

太空基础知识

神机妙算话航天

相有桓 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以弘扬太空科学、普及航天技术、激发学习兴趣为宗旨,以人类航天技术发展历程为轴线,从探索太空开始,按照先基础知识、后技术应用,先太空旅行、后地面保障的顺序进行介绍。主要内容包括探索太空、空间环境、航天器轨道、进入太空、利用太空、控制太空、太空返回、航天发射场以及地面保障系统等。

为帮助读者更好地阅读和理解,本书将中学数学、物理、化学知识与航天技术相融合,将定性定量相结合,给出了大量简单实用的计算公式及算例,并融合穿插了许多生动、丰富的历史人物和事件,集知识性、实用性、趣味性于一体,是一本适合中学生、航天爱好者和航天工作者阅读的航天科普著作。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

太空基础知识:神机妙算话航天/相有恒著. —北京:清华大学出版社,2023.8
ISBN 978-7-302-63979-4

I. ①太… II. ①相… III. ①航天—普及读物 IV. ①V4-49

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 116943 号

责任编辑:佟丽霞 赵从棉

封面设计:王利群

责任校对:欧 洋

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京博海升彩色印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18

字 数:433 千字

版 次:2023 年 8 月第 1 版

印 次:2023 年 8 月第 1 次印刷

定 价:129.00 元

产品编号:099918-01



近年来,国外火星探测、深空探测返回、商业载人航天、星链计划等新秀轮番登场亮相,我国嫦娥奔月、神舟飞天、北斗组网、“天问”探火等飞天梦想不断实现,新一股航天热潮持续高涨,人类探索太空的活动进入了新纪元。

遥远深邃的太空令人感到神秘与好奇,人们渴望对太空有更多、更深的认识 and 了解。然而,由于其所涉及的学科众多且内容复杂,很多人会敬而远之。本书很好地将中学数学、物理、化学知识与航天技术相融合,既不是空泛的航天知识的科普读物,也不是深奥的太空技术的学术论著。它以小学、初中知识为切入点,逐步深化科普,摒弃了以往科普书籍中多为定性描述的方式,将定性 with 定量相结合,以中学数学和物理知识为主,给出了大量简单实用的计算公式,并配备了许多启示性算例及其推算过程。这不仅能够激发读者学习数学、物理等学科的兴趣,还可以帮助读者更加深入地了解太空、理解航天,从而提高我们进出、利用、控制太空的能力。

本书以弘扬太空科学、普及航天技术、激发学习兴趣为宗旨,以人类航天技术发展历程为轴线,从探索太空开始,按照先基础知识、后技术应用,先太空旅行、后地面保障的顺序进行介绍。在介绍太空时,按照进入太空、利用太空、控制太空和太空返回的逻辑依次描述。全书共 9 章。第 1 章探索太空,主要介绍了探索太空的目的,以及有关宇宙起源的创世神话和宇宙大爆炸理论、天文学的起源、对宇宙的观测与认知等内容。第 2 章空间环境,从空间环境对航天活动的影响出发,介绍了真空和微重力环境、中性环境、等离子体环境、辐射环境、空间碎片与微流星体等内容。第 3 章航天器轨道,从轨道描述和轨道运动的角度,阐述了轨道几何学、轨道定律、轨道力学、典型轨道、轨道机动等内容。第 4 章进入太空,从如何实现航天器发射入轨的角度,介绍了航天器入轨要求、发射窗口、航天器入轨过程、运载火箭原理与技术等内容。第 5 章利用太空,从人类利用太空资源的角度,介绍了利用卫星进行通信、导航、遥感观测以及空间站与空间科学实验等内容。第 6 章控制太空,从控制太空所需掌握的能力角度,介绍了太空监察、太空攻击、太空防御、交会拦截等内容。第 7 章太空返回,从航天器返回过程的影响因素出发,介绍了航天器返回过程、返回方式、返回运动分析、返回弹道以及航天器形状对返回过程的影响、返回过程的航天器防热等内容。第 8 章航天发射场,重点介绍了航天发射场的选址、纬度、落区以及航天发射场的类型等,并对世界主要航天发射场进行了介绍。第 9 章地面保障系统,从航天发射活动保障角度,介绍了发射场特种燃料、特种气体、空调、供电保障,以及测控、时间统一等内容。

书中进行太空基础知识解读时,内容深入浅出、语言通俗易懂,融合穿插了许多生动、丰

富的历史人物和事件。本书还附有大量精美的实物图片和精心绘制的示意图例,集知识性、实用性、趣味性于一体,是一本适合中学生、航天爱好者和航天工作者阅读的航天科普著作。

本书的创作初衷来自太原卫星发射中心主任李宗利先生的两个愿望:一是给不同专业背景但正在从事航天发射和太空探索工作的工程师提供一门定性与定量相结合的太空课程;二是让具有中学数理化知识的航天爱好者可以选用本书提供的数学模型等工具描述太空,以全新视角探寻太空奥妙,走向更远的未来。全书由李宗利先生策划和主导,从专著主题的构思、篇章结构的谋划,到书稿内容的撰写,甚至是典型算例及历史事件的选取,先生都给予了悉心指导,倾注了大量心血,在此谨致以最诚挚的敬意。由于著者才疏学浅,未能将先生的真知灼见完全融会贯通,尚有待完善之处。

唐立、张安理、闫鹏、张建荣、李鹏、李斌、薛甫成、夏红根、王琛、佟丽霞等参与了部分编写工作,管懿、韩庆华、尹全、张平、石刚、王菲、张龙岗等也做了许多工作,在此表示衷心感谢!

由于著者水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

著者

2022年6月22日



第 1 章 探索太空	1
1.1 探索太空的目的	2
1.2 宇宙起源	3
1.2.1 盘古开天辟地	3
1.2.2 关于宇宙命运的传说	4
1.2.3 宇宙大爆炸	6
1.3 天文学起源	8
1.4 宇宙的观测与认知	11
1.4.1 宇宙的尺度	11
1.4.2 宇宙的观测	12
1.4.3 天体距离	14
1.4.4 多普勒效应和哈勃定律	15
第 2 章 空间环境	17
2.1 真空和微重力环境	18
2.1.1 真空中的紫外线	18
2.1.2 真空中的分子污染	19
2.1.3 微重力	20
2.2 中性环境	21
2.2.1 中性环境的构成	22
2.2.2 大气压强的变化	23
2.2.3 大气阻力	24
2.2.4 原子氧腐蚀	26
2.3 等离子体环境	26
2.3.1 地球电离层组成	27
2.3.2 德拜屏蔽效应	28
2.3.3 等离子体振荡	29

2.3.4	黑障现象	29
2.3.5	航天器充电现象	31
2.4	辐射环境	33
2.4.1	辐射的物理基础	33
2.4.2	空间环境中的辐射	34
2.4.3	极光现象	35
2.5	空间碎片与微流星体	36
2.5.1	碎片撞击的物理基础	37
2.5.2	空间碎片的产生与发展	37
2.5.3	空间碎片的危害	38
2.5.4	消除空间碎片	39
第3章	航天器轨道	41
3.1	轨道初识	42
3.2	轨道几何学	43
3.2.1	圆与椭圆	43
3.2.2	偏心率与轴	44
3.2.3	远地点与近地点	46
3.3	轨道定律	46
3.3.1	开普勒定律	46
3.3.2	牛顿运动定律和万有引力定律	50
3.3.3	宇宙速度计算	55
3.4	轨道力学	57
3.4.1	坐标系	57
3.4.2	圆周运动	60
3.4.3	轨道根数	60
3.4.4	星下点轨迹	64
3.5	典型轨道	66
3.5.1	近地轨道	67
3.5.2	中轨道	68
3.5.3	地球静止轨道	68
3.5.4	大椭圆轨道	70
3.5.5	太阳同步轨道	71
3.6	轨道机动	73
3.6.1	轨道转移	73
3.6.2	轨道维持	80
3.6.3	离轨与交会	84

