

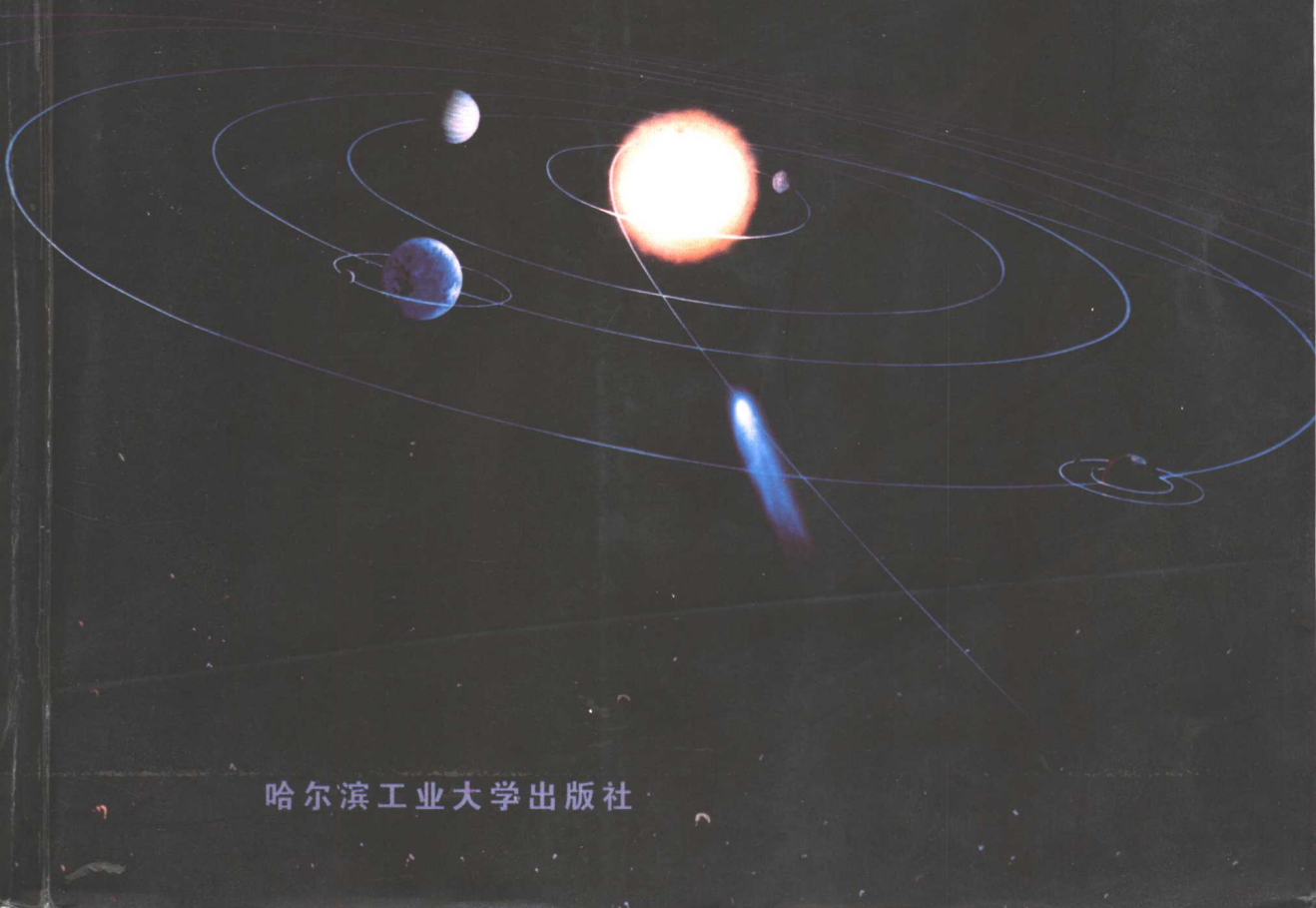
中国现代科学全书·空间科学卷

主编 王大珩 张厚英

太空物理学

Space Physics

刘振兴 等著



哈尔滨工业大学出版社

中国现代科学全书·空间科学卷

主编 王大珩 张厚英

太空物理学

刘振兴 等著

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

本书系统地介绍了太空物理学的研究对象、研究方法、发展历史和 21 世纪的瞻望。具体内容包括:太阳上层大气和行星际物理、磁层物理、中高层大气物理、太空环境对飞行器的影响和预报方法以及太空物理观测等。本书可作为从事太空研究方面的业务人员、科研、教学人员、大学生和研究生以及对太空物理感兴趣的广大非专业人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

