普通高等教育“十五”国家级规划教材

基础天文学

刘学富　主编

FUNDAMENTAL ASTRONOMY FUNDAMENTAL ASTRONOMY



FUNDAMENTAL ASTRONOMY FUNDAMENTAL ASTRONOMY

FUNDAMENTAL ASTRONOMY FUNDAMENTAL ASTRONOMY

高等教育出版社

FUNDAMENTAL ASTRONOMY FUNDAMENTAL ASTRONOMY

FUNDAMENTAL ASTRONOMY FUNDAMENTAL ASTRONOMY

FU STRONOMY FUNDAMENTAL ASTRONOMY

ISBN 7-04-014441-7

9 787040 144413 >

定价 35.10 元

普通高等教育“十五”国家级规划教材

基础天文学

刘学富　主编

张燕平　李志安　杨静　编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材。本书从浅入深，由近及远，系统地、科学地讲解了天体的运行规律；太阳和太阳系；恒星物理量的测量；双星和变星；中子星、白矮星和黑洞；恒星的形成和演化；美丽的银河系和多姿多彩的河外星系，及浩大的星系集团；并介绍了宇宙的演化与未来，以及最新的天文研究的成果和空间探测的发现。

本书除了具有时代性、科学性和系统性以外，还具有实践性。它提供了19个“天文观测与实验”的示例，并列有大量的例题和习题。书后附有一张光盘，内有书中所有插图的彩色图、实验以及天文网上资源。

本书适合高等院校理科和文科的学生学习。书中注有*的章节，天文专业学生必读、非天文专业的学生可以选读。

图书在版编目(CIP)数据

基础天文学/刘学富主编 .—北京：高等教育出版社，2004.7

ISBN 7-04-014441-7

Ⅰ.基 … Ⅱ.刘 … Ⅲ.天文学-高等学校-教材

Ⅳ.P1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第034786号

策划编辑 陶 铮 责任编辑 王文颖 封面设计 刘晓翔 责任绘图 宗小梅
版式设计 张 岚 责任校对 杨凤玲 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 http://www.hep.edu.cn
http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京印刷二厂

开 本 787×960 1/16
印 张 26
字 数 480 000

版 次 2004年7月第1版
印 次 2004年7月第1次印刷
定 价 35.10元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前　言

浩瀚的宇宙魅力无穷，它吸引着无数的科学志士为之求索探秘。千百年来，人们为了认识天体和宇宙的奥秘，不屈不挠地探求着。伟大的波兰天文学家哥白尼有一句名言："人类的天职是勇于探索"，中国古代诗人屈原说过："路漫漫，其修远兮，吾将上下而求索"，可见探索宇宙是人类永恒的科学主题。正是人类一代接一代地探索和辛勤地观测研究，谱写了源远流长的天文学史。如今人类的思想和行动早已飞出地球和太阳系，正迈着时代的步伐向宇宙更深层次进军，使天文学充满了生机和活力。新千年要求有勇于与天奋斗、开拓进取的新人才，我们教师有责任为他们在前进的道路上准备好精神食粮——教科书。

《基础天文学》入选普通高等教育"十五"国家级规划教材，它是现代天文学的基础教材，它将带你敲开现代天文科学殿堂的大门。

本教材从浅入深，由近及远，系统地讲解了天体的运转、太阳和太阳系、美丽银河系和多姿多彩的河外星系及浩大的星系集团，并讲解了天体与宇宙的演化及宇宙的未来，介绍了最新的科学成果与探测发现。

本教材的特点除了具有时代性、科学性和系统性以外还具有实践性，它提供了十九个"天文观测和实验"的示例，这不仅对大学生学习有益，而且对广大的天文爱好者进行天文观测也很有帮助。"天文观测和实验"的内容是根据北京师范大学天文系的望远镜和仪器情况编写的，不同的高校可根据自己的望远镜和设备选做部分实验。

书中还列有大量的例题和习题，其中包括一些历届国际天文奥林匹克竞赛的考题，它有益于教学与学生的自学，对那些准备参加国际天文奥赛的青少年也是非常有帮助的。

本书作为基础天文教材适合于高等院校各类学科(理科和文科)的大学生学习。书中注有 * 的章节，为天文专业学生必读的知识，其他各学科的学生可以选读。

书后附有一张光盘，呈现给读者一些最新探测的宇宙精彩图像，适合制作天文教学的电子幻灯片，可以帮助教师教学，也有助于学生自学和理解。光盘中的附录给出了"全天 88 个星座表"、"梅西叶星表"及"球面三角学的基本知识"，并提供了"天文网上资源"的网址以便于大家从网上进一步了解当今天文观测的新动态，这也是从事现代天文科学研究所需要的。

本书的主要内容是由刘学富教授编著，其中有关"天文时间系统"与"地球宇

宙环境、地震、厄尔尼诺现象”等章节由李志安教授编写。“天文观测和实验”的内容，主要由张燕平副教授和杨静副教授编写，光盘由张燕平副教授精心从网上选图制作，全书由刘学富教授统编完成。

北京大学天文系吴鑫基教授在百忙中对此书进行了细致的审阅，并提出了宝贵的意见。北京师范大学姜碧沩教授和陈阳博士对本书也提出了宝贵的修改意见，在此我们一并表示衷心的感谢！

本书中的不妥之处恳请专家和读者指正。

此书献给不畏艰险，努力攀登科学高峰，探索宇宙的新秀们！

作者 2004 年 1 月

目　录

绪论 …… 1

第一篇　天文观测的基础知识 …… 7

第一章　星空运转与周日视运动 …… 9

第 1 节　星座与四季星空 …… 9

第 2 节　天体的周日视运动 …… 11

第 3 节　太阳的周年视运动 …… 13

第 4 节　天体的亮度和视星等 …… 16

习题 …… 18

第二章　天球和天球坐标系 …… 19

第 1 节　天球和天球坐标系 …… 19

*第 2 节　天球坐标系的变换 …… 22

习题 …… 24

第三章　天文观测时间系统 …… 26

第 1 节　平太阳时、世界时、区时与恒星时 …… 26

*第 2 节　原子时、历书时和力学时 …… 30

第 3 节　历法与节气 …… 32

*第 4 节　天体的出没时刻 …… 35

习题 …… 37

第四章　天文望远镜 …… 39

第 1 节　当代天文学望远镜 …… 39

第 2 节　天文光学望远镜系统 …… 42

第 3 节　天文光学望远镜的光学性能 …… 44

*第 4 节　光学望远镜的光学像差 …… 47

*第 5 节　光学望远镜的机械装置 …… 48

第 6 节　射电望远镜 …… 50

第 7 节　空间望远镜与空间探测器 …… 53

习题 …… 56

第二篇　我们的太阳系 …… 59

第五章　太阳系大家族 …… 61

第 1 节　太阳系大家族 …… 61
第 2 节　行星的视运动 …… 63
第 3 节　行星的轨道运动定律 …… 65
*第 4 节　行星运动轨道要素和运动方程 …… 68
第 5 节　太阳系的形成和演化 …… 72
习题 …… 75
第六章　水星与金星 …… 77
第 1 节　水星 …… 77
第 2 节　金星 …… 79
习题 …… 81
第七章　地球与月球 …… 83
第 1 节　地球在太阳系中得天独厚 …… 83
第 2 节　地球的物理特征与结构 …… 84
第 3 节　地球的内部构造 …… 88
第 4 节　磁层与辐射带 …… 90
*第 5 节　地球自转 …… 91
*第 6 节　地球内部的地极移动 …… 94
第 7 节　地球公转与四季 …… 95
*第 8 节　地球轨道参数变化 …… 99
*第 9 节　地球的沧桑演变 …… 100
*第 10 节　厄尔尼诺现象 …… 103
*第 11 节　地震 …… 105
*第 12 节　宇宙环境对气候的影响 …… 109
第 13 节　保护环境珍惜地球 …… 114
第 14 节　月球 …… 115
习题 …… 121
第八章　地外行星 …… 123
第 1 节　火星 …… 123
第 2 节　木星 …… 127
第 3 节　土星 …… 132
第 4 节　天王星 …… 134
第 5 节　海王星 …… 136
第 6 节　冥王星 …… 138
习题 …… 140
第九章　太阳系的小天体 …… 142

第 1 节　小行星 …… 142
第 2 节　彗星 …… 144
第 3 节　流星和流星雨 …… 148
第 4 节　陨石和陨石雨 …… 151
习题 …… 156
第十章　日食与月食 …… 158
第 1 节　月食 …… 158
第 2 节　日食 …… 160
习题 …… 163
第三篇　太阳和恒星世界 …… 165
第十一章　太阳是一颗主序星 …… 167
第 1 节　太阳的物理特征 …… 167
第 2 节　太阳的内部 …… 170
* 第 3 节　太阳的能量来源 …… 171
* 第 4 节　太阳的空间探测 …… 174
第十二章　太阳大气 …… 177
第 1 节　光球 …… 178
第 2 节　太阳的光球光谱 …… 179
第 3 节　色球 …… 181
第 4 节　过渡区和日冕 …… 182
第 5 节　太阳风 …… 184
第 6 节　太阳磁场 …… 185
习题 …… 187
第十三章　太阳活动 …… 189
第 1 节　太阳黑子活动 …… 189
第 2 节　色球活动 …… 191
第 3 节　日冕活动 …… 194
* 第 4 节　日震 …… 195
第十四章　日地关系 …… 197
第 1 节　太阳是一个超级实验室 …… 197
第 2 节　太阳对地球环境的影响 …… 198
* 第 3 节　太阳对地球气候与地震的影响 …… 200
习题 …… 201
第十五章　恒星的测量 …… 203

第 1 节　恒星的距离 …… 203
第 2 节　恒星的绝对星等与光度 …… 205
*第 3 节　恒星的辐射与温度 …… 206
第 4 节　恒星的光谱 …… 210
第 5 节　恒星的大小 …… 215
第 6 节　恒星的质量 …… 216
第 7 节　恒星的运动 …… 219
*第 8 节　恒星的自转 …… 222
第 9 节　恒星活动与能源 …… 223
习题 …… 226
第十六章　恒星的形成和演化 …… 228
第 1 节　化学元素的形成 …… 228
第 2 节　原恒星 …… 230
第 3 节　主序前星 …… 231
第 4 节　主序星 …… 232
第 5 节　红巨星 …… 234
第 6 节　恒星的归宿 …… 236
习题 …… 238
第十七章　白矮星、中子星和黑洞 …… 240
第 1 节　白矮星 …… 240
第 2 节　中子星 …… 243
第 3 节　黑洞 …… 250
习题 …… 256
第十八章　双星 …… 257
第 1 节　目视双星 …… 257
第 2 节　食变双星 …… 260
第 3 节　分光双星 …… 261
*第 4 节　双星的洛希模型 …… 263
*第 5 节　色球活动双星 …… 265
*第 6 节　X 射线双星 …… 265
*第 7 节　密近双星的演化 …… 266
习题 …… 268
第十九章　变星 …… 270
第 1 节　变星的分类 …… 270
第 2 节　脉动变星 …… 271

第 3 节　激变变星 …… 276
习题 …… 279
第二十章　超新星 …… 280
第 1 节　超新星的分类 …… 280
第 2 节　著名的超新星 …… 281
*第 3 节　超新星的爆发机制 …… 286
习题 …… 287
第四篇　银河系与河外星系 …… 289
第二十一章　银河系 …… 291
第 1 节　银河系的外貌 …… 291
第 2 节　银河系里的恒星族 …… 293
第 3 节　星团 …… 294
第 4 节　银河系的质量 …… 296
第 5 节　银河系的较差自转 …… 297
第 6 节　银河系的旋臂 …… 300
第 7 节　银河系的中心 …… 304
第 8 节　银河系的形成和演化 …… 306
习题 …… 307
第二十二章　河外星系 …… 309
第 1 节　星系的形态分类 …… 309
第 2 节　星系的红移 …… 316
第 3 节　星系的光度 …… 318
*第 4 节　星系的质量 …… 320
第 5 节　星系的形成和演化 …… 322
习题 …… 326
第二十三章　活动星系 …… 327
第 1 节　类星体 …… 327
第 2 节　赛弗特活动星系 …… 337
*第 3 节　蝎虎座 BL 天体 …… 340
*第 4 节　其他活动星系 …… 342
*第 5 节　活动星系核的统一模型 …… 344
习题 …… 348
第二十四章　星际介质 …… 349
第 1 节　星际消光 …… 349

第 2 节 气体星云 …… 350
* 第 3 节 宇宙线和星际磁场 …… 357
习题 …… 358
第二十五章 星系群与超星系团 …… 359
第 1 节 星系群 …… 359
第 2 节 星系团与超星系团 …… 360
* 第 3 节 暗物质 …… 364
第五篇 膨胀的宇宙与宇宙中生命的探寻 …… 367
第二十六章 宇宙学 …… 369
第 1 节 中国古代宇宙观 …… 369
第 2 节 欧洲宇宙学的发展 …… 371
第 3 节 现代宇宙学的观测基础 …… 372
* 第 4 节 现代宇宙学 …… 374
第 5 节 标准宇宙学——宇宙大爆炸模型 …… 377
第 6 节 宇宙演化的简史 …… 381
第 7 节 宇宙的年龄与未来 …… 384
习题 …… 387
第二十七章 茫茫宇宙觅知音 …… 388
第 1 节 太阳系的生命探索 …… 388
第 2 节 银河系里的生命之光 …… 389
习题 …… 396
附录 常用天文、物理常量 …… 398
参考文献 …… 399

光盘目录

使用说明

天文彩色插图

天文观测与实验

实验一　天球仪的使用

实验二　认识星空

实验三　天文年历、星表、星图和星图软件的使用

实验四　流星和流星雨的观测

实验五　天文望远镜的使用与光学性能的测定

实验六　子午线的测定

实验七　月球的白光照相

实验八　太阳黑子的投影观测及数据处理

实验九　太阳光球光谱的拍摄与证认

实验十　恒星的光谱分类

实验十一　目视双星的目视观测

实验十二　目视双星的 CCD 观测

实验十三　变星的光电测光

实验十四　星系的哈勃分类

实验十五　河外星系红移的测定

实验十六　CCD 性能指标的测试

实验十七　星系和星云的 CCD 成像观测

实验十八　大气消光的光电观测

实验十九　大气消光的 CCD 观测

附录

附录一　全天 88 个星座表

附录二　梅西叶天体表

附录三　球面三角基本公式

附录四　天文网上资源

注：* 表示天文知识的深化内容，适合天文专业学生学习，其他理科与文科的学生可以选学。

此书附教学资料光盘一张，内容包括：以上 19 个天文观测与实验的教材、配合教学的天文彩色插图和附录。

绪　论

天文学是一门研究天体和宇宙的科学，它研究天体的分布、位置、运动规律、化学组成和物理状态以及天体和宇宙的结构和演化。天文学以观测的天体信息和实际探测为基础，是一门古老而又富有生命力的科学。在源远流长的天文学史的长河中，天文学从诞生到发展成现代天文学，每次巨大的飞跃，都离不开社会生产和生活的需要，都伴随着科学理论的创新与科学技术的革新。

古代，人类为了生存而发展农、牧业生产，在与大自然做艰苦卓绝的斗争中很早就开始了观察天象。恩格斯在谈到自然科学的发展时说过："首先是天文学——游牧民族和农业民族为了定季节，就已经绝对需要它。"在古埃及，人们很早就把天体的出没规律与尼罗河河水涨落及泛滥的关系结合在一起。在中国、印度、巴比伦、希腊、雅典这些古代文明发达的地区，早在几千年前人们就辛勤地观察天象，制定历法，指导农、牧业生产，同时创造了古代天文学的辉煌。

17 世纪欧洲文艺复兴时期，以哥白尼、开普勒、牛顿为代表的科学家把天文学推向了新的里程。伴随着欧洲工业革命，照相术、光谱学技术等应用到天体的光度测量和光谱分析中，从而诞生了天体物理学。20 世纪初，随着高速发展的电子技术，诞生了射电天文学，并促成了 60 年代天文的四大发现，即发现了类星体、脉冲星、星际分子与宇宙微波背景辐射。

在当代，迅速发展的新兴高科技，给天文学注入了新的活力，带来了蓬勃发展的新局面。地面上大望远镜，空间望远镜及宇宙飞船，使人类可以探测到宇宙更深层次的奥秘，给人类带来一次次的惊喜和新的发现。比如发现了许多刚刚诞生的幼年恒星，许多正在形成的星系，有的星系之间正发生着激烈碰撞与吞并，宇宙中有宏伟的"长城"和大吸引体等大尺度结构。人类已实现了"空中行走"和"建造空中实验室"的梦想，正在坚持不懈地对宇宙的更深层次、特殊致密的天体和宇宙中的暗物质和暗能量等进行进一步的探测研究，并计划开拓太阳、月球、火星等天体能源和资源的利用，总之，人类在 21 世纪将使天文学有新的飞跃，再铸天文学的辉煌。

一、天文学的分支科学

天文学主要有三个分支学科：天体物理学、天体测量学和天体力学。现代又发展了空间天文学和高能天体物理学等。

1. 天体物理学

天体物理学主要是应用物理学的理论、技术和方法研究天体的物理状态(如大小、质量、温度、压力及密度等)、表面特征、结构、化学组成以及形成和演化的科学。天体物理学又分为理论天体物理和实测天体物理。

理论天体物理学以广义相对论、等离子体物理、磁流体力学和气体动力学为理论基础研究恒星大气及恒星、星系的结构和演化,宇宙的演化等。按照研究的对象又分为太阳物理学、恒星物理学、恒星天文学、星系天文学、天体演化学、宇宙学等。

实测天体物理学是利用望远镜、辐射探测器和高能粒子探测器等接收天体的电磁辐射和微粒流辐射进行多波段的测光、成像和偏振观测研究,以及利用天体光谱仪进行天体的光谱分析了解天体的化学组成和化学丰富度及视向速度、自转速度和活动性等。当今,实测天体物理学已跨入了全波段(从γ射线、X射线、紫外辐射、光学、红外到射电波段)和全方位(地面、空间)观测研究的新时代。在天文观测仪器的分布上,形成了地面、空间立体分布,联合观测的新局面。

2. 天体测量学

天体测量学主要是研究如何精确测定天体的位置和运动,建立和维持基本参考系的坐标系,确定地面点的坐标以及提供精确的地球自转参数(地极坐标和标准的时间)服务。目前,天体测量学已从传统的地面光学测量发展到利用人造卫星激光测距(LSR)、激光测月(LLR)、甚长基线干涉测量(VLBI)、全球定位系统(GPS)以及空间技术,定位精度达到万分之一角秒,空间至地面的距离测量精度达到厘米级。基本参考系由已有传统的静态恒星参考系发展到动力学参考系与以遥远的河外天体为基准的射电参考系。新兴的天文地球动力学,研究地球的自转和地壳运动,也属于天体测量学的范畴。

3. 天体力学

天体力学主要研究天体运动的动力学问题,包括天体的力学运动和形状。天体力学的理论基础是常规运动速度下的牛顿力学和接近光速的狭义相对论和广义相对论。天体力学采用定性理论、摄动理论和数值方法确定天体的运动和轨道变化等,计算彗星、小行星的轨道,预报日月食,预报太阳系内天体的碰撞事件等,还应用于人造天体的轨道设计和监测。恒星动力学、星系动力学等也属天体力学。

4. 高能天体物理学

在空间探测的基础上综合研究天体的X射线、γ射线辐射、中微子和宇宙射线的天文分支科学叫高能天体物理学。X射线辐射是天体的主要的特点之一,遍及天体的各个层次。只要有高温、高能粒子存在就会产生X射线辐射。它研究的对象有主序星、超新星及遗迹、致密星、X射线双星、黑洞、γ射线暴、星系、星系团、类星体及宇宙X射线背景等。专门研究天体宇宙中的中微子叫中微子

天文学，也属于高能天体物理学。

二、宇宙天体的层次

我们生活在地球上，地球在宇宙中是太阳的一颗行星，它的直径约 1.274×10^4 km，是宇宙间尺度很小的天体。太阳是离地球最近的恒星，它的直径约 1.392×10^6 km。太阳以强大的吸引力维系着整个太阳系。在它引力作用下，太阳系的九大行星：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星以及它们的卫星、成千上万的小行星、彗星和无数流星体及弥漫的星际物质都围绕着太阳运转，组成了太阳系。

太阳系位居于银河系的一个旋臂的边上，距离银河系中心约 2.5×10^4 l.y.（光年），围绕着银河中心旋转，同时还缓慢地穿行于银道面及银河系旋臂之间。

银河系里大约有 3 000 亿颗恒星，还有许多光变特殊的变星、致密天体（中子星、白矮星和黑洞）、星云及无数的星际物质和暗物质，所有这些组成了我们美丽的银河系。银河系内的银河星团也叫疏散星团，它由十几颗到几千颗恒星聚集组成。银河星团大多分布在银道面附近，结构比较松散，成员星比较年轻。而由成千上万颗星组成的球状星团包含大量的老年星。除个别星团以外，大多数球状星团离太阳系较远。

银河系内的所有成员都围绕着银河系的中心旋转，它以特有的频率，不停地旋转，同时还以 21 km/s 的速度朝着麒麟座的方向飞驰。银河系是一个普通星系，它的范围约有 16 万光年。

在辽阔无垠的宇宙中，我们的银河系只是“沧海一粟”。除了银河系以外还有约 1 250 亿以上的千姿百态的河外星系（包括河外星云）。在河外天体中有正常的星系；也有激烈活动的活动星系（又称活动星系核），例如，类星体、赛弗特星系和蝎虎座 BL 天体等。

星系有成群合伙的倾向，有的组成双重星系，有的组成多重星系。我们的银河系与大、小麦哲伦云及比邻星系一起组成了四重星系。近年观测发现，一些星系互相碰撞，大星系会吞食质量小的星系，形成特大星系。我们的银河系、仙女座大星云及大、小麦哲伦云和比邻星系等 35 个星系组成了本星系群，其成员星系之间的距离远远大于星系的尺度。比星系群更大的有星系团和超星系团。包括银河系在内的星系团叫本星系团。离银河系最近的星系团是室女星系团，此外还有后发星系团、英仙星系团和半人马星系团等。许多星系又组成特大的超星系团。这些星系团和超星系团是宇宙的大尺度结构。现代在宇宙中还发现有链状结构、大空洞和“宇宙长城”等大尺度结构。

目前，用最大的望远镜和强有力的观测设备所能探测到的最遥远的天体离我们大约有 120 亿～200 亿光年。我们观测的宇宙至少已诞生了 120 亿年以

上,但是在漫长的宇宙演化史中,它还很年轻,依然是"风华正茂",魅力无穷。

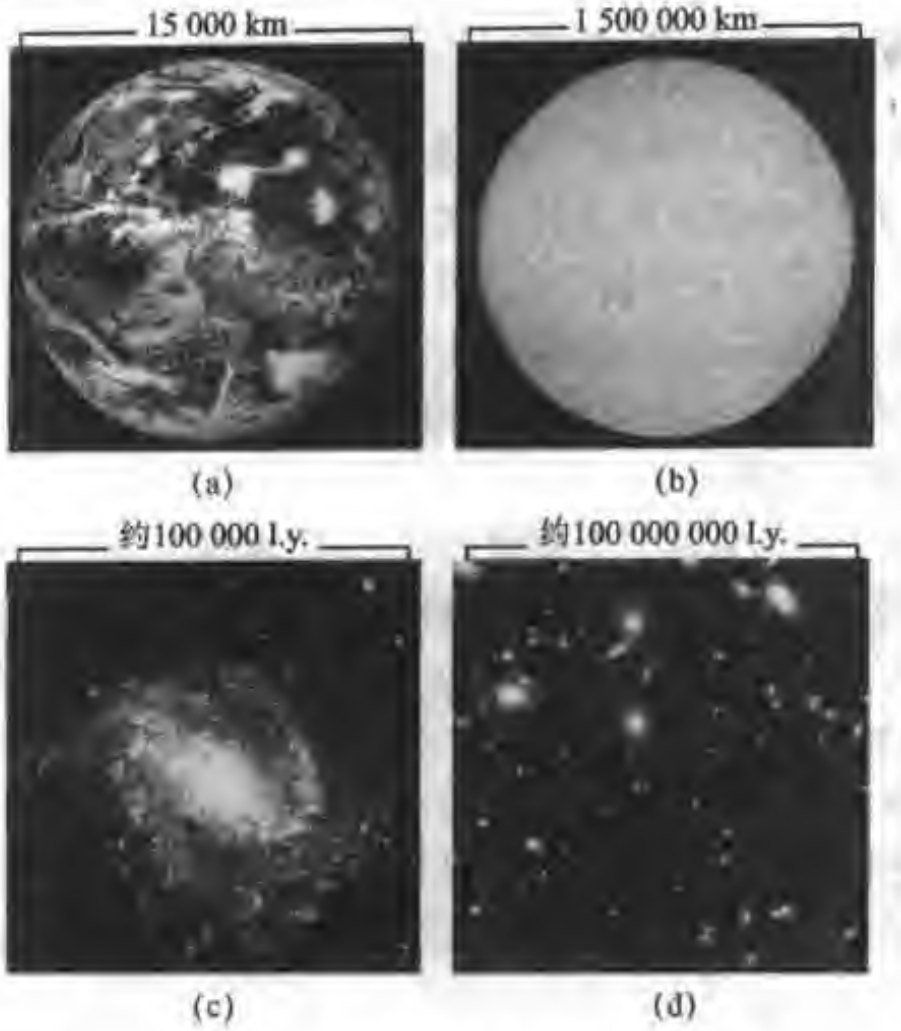


图 0.1 宇宙的层次和天体的尺度

(a)地球 15 000 km;(b)太阳 1.5×10⁶ km;(c)星系 1×10⁵ l.y.;(d)星系团 1×10⁸ l.y.

表 0.1 列出了一些典型的、不同层次的宇宙天体的质量和尺度。

表 0.1 不同层次的宇宙天体的质量和尺度

天 体	质量/$m_\odot$	尺度
恒星	1	7×10^5 km
星团	$10^4\sim10^7$	100 pc
星系	$10^8\sim10^{13}$	100 kpc
星系群	10^{14}	1 Mpc
星系团	10^{15}	3 Mpc
超星系团	10^{16}	10 Mpc
大尺度结构	10^{17}	10~100 Mpc
宇宙空隙	0	10~100 Mpc

三、中国古代天文学的辉煌成就

古代,世界上最早的文明发源地:两河流域(发源于今土耳其境内的幼发拉

底河和底格里斯河，向东流入波斯湾）、古埃及、古希腊、古中国、古印度和古阿拉伯等，都是天文学最早发展的地区。中国有着悠久的文明史，几千年之前由于农、牧业和社会生活的需要，人们就开始观察日、月、星辰，研究它们的运动规律，记录了大量而重要的天象，积累了极其宝贵的天文资料，为近代天文学的发展奠定了坚实的基础。

中国有世界上最早、最丰富的天象记载，有悠久的天文观星台，创造了许多精致的天文观测仪器，制定了精确的天文历法，提出了朴素的宇宙理论，涌现出了许多杰出的天文学家。世界上最早、最丰富的哈雷彗星观测记录是《春秋左传》的记载。从公元前 240 年到公元 1910 年哈雷彗星的 29 次回归在中国都有详细记录，它成为哈雷确定这颗彗星回归周期的重要依据。我国有世界最早的日食和黑子记录，1054 年的超新星爆发记载，至今为全世界引用。

早在公元前 200 年我们的祖先就通过恒星位置的观测编著了星表，绘制了星图。著名的苏州石刻天文星图是世界上最古老的星图。

中国历法的研究有悠久的历史，除了测算日、月、年和天象的对应规律以外还推算日食、月食及水星、金星、火星、木星和土星的出没动态等。

我们的祖先还发明、创造了各种天文观测仪器，从利用日影记时的圭表、日晷，测量天体位置的浑仪（图 0.2）和简仪，到演示天体视运动的浑象仪；从单一功能的观测仪器，到宋代苏颂等人创制的集观测、演示、报时于一体的水运仪观象台，无不显示出我们祖先非凡的想像力和创造力。



图 0.2　中国古代天文仪器——浑仪，现陈列在南京紫金山天文台

今日仍巍然屹立在河南登封的观星台是世界上最古老的天文台。明、清两代建立的规模宏伟、仪器众多的北京古观象台风韵犹存。我们的祖先创造了古代天文学的辉煌。

21 世纪，我们新一代的人应当继承和发扬祖先的光荣传统，担起重铸天文辉煌的重任。

第一篇

天文观测的基础知识

第一章

星空运转与周日视运动

深邃的夜空，繁星闪烁着诱人的晶莹之光，仿佛是一个缀满宝石的迷宫，那一颗颗亮星像宝石一样晶莹剔透，那个个星座如悬挂在夜空中的一幅幅图画，令人心驰神往。让我们从熟悉这些星座开始，了解星空的运转和天体的周日视运动。

第 1 节　星座与四季星空

一、星座与星名

我们祖先早就给天上的亮星起了名，有的根据神话故事，如牛郎星、织女星、天狼星、老人星等；有的依据中国二十八宿命名，如角宿一、心宿二、娄宿三、参宿四和毕宿五等；有的根据恒星颜色命名如大火（心宿二）；还有的依据恒星所在天区命名的，如天关星、北河二、北河三、南河三、天津四、五车二和南门二等。

1603 年，德国业余天文学家拜尔建议“平等对待”这些恒星，不能只给亮星起名，他提出：每个星座中的恒星从亮到暗顺序排列，以该星座名称加一个希腊字母顺序表示。例如猎户座 α（参宿四）、猎户座 β（参宿七）、猎户座 γ（参宿五）、猎户座 δ（参宿三）等。某个星座的恒星若超过了 24 个或者为了方便，就用星座的名称后加阿拉伯数字表示。如天鹅座 61 星、天鹅座 32 星、双子座 65 星及天兔座 17 星等。天文学家有时用星表的序号来表示星名，如猎户座 α 星也叫 HD39801（HD 星表 39801 号）。

人们根据一群星构成的图形加上想像，把恒星划分成许多星座。中国古代把恒星天空划分成三垣二十八宿，“垣”是墙的意思，“宿”是住址的意思。日月穿行在黄道附近，黄道附近的星被分成 28 个大小不等的星区，叫 28 宿。月球在绕地球公转运动过程中，每日从西往东经过一宿。28 宿以外的星区划分为三垣：紫微垣、太微垣和天市垣。紫微垣包括北天极附近的星区，太微垣大致包括室女座、后发座和狮子座，天市垣包括蛇夫座、武仙座、巨蛇座和天鹰座等星座。

1928年，国际天文学联合会决定，将全天划分为88个星座，其中沿黄道天区的有12个星座，因为太阳的周年视运动穿过它们，所以也叫黄道12宫。它们是双鱼座、白羊座、金牛座、双子座、巨蟹座、狮子座、室女座、天秤座、天蝎座、人马座、摩羯座和宝瓶座。

北半天球有29个星座，如小熊座、大熊座、天龙座、天琴座、天鹰座、天鹅座、武仙座、狐狸座、飞马座、蝎虎座、北冕座、猎犬座、后发座、牧夫座、仙王座、仙后座、仙女座、英仙座、猎户座等。南半天球有47个星座，如大犬座、船底座、半人马座、鲸鱼座、波江座、长蛇座、天兔座、麒麟座、蛇夫座、盾牌座、船帆座和飞鱼座等(见光盘附录一)。

这88个星座形状各异，色彩纷呈，人们按照它们组合的形状把它们想像成不同的人物和动物等。并给每个星座都联想了许多美丽动听的故事。比如中国民间早就传说的牛郎星和织女星的故事。希腊故事把牛郎星和周围的星连在一起，认为像老鹰叫天鹰座，把织女星和周围的星想像为一架琴叫天琴座。天鹅座中亮的六颗星，古希腊神话故事把它说成一只在银河上空低飞的天鹅，所以叫天鹅座。

二、四季星空

美丽星空的88个星座不是每个地区的人们都能看到，其原因是由于所处的地理纬度不同，后面我们还要讲，不同地理纬度看到天体视运动的详情。

在北半球，人们在满天的繁星中，很早就认识了著名的北斗七星(大熊座)，“望见了北斗星就知道了方向”，由北斗七星勺底的两颗星连线延长的方向就可以找到北极星。北极星距离北天极约1°左右，北极星的地平高度约等于当地的地理纬度。因此，古代的航海家们由北极星识别方向，把轩辕十四、毕宿五、北河三、北落师门、娄宿三、角宿一、心宿二、牛郎星和室宿一星叫做导航的航海九星。现代星际航行也利用恒星导航，例如登月的阿波罗11号宇宙飞船没有用光学定位仪而是靠一些亮星为宇宙飞行轨道定位，可见，今日它们仍为人类的宇宙探测导航。

由于地球自西向东转，地球上的人们看到所有的星星都和太阳一样都有东升西落的现象。另一方面由于地球的绕日公转，使人们在不同季节的夜晚，即使在同一时刻看同一颗星，其在天空的高度和方位也不同。

我们的祖先很早就注意到了四季星空的变化，写下了寒来暑往，斗转星移的诗篇：

斗柄指东，天下皆春；
斗柄指南，天下皆夏；
斗柄指西，天下皆秋；

斗柄指北，天下皆冬。

这诗篇告诉了北半球的人们在不同的季节里北斗星的斗柄所指的方向不同。

我们认识星空，最好到远离城市灯光的空旷地区，并要准备好一份星图和一个手电筒。如果你有一些星图天文软件如 Skymap，事先用计算机演示当夜的星空图像，它会帮你认识星空（详见光盘"天文观测和实验"部分）。

第 2 节　天体的周日视运动

天体的周日视运动　由于地球自西向东自转，由相对运动原理，人们不觉得是地球在运动，却看到所有天体都围绕着天轴（地球自转轴的延伸）自东向西运动，24 小时运转一周，这就叫天体的周日视运动。



图 1.1　北极星附近的星围绕天极的周日视运动照片

站在地球不同纬度处的观测者，所见天体的升、落情况有所不同，这是因为不同纬度地区天极的高度不同。例如图 1.1 为在北京地区的观测者拍摄的天体周日视运动的照片。下面我们分析几种特殊地区看到天体周日视运动的情况。

一、在南、北极观察天体的周日视运动

在地球的北极或南极（地理纬度 $\phi=\pm 90°$），人们看到的天体都平行于地平

圈转动，看不到升落的情况，如图 1.2 所示。在北极地区只能看到北半天球的星，永远看不到南半天球的星，而在南极只能看到南半天球的星，永远看不到北半天球的星。在两极，半年是白天，半年是黑夜。在北极地区，从春分到秋分看到太阳每天以不同的高度围着观测者打转转，永远不落，半年都是白天；从秋分到春分，太阳永不上升，半年的长夜，北极星高悬天顶，其他星星都围绕着天轴转圈，永不下落。而在南极地区，从春分到秋分，半年都是黑夜；从秋分到春分，半年内太阳永不下落，都是白昼。

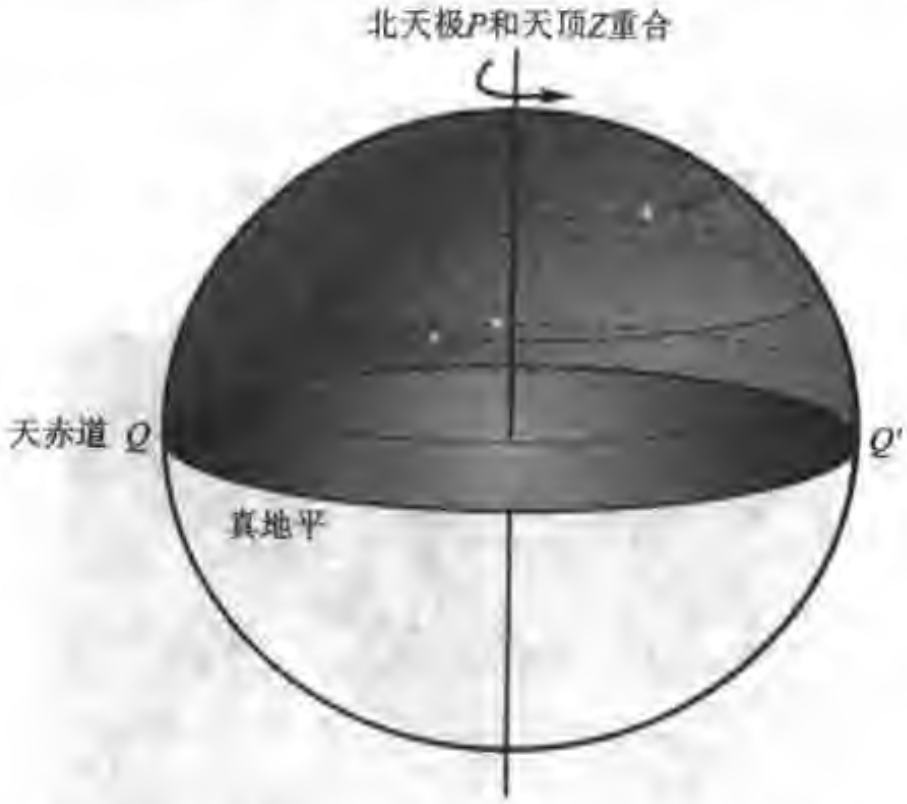


图 1.2　在南、北极地区看到的天体的周日视运动

二、在赤道地区观察天体的视运动

地球赤道地区(地理纬度 $\phi=0°$)的观测者所看到情景是所有天体都垂直于地平面做圆运动，如图 1.3 所示。在这个地区，在春分和秋分日中午时刻太阳在天顶，是真正的“太阳当头照，立杆不见影”。

三、在两极和赤道之间的地区观察天体的周日视运动

在两极和赤道之间的地区(地理纬度 $0° < \phi < +90°$，或 $0° > \phi > -90°$)，例如在北极与赤道之间的地区，可看到全部北半球的天体及部分南半球的天体，如图 1.4 所示。地理纬度越高，天极离地面越高，可看到的南半天球的天体就越少。例如在北京，北极星的高度约 40°，那些赤纬(天体的赤道坐标)大于和等于 50°的天体永不下落到地平以下，而一部分南天的天体(赤纬小于 −50°)则永远看不到。比如在广州夜晚可看到老人星，而在北京就看不到。

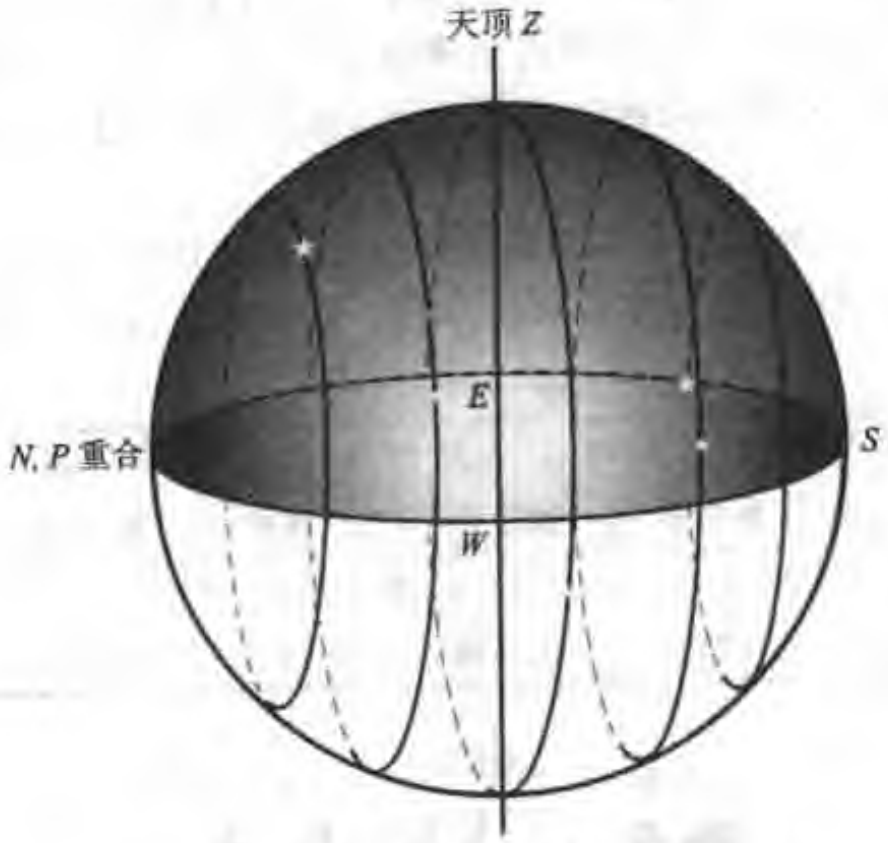


图 1.3　在赤道地区看到的天体的周日视运动

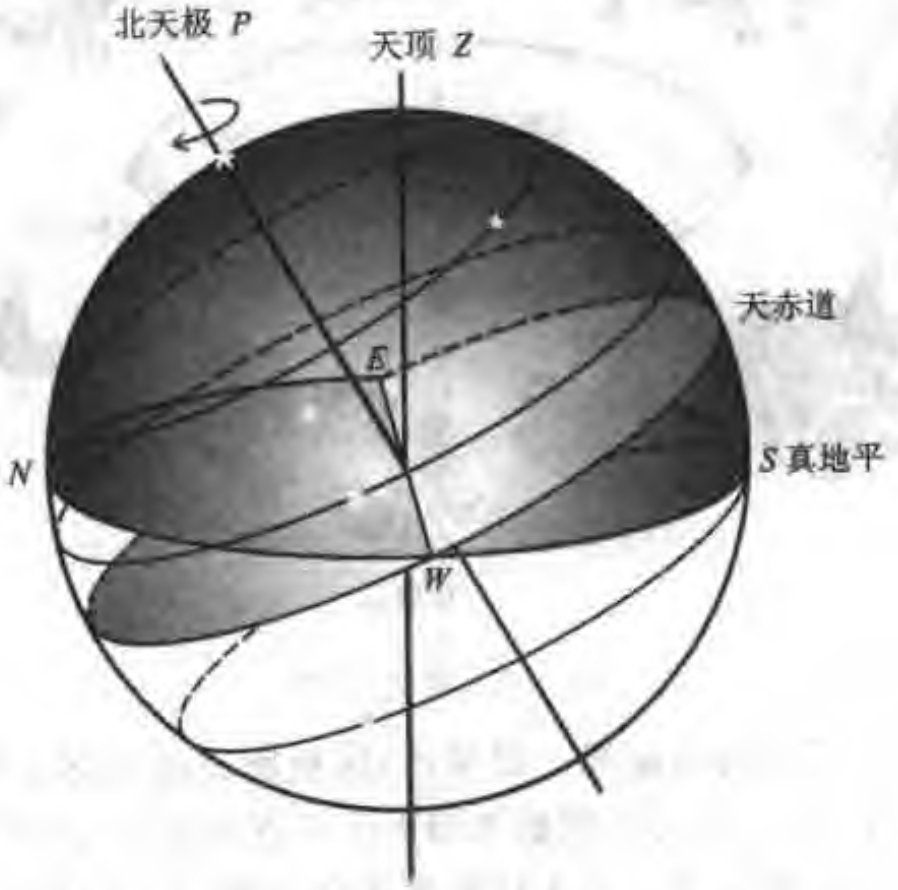


图 1.4　在中纬地区看到的天体的周日视运动

第 3 节　太阳的周年视运动

旭日东升，夕阳西下，这是大家都熟悉的太阳周日视运动现象，大家一定也

注意到太阳在一年里，每天出没的方位和中午的高度有所变化，不同季节的夜晚的同一时刻（比如晚 8 点）所看到的星座也不同，这是太阳的周年视运动现象。由于地球在自转的同时还绕日公转，一年里，视太阳在天球上相对其他背景恒星移动一周。

黄道 12 宫　一年内视太阳在天球黄道（地球绕日公转的轨道叫黄道）上穿行 12 个星座，人们把这些星座叫黄道 12 宫，如图 1.5 所示。太阳穿行 12 宫的时间大体如下：

日期：3 月 21 日—4 月 20 日	5 月 21 日	6 月 22 日	7 月 23 日	8 月 23 日	9 月 23 日	
太阳经过：白羊座	金牛座	双子座	巨蟹座	狮子座	室女座	
日期：9 月 23 日—10 月 23 日	11 月 22 日	12 月 22 日	1 月 20 日	2 月 18 日	3 月 21 日	
太阳经过：天秤座	天蝎座	人马座	摩羯座	宝瓶座	双鱼座	

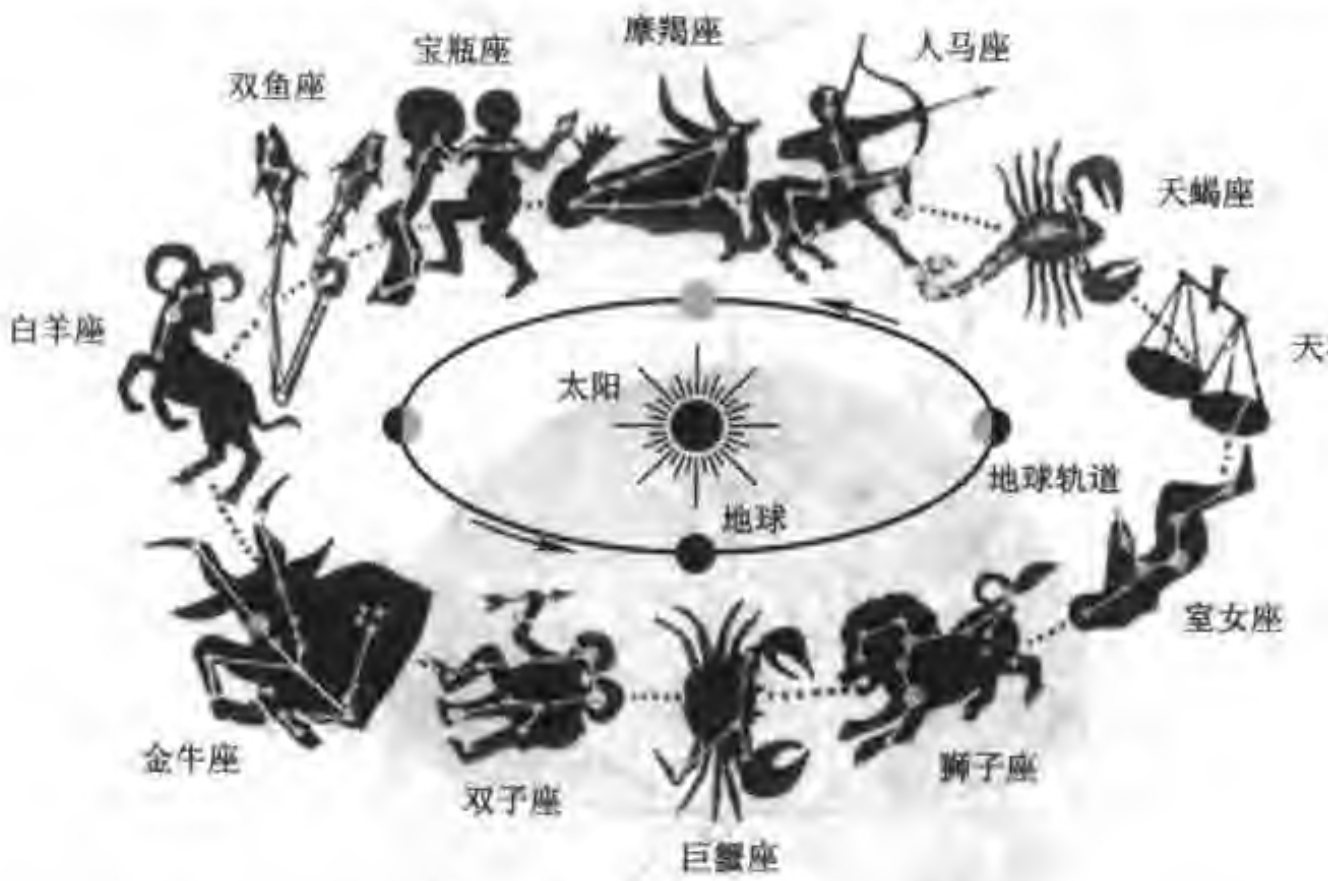


图 1.5　黄道 12 宫

现代流行的说法即每人都属一定星座，这里所说的星座是指太阳一年穿行的黄道 12 宫里的星座。你可以依据上图由生日查出在那天太阳穿行的星座，就是你所属的星座。比如生于 5 月 1 日就属于金牛座，生于 10 月 15 日就属于天秤座等。至于星座决定人的性格，显然没有什么道理，只是趣谈。

由于地球绕日公转的轨道是椭圆的，所以地球的公转速度是不均匀的，因此太阳的周年视运动也是不均匀的。在 1 月 3 日或 4 日地球运动到近日点这时运动速度比其他地方大，所以太阳在摩羯座停留的时间最短。

春分点与秋分点　在一年里太阳的周年视运动是沿着黄道运动一周，黄道

与天赤道交于两点：太阳沿着黄道由天赤道以南穿越到天赤道以北的那个交点叫升交点，称为春分点，如图 1.6 所示。在黄道上与春分点相距 180°的黄道与赤道的那个交点叫降交点，也称作秋分点。

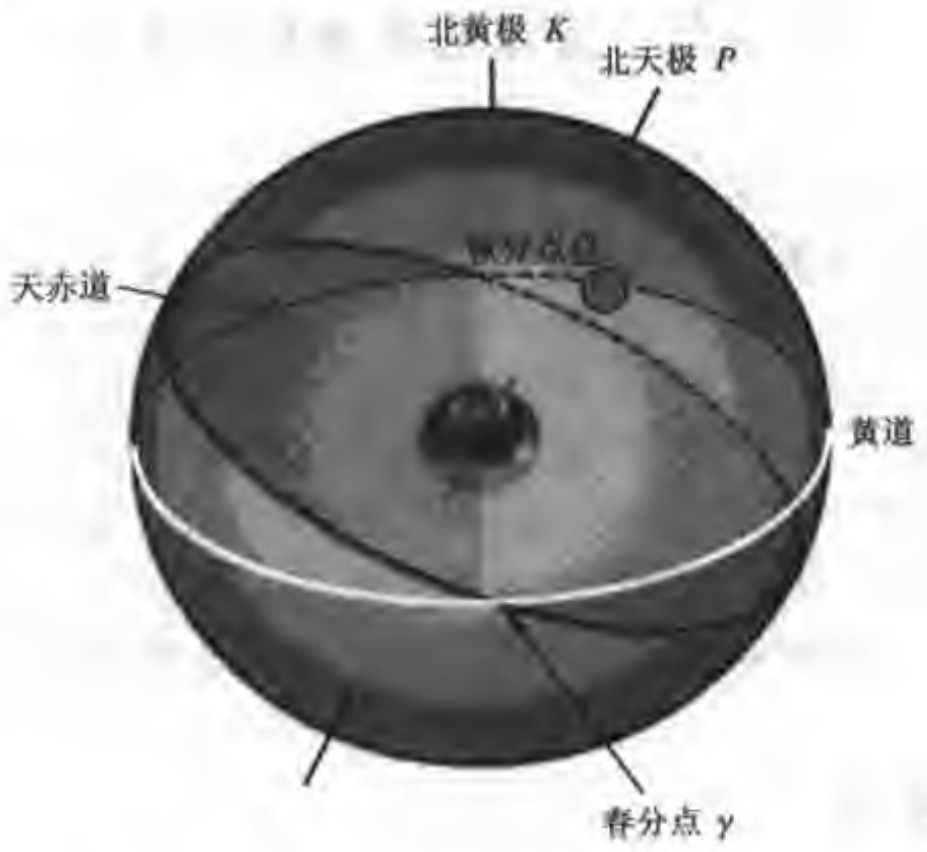


图 1.6　太阳的周年视运动

与春分点相距 90°且在赤道以北的那一点叫夏至点，在天球上和夏至点相对的那一点，它与春分点相距 270°，在赤道以南叫冬至点。太阳每年在公历 3 月 21 日前后到达春分点，6 月 22 日前后到达夏至点，9 月 23 日前后到达秋分点，12 月 22 日前后到达冬至点。

在地球不同纬度处，太阳的周年视运动不同：在北半球中纬地区，春分日和秋分日那天，太阳正好位于天赤道上，早晨日出正东，傍晚日落正西，昼夜等长。春分过后，太阳从东北方升起，西北方落下，昼渐长，夜渐短。正午时刻的太阳高度逐渐增高，夏至日达到最高，白天的时间最长。夏至过后，太阳正午高度逐渐降低，白昼也逐渐变短，至秋分日又昼夜平分。秋分过后，太阳南移，正午高度继续降低，冬至日达到最低，白昼最短，太阳从东南方升起，西南方落下。在南半球的中纬地区看到的太阳升落情形正好相反。

在地球赤道地区，春分日和秋分日中午太阳都位于头顶。从春分到秋分，太阳在天顶北；从秋分到春分，太阳在天顶南。一年中无论哪一天，太阳总沿着与地平面垂直的平行圈升落，一年四季都是昼夜平分。

在南极地区（$-66.5° > \phi > -90°$），从春分日到秋分日太阳永不升起，从秋分日到春分日太阳永不下落。北极地区的情况与南极正好相反。

在北极圈（纬度为 66.5°）上，夏至日那天太阳不落，24 小时都是白天，只是

在晚上 12 点时，它才和地平相切于北点。而冬至日那天太阳迟迟不升起来，只有在中午时分，才在南点附近看到太阳的光芒一现，其余时间就是茫茫的黑夜。读者根据此道理，可想像在南极圈地区看到太阳的升落情况。

第 4 节 天体的亮度和视星等

自古以来人们为了农、牧业生产的需要很早就学会熟悉星空、识别星的亮度。习惯上把肉眼看到的星的亮度分为 6 等，最亮的星定为 1 等星，把勉强看到的暗星定为 6 等星。1850 年，普森注意到古代天文学家定出的 1 等星比 6 等星大约亮 100 倍。为了使星等系统更为精确，普森规定星等相差 5 等，亮度之比精确地等于 100 倍。也就是说，星等每相差 1 等，其亮度之比等于 2.512 倍，即 1 等星比 2 等星亮 2.512 倍；2 等星比 3 等星亮 2.512 倍。星等的范围也向两端延伸了，比 1 等星亮的有 0 等星和负星等的星，比如天狼星为 -1.4^m，太阳的视星等为 -26.7^m，月球满月的视星等为 -12.6^m；比 6 等星更暗的有 7 等星、8 等星、9 等星……

一、视星等

视星等 根据心理学研究，人的眼睛有这样的特性，即入射的光按等比级数增加时，人眼睛的感觉是按等差级数改变的，所以有如下星等和亮度的换算公式：

$$m=-2.5\lg E$$

设有两颗星的亮度分别为 E_1 和 E_2，则它们的星等 m_1 与 m_2 之差的关系为

$$m_1-m_2=-2.5\lg(E_1/E_2)$$

此星等对应着天体的视亮度，所以叫视星等。

二、色指数

对同一天体，天文学家用两个系统的星等差值表示它的颜色，定义色指数（以 C 表示）：

$$C=m_{pg}-m_{pv}$$

式中 m_{pg} 是用照相方法得到的照相星等；m_{pv} 是仿视星等，即在照相底片上加黄色滤光片而测得的星等。

***UBV* 三色星等系统** U 是紫外星等，B 是蓝色星等，V 是黄色星等。

1953 年美国天文学家琼森和摩根提出了 *UBV* 三色星等系统，成为现代国际上通用的测光系统。*UBV* 测光系统要求望远镜是镀铝的反射望远镜，并采用

美国生产的 IP21 型光电倍增管及将三种颜色的滤光片附加在探测器前边，现可应用于光电测光、照相测光或 CCD 测光。

三色测光所测得的星等，分别叫 U 星等(有效波长为 365 nm)；B 星等(有效波长为 445 nm)和 V 星等(有效波长为 550 nm)。

色指数　$(B-V)$和$(U-B)$。

UBV 星表，通常常给出 V，$(B-V)$及$(U-B)$，其中 V 是 V 星等；$(B-V)$和$(U-B)$表示天体的色指数。

【例题 1】 说明南极圈地区在春分、夏至、秋分与冬至看到的太阳升落情况。(不考虑地球大气的折射，也不考虑所见到的视地平低于数学地平的情况)

解答：在南极圈(纬度 $-66.5°$)地区，在冬至那天，24 小时几乎都是白天，太阳不落，只是在夜里 12 点，太阳的视面中心过地乎圈的南点。

夏至那天，太阳不会升起，只是在中午 12 点时太阳的视面中心过地平圈的北点。在春分日和秋分日是昼夜平分。

【例题 2】 最近，在极夜结束后，南极的企鹅观测到了日出。问在这时北极的白熊看到了什么现象？

解答：如果你按照完全对称的情况，回答北极的白熊在这个时候观测到日落，这是不正确的。因为实际上白熊要在几天之后才会看到日落，这里必须考虑两种情况：

第一，对于任意观测者，实际看到的视地平是低于地平圈的(数学地平)，比如一个人站在平坦的地表面上，她看到的视地平比数学地平约低 $2.5'$，这可由下面计算得出：

设 R 是地球半径，h 为眼睛在地球表面的水平高度，视地平比数学地平低的角度为

$$\theta=\arccos\,(R/(R+h))$$

$$\tan\theta\approx\theta=((R+h)^2-R^2)^{1/2}/R=(2h/R)^{1/2}(\mathrm{rad})=2.5'$$

企鹅大小不同，我们可以取高大的帝企鹅的眼睛高度大约在地球表面 1 m，视地平比数学地平大约低 $2'$。白熊是坐着的，眼睛的水平高度也是 1 m，视地平也大约低 $2'$。

这意味着，企鹅看到太阳的视面中心升到地平圈上的时候(日出)，在北极，太阳的视面中心已经在地平圈(数学地平)之上 $2'$了。坐着的北极白熊看到的太阳已在地平圈以上 $4'$，亦即太阳视半径的四分之一已露在地平之上了。

第二，地球大气对光的折射作用也必须考虑，大气折射的大小取决于天气情况，在地平方向大气折射角平均为 $35'$。南极的企鹅看到太阳视面中心在地平圈(数学地平)上时，太阳实际上是在数学地平以下 $35'+2'=37'$。在北极，这时太阳仍然没有开始下落，太阳在地平圈之上，大气折射角大约是 $25'$(不是 $35'$，因为这时太阳实际上不是在南极的地平圈上，而是低于地平圈)。

因此，坐在北极的白熊看到的太阳高度为 $4'+35'+25'=64'$，即大约 $1°$ 高。

【例题 3】 大约公元前 1100 年，中国天文学家在夏至日测量了太阳的最大高度，夏至日时得到 $h_1=79°07'$，冬至日时 $h_2=31°19'$。在这两种情况下，太阳都处在天顶的南边。求出观测者所在的地理纬度，同时计算黄道与赤道在那时的夹角。

解答：我们可以证明：天极的高度等于当地的地理纬度 ϕ 这一重要规律，所以天球赤道的地平高度为 $90°-\phi$。设黄道与赤道的夹角为 ε。

在夏至，太阳的赤纬为$+\varepsilon$，太阳的地平高度$h_1=90^\circ-\phi+\varepsilon$；

在冬至，太阳的赤纬为$-\varepsilon$，太阳的地平高度$h_2=90^\circ-\phi-\varepsilon$；

所以有 $\phi=90^\circ-(h_1+h_2)/2=34^\circ47'$

$\varepsilon=(h_1-h_2)/2-23^\circ54'$

所以，观测地的地理纬度ϕ为$34^\circ47'$，那时黄道与赤道的夹角ε为$23^\circ54'$。



习　题

1. 在地球上什么地方，什么时候，观察太阳由升起到落下持续的时间最长？

2. 说明北京地区（地理纬度约为40°）在春分日、夏至日、秋分日与冬至日的时候，太阳在上中天时的高度分别是多少？

3. 黄道12宫沿黄道均匀分布，太阳在哪个星座停留的时间最短？

4. 我们将太阳的圆面覆盖住天顶，定义太阳位于天顶，问在汕头（纬度23.5°），基多（纬度为0°），与圣保罗（纬度为-23.5°）何时能够看到太阳位于天顶这种现象？并做解释。

5. 在月球的天空中，太阳和地球哪个更常见？（提示：在月球的正面与在月球的背面分别考虑。）

6. 说明在春分日、夏至日、秋分日与冬至日时，太阳的赤经和赤纬分别是多少？

7. 猎户座的三星，在一个月前是在晚上10时升起来的，问这三颗星今天晚上何时升起？

8. 在春分日那天，在北极的北极熊与在南极的企鹅看到太阳的周日视运动的现象是怎样的？过了两天后，它们看到太阳的视运动又是怎样的？

9. 在椭圆星系M32（仙女座大星云的一个伴星系）中约有2.5×10^7颗恒星，这个星系的视星等为9^m，如果所有恒星的亮度相同，这个星系中单颗恒星的视星等是多少？

第二章

天球和天球坐标系

在晴朗的夜晚，仰望天空，眼前像有一个半球形的夜幕天穹，上面点缀着无数闪烁发亮的明星，感觉自己仿佛是处在这个天穹的中心，这就是人们对“天球”的印象。天文学家为了研究天体的位置和天体的运动引入了“天球”的概念和天球坐标。

第 1 节　天球和天球坐标系

天球是一个假想的球，它是以观测者（或地心、日心）为中心，以无穷远为半径的球，所有天体都投影在这个球面上。天球的轴是地球自转轴的延伸，叫天轴；天轴与天球有两个交点，叫做天极；地球北极的延伸的点叫北天极；地球南极延伸的那个点叫南天极。

天体在天球上的视位置，最方便是用球面坐标来表示，在天球上建立的球面坐标系叫**天球坐标系**。天文中常用的天文坐标系有地平坐标系、赤道坐标系、黄道坐标系、银道坐标系。

一、地平坐标系

地平坐标系主要有两个参量：方位角 A 和地平高度 h（或天顶距 z），如图 2.1 所示。观测者的头顶方向与天球相交的点叫**天顶**（Z 点）。从观测者脚底方向延伸与天球的交点叫**天底**。垂直于天顶和天底连线并过天球中心的平面叫地平面。它与天球相交于一个大圆，这个大圆叫地平圈，也叫真地平。这个真地平是数学平面，它和眼睛看到的视地平有所区别。在宽阔的海面上，因为地球是球形，视地平总是低于真地平。与地平圈平行的小圆叫地平纬圈，与地平圈垂直的大圆叫地平经圈。从北点沿地平圈顺时针方向量度叫地平方位角，记做 A。天体 σ 的地平高度，是从地平圈沿着地平经圈向上量度，记作**地平高度** h。

天体沿地平经圈到天顶 Z 的圆弧叫这个天体的**天顶距** z。

由图可以看出天体的天顶距 z 与天体的高度 h 的关系为 $z=90°-h$。所以地平坐标系中，地平高度 h 参量也可以用天顶距 z 代替，两者之和等于 90°。

通过北天极 P 和天顶 Z 的大圆叫**天球子午圈**，它和真地平相交于 N 点和 S

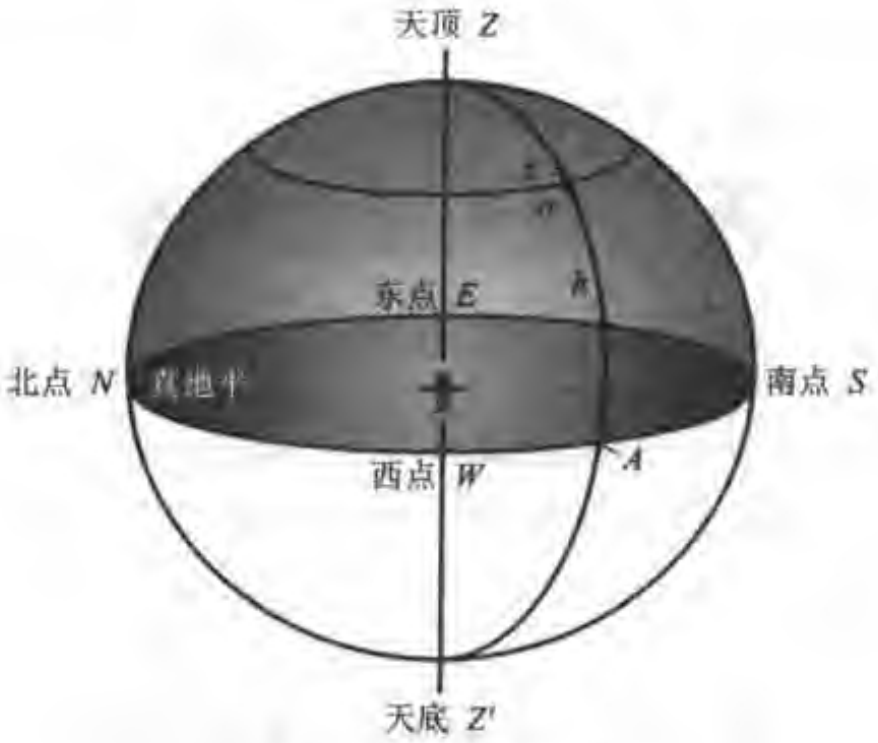


图 2.1 地平坐标系

点。靠近北天极的叫北点，和它相对的另一点是南点。在地平圈上沿顺时针量度，离南、北点各 90°的点分别叫东点(E)和西点(W)。通过天顶、东点、天底和西点的大圆 $ZEZ'W$ 叫**卯酉圈**。

天体通过子午圈叫"中天"，天体每天有两次中天，位置达到最高的叫上中天，位置达到最低叫下中天。在极点是特殊情况，两次中天天体的高度一样，可以定天体通过面向的子午圈方向为上中天，相距 180°背向的那次中天叫下中天。

地球上任何观测点的天极高度等于当地的地理纬度，由相似三角形的道理，可以证明。如图 2.2 所示，在观测地 O' 处的天极为 P' 方向。根据两个边互相垂直的角相等($\angle ZOQ' = \angle P'O'E'$)，所以，天极的高度角等于当地的地理纬度。

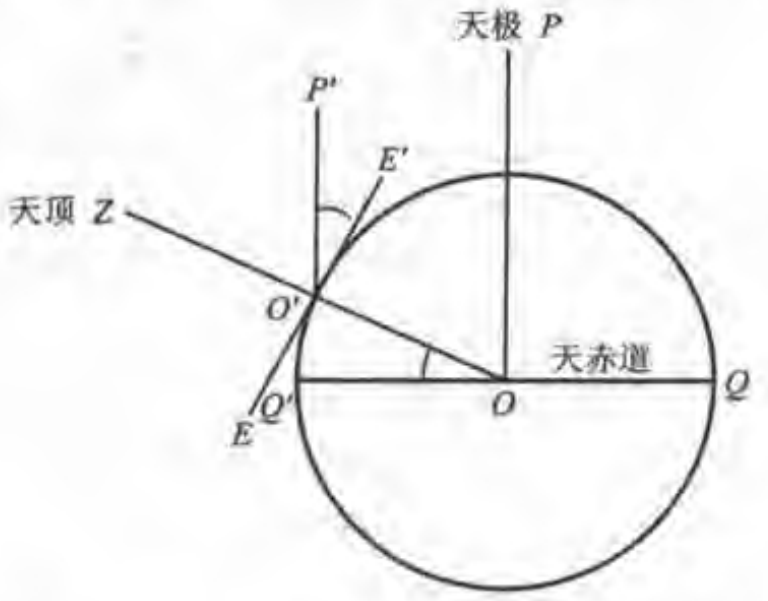


图 2.2 天极的高度等于当地地理纬度的示意图

二、赤道坐标系

如图 2.3 所示，地球自转轴的延伸与天球相交的两点是北天极 P 和南天极 P'。地球赤道的延伸与天球相交的大圆圈叫天球赤道即天赤道 QQ'。天赤道以北的半个天球叫北天球，以南的叫南天球。天球上平行于天赤道的小圆圈叫纬圈，垂直于天赤道并且过两个天极的大圆圈叫经圈或时圈。

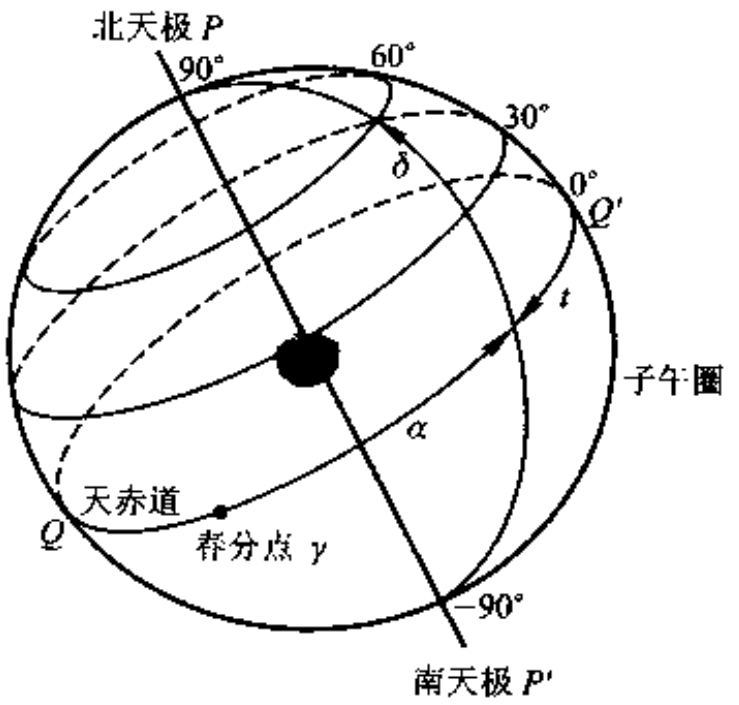


图 2.3　赤道坐标

在赤道坐标中，天体的位置，其赤经(RA)用 α 表示；赤纬(Dec)用 δ 表示。赤纬 δ 是沿着赤经圈，由天赤道向北天极、南天极两个方向计量 0°～+ 90°，从赤道向北天极方向量度为正，向南天极方向量度为负。

地球公转轨道面的延伸与天球相交的大圆圈叫黄道，天赤道与黄道相交于两点，它们分别叫春分点和秋分点。春分点是由于太阳在春分日那天由南半天球进入北半天球时经过此交点，因此春分点也叫升交点，用符号 γ 表示。天体的赤经 α 是从春分点开始，沿着赤道圈逆时针方向计量到天体的赤经圈与天赤道的交点，以 0 ～ 24^h 计量。

三、时角坐标系

在时角坐标中，主要的参量是时角 t 和赤纬 δ。

时角 t 是从过观测者子午圈与天赤道交点算起，到过天体的赤经圈与天赤道的交点，面向南，沿着赤道圈顺时针方向计量，按小时计量。一周 360°是 24 小时，所以 15°为 1 小时。从子午圈向西(逆时针)量度的时角称为负时角，如 345°的时角为 $t=-1^h$ 等。

赤纬 δ 是沿着赤经圈由天赤道向北天极或向南天极两个方向计算，从 0°～+ 90°，从赤道向北天极方向量度为正，向南天极方向量度为负，这与赤道坐标一致。

时角坐标系对于天文观测来说是很方便的，后面我们进到天文时间系统时，就会一目了然。

四、黄道坐标系

如图 2.4 所示，黄道坐标是以黄道为基本圈，春分点为原点的球面坐标系。

垂直于黄道的大圆与天球相交的两个极点分别叫北黄极与南黄极。

天体黄道坐标的计量用黄经和黄纬表示。

天体的黄经是从春分点起算，沿黄道逆时针量度（自西向东），以 0 ～ 24^h 计量，量度方向与赤经方向相同。黄经用 λ 表示。

天体的黄纬是从黄道向北、南两个黄极量度 0°～±90°，向北黄极为正，向南黄极为负，用 β 表示。

黄道与赤道的夹角叫黄赤交角，目前黄赤交角约 23°26′。

由图 2.4 可知北黄极的赤道坐标：赤经 α 为 $270° = 18^h$，赤纬 δ 为 90°−23.5°=66.5°。

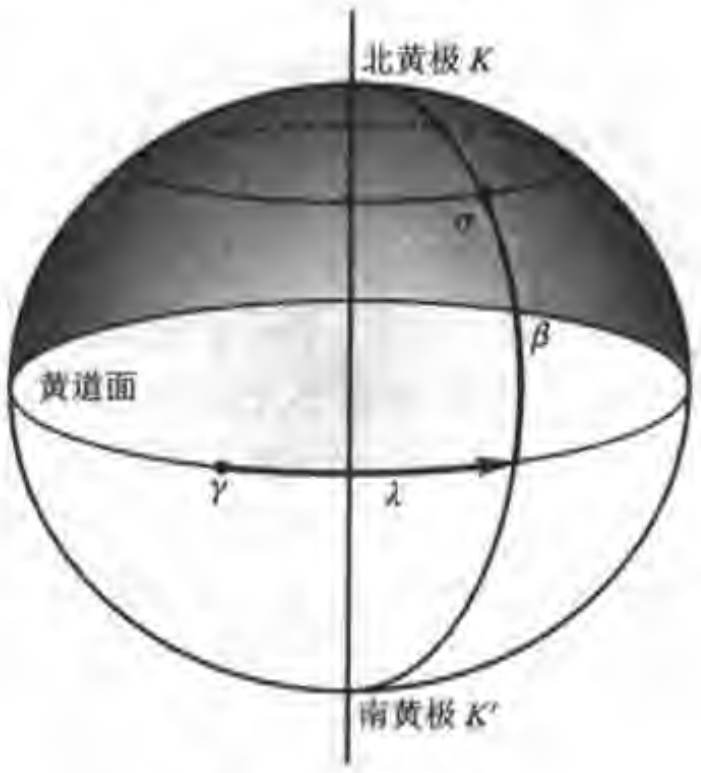


图 2.4 黄道坐标系

五、银道坐标系

研究银河系用银道坐标系是最方便的。银河系是一个扁的旋转椭球体，群星密集在银盘。这个椭球的对称平面叫银道面，它与天球相交的大圆叫银道。垂直银道面过天球中心与天球交两点，分别叫做北银极和南银极。接近北天极的叫北银极，接近南天极的叫南银极。

在银道坐标系中，天体的位置用银经 L，银纬 b 表示。银纬 b 的计量是沿着银经圈，由银道向北银极或南银极两个方向计算 0°～±90°，从银道向北银极方向量度为正，向南银极方向量度为负。

银道和赤道的交角，用 i 符号，银道由赤道之南进入赤道以北的交点叫升交点。银经 L 是从升交点起算，沿着银道逆时针方向计量，从 0^h～24^h。

*第 2 节 天球坐标系的变换

由球面三角的基本知识，我们可以证明天文坐标系之间的换算（详见光盘附录三）。

一、地平坐标与时角坐标的换算

设天体 σ 的地平坐标为 (A, z)，时角坐标为 (t, δ)，观测地点的地理纬度为 ϕ。对以北天极 P、天体 σ 和天顶 Z 为顶点的球面三角形，如图 2.5 所示，由球面

三角基本公式，可得出如下换算式。

(1) 已知天体方位角 A 和天顶距 z，利用球面三角公式求天体的时角 t 和赤纬 δ

$$\sin\delta=\sin\phi\cos z-\cos\phi\sin z\cos A$$

$$\cos\delta\sin t=\sin z\sin A$$

$$\cos\delta\cos t=\sin\phi\sin z\cos A+\cos z\cos\phi$$

已知地方区时(如北京时)可以计算出地方恒星时，由地方恒星时 S 与时角 t 的关系式，$\alpha=S-t$，可求出天体的时角 t。

(2) 已知天体的时角 t 和赤纬 δ，求天体的方位角 A 和天顶距 z(或地平高度)利用如下球面三角公式即可

$$\cos z=\sin\phi\sin\delta+\cos\phi\cos\delta\cos t$$

$$\sin z\sin A=\cos\delta\sin t$$

$$\sin z\cos A=-\sin\delta\cos\phi+\cos\delta\sin\phi\cos t$$

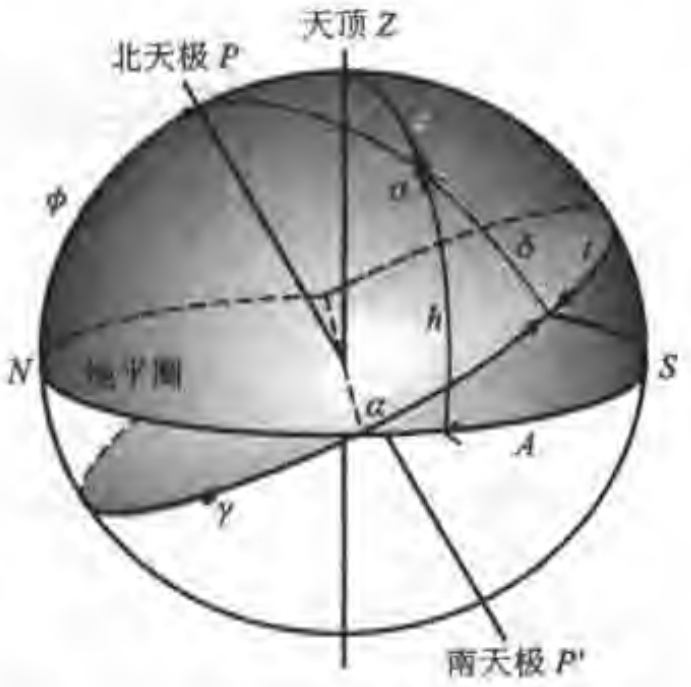


图 2.5　地平坐标与时角坐标变换的图示

二、赤道坐标与黄道坐标的换算公式

设天体的黄经为 λ，黄纬为 β；天体的赤经为 α，赤纬为 δ；黄道与赤道的夹角为 ε(参看图 2.6)。由球面三角形 $K\sigma P$ 则黄道坐标与赤道坐标的换算公式：

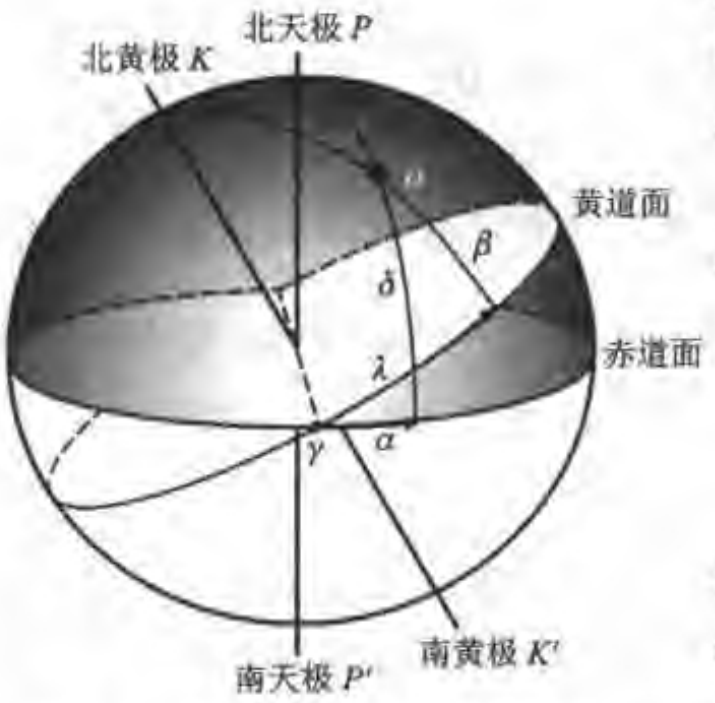


图 2.6　赤道坐标与黄道坐标的换算

(1) 由天体的赤经 α、赤纬 δ；黄道与赤道的夹角 ε，求天体黄经 λ、黄纬 β

$$\sin\beta=\cos\varepsilon\sin\delta-\sin\varepsilon\cos\delta\sin\alpha$$

$$\cos\beta\cos\lambda=\cos\delta\cos\alpha$$

$$\cos\beta\sin\lambda=\sin\delta\sin\varepsilon+\cos\delta\cos\varepsilon\sin\alpha$$

(2) 由天体黄经 λ、黄纬 β 与黄赤夹角 ε，求赤经 α、赤纬 δ

$$\sin\delta=\cos\varepsilon\sin\beta+\sin\varepsilon\cos\beta\sin\lambda$$

$$\cos\delta\cos\alpha=\cos\beta\cos\lambda$$

$$\cos\delta\sin\alpha=-\sin\beta\sin\varepsilon+\cos\beta\cos\varepsilon\sin\lambda$$

【例题 1】 写出北黄极的赤道坐标与北天极的黄道坐标。

解答：先绘出天球的黄道坐标与赤道坐标的简化图，设黄赤交角为 23.5°，由图 2.7 可以看出：

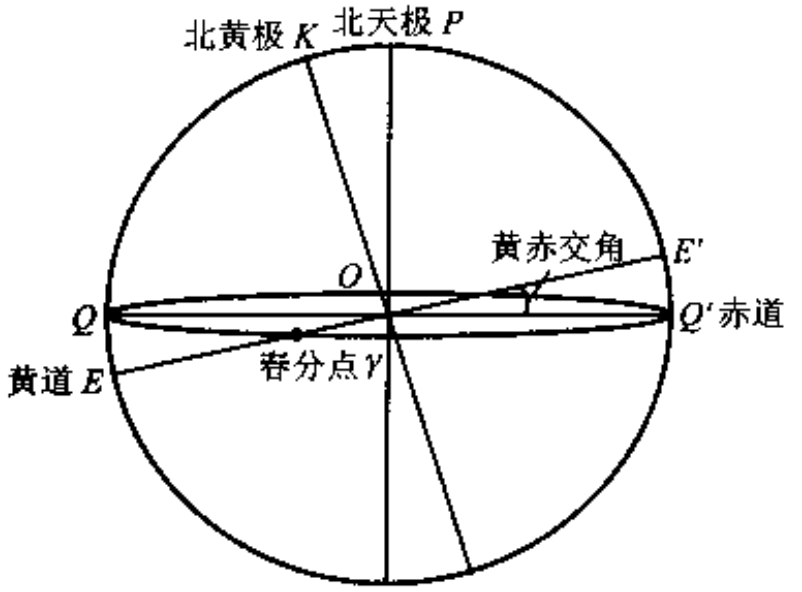


图 2.7 简化天文坐标图

北黄极的赤道坐标：赤经为 18^h；赤纬为 $90°-23.5°=66.5°$。

北天极的黄道坐标：黄经为 6^h；黄纬为 $90°-23.5°=66.5°$。

【例题 2】 证明天体在上中天的时刻，它的赤纬 δ、天顶距 z 和观测地的地理纬度 ϕ 有如下关系：$z=\pm(\phi-\delta)$ 如果天体在天顶之南中天，取＋号，如果天体在天顶与天极之间中天，则取负号。（参照图 2.8 证明。）

由图可明显地看出：

$$\angle PON=\angle ZOQ'=\phi;\quad z=\pm(\phi-\delta)$$

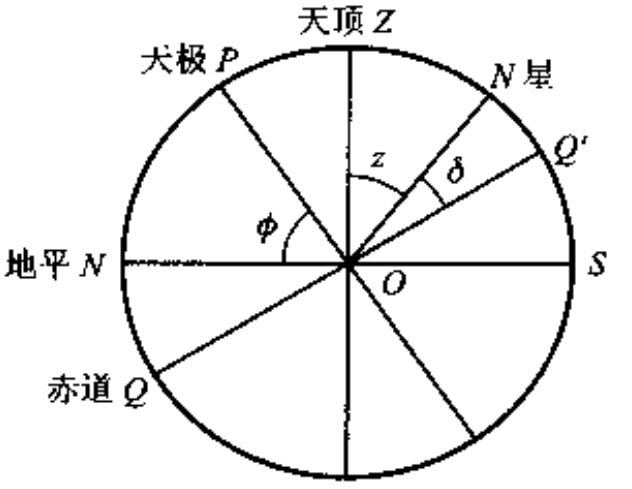


图 2.8 证明 $z=\pm(\phi-\delta)$ 的示意图

【例题 3】 设想一个北极熊，在 2002 年内整年都坐在北极处。计算当太阳处在地平线上的最高位置时，天空的多大部分处在黄道之下。在什么时间（指日期），天空的同样部分将再次处在黄道之下。

解答：在北极，当太阳在水平线上面的最高位置时是夏至日，这天的任意时刻黄道以下的天空部分都是 ε/π，即有 ε/π 部分天空是在黄道之下，又是在地平之上。ε 是黄道与赤道的夹角（在 2002 年是 $23°26'$），π 是 $180°$。

所以 $23°26'/180°=0.13$ 在任意时刻都如此。次年 6 月 22 日夏至时天空的同样部分将再次处在黄道之下。



习 题

1. 我们通常认为全天肉眼可见的恒星有 6 000 颗，假设恒星在天球上均匀分布，请估计有多少颗位于恒显圈（即永不下落）：(a)位于距北极 1°处；(b)位于距赤道 1°处。

2. 观测者位于纬度 40°处观看时，天球赤道与地平圈相交成什么角度（两者相交东西两点）？若在纬度 −40°处时，则上述角度又分别为多少度？

3. 对纬度＋55°而言，春分点刚升出地平的时刻，黄道与地平圈构成什么角

度？春分点刚沉没地平的时刻呢？对纬度+66.5°而言呢？

4. 地理纬度为 42°处，天顶的赤纬等于多少？

5. 为什么赤经的计算照例是从西向东，而不是反方向的？

6. 某星具有时角 $t=18^h$。问这颗星在天球的哪部分可见到？

7. 天球北半球最亮的两颗星是织女星（$\alpha=18^h34^m$）和五车二（$\alpha=5^h10^m$）。问当春分点上中天的时刻，它们位于天空的哪一边（西边或东边），时角为多少？当春分点下中天的时刻呢？

8. 银河的中线构成一个与天球赤道相交成 62°角的大圆。升交点的赤经为 18^h40^m。试确定北银极的赤道坐标。

9. 流星划过星空，其路程的始末两点各离北天极 90°和 136°19′0″，而通过这两点的两赤经圈之间的夹角等于 62°20′42″。试确定这流星的路程长度，以度数表示，并确定该路线与上述两赤经圈的交角。

10. 在北京（$\phi=39°57'$），五车二（$\delta=45°54'$）上中天时，天顶距为多少？

第三章

天文观测时间系统

时间和空间都是物质存在的形式，物质的运动和变化都是在时间和空间中进行的。为了计量时间，就必须观测物质的运动。天文观测的时间主要是依据地球的运动：自转和绕太阳公转的运动规律来计量的。

第 1 节　平太阳时、世界时、区时与恒星时

一、真太阳时与平太阳时

日常生活用的钟和手表都是用的平太阳时，而以真正的太阳为参考点，以真太阳的视运动来计量地球自转一周的时间，即太阳视圆面中心连续两次上中天的时间间隔叫做一个**真太阳日**。一个真太阳日分为 24 小时，一个真太阳小时分为 60 分，一个真太阳分分为 60 秒。真太阳时在日常生活中应用是不方便的，因为地球自转同时还绕日公转，而且公转速度是不均匀的，例如在近日点附近运动快，在远日点附近运动慢。因此，天文学家引入一个天球上的假想点——平太阳，它在天球上的视运动（周日视运动和周年视运动之和）是均匀的。以假想平太阳为参考点，来计量地球自转一周的时间，相应的时间叫一个**平太阳日**，相应一个平太阳日的时、分、秒就是平太阳时的时、分和秒。平太阳时也可简称为平时。

真太阳时与平太阳时的关系，通过时差来联系。真太阳时角 $t_\odot$ 与平太阳时角 t_m 之差，叫时差，即

$$\eta = t_\odot - t_m$$

由于真太阳的周年视运动是不均匀的，而平太阳的周年视运动是均匀的，所以 η 不是一个固定值，时差随时间的变化曲线叫时差曲线。在中国天文年历的太阳表中载有每天 η 的数值。

二、恒星日与恒星时

恒星日是以某一个恒星为参考点来度量的地球自转周期，即该星连续两次经过上中天的时间间隔。天文学家规定，恒星日以天球上的春分点（假设这颗恒星位于春分点）为参考点，来计量地球自转的周期，规定：春分点连续两次通过某

观测地子午圈的时间间隔叫做一个**恒星日**，并以春分点（γ）在该地上中天的瞬间作为恒星时的起算点，即以春分点的时角来计量恒星时：

$$S=t_\gamma$$

这就是说地方恒星时在数值上等于春分点的时角 t_γ（以小时为单位）。再细分，一个恒星日等于 24 个恒星时，一个恒星时等于 60 个恒星分，一个恒星分等于 60 个恒星秒。

我们知道春分点的赤经等于 0^h，又知恒星时是春分点的时角，所以很容易证明：恒星时（S）与任一个天体的赤经和它的时角的关系为

$$S=\alpha+t$$

用望远镜观测某一天体时，已知地方恒星时 S，由星表查知天体的赤经 α，由上式可算出它的时角 t。望远镜的赤道装置有赤纬盘（δ）和时角（t）盘，从而可以方便地对向天体。恒星在上中天时，它的时角 $t=0^h$，则有 $S=\alpha+0^h$。因此，观测者由恒星钟知道观测时刻的地方恒星时，就知道了上中天恒星的赤经。

三、恒星时和平太阳时的关系

平时与恒星时有什么关系呢？让我们选择地球某处 A 点来计算（参照图 3.1）。如果以恒星为参考点，地球转了一周之后又对向这个恒星，我们说这是过了一个恒星日。由于地球除了自转外，还围绕着太阳公转，当地球自转一周之后，地球上的 A 点，没有正对太阳，必须再转过 0.986°才对准太阳。所以 1 个平太阳日比 1 个恒星日长。在一个回归年（地球公转周期）里有 365.242 2 个平太阳日，而有 366.242 2 个恒星日。在一回归年里，恒星日的日数比平太阳日的日数多一天，即

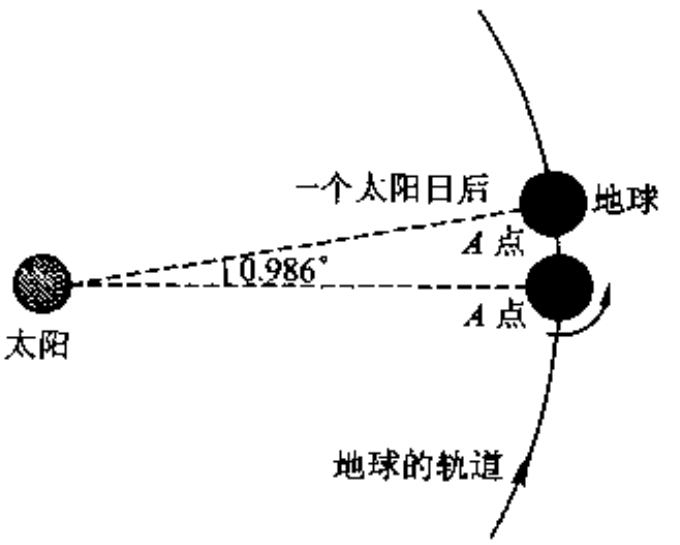


图 3.1　1 个平太阳日比 1 个恒星日长的示意图

$$1\text{ 平太阳日}=\frac{366.242\,2}{365.242\,2}\text{恒星日}=\left(1+\frac{1}{365.242\,2}\right)\text{恒星日}$$

$$\text{引入符号 }\mu=\frac{1}{365.242\,2}=3^m56.555\,4^s$$

因此，恒星钟比平时钟每天快约 4 分钟左右。

四、地方时与世界时

恒星时、平时都具有地方性，都是地方时。因为这些时间计量系统，计量时

间的起算点是天体过天子午圈的时刻，而对于地面上不同地理经圈的两地，它们的天子午圈是不同的，使得不同地点时刻的起算点各不相同，这就形成了各自的时间计量系统——地方时。

不难证明，不同的两地同时观测同一天体，其时角之差，等于这两地的地理经度之差。因而，只要两地经度有差别，两地的地方时刻就不相同。例如我国幅员辽阔当东部乌苏里江的渔民迎来黎明的曙光时，西部帕米尔高原还在深夜。如果各地都按地方时计量，将使各地人们的交流很不方便，于是国际上统一规定了全球的标准时——世界时。

世界时 以英国格林尼治天文台原址所在的子午线为起点，即格林尼治的地理经度 $\lambda = 0^h$，该地的地方平时就作为世界时，用字母 UT 表示。其他地方的平时 m 与世界时的关系为

$$m = \mathrm{UT} \pm \lambda$$

东经 λ 取正，西经 λ 取负。如果已知某地的地理经度，又知道地方平时，就可求出世界时，反之亦然。

五、区时

1884 年国际子午线会议规定，全世界统一实行分区计时制。这样便产生了区时。全球根据地理经度分成 24 个时区，每 15°一个区，在同一时区内，都采用该区中央经线上的地方平时作为该时区的标准时间，相邻两时区的标准时间相差整一小时。根据这一原则，东、西两半球各分为 12 个时区（参见图 3.2），格林尼治子午线为零时区的中央子午线，两旁各 7.5°的经度范围属零时区。这一时区内采用格林尼治地方时，即世界时。类推有东一时区、东二时区、东三时区……东十二时区；西一时区、西二时区……西十二时区。东十二时区和西十二时区重合，共同使用 180°经线的地方时。这样划分，区时和地方时相差不超过半小时，对人们的生活影响不大。显然，区时等于世界时 UT 与时区号 N 相加。东时区 N 为正，西时区 N 为负。

不同的国家根据自己的法律规定使用自己国家的统一区时。我国从东向西横跨五个时区。中华人民共和国成立后，我国统一采用北京所在的东八时区的区时，即东经 120°经线的地方时为“北京时间”。需注意的是，北京时间是区时，不是北京地方平时，二者相差约 14.5 分钟。

$$\text{北京区时} = \mathrm{UT} + 8^h$$

中央人民广播电台发出的时号就是北京区时，减去 8 小时就是世界时。

六、区时与地方恒星时的换算

我们日常生活采用区时，而天文观测要用恒星时，因此，区时与恒星时的换

算是很重要的。如果在地理经度为 λ 的地方(第 N 时区)的区时为 T,那么此时的地方恒星时 S 可由下式确定:

$$S=S_0+(T-N)(1+1/365.242\,2)+\lambda$$

式中 S_0 为当日世界时零时的地方恒星时,可查天文年历得到。

例如,北京时间是东经 120°的时区,(第 8 时区),北京的地理经度 $\lambda=7^h45^m$,则有

$$S=S_0+(T-8^h)(1+1/365.242\,2)+7^h45^m$$

在天文观测时,已知区时,又知当地的地理经度就可以利用上式求出地方恒星时,把恒星钟对准,观测就有了恒星计时信号。已知地方恒星时 S,就可由 $S=\alpha+t$ 计算出当时天体的时角 t,于是由天体的赤纬和时角,就可以利用望远镜对天体进行观测了。

七、日界线

按区时系统计量时间,平太阳日的起始时刻是不同的。为了统一全球的日期,国际规定,在太平洋中以 180°经线为准,避开陆地和岛屿画一条国际日期变

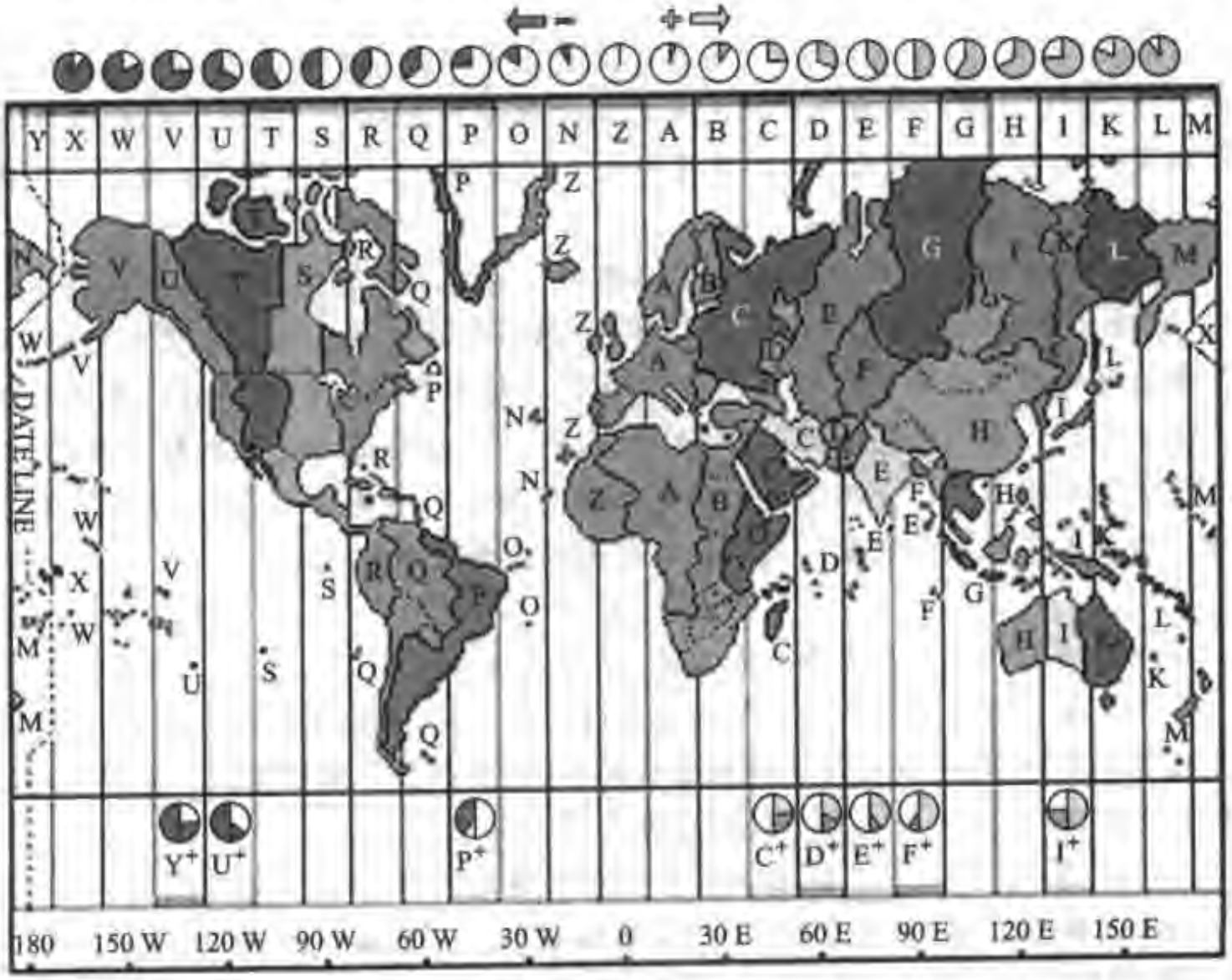


图 3.2　区时与日界线

更线，叫做**日界线**。在浩渺的南太平洋上，有三个岛屿：汤加塔布岛，瓦乌群岛和查塔姆群岛。这三个岛屿跨越在180°两边。为了避免一个国家分属两个半球带来时间的混乱，把这三个群岛都划入东半球，归入东经180°，这样，汤加和新西兰的一些岛屿上的国民最先敲响每年的新年钟声。

