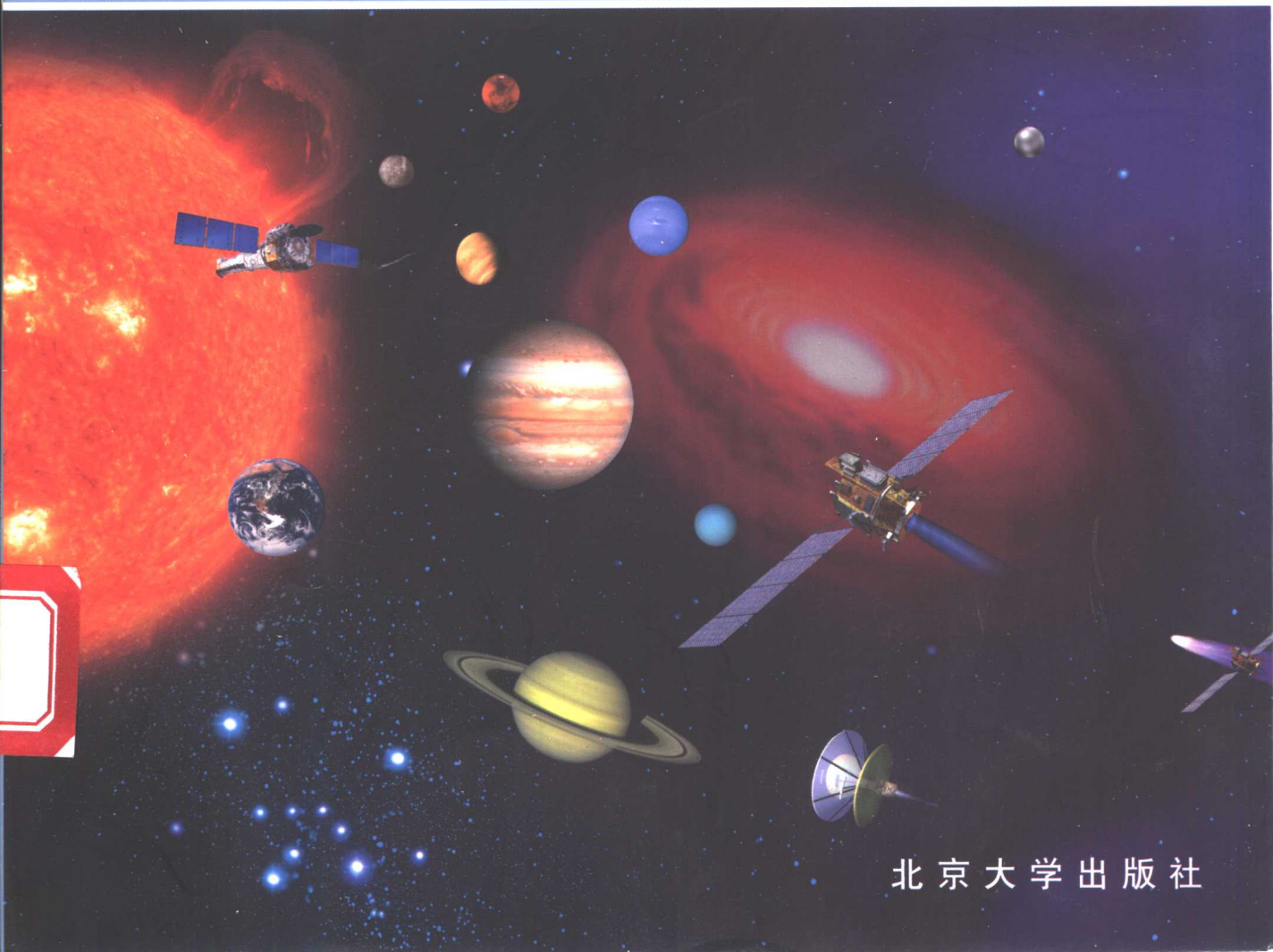




北京市高等教育精品教材立项项目

# 太空探索

焦维新 傅绥燕 编著 *EXPLORING SPACE*



北京大学出版社

北京市高等教育精品教材立项项目

# 太空探索

焦维新 傅绥燕 编著

## 图书在版编目(CIP)数据

太空探索/焦维新等编著. —北京:北京大学出版社, 2003. 9  
(北京市高等教育精品教材立项项目)

ISBN 7-301-06341-5

I. 太… II. 焦… III. 空间探索-高等学校-教材 IV. V11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 036130 号

书 名: 太空探索

著作责任者: 焦维新 傅绥燕 编著

责任编辑: 王 艳

标准书号: ISBN 7-301-06341-5/P·0060

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: [zpup@pup.pku.edu.cn](mailto:zpup@pup.pku.edu.cn)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787mm×960mm 16 开本 15.25 印张 324 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 24.00 元