第 4 章 进入太空	86
4.1 航天器入轨要求	86
4.1.1 发射高度	86
4.1.2 在轨总能量	87
4.2 发射窗口	88
4.2.1 发射窗口的类型	88
4.2.2 发射窗口确定	90
4.3 航天器入轨过程	94
4.3.1 航天发射过程	94
4.3.2 火箭飞行政序	95
4.3.3 航天器入轨形式	98
4.4 运载火箭	99
4.4.1 火箭的原理	100
4.4.2 火箭技术	101
4.4.3 运载火箭的发展	119
第 5 章 利用太空	124
5.1 卫星通信	124
5.1.1 卫星通信基础	125
5.1.2 卫星接收天线	127
5.1.3 通信卫星的轨道布设	131
5.2 卫星导航定位	133
5.2.1 卫星导航定位基础	134
5.2.2 导航卫星的轨道布设	137
5.3 卫星遥感	139
5.3.1 卫星遥感基础	139
5.3.2 卫星遥感的分辨率	144
5.3.3 遥感卫星的轨道布设	145
5.4 空间站与空间科学实验	145
5.4.1 空间站	146
5.4.2 空间科学实验	147
第 6 章 控制太空	152
6.1 太空监察	152
6.1.1 红外探测	153
6.1.2 雷达探测	153

6.2	太空攻击	158
6.2.1	钱学森弹道	158
6.2.2	乘波体与激波	160
6.2.3	激光	163
6.2.4	碎片碰撞	165
6.3	太空防御	167
6.3.1	秘密投送	167
6.3.2	在轨隐身	167
6.3.3	机动变轨	168
6.3.4	导弹拦截	168
6.3.5	在轨修复	168
6.4	交会拦截	168
6.4.1	共面交会	168
6.4.2	共轨交会	171
第7章	太空返回	174
7.1	航天器返回过程	175
7.2	航天器返回方式	178
7.2.1	弹道式返回	180
7.2.2	半弹道式返回	181
7.2.3	升力式返回	182
7.2.4	跳跃式返回	185
7.3	航天器返回运动分析	186
7.3.1	航天器返回过程受力分析	186
7.3.2	航天器返回速度	189
7.4	返回弹道	190
7.4.1	加速度	190
7.4.2	加热率	190
7.4.3	着陆精度	192
7.4.4	返回通道	192
7.5	航天器形状与防热	193
7.5.1	航天器形状	193
7.5.2	航天器防热	195
第8章	航天发射场	199
8.1	航天发射场及落区选址	199
8.1.1	选址要素	200

8.1.2	发射场纬度与轨道倾角·····	201
8.1.3	火箭残骸落区·····	208
8.2	航天发射场类型·····	211
8.2.1	内陆发射场·····	211
8.2.2	濒海发射场·····	211
8.2.3	陆上移动发射平台·····	211
8.2.4	海上固定发射场·····	212
8.2.5	海上移动发射平台·····	212
8.2.6	水下发射平台·····	213
8.2.7	空基发射平台·····	213
8.2.8	天基发射平台·····	214
8.3	世界主要航天发射场介绍·····	215
8.3.1	美国·····	215
8.3.2	俄罗斯/苏联·····	216
8.3.3	欧洲航天局·····	217
8.3.4	日本·····	218
8.3.5	印度·····	219
8.3.6	中国·····	220
第 9 章	地面保障系统·····	223
9.1	特种燃料·····	223
9.1.1	燃料种类·····	224
9.1.2	燃料加注·····	226
9.1.3	燃料制取·····	230
9.1.4	燃料贮存·····	231
9.2	特种气体·····	234
9.2.1	气体制取·····	234
9.2.2	气体要求·····	237
9.2.3	气体量化·····	239
9.2.4	气体利用·····	242
9.3	空调·····	245
9.3.1	环境参数·····	245
9.3.2	温度保障·····	249
9.3.3	湿度保障·····	250
9.3.4	洁净度保障·····	251
9.4	供电·····	253
9.4.1	高压输电·····	253

9.4.2	负荷计算·····	255
9.4.3	接地保护·····	257
9.4.4	塔架避雷·····	258
9.5	测控·····	263
9.5.1	雷达·····	263
9.5.2	遥测遥控·····	265
9.6	时间统一·····	267
9.6.1	世界时系统·····	267
9.6.2	历书时·····	274
9.6.3	原子时·····	274
参考文献·····		275

第1章

探索太空

太空一般指地球大气层以外的宇宙空间区域。你可能对太空一无所知,这没有关系,现在让我们一起来进行太空探索!

说起我们所熟知的飞天梦,可以追溯到古代的神话传说。《淮南子》写道:“羿请不死之药于西王母,羿妻嫦娥窃之奔月,托身于月,是为蟾蜍,而为月精。”讲述后羿从西王母处请来不死之药,他的妻子嫦娥偷吃了这颗灵药,飞往月宫,并住在月宫中,变成了蟾蜍,就是传说中的月精。“嫦娥奔月”是人们幻想出来的“飞天登月”活动,但却表达了古人对未知空间的好奇,同时也映衬着现代航天事业的发展。“白兔捣药秋复春,嫦娥孤栖与谁邻”,诗中描绘嫦娥携带玉兔栖息在广寒宫的场景,不正是登月探测器“嫦娥三号”携带月球车“玉兔”着陆月球的场面吗?

古人对宇宙的探索不仅局限于“飞天登月”,更有浩瀚星空。“迢迢牵牛星,皎皎河汉女”,诗句在描绘牛郎织女爱情故事的同时,也让我们认识了隶属于天鹰座的牛郎星和天琴座的织女星,以及造成它们“隔河相望”的银河星系。其中,为牛郎织女搭起相见之路的鹊桥,也成了今天为嫦娥探测器提供地月通信支持的中继星“鹊桥”。宇宙星空有无边际,边际之外属于哪里?日、月、星辰又如何运动?屈原在《楚辞·天问》中发出的千年疑问“九天之际,安放安属?”“日月安属?列星安陈?”,也坚定了今天人类走出地球、探索太空的决心。2020年4月24日,在“东方红一号”卫星发射50周年纪念日,中国国家航天局宣布正式命名中国行星探测任务为“天问”系列,首次火星探测任务为“天问一号”。不只如此,还有“夸父”太阳监测卫星计划、“羲和”太阳探测卫星、“祝融”火星着陆车等,这些浪漫的名字中饱含着人类对宇宙探索最执着的追求。

人类文明在宇宙中虽如沧海一粟,但人们的探索之心从未黯淡。千年前,古人仰望星空,写下璀璨神话,寄托美好憧憬。现如今,航天活动用科技让我们得以窥见无比瑰丽的宇宙,把神话照进现实。太空——最后的疆界,它需要无数年轻人投入到无限宇宙的探索中,去发现未知奥秘,去踏足无人之境,去寻找新的生命和文明。太空不仅仅属于那些少数从事科学研究的人们,也不只是属于那些少数字航员群体,而是属于我们全人类。那里有我们共同的新领地,每个人都有义务了解它。

1.1 探索太空的目的

探索太空的行动危险且昂贵,那么我们为什么还要探索太空呢?因为太空为我们提供了几个重要资源。

太空提供了观察地球的方位。人们所在的位置越高,可观测到的地球范围就会越大。纵观历史,统治者就是利用这一点,把观察点建在山顶上,俯瞰疆土,警示敌人,许多战争就是为了争夺“制高点”。这就是我们探索太空的出发点,当置于太空中的合适位置时,就可以对地球表面进行有效观察。在轨航天器(见图 1-1-1、图 1-1-2)可以起到“耳朵”和“眼睛”的作用,能够为人类提供各种服务。



图 1-1-1 北斗导航系统

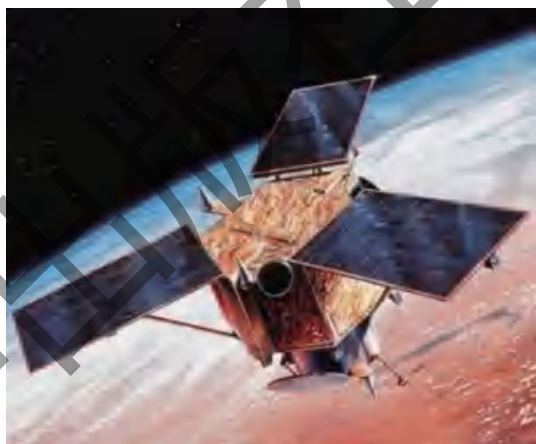


图 1-1-2 遥感卫星

太空提供了宇宙的清晰画面。夜晚,我们遥望天空,会看到众多星星在闪烁,这是由于星光穿越大气层时,大气层会使光线变模糊,星光模糊从而产生闪烁。当我们从太空中进行观测时,就可以清晰地观察宇宙。中国巡天号空间望远镜、美国哈勃太空望远镜(见图 1-1-3、图 1-1-4)等,它们能够观察的范围远远超过人类自身的感知。这些得益于太空优势的观测仪器正在逐步加深人类对宇宙的了解。