从日界线以东往西走，越过日界线，即从西十二区进入东十二区，日期增加一天，时间不变，如果自日界线以西往东走，越过日界线，即从东十二区进入西十二区，日期减一天。假如一个产妇坐飞机，恰巧在飞越日界线前后出生了一对双胞胎，飞机在东十二区上空出生了第一个婴儿，飞机飞越日界线，进入西十二区上空之后，又出生了一个婴儿，那么这两个婴儿的出生日期正好相差一天，后出生的婴儿，应当是弟弟(或妹妹)，但生日日期却早一天，按生日日期来论，反而成为哥哥(或姐姐)。

*第2节　原子时、历书时和力学时

一、原子时

在20世纪30年代之前，世界各天文台主要用精密的天文摆钟来维持时间的计量(称为守时)，从而连续地发布时间。但是天文摆钟受气温、湿度、气压等条件变化的影响，每天的误差约为千分之一秒左右，经常需要用光学望远镜观测恒星的方法来改正钟的误差。

20世纪30年代，人们制造出了石英钟。石英振荡器的振荡频率比摆钟稳定，它的发明使计时精度提高了一个量级，但石英钟仍然受气温变化的影响，以及振荡器存在老化和长期的变化。50年代出现了原子钟。原子钟的基本原理是原子具有一系列确定的能级，如E_1、E_2、…、E_n，它的最低的能级称为基态，其他能级称为激发态。当原子从一个能级跃迁到另一个能级时，会以电磁波形式向外辐射或吸收电磁能量。两个能级之间的能量差满足关系式：

$$E_2-E_1=h\nu$$

$h=6.62\times10^{-20}\mathrm{J}\cdot\mathrm{s}$($h$为普朗克常量)，$\nu$为跃迁频率。

原子在具有相应频率的外界电磁场作用下，将从高能级跃迁到低能级，并向外辐射能量，使外界入射的电磁能量得到放大，即产生了感应辐射。原子跃迁的频率非常稳定，目前把铯原子的跃迁频率作为标准。

1967年10月第十三届国际度量衡会议通过原子时秒长的定义为：位于海平面上的铯133原子基态的两个超精细能级，在零磁场中跃迁辐射振荡为9 192 631 770周所持续的时间。原子时的起始时刻定为1958年1月1日世界时零点这一瞬间。这时原子时秒长等于世界时(平太阳时)秒长。但这一瞬间，

两种时间计量系统相差为 $UT_1-TAI=+0.003\ 9\ s$，UT_1 是世界时 UT_0 经过地极移动改正后的世界时（UT_0 是由观测处理得到的，以地球自转为基准的世界时）。1969 年，当时的国际时间局（BIH）用几台精度更高，更稳定的铯原子钟组成一个系统来维持时间标准，称为 TAI。

铯原子钟的准确度能达到 10^{-12} 量级，也就是说，铯原子钟每天误差只有一亿分之一秒。或者说，铯原子钟约 30 万年才有 1 s 的误差。

目前除了铯原子钟之外，还有铷原子钟，它的体积较小，但准确度稍差。氢原子钟的准确度最好，达到 10^{-15} 量级，也就是说比铯原子钟还好 1 000 倍，但它的体积比较庞大。

二、历书时与力学时

由于地球自转是不均匀的，所以以自转为基础的世界时 UT_0 也是不均匀的。为了得到均匀的计量时间单位，1958 年第十届国际天文联合会决定以地球公转作为时间的计量单位，称为历书时。历书时（ET）的精确定义为：从公元 1900.0 太阳几何平黄经为 279°41′27.54″的瞬间起算，这一瞬间的历书时记为 1900 年 1 月 0 日 12 时正。1900.0 瞬间回归年长度的 31 556 925.974 7 分之一定义为历书时秒长。从 1960 年开始，天文年历中太阳、月球和行星历表都以历书时为基准进行计算，但是历书时需要用月球的运动来确定，误差比较大，后来改用力学时。

力学时是以天体力学理论计算得到的，天文历表所用的时间系统。以太阳系质心为基准的力学时，称为太阳系质心力学时，记为 TDB。力学时与原子时（TAI）关系为：规定原子时 1977 年 1 月 1 日 $0^h00^m00^s$ 瞬间对应的地球力学时为 1977 年 1 月 1.000 372 5 日。

根据国际天文学联合会决议，天文年历从 1984 年开始采用新的标准历元，即 2000 年 1 月 1.5 日力学时（TDB）为 J 2000.0，此时儒略日 JD= 2 451 545.0。

三、时间的精确测定

在 20 世纪 70 年代以前，天文上主要通过用光电中星仪，光电等高仪，摄影天顶筒等仪器观测恒星来精确测定时间。比较简单的方法是用中星仪，该仪器的望远镜指向子午圈以观测恒星过子午圈的时间，即恒星中天的时刻。我们知道一颗恒星中天时，恒星时就等于该恒星的赤经，即 $S=\alpha$。达种方法要求望远镜指向子午圈，但实际上望远镜指向会有微小的误差，即可能偏离子午圈一个小角度。为了改正这种误差，在观测过程中，测定望远镜的指向误差 t'，可得

$$S=\alpha+t'$$

观测时记录恒星过子午圈的时刻 S'，那么可得到

$$S = S' + u = \alpha + t'$$

u 是守时钟的钟差。从星表中查出 α，或者通过计算得到观测时刻该恒星的视赤经 α，我们就可以准确地测定钟差 u，也就可以得到准确的时间是 $S=S'+u$。然后把恒星时 S 换算成平太阳时。为了提高观测精度，减小观测误差的影响一般在 1～2 小时内观测一组恒星，约 20～40 颗恒星，记录各颗恒星中天的时刻和误差改正，计算每颗恒星中天时得出的钟差改正，最后取平均，即可得到比较准确的时间。

可见测定精确的时间，实际上是测定一个钟的误差，改正钟差，即可得到准确的时间。这要求守时钟非常稳定，变化很小，可以把观测得到的准确时间保存下来，以便及时提供精确的时间。

20 世纪 80 年代以来国际上采用人造卫星激光测距(SLR)、甚长基线干涉测量(VLBI)、全球人造卫星定位系统(GPS)和激光测月(LLR)等高新技术，精确测定地球定位参数。1988 年开始由国际地球自转服务局(IERS)综合全球观测资料，向全世界提供精度高于 0.1 ms 的精确时间和精度高于 0.001″的地极坐标等地球定位参数。

第 3 节 历法与节气

我们知道以春分点作为标准，计量地球公转一周的时间，叫**一个回归年**。一个回归年包括 365.242 2 个平太阳日。人们习惯一年中有整日数，把计量一年中日数(整数)的方法和怎样选取起算点的方法称为历法。在历法中一年必须包含日的整数，称为历年。历法的研究史实质上是使历年的平均长度逐渐接近回归年长度的历史。

中国的历法研究有悠久的历史，自两千一百多年前战国时代就诞生了阴阳历，以后又不断地对其进行改革和修订。随着人类社会的发展，历法也不断发展，日趋完善。

目前国际上通用的公历又称格里历，它的前身是儒略历。这两种历法都是太阳历简称阳历，它以回归年为基本单位，与朔望月毫无关系。

一、儒略历

儒略历将每年划分为 12 个月，逢单的月份为大月，有 31 天，逢双的月份为小月，有 30 天。在 4 年中有一个闰年，3 个平年，闰年有 366 天，平年在二月份扣掉一天，一年有 365 天。因此，儒略历平均的年长为 365.25 天，它比回归年长 0.007 8 天。

二、格里历

格里历是公元 1582 年由罗马教皇格里哥里 13 世颁行的。它的一年中

1月、3月、5月、7月、8月、10月与12月为大月，有31天；4月、6月、9月和11月为小月，有30天；二月份在平年时为28天。（我国民众传颂的“一、三、五、七、八、十、腊（十二月），31天永不差；四、六、九、冬（十一月）三十日；只有二月二十八。”）

格里历规定四年一闰，闰年的二月份为29天。它还规定：凡公元数能被4除尽的年为闰年，除不尽的为平年；但对整世纪的年份如1600年、1700年、1800年等，只有世纪数能被4除尽的才是闰年，不能被4除尽的仍为平年。比如1900年的世纪数是19因而1900年就不是闰年而是平年，2000年是闰年。这样，格里历每400年中不是有100个闰年而是扣除了3个闰年，有97个闰年，共有(400－97)×365 ＋ 97×366＝146 097天与地球真正的公转周期，即回归年100×365.242 2＝146 096.88天在400年中只差0.12天，每年与回归年仅差0.000 3天，显然比儒略历更为接近地球公转周期。格里历在三千多年以后与回归年才差一天，精确度已够用，所以格里历被沿用至今称为公历，以公元纪年。我国采用格里历并以1月1日作为一年的开始，用公元作为纪元。世界许多国家也采用这种纪元方法。

三、中国农历

中国最早使用阴阳历，因为有二十四节气，能指导农事活动，所以后来又叫农历。这种历法是以月亮圆缺，即月相盈亏和太阳的周年视运动的周期为依据的。中国农历历法规定：以月相为朔的日期定为下一个月的初一。由于月相的朔望周期不是日的整数，平均为29.530 59天，便规定：大月30天，小月29天。此外，由于地球公转运动不是均匀的，如在近日点比在远日点处运动快，所以朔望周期也长短不一，最多相差约半天，所以规定有的年份连续几个大月或连续几个小月。

中国农历也是以回归年为依据的。但回归年的周期与朔望月的周期是不通约的。积12个朔望月为354天或355天，与回归年相差11天左右，3年累计已超过一个月。调节的方法是在有的年份安排有13个月，有两个一样的月份，成为置闰。置闰的规则依据二十四节气来定。

四、二十四节气

每年地球围绕太阳在黄道上公转一周，地球上的观测者在不同的夜晚，看到的星空随季节不断变化，这反映太阳在黄道上视位置的变化，可用黄经来表示，一年从0°至360°。

在五千年前，我国人民为了按时农业耕种就有了二分（春分、秋分）和二至（夏至、冬至）的概念。到战国末期完善了二十四节气的名称。二十四节气是把

黄道等分成为 24 段，太阳视运动每经过一段的时间定为一节气。因为太阳在黄道上的视运动是不均匀的，所以各节气的时间长度也不相等，各个节气所对应的太阳黄经和时间列于表 3.1。二十四节气是天文历法的一部分，沿用至今，是安排农业生产掌握农时的重要依据。

表 3.1 二十四节气每年发生的日期(月-日)与太阳的黄经

春季	立春	雨水	惊蛰	春分	清明	谷雨
	02-4;5	02-19;20	03-5;6	03-20;21	04-4;5	04-20;21
太阳黄经	315°	330°	345°	0°	15°	30°
夏季	立夏	小满	芒种	夏至	小暑	大暑
	05-5;6	05 21;22	06-5;6	06-21;22	07-7;8	07-23;24
太阳黄经	45°	60°	75°	90°	105°	120°
秋季	立秋	处暑	白露	秋分	寒露	霜降
	08-7;8	08-23;24	09-7;8	09-23;24	10-8;9	10-23;24
太阳黄经	135°	150°	165°	180°	195°	210°
冬季	立冬	小雪	大雪	冬至	小寒	大寒
	11-7;8	11-22;23	12-7;8	12-21;22	01-5;6	01-20;21
太阳黄经	225°	240°	255°	270°	285°	300°

五、儒略日

儒略日是种长期纪日法，它以公元前 4713 年，1 月 1 日格林尼治平正午，即世界时 $UT=12^h$ 为起算点，连续不断累计日数。在天文观测中特别是变星、双星的观测中常利用儒略日来计算日期和时间。中国天文年历的附表中载有世界时为零时的儒略日。例如，2001 年 11 月 18 日北京时 8 点(世界时为 0 点)的儒略日为 2 452 231.5。

六、干支纪年

中国有一套比儒略日更古老的连续纪日的方法，它从殷商时代就已被使用，今日在绘画、书法艺术领域还沿用干支纪年。干支就是甲乙丙丁戊己庚辛壬癸 10 个天干和子丑寅卯辰巳午未申酉戌亥 12 个地支。天干和地支的搭配，共 60 个顺序，又称“六十花甲子”，周而复始，循环使用。干支纪年是从东汉章帝元和二年(公元 85 年，乙酉年)四分历开始的。公元年数与年的干支可用下述方法加以换算。首先，对天干和地支分别给以序号(如表 3.2)。

表 3.2　干支序号表

序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
天干	庚	辛	壬	癸	甲	乙	丙	丁	戊	己		
地支	申	酉	戌	亥	子	丑	寅	卯	辰	巳	午	未

对于任一公元年数：

天干序号＝公元年尾数；

地支序号＝(公元年数/12)的余数。

例如：公元 2003 年，天干的序号＝3，天干为癸；地支序号＝(2003 / 12)的余数＝11，地支为未。所以公元 2003 年为癸未年。

*第 4 节　天体的出没时刻

天体的出没时间是变化的，掌握它的规律和特点，才能顺利进行观测。由于地球绕日公转一周(360°)要运行 365.242 2 天，所以视太阳在天球上沿着黄道每天大约东移 1°，因此同一颗星，第二天就比头一天早升起 4 分钟。

天体在出没的瞬间位于观测的地平上，所以天顶距都是 90°(即 $z=90°$)。如果观测地的地理纬度 ϕ 已知，通过查星表可知某天体 σ 在一定历元(例如 2000 年)的天球赤道坐标：赤经 α 和赤纬 δ。

如图 3.3 所示，由坐标换算公式：

$$\cos z=\sin\phi\sin\delta+\cos\phi\cos\delta\cos t$$

且 $z=90°$，可得

$$\cos t=-\tan\phi\tan\delta$$

由此式给出两个解：即时角 t 的正值与 t 的负值，前者为天体没地平的时角，后者为天体出地平的时角。

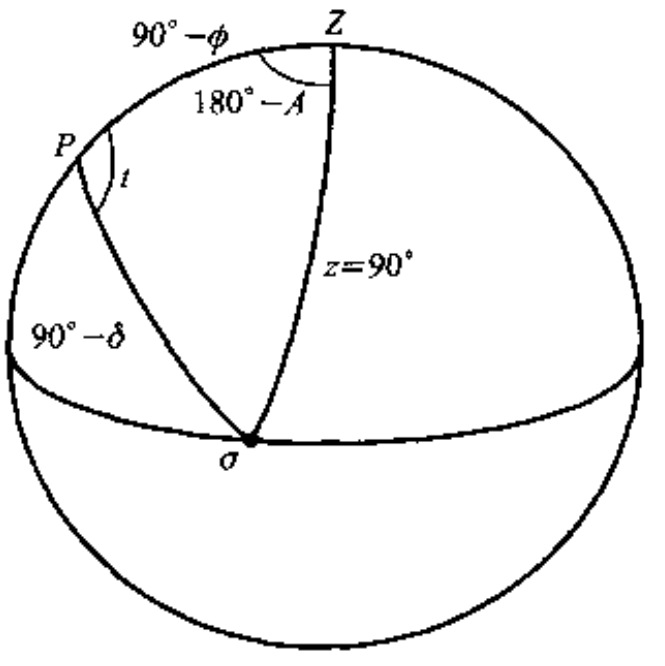


图 3.3　天体出没时的天文三角形

由恒星时 S 和时角 t 的关系式 $S=\alpha+t$ 可求出 S，再由上述恒星时 S 和北京时 T 的关系，可以推算出北京时或世界时。如此可以求出天体出、没地平的北京时间或世界时间。

天体出没的方位角 A 也可由坐标变换公式得到

$$\sin\delta=\sin\phi\cos z-\cos\phi\sin z\cos A$$

由于 $z=90°$，可得　$\cos A=-\sin\delta/\cos\phi$，此式给出两个解：大于 180°的 A 对应于没地平的方位；小于 180°的 A 对应于出地平的方位。方位角 A 从北点起计

量，0～360°。

对于地理纬度为 ϕ 的观测地，赤纬 $\delta \geqslant (90^\circ - \phi)$ 的天体为永不下落天体；赤纬 $\delta \leqslant (90^\circ - \phi)$ 的天体为永不上升天体，只有在 $-(90^\circ - \phi) < \delta < (90^\circ - \phi)$ 范围内的天体存在出没的现象。

对于太阳和月球，上边缘出或没于地平，才算作它们的出地平或没地平。由于地球大气折射的影响及太阳和月球的视圆面比较大，计算它们的出没时刻和方位角，注意用天顶距 $z = 90^\circ 51'$ 代入坐标换算公式即可。

【例题 1】 按干支纪年法 2004 年是甲申年，问北京召开奥运会的 2008 年是什么年？

解答：公元年数与年的干支可用书中表 3.2 加以换算。

对于 2008 年：

天干序号＝公元年尾数为 8，相应的天干序号是戊

地支序号＝(公元年数/12)的余数，即 2008 / 12 ＝ 167.3

2008－167×12 ＝4 地支序号是子，所以 2008 年是戊子年。

【例题 2】 2003 年 1 月 1 日北京时间早 0 点整的儒略日是多少？

解答：2003 年 1 月 1 日北京时间早 0 点 UT ＝ $24^h - 8^h = 16^h$，是世界时 2002 年 12 月 31 日 16 点。查天文年历，可知 2002 年 12 月 31 日，世界时 0 点的儒略日为 2 452 639.5。

所以，2003 年 1 月 1 日北京时间 0 点的儒略日为 2 452 639.5＋16 / 24＝2 452 640.167。

【例题 3】 某地天文台夜间观测猎户座 α 星（$\alpha = 5^h 51^m$）上中天，而此时，格林尼治天文台（地理经度 $\lambda = 0$）的恒星钟指在 $15^h 09^m$；试确定该地的地理经度是多少？

解答：$S - \alpha = t$ 由于 $t = 0$，所以当地恒星时 $S = 5^h 51^m$，格林尼治天文台（地理经度 $\lambda_0 = 0$）的恒星钟指在 $15^h 9^m$，即 S_0 $15^h 09^m$，该星在某地天文台与格林尼治天文台的时角差 $S - S_0 = t - t_0 = 5^h 51^m - 15^h 09^m = -9^h 18^m$；由于 $t - t_0 = \lambda - \lambda_0$，所以某地的地理经度为西经 $9^h 18^m$ 或西经 139.5°。

【例题 4】 2003 年 5 月 1 日在中国国家天文台兴隆站（地理经度 $\lambda = 7^h 45^m$）观测变星 44i Boo（$\alpha = 15^h 3^m 54^s$，$\delta = +47^\circ 46.3'$），问当夜北京时间 20 点整时的儒略日和地方恒星时为多少？此变星的时角为多少？当天夜里几时是它的光变主极小时刻？（此变星的星历表给出：I_{min} JD 2 439 852.490 3＋0.267 815 9E^d，式中第 1 项为文献给出的变星光变极小时刻，第 2 项为光变周期，E 为周期的整数倍。）

解答：2003 年 5 月 1 日夜间观测，我们以北京区时 20 点为起算点。当天北京时间 20 时是世界时 12 时，儒略日 JD 2 452 762.0 在兴隆观测，先求出当日北京时 20 点时的地方恒星时，即

$$\text{地方恒星时 } S = S_0 + (20^h - 8^h)(1 + \mu) + \lambda$$
$$= 14^h 38^m 40.7^s + 12(1 + 1/365.242\,2) + 7^h 45^m$$
$$= 10^h 25^m 28.9^s$$

由恒星时角 t 与恒星时 S 和恒星的赤经 α 的关系式 $t = S - \alpha$，得

该变星的时角 $t = -4^h 38^m 14.9^s$（在东边天空）

(2 452 762.0－2 439 852.490 3)/ 0.267 815 9＝48 202.925 96

(1－0.925 96)×0.267 815 9＝0.074 04×0.267 815 9＝$0^n 28^m 33.23^s$

由于这是我们以北京时 20^h 算出的儒略日，所以 $20^h + 0^h28^m33.23^s = 20^h28^m33.23^s$。当夜可观测两个主极小：一个在 $20^h28^m33.23^s$ 出现，另一个是此时再加上一个周期(0.267 815 9 日)，即次日的凌晨 $2^h54^m12.52^s$ 也可以观测到。该变星的光变极小。

【例题 5】 一位天文学家每天都在相同的地方恒星时进行观测，而且总是注意到太阳正好在数学地平上。问观测是在何地，何时进行的？

解答：由于观测的地方恒星时是固定的，我们知道：恒星时定义为春分点的时角，所以所观测的天体在黄道上的坐标也是固定的。由于太阳的周年视运动是沿着黄道的，并且日出和日落的时刻都是在数学地平圈上，这只有在北极圈和南极圈地区才有可能。

在什么时间呢？这是容易求出来的。我们注意到在北极圈，6 月 22 日的子夜时刻，地方恒星时为 18^h；在 12 月 22 日的中午时刻，地方恒星时也是 18^h；

同理可知，在南极圈在 6 月 22 日的中午时刻，地方恒星时为 6^h，在 12 月 22 日子夜，也是地方恒星时 6^h。

所以，答案是只有在北极圈(地理纬度为 66.5°)地区，在地方恒星时 18^h 或者在南极圈(地理纬度为 −66.5°)，地方恒星时 6^h 的时候，天文学家总是观测到太阳在地平圈上。(注意，这里不考虑大气折射，所说的地平圈是指数学地平，不是看到的视地平；不考虑视地平比数学地平低的问题。)

【例题 6】 已知在中世纪广泛应用儒略历，而现在大多数国家应用格里历，从第 3 世纪到现在(2000 年)，儒略历和格里历相差了 13 天，即对于同样的日期来讲，儒略历落后格里历 13 天。上次儒略历与格里历相合是在第 3 世纪。计算到那一个世纪两个历法相差 1 年，日期又重合。比如在格里历是 10 月 22 日，儒略历也是 10 月 22 日。

解答：1 回归年 = 365.242 2 天。儒略历规定平时 1 年有 365 天，4 年一闰，在闰年里，1 年366 天，所以，儒略历的 1 平均年 = 365.25 天，为了缩小历年与回归年的长度差，格里历除了规定一年 365 天，4 年一闰以外，还规定在 100 年以上，只有世纪数能被 4 除尽的才是闰年，如公元 100 年，200 年，300 年，虽能被 4 除尽但世纪数不能被 4 除尽，就不是闰年，而 400 年是闰年。所以在 400 年中格里历比儒略历少 3 天，如此格里历的历年的平均年长为 (365.25×400−3)/400 = 365.242 5 天，和回归年在 3333 年中才差 1 天。

本题已知这两个历法在第 3 世纪(公元 300 年)相合，在公元 2000 年儒略历落后格里历 13 天。所以，2 000 − 300 = 1 700，17 个世纪内相差 13 天，即 4 个世纪差 3 天；所以 365.242 2 − 13 = 352.242 2，352.242 2/3 = 117.414；而 4×117.414 = 469.66 是继 20 世纪之后的世纪数。则 169.66 + 19 = 488.66，即第 489 世纪，格里历与儒略历相差一年，在日期上又重合了。



习　题

1. 2003 年 11 月 19 日凌晨北京时间 0^h30^m 拍照流星雨，求当时的儒略日及恒星时？

2. 现在是恒星时 6^h38^m，已知某恒星再经过 2^h10^m 后上中天。试计算该星的赤经。

3. 若今天某星于晚上 8^h0^m 中天，问过 10 天后它将在何时上中天？

4. 两地经度差等于太阳时之差，还是等于恒星时之差？

5. 设赤经等于 18^h 的恒星，在晚上 8^h 位于子午圈。问当时大概几月几日？

6. 行星穿过子午圈时比坐标为 $\alpha = 0^h19^m4^s$，$\delta = 0°13.2'$ 的恒星早 2^m19^s。当时行星的天顶距比恒星中天时大 $19.4'$。问此行星的坐标。

7. 某星的时角等于 14^h22^m。它的赤经等于 13^h2^m。试求观测时刻的恒星时。

8. 如果地球自转方向与它真正转动的方向相反，问太阳时和恒星时两者间的关系将如何？

9. 6 月 14 日，在船上用六分仪测得太阳中天是在 8^h23^m（系按照那只指示格林尼治恒星时的时计）。中天发生在天顶距 $22°2'$ 处（已计及蒙气差），按照航海天文历书，在这一天这个时刻，太阳的坐标为 $\alpha = 5^h26^m$，$\delta = 18°25'$。试确定这艘船所在处的经度和纬度。

10. 由日界线向西做环球旅行时，短少一个太阳日，那么，是否同样也短少一个恒星日。

11. 每半秒钟响一下的恒星时计和平时时计的响声每隔多久重合一次？

第四章

天文望远镜

天文望远镜是探测宇宙奥秘的重要武器，它的主要作用是收集天体的辐射，并使其成像。当今已进入全波段的观测时代，在地面上由于受地球大气窗口的限制，天体的电磁辐射在不同波段透过率不同，所以主要有光学望远镜（观测波段 300～900 nm）、红外望远镜（观测 1.25～28 μm 波段）和射电望远镜（sub-mm，mm，cm 和 m 波）；在空间，原则上不受波段的限制，目前已经发射的有 γ 射线望远镜、X 射线望远镜、紫外望远镜、光学望远镜（如：哈勃空间望远镜）、中红外望远镜和远红外望远镜。

第 1 节　当代天文学望远镜

1609 年伽利略将自制望远镜（口径 4.4 cm）（见图 4.1）指向天空，发现了月球上的环形山、木星的 4 颗卫星、金星亮度的位相变化、银河系是由许多恒星组成的等成果。自那时开始，天文观测从肉眼观测时代进入了望远镜的观测时代。天文望远镜的应用极大地扩展了人们的眼界，提高了观测的精度，给天文观测带来了革命性的变化，极大地推动了天文学的发展。



图 4.1　伽利略望远镜

几百年来人们致力于提高望远镜的贯穿本领（能观测到更暗弱的天体）和分辨本领。按照望远镜聚光的方式不同，可以将其分为反射望远镜与折射望远镜。历史上反射望远镜与折射望远镜的发展也经历了一定的过程。早年，折射望远镜由于结构简单得到较快的发展，如 1897 年，美国叶凯士天文台建成一架口径达 1.02 m 的折射望远镜，迄今为止它是世界上口径最大的折射望远镜。此后由于折射望远镜对玻璃材料要求高，而且透镜会严重吸收紫外光等原因，国际上再没有人制作更大

的折射望远镜。后来人们开始致力于发展反射望远镜，1948 年美国建成的 5.08 m反射望远镜在后来的 55 年中对天文观测做出了伟大的贡献。后来更大口径的望远镜在世界林立。为什么人们致力于发展口径越来越大的光学望远镜呢？这是因为口径越大，收集的光量越多，贯穿本领越强，分辨本领也越高。曾经有一段时期，研制大口径的镜面比较困难，如受重力弯沉、温度变化影响，大镜面容易变形，大口径望远镜发展一度受阻。近年来应用多镜面拼接技术及光干涉技术，特别是随着实时矫正镜面变形的主动光学技术和自动补偿大气湍流影响的自适应光学技术的发展使望远镜突破大镜面的难关，口径有越来越大的发展趋势。

当代 5 m 以上口径的大望远镜已经有十多个，主要有美国两个 10 m 口径的凯克望远镜(分别称为凯克Ⅰ和凯克Ⅱ，都兴建在夏威夷的莫纳克亚山)，它们是目前世界上最大的光学望远镜。凯克望远镜由 36 块直径 1.8 m，厚10 cm的镜子组合成的，有效口径为 10 m，焦距为 17.5 m，镜面为双曲面(参见图 4.2)。欧洲南方天文台(ESO)有四台口径为 8.2 m 的望远镜，它们可以独立观测，又可以组合起来形成一个有效口径为 16 m 的望远镜，兴建在智利的 Cerro Paranal 山上。



(a)凯克望远镜的圆顶　　(b)望远镜的主镜和副镜

图 4.2　凯克望远镜

由美国、英国、加拿大、澳大利亚、智利、巴西和阿根廷七国联合兴建的双子座望远镜，由两台口径为 8.1 m 的望远镜组成，分别建在南、北半球，双子座北望远镜安装在夏威夷的莫纳克亚山，于 1999 年 7 月建成并投入使用，双子座南望远镜安装在智利，于 2000 年底投入使用。

日本的昴星团(Subaru)望远镜，是口径 8.3 m(单镜面)的望远镜，安装在夏威夷的莫纳克亚山，于 1999 年 1 月投入使用。它有如下终端设备：红外照相机和光谱仪(IRCS)；自适应光学成像仪(CIAO)；中红外照相机及分光计(COMICS)；暗弱天体照相机和光谱仪(FOCAS)；主焦点照相机(Suprime

Cam)；高分辨光谱仪(HDS)和抗大气干扰的微光摄谱仪及自适应光学设备(AO)。俄罗斯的 6 m 望远镜建在高加索，1976 年投入使用。美国的麦哲伦望远镜，口径为 6.5 m，建在智利的拉斯坎帕纳斯山，1997 年建成。和特(HET)9 m 望远镜建在美国麦克唐纳天文台，是光学红外光谱巡天望远镜，该望远镜由 85 个口径为 1 m 的球面镜组成，附属两个光谱仪，一个是阶梯光栅高分辨光谱仪，另一台是低分辨的卡焦摄谱仪。

目前正在建造的望远镜，主要有欧洲南方天文台的大双筒望远镜(LBT)，以及南非大望远镜(SALT)。LBT 望远镜是美国、意大利合作制造的，由两个 8.4 m组成的等效口径为 11.8 m 的双筒望远镜，安装在美国的亚利桑那州图桑的东北，将于 2004 年投入使用。南非大望远镜由南非、德国、波兰、美国和新西兰合作建造，安放在位于南非的北开普省，主镜是有效口径为 11 m 的正六边形拼镶镜，预计 2005 年完成。美国加州理工学院等已开始研制口径为 30 m 的极



图 4.3　中国的 2.16 m 望远镜

大望远镜(ELT)的计划;还有西班牙及欧洲南方天文台(ESO)等开始筹划建造口径 100 m 的望远镜(OWL)。

世界上口径大于 2 m 的光学望远镜有 40 余台。中国目前最大的 2.16 m 望远镜,安装在国家天文台兴隆观测站(参见图 4.3),它对发展我国的天体物理科学研究起着巨大的作用。目前正在筹建一台大面积天区多目标天体的光谱巡天望远镜(LAMOST),它的有效口径为 4 m,主要用于天体的光谱巡天观测。此望远镜新颖独特的设计思想获得了国际天文界的赞誉,在 21 世纪它将为我国天文事业的发展做出重要贡献。

第 2 节　天文光学望远镜系统

一、天文光学观测仪器系统

天文光学观测仪器系统主要包括望远镜、辐射分析器、探测器和记录器。利用望远镜可以收集天体的电磁辐射,使之成像,由辐射分析器(包括摄谱仪、视频仪、干涉仪和滤光片等)和探测器(照相底片、光电倍增管、CCD 等)接收辐射,取得信息,通过计算机进行信息的实时处理。计算机还可发送信号控制望远镜和分析器的运转。

二、光学望远镜的类型

光学望远镜的光学部分主要是望远镜的物镜和目镜。物镜是核心器件,起聚光作用,其光学性能的好坏至关重要。物镜是反射镜的叫反射望远镜;物镜是透镜的叫折射望远镜;物镜是反射镜,但是前面加一块改正像差的透镜组成的望远镜叫折反射望远镜(参见图 4.4)。

1. 折射望远镜

折射望远镜的物镜是复合透镜,即由两块以上的透镜组成,其光力(望远镜的口径和它的焦距之比 D/F)较小,镜筒长。折射望远镜适合于测定恒星的位置、运动等以及作为导星系统。由于大口径的光学玻璃易受温度、压力影响而变形,而且玻璃对紫外光吸收很严重,因此,19 世纪制造的口径 1 020 mm 的折射望远镜成了绝代最大折射望远镜。现代设计大型望远镜已不再考虑采用折射望远镜系统。

2. 反射望远镜

反射望远镜的物镜是反射镜,为了消除镜子的像差,一般物镜做成抛物面镜或双曲面镜。反射望远镜与折射望远镜相比不会造成像的色差,可以使用大口径的玻璃材料,也可以采用多镜面拼镶技术,镜面镀铝或镀银后,从紫外到红外

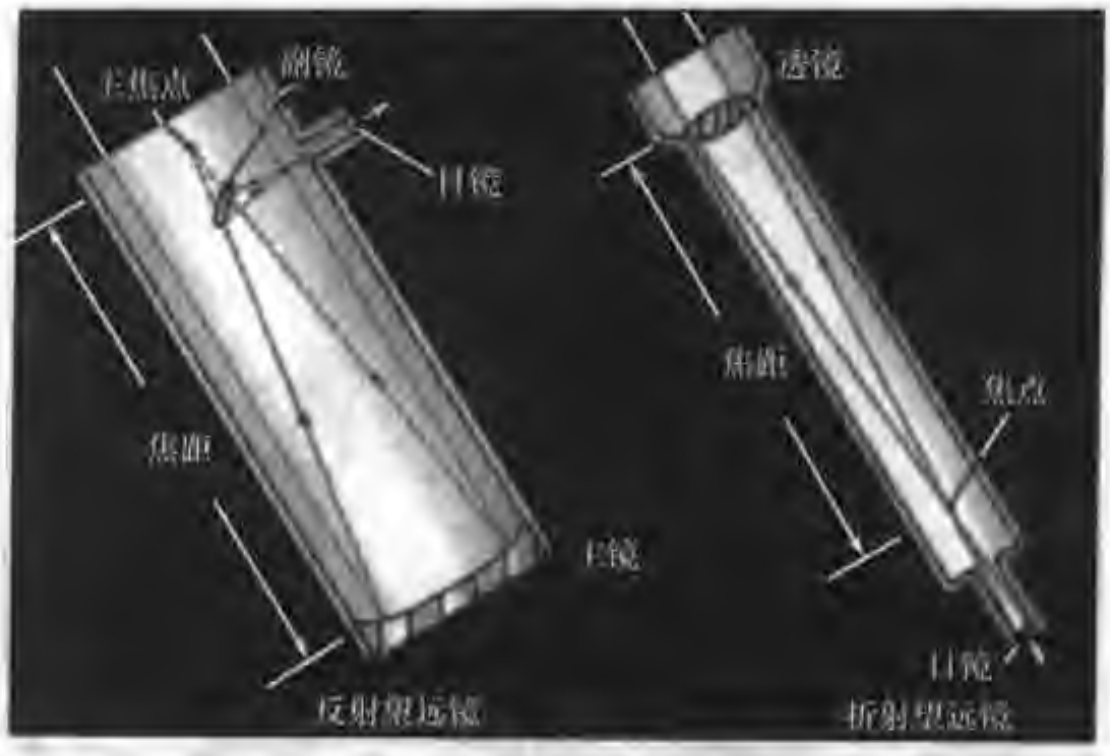


图 4.4　反射望远镜与折射望远镜的光路图

都具有良好的反射率，所以目前发展和设计的新型望远镜都是采用反射望远镜系统。

反射望远镜可以工作在不同的焦点，由于工作焦点的不同，反射望远镜可分为以下几种系统：

(1) 主焦点系统　在物镜的主焦点进行观测的系统。

(2) 卡塞格林系统　卡塞格林系统的主镜为抛物面镜，副镜为凸的双曲面镜。在物镜的中心挖一个洞，光束从洞孔穿出后再成像。这种系统可以在望远镜的后面方便地附加终端设备，例如附加光电光度计等。

(3) R-C 系统　它类似于卡塞格林系统的光路，也是在物镜的中心挖一个洞，光束经过主镜和副镜后，会聚的光从洞孔穿出后再成像，只是它的主镜是凹的旋转双曲面镜，副镜是凸的旋转双曲面镜。这种系统有较好的像质和较大的视场。

(4) 牛顿系统　在系统中除了物镜外，附加了一个平面反射镜将主镜的焦点折出镜外。这种系统叫牛顿系统。因多了一个反射镜面光损失较大，目前已很少使用。

(5) 折轴系统　这种系统的望远镜物镜，出射的光束通过一平面镜反射到极轴方向，因为天体是绕极轴做周日视运动的，所以在望远镜跟踪天体转动时可以在空间固定处获得天体的像。这可以方便在其后附加大型的固定终端设备，例如大型摄谱仪等(参见图 4.5)。

3. 折反射望远镜系统

施米特望远镜是折反射系统，系统中的主镜为一个球面反射镜，球面镜的前面还配置了一个改正透镜，以改正球面反射镜的像差。这种系统是一

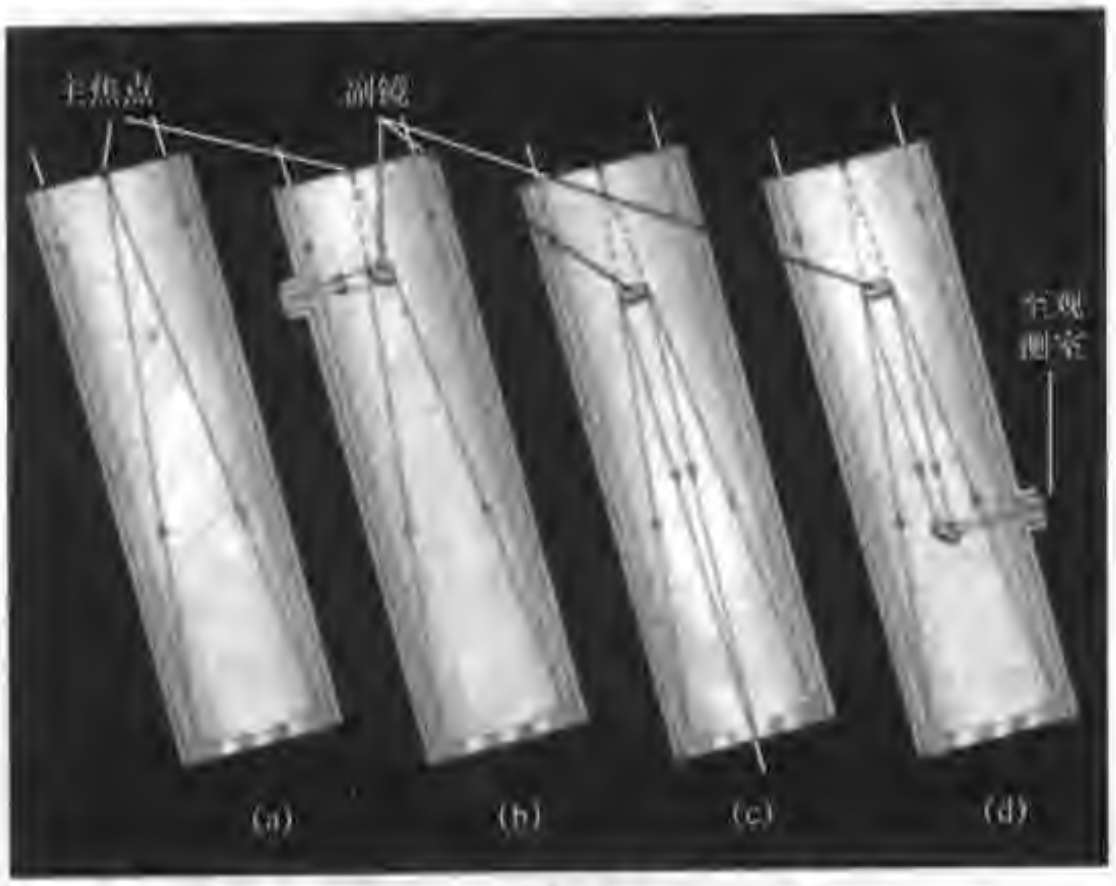


图 4.5　反射望远镜的四种焦点系统

(a)主焦点系统;(b)牛顿系统;(c)卡赛格林系统或 R－C 系统;(d)库德折轴系统

个可以得到大视场的优质成像系统。一般施米特望远镜有效视场可达十几平方度。

施米特-卡塞格林望远镜是一种施米特系统与卡塞格林系统相结合的系统，其特点是把施米特改正透镜里面有金属镀膜(铝或银)的中心区，作为副镜用，会聚的光束通过主镜中心孔成像于主镜后的焦面。

第 3 节　天文光学望远镜的光学性能

衡量天文望远镜光学性能的好坏主要有六个参量：(1)望远镜的通光有效口径；(2)光力，即相对口径；(3)分辨本领；(4)视场；(5)放大率(对目视望远镜)或底片比例尺(对照相望远镜)；(6)极限星等(或叫贯穿本领)。

1. 口径(D)

望远镜的口径指望远镜的有效通光直径。口径愈大能收集的光量愈多，即聚光本领就愈强，口径愈大愈能观测到更暗弱的天体。因而，大口径显示着探测暗弱天体的威力大，这是因为望远镜接收到天体的光流量与物镜的有效面积(πr^2)成正比。1609 年伽利略望远镜的口径仅有 4 cm 左右，但是它比人的眼睛(瞳孔的直径在夜间观察约为 6 mm)的通光面积大 43 倍，所以才掀起了天文观测的新时代。人眼直接观测只能看亮于 6.5^m 的星，可是通过 10 m 口径的望远镜能看到比 22^m 还暗的星。

2. 光力(A)

望远镜的光力也叫相对口径，即口径 D 和焦距 F 之比，$A=D/F$。光力的倒数叫焦比($1/A=F/D$)。望远镜的光力越大，观测有视面天体(如太阳、月亮、行星、彗星、星系和星云等)就越有利，因为观测到天体的亮度与光力 A^2 成正比。例如，天文学家为了研究太阳的精细结构和细致的活动情况，需要通过望远镜呈现出一个大而明亮的太阳像，这需要口径大，焦距长的望远镜来观测。又如彗星观测，要研究它的形状，彗头、彗尾等结构也需要用光力大的望远镜。

3. 分辨本领(R)

望远镜的分辨本领是指望远镜能分辨天体细节的能力，它是望远镜很重要的性能指标。如果望远镜分辨本领低，放大率再大，像也是模糊的。望远镜的分辨本领由望远镜能够分辨的最小角度(叫分辨角)来衡量。显然，分辨角越小，望远镜的分辨率越高。根据光的衍射原理，两束光刚能分开的最小角度叫分辨角。在望远镜(通光孔径为圆孔)的情况下，分辨角由如下公式确定：

$$\delta=1.22\lambda/D$$

式中 D 为望远镜的口径；λ 为入射光的波长。显然，望远镜的口径越大其分辨本领越高，同样口径的望远镜接收到的光，其波长越短，分辨本领越高。例如一台 1 m 的光学望远镜(目视的有效波长为 555 nm)的分辨本领是一台工作在 2 m 波段的口径 1 m 的射电望远镜的分辨率的 3.6×10^6 倍(360 万倍)！

分辨角 δ 常用角秒为单位($1\text{rad}=206\ 265''$)。目视望远镜最敏感的波长 $\lambda=555$ nm，用望远镜的物镜口径 D(mm)来计算，则有如下简化公式：

$$\delta''=140''/D\quad(\text{mm})$$

在良好的天文台址条件下，望远镜的口径愈大，分辨本领愈高，愈能分辨天体的更精细结构，越能观测更暗、更多的天体。所以用分辨角的倒数 $1/\delta''$ 表示望远镜的分辨本领 R。如果在大气抖动厉害的时候，口径大的望远镜的高分辨率是难以实现的，就如同“英雄无用武之地”。例如，10 m 的大望远镜，它的分辨角 δ'' 理论值为 $0.014''$，如果大气抖动很厉害，使星的影像直径就有 $2''$，那么这架大望远镜也实现不了高分辨本领的优越性。

4. 视场(ω)

望远镜的成像良好区域所对应的天空角直径的范围叫望远镜的视场，用角度(°)表示。若望远镜存在较大的像差，视场边上的像质很差，成像的良好区小，自然视场就小。对于星系或特殊天体的巡天观测必须要有大视场的望远镜，这样，一次观测就可以覆盖比较大的天区。

施米特望远镜的焦距比较短，更主要的是它的光学系统的像差消得比较好，故它的视场 ω 可达十几度。一般反射望远镜的视场 ω 小于 1°。视场的理论值初步计算可用如下公式：

$$\tan(\omega/2)=D/F$$

如果光学系统存在较大的像差，视场边上的像质量很差，成像良好区小，自然望远镜的视场就小，远远达不到计算的理论值，所以，望远镜的视场大小要根据实际观测来测定。

5. 望远镜的放大率 G 与底片比例尺(α)

(1) 望远镜的放大率

望远镜放大率是对目视望远镜讲的，有人认为望远镜的放大率越大越好，买望远镜，先问它有多大放大率？对于普通民用望远镜(如双筒望远镜)，这是一个需要考虑的参数，但对于天文望远镜而言，这是一个错误的想法。如果望远镜的口径小、分辨率很低，放大率再大，也还是不清楚。

目视望远镜的放大率等于物镜的焦距 F_1 与目镜的焦距 F_2 之比，即

$$G=F_1/F_2$$

一架望远镜配备多个目镜，就可以获得不同的放大率。显然目镜的焦距越短可以获得的放大率越大。常用的目镜的焦距为 10 mm 左右，用它配在焦距 800 mm 的望远镜物镜后面，就可获得 80 倍的放大率。有的天文爱好者用显微目镜，可获得上千倍的放大率，这样并不好，因为小望远镜用过大的放大率，观测天体变得很暗，而且由于光的衍射效应，其像会变得模糊。适合观测的最低放大率由如下决定，$G_{min}=D/d$(眼)，这称为等瞳孔放大率。如 45 cm 口径的望远镜的等瞳孔放大率，$G_{min}=D/d=450/6=75$ 倍。目视望远镜的放大率也不要过大，最大放大率决定于目镜的最小焦距。一般按经验取 $G_{max}=4Gr$，而 $Gr=60''/\delta''$。式中 δ''为望远镜的分辨角。例如 40 cm 口径的目视望远镜的分辨角 $\delta''=140/400=0.35''$，所以，最大放大率，$G_{max}=4Gr=4\times60/0.35=685$ 倍。

(2) 底片比例尺

照相望远镜在焦面获得天体的像，像平面上 1 mm 与对应天空的角直径(角秒)的比率，叫做“底片比例尺”，采用(″)/mm 为单位。我们知道 1rad=206 265″，则底片比例尺为

$$\alpha=206\ 265/F(('')/\mathrm{mm})$$

式中 F 为物镜的焦距，以毫米为单位。显然，若要测量天体的位置或照月球的环形山的细节应当选用有长焦距物镜的望远镜；若要观测星系或做某种特殊天体的巡天，则要用视场大的施米特望远镜，它的底片比例尺大。

6. 贯穿本领(极限星等)

通过望远镜能看见的最暗的星等为望远镜的贯穿本领。它反映了望远镜观测恒星方面的能力。当然，望远镜的口径越大，就能观测到越暗的天体。此外也与望远镜后接的探测器有关。例如 CCD 就比照相底片量子效率高。对于照相观测或用电荷耦合器件 CCD 观测，由于有累积效应，在一定的时间范围内露光

时间越长就能观测到越暗的星，望远镜的贯穿本领也越高。当然不能任意延长露光时间，因为延长到一定程度后，由于夜天光的作用也会导致贯穿本领的降低。所以配有照相机，光电倍增管，光电成像器件和 CCD 等探测器的天文望远镜，其贯穿本领不仅决定于天文望远镜本身，而且也和这些探测器的灵敏度有关。其贯穿本领必须根据望远镜和探测器的特性进行具体实测而定。

对于目视望远镜，它的极限星等可以经验地用如下公式计算：

$$m=6.5+5\ \lg\ D/d+2.5\ \lg\ k$$

$$d=6\ \text{mm}, k=0.6$$

则有

$$m=2.1+5\ \lg\ D$$

例如，我国最大的 2.16 m 望远镜，它的目视极限星等约为 18.7^{m}，而用 CCD 做成像观测的极限星等可达 21^{m}。

天文望远镜光学性能的总评价可以用一个叫品质因子 Q 的参量来度量。它的定义是

$$Q=F\cdot\omega^{2}\cdot\Delta\lambda$$

式中的 F 为流量密度的增益，ω 为望远镜的视场，$\Delta\lambda$ 为望远镜观测的波段范围。对于地面望远镜，有

$$F=\left(\frac{D}{\delta F}\right)^{2}\eta$$

式中 η 为望远镜的通光反射或透射效率，δ 为星像的视影直径。由此式可知好的大气条件（大气宁静度高，透明度高）使星像的视影直径变小与增大望远镜的口径是等价的。

显然，流量密度的增益 F 愈大时，获得信息质量会更好，望远镜的视场 ω 愈大，自然可以观测到更多的天体；可观测的工作波段 $\Delta\lambda$ 的范围越大，应用范围也就越广，所以新一代的大型天文望远镜设计均是以高品质因子 Q 为目标的。

* 第 4 节　光学望远镜的光学像差

实际制作的望远镜的光学性能往往不能满足理想条件，光束经过光学系统后都不能得到良好的像，如恒星呈现为一个衍散的圆斑，星系的样子变形等，这些都是光学系统有像差的表现。实验表明，望远镜不可能完全消除像差，只要镜面光学磨制的误差小于或等于入射波长的四分之一，就是一个良好的光学系统。这也叫瑞利准则。望远镜的像差有如下几种：

1. 球差

平行于光轴的光束入射到望远镜的物镜上，离光轴近的光束比离光轴远的光束聚焦在更远的地方，此差称为球差。在实际应用中，反射物镜一般不用球面

镜而采用抛物面镜，或双曲面镜其目的就是减小球差的影响。由于正透镜的球差为负值，负透镜的球差为正值，所以天文折射望远镜的物镜一般都是采用两块（正透镜和负透镜）以上的复合透镜，以达到减小球差的目的。

2. 彗差

与光轴倾斜比较大的平行光束入射到物镜，在焦平面上得不到点源像，而是成一个像彗星状的斑点，称为彗差。反射镜做成旋转双曲面即可以减小彗差。

3. 像散

窄细的倾斜平行光束通过光学系统后不会聚于一点，其在光轴的焦面处也不是一点而是一个弥散的圆，这种现象称为像散。

4. 场曲

光学系统成像的焦面不是平面而是一个曲面，这种现象称为场曲。

5. 畸变

由于望远镜的光学系统的各个方向放大率不同所造成像有变形，称为畸变。

6. 色差

光束通过望远镜的透镜物镜时，由于折射率随波长变化而造成不同波长的光聚焦在光轴的不同处，使像呈现颜色，称为色差。单透镜不能消除色差，因此折射望远镜常采用多块不同折射率的透镜组合。除了要尽量减小各种像差外，还要求所有镜面光轴一致，且安装位置符合要求。

*第5节　光学望远镜的机械装置

望远镜的机械装置要满足望远镜有一定的指向精度和跟踪精度的要求。现代的望远镜其操纵和跟踪装置都由计算机的软件来实现。天文爱好者的小型望远镜最好也要有跟踪装置即转移钟。望远镜的机械装置主要有赤道装置和地平装置两种方式。

一、赤道装置

这种装置有两个相互垂直的轴，分别为赤纬轴和赤经轴（极轴）。极轴指向天极，与地球自转轴平行，高度等于当地的地理纬度。镜筒可以绕着赤纬轴转动，并可以固定在使用的赤纬方向上。通常有赤纬盘及时角盘显示望远镜的指向。跟踪天体时，望远镜自东向西绕极轴运动，方向与地球自转方向相反，速度为 15″/s，用来补偿地球自转，使望远镜保持指向被测的天体。利用赤道装置实现跟踪天体的周日视运动是很方便的。赤道式装置又有双柱式（用两个柱子支撑极轴）和叉式（叉式的两臂固定镜筒）两种。高纬地区用双柱式不很方便，因为若重力平衡不够好的话，会增加望远镜的重力弯沉影响，可改用叉式。

二、地平装置

这种装置有两个相互垂直的主轴，水平轴和垂直轴，望远镜筒与水平轴相连。跟踪天体时必须两个轴同时转动，运动虽复杂，但由计算机软件来控制不难实现所要求的指向精度和跟踪精度。这种装置的优点是重力对称，结构简单，造价较低。其缺点是在天顶处有一个不能跟踪的盲区，盲区的大小一般不超过 1°。现代新建的 5 m 以上的甚大望远镜的机械装置的方案，一般多采用地平装置。

三、望远镜观测前的调试

新的望远镜如果安装不妥或不够准确会对观测带来很大影响。所以首先要检查望远镜的基座是否调到水平，必须调到水平仪的气泡完全居中时为止。其次是调整望远镜的极轴。望远镜的极轴应和天轴，即地球自转轴平行，极轴的地平倾角应等于观测地点的地理纬度，且位于子午面内。这种调整可按以下步骤进行：

1. 粗调极轴的高度

将望远镜放在赤纬 90°、时角 12^h 的位置上使望远镜指向北极星，然后根据天文年历加以改正，改正以后的极轴应当是对向了天极。如果极轴的高度与当地的地理纬度相差很大时，应当对极轴做高度的精确调整。

2. 精调望远镜的极轴的方位

先将望远镜对向子午面（时角 0^h）内，锁定极轴，并将望远镜指向南方赤道附近一颗亮星。此时关掉转移钟，从望远镜的带有十字丝的目镜里看此星的视运动。如果是沿着中间的十字丝的横线而过，则极轴的方位正确。如果向下走则极轴偏东，应当将极轴的北端向西稍转；如果向上走则极轴偏西，应当将极轴的北端向东稍转；经反复调整达到星像沿着横丝走的情况为止。

3. 精调望远镜的极轴的高度

让望远镜位于 18^h 的时圈内指向东方的一颗亮星，关掉转移钟，从带有十字丝的目镜里看星。如果星像沿着横丝而过，则极轴的高度正确；如果向下走则极轴稍低，应当升高极轴的倾角；如果星像向上走则极轴偏高，应当降低极轴的倾角；反复调整达到星像沿着横丝走的情况为止。

调整好极轴后，应当进一步检验望远镜的光学质量。观测时检验望远镜的光学质量与实际的分辨本领。这可以通过目视、照相或 CCD 所成的像来检验光学质量和实际的分辨本领。这可以利用较亮的目视双星，看看望远镜能分辨出双星的最小角距离是多少。检验望远镜的极限星等，可以在天气良好无月的夜晚观测暗星，检验目视能观测到最暗的星等是多少，再用天体照相仪或用 CCD 照相机继续拍照，做尽可能的长对间的露光，所能拍到的最暗星等就是它的极限星等。

第 6 节 射电望远镜

20 世纪 30 年代初，美国年轻的工程师央斯基，在研究无线电干扰的噪声源时，首先发现了来自天体的无线电波。1937 年美国无线电工程师雷伯，架设了一个直径 9.6 m 的金属抛物面天线，首次收到了来自银河系的无线电波，证实了央斯基的发现。雷伯的天线是世界上第一架射电望远镜。

第二次世界大战期间，英国的雷达在监视和侦察德国的飞机时收到突然的干扰信号，当时认为是德国使用了反雷达新式武器，后来查明，是太阳上有大黑子和耀斑爆发活动。此后，人们仿照雷达的结构，做成由天线、接收系统和资料记录设备构成的射电望远镜，用它来接收天体发射的无线电波。由此也诞生了射电天文学。

射电天文学是一个相对新的天文学分支，它使用射电望远镜系统在无线电波段研究宇宙中各类天体。20 世纪 60 年代，天文学中的四大重要发现——类星体、脉冲星、微波背景辐射和星际有机分子都主要是由射电望远镜的观测发现的。射电天文学的发展对天文学的发展做出了重大贡献。

一、射电望远镜系统

典型的射电望远镜包括天线系统、接收系统和记录系统：

(1) 天线系统　经典的天线是旋转抛物面天线，它的优点是有汇集射电波的接收面，频带较宽，比较易于进行机械跟踪和扫描。它的主要限制是机械结构与精度要求的矛盾。由于天线的精度要保持在工作波长的 1/20 以内，波长越短，天线要求的精度越高。

(2) 接收系统　主要有一个接收机，其作用是把微弱的无线电信号放大。

(3) 记录系统　使用记录仪或电表将经过接收机放大的信号显示出来，并进行记录。

近年来广泛采用了数字技术，利用计算机不仅可以处理数据，还可以实现综合孔径，谱线观测等。很长时期，制造巨型天线与如何使它在观测过程中不变形的高精技术是一大难关。20 世纪 90 年代初，由于主动光学技术和自适应光学先进技术的发展，解决了射电望远镜发展大面积天线的技术难关，比如因温度和重力弯沉引起天线变形问题与大气的抖动的随机影响等。

二、当代射电望远镜

当今世界上，最大的射电望远镜是美国的位于波多黎各的阿雷西博(Arecibo)天文台的射电望远镜，其抛物面天线直径达 365 m，它是固定不动的，只能靠

副镜的调整来稍微扩大可观测的天区(参见图 4.6)。其次是德国的 100 m 可动天线的射电望远镜。

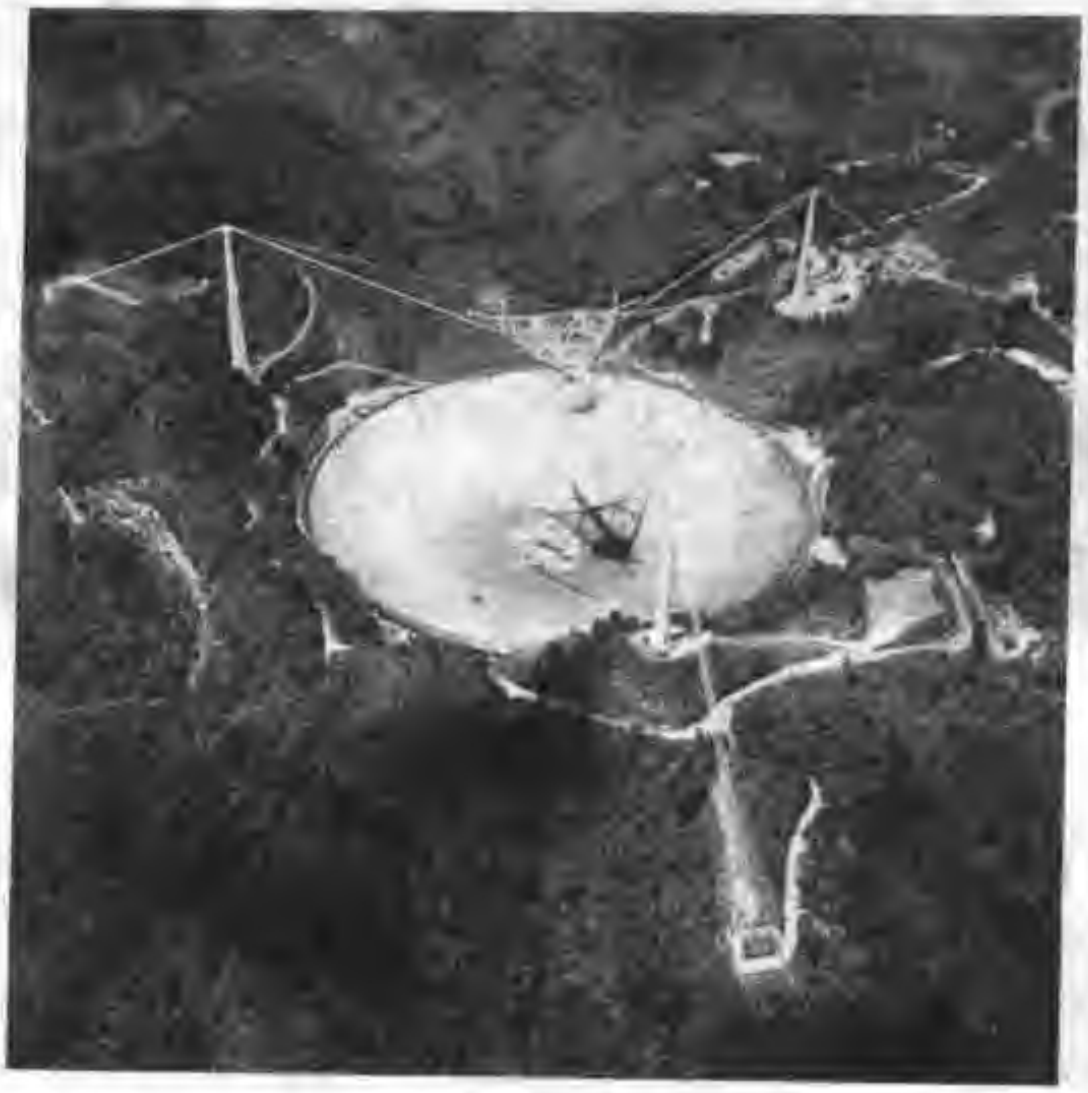


图 4.6　美国波多黎各的阿雷西博(Arecibo)天文台的射电望远镜

可转动射电望远镜(GBT),于 2000 年建在美国的绿岸(Green Bank)天文台,它的天线口径是 110 m×100 m,可自动跟踪。GBT 的设计是独特的,不仅在于它的不对称的天线,而且在于它不像很多其他望远镜那样,有很多支撑馈元的架子,这样它可减少射电波因架子反射的损失。它安装了自适应系统。

为了提高射电望远镜的分辨本领,一方面可以增大天线的口径,另一方面是应用射电干涉技术。因为射电望远镜观测的辐射波长远大于光学的波长,所以不能单纯靠增大口径来提高分辨本领,因而发展了干涉技术。一开始有双天线干涉,然后又有了多天线干涉。例如采用米尔斯十字天线及综合孔径等,米尔斯十字把天线排成一个十字,分别放在南北和东西方向,这样便可以得到二维的分辨率。50 年代发展起来的综合口径技术可以得到高分辨率的射电图像,发明这个技术的是英国科学家赖尔(M. Ryle),他因此而获得 1974 年的诺贝尔物理学奖。

当今世界上有很多的射电望远镜阵,比较著名的有美国的甚大望远镜阵(VLA)(图 4.7),它由 27 面,直径为 25 m 的天线排成"Y"字形组成。另一个是美国著名的"甚长基线干涉仪"(VLBI),该阵列由 10 架口径均为 25 m 的射电望



图 4.7　VLA 射电望远镜阵

远镜组成，分别独立的对某一天体观测，利用计算机对观测数据做相关处理。上海天文台、新疆乌鲁木齐天文台的两个 25 m 射电望远镜也参与国际的甚长基线干涉仪的联合观测。我们知道，干涉的基线越长，可以达到的分辨率便越高。

新建的超大型甚长基线干涉阵(VLBA)是美国国家射电天文台(NRAO)建立的。它包括十台东到维尔京群岛，西到夏威夷的莫纳克亚山的望远镜组成。甚长基线干涉阵是一种由甚长基线干涉仪的技术发展起来的。

1997 年 2 月美国和日本发射的卫星-甚长基线干涉空间天文台计划(VOSP)，在空间展成 8 m 的射电望远镜，它与 VLBI 联合干涉，其基线比地球半径长 3 倍。

此外，日本野边山天文台有一个 45 m 的大望远镜及若干个小的射电望远镜联合观测。伯克利、伊利诺伊·马里兰的毫米波天线阵(BIMA)包括 10 台连在一起的直径 6 m 的射电望远镜。BIMA 天线之间的距离在 7 m～2 000 m 之间可调。它的分辨率相当于一台直径为 1 000 m 的射电望远镜。

20 世纪 80 年代，中国陆续建成由 28 面直径 9 m 的天线组成的密云综合孔径望远镜、青海德令哈 13.7 m 的毫米波望远镜、上海佘山 25 m 的射电望远镜和乌鲁木齐南山 25 m 射电望远镜。这些设备虽然处于目前国际上的中、低水平，但它们在巡视与监测等课题方向都做出了国际水平的成果。例如，利用密云综合孔径望远镜观测获得比较完备的低频星表(MYC 327 MHz)；利用青海 13.7 m 的毫米波射电望远镜近年来发现了大量脉泽源及大量的 CO 分子谱线；上海和乌鲁木齐的两台 25 m 射电望远镜正式加入 EVN(欧洲 VLBI 网)，成为国际一流设备的一部分。

第7节　空间望远镜与空间探测器

随着1957年苏联成功发射人造地球卫星为标志的人类航天时代的到来，天文观测冲破了地球大气的限制。哈勃空间望远镜、高能天文台、紫外探测器和伦琴射线卫星一个个相继升空。空间探测拓宽了获得天体信息的领域，向人们展示了一幅全新的宇宙图景，在短短的二三十年内，在探测宇宙更深层次、发现致密天体和对太阳系天体的实地、近地考察等方面获得了令人瞩目的成就。

太空中的望远镜不受地球大气的影响，几乎可以达到理论的分辨率。著名的光学空间望远镜有哈勃空间望远镜和依巴谷天体测量卫星。

一、哈勃空间望远镜

哈勃空间望远镜由主镜口径为2.4 m的反射望远镜和两个太阳能电池的双翼组成。哈勃空间望远镜的光学系统是R－C系统，即一个改进型的卡塞格林系统。哈勃望远镜定位在离地球表面614 km的圆形轨道上飞行(图4.8)。哈勃空间望远镜比地面望远镜的优越之处在于它在大气外运行不受地球大气的吸收、散射和大气抖动的影响，因而有高的分辨率(能分开遥远天体0.1″的细节)，并有宽的工作波段(从远紫外105 nm到近红外1 100 nm)及高的灵敏度(采用CCD探测器)，它传回的图像非常清晰。1990年4月25日，由“发现号”



图4.8　哈勃空间望远镜

航天飞机把哈勃空间望远镜送入高空。它首次发回的天体图像模糊，经过细致的检验发现其光学系统有像差，查明问题出在镜面磨制时检测镜位置错了1.3 mm，这是一个不应有的错误。为了纠正，1993 年 12 月 2 日有 7 名宇航员登上宇航船，在太空对哈勃空间望远镜进行了 12 天的维修，修好了哈勃空间望远镜。

哈勃空间望远镜发现了木星赤道周围有巨大的湍流；展示出以前从未曾见到的恒星正在形成的真实景象；分辨出仙女星系核心的细致结构；观测到一些星系正在互相碰撞与合并等。

二、依巴谷天体测量卫星(HIPPARCOS)

HIPPARCOS 是“高精度视差收集卫星”的缩写，它是一颗地球同步卫星，由欧洲空间局在 1989 年发射。它的分辨率精度很高为 0.002″，比地面高 50 倍。它测量了在 500 pc 范围内，约十万余颗恒星的距离。这些距离非常可靠，为其他天体测量和天体物理研究提供了重要的资料依据。

GAIA 是下一代将发射的天体测量卫星，计划于 2010～2012 年升空，用于精确测量 10 Kpc 距离内的恒星距离。

三、空间探测器

1. 在紫外和红外波段

1975 年美国的科伊柏机载天文台(KAO)，探测到大量 5～1 000 μm 的红外源(主要辐射红外电磁波的天体)。1983 年 1 月 20 日发射的红外天文卫星(IRAS)在当年 11 月就获得了丰收。它在离地 900 km 处飞行了 10 个月后就找到了 25 万个红外点源，2 万个红外小面元等。1995 年底发射的“红外空间天文台”(ISO)是继红外卫星之后，工作波段在 3～200 μm 的重要天文红外卫星。它的探测能力比前者高 100 倍。

在紫外波段方面，1992 年 6 月美国发射了极远紫外探索卫星(EUVE)，其上配备了扫描成像系统，可得到分辨率为 6′的全天远紫外亮源图。1996 年美国发射了远紫外光谱探索卫星(FUSE)。

2. X 射线源和 X 射线暴

由于大气的吸收，X 射线的探测必须在高空进行。自从贾科尼(R. Giacconi)等 1962 年利用高空火箭发现了太阳系外的 X 射线源——天蝎座 X－1 和蟹状星云的 X 射线后，人类加快了对 X 射线的研究步伐。1970 年美国发射了 X 射线卫星“乌呼鲁”(肯尼亚语“自由”的意思)，发现了几百颗 X 射线源(辐射 X 射线电磁波的天体)，这包括超新星、超新星遗迹、新星、X 射线双星及类星体等。1977 年美国的“高能天文台 1 号”(HEAO－1)和“高能天文台 2 号”

(HEAO-2),在银河系发现了3 000多颗X射线源,而且还在河外星系仙女座大星云中发现了80多个X射线源。

1988年6月德国、美国和英国共同发射的伦琴X射线卫星(ROSAT),在太空飞行了两年就发现了10万余个X射线源。近年来,美国的高能X射线天体物理设备:AXAF-I(成像观测),AXAF-S(光谱观测)分别于1998和1999年由运载火箭载入空间轨道。钱德拉X射线天文台于1999年7月23日也发射成功。此外,欧洲研制的多镜面X射线望远镜于1999年也送入了轨道,已投入了空间观测。中国也正在研制一颗探测硬X射线的卫星,不久将会发射。

X射线的空间探测除了发现大量的X射线源以外,还探测到河外星系中经常发生的X射线暴,这是指有些天体,其X射线辐射在1 s之内强度突增20到50倍,持续几秒到几十秒后,辐射又急速下降。X射线暴发出的X射线能量比太阳每秒的总辐射能还要强几十万倍甚至几百万倍以上。X射线暴的原因和能量来源,至今仍是宇宙之谜。

3. γ射线源和γ射线暴

最早是1960年,人们用气球搭载探测器探测到在银河系中心方向有很强的γ射线辐射。1967年美国的Vela卫星意外地发现了γ射线暴。1972年11月美国的γ射线卫星(SAS-2),运行了7个月,就记录了8 000个γ射线源(辐射γ射线的天体),并发现天鹅座X-3是个高能γ射线源。1975年8月9日西欧联合发射了"COSB"卫星,在6年中观测记录到10多万个γ射线源。

来自太阳系以外天体的γ射线源,其辐射能量达到10^{11}电子伏特时,称为γ射线暴。1991年4月7日美国发射的康普顿γ射线空间天文台(CGRO)探测到来自宇宙的2 000多个γ射线暴,多得令人震撼。这使长期未解决的γ射线暴之谜,又增加了几分神秘的色彩。

1997年5月8日在鹿豹座方向又发现了γ射线暴。研究表明,此光源离我们非常遥远。按照推算,这次γ射线暴离我们的距离有40亿~80亿光年!这一事实使天文界为之震惊!为此,有的天文学家呼吁:人们应该警惕,如果在银河系内发生γ射线暴,将消灭地球大气的臭氧层,破坏人类的生态环境和粮食来源。这比小行星碰撞地球来讲,是更大、更严重的太空灾难。

当今,天文观测已进入了全波段观测的新时代。在天文仪器的布局上,形成了地面、空间的立体分布新局面,地面上大的光学和红外望远镜及射电天线阵、甚长基线干涉仪等与空间望远镜、卫星等进行联合观测,使21世纪天文学必将取得更辉煌的成就。

【例题1】 双星ζHer的两个伴星的角距离是1.38″。问地面上多大口径的光学望远镜才能分辨它?如果望远镜物镜的焦距是1 m,目镜的焦距多大才能分辨开两个子星(眼睛的分辨角为2′)?

解答:在光学区域可以用有效波长 $\lambda=550$ nm,设物镜的口径为 D,焦距 f,放大率为 ω,目镜焦距为 f',由望远镜的口径 D 与波长 λ 的关系,先求出望远镜物镜的口径,即

$$D=1.22\lambda/\theta=550\times10^{-9}/(1.38/3\,600\times\pi/180)\ \text{m}=0.082\ \text{m}=8.2\ \text{cm}$$

目视望远镜的放大率 ω 要达到把观测天体的角距离放大到可以由眼睛分辨的程度(人眼的分辨率为 2′),所以求出放大率应当是

$$\omega\approx 2'/1.38''=87$$

已知望远镜物镜的焦距 $f\approx1\ \text{m}=100\ \text{cm}$,所以

$$f'=f/\omega=100/87\ \text{cm}\approx1.15\ \text{cm}$$

答:目镜的焦距为 1.15 cm。

【例题 2】 望远镜的物镜口径为 90 mm,焦距为 1 200 mm。

(1) 望远镜的出射光瞳为 6 mm(相当于人眼瞳孔的大小),目镜的焦距为多少?

(2) 此目视望远镜的放大率是多少?

(3) 通过望远镜物镜和目镜所看到的月球角直径是多大?

解答:设望远镜的物镜口径为 D,望远镜的出射光瞳大小应当是目镜口径 d。

(1) $D/d=f/f'$,所以 $f'\approx f\cdot d/D=1\,200\times6/90\ \text{mm}\approx80\ \text{mm}$

(2) 放大率 $\omega=f/f'=1\,200/80=15$

(3) 假设月亮的角直径 $\alpha\approx0.5°$,则通过望远镜看到月亮的大小是 $\omega\times\alpha=7.5°$

【例题 3】 我们用肉眼可以分辨月球上的"危海"(直径 520 km)吗?为什么?

解答:设月球上的"危海"的角直径为 α,由于月球的角直径为 31′,线直径为3 475 km,由 $520/3\,475=\alpha/31'$ 可求出 $\alpha=4.6'$,人眼睛的分辨率为 2′,所以可以用肉眼分辨出月球上的"危海"。

【例题 4】 口径 10 m 的凯克望远镜建在夏威夷的莫纳克亚山,观测到的星像直径可以小到 0.3″,请你估算一下用凯克望远镜进行目视观测的极限星等。

解答:夜间人眼的瞳孔的最大直径约为 6 mm,极限星等约为 6.5^{m},根据星等的知识,我们利用公式 $m_1-m_2=-2.5\lg(I_1/I_2)=2.5\lg(D_2/D_1)^2$,可以估算凯克望远镜的目视极限星等,即

$$m_1=6.5+2.5\lg(10\,000/6)^2=22.1$$

所以应用 CCD 探测器可以观测暗于 22^{m} 的星。



习 题

1. 一架 1.2 m 的施米特望远镜,其视场为 6°×6°。估算要拍摄多少张底片才能覆盖全天,解释你的结论,为了做到这一点,望远镜应放在何处?

2. 用 Arecibo 射电望远镜 1′的分辨率可以看到在金星表面多大尺度的表面特征(设金星离太阳的平均距离为 $1.072\,8\times10^{8}$ km)?

3. 望远镜的焦距为 125 cm,在它的终端安装一个光度计,观测一星团中的恒星,已知一个同类光谱型的 8 等星,发射出的光子数为 4 000/s,光度计的噪音计数是 500/s;探测的光子数上限值是只能观测 2×10^{5}/s,星团中 5 等星,还是

10 等星或者 15 等星哪个星等能观测？解释你的计算。

4. 某一空间望远镜对于红光(700 nm)可以达到 0.05″的角分辨率(受衍射的限制)问在紫外 350 nm 的角分辨率是多少？

5. 一个黑苍蝇落在了一台口径 5 cm 的望远镜的物镜上，当一个观测者用它观测月亮他会见到什么？

6. 为什么射电天文学家可以在白天观测，而光学天文学家除了太阳观测以外的绝大多数观测只能在夜晚进行？

7. 一个望远镜有 $10' \times 10'$ 的视场，探测器是 1 024×1 024 像素(pixel)的 CCD，1 pixel 像素对应天空的角直径是多少？

8. 美国帕洛马天文台的 5 m 望远镜($A = D/F = 5.33/51.6$)，在卡塞格林焦点上附加目镜，计算最小的目镜焦距以及它的最低放大倍数。

9. 中国国家天文台 2.16 m 望远镜在焦面上附加一块 CCD 尺寸为19 mm×12 mm，望远镜的焦距为 10 m。求此 CCD 对应于天空多少平方角分？

10. 现代大望远镜应用什么先进技术来克服镜面由于温度、重力弯沉以及地球大气湍流的影响？

11. 一个 40 cm 口径望远镜($D/F = 400/2\ 000$)的终端加 CCD 系统，CCD 的像素数为 1 024×1 024，每个像素是 15 μm×15 μm，问用此望远镜附加 CCD 探测器能拍摄到天空的范围是多少平方角秒？

12. 在两个地方的射电望远镜做天体的干涉测量，其基线为 2 900 km，(a)问做干涉测量射电望远镜在 22 GHz 波段的分辨率是多少？(b)同样分辨率的光学望远镜的口径应当多大？

13. 仙女座星系在 2.9 百万 l. y. 或 900 kpc 远处。它的线直径约 30 kpc，用海尔望远镜(角分辨率为 1″)，哈勃望远镜(分辨率为 0.05″)，和射电干涉仪(分辨率为 0.001″)这样的分辨率能观测到多远距离的天体？

14. 估算下列望远镜的分辨角分别为多少？

(a) 一个 5 000 km 基线的干涉仪，观测频率为 5 GHz。

(b) 一个红外干涉仪其基线为 50 m，工作波长为 1 μm。

第二篇

我们的太阳系

第五章

太阳系大家族

我们地球所在的太阳系是个大家族，太阳是这个家族的主宰。太阳以强大的万有引力吸引着太阳系所有家族成员：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星及冥王星九大行星（图 5.1）及其卫星和众多的小行星、彗星、流星体以及弥漫的行星际物质，使它们都围着自己转。太阳是太阳系的中心天体，它的质量占太阳系总质量的 99.87%。



图 5.1　太阳和它的九大行星

第 1 节　太阳系大家族

太阳系家族中的大行星可分成两大群体，一群是“类地行星”，它们由四个表面为固体和岩石的行星组成，按照离太阳的远近，依次是水星、金星、地球和火星。另一群包括：木星、土星、天王星、海王星及冥王星，被称为“类木行星”。

行星和卫星本身都不发光，由于它们反射太阳的光，所以才被我们看到。太阳系家族的所有成员都围绕着太阳，自西向东沿着椭圆轨道运转（叫公转），同时还绕本身的自转轴自转。大多数大行星的自转方向与公转方向相同，也有少数的大行星相反，如金星、天王星与冥王星的自转是自东向西转，可以说它们是太阳系的“逆子”。

到目前为止，已知除了水星和金星没有卫星外，其他大行星都有自己的卫星。按已经确定轨道要素的卫星来计算，地球有 1 个卫星，这就是我们熟悉的月球，火星有 2 个卫星，木星有 61 个卫星(其中有 14 颗是逆行卫星)，土星有 31 个卫星，天王星有 24 个卫星，海王星有 11 个，而冥王星只有 1 个卫星。表 5.1 列出了太阳系的主要成员的主要物理参量与地球的参量相比较的数值。

许多科学家认为太阳系有可能还存在着第 10 颗大行星，这种看法是有依据的。因为根据万有引力定律，算出太阳系的引力范围达 4 500 AU，而九大行星的范围仅在 50 AU 之内。难道 99%的太阳系引力范围内就什么天体都不存在了吗？再者，冥王星的质量只有地球质量的 1/400，如此小质量的天体不至于对天王星和海王星的运动产生那么大的摄动影响。所以才推断出冥王星的外边还可能存在着第十颗大行星。2004 年春美国天文学家发现了一个距地球 130 亿 km，直径为 1 700 km 的一个暗红色行星，命名为“赛德娜”，它很可能就是太阳系的第十颗大行星。

在火星与木星之间有一个小行星聚集的带区，绝大部分小行星都在这个带区内运行，所以称它为小行星带。个别的小行星受大行星的引力摄动会窜入到地球轨道之内，成为碰撞地球的隐患。此外，彗星也是太阳系家族的成员，彗星在接近太阳时，在背离太阳的方向拖着长长的彗尾，在天空中显得十分美丽壮观。彗星沿着一个偏心率很大的椭圆轨道运动。彗星在运动中如果受到附近的大行星的引力摄动，也有可能与大行星相撞。彗星破裂后的碎块叫流星体，它们仍沿着原来的椭圆轨道运行，有些流星体被地球吸引，闯入地球大气，和大气摩擦，生热发光，这就是我们看到的偶发流星和火流星，有时成群流星从一个方向像天上的烟花一样散落下来，叫流星雨。太阳系中一些流星体体积较大，在大气中燃烧未尽，而落到地面上，这就是陨石或陨铁。地球上的陨石坑就是它们的印记。

太阳系中充满了星际气体的原子、分子、有机分子和尘埃颗粒等行星际物质，它们弥漫于整个太阳系空间。

表 5.1 太阳系的主要成员(太阳、九大行星、月球、谷神星、彗星)的主要物理参量与地球的参量相比较

	平均离日距离/AU	轨道周期/地球年	质量/$m_{地}$	半径/$R_{地}$	卫星数目	自转周期/d	平均密度/($kg \cdot m^{-3}$)
水星	0.39	0.24	0.055	0.38	0	59	5 400
金星	0.72	0.62	0.82	0.95	0	−243	5 200
地球	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1.0	5 500
月球	—	—	0.012	0.27	—	27.3	3 300

续表

	平均离日距离/AU	轨道周期/地球年	质量/$m_{地}$	半径/$R_{地}$	卫星数目	自转周期/d	平均密度/(kg·m^{-3})
火星	1.5	1.9	0.11	0.53	2	1.0	3 900
谷神星(小行星)	2.8	4.7	0.000 15	0.073	0	0.38	2 700
木星	5.2	11.9	318	11.2	61	0.41	1 300
土星	9.5	29.4	95	9.5	31	0.44	700
天王星	19.2	84	15	4.0	24	-0.72	1 300
海王星	30.1	164	17	3.9	11	0.67	1 600
冥王星	39.5	218	0.002	0.2	1	-6.4	2 100
彗星 Hale Bopp	180	2 400	1.0×10^{9}	0.004	—	0.47	100
太阳	—		332 000	109	—	25.8	1 400

第2节　行星的视运动

夜空里繁星密布，如何在浩瀚的星海中找出大行星呢？这并不困难，首先，由于大行星比恒星离我们近得多，有一定的视面，看起来不像恒星那样闪烁；其次，大行星出现在黄道附近；再者，大行星比一般的恒星都亮，如金星最亮，其星等为$-4.4^{m}\sim-3.3^{m}$，它出现在黎明的东方或黄昏时的西方，是非常明亮的白色星，火星是亮度在0.8^{m}到-1.5^{m}之间的红色行星。我们知道行星本身不发光，靠反射太阳光而发亮，所以其亮度随行星到太阳与地球间的距离不同而变化，离地球最远和最近时，我们看它的视角直径也不相同，因此，同一行星的亮度不同时期也有明显的变化。水星、金星还有明显的圆缺的“位相”变化，仔细观察火星，它的亮度也有位相的变化，在月球上看地球也会看到地球位相的变化。

当你连续观察几天到几十天，会发觉，行星相对于恒星背景有明显的移动，其路径是在黄道附近，有时是自西向东(顺行)；有时又向相反方向运动(称为逆行)。顺行的时间长，逆行的时间短；由顺行转为逆行或由逆行转为顺行的转折点，似乎是静止的，叫“留”。

我们分两种行星来谈它们的视运动。水星和金星在地球轨道之内运动叫地内行星，地球轨道之外的行星，如火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星叫地外行星。

一、地内行星的观测最佳时机

在地球轨道以内的水星和金星，绕日公转比地球快。从地球上的观测者来看，内行星绕日转动，有4个特殊位置很重要，即下合、上合、东大距和西大距(如

图 5.2 所示)。

当行星和太阳的黄经相等时,称为行星的合日,简称"合"。行星在太阳前面称为"下合";行星在太阳后面称为"上合"。合时,行星与太阳同升同落,我们看不见它。地内行星在上合后,于黄昏时出现在西方天空,成为昏星。而下合后,则行星向西偏离太阳,于凌晨时出现在东方天空,成为晨星。当行星与太阳角距离达到最大值时,称为"大距",在太阳之东称"东大距",在太阳之西称"西大距"。大距时因为离太阳角距离远,受阳光的影响小,所以是观察地内行星的最佳时机。水星的大距在18°～28°之间,金星的大距则在 45°～48°之间。

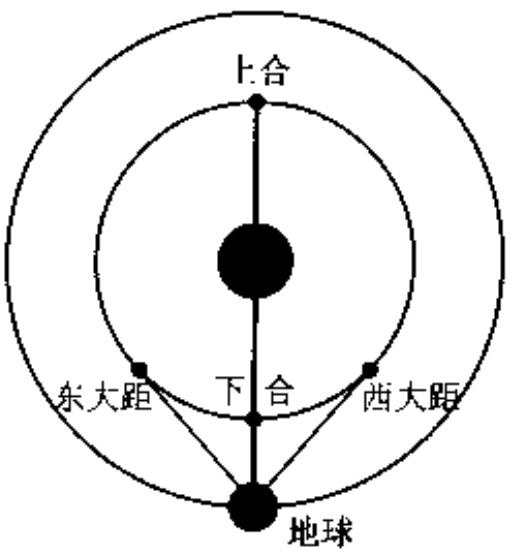


图 5.2　地内行星(金星或水星)观测的最佳时机是东大距与西大距

地内行星在一个会合周期内,所经历的过程为:上合→(顺行)→东大距→(顺行)→留→(逆行)→下合→(逆行)→留→(顺行)→西大距→(顺行)→上合。

由于水星离太阳太近,看到它的机会很少,而金星常在早晨或黄昏时见到,因此可选择金星作为观察对象来观察地内行星在天球上的行踪。首先查阅天文年历或用天文软件,选择金星在大距附近的日期来观察。当夜观察了金星所在的位置后,标记在事先复印好的星图上,并记录观测的时间,然后隔两日再观察金星所在位置,在星图上记下标号,如此坚持几月,可绘出金星的视运动图。

二、地外行星的观测最佳时机

在地球轨道以外的行星如火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星叫地外行星。地外行星的视运动有 4 个很重要的特殊位置即:合、冲、东方照和西方照。地外行星的轨道在地球轨道的外面,所以只有上合,称之为合。行星与太阳黄经相差 180°时为"冲",冲时太阳西落时行星东升,所以整夜可见。当行星与太阳的黄经相差 90°时,称为"方照",行星在太阳之东为"东方照",行星在太阳之西为"西方照"。东方照时,行星中午升起,日落时位于中天附近,上半夜可见于西方天空;西方照时,行星子夜升起,日出时位于中天附近,下半夜见于东方天空。

由于地外行星公转角速度比地球小,合时,行星与太阳同升同落;合后,行星偏离太阳向西,日出前东方天空可见;以后行星与太阳角距离日增,经过西方照后直到冲;冲后,行星位于太阳之东,且与太阳角距离日减,经过东方照后又到"合"的位置,完成了一个会合周期。

地外行星在合附近是顺行,冲附近是逆行,在从西方照到冲和冲到东方照时都经过"留"。地外行星在一个会合周期中视运动所经历的过程为:合→(顺行)→西方

照→(顺行)→留→(逆行)→冲→(逆行)→留→(顺行)→东方照→(顺行)→合。

冲日是行星与地球相距最近的时刻，因此是观测的最好时机(图 5.3)。由于地球和行星轨道都是椭圆的，在每次“冲”时行星和地球间距离不同。当行星过近日点并发生冲时，称为“大冲”。行星在大冲时离地球最近，最有利于观测。2003 年 8 月 29 日北京时间凌晨 2 点，火星大冲，地球与火星的距离是近百年来最近的一次，距离约为 5 576 万 km。

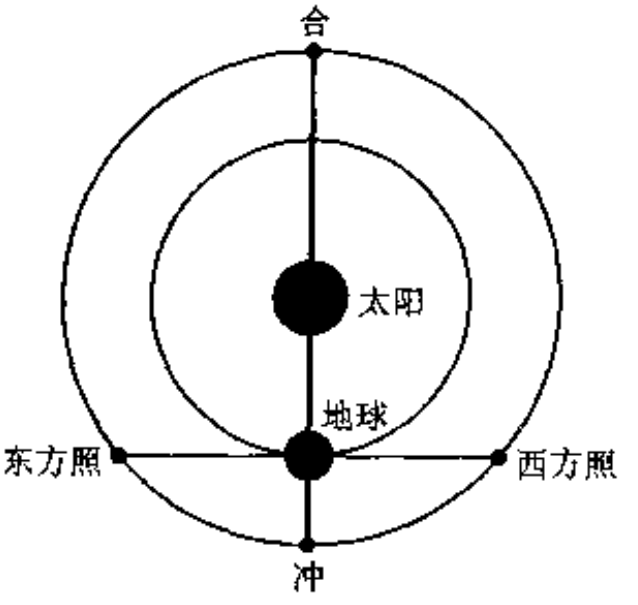


图 5.3　地外行星观测的最佳时机是大冲(冲日)、东方照和西方照

观测地外大行星，要先查天文年历或用天文软件，查看行星在一年内的合、冲、东方照、西方照等的日期和时刻。观测地外行星选择冲日最好，观测时记下行星在星图上的位置，然后隔几天(如 4～5 天)再行观测，并记下位置，坚持数月之后可以描绘出行星的行踪图。

第 3 节　行星的轨道运动定律

一、万有引力定律

1667 年牛顿发表了万有引力定律，把天体的运行规律和地面物体的运动规律统一起来。万有引力定律的数学表达式为

$$F=G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

任何两个相距为 r 并具有质量 m_1 及 m_2 的质点之间必然存在相互吸引的力 F。式中 G 称为万有引力常量，其数值有所选定的单位制确定。在国际单位制(SI)中，$G=6.672\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$。

二、开普勒的行星运动三定律

德国的数学家、天文学家开普勒(Johannes Kepler)(1571－1630)依据实测天文学家第谷(Tycho Brahe)对太阳系行星运动的大量观测资料，呕心沥血，毕生从事行星运动的研究，总结出了行星运动的三定律。他指出，行星在空间里围绕太阳运动，遵循开普勒三定律：

1. 行星运动的轨道是椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。

2. 行星绕太阳运动时，以太阳为坐标原点的行星向径在相等的时间内所扫

过的面积相等(见图 5.4)。

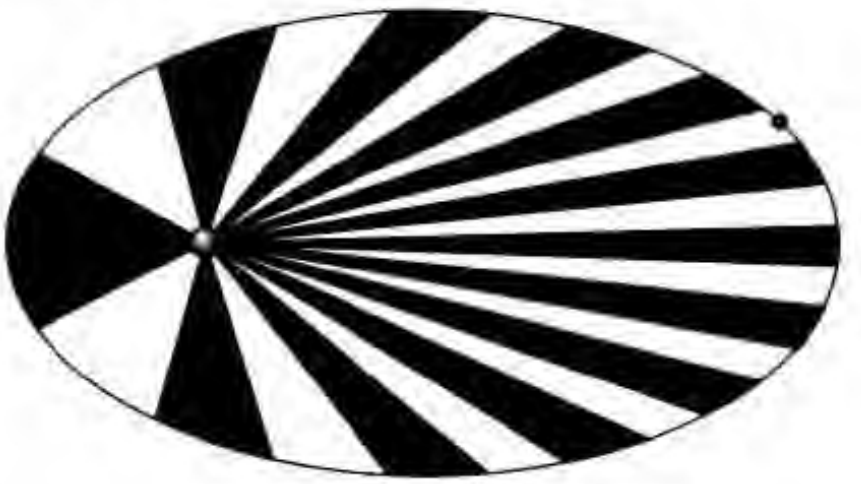


图 5.4　开普勒第二定律示意图

3. 不同行星在轨道上的公转周期 T 的平方与行星轨道半长径 a 的立方成正比,即

$$\frac{T_1^2}{T_2^2}=\frac{a_1^3}{a_2^3}$$

或者

$$\frac{a_1^3}{T_1^2}=\frac{a_2^3}{T_2^2}=\cdots=\frac{a_i^3}{T_i^2}=\frac{Gm_\odot}{4\pi^2}=常数$$

式中 G 是万有力常量,$m_\odot$ 为太阳质量。

开普勒第一定律和开普勒第二定律是严格正确的,开普勒第三定律有一小的偏差,因为它忽略了不同行星的质量差别。严格的第三定律应当为

$$\frac{T_1^2}{T_2^2}=\frac{a_1^3(m_\odot+m_2)}{a_2^3(m_\odot+m_1)}$$

或者

$$\frac{a^3}{T^2(m_\odot+m)}=\frac{Gm_\odot}{4\pi^2}=常数$$

采取合适的单位,即用太阳质量为质量单位,以回归年表示行星运动周期 T,以天文单位(日地平均距离 AU)表示行星运动的半长径 a,第三定律精确表示为

$$\frac{T_1^2}{a_1^3(m_\odot+m_2)}=\frac{T_2^2}{a_2^3(m_\odot+m_1)}$$

m_1 和 m_2 分别为两个行星的质量。

由开普勒第二定律知道,行星在轨道上的运动速度是不均匀的,在近日点附近要比远日点附近运动得快。由第三定律知道,行星离太阳越远,公转周期越长;轨道半长径与周期之间有确切的数量关系。

依据第三定律可以计算太阳的质量及有卫星绕转的大行星的质量 m。因为由近似公式可以得到

$$m=\frac{4\pi^2}{G}\frac{a^3}{T^2}$$

只要知道太阳或卫星绕行星公转的周期和轨道半长径就可以求出太阳或大行星的质量。

三、行星的会合周期

地球所看到的行星视运动是行星的公转和地球公转的复合运动，称为“会合运动”。行星相邻两次合(或冲)所经历的时间间隔，称为“会合周期”。

行星运动的会合周期 S 的近似的计算是

$$\frac{1}{S}=\frac{1}{T}-\frac{1}{E}\text{(对地内行星)}$$

$$\frac{1}{S}=\frac{1}{E}-\frac{1}{T}\text{(对地外行星)}$$

式中 E 是地球近点年的周期，$E=365.259\ 6$ 天。例如水星 $T=87.97$ 天，求出 $S=115.93$ 天；金星 $T=224.701$ 天，求出 $S=583.924$ 天。

四、提丢斯-波得定则

1766 年德国的提丢斯指出，用下述方法可以近似地得到行星和太阳的平均距离：取一数列 0、3、6、12、24、…，并在每一数目上加 4 而后除以 10，就得到以天文单位表示的各行星到太阳的平均距离。这样的法则称为提丢斯-波得定则。1772 年波得较详细地研究这个问题并发表了上述定则，因此该定则也称提丢斯-波得定则。提丢斯-波得定则可以用 $a+bc^n$ 的公式，取 $a=0.4$，$b=0.3$，$c=2$。对于水星 $n=-\infty$，金星 $n=0$，地球 $n=1$，火星 $n=2$ 等等。表 5.2 给出了由提丢斯-波得定则得到的大行星的距离与真实情况的比较。

表 5.2　行星到太阳的距离

行星名称	提丢斯-波得定则计算的距离/AU	真实距离/AU
水星	0.4	0.39
金星	0.7	0.72
地球	1.0	1.00
火星	1.6	1.52
谷神星	2.8	2.77
木星	5.2	5.20
土星	10.0	9.56
天王星	19.6	19.19
海王星	38.8	30.07
冥王星	77.2	39.46

由表 5.2 可见，对于海王星和冥王星的距离由提丢斯-波得定则得到的距离

与实际的距离相差很大。迄今为止，提丢斯-波得定则还没有得到满意的理论解释，但是它意味着什么规律呢？第十大行星如果存在是应该在哪里呢？这些都值得我们去思考。

*第4节　行星运动轨道要素和运动方程

一、行星运动的轨道要素

太阳系天体的运动轨道是圆锥曲线，包括椭圆（特殊情况是圆）、抛物线、双曲线三种类型。决定轨道在空间的位置和行星在轨道上的位置依赖于6个常数，称为轨道根数。下面我们以较为普遍的椭圆轨道（太阳系所有的行星、卫星和大部分小行星都是椭圆轨道）为例来描述这6个轨道（图5.5）。以太阳为原点，以黄道平面为 xy 平面，春分点方向为 x 轴方向，建立空间坐标，6个轨道要素或轨道根数的物理意义可以分别表述如下：

