0254-6124/2021/41(1)-001–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Chi, DOU Xiankang, GONG Jiancun, FU Suiyan, ZHANG Shaodong, ZHANG Xiaomin, CAO Jinbin, YANG Huigen, WU Jian, WANG Jinsong, XIA Lidong, DENG Xiaohua, XIAO Fuliang, FANG Hanxian. Recent advances and prospect in space physics (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(1): 1-9. DOI:10.11728/ cjss2021.01.001

空间物理学最新进展与展望

王 赤[1] 窦贤康[2] 龚建村[3] 傅绥燕[4] 张绍东[2]
张晓敏[5] 曹晋滨[6] 杨惠根[7] 吴 健[8] 王劲松[9]
夏利东[10] 邓晓华[11] 肖伏良[12] 方涵先[13]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(武汉大学 武汉 430072)

3(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201203)

4(北京大学 北京 100871)

5(北京理工大学 北京 100081)

6(北京航空航天大学 北京 100191)

7(中国极地研究中心 上海 200136)

8(中国电波传播研究所 青岛 266107)

9(中国气象局 北京 100081)

10(山东大学 威海 264209)

11(南昌大学 南昌 330031)

12(长沙理工大学 长沙 410114)

13(国防科技大学 长沙 410073)

摘 要 空间物理学是人类进入空间时代后迅速发展的一门新兴交叉学科, 特别是进入新世纪后国内外都取得了辉煌的成就. 本文简要介绍空间物理领域近年来取得的重要进展、重要成果、国内外发展趋势, 以及未来发展的重点方向.

关键词 空间物理, 空间天气, 空间探测

中图分类号 P 353

Recent Advances and Prospect in Space Physics

WANG Chi[1] DOU Xiankang[2] GONG Jiancun[3] FU Suiyan[4]
ZHANG Shaodong[2] ZHANG Xiaomin[5] CAO Jinbin[6] YANG Huigen[7]
WU Jian[8] WANG Jinsong[9] XIA Lidong[10]

2020-09-30 收到原稿

E-mail: cw@swl.ac.cn

DENG Xiaohua[11] XIAO Fuliang[12] FANG Hanxian[13]

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

2(*Wuhan University, Wuhan* 430072)

3(*Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 210203)

4(*Piking University, Beijing* 100871)

5(*Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)

6(*Beihang University, Beijing* 100191)

7(*Polar Research Institute of China Polar Research Institute of China, Shanghai* 200136)

8(*China Research Institute of Radio-wave Propagation, Qingdao* 266107)

9(*China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

10(*Shandong University, Weihai* 264209)

11(*Nanchang University, Nanchang* 330031)

12(*Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410114)

13(*National University of Defense Technology, Changsha* 410073)

Abstract Space physics is a rapid-developing cross-disciplinary subject after entering space age, especially it has got great achievements in the new century. This paper will briefly present the important advances and scientific results, analyze the development trends, and suggest future key directions.

Key words Space physics, Space weather, Space exploration

0 引言

空间物理学是伴随人造卫星进入空间而迅速发展起来的一门新兴的、多学科交叉的前沿基础学科, 着重研究地球空间、日地空间和太阳系空间的物理过程和变化规律, 主要研究对象包括太阳、行星际空间、地球和行星的磁层、电离层、大气层, 以及几者之间的相互作用和因果关系, 特别关注地球表面 20 km 以上直到太阳大气这一广阔日地空间环境中的基本物理过程. 空间物理学是当代自然科学领域最活跃的前沿学科之一.

太阳是日地系统和太阳系的主要能源和扰动源, 其各种活动和爆发过程直接影响整个系统的状态. 太阳的爆发活动包括太阳耀斑和日冕物质抛射事件, 这些爆发活动的能量来源于太阳外层大气中磁场的磁能释放, 太阳大气的等离子体加速成为向外流动的太阳风与太阳磁场一起延伸到行星际空间, 并最后在日球层边界与恒星际空间相连接. 太阳风与地球和行星相互作用并控制了地球和行星基本上由完全电离的等离子体组成的磁层. 电离层由部分电离的等离子体组成, 太阳辐射、地球、行星的磁场和引力场均对其产生重要影响. 地球中高层大气及低层大气以中性成分为主, 也有许多电磁过程, 同时涉及固、液、气和等离子体四态之间的相互作用 [1]. 空间物理学的研究领域包括物理性质不同的特定空间区域的特征和变化, 而且特别强调不同区域之间活动和变化的相互联系.

1957 年第一颗人造卫星的发射开辟了空间科学发展的新纪元, 空间物理学随着航天技术和空间探测活动的发展而迅速发展. 20 世纪中期以来, 人类发射了数百颗航天器用于空间物理探测和研究, 大致可以分为如下三个阶段 [2].

