 基于卫星观测和经验建模, 探究了不同波动对辐射带电子动力学和动态演化的影响^[73]; 首次给出了甚低频波由低纬向高纬传播的直接证据^[74], 发现哨声波可以通过非线性波粒相互作用导致电子沉降^[75,76], 研究发现辐射带电子反转能谱可能源于嘶声波的散射效应^[77], 且局地加速机制可有效将电子加速至7 MeV^[78]. 如图3所示, Zhang等人^[79]首次在地磁极区电离层与磁层发现“太空台风(space hurricane)”. Wang等人^[80]揭示了“马轭型”极光(horse-collar aurora)的形成与演化机理. Dai等人^[81]首次提出并证实

了日侧重联直接驱动磁层大尺度对流的新模式. Liu等人^[82]首次发现在距离地球16万公里的非偶极磁场区域的合声波, 其产生机制来自非线性波粒相互作用.

2.3 电离层和中高层大气

近年来, 基于新技术研制的非相干散射雷达促进了电离层研究^[83,84], ESA (European Space Agency)的Swarm, NASA的COSMIC-II (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate-II)、GOLD (Global-scale Observations of the Limb and Disk)和ICON (Ionospheric Connection Explorer)卫星也给电离层和中高层大气研究带来了新的突破^[85~88]. Swarm卫星的磁场数据是国际地磁参考场模型的重要来源^[89], 并首次有效检测到岩石圈磁场, 揭示了多种电离层结构的细节特征^[90]. COSMIC-II卫星利用掩星技术对电离层进行了三维成像^[91]. GOLD卫星探究了赤道电离异常和等离子体泡的演化过程(图4)^[92]. ICON卫星为赤道及低纬电动力学研究作出了重要贡献^[93]. 电离层模式化也得到长足的发展, 建立了各类经验模型、

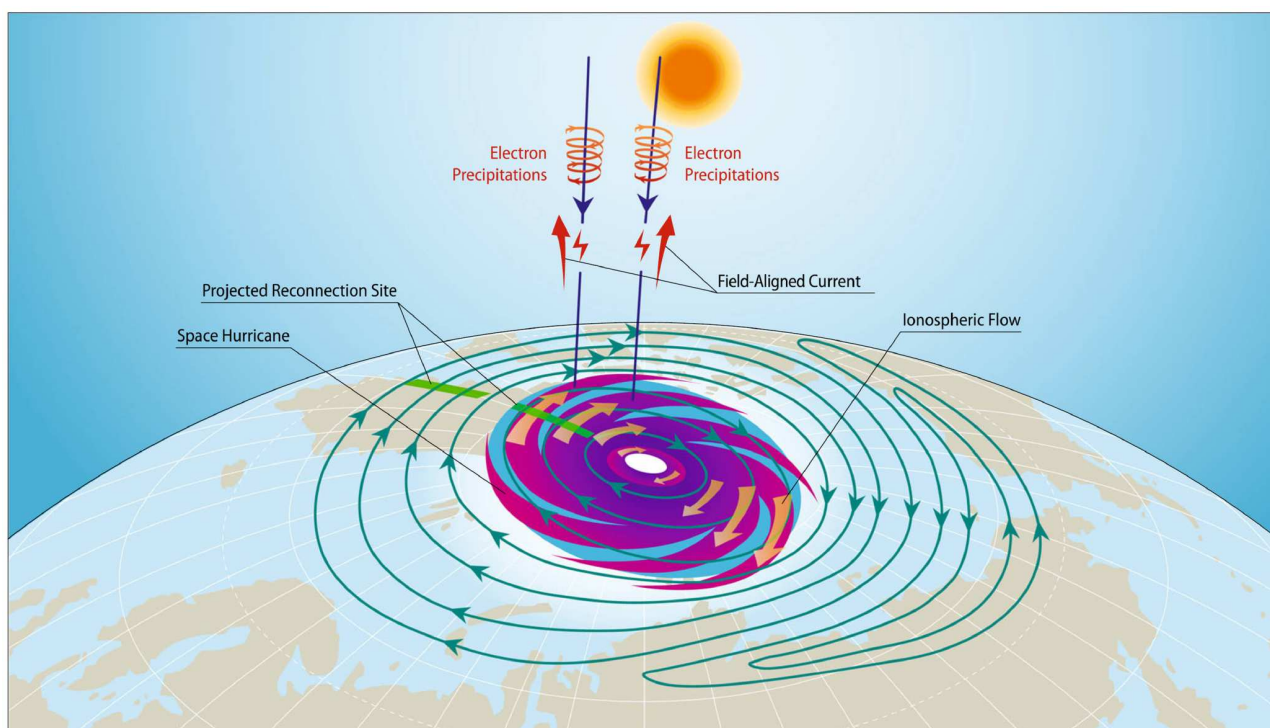


图3 太空台风及其形成机制示意图^[79]。旋风状极光斑(品红色)与环形电离层流(棕色粗箭头)共同构成太空台风。深蓝色箭头代表地球磁力线,伴有电子沉降和上行场向电流

Figure 3 Schematic of the space hurricane and its formation mechanism^[79]. The magenta cyclone-shape auroral spot with brown thick arrows of circular ionospheric flows represents the space hurricane. Dark blue lines are Earth's magnetic field lines, with electron precipitation and upward field-aligned currents (FACs)

理论模型和电离层-热层耦合理论模式,并应用于电离层预报^[94~98]。电离层的实验室模拟也取得进展^[99],美国、欧洲多国、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^[100~102]。例如,Krot是当前最大的空间物理地面实验装置,在电离层不均匀体等研究方面取得大量成果^[103]。中国国家重大科技基础设施项目子午工程一期和二期已经成功实施和运行^[104],并自主研制了首部高频相干散射雷达^[84]和相控阵非相干散射雷达^[105]。风云三号卫星的极光数据首次提供了地球等离子体层顶的表面波证据^[106]。Liu等人^[107]揭示了耀斑对整个地球磁层-电离层空间的显著影响。

在中高层大气研究方面,近些年的研究热点之一为中高层大气对太阳活动的响应。太阳活动可以通过高能粒子(质子或者电子)注入地球极区中高层大气影响大气层^[108]。太阳高能粒子也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^[109]。Yu等人^[110]探究了热层成分对磁暴的响应。太阳辐射也可显

著影响中高层大气,但目前对中高层大气如何响应太阳活动仍存在未知,GOLD和ICON等卫星的协同观测有助于定量分析太阳辐射对中高层大气的影响^[111,112]。另一研究热点为低层大气过程对中高层大气的影响,通过多卫星和地基多手段联合观测探究低层大气和中高层大气间的耦合过程^[113]。重力波是低层大气影响中高层大气动力学和电动力学的关键媒介之一。卫星观测表明从安第斯山区到南极Peninsula高原是重力波活动的热点^[114]。全大气环流模式证实了重力波的拖曳作用对热层大气的全球环流起着重要作用^[115]。Liu等人^[116]探究了重力波破碎及其产生次级波的过程。利用地基和卫星的长期观测,Ma等人^[117]研究了中高层大气各参数的长期变化规律。