太空物理学/刘振兴等著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005. 3

(中国现代科学全书·空间科学卷)

ISBN 7-5603-1864-9

I. 太… II. 刘… III. 太空物理学 IV. P35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 013997 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 27.5 字数 510 千字

版 次 2005 年月 3 第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1864-9/V·11

印 数 1~3 000

定 价 36.00 元

《中国现代科学全书》总编辑委员会

名誉主编	胡 绳	钱伟长	吴阶平	周光召
	许嘉璐	罗豪才	季羨林	王大珩
	郑必坚			
主 编	姜士林	郭德宏	刘 政	程湘清
	卞晋平	王洛林	许智宏	白春礼
	卢良恕	徐 诚	王洪峻	明立志

《中国现代科学全书·空间科学卷》编辑委员会

主 编	王大珩	张厚英
编辑委员	(以姓氏笔画为序)	
	刘振兴	江丕栋 欧阳自远
	黄惠康	潘厚任

总 序 言

王 琳 张 宇 英

外层空间浩瀚无垠,是人类借助于空间科学技术扩大其活动范围的最新领域。1957年人造卫星上天,标志着人类进入了空间时代。空间的探测为人类认识自然界增添了新的知识,为了解地外空间环境,为研究宇宙的起源和演化、太阳系的起源和演化以及生命的起源和演化,积累了丰富的、极有价值的科学资料。空间科学技术是一个新兴的领域,也是当代高科技发展的前沿领域之一,发展神速,涉及的内容和范围十分广泛,并已从试验阶段发展到应用阶段,从单纯的政治、军事目的逐渐走向空间资源的开发和利用。

《中国现代科学全书》是由全国人大常委会办公厅研究室、中国人民政治协商会议全国委员会研究室、中共中央党校中共党史教研室共同发起、组织编写的一套规模宏大的学术专著丛书,系统全面地概述现代自然科学和社会科学各学科的建设、发展及其学术研究成果,是21世纪中国科学文化建设的重大工程。《中国现代科学全书·空间科学卷》是其中的一卷,包括五个分册:《太空学概论》、《太空物理学》、《空间化学》、《空间生物学》和《外层空间法》,这是中国科学院数十位工作在空间科学研究第一线的科研工作者历时两年的呕心沥血的结晶,它系统全面地概括了国内外空间科学几个分支学科的基本理论及其发展趋势,展示了最新的研究成果以及当前的发展态势。

《太空学概论》由潘厚任、王景涛教授撰写。该书从太空研究、太空科学探测和实验的角度,以有效载荷为主线,对人类在太空的活动进行了较全面的概括性的介绍和评述。

太空物理学是一门应用性很强的基础学科,与地球物理学、大气物理学和太阳物理学紧密交叉,构成了人类认识自身生存环境的重要前沿学科之一。《太空物理学》一书由刘振兴院士撰写。该书论述的分支学科包括太阳大气物理、日球层物理、磁层物理、电离层物理、高中层大气物理、太空环境和太空探测等。

空间化学与地质学研究已经步入成熟阶段,在地外物质与太阳系早期演化的研究中,我国学者开拓了一系列新领域的研究。《空间化学》是一部论述国内外最新研究进展的学术专著,由李春来教授和欧阳自远院士撰写。该书比较全面地论述了当代空间化学和行星地质学的基本概念、理论和研究进展,并且从空间化学和行星地质的角度,系统地论述和总结了当今行星探测取得的重大进展和丰硕成果。