第一阶段 20 世纪 60 年代初到 80 年代末, 发现和专门探测阶段. 20 世纪 60 年代充满了激动人心的空间物理新发现. 人们发现了辐射带的存在, 发现和证实了太阳风的存在, 并相继发现了太阳风中存

在激波、高速流、Alfvén 波和各种磁流体间断面的存在, 基本弄清了地球轨道附近的行星际空间环境, 发现了地球弓形激波、粒子的激波加速和磁场重联等基本物理现象的存在. 在随后的三十年间, 针对日地系统不同的空间层次, 人类开始进行目的性很强的专门探测, 发射了一系列专项研究卫星, 空间物理学向广度和深度发展. 这些卫星包括: 监测太阳活动的卫星, 探测太阳风的卫星, 探测地球空间的卫星. 同时, 人类也有计划地探测了太阳系中的其他行星. 目前, 还有 20 世纪 70 年代末发射的飞船正在向宇宙深空探索, 旅行者一号于 2005 年底到达了日球层的边缘 (终止激波).

第二阶段 20 世纪 90 年代, 将日地系统作为一个整体来研究. 由于人类社会发展带来的对航天、通信、导航等高科技领域及国家安全的强烈需求, 空间物理和空间天气迅速发展成为国际科技活动的热点之一 [3]. 人们逐渐认识到把日地系统整体作为一个有机因果链进行研究的重要性. 20 世纪 90 年代中期, 美国开始制定国家空间天气计划, 建立空间天气监测体系, 在物理和数值模拟方面建立从太阳到地球的空间天气预报模式, 实现常规及可靠的空间天气预报.

第三阶段 21 世纪开始将太阳–太阳系作为一个有机整体研究, 并强调空间物理探测和研究为空间探索保障和技术社会服务. 2012 年美国发布的《太阳与空间物理: 服务于技术社会的科学》[4] 战略研究报告中指出, 空间物理的主要目标是提升对太阳活动爆发机制和近地空间等离子体动力学基本物理过程的科学认识, 确定日地耦合系统背景下地球大气各个圈层的相互作用, 以及大幅提高开展符合实际和定制的地球空间环境预报的能力, 更好地满足社会的需求.

本文简要介绍空间物理领域近年来取得的重要进展、重要成果、国内外发展趋势, 以及对未来发展重点方向的思考和建议.

1 国际重要进展与成果

近年来, 人类在研究太阳活动及其对日地空间环境的影响, 以及太阳系与星际空间相互作用等方面取得了重大进展 [5,6]. 具体包括: 明确了太阳活动区、耀斑、日冕物质抛射 (CME) 和行星际介质扰动之间的联系, 提出了相对论带电粒子的可能加速机制; 了解了行星际条件驱动地磁活动和磁暴现象, 确定了磁层–电离层–热层耦合的主要动力学特征; 开始探索太阳对日球最外层空间 (日球层与星际空间边界处) 的影响. 此外, 基于物理的数值模拟工作同步得到了迅速发展, 为理解日地空间、日球层空间各种物理现象提供了有效途径, 使人类能够逐步深入了解相关领域的基本物理过程, 并具备初步的空间天气预测能力.

1.1 太阳爆发活动及其传播

太阳爆发活动的能量来源于太阳磁场, 近年来人们对太阳磁场结构有了深入的理解. 太阳观测卫星 Hinode 上的 0.5 m 口径望远镜、1 m 级孔径的地面望远镜以及 1.6 m 新太阳望远镜 (NST) 的空间分辨率均已极大地提高. 利用上述设备的观测数据, 已经能够比较清楚地了解黑子半影暗条、本影亮点和微小磁结构的基本物理过程. 从色球到太阳风的过渡受到日冕磁场的控制, 随着太阳磁场观测技术的进步, 人类已获得了全色球矢量场和日冕磁图. 人们在理论模型和观测两方面都已经取得了重要进展, 实现了对日冕半真实全球三维 MHD 数值模拟, 其空间分辨率足以与当前观测相比较, 然而色球建模仍然是当前空间物理研究领域的重大挑战.

耀斑和日冕物质抛射是威胁载人航天的太阳高能粒子 (SEP) 的主要来源. 人类对磁场能量在耀斑事件中是如何爆发性释放问题已经取得突破性进展. RHESSI 卫星的硬 X 射线 (HXR) 光谱成像观测结果表明, 能量释放 (电子或离子加速) 与磁场重联相关. 人类对日冕物质抛射 (CME) 和耀斑的产生机制研究也取得了进展. 在 $4\,R_{\rm s}$ (太阳半径) 以内, CME 速度曲线与耀斑 HXR 能量释放同步. CME 的磁通量绳模型的模拟结果与大多数观测事件一致.