---

本书如有质量问题,请与教材供应部门联系。

版权所有 侵权必究

## 内 容 简 介

《太空探索》是北京市高等教育精品教材立项项目。全书分四篇共十二章。第一篇为太空概览,按照太空的四个层次,阐述了地球空间、日地空间、日球空间和宇宙的构成和基本特征。第二篇为探索太空,描述了探测地球空间、探索太阳系和寻找地外文明的方式、方法和技术。第三篇为太空资源的开发与利用,介绍了太空环境的特殊资源、太阳系一些行星及其卫星以及小行星上的宝贵矿物资源,以及这些资源的开发与利用情况和远景。第四篇为太空灾害与预防,介绍了灾害性空间天气和流星体对人类社会生活和技术系统可能造成的危害,系统地分析了近地小天体撞击地球的可能性。书中每篇后都附有参考文献和思考题。

该书集中了空间科学与技术、天体物理学、行星科学、宇航学等多学科的精华,并以新的视点将人类目前关注的问题纳入一个系统中。该书对太空的论述深入浅出,不仅可以作为通选课的教材,对广大科技人员、科普爱好者和青少年也是一本很好的参考读物。

## 前 言

《太空探索》是北京市高等教育精品教材立项项目,亦是北京大学素质教育通选课教材。我们认为,素质教育通选课的目的应是引导学生广泛涉猎不同学科领域,拓宽知识面,学习不同学科的思想和方法,为适应 21 世纪对高素质人才的需要打下基础。为了达到这个目的,我们在选择内容、确定体系和掌握难易等方面,做了一些有益的探索。

在选择内容和确定体系时,我们不是以现有的空间物理学某一课程为基础,而是以太空概览、探索太空、太空资源和太空灾害为主线,以新的视点,将空间物理学、空间天文学、行星科学、宇航学与航天技术等多学科精华融为一体,使本课内容广而不杂,多而不乱,体系清晰。

如何适当地掌握难易,是我们编写教材时遇到的另一个重要问题。本课的性质和内容决定了该教材不能太专,但又区别于一般意义上的科普书。我们主要在内容的阐述和内容的衔接上下功夫。至关重要的内容一定要讲,选定的内容一定要讲清楚。各篇的内容前后呼应,全书的内容自成体系。通过本课的学习,能使学生了解太空领域的基本知识,了解思想与方法、学科前沿和新成果,并从中体会不同学科的交叉渗透对促进自然科学研究的意义。

基于以上考虑,我们将《太空探索》分四篇共十二章。第一篇为太空概览,分 5 章,分别介绍了绚丽多彩的太空、地球空间、日地空间、日球空间和宇宙。正确地了解和认识太空,对于树立正确的宇宙观是很重要的,同时也为后三篇的教学打下基础。第二篇为探索太空,分 3 章,介绍了太空飞行基础、探索太空的航天器和仪器以及探索太空的奥秘。该篇的重点是第八章探索太空的奥秘,包括如何探测地球空间,行星探测的方式和典型飞船,揭示宇宙奥秘的“四大天王”,寻找地外文明的方法和技术。第三篇为太空资源的开发与利用,分 2 章,介绍了太空环境的特殊资源,太阳系一些行星及其卫星以及小行星上的宝贵矿物资源,这些资源的开发与利用情况和远景,涉及太空资源的科学和商业应用,太空的军事应用。第四篇为太空灾害与预防,分 2 章,介绍了灾害性空间天气对人类社会生活和技术系统可能造成的危害,减轻和预防灾害性空间天气的措施,系统地分析了近地小天体撞击地球的可能性。每篇后都附有参考文献和思考题。

阅读本书不要求具有高等数学和普通物理学的知识,但部分内容对文科生来说有一定的难度,如第六章中关于航天器轨道的理论。但这类内容只要求定性了解,不要求定量计算。感兴趣并具有一定数理基础的同学,可深入钻研这些章节。另外,为了扩大知识面,每一篇内容都尽量自成体系,因此总的教学内容超过了每周 2 学时的限制,但讲授时

可有详有略,有些内容也可以不讲,只作为参考。

对于编写素质教育通选课的教材,我们也只是做了初步的尝试,还需要在今后的教学实践中进一步探索。总的来看,该书的内容是丰富的,论述上也尽量做到深入浅出。因此不仅可作为通选课的教材,对有关科技人员、科普爱好者和广大青少年也是一本很好的参考读物。