图 1-1-3 中国巡天号空间望远镜



图 1-1-4 美国哈勃太空望远镜

太空提供了失重的空间环境。在太空中能够完成一些在地球上不可能完成的制造和生产过程。为了制造新合金,应将两种以上金属按照一定比例混合;然而,由于重力影响使得较重的金属沉入容器底部,难以实现均匀混合。在失重状态下,使用不同的材料可以得到均匀的混合物。由于不受地球的重力影响,在太空中可以生产应用于计算机和其他领域的一些新型材料以及医药产品。

太空提供了丰富的各种资源。太阳系中存在丰富的矿产和能量资源,在轨航天器只利用了这些资源中的一种,即无限的太阳能。科学家们预测人类可以利用月球及其他天体上的资源,以发展基于太空的经济。例如,月球、火星和小行星上蕴藏着丰富的矿产资源及稀有金属,类木行星和彗星上蕴藏着丰富的氢能资源,这些资源与人类探索太空的活动结合起来,意味着人类最后的疆界就是太空。

太空为人类提供了无限的挑战与机遇,很多人将太空挑战者视为新世界的开拓者。虽然在月球或者火星上建立根据地还有很漫长的路要走,但这个最后疆界的诱惑正在不断影响着我们的生活。人类每年花费巨额资金制作一些太空题材的科幻电影,如《流浪地球》《星际旅行》等(见图 1-1-5、图 1-1-6),嫦娥登月计划和许多航天任务已经唤起了人类进行太空旅行的憧憬。每个人对于太空都有不同的理解,当越来越多的人加入到探索太空队伍中时,未来的太空探索将更加具有魅力。



图 1-1-5 《流浪地球》



图 1-1-6 《星际旅行》

1.2 宇宙起源

《千字文》开篇说“天地玄黄,宇宙洪荒”,洪荒即宇宙刚生成时混沌蒙昧的原始状态。四方上下曰宇,古往今来曰宙,以喻天地。宇指无限空间,宙指无限时间,时间与空间的总和即是宇宙。既然宇宙涉及时间,那就应该有一个初始点。宇宙的初始点是什么样的呢?天地万物是如何开始的呢?

1.2.1 盘古开天辟地

我国创世神话讲述的就是关于宇宙起源的话题,其中人们最为熟知的是盘古开天辟地。因为只有有了天地,才能有人类与一切动植物,以及他们生存所需要的空间。

盘古,又称盘古氏,是我国古代神话传说中开天辟地创造人类世界的始祖。盘古开天

(见图 1-2-1)的记载最早见于三国时期徐整所著的《三五历纪》：“天地混沌如鸡子，盘古生其中。万八千岁，天地开辟，阳清为天，阴浊为地。盘古在其中，一日九变，神于天，圣于地。天日高一丈，地日厚一丈，盘古日长一丈，如此万八千岁。天数极高，地数极深，盘古极长。后乃有三皇。数起于一，立于三，成于五，盛于七，处于九，故天去地九万里。”



图 1-2-1 盘古开天

人们传说：远古时期，天和地尚未分开，宇宙一片混沌。在这个混沌的宇宙之中有一个巨人，名叫盘古，他睡了一万八千年。有一天，盘古突然醒了，他见周围一片漆黑，就用自己制作的斧头朝着眼前的黑暗猛劈过去，只听一声巨响，黑暗的东西渐渐分散开。天地分开后，盘古担心它们还会合在一起，于是头顶着天、脚踏着地。天每天升高一丈，盘古也跟着天越长越高。盘古想用自己的身体创造出一个充满生机勃勃的世界，于是他微笑着倒下去，把自己的身体奉献给了大地。在倒下去的瞬间，他的双眼飞上天空，左眼变成太阳，给大地带来了光明和希望，右眼变成月亮，两眼中的液体撒向天空，变成夜里的万点繁星。从此，宇宙有了天地之分。盘古开天辟地的传说是古人对人类始祖的神化，它体现了中华民族热爱劳动、不怕困难、为民造福、无私奉献的伟大精神。

据《淮南子》记载：“古未有天地之时，惟像无形，窈窈冥冥，芒芟漠闵，溟濛鸿洞，莫知其门。有二神混生，经天营地；孔乎莫知其所终极，滔乎莫知其所止息；于是乃别为阴阳，离为八极；刚柔相成，万物乃形；烦气为虫，精气为人。”根据这个说法，天地分开之前一片混沌，后来逐渐形成天和地，而且同时产生了掌管天地的二神。这时便分出天地阴阳，散离成四方八极，阴阳二气互相作用，万物才从中形成。这掌管天地的二神是谁，这里没说，不过根据其他一些典籍记载来看，这里的二神是指重和黎。然而，根据《山海经》记载，重和黎并不是自然产生的，而是颛顼的后代，且多了一个天帝，天帝命令二人分管天和地。

1.2.2 关于宇宙命运的传说

古印度的舍罕王有意重赏国际象棋的发明者——西萨·班·达依尔。舍罕王让达依尔自己选择一个奖品，达依尔跪在国王面前说：“陛下啊，请您在棋盘的第一格赏给我 1 粒麦子，在第二格赏给我 2 粒麦子，在第三格赏给我 4 粒麦子……照这样下去，每一格内的麦字数都比前一格多一倍。把这摆满棋盘所有 64 格的麦子赏给您的仆人吧。”舍罕王听后高兴

地答应了,说:“爱卿,你当然会如愿以偿的。”(见图 1-2-2)



图 1-2-2 舍罕王赏麦

那么这个奖项所包含的麦子数为: $2^0 + 2^1 + 2^2 + \dots + 2^{63}$

这其实是一个等比数列的前 n 项和的计算问题,等比数列的求和公式为

$$S_n = \frac{a_1 - a_n q}{1 - q} = \frac{a_1(1 - q^n)}{1 - q}, \quad q \neq 1 \quad (1.2.1)$$

式中, S_n 为等比数列的前 n 项和; a_1 为首项; a_n 为第 n 项; q 为等比。

将 $a_1 = 1, q = 2, n = 64$ 代入上式,可得

$$S_{64} = \frac{1 \times (1 - 2^{64})}{1 - 2} = 2^{64} - 1 = 18\,446\,744\,073\,709\,551\,615$$

如果选用一个宽 4 m、高 4 m 的粮仓储存这些麦子,那么这样的粮仓长度将达到 3×10^8 km,它可以绕地球赤道约 7500 圈或者在地球和太阳之间打个来回。

哪有这么多麦子啊? 舍罕王很是为难。太子的数学老师知道了这件事,对国王说:“陛下,您只需让达依尔进入粮仓,自己数完那些麦子就可以了,假如每秒数 1 粒,大约需要 5849 亿年才能数完;这样的话,就不是您不赏赐,而是他无法取走赏赐。”国王恍然大悟,于是叫来达依尔,让他这样做。达依尔想了想,说:“陛下,您的智慧超过了我,我不要赏赐了。”

这位数学老师说的 5849 亿年是怎么得来的呢? 下面我们来算一算。

1 s 数 1 粒麦子,1 年中共有 $365 \times 24 \times 60 \times 60$ s = 31 536 000 s,前面已经计算得到了全部麦子的个数,那么数完全部麦子需要的时间为

$$t = \frac{18\,446\,744\,073\,709\,551\,615}{31\,536\,000} \text{ 年} \approx 584\,942\,417\,355 \text{ 年} \approx 5849 \text{ 亿年}$$

还有一个关于宇宙命运的传说。在印度北部的贝拿勒斯神庙里放有一块黄铜板,板上插有三根各一尺多长的宝石针。梵天在创造世界时,在其中一根针上按下大、上小的顺序放了大小不同的 64 张金片,这就是所谓的梵塔,如图 1-2-3 所示。梵天创世后立下训谕:不论

白天、黑夜,都有一名僧人一刻不停地把这些金片在三根针上移来移去,每次只能移动一片,且移动时必须保证小片总在大片之上。当所有 64 张金片从梵天创世时所放的那根针上移到另一根针上时,世界的一切将在一声霹雳中化为乌有。