太阳风结构和动力学方面的研究也已经取得重大进展, 这些进展是理解太阳对地球空间环境影响的关键. Ulysses 飞船和 ACE 卫星得到的太阳风轮廓图表明, 低速和高速太阳风分别源自太阳低纬和高纬区域. 太阳风微观结构大致与日冕结构相关. 研究发现, 磁通量绳增长可导致日冕物质抛射, 太阳表面的小型丝状爆发可产生太阳 X 射线射流, 这些发现质疑了长期以来广泛接受的磁通量浮现模型 (Emerging-Flux Model). 建立了用于解释不同尺度的太阳爆发事件的统一模型, 发现太阳表面形成的磁笼能阻止太阳耀斑的喷发. 揭示了太阳针状体 (Spicule) 产生机制和加热过程, 显示其在形成阿尔芬波 (Alfvén waves) 的过程中起着重要作用. 2017 年发射的帕克

太阳探测器 (PSP) 是第一个飞入太阳日冕的飞行器, 该探测器是迄今为止最接近太阳的探测器, 其位于太阳表面上方 $9\,R_{\rm s}$ 处, 获得了包括太阳磁力线回旋、太阳风旋转、无尘区域和高能粒子等方面的新信息, 为理解整个星系中活跃恒星提供了新数据.

1.2 磁层动力学过程

磁层的全球动力学受行星际磁场 (IMF) 南北向分量变化所控制, IMF 南北向分量变化驱动磁层形成对流环路. IMF 和太阳风动压变化会产生磁暴现象, 引起极光并驱动全球响应. 磁暴期间, 磁层的赤道环电流增强, 并使得地面磁场出现扰动. 数值模型和全球高能中性原子 (ENA) 成像显示, 在磁暴主相期间, 环电流具有不对称性, 这表明了其与电离层间的紧密耦合.

磁层顶开尔文–亥姆霍兹 (K-H) 波比预期的更常见, 其可能对地球空间环境影响更大. 来自太阳的等离子体射流撞击到地球磁层顶时引发磁层顶的振动. 磁层作为一个统一的耦合系统, 对其在磁暴期间的响应认识有了极大改善. 磁层与电离层之间的电动力学耦合不再是简单的耗散响应, 环电流与电离层的相互作用会严重扭曲内磁层对流, 反过来也会影响环电流本身.

MMS 卫星首次实现了对磁重联现象的三维高时空精度观测, 观测结果深刻改变了人类对近地空间磁重联现象的认识. 对磁场和等离子流细节的首次定量预测得到了实地观测数据的证实, 复杂的动力学模拟结果也与磁尾磁重联的特征一致. 在磁场重联发生的小尺度结构内, 离子和电子由于质量不同而解耦, 从而极大地加快了重联的速率. 最新的三维数值模拟结果显示, 新增的第三维有利于等离子体不稳定性增长, 可能破坏耗散区, 使得重联出现高度振荡. 磁尾磁重联产生狭窄的高速喷流, 多点卫星观测表明这种重联产生的高速喷流会触发磁层亚暴并驱动磁尾对流.

波粒相互作用已被确定为辐射带粒子能量获取与损失的主要机制. 等离子体理论、包含 WPI 过程的全球数值模拟以及波的观测数据都证实, 高能和低能等离子体的混合体驱动着环电流和辐射带中的不稳定性. 利用卫星和探空气球对从空间撞击地球大气的高能电子进行探测的结果表明, 等离子体层嘶声可导致辐射带电子损耗.

太阳风与磁层相互作用产生的超低频波是内磁层中带电粒子的重要能量来源. 最新的卫星观测数据表明, 超低频波通过与带电粒子的漂移共振或漂移–弹跳共振, 可以快速加速产生辐射带 “杀手” 电子, 改变环电流离子成分, 并影响等离子体层和电离层上行的低能粒子等. 通过这些新的观测数据还发现了带电粒子对超低频波的增长/衰减以及空间分布的响应, 从而进一步发展了超低频波与带电粒子相互作用的理论. 超低频波还可以通过影响其他类型波动如动力学 Alfvén 波、嘶声波、合声波等的激发和空间分布, 进而影响内磁层中带电粒子的加速、输运和损失等过程.

1.3 电离层特征与扰动

太阳活动、太阳风、太阳 EUV 辐射和地球磁场的缓慢变化都是影响地球空间环境长期变化的重要因素. 最近的太阳极小年出现了一个长时间的低太阳 EUV 通量和相应的加热率, 同时热层密度下降到比过去四个太阳活动周的观测值都低的异常水平. 目前还没有模型可以预测和重现这种密度观测, 这很可能是很多因素的综合效应, 如较低水平的太阳和地球活动、温室由于气体浓度增加而降温, 以及额外的化学或动力学变化从大气底部向外输运等.

电离层密度的全球 GPS 图像第一次展示了磁暴起始时大尺度高密度羽状等离子体从中纬极光卵扩展现象. 在此次事件期间, IMAGE 卫星对等离子体层的 $\rm He^+$ 离子成像结果证明内磁层出现相应结构, 等离子体被剪切出等离子体层, 并对流到磁层顶. 电离层内出现了意料之外的等离子体层结构, 这与磁暴期增强的极光离子出流关键过程密切相关.