焦维新 傅绥燕

2003年7月于北京大学

# 目 录

## 第一篇 太空概览

<b>第一章 绚丽多彩的太空</b> .....	( 1 )
1.1 什么是太空 .....	( 1 )
1.2 太空中的奇妙景象 .....	( 2 )
1.3 为什么要探索太空 .....	( 3 )
<b>第二章 地球空间</b> .....	( 6 )
2.1 什么是地球空间 .....	( 6 )
2.2 高层中性大气 .....	( 9 )
2.3 电离层 .....	( 11 )
2.4 磁层与辐射带 .....	( 17 )
<b>第三章 日地空间</b> .....	( 23 )
3.1 太阳 .....	( 23 )
3.2 日地行星际空间 .....	( 30 )
<b>第四章 日球空间</b> .....	( 34 )
4.1 日球空间概况 .....	( 34 )
4.2 类地行星与月球 .....	( 35 )
4.3 类木行星与冥王星 .....	( 48 )
4.4 小行星与彗星 .....	( 58 )
<b>第五章 宇宙</b> .....	( 62 )
5.1 恒星及其演化 .....	( 62 )
5.2 宇宙的层次 .....	( 67 )
思考题 .....	( 69 )
参考文献 .....	( 70 )

## 第二篇 探索太空

<b>第六章 太空飞行基础</b> .....	( 71 )
6.1 运载火箭 .....	( 71 )
6.2 新型推进器 .....	( 74 )
6.3 航天器的运行轨道 .....	( 82 )
6.4 霍曼轨道与空间交会轨道 .....	( 92 )
6.5 引力助推 .....	( 94 )

6.6	拉格朗日点与晕轨道 .....	(97)
<b>第七章</b>	<b>探索太空的航天器与仪器 .....</b>	<b>(99)</b>
7.1	探索太空的航天器 .....	(99)
7.2	探索太空的仪器 .....	(104)
<b>第八章</b>	<b>探索太空的奥秘 .....</b>	<b>(111)</b>
8.1	探索地球空间 .....	(111)
8.2	从太空观测太阳 .....	(119)
8.3	探索太阳系 .....	(124)
8.4	探索宇宙的奥秘 .....	(138)
	思考题 .....	(153)
	参考文献 .....	(153)

### 第三篇 太空资源的开发与利用

<b>第九章</b>	<b>太空资源的科学和商业利用 .....</b>	<b>(155)</b>
9.1	概述 .....	(155)
9.2	卫星通信与卫星导航 .....	(159)
9.3	空间对地观测 .....	(166)
9.4	航天器的微重力环境资源 .....	(175)
9.5	地球外资源及其开发利用 .....	(179)
<b>第十章</b>	<b>太空的军事应用 .....</b>	<b>(182)</b>
10.1	概述 .....	(182)
10.2	侦察卫星 .....	(184)
10.3	军事通信卫星 .....	(193)
10.4	太空武器 .....	(196)
	思考题 .....	(200)
	参考文献 .....	(200)

### 第四篇 太空灾害与预防

<b>第十一章</b>	<b>灾害性空间天气 .....</b>	<b>(201)</b>
11.1	空间天气与空间天气学 .....	(201)
11.2	灾害性空间天气的效应 .....	(206)
11.3	避免和减轻空间天气灾害的措施 .....	(212)
<b>第十二章</b>	<b>太空的撞击危害 .....</b>	<b>(217)</b>
12.1	流星体与太空碎片 .....	(217)
12.2	近地小天体及其撞击地球的可能性 .....	(224)
	思考题 .....	(235)
	参考文献 .....	(235)



# 第一篇 太空概览

## 第一章 绚丽多彩的太空

### 1.1 什么是太空

所谓太空,是指稠密大气层以外的广阔无垠的空间区域。其下边界起始于距地球表面大约 60 km 处,向上一直到茫茫宇宙。

将太空下边界定义在大约 60 km 高度左右,是考虑到在这个高度以上,地球的大气层已非常稀薄,大气开始电离,大气的状态除了受地球引力场支配外,还受太阳电磁辐射和粒子辐射的直接影响。另一方面,从研究方法来看,描述中性大气的流体力学方法已不完全适用,必须结合电动力学的知识,也即用磁流体力学方法。

由于太空包含的范围巨大,通常将太空划分为几个层次,由近到远、由小到大依次为地球空间(geospace)、日地空间(solar-terrestrial space)、日球(层)(heliosphere)和宇宙(universe)。

地球空间的外边界是太阳风与地磁场相互作用形成的,称为磁层顶。磁层顶是“泪滴形”的,在向阳面,磁层顶距地球的距离大约为 7~8 个地球半径,在背阳面,太阳风将地球的磁场拉到距地球约几十个地球半径,形成磁尾。地球空间是人类生存和进行主要空间活动的区域。