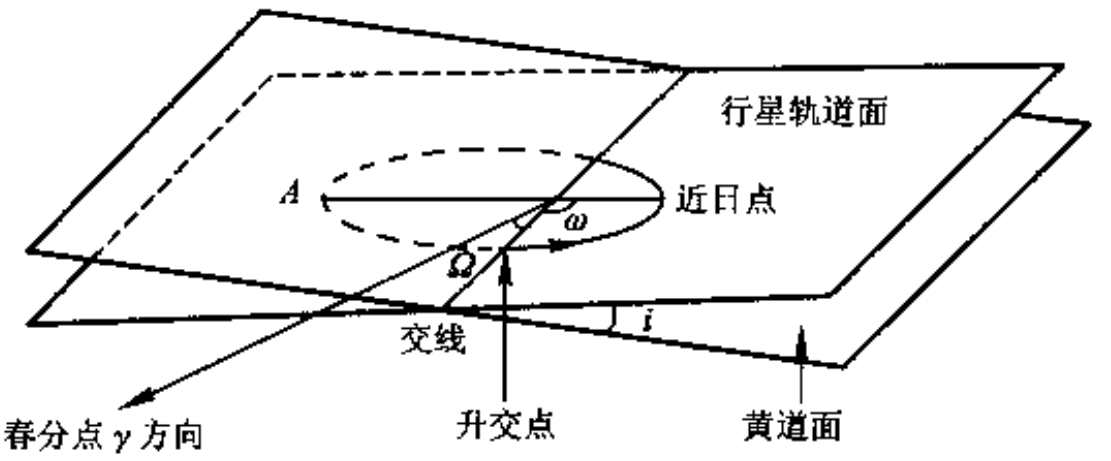


图5.5　行星轨道根数（A为远日点）

（1）**轨道半长径** a

（2）**偏心率** e　$e=\sqrt{(a^2-b^2)}/a$，b 是轨道半短径。

半长径 a 和偏心率 e 决定了椭圆的大小和扁平的程度。近日点距离太阳的距离为 $a(1-e)$；远日点距离太阳的距离为 $a(1+e)$。

（3）**轨道倾角** i　指行星轨道平面对黄道平面的倾角。

（4）**升交点黄经** Ω　即行星轨道平面与黄道平面的交线与 x 轴方向的夹角。行星在天球上从黄道以南运动到黄道以北所经过的交点，叫“升交点”，另一个交点叫“降交点”。升交点黄经是指升交点从春分点起算的日心黄经。轨道倾角 i 和升交点黄经 Ω，完全决定了轨道平面的空间位置。

（5）**近日点角距** ω　是轨道长轴上近日点方向与轨道交线的夹角，它决定了椭圆长轴的方向。此角决定了行星轨道长轴在轨道面中的方向。

（6）**行星过近日点的时刻** τ　根数 τ 决定行星在轨道上何时处于何处的

问题。

对行星的视位置做多次观测，就能算出该行星的 6 个轨道要素。然后可以根据行星的轨道要素计算出任一时刻行星的视位置。

下表给出了九大行星的部分轨道要素和其他轨道运动参数。

表 5.3　九大行星的轨道要素

行星	轨道半长径 a/AU	偏心率	倾角	公转周期/d	会合周期/d	轨道运动平均速度/(km·s^{-1})
水星	0.387 1	0.205 6	7.0°	87.97	115.88	47.87
金星	0.723 3	0.006 8	3.4°	224.70	583.92	35.02
地球	1.000 0	0.016 7	0°	365.24	—	29.79
火星	1.523 7	0.093 4	1.9°	686.98	779.93	24.13
木星	5.202 7	0.048 3	1.3°	4 332.71	398.88	13.06
土星	9.555 5	0.056 0	2.5°	10 759.50	378.09	9.66
天王星	19.191 1	0.046 1	0.8°	30 685.00	369.66	6.80
海王星	30.109 0	0.009 7	1.8°	60 190.00	367.49	5.44
冥王星	39.528 9	0.248 2	17.1°	90 800.00	366.73	4.74

由表 5.3 中数据和行星视运动的研究，可以发现行星的轨道运动具有以下几个主要特性：除了水星和冥王星外，其他行星的轨道偏心率都很小，都接近于圆；其次，除了冥王星外，其他行星的轨道面相对于黄道面的倾角都很小。这表明行星轨道几乎在同一平面上；再者，所有行星公转的方向都与地球公转的方向相同，都是自西向东转。它们的这些共同特性是由于它们都是太阳系大家族的成员，经历过共同的起源和演化历程。

二、行星的轨道运动方程

行星运动方程

由天体力学的二体问题微分方程的解，可以得出椭圆轨道上行星位置的极坐标方程(图 5.6)：

$$r=\frac{a(1-e^2)}{1+e\cos f}$$

式中 a 为轨道半长径，e 是轨道偏心率，都是已知的轨道根数，只要知道给定时刻 t 时的极角 f，就可以计算极半径 r，从而得到行星在轨道上的位置。而轨道在空间的位置是由另几个轨道根数给定的，于是行星的空间位置当然也就可以计算了。以上计算的关键是求出

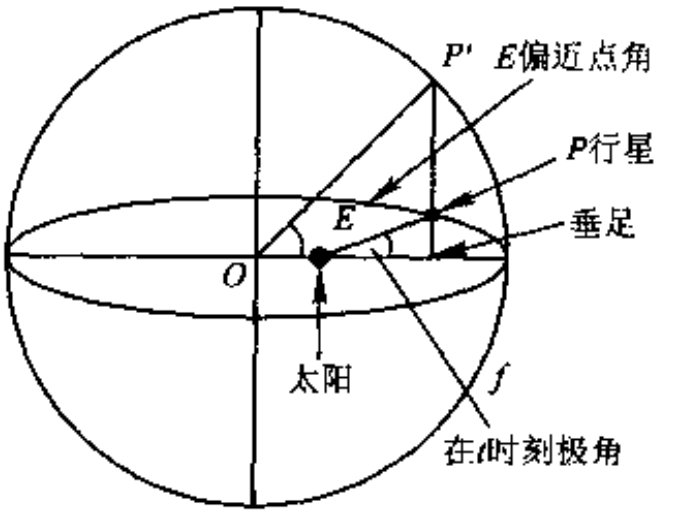


图 5.6　行星运动的极坐标方程

极角 f 与 t 的关系，为此，我们绘出图 5.6 来做辅助说明。

以椭圆中心 O 为中心，以半长径 a 为半径画圆，从行星位置 P 向长轴做垂线，与圆交于 P'，垂足至太阳的距离为 L，OP' 与长轴的夹角 E 称为偏近点角。从几何关系不难看出：$\cos f=L/r$，$\cos E=(ae+L)/a$，于是有

$$r\cos f=a(\cos E-e) \tag{5-1}$$

代入极坐标方程可得

$$r=a(1-e\cos E) \tag{5-2}$$

微分方程通解中的一个积分为

$$E-e\sin E=\frac{2\pi}{T}(t-\tau)$$

式中 t 指任意时刻，τ 为 6 个轨道根数之一（行星过近日点时刻），T 是行星轨道运动的周期。根据开普勒第三定律，T 可以从半长径 a 计算得到。定义 $M=\frac{2\pi}{T}(t-\tau)$。显然当 $t=\tau$ 时，$M=0$，而且 M 是 t 的线性函数，所以 M 是从近日点起算的一个随时间均匀增加的角度，称为平近点角，于是有

$$E-e\sin E=M \tag{5-3}$$

此式称为开普勒方程，它是开普勒最先推导出来的。

计算星历表的过程是：由任意时刻 t 计算 M；由 M 求解开普勒方程(5-3)式得 E；由 E 通过(5-2)式计算 r；再由 r 和 E 通过(5-1)式计算 f，问题就得到解决了。天体力学利用迭代法，可以求得精度较高的 E 值。

三、行星际飞行器的轨道问题

在这宇宙航行时代，在地球上发射人造卫星、宇宙飞船，其速度和轨道关系是怎样的呢？这是天体力学中的二体问题，在此做简单的阐述。

从二体问题微分方程的解，可以获得关于运动速度 v 的公式（称为活力公式，或运动能量公式）：

$$v^2=G(m_1+m_2)\left(\frac{2}{r}-\frac{1}{a}\right)$$

式中 G 为万有引力常量，m_1、m_2 分别是两个天体的质量，r 是至质量中心的距离，a 是绕质量中心运动的轨道的半长径。活力公式是能量守恒定律的反映。它维持着动能 $\frac{1}{2}m\omega^2$ 与引力势能 $-\frac{\mu m}{r}$ 之和为常数 $-\frac{\mu m}{2a}$ 的关系，其中 $\mu=G(m_1+m_2)$。

对于正圆轨道，$a=r$，$v_0=\sqrt{G(m_1+m_2)}/r$，此时的速度 v_0 又称为环绕速度。

对于抛物线轨道，$a=\infty$，$v_1=\sqrt{2}v_0$，此时的速度 v_1 又称为逃逸速度。

如果在某一位置处，飞行器达到不同的速度，则其运行轨道将取不同的类型（图 5.7）。

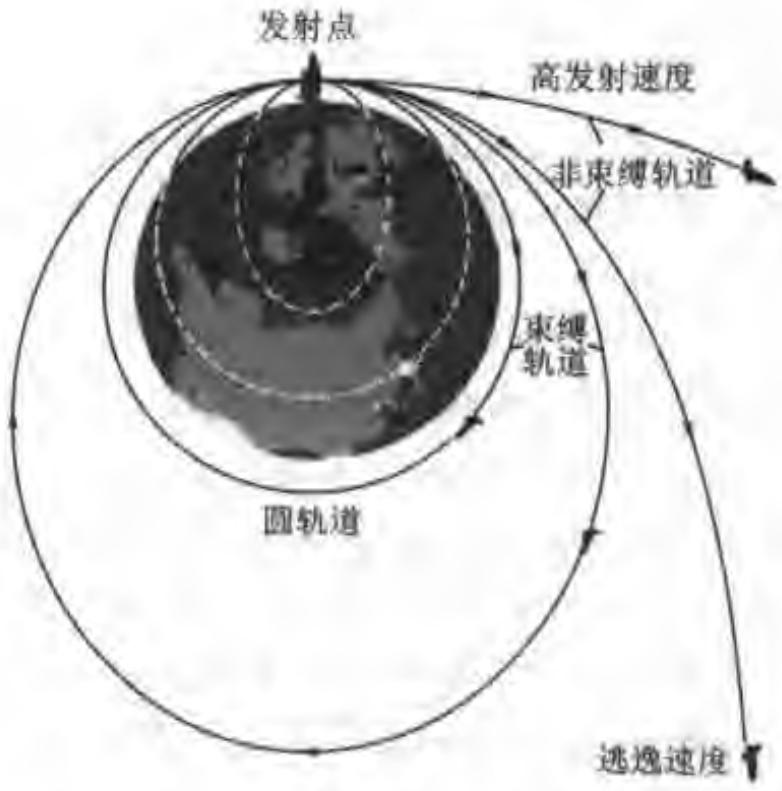


图 5.7　环绕地球轨道速度与逃逸速度的关系

当 $v<v_0$ 时，取椭圆轨道(1)，远点在该处；

当 $v=v_0$ 时，取正圆轨道(2)；

当 $v_0<v<v_1$ 时，取椭圆轨道(3)，近点在该处；

当 $v=v_1$ 时，取抛物线轨道(4)，离去的方向与来的方向平行；

当 $v>v_1$ 时，取双曲线轨道(5)，离去的方向与来的方向相差一个角度。

四、三种宇宙速度的计算

三种宇宙速度是指在地球表面发射人造天体时有三种不同的发射速度。第一宇宙速度指环绕地球飞行的最低速度；第二宇宙速度指脱离地球引力场绕太阳飞行的最低速度；第三宇宙速度指脱离太阳引力场，飞出太阳系的最低速度。

1. 第一宇宙速度

第一宇宙速度是卫星或飞行器对地球表面的环绕速度，即

$$v_0=\sqrt{G(m_1+m_2)/r}$$

m_1 是地球质量，m_2 是飞行器质量，r 是地球半径。飞行器 m_2 与地球的质量 m_1 相比可以忽略，又注意到 $Gm_1=r^2g$（从 $F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$ 及 $F=mg$ 立即可以推知），g 是地球表面重力加速度。于是，$v_0=\sqrt{rg}$，取 $r=6\ 378\ \text{km}$，$g=9.8\ \text{m/s}^2$，可算出 $v_0=7.9\ \text{km/s}$。按此速度飞行，绕轨道一周的时间 $T=2\pi r/v_0(\text{s})\approx 84\ \text{min}$。

2. 第二宇宙速度

第二宇宙速度是卫星或飞行器对地球表面的逃逸速度。在活力公式中令 $a=\infty$，即得 $v_1=\sqrt{2G(m_1)/r}=\sqrt{2}v_0=11.2$ km/s。

3. 第三宇宙速度

第三宇宙速度是卫星或飞行器在地球位置处对太阳引力的逃逸速度。地球绕太阳公转可近似认为是圆轨道，那么地球公转的速度就是在地球位置处对太阳引力的环绕速度，其值为

$$2\pi r/T\approx 29.8 \text{ km/s}$$

其中 r 取用千米表示的天文单位的值，T 取 365.242 2d。

逃逸速度为 $v_1=\sqrt{2}v_0=42.1$ km/s。如果轨道设计为入轨时与地球公转方向相同，则可借助地球公转的速度，于是飞行器自身的速度可减为(42.1－29.8)km/s=12.3 km/s。需注意这是飞行器脱离地球引力束缚后应达到的速度。脱离引力束缚，需要在发射时达到第二宇宙速度 v_1。从能量的角度来考虑，要想获得第三宇宙速度 v_2，付出的能量应当等于脱离地球引力束缚所需要的能量加上能达到 12.3 km/s 所需要的能量。由于能量与速度的平方成正比。于是，应当有 $v_2^2=v_1^2+(12.3)^2$，已知 $v_1=11.2$ km/s，所以

$$v_2=\sqrt{v_1^2+(12.3)^2}=16.7 \text{ km/s}$$

达才是最后算出的第三宇宙速度。表 5.4 列出了太阳系各大行星和月球表面的环绕速度和逃逸速度。

表 5.4 太阳系天体的宇宙速度

	环绕速度 v_0/(km·s^{-1})	逃逸速度 v_1/(km·s^{-1})
水星	3.0	4.3
金星	7.3	10.3
地球	7.9	11.2
火星	3.5	5.0
木星	42.1	59.5
土星	25.2	35.6
天王星	15.1	21.4
海王星	16.7	23.6
冥王星	0.85	1.2
月球	1.7	2.4

第 5 节 太阳系的形成和演化

按照现代宇宙大爆炸模型的观点，大约在 150 亿年前，宇宙中所有的物质与

能量都聚集在一个无限致密与灼热的原始火球之中，这个原始火球处于高温、高密状态，在原始火球里，物质以基本粒子的形态存在。后来，在基本粒子的相互作用下，原始火球发生了大爆炸。这场大爆炸之后，诞生了我们今天的宇宙。这种爆炸不是物质向虚无的空间飞散，而是向四面八方的均匀膨胀。后来膨胀减慢，开始了今天我们所观测到的宇宙较慢的膨胀。

随着宇宙的膨胀，温度逐渐降低，这有利于基本粒子的结合；电子和中微子与其反粒子（正电子和反中微子）等这些基本粒子在结合过程中释放出能量，发射出辐射（光子）。随着宇宙的胀大，其中的物质逐渐冷却，温度降低下来，粒子的运动也就慢多了，这就使它们有可能合并成稳定原子核（质子和中子）。此后，这些粒子组合到一起形成了第一批氢原子和氦原子。随着整个温度的降低，宇宙中不断创生出更重元素的原子核。宇宙间最丰富的物质是氢和氦组成的星际气体和星际物质。它们在引力的作用下，聚集到一起，逐渐形成巨大的星际云团。

由于星际云团本身的密度不均匀，这些小尺度的密度聚集区在自引力作用下压缩得足够紧密逐渐形成了恒星、星系、星系团和大尺度结构的“种子”。经过进一步的引力收缩，形成了恒星、行星等天体。不同的星际云在运动中相互吸引、彼此撞击，有的聚拢合并，有的分裂离散，逐渐地形成了千姿百态的星系和巨大的星系团、超星系团和大的吸引体。

关于太阳系的形成，星云说认为，在无数弥漫的星际云之中有一块星云叫做太阳系星云，它就是我们地球所在的太阳系的诞生之地。太阳系星云原来是一大团炽热的、缓慢旋转的气体尘埃星云，这些弥漫尘埃星云漫游在浩缈的宇宙之中。由于引力的作用，它逐渐收缩、凝聚，同时旋转速度加快，逐渐形成一个“铁饼”状的星云团块，这个引力团块的核心部分形成了太阳，那些远离星云中心的旋转气体环不断收缩，逐渐变冷。这些环系在运动中不断受到其他团块的撞击，分裂为许多行星，并逐渐形成行星系统，最后形成了太阳、九大行星和无数小天体所组成的太阳系家族。按照这种观点，我们可以得知太阳和地球是一母（太阳系星云）所生的儿女，是同胞姐妹。

另一些科学家认为，太阳系内的行星是由另一颗恒星与我们的太阳相撞击后，从太阳上分裂出一些物质形成的，其中包括我们的行星——地球。按照这种学说，太阳是我们地球的母亲。

也有人认为，当太阳形成后，在轨道上遇到另一个由气体和尘埃组成的冷星云。由于太阳的吸引力，俘获了那个星云的部分物质，这些物质就绕太阳旋转，逐渐演化形成太阳系的行星系统。按照这种观点，太阳和地球不是“直系亲缘”，但是很有缘分。

我国天文学家戴文赛教授发展了太阳系的星云学说，他进一步阐明了太阳

系内行星的形成过程。太阳系星云不断受到临近的其他星云碰撞，分裂出小的团块和颗粒，在自引力作用下逐渐收缩、凝聚形成较大的团块和大的颗粒。这些团块和物质颗粒在引力作用下，向云盘的赤道沉降，形成薄的尘埃层。中心区收缩凝聚成太阳，周围大颗粒逐渐凝聚成大团块——星子。星子在绕日公转中有的互相碰撞成碎块，有的互相结合成更大的团块，成为大星子。大星子吸引周围的物质颗粒，迅速成长为行星胎，它继续吸引小星子及星际物质，演化为行星，其中之一就是襁褓中的地球。

从太阳的化学成分中有铁等重元素来看，太阳可能是第三代恒星，即宇宙大爆炸后形成的恒星的后代。在宇宙大爆炸后的 100 亿年左右，即从现在倒推 50 亿年时发生了第二次超新星爆发的繁盛时期，一颗超新星内的重元素充斥到太阳系所在的星云——太阳系星云，在自引力与向外压力相抗衡的运动中，孕育了太阳系。太阳刚诞生时是个温度为 10^7 K 的原始恒星，它继续收缩，中心温度迅速增加，并开始闪烁发光，经过漫长的岁月，当内部温度达到 1.5×10^7 K 时，核心的氢点燃，开始了氢聚变成氦的热核反应，成为充满活力的主序星——太阳，带领着太阳系家族在广袤的宇宙中遨游。

在太阳系星云中刚刚诞生的地球，在运动中不断与周围小行星碰撞，逐渐壮大。同时也增强了自身的引力，吸引了周围更多的小天体，像滚雪球一样，地球越来越大。初期的地球的温度很高，被炽热的浓厚岩浆所笼罩，周围有厚厚的蒸汽和气体形成的云层环绕。经过了漫长的时间地面逐渐冷却，当温度降到 300 K左右时，浓厚的云层随着地球引力的增强开始缓缓下降。随着闪电雷鸣的轰击，倾盆大雨的冲刷，地球渐渐降温，外壳逐渐凝固了，大气纯净了，出现了蜿蜒的山脉和汪洋的海洋，地球上生命的故事也从此开始了。

大约 50 亿年之后，当太阳内部的氢核燃料都燃烧成了氦以后，壳层的氢开始燃烧，这时太阳的体积开始膨胀而成为红巨星。它膨胀的体积先是包容了水星、金星的范围，使它们蒸发融化。然后进入了不停地膨胀、收缩循环的脉动不稳定阶段。此后，太阳又进一步膨胀，这时它的体积大到包容到了地球轨道，这时地球也就融化蒸发，只留下了火星及其轨道外的行星。太阳在脉动之后的进一步膨胀中，外层与核心分开，恒星的外层渐渐扩张，通过物质抛射，形成行星状星云。而核心区域的物质随着整个星球的膨胀，内部的辐射压力大为减小，不足以抵抗自身的引力，这时物质塌缩，挤向中心，使中心密度急剧增加，形成了一个致密的白矮星。这时，它依靠简并电子气的压力与引力相平衡，而且内部已停止了热核反应。在一段很长的时间内继续发射它的余热和微弱的光，直到失去它的全部热量成为一颗冰冷、静寂的黑矮星。

【例题 1】 一艘飞船在日落的同时从靠近地球赤道的人造卫星发射基地出发，它的驾驶员希望连续观测太阳位于地平线上的情景。飞船的运动速度应为多少？详细解释飞船的

运动。

解答:地球的平均半径为 6 378 km,我们可以算出在赤道上的自转速度为 0.46 km/s = 1 669.76 km/h(千米/小时)。由于地球是自西向东自转,因此飞船要以 1 669.76km/h 的速度自东向西运动(假定飞船距地面的距离与地球半径相比可以忽略不计),才能抵消地球自转的影响,使驾驶员能连续观测太阳位于地平线上的情景。

【例题 2】　一名宇航员乘宇宙飞船从月面的冷海上空高度 100 km 的上空飞过,同时另一名宇航员正在月球上的白天在月面上的冷海行走,飞船上的宇航员能否用 20 倍的双筒望远镜发现月面上的宇航员?考虑所有的可能性。

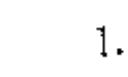
解答:首先计算从冷海上空 100 km 的高度望去,月面上的宇航员的张角。由于飞船上的宇航员在冷海的正上方,他看到的月面上宇航员的最大宽度约为 0.6 m(宇航员的肩部),张角 θ''　$(0.3/100\ 000)\times 206\ 265''=1.2''$,宇航员如果用 20 倍的双筒望远镜,即放大 20 倍后为 $24''$,人眼的分辨本领约为 $60''$,还是无法发现月面上的宇航员。但是当宇航员身上的宇航服或头盔上反射率高的地方将足够的太阳光反射到上方时,飞船上的宇航员便可发现他。

【例题 3】　火星的相继两次大冲的时间间隔为 779.9 d,计算火星的轨道半长轴为多少?

解答:已知火星的会合周期为 779.9 d = 2.14 a,地球的轨道周期为 1 恒星年,日地平均距离为 1AU,利用行星会合周期公式,有

$$1/T=1/E-1/S=1/1-1/2.14=0.53$$

所以,火星的轨道周期 $T=1.88$ a。由于火星的质量远小于太阳的质量,依据开普勒第三定律,求出 $a=T^{2/3}=1.88^{2/3}=1.52$ AU,即火星的轨道半长轴为 1.52 AU。



习　题

1. 木卫一离木星的距离为 4.22×10^5 km,它绕木星的公转周期为 1.77 d,月球到地球的距离 3.84×10^5 km,月球绕地球的公转周期为 27.32 d。算出木星的质量与地球的质量比。

2. 要月球永远飞离地球,则地球的质量应减小到怎样的程度?

3. 大家知道,如果给物体在水平方向以 7.906 km/s 的速度,它便不再回落到地球上,而变成靠近我们地球表面飞绕的卫星了,求这个卫星的公转周期是多少?

4. 太阳半径 $R=6.96\times10^5$ km,算出太阳表面上的逃逸速度。

5. 大炮在地球上射出炮弹的速度是 900 m/s。问这大炮在月球上射出炮弹的速度是多少?已知月球上一切物体的重量减轻为地球上的 1/6(忽略地球上的空气阻力)。

6. 如果太阳的质量突然增大了一倍,地球轨道会怎样改变?

7. 利用牛顿的万有引力定律,计算你的重量在火星上与在地球上相差多少?

8. 只有水星,火星和冥王星的轨道显著偏离圆形,利用表 5.3 的资料,计算它们离太阳的近日点和远日点的距离。

9. 一个行星在圆轨道上的轨道角动量是它的质量、轨道速度和它距太阳的距离的乘积，计算木星和地球的轨道角动量之比。

10. 一个宇宙飞船在近日点刚刚擦过地球，在远日点刚刚擦过火星。求它的轨道椭率、半长轴和轨道周期。为了简化，假设地球和火星的轨道是圆形。

11. 在 1997 年 3 月地球和火星最靠近。“火星探险者”于 1996 年 12 月 4 日发射，在 1997 年 6 月底抵达火星。勾画出两个行星的轨道和太空船的轨道。可靠地标出当探险者号在火星上着陆时火星与地球的位置。

12. 如果地球的自转速率加倍，则地球的自转角动量会有什么变化？如果地球距离太阳的距离加倍地球的角动量又如何变化？

第六章

水星与金星

水星离太阳最近，金星是最亮的行星，它们都在地球轨道以内，所以也叫地内行星。当它们的黄经和太阳的黄经相等时称为“合”，在上合(行星和地球位于太阳两侧)之后，日落以后出现在西方天空，表现为昏星；在下合后，黎明前出现在东方天空，成为晨星。

第1节 水 星

水星出现在太阳的附近，经常淹没在耀眼的太阳光辉之中，即便在有利条件下，人们也只有在夕阳余晖中或是在黎明时才能看到。因为它离太阳的角距不超过28°(在18°～28°之间)，古代称30°为一辰，所以我们的祖先把水星叫做辰星。

一、水星的运动规律

水星是距离太阳最近的大行星，离太阳的平均距离只有约5 791万km。它的直径只有4 879.4 km，约是地球的三分之一。水星的质量比地球小得多，约为3.3×10^{23} kg仅为0.055个地球质量。水星的平均密度约5 400 kg/m^3。水星上的表面引力是地球引力的0.4倍。水星的自转周期是58.65天(地球日)，绕日公转一周为87.97天(地球日)，也就是说，水星每自转三周所需的时间，恰好等于它绕日公转两圈的时间，这就是说水星的一年的时间等于它的一天半的时间。水星绕日的公转轨道是椭圆，离太阳有时近，有时远，所以在我们看来它有时亮些，有时暗些，它的平均视星等为-1.9^m。由于水星很靠近太阳，加上它的一昼夜大约是地球上的58.65天，白昼日照时间很长，因而，在水星表面赤道区域，白昼的温度高达350℃，就是一块铅放在上面也要熔化。而在夜间的温度降至－170℃左右。在温度变化如此剧烈的恶劣环境下，难怪它是个“不毛之地”，没有智慧的生命生存。

二、水星表面特征

水星离我们地球较近，又是一个处于极端条件下的世界，它的奇异特性吸引

着广大探索者，人们很早就对它进行了空间探测。1973 年 11 月 3 日美国成功发射了“水手 10 号”，它于 1974 年 3 月 29 日到达水星的上空区域。水手 10 号绕日运行的轨道使它有三次从水星近旁飞过，最后一次离水星只有 327 km，可以看清楚水星表面上一二百米大小的物体细节(图 6.1)。水手 10 号在飞行过

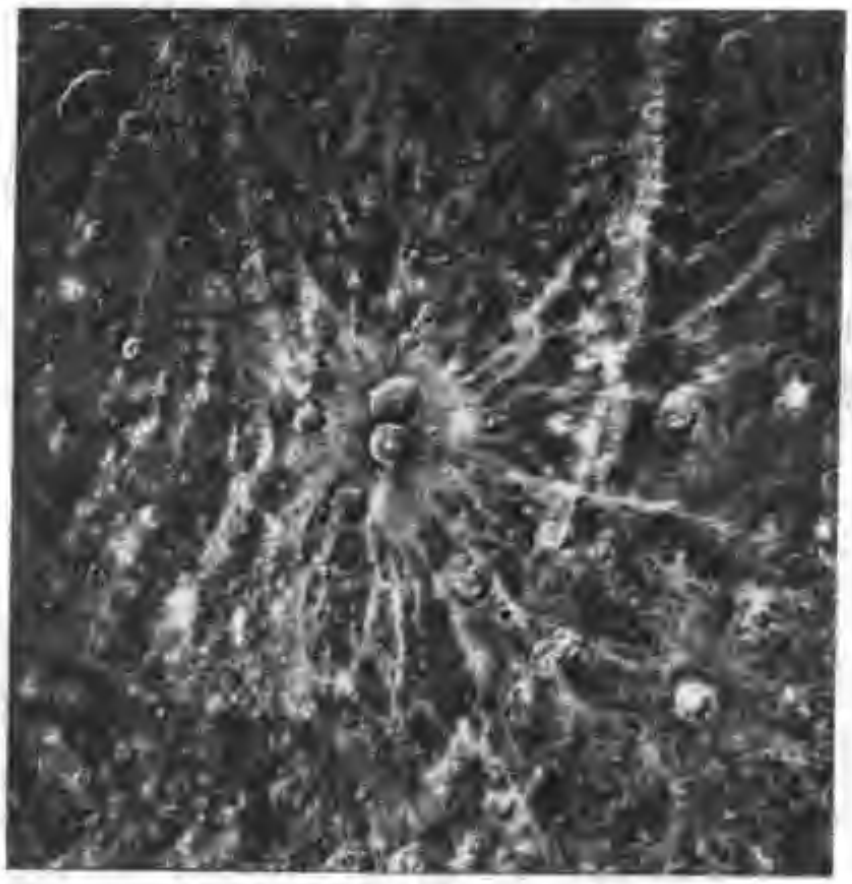


图 6.1　水手 10 号宇宙飞船拍摄的水星表面

程中发回一系列的水星图像。水星的表面很貌似月球，表面上也是环形山密布，也有类似月球的大盆地、裂谷和悬崖等，还有由于冷却和收缩而形成的大的皱纹(图 6.2)。由于水星貌似月球的形象使人们对它的热情大为降温，以至几十年来遭受人们的冷遇。

三、水星的磁场

水星的体积比月球略大。由“水手 10 号”探测到的资料证实了水星内部拥有一个高密度的核。按照类地行星推测，这个高密度的核可能主要由铁构成。然而对于水手 10 号的资料详尽分析以及地面的光谱观测都未检测出水星地壳岩石中有铁存在的痕迹。所以有无铁的问题还是一个谜。

水手 10 号的空间探测发现水星有比较强的磁场。太阳风与水星的磁场相互作用形成了弓形激波与包围水星的磁层。水星的磁场及内部的秘密还没有揭开，所以 21 世纪的科学家又萌发了探测水星的热情，正准备进一步对水星发射探测卫星和宇宙飞船。



图 6.2　新发现的水星表面由于冷却和收缩形成的皱纹区(Scarp)

第2节　金　　星

金星是我们肉眼看到的夜空中最明亮的行星，最亮时的视星等为 -4.4^{m}。除了太阳和月亮外，金星是全天最亮的白色星，所以，古时我们的祖先叫它为太白金星。它的圆面亮度和月球一样也有盈亏的变化。

一、金星的运动规律

金星距离太阳约 1.082×10^{8} km，比水星远，比地球近。其直径约 12 103.6 km，它的体积相当于 0.86 个地球体积。金星自转一周的时间比地球慢得多，它的自转方向与公转方向相反，是自东向西自转，所以站在金星上看太阳，太阳从西边升起来，在东方落下去。金星自转一周是 −243.02 天(负号表示逆转)。金星的绕日公转的周期是 224.7 天。金星像地球那样，自转轴倾斜于黄道面，它的赤道面与黄道面的夹角为 177.4°。在金星上的一个恒星日是 243.02 天，而它的一个太阳日是 117 天(地球日)。

我们所见金星盈亏相位的变化周期，是地球公转周(365.242 2 天)与金星公转周的(224.7 天)的会合周期，即 583.9 天。

二、金星的表面特征

金星的质量比地球略小，相当于 0.81 个地球的质量。在金星的周围有一层浓厚的大气层，所以看起来，金星像是蒙上了面纱。这层浓厚的大气高温而且有腐蚀性，温度高达 450℃以上，气压高出地球的气压近百倍，又充盈着腐蚀性很强的硫酸雨滴。这样恶劣的环境也没有挡住人们的探测行动。1961 年—1983 年前苏联发射了“金星”1～16 号宇宙飞船飞往金星。1984 年俄国发射了“织女星 1 号”和“织女星 2 号”探测金星。美国从 1962 年到 1978 年发射了“水手 2 号”及 6 个“先锋-金星号”宇宙飞船，1989 年 5 月 4 日美国发射的“麦哲伦号”宇宙飞船于 1992 年 9 月完成了雷达对金星成像(图 6.3)和引力探测等任务。由



图 6.3　麦哲伦宇宙飞船探测到的金星表面

空间探测得知，金星的周围有厚厚的云层，在金星表面上空 32～88 km 的浓云密雾中充满了又热又浓的具有腐蚀性的硫酸雨和硫酸雾。大气中还频繁的出现闪电现象。从“金星 13 号”观测得到的图像可知，当时的温度为 457℃，有 89 个地球的大气压。金星的温度一般都在 465～485℃之间，有 90 个大气压，这相当于地球的海底深 900 m 处的压力。这样的灼热表面，如此巨大的压力，加上大气中的硫酸雨滴，如此令人窒息的恶劣环境，岂能是生命的繁衍生息之地！

金星大气中二氧化碳居多，达到 97%以上，还有近 3%的氮和很少量的水蒸气、一氧化碳等。金星表面有高达 480℃的温度主要原因是由于金星大气的“温室效应”。金星大气中的二氧化碳、水汽和臭氧起到了温室玻璃罩的作用，使金星接受到的太阳热能，日积月累地储存起来，使表面升温，热辐射无法散逸到太空。“温室效应”使金星的昼夜温差很小，夜晚温度也不降，依然是难耐的高温。

由于金星有大气的保护及对陨星的“挡驾”，所以表面不像月球和水星那样环形山密布，而是比较平坦，类似于月球上的低洼地，但发现也有陨石坑和火山口，其中有一座火山口的直径约有 700 km。金星上有一处大裂谷长达 1 200 km。金星上还有耸立的高峰，在北半球的麦克斯韦山脉最高峰高达 12 000 m，比地球上的高山之巅珠穆朗玛峰还高。

由于金星的浓厚云层，在白天的天空是阴沉沉的，在夜晚，因为金星没有卫星，天空中最明亮的是地球，月亮紧跟着地球。

【例题 1】 当水星运行到太阳和地球之间时，我们在太阳圆面上会看到一个小黑点穿过，这种现象称为水星凌日。其道理和日食类似，我们能否用肉眼直接观测到水星凌日？

解答：水星比月亮离地球远，视直径仅为太阳的一百九十万分之一。水星挡住太阳的面积太小了，不足以使太阳亮度减弱，所以，用肉眼直接看不到水星凌日的现象，只能通过望远镜附加减光片观察或做投影观测。水星凌日平均每 100 年发生 13 次。2003 年 5 月 7 日下午 1：20 -6：30，发生了水星凌日，我国大部分地区均可用望远镜附加减光片观测到太阳视面上，清晰地有一个黑色的小斑点，那就是水星。

【例题 2】 金星上的一天(1 个太阳日)有多少个地球日？如果金星的自转和公转方向一样而不是逆转，会发生怎样的变化？

解答：按会合周期计算：金星自转周期 - 243 天(金星逆转所以是负值)，它绕日公转周期为 225 天，$1/S=1/225+1/243$，所以 $S=117$ 日(地球日)。

如果金星的自转和公转方向一样而不是逆转，有 $1/S=1/225-1/243$，则金星上的 1 个太阳日为 3 037.5 天(地球日)。

【例题 3】 金星在西大距时，升起的时间大约是几点？

解答：金星和太阳在视线方向最大夹角是在大距的时候，这时金星和太阳的夹角为 45° 左右，相当于 3 个小时，所以金星在西大距时，约凌晨 3 点钟时金星升起。



习　题

1. 水星和月球有哪些相似之处？

2. 水星在东、西大距时，大约几点上升？几时下落？(最大角距为 28°)

3. 水星在近日点时从水星上看太阳的角直径有多大？

4. 水星的平均轨道速度是 48 km/s，利用开普勒第二定律计算水星在下列位置的速度：(a)在近日点；(b)在远日点。转换这个速度为角速度(每天多少角度)，并与水星的自转速度 6.1°/d 做比较。

5. 假设金星和地球的轨道是圆形的，在金星离地球最近时，比较地球对金星的潮汐力与太阳对金星的潮汐力。

6. 金星的大气是地球大气质量的 90 倍，金星的大气可近似看作一层密度均匀为 70 kg/m^3 的大气体层，计算大气的有效厚度为多少公里？

7. 按照 Sterfan 定律，计算温度为 750 K 的金星表面，每平方米每秒发射出

的辐射能量与温度为 300 K 的地球表面，每秒每平方米发出的辐射能量之比是多少？

8. 在没有任何温室效应的情况下，金星的表面温度会像地球那样，表面温度大约是 250 K，而事实上，金星的表面温度是 750 K，利用这个信息和 Sterfan 定律估算从金星表面发出的红外辐射有多少部分被金星大气里的二氧化碳吸收了。

9. 计算宇宙飞船 Magellan 的轨道周期，它沿着一个椭圆的轨道围绕金星，离金星表面上最近高度是 294 km，最大的高度是 8 543 km，在 1993 年它的轨道变化为最小高度为 180 km，最大高度为 541 km，这个新的轨道周期是多少？

第七章

地球与月球

我们的家园——地球是太阳系唯一有智慧人类的星球，同时它也是太阳系的一颗普通的行星。月球是它的唯一的自然卫星。地月系统在太阳系以独特的运动规律，描绘出美丽而壮观的天文图景。



图 7.1　在月球上拍摄的地球照片

第 1 节　地球在太阳系中得天独厚

地球是太阳系家族的宠儿，它之所以如此幸运，是由于地球占有着得天独厚的天然条件。在九大行星中，地球与太阳的距离和质量的搭配恰到好处，而且，地球有比较安定的宇宙环境。

首先，在九大行星中地球离太阳的平均距离为 1.49 亿 km，不近也不远，因而它得到的太阳的热辐射能量适中，不冷也不太热，具有生物生长所需要的条件。而其他行星却没有这个“福分”。如水星离太阳太近，只有日地平均距离的 1/3，加上周围没有大气，水星在中午的温度可达 350℃，比沸腾的油锅的温度还高；而夜晚，水星表面的温度又下降到－170℃左右，如此情况怎能适合生物生长？金星离太阳也比地球近，而且在它表面上有浓厚的二氧化碳大气，使温度最

高可达 480℃，白天、黑夜都是高温、闷热的天气。而火星离太阳比地球远，是日地距离的 1.5 倍，它的表面平均温度为－23℃，与地球南极洲的平均温度相差不多。更不用说那些比火星更遥远的其他大行星了。

地球的“天赐”条件还与太阳和地球的质量有关。太阳的质量是地球质量的 33 万倍，大约为 1.989×10^{33} g，太阳的这个质量使它可以享有 100 亿年的寿命，这不仅足以使地球上完成其生命的演化，而且可以使地球上的人们今后再享受 50 亿年的温暖和光明。如果太阳的质量比现在大 15 倍，则它的寿命只有几千万年，地球也就演变不到现今这样。反之，假如太阳的质量比现在小，如为现今太阳质量的 1/5，则其寿命虽然可延长至 1 万亿年，但它的温度则会太低，将不能满足地球上万种生灵的生长需求。加之地球自转和公转的方式，使地球大部分地区昼夜相间，四季分明，为生命繁衍创造了有利的条件。假如地球质量太大，引力会过强，则会吸住大量的空气，形成很厚的大气层；气压过高，会形成液态空气的海洋，如木星在浓厚的大气下的表面是液态氢海洋。反过来，如果地球的质量太小，引力过弱，空气会逃逸掉，地球就会失去大气层这个“保护伞”。如月球的质量仅为地球质量的 1/81.3，由于质量小，引力吸不住大气，没有大气层的保护，水也被蒸发掉，所以月球上没有液态水，也没有空气，经常受到外来天体的轰击。地球大气厚度恰到好处，它给地球上的“居民”以充足的氧气，适宜的阳光和温度，并且抵挡了大量的紫外线、高能粒子流的碰撞。

再者，地球所处的宇宙环境相对比较安定。太阳系中的小天体：小行星、彗星及流星体大多在一定轨道上运行。虽然有一些受大行星吸引而改变轨道，与其他天体撞击，但与其他大行星相比，地球是幸运者，被小天体碰撞的频率还不算高。而月球、水星和火星等却是被撞得伤痕累累，环形山比比皆是，记录着多次遭受碰撞的经历。地球的宇宙环境对地球的演化和文明是至关重要的，它涉及到地球的安危及生物的生存环境。自地球诞生以来虽有过多次碰撞，但相对其他大行星及其卫星来讲，我们的地球有着相对比较安定的宇宙环境，这也使我们的地球成为太阳系家族中的幸运儿。

第 2 节 地球的物理特征与结构

一、地球的大小与质量

从月球上和人造卫星拍的照片来看，地球是一个浑圆的蓝色星球。20 世纪 70 年代人造卫星的大地精确测量表明：地球的赤道半径 $a=6\ 378.164$ km；地球中心到两极的极半径 $c=6\ 356.779$ km，也就是说地球是赤道略凸，两极处稍扁的椭球体，其平均半径 $R=6\ 371.03$ km；地球的扁率 $(a-c)/a=0.003\ 352\ 9$。

地球体与球体的差别很小。只是在南极有约 30 m 的凹陷，在北极有约 10 m 的隆起，其余地区差值很小。

人们测定地球质量主要是根据开普勒第三定律，即

$$(m_{\oplus}+m_{m})=\frac{a^3}{P^2}$$

式中 $m_{\oplus}$ 为地球质量，m_{m} 为月球质量（在式中月球质量相对地球较小，可以忽略）；P 为月球绕地球运转的周期，以年为单位（$P=27.3\text{d}=7.48\times10^{-2}\text{a}$），$a$ 为月球绕地运转的轨道半长径，以天文单位（AU）为单位（已知地月距离$\approx3.8\times10^{5}$ km$=2.53\times10^{-3}$ AU）。由此可以求出地球的质量。

此外，我们还可以由实验测出地球表面重力加速度 g，由重力加速度 g 与质量 $m_{\oplus}$ 的关系式 $g=Gm_{\oplus}/R^2$（式中 g 是重力加速度，约为 980.6 cm/s^2，G 是引力常量），取地球平均半径 $R=6\ 371.03$ km，我们可以近似计算出地球的质量 $m_{\oplus}=5.964\times10^{24}$ kg。

由于地球不是严格的球对称体，根据更精确的测算，地球质量的准确值是 $m_{\oplus}=5.967\times10^{24}$ kg，也就是说，地球约有 59 万亿亿吨重。这个质量数值仅为太阳质量的 33 万分之一，在浩瀚的宇宙中地球只是一粒“微尘”。

由于已知地球的体积为 1.083×10^{21} m^3，所以算出地球的平均密度为 5.518 g/cm^3。地球比其他行星更“结实”，不像木星那样“虚胖”，木星的密度仅为地球密度的七分之一，而土星的密度仅有 0.69 g/cm^3，比水还轻，如果土星掉在一片汪洋大海中，它会漂浮起来。

在太阳系中，地球的质量是适中的，地球比“老大”木星的质量小很多，仅为木星的 1/318；而比“老九”冥王星的质量则要大 463 倍多。地球的这个质量恰到好处，为什么这样说呢？因为质量越大，自身的引力就越大，物质内部的压力也越大。地球的质量是中等，内部的压力和自身的引力适中，可以吸住相当多的大气，使地球有适合生命生存的环境（如有水和空气）。地球也不像水星、月球那样因质量小，引力过弱，吸不住空气，从而没有大气。

二、地球的圈层结构

科学家把地球的外部，从地壳上面分成四个圈层，即岩石圈、水圈、大气圈和生物圈。这四个圈层不是孤立存在的，它们之间是互相联系、互相交融，密切相关的。

1. 岩石圈

人类立足之地是地球的表层，这一层主要是岩浆岩构成的固态球体。地球表面的岩石层称为地壳，地壳的下面是地幔，可分为上地幔、过渡层和下地幔。上地幔浅部约 100 多 km，也是坚硬的岩石，它与地壳共同组成了地球最外面厚

约 70～150 km 的岩石圈。岩石圈内的岩浆岩是地球内部的炽热岩浆上升后冷却凝固而成的岩石。在岩浆岩上面一般有一层很薄的沉积岩和一层薄薄的土壤覆盖着。科学家们把包含岩浆岩、沉积岩和土壤的覆盖面称为岩石圈。

2. 水圈

岩石圈的表面高低不平，低凹部分被液态水所淹没成为海洋、湖泊和河流。此外，在陆地下面一定深处，还存在着地下水。这些不同形态的水构成的圈层称为水圈。水是生命的源泉，地球上最早的生命可能诞生于海洋。维持生命离不开水，地球上一旦没有水，那么地球将会像火星一样变成一个毫无生气的荒寂世界。

3. 生物圈

在岩石圈上部，大气圈下部和水圈里，生存着千千万万种有生命的生物，这些生物的总体及其分布范围，称为生物圈。地球作为太阳系的一个成员，有着得天独厚的天文条件，加上地球存在大气圈和岩石圈的调节作用，太阳提供给地球充足的阳光，使生物有了适于生存的阳光、温度和各种气候条件。生物圈广泛地渗透在大气圈、水圈和岩石圈里。生物活动形成的循环，是地球外部圈层物质循环的重要内容，也是各个圈层互相联系的纽带。

4. 大气圈

在海洋和陆地的外面是大气圈。大气圈是从海陆表面到行星际空间的过渡圈层，它由好几层组成，总厚度达 1 000 km 以上。大气圈主要由氮和氧组成(氮占 78%，氧占 21%)，此外还有少量的氩气(占 0.93%)和二氧化碳(占 0.027%)，以及微量的氢、氖、氪、氙气。

地球的大气层起着保护地球和人类的重要作用。地球大气像地球的盔甲，避免与减少了来自太空的小行星、流星体、彗星碰撞的灾难与太阳紫外线的杀伤。大气使地球保持适宜的湿度和温度，并维护着人类和万种生灵需要的水和富氧的空气，使地球上的人类和万种生灵才能生养繁栖。

地球大气层的底部是地面，大气的上界有多高，目前并不清楚，因为大气的密度随着高度的增加而减小，它与行星际空间之间没有截然分明的界限。根据世界气象组织的规定，按大气温度的垂直分布，大气层自下而上可粗略地分为对流层、平流层(包括臭氧层)、中间层和电离层以及稀薄的外层大气(图 7.2)。

(1) 对流层

对流层是距地球表面最近，也是最稠密的一层，厚约 8～17 km，这里集中了整个大气 75%的质量和 95%的水汽。在对流层中大气温度随高度而降低，大气从海陆表面吸取热量，产生热空气上升、冷空气下沉的此起彼伏的对流运动，使海陆表面和对流层间存在频繁的水汽交换，形成云雾、雨、雪等。所以对流层是展现风、云、雨雪等种种天气现象的大舞台，与我们人类关系最为密切。

(2) 平流层

对流层顶至 50 km 高度之间分布着平流层，这里水汽很少。在平流层里分布着臭氧层，它能大量吸收太阳紫外辐射，造成气温随高度升高，致使大气难以上下对流，所以在这里大气以水平流动为主。臭氧分子分布在 15～50 km 的大气平流层中，它仅占大气总质量的十万分之一，像一层薄薄的轻纱笼罩着地球，形成一个环绕地球的天然屏障。虽然它很稀薄，但是它吸收和挡住了 99%以上的太阳紫外辐射。使地球上的人类和生物能够正常生长发育世代繁衍。如果没有臭氧层，我们的地球将成为一个没有防犯的星球，杀伤生物的紫外辐射便无遮无拦地长驱直入，使地球上的生灵遭受灭绝。

(3) 中间层

地面以上 50～80 km 之间的大气称为中间层，由于没有臭氧的存在，该层温度随高度迅速下降，使这里成为一个对流运动剧烈的高空对流层。

(4) 电离层

从中间层顶至 200 km 高度之间是电离层。该层的气体已很稀薄，在太阳

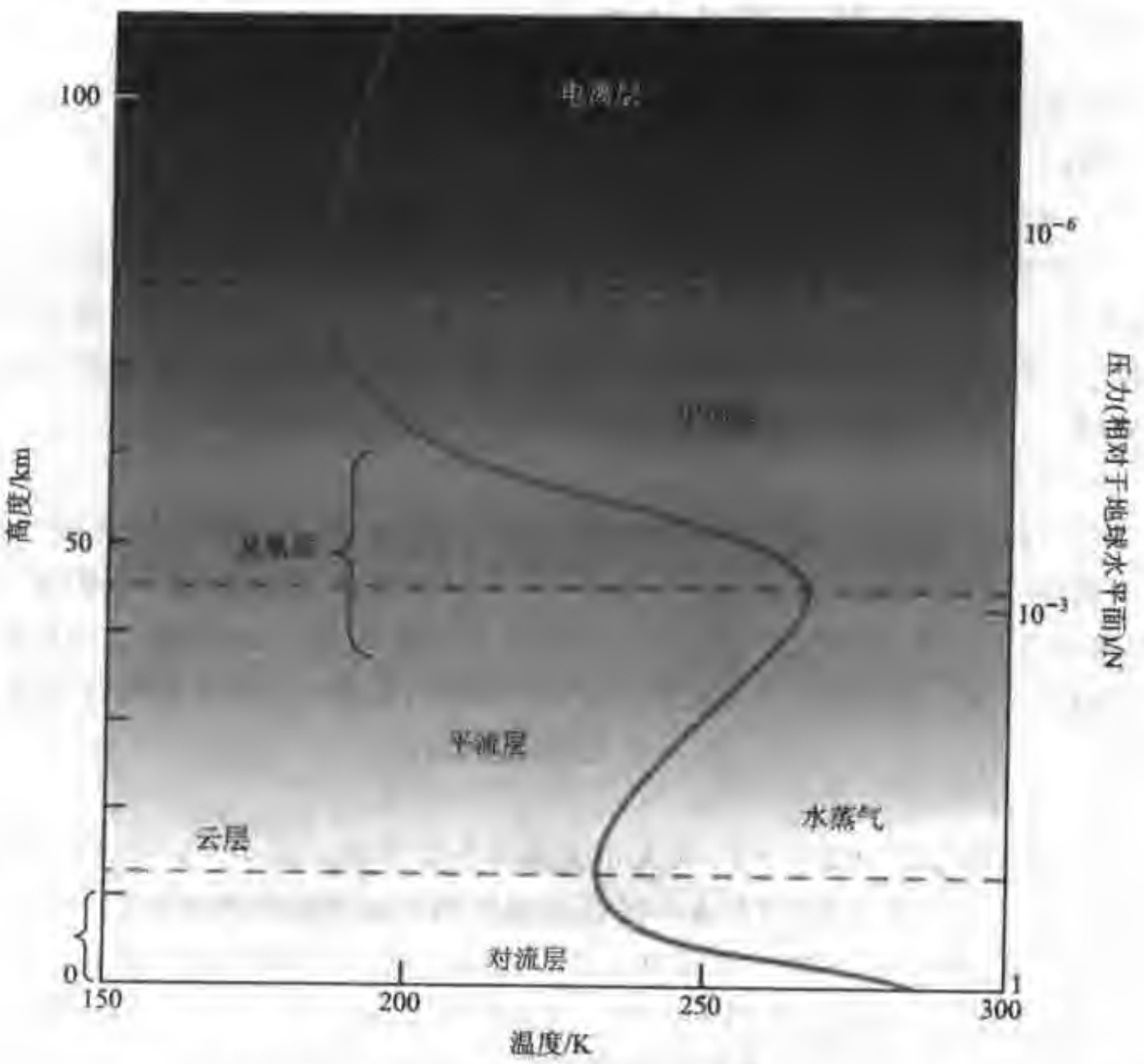


图 7.2　地球大气的温度、压力随地球高度的变化

紫外光作用下大气原子发生电离，形成若干个主要由带电粒子组成的电离层。该层的大气温度最初随高度剧烈增加，然后增速变慢，逐渐过渡到恒温区。电离层能反射无线电短波，给人类的远程通信带来极大方便。

(5) 外层大气

电离层以上为外层大气，这里空气非常稀薄，由于受到的地球引力较小，大气不断地向行星际空间逃逸。该层的大气物质都是带电粒子，其运动受地球磁场的控制。大约到 3 000 km 高度，地球的大气层逐渐与行星际空间融为一体了。

第 3 节 地球的内部构造

科学家们通过研究地震波的传播、热传导、进行放射性勘探以及磁性和重力探测，加上地球资源卫星提供的地下红外辐射照片等方法来了解、分析地球内部的物理性质，揭示地球内部的结构。

一、地球内部的多层结构

地球内部也是一个多层的球体，依其组成物质性质的不同，从外向里可分为三个圈层：地壳、地幔、外核和内核，如图 7.3 所示。

1. 地壳

地壳在地球的最外层，由坚硬的岩石组成，平均厚度为 21.4 km，但很不均匀：海洋地壳比较薄，约 2～11 km，大陆地壳厚度范围是 15～80 km；著名的喜马拉雅山地区地壳厚度达 70～80 km。地壳还可以进一步划分为花岗岩层和玄武岩层。

2. 地幔

地壳向下延伸到 2 891 km 的深度，可分为上地幔、过渡层和下地幔三层。上地幔浅部约 100 km 也是坚硬的岩石，它与地壳组成了地球最外面厚约 70～150 km 的岩石圈(也称岩石圈板块)；再往下延伸至约 700 km 深处是相对比较柔软的软流圈。软流圈以下则是过渡层和下地幔，其物质主要由橄榄石、辉石等组成。

3. 地核

在下地幔下面(2 900～4 980 km)是液态的外地核。在 4 980～5 120 km 之间的区域叫过渡层。从 5 120 km 深处一直到地心是固态的内地核。外核的物质主要是铁、镍元素，内核主要是铁元素。地球内部，越往深处温度越高，压力越大。在地壳底部，最高温度约 1 000℃，压力约为地球大气压的一万倍；而地幔的温度约为 1 200～2 000℃，地核的温度更高了，竟达 5 500～6 000℃，压力增加到地球大气压的三四百万倍。

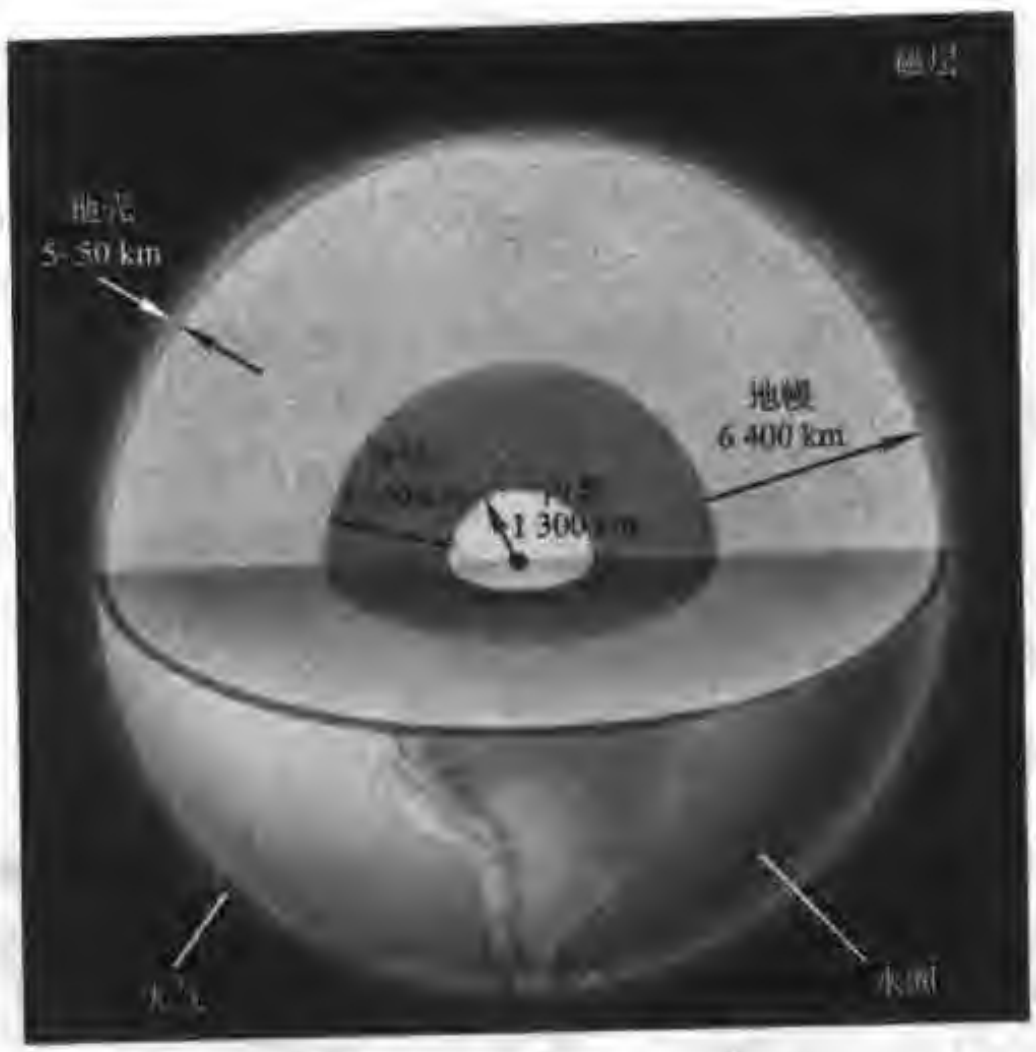


图 7.3　地球的内部构造

二、地球内核旋转加快

1996 年 7 月，美国《自然》杂志发表了一篇重要的论文。论文的作者是我国在美国哥伦比亚大学工作的青年学者宋晓东和美国研究人员理查兹。他们利用 50 多次地震资料和 1967—1995 年期间重大核试验观测结果，发现地球内核跟地壳一起朝同一个方向旋转，但旋转速度比地壳快，在一年之内，内核赤道比赤道带的地壳多旋转了 1.1°，而哈佛与加州大学研究人员给出的数据是 3°，华盛顿大学提供的数据是 0.2°～0.3°。这使科学家们怀疑地核的旋转是否在变化？

为什么地球内核比地壳转动得更快些呢？这是因为地球内核有大量的热能，地球内部存在着连续不断的物质热对流。地球自转时存在一个惯性力，称为科里奥利力。这种力使地球内部各层形成不同的旋转速度。科里奥利力使热对流上升的物质逐渐向西偏移，使下降的物质逐渐向东偏移，最后使垂直运动的物质变成水平方向运动。由于地球是自西向东自转，所以向上对流的物质向西移动（与自转的方向相反），导致地球上层自转变慢，下层自转变快，内核旋转得最快。

第 4 节 磁层与辐射带

地球内部和近地空间都存在磁场。地球磁场源于内部，是偶极磁场有南、北两个磁极，它像一个巨大的磁棒，磁极不完全与地极重合。在地磁北极处的垂直磁场强度为 0.58Gs(高斯)，在地磁南极处的垂直磁场强度为 0.68Gs，在地磁赤道上的水平磁场强度为 0.31Gs。地磁场的强度具有短期和长期变化，其中短期变化有日变化和季节变化以及各种扰动。地球磁场的变化主要受太阳活动，太阳风及宇宙线(来自宇宙的高能粒子流)的影响。地球磁场的短期变化称为地球的变化磁场，长期的缓慢变化的地磁场称为基本磁场。根据四百多年的地磁观测资料，发现北磁极慢慢地向西漂移。

一、地球磁层

地球的偶极磁场在近地空间受太阳风(太阳不断发射的带电离子流)的影响，磁场的磁力线都向后弯曲。朝着太阳的方向被太阳风压缩到一定范围，形成包层，而背向太阳的方向则延伸很长，可及范围远远超过月地距离。地球的外层大气圈的大气是由极其稀薄的电离气体构成，地球偶极磁场就浸没在这个极其稀薄的电离气体内，因此把这个区域称为磁层(见图 7.4)。

根据"探险者 10 号"空间探测器的观测资料得知，在朝向太阳一侧的磁层顶端离地心约 8 至 11 个地球半径，在太阳活动激烈时，它被强劲的太阳风压缩到 5 至 7 个地球半径的范围，而在背向太阳的那侧则延伸至几百甚至几千个地球半径，形成远远超过地月距离的地球磁尾。在磁尾中存在着一个特殊界面，这个界面两边磁力线突然改变方向，该界面称为中性片(或电流片)。由于太阳风的

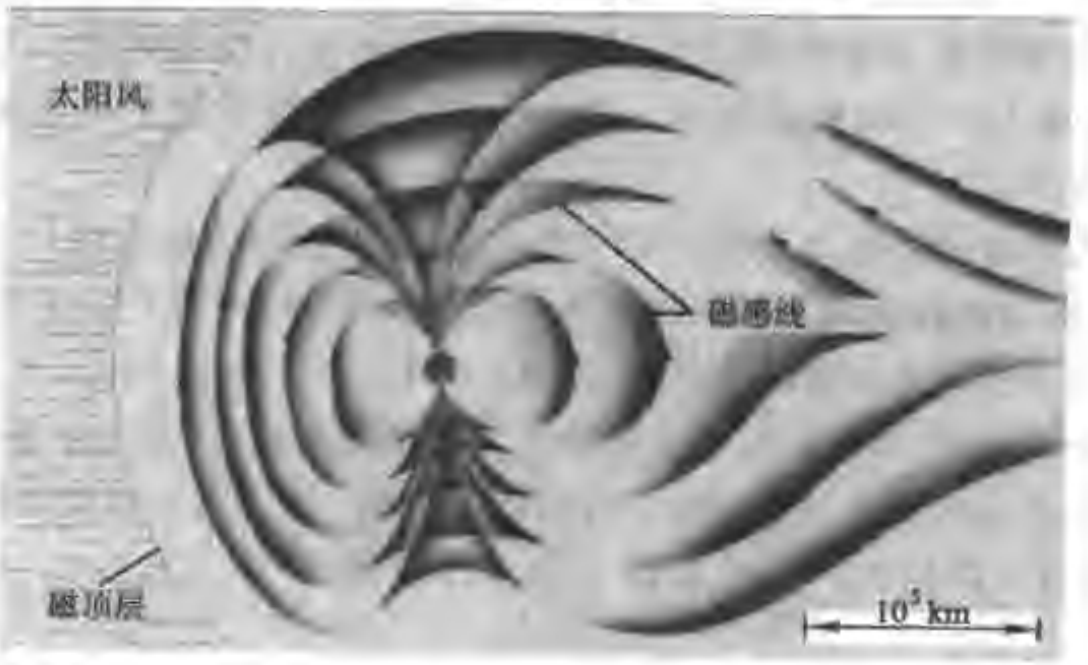


图 7.4 地球的磁层

带电粒子流高速接近地磁场的边缘，形成一个弓形激波的波阵面。波阵面与磁层顶之间的过渡区叫磁鞘，磁鞘的厚度约为 3 至 4 个地球半径。

二、地球的辐射带

地磁场俘获来自太阳风的带电粒子，在地球的周围形成发光的地球辐射带（见图 7.5），它是由空间探测发现的。1958 年 1 月美国发射的探险者 1 号地球卫星搭载的范·艾伦制作的粒子计数器，发现离地面 1 000 km 以上的高度有难以相信的辐射强度。后经探险者 3 号和探险者 4 号的再度证实，知道这种辐射的原因是由高能电子和质子所引起。所以地球的辐射带称为范·艾伦辐射带，它分为内辐射带与外辐射带。辐射带的范围和形状受地磁场的制约，也和太阳活动有关。

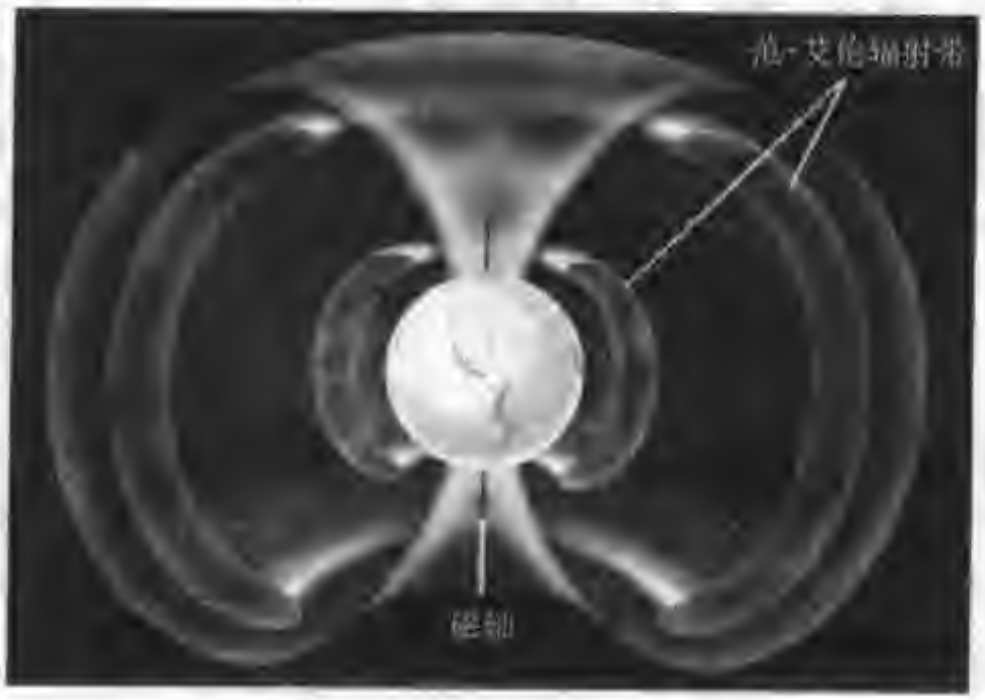


图 7.5　地球的辐射带

*第5节　地 球 自 转

旭日东升，夕阳西下，大家已经习以为然；如果你注意观察星空，会发现星星也在随着时间运转，东升西落。这些都是地球自转的证据。地球上昼夜更替，正是由于地球绕着它的自转轴不停地自西向东自转的结果，面对太阳的一面是白天；背着太阳的一面是黑夜。地球自转一周就是一日，地球不停地自转，昼、夜循环不止。

地球是自西向东自转，而人在地球上，不觉地球动，却看到太阳从东方升起西方落下，如同人坐在车里不觉车运动，似乎外边的景象运动一样，这是一种相对视运动。

根据长期的精确观测，发现地球自转的速率是变化的，是不均匀的。主要存

在长期减慢和季节性的变化，此外还存在约十年左右的变化、年际的变化、短周期的变化以及不规则的变化。

一、地球自转的不稳定性

地球连续地自西向东旋转，它的自转速率似乎非常稳定，过去我们一直用地球自转作为计量时间的标准。在 20 世纪 30 年代制作的石英钟每天误差约万分之一秒。以观测地球自转作为时间基准的方法来确定石英钟的钟差时，发现石英钟存在比较显著的周年和半年的变化。经过分析研究发现并不是石英钟的变化，而是由于地球自转存在季节性的变化。非常稳定的原子钟问世后，更证实了地球自转的变化。

1967 年国际上定义原子时秒长时，确定 1958 年世界时秒长（以地球自转为基准的时间）等于原子时秒长，这一瞬间，世界时（UT_1）与原子时（TAI）起始时刻之差是 0.003 9 s。由于地球自转速度存在变化，以地球自转为基准的世界时 UT 连续变化，所以到 2003 年 UT_1-TAI 累积相差已达到 35 s 之多。UT_1-TAI 的累积差反映出地球自转每天的长度在变化，我们用符号 ΔLOD 表示地球自转日长的变化，可以通过下面公式计算出日长变化的一个时间序列：

$$\Delta LOD=\frac{(UT_1-TAI)_i-(UT_1-TAI)_{i+1}}{\Delta t}$$

原子时非常稳定，相对于世界时 UT_1 来说其变化可以忽略，那么第 i 个值和第 $i+1$ 个值之差，被这两次时间间隔 Δt 除，就可以得到地球自转每天的变化量，称为日长变化 ΔLOD，我们对 ΔLOD 序列进行分析研究，发现地球自转是不均匀的，日长的变化存在各种周期性的变化和非周期性的变化。

二、地球自转的长期减慢

研究发现地球自转存在长期减慢，使日长单位以每百年约 0.002 s 的速度增加。引起地球自转长期减慢的主要原因是由于太阳和月球对地球的引潮力，引起的海洋潮汐摩擦，产生与地球自转角速度相反的力偶矩。

虽然自转长期变慢使日长单位每百年仅仅增加约 0.002 s，但是长期的积累使时间的变化是相当客观的。近 20 个世纪以来，由于地球自转长期减慢，使时间累积相差了 4 小时。仅 1958 年至今 UT_1-TAI 累积差已达到 35 s。早期地球自转速度比现在快得多，从古珊瑚的化石就可以证实这一事实。活的珊瑚表面结构是珊瑚分泌碳酸钙形成平行的生长纹结构。白天由于光合作用，珊瑚增加钙化，夜间珊瑚碳酸钙吸入量减少，所以，生长纹反应了阳光控制的节率。最近发现在泥盆纪（3.7 亿年前）古珊瑚化石，每年约有 400 条生长纹，这说明 3.7 亿年前，地球每年自转 400 周。4.2 亿年前，地球自转每年约 420 天。可见古地

质时期，地球自转比较快，一年的天数比现在多得多。

三、地球自转的年际变化

日长的年际变化是指几年的波动，其幅度达万分之五秒左右。近年来从观测资料证实，大气对日长的年际变化起主要的作用。日长年际变化和大气海洋存在的振荡有关，一种震荡叫南方涛动，另一种震荡叫准两年振荡。南方涛动和厄尔尼诺事件是同时发生的，有时称为 ENSO 事件。

南方涛动是东西赤道太平洋的气压发生逆转的变化，原来西赤道太平洋为低气压，东赤道太平洋为高气压，在赤道太平洋上存在东南信风，当逆转变化后，赤道西太平洋变为高气压，赤道东太平洋变为低气压，东南信风逐渐消失，西风加强，增加了大气的角动量，使地球自转减慢。ENSO 事件的发生是不规律的，一般在 2 年至 7 年左右发生一次，使地球自转速度产生年际的变化。

准两年周期振荡是由于在赤道带上空平流层中的纬向西风存在很强的年际变化，它的周期为 23 至 24 个月，经科学家分析研究证实地球自转变化的准两年项，主要是由于大气的准两年振荡引起的。

四、地球自转的季节性变化

日长变化还存在显著的周年和半年的季节性变化。日长的周年变化使世界时的累计变化幅度为 20～25 ms，半年变化约 9 ms。

地球自转为什么会存在季节性的周期性变化呢？它是由于高空大气风速存在季节性的变化，冬春季节，全球大气角动量增加，夏、秋季节则减小。大气是地球的组成部分，地球整体的角动量应当是守恒不变的。当大气角动量增加时，固体地球的角动量就会减小，地球自转就会变慢。因此，地球自转在夏季（7 月、8 月）比较快，在冬季（1 月、2 月）比较慢。由于大气角动量还存在半年的周期性变化，它也引起地球自转半年的周期性变化。另外，地球围绕太阳公转，地球受太阳的引潮力影响，也使地球自转产生半年的周期变化。

五、地球自转的短周期变化

地球自转的短周期变化指短于半年的周期性变化。月球对地球的引潮力引起地球自转的短周期变化非常显著。它们主要有 13.66 天和 27.56 天的周期性变化，以及 9.13 天的周期项。日长 13.66 天周期项的振幅约为 0.003 6 s，27.56 天的振幅约为 0.001 9 s，9.13 天的振幅约为 0.000 7 s。

在日长变化的 ΔLOD 序列中，把年际的、季节性的变化和潮汐变化扣除后，在剩余的变化中很清楚地看出还存在 40～50 天的波动，它的峰值能达到万分之五秒。经研究分析，科学家认为这种波动的原因主要是由于大气角动量存在亚

季节性的变化引起的。在亚热带，大气区域性流动引起了大气角动量的 40～50 天波动。

近几年来，甚长基线干涉测量(VLBI)，人造卫星激光测距(SLR)和全球定位系统(GPS)进行连续观测，得到精度很高的地球自转参数(地极的坐标和精确的世界时)。资料分析表明地球自转还存在大约一天的周日变化，变化的幅度只有万分之一秒左右。这是由于海洋潮汐和固体地球之间相互作用的结果。

六、地球自转的不规则变化

地球的运动可能受地球的外部与内部因素的影响。外部因素，如天体碰撞、太阳的剧烈活动等；内部因素球，如大地震以及地球上的某些异常现象：强厄尔尼诺现象、大气环流急剧变化等都可能影响地球的自转，使它发生不规则的异常变化。

*第 6 节 地球内部的地极移动

我们的地球不是一个坚硬不变形的刚体，而是一个弹性的椭球体，地球的自转轴在地球内部并不是固定不变的，它存在缓慢而复杂的运动，这种运动称为地极摆动或地极移动。

一、地极移动的发现

地极移动是如何发现的呢？19 世纪 40 年代，俄国普尔科沃天文台的天文学家用一种称为垂直环的天文望远镜观测当地的地理纬度，发现纬度存在周期性变化现象。当时不了解引起纬度变化的原因。1886 年，德国天文学家居斯特纳发现柏林天文台的中星仪所观测的纬度值也存在周年性的变化，和普尔科沃天文台的结果非常相似。那么地理纬度为什么会变化呢？居斯特纳提出了一种设想，他认为地球自转轴可能在地球内部移动，引起了地极移动。

为了证实地球自转轴在地球内部的移动，当时选取柏林、布拉格和檀香山三个经度差约 180°的台站，同时进行观测。观测表明，柏林和布拉格的纬度变化曲线非常相似，而檀香山的纬度变化曲线的相位与前两个天文台的结果正好相反。我们知道，当地的地理纬度等于天极的高度，也就是说当地极移动时，如果柏林和布拉格的纬度增加，则檀香山的纬度减小。这一事实完全证实了纬度变化是由地极移动引起的论点。

1891 年美国天文学家钱德勒分析研究了 17 个天文台站，一百多年来共三万多个纬度观测值，发现纬度变化除了存在周年性的变化外，还存在一种周期约为 1.2 年的变化。为了深入研究，1899 年正式成立了国际纬度服务(ILS)组织，

在北纬 39°08′的纬度圈上建立了五个国际纬度站，它们是日本的水泽，俄国的基塔布，意大利的卡洛福特，美国的盖捷斯堡和美国的尤凯亚。观测的纬度结果由 ILS 进行统一综合处理后公布地极运动的资料。后来，1988 年国际天文学会成立了国际地球自转服务(IERS)机构，负责研究地极移动工作。

二、地极的长期漂移

观测研究表明，地极存在长期的漂移。地极以每年约 0.003″的速度向西经 80°的方向漂移。目前，认为引起地极移动长期变化的主要原因可能是由于第四纪(约 200 万年前)冰川溶化后，地壳返弹变化的结果。地壳返弹的时间很长，因此，经历许多世纪后，极移仍存在线性的长期变化。

三、地极的钱德勒摆动

假如地球是一个刚体，从理论上推导出地球自转轴应存在一种 305 天的周期摆动(欧拉周期)。但是从观测的资料分析研究并没有存在 305 天的周期，而存在一种近 1.2 年的摆动，称为钱德勒摆动。摆动的平均振幅是 0.18″。

我们知道地球是一个弹性体，从地球分层弹性模型理论计算得到的摆动周期正是 435 天的钱德勒摆动周期。钱德勒摆动是一种阻尼的摆动，也就是说钱德勒摆动的振幅随时间变化，摆幅逐渐衰减，但衰减到一定程度后，摆幅又会增大。这说明存在某种激发的动力维持着钱德勒摆动。

科学家认为，钱德勒摆动的主要激发源可能是大气和地下水的变化，以及地震的激发。地球表面大气压存在季节性的变化，引起了全球大气质量的重新分布，这种变化是维持钱德勒摆动的最重要激发源。另一种激发源是地下水的变化，随着雨季的降雨，晴朗天气的蒸发和雨水随江河流入大海，引起陆地上的地下水的迁移。还有一种可能的激发源就是地震，但也有些科学家指出一次地震产生的能量太小，不足以激发钱德勒摆动。

四、地极的周年摆动

地极周年摆动的振幅平均为 0.09″。引起地极周年摆动的主要原因是大气压的变化，使全球大气质量的分布存在周年性的变化，其次是地下水的周年变化，以及冰雪覆盖层的面积，厚度的变化。由于上述因素的周年性变化比较稳定，所以地极周年摆动的振幅变化不太大。

第 7 节　地球公转与四季

地球自转的同时，还绕着太阳做公转运动，公转一圈是一年。地球上“冬去

春来，寒来暑往”的四季变迁正是由于地球的绕日公转。

一、地球绕日公转

地球绕日公转的轨道面称为黄道，公转的轨道是一个椭圆。轨道的偏心率非常小，目前约为 0.016 7，即非常接近于一个圆。太阳位于椭圆的一个焦点上。地球在轨道上和太阳最近的距离是 1.471×10^{8} km，轨道上那点称为近日点。每年的 1 月 3 日或 4 日地球运行到近日点。地球与太阳最远的距离为 1.521×10^{8} km，轨道上那点称为远日点，每年 7 月 2 日或 3 日地球通过远日点。地球公转的方向是自西向东的，也就是说，从地球北极上空朝下看，地球逆时针方向运转。

相对于春分点来说，太阳视运动连续两次通过春分点所需的时间间隔，称为一个回归年。1 个回归年的长度等于 365.242 2 平太阳日。相对于近日点来说，地球连续两次通过近日点所需的时间称为近点年，1 个近点年等于 365.259 6 平太阳日。近点年比回归年稍长一点，这是由于地球的进动，公转轨道长轴在轨道平面内以每年约 11″的速度自西向东进动，旋转一周约需 11 万年。同样，由于月球受太阳的引力，它围绕地球的运动也有进动，使白道与黄道的交线存在周期变化，每 18.6 年旋转一周，即交点每年约后退 19.355°。相对于月球的交点来说，太阳视运动在天球上连续两次通过轨道的升交点所需的时间等于 346.620 平太阳日，称为交点年，由于它与日食和月食有关所以也称为食年。

地球公转的平均速度为每秒 29.79 km。按开普勒第二定律，地球绕太阳公转时，它的向径（焦点到椭圆的距离）在相等时间内扫过的面积是相等的。由于地球在近日点时与太阳的距离比远日点的距离少 5×10^{6} km。既然要求地球公转时向径扫过的面积相等，所以在近日点附近地球公转的速度要比远日点附近的速度快。近日点处公转速度最快，为 30.3 km/s，在远日点时公转速度为 29.3 km/s。对于北半球来说，冬半年（从秋分到春分）公转的时间为 179 天，夏半年（从春分到秋分）的时间为 186 天。

二、四季成因

由于地球绕日运动轨道的椭率很小，所以地球距离太阳的远近对地球上的气候影响不大，地球上季节的冷暖主要取决于太阳辐射的直射还是斜射（见图 7.6）。我们知道地球自转轴与公转轨道面（黄道面）是不垂直的，地球赤道面和黄道面的交角（黄赤交角）目前为 23°26′22″。由于黄赤交角的变化非常小，而且地球公转是平动，因此地球绕太阳公转时，太阳光辐射方向相对地球的入射角随公转变化。地球公转到夏至（每年 6 月 21 日或 22 日）时，太阳直射在北纬 23°26′

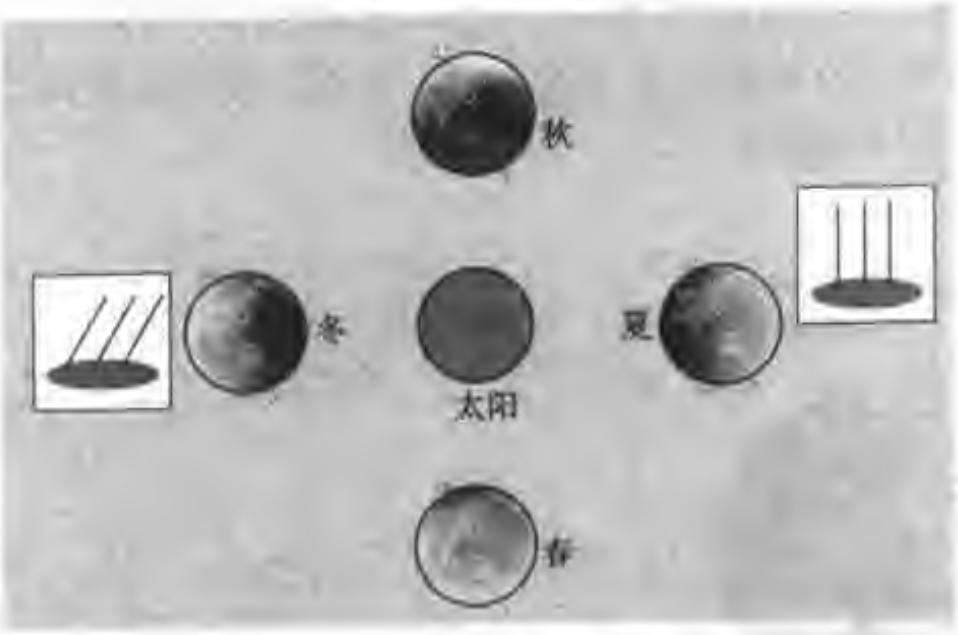


图 7.6　地球上四季变化的原理

的北回归线上。这时北半球昼最长，夜最短，而南半球夜最长昼最短。北半球为夏季，而南半球为冬季。例如北纬 40°（北京所处纬带），夏至日昼长约为 14^h51^m，夜长约为 9^h9^m，地球公转到秋分（每年 9 月 22～24 日）和春分（每年 3 月 20～22 日）时，太阳直射在赤道上，此时南北半球的昼夜长度相等。当地球公转到冬至（每年 12 月 21～23 日）时，太阳光直射在南纬 23°26′（南回归线），则南半球处于夏天，昼最长，夜最短，而北半球为冬天，昼最短夜最长。由此可见，对于北半球来说，夏季得到太阳光的直射，昼长于夜，冬季时太阳光斜射，昼短于夜。夏季得到太阳的辐射量比冬季多，所以夏季炎热，冬季寒冷，地球不停地绕日旋转，形成了地球上一年四季气候的循环。

三、岁差与章动

地球的自转轴除了在地球内部存在摆动外（极移），它在空间的方向还存在一种长期的运动，叫岁差。如图 7.7 所示，这种运动类似于旋转中的陀螺，其自转轴在空间的摆动形成一个圆锥形。由于地球自转轴是倾斜的，地球又是一个旋转椭球体，其赤道带隆起，在月球和太阳对地球赤道隆起部分的引力作用下，使地球自转轴有“扶正”的趋势，但是转动的地球产生一种抗衡力，使倾角保持不变，产生地轴进动使天极（自转轴延伸在天球上的交点）绕黄极做圆周运动，画出一个以黄极为中心的半径约为 23°26′的小圆。天极绕黄极旋转一周约 2.6×10^4 年，地球自转轴在空间的这种运动被称为**岁差**。由于岁差，使北天极在天球上随时间运动，目前北天极指向小熊座 α（北极星）的位置。再过 1.3×10^4 年，即北天极绕黄极运行半周后，那时北天极将指向织女星（天琴座 α 星）。目前确切地说，北极星小熊座 α 星与天北极的角距约为 1°（查天文年历可知当时精确的值）。由于地轴进动，赤道面与黄道面的交线也以同一周期旋转，使天球上的春分点在

黄道上向西移动。与太阳周年运动方向(即地球公转方向)相反,春分点是自东向西移动,成为春分点西移。每年移动 50.278 6″。春分点在黄道上约 2.6 万年进动一周,称为岁差周期。

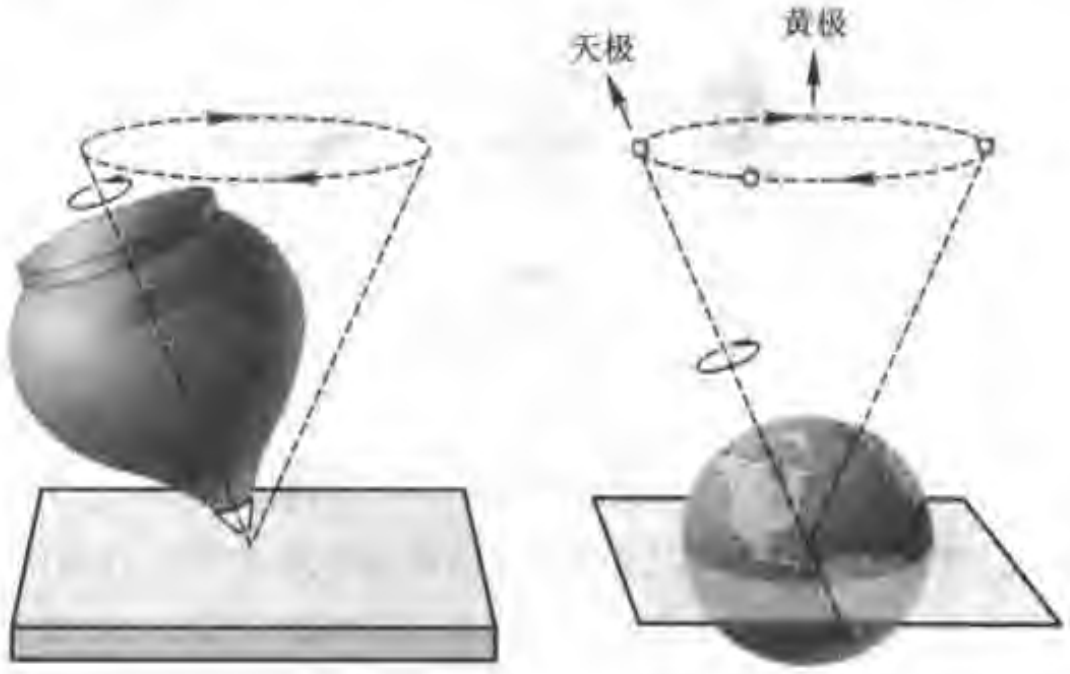


图 7.7　地球的岁差原理图

太阳从春分点开始做周年视运动经过一个回归年之后到了新的春分点,但是比回到原来的春分点要短一些。若以黄道上某一恒星为基准点,太阳视运动连续两次通过此恒星位置所花费的时间间隔才是真正的地球公转的物理周期,称做**恒星年**。所以回归年短于恒星年。回归年与恒星年每 26 000 年差一年,即每年差约 20 分钟。

由于春分点的岁差运动使恒星的赤经,赤纬和黄经有微小变化,这种变化是由于坐标系的变化而不是恒星本身的运动。在天文观测中使用的星图、星表中都表明了历元,给出了恒星的视赤经、赤纬的百年变化量或年变化量,它就是由于地球岁差引起的变化量。观测时要注意加以改正,以得到观测时刻的恒星位置。

地球自转轴在空间的运动除了长期进动——岁差外,还存在一种短周期椭圆式摆动,称为**章动**。这种摆动叠加到岁差上,使天极围绕黄极做波浪式的运动。章动的主要周期是 18.61 年,主章动的摆幅约为 9.214″。引起地球自转轴章动的主要原因,是月球绕地球公转的轨道面(白道面)存在一种周期性的运动。月球绕地球公转,公转的轨道称为白道。白道和黄道的两个交点称为升交点和降交点。月球的轨道面和黄道面的升交点在黄道上做后退的(向西)运动,白道和黄道的交角为 5°08′。当升交点和春分点重合时,白道和赤道的交角为 5°08′+23°27′=28°35′,当升交点和秋分点重合时,白道和赤道的交角为 23°27′−5°08′=18°19′。白道运动一周的时间为 18.61 年。由此带来的月球对地球的引

力变化引起了地球自转轴的章动。

* 第 8 节　地球轨道参数变化

一、地球轨道偏心率的变化

地球公转轨道的偏心率随时间在缓慢地变化，有时非常接近于正圆，有时椭率比较大。1984 年美国天文学家伯格计算给出，椭圆轨道偏心率变化的范围为 0.000 5～0.060 7。我国天文学家张家祥 1982 年计算得的结果是 0.002 4～0.057 1。这意味着在偏心率最大时(按 0.057 1 计算)地球和太阳最远的距离可达 $1.581\ 40\times10^8$ km，最近的距离为 $1.410\ 56\times10^8$ km，相差达到 $1.708\ 3\times10^7$ km。当偏心率变为 0.000 5 时，轨道接近为圆。目前轨道的偏心率约为 0.016 722，偏心率较小，地球的远日点和近日点的距离之差约为 5.003×10^6 km。地球公转轨道偏心率变化的周期约为 9.5 万年，大约在 4 万多年之前偏心率为最小值，再过 4 万多年后，偏心率又达到最小值。那时地球公转轨道几乎接近正圆，地球的近日点和远日点的距离几乎相等。

二、黄赤交角的变化

地球公转的轨道面(黄道)和地球赤道面的夹角——黄赤交角也存在缓慢的变化，达是由于黄道面位置的变化产生的。黄赤交角变化的范围在 22°00′到 24°30′之间，变化的周期约为 4.1×10^4 年。上次黄赤交角最小值约距今 2.8 万年。近期计算黄赤道交角的公式为

$$\varepsilon = 23°27'8.26'' - 0.468\ 4''t$$

式中 t 是 1900 年起算的儒略年数。目前黄赤交角正以每世纪约为 47″的速度减小。目前黄赤交角的数值为 23°26′20″。

三、地球公转轨道近日点进动

地球绕太阳公转的轨道是椭圆，椭圆轨道的长轴(称为拱线)方向逐渐旋转，使地球的近日点和远日点在黄道上做旋转运动，称为近日点进动。目前，地球过近日点的时间是每年的 1 月 3 日或 4 日，过远日点的时间为每年的 7 月 2 日或 3 日。由于近日点在黄道上运动的方向和地球公转方向一致，近日点和春点在黄道上会合一周是 2.17×10^4 年。

以上叙述的黄赤交角的变化，轨道偏心率的变化以及近日点的进动都与行星对地球的长期引力的影响有关，称为行星摄动。

第 9 节 地球的沧桑演变

一、地球的年龄

地球诞生之后，历经沧桑，目前依据“放射钟”的方法测定，地球已渡过了 16 亿年的岁月。在花岗岩、玄武岩、超镁铁岩和页岩石中，都包含着丰富的放射性元素，它们在地球上广泛分布。放射性元素的原子核不太稳定，它们自身放射出带正电的α粒子、带负电的电子和辐射出γ射线，经过一系列中间元素的转化，最后衰变成稳定的元素。例如，放射性元素铀(U)，衰变后最终变成稳定的铅(Pb)元素。放射性元素衰变速度不受周围温度、压力、磁场和化学环境的影响，是很稳定的。经过反复的研究测定，发现 U^{238} 每年有九十亿分之一，衰变为 Pb^{208}；U^{235} 每年有十四亿分之一变成 Pb^{207}，放射性元素钍 Th^{232} 每年有二百七十七亿分之一衰变为 Pb^{208}。所以只要测出某种岩石或矿物中铀和铀铅的数量，以及知道铀衰变为铀铅的速度就可算出该岩石的年龄。

根据“放射钟”的测定，发现地球上岩石的年龄是不同的，它们中间有几百万年的，有几千万年的，有几亿年的和几十亿年的。在各个大陆上都可以找到超过 30 亿年的古老岩石和矿物。在非洲刚果发现了 35.2 亿年前的微斜长石。在我国鞍山地区发现了 31 亿年前的矿物。最近发现的南极洲恩德比地纳波尔杂岩的生存年代超过了 40 亿年。根据推测，地球的年龄约为 46 亿年，与古老的陨石及月球的年龄很相近。

在这 46 亿年的历程中地球发生了一系列的沧桑变迁，由热变冷，经过多次的地质活动，经历了大陆漂移，湖泊、江河和大海形成，以及生命诞生和繁衍的漫长历程。

二、大陆漂移

地球上的陆地不是一个整体，而是被海水分割成许多巨大的陆块和较小的岛屿。陆地的总面积约为 $1.49\times10^8\ km^2$，占地球表面积的 29%。地球上的大陆主要集中在北半球。人们把全球大陆分为七大洲：亚洲、欧洲、非洲、北美洲、南美洲、大洋洲和南极洲，其中亚洲和欧洲在同一大陆块上，称为亚欧大陆。地球上的大陆自古以来就是这样的吗？不是的。1910 年春，德国气象学家魏格纳在观看世界地图时，被大西洋两岸地形的相似性所吸引，他发现南美洲的东海岸和非洲西海岸，一凹一凸互相对应，似乎可以拼合在一起。他想到，为什么大西洋两岸大陆的弯曲形状如此相似呢？沿着北美洲的东海岸到特立尼达和多巴哥的凹形地带，恰好能镶嵌欧洲西海岸到非洲西海岸的凸形大陆，而巴西的亚马孙

河口的大陆突出部分，则刚好可以填入非洲西海岸的几内亚湾。这是偶然的巧合，还是有其存在的必然性？魏格纳以极大的热情在地学领域穷搜博览，从各大洲之间及全球范围的联系中进行考察。1912 年 1 月魏格纳提出了大陆漂移的假说。他在 1912 年—1913 年做了第二次横跨格陵兰岛的探险，并研究了许多理论，于 1915 年，完成了不朽之作《海陆的起源》学说。

大陆漂移学说指出，在古生代石炭纪以前约 2.5 亿～3 亿年前，地球上的大陆只有一块巨大的陆地，成为“盘古大陆”，它恰好把今天的南北美洲、欧洲、亚洲、非洲、南极洲和澳洲加上印度古陆，统一在一个整体之中。盘古大陆被古大洋包围着。如图 7.8 所示，大约在 1.8 亿年前，盘古大陆分裂为南北两大块。1.35 亿年前，北美洲和欧洲分离，非洲和南美洲也分裂。由于大陆在分裂时发生玄武岩浆的大规模喷射，这些地区形成了不少独具特色的金属成矿带。到了中生代的侏罗纪后期，盘古大陆由于分裂、漂移，逐渐形成现在的几个大陆和无数岛屿，原来的大洋也被分割成几个大洋和若干小海。美洲陆块逐渐向西漂移，南北美洲和非洲、欧洲之间形成大西洋，非洲南端沿顺时针方向扭动。半个非洲与亚洲印巴大陆分离，在它们之间形成印度洋。南极洲和澳洲脱离非洲、亚洲向南漂移，并彼此分离。

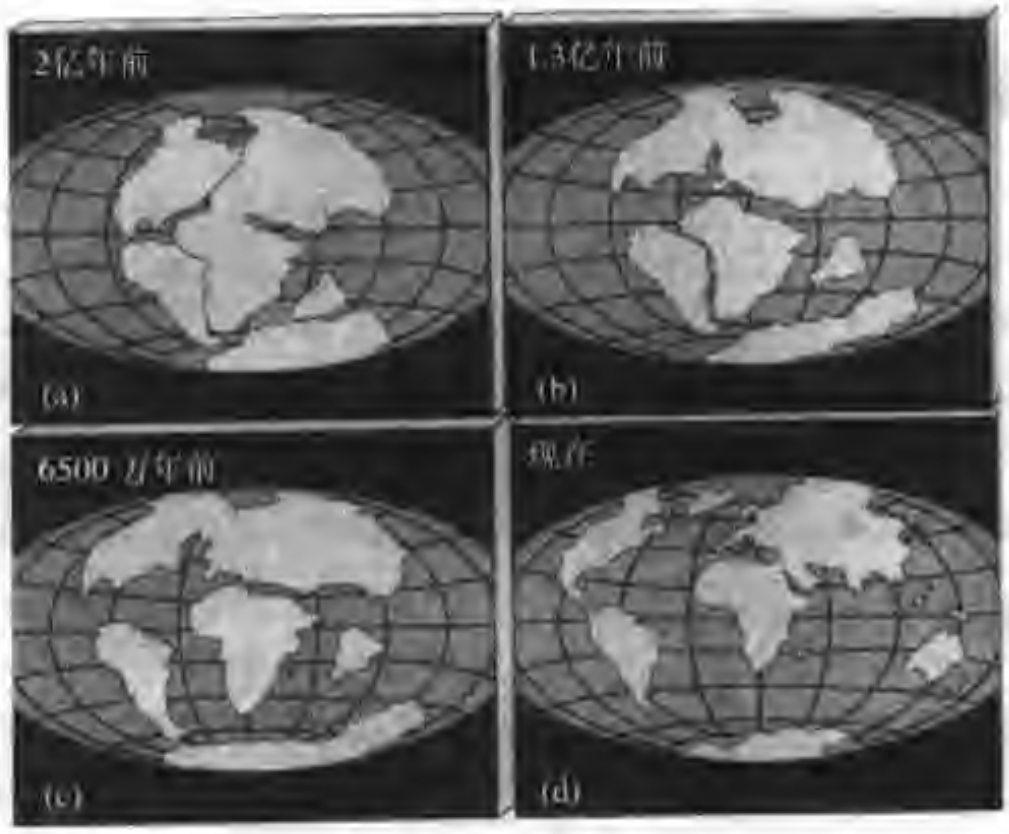


图 7.8　大陆漂移

(a)2 亿年前；(b)1.3 亿年前；(c)6 500 万年前；

(d)目前的大陆与海洋的分布

三、地球的板块构造

大陆为什么会漂移？是什么力量使这样庞大的陆地分离呢？依据最近几十

年来的研究，人们对地壳的活动提出了新的理论，其中影响最大的是板块构造学说。板块构造学说认为地球的岩石是由六大板块合并而成的，这些板块都处于不停的运动之中，正是这些运动造成了大陆的漂移。地球上陆地经过漫长岁月的漂移，形成了现在的六大板块，而且，目前大陆还继续以 1～2 cm/年的速度继续漂移。