2.4 月球与行星空间环境

近年来,卫星观测、高精度数值模拟与地面模拟实验的协同进展显著深化了人类对月球和行星空间环境的科学认知。Artemis卫星提升了对月球尾迹特征的

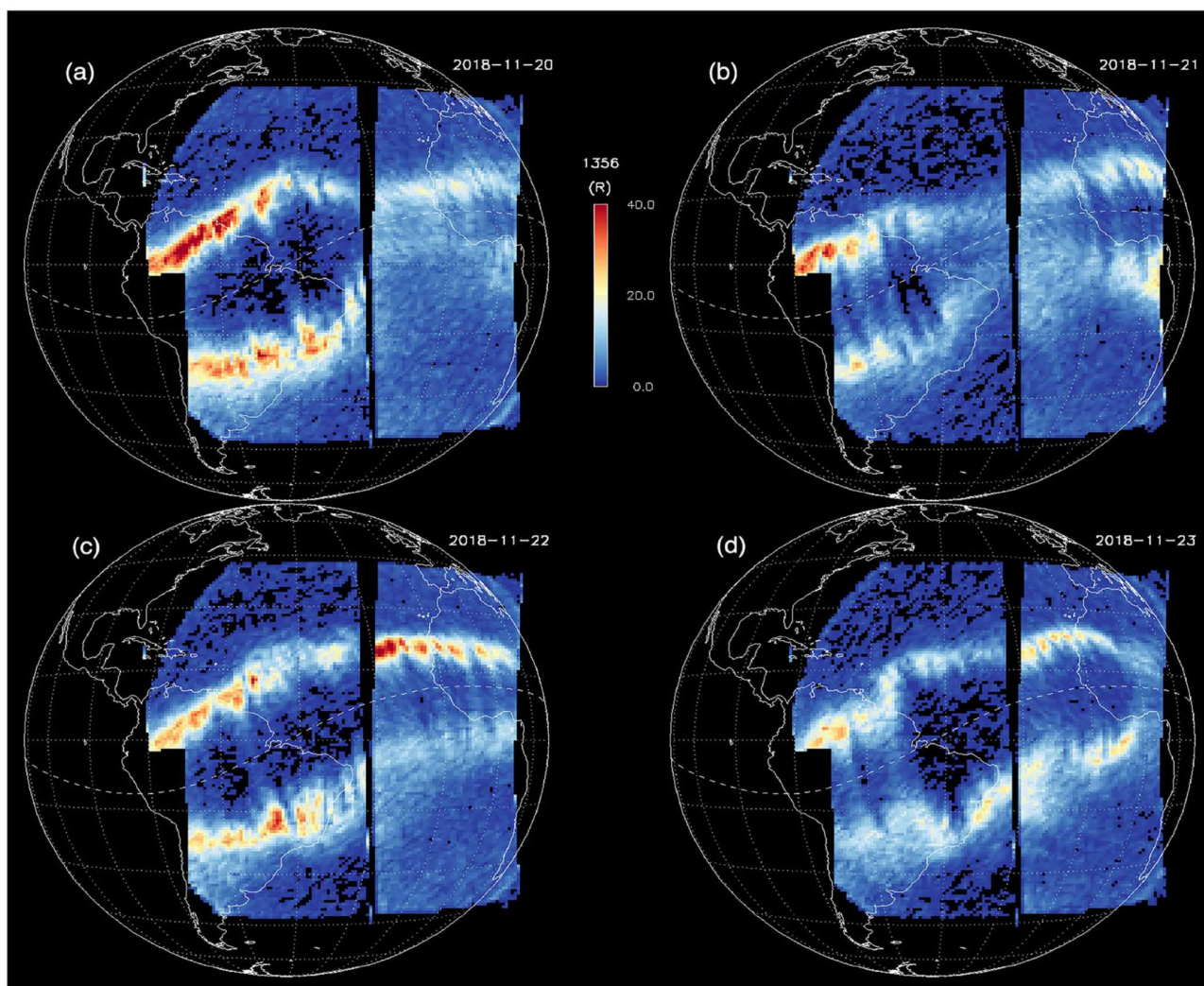


图4 (网络版彩色)GOLD观测到赤道电离异常在地磁平静期的时间演化^[92]。(a~d) 2018年11月20~23日四个连续夜晚、地磁平静条件下的图像。除峰值区耗尽现象外,赤道电离异常也表现出显著的时间变化

Figure 4 (Color online) Quiet time variability of the equatorial ionization anomaly (EIA)^[92]. (a~d) GOLD observations from four sequential nights during geomagnetically quiet conditions on 20–23 November 2018. Variability in the EIA extends beyond plasma depletions within the crests

认知。研究人员利用7年的Artemis卫星数据统计研究了反射质子对尾迹电势结构的影响^[118]；探究了月球穿越地球磁层时尾迹对日冕物质抛射的响应^[119]，并提出地球风在此期间可产生类似太阳风的成水效应^[120]；在月球附近发现了哨声波、ULF(ultralow frequency)波和静电波等波动^[121,122]。研究表明，太阳风和月球磁异常区相互作用可形成微磁层^[123]。微磁层的三维PIC (particle-in-cell)模拟重现了Reiner Gamma地区的白斑结构，且模拟结果支持太阳风遮挡假说^[124]。地面模拟试验发现太阳风离子因为非磁化而可能无法被磁场遮挡^[125]。此外，嫦娥四号首次测得月表低能宇宙线能谱

(图5)^[126]。

水星几乎不存在大气和电离层，其空间环境演化和地球磁层存在明显差异。信使号数据发现水星在磁尾和磁层顶都存在通量管事件^[127]。BepiColombo卫星可能同时探测太阳风和水星磁层，建立系统的太阳风-磁层相互作用图像。信使号发现了可能和水星表面溅射过程相关的太阳风“拾取”钠离子(图6)^[128]，表明水星可能存在和地球类似的西向环电流^[129]。