日地空间是由太阳、太阳风、行星际磁场和地球空间构成的。太阳与地球之间的平均距离定义为一个天文距离单位 1 AU ( $1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$ ),这是一个常用的数据。日地物理学(solar-terrestrial physics)主要研究这一区域的特性。

日球是太阳风、行星际磁场与星际风相互作用形成的边界(日球顶)所包围的区域,日球顶到太阳的距离大约是 100 AU。太阳系就在日球之内。

太阳系是由太阳、九大行星及其卫星、小行星、彗星、流星体和行星际介质组成的天体系统。在太阳系中,太阳是中心天体,其质量占太阳系总质量的 99.85%。除了太阳之外,太阳系主要成员是九大行星,即水星、金星、地球、火星、木星、土星、海王星、天王星和冥王

星,它们的质量只占太阳系总质量的 0.135%。九大行星都在接近同一平面(黄道面)的近圆形轨道上朝着同一方向绕太阳公转,但冥王星例外,它的轨道面对黄道面的倾角为 17.148°。太阳也朝同一方向自转。小行星是指沿椭圆轨道绕太阳公转的固态小天体。大多数小行星分布在火星和土星轨道之间的小行星带内。从巡天观测的照片中估计,小行星有上百万颗。彗星大多数是沿扁长轨道绕太阳公转的小质量天体,有云雾状的独特外貌。彗星在远离太阳时,呈朦胧雾状小斑点,在走近太阳时生出扫帚状的长尾巴。至今已观测到的彗星有 1600 多颗,地球上平均每年可见几颗彗星,多数是重复出现的“老彗星”,只有 1~2 颗是第一次来到内太阳系的“新彗星”。

离地球最近的恒星——太阳,仅仅是一个普通星系——银河系中几千亿颗恒星中的一员。所谓星系,就是由几十亿至几千亿颗恒星和星际气体以及尘埃物质等组成,占据几千光年(1 光年=63 239.8 AU,是光在 1a 的时间内走过的路程)至几十万光年空间的天体系统。我们的银河系就是一个普通星系,银河系以外的星系成为河外星系。而星系又是星系团的成员。相互之间有一定力学联系的十几个、几十个乃至成百上千个星系集聚在一起组成的星系集团,称为星系团。目前已经发现上万个星系团。许多星系团组合在一起,形成超星系团。而总星系,则是比超星系团更高一级的天体层次,它就是目前所能观测到的宇宙。

## 1.2 太空中的奇妙景象

在人类居住的地球上,有许多令人陶醉的奇妙景象。如壮丽的山川河流,奇异的花草树木;变化莫测的风雨雷电,浪漫神奇的海市蜃楼;等等。茫茫太空,既不像神话小说描写的那样富丽堂皇,也不像某些文人墨客描写的那样虚无缥缈。太空不是天堂,也不是真空,它充满着可见与不可见的物质,发生着有时平常、有时惊人的变化,呈现出许多太空特有的奇妙景象。

从光学现象看,太空有绚丽多彩的极光,有神奇莫测的红闪与蓝急流,有肉眼看不见的气辉,还有在远离地球才能看见的地冕。地球的极光在高纬地面就可以看见,在太空看极光是什么景象?九大行星的其他八个成员有极光吗?如果有,能与地球极光比美吗?红闪与蓝急流是伴随着地球大气雷暴而发生的发光现象,但本身不是闪电,它们至今还有许多秘密未被破解。火星、木星有闪电吗?如果有,是什么形态?恒星发出的光都与太阳一样吗?超新星爆发是一种什么景象?

地球大气层的云千姿百态,现代小学语文课本中有一篇专门描写火烧云的文章,将云的变化写得惟妙惟肖。火星也有淡淡的白云,形态变化莫测。星云则五彩缤纷,令人眼花缭乱。

地面上的风是多种多样的,有微风、飓风、龙卷风和台风。地球的高层大气有高空风,它对卫星的轨道和战略导弹的精度有很大影响。火星上的风暴是出名的,还常常产生沙尘

暴,大的沙尘暴遮天蔽日,几乎遍及整个火星。地球上任何地区的沙尘暴,都无法与其相比。天王星和海王星也有巨大的风暴,它们离太阳非常遥远,不知产生这些飓风的能量来自何处。许多人可能都听说过太阳风,其速度可达到每秒几千公里。如此巨大的风暴,却吹不掉你的帽子,因为风所携带的粒子太少了。还有星际风,这可是一个新问题,它是由哪些物质组成的,目前还是一个秘密。