大陆漂移最有说服力的证据是古气候的资料。20 世纪初，无论是在澳洲、印度还是在南部非洲和南美洲，都发现了大约 3 亿年前古冰川的遗迹，就连南极洲也发现了类似的古冰川泥砾。原来，当时这个地区就是寒冷的极区，而那时的欧洲气候却比较温暖。古代气候和今日气候相比是如此不同，这只有从大陆漂移的假说中才能找到合理的答案。

20 世纪 50 年代以来，随着科学技术的发展，人们获得了许多新的证据。例如，美国国家航空和航天局在 1984 年 5 月 21 日宣布，利用卫星首次测出大陆漂移；英国科学家利用地球物理卫星，成功地测到地球上大陆随板块缓慢漂移的速度和方向；夏威夷与南北美洲以 5.1 cm/年的速度靠近，澳大利亚与北美洲以 1 cm/年的速度分离，大西洋以约 1.51 cm/年的速度扩张。随着科学研究的进展，大陆漂移说获得了新生，并发展成为当代最盛行的大陆构造理论——板块构造学说。

四、造山运动

高耸入云的喜马拉雅山海拔 8 848.13 m。在喜马拉雅山区，人们发现了很多海底生物化石。原来，几亿年前那里竟是一片汪洋大海。后来由于大陆板块的碰撞、褶皱、断裂、上升等活动，才逐渐隆起，成为高山山脉，这就是造山运动。造山运动要持续百万、千万、甚至万万年才能形成高耸的大山。喜马拉雅山目前还在继续升高。地球上的高山像喜马拉雅山一样，都有着它们的成长和消失的过程。沧海变桑田，平地起高山，显示着地球的地层一直在永恒不停的运动。

五、海洋的形成和分布

水是生命的源泉。如果没有水，生物都将从地球上消失，地球将变成一个干巴巴的、毫无生气的荒寂世界。现在地球上的海洋约占全球面积的 70.8%，陆地占 29.2%。海洋与陆地的分布很不均匀，2/3 的陆地在北半球。在北纬 45°～70°范围内陆地超过海洋。而在南纬 45°～65°之间，几乎没有陆地可寻。

海洋是如何形成的呢？关于海洋的形成学说，众说纷纭。有的科学家认为，由于地球与彗星的大碰撞，在碰撞炽热的温度下彗星的冰块溶化，地球上就有了液态的水。在太阳照耀下蒸发成水汽，由于地球引力的作用，这些水汽聚集在地球的周围。大气中的水汽遇冷会凝聚为雨水落在地球表面，雨水被太阳蒸发到

大气层，然后又遇冷为雨，地面的水汇集在凹处，慢慢汇集成为汪洋大海。

有的科学家则认为，当地球生成之时，水就已经存在。在组成原始太阳星云中就含有多结晶水的化合物，它们在地球内部被高温蒸腾着，并随着火山爆发而喷射出来，以水蒸气的形式弥漫在空中，然后冉冉升入大气层。

*第 10 节　厄尔尼诺现象

一、厄尔尼诺现象

厄尔尼诺的原文“El Niño”是西班牙语“圣婴（上帝之子）”的意思。在南美厄瓜多尔和秘鲁沿岸，由于暖水从北边涌入，每年圣诞节前后海水温度都会出现季节性的增高，使鱼类减少，渔民把这种现象称为“厄尔尼诺”。

近百多年来记载，发现有些年份在东赤道太平洋附近的秘鲁，智利等国沿岸海域海水增暖异常激烈，暖水区一直发展到赤道中太平洋，持续的时间约一年左右，鱼类和鸟类大量死亡，暴雨、洪涝灾害频频，并且影响到全球气候，给西太平洋区域印度尼西亚、澳大利亚等国带来严重的干旱，我国的气候也受到很大的影响。

二、厄尔尼诺现象的根源

这种现象实际上是热带海洋和大气相互作用的产物。在正常的情况下，赤道太平洋海面区域盛行东风，沿赤道北侧为东北信风，沿赤道南侧为东南信风，使海洋上面的暖水被输送到西太平洋，在这一过程中，海水继续吸收太阳的辐射，海水逐渐升温，并逐渐积蓄。通常西赤道太平洋海面上的海水温度比东赤道太平洋高，西部平均为 29 ℃，东部沿岸平均为 24℃，东西两侧海温差异在 3～6 ℃之间。西赤道太平洋的海平面高度比东赤道太平洋约高出 40 cm。

由于东赤道太平洋表面海水向西流动，海面下层的冷水上升，以及南部高纬的秘鲁沿海的冷洋流流向东赤道太平洋区域，来补充流走的海水，所以通常这个区域出现冷水上翻现象，形成巨大的涌升流，使海面水温比西赤道太平洋低。由于下层海水含有丰富的营养物质，使这一区域成为海洋生物，鱼类十分丰富的海域。

正常年份东赤道太平洋地区东风强劲，海面冷水又使上方的空气变冷，密度增大，以致无法把水汽抬升到能够形成云和雨滴的高度，因此，这一区域洋面上空通常无云，非常干旱。而降水主要分布在印度尼西亚以西的西太平洋海域。但是，当某种原因引起信风减弱时，赤道西太平洋高水位的海水迅速向东蔓延，使赤道中太平洋和东太平洋的海面升高，海温逐渐上升，东赤道太平洋上升的涌

流逐渐减弱，暖水逐步占据了赤道中、东太平洋地区，使海面至 100 m 深处的海水增温。当增温到一定强度，并且持续几个月以上，就发生了厄尔尼诺事件。通常用西经 180°到西经 150°，赤道北 5°和赤道南 5°这一区域内的海面水温的平均值的变化来衡量是否会出现厄尔尼诺现象。当该区域的海温比常年的平均温度升高 0.5℃时，标志着将会出现厄尔尼诺现象。

三、南方涛动与“安索”事件

厄尔尼诺不是孤立存在的海洋现象，它是热带海洋和大气的相互作用的结果。通常，东南太平洋为高气压，印度尼西亚、西赤道太平洋为低气压，形成较强的东南或东北信风。这股风的强弱，一般用澳大利亚西北沿海的达尔文气象站和中南太平洋的塔希堤岛气象站，两个测站的气压差作为指数。平常，塔希堤的气压高于达尔文站的气压，但当将要出现或形成厄尔尼诺现象时，这两地的气压指数出现反相，变成达尔文站的海面气压高于塔希堤岛的气压，形成了信风减弱，西风加强，最后逆转成西风占优势。科学家们把这种气压指数反相变化的现象称为南方涛动（简写为 SO）。厄尔尼诺与南方涛动相互联系不可分离，称为“安索（ENSO）”事件。安索事件可以说是海、气相互作用耦合的结果，可引起全球性的气候异常变化。

四、厄尔尼诺发生的频率和周期

厄尔尼诺现象的发展没有准确的周期性，通常 2～7 年间发生一次，从 1860 年有记录以来已发生了近 40 多次厄尔尼诺现象，1950 年以来共发生了 15 次：1951 年、1953 年、1957 年、1962 年、1965 年、1969 年、1972 年、1976—1977 年、1982—1983 年、1986—1987 年、1991—1992 年、1993 年、1994—1995 年、1997—1998 年，和 2002 年。

20 世纪 90 年代以来，厄尔尼诺现象出现得越来越频繁，虽然每次厄尔尼诺事件都有很多共同的特性，但每次过程又各有其特点，事件发生的前兆也不尽相同。

本世纪最强的一次厄尔尼诺事件是 1997 年春夏之交，这次事件来势很凶猛、二月份中旬东赤道太平洋海温还处于偏低的状态，3 月份赤道太平洋洋面东风出现普遍减弱，东赤道太平洋附近海域出现了增温迹象，仅一个月内海面水温上升了 3.5℃。位于西太平洋的暖水域开始向东移动，使东赤道太平洋区域的水温明显上升，比常年高出 6℃左右。至 8 月份，东赤道地区的海面温度增高 9℃。其温度异常的高，超过了 1982—1983 年的较强的厄尔尼诺事件。由此引起了气候的异常变化，如澳大利亚东部和印度尼西亚部分地区异常干燥，印度尼西亚发生森林大火，延续了几个月；智利等国暴雨成灾，巴西咖啡产量锐减，全球

大部分热带地区出现降雨量明显异常。1997 年的厄尔尼诺现象是本世纪来最强的一次事件，使我国的气候极为反常，很多地区遭受严重的干旱，1998 年 6 月～8 月长江流域和嫩江流域遭受到百年不遇的洪涝灾害，其罪魁祸首可能就是这次的厄尔尼诺事件。

近几十年来，科学家已经为预报厄尔尼诺现象找到了较好的手段，但厄尔尼诺现象的确切起因以及它所产生的影响对人们来说仍然是个谜，“厄尔尼诺之谜”仍未完全被揭开。随着科技迅速发展，世界各国的逐渐重视，科学家们通过海洋观察卫星，监测海洋温度和海平面高度的变化，深入对气候异常现象的认识，了解厄尔尼诺现象产生的物理过程。目前，利用大气海洋相互作用规律，利用巨型计算机精确的分析计算，可以提前半年左右的时间预报厄尔尼诺现象，从而大大减小这种异常气候对人类造成的损失。国内外的科学研究人员广泛进行合作研究，不仅从大气相互作用的物理过程来研究，还必须有全球海洋地质和天文因素等相关学科进行深入配合研究，才能真正揭开厄尔尼诺现象之谜。厄尔尼诺事件使西风加强，大气角动量增加，导致地球自转出现异常的减慢现象。

*第 11 节　地　　震

地震，那种山崩地裂的场景，真是令人惊心动魄！人们在震惊之余，倍感从各方面研究和预测地震的重要性，不能有半点怠慢和忽视！地球也是一个天体，如何从天文角度来分析和认识地震发生的原因，从多方面的角度来预测地震呢？这个科学的难题，目前并未很好地解决，在这里我们只能给出一些大致的分析，首先了解和认识地震的规律，再来谈谈地震与天文因素的关系。

一、全球地震活跃带

整个地球上，地震发生的区域分布是很不均匀的，而是集中出现在一些特定的区域，称为地震活动带。绝大多数地震分布在南纬 60°和北纬 60°之间的广大区域。在南北极区很少发生地震。世界上地震分布具有全球规模的带状分布的特点，科学家们把全球地震分布划分为四条地震带：

环太平洋地震活动带　主要沿北美、南美大陆西海岸和西太平洋，北太平洋主要岛屿外侧。环太平洋地震带是地球上地震活动最强烈的地带，约占全球 80％多的地震发生在这一带。

地中海喜马拉雅山地震活动地带　该地震带横贯欧亚大陆，大致呈东西分布。西起大西洋亚速群岛，穿越地中海，经伊朗高原，进入喜马拉雅山。该地震带释放的能量约占全球地震能量的 15％。

大洋中脊活动带　此地震活动带蜿蜒于各大洋中间。这一带的地震活动性

比前面两个带弱得多，尚未发生过特大破坏性地震。

大陆裂谷地震活动带 此带规模较小，不连续地分布在大陆内部。如东非裂谷、红海裂谷，贝加尔裂谷，亚丁湾裂谷等。大陆裂谷虽然范围较小，但地震活动性比较强，均属浅源地震。

绝大多数强震震中分布于活动断层带内，尤其是距今 10 万年来有过活动的地带，今后仍可能是活动的断层。它的规模可延伸到大陆板块的边界。有些强震产生新的地表断层与原来存在的断层走向一致或重合。如 1906 年美国旧金山发生的 8.3 级大地震，是沿圣安德列斯旧断层产生了 450 km 的地表破裂。我国 1920 年的宁夏海原大地震产生新的断层破裂。

世界上的地震带为什么会这样分布呢？把世界的地震分布与全球板块相比较，就可以明显看出，两者相当吻合，绝大多数地震都分布在大陆板块的边界上。这说明，大陆板块运动过程中的相互作用是引起地震的基本原因。板块内地震发生的原因更复杂些，与板块之间的运动有关，也与局部的地质条件有关。

二、地震预报

宁可千日不震，不能一日无防。因此，地震的预报是极其重要的全球性的科学。地震预报的困难在于地震物理过程具有异常的复杂性、地球内部的“不可入性”和地震的小概率性。地震预报是依据地震发生前的一些前兆现象，因为地震是地壳运动中岩石应力不断积累增加的结果。当超过岩体破裂强度时会发生岩体突然破裂，就会发生地震。在孕育地震过程中，当应力强度增长到接近岩石破裂强度时，岩石中会出现小的破裂，且数量和长度随压力的增长而增大，导致岩石体积膨胀，于是在地表面就能观测到地壳的形变。同时地壳中的水、气体、油等各种流体的活动增强，所以在地震前可以观测到地壳形变，地下水、地下气体、地球电场、磁场、重力等等发生异常的变化。

1. 地震的活跃期与平静期

在一个时期内地震活动相对频繁和强烈称为地震活跃期。一般，当出现 6 级地震频繁时，标志着这个地区进入了地震活跃期。我国台湾和喜马拉雅山地区则以 7 级地震频繁活动为活跃期的标志。在一个地震活跃期中，有些时段地震活动更频繁、更激烈，这些时段称之为地震活跃幕。例如华北地区在一个活跃期中包括了 7 个地震活跃幕。我国大陆地区 20 世纪以来已经历了 5 次大地震的活跃幕，每个活跃幕约经历十几年时间。

据历史记载，我国第一次震情最严重的时期是 1550 年~ 1750 年。在这 200 年中，共计发生了 24 次 7 级以上的地震，其中有 7 次 8 级以上的大地震。20 世纪 50 年代、20 世纪 70 年代和 20 世纪 90 年代前后都是地震比较活跃的时间。

2. 地震前兆现象

地震前兆是地震发生前自然界出现的各种与地震孕育、发生有关的征兆，它是进行地震预报的主要依据，可分为宏观前兆和微观前兆。

宏观地震前兆　人感觉到的地震宏观前兆大多在临近地震发生时出现的、比较常见的有地下水大幅度升降变化、动物习性异常、地声、地光等。

微观地震前兆　人不能感觉的微弱的地震异常活动，如地下微破裂、地面倾斜、岩体伸缩、海平面的升降等，通过精密仪器测量地下水、地电、地温和重力异常现象以及观测天象来预报地震。

现代，全球定位技术(GPS)的发展及地壳运动观测网络的建立打开了地动位移观测的高频端和低频端两个观测窗口，要获取中频段地动位移信息，目前靠定点形变测量法，如利用钻孔应变仪可以观测日月引力的变化引起地壳像海潮似起伏变形的固体潮现象，也可发现地震孕育过程中地面的伸缩变形。随着地震、应变、GPS 三个观测网的发展，可以对频率在 20Hz 以下的地动位移物理量进行全波段的实时监测，可以有效地获取地震活动与孕育过程的信息。

三、地震的触发因素

地球的宇宙环境，特别是太阳和月亮的影响对地球发生地震起着触发作用。地球自转速度的变化和地极移动与地震有联系的事实，也为大家所公认。

另外，据统计资料分析，地震发生的次数与太阳活动兴衰的 11 年和 22 年的周期相关。此外，统计分析还得到地震存在 13.65 天的周期，这与月球位置运动的半周期相关，说明地震和月球的位置有关，即日月引潮力可能对地震的发生起到重要的触发作用。

1. 地球自转变化引起地壳变形

地壳形变的主要原因一般归结为地球内部物质的运动和物理化学状态的变化，例如温度的变化，重结晶作用和重力作用下物质密度的变化等。而地球自转速度的变化也会引起地球形变，构造骨架断裂和褶皱带定向延伸等。

1930 年著名的中国地质学家李四光先生指出，纬向褶皱带的成因或是由于潮汐作用，或是由于地球旋转速度的变化。目前，大多科学家都认为地壳块体的全球性水平运动是天文因素，即地球自转速度变化影响的结果。

2. 地球自转速度变化引发地震

人们依据天文观测早已发现，地球受日月引潮力的作用，产生潮汐摩擦，地球自转速度会长期减慢，并且伴随有周期性的快慢变化。据统计，发生地震的次数和能量释放的大小与地球自转速度变化密切相关。有些地区当自转速度变慢时容易发生地震，有的地区在地球自转速度变快时发生比较多的地震。在同一类型的构造体系上，大致都在同一地球自转条件下发生大地震。例如 1920 年以来，我国 8 次 8 级地震全部发生在地球自转加快期。

在我国大陆东部地区，当地球自转减慢时容易发生地震。当地球自转速率处于由减慢变为加快的转折阶段，全球 7 级以上的地震相时活跃。这些事实说明地球自转速率的变化对地壳断层的错动、对地震发生有触发作用。当发震区岩石应力的积累达到临界状态时，容易受外力的触发，而引发地震，所以地球自转速度变化可能是一种引发地震的触发因素。

3. 地极移动与地震

地极存在钱德勒摆动，其摆动的幅度随时间而变化。为什么它会随时间变化？什么原因激发地极维持钱德勒摆动呢？一系列问题引起了地球物理学家和天文学家的兴趣，出现了地震能否激发钱德勒摆动的争论。有些科学家认为 1906 年旧金山 8 级大地震引起 1907 年地极摆动的变化，有些科学家强调极移变化幅度和地震活动强弱相似，但也有些科学家认为地震释放的能量不足以激发地极的摆动。围绕地震和极移的关系虽然存在激烈的争论，但是，极移和地震有联系，为大家所公认。但两者之间究竟是因果关系，还是由一个共同的激发源引起的至今仍未得到解决。

4. 太阳活动与地震

科学家研究表明，地震发生的次数按时间分布是不均匀的，也就是说有的时期发生地震的次数多，而且强度大，有的时段发生的次数少强度小，这种现象与太阳活动的强弱程度密切相关。曾有科学家研究了公元 320 年至 1982 年期间，我国江苏发生的 166 次大于 4 级的地震，以及全国 1936 年—1976 年大于 4.7 级的 3 133 次地震。研究发现地震发生的高峰期，出现在太阳活动峰年之后的下降段。对云南省的地震资料分析，也发现存在约 11 年的周期。这说明地震发生的次数与太阳活动兴衰的 11 年和 22 年的周期相关。

这种现象可能是由于地震与日面的耀斑大爆发所引起磁场变化有关，即大耀斑引起日地电磁场耦合，触发了地震。这些仅仅是初步的统计分析的结果，还需要进一步分析研究太阳活动引发地震的机理。

5. 日月引潮力与地震

在我国华北地区，初一、十五附近发生强地震比较多，例如 1966 年 3 月 28 日，河北省邢台地区发生了 7.2 级的大地震，这一天月相是初一。1976 年 7 月 28 日河北省唐山地区发生震惊世界的 7.8 级大地震，这一天是阴历初二。有的科学家曾对华北地区 1960 年至 1990 年期间发生的 15 次大于 5.6 级的地震做了统计分析，把朔望前后两天作为朔望期，共 10 天，约占朔望月 29.6 天的 1/3 时间，在这一期间内共发生了 9 次大地震，比率为 9/15＝3/5。这说明初一、十五附近发生地震可能性比其他时期明显地大得多。我国河北地区有史记载以来大于 6 级的地震共 30 次，其中发生在朔望前后 1 天之内共 15 次占 50%，而朔望期前后一天的时间只占朔望月的 20.3%。

美国一些科学家也曾统计分析得到地震存在 13.65 天的周期，也就是说与月球位置运动的半周期相关。以上这些统计事实都说明地震和月球的位置存在相关性，说明日月引潮力对地震的发生可能起到触发的作用。对于不同的地区，由于地震带的断层结构不同，引潮力所起的作用也不同。

由于地球绕太阳公转，太阳与地球的位置存在着周年性的变化；月球绕地球公转的轨道面也存在 18.6 年的周期性变化；由于地球的自转使日、月相对于地球的位置和距离存在周期性的变化，因此，日月对地球上各地的引潮力也存在着复杂的周期性变化。发生地震的主要原因是地球内部的运动变化，在震源处积累应力，当积累的应力达到断层的岩石处于破裂的临界状态时，在引潮力的作用下，将容易触发地震。

*第 12 节　宇宙环境对气候的影响

地球自诞生以来历经了 46 亿年的变迁，由于地球构造的变动、地质作用、自然风化的破坏以及人类对大自然改造等原因，地球早期历史的依据和资料已消失或被抹平。只有 8 亿年以来的地质历史和近 240 万年（地质时间为第四纪）以来的气候史比较清楚。自第四纪以来，地球上的气候存在冰期、间冰期的变化。在这期间，海平面的高度、生态环境、地貌和地层覆盖面、大气中 CO_2 含量等等都发生了重大的变化。

多年来，科学家们从地球的内因（地球轨道运动与地球内部的活动）与外因（太阳辐射、太阳活动与宇宙环境）来研究地球气候的变化原因。他们测量地球轨道运动参数的变化；观测气候变化趋势与太阳辐射的变化的关系；研究太阳活动的长、短周期与地球上气候变化的联系；研究与考证随着地球在宇宙中运动，宇宙环境的变化带来地球上的气候变迁。

一、地球轨道参数变化对气候的影响

由于月球和其他大行星的引力对地球运动轨道的扰动，地球绕日的运动轨道会发生变化，主要反映在地球轨道的三个参数的变化，即偏心率的变化、黄赤交角的变化和春分点位置的变化。这些地球轨道参数的变化，使地球接收到的太阳辐射量发生变化，从而产生气候的变迁，出现了冰期、间冰期。地球轨道参数变化引起的冰河期可使海面上的温度降低 4～9℃左右。从大西洋洋底沉积物岩芯样本分析得到，最近一次冰期约在 18 000 年前，那时大西洋海面降温最大的区域是在大西洋东北部北纬 48°附近，比现在的海温约低 10℃多。在广大低纬地区，海面温度约降低 2℃多。最近一次冰期的最冷时期，欧洲一些地区，夏季平均气温比现今的气温约低 10℃左右。根据研究，我国东部中纬度地区，

冰期时期的气温比现在约低 7～15℃，长江三角洲年平均气温比现在低 13℃左右。淮北平原年平均气温比现在低 9～13℃，河北平原东部比现在低 7℃左右。

二、地球轨道参数变化引起全球环境的变迁

地球轨道参数的变化，不仅对大气圈有影响，而且对全球各圈层即水圈、生物圈和岩石圈都会有直接或间接的影响。全球温度的变化，引起海平面高度的变化。在冰河期气温下降，全球冰川和极地冰层增加，以及海水冷却收缩作用，导致全球海平面下降。全球海平面随全球温度的增暖而升高，随全球温度变冷而下降。在冰期盛期，世界海平面的高度比现今海平面大约低 80 m 左右。上次冰期的盛期，海平面约降低 120 m 左右，那时台湾岛和日本列岛与东亚大陆相连接。

在地质时期，生态受气候变化的影响很大。第四纪冰期和间冰期，对动植物的兴衰和迁移有着重要的影响。冰期内的植物群分布比间冰期南移很多，如亚热带植物的常绿阔叶林区的北界，在间冰期位于北纬 35°，到冰期南退到华南沿海一带。森林的衰退时期，一般是在地球轨道偏心率比较小和夏季高纬地区日照年较弱的时期。

经研究我国哺乳动物的南迁事件目前已发现有四次：140 万年前，一些南方型动物如轴鹿、水鹿、四不像鹿等在华北地区消失，退至长江、淮河流域及以南地区；距今 90 万年前，大熊猫、剑齿象等大批南方型动物在华北普遍消失，退至长江流域及以南地区；距今 28～24 万年前，肿骨鹿、棕熊等北方型动物南侵到长江北岸地区；距今 1.8～1 万年前，北方型动物，如棕熊、仓鼠等侵入到长江以南地区。这四次哺乳动物的南迁，都发生在第四纪内轨道偏心率极小的冰河期时候。

三、太阳辐射和太阳活动对地球气候的长期影响

太阳辐射有没有变化呢？天文学家通过高空气球、飞机或人造卫星在大气外利用热电偶、光电探测器等仪器对太阳辐射进行长期的监测，结果表明，太阳总的辐射基本稳定，在光学波段变化很小，但在紫外波段辐射变化较大。

我们知道表征太阳辐射的太阳常数为 $S=1\,373\ W\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$。观测表明，太阳常数的变化很小，一般在 0.1% 左右。1981～1985 年期间平均每年减小 0.018%，1985 年以后 S 又开始以每年 0.029% 的幅度增加。观测表明，太阳黑子群增多时，太阳常数有减小的趋势。太阳常数虽然变化不大，但是太阳的紫外辐射通量的变化较大，一般在 10% 左右，它与缓变型的太阳活动有关。相比之下，太阳的粒子辐射变化很大，特别是能量在 10^6～10^9 eV（电子伏特）范围内的高能带电粒子，在为期 11 年的太阳活动周内有百分之几十的变化。

太阳的紫外辐射主要影响地球大气的平流层，特别是影响平流层的臭氧分

布。能量在 10^6～10^9 eV 范围内的高能带电粒子主要影响地球大气的电离度，这些受太阳磁场制约的高能带电粒子能深入到地球的低层大气，从而改变大气的电场特性。太阳活动的影响能直达人类周围的环境就是通过电磁场及电磁过程(如电离层扰动)来实现的。

阿波罗宇宙飞船几次在月球上登陆，取回了月球上的土壤。由分析月球土壤含氦和氖的物质推算出：40 亿年前太阳风的强度超过现在强度 4 倍，行星际磁场的强度比现在强 10 倍。这反映了太阳少年时期活动更为激烈。

近几千年来，太阳辐射虽然基本稳定，但也有微小变化。有的科学家统计了几百年的科学资料，得出太阳辐射变化与太阳黑子的关系。根据黑子、极光和碳的同位素^{14}C的资料分析，可划分出若干个太阳活动的极小期和极大期。两千年来，最突出的是 1645 年—1710 年间太阳黑子很少，活动非常微弱，叫做蒙德极小期。这说明几百年期间太阳活动是有显著变化的。黑子的变化会影响到太阳辐射能量的变化。太阳活动在一个世纪比较活跃另一个世纪相对地较为平静。有人提出太阳活动存在着 179 年的周期，它与九大行星的会合周期有关，或与太阳系质心周期性变化有关。地球自转变化也存在周期约为 180 年的变化，很可能与太阳活动的这种周期相关。

四、太阳辐射和太阳活动对短期地球气候的影响

太阳辐射是地球热能的主要来源，也是风、雨、霜、雪等气象变化的幕后导演。由于太阳辐射变化的幅度很小，长期以来，人们一直怀疑太阳辐射能量的变化会影响地球上的天气与气候。近一百多年来，很多科学家做了大量的分析研究，指出太阳辐射变化与太阳黑子多少有关；气象变化与太阳活动存在相关性。太阳辐射包括电磁辐射和微粒辐射，电磁辐射的不同波段和微粒辐射带电粒子的能量强弱不同对地球会有不同的影响，这种影响还受地球磁场、地理位置、地形等因素的约制，因而太阳辐射的变化影响有不同，而且出现的滞后时间也不尽相同。

太阳耀斑爆发是太阳激烈活动的现象，它对短期的天气有一定影响。耀斑爆发后 24 小时内，地球大气压 500hPa(百帕)的大气层的平均高度有所变化：在东经 5°、135°、165°和西经 150°、115°、50°附近，500hPa 大气层的高度升高，而东经 85°、145°、175°和西经 35°附近 500hPa 大气层的高度降低。比较显著的变化是海洋和海岸地区，最强的中心在 40°～60°的中纬带，高度变化 20 m。从纬度 70°到北极，500hPa 大气层高度降低，说明在耀斑爆发后，这一区域气压减低。

观测发现在耀斑爆发后不久高空中的电位梯度和地-空电流密度开始增加，一天后达到最大值。在耀斑爆发后几天内雷暴活动增强，第 4 天达到极大。根据统计，在太阳黑子极小年，耀斑爆发后约第 4 天雷暴活动增加 50%，在太阳黑

子极大年，雷暴活动增加70%。而且，伴随强耀斑有很强的紫外辐射爆发，由此会引起大气层的臭氧显著减少。

太阳耀斑爆发时，太阳的微粒辐射增强，这会引起地磁扰动，出现磁暴。地磁暴之后，引起气压变化。例如，据统计，一次磁暴后，格陵兰南部气压约增加2mbar，西北欧气压降低1mbar。在时间上从磁暴后到大气压变化约延迟1～3天。又如一次磁暴后俄国西伯利亚区域气压普遍下降，而这时整个中纬带气压上升。这些观测事实说明，太阳耀斑爆发后，大多数在24小时内发生地磁暴，然后再过后一两天左右地面气压发生变化。

五、地球在银河系的运动与大冰川期的关系

太阳带领地球和其他行星围绕着银河系中心做椭圆运动，2.9亿年绕银心运行一周，称之为一个宇宙年或地球的银河年。目前太阳系距银心约8.5 kpc，运动速度为220 km/s。

太阳系在银道面上下约±100 pc范围内穿行，天文上把自下而上(或相反)两次穿越银道面的时间间隔称为穿越银道面的周期，其周期为6 700万年。目前太阳系位于银道面以北约8 pc的地方，即将向南穿越银道面。科学家发现太阳系在银道面上、下往返的运动与地质纪的分界时间和持续的时间很一致。表7.1给出了地质纪的分界时间和持续的时间，以及太阳穿越银道面运动的相应时间。

表7.1 地质年代与太阳往返银道面时间对照表

代	纪	持续时间/(百万年)	纪的分界年代/(百万年)	太阳过银道面时间/(百万年)
新生代	第四纪	2.5	2.5	
	第三纪	61.5	67.0	64
中生代	白垩纪	70	137	135
	侏罗纪	58	195	197
	三叠纪	35	230	227
古生代	二叠纪	55	285	280
	石炭纪	65	350	345
	泥盆纪	50	400	394
	志留纪	40	440	435
	奥陶纪	60	500	500
	寒武纪	70	570	570
元古代	震旦纪	—	—	

(摘自：任振球．全球变化．北京：科学出版社，1990)

由表7.1可知，近6亿年以来，地质史上纪的分界时间与太阳系往返银道

面运动的位相存在着较好的相关关系。中生代以来包括三叠纪、侏罗纪、白垩纪和第三纪，它们分界的时间分别为距今 1.95 亿年前、1.37 亿年前和 0.67 亿年前，而太阳由银道北面向南穿越银道面的时间分别为 1.97 亿年前、1.35 亿年前和 0.64 亿年前。两个系列的时间很一致，地质纪的分界时间均为太阳系穿越银道面的时刻，一个纪的长度正好是太阳系穿越银道面完成一周的时间。

我们知道地质年代是根据地壳岩石形成的时间和顺序划分的，地质年代的分界一般标志着岩石的形成以及古生物的发展阶段在其前后有重大的变化。例如二叠纪与三叠纪的分界时期约在 2.3 亿年前，到三叠纪时腕足类减少、迷齿类绝迹，爬行类发展，哺乳类出现等。由三叠纪发展到侏罗纪的分界线约在 1.95 亿年前，到侏罗纪，箭石菊石兴盛、恐龙发展，鸟类出现等。由侏罗纪发展到白垩纪的分界线约在 1.37 亿年前，这时有孔虫兴盛，菊石和箭石渐趋绝迹等。由此可见，地质构造运动和古生物发展阶段的地质纪的分界时间与太阳往返银道面运动的时间相吻合，表明它们之间有可能存在某种物理联系。

根据海洋洋底钙质介壳化石中氧同位素含量的测定，科学家们可以知道古温度的变化。在新生代洋底及高纬地区洋面的古温度值是逐渐下降的。在下降过程中出现了温暖期和寒冷期，反复交错。在距今 3 000 万年前、6 200 万年前和 9 400 万年前，古温度变化处于低温时期，这正是太阳通过银道面的时间，即 3 100 万年前、6 400 万年前和 1 亿年前。目前，太阳系处于银道面附近，即将穿越银道面，在没有人为的影响下地球上温度变化的趋势将处于降温过程中。

地球在地质时期曾经历过多次亿年尺度的大冰川活动时期。距今 6 亿年以来的显生宙期间，从已发现的冰川活动的证据来看，曾发生过 4 次大冰川。在早寒武纪(5.7—6.5 亿年)，冰川曾在澳大利亚、欧洲、格陵兰、纽芬兰、非洲、南美、中国和西伯利亚等地。在奥陶纪至志留纪(4.1～4.7 亿年)冰川曾在非洲、南美、欧洲一部分和加拿大等地出现。在石炭纪至二叠纪(2.35～3.20 亿年前)，冰川发生在澳大利亚南非、南美、印度、巴基斯坦和西伯利亚等地。在新生代晚期(1 400 万左右)，冰川活动影响到整个大陆和海底沉积物。为了与上述第四纪内，周期约为 2 万年左右的冰期相区别，我们将这 4 次地球银河年，亿年的大规模冰川活动称为大冰期。大冰期时期，天气非常寒冷，海平面非常低，全球被海水覆盖的面积少。

在地质时期，地球磁场的极性曾出现几次倒转，从资料的分析说明磁极存在长周期的偏转、转动的周期约为 2.97～3.03 亿年。地磁极性长期变化的周期和相位与地球银河年和大冰期都十分一致。在古生代石炭纪(2.35 亿年前)，地磁

北极位于我国华北；三叠纪(1.95 亿年前)，北磁极位于西伯利亚；白垩纪(6 700 万年前)，北磁极位于白令海峡附近；从晚新代以来(1 400 万年)北磁极位于现在的北极附近。

为什么地球的银河年会出现大冰期呢？目前还没有得到完满的解释，只是提出了几种物理成因的假设。有些科学家认为，太阳系穿越星际物质，尘埃星云吸收了太阳的辐射；有些科学家认为是太阳处于近银心时，太阳光度有所减弱；或者认为太阳通过银河系旋臂边缘时尘埃相对密集，导致太阳辐射变化，引起大冰期等等假设。

第 13 节 保护环境珍惜地球

地球是生命的摇篮，是我们人类唯一美好的家园，它有多层的屏障保护着人类及万种生灵和人类创造的高度文明。但是人类创造文明的同时也自觉、不自觉地破坏着我们美好的家园，可以说，真正的劫难是人类自身的不文明行为！

我们的母亲——地球现在虽是正当青春年华，然而，她已饱经风霜，满目疮痍。目前，母亲正在遭难，危机四伏：清洁的水源受到污染；大气中二氧化碳急剧增加；地下水源和资源接近枯竭；原始森林遭到乱砍、乱伐；大量水土流失；大量物种濒临灭绝等，人类赖以生存的地球生态环境严重恶化，生态系统正在遭受灭顶之灾。环境的惩罚，大自然的报复——洪涝、干旱、地震、台风、冰雹、泥石流等自然灾害的肆虐，不断警示着人们：地球不堪负重，人类正面临着有史以来最严重的环境危机，受到自然灾害的严重威胁和挑战。

自然灾害的发生虽不以人的意志为转移，但人类的活动可以加速或延缓它的发生。自然灾害中有的看起来是自然因素造成的，但实际上也含有人为对生态的破坏。地球上的各种自然灾害主要起因于内因，如地球地壳的构造运动，地球自转变化，大气环流的变化等；而外因如太阳辐射的变化、太阳活动爆发、日月引潮力和宇宙环境等对地球的灾害起着触发的作用。研究自然灾害发生的规律，通晓它发生的外因和内因才能预测它，以达到减灾防灾和富国利民的目的。

人类创造财富不过是历史的一瞬间，而大自然的资源才是永恒的财富。人类在创造文明的同时要维系大自然的生态平衡，与大自然和谐共处。人类必须保护环境，珍惜家园，才能发展社会的文明，创造美好的明天。

地球是太阳系唯一有生命发育和生命活动的星球，我们应当加倍的珍惜、爱护和保护它，不能只享祖先的福而造子孙的孽。常说："人无远虑，必有近忧"，看到今日满目疮痍的地球，想到更为严重的明天，人类应当猛醒！保护地球是全世

界人民的共同事业！

目前，人类正在觉醒，正在采取必要的措施，拯救人类美好的家园，这方面，世界已经重视，中国正在起步。例如，1982 年，联合国人类环境会议发表的《斯德哥尔摩人类环境宣言》指出："人类改造其环境的能力，如果明智地加以利用，就可以给各国人民带来开发的利益和提高生活质量的机会。如果使用不当，或轻率地使用，也会给人类和人类环境造成无法估量的损害"。联合国第 44 届大会定 1990 年—2000 年为世界减灾年；此外《蒙特利尔议定书》缔约国约定：2030 年所有氯氟烃停止使用；《气候框架公约》159 个签字国决定：20 世纪 90 年代末，二氧化碳等温室气体排放量控制在 1990 年的水准；中国计划在"九五"期间废气治理率达 86%；把两区：二氧化硫污染区和酸雨污染区作为"九五"重点控制治理区。目前，人们正在认真地思考：如何珍惜我们的家园，保护生态平衡，创造一个美好的地球环境。人类主要采取以下手段保护环境：①保护蓝天，减少大气污染；②恢复净水，一方面大力节约水资源，调剂水源，一方面大力治理污水，根治水患，防止水土流失；③植树造林，美化环境，绿化地球；④珍惜耕地，合理利用；⑤保护生物多样性，防止生物物种资源被破坏，维护生态平衡；⑥治理固体废弃物的污染，让环境优美、清洁。

地球是人类生存发展的唯一家园，我们只有一个地球。我们别无选择，只有保护地球，爱护地球，珍惜我们的家园，使蓝天恢复本色，大地穿上绿装，让生态恢复平衡，这是造福于我们子孙万代的千秋大业，也是全世界人民的共同事业。

第 14 节　月　　球

月球是地球唯一的天然卫星，它和地球一样都不发光，只反射太阳的光。月球围绕地球公转，又跟着地球一起围绕着太阳公转。月球的自转周期和绕地球公转的周期相同，所以月球总是以同一面向着我们，直到星际航行时代，在太空飞船拍出的照片上，我们才一睹它背面的芳容。

一、月球的自转与物理特征

月球自转的周期与绕地球公转的周期相等都是 27.32 天，这种说法是近似的，严格讲月球有天平动，即我们所看到的月面经常有一些微小的变动。经度天平动最大可达 7°54′，周期为一个近点月（月球连续两次通过近地点的时间）。纬度天平动最大可达 6°51′。

利用激光测距的方法精确测出的月球和地球的距离是 384 401 km。我们由它的视角直径和月地距离，可以计算出月球的平均直径是 3 474.8 km，约为

地球直径的 3/11。

月球体积只有地球体积的 1/49。月球的质量也比地球小得多，约为 7.3×10^{22} kg 是地球质量的 1/81.3。由月球的质量和体积，可以算出月球的平均密度为 3.34 g/cm^3，相当于地球密度的 3/5。月球表面上的重力加速度比地球小，为 1.622 cm/s^2，仅为地球表面重力加速度的 1/6，也就是说，人在月球上的重量只有在地球上重量的 1/6，在月球表面轻轻一跳，就会腾空而起，连地球上的跳高冠军也望尘莫及。

月球是个略扁的球体，扁率只有 1/3 476。南北极区也不对称，北极区隆起，南极区洼陷。月球的重心和几何中心并不重合，重心偏向地球 2 km。

二、月球的公转与月相

月球绕地球的公转是由西向东运行的。月球绕地球的周期叫做恒星月，它平均为 27.32 天。所以月球在星空的背景上的视运动是每天(平太阳日)自西向东移动 13°10′35″，即月出地平每天比前一天晚 52′42″。

月球轨道的偏心率相当大，为 0.055 5。月球轨道面和天球相交的大圆叫白道。白道和黄道夹角为 5°09′。白道和黄道相交于两点，分别称为升交点和降交点。由于太阳引力的摄动，交点沿着黄道西移，每年移动 20°，经过 18.58 年旋转一周。此外，月球轨道的拱线(月球轨道的近地点和远地点的连线叫拱线)也不停的变化，变化周期为 8.85 年。

月球在绕地球公转的同时随着地球一起绕太阳公转，因此人们看到月球的亮度有周期性的变化。月亮的盈亏变化叫月相，月相变化的一个周期叫朔望月。一个朔望月为 29.530 59 天。由于太阳的引力影响，朔望月的长短稍有变化。为什么月球公转周期是约 27.32 天，而朔望月较长呢？这是因为地球绕太阳公转周期为 365.25 天，在月球绕地球转了一周后，地球同时绕太阳运行了大约 27°，按照计算会合周期 T 的公式：

$$\frac{1}{T}=\frac{1}{27.32}-\frac{1}{365.25}$$

可以求出朔望月的时间为 29.53 天。

月相变化的道理可用图 7.9 来说明。图的中心圆球代表地球。外面圆周上的小圆代表月球，最外面是从地球上看到的月相。当月球走到太阳与地球之间时，太阳光照射不到的月球的那个半球对向地球，因此，从地球上看不到月亮，这时就是“朔”，也就是新月。随着月球的公转，被阳光照亮的那半个月面开始有一部分朝向地球，为向右凸出的镰刀形。当地球上看到被太阳照亮的月球右边一半，这时的月相称为“上弦”。上弦后，地球上逐渐看到大半个月面，当太

阳照亮的月球那半球正朝向地球，我们就看一轮圆月，这时称为“望”。过了望，地球上看到亮的部分变小，只能看到左边明亮的半圆，称为“下弦”。以后，又逐日减小，成镰刀形，称为“亏月”，或者叫残月，接着是下个月的朔，之后就出现新月。

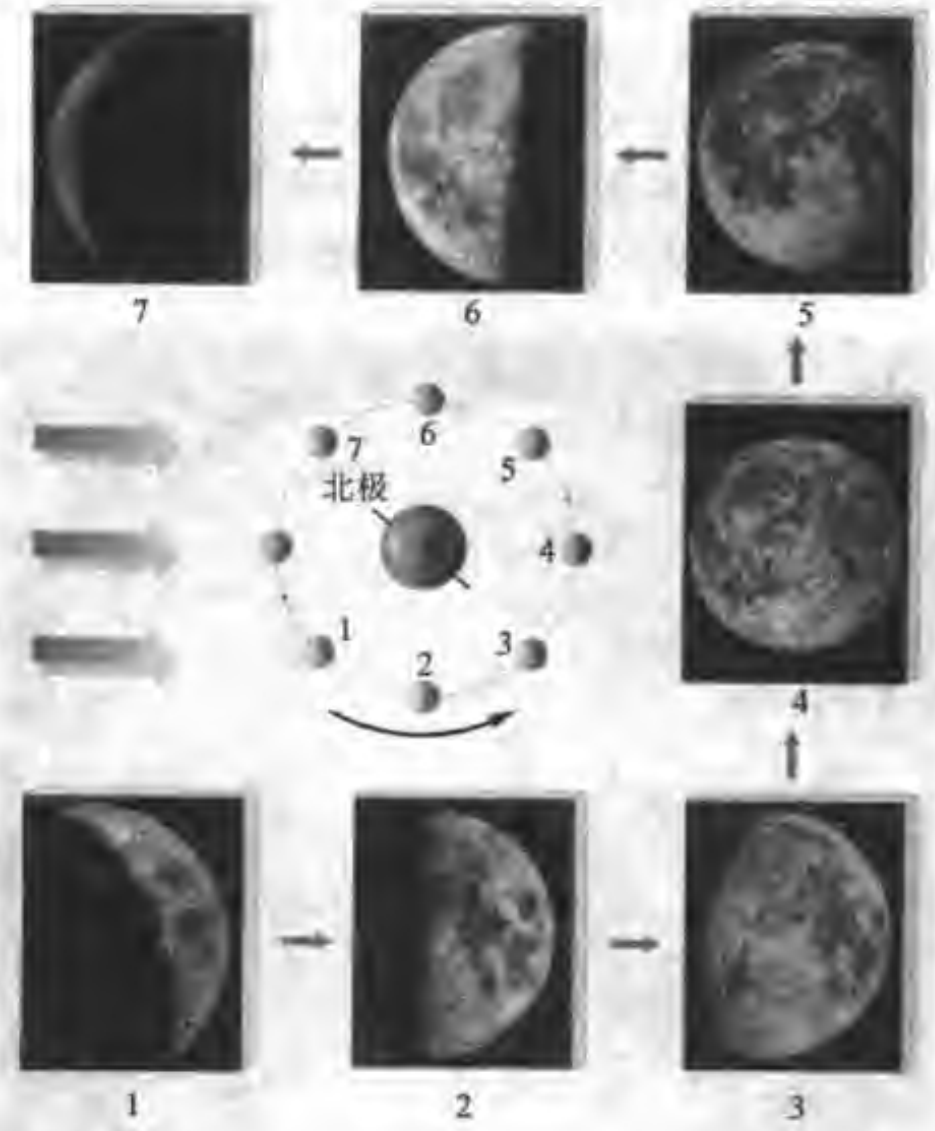


图 7.9　月相变化图解

1. 盈娥眉月(新月后 4 天)；2. 上弦(新月后 7 天)；3. 盈凸月(新月后 10 天)；4. 满月(新月后 14 天)；5. 亏凸月(新月后 18 天)；6. 下弦月(新月后 22 天)；7. 亏月(新月后 26 天)

因为月球的公转运动是自西向东的，所以在朔(农历初一)以后，月球位于太阳之东，日落后，一个月牙出现在西方地平线上空。以后每过一天，月球和太阳的角距离增加约 13.2°。在上弦前后(农历初八左右)，日落时月亮出现在子午圈附近。到望月时(农历十五或十六)，月亮在天空正好和太阳相对，一轮圆月，日落时升，日出时落。望月之后，月球上升时间每天晚约 50 分钟。下弦(农历二十三左右)以后，月球到下半夜才升起。到了农历月底之前，残月仅在黎明前上升，经过一短暂时间，就淹没在太阳的光辉之中。

三、月球的空间探测

我们用望远镜看到月面上有一些暗区称为“月海”，其实月海里没有水，只是广阔的平原。月海大部分在月球正面，最大的叫“风暴洋”。月球背面的月海很少。高出月海的地区称为“月陆”。月面上也有连绵险峻的高山，最高峰达9 km，比地球上的珠穆朗玛峰还要高。

月球表面(图 7.10)，布满了大大小小的“环形山”。著名的哥白尼环形山、第谷环形山都有亮的辐射纹，这些辐射纹由中心向外延伸，长达 1 800 km。月面上还有一些绵延数百公里、宽达几公里到几十公里的大裂缝，如同地球上的大峡谷。



图 7.10　在地球上拍摄的满月照片

由空间探测得知，月球的背面(图 7.11)和正面差异较大。背面的月海面积较小，环形山较多，地表凹凸不平，起伏悬殊。背面的月壳比正面厚，最厚处达150 km，而正面只有 60 km 左右。

20 世纪 70 年代初，阿波罗宇航员在月面上安装了月震仪以了解月球内部结构。实验表明，月震波的能量在距离月球中心一百多公里时就耗散了，这第一次暗示月核可能是半熔融的。最近，宇航局的科学家计算，证明月球有一个半熔融的外核。

早在 1959 年 9 月 14 日，苏联发射的“月球 2 号”宇宙火箭，经过 36 小时的飞行，击中了月球上 3 座环形山之间的一块空地，这是人类第一次把一件物体从

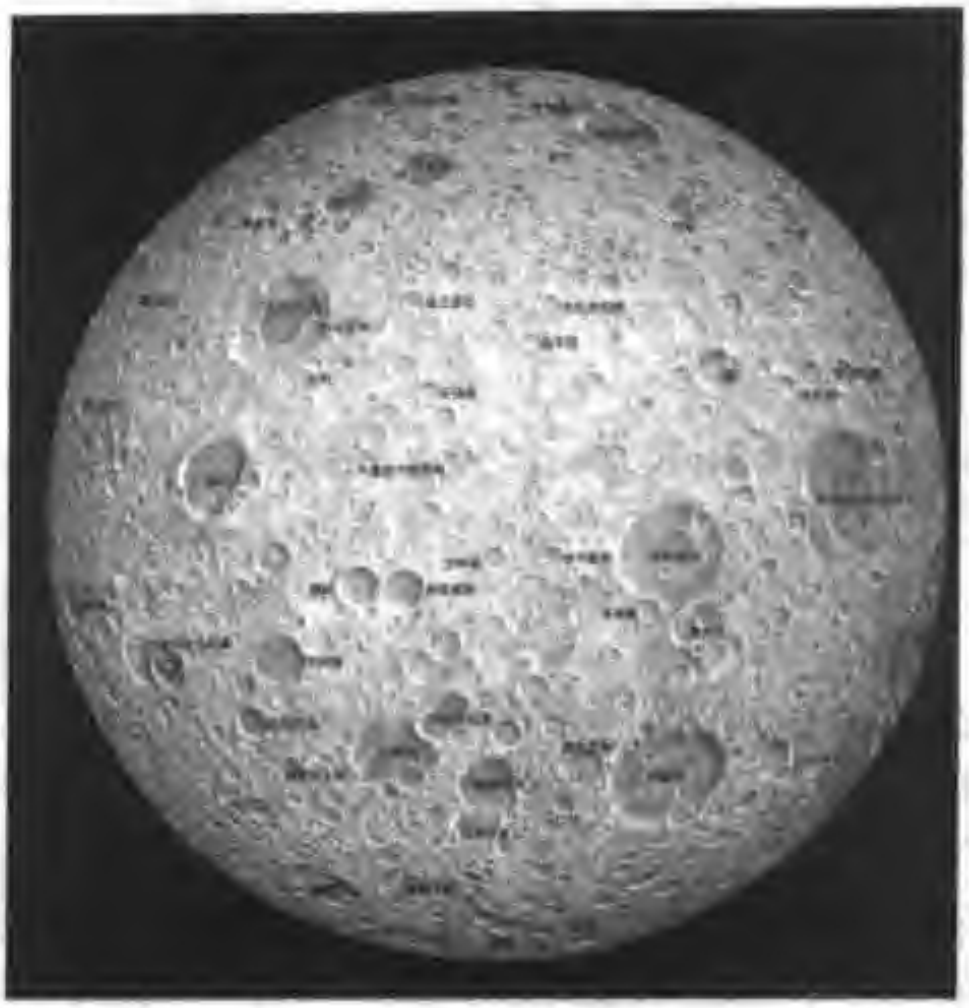


图 7.11　月球背面照片

地球奉送给了月球。此后，人们相继发射了一系列宇宙飞船和空间探测器，有步骤地飞往太空阵地。1969 年 7 月 20 日，美国发射的阿波罗 11 号登月舱第一次实现了人类登上月球的梦想(图 7.12)。

当飞船的指令长阿姆斯特朗从登月舱走下来，第一脚踏上月面的时候，他说了一句意味深长的话："对个人来说，这只是迈了一小步，而对整个人类却是一次大飞跃。"的确，它标志着人类已飞出地球，登上月球，进入探索宇宙的新旅程。

从 1969 年 7 月至 1972 年 12 月，先后有 7 艘阿波罗号宇宙飞船飞向月球，



图 7.12　人类登上月球的第一个足迹

有 6 艘登月成功，共有 12 名宇航员登上了月球，在月面上 8 个不同地点进行了考察，并携带着约 400 kg 月球岩石和土壤返回地球，这是多么硕大的丰收。

研究考察表明，月球大约在 45.5 亿年前形成，月球诞生后不久，就遭到太阳系内密集的行星际物体的猛烈轰击，其势如“暴风骤雨”，迅猛异常。这场“暴雨”一直下到 40 亿年前才停息，造成现在的月球表面，环形山密布、斑痕累累。月球上直径大于 1 km 的环形山有 3 万个以上，其中最大的环形山直径达 1 000 km。在大约 38 亿年前至 26 亿年前，月球内部喷出了大量的玄武岩熔岩，形成了“月海”。航天探测器没有探测出月球整体的磁场。这表明月球磁场强度不会超过地球磁场强度的千分之一。但却测出月岩有磁性，其成因尚还不明。

月球上几乎没有大气，只有极微量的气体，主要成分是氦和氩。由于没有大气，月面上不可能有液态水，因为月球的白天温度高到 127℃，夜间降至 −183℃。那么有没有冰冻的水呢？1994 年美国发射的“克莱门汀”号航天器，在月球南极附近发现了一个大盆地有厚约几米的冰与泥土混合在一起的冻土——“冰湖”。为了进一步探测月球上的冰水及矿物，1998 年 1 月美国发射了“月球勘探者”号无人驾驶飞船，它环绕月球飞行了一年，最近时距月面仅 10 km。探索表明：月球的两极区域有大量的冰水存在，人类可以开发月球水源，以月球为中间站，做更遥远的宇宙航行和探测。

人们计划首先建立“自由号空间站”，它包括太空平台，轨道机动飞行器和载人机动飞行装置。第二步是建立月球基地（建立太阳能发电站，月球太空港，月球观测室和月球实验室以及实验加工厂），第三步是把月球基地作为中转站和补给站，实施人类到其他星球航行的壮举。

【例题 1】 地球的质量减小到怎样的程度月球就永远逃离地球？

解答：月球绕地球的公转速度 $v=\sqrt{\frac{Gm_{\text{E}}}{r}}$，而月球的逃逸速度 $v=\sqrt{\frac{2Gm}{r}}$。

如果月球要逃离地球，则 $m=m_{\text{E}}/2$，即地球的质量减小一半，月球就会飞离地球。

【例题 2】 1957 年前苏联发射了人造卫星“Sputnik I”，它有篮球大小，直径为 580 mm，质量为 83.6 kg 表面有 2 mm 厚的精制的铝合金板。这颗卫星的轨道是椭圆轨道，发射之后，它的近地点距离地球表面 227 km，远地点距离地球表面 945 km。估计一下当时用肉眼是否能观测到这颗卫星？

解答：让我们比较一下由肉眼观测来自远地点的卫星的光流量和来自月球的光流量：

用 W 表示太阳的光流量，α_* 表示观测天体的反照率，有 $S_*=\pi r_*^2=\pi d_*^2/4$，此处 r 和 d 分别是观测天体的半径和直径，R_* 是由观测天体到观测者的距离。

由月球到达观测者的流量：$I_{\text{M}}=W\ \alpha_{\text{M}}S_{\text{M}}/(2\pi R_{\text{M-O}}^2)$；由卫星到达观测者的流量：$I_{\text{I}}=W\ \alpha_{\text{I}}S_{\text{I}}/(4\pi R_{\text{I-O}}^2)$（在解题中我们不考虑散射和随机的辐射与镜子的散射，$2\pi R_{\text{M-O}}^2$ 和 $4\pi R_{\text{I-O}}^2$ 之间的差异，这是由于月球的一面向着观测者。）

由于卫星表面是高精度的铝合金，所以我们可以假设 $\alpha_{\text{I}}=1$，所以有

$$I_M/I_1-\alpha_M(S_M/S_1)(4\pi R_{1\ O}^2/2\pi R_{M-O}^2)-2\ \alpha_M(d_M/d_1)^2(R_{1\ O}/R_{M\ O})^2$$

由月球的反照率$\alpha_M=0.07$有

$$I_M/I_1=0.14\times(3.475\times10^6\ \ 0.58)^2(2.27\times10^5/3.72\times10^8)^2=1.87\times10^6$$

由$m_M-m_1=-2.5\lg I_M/I_1\ \ 2.5\lg(1.87\times10^6)\approx-15.7^m$，所以星等差为$15.7^m$。

已知满月的视星等为-12.7^m，所以卫星的星等$m_1=15.7-12.7=3.0^m$。由于人的眼睛可以看到6^m的天体，卫星 Sputnik 1 在天顶时是3^m，所以，卫星 Sputnik 1 是可以看到的。



习　　题

1. 在地球的表面之上为什么能维持住大气层？推算月球上的大气是否存在？提示：确定一个行星是否能维持住大气，必须对照它的表面逃逸速度与气体分子的平均速度之比，如果气体分子的平均速度超过逃逸速度的1/6，就不能维持大气。我们知道分子的平均速度$\propto\sqrt{\frac{\text{气体温度}}{\text{分子质量}}}$；在地球大气内，地球的表面温度大约300 K，大气成分主要有氧(氧的相对分子量为32)和氮(氮的相对分子量为28)，典型的分子平均速度为0.52 km/s，比分子的逃逸速度11.2 km/s小，所以地球能维持住由氧和氮组成的大气；再推算月球的情况与地球相比。

2. 如果地球的自转突然逆转，太阳日与恒星日的长度会有怎样的变化？

3. 由于地球自转轴进动，北天极绕北黄极以23.5°为半径的小圆，自东向西旋转，26 000年转一周。目前北天极位于北极(小熊座α)附近，春分点恰好位于宝瓶座。问13 000年以后的北极星是哪颗星？春分点位子什么星座？

4. 如果月球的轨道周期是1恒星年，那时的1个朔望月的长度是多少？

5. 月球在天球上的运动在1小时内穿行多少度？多长时间月球移动的距离等于它自己的直径？

6. 已知月球的距离是3.84×10^5 km，它的角直径是0.5°，计算月球的直径是多少？

7. 想像月球上的居民在新月的时候看到地球是什么相？在满月的时候呢？月球的相和地球的相两者间一般的关系怎样？

8. 假若昨天月出是在晚上8时15分，那么今天月出约在何时？若月球的赤纬在这时候增加了，这个月出的时间将怎样改变(定性地)？

9. 6月21日，太阳赤纬$\delta=23°27'$。问在什么纬度处，6月21日的白昼长度只有3小时？

10. 如果整个地球是等密度的，密度为3 000 kg/m³，地球的表面引力和逃逸速度是多少？

11. 近似地把地球的大气层看作密度为1.3 kg/m³均匀的大气层，厚度7.5 km，计算它的质量，并与地球的质量相比较。

12. 地球上的大部分冰在南极洲，南极洲的永久的冰冠近似覆盖地球表面

的 0.5%，厚度有 2～4 km，地球表面 71%是海洋，平均深度是 3.6 km。假设水和冰有同样的密度，估算，如果地球的冰冠融化，则海水平上升多少？

13. 大西洋目前的宽度大约为 6 000 km，一个典型的板块以 3 cm/年的速度运行在大西洋上，要横贯大西洋需要多长时间？

14. 如果 4 个木星样的大行星在地球的同一方向排列在一条线，其潮汐力对我们的地球有没有显著的影响？

15. 月球的质量约为地球的 1/80，月球的半径是地球半径的 1/4，计算一下一个在地球上 980 N 的宇航员加上 490 N 的太空服和背包在月球上的重量是多少？

16. 阿波罗 11 号在月球上方 10 km 沿轨道飞行，求它的轨道周期？

第八章

地外行星

火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星的轨道在地球轨道以外，叫地外行星，它们离太阳比地球更远，有着自己的运动规律，特殊地位和物理条件。

第1节 火 星

人们在夜空看到火星是火红色的，古代人被它的红色迷惑不解，所以中国古代称它为惑星或荧惑。火星最亮时的视星等为-2.01^m，最暗时为1.5^m。火星和地球的特征相似，又距离地球较近，为了寻找火星上的生命遗迹，探寻空间旅行的基地，火星成为人类登月以后空间探索和旅行的重要目的地。

一、火星的运动规律与物理特性

火星是在地球轨道之外与地球临近的大行星。火星绕日的轨道椭率为0.093，火星近日点的距离为1.38 AU(2.07×10^8 km)，远日点距离太阳1.67 AU(2.49×10^8 km)。火星的绕日公转周期是686.98天(地球日)，自转周期是1.025 957天，也就是24.6小时，和地球的自转周期很相近。它的自转轴与黄道面倾斜为66°，即赤道面与黄道面的夹角为24°，这与地球的黄赤交角23.5°也很相近。

火星比地球小，其半径为3 397 km，约为0.53个地球半径。可以推算火星的体积大约是地球体积的七分之一。

火星的质量约为6.4×10^{23} kg，是地球质量的10.8%，其表面重力不及地球的十分之四，因此，如果人站在火星上，重量会减轻一多半。

二、火星的表面特征

火星的南北极都有白色的极冠。这极冠冬天增大，夏天消融，人们自然认为这是水和冰的象征。空间探测表明，极冠的主要成分是干冰(固体二氧化碳)和冰水。火星的大气远比地球大气稀薄，气压仅为地球大气压的0.5%～0.8%。火星大气的主要成分是二氧化碳，占95%；氮占3%，水蒸气含量很少，仅占0.01%。火星云层的主要成分是干冰。由于火星大气稀薄而干燥，使火星表面

的昼夜温差变化很大，常常超过 100℃。白天赤道附近最高可达 20℃，晚上，由于火星保暖作用很差，最低温度降到－80℃。两极温度更低，最低温度可达－139℃。陆地生物不可能在这种酷寒、恶劣的环境下生活，所以，火星是满目荒凉，赤地千里的地方。通过空间探测得到的土壤分析，火星的土壤有大量的氧化铁，由于长期受紫外线的照射，铁就生成了棕红色的氧化物。由于大气中的尘埃是棕红色的氧化物，所以火星天空呈现橙红色。如果你站在火星上，仰望天空，一片桃红，只有在黎明和黄昏才呈现苍白的淡蓝色天空。



图 8.1　火星的图像，右下角图是"火星探路者"拍照的近火星表面照片

三、火星的极冠与尘暴

在地面望远镜里可以看到火星的一个极有白斑，叫做极冠（见图 8.1）。另一极冠或不显著或在背面。在火星的冬季极冠的直径达到 3～4 km，在夏季缩小甚至完全消失。20 世纪初人们推测极冠是由水冰组成，它随着季节而变化，但是近代空间观测证明极冠是由碳氧化物即干冰组成，而不是像地球两极上那样的水冰。

由于火星表面温差很大，所以气候变化十分剧烈，时常发生"尘暴"。当大尘暴来临时，尘埃飞扬弥漫，形成尘埃云，可持续数月之久。特大尘暴往往席卷南半球，蔓延到北半球，甚至覆盖整个星球，风速达 180 m/s，远远超过地球上的 12 级大台风。1971 年 5 月"水手 9 号"飞向火星，7 月进入环绕火星的轨道就遇到

了大尘暴。当时地面望远镜也发现火星表面出现了朦胧的黄云，原来火星上起了大风，到了11月发展成席卷全球的大尘暴，一直到次年的1月才风停尘息。火星表面上环形山遍布，隆起的陡壁和大峡谷相互交错。火星上最突出的是火山，最大的火山是奥林匹克火山，它的直径约600 km，高度为26 000 km，其高度是地球上最高峰珠穆朗玛峰的3倍多，它可能是太阳系中最大的环形火山口。在火星的赤道区和中纬度地区有许多弯弯曲曲的干涸河床，最长的达1 000 km，宽200 km。从"水手"9号卫星拍摄的照片，科学家推测大约在1 000万年前在火星赤道附近的一个区域发生过特大洪水。火星上的沉积岩与地球上一样是由于水流冲刷而成的，这表明火星过去曾经是温暖而湿润的。

四、火星的卫星

在火星的夜晚可以在空中看到"双月悬天"的奇景。这两个月亮就是它的两个卫星：火卫一和火卫二(图8.2)。两个火星卫星像月球一样，它们的一面向着火星，自转周期与公转周期同步。

火卫一有不规则的形状，长28 km，宽20 km，公转周期为7小时39分，比火星的自转周期短。火卫一的表面崎岖不平，有许多陨石坑，显示了遭受过撞击的累累痕迹。火卫二长16 km，宽10 km，公转周期是三十多个小时，比火星的自转周期慢不了多少，因此在火星上可以看到两个"月亮"悬在空中，真是美不胜收！



(a)水手9号飞船拍摄的火卫一的照片　(b)水手9号飞船拍摄的火卫二的照片

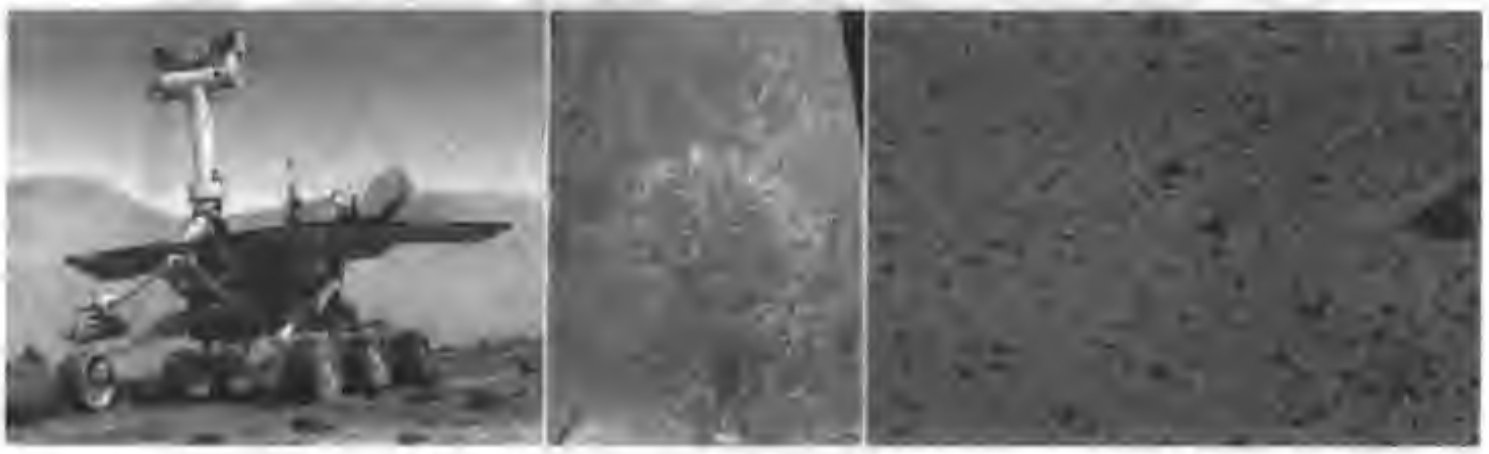
图8.2

五、火星上的生命踪迹

自1965年7月12日美国的"水手4号"飞掠火星以来，相继有"水手6号"、"水手7号"和"水手9号"飞临火星。1976年"海盗1号"和"海盗2号"在火星表面着陆探索，至今已有20多个探测器飞抵火星上空，其中有的还进行了着陆探测。

人们特别感兴趣，而且长盛不衰的问题是火星上有无生命存在？科学家们一直在探索着。从 1962 年到 1973 年前苏联发射了 7 艘“火星”号系列飞船。其中“火星 3 号”在 1971 年 12 月实现了在火星表面软着陆。美国已发射的飞船主要有“水手 4 号”、“水手 6 号”、“水手 7 号”、“水手 9 号”及“海盗 1 号”、“海盗 2 号”。“海盗 1 号”和“海盗 2 号”于 1976 年 7 月和 9 月相继在火星上软着陆，拍了照片并挖取了土壤和岩石样品。由轨道飞行器探测表明，火星上没有找到生命存在的证据，但是人们并没有放弃对生命的继续探寻。

20 世纪 90 年代末到本世纪初有 9 个火星探测器对火星实施探测。1996 年 11 月由俄罗斯与欧洲合作发射了一批太空飞行器到火星。1996 年 12 月美国发射的“火星探路者”经过 7 个月的长途跋涉，于 1997 年 7 月 4 日顺利地降落在火星的阿瑞斯平原上，并放出一个机器人。这个机器人貌似装有的 6 个轮子的微波炉，名叫“索杰纳”。索杰纳的任务是勘察火星表面，收集岩石和土壤样品。分析火星的岩石成分，让人感到吃惊的是火星上的一些岩石竟与地球上的非常相似，有的岩石却截然不同。“火星探路者”传回的照片表明，阿瑞斯平原在远古时代曾发生过特大洪水，说明原先的火星比今天温暖、湿润，很适合生物生存。“火星全球勘查者”于 1997 年 9 月进入环绕火星的轨道，它从 1998 年 3 月开始，用 687 天的时间持续地勘查和记录火星的大气、磁场、地貌、矿藏等。美国宇航局发射的“奥德赛”(Odyssey)号飞船，载有中子摄谱仪、γ 射线摄谱仪。2002 年 2 月美国“奥德赛”火星探测器发现火星表面和近地表层中可能存在着丰富的冰冻水，冰层有多厚，目前还不清楚(见图 8.3)。2003 年 6 月 2 日欧洲宇航局发射了



(a) (b) (c)

图 8.3

(a)2003 年发射的火星“勇气”号探测器，已于 2004 年 1 月 4 日登陆火星；
(b)2002 年美国“奥德赛”火星探测器发现火星上有冰冻水的证据；
(c)“勇气”号发回的第一张彩色图片

“火星快车”探测器，它 6 个月以后进入火星轨道，然后降落到火星表面，对大气和火星表面进行采样并对火星上生命与水进行探寻，遗憾的是，它登陆火星后失

去了联系。同年美国太空总署于6月10日发射了火星探测器"勇气号"(见图8.3),7月7日又成功发射了火星探测器"机遇号",这两个"孪生火星探测器"到火星表面主要考察火星上的生命和水。它们在2004年1月先后登陆火星,已发回了大量宝贵的信息。人类登上火星的时候已为时不远了。由于宇航员往返火星一次至少需要2至3年,因此周密的筹划宇航员的给养、飞船的燃料以及如何建立"火星运输飞船"和"火星轨道站"等,已提到了科学的日程。

火星上没有智慧的生命,这已无可争辩,但是火星上几十亿年前有无生命的问题还在探索。1996年12月美国科学家宣布:1984年在南极洲发现的陨石ALH84001是来自火星的陨石(见图8.4)。科学家研究了这块地球上的火星岩石,认为是火星表面与小行星或彗星碰撞后作为陨石落到地球上的。研究岩石的成分表明,这些陨石中存在化石微生物。这表明,在几十亿年前火星上的条件很可能有过相当温暖潮湿的气候,并且有过温泉,条件是适合于生命的存在。这块火星陨石是存在微观生命的证据,这又极大的激起了人们对火星探测的热情。



图8.4　1984年在南极洲发现的ALH84001火星陨石

第2节　木　　星

在夜空中木星的亮度仅次于金星,最亮时的视星等为-2.7^m。用望远镜观测木星,可以看到木星上有许多不同颜色的斑纹和平行于赤道的明暗相间的条带。这都是木星大气中的云带,有上千公里厚。

一、木星的物理特性与运动规律

木星的体积和质量都是九大行星中最大的,它的赤道半径为7.15×10^4 km,是地球的11.2倍,极半径是6.69×10^4 km。它的体积是地球的1 400倍。木星

的质量约 1.9×10^{27} kg，为地球质量的 318 倍。木星距离太阳的平均距离是 $7.783\ 3\times10^{8}$ km，公转周期是 4 332.71 天(地球日)，约 12 年。在九大行星中它的自转速度最快。木星的赤道旋转速度最快，自转周期为 0.413 54 天，即 $9^{h}50^{m}30^{s}$，高纬度区的自转速度慢些，约 $9^{h}55^{m}$，即木星的自转是较差自转，赤道快，两极区慢，这也说明它不可能是固体球。

二、木星的表面特征与磁场

木星有浓厚的大气，大气下面是液态的海洋，可以说木星是个液体的行星。用望远镜观察到的木星上明暗相间的条纹是木星大气中的云带。由于木星自转快，9 个多小时就自转一周，自转的惯性和离心力的作用，使它的形状是一个扁球体，赤道直径和两极直径之比是 100 ∶ 93，木星大气的条纹也是沿赤道伸展的。

木星的"大红斑"同大气条纹一样惹人注目(见图 8.5)。大红斑呈卵形结构，长约26 000 km，宽约 11 000 km，颜色是略微红色，有时是暗红。1977 年发射的"旅行者"飞船揭示出，大红斑是一个含有红磷化合物的特大气旋，它朝逆时针方向旋转，温度、气压比周围大气都低，类似地球上的"低压气旋"，所不同的是大红斑存在期限不是几天而是上百年。

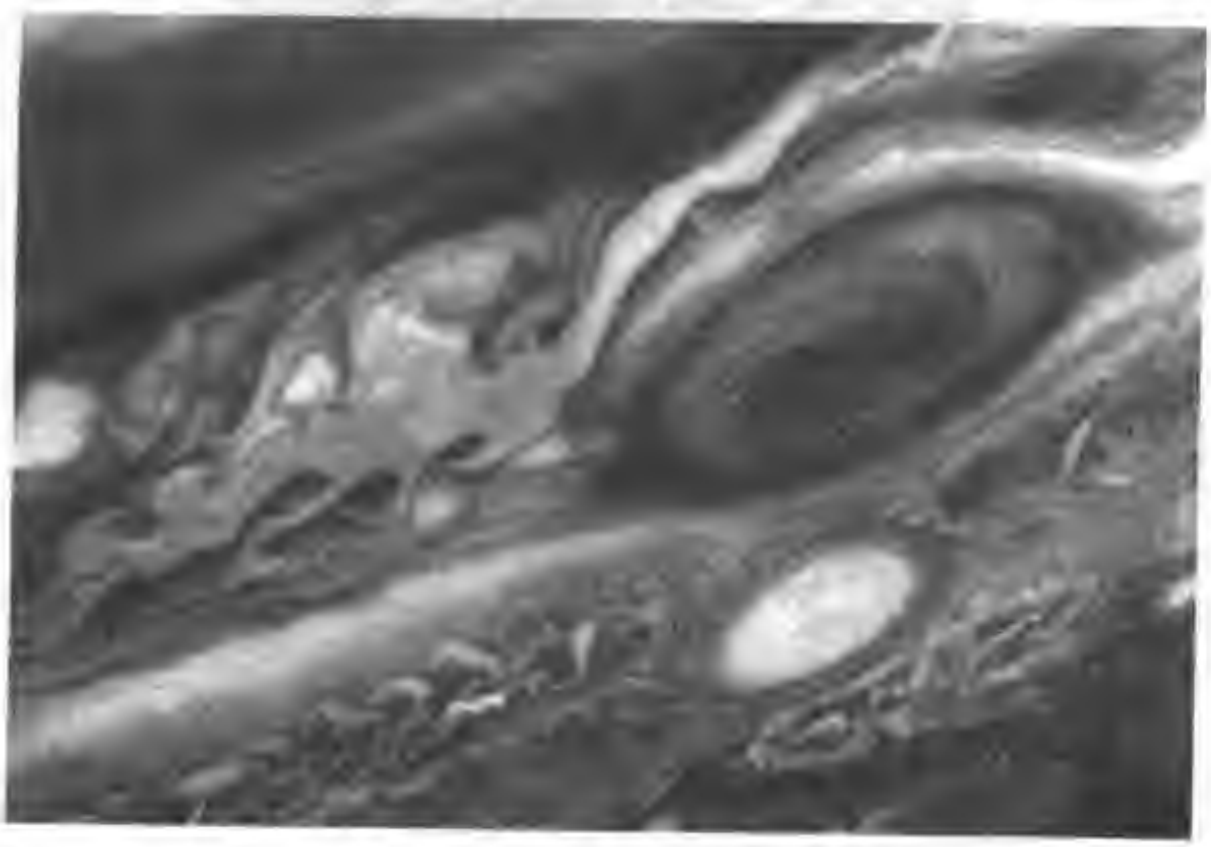


图 8.5　木星的大红斑

为了直接考察木星大气，1989 年 10 月 18 日美国发射了伽利略号木星探测器。历时 6 年，它于 1995 年夏季飞至木星附近，以 47 km/s 的速度冲入木星大气。探测器进一步降落，先是降落伞打开，然后防护层脱落，之后探测器一边缓

缓下落，一边对木星大气进行考察。木星大气层厚约 1 000 km，大气内的风速随着木星的自转率变化（见图 8.6），风的方向与大气内部的结构有关。

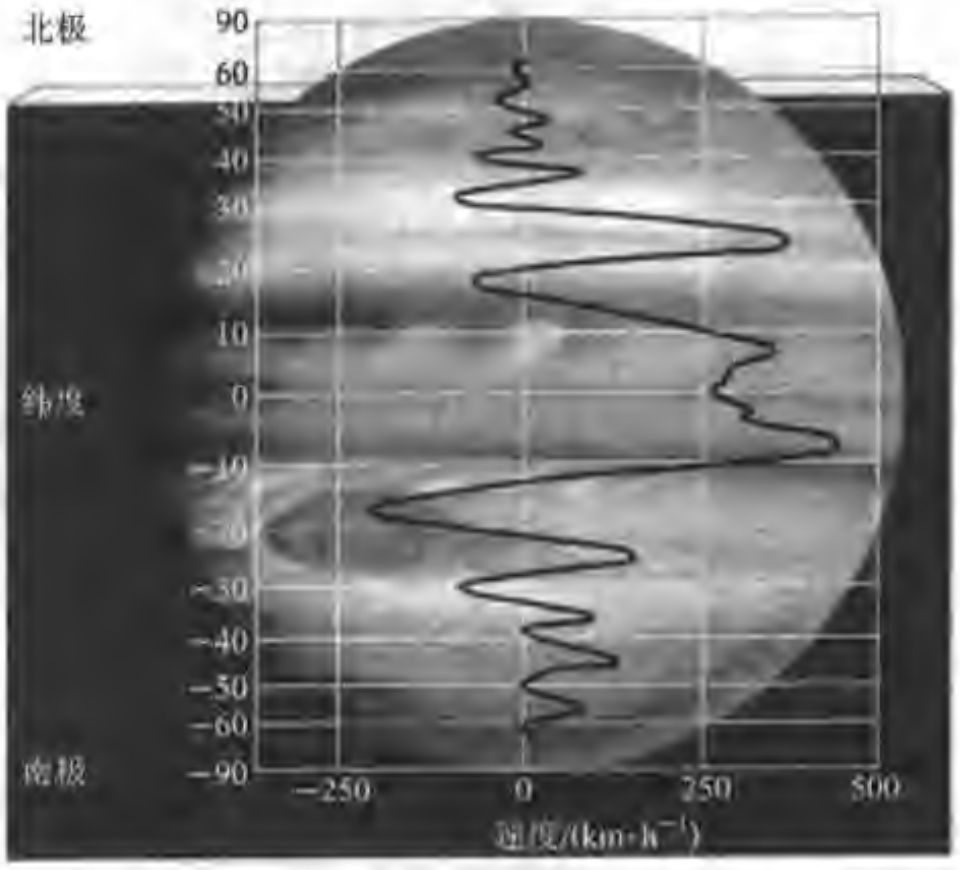


图 8.6　木星大气的风速相对于内部自转率的变化图

木星大气的成分和我们地球不同，在木星大气里氢占 82%，氦占 17%，其余是甲烷、氨等气体分子。探测器观测到有氨云及很薄的硫酸氢氨云存在，但没有找到水存在的证据。探测器所探测的区域，大气十分干燥。在对木星大气进行实地探测过程中，遭遇到强烈的狂风和湍流，在云层深处 161 km，风速达 150 m/s，还探测到有比地球上的雷电强 10 倍的木星雷电。

近年发现，木星也有一个光环。木星光环是由许多直径几十米到几百米的大大小小的石块组成的，这些大小石块围绕着木星环行。

木星除了吸收、反射太阳光外，自身还发出辐射能，也就是说木星本身有能源，不过这能源还不足以产生热核反应。

木星的内部随着从表面到核心的深度增加，温度和压力都上升。如在 100 km 深处温度约 300 K，气压为 10 atm；而在 2×10^4 km 深处，温度约 1.1×10^4 K，气压为 3×10^5 atm；到了核心区温度可能有 4×10^4 K，气压有 5×10^7 atm。在这种高温和高压的情况下液态的氢会转换为液态金属物质（如铁和硅等）。木星探测到强磁场就是最好的证明。

宇宙飞船探测到木星的磁场很强，也是个偶极磁场，并且结构复杂，有规模宏大的球磁层，横跨 3 000 万公里的范围，比地球的磁层范围大得多。木星表面磁场比地球磁场强 10 倍，木星核心区磁场比地球磁场强 1.75 万倍。木星还有

一个和地球周围类似但更强的辐射带(图 8.7)。

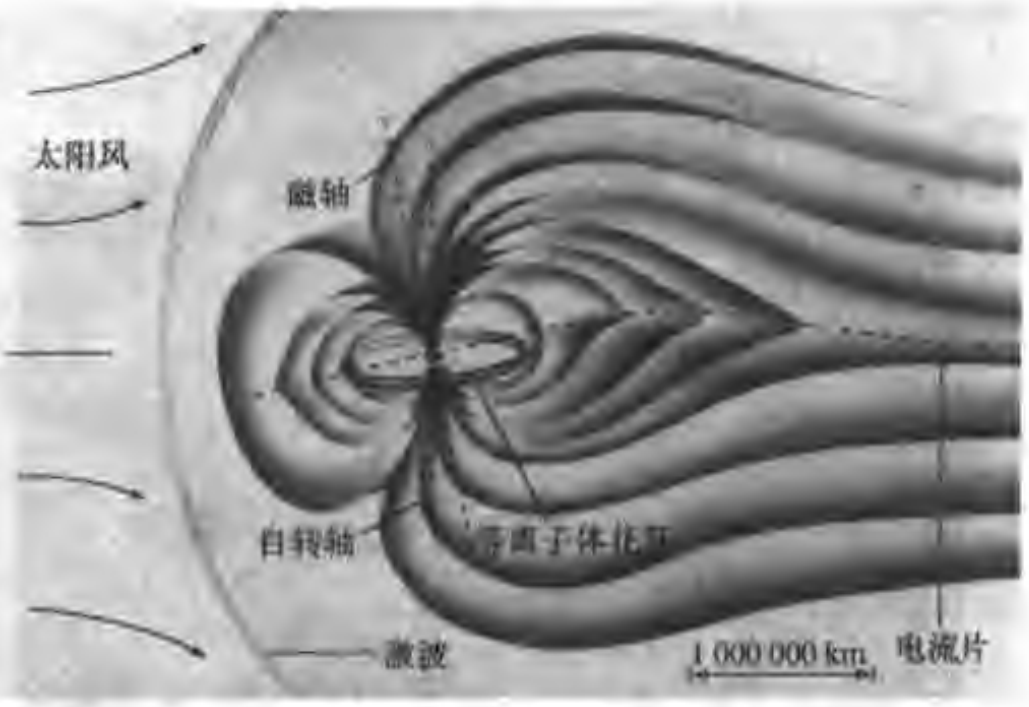


图 8.7 木星的内磁球层

2001 年 1 月卡西尼卫星掠过木星,发现木星的磁层边界随太阳风动力学压力的变化而伸缩。此外还发现了木星的极光。木星的极光起因与地球极光相似,是磁场把太阳风中的带电离子引导到极区而形成的。

三、木星的卫星

到 2003 年已发现木星有 61 颗卫星,其中最亮的 4 颗(木卫一至木卫四)是 1610 年伽利略用小望远镜首先发现的,所以至今仍把木卫一、木卫二、木卫三、木卫四总称为伽利略卫星。它们虽是卫星,尺度可不小,就说木卫三,它的直径为 5 268 km,比水星还要大,木卫四和水星的大小差不多。

"伽利略号"飞船于 1996 年 6 月 27 日飞临木卫三,离它的表面只有 840 km。木卫三的表面充满起伏的环形山,有很高的山脊、裂缝和沟槽,表面为冰层所覆盖,还不断释放出氢原子和带电的氢离子,两极还有臭氧。飞船探测发现木卫三有自己的磁场。

特别令人兴奋的是"伽利略号"发现木卫二上面有水。木卫二白色冰层之上,有浅浅的沟壑纵横(见图 8.8),表面陨石坑很少,处处是龟裂的区域,宛如地球海面浮起的冰块。这可以说明木卫二上有液态的水,而有液态水也就很可能有某些生命物质存在。这给寻找人类知音的人们又带来希望的曙光。

木卫一被确认为除了地球以外有火山活动的天体。频繁的火山活动使木卫一发生了很大变化。"伽利略号"探测器拍摄的木卫一照片已与 10 年前"旅行者号"探测器的照片大不相同。例如:木卫一南半球的马苏比火山周围地区的轮廓和颜色变化很大,火山周围已发现有大量的二氧化硫的堆积物。

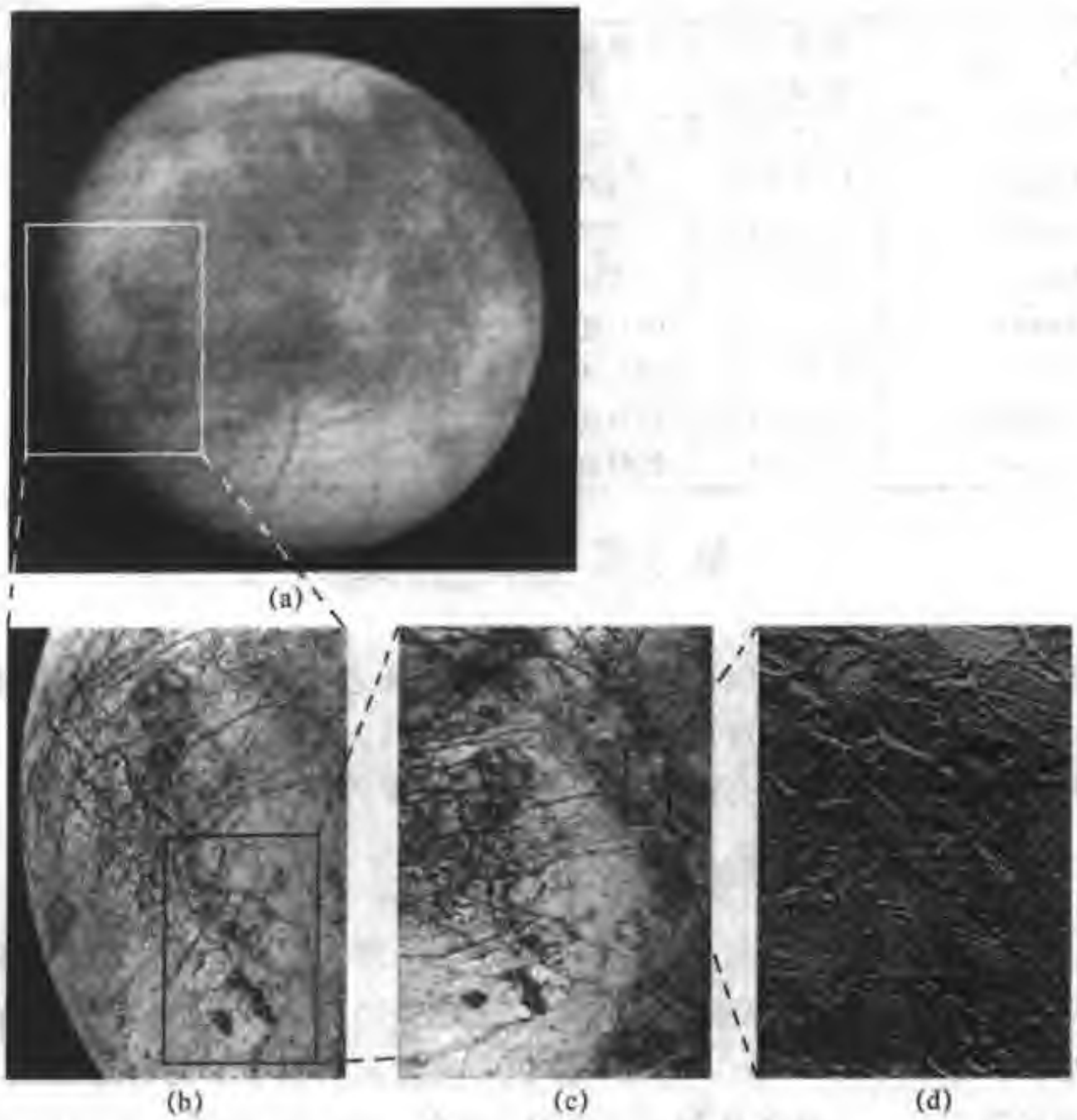


图 8.8　1996 年"伽利略号"飞船拍摄的木卫二照片

(a)木卫二全景;(b)、(c)、(d)局部放大照片

木星的主要卫星的一些参数列在表 8.1 中。

表 8.1　木星主要卫星的一些参数

名　称	距木星的距离/km	轨道周期/d	最大直径/km	质量/$m_月$	密度/(kg·m^{-3})
Metis	1.28×10^5	0.29	40		
Adastea	1.29×10^5	0.30	20		
Amalthea	1.81×10^5	0.50	260		
Thebe	2.22×10^5	0.67	100		
Io(木卫一)	4.22×10^5	1.77	3 640	1.22	3 500
Europa(木卫二)	6.71×10^5	3.55	3 130	0.65	3 000
Ganymede(木卫三)	1.07×10^6	7.15	5 268	2.02	1 900
Callisto(木卫四)	1.88×10^6	16.7	4 800	1.46	1 900

续表

名 称	距木星的距离/km	轨道周期/d	最大直径/km	质量/$m_{月}$	密度/(kg·m^{-3})
Leda	1.11×10^{7}	239	10		
HimaLia	1.15×10^{7}	251	170		
Lysithea	1.17×10^{7}	259	24		
Elara	1.17×10^{7}	260	80		
Ananke	2.12×10^{7}	631(逆行)	20		
Carme	2.26×10^{7}	692(逆行)	30		
Pasiphae	2.35×10^{7}	735(逆行)	36		
Sinope	2.37×10^{7}	758(逆行)	28		

第3节 土 星

夜空中土星是一颗美丽的大行星，它像一顶宽边的大草帽，草帽的帽檐是它的美丽光环。这个“草帽”可谓之大，“帽檐”的一边放上地球，则帽檐的另一边刚好是月球。土星是天上较亮的行星，它的平均视星等为 0.67^{m}。

一、土星的物理特性与自转

土星离太阳的平均距离是 $1.429\ 4\times10^{9}$ km，即 9.5 AU 比木星更远些。土星也是一个巨大的星球，其赤道半径为 $6.016\ 8\times10^{4}$ km，是地球半径的 9 倍，它的极半径只有 5.4×10^{4} km。土星的体积和质量都仅次于木星，在太阳系的大行星中居第二位。土星的体积是地球的 745 倍。土星的质量是 5.7×10^{26} kg，为地球质量的 95 倍。土星的密度在九大行星中最小，平均密度仅为 700 kg/m^{3}，比水的密度(1 000 kg/m^{3})还低，也就是说，假如能把土星放在足够大的海洋里，它会漂浮在水上。人们推断土星有一个岩石固态核。

土星的公转周期是 10 759.5 天(地球日)，约为 29.5 个地球年。土星的自转类似于木星，自转快而且是较差自转，它的内部自转周期根据对它的磁球爆发测定是 10^{h}40^{m}，它的赤道自转周期是 10^{h}14^{m} 比内部快 26^{m}。由于自转很快，土星扁率为 0.09，是大行星中扁率最大的。

二、土星的光环

土星的光环是 1610 年伽利略通过望远镜观测首次发现的。光环非常宽而且平，围绕着土星赤道，没有一处与土星相接(见图 8.9)。环是一系列的同心圆，从外向里分为 A 环、B 环、C 环。亮环 B 的宽度约 2.36×10^{4} km，它与 A 环之间有一宽约 4 800 km 的空隙，叫做卡西尼环缝。1979 年 9 月，“先驱者 11 号”

探测器飞临土星，又探测到了2条新环叫F环、G环和一条恩克环缝。



图8.9　哈勃望远镜拍摄的土星

1980年11月13日，"旅行者1号"在距土星1.2×10^5 km处掠过土星，穿环而过。从拍摄的图片上，人们惊奇地发现，土星环有无数条，大环套小环，整个光环好像一张高密唱盘。它是由数以千计的碎冰块、岩石块、尘埃颗粒组成，直径由1 m～1 km大小不等，排列成一系列的圆圈，绕着土星旋转。

光环的平面在土星赤道面内，与土星的轨道平面成26°44′的倾角，而且光环平面在绕日运动中方向不变，所以在地面上观察光环有时窄些，有时宽些（图8.10）。A环的内半径为1.223×10^5 km，约2.03个土星半径，外半径约1.368×10^5 km，宽度约1.45×10^4 km，厚度约2.27 km。B环内半径为9.2×10^4 km约1.53个土星半径，外半径约1.175×10^5 km，宽度约4.8×10^3 km，厚度约2.3 km。里边的光环转得快，外环转得慢。光环与光环之间接触的部分由于摩擦和碰撞生热，使接触部分融化，然而在低温环境下，马上又凝固在一起，犹如滚雪球一样越聚越大，可以形成直径数十公里的小卫星。事实上确实有小卫星在光环的边缘与环一起绕土星运转。

三、土星的表面特征与磁场

人们推测土星和木星类似，在大气下面没有岩石的表面，是液态的。人们在地球上通过望远镜看到的一些平行于赤道的亮暗条纹，那是土星的大气流形成的和赤道平行的云带。土星的大气成分主要是氢，此外有甲烷和氨。由于土星表面的温度最低为－180℃，因此大气中的氨和甲烷都冻结成微小的晶体，形成云带，层层包围着土星，并绕着土星运动。云层之下是液态的分子氢。土星表面有时也会出现明亮的卵形白斑。土星像木星一样，自身也发射热量。

空间探测表明土星像木星一样，有强磁场和延伸的磁球。土星的磁场强度

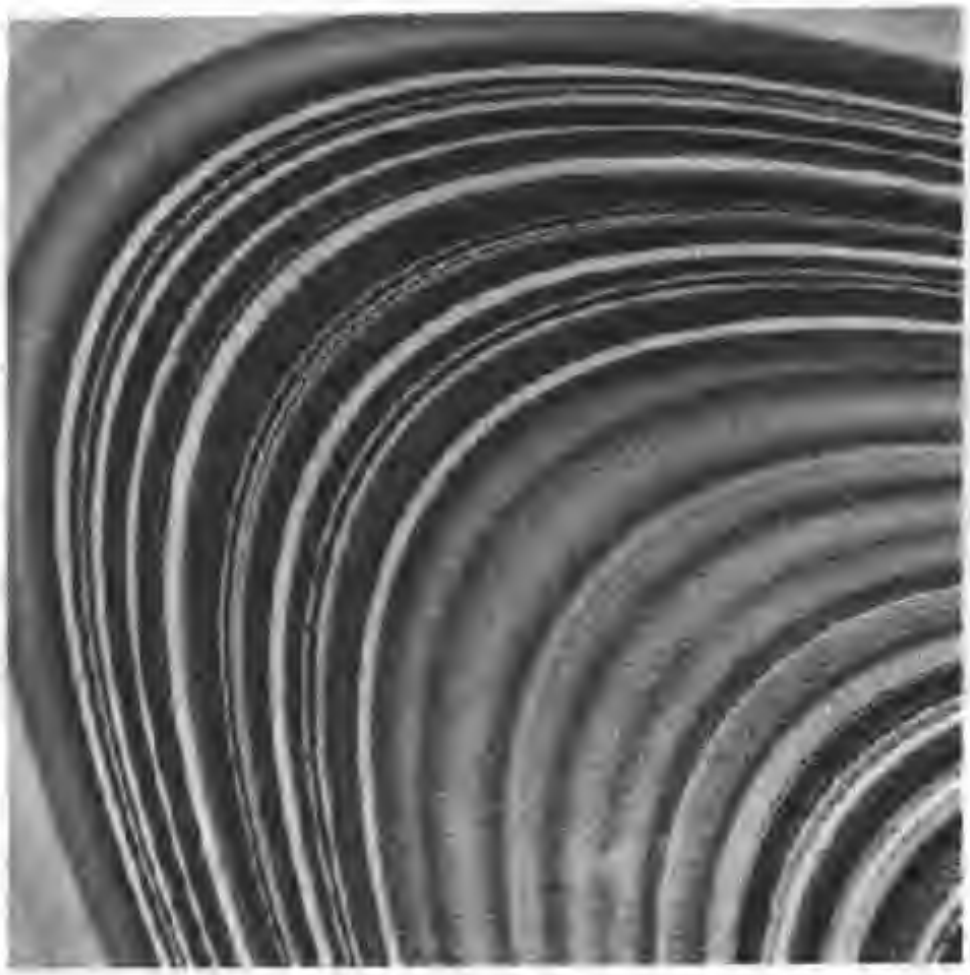


图 8.10　土星光环的局部

是木星的十分之一，是地球磁场强度的 1 000 倍。它的磁轴与自转轴仅差 1°，磁极的方向与地球的磁极方向相反。磁心偏离土星中心 22.5 km，磁球层的分布也较特殊，形状像个大鲸鱼，磁层顶在向着太阳的方向延伸约 10^6 km。