例如,有一个由 3 张金片组成的小梵塔,如图 1-2-4 所示。我们需要移动 1 次、2 次、3 次、…、7 次,才能完成这项工作。



图 1-2-3 梵塔

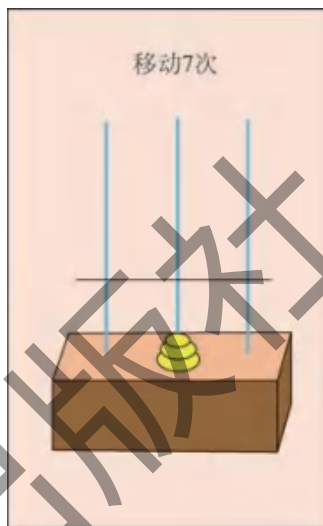


图 1-2-4 由 3 张金片组成的小梵塔

可以看出,梵塔所需的移动次数与达依尔向舍罕王所索取的麦粒数是完全相同的。如果僧人 1 s 移动 1 片金片,僧人们日夜不停、前赴后继、坚持不懈地移动下去,那么完成这项工作所需的时间与数完全部麦子的时间也是完全相同的,即 5849 亿年。

根据这个传说,世界从诞生到消亡将历时约 5849 亿年,我们当然不会相信这种迷信传说。然而,按照现代科学的观点,我们的太阳系已经诞生了约 46 亿年,还有 50 多亿年的寿命;宇宙已经诞生了约 137 亿年,它未来的寿命将比 5849 亿年要长得多。

1.2.3 宇宙大爆炸

1927 年,比利时天文学家、宇宙学家勒梅特(1894—1966)首次提出了宇宙大爆炸假说,他认为宇宙是膨胀的,最初起源于一个“原始原子”的爆炸;1929 年,美国天文学家哈勃(1889—1953)提出哈勃定律,认为大多数星系都存在红移现象,并提出星系都在互相远离的宇宙膨胀理论;1946 年,美国物理学家伽莫夫(1904—1968)与勒梅特一起正式提出关于宇宙起源的大爆炸理论,认为宇宙起源于原始的热核爆炸。

“大爆炸宇宙论”认为:宇宙始于一个致密炽热的奇点(见图 1-2-5),在 137 亿年前的一次大爆炸后膨胀形成,从爆炸初始开始,宇宙处于不断膨胀、不断冷却中。最初的奇点具有无限小的体积、无限大的物质密度、无限高的温度和无限弯曲的时空。宇宙初始,只有能量,没有物质,大爆炸后的物质是由能量转换而来的。

宇宙爆炸初期,物质以基本粒子形态存在,基本粒子是构成物质的最基本单元,包括费米子和玻色子两类。费米子是构成物质实体的基本粒子,玻色子是用来传递能量和作用力的基本粒子。随着宇宙不断膨胀,温度和密度很快下降,大爆炸后的最初几分钟内,形成质



图 1-2-5 宇宙大爆炸

子和中子、反质子和反中子,然后形成电子、原子核,成为一种混沌、不透明的“热汤”状态。

大爆炸后的 38 万年左右,宇宙的温度降到约 3000 K,经历了“重组”时期,离子和电子复合形成气体分子,宇宙渐渐变得清晰,并释放光子。再经过漫长的时间,气体在引力作用下逐渐凝聚成星云,而星云是恒星的育婴室。大爆炸后的 4 亿至 5 亿年,第一代恒星和星系诞生,然后经过恒星和星系的多轮死亡与重生的演变,最终形成我们今天所看到的宇宙。

“大爆炸宇宙论”给出的宇宙演变时序(见图 1-2-6)如下:

- (1) $<10^{-37}$ s: $T \gg 10^{12}$ K, 大爆炸时刻的奇点。
- (2) $10^{-37} \sim 10^{-34}$ s: $T > 10^{12}$ K, “暴涨”时期,宇宙的膨胀呈指数增长。
- (3) $10^{-6} \sim 10^{-4}$ s: $T \approx 10^{12}$ K, 质子、中子及反粒子等重子形成。

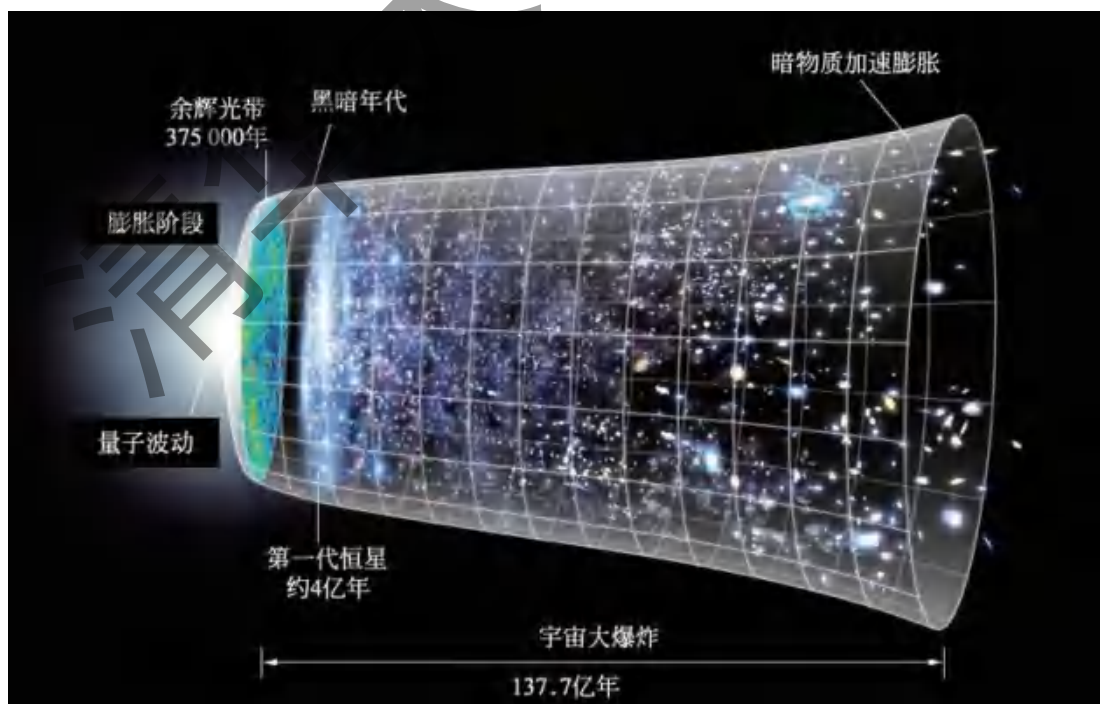


图 1-2-6 宇宙大爆炸演化时序

(4) $100 \sim 1000 \text{ s}$: $T = 10^9 \sim 10^7 \text{ K}$, 发生核反应, 氘、氦、锂形成。

(5) 30 万 $\sim$ 40 万年: $T \approx 10^3 \text{ K}$, 原子形成, 宇宙主要成分为气态物质。

(6) 4 亿 $\sim$ 5 亿年: $T = 100 \text{ K}$, 第一代恒星和星系诞生。

(7) 10 亿年至今: $T = 2.726 \text{ K}$, 逐步演化出星系和各种天体, 形成今天我们所看到的宇宙。

恒星所能引发的核聚变程度与其自身质量有关, 太阳主要引发氢、氦聚变, 较重的恒星会引发碳、氧、镁聚变, 更重的恒星还会引发更重元素的聚变。简略的核聚变顺序依次为氢、氦、碳、氧、镁、硅、钙、铁。但是, 无论恒星有多重, 最终其内部的核聚变反应都会在聚变到铁元素时停止, 这是因为比铁轻的元素聚变释放能量, 比铁重的元素聚变吸收能量。

1.3 天文学起源

天文学起源于人类文化的萌芽时期, 是最古老的自然科学之一, 已有几千年的历史。古人为了明确方向、时间和季节, 会对太阳、月球以及星星进行仔细观察, 从而掌握它们的位置和变化规律, 并在此基础上制定历法。

7000 年前, 我们的人文先始伏羲就发现了太极、阴阳和四象。太极、阴阳和四象是《易经》的基础, 它的发现与天文学有着密切的关系。伏羲经过长期观察, 发现太阳东升西落的现象, 日以为常, 渐渐悟出了天地之间的依存关系, 知道了人类生存的地球只是茫茫宇宙的一分子, 而且整个宇宙是瞬息万变的。4700 年前, 古代埃及人建造的金字塔可以用于观测太阳、月球和其他天体的运行规律。公元前 3100 年, 英国人建造的巨石阵可以精确获得太阳和月球的 12 个方位, 并以此观测太阳、月球和其他天体在不同季节的起落。公元前 3000 多年前, 迦勒底人经过长期观察星象, 创造了星座的划分。