雨是地球上常见的现象,但太空的“雨”可与地球的不一样。太阳发生爆发性活动时,会将大量的带电粒子抛向地球,在极区进入高层大气,形成带电粒子“雨”。当地球与某些彗星的轨道相遇时,大量的碎石块和尘埃被地球吸引并进入地球大气,形成所谓的“流星雨”。

地震是地球上常常发生的自然灾害,水星、金星和火星也有类似的震动吗?恒星是否发生星震?答案是肯定的,而且有些恒星一旦发生星震,其释放出的能量(以 $\gamma$ 射线的形式传输)之大,连在其附近运行的卫星都吃不消,往往要关闭仪器电源,以免被摧毁。

地球上目前仍有活动火山,每年差不多都有火山喷发的报道。太空中的其他天体也有活动火山,如木星的一个卫星 Io,其火山活动的强烈程度是地球所无法相比的。

太空中还有许多现象是无法与地球上发生的事情相类比的。如超新星爆发,用天崩地裂这个词也不能反映其剧烈的程度。一次大的太阳耀斑所释放的能量,相当于同时爆炸几百万个亿吨级的氢弹。黑洞的引力如此之大,以至于光都难以释放出来。黑洞还吞噬星体,同时放出巨大的能量。最近一次彗星撞击木星发生在 1994 年,碰撞所产生的能量之高是难以想像的,但是,哈勃空间望远镜已观测到星系即将碰撞的情景。如果这种事件发生,将会是一种什么样的景象呢?

### 1.3 为什么要探索太空

自从前苏联于 1957 年发射第一颗人造卫星以来,人类对太空的直接探索已经有 40 多年,取得了丰硕的成果。太空技术影响着人们的日常生活,现在,很难设想,如果离开了太空技术,人们的生活将会变得怎样。

尽管人类在探索太空方面取得了很大成就,但对太空的认识还只是初步的,还有许多奥秘需要我们去揭示,有许多资源期待着进一步开发,对太空潜在的危害,人类也需要深入认识,并找到避免和减轻灾害的方法。

概括来说,探索太空的目的包括以下四个方面:开发和利用太空资源,认识和避免太空灾害,开拓天疆,发展空间科学。

资源是人类的生产资料和生活资料的天然来源,它来自于人类所处的天然环境。人类文明发展的进程,就与其所处的环境之间的关系看,一般表现为先适应环境,然后认识和研究环境,进而利用和开发环境的资源,以满足并改善人类的生存条件。在这个进程中,人类首先适应、认识环境,进而利用和开发陆地上的资源,包括土地、山、水、动物和植物等资

源,进一步利用和开发陆地的矿物资源;随后对环境的认识和资源的开发扩展到海洋;20世纪初,这个进程已发展到大气层,到20世纪50年代末,扩展到太空。

太空是一个蕴藏着丰富资源的宝库,一般可将太空资源分成两类:一类称为“硬资源”,就是我们用肉眼可以直接感知的物质资源,如在其他行星、小行星上蕴藏的矿物资源和太阳能资源等;另一类是太空环境所特有的资源,称为“软资源”,如高真空和高洁净资源、微重力资源、超低温资源等。在软资源的利用方面,目前发展迅速,且已发展成商业太空活动。

商业太空活动是新太空时代的重要标志。最明显的特征是打破了政府机构对太空的单独控制,某些太空应用,如遥感,是受商业太空活动部门驱动的。太空技术带来了商业和社会活动各方面的革命,并且随着新兴技术使卫星能力不断提高,这种革命仍将继续。随着太空技术在交通、保健、环境、工业和能源方面的应用,太空应用已经进入家庭、企业、学校、医院和政府部门。

太空资源已经给人类带来了巨大利益,但由于人类的太空基础设施还不完备,对太空资源的认识、利用和开发还需作艰苦的努力。

近年来,来自太空的一种自然灾害越来越引起人类的重视,这就是近地小天体撞击地球问题。在太阳系运行的小行星和彗星中,有些天体的轨道与地球很接近,或者与地球轨道交叉。这些小天体受大行星引力作用的摄动,可能在相当长时间以后,与地球相撞。尽管发生这类事件的概率很小,但根据历史记录,不能完全排除这种可能性。更重要的是,限于目前的观测手段,这种对地球有潜在危险的小天体究竟有多少,它们的轨道特性如何,目前还没有查清,需要进一步努力。

如果说小天体撞击地球问题离我们太远,但另一类太空灾害问题却是常常发生的,这就是灾害性空间天气。所谓空间天气,是指太阳表面、太阳风、磁层、电离层和热层瞬时或短时间内的状态。它们的状态可能影响空间和地面技术系统的性能和可靠性,可能危及人类的生命和健康。恶劣的空间天气可引起卫星运行、通信、导航以及电站输送网络的崩溃,造成社会各方面的经济损失。

