

# 空间物理和空间天气探测与研究

王 赤

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

[摘要] 空间物理学是1957年人造卫星发射成功后迅速发展起来的一门交叉学科。近50年来,空间已成为人类生存的第四环境,其重要性日益突出。20世纪90年代初,空间物理学与空间应用的密切结合产生了专门研究和预报空间环境中灾害性过程及其变化规律,减轻或防止空间灾害并为人类活动服务的空间天气学。文章简要总结了国外及国内空间物理和空间天气探测的历程和发展趋势,并提出对我国未来空间物理和空间天气探测发展规划和探测路线图的几点建议。

[关键词] 空间物理;空间天气;空间物理探测;发展规划

[中图分类号] P172 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)06-0041-05

## 1 前言

1957年人造卫星上天,标志着人类进入了空间时代。其后短短50年,人类对自身的生存环境有了全新的认识,即地球处在从太阳发出的超声速等离子体流和磁场的包围之中。地球的空间系统由大气层、电离层和磁层构成,它和太阳大气、行星际介质一起构成相互耦合的系统——日地系统。来自太阳的能量、动量和质量输出的变化,制约着地球空间环境的形成、结构和变化。

空间物理学是伴随发射人造卫星进入空间而迅速发展起来的一门新兴及多学科交叉的基础学科。它把日地乃至整个太阳系作为一个系统,研究太阳、太阳风同行星、彗星的上层大气、电离层、磁层、高能粒子及其他星际物质间的相互作用。人类特别关注地球表层二三十千米至太阳大气这一广阔日地空间环境中的基本物理过程,这是当代自然科学最活跃的前沿学科之一。20世纪90年代末,空间物理走向“硬”科学时代的一个新发展阶段,强调科学与应用的密切结合,产生了专门研究和预报空间环境中灾害性过程的变化规律,减轻或防止空间灾害,为人类活动服务的空间环境、空间天气学科。

空间物理探测的主要任务,从本质是要了解太阳系范围的空间状态、基本过程和变化规律。由于日地空间是人类空间活动的主要区域,由太阳活动引起的空间天气现象对航天、通信、导航和国家安全等构成严重威胁,因此,日地空间中的物理现象与规律,空间天气及其对人类空间活动和生态环境的影响是空间物理探测和研究的中心任务。

## 2 国外空间物理现状和发展趋势简介

空间物理研究开始于地基监测,人类很早从极光、气辉、天电、潮汐等现象开始了地面的观测研究,随后利用气球、火箭进行了临近空间的探测。

1957年人类发射第一颗人造卫星开辟了空间科学发展的新纪元。空间物理学的发展随着航天技术和空间探测技术的发展而迅速发展起来了。自20世纪中期的半个世纪以来,人类发射了数百颗航天器用于空间物理探测,空间物理学天基探测的发展大致分为如下3个阶段。

1)20世纪60年代初到80年代末,发现和专门探测阶段。整个60年代充满了激动人心的空间新发现。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

[收稿日期] 2008-03-06

[作者简介] 王 赤(1967-),男,湖南邵阳市人,中国科学院空间科学与应用研究中心研究员,主要从事日球太阳风结构和行星际扰动(CME及激波)的传播和演变的数值模拟和数据分析等研究工作

流、Alfven 波和各种磁流体间断面的存在。通过 IMP 和 ISEE 系列科学卫星,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。在随后的二三十年间,针对日地系统不同的空间层次,人们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。既有监测和研究太阳活动的卫星,也有探测太阳风的卫星,还有研究地球空间的卫星。与此同时,人类也有计划地探测了太阳系中的其他行星。目前还有 70 年代末发射的飞船正在向宇宙深空急驶,旅行者 1 号(终极激波)于 2005 年底到达了太阳系的边缘。