金星和火星因没有全球性内禀磁场，其电离层和高层大气可直接与太阳风相互作用。金星和火星是除地球外人类探索最多的行星，但金星自2015年后再无

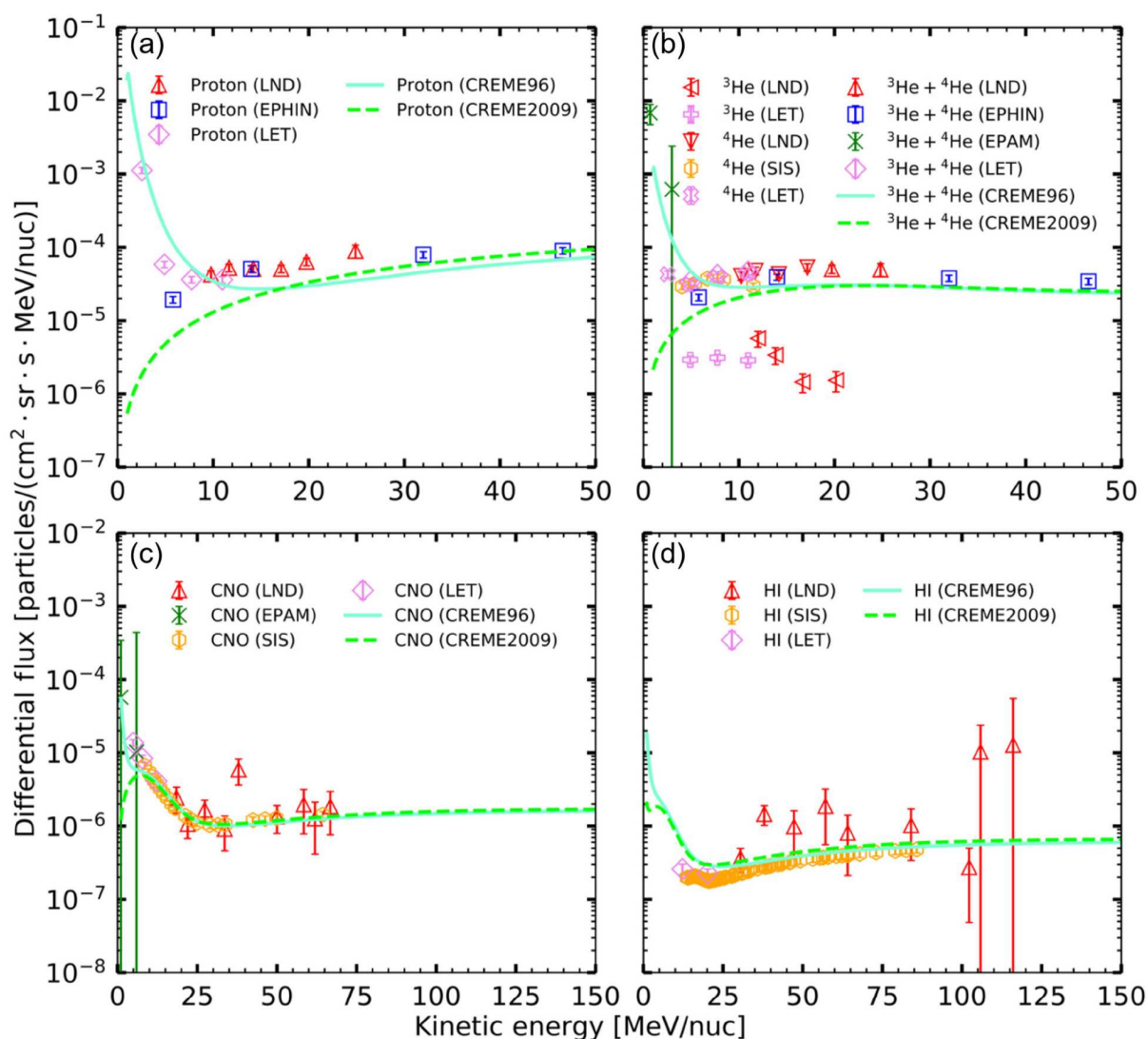


图5 (网络版彩色)嫦娥四号实测月表低能宇宙射线通量及其与地球1 AU处原位测量数据和CRÈME模型预测值对比^[126]. (a) 质子; (b) 氦; (c) 碳氮氧; (d) 重离子

Figure 5 (Color online) Comparisons of low-energy cosmic ray fluxes among Chang'E-4 measurements, *in situ* measurements made at 1 AU, and predictions of the CRÈME models^[126]. (a) Proton; (b) helium; (c) CNO group; (d) HI (heavy-ion) group

卫星任务, 而火星近年来的探测任务较多, 包括欧洲的火星快车、美国的MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution)和中国的天问一号^[2,130]. 研究表明火星岩石剩磁可能影响全球离子逃逸过程和逃逸率^[131], 且强太阳风动压可能通过压缩感应磁场而增大离子逃逸通量^[132,133]. 研究发现火星岩石剩磁上空的电离层顶部一般是磁化状态^[134]. Nauth等人^[135]探究了磁场拓扑结构对火星磁尾电子分布的影响. Li等人^[136]揭示了火星磁鞘区磁场扰动独特的“平台状”幂律谱受背景拾起离子参数的调制特征. Dang等人^[137]利用数值模拟揭示了

金星三维KH不稳定性所产生的氧离子逃逸过程.

卡西尼数据促进了对土星的认知和理解. 其磁场数据测绘了土星的全球磁场^[138]. 旅行者号、先驱者号和卡西尼飞船长期积累的数据表明土星内部磁场没有明显的时间演化现象^[139]. 卡西尼的高分辨率电子数据揭示了土星磁层的开闭磁力线边界特征^[140]. 结合模拟和观测探究了土星磁层顶的KH不稳定性相关的湍流加热效应^[141]. 朱诺飞船持续采集的新数据为木星系统带来了新发现. 观测表明, 极光作为重要的木星大气加热机制, 可以显著影响全球高层大气, 并受太阳风的调

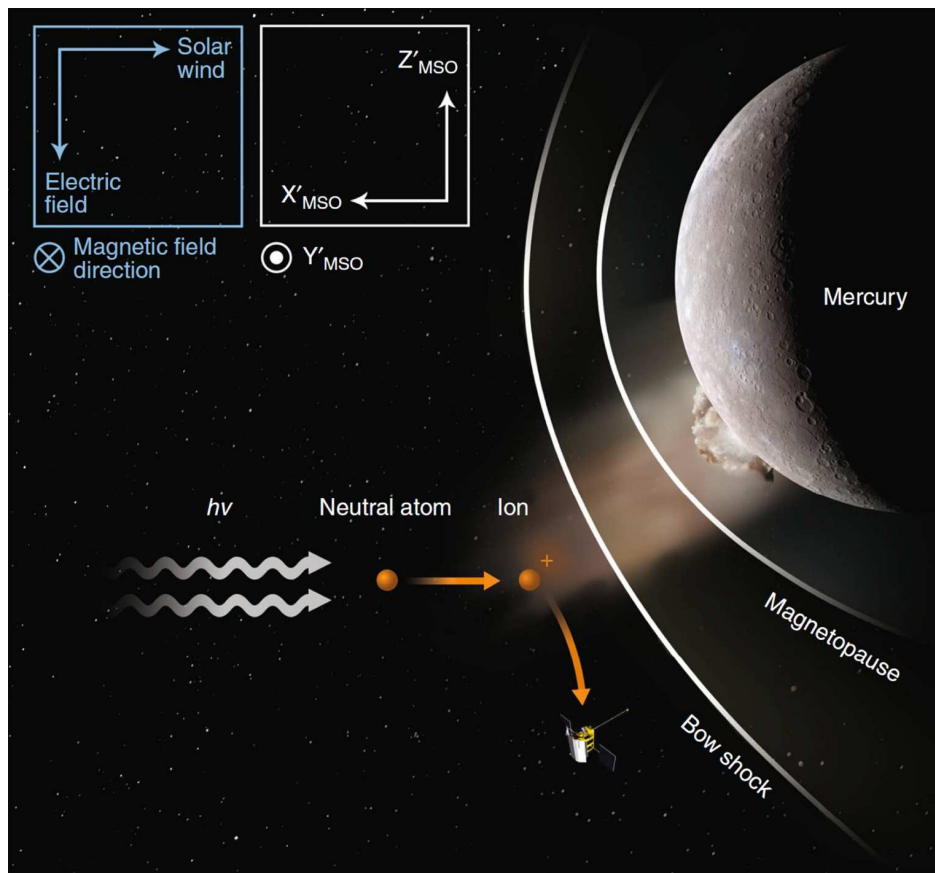


图6 (网络版彩色)水星外逸层瞬态增强事件中拾起离子过程示意图。光子($h\nu$)电离陨石撞击羽流中的中性原子, 新生离子随即被太阳风捕获^[128]