灾害性空间天气对人类的影响越来越引起人们的重视。目前,美国、欧洲空间局和中国,都已制订了空间天气研究规划。随着人类对空间天气的认识不断加深,空间天气预报水平的进一步提高,空间天气将会像日常的大气层天气那样,引起人们普遍的关注。

联合国1967年制订的“关于各国探索和利用外层空间包括月球与其他天体活动所应遵循原则的条约”明确了“外层空间为全人类所共有”的原则,太空活动可以覆盖全球及其大气层,不受领土、领海、领空的限制。对一国而言似乎没有领天问题,但是只有掌握进入太空技术的国家才能够在太空占有一席之地,取得在太空活动的自由权。只有具备运用太空资源能力的国家,才能够获得从陆、海、空疆域难以或不能获得的巨大利益。

太空是没有国界的,谁有本事,谁有能力,谁先下手,谁就能占领。一个国家在太空设置了自己的太空基础设施,占领了有利于本国的空间位置和频率,这个国家才实实在在地在太空占有一席之地,表明这个国家开拓了天疆,或者说把国家的疆域和主权扩展到了太

空。正因为如此,目前世界上很多国家都在加大人力、物力、财力的投入,以便在这个领域的竞争中占据优势。这个优势,既有利于发展经济,又有利于加强军事力量。事实上,美国早在20世纪80年代就抛出了“星球大战”计划,现在又加紧做太空战的准备。由此可看出,加强对太空环境的了解和利用,加强太空基础设施建设,对巩固国防,作好未来反侵略战争的准备,具有十分重要的意义。

太空探测是发展空间科学的基础。与其他以大自然为研究对象的学科一样,空间科学也是一门观测的学科、实验的学科。没有观测数据做基础,发展空间科学就是一句空话。事实上,空间科学的许多重要发现,都是来自于观测上的发现。当然,我们不排除理论研究的指导意义。

空间科学是研究地球空间、日地空间、日球、宇宙这个广袤区域的物理、天文、化学和生命等自然现象及其规律的科学,主要包括空间物理学、空间天文学、空间化学、空间微重力科学、空间生命科学和空间地质学。

空间物理学主要研究发生在日球范围内的物理现象。当前研究的重点问题包括太阳变化的机制、太阳风、磁层的结构、中高层大气,以及它们与上下层的耦合、行星系统的比较研究。

空间天文学是主要借助于航天器在太空进行天文观测和研究的一门学科。现在已经有红外天文学、紫外天文学、X射线天文学和 $\gamma$ 射线天文学等重要分支学科。

空间化学研究发生在空间的化学过程、宇宙物质的化学组成及其演化,又称宇宙化学。

空间地质学是应用地质学、地球化学和地球物理学的原理和方法研究太阳系各类天体的物质成分、结构、形成和演化历史的一门学科,亦称宇宙地质学或天体地质学。

空间微重力科学研究在微重力或低重力条件下物理系统、化学系统及生物系统的规律,它的研究范围包括生物技术、燃烧科学、流体物理学、基础物理学和材料科学等学科。

空间生命科学研究宇宙空间特殊环境作用下的生命现象以及探索地外文明。广义地说,它包括空间生物学、空间生理学、空间医学和空间生物工程学等。

太空特殊和极端的环境为空间科学的发展提供了天然实验室。目前世界上最高能量的加速器也无法获得高能宇宙线所具有的能量。此外,像中子星的强磁场、黑洞的强引力、恒星的震动和耀斑,都为空间天文学的研究提供了广阔的天地。

随着太空探索的进展,人类需要加强研究的科学领域越来越宽阔。例如,研究细胞生物工程与重力的关系,可进一步了解地球对生物的生存有什么限制,在太空是否能存在生物;在太空,利用高级光学技术可以探测有机、无机材料形成和生长期间的结构发展情况,进而可提高材料的性能;利用太空环境可以检验与技术发展有关的燃烧过程,这有助于研究在地球和太空的燃烧安全问题,提高燃料效率,并生产新的推进剂。在太空进行的一些实验,可为激光制冷原子、原子钟和生物物理学研究打下理论和实验基础。

综上所述,探索太空具有极为重要的经济、政治、军事和科学意义。目前,世界上很多国家都在加大人力、物力、财力的投入,以便在太空领域的竞争中占据优势。面对这种形势,我们应当从战略高度上充分认识探索太空的意义,把开拓天疆作为国策。