空间生命科学是伴随空间微重力的环境和载人航天活动而产生和发展起来的。《空间生物学》由江丕栋教授撰写。它是我国第一部系统地、全面地介绍空间生物学的书籍。该书介绍了空间生物学和空间生物技术领域的国内外发展状况,以及近年来利用分子生物学、细胞生物学和分子遗传学等新进展所取得的成果。

《外层空间法》由贺其治和黄惠康教授撰写。空间法是现代国际法发展中的一个新分支,但目前我国在外层空间法的普及和研究方面,同我国所处航天大国的地位极不相称。该书是我国空间法学界研究空间法的一项最新成果,对促进我们开展这方面研究,继而同国际接轨是十分重要的。

在《中国现代科学全书·空间科学卷》的编写中得到了中国科学院空间科学与应用研究中心、中国空间科学学会、中国空间法学会以及中国科学院相关研究所的大力支持,在此表示衷心的感谢。

2003年6月
于北京

前 言

太空物理学是 1957 年人造卫星发射成功后迅速发展起来的一门新兴边缘学科,其主要分支学科包括太阳大气物理、日球层物理、磁层物理、电离层物理、高中层大气物理、太空环境和太空探测等。太空物理学与固体地球物理学、大气物理学、太阳物理学和天体物理学密切交叉,形成人类认识自然、开发和利用自然及维护自身生存环境的前沿科学。

太空物理学是一门应用性很强的基础学科。从它的基础性来说,太空物理学在太空科学中占有十分重要的地位,可以说是太空科学发展的先驱。日地空间包括太阳大气、行星际空间、地球磁层、电离层和高中层大气,其中地球磁层、电离层和高中层大气被称为地球空间(Geospace)。日地空间是一个理想的天然实验室,是浩瀚宇宙的一个缩影。在日地空间中发生的一些重要物理过程,在宇宙的其他天体空间也会存在。利用卫星和飞船进行太空物理探测,从地面实验室拓展到太空天然实验室,极大地开阔了人类认识宇宙视野,对了解宇宙、地球空间环境和行星空间环境的起源和演化过程有重大的科学意义。从其应用来说,人类已进入太空时代,地球空间已成为人类向自然索取、开发和利用资源的重要场所。日地空间环境的剧烈变化,对航天活动和地面技术系统有严重的危害,如导致航天器损伤和失常、卫星和地面通信中断、导航和定位失准,以及高压输电网、长距离输油和输气管道损害等。另外,日地空间环境中的爆发性事件,对人类的生存环境也有影响。太空物理的探测和研究可为保障航天活动的安全、开发利用空间及维护人类的生存环境提供科学依据。

40 多年来,太空物理的探测和研究有了很大的进展。特别是 20 世纪 90 年代国际上实施“国际日地物理计划”以来,对日地空间各层次进

行了多卫星协同观测,使日地空间物理的探测和研究登上了一个新的台阶,瞻望 21 世纪,国际上的空间物理探测将会有新的创举。当前世界上各有关国家都制订出了 2020 年以前太空物理研究的战略计划。太空物理的发展趋势可归结为以下几点:进一步加强日地系统整体联系过程的研究;将地球空间环境和行星空间环境结合起来进行比较研究,了解地球空间未来的演化过程;重视太阳活动对地球大气变化和人类生存环境的影响;开展人类在空间可居住性的研究;太空探测计划与有关的科学课题更密切地配合起来。在太空探测方面的发展趋势是:发展近太阳区的探测;在地球空间发展小卫星星座探测技术;发展轻小型、高精度的场和粒子探测仪器;发展集成的紫外、X 射线和中性原子的成像仪器;发展抗辐射加固包。

我国的太空物理,主要是从 1957 年(国际太空物理年)开始,在我国著名科学家赵九章先生组织和领导下发展起来的。40 多年来,我国的日地空间物理在观测、理论和应用研究方面有很大的进展,在推动学科发展、航天活动、国防建设等方面做出了重要贡献。进入 21 世纪,我国的空间物理探测有了新的进展。2001 年 2 月正式启动了中国地球空间双星探测计划(简称双星计划)。中国双星与欧空局的 Cluster(包括 4 颗卫星)相配合,将第一次形成地球空间的“六点探测”。这对我国太空物理研究的发展将起重要的推动作用。