四、土星的卫星

到 2003 年已发现的卫星有 31 颗，其中只有土卫一到土卫七以及土卫十是规则卫星，其他都是不规则形状卫星。如土卫九是一颗直径为 220 km 左右的不规则卫星。卫星中一群与土星的自转方向一致，而另一群是逆行运转。

1955 年发现的土卫六是太阳系中第二大卫星，它比水星和冥王星都大，呈橙红色，有很厚的大气层，大气中有甲烷和分子氢。有人认为，太阳紫外线作用于土卫六高层大气的甲烷，会产生一种比较大而复杂的分子，这些分子可以沉降到土卫六的表面，堆积成有机层，也就是说，在土卫六上可能生存有低级的生命。

第4节　天　王　星

天王星是 1781 年英国的一位音乐教师、天文爱好者，后来伟大的天文学家——威廉·赫歇耳用自制望远镜发现的。天王星离太阳的平均距离约为

2.9×10^9 km，约 19 AU。因为它离地球很远，所以只有在冲日前后，当它的天顶距不很大时才被肉眼勉强看到(视星等约 6.5^m)。

一、天王星的物理特征和运动规律

天王星的直径约 $5.111\ 8\times10^4$ km，是地球直径的 4 倍。天王星的质量为 14.5 $m_\oplus$，平均密度为 1 300 kg/m^3 略大于水的密度。天王星的公转周期是 30 685天(地球日)，大约为 84 个地球年。

天王星的自转很特殊，地面观测由于分辨不清其表面特征，不能精确测出它的自转速度。然而行星探测器精确地测出了天王星的自转周期是 17.2^h。而且它的自转轴几乎就在公转的轨道面上，行星的赤道面与轨道面的交角约 98°，可以说是“躺”在轨道面上自转，像一个孩子躺在地上打滚一样。而且它自转的方向也与众不同，是由东向西转，因此它和金星一样也是太阳系家族的“逆子”。

天王星的表面包围着很厚的大气层，地面观测难以看清。由行星探测器探测得知天王星大气的主要成分是由氢和氦。云层下的天王星的表面还不清楚，只是推测可能有很厚的冰块层。

人们通过射电望远镜观测到天王星也有磁场。1986 年 1 月 24 日，“旅行者 2 号”越过天王星磁场与太阳风相互作用形成的弓形激波区，测得磁层在朝阳面至少延伸到 5.9×10^5 km 高度，其磁尾延伸约 6×10^6 km。天王星磁轴与自转轴夹角约 60°，而且它也有与地球类似的辐射带。

二、天王星的卫星

天王星的卫星中天卫一到天卫五发现较早，是规则卫星(见图 8.11)。它们的轨道都位于天王星的赤道面上，所以卫星的自转轴几乎垂直于行星的轨道面，而且都是逆行的。有 10 个较小的卫星，位于天卫五的内侧，是“旅行者 2 号”于 1986 年 1 月发现的。1997 年 9 月用 5 m 的海尔望远镜又发现了两个最大的天王星卫星。迄今为止，已发现天王星有 24 颗卫星。

三、天王星的光环

天王星光环的发现是一个天赐良机。1977 年 3 月 10 日发生天王星掩食恒星的天象，即从地球上看去，天王星遮掩了后面的一颗恒星。高空和地面的光电测光资料都表明，天王星并未掩星，恒星是被天王星的光环所掩。因此发现了天王星有光环。1986 年 1 月，“旅行者 2 号”证实了天王星至少有 10 个光环。环的总宽度约为 7 000 km，环间间隙很大，环本身很窄，最宽处只有 80～90 km，窄处只有 20 km。光环也是由石头、尘埃颗粒和冰块组成的。

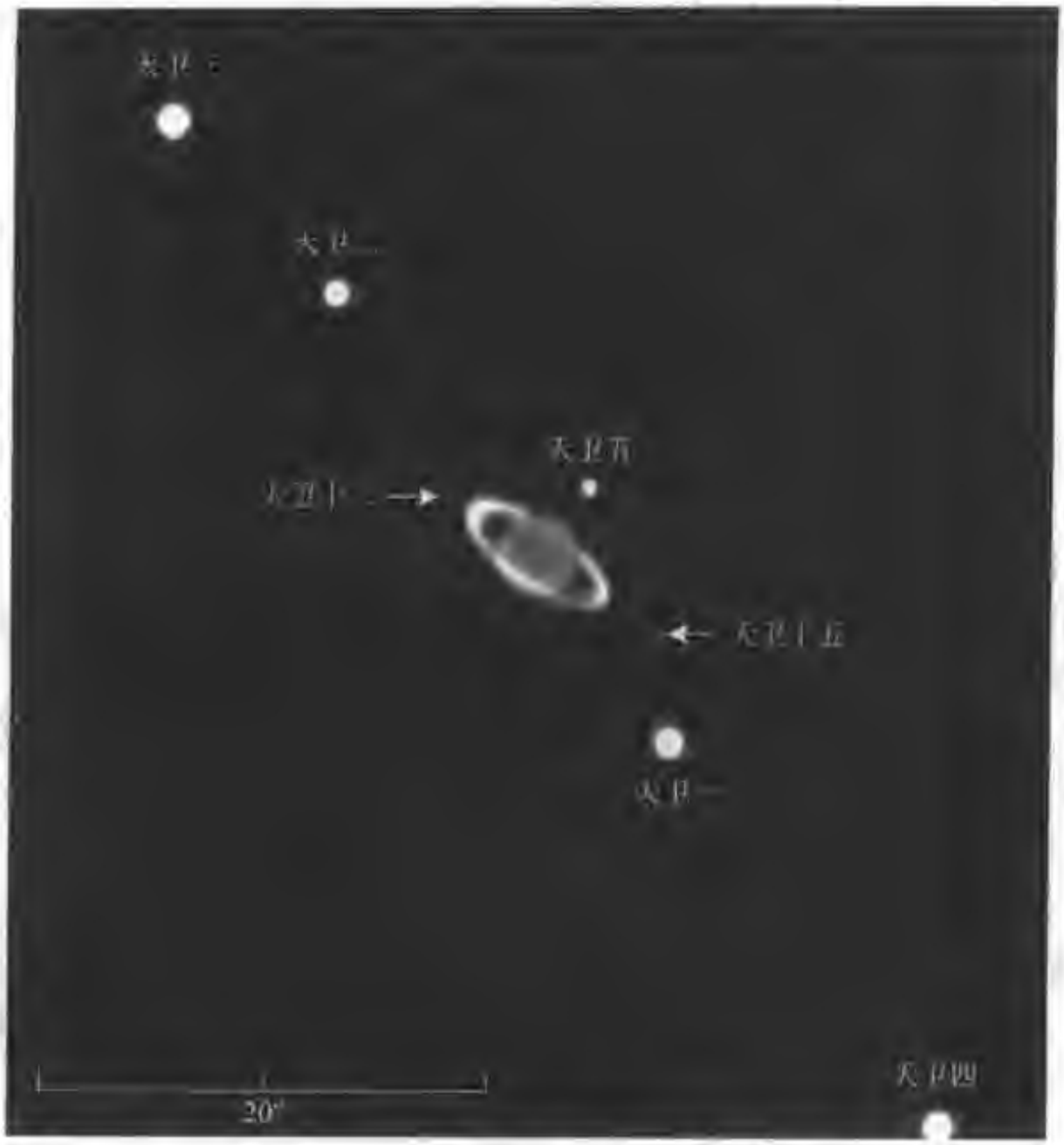


图 8.11　欧南台(ESO)VLT 8 m 望远镜 2002 年 12 月拍摄的天王星(可见有光环)和它的几个卫星(共有 21 颗卫星)

第5节　海　王　星

海王星离太阳比较远，看起来星光比较暗弱，因而在夜空直接用肉眼观察不到海王星，用望远镜观测，它是一颗视星等为 7.84^{m} 的星。

海王星是先由天体力学理论推算出来，后用望远镜寻找发现的。英国剑桥大学刚毕业两年的学生，只有 26 岁的亚当斯于 1845 年 9 月根据天王星的运动规律，算出了这颗未知行星的位置和质量。同年夏季法国的勒威耶也独立计算，确认天王星之外有一颗未知的行星。1846 年他将计算结果报告给德国柏林天文台的台长伽勒，在当夜(9 月 23 日)伽勒按照推算的天区，发现了海王星。

一、海王星的物理特征和运动规律

海王星距离太阳遥远，约有 $4.504\ 3\times10^9$ km，即 30 AU。它的直径为 49 492 km，是地球直径的 3.9 倍，体积是地球的 57 倍。海王星的质量约为 $17.1m_{\oplus}$，平均密度为 1 600 kg/m³。

海王星的绕日公转周期是 6.019×10^4 天(地球日)，约 165 地球年，它的平均自转周期是 0.671 25 天，赤道的自转周期为 16.5 小时，两极的自转比赤道带自转快，周期为 14.2 小时。自转轴与轨道面交角约 65°12′，与地球差不多，因此海王星上也应有四季变化。每个季节长达 41 个地球年。

人们用望远镜观测海王星，看到它是个蓝绿色的圆球状天体。它的反射率较高，表明它有浓密的大气层。大气的主要成分为甲烷和氢。

"旅行者 2 号"探测器在 1989 年 8 月 24 日抵达离海王星只有 4 827 km 的高空。在发回的照片上，可观察到海王星的大气云层的高速流动，风暴接连不断。在大气层中有一些亮斑和暗斑，还有一些类似于木星大红斑的"大黑斑"。大黑斑是逆时针方向运动的气团。大黑斑的南部还伴有明亮的白斑(参见图 8.12)。

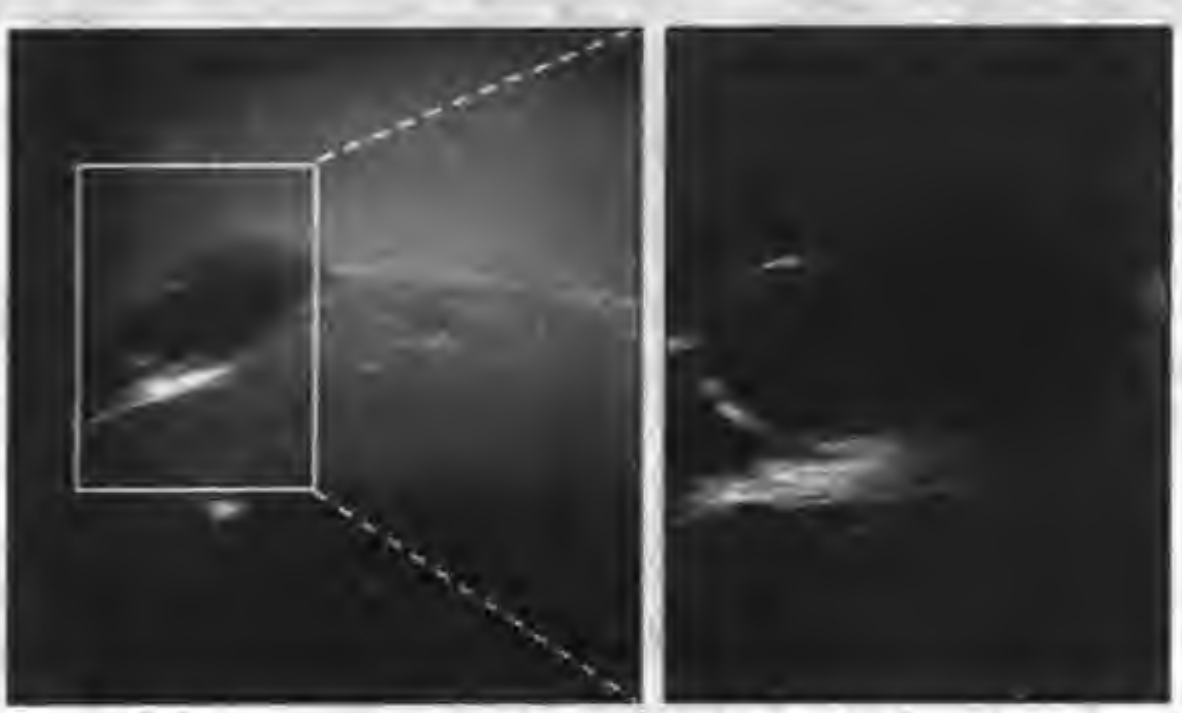


图 8.12　旅行者 2 号拍摄到的海王星大暗斑—大风暴

"旅行者 2 号"探测到海王星的磁场与天王星相似，磁轴相对于自转轴倾斜 46°，偏离行星中心(参见图 8.13)。

二、海王星的卫星

现已发现海王星有 11 颗卫星。海卫一比月球大，直径为 5 000 km，是逆行的，质量约为 $2\ m_{月}$。海卫二比海卫一小，它是顺行的，其轨道偏心率比太阳系所



图 8.13　木星、土星、地球、天王星与海王星的磁场的磁轴(Magnetic axis)与自转轴(Rotation axis)的交角的比较

有卫星的都大，周期近一个地球年。这两颗卫星都是不规则卫星。

1980 年 8 月 20 日由海王星掩星观测确认海王星也有光环。“旅行者 2 号”发回的照片清楚地展示出海王星有 5 道光环，有的较完整，有的残缺不全。

第 6 节　冥　王　星

1930 年 3 月 21 日美国洛威耳天文台的 24 岁的青年汤博用照相方法发现了冥王星。冥王星是目前离太阳最远的大行星，距离为 $5.913\ 52\times10^{9}$ km，是日地距离的 40 倍左右，所以观测到的冥王星很暗，它的视星等是 15.12^{m}。

一、冥王星的物理特征与运动规律

冥王星的直径是 2 320 km，其体积仅为地球的 1%，比水星还小。它的质量仅是地球质量的 0.24%。

冥王星的绕日公转周期是 9.08×10^{4} 天(地球日)，它的自转周期是 6.387 2 天。它也是太阳家族的一个“逆子”，其自转方向与公转方向相反，是从东向

西转。

冥王星轨道偏心率较大，其近日点附近的一段轨道在海王星轨道之内。1989 年，冥王星过近日点，在 1999 年以前，它离太阳的距离比海王星还近。

冥王星的轨道面与众不同，其他八个大行星的运动轨道都基本上在地球轨道面附近，轨道面与黄道面的交角在 7°以内，但是，冥王星的轨道面与地球轨道面（黄道面）交角为 17°。

1988 年 6 月 9 日的一次冥王星掩星观测，发现冥王星存在着大气层。其大气层分为两层，外层透明，内层不透明。冥王星大气层的发现曾在国际上引起震动，被视为 20 世纪 80 年代太阳系重大发现之一。

二、冥王星的卫星

冥王星有一个卫星（见图 8.14）。冥卫的质量约为冥王星的 1/10，直径则为冥王星的一半以上，距冥王星仅为 1.9×10^4 km。据此，有人将这两个天体视为“双行星”。有趣的是，冥卫自转周期与绕冥王星公转周期以及冥王星自转周期三者相同。这种“三重同步”现象在太阳系中是独一无二的。



图 8.14　冥王星和它的卫星

【例题 1】 在火星大冲那天，火星升起的时间大约是几点？

解答：火星冲日，夜里 12 点太阳在下中天时火星在上中天。所以在火星冲日那天，火星在大约 18 点钟升起。

【例题 2】 在火星大冲时，估计火星的轨道速度 v_M。已知地球的平均轨道速度是 $v_1=29.8$ km/s，地球和火星的轨道偏心率分别是 $e_1=0.017$ 和 $e_2=0.093$，火星到太阳的平均距离 $a_2=1.524$ AU。

解答：利用开普勒第三定律（$T^2/a^3=$常数），可以求出圆轨道速度 $v^2/a=$常数，可以判断轨道速度与轨道半长径成反比，即火星的轨道速度比地球的轨道速度小。在火星大冲时是火星的近日点附近，设近日点速度为 v_{per}，近日点距离为 $a(1-e)$。已知 $\frac{v_{circ}^2}{v_1^2}=\frac{1}{a_2}$ 由开普勒第二定律，$\frac{1}{2}v_{per}a(1-e)=\frac{\pi ab}{T}$，式中的 a 为半长轴，半短轴 $b=a(1-e)^{1/2}$。

所以 $v_M = v_{per} = 2\frac{\pi a}{T}(1-e^2)^{1/2} = \frac{v_{circ}}{(1-e)}(1-e)^{1/2} = v_1\sqrt{\frac{1+e}{1-e}}\frac{1}{\sqrt{a_2}} \approx 26.5\ \mathrm{km/s}$.

【例题 3】 火星在 1975 年大冲时的视星等 $m_1 = -1.6^m$，距离太阳的距离为 $r_1 = 1.55$ AU；1982 年大冲时火星离太阳的距离为 $r_2 = 1.64$ AU。求火星在 1982 年大冲时的视星等。

解答：在火星大冲时火星离地球的距离 $\Delta = r - 1$，观测到的流量密度与火星到地球的距离和到太阳的距离有关，$F \propto 1/r^2\Delta^2$，$m_1 - m_2 = -2.5\lg[r_2^2(r_2-1)^2/r_1^2(r_1-1)^2]$

$$m_2 - m_1 + 5\lg[r_2(r_2-1)/r_1(r_1-1)] = 1.1^m$$

所以，火星在 1982 年大冲时的视星等为 -1.1^m。

【例题 4】 2003 年 8 月 28 日 UT 17^h56^m 发生了火星大冲，下一次大冲发生在 2018 年，计算那次大冲的具体日期。

解答：利用火星的会合周期公式：

$$1/T_S = 1/T_E - 1/T_M$$

$$T_S = T_E \times T_M/(T_M - T_E) = 779.95^d$$

此处，T_E 和 T_M 分别是地球与火星公转的恒星周期。所以火星的会合周期是约 780 天，即相隔 780 天发生一次冲。如果是在 2018 年 8 月 28 日发生大冲，则

$$15 \times 365 + 4 = 5\ 479\ 日$$

$$5\ 479/779.95 = 7.025$$

这意味着 2018 年 8 月 28 日是 7 个火星会合周期之后，确切地说，下次大冲应当是在 2018 年 8 月 28 日之前 $5\ 479 - 7 \times 779.95 = 19.35$ 天，即前 19.35 天，所以是 2018 年 8 月 9 日。



习 题

1. 在火星上的居民(假若存在的话)看太阳，太阳圆面张成 22.7′的角。已知太阳的线半径等于 109 倍地球半径，求太阳光到达火星所经历的时间。

2. 火星是否每年都能接近地球到最小距离，也就是说，能否每一年有一次大冲？

3. 想像火星上的“居民”看地球像金星那样，时而是昏星，时而是晨星。问每经过多长时间，在火星上就能看见地球作为昏星出现一次？

4. 观测者指出，某行星每隔 665.25 天发生一次冲。问它距离太阳多少天文单位？

5. 火星的两次冲的时间间隔是多少？什么时候是从地球上看火星最好的时间？在火星上曾有过一次洪水泛滥的证据是什么？今日在火星上有水吗？

6. 为什么有人认为在火星上曾有智慧生物开凿了运河？假如在火星的夏季，你要去访问火星的南半球，请描述一下当时你面对的气候条件。并说明火星两极的季节差异。

7. 如果人类生活在火星，什么环境因素应当考虑？火星可以提供什么资源？哪种资源必须来自地球？火星大气的主要成分是二氧化碳，为什么没有温

室效应来温暖它的表面？比较和对照火星、金星和地球大气的演化。

8. 验证火星的表面引力是地球表面引力的 40%。计算从火星上看地球的会合周期，从火星上看，什么是地球的大距？（假设两个行星的轨道是圆形的。）

9. 土星环的物质绕土星的赤道以 1 500 km/h 的速度流动，问它环绕土星一周需要多少时间？

10. 若土星的表面温度是 97 K，土星辐射的能量比它从太阳获得的能量大 3 倍多，利用斯特芬定律计算，如果没有任何内部热源的情况下土星的表面温度应该是多少。

11. 土星的卫星——太阳神的表面引力大约是地球的七分之一，问太阳神的逃逸速度是多少？

12. 木星的卫星艾得的轨道半径是 6 个木星半径，运行一周需要 42 小时。如果这个卫星与木星自转(10 小时)同步，求那时它的轨道半径？

13. 你估计会在木星云的上层看到日全食吗？

14. 天王星与海王星上有四季吗？为什么？

15. 从海王星看太阳的角直径是多少？你估计在海王星上能看到日食吗？

16. 飞向冥王星的宇宙飞船的速度为 0.5 km/s，从地球到冥王星往返旅行需要多少时间(距离约 40 AU)？

第九章

太阳系的小天体

在太阳系大家族中除了九大行星以外，还有众多的小行星、彗星和流星体。它们相对大行星而言是一些“小不点”。别看它们是小天体，它们对于地球和人类是个巨大的威胁，因为如果它们越轨穿越到地球轨道上来与地球相撞，就会造成巨大灾难。

第1节 小 行 星

在太阳系大家族中，小行星是体积比较小的行星。最大的小行星是谷神星，直径为 770 km。大多数小行星的形状是不规则的，只有少数小行星是球形，如灶神星。小行星表面的反照率各不相同，说明它们的组成物质是不同的。反光能力大的是石质小行星，反光能力差的是碳质小行星。有些小行星还有一个甚至几个卫星。

一、小行星的运行轨道

绝大多数小行星分布在火星和木星轨道之间(2.17～3.64 AU)的带区(图 9.1)。带内小行星的分布是不均匀的，有些区域密集，有些区域稀疏。个别小行星，因受外界的干扰，不在小行星带内运动，而跑到外边。有的还窜到地球轨道和金星轨道以内，对地球构成威胁。这些近地小行星称为阿波罗体。

小行星轨道的偏心率和倾角的平均值为 $e=0.15$，$i=9.4°$，比大行星的偏心率大。已发现的小行星都绕日顺向公转。由于小行星有自转运动，而且由于它的形状不规则，各处反射太阳光的能力不同，所以人们会观测到小行星的亮度有周期性变化。小行星的自转周期一般为 2～16 小时，自转轴的取向无规律。

2004 年 2 月 14 日，美国宇航局发射的 NEAR 宇宙飞船成功地进入围绕爱神小行星运动的轨道，成为第一颗小行星的人造卫星，并获得了大量清晰的爱神星图片。爱神星(433 Eros)于 1898 年 8 月 13 日由德国天文学家威特发现，轨道半径为 1.46 AU，公转周期为 1.75 年，自转周期为 5 小时 16 分，偏心率为 0.22。距地球最近时为 0.13 AU，大小为 33×13×13 km。

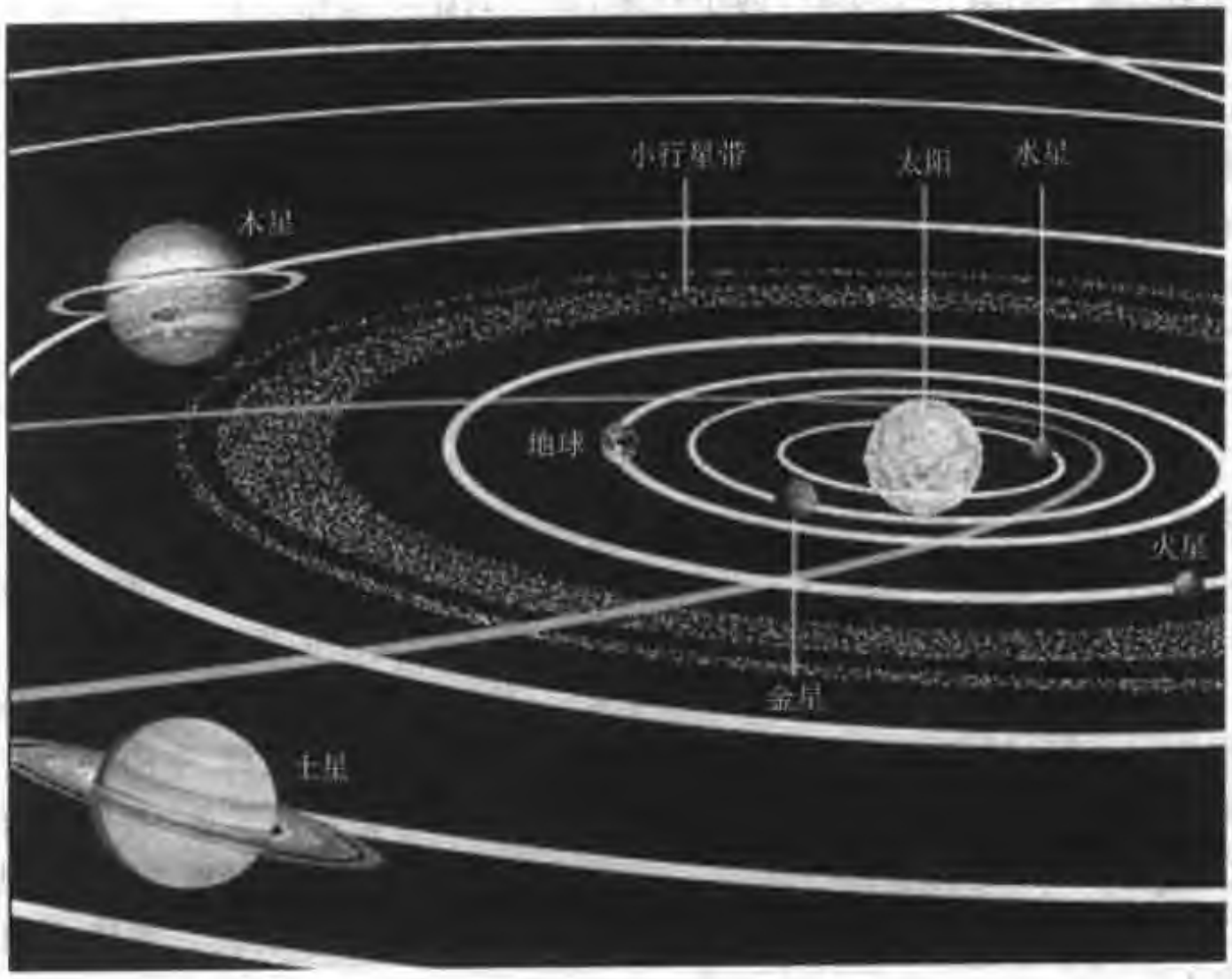


图 9.1　在火星与木星之间的小行星带



图 9.2　爱神星(433 Eros)

二、小行星会撞地球吗

20 世纪中就发生过多次近地小行星威胁地球安全的事件。例如 1937 年

一颗名为赫米斯直径 1.5 km 的小行星，逼近到距离地球只有 3×10^5 km，从地球和月球之间通过，曾给地球造成了可怕的威胁。1968 年 6 月，直径约 1 km、质量为 20 亿吨的小行星伊卡鲁斯，只要它稍许偏离原有的运行轨道，就可能进入与地球相碰撞的路线。这颗小行星以 9 km/s 的速度接近地球，如果它的轨道真的发生偏离与地球相撞，那将是件非常可怕的事情。又如有一颗近地小行星于 1994 年 10 月掠过地球和地球的距离只有 105 000 km。2002 年一颗编号为 2002MN 的小行星比 1994 年掠地小行星还大，掠地时的速度超过 10 km/s。直径约为 50～120 m 的这些近地小行星对地球的安全构成了威胁。

地球上墨西哥湾的大陨石坑，很可能就是过去小行星撞击地球的痕迹。6 500万年前恐龙惨遭灭绝的悲剧，也可能是这颗直径约 10 km 左右的小行星撞击地球的结果。这说明小行星是有可能撞击地球的，必须加强监测。

我国国家天文台，紫金山天文台等有专门小组，每天都进行搜索小行星的观测，并监测和研究已发现的近地小行星。国际上组织了地面、空间联合监测小行星计划，并正进行着联合巡天搜寻小行星，及时由网络联系，共同进行观测分析研究，预报它们的运行轨道。一旦发现某一颗小行星对地球构成威胁，天文学家就会提前准确地做出预报。到时可以用导弹提前把它摧毁在地球之外！

第 2 节 彗 星

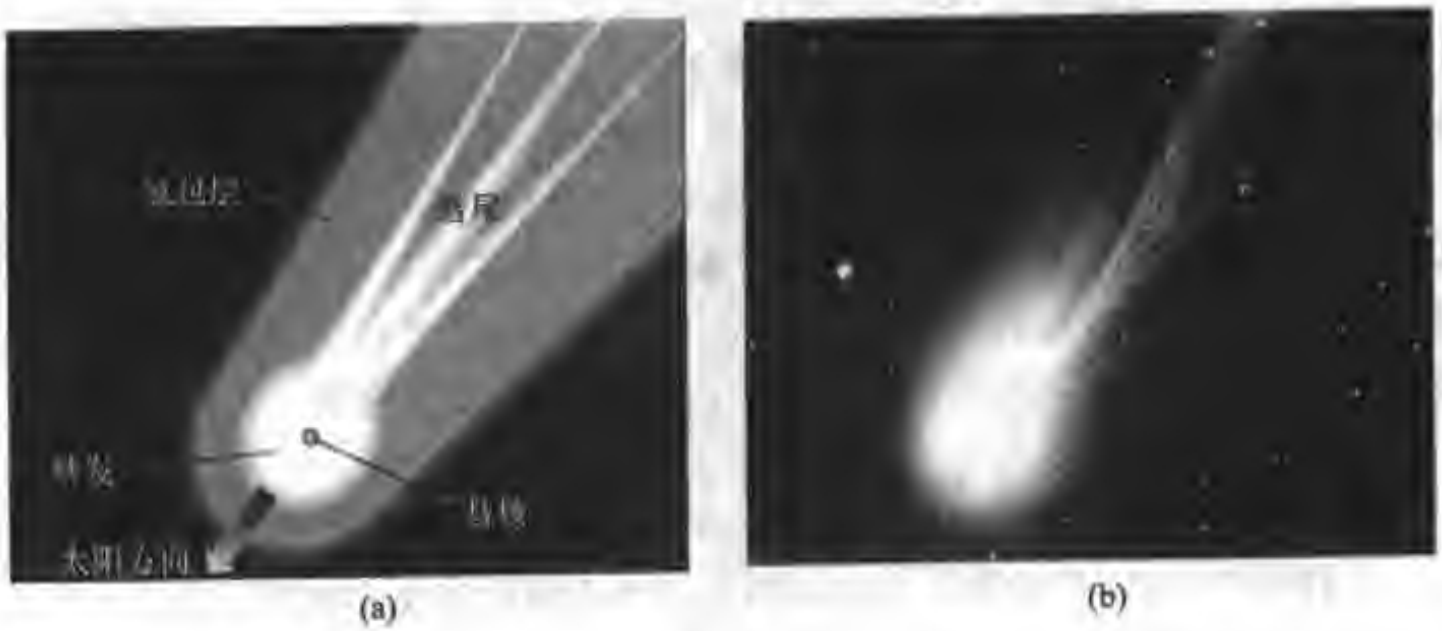
在绚丽的天穹，有时看到拖着长尾巴的天体，这就是彗星。古人把它叫做扫帚星。有人把彗星看作是不祥之兆，这是不对的，没有任何道理。

当彗星离太阳还较远的时候，看起来，彗星只是个云雾状的小斑点，而当它过近日点时，由于受太阳的辐射压和太阳风的作用把蒸发出来的气体推向背离太阳的后方，形成了彗尾，于是人们常看到长尾天使——彗星。

一、彗星的形态和结构

彗星主要由冰块、尘埃组成，当它逐渐接近太阳时，本身的冰雪、尘埃体被蒸发、升华而形成彗头和彗发。彗头的中央部分叫彗核，外面包围着彗头的叫彗发。在彗发的外面还包围着氢原子云，称为彗云或氢云。如图 9.3 所示。

当彗星接近太阳时，太阳的辐射压和太阳风把从彗星蒸发出来的气体推向背离太阳的后方，形成一条或数条彗尾。彗尾的形状多种多样，有的细而长，有的短而粗，有的呈扁形，有的呈针叶状。细长的彗尾，主要由电离的离子、气体分子组成，叫离子彗尾，这种彗尾呈蓝色。短粗而且弯曲的彗尾，主要由尘埃粒子组成，叫



(a)　　(b)

图 9.3

(a)彗星的结构(彗头和彗发(彗头中央是彗核)与氢的原子云包层;彗尾背向太阳方向);(b)著名的哈雷彗星(1986 年离近日点前 1 个月拍摄)

尘埃彗尾,这种彗尾呈现黄褐色。有的彗星两种彗尾兼而有之,如海尔-波普彗星。

彗星的体积庞大,但质量很小,从几十亿吨到数亿亿吨,平均密度约 1 g/cm^3。彗核直径一般为几百米到十几千米。彗星的物质主要集中在彗核。彗发延伸在彗头之外长度不同,有些彗尾长达数亿千米之遥。如 1843 Ⅰ彗星的尾巴长达 3.2 亿 km,超过火星公转轨道的半径。

二、彗星的化学成分

据彗星的光谱观测分析,可知彗星物质的化学成分主要是水(H_2O)、氨(NH_3)、甲烷(CH_4)、氰(C_2N_2)、氮(N_2)、二氧化碳(CO_2)等物质。近年来通过射电观测发现,彗星上还存在着氰化氢(HCN)和乙腈(CH_3CN)有机化合物的分子和多种离子。这说明彗星上还保存着太阳系形成时期的有机分子,有着生命的遗迹。冰水一类物质是构成彗星的主要成分,约占 80%。彗星每经过一次近日点,由于被太阳蒸发及本身升华和扩散,要损失 0.1%～1%的质量,加之向外有喷流效应,其上的物质损失很快。

三、彗星的轨道

彗星的轨道是拉得很长的椭圆,大多数彗星的远日点在冥王星之外,甚至在 50 000 AU 以外。那些小椭圆轨道的彗星的周期较短,周期短于 200 年的彗星叫短周期彗星。著名的哈雷彗星的轨道周期是 75 年,中国前南京紫金山天文台台长张玉哲教授是唯一两次(1910 年,1986 年)目睹哈雷彗星并研究卓著的中国天文学家。

从彗核结构分析来看，彗核是在很低的温度下形成的，而且需始终保持低温才能继续存在。1950 年荷兰天文学家奥尔特(J. H. Oort)根据 19 颗长周期彗星轨道半长径分布统计，推测出在太阳系边缘区，海王星轨道之外，在 2 万～10 万 AU之间有一个长周期彗星发源地，称为**“奥尔特云”**。1951 年美籍荷兰天文学家柯伊伯提出在海王星外存在一个拥有几亿到几百亿颗彗星的彗星带叫做**“柯伊伯带”**。关于彗星的来源，也有人认为可能来自类木行星的光环，有的则认为彗星是大行星或卫星上火山爆发抛出的物质，目前尚无定论。

四、彗木相撞事件

1994 年 7 月 16 日发生了彗木相撞的震撼全球的天文事件(见图 9.4)。“苏梅克列维 9 号”彗星与木星撞击，事先世界各国的天文学家相继做了预报，其中中国紫金山天文台的预报时间与观测到的碰撞时间仅相差 3 分钟。



图 9.4 “苏梅克-列维 9 号”彗星 1994 年 7 月 16 日与木星相撞

“苏梅克列维 9 号”彗星是 1993 年 4 月 24 日由美国天文学家苏梅克夫妇和天文爱好者列维一起发现的。此彗星样子很怪，彗核分裂为 21 块，一字排开，像

一串糖葫芦。1994 年 7 月 16 日 20 点 15 分“苏梅克列维 9 号”彗星的第一块碎片，以 60 km/s 的速度撞到木星大红斑的东南方，即南纬 44°的地方。此后 5 天半内，其他的 20 块碎片像一连串的炮弹相继地向木星轰击。

天文学家测定出，第一块碎片撞到木星时产生的能量有 2 000 亿吨 TNT 当量(4.2×10^{15} J)，其释放的能量相当于 1945 年扔在广岛的原子弹的千万倍。撞击时的温度高达 3 万度。在木星大气中撞出的黑斑状窟窿直径达 1 000 km。而最大的一块彗核碰撞产生的能量有 6 万亿吨 TNT 当量，相当于 3 亿颗原子弹同时爆炸，撞出的黑窟窿的面积是地球表面积的 80%。在这 130 小时之中在木星的上空就接连爆炸了相当于 20 亿颗原子弹，令人惊心动魄！

五、彗星会不会与地球相撞

事实上彗星曾经与地球相撞过，震惊全球的“通古斯卡大爆炸”事件，虽然目前尚未查明，但很可能是彗星撞击地球的一个例证。1908 年 6 月 30 日，一次巨大的爆炸震撼了西伯利亚通古斯卡河沿岸的原始森林。这天早晨大约七时左右，在东方突然出现一个耀眼的巨大火球，发出劈里啪啦的声音，以雷霆万钧之势冲向地球，在密林上空猛烈地爆炸开来，一团巨大的火柱拔地而起，直冲云霄，随即出现一股黑色的蘑菇云。大火吞噬了方圆 60 km 的大片原始森林，爆炸的冲击波把 60 km 以外的人都击昏在地。在 400 km 的范围内，强劲的暴风席卷了屋顶，摧倒了墙壁。一片丛林株株倒地(图 9.5)。西伯利亚铁路的一段铁轨



图 9.5　1908 年 6 月 30 日发生在西伯利亚通古斯卡河沿岸原始森林的彗星撞地球事件

翘起，并猛烈抖动。幸亏这次惊天动地的爆炸的地点在北纬 65°55′，东经 101°57′的森林沼泽地带，才没有多少人身伤亡。事后科学家在现场发现有三个直径大约 90～200 m 的大陨坑，但没有找到，也没挖出任何陨石或碎片，只找到微小而熔凝的金属弹丸嵌入地里。一些科学家认为，那次爆炸是由彗星的彗头撞击地球"肇事"引起的，估计该彗星的直径为几公里，重量约为九十万吨。也有一些天文学家认为是特大陨星，或许是直径数百米的小行星落地后，其残骸已钻到地深处。迄今为止，还没有满意的解释。

再举一例，美国天文学家弗兰克等人在 1981 年从"动力学探测者 1 号"卫星在地球高空拍到的紫外图像上，发现一些暗斑，地球大气有洞，经过分析确认是小彗星进入地球大气层发生瓦解和蒸发形成的水汽云所致。

关于彗星和地球的相撞问题，美国的化学家尤里（曾因发现重氢获 1934 年诺贝尔奖金）和英国的天文学家霍伊尔做了认真研究。他们两位都认为，地球和彗星相撞的可能性是不容怀疑的。平均每年出现彗星 10 颗左右，其中约有几颗新彗星被发现（有些暗而没被发现），按碰撞的概率是 40 亿分之一计算，地球已诞生了 46 亿年，那么地球与彗星的碰撞遭遇至少已经有 500 次以上了。以后也还会发生碰撞，但是，人类利用高科技加强检测定会有能力，有办法阻止彗星的撞击，避免它给地球带来的太空灾难。

第 3 节 流星和流星雨

一、偶发流星与火流星

在夜空中看到的单个出现的流星，在时间和方向上没有什么周期性和规律，这种流星叫作偶发流星，中国的民间通常叫它"贼星"。火流星是偶发流星的一种，当它出现时，非常明亮，像一条巨大的火龙，闪闪发光飞驰而过，有的还伴随有爆炸声。

为什么会出现火流星呢？原来，在太阳系中除了大行星和它们的卫星及数十亿颗的小行星、彗星以外，还有无数的流星体和密集的流星体群。它们是由行星际空间的尘埃、彗星碎片、冰块、颗粒组成，在太阳强大的吸引力作用下也围绕太阳运动。大多数的流星体、流星群体的轨道不是圆形，而是拉得很扁的椭圆形。流星体大约以 42 km/s 的速度绕日飞驰，它们绕日运行的过程中，有时会接近大行星的轨道，每当接近大行星时，便受到摄动，从而如同孤雁出群一样脱离了原来的流星体的轨道。当它们闯入地球大气约 80 km 到 115 km 的高空时与地球大气会发生剧烈地摩擦、灼热熔化，产生耀眼的光亮。质量大的流星体在摩擦中爆炸燃烧，这时人们会看到一个明亮的大火球划破夜空，这就是**火流星**。

一天之中，黎明看到的流星数目比傍晚看到的流星数目多好几倍。这与地球的自转和公转运动的方向有关。假如地球不运动的话，流星从四面八方均匀地进入地球大气，则在地球上的任何地点将看到大体同样数目的**偶发流星**。然而，地球绕日的公转运动是自西向东转，平均速度约 30 km/s，它的自转也是自西向东转，约 0.46 km/s。流星体也沿着椭圆的轨道绕日运转，其速度约 42 km/s。这些流星体相对于地球而言，其分布是四面八方全有。若是从地球转动的后面追上地球，进入大气，流星体相对地球的速度为两个速度相减，大约是 11.5 km/s。然而当流星体迎头面向地球飞驰面来撞击的速度，则是地球的公转速度和流星体的速度之和，即大约 72.5 km/s。速度大的流星体摩擦生热发光也就强些，因而也就容易被观察到。

偶发流星在一年之中出现的情况怎样呢？根据观测统计，在北半球每年 4 月出现流星最少，9 月出现的最多。也就是说，一年之中，秋天看到的流星比春天多得多。这又什么原因呢？这与地球公转及流星体物质数目在它的轨道上的分布不均匀性有关，确切的原因，目前还不清楚。

二、流星物质的化学组成

流星物质进入地球大气，大约在 80～115 km 的高空开始摩擦、燃烧、发光，在 50～70 km 的地方烧尽化为乌有，在这期间，流星的速度达到 12～72 km/s。天文观测研究表明，进入地球大气的流星体的颗粒大小不一，小的如细砂、尘埃，大的像篮球或更大，总的来看，小颗粒的流星体比大颗粒多得多。据统计，闯入地球大气中的流星体的大小与它们的质量成正比。一天之内，可能有数十亿甚至数百亿颗流星体进入地球大气，它们撒在地球的海洋、陆地和田野里。

一般的流星体，密度都极低，大约是水的密度的 1/20。流星体是一种多孔性的松散结构的固体。许多流星体通过大气时在很低的压力下就破碎，这种现象正说明它们是由易碎的和多孔的松脆物质所组成的。

根据流星光谱的资料，可以认证出流星中有氢、氮、氧、钠、镁、铝、钙、铬、镍等的中性原子及镁、硅、钙、铁等的电离原子。速度不同的流星含的原子和电离原子也有差异。

三、流星雨

当密集的流星群体闯入地球大气时，人们看到来自天空某一点（确切说是从某一区域）的一群流星向四方辐射出来，犹如节日放礼花，绚丽多彩，这就是流星雨，或叫群发流星。天空的这一区域称做**流星雨的辐射点**。这些流星群体以相同的速度冲进地球大气，与地球的高层大气摩擦，生热发光，形成壮观的流星雨。

由于人的眼睛有透射效应，会把遥远的平行运动的流星，看作是从一个辐射点发出来的。这如同我们日常看到两条平行的铁轨，似乎在遥远的地方汇聚在一点一样。辐射点在哪个星座，就用哪个星座的名称来称呼这个流星雨。如辐射点在英仙座的叫英仙流星雨，辐射点在天琴座的叫天琴流星雨，辐射点在狮子座的流星雨叫狮子流星雨(图 9.6)。



图 9.6　1998 年 11 月 17 日天文爱好者何景阳
在兴隆站拍摄的狮子座流星雨

流星雨的来源是彗星碎裂和瓦解后的残骸，可以说流星雨是彗星的儿女。为什么这样说呢？我们知道，当彗星接近太阳时，由于太阳的高温、辐射压和太阳风的作用，彗星的冰物质蒸发升华，并抛撒出来气体和尘埃颗粒。彗星抛撒的尘埃颗粒或残片由于速度和方向都不同，加之互相碰撞，则形成很宽的椭圆轨道的流星群体区。当地球穿行流星群体的轨道区时，流星群体和地球高层大气发生剧烈摩擦、爆炸而发光，产生流星雨现象。这种流星雨每年地球穿越它们的轨道时都会出现。表 9.1 列出了每年可以观测到的主要的流星雨的情况。

表 9.1　每年可观测的主要流星雨

流星雨名称	活动期 月-日～月-日	最大 ZHR	辐射点 赤径/(°)	赤纬/(°)	彗星母体
巨蟹 δ	01-01～01-24	4	130	+20	
室女	01-25～04-15	5	195	−4	
狮子 δ	02-15～03-10	2	168	+16	
天琴	04-16～04-25	15	271	+34	Thather 彗星(18611)

续表

流星雨名称	活动期 月-日～月-日	最大 ZHR	辐射点 赤经/(°)	赤纬/(°)	彗星母体
宝瓶 η	04-19～05-28	50	336	−2	Halley 彗星
飞马	06-07～08-24	3	340	+15	
宝瓶 δ	06-12～08-19	20	339	−1	
英仙	07-17～08-24	100	46	+58	Swit-Tuttle 彗星(1862Ⅲ)
天鹅 κ	08-03～08-25	3	286	+59	
御夫 α	08-25～09-05	10	159	+84	
御夫 δ	09-05～10-05	6	166	+60	
猎户	10-02～11-07	20	95	+16	Halley 彗星
天龙	10-06～10-10	变化	262	+54	Giacobini-Zinner 彗星
双子 ε	10-14～10-27	3	100	+27	
金牛	10-01～11-25	5	52	+13	Encke 彗星
猎户	10-02～11-25	20	95	+16	
狮子	11-14～11-21	变化	153	+22	Temper-Tuttle 彗星(188661)
麒麟 α	11-15～11-25	5	117	−6	
仙女	11-15～11-20	变化	25	+43	Biela 彗星
双子	12-07～12-17	110	112	+33	Phaethon 彗星
小熊	12-17～12-26	10	217	+76	Tuttle 彗星

第4节　陨石和陨石雨

太阳系里一些高速运行的较大流星体或小行星，受大行星的摄动，脱离原轨道而闯入地球大气与大气摩擦、爆炸，燃烧未烬的残余部分坠落到地球表面上叫作陨石。由于它在地球大气中运行极快，速度高达 200 km/s，和大气的摩擦，产生出约一两千度甚至上万度的温度，使流星体表面熔化和汽化，并发出强光。由于流星体高速飞行过程中，后方处于真空状态，前方气体向后压缩，会产生较大的啸声，于是人们听到震耳的轰隆巨响。有的大陨石在下落过程中发生爆裂，分裂成许多小块，一齐飞流直下，宛如暴雨、冰雹一般，人们称之为陨石雨。

一、陨石、陨冰和陨石雨事件

1947 年 2 月 12 日上午 10 时左右，在海参崴以北的锡霍特·阿林山区，突然出现一个像满月那样大小的火球，同时发出轰隆巨鸣，自北向南以极快的速度飞驰而去，接着发生了爆裂，一块大陨石坠落在地。事后考察发现了大约 200 多

个大、小坑穴，大的直径达 20 m，小的在 1 m 以下，分布在 1.6 km^2 的范围内，这些坑穴是大陨石爆裂后散落到地面上造成的。这些陨落的陨石是铁质的，也叫铁陨，总重量大约 3.5×10^4 kg 左右。

1959 年 4 月 7 日夜晚，前捷克斯洛伐克的昂德廖菲天文台正在从事流星的观测，突然一块陨石从天而降，陨石落下的路线被天文台的工作人员拍摄下来，因此，准确地求出了这次陨石下落的速度和方向。计算表明陨石在地球大气层以外的运行轨道和小行星的轨道一样，也是拉扁的椭圆轨道。

1970 年 1 月 3 日，在美国中部俄克拉荷马州的北部，人们看到有一个比满月还亮的火球从天空而降，向东南方向落下。冲击波的啸声在 100 km^2 的范围内都能听到。监测网的四个观测站拍摄到了大火球的照片，并从中推算出火球冲入地球大气层之前的速度是 14.2 km/s；火球最高点的高度是 86 km。陨石坠落的地点在罗斯特西底东部。1 月 9 日果然在该地找到了陨石。

在我国吉林地区，1976 年 3 月 8 日发生了一场陨石雨。这天下午 3 时许，有一颗陨星以每秒大约十几公里的速度冲入地球大气层，与空气剧烈摩擦，顷刻间出现了一个耀眼的大火球，火球拖着一束光带，夹杂着翻滚的浓烟，急驰而降。下落过程中多次爆炸、崩裂。其中最大的一个火球飞行到吉林市北郊金珠地区上空约一二十公里的高空时，又一次产生猛烈的爆炸、崩裂并发出巨响，像闷雷般的隆隆回声在天空中回荡达四五分钟之久。大火球爆破后，又冲出三个火球，继续爆裂，碎石散片四处飞溅，陨浇如雨。这次陨石雨的坠落范围有 400～500 km^2。科学家们收集到 100 多块陨石，总重量在 2.6×10^3 kg 以上，其中最大的一块陨石重达 1 770 kg(图 9.7)，是目前世界上最大的石陨石。



图 9.7

1997 年 2 月 15 日深夜发生的陨石雨降落在山东省鄄城县董口乡。专家认定这是一个在高空自东向西平行飞行的流星体，直径大约在半米左右，它以

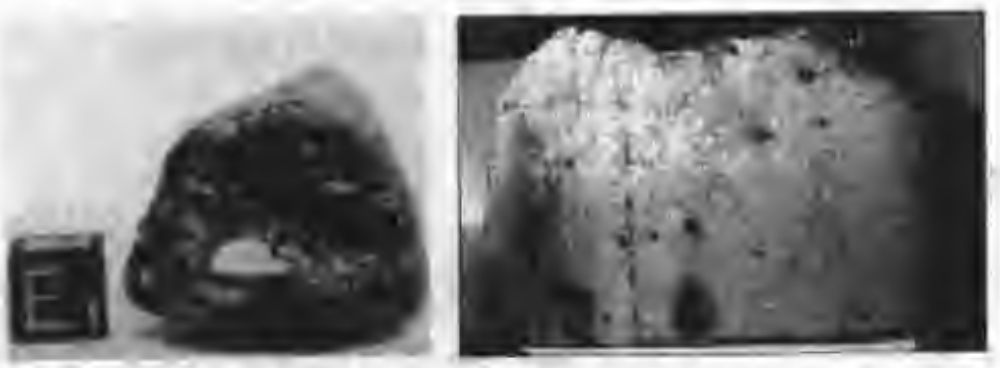
200 km/s 的速度冲入地球大气层，在大气层先后发生过两次爆裂，爆裂后的陨石块降落在大约 15 km^2 的椭圆形地带，这是罕见的陨石雨。

一次奇特的陨冰事件发生在中国无锡市，1983 年 4 月 11 日中午，突然从天空降落一个半米左右的大冰块，它呼啸而下，擦碰着一根电线杆，随即"砰"的一声巨响，顿时电线杆左右摇晃。只见大大小小的冰块满地都是，其颜色是灰白相间。有人认为是"罕见的大冰雹"。但据天气考查表明，当天的天气没有形成冰雹的客观条件，也没有飞机洒冰块的事情。当研究了散落的碎冰之后，证明是流星体闯入地球大气，发生摩擦、生热汽化、爆裂后剩下的冰块。此不速之客就是"陨冰"。

二、陨石的化学成分与分类

陨石的种类按化学成分和特性，分为三种：一种是以硅酸盐为主的石质陨石，一种是以金属铁和镍为主要元素的铁质陨石，第三种则是磁石。最常见的陨石是石陨石。目前世界上最大的石陨石是我国吉林 1 号陨石，重 1 770 kg。最大的铁陨石是非洲纳米比亚的戈巴陨铁，重约 6×10^4 kg。我国新疆的大陨铁，重约 3×10^4 kg 是世界第三大陨铁。

在地球上还发现了月亮陨石与火星陨石(见图 9.8)。1981 年在南极洲，阿兰山发现的一个陨石 ALH81005，重 0.03 kg，经科学家辨认，它与地球上的岩石不同，而与阿波罗宇航员从月球带回的岩石的成分类似，认为可能是在月球上发生了碰撞或爆裂事件，使之落到地球上的，因此，把此陨石叫月亮陨石。此外，前面我们已经提到，1984 年在南极洲发现的陨石 ALH84001，重 2 kg，是来自火星的陨石，岩石上有微生物化石存在的证据。此外，1979 年在南极洲的巨大冰啧区发现的 EFTA79001 陨石，虽然不能确定它是火星陨石，但是由化学成分的分析，熔在岩石里的氮和氩与火星的大气成分相同，再者，它的年龄很小，小于 1.3×10^9 年，此外它的纹理像流动的火山岩浆的遗迹。



(a) 月亮陨石 ALH81005　　(b) 火星陨石 EFTA79001

图 9.8

陨石着陆冲击地面形成的坑穴叫做**陨石坑**。美国的亚利桑那洲温斯洛的大

陨石坑，直径达 1 240 m，深达 170 m 是世界上最著名的陨石坑(图 9.9)。地质学家认为它是 25 000 年以前一颗直径约 50 m，重 2×10^5 t 的流星体撞击形成的。近代由于航天、航空、遥感等高精技术的发展，已发现全球有 130 个大的陨石坑。陨石坑的辨认也不简单，主要靠岩石来判断。陨石坑的周围可能有许多锥形岩石，锥形岩石的顶点常指向坑的中心。1991 年美国科学家用放射性同位素技术，测出了墨西哥湾尤卡坦半岛奇克休卢镇附近的大陨石坑的年龄，此陨石坑的直径约 180 km，测得的年龄为 6 505.18 万年。



图 9.9　美国亚利桑那州温斯洛的大陨石坑

三、陨石的保护和鉴别

当火流星出现的时候要注意记录火球出现的时刻、颜色、运动的方向、运动的速度和声音及这些现象的变化。陨石降落的现场要尽可能完善地保护起来等专业人员考察和处理。对于散落的小陨石收集时，注意鉴别陨石和小石块，鉴别的方法有如下：

(1) 陨石有黑色或深褐色的熔壳(小于 1 mm 厚)。

（2）陨石的熔壳上往往有大小不等、深浅不等的凹坑，叫气印。

（3）陨石的密度约 2.8 g/cm³ 一般比地球上的石头的密度（约 3.8 g/cm³）小些。为什么要保护陨石呢？这是因为研究陨石对研究地球的形成及生命的起源有很高的价值。我们知道，陨石是太阳系中最古老、最原始的天体物质，它的存在年龄与地球相当，在 46 亿年左右。而地球上现存的最古老的岩石只有 38 亿年，有近 8 亿年的地球演变过程人类从地球本身无法探知，只有借助于这些天外来的“不速之客”来回答。另外，研究陨石对于探索生命的起源也有很大帮助，如南京天文台的陨石专家王思潮在 1983 年陕西强县降落的陨石中发现了有机物质，引起了世界天文界的重视。这就是说形成地球生命的有机物有可能是被陨石带入地球，并在地球适宜环境下不断得以发展、演化的。在人类的生命起源和演化理论的争论中，这一发现起了至关重要的作用。

【例题 1】 利用行星运动的开普勒定律计算彗星的轨道周期，彗星的近日点距离为 0.5 AU，远日点距离为 50 000 AU。正如海尔-波谱彗星已通过太阳附近，非引力改变它的周期从 4 200 年到 2 400 年，求彗星的半主轴变化为多少？

解答：因为 $a_1=(50\ 000+0.5)/2$，$T_1=4\ 200$ 年，$T_2=2\ 400$ 年，由开普勒第三定律 $a_1^3/T_1^2=a_2^3/T_2^2$，可以求出

$$a_2=\frac{25\ 000.25^3}{4\ 200^2}\times 2\ 400^2=17\ 215\ \text{AU}$$

即彗星的半主轴变化为 17 215 AU。

【例题 2】 宇宙飞船在一颗直径 2.2 km，平均密度 2.2 g/cm³ 的小行星上着陆，这颗小行星在缓慢的自转，宇航员决定用 2.2 小时的时间沿着这颗小行星的赤道走一圈，他们的这种想法是否能够实现，如果不能，为什么？如果可能，他们都要考虑什么？

解答：宇航员与小行星构成了一个二体问题，可以方便的利用活力公式解决，活力公式是反映天体的位置，速度和轨道半长径之间关系的公式，可以写作：

$$v^2=u(2/r-1/a)$$

式中 v 和 r 为一个天体相对于另一个天体的速度与距离；$u=G(m_1+m_2)$，G 为万有引力常量，m_1 和 m_2 分别为两个天体的质量；u 为常数，在椭圆轨道中表示半长径。

先求出小行星的质量 $m_1=\frac{4}{3}\pi(r)^3\times 2.2\ \text{g/cm}^3=1.23\times 10^{13}\ \text{kg}$。

宇航员的体重 m_2 与 m_1 相比可以忽略不计；将以上条件代入活力公式得

$$v=(Gm_1/r)^{1/2}=0.862\ \text{m/s}$$

v 也是这颗小行星的第一宇宙速度，当宇航员的运动速度大于 v 时，他将脱离小行星引力束缚而飘向宇宙空间。如果宇航员打算用 2.2 小时绕小行星表面一周，其速度 $v'=2\pi(2\ 200/2)/(2.2\times 3\ 600)=0.873$ m/s。

此速度 $v'=0.873$ m/s 大于 0.872 m/s，故不可能实现。

【例题 3】 彗星 c1200204(Hoenig)的轨道偏心率 $e=1.000\ 812$，2002 年 10 月 2 日彗星在近日点 $a_c=0.776$ AU 试计算彗星在近日点处的速度（地球轨道速度为 $v_e=30$ km/s）。

解答：我们已知彗星的轨道偏心率 $e=1.000\ 812$，非常近似抛物线轨道，亦即彗星近日点

的速度大约是圆轨道速度的$\sqrt{2}$倍(离太阳同样距离的圆轨道速度)。

由于彗星的近日点距离 $a_c=0.776$ AU,日地平均距离 $a_e=1$ AU。

利用开普勒第三定律 $a^3/T^2=$常数,可以求出圆轨道速度,即 $v^2a=$常数,所以 $v\sim a^{-1/2}$ 亦即

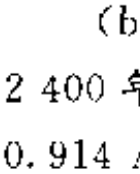
$$v_c=v_e(a_e/a_c)^{1/2}=v_e(0.776)^{-1/2}$$

$v_e=30$ km/s 是地球的圆轨道速度。

彗星的抛物线轨道速度为

$$v_p=\sqrt{2}v_e(a_e/a_c)^{1/2}=v_e[(1/2)a_c/a_e]^{-1/2}=v_e(0.388)^{-1/2}\approx 48\ \text{km/s}$$

所以彗星在近日点处的速度约为 48 km/s。



习 题

1. 假设太阳系里有 7 000 颗小行星,每颗小行星的平均质量大约是10^{17} kg。假定它们大致是球形的,密度为 3 000 kg/m^3,把所有小行星的总质量和地球的质量相比较,并估算小行星的平均直径是多少?

2. 一个周期短于 200 年的彗星定义为短周期的彗星,它的近日点为 0.5 AU,求这颗彗星的远日点可能的最大的距离是多少?

3. 小行星会撞地球吗?人们如何进行监测与对付近地小行星的威胁?

4. 彗星的结构、化学成分和模型如何?为什么彗尾背向太阳?

5. 绘图说明为什么黎明前看到的流星数比傍晚看到的流星多?

6. 最大的小行星谷神星的直径为 0.073 个地球的直径,质量为 0.000 15 个地球的质量。问一个体重 100 kg 的飞行员在这个小行星上有多重?

7. 你站在一颗小行星的表面,这个小行星的直径为 10 km 而密度为 3 000 kg/m^3,你可以投掷一块小石头在环绕小行星的轨道上运行吗?求出投掷石块的速度是多少。

8. 小行星伊卡鲁斯在近日点 0.2 AU 处时轨道的椭率是 0.69。计算它的轨道半长轴和距太阳的远日点距离。

9. 利用行星运动的开普勒定律计算下列各题:

(a) 在奥尔特云的一个彗星,它的近日点距离为 0.5 AU;远日点的距离为 50 000 AU,计算该彗星的轨道周期。

(b) 海尔-波谱彗星已通过太阳附近,非引力改变了它的周期从 4 200 年到 2 400 年,彗星的半主轴变化受什么因素影响?已知近日点的距离维持在 0.914 AU不变,计算老的和新的轨道偏心率。

(c) 一颗短周期的彗星,近日点的距离为 1 AU,轨道周期为 125 年。问它离太阳的最大距离是多少?

10. 一个典型的彗星包含 10^{14} kg 的冰水,多少彗星撞击地球会形成在地球

上大约 2×10^{21} kg 的水?

11. 天文学家估计海尔-波普彗星在它靠近太阳的 100 天期间内平均的质量损失率为 350 000 kg/s,估计一下它损失的总质量,并与彗星的质量(5×10^{19} kg)相比较。

12. 假设地球连续的受到直径约 10 m 的小彗星的轰击,每天有 30 000 次。假设彗星为球形,平均密度为 100 kg/m^3,计算每年到达地球的物质的总质量,计算过去 10 亿年来地球接受到彗星的总质量(假定在过去的发生率是同样的)。

13. 你如何鉴别陨石与普通石头?

第十章

日食与月食

日食和月食是我们熟悉的天象，它是由于太阳、地球和月球在运动过程中发生相互掩食而发生的现象。日食、月食是天体物理研究的重要时机，也是研究地球大气，日冕与色球的“天赐良机”。

第1节 月 食

在望日(农历十五或十六日)，且当日、地、月三者恰好或几乎在一条直线上，月球运动到地影内时，照在月面上的阳光部分或全部被遮挡，这时就出现月食现象(图 10.1)。不是每个望日都发生月食，这是因为地球轨道面与月球的轨道面不在一个平面上。白道和黄道平面约有 5°09′的夹角，只有当月球运行到白道和黄道交点附近±10°～12°(称为月食限)的范围内才可能发生月食。

月食分为月全食和月偏食两种。这是因为地球直径比月球大 4 倍，地球的本影远比月球的轨道半长径还长，所以月球只能穿越地球的本影区，永远不会进入伪本影区内。月球钻进地球的本影就发生月全食。当月球从地球本影的边缘掠过时，只有一部分进入本影，就形成了月偏食，因此，月食分为月全食和月偏食两种。

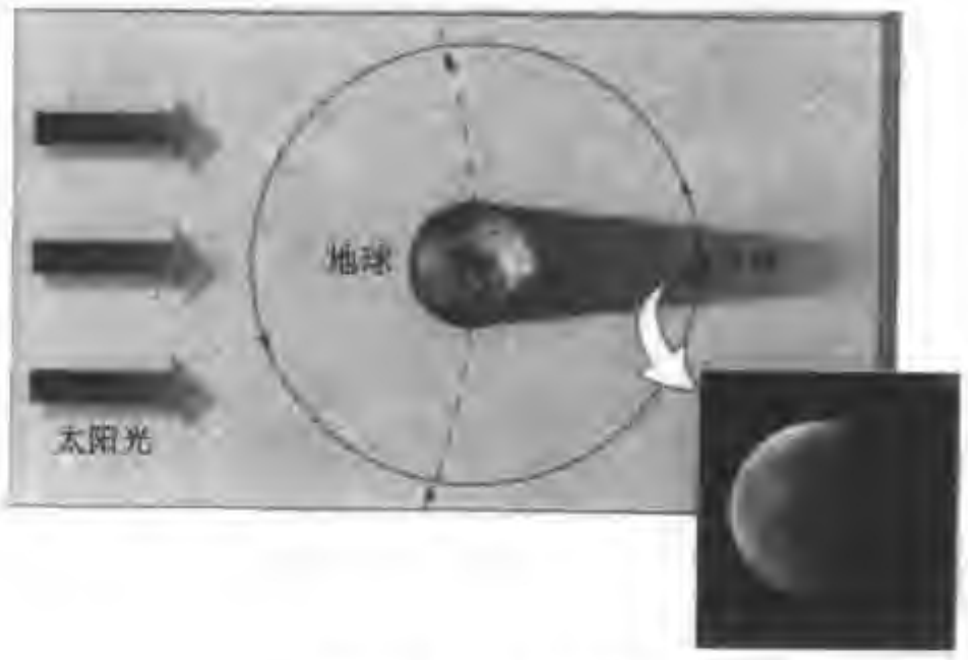


图 10.1 月食原理

一年内可发生多少次月食呢？一年内最多可能发生三次月食，但有些年分一次月食也没发生，一年内发生两次月食的可能性最大。这是因为只有当满月出现在黄白交点附近时，才会发生月食，黄白交点有两个，所以一年中有两个季节可能发生月食，叫食季。当月球运行到黄白交点附近 12°的范围内，又是正当满月，就可能发生月食。月球在白道和黄道交点附近 10°内，则一定发生月食。在食季可能没有赶上满月，因而就可能在一年内一次月食都没有。

月食发生的时候，面对月球的半个地球上的人都可以看到月食。表 10.1 列出了 2004—2014 年我国可以看到的月食。

表 10.1　2004—2014 年我国可见的月食

月食日期 年 月 日	食类型	交食时间（北京时间） 初亏时刻 时:分	 复圆时刻 时:分
2004.05.05	月全食	02:43	06:17
2005.10.17	月偏食	19:29	20:35
2006.09.08	月偏食	02:04	03:42
2007.03.04	月全食	03:36	09:06
2007.08.28	月全食	16:45	20:25
2008.08.17	月偏食	03:34	06:40
2010.01.01	月偏食	02:52	03:58
2010.06.26	月偏食	18:18	20:54
2011.06.16	月全食	02:19	06:03
2011.12.10	月全食	20:48	24:14
2012.06.04	月偏食	17:53	20:13
2013.04.26	月偏食	03:52	04:28
2014.10.08	月全食	17:08	20:36

由于月球自西向东运动，地球本影在月球处的直径大约为月轮直径的 2.5 倍，所以月全食的过程是从月轮的东边缘开始，由初亏、食既、食甚、生光最后到复圆，整个过程长达一个多小时，有时几乎达 2 小时。当月球刚刚进入地球半影时，月轮的东边缘开始减暗。月食的各个阶段定义如下：

初亏　当月球刚刚接触地球本影时，月轮的东边缘开始明显减暗。

食既　当月球的西边缘与地球本影的西边缘内切时，这时月球全部刚刚进入地球的本影内。

食甚　月球的中心与地球本影中心重合的时刻。

生光　当月球的东边缘与地球本影的东边缘内切时，这时月全食结束。

复圆　当月球的西边缘与地球本影的东边缘相外切时，这时本影月食结束。

月全食时，月面亮度并未完全消失，还在发出铜红色的微光。这是由于地球

大气折射、散射和吸收部分阳光，使部分红光到达月面所致。

月球被食的程度叫“食分”。食分等于月球视直径进入地球本影的部分与月球视直径之比。食甚时，若月球恰和地球本影内切，食分等于1；若月球更深入本影内部，则食分大于1，而月偏食的食分都小于1。

第2节 日 食

光辉灿烂的太阳有时突然被一个黑影挡住，阳光渐渐减弱，甚至全被遮住，瞬间如同夜幕降临，繁星缀空，这就是“日食”现象。观测日食是研究太阳外层大气：色球、日冕极为宝贵的时机。

一、日食原理

当月球运行到太阳和地球之间时，且日、月、地三者恰好或几乎成一直线，太阳射向地球的光线被月球遮掉一部分或者全部遮掉时，人们就看到了日食。很显然，日食只能发生在朔日，即农历初一。但不是每个朔日都发生日食，如图10.2所示，因为在朔的时候，月球虽位于太阳和地球之间，但日、月、地三者不一定恰好或几乎在一条直线上。这是因为月球绕地球的轨道面（白道面）和黄道面不重合，有5°09′的夹角。只有当朔（新月）发生在交点附近18°的范围内，才可能会有日食，而在15°范围内则一定有日食。一年内有两个食季，所以每年至少有两次日食。一年中最多可能发生5次日食，这是对全球而言的，对于某个观测点所看到的日食次数自然要少些，尤其日全食带的范围很小，看到的机会就更少些。

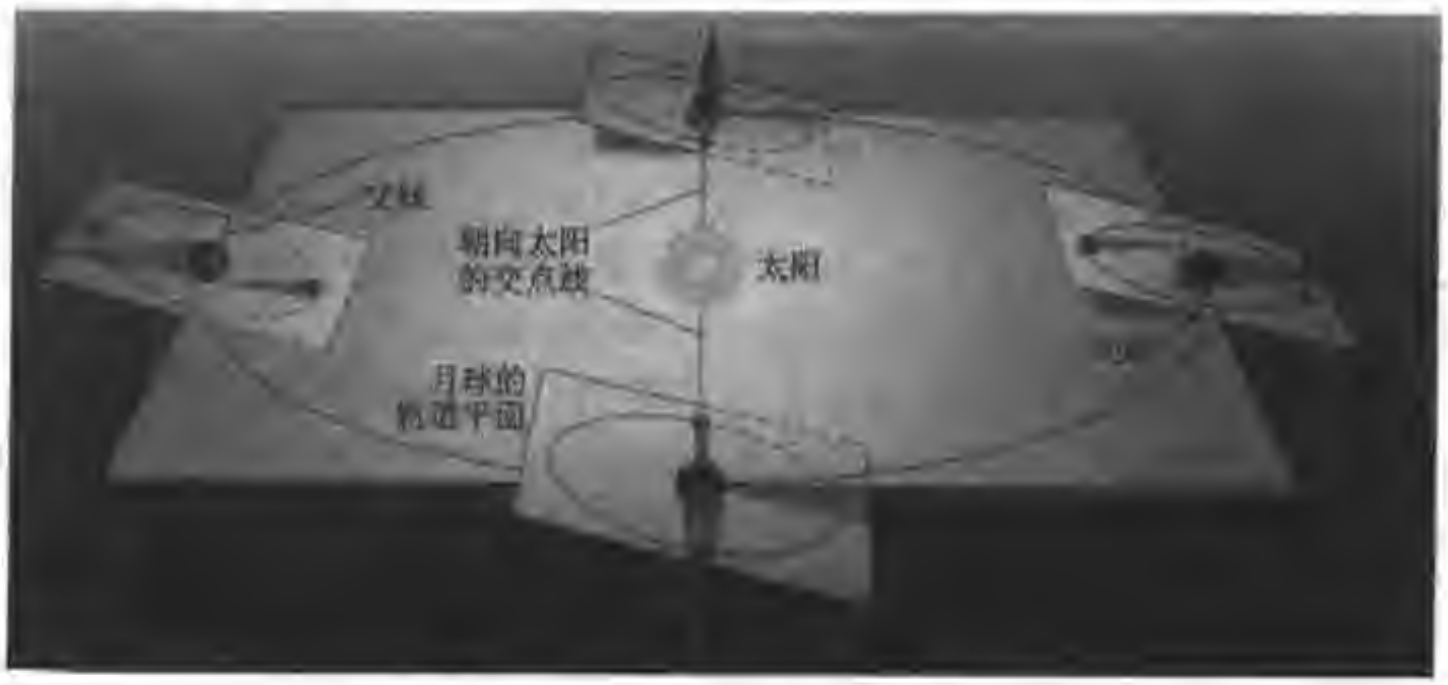


图10.2 日、月交食的原理图

日食的类型有“日全食”、“日偏食”和“日环食”。如图 10.3 所示，当地球表面处于月球本影地区时，人们看到整个太阳的视圆面都被月球遮挡，称做日全食。日偏食是月球的半影区同地面相交的地区上的人们看到太阳的一部分视圆面被遮挡时的现象。日环食指地球表面某地区处于月球的伪本影区时，月球挡住了太阳圆面的中心部分，周围还有一圈明亮的光环，呈现出日环食。如图 10.4 所示。

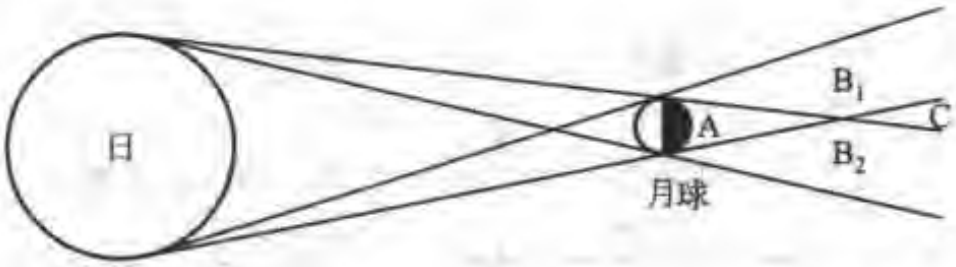


图 10.3　月影的结构：A 为本影；B_1 和 B_2 为半影；C 为伪本影

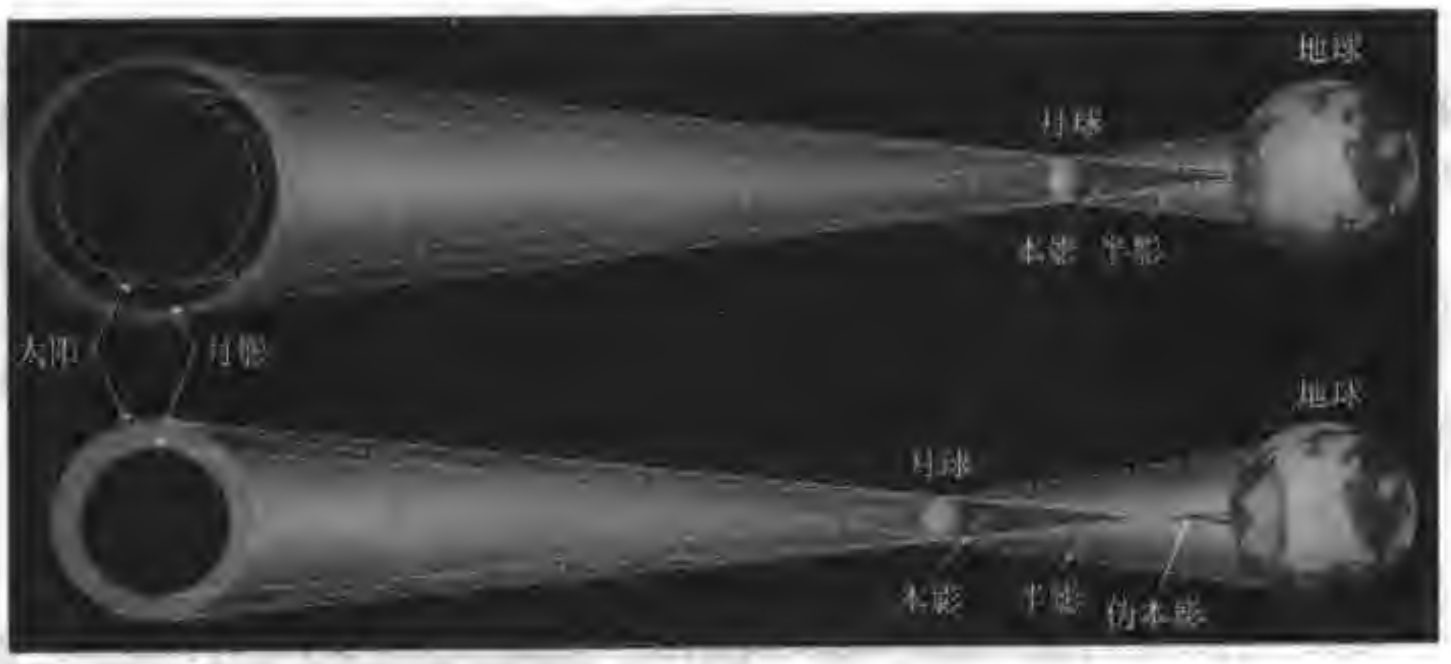


图 10.4　日食的三种类型的形成示意图

日食每年最多可发生 5 次，最少也要发生 2 次。看来，每年发生日食的次数比月食多，可为什么人们总是看到日食的机会比看到月食的机会少呢？这是由于日食带的范围很小，地球上只有食带内的局部地区可见。表 10.2 列出了 2003—2015 年我国部分地区可以看到的日食的时间和日食类型。

表 10.2　2003—2015 年我国可见日食的时间和日食类型

时间　年-月-日	日食类型	主要可见地区
2003-05-31	日环食	乌鲁木齐
2004-10-14	日偏食	哈尔滨
2005-10-03	日环食	拉萨

续表

时间　年-月-日	日食类型	主要可见地区
2006 03-29	日全食	拉萨、乌鲁木齐
2007-03-19	日偏食	拉萨，昆明，广州，北京等地
2008-08-01	日全食	哈尔滨，乌鲁木齐，拉萨等地
2009 01 26	日环食	昆明，武汉，上海等地
2009 07 22	日全食	拉萨，昆明，兰州，北京等地
2010 01 15	日环食	乌鲁木齐，拉萨，兰州，北京等地
2011 01 04	日偏食	乌鲁木齐
2011 06 02	日偏食	哈尔滨
2012-05-21	日环食	广州，上海，北京等地
2015 03 20	日全食	乌鲁木齐

二、日食过程

由于月球自西向东绕地球转动，所以日食总是从日轮的西边缘向东边缘发展。日全食可分为五个阶段，分别叫做："初亏"、"食既"、"食甚"、"生光"和"复圆"。

初亏　当月轮的东边缘与日轮的西边缘外切时称为"初亏"，这是日食的开始。

食既　当月轮的西边缘和日轮的西边缘内切时称为食既，食既是日轮被月轮全部遮挡，即日全食开始。

食甚　当月轮的中心和日轮的中心相重合时称为食甚。

生光　当月轮的东边缘和日轮的东边缘内切时称为生光。

复圆　当月轮的西边缘和日轮的东边缘外切时称为复圆，此时日食全过程结束。一个完整的过程可以延续两小时以上，但全食时间只有几分钟（多数 2～3 分钟，最长只有 7 分钟）。

日偏食只有"初亏"、"食甚"和"复圆"三个阶段。日偏食食甚时，太阳视圆面直径中被月球挡住的部分叫做食分，食分以太阳的视直径为单位。日偏食的食分是太阳视圆面直径被挡住部分与没有被遮部分之比。

由于月影以 1 km/s 的速度自西向东扫过，而地球自转速度在赤道上也只有 0.5 km/s，所以月影在地面上仍然由西向东移动。于是，地面上不同地点看到日食发生的时刻就不同，西部比东部先看到。

【例题 1】　月食是地球走到太阳和月球之间，挡住了射向月球的太阳光的情况，它发生在望日，为什么不是每月都能看到月食？

解答：这是因为地球轨道面与月球的轨道面不在一个平面上，白道和黄道平面约有 5°09′的夹角，只有当月球运行到白道和黄道交点附近 10°～12°（称为月食限）时才可能发生月食。

【例题 2】 苏罗威次群岛(东经 34°5′,北纬 65°1′)于 1990 年 7 月 22 日早晨 5 点发生日全食时,如果有一个观测者从月球上向地球看,他会看到什么?

解答:日全食时,观测者在月球上会看到地球的苏罗威次群岛附近有一个黑斑(月球的影子)自西向东在移动。

【例题 3】 假设在赤道的某地观测到日全食,当时太阳在天顶,又假定月影沿着赤道移动,计算月影相对观测者的速度。

解答:已知地月距离是 384 401 km,所以月影以 1.035 km/s 的速度自西向东移。由于地球赤道处的自转速度是 0.46 km/s,月影的速度相对地球的速度是 1.035　0.464 - 0.57 km/s,所以月影相对观测者的速度为 0.57 km/s。



习　题

1. 一年最多发生几次日食与月食?最少发生几次?为什么在一个年里不可能有 8 次食?

2. 可能在月面上观测到日食、流星、彗星、极光、彩虹、夜光云和人造卫星吗?

3. 在日食的时候,太阳圆面的哪一边缘(东边或西边)最先被月影遮挡?

4. 在两极地区(到极圈为止)还是在赤道地区(回归线之间)能看到更多次的食现象(不考虑有云的情况)?

5. 什么时候月球上的观测者能看见地球所发生的日偏食?在这时候地球上的观测者看见什么?

6. 日食时,当月球在近地点的时候能发生日环食吗?月球在远地点的时候呢?

7. 在最亮日环食的时候,太阳光减弱多少倍?(在这种情况下,太阳的角直径可取 32.6′;月球直径取 29.4′,假设太阳表面亮度是均匀的。)

8. 若今年月食发生在 8 月份,问下一年的 7 月能发生另一次月食吗?今年 10 月可能发生月食吗?若不能,为什么?

9. 在月食的时候可能发生月掩木星吗?可能发生月掩金星吗?

第三篇

太阳和恒星世界

第十一章

太阳是一颗主序星

太阳是太阳系的主宰，太阳作为一颗恒星，是太阳系的中心天体，它的质量占太阳系总质量的99.865%。在太阳强大引力的作用下，所有太阳系家族的成员都围绕着太阳转。在宇宙中太阳是一个具有中等大小、中等质量和中等光度的恒星。它是精力充沛，能源旺盛的主序星。太阳已渡过了大约45～50亿年的岁月，现在仍是恒星世界中一个风华正茂的青壮年星。

第1节　太阳的物理特征

太阳是离地球最近的恒星，光速约3×10^5 km，光从太阳传播到地球大约要8分多钟。天文学家是如何测定日地距离的呢？现代是利用雷达技术，向金星发射雷达脉冲，然后接收金星反射回来的脉冲波，根据发射及返回的脉冲波之间的时间间隔，可以计算出日地距离。比如当金星处在上合，地球离金星最远时观测一次，当金星处在下合，地球离金星最近时又观测一次，设测得金星离地球最近的距离与金星离地球最远的距离分别为a和b。这样的测量在几年内重复多次，就可以求出地球轨道平均半径值，亦即日地平均距离，即$d=(a+b)/2$。地球围绕太阳的轨道是个椭圆，太阳位于一个焦点上，太阳距离地球最近的距离（近日点）约1.47×10^8 km，最远的距离（远日点）约1.52×10^8 km。

日地平均距离　叫做1个天文单位，用1 AU表示，它是天文学家手中最小的“量天尺”：

$$1\ \text{AU}=149\ 597\ 870\ \text{km}$$

一、太阳的大小与质量

太阳的半径（光球半径）　可以由观测它的视角直径来确定。利用六分仪或望远镜（附加减光片和测微目镜）可以精确测出太阳的角直径，其值为31′59″26″，我们知道日地距离，就可求出太阳的半径$R_\odot=6.959\ 9\times10^5$ km，它是地球半径的109倍。

由此可以算出太阳的体积为$4\ 122\times10^{27}$ m^3，是地球体积的130万倍。太阳的质量可依据开普勒定律得出：

$$m_{\odot}+m_{\oplus}=4\pi^2 r^3/GP^2$$

式中，$m_{\odot}$为太阳质量；$m_{\oplus}$为地球质量，式中地球（严格地说是地月系统）的质量相对太阳可以忽略；P为地球绕太阳运转的周期（P=1 回归年= 3.156×10^7 s）；r为地球绕太阳公转的轨道半径（r=1 AU=1.496×10^{11} m）；G为万有引力常量（G=6.7×10^{-11} Nm^2/kg^2）。

地球的轨道速度是环绕太阳的速度，为

$$v=\sqrt{\frac{Gm_{\odot}}{r}}=2\pi\frac{r}{P}$$

$$m_{\odot}=\frac{4\pi^2 r^3}{P^2 G}$$

由此可以求出太阳质量，太阳质量 $m_{\odot}=1.989\times10^{30}$ kg。

太阳的质量约为地球质量的 33 万倍，在恒星群中太阳的质量常被作为一个质量单位，例如，心宿二星的质量是太阳质量的 50 倍，写作 50 $m_{\odot}$。从统计来看，大多数恒星的质量是太阳质量的 0.5～5 倍。少数恒星质量是太阳的几十倍到上百倍，最小的恒星质量只有太阳质量的百分之几。质量决定了恒星演化的速度和最后的归宿，我们的太阳在主序星里是中等质量的，它的晚年最终要成为一个白矮星，而不是中子星或黑洞。

二、太阳的自转

太阳和地球一样也有自转，由于太阳是气体球，所以它不像刚体那样自转速度处处均匀。太阳的赤道与黄道成 7°10.5′的倾角。

观测表明，太阳的赤道区域转得最快，相对于恒星，赤道区域的自转周期是 25.4 日，由赤道向两极自转速度逐渐减小。在南北纬 30°的地方。自转一周为 26.2 日，极区附近自转一周约 37 日。太阳自转速度随纬度不同，这种现象叫做**太阳较差自转**。

相对于地球而言，太阳的转动周期是会合周期，在赤道处约 27 日。通过观测太阳光球上的黑子逐日位移的运动规律可以测定太阳自转的会合周期。此外，可测定太阳东、西边缘两个光谱中同一谱线的位置差距（它是由自转速度引起的多普勒位移的 2 倍）也可以近似测定太阳的会合自转周期。

太阳的较差自转引起对流层内大尺度的气体环流运动，可使太阳内部和外部物质进行交流，内部的物质对流到上面大气层，即光球、色球和日冕。近年的空间观测表明：在赤道区域，色球和日冕与光球层的自转速度差不多一样快，但是在高纬区，高层的日冕和色球大气自转速度比低层的光球快一些，这值得进一步研究。

三、太阳的辐射和光度

太阳的能量不断向外发射，传能的方式有辐射传能、对流传能和热传导，最

主要的是辐射传能。

太阳辐射　包括全波段的电磁辐射和微粒流辐射。太阳电磁辐射的总能量的 99.9%集中在 0.2～10 μm 波段，即太阳的主要能量集中在电磁辐射的可见光波段。

太阳的电磁波辐射使人类不仅可以享受太阳的光和热，而且带来太阳的重要而丰富的信息。电磁辐射波段的范围很广，我们眼睛所看到的这部分却很窄，从 300—900 nm 叫可见光，其他波段的电磁辐射虽然我们眼睛看不见，但是用特殊的探测器可以探测到。太阳电磁波辐射的波段范围从短波到长波按顺序排列如下：γ 射线（10^{-11}～10^{-2} nm），X 射线（10^{-2}～10 nm），紫外辐射（10～350 nm），光学辐射（可见光 350～770 nm），红外辐射（770 nm～100 μm），亚毫米波、毫米波（0.1～1 mm），射电波（1 mm～100 m）及长波（1 000～10^8 m）。

太阳常量　为了表征太阳的辐射，天文学家引入了叫做太阳常量的物理量。太阳常量的定义是在地球大气外离太阳 1 AU 的地方，垂直于太阳光束方向的单位面积，单位时间接受到的所有太阳辐射能量。常用符号 S 来表示。

根据测量，太阳常量 $S=1.374\ \mathrm{kW/m^2}$。

由于 0.2～10 μm 波段集中了太阳 99.9%的辐射能量，所以太阳常量可以在地球的高山上来测量，当然在大气外的空间观测，测量会更精确。太阳常量的测定对研究太阳和地球的大气结构十分重要，而且还可应用于气象、航天、太阳能利用和环境科学等。

观测表明，太阳常量在近百年来基本不变，是稳定的，其变化量值约 0.1%～0.2%。但是别小看太阳常量这个小小的变化量，它对地球的气候和生态环境有很大的影响。

太阳的光度　太阳每秒在各个波段发射的总辐射能量。

太阳光度和太阳常量的关系是怎样的呢？假设在地面距离太阳 r 处观测，则太阳的光度 L 与太阳常数 S 的关系式为

$$4\pi r^2 \times S = L_\odot$$

在日地平均距离（1 AU）处观测太阳的总辐射，则太阳的光度为

$$L_\odot = 4\pi(1\mathrm{AU})^2 \times S = 3.826\times10^{26}\ \mathrm{W}$$

一般把太阳的光度作为恒星的光度单位，定义太阳的光度为 $L_\odot=1$。按照黑体辐射的斯忒藩-玻耳兹曼定律：

$$L_\odot = 4\pi R_\odot^2 \sigma T_e^4$$

式中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量。由此，如果已知太阳的半径 $R_\odot$ 和太阳的光度 $L_\odot$ 可以求出太阳光球的有效温度 T_e 为 5 780 K。

第 2 节 太阳的内部

太阳内部的结构(图 11.1)从内向外,可分为三个区:核反应区、辐射区和对流区。太阳的对流区的外面是大气层,从里向外又可分为三个层圈:光球层、色球层和日冕。

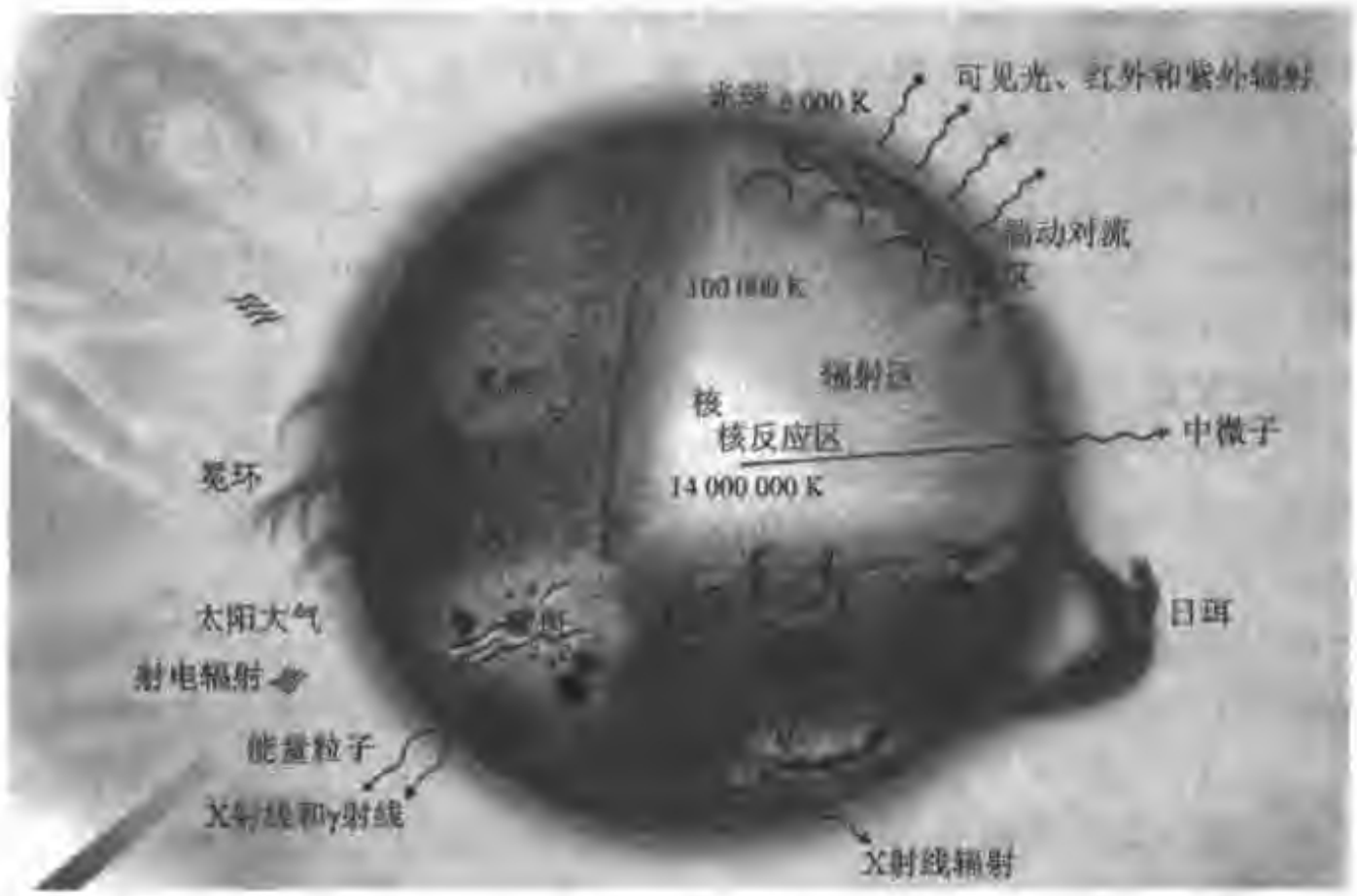


图 11.1 太阳的结构

一、核反应区

太阳在自身的引力作用下,物质向核心聚集,在核心形成高温和超高压状态,导致了内部的氢聚变为氦的热核反应。从中心到 0.25 $R_\odot$,约占太阳体积的 1/64,而其质量却占太阳总质量的一半以上。太阳核心的温度高达 $1.5\times10^7\sim2\times10^7$ K,压力为 2.5×10^{11} atm,即超过地面大气压的 2 500 亿倍! 物质密度约为 150 000 kg/m^3。核心区的温度和密度的分布都随着与太阳中心距离的增加而迅速下降。在这个超高温、超高压的核心区,发生着激烈的热核反应。在这里所产生的能量主要来自氢核合成氦核的聚变,它是太阳辐射和太阳活动的主要能量来源,太阳发射的能量约 99%是由这里产生的。

二、辐射区

从 0.25$R_\odot$~0.86 $R_\odot$ 是辐射区。在这层中气体温度约 7×10^6 K,密度约

15 000 kg/m³。按体积而言，辐射区约占太阳体积的一半。太阳核心产生的能量，通过这个区域以辐射的方式向外传输。核心区产生的光子在向外表面传播的过程中多次被物质吸收，而后再发射，才传输到太阳的外面大气层。

三、对流区

对流区在辐射区的外面，大约从 0.86 $R_\odot$ 至光球的底部，温度约 5×10^5 K，密度也降至 150 kg/m³。由于巨大的温度差引起对流，内部的热量主要以对流的方式向太阳表面传输。除了通过对流和辐射传输能量外，在对流区的大气湍流还会产生扰动，即低频声波。这种声波将机械能量传输到太阳外层大气，导致加热和其他作用。

表 11.1　标准的太阳模型

区域	内半径/km	温度/K	密度/(kg·m⁻³)	特　性
核心区	0	1.5×10^7	1.5×10^5	热核反应产生能量
辐射区	2×10^5	7×10^6	1.5×10^3	电磁辐射转移能量
对流区	5×10^5	2×10^6	150	对流传能
光球	6.96×10^5	5 800	0.000 2	电磁辐射可以逃逸，可见的日面
色球	6.965×10^5	4 500	5×10^{-4}	冷的低层大气
过渡区	6.98×10^5	8 000	2×10^{-16}	温度陡升
日冕	7.06×10^5	10^6	10^{-12}	热的低密度的上层大气
太阳风	10^7	2×10^6	10^{-19}	太阳物质逃逸到空间，贯穿太阳系

*第 3 节　太阳的能量来源

地球的 99%的能量来自太阳，就连动力资源煤和石油也是太阳能蕴藏的能量。太阳是一颗炽热的火球，每秒钟辐射出的总能量高达 4×10^{26} J。太阳作为浩大能量已贡献了 50 亿年，而在今后，太阳还可以继续奉献 50 亿年，如此巨大的能量从何而来？

1905 年爱因斯坦的相对论给出质量和能量可以互相转化的公式 $E=mc^2$。这里 c 是光速，等于 3×10^5 km/s。按照这个公式，1 g 物质就可以释放出 9×10^{13} J 的能量。这相当于一万吨优质煤全部燃烧所得的能量。物质在什么情况下才能转化成能量呢？通过原子核反应，即能源是内部氢聚变为氦的核反应产生的核能。

恒星内部的氢如何变成氦的呢？在 20 世纪 30 年代末，科学家才明确认识到两种核反应可以解释太阳的能源。一种是所谓的"碳-氮循环"，它周而复始地循环进行。经过热核反应，碳和氮的总量不变，损失的只有氢。太阳上的氢极为丰富，

足够维持这种核反应。还有一种是"质子-质子循环"。这两套核反应循环的总效果都是使4个氢原子核合成为一个氦原子核。热核反应中碳、氮、重氢等原子核只起触媒作用。在太阳内部,"碳-氮循环"与"质子-质子循环"两种核反应都发挥作用。"碳-氮循环"(图 11.2)的热核反应包括六个步骤,周而复始的循环反应过程如下:

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{7}N + \gamma + 1.94\ MeV$$

$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + e^{+} + \nu + 2.22\ MeV$$

$$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + \gamma + 7.55\ MeV$$

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{15}_{8}O + \gamma + 7.29\ MeV$$

$$^{15}_{8}O \rightarrow ^{15}_{7}N + e^{+} + \nu + 2.76\ MeV$$

$$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He + \gamma + 4.96\ MeV$$

"质子-质子循环",即四个氢原子核(质子)合成一个氦原子核(α 粒子),如图 11.3 所示。其反应式为

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + e^{+} + \nu + 1.44\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + \gamma + 5.49\ MeV$$

$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + 2^{1}_{1}H + 12.85\ MeV$$