2)20 世纪 90 年代,将日地系统作为一个整体来研究。由于人类社会发展的诸多领域如航天、通信、导航等高科技领域和国家安全的强烈需求,空间物理和空间天气正迅速发展成国际科技活动的热点之一。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。90 年代中期美国开始制定国家空间天气计划,准备在 10 年内完成空间天气监测体系,在物理和数值模拟方面建立从太阳到地面的空间天气预报模式,实现常规及可靠的空间天气预报,日本与欧洲也相继制定了各自的空间天气计划。与此同时国家空间机构协调组织(IACG)开始整合各国发射的空间探测卫星,形成新的 ISTP 全球联测,在此基础上美国宇航局(NASA)制定了日地联系计划,并将空间天气的连锁变化确定为 2000—2020 年空间物理的主攻方向。不久前 IACG 又在美国提出的与日共存(LWS)基础上,提出了国际与日共存计划(ILWS)。集中国际上各种空间探测卫星,重点监测日地联系,以确保航天环境安全。

3)21 世纪开始,将太阳—太阳系作为一个有机整体来研究,并强调空间物理探测和研究为空间探索保障服务。2004 年 1 月 14 日,美国总统布什正式宣布了“新空间探索计划”,提出了宇航员重返月球并以此为基地在 2030 年左右实施载人探险火星的新航天构想,为 NASA 确定了新的空间探索方向。这个新计划最终的目的是要通过不断探索新的空间领域来巩固和加强美国在科学技术、经济和军事上的全球霸主地位。美国宇航局 2004 年 2 月便发表了《空间探索的愿景》(vision for space exploration),为落实布什总统的空间探索新计划制定了实施策略和指导原则。2005 年 2 月,美国宇航局发布了《探

索新纪元:美国宇航局 2005 和未来的发展方向》(the new age of exploration: NASA's direction for 2005 and beyond),确定了 18 个新的美国宇航局的战略目标,其中第 15 个有关空间物理探测的战略目标是:“探索日地系统以了解太阳及其对地球、太阳系和载人探险之旅所必经的空间环境条件的影响,试验演示可以完善未来运行系统的技术。”2006 年 4 月,以美国 NASA 首发联系了世界上主要的 14 个航天机构,讨论“全球探索战略”。协商在月球、火星探测中的互相配合和合作。“全球探索战略”的讨论进一步表明美国 NASA 正实质性地推动实现“新空间探索计划”。为适应美国 NASA 整体空间探索战略目标的转移,其有关空间物理探测的“日地联系计划”(sun-earth connection, SEC)正式调整扩大为“太阳—太阳系联系计划”(sun-solar-system connection, SSSC),其目的就是要把太阳及月球、地球、火星和整个太阳系作为一个有机的、相互联系的系统进行探测研究,为实现美国的国家目标和 NASA 新的空间探索计划服务<sup>[1]</sup>。具体而言,它包括以下 3 个科学和探测目标。a. 开拓空间环境预报的前沿领域。主要是了解从太阳到地球,再到其他行星,直到星际介质的太阳系空间环境中的基本物理过程。b. 了解人类的太空家园的自然规律。主要是要了解人类社会及其技术系统,以及行星的居住环境受到来自太阳活动和行星磁场的影响。c. 保障探索之旅的安全。主要是发展能预报灾害性空间天气的能力,最大限度保证载人和航天器探索的安全和科学产出。

显而易见,美国已经踏上了探索月球、火星和更远深空的新征程。空间物理探测被赋予了新的历史使命。欧洲、日本等主要空间国家和地区也纷纷制定了未来空间物理和空间天气的探测发展规划。