本书是由我国空间物理界有关专家、学者联合撰写的,参加撰写的有:刘振兴(第一章、第二章、第十三章),王水、宋礼庭(第三章),黄永年(第四章),濮祖荫(第五章),庄洪春(第六章),史建魁(第七章),肖佐(第八章),王英鉴(第九章),古士芬、吴中华、田葆宁、龚建村、刘静(第十章),薛丙森、田剑华(第十一章),都亨(第十二章)。刘振兴负责全书的编排和审定。

刘振兴

2004 年 8 月 于北京

目 录

第一章 太空物理学概论

第一节 太空物理学的研究对象	1
第二节 太空物理学的特点和研究方法	4
第三节 太空物理学的地位和作用	5

第二章 太空物理学的发展史

第一节 20 世纪 50 年代以前的研究状况	8
第二节 人造卫星发射后日地空间物理的探测和研究	9
第三节 太阳 - 行星空间探测	18
第四节 我国太空物理观测和研究的发展	21

第三章 太阳上层大气和行星际物理学

第一节 太阳大气结构和动力学	25
第二节 太阳风和行星际磁场	33
第三节 Alfvén 湍流与高速太阳风	50
第四节 行星际激波	59

第四章 宇宙线空间物理学

第一节 概述	71
第二节 太阳宇宙线的起源	72
第三节 太阳耀斑粒子的日冕传输	76
第四节 太阳宇宙线的行星际传播	85
第五节 宇宙线的地球物理效应	90

第五章 磁层物理学

第一节 磁层和磁层结构	95
第二节 磁层顶边界区的结构和动力学	98
第三节 磁层亚暴模型和全球过程	146
第四节 磁暴和磁暴理论	163
第五节 磁层粒子暴	173

第六章 磁层的电场和电流系统

第一节 平均电场	182
第二节 磁层电场随时间的变化	188
第三节 磁暴电场	191
第四节 太阳对磁层电场的影响	192
第五节 地球的影响	194
第六节 磁层电流系统	195
第七节 磁暴电流	207
第八节 太阳风的影响	208

第七章 行星的磁层研究

第一节 外行星的磁层	209
第二节 水星磁层	216
第三节 金星磁层	220
第四节 火星磁层	223

第八章 电离层物理学

第一节 概述	227
第二节 电离层中的主要物理过程	229

第九章 中高层大气物理学

第一节 概述	240
第二节 中高层大气观测和反演方法	242
第三节 中高层大气结构和动力学	246
第四节 中高层大气光化学和辐射过程	249
第五节 中高层大气模式	252

第六节	中高层大气与上下层的耦合	254
第七节	太阳活动对中高层大气的影响	257
第八节	人为活动对中高大气的影响	261
第九节	行星大气	264
第十章 空间环境对飞行器的影响		
第一节	概述	267
第二节	空间高能带电粒子对飞行器的影响	270
第三节	空间等离子体对飞行器的影响(Ⅰ)——飞行器充电效应	281
第四节	空间等离子体对飞行器的影响(Ⅱ)——电离层等离子体 对飞行器的影响	290
第五节	空间磁场对飞行器的影响	295
第六节	高层大气对飞行器的影响	302
第七节	空间碎片和流星体对航天器的影响	310
第十一章 太空环境预报方法		
第一节	概述	319
第二节	地磁预报	321
第三节	电离层预报	333
第四节	质子事件预报	342
第五节	高层大气变化预报	352
第十二章 太空探测		
第一节	概述	363
第二节	主要探测项目和仪器	366
第三节	近地太空探测	369
第四节	行星际太空探测	371
第五节	月球探测	373
第六节	行星、彗星、小行星的探测	376
第七节	空间环境监测	380
第八节	典型的太空物理探测计划	381
第九节	太空探测的可视化技术	385
附表 1	“探险者”卫星系列	389
附表 2	无人月球探测器	392