Figure 6 (Color online) A schematic of the pickup ion process occurring during the observed transient exosphere event. Photons ($h\nu$) ionize the planetary atoms originating from a plume caused by a meteoroid impact event. These ions are then picked up by the solar wind^[128]

制作用^[142]。朱诺号数据发现木星极光电子沉降主要源于随机加速机制而非平行电场加速主导^[143]。模拟和观测揭示了木星磁层-电离层耦合关键参数的分布特征^[144]。对木星夜侧极光的观测表明木星磁层中可能存在类似地球的极光爆发过程^[145,146]。研究人员利用数值模拟揭示了木星磁层独特的磁场拓扑结构^[147], 并提出了可描述不同行星极光形态的统一框架^[148]。

3 未来展望

日球层是一个紧密联系的整体, 太阳与各个天体和整个太阳系之间存在着密切的耦合。空间环境的剧烈变化和灾害性空间天气的发生和发展, 涉及太阳活动—行星际空间扰动—地球空间暴的链锁变化过程, 它伴随着一系列尚未认识的基本物理过程, 是日球层物理探测和研究的主要内容。随着我国月球与深空探测任务的实施, 月球与行星空间物理和空间环境日益

成为我国日球层物理探测研究的热点方向。本文分析了国内外日球层物理领域研究现状与发展态势, 综述了近年来取得的重要成果和前沿进展。面向国际科学前沿和国家需求, 基于《国家空间科学中长期发展规划(2024–2050年)》的部署, 未来我国日球层物理探测研究亟待突破的关键科学问题如下。

(1) 太阳极区磁活动特征及磁周期的形成机制。太阳极区是太阳表面最后一块有待观测的主要区域, 是控制太阳活动和驱动空间天气的关键环节, 在太阳磁周期和高速太阳风的形成过程中也有至关重要的地位。从太阳极区延伸出来的开放磁力线和发出的太阳风也在很大程度上决定了日球层的结构和物理性质。未来十年, 航天器将在偏离黄道面的轨道上对太阳极区的磁场及其活动进行直接成像, 由此我们将揭开太阳极区的神秘面纱。基于这些观测, 并结合黄道面视角的观测, 我们有望回答如下具体的科学问题: 太阳内部完整

的子午环流是什么样的？磁场的全日面分布和演化、迁移有何规律？极区磁场的反转是如何发生的？极区是否存在涡旋？如何准确预测未来的太阳活动周？极区日冕加热的机制是什么？极区磁活动如何驱动太阳风的起源？如何确定太阳风的源区位置？极区的大尺度爆发活动是如何产生的？极区磁场和等离子体如何塑造日球层的形态？

(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于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物理过程有哪些? 三种尺度的过程如何耦合? 磁场重联到底是如何触发、发展和停止的? 重联率的关键控制因素是哪个? 重联线的空间尺度如何演化, 是零散断续还是大尺度连续? 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如何? 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, 以及电子和离子各获取多少比例的能量? 离子和电子如何在重联、湍流和激波等过程中获得加速? 核心区域在哪儿? 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? 磁暴和亚暴是怎样的关系?

(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层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? 如何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? 日球层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? 日球层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, 能提升对日冕物质抛射的传播规律及其对地效应的认知. 亟待解决的具体科学问题包括: 太阳爆发活动的起源、储能与释放物理机制是什么? 如何解决太阳光球磁场测量的 180° 不确定性问题? 如何测量爆发源区的色球和日冕磁场? 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、理解其起源以及与日面活动的关联? 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? 如何通过太阳极轨、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太阳风扰动的起源、传播及其磁层响应的监测? 如何准确预报太阳风扰动结构南向磁场引起的地磁暴、亚暴和极光等现象? 如何理解太阳风-地球耦合系统的能量输运机理?

(5) 内磁层波粒相互作用及其对辐射带三维结构与演化的影响机制. 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、机理及效应是怎样的? 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、条件与机制是什么? 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/微观演化机理如何?

(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-热层耦合过程方面亟待解决的关键科学问题包括: 电离层上行粒子流的源区、加速机制和传输有何规律? 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扮演什么角色? 磁层空间暴引起的电离层和热层全球性多尺度扰动特征如何? 磁层-电离层-热层系统相互作用的关键途径和变化规律是怎样

的? 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如何? 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. 极区粒子动力学方面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数的同步探测?

(7) 电离层/热层多尺度扰动结构的成因与变化规律. 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. 亟待解决的关键科学问题包括: 太阳辐射变化、磁暴、亚暴等典型空间天气事件如何触发电离层/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? 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是怎样的? 电离层中的各种等离子体不稳定性及非线性过程如何影响卫星通信与导航系统(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的幅度和相位出现起伏, 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, 亟待解决的关键科学问题包括: 岩石圈-大气层-电离层可能存在哪些耦合过程与机理? 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如何? 全球气候变化与中高层大气动力学过程有何关系?

(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、木卫系统水冰分布, 以及生命存在性与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如何? 木星的最强磁场起源和特性如何? 太阳风-巨行星系统的磁层-电离层相互作用是怎样的? 最活跃的大气动力学及大气成分和特性是怎样的? 木卫的火山活动、地下海洋和内禀磁场有何特性? 是否存在宜居性? 最原始卫星演化和不规则卫星俘获机理如何? 巨行星还包括天王星和海王星等冰巨星, 它们是太阳系仅剩的未探知巨行星系统, 亟待解决的关键问题有: 冰巨星起源演化和能量循环是怎样的? 其磁层、大气、海洋结构是怎样的? 太阳风-冰巨星旋转磁层相互作用和粒子捕获、加速和逃逸机制如何? 冰卫星地下海洋和空间环境宜居性是如何发展演化的?

(10) 空间天气对行星宜居性环境的影响和机理. 空间天气是影响行星宜居性的关键外部因素, 对其研究具有重要的科学意义和实际应用价值. 空间天气贯穿于太阳活动源头、太阳风暴传播及演化、行星等天体响应以及太阳系外空间环境等多个关键环节, 其多尺度耦合机制蕴含着复杂的物理过程与诸多未解难题. 亟待解决的关键科学问题包括: 如何通过多点、多地探测手段获得日面磁场和爆发现象的信息, 从而从源头对爆发事件进行预警? 如何实现对太阳爆发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? 此外, 火星和金星作为地球近邻, 没有内禀磁场, 其空间环境对太阳风和太阳风暴是如何响应的? 如何研究空间天气对卫星的效应, 从而探索应对空间天气影响的防护手段? 太阳系外的空间天气与日地空间天气有何不同? 这些不同是否影响系外行星的宜居性?