1.4 中高层大气动力学

空间物理学近年来最激动人心的进展之一是人类意识到对流层的天气和气候能够强烈的影响高层大气和电离层. 雷暴释放的对流层热驱动的大气潮汐可以传播到 100 km 的高度, 对电离层–热层系统有潜在影响. 电离层结构季节性的大尺度变化也被发现, 这与热带气候条件下的季节性变化相匹配.

自从进入空间时代以来, 卫星轨道衰减表明热层密度以每十年几个百分点的速度下降. 20 世纪 80 年代有研究者预测, 这种变化主要是由于大气中二氧化碳的增加所引起. 二氧化碳在低层大气中捕获红外热, 但是在高层大气中却表现出辐射冷却的效果. 因此, 热层冷却毫无疑问是人类活动对高层大气的影响结果.

起始于地球表面并传进大气层的大气波动现象存在纵向变化、地方时变化、季节性–纬度性变化和日变化. 研究表明, 低层大气传入的波动所贡献的能量与外部太阳 EUV 和 UV 辐射、沉降粒子、电阻加热和磁层驱动的等离子体流向磁层–电离层输运的能量相当.

1.5 行星空间物理与日球层物理

关于行星空间物理, 已在行星磁层 (或类磁层系统方面) 结构、动力学和耦合联系方面取得了重要进展. 人类加深了对火星大气损失的认识, 通过高纬无线电波测量识别金星闪电, 并对比地球更强的火星磁层–太阳风耦合的磁层动力学过程进行了探测研究.

太阳风动压变化会影响木星极光增亮. ENA 成像证实, 来自木卫二大量的环面中性气体对木星磁层有着显著影响. 在向阳面, 木卫二通过通量管交换过程向外输运等离子体, 而在夜侧则通过离心不稳定性和等离子体团喷流向外输运等离子体. 大量高能离子喷流在木星尾部昏侧约 200 木星半径处得到加速.

Cassini 飞船对土星高度结构的磁层和卫星系统的大量观测是最主要的亮点. 例如, 土卫二南极地区向外喷出羽状水汽和冰晶; 观测发现, 中纬磁层通量管交换引起的磁尾等离子体喷流是土卫二冷等离子体输运的主要机制; 太阳风动压变化强烈调制外磁层活动, 包括土星千米波辐射和土星环电流中的高能粒子加速.

NASA 旅行者二号飞船 (Voyager-2) 突破日球层顶, 进入恒星际介质. 在飞向日球层顶 (太阳系在宇宙的外边界) 的途中, Voyager-2 在到达和穿越终止激波 (TS) 进入日鞘的过程中获得了一系列突破性发现. IBEX 飞船和 Cassini 飞船的观测结果极大地改变了人类对太阳系与星际介质相互作用的认识, 同时也定量确定了一些对日球层边界区域的科学预测. 终止激波 (TS) 处的太阳风不再维持超声速. 长期以来, 终止激波被认为是反常宇宙线 (ACR) 的加速源, 但是 Voyager-2 在穿越 TS 途中并未获得任何证据. ACRS 源区是当前学术界具有极大争论的课题. 同时, 与理论预测一致的是, 大多数的超声速流能量没有加热背景太阳风, 而很可能进入超热太阳风成分.

IBEX 飞船和 Cassini 飞船观测到了高能中性原子分布, 这个由来自外日球层的辐射造成的 “丝带” 结构在此前从未被观测到, 而且这一结构明显受当地的星际磁场调制. 丝带演化的最短时间尺度是 6 个月, 这表明日球–星际相互作用是高度动态的. 星际磁场在外日球层形成中的作用比获得新数据之前预测的更强.

1.6 空间天气预报方法与模式

当前空间天气预报的水平与实际需求还有较大差距, 预报的水平估计相当于气象天气预报 20 世纪六七十年代的水平. 借鉴天气预报发展历史, 要从根本上提高空间天气预报的水平, 一方面要大力开展空间探测, 针对日地空间的关键区域和空间天气连锁变化过程进行监测; 另一方面需要进行理论研究和建立相关的空间天气预报方法和模式. 经过几十年的发展, 从太阳大气、行星际空间再到地球空间的不同空间区域都研发了成熟度不同的各种物理或者经验模式. 过去 10 年中, 从太阳表面太阳风暴驱动源出发, 贯穿日地空间, 最终到地球空间的基于物理规律的整体集成数值预报模式取得了突破性进展, 美国空间天气集成模型中心 (CISM) 和空间环境模型中心 (CSEM) 初步建立了基于物理的空间天气集成数值模型.