附表 3 行星和行星际探测器	398
附表 4 已经进行的和计划中的探测彗星的航天器	404
第十三章 21 世纪太空物理学发展瞻望	
第一节 21 世纪日地空间物理学的发展趋势	405
第二节 卫星、行星和恒星际探测的新创举	407
第三节 开展行星空间环境比较研究	409
第四节 2002 ~ 2020 年我国太空物理学发展规划设想	410
参考文献	412

第一章

太空物理学概论

第一节 太空物理学的研究对象

太空物理(Space Physics)也可译为空间物理。在我国大陆习惯用空间物理这个名词,而在台湾和香港用的是太空物理。按词意来说,太空物理比空间物理更确切一些,因而本书采用太空物理。应说明一点,这里所说的太空,是指外层空间的统称,对于特定的空间区域,例如太阳和地球之间的区域,应称为日地空间,而不能称为“日地太空”。

太空物理学是 1957 年人造卫星上天以来迅速发展起来的一门新兴学科,是太空科学中最早发展起来的一个分支。概括来说,太空物理学主要是利用太空飞行器探测和研究太空中的现象、物理过程及其对人类活动影响的学科。太空物理的研究对象可分为两大部分:一是日地空间物理;一是太阳-行星空间物理。

一、日地空间物理

在国际上一般称为日地物理(Solar - Terrestrial Physics)。由于人类居住在地球,地球可说是一个“特殊的行星”,因而对日地空间物理格外重视。

1. 日地空间的范围

日地空间包括太阳上层大气,日地行星际空间,地球磁层,地球电离层和地球中高层大气,其中地球磁层、电离层和中高层大气称为地球空间(Geospace)。日地空间的各个层次不是孤立的,而是紧密联系着的整体系统,因而也称为日地系统,如图 1-1 所示。

2. 日地空间物理的分支学科

日地空间物理的分支学科包括太阳上层大气物理,日地行星际物理,地球磁层物理,地球电离层物理和地球中高层大气物理。在日地空间物理的书刊中,通常是将“地球”两字省略,只称磁层物理、电离层物理和中高层大气物理。

由于日地空间是相互联系的整体系统,因而日地空间物理各个分支学科的交叉性很强,必须进行交叉研究。

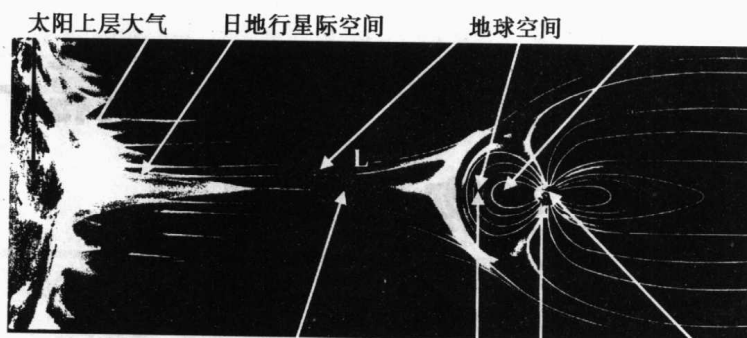


图 1-1 日地系统结构图

3. 日地空间物理的主要研究内容

概括来说,日地空间物理的主要研究内容是:太阳输出的各种形式的能量(包括电磁辐射、粒子辐射和电磁场等),特别是易变化的能量对地球空间环境影响的物理、化学过程及其对人类活动和生存环境的影响。日地空间物理的研究内容,是随着太空探测的发展而不断扩展的,主要内容如下。

(1)研究太阳内部的结构和动力学及其对驱动太阳活动的作用。

重点研究:日冕的加热,太阳风的加速,日冕物质抛射(CME)和太阳耀斑的产生机制,以及太阳高能粒子和电磁辐射的产生机制等。

(2)研究太阳事件在行星际空间的表现和演化过程。

重点研究:日冕物质抛射事件通过日冕向行星际空间的传播和演化过程,太阳风和行星际磁场在行星际空间的不同尺度的结构及太阳风高速流与背景太阳风的相互作用,行星际激波的传播和演化过程,太阳高能粒子(太阳宇宙线)在行星际空间的传播过程等。