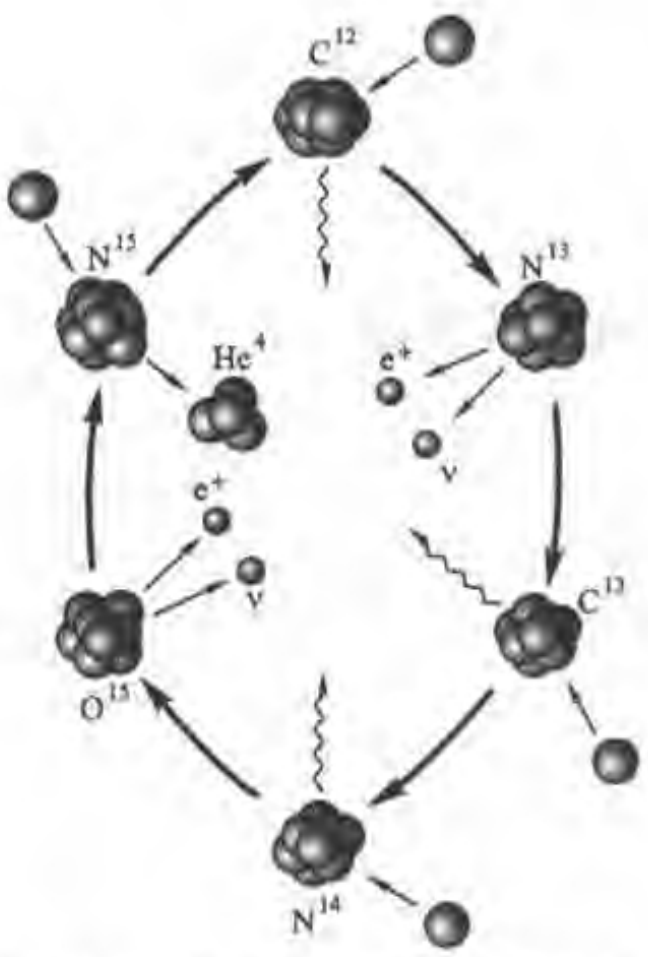


图 11.2 在碳循环过程中氢转变为氦
图中波文箭头表示原子有向外的辐射,
e^{+} 为正电子,ν 表示中微子

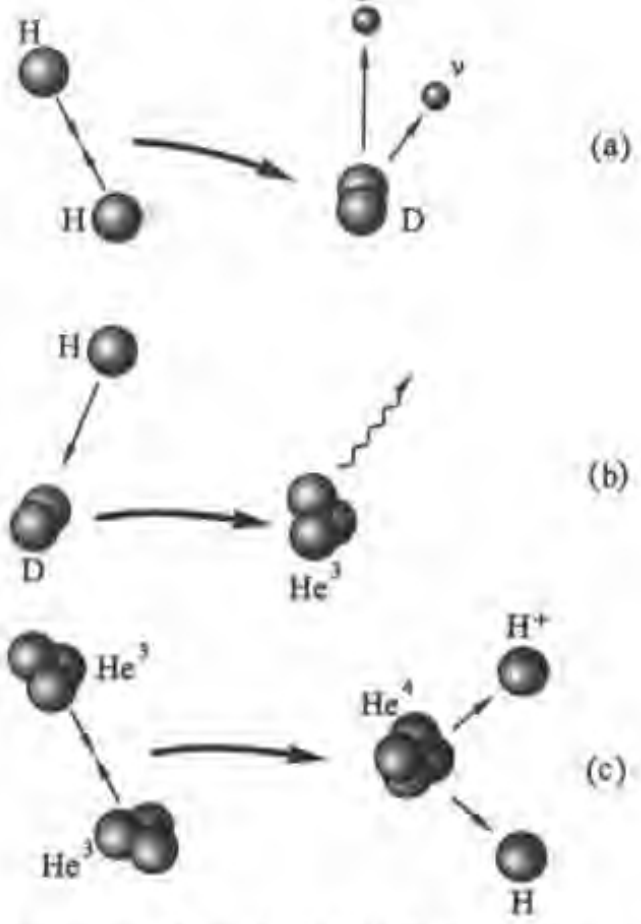


图 11.3 氢聚变为氦的质子-质子链
(a)两个氢原子核相碰并生成一个氘核;(b)一个氘核和一个氢核聚变合成一个同位素;(c)两个这种同位素的核聚合成一个正常质量数为 4 的氦核

此化学式中$^{2}_{1}H$是重氢(D,也叫氘,是氢的同位素),e^{+}是正电子,ν为中微子,γ是光子。这两套化学反应的循环总效果是使四个氢原子核合成为一个氦原子核,即

$$4^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2e^{+} + 2\nu + 2\gamma + 26.7\ MeV$$

碳、氮、重氢等原子核在反应中只起触媒作用。

在核反应当中质量是有损耗的。一个氢原子核的质量是 1.008 u,而氦原子核是 4.004 u。因此在一次质子-质子反应中有 $\Delta m = 4 \times 1.008 - 4.004 = 0.028$ u 的质量损耗。为了维持 4×10^{26} J/s 辐射,太阳在 1s 内就要消耗 6.2×10^{8} t(吨)的氢核"燃料",使氢核聚变为氦,实际损耗的质量只是其中的一小部分,每秒约 4.3×10^{6} t。

在太阳核心区的核心温度高达 1.5×10^{7} K,压力是地球大气压力的 2 500 亿倍。在这个高温、高压的超级实验室里,热核反应大规模地、持续地进行着。上述两套核反应循环究竟哪个为主,虽然有争论,但可以说都在发挥作用,一般认为太阳的能量主要是质子-质子循环的核反应提供的。

太阳的产能率是由它的光度被质量除来计算的,即

$$L_{\odot}/m_{\odot} = \frac{4 \times 10^{26}\ W}{2 \times 10^{30}\ kg} = 2 \times 10^{-4}\ W/kg$$

太阳的产能率为每千克产生 0.000 2 J/s。太阳的寿命大约 100 亿年。因为太阳拥有约 2×10^{30} kg 的巨大质量,并且绝大部分是氢。而且,目前太阳处在壮年时代,太阳在这个阶段还要延续 50 多亿年的演化历程。所以对于人类来说,太阳的能量可以算得上"取之不尽,用之不竭"了。

太阳的中微子　在太阳内部核心区,发生氢聚变成氦的热核反应时会产生中微子。中微子是呈电中性的粒子。由于中微子几乎不与其他粒子发生相互作用,因此当中微子穿过你身体时,连一个原子都不会被触动一下。中微子的穿透力特别强,如果要停止一个中微子的运动,需要厚达 1 l.y. 以上的铅板! 因此,人们要捕捉中微子是非常困难的。

科学家在美国南达科地州霍姆斯塔克废井深处放置了一个大桶,里边储存着 38 万升全氯乙烯的纯净液体来探测中微子。当中微子射入该液体后,将其中的一些氯转变为放射性的氩。依据记录到的氩的数量就可以推断太阳放射出多少中微子。然而,20 年来实验探测到的太阳中微子比理论预计的少得多。大约只有预计数量的 1/4 的中微子被探测到,这被称为"太阳的中微子之谜"。当今这个谜底已经揭开。因为很久以来,科学家都是假定中微子的质量为零,从而推出中微子在传播过程中没有衰变。但是,现代人们对这种假设提出了质疑,宇宙中有无数的中微子,若每个中微子都有质量,则所有中微子的贡献和作用将不可忽视。到底中微子有没有质量呢? 1980 年—1995 年第一代质子衰变探测器的

观测没有获得任何信息，直到近期才发现了中微子有质量的证据。

1994 年，美国科学家洛斯·阿拉莫斯，用满满一大桶矿物油和一连串的 1 220个光电管检测中微子，测出中微子有一个微小的，不为零的质量。他们通过实验，测定出中微子的能量在 0.5～5 eV 之间。

在日本池野山内部深处一个正在开采的锌矿中安装着一台巨大超级探测器来探测中微子。它的不锈钢容器中装有 5 万吨超纯水。这些水由分布在容器的壁，底板和顶棚上的 11 000 个光电倍增管进行监测。这些光电倍增管记录切仑科夫闪光，此闪光标志着高能中微子与水中的原子核发生了一次很罕见的碰撞。实验已经证明中微子在飞行过程中发生衰变，从而有力地支持了这种难以捉摸的中微子是有质量的。

中微子有质量这一新发现可以解释太阳内部产生的中微子的理论值与实测记数之间的矛盾。因为太阳内部的中微子中，有一些在到达探测器以前便衰变了，故而探测到的中微子比理论预计的要少得多。

开创"中微子天文学"著名科学家，美国宾夕法尼亚大学物理天文系的教授雷蒙德·戴维斯(Raymand Davis Jr)和日本东京大学国际基本粒子物理中心的科学家小柴昌俊(Masatoshi Koshiba)获得了 2002 年诺贝尔物理奖。

第 4 节 太阳的空间探测

自从 20 世纪 60 年代以来，人类加快了探测太阳的步伐，发射了一系列的卫星和太阳探测器，进行空间探测。在 1963—1973 年间，美国发射了 10 颗"探险者"卫星(IMP 系列)确定了地球向阳面的磁层顶有激波存在；发现了地球磁尾的电流片；测到了大量太阳风数据；发现了起源于太阳的行星际磁场的扇形结构，并发现行星际磁场随着太阳的自转而转动等。同期美国海军还发射了系列卫星，长期监测太阳的紫外和 X 射线辐射。

美国宇航局自 1962 年至 1975 年发射了由 8 颗太阳观测卫星组成的"轨道太阳观测站"(OSO)，任务是观测太阳的紫外、X 射线和 γ 射线辐射，研究太阳结构和太阳活动的长期、短期变化，其观测时间超过了一个太阳周。1975 年又发射了 GOES 系列同步轨道卫星，监测太空环境，观测地球轨道附近的软 X 射线(波长在 0.1～1 nm)和质子通量及太阳耀斑爆发引起的质子事件。

1974—1976 年联邦德国和美国发射了两个探测器叫"太阳神"(Helios)，观测 0.3 年～1 AU 的行星际空间环境及太阳磁场和太阳风。1977—1978 年"国际日地探险者"(ISEE)3 颗系列卫星也升天。1979 年美国空军发射了"太阳风"(Solar wind)卫星用以观测太阳爆发和太阳风在地球两极产生的效应。

特别要提及的是 1973 年美国发射的"天空实验室"太空站(Skylab)，它进行

了四次飞行，对确认日冕亮点、日冕环弧结构、冕洞、日冕瞬变现象和日冕物质抛射等研究有重要贡献。



图 11.4　探测太阳的 SOHO 卫星

美国宇航局发射的“尤利西斯”太阳探测器于 1994 年 6 至 10 月飞临太阳两极，揭示出：在高纬区太阳磁场的极性是紊乱的。而且，高纬区的磁场强度几乎不随纬度变化。这个结果令科学家颇感意外，因为太阳的磁场是偶极型并向行星际空间扩展，从赤道到两极，太阳的磁场强度应当随纬度增高而增强。但是观测事实否定了它，其原因有待进一步探索。

1995 年 12 月 2 日欧洲空间局和美国航空航天局合作发射了太阳及日球层观测平台卫星(SOHO)(图 11.4)。它离地球有 150 万 km，而且总是处在太阳和地球之间。SOHO 可工作 6 年以上，目前仍运行在轨道上。卫星上载有 12 种精密的望远镜和探测仪，主要观测研究太阳的内部结构、物质的动力学过程、日冕的加热机制以及太阳风的起源和加速过程。预计 2006 年发射一个“太阳动力学观测”卫星接替 SOHO 卫星对太阳进行全方位的观测。

1998 年 4 月美国航天局发射了一个探测器“太阳过渡区和日冕的探测者”(TRACE)，它的主要任务是探测太阳大气的三维磁场结构，随太阳大气流动而引起的温度变化，随时间变化的日冕精细结构，日冕和过渡区的热结构。该探测器自发射以来发回了大量有价值的日冕和过渡区的信息。其中一个重要发现就是日冕存在着理论上无法解释的非均匀、复杂而丰富的精细结构，并发现在日冕

底层存在着一些类如大苔藓一样的结构。

由中国艾国祥院士设计的太阳空间望远镜(SST),载有口径 1 m 的主镜,8 个通道的两维光谱仪,可以测量太阳上分辨率为 0.1″～0.15″的矢量磁场,同时可以探测太阳瞬变和稳定磁流体力学过程。其上还装有 4 个波段的远紫外望远镜;256 通道的太阳宽带频谱仪;全日面 H_α 与白光望远镜;以及从 100 KHz～100 MHz 的行星际射电频谱仪。它的升空将会带来太阳磁场等方面的重要信息。

第十二章

太阳大气

太阳外边的大气层，从里向外分为光球层、色球层和日冕层。紧挨着对流区的大气底层是光焰夺目的光球层，厚约 500 km，地球上接收到的太阳能量基本上是由光球层发出的。在光球层之上厚为 1 500 km 的大气是绚丽多彩的色球层，色球内的物质比光球的物质稀薄和透明得多。色球顶部的上面是过渡层，温度陡升到几百万度(10^5 K)，再外面就是美丽的银白色日冕，它由极端稀薄的气体组成。由于日冕的高温，它延伸到数万公里之远。太阳的外大气层经常喷发一种带电粒子流(主要由电子和各种离子组成)，称为太阳风。太阳风以大约 500 km/s 的速度吹遍整个太阳系，消失在恒星际空间。现代有的天文学家把太阳风吹拂的范围看作太阳大气的最外层，称之为太阳风层。

太阳大气的温度在光球 500 km 之上的色球边缘温度最低约 4 500 K，然后随高度增长，在过渡区温度迅速增长，在 10 000 km 高度的日冕区底层边界，温度已达到 10^6 K 以上(见图 12.1)。

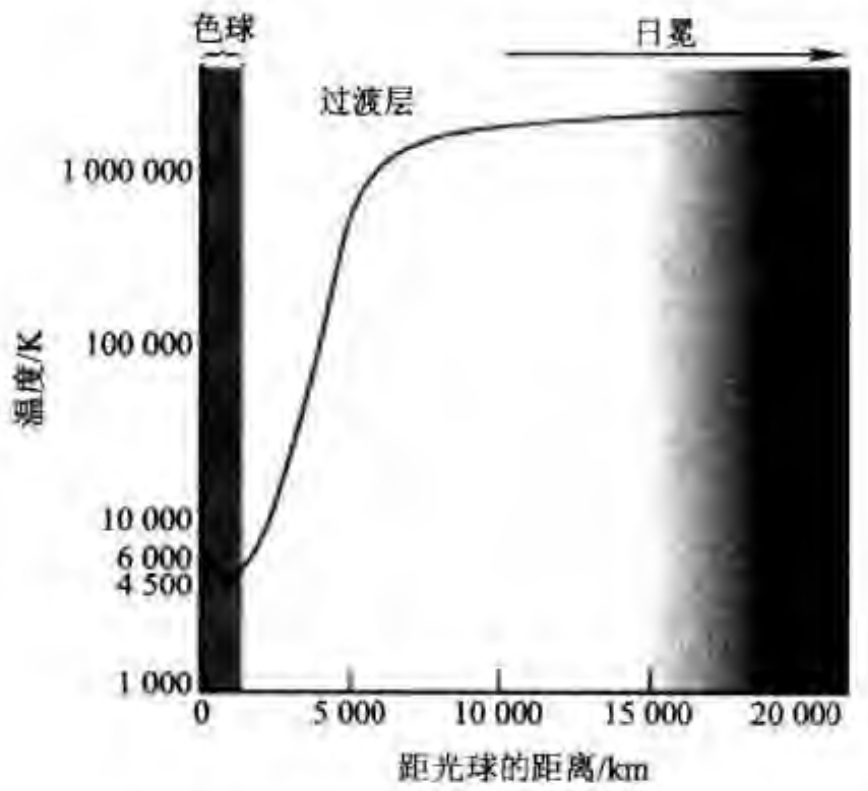


图 12.1　太阳大气温度随高度的变化

第1节 光 球

太阳光球层在太阳对流区之上，是太阳大气的最底层，厚约 500 km。光球层物质的平均有效温度为 5 780 K，可是太阳的温度随着高度由内向外逐渐降低，在光球与色球交界处，温度降至 4 000～4 600 K。光球层的平均密度约为2×10^{-4} kg/m^3，压力约为 1.4 atm。光球主要以辐射方式传输能量。我们说的宁静太阳半径 $R_\odot$，是指从太阳中心到光球层大气的顶部，约为 6.96×10^5 km。日常我们所说"一轮红日出东方"，所见那光芒四射的日轮就是太阳的光球。光球层发射出的可见光最强(不要直接观察太阳，谨防眼睛受到伤害，一定要通过减光片或滤光片对其减光后才能观察)。图 12.2 为太阳光球像。地球获得的太阳光和热的能量基本上是由光球发出的。

临边昏暗 仔细观察，你会发现光球的中心区域亮于边缘，这叫做临边昏暗现象。为什么会有临边昏暗呢？这是由于光球向外辐射沿着半径方向基本上一样强，但我们只是从某一个方向看太阳。对太阳表面不同部分来说，从同样深度大气层发出的光到达我们时通过的太阳大气层厚度不同。显然，厚度越大，被吸收的辐射越多。因此，日面中心的辐射主要来自较深的层，而边缘的辐射则由外层发出，前者温度较高，所以日面中心较亮，而边缘较弱。



图 12.2 太阳光球像

太阳黑子　在光球上看到的暗斑叫太阳黑子。黑子的温度比周围光球的温度低，大约只有 4 500 K。黑子是强磁场区，磁场强度约 0.35～0.45 T。

光斑与米粒组织　太阳光球上除了黑子以外还有温度比光球温度高 100 K 左右的发亮区域，叫光斑。光斑具有不同形式的纤维状结构。观测表明，与黑子有密切联系的光斑呈纤维状，寿命约为黑子寿命的三倍。那些与黑子无关的光斑大多呈圆形，面积比较小，平均寿命约为半小时。据统计研究，光斑也具有 11 年的活动周期。

光球上有一些像米粒似的气团叫米粒组织，尺度大的叫超米粒组织，超粒组织的尺度约为 3×10^4 km 左右(图 12.3)。太阳的米粒组织和超米粒组织如同沸腾的米粥，此起彼伏，上下翻腾，估计全光球有 400 万颗米粒组织。科学家普遍认为，米粒组织是一种太阳大气的对流现象。

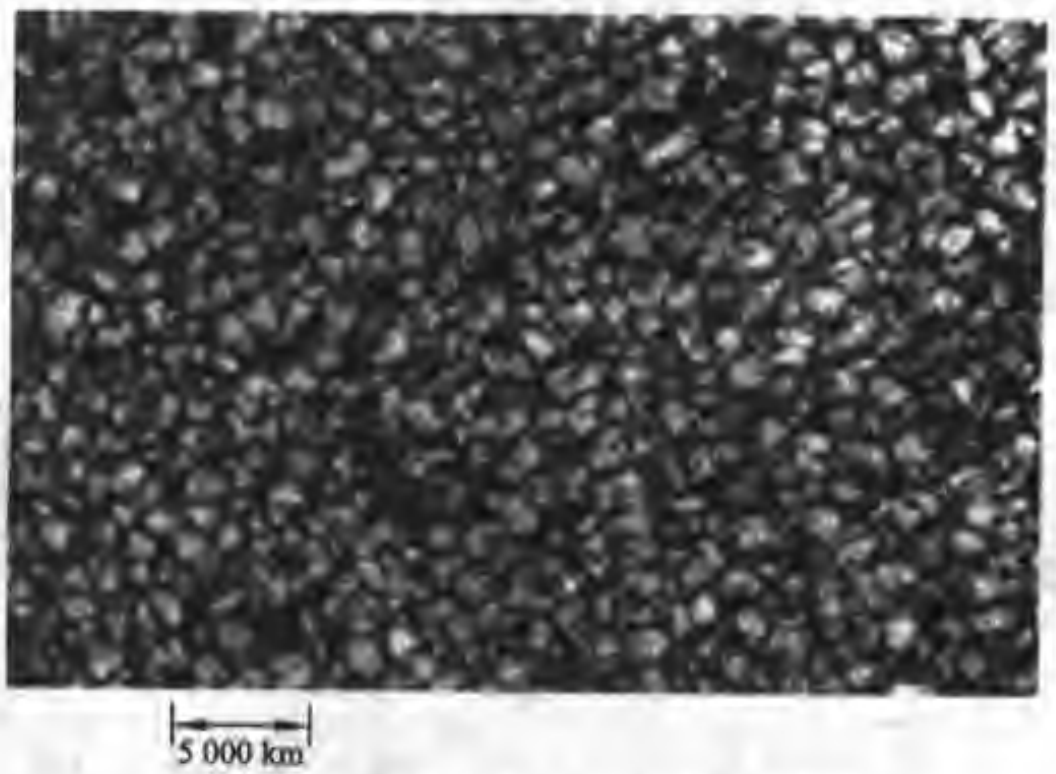


图 12.3　太阳光球上的米粒组织与超米粒组织

第 2 节　太阳的光球光谱

专门研究太阳的望远镜叫太阳望远镜，主要有垂直式和水平式两种太阳望远镜，垂直式的叫太阳塔；水平式的叫水平式太阳望远镜。太阳望远镜中有两块平面镜叫定日镜，其中一块接受太阳光并跟踪太阳的周日视运动叫动镜；另一块可以上下移动或南北移动的镜子叫定镜，它的作用是补偿太阳的周年视动。太阳光由动镜反射到定镜再反射到成像镜。成像镜是一个抛物面镜，其焦距很长，由于太阳光足够强，因而可得到一个大而亮的太阳像。为了得到高分辨、大色散的太阳光谱，摄谱仪照相镜的焦距比较长，一般都固定在大的光谱仪室内，叫做

太阳光谱仪。利用太阳望远镜和光谱仪就可以观测太阳的光谱。太阳的光球光谱是一条连续的彩色光谱带，其上面还叠加有许多条暗线(见图 12.4)。1814 年德国物理学家夫琅禾费首先观测发现了太阳光球光谱中有近 600 条暗线(现已发现有一万余条暗线)。夫琅禾费还测量出较明显的谱线位置，并且用拉丁字母来代表其中一些较粗的谱线，即分别标以 A、B、C、…、K 等字母。这种标志沿用至今，科学界把太阳光谱中的暗线称为"夫琅禾费谱线"。

太阳光球光谱中为什么会出现那么多暗黑的谱线呢？夫琅禾费及同代人没有能解决这个疑难。直至 45 年之后，德国的化学家本生和物理学家基尔霍夫揭开了这个谜团。他们发现，当发射连续谱的光穿过某种温度较低的气体时，较冷的气体便会吸收掉本身所发射的那些波长的谱线，在其波长处，由于光亮的减弱而形成暗线。各种元素都具有这样的特性，即它们发射和吸收相同波长的光。这样太阳光球光谱中的暗线的本质就不难理解了。太阳内部高温的气体发射的连续谱，在向外发射时穿越比它冷的光球大气层时，这些较冷的大气中的诸元素就吸收了与它们各自频率相同的谱线，使之在太阳的连续谱上叠加了许多吸收线。现今，人们已熟悉太阳的光球光谱中的重要的夫琅禾费吸收线和它们对应的化学元素，并通过它们来认证其他恒星、星系等天体的光谱。

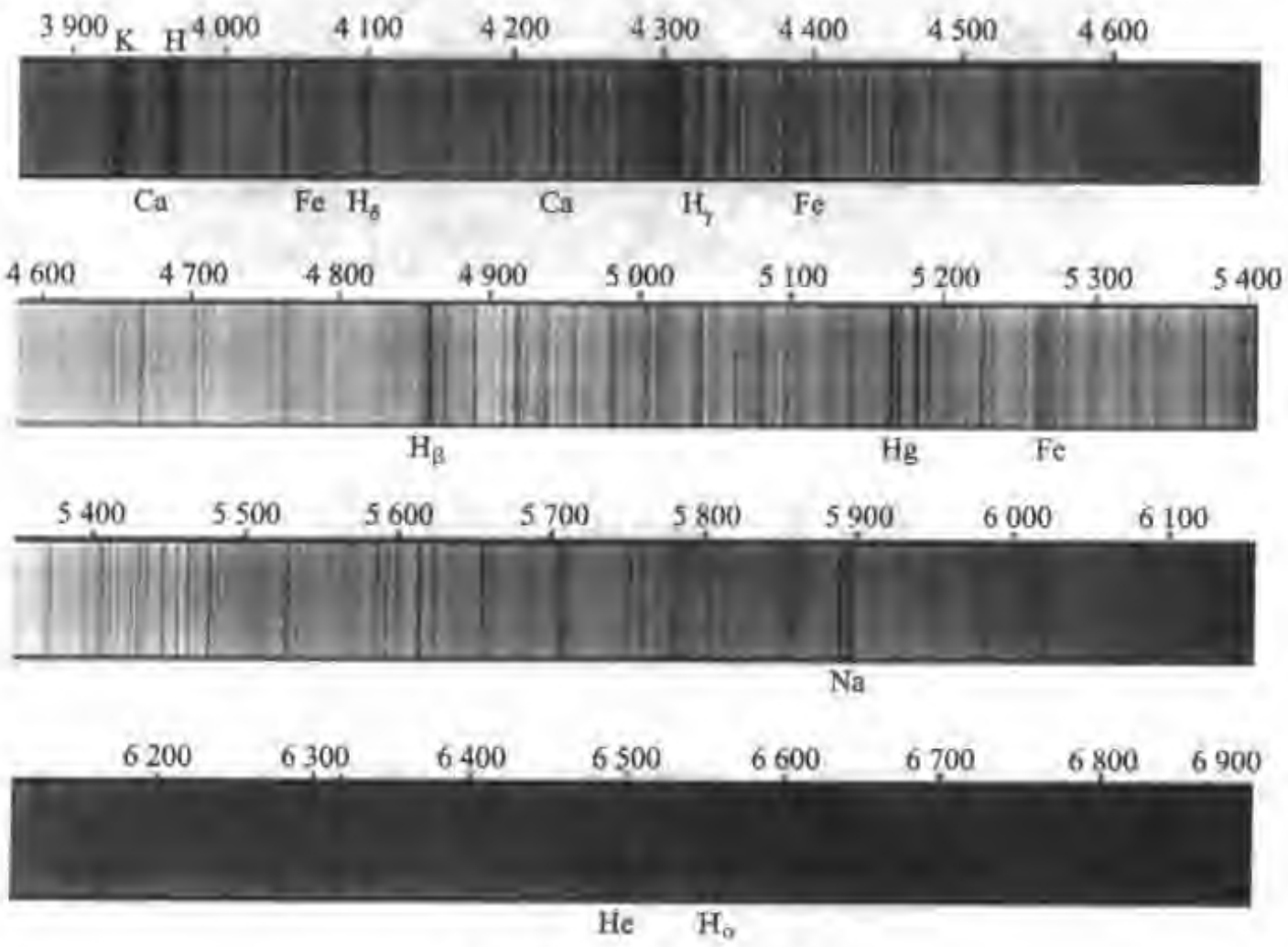


图 12.4 太阳光球光谱

值得特别提出的是氦元素的首次发现是源于太阳，地球上的氦是后发现的。1868年8月18日，日全食的时候，法国天文学家让桑和英国人洛克把分光镜对准太阳，发现在钠线（即D线）附近出现了一条明亮的黄色谱线（波长为587.56 nm）。断定它属于一种未知的元素，称之为“氦”，这是从希腊文“太阳”来的（即Helium）。27年之后，人们在地球上也找到了氦。

太阳大气的各化学成分所占的比例是怎样的呢？现在一般认为，太阳光球中存在着90多种元素，这些元素的含量相差悬殊，按质量而言，氢占71%，氦占27.1%，其他元素的含量很低。含量较多的元素有：氧(0.97%)，碳(0.40%)，氮(0.096%)，氖（0.058%），硅（0.099%），硫（0.040%），铁（0.14%），镁(0.076%)，钙(0.009%)等。由太阳光球的光谱不仅可以研究太阳大气的化学成分，还可以研究太阳的自转速度、太阳的磁场、太阳的活动机制等，所以太阳光谱可以向我们提供许多重要的天体物理信息。

第3节　色　球

光球上面的大气层为色球层。色球层比光球层厚，约为1 500 km，它的内半径约6.965×10^5 km。色球内各种物理参数，包括密度、电离度和各种物理过程，在色球层不同高度处存在着巨大变化。如温度随高度而上升，低色球层的温度为4 500 K，中色球层为8 000 K，到了高色球层顶温度升到5×10^4 K。由于色球的密度比光球稀薄得多，平均密度为5×10^{-6} kg/m^3，它发射出的可见光很弱，平时都被光球的光所掩没，所以只有在日食时或利用色球望远镜我们才可以看到太阳色球。在壮丽的日食食甚时刻，太阳光球被月轮挡住前后几秒钟内，我们看见日面边缘有一条弧形的发光层，它有鲜明的色泽，因此叫色球。平时没有日食发生，只能利用色球望远镜观测。太阳色球看上去像“燃烧的草原”，有许多挺拔的针状物（见图12.5），还有彩色的谱斑、细细的网络以及冲天的日浪和壮观的日珥；有时还会观测到激烈的耀斑爆发。色球望远镜上如果加上H。干涉滤光器，就可观察到氢谱斑（红色）；如果加上波长396.85 nm的电离钙干涉滤光器，则可看到色球的钙谱斑（蓝绿色），美丽的色球真是色彩斑斓。

在日全食时，当月球刚刚把整个太阳光球遮盖起来的时候，色球层未被遮盖的部分呈现一段狭窄的圆弧形状，这起了天然的狭缝作用。利用光谱仪（不要狭缝装置）拍照，可拍到日食期间太阳色球的光谱。由于色球温度比较高，光谱中的谱线都是发射线，日全食时间又很短，因此叫做闪光光谱。它和光球光谱中的夫琅禾费光谱线很类似，但是光球光谱中的夫琅禾费是吸收的暗线，而闪光光谱的谱线是亮的发射线，而且氢线比较强。



图 12.5　太阳色球上的针状物

第 4 节　过渡区和日冕

色球层之上是过渡区，它的厚度约 8 500 km。平均密度为 2×10^{-10} kg/m^3。在过渡区内温度陡升。从过渡区再往外就是日冕。日冕是太阳大气的最外面一层，由内冕和外冕组成。内冕最底层在 1.003 $R_\odot$ 处，通过过渡区与色球相接。内冕与外冕的交界在 1.3 $R_\odot$ 处，外冕的范围向外延伸到几个太阳半径，甚至可达25 $R_\odot$，此处与行星空间相接。日冕的物质极其稀薄，平均密度约 1×10^{-12} kg/m^3，主要由质子、离子、各种高度电离的离子和高速的自由电子组成，电子运动温度高达数百万开。

由于气体非常稀薄，所以这层的光度很低，大约只有太阳光球辐射的百万分之一。在通常的情况下，它发出的光被淹没在光球的光辉之中，不能被看到。在日全食期间，当月影遮住太阳的光球时，可以看到美丽的银色日冕，而平时只能应用日冕仪来观测日冕。日冕的辐射波段很宽，从短于 0.1 nm 的 X 射线、可见光……到百米的射电波，以及几千电子伏特到数十亿电子伏特(10^9 eV)的粒子辐射谱。因此，研究日冕可采用空间探测器、射电望远镜和高山日冕仪等。

由于日冕的温度很高，约有 400 万 K，它发射的 X 射线比较强。最近由“天

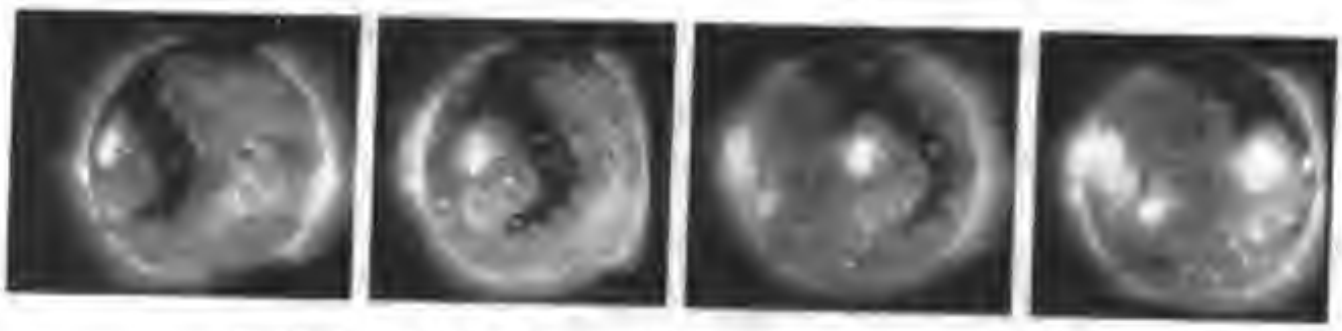


图 12.6　天空实验室飞船拍摄的四张日冕 X 射线图像

空实验室"飞船拍到相隔一天的四张太阳日冕的 X 射线图像(图 12.6),明显看出暗区(冕洞)的变化,从那里有高速的太阳风暴向外流动。

日冕是如何被加热到 4 百万 K 的呢? 这是"日冕加热"的难题。1995 年 12 月 2 日发射成功的"太阳及日球层观测平台"(SOHO)卫星的观测给出了最佳的回答。这个卫星上装载着高分辨率的磁场测量仪器,观测到日面上有成千上万的零星磁场,它们时隐时现地不断演变着,科学家称之为"磁毯"。平常这条"磁毯"会出现 4 000 个环,它们形成许多磁回路,磁回路之间相互作用,造成电和磁的短路与磁湮没,由此所释放的能量使日冕加热,也可以说磁能加热了日冕。

1973 年,美国轨道太阳天文台(OSO－7)的日冕仪首次观测到日冕物质抛射。接着,天空实验室飞船等先后发现了大规模、突发性的日冕亮结构变化,它以 10～2 000 km/s 的速度向外扩展,即所谓的日冕爆发,后来这种现象被称为日冕物质抛射(简称 CME)。

20 世纪 80 年代,美国的"太阳峰年研究"(SMM)卫星,日本的"火鸟"卫星和最近日美合作的"阳光"卫星等,以及火箭的远紫外线和 X 射线成像器的观测都显示,日冕是很不均匀的也是不平静的。冕环和冕洞等结构布满了活动区,其中日冕环是日冕上令人瞩目的细而亮的环。这些冕环有的横跨两个极性相反的黑子;有的扭曲成 S 形连接两个活动区。许多冕环组成一个环系。冕环有时会



(a)　　(b)

图 12.7

(a)太阳活动极大时期的日冕(1999 年 8 月 11 日日食的照片);

(b)太阳活动极小期的日冕(1977 年 9 月 17 日日全食照片)

出现振荡现象，它们的亮度也闪烁变化。冕环内也存在着持续的物质流动，曾观测到物质从环顶下落的情况，其速度约为每秒数十公里。最近研究揭示：冕环内存在着细小的磁流管或纤维状结构。在太阳活动剧烈的耀斑爆发时冕环的亮度会突然增加。

日冕上有些区域辐射亮度比周围低、温度也低些，特别是远紫外辐射及X射线异常低，甚至没有。这些区域叫**冕洞**。冕洞有极区冕洞、孤立冕洞和延伸冕洞之分。冕洞的总面积相当于日面总面积的五分之一，而其中极区冕洞约占总冕洞面积的3/4。

极羽发源于光球层，而延伸到日冕，形状呈羽毛状。日冕极羽与日冕抛射的物质流的区别是极羽仅仅出现于太阳的两极区域。极羽在太阳活动极小时期更加明显（见图12.7）。

第5节 太 阳 风

温度高达几百万开的日冕物质连续不断地向外发射出等离子体流，主要包含自由电子、质子（即氢原子核）和α粒子（氦的原子核），形成太阳大气不断的物质外流，叫做太阳风。太阳风吹拂到整个太阳系的行星际空间约100 AU的辽阔领域。来自不同区域的太阳风的速度有差异，在日冕磁场开放处，即冕洞（有大量物质沿磁力线外流，导致密度下降和亮度减少区）的太阳风，其速度高达600～900 km/s，而从一般区域流出的是300～450 km/s的低速太阳风。

1994年6月至10月飞越太阳南极上空的“尤利西斯”太阳探测卫星的考察告诉我们，就冕洞外面的区域来说，随着日面纬度的升高，太阳风的速度逐渐增加，从400 km/s递增到500 km/s。

特别值得注意的是：从赤道到南纬30°范围内，太阳风速度在一个太阳自转周（约26天）期间往往有明显的变化。这意味着，不同经度日冕发出的太阳风，其速度也大不相同。但是在南纬50°以上，太阳风速基本恒定，不随经度变化。天文学家认为，高纬区域的太阳风来自一个覆盖极区的冕洞，由它发出的太阳风基本上是等速的。此外，太阳及日球层观测平台（SOHO）的探测表明，太阳赤道面的太阳风比太阳南、北极上空的太阳风强烈。

“尤利西斯”的另一重要发现是来自高、低纬区域的快、慢太阳风在化学成分上有明显的不同。比如，镁和氧的含量比，在快速风中大约是0.08，而在慢速风中高达0.17，相差一倍多。值得注意的是这些探测结果是在太阳宁静年对太阳南纬区域进行的，至于活动的峰年又如何，我们等待着“尤利西斯”的新消息。

太阳风对各行星的磁层产生比较复杂的影响，会导致许多大行星磁扰现象。太阳风和地球磁层的相互作用直接与间接地影响我们的短波通讯，地球上发生

的磁暴与磁扰有密切的联系。

第6节　太阳磁场

除了光球、色球到日冕层中的高温等离子体外，太阳磁场的存在对太阳活动起了决定性作用，太阳活动现象本质上是磁活动现象。太阳大气的各种物理状态、运动和演化都受到太阳磁场的牵制和支配，特别是日冕物质抛射、太阳耀斑、日珥抛射、黑子和谱斑等活动现象，其能量均来自太阳磁场。如太阳黑子的产生、发展以及周期性的变化都是太阳磁场及其变化所引起的。此外，太阳磁场对太阳大气结构、磁湍流结构、日冕加热、色球反常等都起着关键性作用。因此，太阳磁场的研究是天文学的一个重要研究领域，也是日地关系边缘科学的最为关注的热点。太阳的磁场比较复杂，它有遍及各处的普遍磁场（其磁场强度平均为1～2 Gs）和较强的活动区磁场（如黑子区的强磁场，一般为0.3～0.4 T）。日面的磁场分布很不均匀，个别狭小区域比周围的磁场强很多（可达0.1 T），叫做磁节点。有时，几个小的磁节点可以会合形成黑子区的强磁场。

一、太阳活动区磁场

依据谱线的塞曼效应（光源在强磁场中谱线分裂的现象），可以由测定谱线分裂的裂距求出磁场的强度和极性。观测表明，一个太阳黑子群中往往有两个大黑子，而且它们分别为不同的磁性，一个为南磁极（S），另一个则为北磁极（N）。对于日面的同一半球（例如北半球）来说前导黑子（对太阳自转的方向而言，处在前面的黑子）都有相同的磁性（例如前导黑子皆为N极，后随黑子都是S极）。而对于另一个半球（例如南半球）而言，情况正好相反。经过22年，南、北半球的黑子磁性分布发生对换，即前导黑子由原来的N极都变换为S极，而后随黑子的磁性都变为N极。日面磁场非常复杂，往往多个磁极纵横交错。太阳耀斑爆发就经常发生在这些磁场结构复杂的区域。观测研究还表明，光球中的磁结构除了黑子区的强磁场外，还有强、弱不同的磁场网络等结构。

二、太阳的普遍磁场

太阳的普遍磁场只有1～2 Gs（即0.000 1～0.000 2 T），很弱不易观测，可以通过太阳磁象仪和太阳磁场望远镜来观测。海尔等从1912年起便从事太阳的普遍磁场的观测研究，他们假设太阳普遍磁场是偶极磁场。巴布柯克在1957年—1958年观测发现太阳普遍磁场的极性，在一个太阳自转周内（约26天）变换两次，由N变为S，然后又从S变成N极。如此看来，太阳磁场是南北相反，东西对立的复杂结构，如今这也是个难解之谜。

三、行星际磁场

太阳磁场不局限在日面上，而是延伸到广阔的太阳系行星际空间，和行星际磁场融为一体。它的延展扇形结构磁场团团包围了地球磁层。空间探测表明，行星际磁场起源于太阳，为扇形结构，其扇形边界随太阳自转而不断扫过地球。地球对此有系统的响应，如地球磁场受其影响产生周期性的扰动，大气的涡度面积指数也因扇形边界的通过而受调制，南极地区的大气垂直电场在扇形边界通过后几天达到极小值，而与扇形边界内磁场的方向无关等，这些对研究日地关系、太阳与气象、航天与航空有重要的实际意义。

四、太阳磁场的观测

20 世纪 70 年代中国发展了测量太阳磁场的仪器，在太阳物理学家艾国祥院士带领下研制出了太阳磁场望远镜，能观测光球的矢量磁场和速度场、色球的纵向磁场和速度场。后又发展成九通道望远镜，获得了一系列重大发现。

五、太阳磁场的形成机制

天文学家用"太阳发电机"理论来解释太阳磁场的形成机制。太阳内部对流层中的带电流体运动和磁场的相互作用，像一个发电机那样，形成和发展了磁场。早在 1919 年拉莫尔就提出了太阳发电机的概念。

1955 年帕克提出了星体内较差自转和小尺度的回流可维持自激发电机过程，即认为太阳内部的等离子体可以认为"冻结"在磁场上，它们随着太阳大气一起转动。由于太阳有较差自转，即太阳赤道区域比高纬度区域转得快，就造成磁力线扭曲缠绕成磁流绳结，使纬向磁场产生和发展。有的磁流绳冒出太阳表面并形成了太阳黑子区磁场(参见图 12.8)。



图 12.8　太阳活动区磁场的形成机制

【例题 1】 求太阳的表面亮度 B。

解答：太阳的表面亮度等于单位球面度的太阳常量。假设太阳的辐射是各向同性的，太阳的半径为 R，日地距离为 r。

当 $r \gg R$ 时，若太阳的截面为 A，则太阳截面对应地球的立体角为 $\omega = A/r^2 = \pi R^2/r^2$，太阳在地球上的表面流量密度叫太阳常量 $S_\odot = 1\ 374\ \mathrm{W/m^2}$，已知太阳的角直径 $\alpha = 32'$，因此 $R/r = \alpha/2 = \frac{1}{2} \times \frac{32}{60} \times \frac{\pi}{180} = 0.004\ 65\ \mathrm{rad}$，所以太阳截面对应地球的球面度为 $\omega = \pi(R/r)^2 = \pi \times (0.004\ 65)^2 = 6.81 \times 10^{-5}\ \mathrm{sr}$。

所以太阳的表面亮度 $B = S_\odot/\omega = 2.04 \times 10^7\ \mathrm{W/(m^2 \cdot sr)}$。

【例题 2】 求太阳表面的引力加速度。它是地球表面引力加速度的多少倍？

解答：已知地球表面的引力加速度 $g_0 = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$，太阳的质量 $m_\odot = 1.989 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}$，太阳半径 $R = 6.96 \times 10^8\ \mathrm{m}$，由引力加速度公式 $g = Gm_\odot/R^2$，所以，太阳表面的引力加速度为 $g = 274\ \mathrm{m/s^2} = 28\ \mathrm{g}$，是地球表面引力加速度的 28 倍。

【例题 3】 求太阳的平均密度。

解答：已知太阳的质量 $m_\odot = 1.989 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}$，太阳半径 $R = 6.96 \times 10^8\ \mathrm{m}$，太阳的体积 $V = 4\pi R^3/3$。

所以，平均密度 $\rho = m_\odot/V = 3m/(4\pi R^3) = 1\ 410\ \mathrm{kg/m^{-3}}$。

【例题 4】 太阳是一颗什么样的恒星？它的绝对星等是多少？

解答：太阳是一个黄色(G2V)的中等大小的主序星。

太阳光球半径 $R_\odot = 6.959\ 9 \times 10^5\ \mathrm{km}$，质量为 $1.989 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}$；

太阳的视星等 $m = -26.8$，距离 $r = 1\ \mathrm{AU} = (1/206\ 265)\ \mathrm{pc}$；

由公式 $M = m + 5 - 5\lg r$，得 $M = -26.8 + 5 - 5\lg(1/206\ 265)$。

所以，太阳的绝对星等 $m = +4.74$。

【例题 5】 假设太阳的一生中只有 0.8% 的质量转化为能量，求太阳寿命最长是多少？(假定太阳的光度一直维持一个常数。)

解答：太阳的质量为 $1.989 \times 10^{30}\ \mathrm{kg} \approx 2 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}$。

太阳一生中 0.8% 质量转换的总能量为

$$E = mc^2 \approx 0.008 \times 2 \times 10^{30} \times (3 \times 10^8)^2 = 1.4 \times 10^{45}\ \mathrm{J}$$

已知太阳每秒释放的总能量叫太阳的光度 $L_\odot$，$L_\odot = 3.9 \times 10^{26}\ \mathrm{W}$。

总能量能维持的辐射时间，即太阳的最高寿命为，

$$t = E/L_\odot = 1.4 \times 10^{45}/(3.9 \times 10^{26}) = 3.6 \times 10^{18}\ \mathrm{s} \approx 10^{11}\ \mathrm{a}$$



习　题

1. 太阳常量亦即太阳辐射在 1 AU 处太阳辐射流量密度是 $1\ 390\ \mathrm{W/m^2}$。求太阳表面的流量密度，当时太阳的视角直径为 $32'$。

2. 一些理论提出太阳在 4.5×10^9 年前的有效温度是 5 000 K，而且半径是现在的 1.02 倍，求那时的太阳常量。假定地球的轨道没有变化。

3. 地球绕太阳运动的平均速度为 29.8 km/s，求太阳的质量是多少？

4. 用黑体辐射定律估计太阳光球(5 800 K)和日冕(10^6 K)中光辐射最强的波长是多少?

5. 设太阳表面单位面积的辐射功率 $f = 1.36\times10^3\ J/m^2$,求太阳的光度。

6. 太阳的角直径为 $32'$,求太阳的线直径是多少?

7. 什么是太阳风?它的结构与速度如何?对行星际空间有何影响?

8. 太阳光球光谱如何观测到?由光谱我们可以测定太阳的那些物理参量?

9. 太阳内部一个相当于地球质量的太阳物质氢聚变成氦的热核反应需要多少时间?

第十三章

太阳活动

太阳大气像一个滚烫的海洋，经常出现汹涌澎湃的惊涛骇浪，这就是太阳上发生的活动现象。太阳活动的形式多种多样，如光球层经常出现黑子群；在色球层出现的激烈的耀斑爆发现象及各种形态的日珥活动；日冕出现的冕环和日冕物质抛射等。这些太阳活动对地球有着重要的影响和响应，直接关系到人类的生活、生产、宇宙航行、空间开发、通讯和社会文明。下面让我们来仔细看看与我们密切相关的太阳活动现象。

第 1 节　太阳黑子活动

太阳黑子是太阳光球上的暗斑，它是光球上温度较低(4 500 K)的区域，通常成群出现(见图 13.1(a))。研究表明，黑子的成因是太阳内部的强磁场出现于光球表面而形成的。黑子的磁场强度在 0.3～0.4 T 之间。黑子越大磁场越强，黑子区的磁场显然比太阳表面的普遍磁场(约为 2×10^{-4} T)强得多。

太阳黑子大小不一，小的黑子直径约有 1 000 km，大的黑子约有20 000 km(图 13.1(b))，特大的太阳黑子的直径可达 245 000 km，相当于地球直径的 19 倍！黑子的形状像一个暗的浅碟，中间凹陷。发展完全的黑子分本影和半影两部分。黑子中间的暗核部分叫做本影，本影周围较浅的边框叫做半影。本影是黑子的核心，温度约为4 240 K；半影是黑子边缘稍亮的部分温度约为 5 680 K。黑子的亮度大约是光球亮度的 2/3。

太阳黑子相对数　1849 年瑞士苏黎世天文台的沃尔夫提出了黑子相对数的概念，他定义黑子相对数为 R，由下式计算：

$$R = k(10g+f)$$

式中 g 是观测到的黑子群数，f 是观测到的单个黑子总数，K 是台站之间的换算因子。沃尔夫对他自己的观测取 $k=1$。式中的 K 值与观测者的观测技术、观测方法和天气的明晰度有关。k 值可以用本站的观测值同苏黎世天文台同期的观测值比较后得出。初次观测者可先取 $k=1$，以后可以根据两地同期观测的黑子数的比对求出。

早在公元前 28 年我国的“汉书五行志”中已有太阳黑子的世界上最早的详

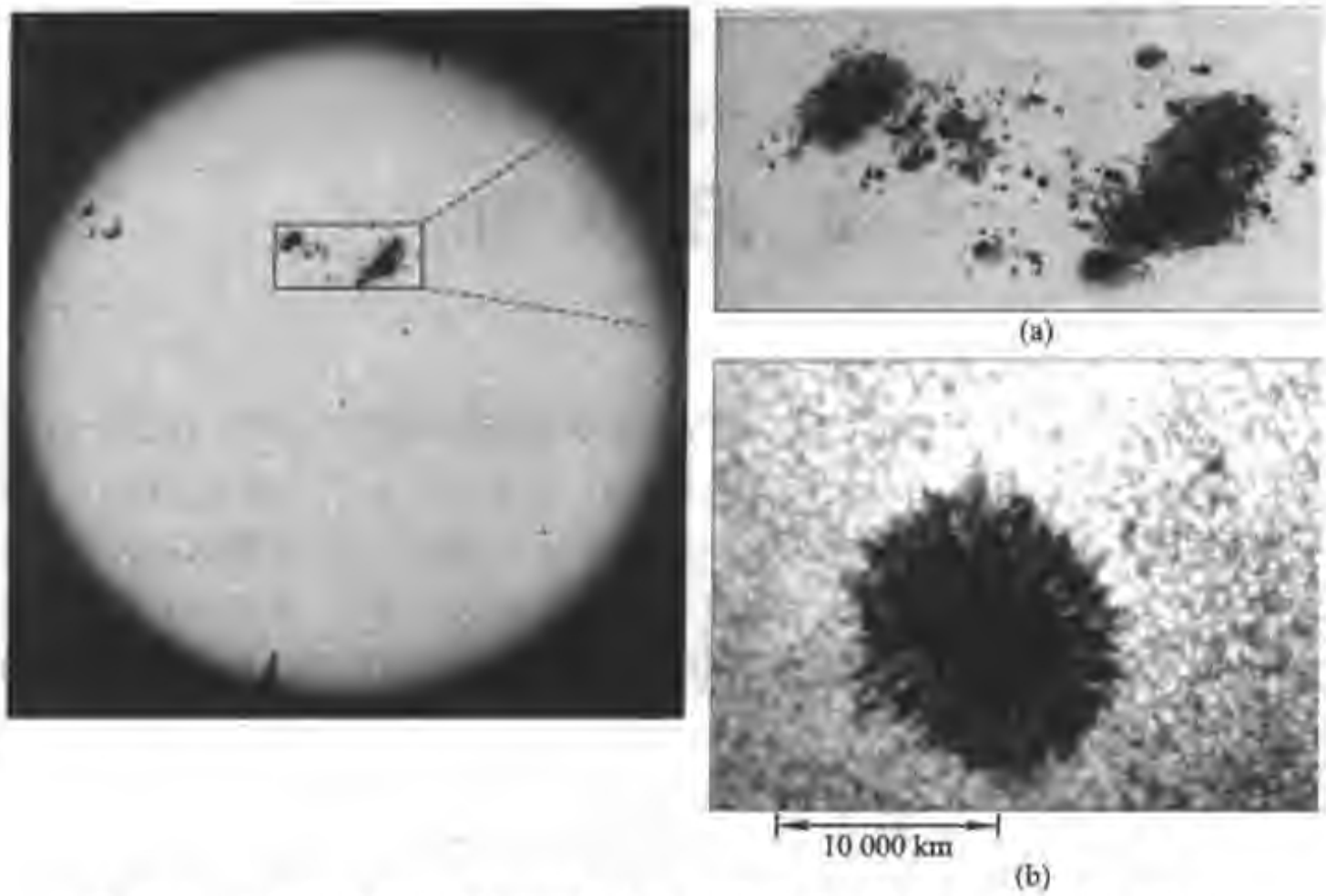
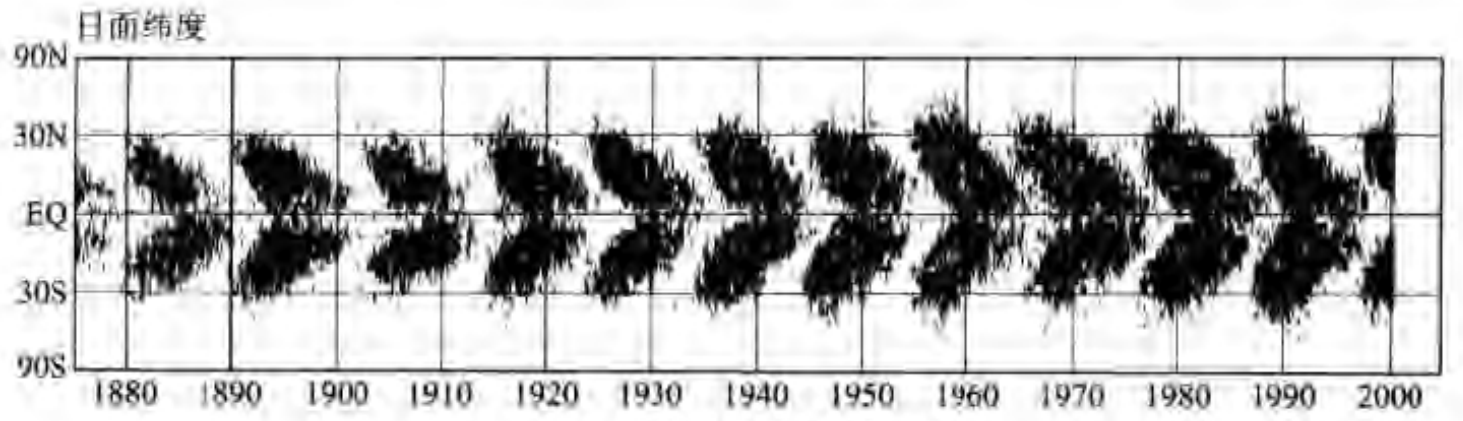


图 13.1　太阳活动极大期拍摄的黑子群，右图中最大的黑子直径达 20 000 km

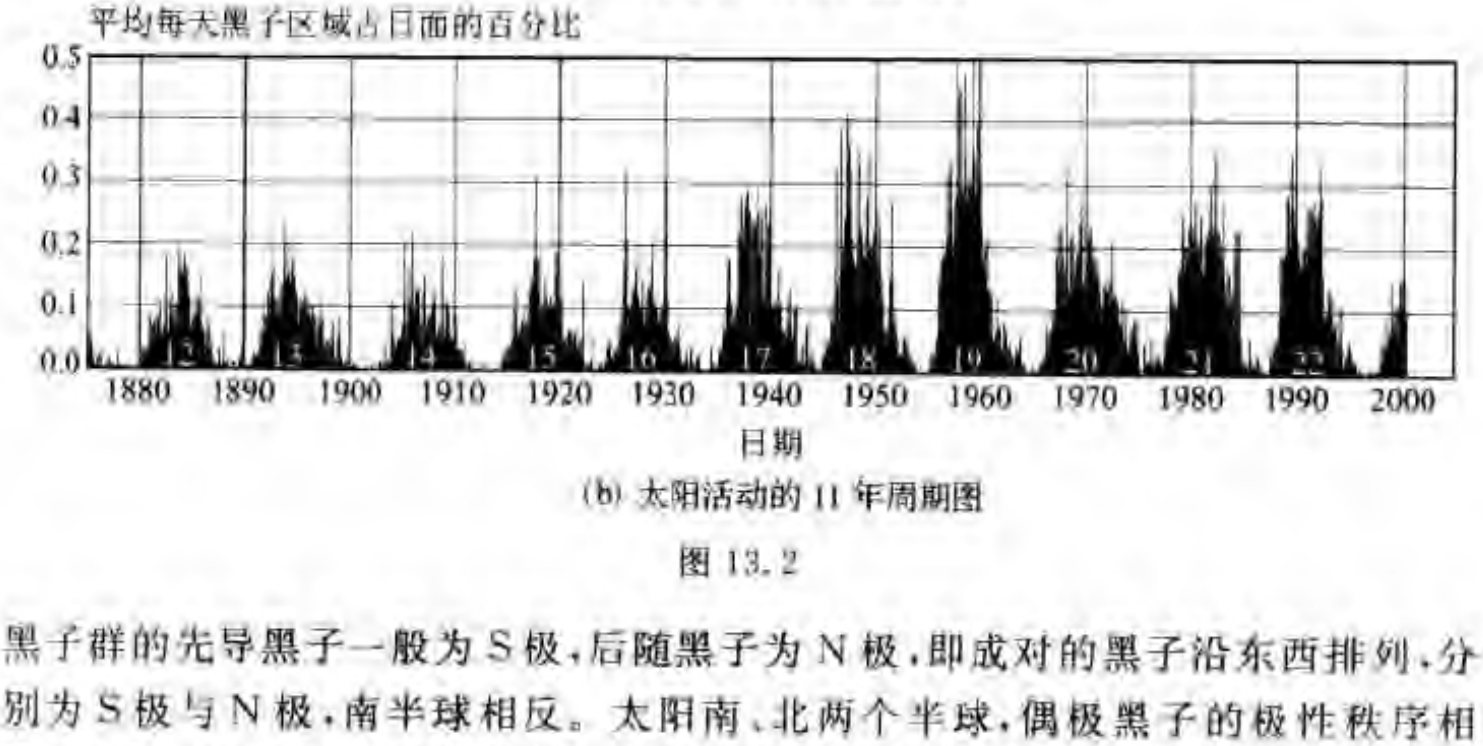
细记录。1609 年伽利略首先用望远镜观测到了太阳黑子。长期积累的黑子观测资料，表明：太阳黑子活动的强弱存在周期变化，周期短则 9 年，长则 13.6 年，平均为 11 年。这个周期的最早发现者是施瓦贝，他在 1843 年发现太阳黑子的盛衰有约 10 年的周期。国际上规定，以 1755 年作为太阳黑子周期的开元年。从 1755 年 3 月到 1766 年为第一个太阳周期。一个太阳活动周期开始和结束的标准是：每月太阳黑子相对数的平滑值达到极小值。从 1766 年以后，按 11 年周期排列序号。2000 年是第 23 个太阳周的太阳活动峰年。2000 年 4 月 3 日太阳黑子数高达 301，是平均数的两倍。一般，整个峰年阶段会持续 1～2 年。在峰年这段时间，除了黑子群在日面上的数量增多，太阳黑子相对数 R 增加外，其纬度分布也会从活动周开始时的±30°变化到±15°附近，然后向着更低纬度迁移。此外，太阳的各种活动也会在太阳峰年期随黑子数的增加而发生相应的变化，并经常有太阳耀斑爆发等，这会对地球有较大的影响，必须给予极大的关注。

蝴蝶图　黑子在日面上的纬度分布不均匀，几乎所有黑子都分布在日面南、北纬 45°的范围以内，而且在赤道两旁 8°范围内的很少。如果以黑子群的平均日面纬度为纵坐标，以时间为横坐标，那么黑子群在日面纬度上的分布图的形状像一群蝴蝶，故称蝴蝶图（如图 13.2(a)所示）。

一般来说，一个太阳黑子群中有两个主要黑子，它们的磁极性相反。在同一个半球，各个黑子群的 N、S 极性分布状况是相同的。例如第 22 太阳周，北半球



(a) 太阳黑子分布的蝴蝶图



(b) 太阳活动的 11 年周期图

图 13.2

黑子群的先导黑子一般为 S 极，后随黑子为 N 极，即成对的黑子沿东西排列，分别为 S 极与 N 极，南半球相反。太阳南、北两个半球，偶极黑子的极性秩序相反，在下一个黑子周，这种关系会颠倒。因此，一个完整的太阳磁活动周期是 22 年，称为磁活动周（包括两个太阳活动周期，见图 13.2(b)）。

根据黑子、极光和碳的同位素 ^{14}C 的资料分析，可划分出若干个太阳活动的极小期和极大期。两千年来，最突出的是 1645 年—1710 年间太阳黑子非常少，活动非常微弱，叫做蒙德极小期。据资料统计分析，太阳黑子活动还有近 80 年的周期，即近 11 年周期的太阳活动剧烈程度有 80 年周期的变化。各个周期的峰年，太阳黑子的相对数 R 的极大值并不相同，如 1957 年—1958 年的太阳第 19 周活动峰年期间，峰值的黑子相对数 R 约 200，这一年中出现的超过 3 级的大耀斑有 20～30 个，而在第 20 周太阳活动峰年，R 约只有 100，相应超过 3 级的太阳耀斑事件 7～8 个。这表明太阳活动在各个不同太阳峰年期间的强度及频次会随太阳黑子数发生变化。

第 2 节　色 球 活 动

色球层呈现出许多剧烈而壮观的太阳活动：无数的细而明亮的针状物如同火焰丛林；多姿多态的谱斑、暗条；滚滚的日浪；色球边缘的日珥惟妙惟肖，有的

像太阳的大耳环;激烈的耀斑爆发显示出威力无比的壮观景象。

谱斑 太阳色球上出现的大块增亮区称为亮谱斑;较暗的称为暗谱斑。一般谱斑的温度比周围高 1 000 K 左右,其尺度从几千千米到几十万千米。利用波长为 396.85 nm 或者波长为 393.37 nm 的一次电离钙的 H 线或者 K 线得到的钙谱斑比利用波长为 656.28 nm 的 H_α 氢谱斑要清晰。光斑只能在日面边缘处观测到,而谱斑在整个色球上都可以观测到。磁场是光球上的光斑和色球上谱斑的联系纽带。谱斑与黑子有密切联系,谱斑多出现在大黑子和黑子群附近,当黑子多时,谱斑也比较多。谱斑的寿命比黑子长。

耀斑 耀斑是发生在太阳色球高层大气和低日冕区的一种急骤不稳定过程,也是太阳大气上最复杂和最激烈的活动现象,在很短的时间(约 100~1 000 s)内释放出高达 10^{23}~10^{25} J 以上的能量。

用色球望远镜观测时发现色球突然迅速闪耀的亮斑,这就是耀斑(如图 13.3)。耀斑的寿命不长,约为几分钟到几十分钟。一般,耀斑的面积越大,寿命越长。绝大多数耀斑都出现在双极黑子群附近区域。

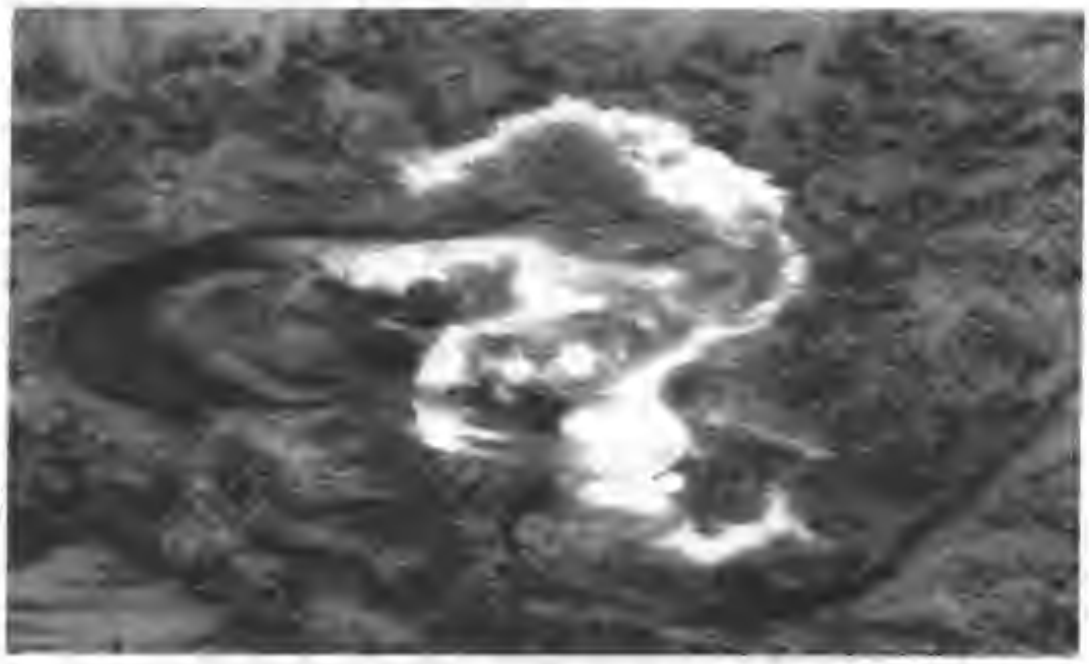


图 13.3 太阳色球上的耀斑

耀斑是很复杂的太阳活动过程,耀斑发生时,会产生高能电磁辐射、射电辐射、高能粒子和等离子体爆发等,有的还伴随有一系列的动力学现象,如日浪、日喷和日冕物质抛射等。特大的耀斑几乎在所有波段(包括 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光和射电)都发射非常可观的辐射,还发射高能粒子流(叫质子事件),这些对地球会产生重大的影响。例如耀斑爆发时,地球电离层底部的电子密度急剧增大,会发生地球磁暴和无线电短波衰退或传播中断。

此外,在 γ 射线、X 射线、紫外、光学、红外和射电波段产生的电磁辐射能量大约仅占太阳耀斑能量的 25%,而其余约 75%的耀斑能量是通过太阳高能粒子辐射和等离子体流发出去的。当太阳上大耀斑出现之际,会发射出高能

粒子流，这包括接近光速的电子和氢的原子核及其他高能粒子，称为太阳宇宙线。太阳宇宙线高能粒子侵入地球后，引起极区大气电离度增加，还会导致通过极区的无线电波被严重吸收，导致短波波段通讯中断。由于这种量级的太阳宇宙线只能沿地球磁力线进入极区附近，因此只有地球的高纬地区会出现极光，发生地磁暴或地磁扰动等。

日珥、暗条与日浪　日珥是太阳表面喷出的炽热气体流，是美丽的太阳色球活动现象。从测量得知，日珥的物质密度比日冕大一千倍到一万倍，温度低于日冕约为 7 000 K，它在色球上的投影是暗条。日珥活动的速度约为 250 km/s，上升高度可达 6×10^5 km 到 7×10^5 km，然后再向色球层落下，也有的日珥向上喷射后长期悬浮于日冕之中。

日珥的分类繁多，但人们倾向于把它们分成两大类：宁静日珥和活动日珥。宁静日珥有较稳定的结构，寿命可持续几个月，在这期间日珥长度增长到 10^5 km，并缓慢向太阳极区移动。它的温度约 5 000～8 000 K，磁场强度为 5～30 Gs。活动日珥位于活动区附近，气流运动激烈，寿命只有几分钟到几小时，呈现有日浪、日喷、环状等形态(见图 13.4)。

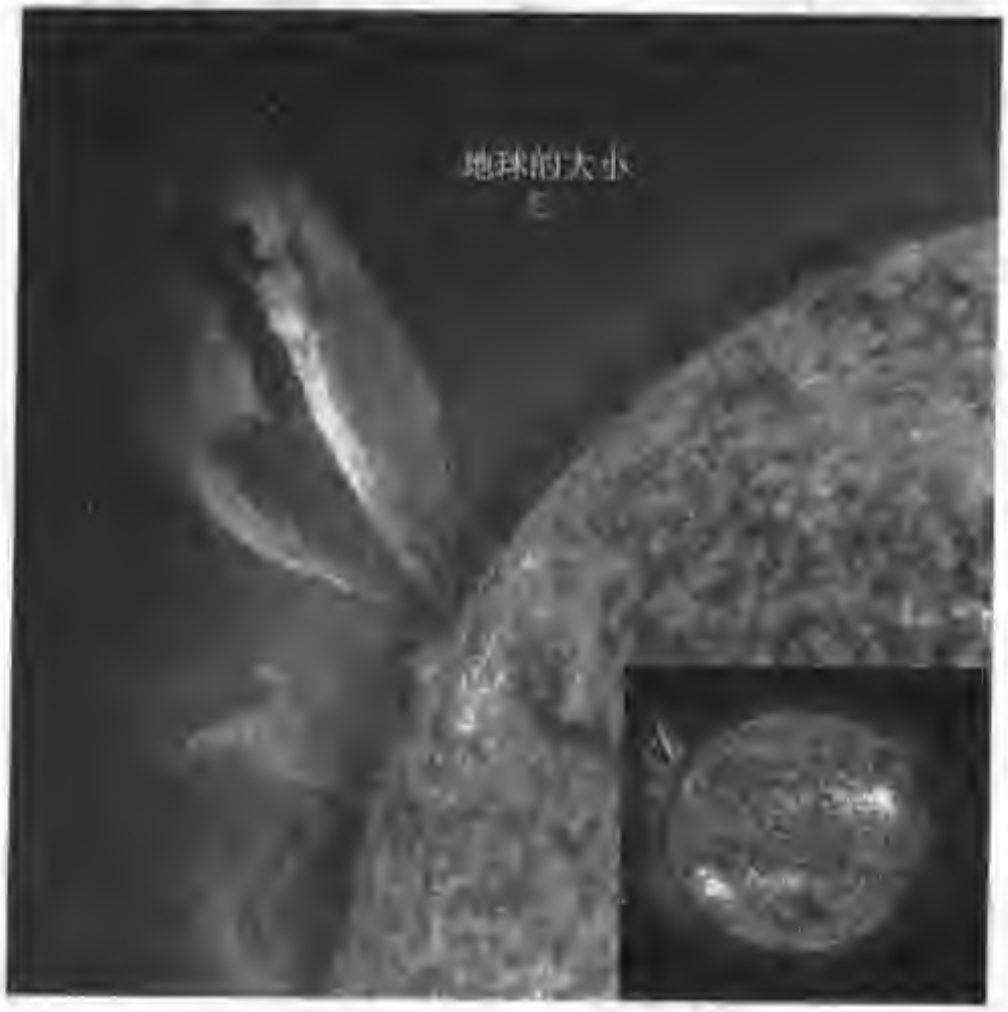


图 13.4　活动日珥

在色球上面，可以看到如同“燃烧的火焰林”一样的针状物，它们变幻莫测，平均寿命约为 5 分钟，其高度平均约为 $2\times10^3\sim10^4$ km。针状物的方向不是总沿着太阳的径向分布，而是受日面磁场的控制。色球上有纵横交错的复杂网络，

其网络单元的平均大小为 $3\times10^4\sim3.5\times10^4$ km，其平均寿命为 19～21 小时。色球像一个波涛滚滚的“海洋”，时常发生着惊涛骇浪，称做日浪，巨大的日浪的高度可达 5 000 km。

第3节 日冕活动

一、日冕物质抛射(CME)

在太阳活动极盛时期，日冕上经常发生大规模的强烈喷射活动，日冕物质沿着磁力线向外流动，这种活动被称为日冕物质抛射。日冕物质抛射常发生在太阳冕洞区域附近。这类抛射活动会以每秒数百千米的速度将数十亿吨，温度高达百万度的气体抛射到行星际空间(见图 13.5)。在太阳活动极小时期，喷流射线常在太阳低纬度区域发生。

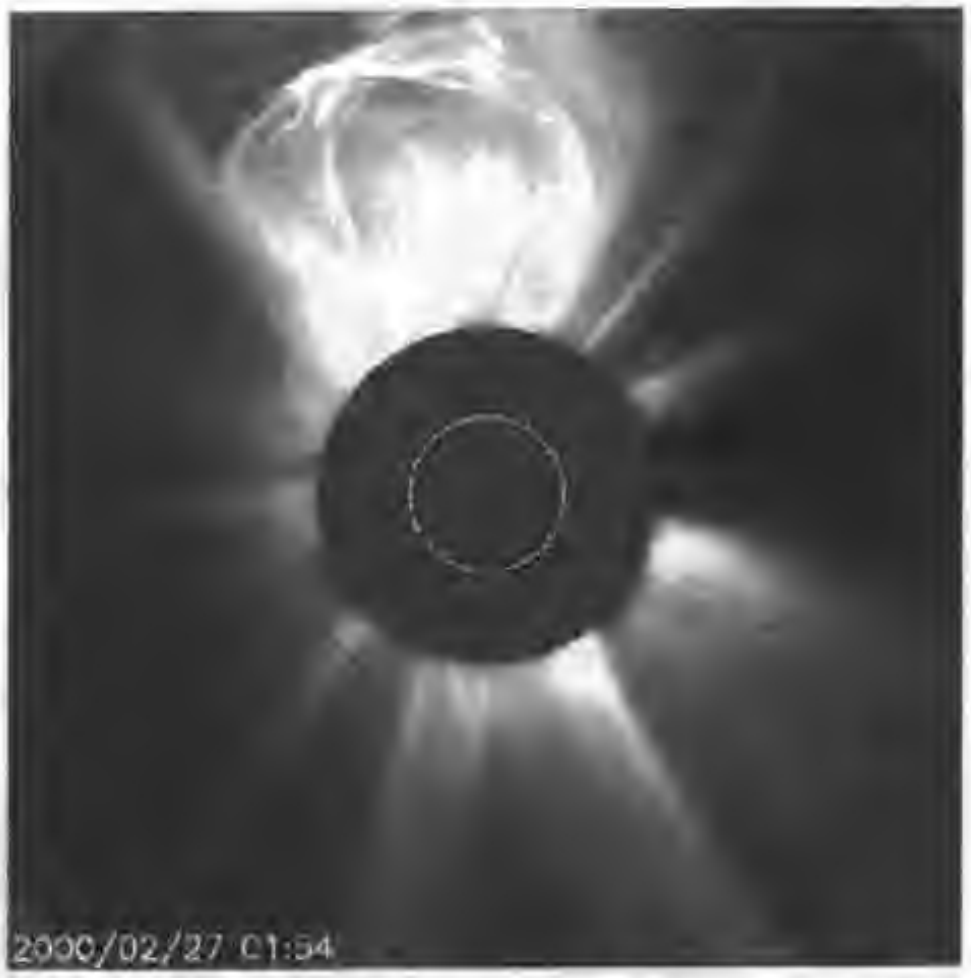


图 13.5 日冕的物质流延伸到距离日面很远的太阳系行星际空间

大多数日冕物质抛射都是沿着径向抛射，似乎总在沿着开放的磁场不断地流动。最大的抛射速度达 2 000 km/s。最大抛射质量达 100 亿吨；抛射的能量比大耀斑的能量约大 10 倍。日冕物质流抛射的频率很高，如 1973 年(接近太阳活动极小年)平均每天 0.74 个，1980 年(近太阳活动极大年)为每天 3 个。日冕物质抛射的高度和密度都随太阳活动而变化，与太阳黑子、耀斑爆发及太阳射电

爆发等密切联系。

日冕物质抛射由日冕的非均匀磁场所产生，磁力可能是驱动日冕物质抛射的主要力量来源。最近日冕探测器(TRACE)卫星拍摄的图像显示：几乎一半的冕环有等离子体亮斑，小斑点以惊人的速度移动。因此科学家推断，冕环不是一种静止的等离子体结构，而是从太阳表面并在日冕磁结构之间喷射出的超高速等离子体流，就像从喷泉涌出的水弧。

日冕物质抛射产生的激波和本身携带的物质流和磁场都会给地球的电磁环境带来严重影响，干扰电离层的电离状态，引起地球的磁暴或磁场的扰动等。目前一些科学家依据日冕物质抛射来预报地磁活动。

二、太阳风暴

在太阳活动峰年时期，太阳耀斑爆发时也伴随有强烈的太阳风激流，人们称之为太阳风暴。研究表明，冕洞是强劲的太阳风源。这种劲风从太阳一直吹到地球附近，对近地空间磁场有很大影响。在强劲的太阳风吹拂下，地球磁场受到压缩，形成磁层。

最近，冕洞的空间观测与研究发现了冕洞和磁场随太阳的自转一起转动，认证出冕洞是高速太阳风(700～800 km/s)的风源，这也可以解释地球磁暴的重复出现。据美国"天空实验室"的观测，当一个极的极区冕洞变大时，另一个极的极区冕洞却变小，从而使两极的冕洞面积之和基本保持不变。冕洞的寿命平均约为5～6个太阳自转周期，有的冕洞的寿命可长达一年。日冕凝聚区是日冕中电子密度比周围大的区域。一般认为，日冕凝聚区是太阳局部活动区在日冕的延伸。日冕凝聚区大致呈环状或亮节状，内部有更细致的结构；其高度约为5×10^5 km到5×10^6 km，厚度约为5 000 km，温度约为4×10^6 K。

*第4节　日　震

20世纪60年代后期，美国天文学家莱顿等人观测到太阳大气在不停地一胀一缩地脉动，大约每隔296±3 s振动一次，称做"太阳五分钟振荡"。这种震荡的规模很大，在任何时刻，大约有三分之二的太阳表面在做这种振动。在10^3～5×10^4 km范围内，振动的步调基本一致，即一股气流冉冉升起，另一些气流同时徐徐下降，如同浩瀚的大海，五分钟就出现巨浪波涛，这波涛纵横10^3～5×10^4 km，上下错落25 km。后来发现，太阳的振动不止有5 min的周期，还有7 min、160 min以上的多种振动周期，振荡引起的大气速度约为1 m/s。分析认为这种振荡是太阳大气中的声波和重力波的现象，并认为这种振荡是太阳整体的振动，称之为日震。太阳光球表层的脉动是太阳内部传播的声波反射到表面

而产生的。声波不仅能使光球表层局部区域的气体随之上下运动，而且还能深深地穿透太阳内部，引起整个太阳表面的振动，所以叫做日震。

测量太阳的“震波”，分析太阳振动的内在原因已成为目前太阳物理研究的重要课题。我们知道，关于太阳的大量信息来自太阳表面，而太阳的内部很难揭示，然而日震的观测研究有助于获得太阳内部及日核的信息，对研究太阳自转、太阳磁场起源、太阳活动规律都有着重要意义。

SOHO 太阳探测卫星上面有三台仪器用于探测日震，可测量太阳微小的亮暗变化，得到整个太阳的长周期日震数据。科学家通过观测太阳光球脉动，即日震来探求太阳内部深处的奥秘。日震的周期长达几个小时，周期越长则穿透越深，较小而较短的周期则相对于较浅的大气层次的振动。因而探测研究一系列不同周期的日震，就可以了解太阳内部各个层次的物理特性。这类似于利用地震波研究地球内部结构。

第十四章

日地关系

昼夜交替，四季循环，这是地球自转的同时又绕太阳公转运动的结果。太阳辐射是地球上光和热的主要能量源泉。在阳光的沐浴下，地球上草木葱绿，鲜花盛开，鸟翔高空，鱼潜海底，大地生机盎然！太阳是地球上重要的能量来源，不仅直接可用，而且是其他能源如煤、石油和水动力的重要源泉。没有太阳就不可能有由古生物转化而来的煤炭、石油等燃料；没有太阳也就没有水的循环，空气的流动和潮汐现象。

太阳辐射的总量基本是稳定的，仅有大约 0.1%～0.2%的起伏变化。但是，太阳辐射的这个微小变化，特别是在紫外和 X 射线波段的涨落会给地球带来重大的影响。当太阳活动厉害时，太阳的紫外和 X 射线对地球高层大气成分和结构有较大的影响，会引起地球上电磁的复杂变化与气候变化。

第 1 节　太阳是一个超级实验室

太阳的内部具有极高的温度和极大的压力，它的特殊温度、密度、磁场和极大的物理尺度提供了地球上实验室所无法比拟的物理条件。通过对太阳的研究，可以验证新的物理理论，也促进了具有重大实用价值和理论价值的学科发展，如原子物理学、磁流体力学和等离子体物理学等。

20 世纪，爱因斯坦创立了广义相对论，日食的观测为此理论提供了有利的佐证。按照广义相对论，在引力的作用下，空间是弯曲的，因此光线传播的途径不是直线，而有一定的曲率。但这实验在地面的实验室无法检验，因为地球质量不够大，整个地球所产生的光线偏转也是微不足道的。太阳的质量比地球的质量大 30 多万倍，它产生的引力场导致的光线的偏转要大得多，所以太阳是最合适的物理实验室。1919 年 5 月 29 日的日食发生的时候，天文学家把食甚时刻拍到的太阳附近的恒星照片，与以前晚上拍摄的照片进行比较后，发现这些星的位置确实有了变动。根据广义相对论的计算，星光在太阳重力场中偏转的角度应为 1.74″，对两套底片实测的结果分别是 1.61″和 1.98″，和理论计算的结果惊人的吻合，这引起了全世界的轰动，此后多次日食都证实了相对论所预言的星光偏转现象。

极光现象　在地球上靠近地磁极区或高纬度地区，晚上常常可以看到天空中有绚丽多彩、变换多端的光带，这就是极光（参见图 14.1）。极光现象可以维持几分钟到几小时。它可以说是太阳和地球大气的一种亲切的“对话”。

为什么会出现极光现象呢？这是由于太阳活动常伴随有带电高能粒子流（携带着 10^4 eV 左右的能量）的发射。这种高能带电粒子流到达地球大气后，使高层大气中的气体分子或原子激发或电离而形成极光现象。由于地磁场的作用，这些高能粒子流只能沿着地球的磁力线运动而集中到地球的两个磁极，所以，在高纬地区才能看到极光。

极光出现的强度和频繁程度与太阳活动的强弱有关。



图 14.1　在南极拍到的极光照片

第 2 节　太阳对地球环境的影响

一、对地球电磁环境的干扰及对无线电通讯的影响

地面上的短波无线电通讯是靠地球电离层的反射而传播的。大气的电离层的物理状况受太阳紫外辐射及太阳活动的影响。在耀斑爆发和日冕物质抛射时期，会引起电离层的一系列反应：由于 0.1～1 nm 波长的太阳 X 射线爆发，会引起地球的向阳面 D 层（离地面 80～100 km）的电离度急剧增加，从而引起短波和中波无线电信号衰减或完全消失，长波信号增强，这种现象可持续数分钟之久。此外，太阳活动期间，远紫外辐射增强，会引起 E 层（离地面 100～120 km）和 F 层（离地面 150～500 km）电离度的突然增大，从而产生无

线电频率的突然漂移。此外，太阳活动期间还发射出大量高能带电粒子，当这些高能带电粒子运动到近地空间时，被地球磁场引导到高磁纬地带，也使 D 层电离度增加，导致低频信号的振幅和相位改变，影响通讯和导航，有时极区高频通讯会完全中断数天。

历史上就曾经出现过多次大片地区的短波无线电广播和电报突然中断 1 小时左右，使通讯陷入紊乱状态的事件。后查明这种事件不是机电设备的故障，而是由于太阳上发生了色球爆发或日冕物质抛射，破坏了地球电离层的电离状态，改变了它的物理特性。例如 1989 年太阳耀斑爆发射出的高能粒子流使加拿大魁北克省发电站遭到破坏，使该地区 600 多万居民遭受长达 9 个小时的停电。又如，2000 年 6 月 2 日—9 日及 6 月 11 日，我国不同范围受到了太阳风暴的干扰，部分频率信号中断，其中以 6 月 9 日的一次最大，全国范围短波信号受到干扰、持续 17 小时之久。

二、对近地空间及宇航的影响

太阳活动进入活动峰年时，太阳黑子相对数增加，耀斑爆发、日冕物质抛射等现象频繁出现，太阳活动增强，并且发射出大量高能带电粒子（一般具有 1～1 000 MeV 能量）。

质子比电磁波传播得慢一点，约在太阳耀斑出现后 1～2 小时到达地球附近。太阳质子辐射常被称为“太阳宇宙线”，它们对大气的直接影响比其他微粒流大得多。太阳质子主要进入地球大气的高纬区，特别是极区附近，当太阳质子进入到近地空间与同期发生的 γ 射线暴、X 射线爆发联合作用，地球磁场将被压缩，绕地球赤道的高空环电流大大增强，不仅使电离层无线电讯的临界频率突然改变，也会干扰和破坏卫星及空间探测器的设备和运行，甚至威胁到宇航员的生命安全。

三、引起地球磁暴和磁扰

大耀斑爆发后微粒流辐射可以持续 1～5 天。太阳质子能够穿透到离地面 30 km或更低的高度，增强地球大气的电离度，造成极冠吸收事件和地磁的磁暴。观测统计表明：太阳质子事件也存在 11 年的周期，太阳活动峰年及附近时期出现的质子事件比太阳活动宁静年强 7 倍左右。

近年观测还表明，地球磁场的扰动和磁暴发生的周期与太阳风随太阳自转而旋转的周期一致。太阳风对地球磁层的作用的图景如图 14.2 所示。

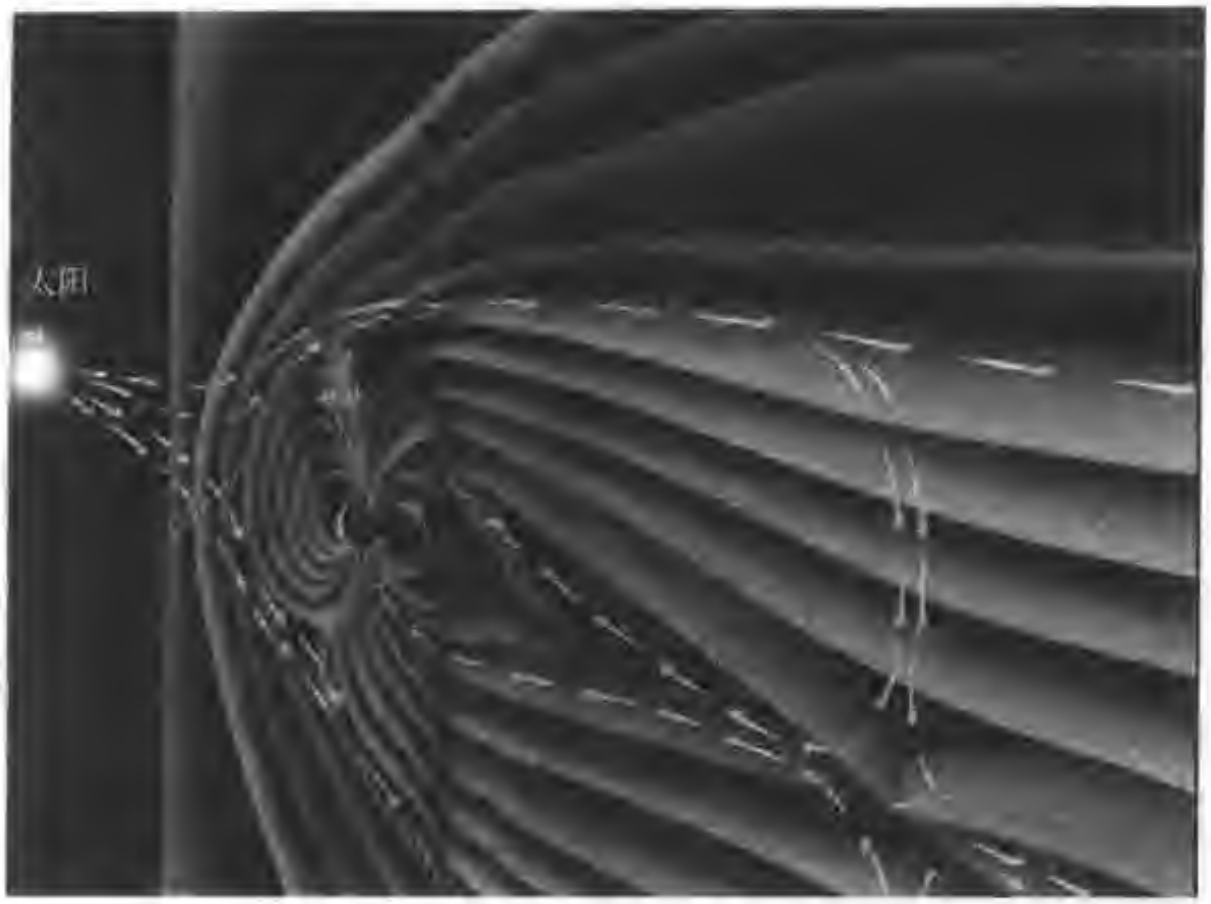


图 14.2 太阳风作用地球磁层的图解

四、对人体健康的影响

有些科学家认为，太阳活动引发地磁扰动或磁暴，而地球磁场对人体的内分泌具有显著的调制作用，人体的神经系统对地磁扰动非常敏感。在通常的情况下，人体的电磁场与地球电磁场处于相互交融的状态，当发生强烈太阳活动时引起地磁扰动，会打破人体电磁场和地球电磁场的平衡，使人体的某些功能发生紊乱，导致人体的免疫功能削弱，人类的植物神经系统的紧张程度会提高，攻击性行为加剧，交通事故增多，判断错误率上升等。

有的科学家报道，在太阳活动引起的地球磁暴期间，精神病患者会猛增若干倍。对此，有的医学家认为，高频电磁波照射可使人类淋巴细胞发生病变；大量的长时间的太阳微波辐射会造成人体免疫系统发生障碍，这样细菌和病毒就容易进入体内，从而促使某些疾病的发生。目前这类课题还无定论，处于研究阶段。

*第 3 节 太阳对地球气候与地震的影响

一、太阳辐射变化引起气候变化

前面说过，太阳辐射是地球上光和热的主要来源，它的微小变化也会给地球

带来严重的影响。虽然说太阳的辐射总量是基本稳定的，但是也有0.1%～0.2%的起伏变化，特别是在紫外波段和X射线波段有较大幅度的涨落。当太阳活动剧烈时，太阳的紫外辐射和X射线辐射对地球高层大气的成分和结构有较大的影响，会引起地面附近复杂多变的气候变迁。虽然太阳常量的变化只有千分之一二左右，但它足以引起大气环流和气候的变化。雨量、温度、湖泊水位及河流洪水流量等都和黑子相对数的11年周期存在着一定的相关性，而某些地区的气压、温度、雨量都与太阳黑子的22年磁周期有较显著的相关性。科学事实表明，激烈的太阳活动现象，如太阳大耀斑爆发、日冕物质抛射等都会给地球的气候带来重要的影响；特别是平流层中的臭氧层受太阳活动的影响最大，而臭氧层的变化会导致全球的气温变化。太阳活动的11年周期性给地球的气候带来相应变化，例如1957年—1958年是太阳活动的峰年期，世界上好些地方气候反常，历史上罕见的洪水、干旱、酷暑、大雪……频繁发生。据专家预测，到2100年全球气温还将增加1～3.5 ℃，海平面因两极的冰川溶化会上升15～95 cm，许多国家和地区，如孟加拉国和中国沿海地带及太平洋和印度洋上的许多岛屿将被水淹没。这将给人类的生命安全和社会文明带来严重的危害。

二、太阳活动对地球臭氧层的影响

地球上空10—50 km大气平流层中存在着一层臭氧。虽然臭氧仅占大气成分的十万分之一，但这一层薄薄的“臭氧轻纱”，如太空服般笼罩着地球，吸收和挡住了99%以上有害于人体和其他生物的紫外线，保护着地球上人类及其他生物的生存。臭氧层是联络太阳活动和天气变化的一种媒介物。臭氧层的分布或密度变化受到太阳紫外辐射量变化的影响，从而使大气环流发生变化，随之可影响天气与气候。全球臭氧的总量平均值存在季节性的变化，最大值在冬至附近，最小值在夏至附近。臭氧总量与太阳黑子相对数相关，在黑子相对数达到极大的2～3年之后臭氧将达到极大值。

三、太阳活动对地震的影响

地震发生的次数与太阳活动兴衰的11年和22年的周期相关。这种现象可能是由于地震与日面的大耀斑爆发所引起的磁场变化有关，即大耀斑引起日地电磁场耦合，触发了地震，不过，这种理论还需要进一步分析研究。



习　题

1. 太阳各层大气的太阳活动现象有哪些特征？

2. 根据书中图12.2的太阳黑子照片求出太阳黑子的沃尔夫相对数（提示：黑子相对数为R，由下式计算：$R=K(10g+f)$式中g是观测到的黑子群数；f是

观测到的单个黑子总数，K 是台站之间的换算因子。我们可初步选 K＝1。）

3. 利用维恩定律来确定以下情况的峰值波长是多少：

（a）在温度为 10^7 K 太阳的核心

（b）在温度为 10^3 K 的太阳的对流区

（c）在温度为 10^4 K 的太阳光球层低层

4. 如果对流的太阳物质以 1 km/s 的速度运动，穿过一个 1 000 km 区域的典型米粒组织须要多长时间？并与大多数太阳米粒组织有约 10 分钟寿命的情况做比较。

5. 利用斯特藩定律计算一个温度为 4 500 K 的太阳黑子和它周围光球温度为 5 800 K 所发射的每单位面积的能量之比。

6. 太阳风离开太阳携带出的质量大约是 9×10^5 kg/s。这与太阳以辐射形式损失的质量之比是多少？

7. 太阳每秒发射 4×10^{26} J 的辐射能量，完成一个太阳核反应全过程，产生 4.3×10^{-12} J 的电磁能和释放两个中微子。假定中微子在震荡中有一半转换为其他的粒子。在完成一个太阳核反应全过程中，中微子离开太阳穿行了 1 AU，估计太阳的中微子每秒穿行的路程有几个地球直径？

8. 为什么说太阳活动的本质是磁活动？太阳活动对地球有哪些影响？你了解有哪些方法可以预报太阳活动？

第十五章

恒星的测量

恒星是本身能发光的星球。在浩瀚的宇宙中除了太阳以外，所有恒星都离我们非常遥远。平时，我们眼睛直接能看到的恒星大都位于银河系。恒星世界丰富多彩，有刚刚形成的原恒星，也有年幼的主序前星，以及众多的青壮年主序星，还有步入晚年的红巨星和临终的白矮星、中子星与黑洞。按照光度来分，有光度稳定的正常星，也有光度变化的变星及剧烈爆发的超新星。恒星的结构和演化研究是天体物理学的重要核心问题，也是探索宇宙演化奥秘的重要途径。

第 1 节　恒星的距离

恒星的距离常用“光年”来度量，即光(光速约 3×10^5 km/s)在一年所走的距离，

$$1\ \text{l.y.}=9.460\ 530\times10^{12}\ \text{km}$$

太阳光传到地球约需要 8 分钟，但是，光从最近的恒星——半人马座的比邻星到地球需要 4.3 l.y.。我们熟知的牛郎星(α Aql)离我们有 16.5 l.y.，织女星(α Lyr)距我们有 26.5 l.y.，而它们之间相距 16 l.y.，所以如果他们同时穿越银河到鹊桥相会，即使以光的速度飞驰，也需要 8 年之后才能相会。明亮的大角星(α Boo)距离我们更远，约有 36 l.y.；毕宿五(α Tau)距离我们 68 l.y.，而天津四(α Cyg)距离我们约为 1 600 l.y.，可见恒星离我们是多么遥远。测定恒星距离的方法主要有三角视差法、分光视差法及星团视差法等，这里主要介绍前两个重要的方法。

一、三角视差法

天文学家经常应用一个比光年更长的尺度叫秒差距(pc)来量度距离。它是由三角视差法定义的，它相当于周年视差 $\pi=1''$ 的距离。这种方法类似于大地的三角视差测量，叫三角视差法。

什么是“视差”呢？举个例子：举起你的右手，伸出一个手指，你先闭起左眼用右眼看，然后再闭起右眼用左眼看，两次看到手指相对其背景的位置不同，这个角度位移差就叫做视差。你还会发现：手指距离眼睛越近，视差越大，因此“视差”

的大小就可以用来量度距离的远近。

地球在绕日公转的过程中，在不同时间处于轨道的不同位置，因此在不同时间观测同一天体在天球上的位置就有差异。原则上，对同一恒星，根据相隔半年的两次观测所测定的恒星的位置，即可算出相对地球轨道半径对应的视差角。