2 国内重要进展与成果

2003 年和 2004 年中国发射了地球空间双星探测计划 (以下简称 “双星计划”) 探测一号卫星 (赤道星) 和探测二号卫星 (极轨星), 2012 年建成了 “东半球空间环境地基综合监测子午链” (子午工程 I 期). 双星计划和子午工程 I 期是国际上重大空间探测计划的重要组成部分, 极大地推动了空间物理探测技术的进步, 相应的科学研究也大幅提升了中国在国际空间科学领域的地位与影响力 [7]. 在国家自然科学基金委、科技部、中国科学院、中国气象局等部委的支持下, 开展了很多空间物理基础和应用基础研究, 这使得中国的空间物理学在诸多领域取得了重要的进展. 其中, 太阳风的起源及其加热和加速、行星际扰动传播、磁暴和亚暴的产生机制、磁重联过程、太阳风与磁层的相互作用、中高层大气动力学过程的探测与研究、电离层的建模以及空间天气预报方法研究等已经站在国际研究前沿 [8].

2.1 太阳爆发活动及其传播

根据 SOHO 飞船对冕洞光球磁场及过渡区的光谱成像观测资料, 发现太阳风起源于日冕漏斗状开放磁结构, 物质和能量来源于对流驱动的磁重联. 高温

高速的太阳风流经常伴随着强湍动/强波动, 湍动被认为是太阳风加热加速的重要能量来源.

发现了迄今为止最大尺度的日冕波动–冕流波. 研究表明, CME 在行星际空间传播过程中受自身演化、背景磁场和太阳风的影响, 同时也受在传播途中所遭遇的激波和其他 CME 等行星际瞬变空间结构的影响. CME 在日地空间传播时并不一定严格沿着日心径向, 可能存在偏转效应. CME 之间的相互作用过程会使 CME 动力学特征 (包括传播速度和传播方向等) 发生显著变化. 揭示了超级太阳风暴事件是太阳活动区连续爆发产生的复合事件的形成机制.

2.2 磁层动力学过程

日侧磁场重联是太阳风物质、能量进入磁层的重要机制, 其发生位置、产生结构及其变化对于认识磁层扰动过程十分重要. 在行星际磁场不以北向分量为主时, 重联最可能发生在向阳面磁层顶的重联线带中. 磁层顶通量传输事件的尺度变化显示出磁层顶磁重联的时变特性. 发现了弓激波对磁层持续供电的证据, 提出了太阳风与电离层通过场向电流直接耦合的观点. 提出了地球空间磁场对行星际激波负响应新现象的形成机制. 发现磁重联能量转换是发生在 O 点而非传统理论认为的 X 点. 提出了非稳态磁场重联中的能量电子加速新机制. 对磁场重联的精细结构进行了细致的研究, 发现了重联扩散区中充满了相互作用的磁通量绳, 并据此给出了扩散区是由很多相互合并的磁岛组成并处于湍动状态的动态重联图像. 另外, 还发现了磁场重联导致的小尺度丝状电流中发生次级重联的证据. 通过数值模拟揭示了存在引导场情况下电子在磁场重联过程中加速的物理图像. 发现电子开尔文–赫姆霍兹不稳定性会在重联扩散区内诱导产生亚离子尺度的磁通量绳. 利用动力学方法对等离子体片高速等离子体流建模, 发现以前基于传统磁流体力学 MHD 方法的研究严重低估了高速离子流在磁层亚暴能量输运中的作用.

利用极区电离层大范围等离子体观测, 在不同行星际磁场条件下直接观测到极区电离层等离子体云块的完整演化过程, 进而直接提供了磁层大尺度对流循环的直接观测证据. 利用卫星和中国南极中山站地基观测, 结合三维磁流体力学模拟, 首次揭示了发生在地球南北极的 “跨极盖多重极光弧” 特征和形成机制. 利用 Cluster 卫星和 Swarm 卫星的探测数据, 首次获得地球磁层和电离层电流耦合的观测证据.

地球内磁层中不同能量的粒子共存使得这一区域波动现象十分丰富. 研究表明, 超低频波主要是由外部太阳风变化驱动, 并可以通过两种不同的共振过程将能量分别转移给离子和电子. 首次发现内磁层上升调的快磁声波. 通过分析电场和粒子通量相位差, 给出了磁层波粒漂移共振机制的直接观测证据. 发现等离子体层顶表面波和磁力线共振的证据. 给出了等离子体波控制辐射带变化的完整物理图像. 在波–粒相互作用对环电流、辐射带和等离子体层粒子的调制与加速方面取得重要进展.

针对 Cluster、双星、THEMIS、Swarm 和 MMS 等多卫星星座, 中国学者相继发展了电流最小方差分析、磁场几何分析、磁结构维度和方向速度分析、磁场零点判定、磁结构重构等方法, 极大地促进了对多尺度三维磁结构特性的研究, 加深了国际上对磁结构空间等离子体动力学过程时空变化等问题的理解.