参考文献

- 1 Wu W, Wang C, Liu Y, et al. Frontier scientific questions in deep space exploration (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 606–627 [吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 深空探测之前沿科学问题探析. 科学通报, 2023, 68: 606–627]
- 2 Wang C, Wang Y, Tian H, et al. Strategic study for the development of space physics (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2023, 43: 9–42 [王赤, 汪毓明, 田晖, 等. 空间物理学学科发展战略研究. 空间科学学报, 2023, 43: 9–42]
- 3 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The Next Decade of Discovery in Solar and Space Physics: Exploring and Safeguarding Humanity's Home in Space. Washington DC: The National Academies Press, 2024
- 4 Yan Y. Research advances in solar physics at National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 1363–1384 [颜毅华. 中国科学院国家天文台太阳物理研究20年. 科学通报, 2021, 66: 1363–1384]
- 5 Liu S, Gong J. Operational space weather services in National Space Science Center of Chinese Academy of Sciences. *Space Weather*, 2015, 13: 599–605
- 6 Liu S, Chen Y, Luo B, et al. Development of new capabilities using machine learning for space weather prediction. *Chin J Space Sci*, 2020, 40: 875
- 7 Liu R, Chen Y, Deng Y, et al. Recent research progress of solar physics in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2011–2024 [刘睿, 陈耀, 邓元勇, 等. 中国太阳物理学研究进展. 科学通报, 2019, 64: 2011–2024]
- 8 Deng Y, Zhou G, Dai S, et al. Solar Polar-orbit Observatory (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 298–308 [邓元勇, 周桂萍, 代树武, 等. 太阳极轨天文台. 科学通报, 2023, 68: 298–308]
- 9 Gizon L, Cameron R H, Pourabdian M, et al. Meridional flow in the Sun's convection zone is a single cell in each hemisphere. *Science*, 2020, 368: 1469–1472
- 10 Hanasoge S M, Hotta H, Sreenivasan K R. Turbulence in the Sun is suppressed on large scales and confined to equatorial regions. *Sci Adv*, 2020, 6: eaba9639
- 11 Hotta H, Iijima H, Kusano K. Weak influence of near-surface layer on solar deep convection zone revealed by comprehensive simulation from base to surface. *Sci Adv*, 2019, 5: eaau2307
- 12 Tang R, Zeng X, Chen Z, et al. Multiple CNN variants and ensemble learning for sunspot group classification by magnetic type. *Astrophys J Suppl Ser*, 2021, 257: 38–47
- 13 MacTaggart D, Prior C, Raphaldini B, et al. Direct evidence that twisted flux tube emergence creates solar active regions. *Nat Commun*, 2021, 12: 6621
- 14 Cheung M C M, Rempel M, Chintzoglou G, et al. A comprehensive three-dimensional radiative magnetohydrodynamic simulation of a solar flare. *Nat Astron*, 2019, 3: 160–166
- 15 Kusano K, Iju T, Bamba Y, et al. A physics-based method that can predict imminent large solar flares. *Science*, 2020, 369: 587–591
- 16 Ishikawa R, Bueno J T, del Pino Alemán T, et al. Mapping solar magnetic fields from the photosphere to the base of the corona. *Sci Adv*, 2021, 7: eabe8406
- 17 Yang Z, Tian H, Tomczyk S, et al. Observing the evolution of the Sun's global coronal magnetic field over 8 months. *Science*, 2024, 386: 76–82
- 18 Fleishman G D, Gary D E, Chen B, et al. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare. *Science*, 2020, 367: 278–280
- 19 Brooks D H, Yardley S L. The source of the major solar energetic particle events from super active region 11944. *Sci Adv*, 2021, 7: eabf0068
- 20 Shen Y, Li B, Chen P, et al. Research progress on coronal extreme ultraviolet waves (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 3909–3923 [申远灯, 李波, 陈鹏飞, 等. 日冕极紫外波研究进展. 科学通报, 2020, 65: 3909–3923]
- 21 Liu J, Nelson C J, Snow B, et al. Evidence of ubiquitous Alfvén pulses transporting energy from the photosphere to the upper chromosphere. *Nat Commun*, 2019, 10: 3504
- 22 Bahaiddin S M, Bradshaw S J, Winebarger A R. The origin of reconnection-mediated transient brightenings in the solar transition region. *Nat Astron*, 2021, 5: 237–245
- 23 Antolin P, Pagano P, Testa P, et al. Reconnection nanojets in the solar corona. *Nat Astron*, 2021, 5: 54–62
- 24 Stangalini M, Erdélyi R, Boocock C, et al. Torsional oscillations within a magnetic pore in the solar photosphere. *Nat Astron*, 2021, 5: 691–696
- 25 Berghmans D, Auchère F, Long D M, et al. Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI. *Astron Astrophys*, 2021, 656: L4
- 26 Zheng R, Liu Y, Liu W, et al. Why “Solar Tsunamis” rarely leave their imprints in the chromosphere. *ApJL*, 2023, 949: L8
- 27 Zhong Z, Chen Y, Ni Y W, et al. The magnetic origin of the mystery of rare H α moreton waves. *Astrophys J*, 2025, 980: 42
- 28 Rao S, Li C, Ding M, et al. Height-dependent differential rotation of the solar atmosphere detected by CHASE. *Nat Astron*, 2024, 8: 1102–1109
- 29 Gou T, Liu R, Kliem B, et al. The birth of a coronal mass ejection. *Sci Adv*, 2019, 5: eaau7004