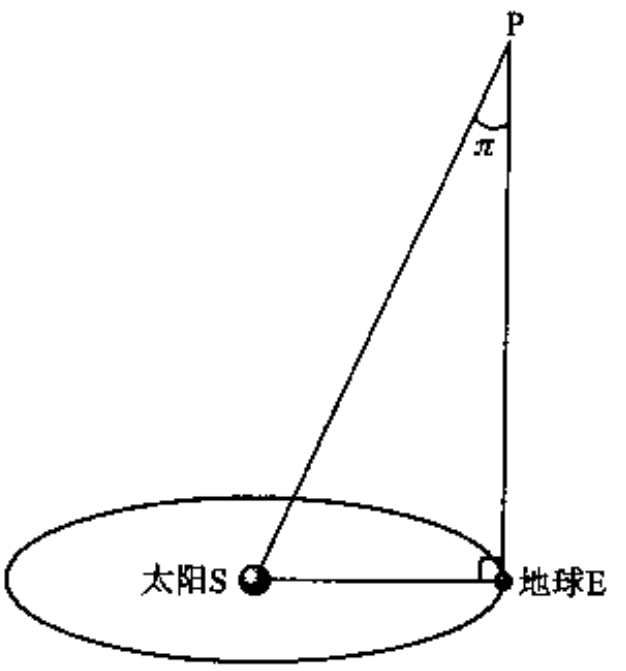


图 15.1 恒星的周年视差示意图

（恒星对地球和太阳的张角为 π，这个 π 角叫周年视差）

周年视差（用 π 表示） 当恒星与地球的连线垂直地球轨道半径时，恒星对日地平均距离 a 所张的角 π（参见图 15.1）叫恒星的周年视差。

周年视差 π（以角秒为单位）与太阳到恒星的距离 r 之间的关系为

$$\sin \pi = a/r$$

式中 a 为日地平均距离（$a=1$ AU）。

由于恒星的视差 π 一般都很小，故上式可以近似写为

$$\pi \approx a/r$$

式中视差角 π 的单位为弧度，已知 1 rad＝206 265″（角秒）。周年视差 π 用角秒表示，周年视差 $\pi=1''$ 的恒星与地球的距离 r 为 206 265 AU（天文单位），这个距离定义为 1 秒差距（1 pc）。换句话说，从某恒星上看日地平均距离（1 AU）所张的角为 1″时的距离叫 1 pc。用数学描述距离与周年视差的关系为

$$r = 1/\pi$$

其中 r 以 pc 为单位，π 以（″）为单位。

根据此式，由测量得到恒星的周年视差 π（以角秒计算），就可以计算出恒星的距离 r（以 pc 为单位）。三角视差的基本测量方法是拍摄两张相距半年的待测恒星及背景星的照片或 CCD 图像，在实际观测中，为了减少误差，往往一年拍摄多次，而且需要经历几年时间，拍摄数十张照片或 CCD 图像，然后进行研究归算。迄今为止，在地面上用三角视差方法测出距离的星约有 8 000 多颗。

以上三种距离单位的关系是：

$$1 \text{ AU} = 1.581\,3 \times 10^{-5} \text{ l. y.} = 4.848\,1 \times 10^{-6} \text{ pc}$$

$$1 \text{ l. y.} = 63\,240 \text{ AU} = 0.306\,6 \text{ pc}$$

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ AU} = 3.26 \text{ l. y.}$$

三角视差是测定恒星的距离最基本、最可靠的方法。恒星越远，视差角越

小，要求观测的精度越高。近年，根据依巴谷卫星的测量结果，美国航空航天局天文数据中心发行的CD光盘列有11万颗星的精确周年视差 π 值数据(精确到0.002″)。

二、分光视差法

分光视差法是利用恒星光谱中某些谱线的强度比和绝对星等的线性经验关系，即由测定一些谱线对的强度比求绝对星等，进而求出距离，这种方法叫分光视差。

常用的光谱线对有：一次电离锶线SrⅡ 407.8 nm与中性铁线FeⅠ 707.2 nm谱线的强度比，即SrⅡ 407.8/FeⅠ 707.2；此外还有SrⅡ 421.6/FeⅠ 425.0；TiⅡ 416.1/FeⅠ 416.7；ScⅡ 424.6/FeⅠ 425.8 和LiⅡ 429.0/FeⅠ 427.1 等线对。

为了定标，先选取一批已知三角视差的恒星，并知道它们的绝对星等 M。以 M 作为纵坐标，谱线对的强度比为横坐标，绘图求出直线的截距和斜率，或利用最小二乘法求出直线的截距 a 和斜率 b，则有，

$M=a+b(I_1/I_2)$；求出系数 a 与 b 后，对一些可以测定谱线强度比的恒星就可以求出绝对星等了，再通过观测它的视星等，最终可求出恒星的距离。能利用分光视差方法测定距离的恒星约有6万颗以上。

此外，测定天体距离的重要方法还有造父视差，它是利用造父变星的周期和光度(绝对星等)的关系确定恒星、星团或星系的距离，在变星的章节中有详细阐述。

第2节　恒星的绝对星等与光度

恒星的视星等是指肉眼或通过天体辐射接收器所观测到的恒星亮度，实际上是接收到的星光的照度，由于恒星的距离不同，所以它不能客观地反映恒星真正的发光强度。

为了比较恒星亮度的真实差异，天文学家规定在10 pc的距离来比较恒星的亮度，即将恒星在10 pc处的视星等定义为**绝对星等**。

设恒星在 $r_0=10$ pc 处亮度为 E_0，在距离 r(pc)处的亮度为 E，则根据天体的亮度与距离的平方成反比，目视星等 m_v 和目视绝对星等 M_v 有如下关系：

$$E/E_0=(r_0/r)^2$$

对此式两边取对数，有

$$-2.5\lg E/E_0=-2.5\lg(10/r)^2$$

由于 $-2.5\lg E=m_v$，$-2.5\lg E_0=M_v$。经整理后可以得到如下目视星等 m_v 与目视绝对星等 M_v 的重要关系：

$$M_v = m_v + 5 - 5\lg r$$

或写作

$$m_v - M_v = 5\lg r - 5$$

式中 r 以 pc 为单位；$m_v - M_v$ 叫做**距离模数**。由此可以看出，由天体的距离可以求出绝对星等；反之，也可以由绝对星等来求它的距离。

恒星的光度 恒星每秒发出的总辐射能量叫恒星的光度(L)，它反映恒星真正的发光强度。在恒星世界中，超巨星和巨星是光度大的星，矮星、亚矮星是光度小的星，太阳就是一个黄色的矮星。恒星世界丰富多彩，光度大的超巨星如天津四星(α Cyg)，它的绝对星等大约为 -7.2^m，其光度比太阳强 6 万倍。而光度小的天狼星的伴星是一个白矮星，它的绝对星等为 11.5^m，光度不及太阳的万分之一。织女星的光度是太阳的 48 倍，参宿七的光度是太阳光度的 2.3 万倍！看起来，它们都只是闪闪星星，哪能和光辉的太阳相比。正是由于它们比太阳遥远得多，所以看起来它们只发出微弱的星光。也有许多恒星的光度比太阳暗得多。例如，半人马座比邻星，它的光度只有太阳的 2.5 万分之一，更暗的星的光度只有太阳光度的几十万分之一。

严格说，光度对应的星等是绝对热星等系统，即用测热辐射计测量恒星的总辐射所得到的星等系统。如果知道了某恒星的热绝对星等 M_{bol}，即可求出它的光度 L，即 $M_{bol} = -2.5\lg L$。若以 $M_{bol\odot}$ 和 M_{bol} 分别表示太阳与某恒星的绝对热星等，$L_\odot$ 和 L 分别表示太阳与某恒星的光度，则该恒星的绝对热星等与太阳的绝对热星等之差为

$$M_{bol} - M_{bol\odot} = -2.5\lg(L/L_\odot)$$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

式中，σ 为斯忒芬-玻耳兹曼常量，$\sigma = 5.670\,32\times10^{-8}\ \mathrm{J/(m^2\cdot K^4\cdot s)}$。

一般令 $L_\odot = 1$，则有 $\lg L = -0.4\,(M_{bol} - M_{bol\odot})$。

绝对热星等与绝对目视星等之差叫热改正 BC，即

$$BC = M_{bol} - M_v$$

已知太阳的绝对目视星等 $M_v = +4.83$，太阳的热改正 BC 为 -0.08，

$$M_{bol\odot} = 4.83 - 0.08 = 4.75$$

所以，$\lg L = 0.4(4.75 - M_{bol})$

如果通过光谱的方法测定了热改正，则恒星的热星等可以通过目视星等与热改正来计算求得。

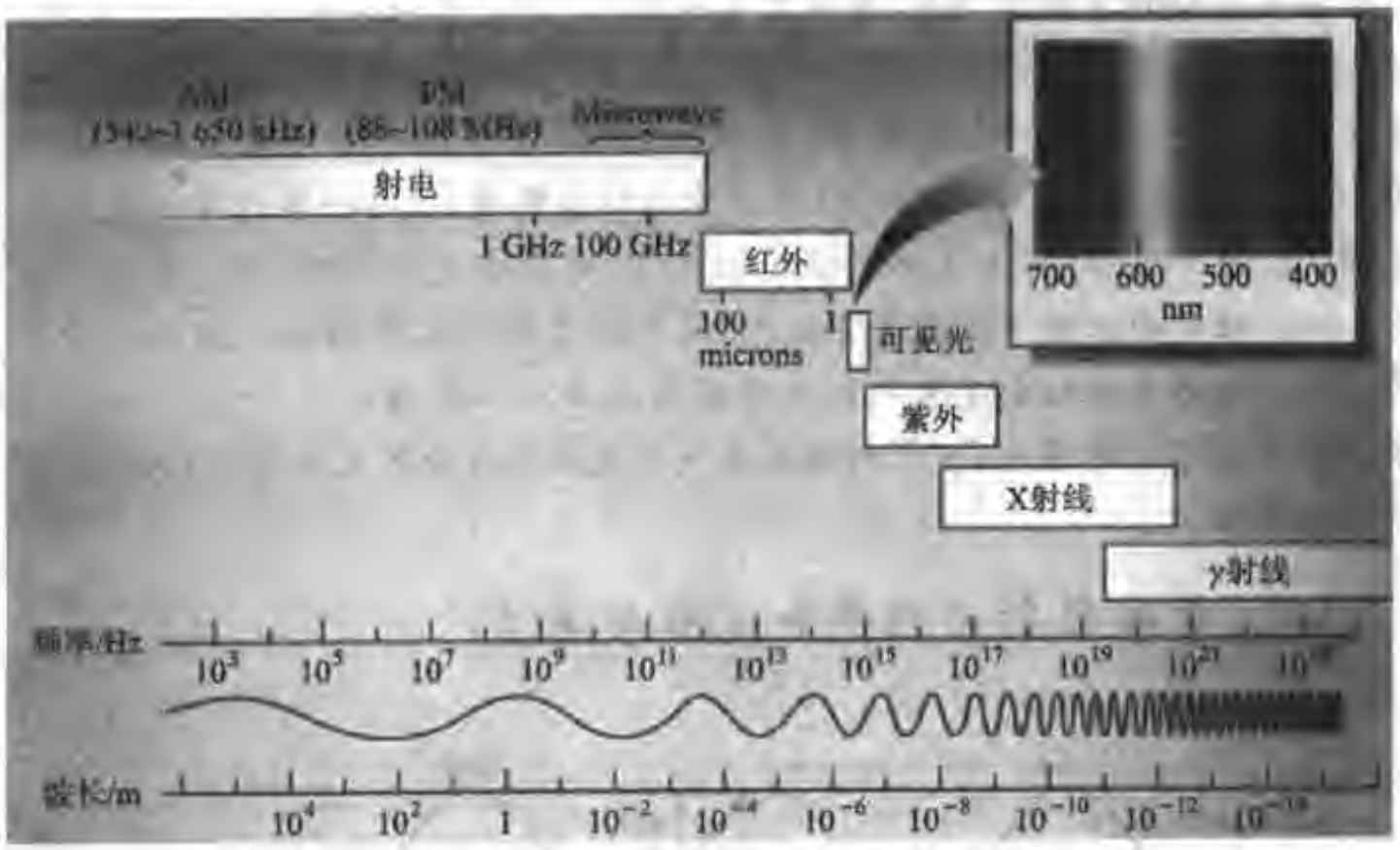
第 3 节 恒星的辐射与温度

一、恒星的电磁辐射

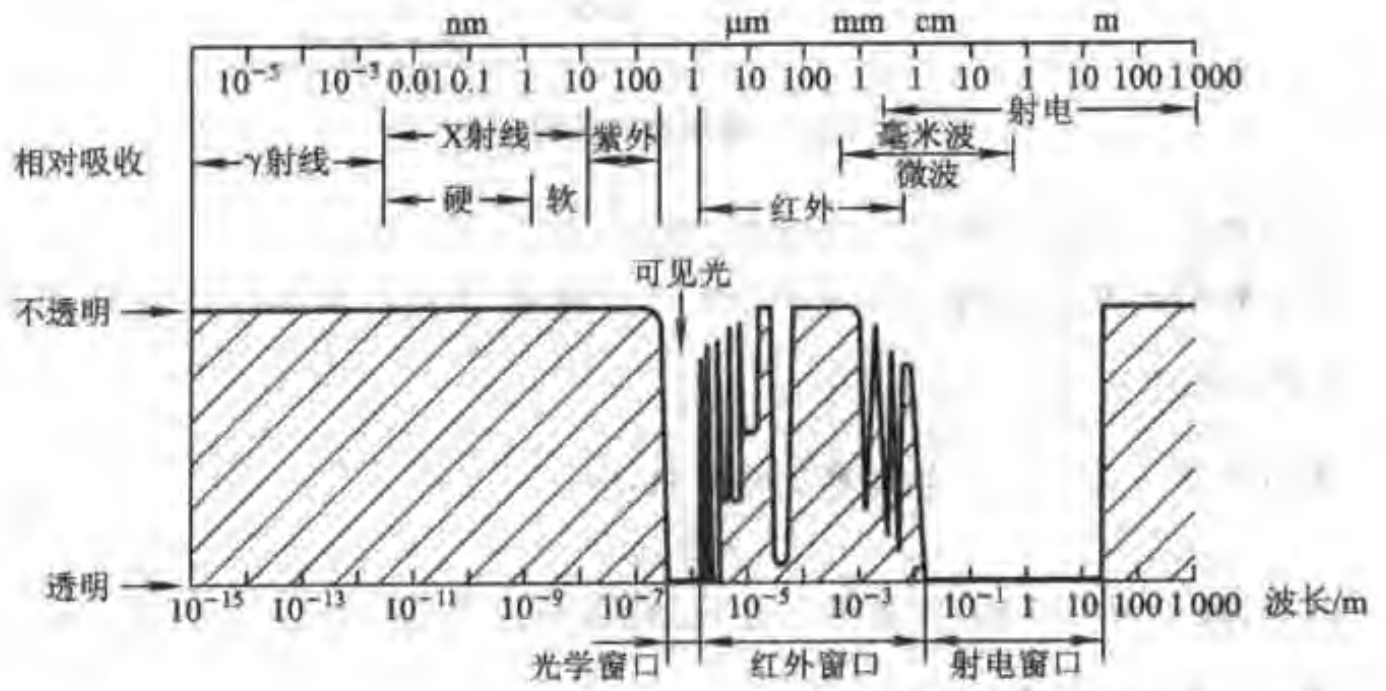
恒星及所有天体的电磁辐射能带来丰富的信息，其波段的范围很广，我们眼

睛所看到的这部分很窄(300～900 nm)的波段叫可见光,其他波段的电磁辐射虽然我们眼睛看不见,但是用特殊的探测器是可以探测到的,从短波到长波按顺序排列如下(参见图 15.2):

γ射线(10^{-11}～10^{-2} nm),X 射线(10^{-2}～10 nm),紫外辐射(10～350 nm),光学辐射(可见光 350～770 nm),红外辐射(770 nm～100 μm),亚毫米波(0.1 mm～1 mm),射电波(1 mm～100 m)(波长的单位是纳米(nm),1 nm=10^{-6}mm)。



(a) 天体辐射频谱



(b) 地球大气的“大气窗口”

图 15.2

天体发出的电磁辐射不是所有的辐射都能到达地面，这是因为我们的地球被一层厚达一千多千米的大气包围着，它像一个天然的“盔甲”保护着地球和人类的安全，使地球勉遭大多数小行星和彗星的撞击，然而它也像一个“屏障”阻碍着电磁辐射的通过。地球大气只有三个“大气窗口”，即光学窗口、红外窗口和射电窗口让电磁辐射相应的光学波段、红外波段和射电波段辐射通过。

天体发出的电磁辐射，短于 350 nm 的紫外辐射、远紫外辐射、X 射线辐射以及最短波段的 γ 射线辐射，都被大气中的氧、氮气体的分子和原子吸收掉，所以人们在地面观测不到天体的 γ 射线、X 射线、远紫外和紫外等波段的天体电磁辐射。比光学波段长的红外辐射(从 0.7 μm 到 100 μm)，由于受到地球大气中的 H_2O、CO_2、O_2、CH、NO 和 CO 等分子的强烈吸收，仅有一些很窄波段可以透过，称做“红外窗口”。大气对 1 mm～100 m 电磁波透过的窗口叫“射电窗口”。比 1 mm 短些的亚微米波段易受水汽、氧气和臭氧吸收的影响。比 100 m 更长的波段的天体电磁辐射受大气的电离层的吸收也不能通过。当今，人类已冲破了地球大气窗口的限制，可以到地球大气外观测全波段的天体信息，探测宇宙更深处的奥秘。

二、电磁辐射的频率和波长的关系

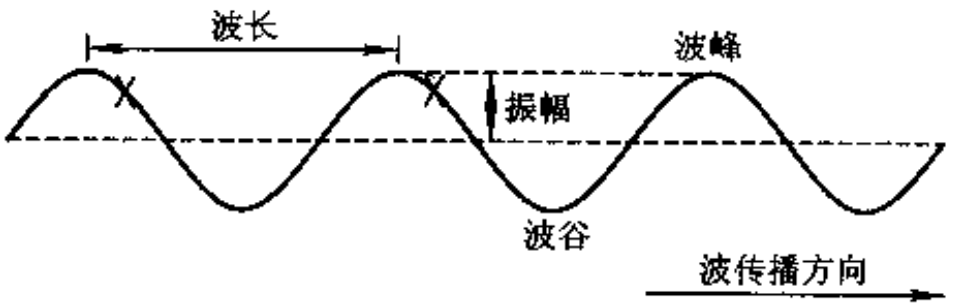


图 15.3 频率与波长的关系

波的频率 ν 是波的周期 T 的倒数，即 $\nu=1/T$。

电磁辐射的频率为每秒多少周，单位是赫兹(Hz)。例如一个波的周期为 5 s，则它的频率为 $\frac{1}{5}\ s^{-1}=0.2$ Hz。

波的速度 v 是波长 λ 与频率 ν 的乘积，即

$$v=\lambda\nu$$

例如，波长为 0.5 m，频率为 0.2 Hz 的波的速度 $v=0.5\times0.2=0.1$ m/s。

三、黑体辐射定律

天体的辐射可以近似看作黑体辐射，符合黑体辐射的定律。科学家把那些

能够在任何温度下全部吸收任何波长辐射的物体称为**绝对黑体**，或简称黑体。1859 年基尔霍夫根据大量的实验事实，总结出一条说明物体热辐射的定律：在热动平衡下，任何物体的辐射强度和吸收系数的比值与物体的性质及表面特征无关，对于所有物体，这个比值是波长和温度的一个普适函数。普适函数的物理意义就是绝对黑体的辐射强度。

1900 年普朗克定出了普适函数 $M(\lambda, T)$ 的形式，与实验的结果完全符合。后人称普适函数为普朗克函数，它的具体数学形式为

$$M(\lambda, T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

或

$$M(\nu, T)=\frac{2h\nu^3}{c^2}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$$

简写为

$$M(\lambda, T)=\frac{c_1}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}-1}$$

在 CGS 单位制中，$c_1=2hc^2=1.191\times10^{-5}\ \mathrm{erg\cdot cm^2/s}$，$c_2=hc/k=1.438\ 8\ \mathrm{cm\cdot K}$。

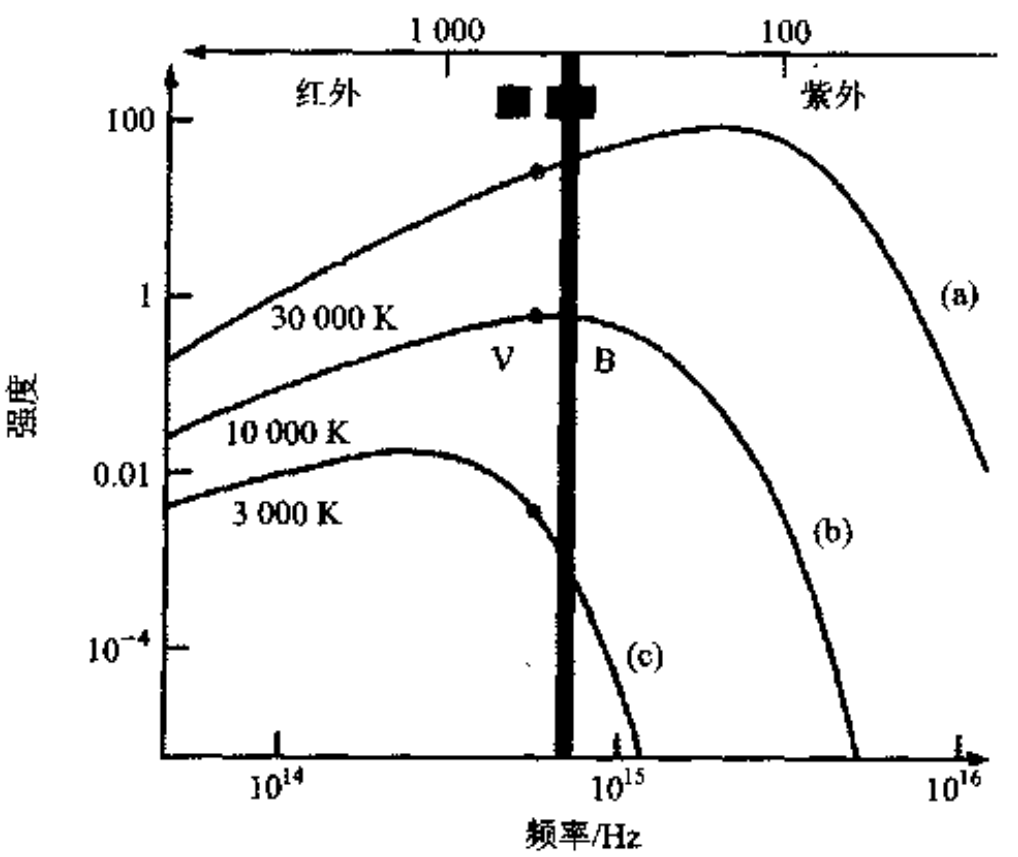


图 15.4　相应于 3 000 K，10 000 K，30 000 K 温度的黑体辐射曲线

1. 维恩定律

由图 15.4 可以看到曲线的峰值波长随温度的增加而变短（频率增加），即辐射的峰值波长与温度成反比。利用维恩定律，已知天体的辐射峰值波长可以求

天体的温度，或者已知天体的温度求它辐射的峰值波长。

在一些情况下，$\lambda T \ll c_2$，当 $e^{-c_2/\lambda T} \ll 1$，则有 $1-e^{-c_2/\lambda T} \approx 1$，

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-c_2/\lambda T}$$

这就是维恩公式。

为了定出黑体辐射能量分布曲线极大值对应的波长 λ_{max}，将普朗克函数对 λ 求导，并令导数值为零，便得到下述方程：

设 $\beta = c_2/\lambda T$，由于 $\frac{\beta e^\beta}{e^\beta - 1} - 5 = 0$，解此方程，可得 $\beta = 4.965\ 1$，因此

$$\lambda_{max} = \frac{0.29}{T}(\text{cm})$$

这就是著名的维恩(Wien)位移定律。例如温度为 6 000 K 的星，它的辐射极大波长和极大频率是

$$\lambda_{max} = \frac{0.29}{6\ 000}\ \text{cm} = 483\ \text{nm}$$

$$\nu_{max} = \frac{c}{\lambda_{max}} = \frac{cT}{0.29} = \frac{3\times10^8}{0.002\ 9} \times 6\ 000\ \text{Hz} = 6.2\times10^{14}\ \text{Hz}$$

2. 斯特藩(Stafen)定律

黑体在单位时间单位面积辐射的能量叫辐射流(F)，辐射流与温度的关系为

$$F = \sigma T^4$$

式中 σ 为斯特藩-玻耳兹曼常量，$\sigma = 5.670\ 32\times10^{-8}\ \text{J/(m}^2\cdot\text{K}^4\cdot\text{s)}$。

前面我们已经讲过，恒星的光度 $L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$，由此式计算得到的恒星温度称为恒星的有效温度。

第 4 节 恒星的光谱

我们的祖先很早就注意到恒星有不同的颜色，如心宿二取名为"大火"即指出它是火红色，又如注意到天狼星为白色，参宿四为黄色，参宿五为蓝色等。恒星为什么会有不同的颜色呢？这是由于它们的表面温度不同。我们生活中有这样的体会，火炉里的煤刚开始燃烧时看上去是红色的，随着炉火的温度逐渐升高，火焰呈现黄色，随后是白色，到最旺时，火焰就呈现蓝色的光芒，原来炽热发光的天体颜色反映了它的温度。太阳是黄色的，有效表面温度约 5 800 K，织女星的有效表面温度约 10^4 K 左右，是蓝色的。

1666 年，牛顿发现太阳光通过三棱镜可以分解出从紫到红的彩带，这就是光谱(图 15.5)。后来人们知道，其他恒星也如此。正常恒星的光球光谱由

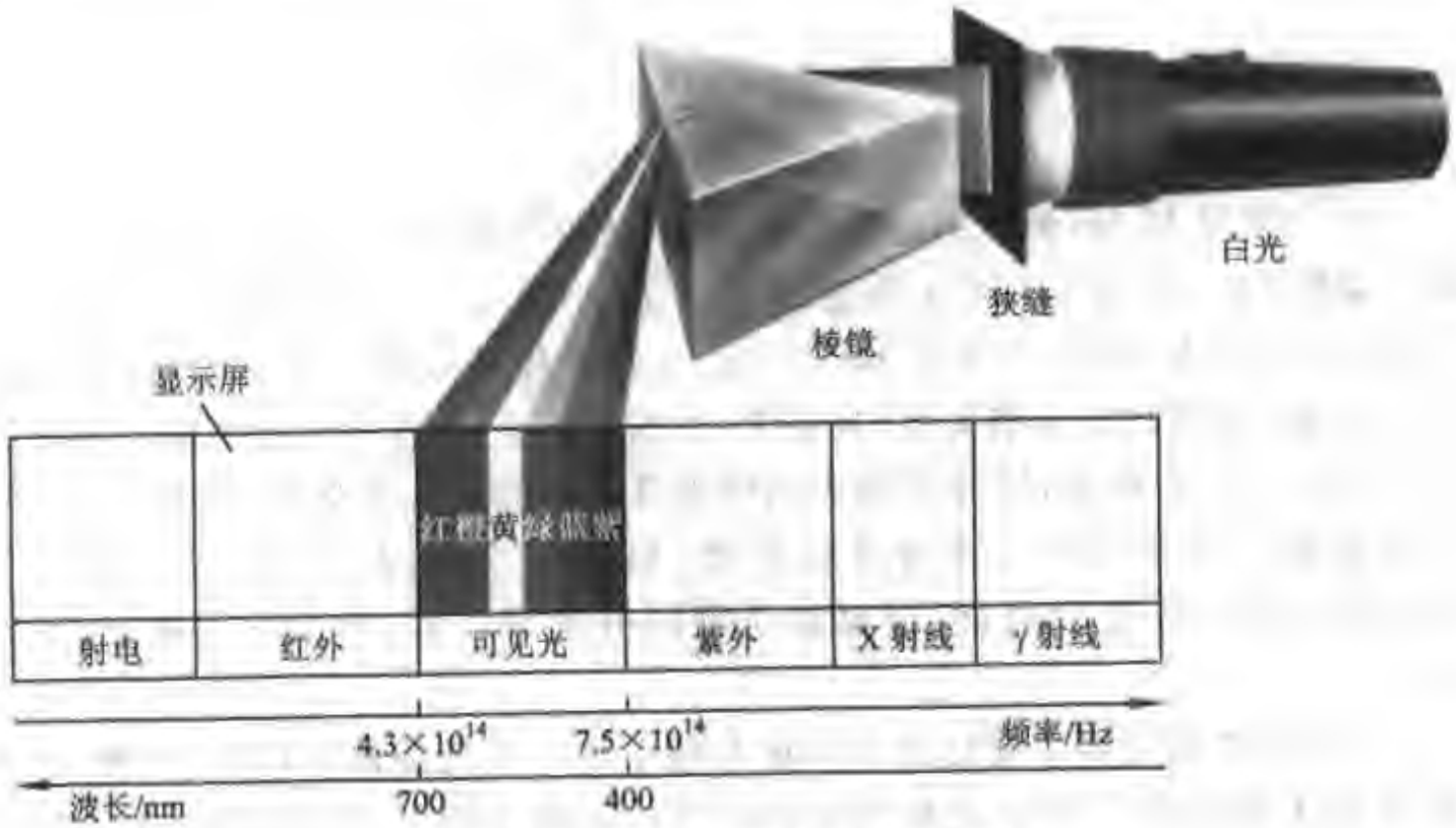


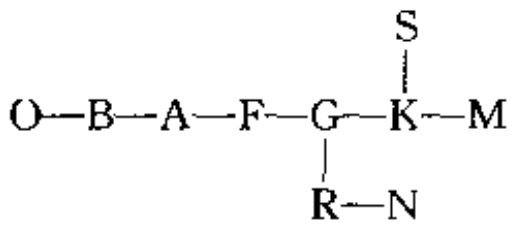
图 15.5　棱镜光谱仪的分光原理图

连续谱上叠加有吸收线(暗线)或发射线(亮线),或吸收线和发射线兼而有之。不同类型恒星光谱的谱线数目、分布、形状和强度等都不相同。1814 年德国物理学家夫琅禾费发现太阳光球光谱中有吸收暗线,后人把这些吸收线叫做夫琅禾费线。1859 年,德国化学家本生和物理学家基尔霍夫终于弄清,恒星光谱谱线的形成是由于每一种化学元素被加热到白炽时都会产生自己特有的光谱:炽热的固体、液体或高压气体都发出连续光谱,金属汞、钠、铁等炽热蒸发气和稀薄气体能够发出一定的明亮发射线,各条线对应不同波长。每种元素可以吸收它能够发射的光波,即当发射连续光谱的光穿过较冷的气体时,低温气体原子会吸收它高温时所能发射的光子,从而在连续光谱背景上的相应波长处出现暗色的吸收线,即吸收的波长正好与该元素发出的亮线波长相同。

通过研究这些光谱特征,可以知晓它们大气的化学成分及温度、自转、视向运动速度等特性。虽然不同恒星的光谱不完全相同,但仔细研究发现光谱线代表的元素及谱线的形状、强度和连续谱的强度存在一定的规律性,可以分类。

一、恒星的光谱分类

1918 年—1924 年,哈佛大学天文台发表的对全天亮于 8.5^m 的星的恒星光谱的分类沿用至今,其光谱的序列:



从O型到M型，恒星的温度由高到低，其中的每一个光谱型又分为10个次光谱型(不一定每类恒星的光谱型都有10个次型)。O型、B型、A型的星温度较高称为早型星，而K型和M型的星温度较低称为晚型星。R型、N型星与K型、M型星的光谱类似，只是R型、N型星的光谱中有较强的C和CN分子吸收带而在K型，M型星的光谱中则具有强的金属氧化物的吸收带。这表明R型、N型星的碳元素含量较K型、M型星丰富，故而又被称为碳星。S型的光谱与M型相似，但金属氧化物的分子带较强，且其上常有氢的发射线。

哈佛分类的主要原则是依据恒星光谱中的一些谱线的强度之比，例如对于O型、B型及早A型星主要按照光谱的电离和中性氢线、氦线的强弱来分类；对于晚A型、F型、G型及早K型星是依据电离和中性金属线的强度比，而晚K型和M型星以及C型和S型星则主要看金属线和分子带的强弱程度。由于恒星光谱中的电离和中性金属线的强弱主要取决于温度，因此哈佛分类序列是一个温度序列，即一元分类法。由O型到M型，温度逐渐由高降低(如表15.1所示)。

表15.1 恒星的光谱型、温度与颜色之间的关系

光谱型 SP	有效温度/K	主要特征	颜色	恒星例
O	$4\times10^4\sim2.5\times10^4$	一次电离氦线(发射或吸收)，强紫外连续谱	蓝色	参宿一
B	$2.5\times10^4\sim1.2\times10^4$	中性氦的吸收线	蓝白	角宿一
A	$1.15\times10^4\sim7\ 700$	A0型的氢强度极强，其他次型依次递减	白色	牛郎星
F	7 600～6 100	金属线开始显现	黄白色	老人星
G	6 000～5 000	太阳型光谱，中性金属原子和离子	黄色	太阳
K	4 900～3 700	金属线为主，弱的蓝色连续谱	红橙色	大角星
M	3 600～2 600	氧化钛的分子带明显	红色	心宿二

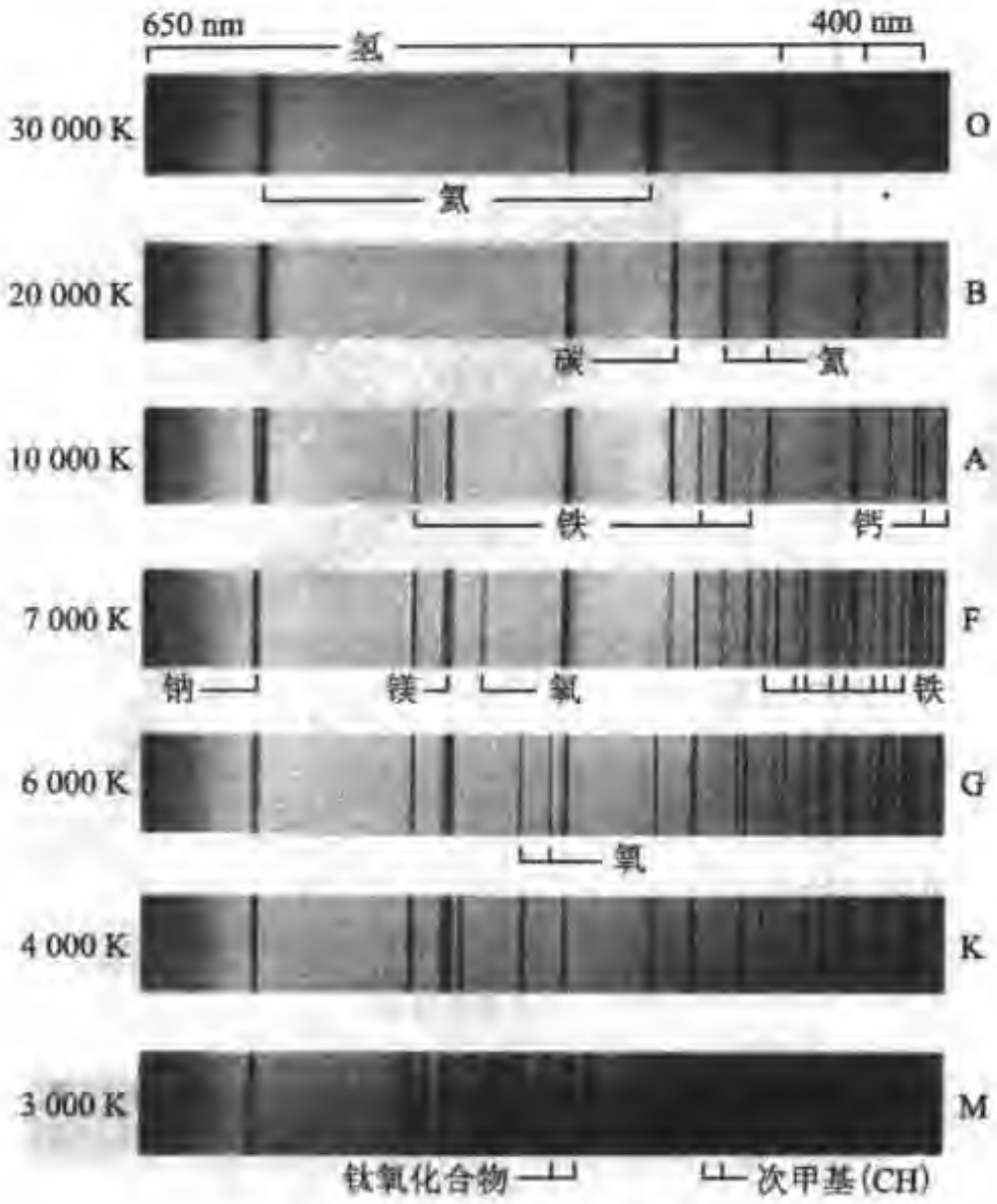


图 15.6　恒星的光谱分类

二、恒星的光谱光度图——赫-罗图(H－R 图)

20 世纪初，丹麦天文学家赫茨普龙和美国天文学家罗素分别研究了大量恒星的温度与它的光度(绝对星等)之间的关系。他们以光谱型(或表面温度)为横坐标，以恒星的绝对星等(光度)为纵坐标作图，发现恒星在光谱-光度图中有一定的分布规律。此图对研究恒星的分类和演化起了重要作用，人们称此图为赫-罗图(简称 H－R 图)，参见图 15.7。

赫-罗图像是恒星大家族的一幅"全家福"照片，使人们看到众多恒星分成了几个不同的群体，它们分布于赫-罗图上一定的范围内。

20 世纪 40 年代，美国天文学家摩根和基南创立了 MK 分类，它是二元分类法，即以光谱型与光度型两个参量为标准对恒星进行分类。也就是说，恒星的光谱分类不仅要考虑恒星的温度，而且还应考虑恒星的内部压力、光度情况，这反映在它们光谱中的谱线的强、弱(即粗、细)程度不同。

MK 分类把恒星的光度分为七个等级，并用罗马数字Ⅰ～Ⅶ来表示：

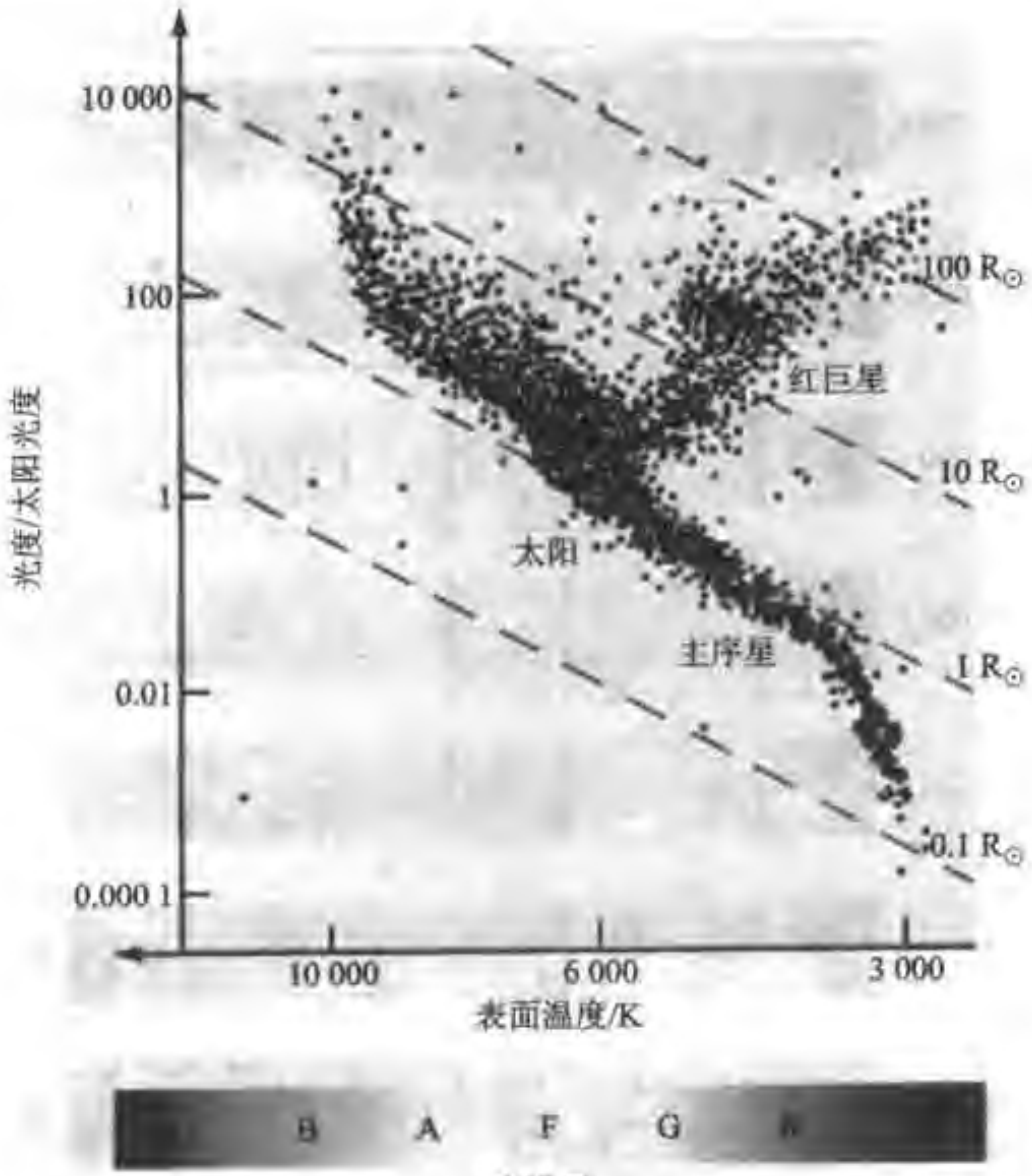


图 15.7　赫-罗(H－R)图

(纵坐标为恒星的光度,以太阳的光度为单位,横坐标为恒星的温度与相应的光谱型,图中 11 万颗恒星的位置是根据依巴谷卫星测量的参数点出的,大部分恒星处于图中的对角线上,称为主序星)

Ⅰ。代表最亮的超巨星,$Ⅰ_{ab}$表示亮超巨星,$Ⅰ_{b}$表示亮度较低的超巨星,Ⅱ表示亮巨星;Ⅲ表示巨星;Ⅳ表示亚巨星;Ⅴ表示主序星,也叫矮星;Ⅵ和Ⅶ分别表示亚矮星和白矮星。例如,太阳为 G2Ⅴ,表示它是一个光谱型为 G2,光度型为Ⅴ的恒星,即一个黄色的矮星。

我们观测到的恒星,有 90%的星是主序星。太阳位于主序星的中部,光谱型为 G2,绝对目视星等为 4.83^{m}。主序星在赫-罗图中占有从左上角到右下脚的对角线位置,处于这条对角线上的星叫主序星。分布在赫-罗图的右上方的恒星是最亮的超巨星,往下依次有亮超巨星,亮巨星,巨星和亚巨星,它们都在主序星之上。

主星序的下边近处是亚矮星。图的左下角的一群是白矮星(参见图 15.8),它们颜色发白,温度高而光度低,说明其体积小,实际上它们的体积大约与地球差不多。

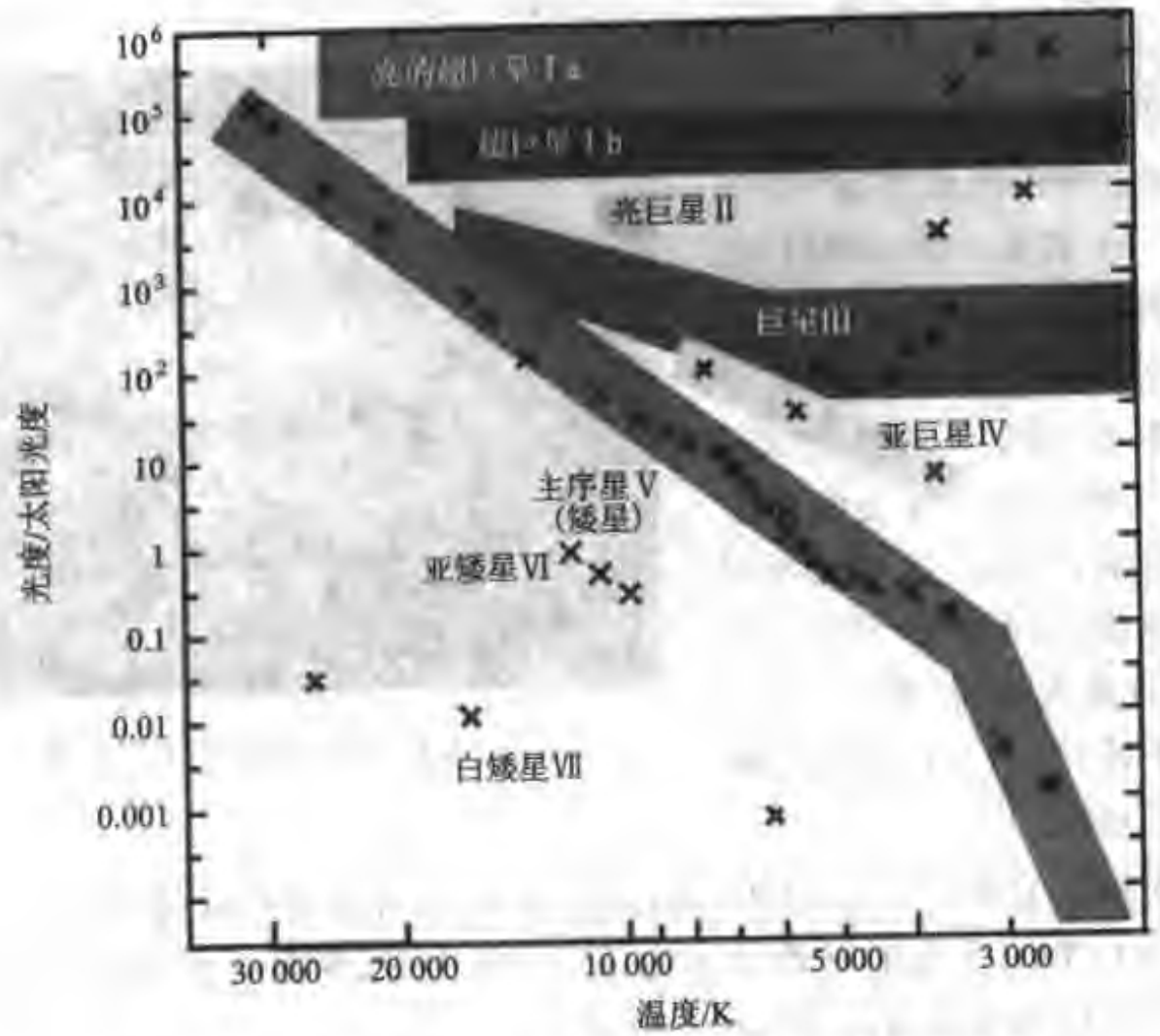


图 15.8　赫-罗图(不同光度型的恒星在赫-罗图中的分布)

第 5 节　恒星的大小

由于恒星非常遥远,其视角直径非常小,直接观察或通过望远镜看到的恒星只是个亮点,所以直接测恒星的角直径很困难。恒星角直径可以利用干涉方法或利用月掩星的机会测得。

月掩星法　当恒星被月球边缘掩食时会产生星光的衍射图像。用快速光电光度计将图样变化记录下来,并与模拟不同角直径光源被月球掩食的理论衍射图样对照,从而定出被掩食星的角直径。

光斑干涉法　现代,恒星半径的测定主要利用光斑干涉方法。此方法是利用大望远镜对恒星进行快速拍照。近地面大气由于热不均匀而产生湍流,这些大气湍流元的尺度平均在 10 cm 左右,寿命在 0.1～0.001 s 之间。对恒星快速曝光(时间短于 0.01 s)时,大气可以看作各个湍流元是"冻结"的。在这情况下,拍照得到的星像不是一个点像,而是由无数斑点组成的干涉图样(参见图 15.9)。根据恒星的角直径与辐射强度分布的干涉图样的关系,将恒星光斑干涉图进行频谱分析就可以求出恒星的角直径,如果再知道它的距离,就可以求出恒星的线直径大小了。

近代发展的恒星强度干涉仪是通过两架望远镜同时观测一颗较近的恒星来测量其角直径的方法。例如澳大利亚的恒星强度干涉仪是由两架距离 0～188 m 可变，口径各为 6.5 m 的光学望远镜组成。每个望远镜连接一个相同的光电光度计。两个望远镜同时对准同一颗星，接受到的星光信号的强度是相关的。改变两架望远镜的距离，可以得到恒星不同的干涉图像，由此资料可以计算出恒星的角大小，同样，若再知道恒星的距离，就可以测定出恒星的线半径。



图 15.9 恒星的光斑干涉图像

利用恒星的半径与恒星的光度、温度的关系，可以推算恒星的大小。设恒星的光度为 L，恒星表面的有效温度为 T_e，半径为 R，则有关系式，$L=4\pi R^2\sigma T_e^4$。由恒星的光度和有效温度可以求出半径。

在恒星世界，超巨星最大，其半径可以达到几百到几千倍的太阳半径。例如参宿西(α Ori)的半径是太阳半径的 370 倍。心宿二(σ Sco)的半径是太阳半径的 230 倍。太阳是一颗矮星，白矮星比太阳更小，如天狼星的伴星的半径只有 1/333 太阳半径。中子星的半径仅有 15 km 左右。

由此可见，恒星的大小差别很大，从 15 km 到 2 000 $R_\odot$，半径相差近 1 000 万倍，体积则相差 2 万亿亿倍！。

第 6 节 恒星的质量

恒星的质量是恒星研究中一个非常重要的物理量，它关系到恒星的物理特性并决定着恒星的寿命长短和演化进程，因为恒星的寿命 $T\propto 1/m^3$，质量大的星比质量小的星演化快得多。恒星如此遥远，它的质量是怎么知道的呢？目前，能直接测定质量的恒星只有双星，可以根据两个星互相绕转的运动规律，直接测定其质量。

测定双星质量的基本原理是依据开普勒第三定律，两颗星系统的总质量与轨道半长径的立方成正比，与轨道周期的平方成反比，即

$$m_1+m_2=\frac{a^3}{p^2}$$

式中子星质量 m_1 和 m_2 以太阳质量为单位；轨道半长径 a 以天文单位(AU)为单位；周期 P 以回归年为单位。

利用观测得到的周期 P 及轨道半长径 a，由上述公式可以算出两颗子星的质量和，如果用天体测量方法测出它们相对质心的距离 a_1 和 a_2，则可知两个子星的质量比 $m_1/m_2=a_2/a_1$，即可求出每个子星的质量。

此外，利用光谱测定两颗子星的视向速度曲线，也可求得两个子星的质量比(详见“双星”的章节)。

质光关系　对于质量大于 0.2 $m_\odot$ 的主序星，恒星的质量和光度之间有很好的统计关系，叫“质光关系”，即恒星的质量越大，其光度越强(参见图 15.10)。除了特殊天体外，观测到的恒星中 90%的主序星都符合如下的质量和光度的关系：

$$\lg(L/L_\odot)=3.8\ \lg(m/m_\odot)+0.08$$

式中，L 为恒星光度，$L_\odot$ 为太阳的光度。通过观测求出恒星的光度后，就可以通过质光关系求出它的质量。

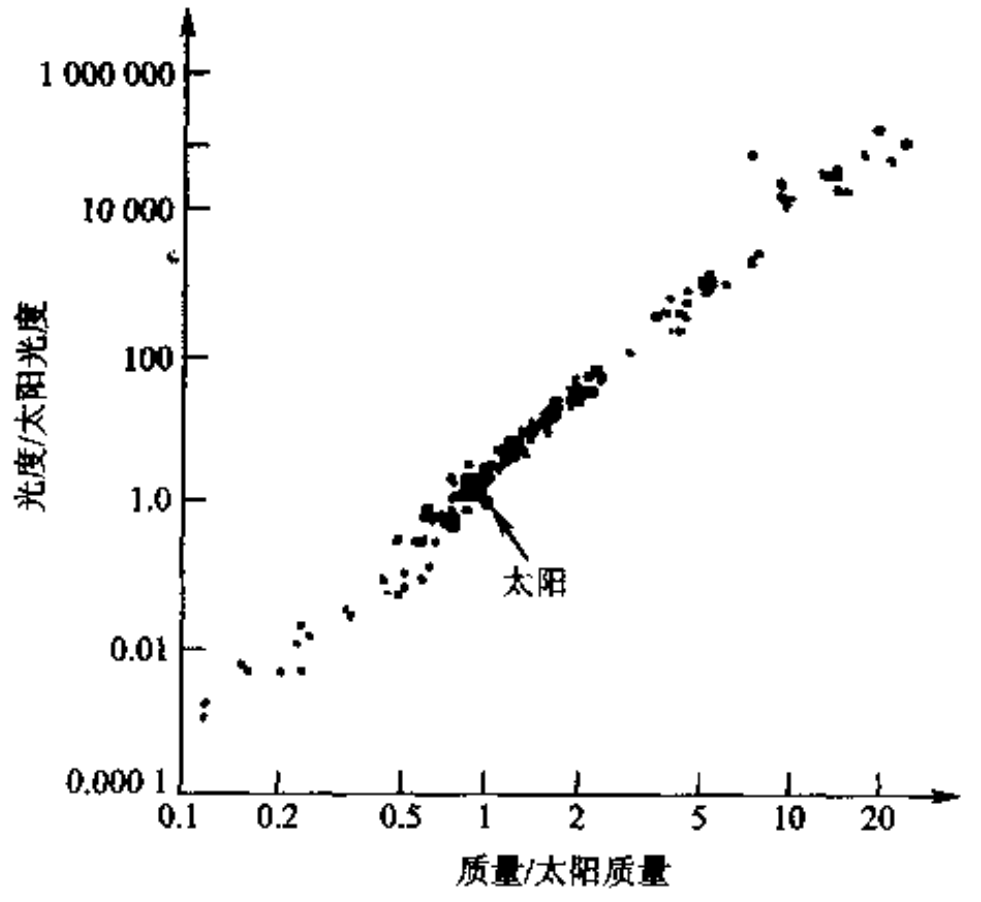


图 15.10　主序星的光度与质量的关系

我们熟悉的亮星在赫-罗图上的位置如 15.11 所示。其中，心宿二的质量是太阳的 50 倍，大角星的质量是太阳的 10 倍。正常恒星的质量范围大约是 0.01～120 $m_\odot$。已知质量最大的星是 HD93250，它的质量大约是太阳的 120 倍。从统计来看，大多数恒星的质量是太阳质量的 0.5 到 5 倍。少数恒星的质量是太阳的几十倍到上百倍，最小的恒星质量只有太阳质量的百分之几。可见，与不同恒星的体积差别相比，恒星的质量差别不是很大。这是因为恒星中心要达到一定的温度和压力条件才能进行核燃烧，也才能发光，否则就只能形成行

星、小行星或陨星，而不能成其为恒星。但恒星的质量也不可能太大，因为如果质量太大，内部温度过高、压力过大，会发生爆炸瓦解。

对于主序星来讲，恒星的半径和光度取决于它的质量。半径和光度随着质量的增加而增加，主序星的半径和质量的关系如图 15.12 所示。主序星随着光谱型从早型(O、B、A)到晚型(F、G、K、M)，即温度由高到低，光度也由高到低，光度与质量成正比，半径与质量也成正比。

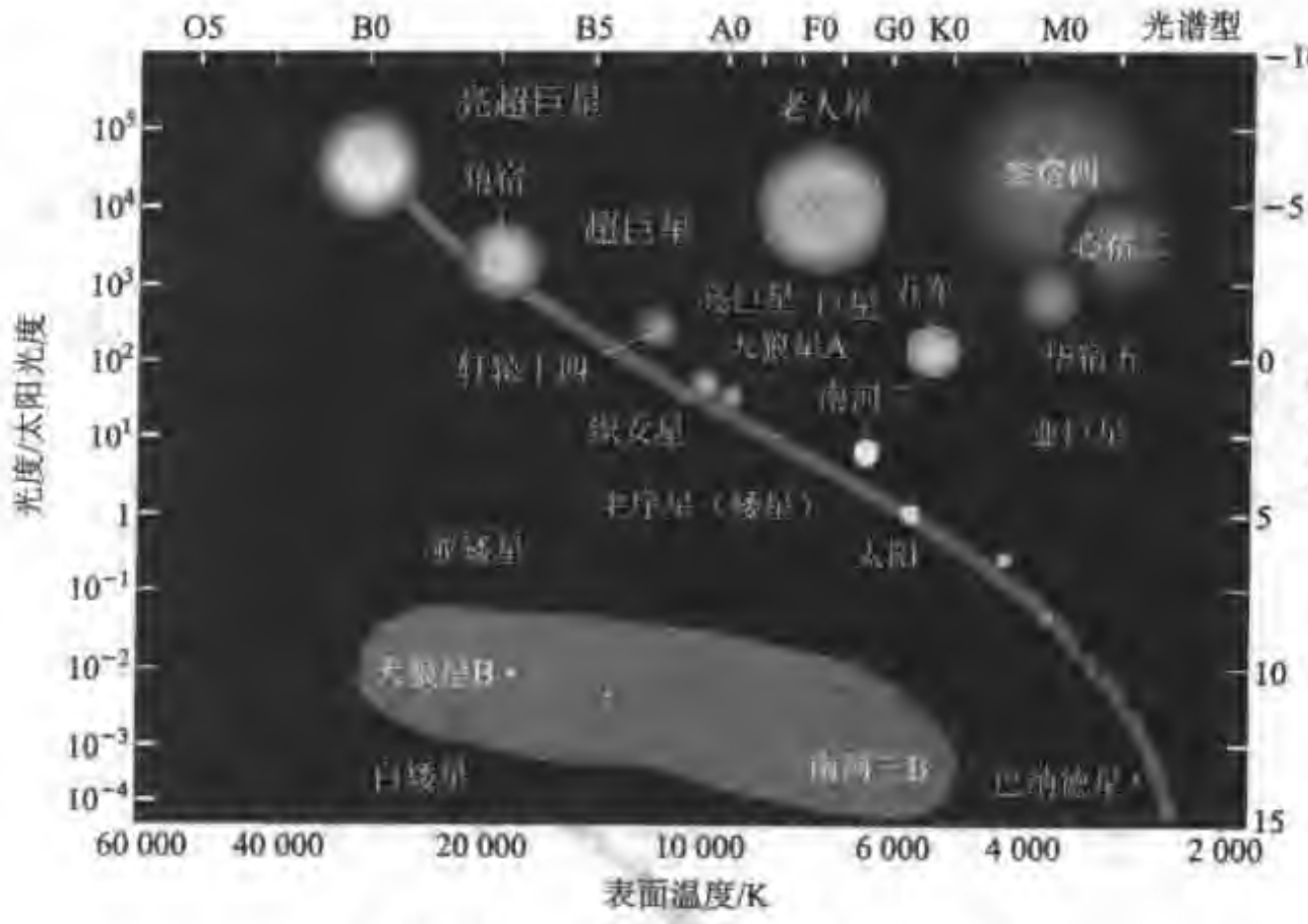


图 15.11 一些亮星在赫-罗图上的位置

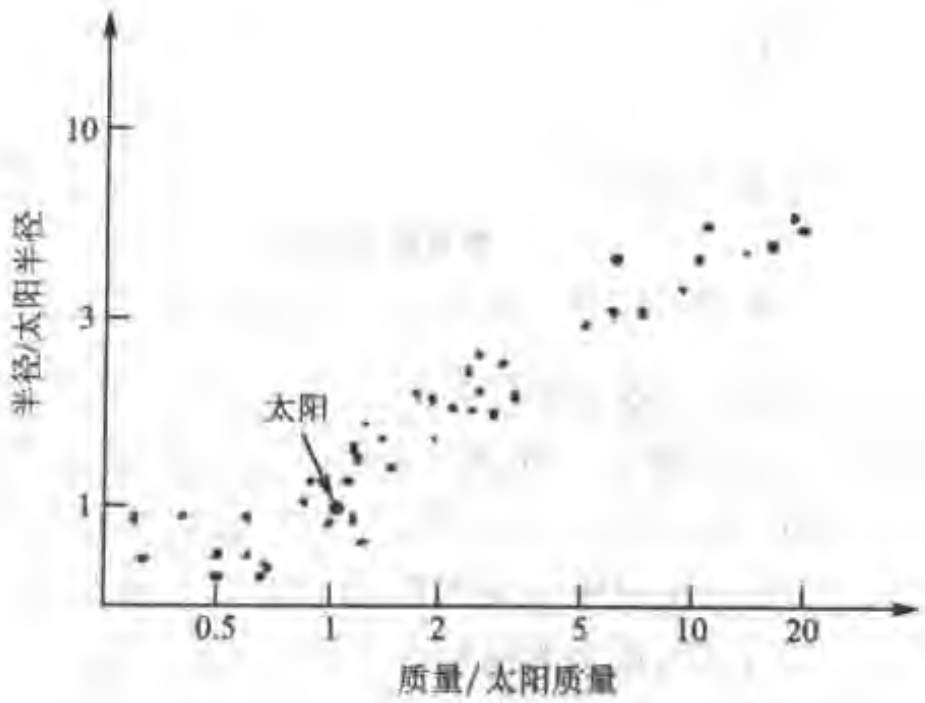


图 15.12 主序星的半径与质量的关系

恒星的密度　各类恒星的体积相差悬殊，可达数千亿倍以上，然而质量之差却很小，才相差几十至上百倍，其密度相差的惊人程度就可想而知了。红超巨星的平均密度仅为水的百万分之一甚至万万分之一，非常稀薄。可是白矮星的密度比水大几万倍以上。如天狼星的伴星，其密度竟是水的 65 000 倍。更令人吃惊的是中子星的密度，每立方厘米约有 1 亿吨重！。

一般而言，恒星的内部密度并不均匀，从内到外密度逐渐减小。

第 7 节　恒星的运动

恒星与宇宙间一切物质一样都是运动着的，只是由于恒星在一年里走的路程比起恒星和地球的距离来显得极为微小，以至于在很长的时间里，人们误认为恒星是不动的。

我国早在战国时代，就制造出了类似现代的赤道坐标仪器，用来测量恒星的位置，研究恒星的运动。西汉时代，落下闳发明了浑仪，可测量天体的位置，唐朝张遂（僧：一行）长期测量恒星的位置，研究恒星的运动。在西方，1717 年前后，英国天文学家哈雷与希腊的托勒密等人，做了大量观测，发现了天狼星、南河三和大角星等的位置有明显的变化。

恒星的空间运动是指恒星相对于太阳的运动。地球上的观测者测到的是恒星相对于地球的运动，要归算到以太阳中心为坐标原点的运动速度。

一、视向速度（v_r）

恒星在空间运动，其运动速度可分解为切向速度分量和视向速度分量（见图 15.13），其中沿着视线方向的分量叫视向速度。天体的视向速度可以利用测定恒星光谱中谱线的多普勒位移而求得的。天体的切向速度由测量天体的自行而求得。

多普勒效应　1842 年物理学家多普勒研究指出：当声源或光源移动时，接受到的波长会变化，声源或光源远离时波长增加（即频率变低），接近时波长变短（即频率变高），参见图 15.14。恒星就是一个光源，当恒星离我们而去时，它的谱线波长增加，称之为红移；如果恒星向着我们而来，它的光谱线波长变短，称之为蓝移。恒星离开或接近我们的速度越大，谱线的多普勒位移也就越大。

设光源静止时的波长为 λ_0；光源相对于观测者的速度，即视向速度为 v_r，其光谱的谱线发生位移，若位移后的谱线波长为 λ，则 $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$。

设 c 为光速，$z=\pm\Delta\lambda/\lambda_0$，$z$ 叫红移量，波长增加取正号，叫做红移；反之，取负号叫做蓝移。

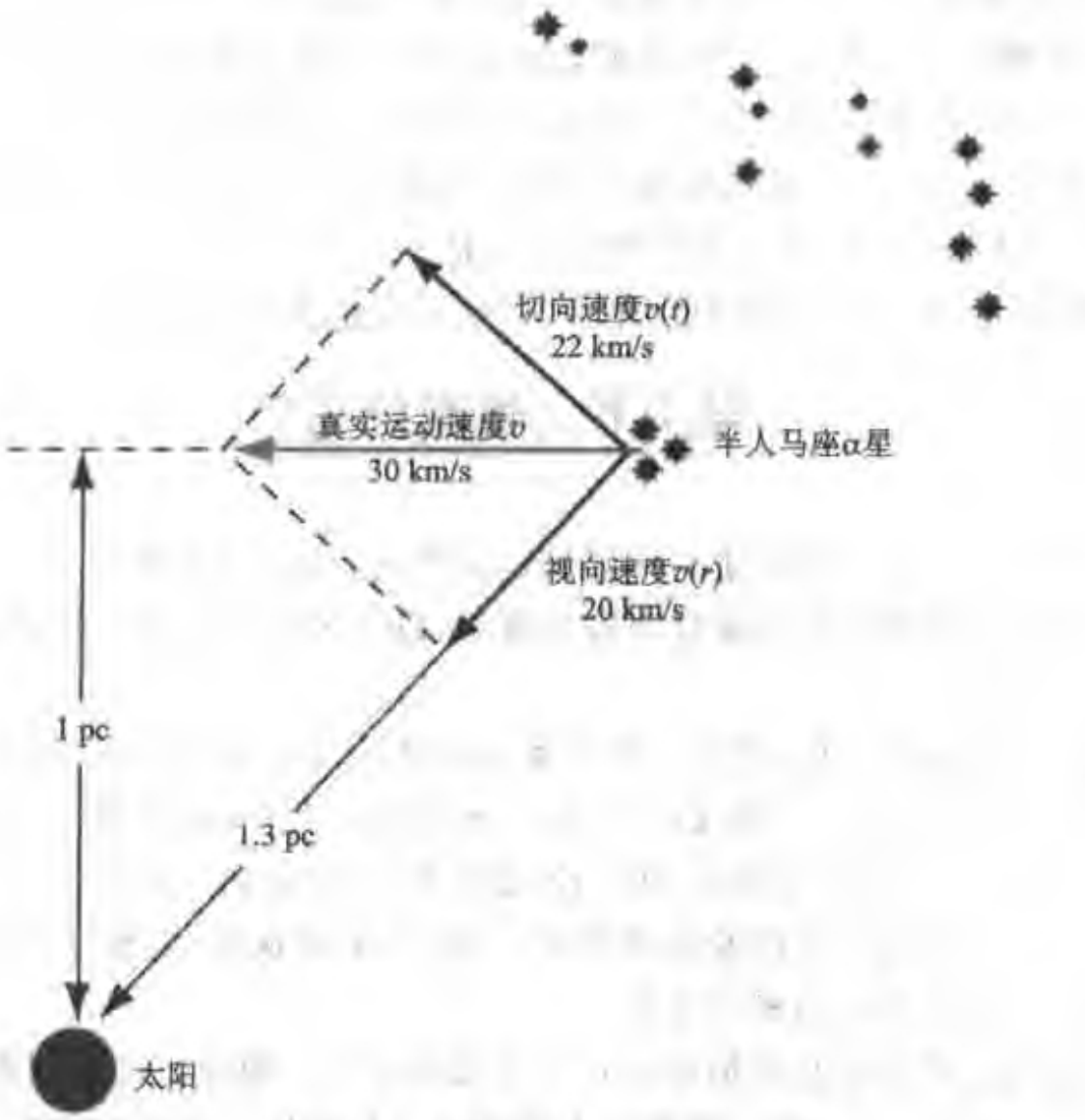


图 15.13 恒星的运动

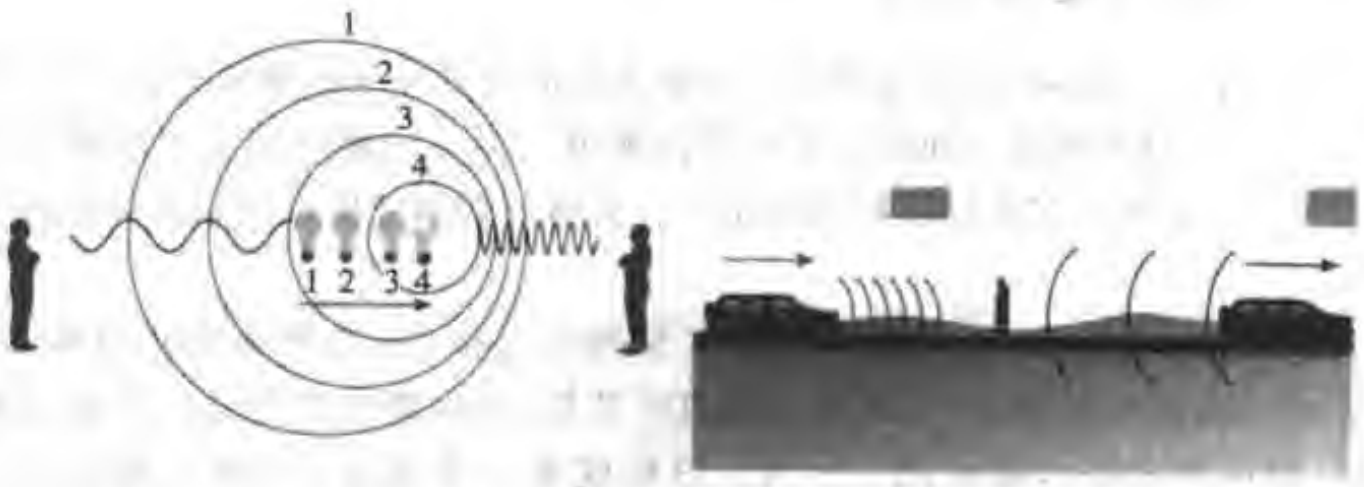


图 15.14 多普勒效应原理图

天体的视向速度 $v_r = \pm c\Delta\lambda/\lambda_0$，正号为天体离开观测者运动；负号为天体向着观测者运动，也叫退行速度。当光源的速度 $v \ll c$（光速）时 $v_r/c = z$，例如牛郎星以 26 km/s 的速度接近我们，而毕宿五却以 54 km/s 的速度远离我们。

对于一些活动星系如类星体，光源的速度与 c（光速）可以比拟，即当 v 比 c 小的不多时，需要考虑相对论效应，此时 $v_r/c = [(z+1)^2-1]/[(z+1)^2+1]$。

二、恒星的自行(μ)

恒星在垂直视线方向的运动速度叫切向速度 v_t，恒星相对太阳每年移动的角度称为恒星的自行 μ，以(″)/a 为单位来计算。通过测定恒星的自行 μ，如果已知其距离 r，就可以计算出切向速度 v_t，即 $v_t=r\theta$，式中 θ 以弧度计量，我们知道 1 rad=206 265″，所以 $v_t=r\theta=r\mu/206\ 265$，式中 r 用周年视差 π 表示，即 $r(\mathrm{pc})=1/\pi$，我们已知 1 pc=3.26 l.y.，所以切向速度有

$$v_t=4.74\frac{\mu}{\pi}$$

例如相隔 22 年的巴纳德星在天空的位置变化了 227″(图 15.15)，所以它的自行为 $\mu=227''/22=10.3''/\mathrm{a}$。巴纳德星距离我们 1.8 pc，它每年($3.2\times10^7$ s)移动的距离可以算出是 0.000 09 pc(2.8×10^9 km)，由此可知巴纳德星的切向速度为 88 km/s。

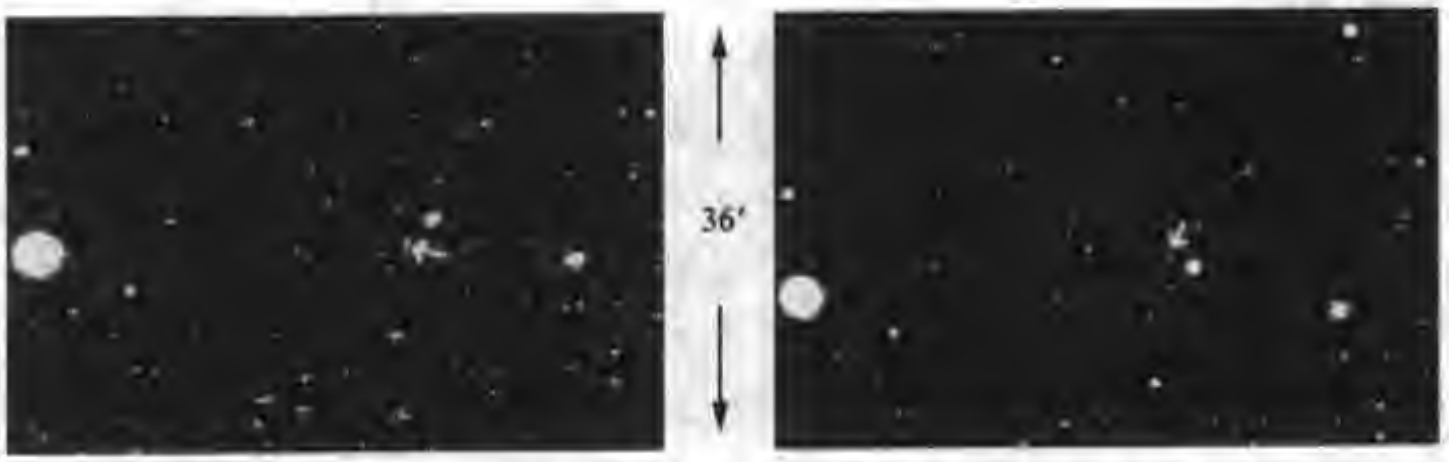


图15.15　相隔 22 年的两张巴纳德星(图中箭头所指)的照片，可以明显地看到它的位置变化

通过天体测量可以测定恒星的自行，并可求出切向速度 v_t，另一方面可以观测恒星的光谱，由测定谱线的多普勒位移，计算恒星的视向速度 v_r，最终可以求出恒星的空间速度 v，即

$$v^2=v_r^2+v_t^2$$

例如，南门二(α CenA)星的光谱测量求出它的视向速度为−22 km/s，它的自行为 3.676″/a，它的距离为 4.3 l.y.，可以算出它的切向速度大约为 20 km/s。再由 $v^2=(-22)^2+20^2$，计算出它的空间速度 $v=29.7$ km/s。

由上述可知，已知恒星的切向速度和视向速度就可以求出恒星相对于太阳的运动。然而恒星相对太阳的运动实际上包括两个部分运动：一部分是由于太阳系的运动产生的；另一部分是恒星本身的运动。这后一部分才是恒星的真正运动。银河系内的恒星与太阳一样都有绕银河系中心的转动，又有在空间里自己固有的运动，这种固有的运动叫恒星的本动。恒星的本动并不影响恒星绕银河系中心的运动。由于恒星之间的距离比起它们的直径来说非常大(参见表

15.2)，所以恒星之间的碰撞几乎是不可能的。

表 15.2 几颗亮恒星的目视星等、光谱光度型、半径和距离及视向速度和自行的比较

	目视星等	光谱型	绝对星等	距离/ l.y.	视向速度/ (km/s)	自行/ ((″)/a)	半径/ $R_\odot$
α CMaA 天狼星	−1.47	A1 V	+1.42	8.7	−8	1.324	2
α CMaB(白矮星)	8.5	Wd		8.7			0.003
α CenA 南门二	0.33	G2 V	+4.39	4.3	−22	3.676	4.3
α Boo 大角星	−0.1	K2 Ⅲ	−0.3	36.2	−5	2.284	36.2
α Lyr 织女星	0.04	A0 V	+0.5	26.5	−14	0.345	26.5
α Aql 河鼓二	0.77	A7 Ⅳ-V	+2.2	16.5	−26	0.658	16.5
α Cyg 天津四	1.26	A2 Ⅰa	−7.1	250.8	−5	0.003	250.8
α Leo 轩辕十四	1.36	B7 V	−0.7	83.6	+4	0.248	
α Aur 五车二	0.05	G8 Ⅲ	−0.6	44.7	+30	0.435	44.7
β OriA 参宿七	0.14	B8 Ⅰa	−7.1	900	+21	0.001	
α CMiA 南河三	0.37	F5 Ⅳ-V	+2.7	11.3	−3	1.250	11.3
α Ori 参宿四	0.41	M2 Ⅰab	−5.6	370	+21	0.028	370
α Eri 水委一	0.51	B3 V	−2.3	118	+19	0.098	
β CenB 马腹一	0.64	B1 Ⅲ	−5.2	490	−12	0.035	
α Tau A 毕宿五	0.86	K5 Ⅲ	−0.7	68	+54	0.202	
α Vir 角宿一	0.91	B1 V	−3.3	220	+1	0.054	
α Sco A 心宿二	0.92	M1 Ⅰb	−5.1	520	−3	0.029	520
α PsA 北落师门	1.15	A3 V	+2.0	22.6	+7	0.367	
β Gem 北河三	1.16	K0 Ⅲ	+1.0	35	+3	0.625	
β Cru 十字架二	1.28	B0.5 Ⅲ	−4.6	490	+20	0.049	
α Car 老人星	−0.72	F0 Ⅰ-Ⅲ	−3.1	98	+21	0.025	

第 8 节 恒星的自转

观测表明，恒星不仅有空间运动，而且本身还有自转。天文学家根据太阳黑子的移动发现太阳的自转运动，遥远的恒星如何知道它的自转呢？主要依据光谱分析的方法。对于一个自转着的恒星来说，可以想象：它的一半远离观测者，而另一半接近观测者，如此它的谱线轮廓将会因自转引起的多普勒位移而被展宽。通过对恒星谱线轮廓进行分析、测量可以得到恒星自转的速度。由于恒星的自转轴与视线方向间有一夹角 i，所以，一般可得到 $v\sin i$ 值，即自转速度在视

线方向的投影值，如果知道自转轴与视线的夹角 i 则可以求出恒星的自转速度 v。

恒星的自转速度是不同的，有的较小，只有几公里每秒，而高速自转的恒星自转速度可达 400～500 km/s。至于一些特殊类型的恒星，如致密的中子星，在不到一秒，甚至在几毫秒的时间就自转一周，自转速度高得惊人，可达每秒数万千米！

对于主序星，不同光谱型的星大致有如表 15.3 所示的平均自转速度。

表 15.3　主序星的平均自转速度

光　谱　型	O_5	B_0	B_5	A_0	A_5	F_0	F_5	G_5	K	M
平均自转速度/(km·s^{-1})	190	200	210	190	160	95	35	12	1	1

第 9 节　恒星活动与能源

恒星都是炽热的气体球，我们观测到的是它的表面大气层。众多的恒星中有一些星，具有类似太阳上的活动叫类太阳星。类太阳星一般都具有超强的磁场并且具有频繁而激烈的恒星活动，如黑子群比太阳多，占表面积的 30%～50%（太阳黑子的平均面积只占日面的 0.1%～0.2%），并且频繁发生激烈的色球活动。双星中有一类是色球活动双星如猎犬座 RS 双星。

一、恒星活动与能源

恒星活动与它的磁场密切相关，本质上是一种磁活动现象。恒星活动也与恒星大气的物理状况（温度、压力、密度和湍流等）和化学成分及金属丰度有着密切联系。因此，研究恒星活动对于探讨恒星的磁流体本质及超强磁场星的结构和演化有重要意义。

正常恒星和太阳一样，能量来源也是由内部的热核聚变反应提供的。正是恒星内部的热核聚变反应所产生的能量不断向空间发射出辐射，我们才能看到恒星闪烁的光芒。

在热核聚变的过程中，氢原子核先聚变成氦原子核，氦再依次进行聚合成更重的元素。在一颗典型的恒星中，原子核逐级合并，直到形成可观数量的许多重元素。热核聚变过程中的核能以辐射方式为主，穿越恒星的表面向外传播。有时恒星内部由内向外的辐射流很强，而物质的透过率很小，使得能量在恒星内部被阻塞，这时恒星会借助其他方式例如通过对流，把能量由内部带到外部去。对太阳而言，它除了辐射传递能量及热传导外还有重要的对流传能，即在沸腾的恒星内部，加热的气团（米粒组织、超米粒组织）上下翻腾，以对流方式向外传递

能量。

二、恒星的寿命

恒星的寿命取决于质量，质量越大寿命越短。可以这样来估算，恒星的寿命取决于单位时间恒星内部的核反应释放能量的速率，及恒星燃烧能维持多久才能把内部可用燃料都发射与消耗掉，即恒星的寿命与恒星光度成反比，而主序星光度近似与质量的立方成正比。设恒星的寿命为 T_s，质量为 m_s，可以得到如下近似表达式：

$$T_s \propto 1/(m_s)^2$$

一般 O 型、B 型主序星质量是太阳质量的 20 倍，这类星的寿命约为

$$1/(20)^2 = \frac{1}{400} T_\odot = 1/400 \times 10^{10}\ \text{a} = 2.5 \times 10^7\ \text{a}$$

所以，我们可以确信我们现在观测到的 O 型、B 型星是相当年轻的星。比太阳质量小的 K 型、M 型的主序星有着低光度，其寿命很长，至少有几万亿年。表 15.4 列出了不同质量的几个典型的恒星的寿命。

表 15.4 5 个亮星的光谱型、质量、中心温度、光度和估计的寿命

恒星名	光谱型	质量/$m_\odot$	中心温度/(10^6 K)	光度/$L_\odot$	估计的寿命/(10^6 a)
参宿七	B8 Ⅰa	10	30	4.4×10^4	20
天狼星 A	A1 V	2.3	29	23	10^4
α Cen	G2 V	1.1	17	1.4	7×10^3
太阳	G2 V	1.0	15	1.0	10^4
半人马座比邻星	M5 V	0.1	5.0	6×10^{-5}	$>10^6$

【例题 1】 一颗星的视星等 $m=6^m$，距离 $r=100$ pc，求它的绝对星等。

解答：由公式 $M=m+5-5\lg r$ 可得

$$M=6+5-10=1,$$

即这颗星的绝对星等为 1^m。

【例题 2】 一对目视双星的两个子星：一个星等为 1^m，另一个星等为 2^m，问这颗双星系统的星等是多少？

解答：双星系统总的星等绝不能用两个子星的星等相加，而是两个子星的亮度相加后再求其星等。设 1^m 的子星观测到的光流量为 F_1；另一个 2^m 子星观测到的光流量为 F_2。双星系统的光流量为 F_0，代入星等和光流量的关系式：$\Delta m=-2.5\lg(F_1/F_2)$，可得两个子星的星等差为 $(1-2)=-2.5\lg(F_1/F_2)$

$$F_1/F_2 = 10^{1/2.5} = 10^{0.4}$$

双星总的流量密度为两个子星的光流量之和，即 $F_0=F_1+F_2=F_1(1+10^{-0.4})$，

双星系统的星等与第一个子星的星等差为

$$m-1=-2.5\ \lg F_0/F_1=-2.5\ \lg[F_1(1+0.398)/F_1]=0.64^m$$

所以，双星系统的星等为 0.64^m。

【例题 3】 通常把一个距离为 10 kpc，看起来像太阳那样亮的超新星的绝对星等作为标准烛光来测量遥远星系的距离。问如果一颗 10 亿倍太阳光度的超新星看起来像太阳那样亮，它所在星系有多远？

解答：设超新星的绝对星等为 M，作为标准烛光的绝对星等为 M_0。

由 $M=m+5-5\ \lg r$，求出标准烛光的绝对星等

$$M_0=-26.8+5-5\ \lg(10^1)$$

$$M_0=-26.8+5-5\times 4=-41.8^m\text{（标准烛光的绝对星等）}$$

$$M-M_\odot=-2.5\ \lg(L_1/L_\odot)=-2.5\ \lg(10^9)=-22.5$$

所以

$$M=4.75-22.5=-17.75\text{（超新星的绝对星等）}$$

由 $M=m+5-5\ \lg r$，则有 $-17.75=-26.8+5-5\ \lg r$，$r=0.15$ pc。

所以，该超新星所在星系有 0.15 pc 远。

【例题 4】 太阳的周日视差为 $\pi_\odot=8.8''$，具有相同绝对星等的另一颗恒星的周年视差为 $\pi=0.022''$，在晚上能否直接用眼睛看到这颗星？

解答：太阳周日视差是地球半径对太阳中心张的角，与恒星的周年视差的概念完全不同，计算时不用考虑。

已知这颗恒星的视差 π，其距离为 $D=1/\pi=1/0.022=45.45$ pc；太阳的视星等为 -26.8，太阳的绝对星等 $M=+4.75$，又已知该星与太阳的绝对星等相同，则该星的视星等为 $m=4.75+2.5\ \lg(45.45/10)^2=8.0^m$，肉眼只能看到亮于 6.5^m 的星，所以无法看到此星。

【例题 5】 两颗星有同样的绝对星等，但一颗星比另一颗的距离远 1 000 倍，它们视星等差是多少？哪个星等大？

由绝对星等 M、视星等 m 和距离 r 的关系式，$M=m+5-5\ \lg r$，又已知两颗星有同样的绝对星等 M，则有

$$m_1+5-5\ \lg r_1=m_2+5-5\ \lg r_2$$

$$m_1-m_2=5\ \lg(r_1/r_2)=5\ \lg(1\ 000/1)=15^m$$

所以，它们的视星等差为 15 等，较远的那颗星视星等更暗。

【例题 6】 如果把一颗星分成两半（假设恒星的密度和温度维持不变），这颗星的星等发生了什么变化？形成的双星与原来星的星等相比较。

解答：恒星被分成两半后，每个子星是原来体积的 1/2，其半径分别为 r_1 与 r_2。表面积可以这样算：由体积之比为 $V_1/V_2=(r_1/r_2)^3=0.5$；求出 $(r_1/r_2)=(0.5)^{1/3}=0.794$；它们的面积之比为 $(r_1/r_2)^2=0.63$；

恒星的视亮度与它的发光的表面积成正比，所以

$$F_1/F_2=(r_1/r_2)^2=0.63$$

$$m_1-m=-2.5\ \lg(F_1/F_2)=-2.5\ \lg(0.63)=0.5^m$$

所以每个子星都比原来的星亮度减小，暗 0.5^m。

设两个子星组成双星后的星等为 $m_{双}$，则双星与原来星的星等差为

$$m_{双}-m=-2.5\lg(F_1/F+F_2/F)=-2.5\lg(0.63+0.63)=-0.25^{m}$$

所以，每个子星都比原来的星亮度暗了 0.5^{m}；双星系统的星等比原来星的亮度亮 0.25^{m}。

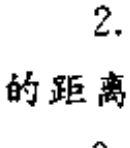
【例题 7】 观测大气消光，在一个夜晚观测某标准测光星，随不同高度观测到的星等如下表：

地平高度	大气质量	星等
50°	1.3	0.90^{m}
35°	1.74	0.98^{m}
25°	2.37	1.07^{m}
20°	2.92	1.17^{m}

利用绘图法绘出消光线求出该标准星的大气外星等与主消光系数。

解答：利用绘图法，先绘出以星等为纵坐标，以大气质量为横坐标的消光线，其直线的截距是大气外星等 m_0（对应大气质量为零处）；斜率 k 是消光系数。

求出的大气外星等 $m_0=0.68$；消光系数 $k=0.17$。



习　题

1. 织女星的视向速度等于 −14 km/s，自行是每年 0.348″，视差为 0.124″。求织女星相对与太阳的总空间速度。

2. 天琴座 RR 星的绝对星等是 $0.6^{m}\pm0.3^{m}$。问由于绝对星等的误差引起的距离的偏差有多大？

3. 一颗长周期变星的热星等变化一个星等，它的最高温度为 4 500 K，如果它的变化仅仅是由于温度的变化，问它的最低温度是多少？如果热星等变化一个星等仅仅是由于半径的变化引起的，而温度保持不变，那么它的半径变化是多少？

4. 在 1983 年蟹状星云的角半径是 3″，它一年膨胀 0.21″，这个膨胀速度相对于星云中心星的视向速度为 1 300 km/s。假定星云的膨胀是对称的，求此星云的距离是多少？估计这个星云是多少年前爆发的超新星的遗迹？如果这颗超新星的绝对星等是 -18^{m}，它的视星等是多少？

5. 在仙女座星系中一颗恒星绝对星等 $M=5^{m}$（距离为 690 kpc），这颗星作为超新星爆发亮度增加了 10^9 倍，问它的视星等是多少？

6. 一个双星的两个子星沿着圆轨道运动，相互的距离是 1 AU，两个子星的质量都是 1 $m_{\odot}$。一个在轨道平面上的观测者看到双星的光谱中谱线周期性的分裂，问氢的 H_γ 线（$\lambda=434$ nm）最大分开多少？

7. 巴纳德星距离我们 1.83 pc，质量是 0.135 $m_{\odot}$ 它有 25 a 的震荡周期，振幅是 0.026″，假定这个震荡是由于它的行星引起的。求这颗行星的质量和轨道半径。

8. 除了太阳外，离我们最近的恒星是半人马座的比邻星，它的目视星等为 10.7^m，该星的周年视差 $\pi=0.76''$，求距离模数和它的绝对星等。

9. 有三个天体，已测出它们的周年视差分别为(a)$0.001''$(b)$0.02''$(c)$0.4''$ 求这三个天体的距离各是多少？

10. 角宿星的周年视差是 $0.013''$。求它的距离有多远？如果一个观测者站在海王星的一个卫星之上，观测角宿星，问角宿星的视差是多少？

11. 一颗星距离太阳有 20 pc；它的自行运动为 $0.5''/a$。问它的切向速度是多少？如果恒星的光谱线红移 0.01%，计算它相对太阳的视向速度是多少？它的空间运动速度是多少？

12. 某星的半径是太阳的 3 倍，表面温度为 10^4 K，求它的光度是太阳光度的多少倍？

13. 一颗星的温度是太阳温度的两倍，光度是太阳光度的 64 倍，问该星的半径是太阳半径的多少倍？

14. A 和 B 两星的光度分别是太阳光度的 0.5 倍和 4.5 倍，它们有同样的视亮度，哪一个更远？远多少？

15. 观测一颗食分光双星，子星轨道运动周期是 10 天，设其轨道是圆形的，两颗星距离 0.5 AU，一颗星的质量是另一颗星质量的 1.5 倍，求两子星的质量。

第十六章

恒星的形成和演化

恒星也像人一样有出生、成熟、衰老和死亡的过程。但是恒星的一生要经历几千万年，甚至100亿年以上的漫长时间。相对恒星的演化岁月，人的一生只是微不足道的一瞬间，那么人们是怎样认识恒星的一生呢？

人们可以同时观测到不同年龄的恒星：有孕育之中的原始星胎、刚刚形成的原恒星、年少的主序前星、精力充沛的壮年主序星，还有老年红巨星和濒临死亡的白矮星、中子星以及黑洞。对这些不同年龄的恒星，根据已有的理论和观测的事实来认识它们，就可以了解恒星一生的演化梗概。

恒星的演化历程主要取决于两个重要的因素：初始质量和它的化学成分。恒星的初始质量和化学成分决定了它的演化历程、演化速度和最终的归宿。恒星的化学成分是通过分析恒星光球光谱而得到的。一般都是假定光球的化学成分与内部的化学成分是一样的，这对绝大多数的恒星是适用的，但对一些特殊星不行，例如S光谱型星，它的光谱中包含放射性元素锝和锝的同位素几乎是在S星内部合成的，并由某种过程把锝送到了表面，因此内部与大气的含量不同。但这只是少数恒星。

第1节　化学元素的形成

恒星的演化和元素的起源这两个问题关系十分密切。世界上所有的物质——岩石、矿物、空气、气体星云和恒星都由107种化学元素组成。而这107种元素最终由三种类型的基本物质所组成：质子、中子和电子。

氢原子由一个质子(带正电的粒子，原子核)和一个电子组成，相对原子质量为1，原子序数也为1。氦原子核包括两个质子和两个中子，围绕原子核的有两个带负电的电子，相对原子质量为4，原子序数为2。碳元素的原子核由6个质子和6个中子组成，电子壳层中有6个电子围绕着原子核不停地运动，原子的相对原子质量为12，原子序数为6。电子壳层决定了元素的化学性质。所以原子序数不同的元素，它们的电子壳层不同，因而化学性质也不同。原子序数相同而中子数不同的原子，它们的相对原子质量不同，但化学性质相同，称为同一元素的同位素。如重氢的原子核由一个质子和一个中子组成，氢的这个同位素称为

氘。在达到一定温度、压力条件下通过热核反应，4 个氢原子将其中两个电子和两个质子组合成 2 个中子，然后再将它们和剩余的两个质子组合成原子核，就可以把氢聚变成氦，并释放出能量。

从正常恒星和周围星际物质的光谱研究，我们知道恒星最初包含大约 70% 的氢和 28%的氦，重元素所占比例很小，而且在不同类型恒星中重元素所占比例也很不相同。如类太阳星重元素占 2%～3%，这类重元素相对丰富的星是年轻的恒星，称为星族Ⅰ星。在球状星团里的恒星，其重元素只占 0.1%～0.01% 被称为贫金属星，是老年星，叫星族Ⅱ星。

现存的元素是宇宙、星系和恒星各层次演化的总体结果，其中大部分是在恒星内部经核反应合成的。所有元素不是通过单一过程一次形成的，而是经过相应的几个过程逐步形成的。在宇宙大爆炸时，只形成了氢和氦。最早由星际云形成的第一代恒星，其化学元素主要是氢和氦。锂、铍等轻元素在银河系的演化早期就形成了，因为它们要求的核反应温度不高，大约在 250 万开下即可由核反应产生。在太阳和类太阳星中锂是非常稀少的，因为锂在温度达到300 万度时，可以发生吸收 1 个氢原子并聚变为 2 个氦原子的热核反应。

一颗恒星进入主序星阶段后，恒星内部会发生氢聚变为氦的热核反应。对于大于 8 倍太阳质量的恒星，其内部所有氢都聚变为氦后，恒星内部温度处于 1 亿度的高温情况下，会发生 3 个氦核聚合成 1 个碳核的反应。在转化时释放出的能量还可以转换为热能。当温度继续升高一些时就会发生碳原子聚合，并且又以完全不同的方式衰变成一些其他元素，如镁、钠、氖和氧。氧原子又可以聚合生成硫和磷。如此递推下去不断形成更重的原子核。我们知道，由原子核的特性决定，参与核反应的元素越重，产能越少，铁原子核形成后就停止了。当大质量恒星的核反应过程进行到中心区成为气态铁球体时，铁原子核会捕获气体中来回飞驰的电子，铁球体就收缩。因为当电子被捕获消失在原子核中时，重力（自身的引力）大于向外的气体压力，直到恒星中心区铁气态球崩溃坍缩。天文学家推测，铁球中的物质积聚到 1.5 倍太阳质量时，这种演变将继续下去，直到在极高密度条件下，各种基本粒子充分挤压，质子和电子都合并成中子，于是只剩下中子物质，同时释放出惊人的能量可以把恒星的外壳以巨大的速度抛向空间。这时恒星发生爆炸，星的壳层物质四处飞散，核心留下一颗中子星。合成后的重元素，随着恒星爆炸回到宇宙空间，又参与到新生恒星的孕育形成之中，于是有了现在我们观测到的化学元素丰富度分布。

对于质量小于 8 倍太阳质量的恒星在聚变过程中绝不会到达铁核心的阶段，最终可能会形成白矮星，例如太阳的归宿就是白矮星。

第2节 原 恒 星

人们对于恒星的形成和演化的认识，是从一些重要天象得到的启示。例如，一些较年轻的（年龄不到 100 万年）、大质量的恒星在银河系内的分布，都集中在银道面的旋臂中，那里充满了密集的星际气体和尘埃。这说明年轻的恒星与星际云和星际气体有密切联系。在浩瀚无垠的宇宙之中到处弥漫着星际气体和尘埃物质。这种星际气体的平均密度约为每立方厘米 1 个氢原子，温度在 100 K 左右；而星际尘埃的温度只有 10 K。它们在空间的分布很不均匀，密集之处形成星际气体云。观测到的星际云，有的质量和半径很大，密度很低，是由氢原子组成的气体云；也有质量较大，半径较小，密度较高的分子云成团地聚集在一起。我们观测到的恒星也是成群、成团和成协地在一起。所以，目前大多数天文学家认为恒星是由弥漫的星际云中的分子云收缩形成，在收缩的过程中伴随有碰撞、瓦解而致碎裂的过程。

质量很大的星云在自身引力的作用下会很快地经历收缩、密集、升温的过程。当星云的质量达到 1 万倍太阳质量时，由于密度分布不均匀而变得不稳定，密度足够大的星云区收缩快，导致大型分子星云分裂、瓦解成许多中等分子云。随着中等分子云的收缩和密度增加，又可能破碎成许多更小的分



图 16.1 在 M16 天鹰座大星云中发现了一些新形成的恒星

子云。

这些小分子云中密度较大者能吸引周围更多的气体和尘埃，并随着引力收缩，内部温度骤升，在星云不断收缩过程中引力能转化为热能。当温度达到2 000 K时，一部分氢分子变为氢原子导致了中心核不稳定，再次发生塌缩。第二次塌缩形成的新核，称为原恒星。从星际云到形成原恒星的过程大约需要200万年。

近年通过红外方法观测到在猎户星云的星际气体和尘埃物质之中有大量密集的蓝色高光度的年轻星，在那里发现了一个直径约为太阳的1 500倍的发出强红外辐射的“婴儿星”—— 原恒星。观测还发现在人马座星云及M16天鹰座大星云(图16.1)中有许多新生的恒星在闪烁发光，它们就是原恒星。