2.3 电离层特征与扰动

在电离层时空扰动特征和形成机制方面成果丰富, 提出了电离层随太阳活动变化呈现多种类型. 地球磁层的扰动一般都会造成电离层的扰动, 出现电离层正暴或者负相暴. 近期基于反演大量低轨卫星导航信标观测数据, 顶部电离层的研究取得重要进展. 研究了电离层中的各种等离子体不稳定性和非线性过程, 以及在赤道和极区电离层中产生不同尺度的等离子体不均匀体. 开发了模拟真实地磁场的电离层发电机理论模式 TIDM-IGGCAS-II 和三维电离层理论模式 TIME3D-IGGCAS, 在 APEX 磁坐标系下求解时变的电离层参数. 发展了三维时变的全球电离层–热层理论模式 GCITEM-IGGCAS, 自洽求解主要的热层电离层参数 (密度、温度、速度和电场等), 较好地再现了电离层/热层的形态和主要变化特征. 开发了中国地区 TEC 和电子密度同化模型.

地震电离层异常研究取得较大进展, 利用电波观测站电离层垂测数据, 获得了主流 “异常电场” 假说的地面电场测量数据证据. 利用星载三频信标和地面垂测斜测数据, 开发了多数据源电离层层析算法, 提高了成像分辨率和精度.

2.4 中高层大气动力学

大气重力波是在层结稳定大气中由于空气微团受到扰动在其平衡位置发生震荡而产生的, 这种震荡在合适条件下能够在大气中传播. 中国学者提出了共振和非共振作用均能引起初级波与次级波之间的

能量交换, 使得重力波波谱更加广泛. 发现了重力波对大气光化学过程存在重要影响. 大气重力波全球分布及其变化特性的观测结果能够为全球环流模式中重力波参数化方案提供更为真实的观测依据, 从而提高了全球环流模式的准确性.

大气波动是中高层大气的主要扰动形式. 行星尺度的大气波动 (潮汐波和行星波) 在传播过程中, 影响各层区的动力学过程、能量交换以及成分的输运, 在各层区间的耦合中发挥重要作用. 发展了提取大气潮汐波和行星波的新方法, 系统考察了主导大气潮汐波和行星波及其空间分布特征. 利用全球电离层 TEC 观测资料, 采用经度波数谱分析方法提取电离层经度 "四波" 结构, 系统刻画了电离层 "四波" 结构的典型变化特征. 通过观测证实和模拟重现对流层行星波的作用, 发现其能够促使形成冬季平流层的爆发性增温, 进而形成各层区耦合的特殊通道. 潮汐波和行星波的共同作用可以将能量、动量传输到中间层、低热层乃至热层/电离层, 在各层区产生强烈响应.

由于台风、海啸/地震等事件引起的近地表波动通过动力学和电动力学等形式向上传输, 可以通过大气圈–电离圈的耦合造成电离层扰动. 开展了中层大气层–太阳/地磁活动耦合研究.

2.5　行星空间物理与日球层物理

在月球和深空探测的国家计划的牵引下, 中国行星物理研究逐渐从零星的跟踪研究过渡到规模化的团队研究, 驶入 "快车道".

研究了火星中层大气迁移和非迁移潮汐波的纬向和季节变化规律, 并在火星大气中发现了三种新的非迁移潮汐波. 针对系外行星大气, 利用数值模拟的手段研究了在恒星演化早期阶段的强紫外辐射对宜居带内行星大气氧含量的影响. 发现了金星磁尾中存在磁重联过程的证据和水星磁尾的重联区及其快速演化过程. 通过观测数据和数值模拟, 研究了月球附近的磁场结构, 确认了月球尾迹中的 Alfvén 翅结构. 提出了金星弓激波外的氧离子逃逸通道. 研究了火星大气的多个属性, 发现其温度、电离率、等离子体输运特性等明显受火星局域磁场构型的调制.

发展了描述中性成分与带电粒子相互作用的理论方法, 建立了三维日球多元流体太阳风模型, 揭示了日冕物质抛射事件在日球空间的传播过程和演化规律.

2.6　空间天气预报方法与模式

在太阳大气–行星际耦合物理过程与建模研究领域, 实现了日冕–行星际守恒元解元 (SIP-CESE MHD) 模型在重叠网格系统下的自适应技术, 建立了以连续观测驱动的三维背景太阳风时变模式. 辐射带粒子动力学及模型建模等方面取得了重要进展. 发展了非均匀电导电离层模型的太阳风–磁层–电离层耦合 MHD 和粒子模拟数值模型, 研发了三维非对称磁层顶和弓激波模型. 建立了基于实测数据的全球等离子层顶模型, 并使响应时间从以往的 3 h 提高到 5 min. 建立了辐射带电子径向扩散系数 DLL (Liu) 模型, 展示了以往模型不能描述的径向扩散系数与粒子能量的关系. 发展了电离层参量 (如临界频率、F_2 层峰高、顶部等离子体密度) 的局域与全球模型, 并开发了电离层数据同化模式. 建立了基于自主观测数据的重力波源参数化模式, 建立和完善了系列大气波动传播模式, 建立了基于物理的日地系统连锁变化过程集成模式框架.