“天文”一词最早见于《易经》,《易传·彖·贲》提出“刚柔交错, 天文也; 文明以止, 人文也”, 要求君子“观乎天文, 以察时变; 观乎人文, 以化成天下”。《周易》提出“天衢”, 要求人们向天道学习, 会通天道人道, 法天正己, 尊时守位, 知常明变, 开物成务, 建功立业。《楚辞·天问》开篇辞为“遂古之初, 谁传道之? 上下未形, 何由考之? 冥昭瞢暗, 谁能极之? 冯翼惟象, 何以识之?”, 面对未知的天地, 屈原(公元前 340—前 278)提出了自己的疑问, 体现了对真理执着的追求。顾炎武(1613—1682)《日知录》有云:“三代以上, 人人皆知天文。七月流火, 农夫之辞也; 三星在天, 妇人之语也; 月离于毕, 戍卒之作也; 龙尾伏辰, 儿童之谣也。”山西襄汾的陶寺遗址与《尚书·尧典》记载的观象台相当,《易传·象·革》中提到“君子以治历明时”。早期天文学的行为从本质上来说就是天体测量学。

对天体运行的规律, 早在古希腊时期, 哲学家亚里士多德(公元前 384—前 322)就提出“地心说”(见图 1-3-1), 即地球中心说。他认为宇宙是一个有限的球体, 分为天地两层, 地球是宇宙的中心且静止不动, 太阳和月球围绕地球转动, 地球外有 9 层天, 由内向外依次为月球天、水星天、金星天、太阳天、火星天、木星天、土星天、恒星天和原动力天, 除此之外宇宙空无一物。古罗马天文学家托勒密(约公元 90—168)全面继承了亚里士多德等人的“地心说”, 并利用前人积累和自己长期观测得到的数据, 撰写了《天文学大成》, 认为地球是静止不动的且位于有限的宇宙中心, 太阳、月球和其他所有星体都围绕着地球转动, 他把亚里士多

德的9层天扩大为11层天,把原动力天改为晶莹天,又往外添加了最高天和净火天(见图1-3-2)。当时的教会借助该理论,宣传上帝创造了地球,并且创造了宇宙的一切,这种理论在天文学占统治地位达1300年之久,同时也限制了欧洲天文学的发展。



图 1-3-1 亚里士多德与“地心说”



图 1-3-2 托勒密与“地心说”

直至16世纪,波兰天文学家哥白尼(1473—1543)通过对天体长达30年的观测,对盛行欧洲的“地心说”提出挑战,并于1510—1514年写下《天体运行论》手稿,提出“日心说”,即太阳中心说。他认为处于宇宙中心的不是地球而是太阳,地球和其他行星一起绕太阳运转,只有月球绕地球运转,日月星辰每天东升西落是由于地球自转所引起的(见图1-3-3)。由于这些学说与当时的宗教教义水火不容,因此哥白尼迟迟不能下定决心出版自己的著作,直到1543年他逝世前,在朋友的劝说下才出版了《天体运行论》,这部伟大的科学著作得以问世。哥白尼提出的“日心说”从根本上改变了旧的宇宙观,为通往近代天文学铺平了道路,从此天文学的发展进入了新阶段,对自然研究便开始从神学中解放出来。



图 1-3-3 哥白尼与“日心说”

天文学上的一切发现和研究成果都离不开天文观测工具。我国最古老的天文仪器是土圭,也称圭表(见图1-3-4)。它利用日影进行测量,主要用于测定冬至日所在,进而确定回归年的长度;此外,通过观测表影的变化还可确定方向和节气。它最初出现在什么年代,已无

从考证。东汉时期伟大的天文学家、数学家张衡(公元 78—139)在西汉耿寿昌发明的浑天仪的基础上,根据自己的浑天说创制了一个比以前更精确、更全面的“浑天仪”(见图 1-3-5)。浑天仪是我国古代天文仪器的杰出代表,它通过转动机械把浑象和漏壶(也称漏刻)结合起来,以漏壶流水推动浑象使它与天球同步转动,以显示星空的周日视运动,如恒星的出没和中天等。



图 1-3-4 圭表



图 1-3-5 浑天仪

17 世纪以前,虽然人们已经制作了许多天文观测仪器,但要开展观测工作仍然只能依靠人的眼睛。1608 年,荷兰眼镜商人李波尔赛偶然发现用两片透镜能够将远处的物体看得更清楚,他经过多次试验,制造了世界上第一架望远镜。1609 年,意大利天文学家、物理学家伽利略(1564—1642)发明了世界上第一架天文望远镜,它将凹透镜作为目镜、凸透镜作为物镜,也称为伽利略望远镜(见图 1-3-6)。通过这个望远镜,伽利略把目标指向遥远的星空,得到了许多重要发现,开启了天文学的新纪元。1611 年,德国天文学家、物理学家开普勒(1571—1630)制作了一种折射式天文望远镜,它将两片凸透镜分别作为物镜和目镜,放大倍数提高了很多,也称为开普勒望远镜(见图 1-3-7)。1917 年,美国天文学家海尔(1868—1938)在美国威尔逊山天文台主持建造了当时世界上最大的天文望远镜,也称为胡克望远镜(见图 1-3-8),它的口径约为 2.54 m。科学家们正是用这架望远镜揭示了银河系的大小以及地球在其中所处的位置,此外,哈勃的宇宙膨胀理论就是哈勃用这架望远镜观测后得出的重要结论。



图 1-3-6 伽利略望远镜



图 1-3-7 开普勒望远镜

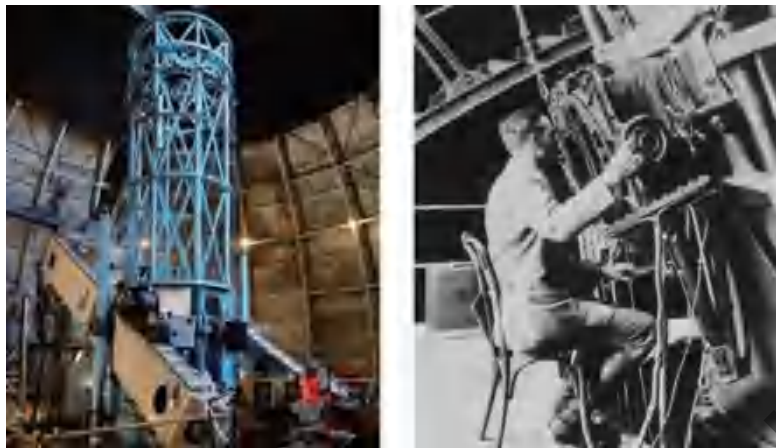


图 1-3-8 胡克望远镜

1.4 宇宙的观测与认知

我们知道,人类生活在地球上,地球位于太阳系中,太阳系位于银河系中,银河系位于星系团中,星系团位于超星系团中,超星系团构成了宇宙。我们所在的宇宙之外到底还有什么,仍是科学界未解之谜。宇宙观测的一个重要目标是对宇宙天体的物理参数进行测量,这些参数包括亮度、温度、大小、距离和相对运动速度等。

1.4.1 宇宙的尺度

要了解宇宙的尺度,我们需要用一把“大尺子”作为标准来量度空间距离。常用的计量天体距离的单位有三种:天文单位(astronomical unit, AU)、光年(light year, l. y.)、秒差距(parsec, pc)。

天文单位是指太阳质心到地球质心的平均距离, $1 \text{ AU} = 1.495\,978\,7 \times 10^{11} \text{ m}$ 。实际上,地球绕着太阳运动的轨道为椭圆轨道,其椭圆轨道的半长轴约为 $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ 。例如,木星到太阳的距离约 5 AU,海王星到太阳的距离约 30 AU,太阳系的尺度约 10^5 AU 。

光年是指光在真空中沿直线行走一年的距离, $1 \text{ l. y.} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m} = 6.324 \times 10^4 \text{ AU}$,约为 10^{13} km 。例如,银河系的尺度范围为 10^5 光年,即 10 万光年。

秒差距是建立在三角视差的基础上,以 1 AU 为底边的等腰(或直角)三角形,当底边所对应的三角形内角大小为 $1''$ 时,这个三角形的一条边(或直角边)的长度称为 1 秒差距(pc), $1 \text{ pc} = 30.86 \times 10^{12} \text{ km} = 3.262 \text{ l. y.} = 206\,264.8 \text{ AU}$ 。