- 30 Gou T, Liu R, Veronig A M, et al. Complete replacement of magnetic flux in a flux rope during a coronal mass ejection. *Nat Astron*, 2023, 7: 815–824
- 31 Raouafi N E, Matteini L, Squire J, et al. Parker solar probe: four years of discoveries at solar cycle minimum. *Space Sci Rev*, 2023, 219: 8
- 32 Bale S D, Badman S T, Bonnell J W, et al. Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole. *Nature*, 2019, 576: 237–242
- 33 Howard R A, Vourlidas A, Bothmer V, et al. Near-Sun observations of an F-corona decrease and K-corona fine structure. *Nature*, 2019, 576: 232–236
- 34 Kasper J C, Bale S D, Belcher J W, et al. Alfvénic velocity spikes and rotational flows in the near-Sun solar wind. *Nature*, 2019, 576: 228–231
- 35 Mann I, Nouzák L, Vaverka J, et al. Dust observations with antenna measurements and its prospects for observations with Parker Solar Probe and Solar Orbiter. *Ann Geophys*, 2019, 37: 1121–1140
- 36 McComas D J, Christian E R, Cohen C M S, et al. Probing the energetic particle environment near the Sun. *Nature*, 2019, 576: 223–227
- 37 Li H, Dai F, Wang C, et al. Contribution of Alfvénic waves on the formation and deflection of switchbacks: insights from two decades of WIND spacecraft data. *Astrophys J Lett*, 2025, 984: L4
- 38 Hou C, He J, Duan D, et al. The origin of interplanetary switchbacks in reconnection at chromospheric network boundaries. *Nat Astron*, 2024, 8: 1246–1256
- 39 Wang C, Li H, Guo X C, et al. Scientific objectives for the exploration of the boundary of Solar system (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 7: 517–524 [王赤, 李晖, 郭孝城, 等. 太阳系边际探测项目的科学问题. *深空探测学报*, 2020, 7: 517–524]
- 40 Decker R B, Krimigis S M, Roelof E C, et al. Voyager 1 in the foreshock, termination shock, and heliosheath. *Science*, 2005, 309: 2020–2024
- 41 Richardson J D, Belcher J W, Garcia-Galindo P, et al. Voyager 2 plasma observations of the heliopause and interstellar medium. *Nat Astron*, 2019, 3: 1019–1023
- 42 Richardson J D, Kasper J C, Wang C, et al. Cool heliosheath plasma and deceleration of the upstream solar wind at the termination shock. *Nature*, 2008, 454: 63–66
- 43 Telfer M W, Parteli E J R, Radebaugh J, et al. Dunes on Pluto. *Science*, 2018, 360: 992–997
- 44 McComas D J, Swaczyna P, Szalay J R, et al. Interstellar pickup ion observations halfway to the termination shock. *Astrophys J Suppl Ser*, 2021, 254: 19
- 45 Stern S A, Weaver H A, Spencer J R, et al. Initial results from the New Horizons exploration of 2014 MU₆₉, a small Kuiper Belt object. *Science*, 2019, 364: eaaw9771
- 46 Zirnstein E J, Shrestha B L, McComas D J, et al. Oblique and rippled heliosphere structures from the Interstellar Boundary Explorer. *Nat Astron*, 2022, 6: 1398–1413
- 47 McComas D J, Allegrini F, Bochsler P, et al. Global observations of the interstellar interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX). *Science*, 2009, 326: 959–962
- 48 Burch J L, Torbert R B, Phan T D, et al. Electron-scale measurements of magnetic reconnection in space. *Science*, 2016, 352: aaf2939
- 49 Tang B, Li W Y, Graham D B, et al. Crescent-shaped electron distributions at the nonreconnecting magnetopause: magnetospheric multiscale observations. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 3024–3032
- 50 Li W Y, Graham D B, Khotyaintsev Y V, et al. Electron Bernstein waves driven by electron crescents near the electron diffusion region. *Nat Commun*, 2020, 11: 141
- 51 Fu H S, Peng F Z, Liu C M, et al. Evidence of electron acceleration at a reconnecting magnetopause. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 5645–5652
- 52 Liu H, Zong Q G, Zhang H, et al. MMS observations of electron scale magnetic cavity embedded in proton scale magnetic cavity. *Nat Commun*, 2019, 10: 1040
- 53 Sun T R, Tang B B, Wang C, et al. Large-scale characteristics of flux transfer events on the dayside magnetopause. *JGR Space Phys*, 2019, 124: 2425–2434
- 54 Chaston C C, Travnicek P. Ion scattering and energization in filamentary structures through Earth’s magnetosheath. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e2021GL094029
- 55 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. *ApJL*, 2019, 877: L37
- 56 Vega C, Roytershteyn V, Delzanno G L, et al. Electron-only reconnection in Kinetic-Alfvén turbulence. *ApJL*, 2020, 893: L10
- 57 Amano T, Katou T, Kitamura N, et al. Observational evidence for stochastic shock drift acceleration of electrons at the Earth’s bow shock. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 065101
- 58 Oka M, Otsuka F, Matsuiki S, et al. Electron scattering by low-frequency whistler waves at Earth’s bow shock. *Astrophys J*, 2019, 886: 53
- 59 Johlander A, Battarbee M, Vaivads A, et al. Ion acceleration efficiency at the Earth’s bow shock: observations and simulation results. *Astrophys J*, 2021, 914: 82

- 60 Wang S, Lu S, Lu Q, et al. Origin of reconnecting current sheets in shocked turbulent plasma. *Sci Adv*, 2024, 10: eado4639
- 61 Yang Z, Liu Y D, Johlander A, et al. MMS direct observations of kinetic-scale shock self-reformation. *ApJL*, 2020, 901: L6
- 62 Chen L, Wang S, Hesse M, et al. Electron diffusion regions in magnetotail reconnection under varying guide fields. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 6230–6238
- 63 Sitnov M I, Motoba T, Swisdak M. Multiscale nature of the magnetotail reconnection onset. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: 1–6
- 64 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. *JGR Space Phys*, 2022, 127: 1–8
- 65 Lu S, Wang R, Lu Q, et al. Magnetotail reconnection onset caused by electron kinetics with a strong external driver. *Nat Commun*, 2020, 11: 5049
- 66 Li X, Wang R, Lu Q, et al. Three-dimensional network of filamentary currents and super-thermal electrons during magnetotail magnetic reconnection. *Nat Commun*, 2022, 13: 3241
- 67 Liu H, Li W, Tang B, et al. High-speed electron flows in the Earth magnetotail. *AGU Adv*, 2025, 6: e2024AV001549
- 68 Sergeev V A, Sun W, Yang J, et al. Manifestations of magnetotail flow channels in energetic particle signatures at low-altitude orbit. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: 1
- 69 Eriksson E, Vaivads A, Alm L, et al. Electron acceleration in a magnetotail reconnection outflow region using magnetospheric multiscale data. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: 1–8
- 70 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. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL088540
- 71 Wang S, Wang R, Lu Q, et al. Direct evidence of secondary reconnection inside filamentary currents of magnetic flux ropes during magnetic reconnection. *Nat Commun*, 2020, 11: 3964–3971
- 72 Alqeeq S W, Le Contel O, Canu P, et al. Investigation of the homogeneity of energy conversion processes at dipolarization fronts from MMS measurements. *Phys Plasmas*, 2022, 29: 012906
- 73 Claudepierre S G, Ma Q, Bortnik J, et al. Empirically estimated electron lifetimes in the Earth's radiation belts: Van Allen Probe Observations. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL086053
- 74 Li J, Bortnik J, An X, et al. Origin of two-band chorus in the radiation belt of Earth. *Nat Commun*, 2019, 10: 4672
- 75 Zhang X J, Artemyev A, Angelopoulos V, et al. Superfast precipitation of energetic electrons in the radiation belts of the Earth. *Nat Commun*, 2022, 13: 1611
- 76 Gao X, Ma J, Shao T, et al. Why chorus waves are the dominant driver for diffuse auroral precipitation. *Sci Bull*, 2024, 69: 597–600
- 77 Zhao H, Ni B, Li X, et al. Plasmaspheric hiss waves generate a reversed energy spectrum of radiation belt electrons. *Nat Phys*, 2019, 15: 367–372
- 78 Allison H J, Shprits Y Y. Local heating of radiation belt electrons to ultra-relativistic energies. *Nat Commun*, 2020, 11: 4533
- 79 Zhang Q H, Zhang Y L, Wang C, et al. A space hurricane over the Earth's polar ionosphere. *Nat Commun*, 2021, 12: 1207
- 80 Wang X Y, Zhang Q H, Wang C, et al. Unusual shrinkage and reshaping of Earth's magnetosphere under a strong northward interplanetary magnetic field. *Commun Earth Environ*, 2023, 4: 31
- 81 Dai L, Zhu M, Ren Y, et al. Global-scale magnetosphere convection driven by dayside magnetic reconnection. *Nat Commun*, 2024, 15: 639
- 82 Liu C M, Zhao B N, Cao J B, et al. Field–particle energy transfer during chorus emissions in space. *Nature*, 2025, 637: 813–820
- 83 Valentini T, Buonocore J, Cousins M, et al. AMISR the advanced modular incoherent scatter radar. In: 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology, 2013. 659–663
- 84 Zhang J J, Wang W, Wang C, et al. First observation of ionospheric convection from the Jiamusi HF Radar during a strong geomagnetic storm. *Earth Space Sci*, 2020, 7: e2019EA000911
- 85 Olsen N, Friis-Christensen E, Floberghagen R, et al. The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products. *Earth Planet Space*, 2012, 65: 1189–1200
- 86 Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: early results. *Bull Amer Meteor Soc*, 2008, 89: 313–334
- 87 Eastes R W, McClintock W E, Burns A G, et al. The global-scale observations of the Limb and Disk (GOLD) Mission. *Space Sci Rev*, 2017, 212: 383–408
- 88 Immel T J, England S L, Mende S B, et al. The Ionospheric Connection Explorer Mission: mission goals and design. *Space Sci Rev*, 2018, 214: 13
- 89 Sabaka T J, Tøffner-Clausen L, Olsen N, et al. A comprehensive model of Earth's magnetic field determined from 4 years of Swarm satellite observations. *Earth Planets Space*, 2018, 70: 130
- 90 Marchetti D, De Santis A, Shen X, et al. Possible Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling effects prior to the 2018 $M_w = 7.5$ Indonesia earthquake from seismic, atmospheric and ionospheric data. *J Asian Earth Sci*, 2019, 188: 104097
- 91 Anthes R A. Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. *Atmos Meas Tech*, 2011, 4: 1077–1103
- 92 Eastes R W, Solomon S C, Daniell R E, et al. Global-scale observations of the equatorial ionization anomaly. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 9318–