3　展望与结语

未来 5~10 年, 空间物理探测和研究正在朝着整体性、系统性和精细化探测方向发展, 主要表现在以下方面.

(1) 日地空间天气连锁变化过程和变化规律继续成为主攻方向. 日地空间是一个耦合的复杂系统. 来自太阳的能量和物质经过行星际传向地球空间, 形成能影响人类空间技术活动甚至地面系统的各种地球空间环境现象. 太阳活动与太阳爆发引起的太阳风扰动通过与地球磁层相互作用, 形成地磁暴、亚暴等磁层扰动, 并通过太阳风–磁层–电离层/热层耦合系统进一步影响到地球电离层与热层, 引起电离层及热层暴, 产生包括极光在内的中高层大气剧烈扰动现象. 地球低层大气吸收来自太阳的辐射能量, 以重力波、潮汐和行星波等波动形式将能量和动量向上传递, 进一步加热高层大气, 影响高层大气环流, 拖曳电离层等离子体运动并与之发生耦合作用. 潮汐等大气波动在电离层底部 (发电机区) 通过发电机效应产生电场, 该电场沿着倾斜的磁力线映射到整个电离层, 导致电离层等离子体重新分布, 产生包括赤道喷泉效应在内的电离层动力学和电动力学现象. 2020 年 8 月 29 日, 美国 NASA 公布了针对空间天气的探

测卫星的 5 个任务进入概念研究, 聚焦太阳活动及其对地球空间环境的影响, 包括太阳极紫外光谱探测卫星 (MUSE), 太阳极区探测卫星 (Solaris), 太阳风等离子体湍流探测任务 (HelioSwarm), 磁层响应观测台 (STORM) 和极光重构微纳星座 (ARCS).

(2) 微小卫星星座日益成为多时空尺度物理现象探测的重要手段. 空间物理探测一方面发展小卫星星座探测技术, 观测小尺度三维结构, 区分时空变化 (例如 THEMIS, Cluster, MMS 等); 另一方面建立大尺度的星座观测体系, 实现立体和全局性的观测 (例如 STEREO, 双星计划等). 空间物理探测与研究的发展已经由定性、单因素或为数不多的空间环境因素的探测研究进入到了精细化的多因素耦合或协同探测研究的新阶段. 只有实施联合探测, 才能了解关键区域、关键点处扰动能量的形成、释放、转换和分配的基本物理过程, 深入揭示其物理过程的本质. 不同高度卫星的联合观测, 成为日地空间不同空间区域耦合研究不可或缺的前提, 例如: 刚进入概念研究的 32 颗立方星组成的极光重构微纳星座 (ARCS), 预计 2022 年发射的由 4 个 6U 立方星构成的日冕和日球层联系偏振探测星座计划 (PUNCH), 串联磁重联和极尖区电动力学探测双星 (TRACERS) 任务.

(3) 空间天气过程在宏观和微观两个层面上开展研究, 强调二者的密切结合. 空间天气研究面临挑战的科学问题主要包括大尺度 (宏观) 和中小尺度 (微观) 二方面的问题. 空间天气大尺度问题包括驱动空间天气事件发生的大尺度扰动能量的形成、释放、经由行星际空间的传输、注入地球空间并触发地球磁层、电离层和中高层大气天气变化的能量沉积、传输、转换和耗散等过程. 中小尺度问题涉及控制关键区域、关键点处扰动能量的形成、释放、转换和分配的基本物理过程, 例如磁重联过程、粒子加速和传输过程、等离子体和中性大气的耦合过程、光化–动力过程、湍动、波动过程和磁场的产生与易变性的发电机过程等. 成像整体观测日益成为描述宏观现象的重要途径, 多卫星的联合观测是微观物理过程不可或缺的观测手段. 揭示空间天气基本物理过程并实现微观过程与宏观整体现象的融合研究是空间物理研究的重要前沿.

(4) 深空探测方兴未艾, 行星空间物理研究成为新的学科增长点. 太阳和行星际的探测中, 太阳轨道器和太阳探测以及内日球探针都向空间天气的源头——太阳不断逼近. 一系列空间探测计划向太阳系的火星、金星、水星、土星、木星和小行星等深空进军, 行星空间物理探测也成为重要组成部分. 美国旅行者飞船正在离太阳 100 AU 处传回日球层边缘的信息. 2012 年 8 月, 旅行者 1 号已经穿透了日球层顶进入了星际空间.