我们可以这样来形象地描述宇宙的尺度:如果将 1 光年当成 1 m 长,那么太阳(直径约为 $1.392 \times 10^6 \text{ km}$)的尺度就相当于 $0.1 \mu\text{m}$,太阳系的尺度相当于 1.58 m,银河系的尺度相当于 100 km。如图 1-4-1 所示为用对数坐标表示不同宇宙区域和天体的空间尺度。

目前,我们已经对宇宙空间有了一定认知。地球到太阳的距离为 1 AU,地球到冥王星的距离约 40 AU,太阳系的尺度约 10^5 AU 。太阳到三恒星系统“ α -半人马座”(Alpha Centauri)的距离约 4.37 光年,如果以 12 km/s 的速度在太空飞行,需要 10 万年才能到达该恒星。在距离太阳 17 光年的范围内,有 65 颗类似太阳的恒星。

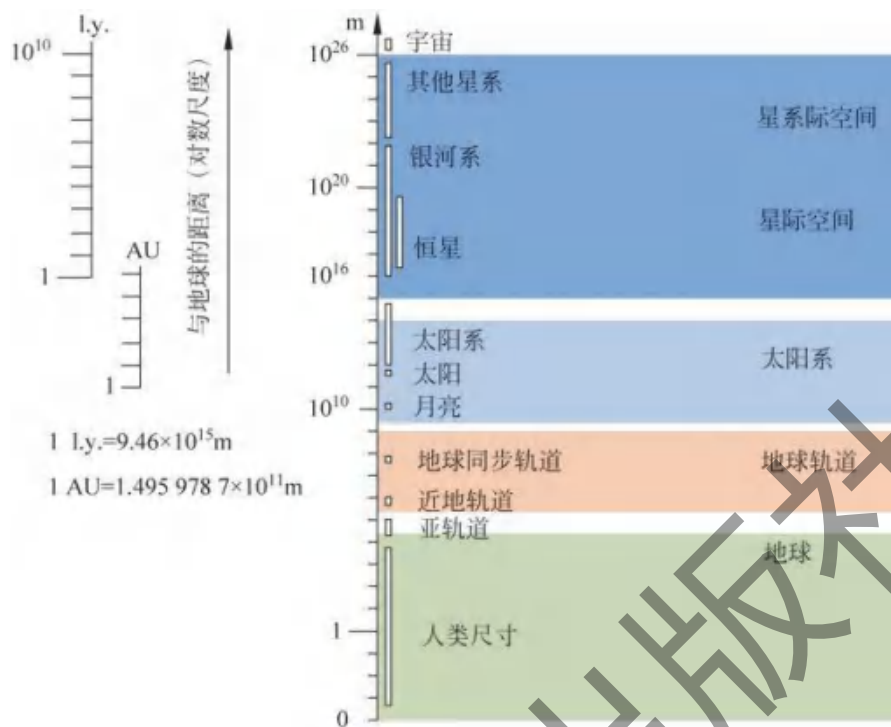


图 1-4-1 用对数坐标表示不同宇宙区域和天体的空间尺度

1.4.2 宇宙的观测

1. 星等和绝对星等

夜空中繁星点点,或明或暗,有的呈现蓝色,有的呈现红色(见图 1-4-2)。在地球上通过眼睛观测,一个晚上半天球可以看到约 3000 颗星,整个天球可以看到 6000 多颗星。



图 1-4-2 天空中闪烁的星星

公元前 2 世纪,古希腊天文学家喜帕恰斯(公元前 190—前 125)在编制星表时发现了岁差现象,并把眼睛可见的恒星按照亮度划分为 6 个等级,1 等星最亮,2 等星次之,6 等星是人的眼睛能看到的最暗的星星。用星等来表示天体相对亮暗的等级。星等的数值越小,表

示星星越亮。1850年,英国天文学家普森(1829—1891)将“星等”实现了量化,将1等星亮度定义为6等星的100倍,即星等每相差一个等级,亮度就相差 $100^{1/5} = 2.512$ 倍,此比例称为“普森比例”。星等之间的亮度可用以下公式表示:

$$\frac{L_1}{L_2} = 100^{\frac{m_2 - m_1}{5}} \text{ 或 } m_2 - m_1 = -2.5 \lg \frac{L_2}{L_1} \quad (1.4.1)$$

式中, m_1 、 m_2 分别为两颗恒星的星等; L_1 、 L_2 分别为两颗恒星的亮度。

目前,共发现1等星有22颗,2等星有71颗,3等星有190颗,4等星有610颗,5等星有1929颗,其余都是6等星及以上星等。

星等数值越大,星星越暗;星等数值越小,星星越亮;星等可以为负数。例如,北极星的 m 值为2.02,牛郎星为1,织女星为0.03,天狼星为-1.46,金星最亮时为-4.4,月亮满月时为-12.74,太阳为-26.7。目前,地面望远镜可观测到25等星,空间望远镜可观测到30等星。

绝对星等是假定把恒星放在距离地球10秒差距的地方测得的恒星的亮度,它反映了天体的真实发光本领。实际上,天体亮度与距离 r (以秒差距为单位)的平方成反比,有如下公式:

$$\frac{L_{10}}{L} = 100^{\frac{m - M_V}{5}} = \frac{r^2}{10^2} \quad (1.4.2)$$

由此可以得到

$$M_V(r) = m - 5 \lg r + 5 \quad (1.4.3)$$

式中, M_V 为绝对星等; m 为天文观测到的星等; r 为星所处的距离,单位为秒差距(pc)。

2. 恒星的温度

维恩位移定律是热辐射的基本定律之一,描述了黑体辐射光谱能量的峰值波长与热力学温度之间的关系。假设天体为黑体,根据该定律,可以得到天体的温度值,公式如下:

$$\lambda_{\max} = c/T \quad (1.4.4)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为辐射光谱能量的峰值波长, μm ; T 为黑体的热力学温度,K; c 为维恩常数,其值为 $2897 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

维恩位移定律表明,一个黑体的温度越高,其辐射光谱能量的峰值波长就越短。在宇宙中,不同恒星随表面温度的不同会呈现出不同的颜色,表面温度在30 000 K以上的呈现蓝色,随着表面温度降低依次呈现蓝白色、白色、黄色、红橙色,濒临燃尽而膨胀的红巨星表面温度只有2000~3000 K,呈现红色。太阳辐射的峰值波长为 $0.502 \mu\text{m}$,根据维恩位移定律,计算得到其表面温度为5771 K。

3. 恒星的大小

对于距离地球很近的恒星,可以通过无线电射频频延时测量距离和几何张角测量尺寸,而距离地球很远的恒星无法直接测量其大小,可以依据赫罗图进行计算。

赫罗图是以恒星的绝对星等或光度相对于光谱类型或有效温度绘制的散布图,又称光谱-光度图。它将每颗恒星绘制在一张图表上,可测量恒星的温度和光度,而这与恒星的位置无关。由此,可以得到恒星相对半径 R/R_0 (R 为恒星半径, R_0 为太阳半径)与恒星绝对星等 M_V 和表面温度 T_e 的关系如下:

$$\lg \frac{R}{R_0} = 8.49 - 0.2M_V - 2\lg T_e \quad (1.4.5)$$

1.4.3 天体距离

测量宇宙中恒星或者星系距离的方法有多种,下面主要介绍一种最基本、最可靠的方法——三角视差法。

什么是视差?我们一起来做个实验:举起你的右手,伸出大拇指,先闭上左眼用右眼看远处的物体,再闭上右眼用左眼看该物体,那么你两次看到大拇指相对其远处物体的位置是不同的,这个角度位移差称为视差,大拇指与两眼所成的角称为视差角。同时,你还会发现,大拇指距离眼睛越近,视差会越大,因此可采用视差来测量距离的远近。

三角视差法是把待测恒星视为一个特大三角形的顶点,地球绕太阳公转的轨道直径的两端视为该三角形的另外两个顶点,然后测量地球到待测恒星的视差角,再用已知的地球绕太阳公转的轨道直径,通过三角公式计算出恒星与地球的距离。