## 第二章 地球空间

### 2.1 什么是地球空间

为了深入研究地球空间,也为了在第四章将太阳系的其他行星与地球比较,我们首先系统地介绍地球大气层。

#### 2.1.1 大气层的基本特征

包围地球的气体,总称为大气或大气层。像鱼类生活在水中一样,我们人类生活在地球大气的底部,并且一刻也离不开大气。大气为地球生命的繁衍、人类的发展,提供了理想的环境。它的状态和变化,时时处处都影响着人类的活动与生存。

静态大气的性质通常由四个参数描述,即压强  $p$ 、密度  $\rho$ 、温度  $T$  和大气成分。这几个参数不是孤立的,而是由气体定律支配的。其中一个重要关系式为  $p=nkT$ ,这里  $n$  是单位体积中的分子数,也称数密度, $k$  为玻尔兹曼常数。

大气压强主要随高度而变化,表 2-1 给出不同高度的压强相对于海平面上压强的变化,即以海平面处的压强值为 1。

表 2-1 大气压强随高度变化

高度/km	大气压强	高度/km	大气压强
0	1	135	$10^{-8}$
16	$10^{-1}$	220	$10^{-9}$
31	$10^{-2}$	350	$10^{-10}$
48	$10^{-3}$	520	$10^{-11}$
65	$10^{-4}$	730	$10^{-12}$
80	$10^{-5}$	1100	$10^{-13}$
92	$10^{-6}$	2100	$10^{-14}$
108	$10^{-7}$	50 000	$10^{-15.8}$

单位体积内的大气质量定义为大气密度,常用  $\rho$  表示。由于地球引力的作用,越往高空大气密度越小,整个大气层质量的 90% 都集中在高于海平面 16 km 以内的空间里,99.999% 的大气质量都集中在 80 km 高度以内,基本按指数规律下降。为了定性地说明这种规律,表 2-2 列出了一些典型情况下的大气密度随高度变化的数值(以海平面处的大气密度值为 1)。

表 2-2 大气密度随高度变化

高度/km	大气密度	高度/km	大气密度
0	1	165	$10^{-9}$
18	$10^{-1}$	245	$10^{-10}$
33	$10^{-2}$	370	$10^{-11}$
49	$10^{-3}$	540	$10^{-12}$
67	$10^{-4}$	730	$10^{-13}$
82	$10^{-5}$	980	$10^{-14}$
96	$10^{-6}$	1600	$10^{-15}$
110	$10^{-7}$	2750	$10^{-16}$
125	$10^{-8}$	5000	$10^{-18.7}$

大气密度不但随高度变化而变化,而且也随纬度、季节、昼夜和太阳活动等变化而变化。海平面处最大密度出现在日出后不久,而 200 km 以上大气密度的最大值总是出现在地方时 14 时,最小值出现在地方时 4 时。大气密度是卫星轨道设计最重要的参数之一,也是计算卫星轨道摄动、飞行寿命、返回时受到的气动阻力与气动加热等的重要依据。

大气温度指大气的冷热程度。从分子运动论的角度看,温度代表单个分子的平均平动动能。

大气中各种成分的比例,在 80 km 高度以下不变,平均分子量为 28.96。由于风和湍流扩散等作用,各种成分均匀混合在一起,表 2-3 给出了低层大气的主要成分及其百分比。

表 2-3 低层大气的主要成分及其百分比

气体	体积百分比(%)	质量百分比(%)	分子量
N	78.1	75.52	28.02
O	20.9	22.15	32.00
Ar	0.93	1.28	39.96
CO <sub>2</sub>	0.03	0.05	44.02

在 120 km 高度以上,大气的各种成分开始扩散分离,氧分子开始部分解为氧原子;230 km 高度以上,氮分子部分解为氮原子。离地面越高,离解的比例越大,气体也越轻。320~1000 km 高度之间有一层氮离子,亦叫氮层。氮层之上有更稀薄的一层氢离子,称为“质子层”。质子层一直延伸到 64 000 km 高度才稀薄到行星际空间的密度。

### 2.1.2 大气层分层

探测结果表明,地球大气层的顶部并没有明显的分界线,而是逐渐过渡到星际空间的。按其温度在垂直方向上的变化,可将大气分为四层,自下而上依次是:对流层、平流层、中间层和热层,如图 2-1 所示。