(5) 重视空间天气对航天活动和人类生存环境影响的研究. 空间天气对人类活动的影响日益受到人们的重视. 这些影响不仅局限于空间活动, 而是涉及从天基、地基各类现代高技术系统直至人类健康和人类生活. 据统计在轨卫星的所有故障中, 空间天气效应诱发的事故约占 40%, 具体表现在航天器轨道、寿命、姿态控制直至航天器材料、电子器件以及软硬件的正常工作和通信测控. 当太阳、空间 X 射线、地磁、电离层发生骚扰时, 会使电波信号的折射条件改变、反射能力减弱、吸收加大, 导致信号发生闪烁、误码率增加等, 例如低频、甚低频信号产生相位异常、广播电视系统受到干扰甚至中断. 空间天气效应对电波传播的影响不仅局限于通信领域, 卫星精密定位系统、导航系统、雷达特别是远程超视距雷达系统都会受到空间电磁环境扰动的强烈影响, 例如其可使雷达测速测距系统产生误差、导航定位侦察系统产生误差等. 空间高能粒子辐射除直接威胁航天员的生命安全外, 民航飞机特别是经常在高纬地区和跨极区飞行的航班人员和器件同样受到影响. 空间电磁环境扰动及空间天气事件导致的人类日常活动、健康条件和疾病发生的关系也已引起人类的关注并正在进行深入研究中.

中国的空间物理在未来 10 年也将进入 “黄金” 发展期. 在空间天气地基监测方面, 子午工程 Ⅱ 期已经开工建设, 建设周期 4 年. 子午工程 Ⅱ 期在 I 期监测链的基础上向经、纬向延拓, 利用多种观测手段对我国重点区域加密观测, 充实完善沿东经 100°E 和北纬 40°N 的两条观测链, 与 I 期东经 120°E 和北纬 30°N 观测链共同构成覆盖中国区域上空的空间环境地基综合监测. 2021−2022 年将发射中国第一颗太阳观测卫星 ASO-S, 聚焦 “一磁两暴”, 针对磁场与耀斑的关系, 磁场与日冕物质抛射的关系, 以及耀斑与日冕物质抛射的关系开展科学研究, 同时也可为空间天气预报服务. 中欧合作地球空间 “微笑” 卫星 (SMILE) 计划将利用创新的 X 射线和紫外成像仪器, 首次对太阳风和地球磁层之间的相互作用进行

整体成像, 对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具有重要的科学意义和应用价值. SMILE 计划于 2024 年底发射. 该任务是继地球空间双星计划后, 中欧之间又一大型空间探测计划, 开辟了中国空间科学国际合作的新范式. 太阳全方位立体探测、行星际 L1/L5 监测系统, 磁场重联多尺度自适应探测星座、电离层和中高层大气微小卫星星座等空间物理探测计划正在开展研究. 基于子午工程的国际子午圈大科学计划正在推动之中.

中国月球和深空探测也为空间物理的发展带来新的契机. 火星探测计划 “天问一号” 的成功发射, 计划中的月球科研站、小行星探测、木星系探测, 以及太阳系边际探测涵括了重要的行星空间物理相关的探测和研究, 为空间物理的发展提供了新的增长点.

致谢　中国科学技术大学陆全明教授, 北京大学宗秋刚教授, 南昌大学周猛教授等空间物理学专业委员会委员对本文进行了修改并提出了建议.

参考文献

[1] WANG Shui. Review and prospect of space physics [J]. *Adv. Earth Sci.*, 2001, 16(5): 664-670 (王水. 空间物理学的回顾和展望 [J]. 地球科学进展, 2001, **16**(5): 664-670)

[2] WANG Chi, REN Liwen. A voyage of solar-terrestrial exploration [J]. *Space Int.*, 2015, **1**: 22-27 (王赤, 任丽文. 日地空间探索之旅 [J]. 国际太空, 2015, 1: 22-27)

[3] WEI Fengsi. Space weather science [J]. *Adv. Earth Sci.*, 1999, **14**(S1): 1-7 (魏奉思. 空间天气学 [J]. 地球物理学进展, 1999, **14**(S1): 1-7)

[4] NRC Solar and Space Physics Survey Committee. Solar and Space Physics: Science for a Technological Society [M]. Washington D C: Solar and Space Physics Survey Committee, National Research Council, 2013

[5] National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Discipline Development Strategy in the Next 10 Years: Space Science [M]. Beijing: Science Press, 2012 (国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 未来 10 年中国学科发展战略: 空间科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012)

[6] National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. Discipline Development Strategy in China: Space Science [M]. Beijing: Science Press, 2019 (国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略: 空间科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019)

[7] LIU Zhenxing. Review of the development of space physics in China [J]. *Rev. Special Issue 60th Anniv. Chin. Geophys. Soc.*, 2007: 286-293 (刘振兴. 中国空间物理发展的回顾 [J]. 回顾中国地球物理学会 60 周年专刊, 2007: 286-293)

[8] FU Suiyan, XU Jiyao, WEI Yong, *et al.* 70 years of space physics research in China [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2019, 10. DOI:10.1360/SSTe-2019-0131 (傅绥燕, 徐寄遥, 魏勇, 等. 探索中前行–中国空间物理研究 70 年 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 10. DOI:10.1360/SSTe-2019-0131)