对于离我们比较近的恒星,可以采用三角视差法测量它们的距离,如图 1-4-3 所示。



图 1-4-3 恒星三角视差法测量示意图

由三角函数公式,可得

$$\sin \rho = \frac{R}{d} \quad (1.4.6)$$

式中, ρ 为视差角,单位为角秒("); R 为地球与太阳之间的距离,约为 1.5×10^8 km; d 为待测恒星离地球的距离,单位为 km。

当 ρ 很小时, ρ 以角秒表示,有 $\sin \rho = \rho$; d 的单位取 pc,则有

$$d = \frac{1}{\rho} \quad (1.4.7)$$

式中, ρ 为视差角,单位为角秒("); d 为待测恒星离地球的距离,单位为 pc。

用三角视差法测量恒星距离有一定局限性,这是由于恒星距离我们越远, ρ 就越小,实际观测中难以测定,一般认为三角视差法可以测量的最远距离约为 100 pc。对于更远恒星

的距离测量,可以采用造父变星的光度周期变化法、哈勃定律等方法。造父变星的光度变化周期与绝对星等光度之间存在线性关系,通过测得的光度变化周期可以得到绝对星等,再根据距离与绝对星等的关系式计算得到星系的距离。

1.4.4 多普勒效应和哈勃定律

1842年,奥地利物理学家和数学家多普勒(1803—1853)首先提出了多普勒效应,其主要内容是:如果光源相对于观测者在运动,那么我们观测到的光线波长就会产生变化。若光源朝着远离观测者的方向运动,则波长变长、频率变低,产生红移现象;若光源朝着靠近观测者的方向运动,则波长变短、频率变高,产生蓝移现象(如图1-4-4所示)。

波长变化 $\Delta\lambda$ 与原波长 λ 之比,与星系相对观测者的视向速度 v 与光速 c_0 之比有关。其中,当星系朝着远离观测者的方向运动时, v 为正值;当星系朝着面向观测者的方向运动时, v 为负值。利用多普勒效应,可以测量星系视线方向的相对运动速度。

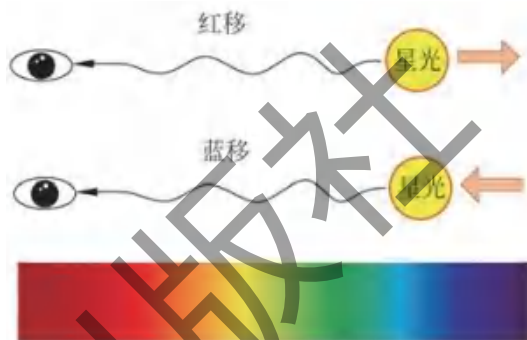


图1-4-4 多普勒红移和蓝移效应图

(1) 当视向速度 v 远小于光速 c_0 时,不用考虑相对论效应,公式如下:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c_0} \quad (1.4.8)$$

(2) 当视向速度 v 与光速 c_0 相差不太大时,需要考虑相对论效应,公式如下:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\left(1 + \frac{v}{c_0}\right)^{1/2}}{\left(1 - \frac{v}{c_0}\right)^{1/2}} - 1 \quad (1.4.9)$$

哈勃等人经过多年的天文观测,于1929年发现银河系之外的星系都呈现红移现象(除仙女系外),即星系都在“退行”远离我们而去,且星系视向退行速度与它们和星系的距离成正比,如图1-4-5所示,星系距离越远,其对应的视向退行速度越快,表现为宇宙在膨胀。因此可以得到哈勃关系式,即哈勃定律,又称哈勃-勒梅特定律,如下:

$$v = H_0 d \quad (1.4.10)$$

式中, v 为由红移现象测得的星系退行速度; H_0 为哈勃常数; d 为星系之间的距离。哈勃常数随宇宙演变而变化,欧洲航天局于2013年3月21日宣布,根据普朗克卫星的测量结果得出的哈勃常数为

$$H_0 = (67.80 \pm 0.77) \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$$

H_0 的倒数称为哈勃时间,近似等于宇宙的年龄(目前,一般认为宇宙年龄为137亿~138亿年),哈勃时间为

$$\frac{1}{H_0} = \frac{1 \times 10^6 \times 30.86 \times 10^{12}}{67.80} \text{ s} \approx \frac{30.86 \times 10^4}{67.80 \times 31.536} \text{ 亿年} \approx 144 \text{ 亿年}$$

哈勃定律是宇宙膨胀理论的基础,这种膨胀是一种全空间的均匀膨胀。因此,观察者无

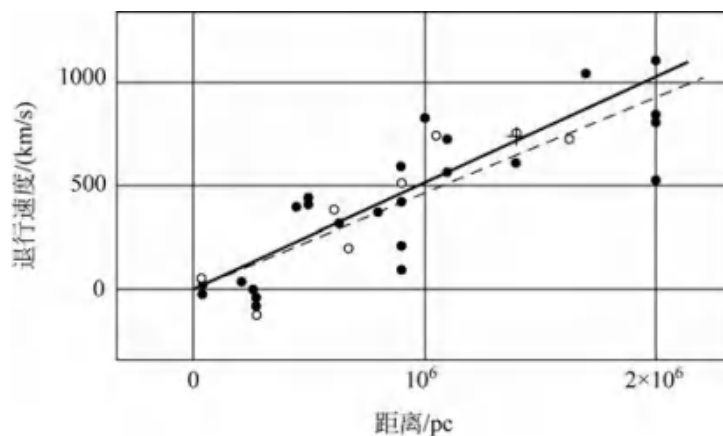


图 1-4-5 哈勃测量的星系退行速度与距离的关系

论处于宇宙空间中哪个位置,看到的宇宙都是各向均匀同性地膨胀;从任一星系来看,所有星系都以它为中心向四面散开,距离越远的星系散开的速度越快。哈勃定律原来由对正常星系观测而得,现在已应用到类星体或其他特殊星系上,它通常被用来推算遥远星系的距离。

第2章

空间环境

我们在开始任何旅行之前,常常需要先了解天气情况,以便携带与天气相适应的生活用品。同样地,我们通过观测空间环境,从而了解航天器或人类需要进行什么样的准备,以适应这个并不友好的环境。所谓环境,《辞海》中定义为围绕着人类的外部世界,是人类赖以生存和发展的社会 and 物质条件的综合体。因此,早期是没有空间环境这个概念的。

让我们回顾一下历史,早期人类是在陆地生存、生活和发展的。一直到15世纪末,以哥伦布发现新大陆和郑和下西洋为标志,人类将活动轨迹扩展到海洋上,好比《海贼王》中的路飞,开启了征服大海的历程。1903年12月莱特兄弟成功试飞了用内燃机作动力的飞机,标志着人类离开地面,进入天空。1957年10月苏联成功发射了第一颗人造地球卫星,从此人类跳出地球进入太空。

从航天学和空间科学的角度来讲,空间环境指的是人类能观测到的整个宇宙空间的环境。如果我们从地面往上来认识这个问题的话,从地面到一二十千米属于大气环境范围,也是飞机能够飞行的区域;20~100 km,各类飞行器难以长时间停留,属于临近空间的范围;100 km以上,是火箭、航天飞机、卫星的主要活动场所,即所谓的“空间环境”。如图2-1-1所示为空间分布示意图。



图 2-1-1 空间分布示意图

人们通常认为的空间环境近似于真空,但在轨道航天器所处的环境中,还包括大量的中性粒子、带电粒子、电磁辐射以及碎片尘埃等,并且它的状态并不是平静的,而是伴随着各种形态、各种时间尺度的扰动。空间环境扰动的源头主要是太阳活动,太阳活动直接影响空间环境,各种太阳活动爆发产生的高能辐射和粒子流都能引发地球附近空间环境效应,每一种环境因素都有可能对在轨航天器产生潜在危害,造成不可预知的后果。

2.1 真空和微重力环境

随着航天器运行高度的增加,大气压强的不断下降,万有引力的不断减弱,人们将面临进入太空的第一个难题——真空和微重力环境。在距离地表 100 km 的高度上,周围环境大气压强约比海平面大气压强低 6 个数量级,相对于地表而言,空间环境基本上是类真空环境。在日常生活中,我们对“真空”并不陌生,比如双层玻璃的水杯,其中间的真空隔层对杯子里的水具有“绝热”效果而使杯内的水保温;食物包装抽真空处理,以延长食物的保质期等。在太空的类真空环境中同时存在微重力环境,“漂浮的水滴、拧不干的毛巾、呈近似圆形的蜡烛火焰……”这些我们在空间站实验中看到的神奇现象,让我们对太空的神秘又多了些许向往。那么太空的真空和微重力环境会对我们的航天活动带来哪些影响? 又是什么原因导致这些神奇现象存在的呢?