总之,国际上空间物理探测和研究的发展趋势可归纳如下。

1)进一步开展日地系统整体联系过程的研究,并延拓为太阳—太阳系整体联系,天基与地基相结合的观测体系将日趋完善。

2)将地球空间环境和行星空间环境结合起来进行比较研究,了解地球空间环境的过去、现在和未来;重视空间环境对航天活动、人类生存环境、人类在太空可居住性的研究。

3)重视观测、理论和模型研究的紧密结合。

4)发展小卫星星座探测技术,观测小尺度三维

结构,区分时间-空间变化;建立大尺度的星座观测体系,实现立体和全局性的观测。

国际上在着力发展空间探测的同时,也十分注重地基观测。事实上,大型国际合作计划“国际与日同在计划”和“日地系统空间气候和天气计划”中,地基观测是非常重要的组成部分。正是由于具有“5C”(连续、方便、可控、可信和便宜)的优越性,地基观测是空间环境监测的基础,也是空间探测计划的重要补充。由于对空间环境进行全天时和整体性监测的需求,世界空间环境地面监测正沿着多台站、网络式综合监测的方向迅速发展。加拿大最近提出了地球空间监测计划(CGSM),包括了协调观测、数据同化和模式研究等各个方面。计划从2003年开始,在加拿大全国范围内建设无线电观测设备(8个先进数字电离层探测台、相对电离层吸收仪)、磁场观测设备(各种地磁仪48台)和光学观测设备(10台CCD全天成像仪、沿子午线布置多通道扫描光度计4台),并利用国际两极雷达探测网的3~4台高频电离层雷达设备等地基观测系统,对空间环境进行综合监测。作为世界最先进的空间环境监测国家,美国在众多的卫星探测计划之外,也提出了先进模块化的可移动雷达(AMISR)计划,通过2007—2012年和2013—2016年2个阶段的研制与发展,为研究迅速变化的高层大气以及观测空间天气事件提供强有力的地面空间环境监测手段。

### 3 我国空间物理的基础和现状简介

我国在20世纪60年代初期开始利用探空火箭、探空气球开展高层大气探测。1958年中国科学院赵九章教授向国务院建议发展我国的科学卫星,随后地球物理所分离出了应用地球物理所专门从事我国第一颗人造卫星的研究工作,并建立了中高层大气、电离层、磁层和行星物理等空间物理各个分支学科以及中国科学技术大学的地球空间科学系。在70年代初期开始利用“实践”系列科学探测与技术试验卫星(SJ-1 1971, SJ-2 1984, SJ-4 1994, SJ-5 1999)开展了一系列空间探测和研究,对近地空间环境中的带电粒子及其效应进行了较为详细的探测,获得了很多宝贵的环境探测资料,为我国的国民经济和空间物理、空间天气研究起到了积极的推动作用,但是我国在空间物理和空间天气的研究方面与世界先进水平有巨大的差距,长期存在着空间科学研究落后于航天技术发展的极为不平衡的局面,

直到2003—2004年才发射了真正意义上的空间物理探测卫星——“地球空间双星探测计划”的探测一号和二号,这是我国第一次以自己提出的探测计划开展的国际合作空间探测项目。中国双星计划与欧空局的Cluster(包括4颗卫星)相配合,第一次形成地球空间的“六点探测”。“十一五”期间“双星计划”的实施使我国在科学卫星研制,空间探测仪器,空间探测数据处理等方面都取得了极大的进步,为今后的发展打下了良好的基础,然而,迄今为止我国的太阳和行星际空间探测还是空白。继“双星”计划取得成功之后,一个全面探测太阳风暴和极光的“夸父”计划已经形成。“夸父”计划是由“L1+极轨”的3颗卫星组成的一个空间观测系统:位于地球与太阳连线引力平衡处第一拉格朗日点(即L1点)上的夸父A星和在地球极轨上共轨飞行的夸父B1、B2星。3颗卫星的联测将完成从太阳大气到近地空间完整的扰动因果链探测,包括:太阳耀斑、日冕物质抛射(CME)、行星际磁云、行星际激波以及它们的地球效应,比如磁层亚暴、磁暴以及极光活动。广泛的国际合作是空间物理和空间天气探测发展趋势之一,如美国组织的11项大型空间科学计划中(其中6项的总投资超过10亿美元),均包含相当程度的国际合作。作为航天大国,我国正在成为国际空间科学合作计划(包括国际与日共存计划、国际日球物理年等)的重要参与者,提高了中国在国际空间科学界的地位和影响。