9326

- 93 Immel T J, Harding B J, Heelis R A, et al. Regulation of ionospheric plasma velocities by thermospheric winds. *Nat Geosci*, 2021, 14: 893–898
- 94 Ren Z. Upper atmosphere modeling: from Earth to Planet (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 1320–1335 [任志鹏. 高层大气建模: 从地球到行星. 科学通报, 2020, 65: 1320–1335]
- 95 Liu Y, Lei J, Yu P, et al. Laboratory excitation of the Kelvin-Helmholtz instability in an ionospheric-like plasma. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 3846–3853
- 96 Chartier A T, Matsuo T, Anderson J L, et al. Ionospheric data assimilation and forecasting during storms. *JGR Space Phys*, 2016, 121: 764–778
- 97 Matsuo T, Fedrizzi M, Fuller-Rowell T J, et al. Data assimilation of thermospheric mass density. *Space Weather*, 2012, 10: 5002
- 98 Ren Z, Wan W, Liu L. GCITEM-IGGCAS: a new global coupled ionosphere–thermosphere-electrodynamics model. *J Atmos Sol-Terrestrial Phys*, 2009, 71: 2064–2076
- 99 Liu Y, Shi P, Zhang X, et al. Laboratory plasma devices for space physics investigation. *Rev Sci Instruments*, 2021, 92: 071101
- 100 Ganguli G, Crabtree C, Fletcher A, et al. Behavior of compressed plasmas in magnetic fields. *Rev Mod Plasma Phys*, 2020, 4: 12
- 101 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
- 102 Mirzaei H R, Kazemi M, Etaati G, et al. Analysis and design of microwave resonant plasma source for Iranian Space Plasma Simulation Chamber. *J Theor Appl Phys*, 2022, 16: 162221
- 103 Aidakina N A, Galka A G, Gundorin V I, et al. Simulation of physical phenomena in the ionosphere and magnetosphere of the Earth on Krot plasma device. Some results and prospects. *Geomagn Aeron*, 2018, 58: 314–324
- 104 Wang C, Xu J, Lü D, et al. Construction progress of Chinese Meridian Project Phase II. *Chin J Space Sci*, 2022, 42: 539–545
- 105 Yue X, Wan W, Ning B, et al. An active phased array radar in China. *Nat Astron*, 2022, 6: 619
- 106 He F, Guo R L, Dunn W R, et al. Plasmapause surface wave oscillates the magnetosphere and diffuse aurora. *Nat Commun*, 2020, 11: 1668
- 107 Liu J, Wang W, Qian L, et al. Solar flare effects in the Earth's magnetosphere. *Nat Phys*, 2021, 17: 807–812
- 108 Maher P, Gerber E P, Medeiros B, et al. Model hierarchies for understanding atmospheric circulation. *Rev Geophys*, 2019, 57: 250–280
- 109 Denton M H, Kivi R, Ulich T, et al. Solar proton events and stratospheric ozone depletion over northern Finland. *J Atmos Sol-Terrestrial Phys*, 2017, 177: 218–227
- 110 Yu T, Wang W, Ren Z, et al. Middle-Low Latitude Neutral Composition and Temperature Responses to the 20 and 21 November 2003 Superstorm From GUVI Dayside Limb Measurements. *JGR Space Phys*, 2021, 126: e2020JA028427
- 111 Roy I. Solar cyclic variability can modulate winter Arctic climate. *Sci Rep*, 2018, 8: 4864
- 112 Chiodo G, Oehrlein J, Polvani L M, et al. Insignificant influence of the 11-year solar cycle on the North Atlantic Oscillation. *Nat Geosci*, 2019, 12: 94–99
- 113 Criddle N R, Pautet P, Yuan T, et al. Evidence for horizontal blocking and reflection of a small-scale gravity wave in the mesosphere. *JGR Atmos*, 2020, 125: e2019JD031828
- 114 Ern M, Trinh Q T, Preusse P, et al. GRACILE: a comprehensive climatology of atmospheric gravity wave parameters based on satellite limb soundings. *Earth Syst Sci Data*, 2018, 10: 857–892
- 115 Liu H. Variability and predictability of the space environment as related to lower atmosphere forcing. *Space Weather*, 2016, 14: 634–658
- 116 Liu X, Xu J, Yue J, et al. Orographic primary and secondary gravity waves in the middle atmosphere from 16-year SABER observations. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 4512–4522
- 117 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. *JGR Atmos*, 2018, 123: 9488–9501
- 118 Xu Z, Guo J, Wimmer-Schweingruber R F, et al. First solar energetic particles measured on the lunar far-side. *ApJL*, 2020, 902: L30
- 119 Rasca A P, Fatemi S, Farrell W M, et al. A double disturbed lunar plasma wake. *JGR Space Phys*, 2021, 126: 1–3
- 120 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. *ApJL*, 2021, 922: L41
- 121 Sawaguchi W, Harada Y, Kurita S. Discrete rising tone elements of whistler-mode waves in the vicinity of the Moon: ARTEMIS observations. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e2020GL091100
- 122 Howard S K, Halekas J S, Farrell W M, et al. Solar wind and interplanetary magnetic field influence on ultralow frequency waves and reflected ions near the Moon. *JGR Space Phys*, 2020, 125: e2019JA027209
- 123 Xie L, Li L, Zhang A, et al. Inside a lunar mini-magnetosphere: first energetic neutral atom measurements on the lunar surface. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e2021GL093943
- 124 Deca J, Hemingway D J, Divin A, et al. Simulating the Reiner Gamma Swirl: the long-term effect of solar wind standoff. *JGR Planets*, 2020, 125: e2019JE006219