2.1.1 真空中的紫外线

生活中,我们经常在太阳下活动,时间长了皮肤就会晒黑,这是由于被太阳光中紫外线照射的结果。实际上,只有 21% 的太阳光能不受阻碍地穿过地球大气层,而其中绝大部分紫外线能够被大气层中的臭氧层吸收,因此大部分人对紫外线只是停留在晒黑皮肤的认识上。

在太空环境中,人类如果暴露在紫外线的照射下,恐怕不只是晒黑皮肤的问题。紫外线在太阳光中的占比很低,仅为 5% 左右,但是能量却很高。在太空中,由于失去了大气中臭氧层对紫外线的吸收,在轨航天器完全暴露在太阳紫外线照射之中。紫外线中单个光子具有的能量足以破坏航天器部分物质的有机化学键。因此,航天员出舱活动必须穿着宇航服加以防护。单个光子的能量与它的波长 λ 或频率 f 有关,其公式为

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1.1)$$

式中, h 为普朗克常量,其值为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速,其值为 $2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

在轨航天器的一些高分子聚合物制品一旦暴露在紫外线辐射中,就会引发聚合物材料自我氧化、降解,破坏聚合物分子的化学键。从表面观察,高分子聚合物制品颜色等外观发生改变;从力学特性分析,高分子聚合物制品脆化,力学性能恶变,影响使用寿命。

为了阻挡紫外线辐射对航天器的伤害,同时考虑真空、温差等空间环境因素,对航天器的防护提出了极其苛刻的要求。科学家们尝试了很多方法,终于为航天器找到一件合适的“保护衣”——一种聚酰亚胺的高性能聚合物材料与金属材料复合而成的薄膜,如图 2-1-2 所示。它的外观看起来像是为航天器包裹了一层金箔,但实际性能却远超人们的想象。这层薄膜对紫外线有极高的反射率,并具有超强的耐热性、超宽的温度适应范围,使它成为航天器保护衣材料的不二之选。



图 2-1-2 卫星“保护衣”——聚酰亚胺薄膜

2.1.2 真空中的分子污染

当航天器在类真空环境中运行时,其挥发性物质会摆脱物体间的吸引力束缚,进入空间环境中,即航天器中许多物质会发生“真空出气”现象,从而使得质量减少。即使运载火箭携带的航天器表面很干净,但在发射和在轨运行过程中,由于存在“出气”过程,航天器自身也会成为一种污染源。几乎所有的材料都会有一定量的挥发性物质附着在其表面,或从材料内部扩散出来,进而散发到周边环境,它们主要来源于制造、加工以及清洗等工艺过程。这些挥发性物质会脱离束缚,以分子形式逸出,进入航天器运行轨道,可能撞击并附着在航天器表面,虽然每次只沉积 1 个分子,厚度为数十埃,但随着时间的流逝,太阳能电池板、光学镜头等航天器敏感部件表面沉积了大量分子,会使得航天器性能严重下降,这种类型的污染称为分子污染。

1. 材料“出气”

材料“出气”是指材料随时间增加不断释放气体分子的过程。在温度、体积一定的情况下,可以通过对材料加压来测得材料出气率 Q 。 Q 的单位为:(压力增量单位 $\times$ 真空室体积单位)/(样品表面积单位 $\times$ 真空室中测试时间单位),即 $(\text{Pa} \cdot \text{m}^3)/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,该单位等同于国际单位制中的出气单位 W/m^2 。根据理想气体状态方程 $P = NkT$ 可知,在温度已知的情况下,气体的分子数与压强有关。因此,材料出气率 Q 可表示为

$$Q = NkT \quad (2.1.2)$$

式中, N 为单位面积、单位时间的出气分子数,单位为 $1/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Q 为出气率,单位为 W/m^2 ; k 为玻尔兹曼常数,其值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为温度,单位为 K。

因此,单位面积、单位时间的出气质量 m [单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 可以表示为

$$m = \frac{MN}{N_A} = \frac{QM}{kTN_A} \quad (2.1.3)$$

式中, N_A 为阿伏伽德罗常量,其值为 $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; M 为分子量,单位为 kg/kmol 。

2. “出气”分子传递

物体表面的污染速率不仅与自身出气源的出气速率有关,还与通过视线传递方式污染的其他出气源的出气速率有关。假设一个平面,面积为 ΔA_1 , 它向空间发出的出气率为 $I_1 (\text{W}/\text{m}^2)$, 如图 2-1-3 所示,根据第一个平面 ΔA_1 与第二个平面 ΔA_2 的位置计算,从第一个平面辐射出的能量会有多大比例到达第二个平面? 这与两个平面间的几何关系有关,通过对平面间几何视角因子进行计算可以得出。

ΔA_1 射向 ΔA_2 的能量传递速率为

$$\Delta q_1 = I_1 \cos \theta \Delta A_1 \quad (2.1.4)$$

式中, θ 为垂直于 ΔA_1 的法线与两平面中心连线的夹角。

ΔA_2 得到的能量大小与夹角 φ (ΔA_2 的垂直法线与两平面中心连线的夹角) 相关,即

$$\Delta \omega_2 = \frac{\cos \varphi \Delta A_2}{r^2} \quad (2.1.5)$$

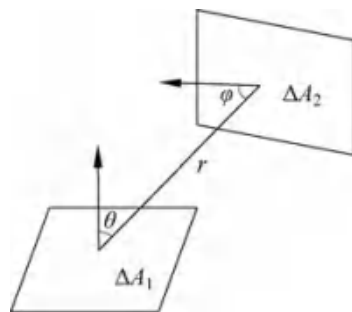


图 2-1-3 几何视角因子

式中, r 为平面中心之间的连线距离。

那么, 由 ΔA_1 辐射到达 ΔA_2 的能量大小为

$$\Delta q_{12} = I_1 \frac{\cos\theta \cos\varphi}{r^2} \Delta A_1 \Delta A_2 \quad (2.1.6)$$

出气源可能是一个较大的平面, 如航天器的太阳能面板; 也可能是很小的局部区域, 如航天器的某个电子元件。假设火箭携带两个以上航天器进入太空, 那么其中的一个航天器就可能对其他航天器带来污染, 使其性能下降。任何可能“出气”的材料, 本身就是一种潜在的污染源。

2.1.3 微重力

重力是由于地球的吸引而使地球表面的物体受到的力。它既看不见也摸不着, 但又实实在在存在, 熟透的苹果因它从枝头掉落, 江河瀑布因它流向低处, 重力的存在使得地球上的物体都存在垂直向下、指向地心的趋势。如果物体脱离了重力的作用, 又会是什么样子呢?

太空中微重力环境的主要特点就是失重。由于缺乏重力的影响, 航天员犹如练就绝世武功一般, 神奇地漂浮在太空中。如果想要行走或移动, 只能借助外力来改变状态。

1. 航天器轨道中的重力

根据万有引力定律、牛顿第二定律可知, 航天器在地球表面所受的重力约等于航天器与地球间的万有引力, 如下:

$$\frac{GMm}{R^2} = mg \quad (2.1.7)$$

式中, M 为地球质量, 单位为 kg; m 为航天器质量, 单位为 kg; R 为地球半径, 单位为 m; G 为万有引力常量, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$; g 为地球表面重力加速度, 单位为 m/s^2 。

假设航天器距离地球表面高度为 h , 则有

$$\frac{GMm}{(R+h)^2} = mg' \quad (2.1.8)$$

式中, g' 是在轨航天器高度位置的重力加速度。由此可知, 航天器轨道高度加速度的变化与航天器距离地面高度的变化有直接关系:

$$\frac{g'}{g} = \frac{R^2}{(R+h)^2} \quad (2.1.9)$$

我们知道, 地球平均半径约为 6371 km, 而空间站轨道高度约为 400 km, 由此可得

$$\frac{g'}{g} = \frac{R^2}{(R+h)^2} = \frac{6371^2}{(6371+400)^2} \approx 0.885$$

即空间站轨道高度的重力加速度 g' 约为地球表面重力加速度的 88.5%。

地球引力随物体与地球之间距离的增加而减弱, 与距离的平方成反比。若要达到 $10^{-6}g$ 的微重力环境, 须将物体放在地球半径 1000 倍距离的高空, 因此空间中不存在所谓的“零重力”。