(3)研究地球空间环境对太阳事件和行星际扰动的响应过程。

重点研究:不同行星际条件下磁层顶边界层结构和动力学,磁层亚暴和磁暴的触发机制及其对太阳活动和行星际扰动的全球响应过程,磁层粒子暴的触发机制及其与磁层亚暴和磁暴的关系。

(4)电离层和中高层大气对太阳活动、磁层扰动和低层大气活动的响应过程。

重点研究:电离层和热层系统对太阳活动、磁层扰动及低层大气波动响应的动力学、光化学和电动力学过程,中层大气的光化学、辐射和动力学过程,电离层-热层-中层耦合的动力学、光化学和电动力学过程等。

(5)整体的日地空间环境模型和预报方法研究,在各层次模型研究的基础上,建立整体的日地空间模型;在太阳、磁层亚暴、磁暴、磁层粒子暴、热层暴及电离层扰动预报研究的基础上,建立整体的日地空间环境(太空天气)的预报方法。

(6)研究日地空间环境变化和人为活动对天基、地基技术系统和人类生存环境的影响。

重点研究:灾害性太空环境对航天器系统、宇航员安全的影响,对通信、导航和定位系统的影响,天然和人为活动对人类生存环境的影响。

二、太阳-行星空间物理的研究内容

(1)研究行星及其卫星磁场的起源、演化及其对行星环境的影响。

(2)研究太阳风与行星磁层和电离层的相互作用过程。

(3)研究行星磁层、电离层和大气系统的结构和变化特性。

(4)研究行星磁层和大气的演化过程。

(5)地球空间环境与行星空间环境的比较研究。

三、恒星际空间物理

随着太空探测技术的不断发展,太空探测器将飞出太阳系对恒星际空间进行探测,预期太空物理学将会形成一个新的分支学科,称为恒星际空间物理,其主要研究内容是:探测和研究恒星际等离子体的物理特性,恒星际等离子体与日球的相互作用及其对日球层结构和动力学过程的影响。

四、太空物理、太空环境和太空天气的涵义和关系

1. 太空环境

太空环境(Space Environment)也可译为空间环境,这里所说的环境是指星体本身及其周围的物质状态,而这些物质状态对人类活动和生存有重要的影响。人类是生活在地球表面,地球表面的一些物质状态对人类活动和生存影响最大,因而先后提出了陆地环境、海洋环境和大气环境。自人造卫星上天以来,人类活动的空间范围越来越广,逐渐向太空扩展,因而又提出了太空环境。1981年在罗马召开的国际宇航联合会第32届年会上,将陆地、海洋和大气分别称为第一、第二和第三环境,将外层空间环境(太空环境)称为第四环境。

随着人类航天活动的空间范围不断地扩展,太空环境又分为一些不同的层次,包括地球空间环境(Geospace Environment),日地空间环境(Solar-Terrestrial Environment)和行星空间环境(Planetary space Environment)等。

在太空物理中,经常用到太空环境这个名词,人们自然会提出,太空环境和太空物理的关系问题。从广义上来说,太空环境研究包括太空环境的探测、理论研究,预报研究和应用研究。因此,从广义角度来说,太空环境和太空物理的研究内容是一致的,因为太空物理研究的对象就是太空环境。狭义地理解,认为太空环境研究的内容主要是指太空环境对太空活动的影响和预报,这是属于太空物理应用的范畴。使用太空环境一词的目的,是便于使政府部门和人民群众对太空物理

的理解,便于说明太空物理研究对人类活动和生存影响的重要性。

这里必须说明的是,不能将太空环境和太空物理分割开,因太空环境对太空活动的影响和预报,是属于太空物理学中的应用研究部分,离开太空物理的理论研究,太空环境的应用和预报是不能发展的。

2. “太空天气”(Space Weather)