我国一直十分重视日地空间环境的地基监测。从1957年参加国际地球物理年开始,我国逐步在东经120°子午线附近和北纬30°台链上建设监测台站,现已具备相当的监测基础、设备条件和人才队伍。地磁、中高层大气、电离层、磁层、行星际等领域已建空间环境监测台站达数十个,拥有MST雷达、电离层测高仪、数字化地磁仪、激光雷达和非相干散射雷达等多种先进设备,并已建立海南探空火箭发射基地、世界数据中心中国空间环境数据中心、中国地球物理数据中心等<sup>[2]</sup>。2008年1月“东半球空间环境地基综合监测子午链”(简称子午工程)作为国家重大科技基础设施项目开始建设。子午工程利用沿东半球120°E子午线附近和北纬30°N附近的15个综合性观测台站,运用无线电、地磁、光学和探空火箭等多种探测手段,连续监测地球表面20~30 km以上到几百千米的中高层大气、电离层和磁层,以及十几个地球半径以外的行星际的空间环境

参数。它将为我国各类用户提供完整、连续、可靠的多学科、多层次的空间环境地基综合监测数据。子午工程总投资 1.67 亿元,建设期 3 年,预期 2010 年建成,整体科学寿命预计超过 11 年。以子午工程为基础,中国科学家率先提出了“国际空间天气子午圈计划”,拟通过国际合作,将中国的子午链向北延伸到俄罗斯,向南经过澳大利亚,并和西半球 60°附近的子午链构成第一个环绕地球一周的空间环境地基监测子午圈。

自赵九章先生等老一辈科学家们倡导空间物理和实施国际地球物理年以来,已经历了近 50 年的发展,特别是通过“九五”、“十五”、国家基金委、“八六三”、载人航天、中国科学院和国家各类重大项目的开展,相关的空间物理和空间天气探测、研究和应用有了较好的积累,锻炼了队伍,培养了人才。我国空间物理研究人员在太阳磁活动、太阳活动的光谱诊断、太阳风起源、行星际扰动传播、磁暴、亚暴理论、环电流研究、电离层区域异常、重力波传播、大气光化、动力过程以及空间等离子体基本过程(如磁重联、等离子体波的激发、粒子加速等)等领域都产生了一批有国际重要影响的工作,连续获得国家自然科学二等奖等多项国家科技奖励。在 2008 年 1 月由汤姆森科技信息集团(总部设于美国,系全球科技信息服务企业领导者)发布的 22 个主要科研领

域全球上升最快的研究机构“新星”(rising stars)名录中,中国科学院在空间科学领域中被评为最新的全球科研机构“新星”。这从一个侧面也反映了我国空间物理研究领域的水平正在快速提升。我国已经建立了具有国际影响的空间天气学国家重点实验室,军民空间天气预报保障业务部门。越来越多的大学纷纷在该领域建立实验室或课题组。国内目前从事空间物理和空间天气监测、研究及应用的人数达千余人。随着国家经济实力的增强以及航天、通信、导航定位和国家安全对空间天气和空间环境的强烈需求,空间物理和空间天气的发展迎来了一个“黄金发展期”。

#### 4 我国空间物理探测和研究发展战略建议

日地空间是一个紧密联系的整体,各个相邻的层次之间存在着密切的耦合。空间灾害环境和天气的发生和发展,是太阳活动-行星际空间扰动-地球空间暴的连锁变化过程,它伴随着一系列人类尚未认识的基本物理过程。通过我国空间物理和空间天气领域专家学者的充分研究和讨论,建议将日地空间天气连锁变化过程的探测作为我国未来 10~20 年空间物理和空间天气探测的主攻方向<sup>[3]</sup>。