- 125 Yeo L H, Han J, Wang X, et al. Laboratory simulation of solar wind interaction with lunar magnetic anomalies. *JGR Space Phys*, 2022, 127: 1–8
- 126 Luo P, Zhang X, Fu S, et al. First measurements of low-energy cosmic rays on the surface of the lunar farside from Chang'E-4 mission. *Sci Adv*, 2022, 8: 1760
- 127 Sun W J, Slavin J A, Dewey R M, et al. MESSENGER observations of Mercury's nightside magnetosphere under extreme solar wind conditions: reconnection-generated structures and steady convection. *JGR Space Phys*, 2020, 125: e2019JA027490
- 128 Jasinski J M, Regoli L H, Cassidy T A, et al. A transient enhancement of Mercury's exosphere at extremely high altitudes inferred from pickup ions. *Nat Commun*, 2020, 11: 1–9
- 129 Zhao J T, Zong Q G, Yue C, et al. Observational evidence of ring current in the magnetosphere of Mercury. *Nat Commun*, 2022, 13: 924
- 130 Fan K, Yan L, Wei Y, et al. The solar wind plasma upstream of Mars observed by Tianwen-1: comparison with Mars Express and MAVEN. *Sci China Earth Sci*, 2022, 65: 759–768
- 131 Weber T, Brain D, Xu S, et al. Martian crustal field influence on O^+ and O_2^+ escape as measured by MAVEN. *JGR Space Phys*, 2021, 126: 1–20
- 132 Weber T, Brain D, Mitchell D, et al. The influence of solar wind pressure on Martian crustal magnetic field topology. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 2347–2354
- 133 Girazian Z, Halekas J, Morgan D D, et al. The effects of solar wind dynamic pressure on the structure of the topside ionosphere of Mars. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 8652–8662
- 134 Sánchez-Cano B, Narvaez C, Lester M, et al. Mars' ionopause: a matter of pressures. *JGR Space Phys*, 2020, 125: e2020JA028145
- 135 Nauth M, Fowler C M, Andersson L, et al. The influence of magnetic field topology and orientation on the distribution of thermal electrons in the Martian magnetotail. *JGR Space Phys*, 2021, 126: 1–6
- 136 Li H, Jiang W, Yang Z, et al. Pickup ion modulation on plateau-like turbulence in the Martian magnetosheath. *Astrophys J*, 2024, 967: 76
- 137 Dang T, Lei J, Zhang B, et al. Oxygen ion escape at Venus associated with three-dimensional Kelvin-Helmholtz instability. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2021GL096961
- 138 Cao H, Dougherty M K, Hunt G J, et al. The landscape of Saturn's internal magnetic field from the Cassini Grand Finale. *Icarus*, 2020, 344: 113541
- 139 Moore K M, Bolton B, Cao H, et al. No evidence for time variation in Saturn's internal magnetic field. *Planet Sci J*, 2021, 2: 181
- 140 Jasinski J M, Arridge C S, Bader A, et al. Saturn's open-closed field line boundary: a Cassini electron survey at Saturn's magnetosphere. *JGR Space Phys*, 2019, 124: 10018–10035
- 141 Delamere P A, Ng C S, Damiano P A, et al. Kelvin-Helmholtz-related turbulent heating at Saturn's magnetopause boundary. *JGR Space Phys*, 2021, 126: 1
- 142 O'Donoghue J, Moore L, Bhakyaipaul T, et al. Global upper-atmospheric heating on Jupiter by the polar aurorae. *Nature*, 2021, 596: 54–57
- 143 Mauk B H, Haggerty D K, Paranicas C, et al. Discrete and broadband electron acceleration in Jupiter's powerful aurora. *Nature*, 2017, 549: 66–69
- 144 Wang Y, Blanc M, Louis C, et al. A preliminary study of magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling at Jupiter: Juno multi-instrument measurements and modeling tools. *JGR Space Phys*, 2021, 126: e2021JA029469
- 145 Bonfond B, Yao Z H, Gladstone G R, et al. Are dawn storms Jupiter's auroral substorms? *AGU Adv*, 2021, 2: 1–4
- 146 Yao Z H, Bonfond B, Clark G, et al. Reconnection- and dipolarization-driven auroral dawn storms and injections. *JGR Space Phys*, 2020, 125: e2019JA027663
- 147 Zhang B, Delamere P A, Yao Z, et al. How Jupiter's unusual magnetospheric topology structures its aurora. *Sci Adv*, 2021, 7: eabd1204
- 148 Zhang B, Yao Z, Brambles O J, et al. A unified framework for global auroral morphologies of different planets. *Nat Astron*, 2024, 8: 964–972

Summary for “日球层物理学研究前沿进展与展望”

Frontier advances and prospects in heliophysics

Chi Wang^{1,4*}, Yuming Wang², Hui Li^{1,4*}, Hui Tian³, Qinghe Zhang¹ & Yuxian Wang¹

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

² National Key Laboratory of Deep Space Exploration/School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

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

⁴ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

* Corresponding authors, E-mail: cw@swl.ac.cn; hli@swl.ac.cn

Heliophysics, a highly active and foundational frontier of contemporary natural science, stands as a critical interdisciplinary field encompassing solar physics, space physics, space weather and plasma physics. It is of paramount importance for understanding the physical processes of the Sun-Earth system and the solar system as a whole, as well as for ensuring the security of human high-technology activities in space. Since the successful launch of the first artificial satellite in 1957 ushered in a new era of space exploration, humanity has deployed hundreds of specialized spacecraft to investigate the myriad phenomena within our heliosphere. The synergistic use of remote sensing and *in-situ* measurements, integrated with extensive ground-based observations and sophisticated numerical models, has yielded numerous breakthrough discoveries. These advancements have profoundly enhanced our understanding of the Sun's influence on the solar system and the complex space environment surrounding Earth. This paper presents a comprehensive review of the current research status and future development trends in heliophysics, both domestically and within China. It synthesizes significant scientific achievements and cutting-edge advancements in recent years across four key domains: (1) the Sun and the heliosphere; (2) Earth's magnetosphere; (3) the ionosphere and the middle-upper atmosphere; and (4) the space environments of the Moon and other planets. Our analysis indicates that the international research paradigm is progressively expanding from a focused study of the “Sun-Earth system connection” to a holistic exploration of the “Sun-Solar System connection”. Concurrently, technological advancements in wide-field imaging and constellation-based missions are significantly enhancing our observational capabilities for both macroscopic and meso- to micro-scale three-dimensional structures. Furthermore, comparative planetology and the study of planetary habitability are gaining increasing prominence. Domestically, China's heliophysics research has established a considerable ground-based monitoring network, is accelerating the construction of its space-based detection systems, and is continuously strengthening its academic foundations, leading to a steady emergence of original scientific outcomes. Looking toward the future, and aligned with the strategic deployment outlined in the recently released “*National Space Science Mid- and Long- Term Development Plan (2024–2050)*”, this paper provides an in-depth discussion of ten critical scientific questions that China aims to address. These questions include: (1) the characteristics of magnetic activity in the solar polar regions and the formation mechanism of the solar magnetic cycle; (2) the cross-scale processes and mechanisms governing solar wind-magnetosphere interactions; (3) the processes and mechanisms of the solar wind's interaction with the interstellar medium; (4) the three-dimensional propagation characteristics of solar wind disturbances and the prediction of the southward magnetic field; (5) the influence of inner magnetospheric wave-particle interactions on the three-dimensional structure and evolution of radiation belts; (6) the coupling processes between the magnetosphere, ionosphere, and thermosphere, and the dynamics of polar particles; (7) the causes and variability of multi-scale disturbance structures in the ionosphere/thermosphere; (8) the coupling processes and mechanisms between Earth's geodynamic activity, atmosphere, and ionosphere; (9) the space weather environment and the mechanisms of matter and energy circulation in giant planet systems; and (10) the influence and mechanisms of space weather on planetary habitability. This paper aims to provide a comprehensive scientific reference for China's future deployment of research initiatives and strategic planning in heliophysics.

heliosphere, planetary physics, solar-terrestrial space, space weather

doi: [10.1360/CSB-2025-5161](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5161)