“太空天气”一词是随着太空环境预报的需求而逐步提出来的。早在 20 世纪 60 年代初,我国著名科学家钱学森曾提出“天象”一词。这里所提的“天”是指太空。“天象”是与通常所说的气象相类比而提出来的,确切地说,即是“太空气象”。20 世纪 80 年代初,国际上曾提出“太空天气”和“太空气候”的名词。这里“太空天气”是指太空环境的确定性变化和短期变化;“太空气候”是指太空环境的统计性变化和长期变化。这些说法也是与通常的天气和气候相类比而提出来的。

1994 年美国正式提出国家“空间天气”计划。“空间天气”与人们熟知的天气相类比,需求目标明确,有利于人民群众和政府部门的理解和支持。

在美国的太空天气计划中,对太空天气是这样定义的:“太空天气指的是太阳、太阳风、磁层、电离层和热层的状况。它可影响天基和地基的技术系统的运行和可靠性,危及人类的健康和生命。恶劣的太空环境会引起卫星运行、通信、导航和输电网的事故,造成经济损失。”

从上述的定义来看,太空天气和通常所说的日地空间物理的研究范围是一致的,只是太空天气更侧重于对天基和地基的技术系统和人类健康有影响的灾害性太空环境的研究和预报。太空天气预报是一种国家行为,正像一般的天气预报一样,需要建立天基和地基的监测和预报系统,并与广大用户保持密切联系,最后建立起国家的太空天气预报业务部门。总的来说,太空天气是日地空间物理学中与应用密切结合的研究内容。

第二节 太空物理学的特点和研究方法

一、太空物理学的特点

1. 新兴和前沿

太空物理学是自 1957 年人造卫星发射以来迅速发展起来的一门新兴学科。随着太空探测技术的发展,太空物理学的研究领域也在不断发展。由于它是一门年轻的学科,因而对太空中的许多物理现象和物理过程还不了解,目前太空物理中的一些理论还不成熟,需要进一步开展太空探测,用新的探测事实对现有的理论进行验证和完善。太空物理学研究的问题,绝大部分是处于科学前沿的。

2. 对观测的强依赖性

太空物理学是在太空探测的基础上发展起来的,40多年来的事实表明,太空物理学的每次突破性进展,都是由于先进的太空探测计划推动的。太空物理学的发展,必须不断地发展太空探测和地面观测。

3. 基础性和应用性

太空物理学是一门基础研究和实际应用紧密结合的学科。从其基础性来说,太空物理学是认识太空中场和粒子相互作用、时空变化规律及其起源和演化过程,研究内容包括一些重要的基本物理问题,因而太空物理学是一门基础性很强的学科。从其应用性来说,太空物理学研究对太空飞行器和宇航员的安全、太空开发和利用、通信、导航和定位、地基技术系统以及人类生存环境的维护等有重要的应用价值。

4. 全球性

从太空物理研究的对象来说,太空中的各种现象和物理过程是全球性的。就日地系统来看,日地空间的各个层次是紧密联系着的,不同纬度和经度上的现象也是相互联系着的,必须进行全球性的研究,才能了解日地系统的整体过程。从太空探测的角度来说,要了解太空现象和物理过程的整体,必须在太空中和地面上的不同区域进行观测,构成全球的立体的观测系统,这就需要开展广泛的国际合作。

5. 交叉性

太空物理研究的空间领域很广,上到宇宙空间,下到天体的内核,因而太空物理学与多门学科交叉,诸如天文学、太阳物理学、大气科学、地球物理学等。由于太空中的物质主要是等离子体,因而太空物理学又与等离子体物理学、磁流体力学密切交叉。另外,由于太空物理研究依赖于太空探测,因而它又与太空飞行器、运载系统和探测仪器密切联系。

二、太空物理学研究方法

太空物理学研究方法,是根据其特性提出来的,需要采用综合的研究方法,包括太空探测,地面观测,数据分析,理论研究和数值模拟试验研究。

第三节 太空物理学的地位和作用

一、在知识和技术创新中的地位和作用

1957年人造卫星的首次发射成功,开始了人类探测和认识宇宙的新纪元。利用卫星和飞船对太空进行探测,从地面人工实验室的试验发展到太空天然实验室