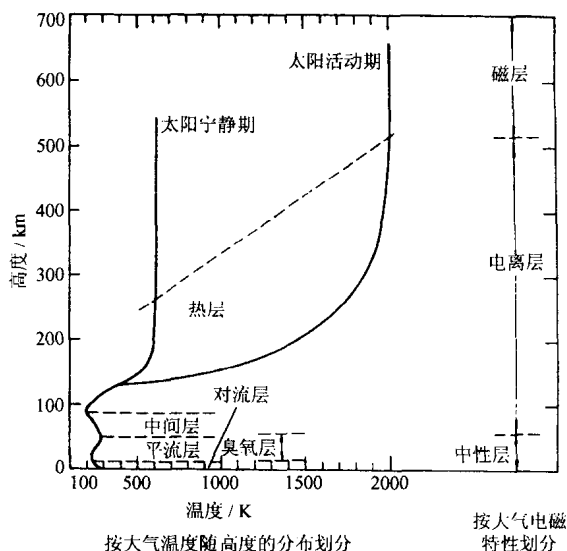


图 2-1 地球大气层分层

对流层是紧贴地面的一层，它受地面的影响最大。因为地面附近的空气受热上升，而位于上面的冷空气下沉，这样就发生了对流运动，所以把这层叫做对流层。它的下界是地面，上界因纬度和季节而不同。据观测，在低纬度地区，其上界位于 17~18 km 高度处；在中纬度地区位于 10~12 km 高度处；在高纬度地区仅位于 8~9 km 高度处。夏季的对流层厚度大于冬季。

在对流层的顶部，直到海平面以上 50~55 km 高度的这一层，气流运动相当平衡，主要以水平运动为主，故称为平流层。由于臭氧主要分布在平流层，它对波长为 220~290 nm 的紫外线有强烈的吸收作用，因而引起该层增温，温度随高度升高。

平流层之上，到高于海平面 85 km 的这一层为中间层。

从中间层顶部到高出海平面 800 km 的高空，称为热层。这一层的空气密度很小，在约 700 km 厚的气层中，只含有大气总质量的 0.5%。据探测，在 120 km 高空，声波已难以传播；270 km 高空，大气密度只有地面的一百亿分之一，所以在这里即使在你耳边开大炮，也难听到什么声音。热层里的气温很高，据人造卫星观测，在 300 km 高度上，气温高达 1000 K 以上。

若按大气被电离的状态来划分，可分为中性层和电离层。在海平面以上至 60 km 以内的大气基本上没有被电离，处于中性状态，所以这一层叫中性层。在 60 km 以上至 1000 km 的高度，这一层大气在太阳紫外线的作用下，大气成分开始电离，形成大量的正、负离子和自由电子，所以这一层叫做电离层。电离层上面是磁层，磁层本质上也是电离层，只是气体更稀薄，且是完全电离的。



### 2.1.3 地球空间的定义

地球空间定义为靠近地球的、受太阳辐射变化直接影响的空间区域。具体来说,是指大气层中平流层顶以上的部分。它不同于紧靠地面、产生各种天气过程的低层大气,因为地球空间的气体是部分或完全电离的;也不同于行星际空间,因为地球空间的物质主要源于地球,是地球大气的一部分。

地球空间是由许多相互作用共同产生的区域,也是由许多边界决定的区域。这些相互作用包括:地球物质与太阳辐射的相互作用,太阳风和地磁场的相互作用,磁场与带电粒子的相互作用;这些边界包括:太阳风与地球物质的边界,由不同气流支配的各区域的边界。

## 2.2 高层中性大气

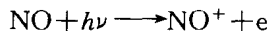
高层中性大气简称高层大气。本书所指的高层大气,是指平流层顶以上的大气层区域,包括中间层和热层。

### 2.2.1 中间层

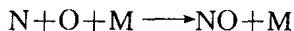
中间层在平流层顶以上,位于 50~85 km 之间。这个区域的温度随高度的增加而减小,在中间层顶(大约在 80~85 km 高度处)温度下降到大约 180 K,这是大气层中最冷的部分。

在这一层大气中,几乎没有臭氧,这就使来自太阳辐射的大量紫外线未被吸收而穿过这一层大气,所以,在这层大气里,气温随高度的增加而下降得很快。温度降低的另一个原因是由于二氧化碳在 15 μm 的红外辐射。由于下层气温比上层的高,有利于空气的垂直对流运动,故又称之为高空对流层或上对流层。中间层顶部尚有水汽存在,可出现很薄且发光的夜光云,在夏季的夜晚,高纬度地区偶尔能见到这种银白色的夜光云。

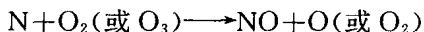
中间层中重要的中性成分是 NO。在 60~80 km 之间,NO 是电离层 D 区的主要离子源,它是通过以下过程产生的:



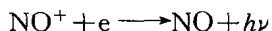
其中 e 表示电子,  $h\nu$  表示光子。当存在氮原子时,NO 是通过下面的作用形成的:



其中 M 表示参与这种作用的第三体。或者



另外,相当多的 NO 来自于离子与电子的复合:



中间层大气是对太阳活动和人类活动等外界扰动都极为敏感的大气区域,也是一系