我国空间物理和空间天气探测发展的建议路线图见图 1。

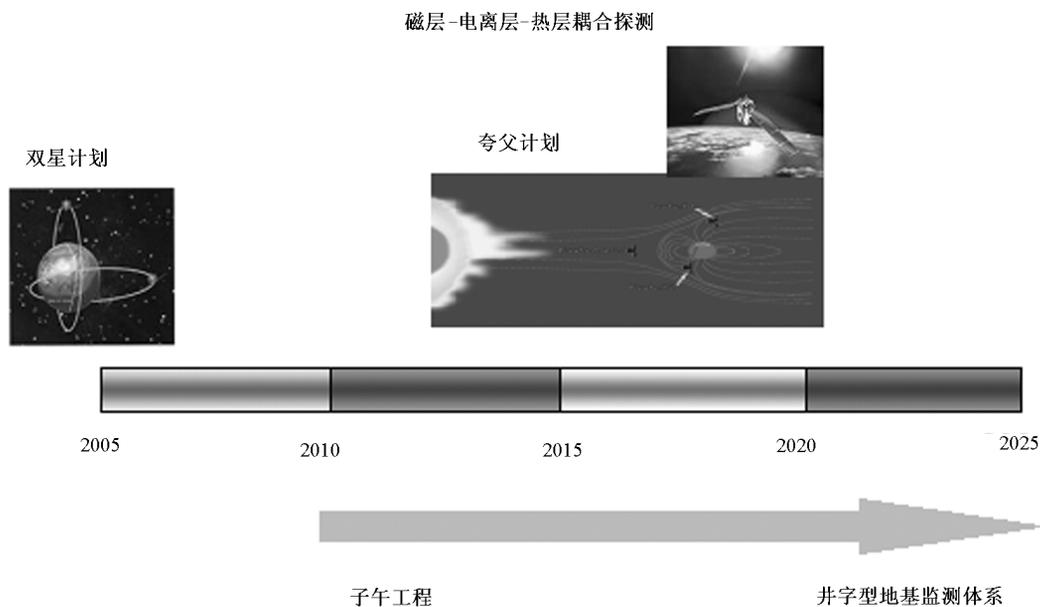


图 1 我国空间物理和空间天气探测发展建议的路线图

Fig. 1 Suggested roadmap for the space physics and space weather exploration in China

1)“十一五”期间(2006—2010年):在“双星”计划取得重要科学成果的基础上,围绕“夸父”项目概念(空间天气、空间风暴和极光探测计划)开展预先研究,探测空间局域扩展至离地球约  $150 \times 10^4$  km 的拉格朗日点(L1),进一步创新科学目标和关键探测技术,争取“十一五”后期立项实施。地基空间环境监测方面完成东半球空间环境地基监测子午链(子午工程)的建设。

2)“十二五”期间(2011—2015年):全面实施“夸父计划”,通过3颗卫星的联测完成从太阳大气的遥感探测到近地空间完整的扰动因果链探测,以研究日地系统能量输入和输出、日地爆发事件的形成和因果关系,以及空间天气连锁变化过程。由于“夸父计划”的L1点卫星的寿命相对较长(约10年),在“十二五”后期或“十三五”期间,发射磁层-电离层-热层耦合探测的卫星计划(MIT探测计划),充分发挥“夸父计划”A星的科学应用价值。

3)“十三五”至“十四五”期间(2016—2030年):空间物理和空间天气探测进入行星际空间领域,包括从太阳极轨就地或遥感探测日地空间太阳风和行星际日冕物质抛射事件的传播、演化和太阳日冕和行星际耦合关系的探测。“十四五”后期或“十五五”期间发射太阳极轨行星际日冕物质抛射事件射电成像探测计划(SPORT)。在子午工程的基础上,发展“井”字型空间环境地基监测系统。

#### 参考文献

- [1] 2005 Sun - Solar System Connection Roadmap Team. Sun - Solar System Connection: Science and Technology Roadmap 2005 - 2035. NASA, 2005
- [2] 国家自然科学基金委员会. 中国空间天气战略计划建议[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2004
- [3] 空间物理中长期发展规划编写组. 空间物理中长期发展规划研究报告[R]. 北京:国防科工委, 2007

## Exploration and research of space physics and space weather

Wang Chi

(Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100190, China)

[Abstract] Space physics is a fast - growing cross - discipline science with the advance of satellite technology since 1957. Space environment is becoming more and more important as the fourth living environment for human being. Starting from the early 1990s, space weather is born by applying the fundamentals of space physics to applications. The space weather study is aimed to investigate and alleviate the disaster effects of solar activity on our high - tech systems on the earth and in space. This report gives a brief summary of the history, current status and future direction of the international space physics and space weather exploration and study, and introduces the suggested space physics and space weather mid - long term development strategic plan and exploration roadmap.

[Key words] space physics; space weather; space physics exploration; strategic plan