第3节　主序前星

原恒星诞生后，在自身引力的作用下继续收缩，半径逐渐减小到太阳半径尺度时，反应逐渐加剧，中心温度继续迅速增加，星体开始闪烁发光。但是原恒星阶段，内部还没有发生热核反应，它们向外辐射的能量是外部物质下落释放的引力能转变成的。此外，内部没有达到流体静力学平衡，在它的表面还要承受外部物质不断下落造成的压力。恒星内部的物理条件发生了极大的改变，物质的密度由原始星云的$10^{-18}\ g/cm^3$，增加到大约$1\ g/cm^3$，也就是说增加了1百亿亿倍。

经过一定的演化时间后，原恒星内部的压强逐渐增大，最终能阻止塌缩。这时总质量不再增加，当星体内部逐渐达到了流体静力学平衡，内部气体处于完全对流状态，这时原恒星成长为少年星，叫做主序前星。

主序前星在赫-罗图中的位置将落在一条与主序几乎垂直的曲线即“林中四郎”线附近(见图16.2)。

处于主序前演化阶段的恒星，内部温度较低，约为3 000～5 000 K。在此温度情况下，尚未发生热核反应。恒星的主要能源是靠引力能的释放，一部分用以维持向外的辐射，另一部分用于增加内部的热能，使内部温度不断升高。

主序前星的质量越大演化得越快，到达主序星的时间也越短，表16.1给出了一些具体情况。

由表16.1可见，一个10 $m_\odot$的B3型恒星，演化到主序需要30万年，而具有1 $m_\odot$的G2型恒星则需要3 000万年才能演化到主序星，质量为0.2 $m_\odot$左右的小质量恒星要花费10亿年才能到达主序，成为主序星。

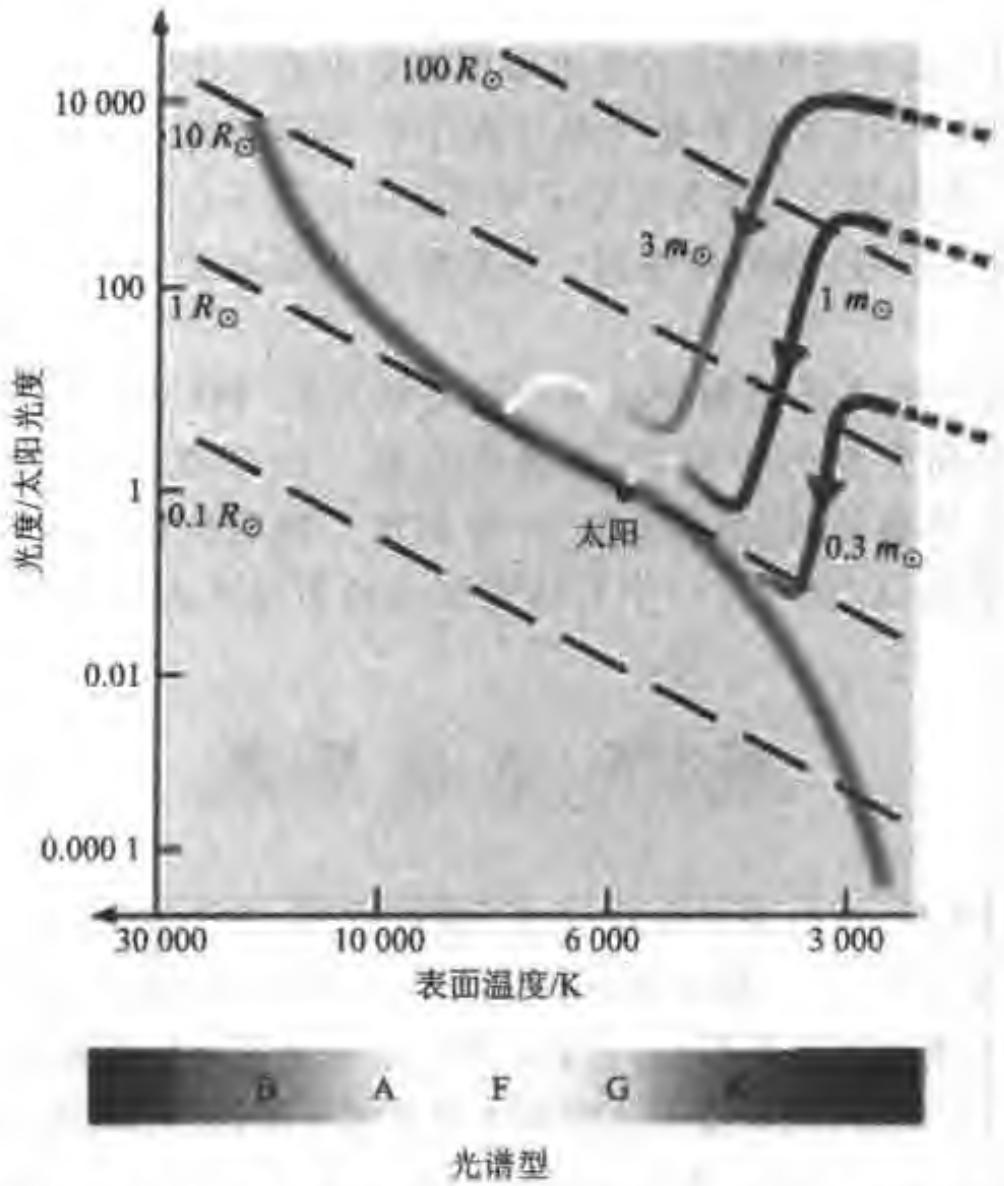


图 16.2　赫-罗图中的曲线表示了不同质量的主序前星演化到主序星的过程

表 16.1　主序前星的演化时间尺度

质量/$m_\odot$	光谱型	到达零龄主序的年龄/(10^4 a)
30	O6	3
10	B3	30
4	B8	100
2	A4	800
1	G2	3 000
0.5	K8	10^4
0.2	M5	10^5

第 4 节　主　序　星

当恒星的内部温度升高到 1 500 万 K 时，氢聚变为氦的热核反应开始全面发生。当恒星刚刚发生热核反应时，在赫-罗图上的位置是刚好到达主星序带的

最左端边缘(零龄主序),这时叫零龄主序星(ZAMS)。热核反应产生巨大的辐射能使恒星内部的压力增高到足以和引力相抗衡时,恒星不再收缩,成了青、壮年期的主序星。这段时间恒星进入了一生中最辉煌、活力最充沛的时期。

主序星的化学元素组成是相同的,主要组成部分是氢和氦以及其他元素。从零龄主序开始,恒星内部开始发生氢聚变成氦的热核反应。这时恒星的能源主要是氢聚合为氦时释放出的核能。恒星一旦开始核反应,它的温度和光度便不再有太大的变化。由于恒星的化学组成中氢的含量最多,并且氢的聚合反应是以极慢的速度进行的,因此恒星的一生几乎 90%以上的时间处于中心核内进行氢燃烧阶段,即处于主序星演化阶段。

主序星在赫-罗图上的分布有一定规律:沿着主星序由左上方往右下方走,恒星的质量由大变小,温度由高变低。其质量与光度之间,以及质量和半径之间符合前述的质-光关系和质量-半径关系。质量比太阳小的恒星进驻到了赫-罗图主星序的下部,它们的光度较小,温度也较低;而那些质量比太阳大的恒星进驻到主星序的上部,它们的光度大、温度高;质量与太阳相近的恒星则进驻主星序的中部,它们的光度和温度也都居中。

前面已经说过,对于主序星,它的光度与质量有一定的关系,$L \propto m^4$。除此之外光度还和恒星的大小、温度有关,半径大的主序星温度高,光度也高;半径较小的主序星,温度低,光度也低,这对主序星的天体物理观测研究很有意义,比如通过观测它们的视星等,再利用绝对星等和光谱型(或色指数)的赫-罗图,与观测得到的视星等与光谱型对应图比较,可以很方便地求出恒星的距离。

所有主序星都如同太阳那样,是一个炽热的气体球,大气的主要成分是氢和氦。晚型的主序星的金属元素比早型星的更丰富。主序星主要的能量来源是氢聚变成氦的热核反应。我们知道,在太阳内部的"碳-氮循环"与"质子-质子循环"两种核反应都发挥作用,而比太阳质量更大,内部温度更高的恒星基本上由碳-氮循环获得能量,比太阳温度低的恒星主要通过质子-质子循环反应产生核能量。

我们观测到的恒星大约 90%是主序星,因为恒星的一生中,在主序星演化阶段停留的时间最长。而不同质量的恒星在主序星阶段停留的时间长短也不同。质量越大的恒星引力越强,与这种引力相平衡的内部压力和温度也越高。也就是说,大质量恒星相对小质量恒星,热核反应进行得较快些,核燃料消耗的也较快,因此它们的青壮年期比较短。小质量恒星内部的热核反应进行得非常缓慢,核燃料消耗得慢,它们的青壮年期就长(参见表 16.2)。例如,质量为 50 $m_\odot$ 的主序星,在主序星阶段大约停留 100 万年;15 $m_\odot$ 的主序星在主序阶段大约停留 1 500 万年;而质量仅为 0.5 $m_\odot$ 的恒星在此阶段停留要长达 2 万亿年。太阳是个中等质量的主序星,在此阶段要停留大约 100 亿年。在恒星的一生中主序阶段是"风华正茂的青壮年"时期。类太阳星的形成过程可以分为 4 个阶

段：①星际云；②原恒星；③主序前星；④主序星，如图 16.3 所示。

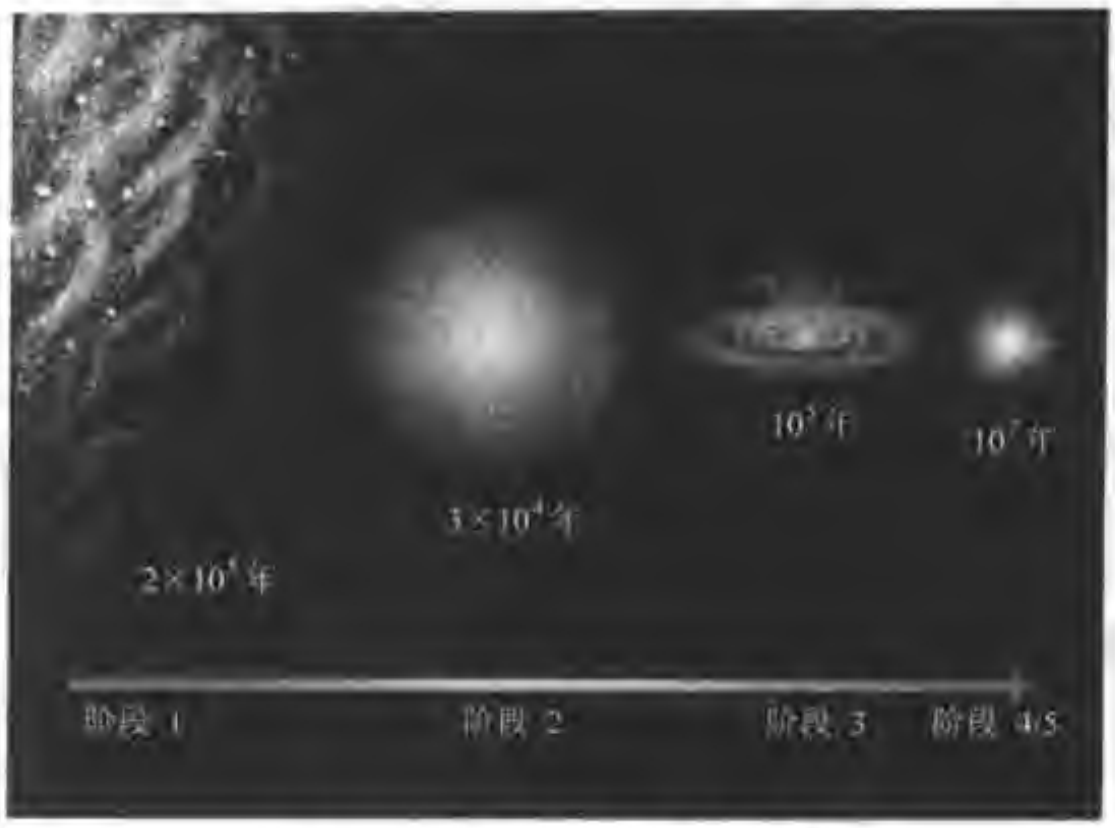


图 16.3　类太阳星的形成过程
（从星际云经历原恒星、主序前星、主序星演化的示意图）

表 16.2　主序星的表面温度、光度和在主星序演化阶段的寿命表

质量/$m_\odot$	表面温度/K	光度/$L_\odot$	在主星序的寿命/(10^5 a)
25	3.5×10^4	8×10^4	3
15	3×10^4	10^4	15
3	1.1×10^4	60	500
1.5	7 000	5	3 000
1.0	6 000	1	1×10^4
0.75	5 000	0.5	1.5×10^4
0.50	4 000	0.03	2×10^5

第5节　红　巨　星

主序星氢聚变成氦的热核反应开始是在星体核心区进行的，随着氢的消耗，当核心区内的氢全部聚变成氦的时候，核反应向外推移。恒星内部发生了剧烈变化，中心区的氢几乎燃烧耗尽，变成了一个氦核。中心区停止了氢的热核反应，因此抗衡引力的辐射压力也减小了，外层的物质在引力作用下向核心挤压，从而压力加大。这时核心收缩，引力能转变为热能使核心区温度增高，当星壳层温度达到 10^7 K 时壳层的氢点燃，开始氢聚变成氦的热核反应，推动外面包层受

热膨胀，使恒星体积很快增大上千倍以上，而表面温度下降。这时，恒星离开了主序，演化到红巨星阶段。

此后，壳层氢继续燃烧，核心区继续收缩，核心的温度继续增高。当温度达到 1 亿 K 时，核心的氦开始点燃，开始了氦聚变成碳的核反应。核心的氦燃烧和壳层的氢燃烧使包层继续膨胀，体积不断增大，表面温度降到 3 000～4 000 K。离开主序约 5 亿年后，由于恒星的体积增加，恒星的光度也就增加，大约增加1 000倍，表面有效温度约 3 000 K，半径可达太阳半径的数百倍。

例如心宿二(天蝎座 α)的直径约为太阳直径的 500 倍。一般红巨星的光度是太阳的几十倍、几百倍，甚至几万倍。红巨星的半径是巨大的，平均约有 70 倍主序星的半径，然而它的氦核却很小，仅是整个恒星的 1/1 000，它的氦核密度约 10^8 kg/m^3，而在红巨星的最外层的密度是 10^{-3} kg/m^3。核心的温度约 10^8 K，达到了氦核反应需要的温度。

不同质量的恒星由主序到红巨星经历的演化过程不同。一颗星演变成红巨星，标志着它已进入暮年时期，成为老年星。红巨星得到充分演化时，在它的内部，不仅氢原子核几乎全聚变成了氦原子核，而且氦核又进一步聚变成比它更复杂的碳原子核，然后会依次聚变成为氧、硅等元素的原子核，直到合成最稳定的元素铁为止。在铁核形成前，恒星的能量虽然不如氢聚变成氦的能量那么多，但却足以维持恒星发光、发热的生命。然而从铁核中就不可能再获得能量了，至此恒星的一生就走到尽头了。图 16.4 为红超巨星的内部构造，核心是铁，从里向外，依次各层是硅和硫；氧、氖、钠；碳、氧、氖；氦和氮；最外层大气是氢和氦。

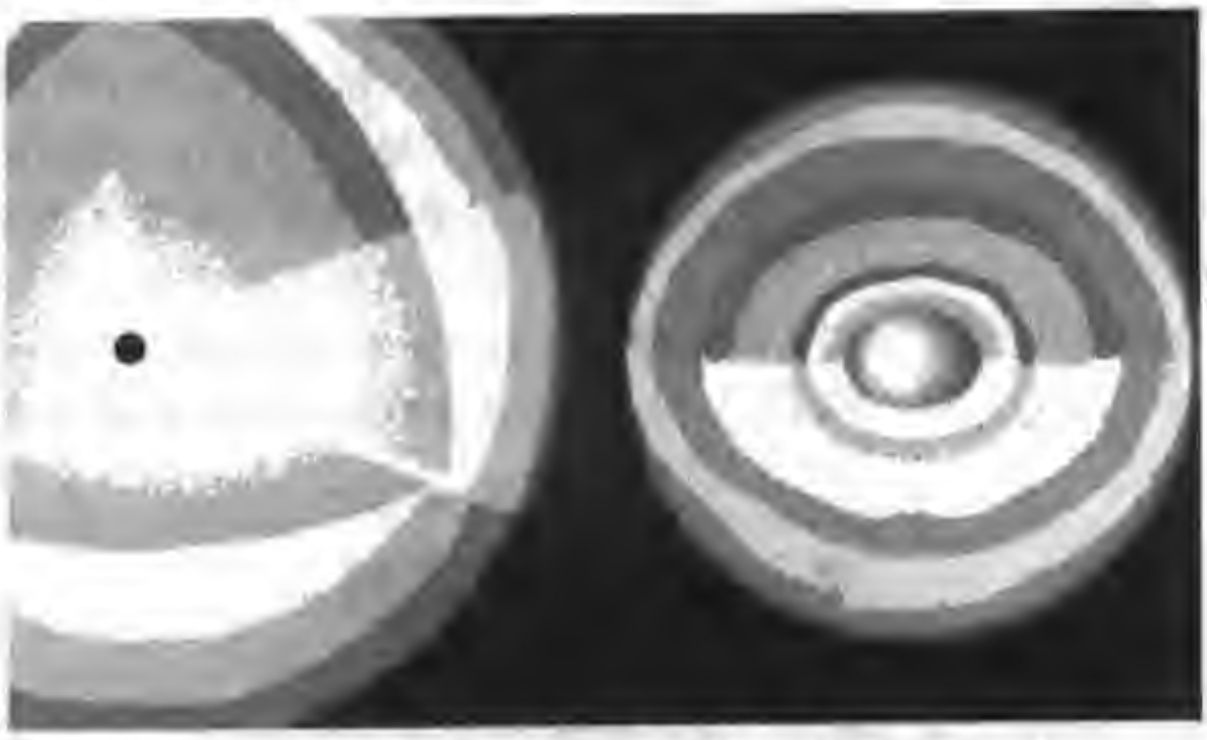


图 16.4　红超巨星的内部构造

然而，并非所有恒星内部的核反应都会演化到铁。如果质量较小，它的核心温度就不足以使较重元素的原子核发生聚变。

一些红巨星，氦核温度升高到氦的燃烧点时，不像主序星那样稳定，会发生氦猛烈燃烧的“氦闪”现象，因而成为不稳定的星。当红巨星的内部变得太热，它往外的辐射压力大于自身的引力时，星体就会再次膨胀成为红超巨星。热物质膨胀会消耗能量，从而使星体变冷，而其向外的压力就逐渐减小。当膨胀停下来时，温度已变得太低，以致又会出现收缩的趋势。于是，恒星出现周而复始的膨胀、收缩，即发生脉动。脉动变星就是处于这个演化阶段的恒星。恒星在这个不稳定期持续时间很短。这一阶段的演化程在赫-罗图上，又从右方向左方转移，经过一段恒星不稳定区。观测到的脉动变星几乎都处于这个不稳定带。脉动变星不停地收缩、膨胀，经过了一定阶段后又恢复正常，很像恒星的“更年期”。

天文学家计算了一个有 7 $m_\odot$ 的恒星演化程。这颗星从主序阶段开始，这时恒星内部化学组成是均匀的，并且主要由含氢丰富的物质组成。在主序星阶段核心的氢燃烧，氢聚变成氦，2 600 万年后，开始了由中心区向壳层燃烧的转变，壳层氢点燃 2 650 万年后，中心成为氦球，只在壳层发生氢聚变为氦的核反应来供能，恒星的半径增大了，此时恒星有一个很厚的对流层。再经过 10 万年后，氦开始点燃。3 400 万年后，恒星依靠外部壳层的氢燃烧和内部壳层的氦燃烧来供能源，恒星收缩，并失去了外部对流层。再经过 200 万年恒星变成红超巨星，并多次经过脉动演化阶段，那时它的氢燃烧壳层已经消失，这时恒星仅依靠氦的聚变来供能，它的化学组成已变得相当复杂：外部仍然是由原始的含氢丰富的物质组成，而它的下面是一个很厚的氦层，氦层内部有一个极小的碳核球。

恒星演化到红巨星前经历一个过渡阶段，这个阶段在赫-罗图中红巨星分支的渐近线附近，处于这个晚期演化阶段的星叫做 AGB 天体。当恒星核内的氦耗尽时（燃烧变成碳和氧），核必收缩，这就增加核周围覆盖层的压力和温度，于是核外气壳层点燃，而在这个壳层的外面的氢壳层燃烧。此时的恒星处于双壳层燃烧阶段，恒星内部的碳氧核的质量在不断增加，在赫-罗图上，它的演化路线又一次上升到巨星分支，所以这类恒星叫红巨星渐近线分支恒星。

第 6 节 恒星的归宿

恒星演化到晚期都要损失一部分质量，然后走向生命的终点。不同质量的恒星损失质量的形式不同，因而恒星的归宿也不同。

像太阳这样小质量的恒星，当恒星核中的氢耗尽以后，热能仍然继续不断地从恒星中心泄露出来。恒星核必然在引力的作用下收缩。收缩时，恒星核本身

受到加热，同时也加热了核上面的恒星壳层。在这个新的较高温度条件下，核内的氢完全枯竭，恒星核附近壳层内的氢开始燃烧。然而，此时核本身仍然不能产生核反应，但它却继续不断地向覆盖在它上面较冷的层次释放热。在这种情况下，恒星核必然继续收缩。虽不发生灾难性的大爆炸，也会在后期脉动过程中使外层与核心分开，恒星的外层渐渐扩张，通过质量抛射，形成行星状星云(参见16.5)。而恒星内部辐射压力减小，不足以抵抗自身的引力，压力使物质挤向中心，密度急剧增加，成为一种依靠简并电子的压力与引力平衡的星体——白矮星。白矮星在一段很长的时间内继续发射微弱的光，直到失去它的全部热量成为一颗冰冷、静寂的黑矮星。这就是小质量星的归宿。

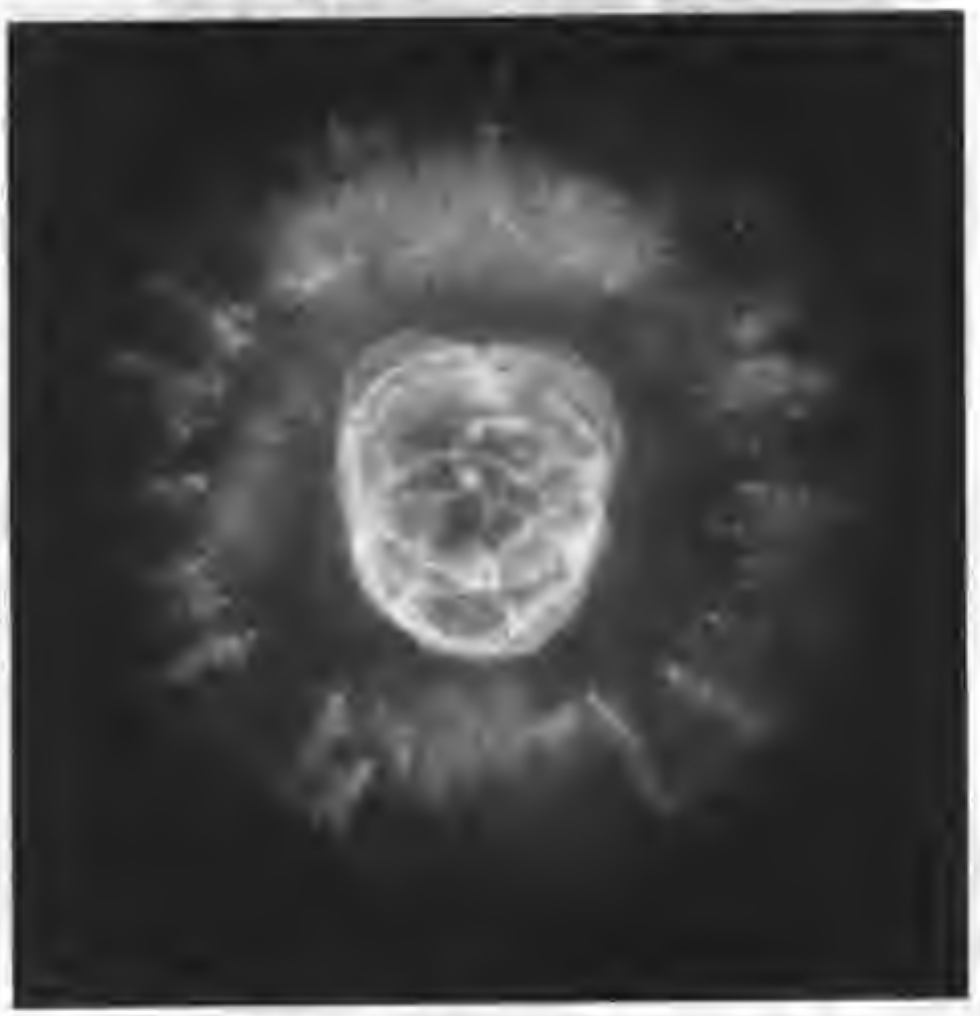


图 16.5　哈勃望远镜拍摄的天鹰座的行星状星云

大质量的红超巨星演化到晚年，当温度等于或大于 10^8 K 时会导致 3 个氦核聚变成一个碳核的热核反应，星的核心会变成一个高密度的电子简并态(即电子占满了各个能态)的碳球。整个星体向中心坍缩，核心简并的碳球因受猛烈压缩而温度剧升，碳核聚变为更重的原子核，星体发生大爆炸，这就是我们观测到的超新星爆发。超新星爆发时星体发生灾难性的大塌缩，外壳物质被抛向四面八方，并携带出巨大的能量，其核心成为致密星。如果致密星的质量大于 $1.4\ m_\odot$，小于 $3.2\ m_\odot$，将成为中子星。此时核心的密度高达 $3\times10^{16}\ \mathrm{kg/m^3}$ 时，电子几乎全被压进质子中去，使质子转化为中子，核心物质呈现为中子简并态。

若是超新星爆发后核心的质量超过 3.2 $m_\odot$，则中子简并态压力抵不住气体自身引力，恒星继续收缩下去，最终成为黑洞。

对于质量小于 3 $m_\odot$ 的恒星和大于 8 $m_\odot$ 的恒星有两条演化程，有不同的归宿，如图 16.6 所示。



图 16.6 质量小于 3 $m_\odot$ 的演化程(右分支)和质量大于 8 $m_\odot$ 恒星的演化程(左分支)



习 题

1. 一个星际气体云要达到收缩的目的，它内部的气体的平均速度必须低于星云的逃逸速度的一半。一个氢云质量为 1 000 $m_\odot$，半径为 10 pc，温度为 10 K，问它能收缩吗?

2. 利用半径-光度-温度的关系：$L=4\pi R^2\sigma T_e^4$，解释一个原恒星的光度由第 4 阶段($T=3\ 000$ K，$R=2\times10^8$ km)到第 6 阶段($T=4\ 500$ K，$R=10^6$ km)是如何变化的?

3. 一颗矮星半径是 0.1 $R_\odot$，其表面温度是 600 K，它的光度是多少(以太阳光度 $L_\odot$ 为单位)?

4. 一颗超新星爆发，它发出冲击波的速度是大约 5 000 km/s，这样一个扰动穿越一个直径 20 pc 的分子云，需要多少时间?(假设冲击波运行中没有衰减)

5. 一个典型的疏散星团直径为 10 pc，它的成员星的平均速度是1 km/s。

估计多长的时间(10 亿年的倍数)后星团中心的典型星轨道溶解到银河系的潮汐场中。

6. 利用半径-光度-温度的关系计算一个温度为 3 000 K(太阳温度的一半),光度为 $10^4\ L_\odot$ 的红巨星,可以吞没多少个太阳系的行星。重复这样的计算,对于一个温度为 1.2×10^4 K,光度为 $0.000\ 4\ L_\odot$ 的白矮星又是如何?

7. 一颗主序星距离我们 20 pc,通过一个望远镜刚刚能看见。后来这星演化到红巨星分支,它的温度下降到原来温度的三分之一,半径增加到原来的 100 倍。这时用同样望远镜如果还能看到的话,这星的最远距离是多少?

8. 一颗红巨星,其氦核质量为 $0.25\ m_\odot$,核的半径为 1.5×10^4 km;这个红巨星最外的大气包层质量是 $0.5\ m_\odot$,半径是 0.5 AU,求出核的平均密度与红巨星大气包层各自的平均密度,并把它们与太阳的核密度做比较。

9. 太阳的寿命大约是 100 亿年,估计以下天体的预计寿命:

(a) $0.2\ m_\odot$,$0.01\ L_\odot$ 的红矮星;

(b) $10\ m_\odot$,$1\ 000\ L_\odot$ 的蓝巨星。

第十七章

白矮星、中子星和黑洞

白矮星、中子星和黑洞都是致密星，而且都是恒星晚期演化的最终产物，即核燃料完全耗尽时恒星的归宿星。

一个恒星到晚年是演化成白矮星还是中子星或黑洞主要取决于它的质量。致密星与正常星的共同区别，是它们不再燃烧核燃料，从而不能靠核反应产生的热压力来支持自身的引力塌缩，致使致密星的尺度非常小，密度很高，引力场很强，处于超高的密度、超强的压力和超强磁场的极端物理状态。研究致密星的特性和内部的物理状态，对解析恒星的晚期演化有重要意义。

第1节 白 矮 星

冬夜明亮的天狼星的伴星就是一颗典型的白矮星，它是20世纪30年代，德国天文学家贝塞尔由天体测量发现的。他发现天狼星在天球上的运动路径是波浪式的曲线，从而推测天狼星是双星系统，一定有一颗看不见的伴星。后来在



图17.1 天狼星A与它的白矮星伴星天狼星B的照片

1862 年望远镜制造专家科拉克用 25 cm 口径望远镜果然观测到了天狼星的伴星(天狼星 B),这是人们发现的第一颗白矮星。图 17.1 是由钱德拉空间望远镜拍摄的天狼星 A 和它的白矮星伴星天狼星 B 的照片。天狼星 A(主星)的视星等为 -1.74^m,而天狼星 B(伴星)的视星等为 $+8.64^m$,绝对星等分别为 1.43^m 和 11.33^m,即主星比伴星约亮 10^m,光度相差 1 万倍。两个子星互相绕转的轨道周期为 50 年。表 17.1 列出了天狼星 B 的一些物理参量。天狼星 B 的质量是 $1.05\ m_\odot$,而半径却只有约 4×10^4 km,相当于 $7.4\times10^{-3}R_\odot$,体积是太阳的百万分之一,由此可知,它的密度是太阳平均密度的 100 万倍!

表 17.1　天狼星 B 的一些物理参量

质量/$m_\odot$	1.05
半径/$R_\odot$	7.4×10^{-3}
总光度/$L_\odot$	0.01
表面温度/K	2.4×10^4
平均密度/(kg · m $^{-3}$)	3×10^9

现已观测到数千颗白矮星,这类星不再燃烧核燃料,它们辐射残存的热能慢慢冷却。而且,这类星的光谱大多是 A 型,发出白颜色的光,而且半径特别小,其平均密度高达 10^9 kg/m^3,所以叫做白矮星。

一、白矮星的物理特性

一般白矮星的质量与太阳质量近似,在 $0.3\sim1.2\ m_\odot$ 之间,都小于 $1.4\ m_\odot$。但是白矮星的半径很小,通常为太阳半径的百分之一左右,平均约 5×10^3 km,与地球的大小相近,因而白矮星的密度很高,约为 $10^8\sim10^{12}$ kg/m^3,也就是说,在这奇异的白矮星中,1 立方厘米的物质约有 200 吨重!

白矮星的表面温度高,约 $5\times10^3\sim5\times10^4$ K;多数光谱为 A 型.由于白矮星体积很小,所以,它们的光度低,大约是太阳光度的十分之一到千分之一,绝对星等在 $+8^m$ 到 $+14^m$ 之间;

根据观测资料统计,不同的白矮星化学成分有很大的差异,按照其差别,把白矮星分为 DA、DB、DC、DF 和 DP 5 个次型:DA 型白矮星含氢丰富;DB 型白矮星含氦丰富;DC 型白矮星含碳丰富;DF 型含钙丰富;而 DP 型的白矮星磁场特别强,一般可达 10T,特别强的高达 $10^3\sim10^4$ T,称为磁白矮星。天蝎座 ZZ 变星是颗 DA 型白矮星,而天狼 B 星属于 DB 型白矮星。

二、引力红移

白矮星还有一个奇异的特性,就是有引力红移现象。什么是引力红移呢?它

是爱因斯坦广义相对论的一个推论。按照广义相对论，在远离引力场的地方观测引力场中的辐射源发射出来的光时，光谱中谱线向红端移动，即同一条原子谱线比没有强引力场的情况下，波长变长。波长红移的大小与辐射源和观测者两处的引力势差成正比。由于白矮星半径很小，密度很大，引力场很强，光子离开表面克服引力要损失相当的能量，一个光子的能量为 $h\nu$（h 为普朗克常量）与它的频率成正比，能量减少频率就降低，所以波长就变长。此红移不是光源移动引起的多普勒位移，而是引力场引起的红移，所以叫做引力红移。例如，由光谱观测，测出天狼 B 星的引力红移是 89 km/s，波江座 40 的引力红移是 23.9 km/s。

三、白矮星的内部物理状态

在白矮星内部的高密、高温、高压条件下，与强大引力相平衡的是简并电子气的压力。为什么是这样呢？因为白矮星内部原子的电子壳层结构都被高压破坏了，只有赤裸裸的原子核（包括质子和中子）和自由电子。这些电子都脱离原来的“几率轨道”，而成为自由电子，于是形成了密度很大的自由电子气。我们知道，原子的一定能量状态，只能允许一个电子占有，低能态占满了，就只能到高能态去。当电子密度很高时，所有的能量状态都将被电子占满，这样的电子就处在简并态，所以称为简并电子气。其中电子速度比光速小得多，叫非相对论性简并气体，其电子压力与电子密度的 5/3 次方成正比；那些电子速度与光速接近的称为相对论简并气体，其电子压力和电子密度的 4/3 次方成正比。而理想气体的压力与气体粒子数密度的 1 次方成正比。因此，简并电子气的压力比理想气体的压力大得多，相比之下白矮星的辐射压力和原子核压力都不重要了。因此，压缩到高密度的电子气体，一般互相间有很高的随机速度。这个随机运动速度能够引起比热压力高得多的简并压力，与白矮星自引力相抗衡的就是这种电子简并压力。

四、白矮星的质量

1931 年，印度籍美国科学家钱德拉塞卡推出了完全简并电子气的物态方程，建立了白矮星模型。他推导出了白矮星的质量上限为太阳质量的 1.4 倍，即 $m_{ch}=1.4\ m_{\odot}$，也就是说大于此质量限的白矮星不复存在，将会进一步坍缩形成中子星或黑洞。后人称这一质量极限为白矮星的钱德拉塞卡质量限。由于他对科学的卓越贡献，钱德拉塞卡获得了 1983 年诺贝尔物理学奖。目前已被观测测到的所有的白矮星的质量都小于这个极限值。观测结果为证明钱德拉塞卡理论的正确性提供了一个重要证据。

五、白矮星发光的来源

白矮星是小质量恒星的归宿，它的内部停止了核反应，所有的核燃料都已经

耗尽了。为什么一些白矮星仍然发光呢？这是因为白矮星是恒星燃烧后的遗迹，它的内部温度不是零，这类似于正在冷却的余烬，其光辐射是非常微弱的。白矮星没有由气体组成的普通恒星所具有的典型特性，白矮星在发射光辐射时没有那种大得可以观测得到的收缩和变热。这是因为支撑着白矮星自引力的是电子简并压，而不是热压力。白矮星可以说是固化的，在许多方面，类似于地球上的金属。所以，以白矮星为归宿的恒星能静静地安息在宇宙之中。

第2节　中　子　星

一、脉冲星的发现

1967年10月，英国剑桥大学的研究生，24岁的姑娘乔斯琳·贝尔在用一架工作波段为3.7 m的射电望远镜观测行星际闪烁现象时（指天体发射的无线电波穿过行星际空间时受太阳风影响，射电信号的强度会发生起伏变化的现象）发现了一种很强的无线电脉冲信号，由于深夜太阳风的影响非常小，不像是行星际闪烁，而这种信号反复出现，周期为1.337 s，如图17.2所示。她请教她的导师安东尼·休伊什教授，然后他们开始仔细地研究这种像人的脉搏一样准确而稳定的脉冲信号来源。他们发现这种脉冲信号每隔23小时56分钟过一次子午圈，显然此信号是来自某个天体，因为它重复出现的时间间隔是地球自转一周的时间。

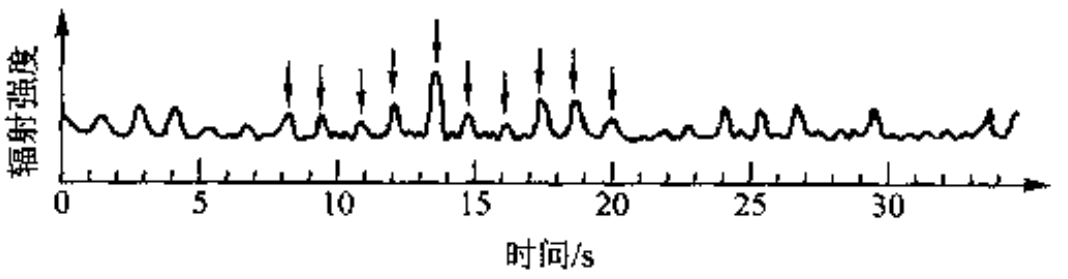


图17.2

此后，世界各国许多射电天文台都投入了寻找脉冲星的观测工作。1993年美国天文学家泰勒给出的脉冲星星表（TML93）列出了已发现的558颗脉冲星的参数。泰勒在他的专著“脉冲星”的扉页上写到：“献给乔斯琳·贝尔，没有她的聪明和百折不挠，我们就分享不到研究脉冲星的幸运。”

至今，在我们银河系内已发现了一千多颗脉冲星。脉冲星在我们银河系内是特殊“居民”，它们绝大部分位于银道面附近。有的天文学家从理论上估计，银河系内可能有几十万颗脉冲星，只是由于它们太暗弱而不易被探测到。目前观测到最暗的一个脉冲星是陶里斯在1994年用澳大利亚帕凯斯射电望远镜发现的一颗命名为PSRJ0108－1431的暗弱脉冲星。该星位于鲸鱼座，距离我们

280 l.y.，每分钟旋转 74 次。

现代对脉冲星的命名，统一采用 PSR(脉冲星)加上它的赤经和赤纬位置来命名，例如 PSR1919+21 脉冲星的赤经为 19^h19^m，赤纬是 +21°。

二、脉冲星就是中子星

早在 1932 年英国物理学家们发现原子核里除了质子之外还有中子之后，苏联物理学家朗道就预言：宇宙中可能存在着由自由中子组成的中子星。两年后，德国天文学家巴德和瑞士天文学家兹维基明确提出，一旦超新星爆发后，就会在核心形成中子星。1939 年，理论物理学家奥本海默和沃尔科夫详细地研究了中子星的模型，他指出：如果这种天体存在的话，质量一般不会超过太阳质量的 2 倍，它们的半径只有 20 km 左右，其密度将大得惊人，比白矮星还要高出七、八个数量级。

理论家关于中子星存在的预言给予了人们重要的启迪，引导人们去探索和创新，果然迎来 20 世纪 60 年代脉冲星的发现。大量观测研究证实，所观测发现的脉冲星就是以前理论家预言的中子星。由于它的亮度非常弱，所以很久不能被光学望远镜发现，一直到 60 年代用射电望远镜观测才发现了它。后来天文学家在蟹状星云中央，发现了一颗脉冲星，证明了中子星确实是在超新星发生灾难性爆发时产生的，它就是观测到的脉冲星。

中子星是恒星演化到核能耗尽，引力塌缩的结果。当超新星爆发时，把大量外层物质抛射出去，同时由于引力而剧烈坍缩，把核心处的物质压得更紧。在此情况下，如果简并电子气的压力也不足以抵抗坍缩的压力时，电子(e)就被压进了原子核，与质子(p)结合成了中子(n)。

$$p+e \rightarrow n+\text{中微子}$$

中子的数量不断增加，当密度达到 10^{17} kg/m³ 时，会导致原子瓦解，进入中子简并态，变成中子流体。当密度超过 10^{17} kg/m³ 时，简并中子气所形成的压力远远超过简并电子气，形成与坍缩的引力相抗衡的状态，稳定的中子星就形成了。

理论家预言了中子星的自转动能会稳定地转变成其他形式能量的情况。这在蟹状星云中的那颗脉冲星得到证实，它是人们首次观测到自转周期变长的脉冲星，说明了中子星的自转能部分地转变为蟹状星云的能量。

三、中子星的质量

有些中子星是双星系统中的子星，因而有可能测定它们的质量。观测表明：中子星的质量为 1.4～3.2 $m_\odot$，与中子星的形成理论一致。

对于一个质量为 1.4 $m_\odot$ 的中子星，半径约为 15 km。因此，一颗中子星半

径约为 15 km 左右，与一个城市相仿(图 17.3)！



图 17.3　中子星的半径仅有 15 km 左右，
图中背景为美国曼哈顿岛

理论研究表明，中子星的质量也有一个上限，此上限约为 3.2 $m_{\odot}$，称为奥本海默-佛柯父极限，奥本海默-佛柯父推算出中子星的质量如果大于 3.2 $m_{\odot}$，即超过这个极限中子星就不能稳定存在，内部的简并压力也无法抗衡坍缩引力，星体便进一步坍缩下去，直至形成黑洞。

四、中子星的内部物理状况

1. 非常强的引力场

中子星的引力场非常强。我们知道一个中子星的大小比一座山大不了多少，然而，一颗中子星的质量却与太阳差不多，所以，中子星的表面引力极强，以至于任何一块普通石头都很难逃出它的束缚。中子星的强大引力(压力)把大部分自由电子压进原子核里，强迫它们与质子结合形成中子。

中子星有这样高的核密度以及非常大的引力场，意味着在正确描述中子星的结构时，应该考虑核之间的相互作用力和牛顿引力理论的爱因斯坦修正。目前物理学家对中子星的结构了解甚少，需要进一步的实际观测提供重要线索。

2. 超高的密度

中子星比白矮星的密度更高。我们知道，太阳的体积可以装下 130 万个地

球，然而一个地球可以装下 2.58×10^{8} 颗中子星，可见中子星之渺小。但是，中子星却和太阳的质量差不多，因而中子星的密度极高。

按照理论模型计算，中子星的最外面可能有很薄的致密大气；大气之下是厚约 1 km 左右的固体的外壳，具有晶体点阵结构。外壳的密度为 $10^{9}\sim10^{11}$ kg/m^{3}，由中子核和核外的电子气组成。而它的内壳密度高达 $10^{14}\sim10^{17}$ kg/m^{3}。这意味着 1 立方厘米的中子星的物质就有几亿吨甚至几十亿吨重！也就是说中子星上一个核桃那么大的物质，要几万艘万吨以上的巨轮才能拖得动。在中子星内壳以下是重核(像铁)，密度大于 10^{17} kg/m^{3}，是简并中子流和少量的质子、电子。中子处于超流状态，原子则是超导的。中子星的核心处是约有 1 km 范围的固体核。

3. 超高的温度与超强的磁场

中子星的表面温度约 10^{7} K，而内部中心温度则高达 6×10^{9} K，是一个比太阳热得多的极端超高温世界。中心的压力是 10^{28} atm，比太阳中心压力大 3×10^{16} 倍，因而也是一个极端超高压的世界。

中子星的表面磁场很强，高达 1 亿到 20 亿特斯拉，比太阳的普遍磁场强 20 万亿倍，比地球磁场强 1 亿亿倍。

中子星的电磁辐射能量是太阳的一百万倍。可见，中子星是具有超高密度、超高温、超高压、超强磁场、超强辐射等极端物理条件的天然实验室。

4. 中子星的辐射能源

中子星内部不再有热核反应，核能已经耗尽，但是通过引力塌缩形成的中子星的内部温度极高(几十亿开)。由辐射的维恩定理 $\lambda_{max}T=0.29\text{cm}\cdot\text{K}$，可以知道中子星辐射能量极大的波长 $\lambda_{max}=0.003$ nm，属于硬 X 射线范围。但是由于大量的中微子将畅通无阻地逃离中子星，带走了巨大的能量使中子星表面很快冷却，所以新生的中子星由于过快冷却使中子星的表面温度降为 10^{7} K。观测发现中子星大都是通过射电观测与 X 射线的探测发现的。它们的射电辐射是周期性地发出短暂的能量脉冲，周期短且稳定，一般为 0.03～1 s。目前已知，最慢的射电脉冲星 PSRJ2144－3933 的自转周期为 8.51 s；最快的脉冲星是毫秒脉冲星psr1937＋214 自转周期为 1.6×10^{-3} s。脉冲的宽度多在 0.001 s 到 0.05 s 之间。

观测表明，脉冲星的辐射脉冲周期有增长现象，个别脉冲星周期有突然变化。此外，它们的脉冲辐射是偏振的，大多数是线偏振，也有的是偏振度很高的椭圆偏振。再者，脉冲星的射电频谱包含多种多样的频率，脉冲能量密度随频率的增加而很快下降，也就是说低频率的比高频率的辐射能量强些。

中子星的辐射能有三种可能的能量来源：热能、引力能与转动能。

(1) 热能　热能将以黑体辐射的形式辐射出去，同时也将通过各种冷却过

程而耗散。中子星的表面积很小，很难观测到它的光学波段辐射，但是由于它的温度较高，光度与温度的四次方成比，所以可以观测到它在X射线波段的辐射。

(2) 引力能　当一个双星系统中的伴星的物质被中子星吸积，流向中子星时，由于物质有过剩的角动量，则这些物质并不直接落到中子星上而是形成围绕中子星的吸积盘，中子星的吸积和吸积盘的形成都是引力能所致。对于核能已经耗尽的中子星，热能显然不可能是它的主要能量来源，而引力能也不是它们的主要能量来源，因为大多数脉冲星不是双星系统，脉冲双星只占总数的5%。

(3) 转动能　中子星都是快速自转的天体，它们蕴藏了极大的转动能，因而中子星的快速自转特性决定了中子星的主要能源是转动能。

五、脉冲星的辐射机制

是什么原因使脉冲星发射脉冲信号呢？“快速自转中子星模型”回答了这个问题。这一模型认为脉冲星具有极强的磁场，而且是快速自转的致密中子星，转动的速度大约每秒一周甚至几百周，足够产生所观测到的脉冲。为什么脉冲星旋转得如此之快呢？这是由于物体都遵循角动量守恒的定律；角动量取决于三个因素：物体的质量、伸展度和旋转的速度。对于一个孤立的物体来说，其角动量是恒定的。因此，如果一个旋转物体保持不变的质量，当它伸展开时转得较慢，当它收缩紧时旋转就加快。中子星收缩的很紧，物质密度极高，因此旋转非常迅速。

中子星的外部充满了各种带电粒子，叫等离子体，带电粒子的速度很高，接

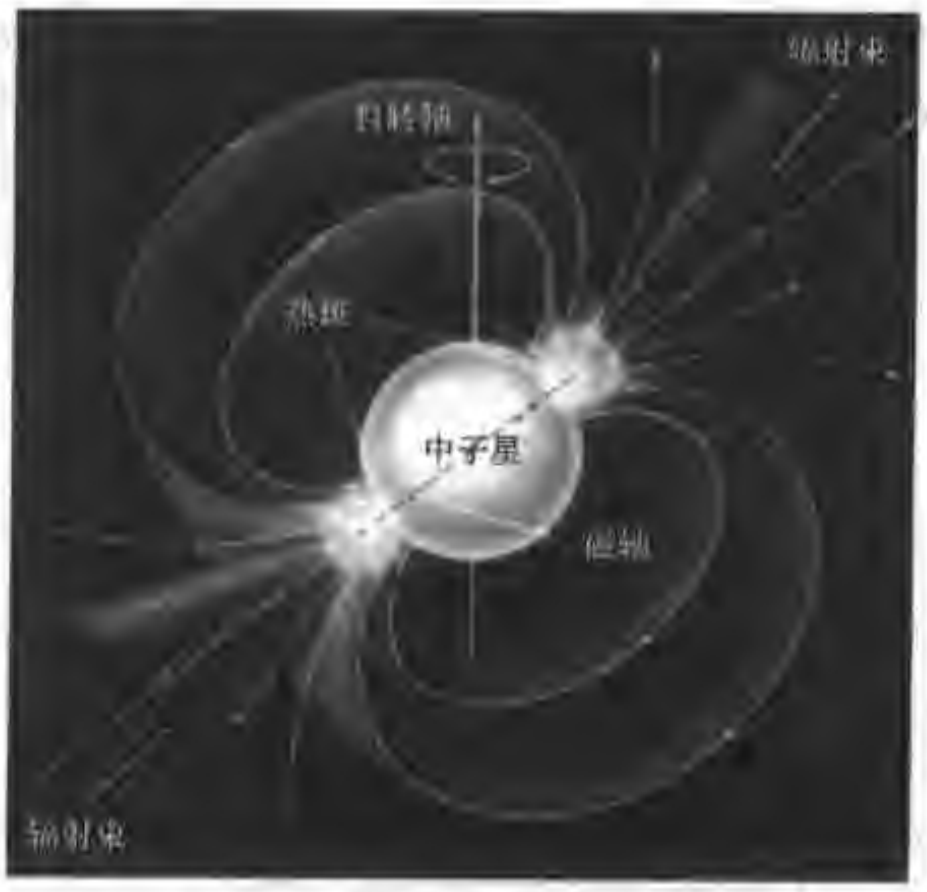


图 17.4　脉冲星辐射机制的灯塔模型

近光速，它们在磁场中绕磁力线沿螺旋轨道运动时会发出一种同步加速辐射。中子星的自转轴与它的磁轴不重合，则随着中子星的自转，磁极和同步加速辐射也会周期性地扫过空间。最近研究表明，脉冲星除了存在磁极区的空心辐射锥以外，还存在有中心辐射束。中子星的辐射束从磁轴方向发射出来，由于中子星快速自转，在远处看来，辐射一亮一暗，如同巡航的灯塔（见图 17.4）。

六、毫秒脉冲星

正常的脉冲星的脉冲周期是 0.05～8.5 s。1982 年发现了更短周期的毫秒脉冲星。中子星都是老年星，根据理论估计，它的年龄大约有 10 亿年，如此老年的星为什么还旋转得如此之快呢？其中之一的解释是它可能是双星系统，系统中伴星太暗弱而不能被观测到，被吸积的物质不断冲向中子星的吸积盘，并给予它一冲击力，此动能会转移到中子星的表面，使得中子星的自转加速。

截止到 2002 年为止，已发现了 75 个周期在 1.5～25 ms 的毫秒脉冲星。天文学家对毫秒脉冲星的发现经历了好几年的艰辛。美国的贝克教授等用阿雷西博射电望远镜，并改进接受系统的灵敏度，经过努力在 1982 年终于发现了脉冲星 PSR1937＋214，这是一颗不寻常的脉冲星，它的周期只有 1.558 ms，也就是说，在 1 s 的时间内它自转 642 圈！它的周期只有蟹状星云中脉冲星周期的 1/20，但年龄要高出 5 个数量级，达到 4 亿年。它的磁场强度较低，约为 1 万特斯拉，周期变化率为 1.049×10^{-19} s/s。

值得关注的是，1992 年发现毫秒脉冲星 PSR1257＋12 有行星系统，其证据为：由于看不见的天体的引力作用，观测到来自脉冲星的信号有畸变的现象。这不仅是首次发现脉冲星有行星，也是在太阳系以外发现的第一个行星系统。理论工作者认为，这些行星是中子星从毁灭了的伴星残骸中捕获的物质形成的。观测表明，PSR1257＋12 有 3 颗行星，两个较大的行星，其中一个距离脉冲星约 5 400 km，公转周期为 66.6 天，质量为地球质量的 3.8 倍；另一个行星距离脉冲星约 7 000 km，公转周期为 98.2 天，质量为地球质量的 2.8 倍。

七、中子星双星

1976 年以后天文学家发现了一些双星系统内有中子星，并在我们的银河系中心区域和一些富星团中发现了众多的 X 射线暴，它们发生剧烈的能量爆发，其光度比太阳高几千倍，但是只持续几秒钟。科学家认为这些双星系统内一个子星是主序星或巨星，另一颗是中子星，在中子星的吸积作用下，伴星的物质流向中子星，在中子星周围形成吸积盘，气流冲击吸积盘，形成热斑，并发射 X 射线。典型的例子是脉冲星 S433，它有 X 射线双喷流，这可以用双星的模型来解

释。如图 17.5 所示 S433 脉冲双星系统，伴星正常星的物质受主星中子星吸积流向中子星，物质受中子星强大的引力作用而冲击吸积盘，加热它成热斑，同时产生 X 射线，并向垂直吸积盘的两个相反方向发射喷流。

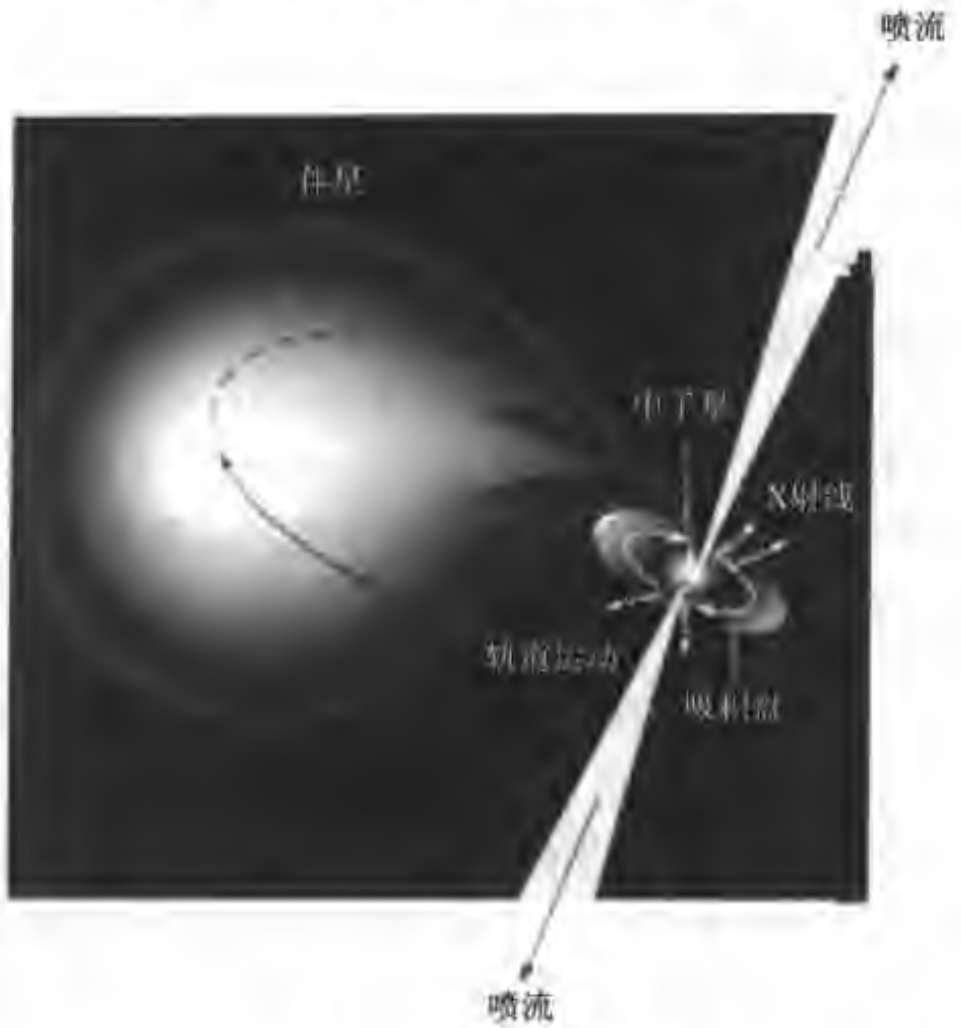


图 17.5　SS433 的双星模型

天文学家还观测到了一些射电脉冲双星，第一个被发现的脉冲星双星系统是 PSR1913＋16，由双星的轨道运动规律测定出两个子星的质量和是 2.8 $m_\odot$，每个子星的质量很可能都是 1.4 $m_\odot$。

大多数射电脉冲双星是由一个中子星和一个白矮星组成的。伴星的质量比太阳的质量小许多，在 0.08～0.87 $m_\odot$ 之间。轨道周期长的如 PSR0820＋02，周期为 1 232 天，轨道周期短的如 PSRJ2051－0827，系统内的两个子星都是中子星，轨道周期只有 0.099 天。

脉冲双星的首次发现使人们惊喜不已，因为由双星的轨道运动可以推算两个中子星的质量这个重要的天体物理量。而且，还观测到脉冲星双星系统 PSR1913＋16 中两个子星的轨道周期正在减小，这恰恰是爱因斯坦的广义相对论所预言的：如果有两颗中子星彼此靠得很近，并因强大的引力作用而互相绕转，那么被吸积的天体一定会发出颇为可观的引力波。同时由于发出引力波，能量损失会使运转轨道的半径缩小，绕转周期就会缩短。人们只要观测到这类双星轨道周期随时间的变化，就可以对爱因斯坦预言的引力波做出检验。

1973 年，美国天体物理学家泰勒和赫尔斯用阿雷西博天文台直径 305 m 的巨大射电望远镜，以惊人的毅力和工作热情完成了 140 sr 天区的脉冲星的巡天观测和资料处理工作。他们发现了 40 颗新脉冲星，其中包括第一个脉冲双星 PSR1913＋16。这个脉冲双星成为天文学家验证引力辐射的空间实验室。赫尔斯和泰勒 20 年来坚持不懈地投入引力波验证的研究中，进行了上千次观测。他们以极高精度推算出脉冲双星 PSR 1913＋16 两颗子星的轨道运动状况。结果发现在排除了其他因素之后，该双星系统的周期变化率为$(-3.2\pm0.6)\times10^{-12}$ s/s，此值正好与广义相对论的预期值相符，误差仅为 0.4%。这是引力波存在的第一个定量证据。为此，1993 年，泰勒和赫尔斯共同获得诺贝尔物理学奖。

目前已观测到近 1 500 个射电脉冲星。1991 年发现的射电脉冲双星 PSR1534＋12 在验证引力波方面比 PSR1913＋16 还要有利。它也是双中子星系统，轨道周期为 10.1 小时，轨道椭率为 0.27，它的优势是脉冲宽度窄，因而测量它的脉冲到达时间的精度可以更高。

第 3 节 黑 洞

黑洞是巨大的致密天体，它是恒星晚期演化阶段最终引力坍缩后的天体。黑洞的密度高得令人难以想像。它以强大的引力吸引一切物质，像宇宙中的一个“怪兽”，吞食来自宇宙的万物。“黑洞”这个名词，是 1968 年美国物理学家惠勒在他的一篇题为《我们的宇宙，已知的和未知的》论文中提出来的。惠勒指出，黑洞是一个特殊的大质量超巨星坍缩后产生的。当恒星演化到核能耗尽的时候，若这时它的质量超过 3.2 $m_\odot$（即超过奥本海默-佛柯父极限），其内部中子结构的抗拒力将抵不住引力的坍缩，从而中子星在自身引力的挤压下将被碾得粉碎，最终形成一个密度高得难以想像的黑洞。

在这样高密度的黑洞中隐匿着巨大的引力场，它的这种引力大到使任何东西，包括光，都不能逃逸出去。这就是说，各种物质都会被黑洞吞食掉，而黑洞却不让它本身一定范围（视界）的任何事态被外界看见。

一、黑洞的视界

天文学家把那个物质被黑洞吸入不能再返回之处，叫做黑洞的“**视界**”，此区域的半径叫**史瓦西半径**，这是为了纪念史瓦西的功绩。1916 年，德国天体物理家史瓦西对于完全球对称的情形求解了爱因斯坦广义相对论的引力场方程。按照这个解，一个非旋转的黑洞的临界半径 R_g 与天体的质量 m 和光速 c 以及万有引力常量 G 的关系为

$$R_g=2Gm/c^2=2.96(m/m_\odot)$$

式中求出的 R_g 的单位为 km。任何物体的史瓦西半径都可以计算出来，质量越小，这种半径也越小。对于具有地球质量的天体要变成黑洞，其视界半径小于 1 cm。太阳的 R_g 大约为3 km，也就是说，如果把太阳物质压缩到半径为3 km或更小的一个球体内，它的光线就休想往外逃逸；而只要离开中心 3 km 以外，就没有危险了。任何天体，一切物质，一旦进入了视界，便逃脱不了被黑洞吞噬的命运，一直会下落到黑洞内，在不到几分之一秒的瞬间，就会被那里无穷大的引力碾得粉身碎骨。

当天体的半径缩小到 R_g 以后，在视界内引力场非常强，光线弯曲得也非常厉害，以至于完全跑不出视界。因此，一方面视界内的任何信息都传不出来，视界外的观测者不可能看到视界内的情况；另一方面，视界以外的物质和辐射却可以进入视界。如果一个天体收缩到这个视界的半径之内，那么它所有的物质将在有限的时间内落入黑洞，犹如掉入一个漆黑的无底洞。

二、时空引力弯曲

黑洞的半径是多大呢？我们没有一种可操作的方法来测量它的半径，如果想用发射一束光穿过黑洞，而在那边用一面镜子反射回来，测量光往返的时间来计算黑洞的直径，这是不可能实现的。因为当光束穿越黑洞时，光子会掉进黑洞，并且永远不会从里边出来。我们所能测量的是黑洞的视界。视界是这样一个面，光子从该表面向外飞行时，能勉强地逃逸到无穷远处，这个视界的圆周就可以测量了。用这样的方法，获得的视界圆周是 $4\pi Gm/c^2$，其中 m 是应用牛顿定律由一个远离黑洞，绕黑洞旋转的小天体推算出的黑洞质量。所测量的视界圆周等于 $2\pi R_g$，于是我们可以得到史瓦西半径 R_g。

为什么万物都不能从黑洞逃逸出去呢？按照爱因斯坦的广义相对论，时空由于大质量物体的存在而畸变，物质的质量弯曲了时间和空间，而空间的弯曲又反过来影响穿越空间的物体运动。质量使时空弯曲可用一个日常例子来说明。如果我们在橡皮台球的桌面上放一块大石头，石头的重量就会使床面下沉；石头越重弹簧桌面弯曲得越厉害。任何东西都不能从黑洞逃逸出去的道理，正如一个滚过弹簧桌面的网球将掉进由大圆石头造成的凹坑一样，一切经过黑洞近旁空间的物体也将被其巨大的引力陷阱所捕获(参见图 17.6)。

由此可见，宇宙中的大质量物体会使宇宙结构发生畸变，质量大的天体比质量小的天体使空间弯曲得更厉害。若宇宙中某处存在有超密度的黑洞，则该处的宇宙结构将被撕裂，这种时空结构的破裂叫做时空的奇点。

某一天体掉落在黑洞中决不意味着它在宇宙中从此消失了，黑洞的引力使它仍旧可以被外界所察觉。因为光线接近时会被黑洞捕获，在黑洞的周围较远处传播的光线就会发生方向的改变。黑洞还能够用它的引力和别的天体组成新的力学系统，甚至能够控制住一批行星，还能够和另外一颗星结成一对双星。

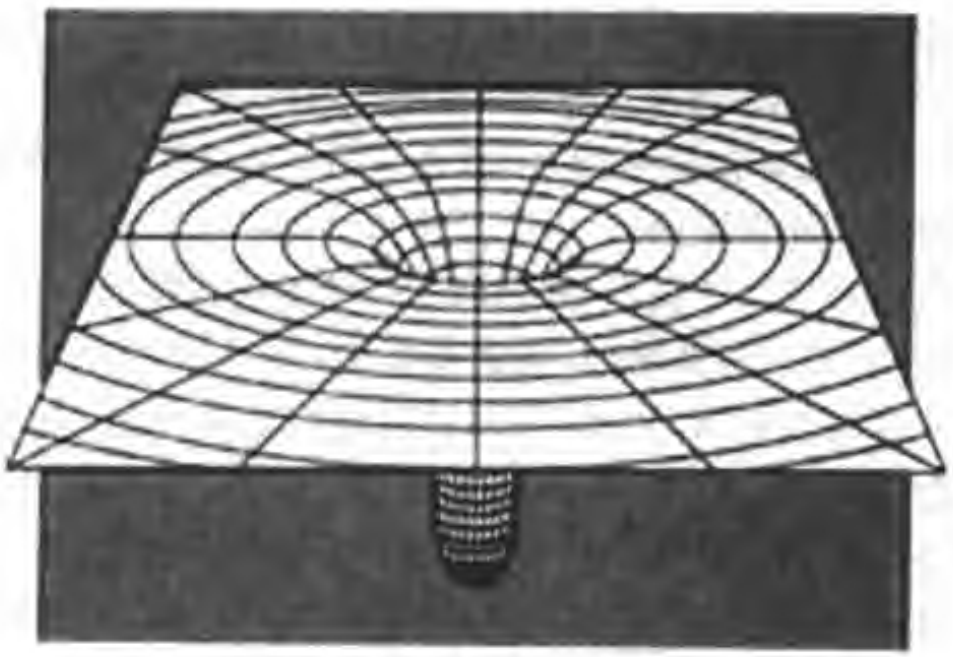


图 17.6　时空弯曲示意图



图 17.7　黑洞的模型

2003 年据钱德拉塞卡 X 射线天文台的观测发现，在星系 NGC6240 的核心内有一个黑洞双星，两个黑洞的距离为 3 000 l. y.，它们在一个轨道里彼此环绕。

三、黑洞的霍金辐射

英国宇宙学家霍金认为黑洞会缓慢地释放能量。1974 年他证明了黑洞的温度不为零，比宇宙深空的温度高一些。一切比其周围较暖的物体都要释放出热，黑洞也不例外。一个典型的黑洞将在 10^{18} 年内释放出它的全部能量，释放的

能量叫霍金辐射。

霍金研究了在视界面附近粒子产生和湮灭的量子力学过程。他设想了发生在黑洞视界面附近类似的过程，通常是这种粒子的湮灭紧跟着另一种粒子的产生，于是，在无限远的地方不会出现可检测的变化。然而，有时新产生的粒子和反粒子受黑洞潮汐力的影响面有不同的加速。两个中的一个掉进了黑洞(带负能)，它的同伴却获得了足够的能量而物质化，逃到无限远处。

霍金推算出一个非旋转的黑洞与热能分布相关的温度 T 与它的质量成反比，即

$$kT=\frac{hc^3}{16\pi^2Gm}$$

由此，他推测出黑洞的温度直接与“表面重力”成正比。

当黑洞的质量与大质量恒星的质量相仿时，这个黑洞的温度低得可以忽略，近似于绝对零度。经典理论认为黑洞只吸收光子，而永远不会发射光子。然而，量子力学的计算，给出一定质量的黑洞都有一定的温度。

四、黑洞的探测

黑洞不能直接观测，但是可以通过观测黑洞对它周围物质的作用所产生的现象，间接找到黑洞的观测证据。近年来，天文学家找到了越来越多的黑洞存在的证据。例如，通过观测炽热气体流进黑洞视界时发出的信息——X 射线辐射来确定黑洞的存在，还可以通过观测黑洞附近的超光速喷流源来确定(参见图 17.7 黑洞的模型)。

目前，天文学家认为我们银河系的中心很可能存在一个或两个黑洞，并推测位于室女座星系团内，距离我们约 5 000 多万光年的河外星系 M87 的中心也有一个黑洞。1994 年夏天，哈勃空间望远镜的观测得到 M87 星系中心存在着有超大质量的天体的证据，它很可能是黑洞(参见图 17.8)。

1997 年，中国天文学家张双南测量出黑洞有自旋的特性。他依据观测到的银河系内两个超光速喷流源，GROJ1655－40 和 GRS1915＋105 的 X 射线特性，揭示了在此 X 射线双星系统中包含的黑洞是快速自旋的，自转的方向与吸积盘的旋转方向有时相同，有时相反。

依据相对论量子理论，可推算出黑洞的视界附近的量子效应会导致黑洞发射，甚至会出现爆炸。由于黑洞自转，靠近视界处会有很强的引力场，黑洞会对外界施加强引力和强电磁力作用。当附近的物质受黑洞引力作用下落时，引力势能会转变为动能和热能，使接近视界处的物质温度升高而电离。

近年来，发现有 20 多个 X 射线双星系统中致密的子星质量是在 3.2 $m_\odot$ 以上，它们很可能是黑洞双星(BHBs)。在这二十几个黑洞双星候选者(BHCs)中

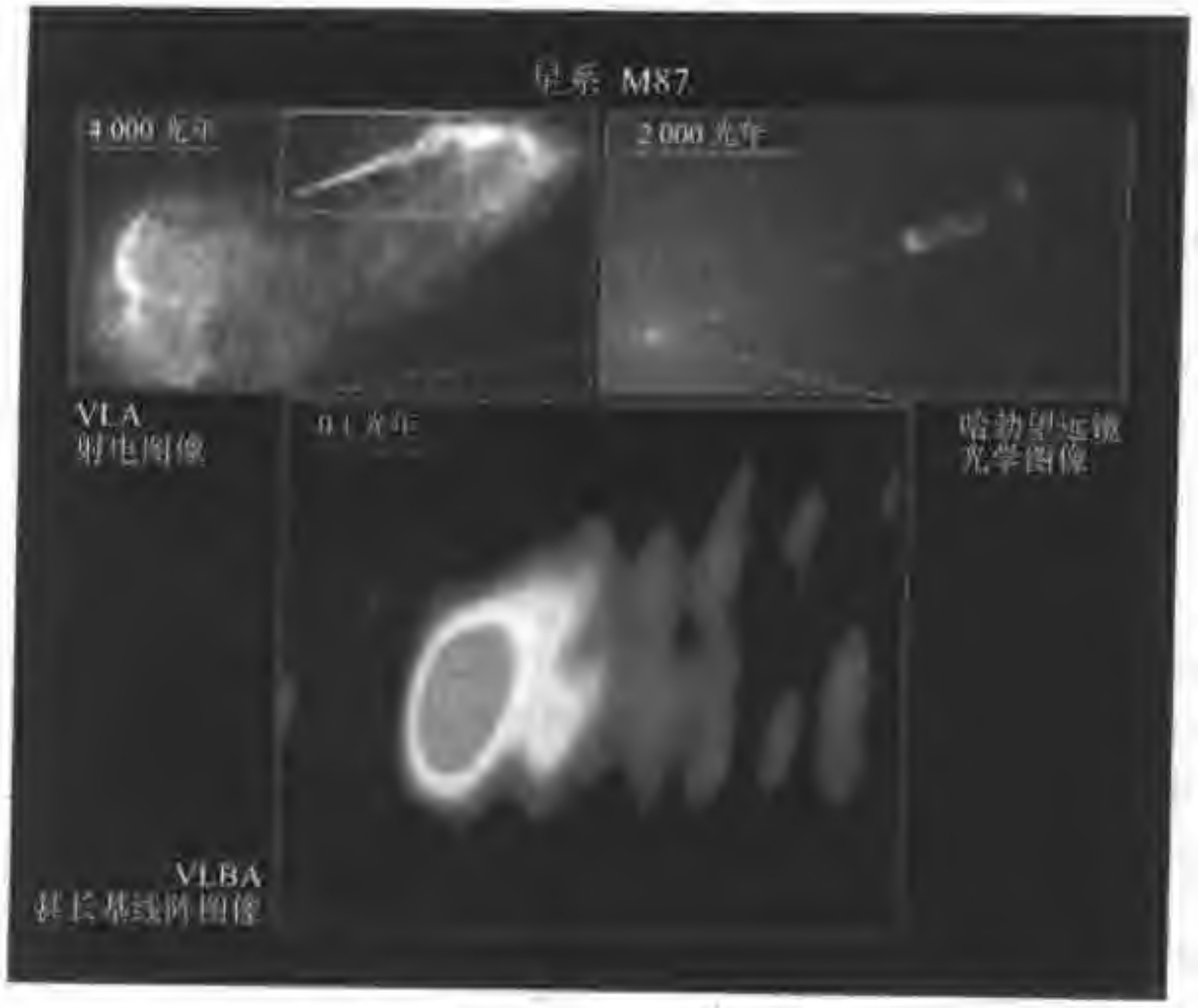


图 17.8　VLA 射电阵、哈勃望远镜和甚长基线阵
拍摄的 M87 活动星系核的图像

至少有 5 个有明显的黑洞证据，它们是 GRS2023＋338，GROJ0422＋32，GROJ1719－24，1E1740.7－2942 和 GRS1758－258。据轨道运动定律推算，这 5 个 X 射线双星系统内的两个致密天体的质量大于 3.2 $m_{\odot}$，超过了中子星的质

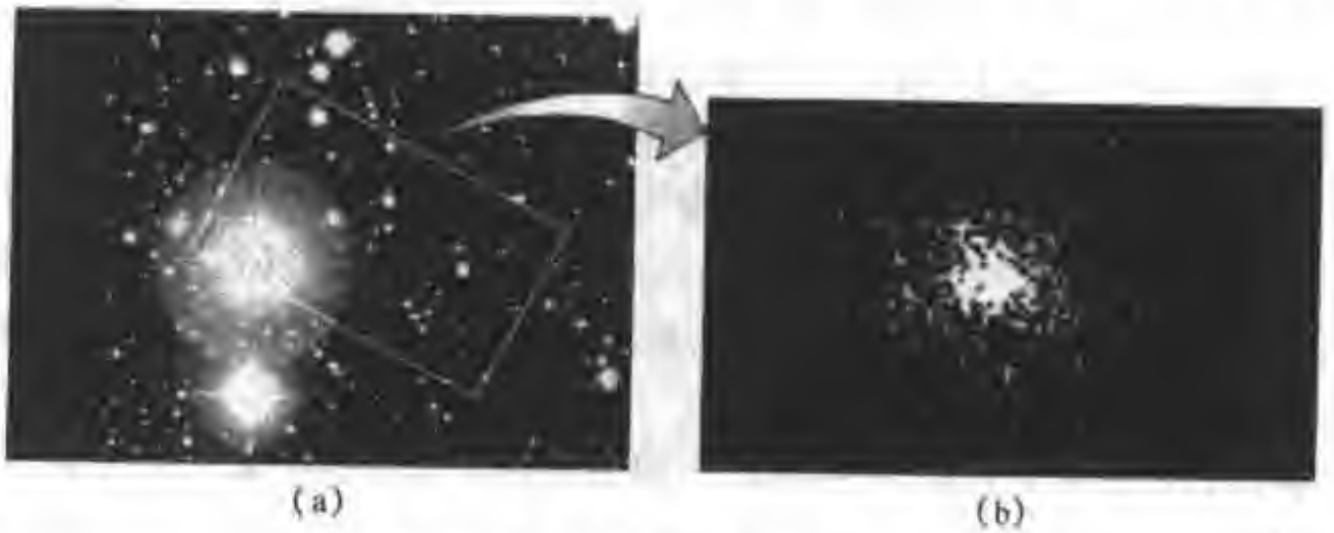


图 17.9　X 射线双星天鹅座 X－1(Cyg X－1)
(a) 照片中最亮的星是个双星系统，它的伴星
在光学波段看不见；(b) 由 X 射线的观测
结果表明它的伴星很可能是黑洞

量限，而且它们的 X 射线谱缺少软 X 射线（光子能量为 0.5～1.0 keV 的 X 射线）的辐射，这说明不可能是中子星更不可能是白矮星，而是黑洞的候选者。

天鹅座 X－1 是黑洞的最佳候选者，它是颗 X 射线双星（图 17.9），系统中主星是一颗 B0 超巨星，其质量为 30 $m_\odot$，直径为 1.8×10^7 km。它的伴星看不见，很可能是一个黑洞，因为观测到它的 X 射线有一定特征变化，判断出主星有轨道运动，推测出系统的伴星是一个具有 14 $m_\odot$ 的星，这远远超过了中子星的质量限，所以天文学家公认它是黑洞的最佳候选者，也就是说，天鹅座 X－1 系统中的一个子星非常可能是黑洞。

据最近观测研究，天鹅座 X－3 也被认为是黑洞的候选者，还有 X 射线新星和超光速的喷流源如 GRO J1655－40 及 GRS1915＋105 也是黑洞双星的候选者。天文学家推测：除了像 Cyg X－1 这样的恒星级黑洞外，大质量的黑洞存在于非常活跃的星系中心中，比如在赛佛特星系中心或在遥远的类星体核心。

哈勃空间望远镜在室女座活动星系 NGC6251 中拍摄到一个草帽样翘曲的尘埃圆盘，圆盘一边反射紫外光。欧洲南方天文台的菲里利普斯·克兰和他的同事们还诧异地看到从核心伸展出来的一个针状物与一个直径 1 000 l. y. 的尘埃盘平行。他们认为此星系的中心很可能有一个黑洞。

2002 年 11 月钱德拉塞卡 X 射线卫星发现在离我们有大约 3 000 l. y. 远的 NGC6240 星系中有两个巨大的黑洞正在相互靠拢，预计几亿年后，会合并为一个巨大的黑洞。

总之，人们虽然看不见黑洞，但可以依据黑洞对其他天体的引力作用、电磁效应等影响来探测它。迄今为止，天文学家关于黑洞的理论研究文献比从太空探索的确凿证据要多得多。目前太空探索的科学家们正向着进一步探测的方向进发，相信不久会传来更多的证据。

【例题 1】 假设太阳塌缩为一个半径为 20 km 的中子星。

(a)问这个中子星的平均密度是多少？(b)它的自转周期是多少？

解答：(a)平均密度为

$$\rho=\frac{m_\odot}{\frac{4}{3}\pi r^3}\approx6\times10^{18}\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$$

(b)它的自转周期可利用物体的角动量守恒定律求出。

精确的计算需要知道太阳和中子星的质量分布，粗略的估计可以假定太阳和中子星的质量都是均匀的。我们知道转动惯量 $J=(2/5)mR^2$，角动量 $L=J\omega$，已知太阳的赤道自转周期 $P_\odot=25$ d；太阳的光球半径 $R_\odot=6.96\times10^8$ m。

由角动量守恒定律给出

$$\frac{2}{5}m_\odot R_\odot^2\times2\pi/P_\odot=\frac{2}{5}m_\odot R^2\times2\pi/P$$

所以，$P=P_\odot(R/R_\odot)^2=25\times(20\times10^3/(6.96\times10^8))^2\ \mathrm{d}=2.064\times10^{-4}\ \mathrm{d}\approx1.8\times10^{-2}$ s

$1/P=555.5$ 周所以，那时太阳将会约每秒转 555 周。

【例题 2】 如果太阳表面物质的逃逸速度超过光速，太阳的半径会是多少？

解答：如果逃逸速度超过光速，即

$$\sqrt{\frac{2Gm_\odot}{R}} > c \text{ 或 } R < 2Gm_\odot / c^2 = R_\odot$$

式中，$G = 6.67\times10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2}$，

$$R_\odot = 2Gm_\odot / c^2 = 2\times6.67\times10^{-11}\times1.989\times10^{30}/(2.998\times10^8)^2\,\mathrm{m} - 2\,950\ \mathrm{m}$$

所以如果太阳表面物质的逃逸速度超过光速，太阳的半径必须减小到 2 950 m。



习　题

1. 一个固体的角动量正比于它的角速度乘半径的平方。利用角动量守恒定律，如果恒星核的初始旋转率是每天 1 圈，它的半径从 10^4 km 减小到 10 km 估算这个致密的恒星核旋转得有多快？

2. 计算一个 1.4 $m_\odot$，半径为 10 km 的中子星的引力和逃逸速度。

3. 利用半径-光度-温度的关系计算一个 10 km 的半径，温度为 10^3 K，10^7 K，10^9 K 的中子星的光度，关于中子星的可视性你做出什么结论？其中最亮的中子星可以绘在 H－R 图上吗？

4. 某一γ探测器面积为 0.5 $\mathrm{m^2}$，记录到光子总的能量为 10^{-8} J，如果γ射线暴发生在 100 Mpc 以外，求它释放的总能量（假设发射是各向同性的）。如果这个γ射线暴发生在我们的银河系的银晕，即 10^5 pc 外，探测到的γ射线暴图像会有什么变化？

5. 一个 10 km 半径的中子星每秒转 600 圈，计算它的赤道上一点的速度，并与光速比较（认为赤道是圆的）。

6. 一些星系的中心有特大质量的黑洞。质量为 1 百万个太阳质量和 10 亿个太阳质量的黑洞的史瓦西半径分别是多少？将第一个黑洞的史瓦西半径与太阳的大小做比较，第二个黑洞史瓦西半径与太阳系的大小做比较。

7. 一个具有黑体温度等于太阳光球温度 6 000 K 的黑洞，这个黑洞的质量和史瓦西半径是多少？

第十八章

双　星

在银河系中的恒星中几乎有一半以上是双星，这些双星是由万有引力这个“纽带”连接在一起的。它们互相绕转，呈现出特有的演化图景。通过双星的研究不仅可以直接测定恒星质量，还可以为我们提供双星轨道要素和恒星大小等重要信息。

在双星系统中两个子星互相绕转，彼此之间有着物理联系的恒星系统称为物理双星。如果两个星看起来在天球上的角距离很近，但它们之间没有相互的引力作用叫做几何双星，它们不是真正的双星，不在双星的研究范围之内。双星系统中，两颗成员星都称为双星的子星，较亮的那颗叫主星，较暗的那颗叫伴星或次星。

双星世界丰富多彩，按照观测分类有目视双星，食变双星和分光双星三大类。有许多双星兼有两种类型，如食变双星又是分光双星；有的既是目视双星又是分光双星等。天文学家按照它们的特殊性质又把它们分成许多类型：例如，两个子星距离较近，并有物质交流的双星叫做密近双星；双星系统若经常发生激烈的恒星活动现象（恒星黑子活动、耀斑爆发等）叫做色球活动双星；系统具有强 X 射线辐射的双星叫做 X 射线双星。

第 1 节　目 视 双 星

直接用眼睛或通过望远镜照相观测就能分辨出是两个子星的双星叫**目视双星**。目视双星的两个子星呈分离的像，不停地相互绕转。目视双星的两个子星相距较远，互相绕转的轨道周期也较长，一般在一年以上，也有十几年甚至几百年的（见图 18.1）。

著名的天狼 A 星和它的伴星天狼 B 星是一对目视双星，轨道周期为 49.9 年。明亮的目视双星室女座 γ 是由亮度几乎相等的两个子星组成的，它们的绕转周期更长，为 171 年。表 18.1 列出了一些亮的目视双星的参数。

由目视、照相或用干涉法可以测定目视双星的运动轨道要素：轨道倾角、轨道半长轴、椭率、轨道周期和过近星点的时刻等。

直接目视观测时，望远镜的目镜必须是测微目镜，也叫目镜动丝测微器。动丝

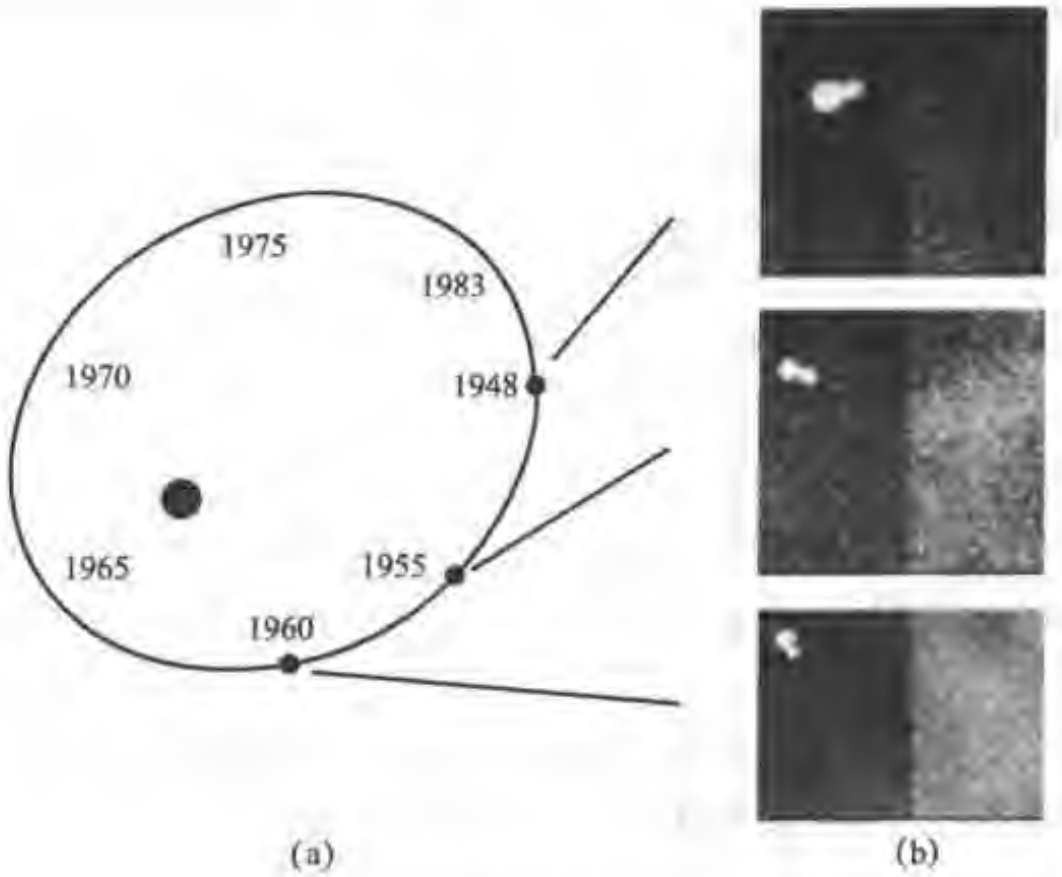


图 18.1

(a)目视双星(克鲁格 60)的视运动轨道图;

(b)此目视双星在三个不同时期的照片

测微器通常是由一个冉斯登型的目镜配有可读出读数的、能调节的十字丝所组成。通过大量观测,测量两个子星在不同时间、不同位相时在天球上的角距离(ρ)及主星和伴星的连线与南北连线的夹角(方位角 θ)。如果观测资料概括或接近一个双星的轨道周期,可以把测量的数据(ρ 和 θ)绘出目视双星的视椭圆轨道,代入轨道方程式,计算出它的轨道要素。目前,已确定轨道要素的目视双星约有数万颗。

表 18.1 一些亮的目视双星表

星名	赤经 α 赤纬 δ 2000.0		ρ /(″)	P /a	π /(″)	子星 1		子星 2	
						星等	光谱型	星等	光谱型
仙后座 η (ηCas)	00^h49^m	$+57°49'$	11.99	480	0.17	3.44	G0V	7.18	K5
波江座 o^2 (o^2 Eri)	04^h15^m	$-07°40'$	6.89	247	0.201	9.62	F2Ⅲ	11.10	KeIV
天狼星 (αCMa)	06^h45^m	$-16°43'$	7.62	49.9	0.379	−1.47	A1V	8.64	DA

续表

星名	赤经α　赤纬δ 2000.0		ρ /(″)	P /a	π /(″)	子星 1		子星 2	
						星等	光谱型	星等	光谱型
南河三 (αCMi)	07^h39^m	$+05°14'$	4.55	40.6	0.287	0.34	F5Ⅳ	10.64	DF
牧夫座ε (εBoo)	14^h45^m	$+27°05'$	4.88	150.0	0.118	2.70	K0Ⅱ-Ⅲ	5.12	A2V
武仙座ζ (ζ Her)	16^h41^m	$+31°36'$	1.38	34.4	0.104	2.82	G0Ⅳ	5.54	dK0
蛇夫座 70 (70 Oph)	18^h05^m	$+02°30'$	4.55	87.8	0.199	4.02	K0V	8.49	K4
飞马座 85 (85 Peg)	00^h02^m	$+27°05'$	0.83	26.3	0.080	5.75	G3V	8.85	

注：(1)ρ 为双星的角距离；(2)坐标所示的赤经α、赤纬δ为主星的位置；(3)星等为目视星等；(4)P 为双星轨道周期；(5)π 为周年视差

目视双星的质量测定：由观测可以得到两个子星的相对轨道半长径 a，以角秒为单位，设双星离我们的距离用周年视差 π 表示，两颗子星相对轨道的半长径是 a，以天文单位 AU 量度，轨道周期 P 用回归年量度，质量以太阳质量为单位，则有

$$m_1+m_2=\frac{a^3}{\pi^3 P^2}$$

由上式的改写，可以得到周年视差的另一种表达式，即

$$\pi=\frac{a}{\sqrt[3]{P^2(m_1+m_2)}}$$

利用目视双星观测，由角距 a 和周期 P 及两个子星的质量和可以求它的距离，这种方法叫力学视差。

我们注意到：对于目视双星如果知道角距 a 和周年视差及轨道运动周期 P，就可以求出双星两个子星的质量和。欲求出两个子星分别的质量，还需要一个条件。只要我们再求出两个子星的质量比 m_1/m_2 就可以求出两个子星分别的质量了。有两种途径可以做到：(1)由天体测量方法测出一个子星的绝对轨道半长径 a_1 或 a_2；则由 $a_1/a_2=m_2/m_1$ 求出质量比；(2)拍摄两个子星的光谱由视向

速度的半振幅之比，即 $K_1/K_2=m_2/m_1$ 也可求出两个子星的质量比（参见“分光双星”章节）。

第2节 食变双星

有些双星由于两个子星的轨道运动而互相遮掩发生掩食效应引起系统光变叫**食变双星**。

食变双星的两个子星相距很近，当观测者的视线与双星运动的轨道面接近平行时，会看到两个子星互相掩食，如同日、月食一样。由此，可通过光电测光或CCD测光观测到它们的亮度变化，通过分析亮度随时间变化的光变曲线，可测定双星的光变周期、轨道倾角、轨道半长径等轨道参数。

食变星的光变曲线如图18.2所示，光变曲线的最深（低）处叫光变极小，光变曲线次深处叫光变次极小。两个主极小（或两个次极小）之间的时间间隔叫一个光变周期 P。精确地测定极小时刻可以方便地测定光变周期和周期变化。

按照光变曲线可把食变双星分为三类：大陵五型食双星（EA）、渐台二型食双星（EB）和大熊座W型食双星（EW）。

1. 大陵五型（Algol型，EA）

大陵五型食双星的光变曲线的特征是有明显的主极小（较深的）和次极小（较浅的），而食外光变曲线，即在主极小和次极小之间的曲线段较为平滑。光变周期范围在0.2天至几年，光变幅相当不同，大的可达几个星等。

2. 渐台二型（βLyr型，EB）

渐台二型食双星的光变曲线在主极小和次极小之间就不那么平直而是弯曲得多，主极小比次极小明显的深。光变周期一般长于一天，光变幅小于2等。

3. 大熊座W型（W UMa型，EW）

大熊座W型食双星的光变曲线类似一个英文字母W，光变曲线的主极小（主星被掩食）和次极小（次星被掩食）的深度几乎相等，光变周期短于一天，光变幅小于$0.^m8$。典型星是大熊座W双星。这类双星，因为两个子星之间有频繁的物质交流，所以也叫做密近双星。

下面我们介绍一下几颗典型的食双星。

大陵五（Algol） 大陵五是大陵五型食双星的典型星。1782年18岁的英国聋哑青年——天文爱好者约翰·古德利克通过大量的观测，发现了它的光变，并正确地推测了它的光变周期。他指出大陵五的光变周期是2.87天，并进一步推断它的光变可能是另一个天体绕着它转，遮住了它的一部分引起的。后人的观测证实了他的观测和推断，并观测到此星还有更短时标的光变；大陵五的光谱中有发射线，由此可推断出其中有一个子星周围可能有气环。研究表明大陵五

双星食的原因是因为一颗光谱型为 B8 的主序星把一颗光谱型为 K0 的亚巨星的光线的一部分遮挡住的缘故；B8 主序星的质量约为 3.7 $m_{\odot}$，而亚巨星的质量是 0.8 $m_{\odot}$。按照演化理论，大质量的星比小质量星演化快，假设两个子星同时生成，而大陵五的小质量的星却演化快（先充满了洛希瓣），这个矛盾叫“大陵五佯谬”。近代研究，认为目前质量小的星原来是较大质量的子星，经过快速的质量转移，部分物质转移给了它的伴星，并演化成为了质量较小的星，这时质量转移率慢了下来。这就解释了这个矛盾。

天琴座 β(βLyr)　它是渐台二型食变双星的典型星。它的两个子星的视星等分别为 3.38^{m} 和 4.29^{m}，轨道周期为 12.9 天，它的主星是一个光谱型为 B8 的早型星。现代观测表明，此双星系统中有强大的气流正从主星抛出被伴星捕获，有的物质被抛到双星系统之外，这是近年来天文学家研究的热点。

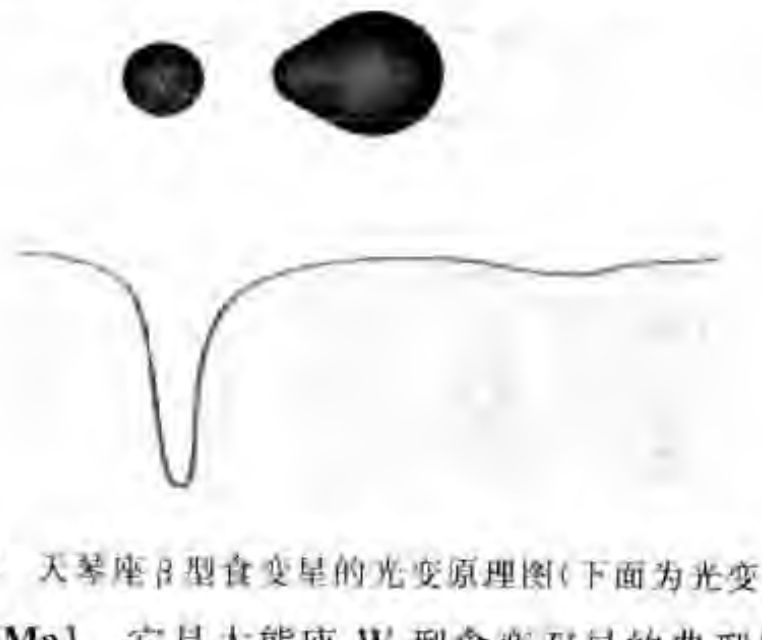


图 18.2　天琴座β型食变星的光变原理图（下面为光变曲线）

大熊座 W(W UMa)　它是大熊座 W 型食变双星的典型星，也是密近双星，两个子星的视星等分别是 8.5^{m} 与 9.2^{m}，都是光谱型为 F8 主序星；轨道周期较短，仅有 0.333 6 天，即 8 个多小时就转一周。观测表明，这个双星的两个子星之间有频繁的物质交流，它的活动现象、周期变化及物质交流受到广泛关注。

这类食双星的光变曲线的极大处是圆形的，主极小与次极小的深度几乎相等。这种特征反映了两颗星的形状因潮汐作用而变为偏离球形，因而只要在公转中还未进入交食，在观测者看来有相同的视亮度。主极小和次极小几乎相等说明两个子星的有效温度近似相等。光谱观测表明，这类双星的谱线轮廓由于自转而致宽。理论模型认为两个子星有共同的外壳，子星间不断有物质气流，像是个亲密无间的“联体双胞胎”。

第3节　分光双星

有一类双星，直接用眼睛或通过望远镜看是一颗星，但观测光谱发现其谱线

具有周期性的多普勒位移，从而判断出是两子星有互相绕转的轨道运动，人们称这类双星为**分光双星**(参见图 18.3)。



图 18.3　分光双星(谱线具有周期性的多普勒位移)

如果双星系统内伴星比主星暗得多，只能观测到一颗星的光谱，即只有单线呈现出周期性的多普勒位移的称为单谱分光双星；如果两颗子星亮度差不多，我们能观测到两个子星的光谱，即观测到谱线有时成双，而有时合二为一，呈周期性变化，这类双星叫双谱分光双星。由谱线的多普勒位移测定子星的视向速度，就可确定双星的轨道运动。20 世纪 90 年代，天文学家已发现和测定了 1 469 个分光双星的轨道根数，给出了分光双星表。

在分光双星中，有一类双星系统内的成员星一个冷、一个热，这类双星系统叫共生星。例如仙女座 Z 双星、天鹅座 CI 双星都是冷热共存的共生星。一般而言，共生星系统是由一颗红巨星(或红超巨星)和一颗主序星(或白矮星甚至中子星)组成的。这种冷、热不同的孪生同胞究竟是如何诞生的？它们又如何共处一生，这些都是目前天文学家研究的重要课题。

对于分光双星，由于子星绕双星系统质量中心的轨道运动(绝对轨道运动)，谱线周期性地由单线分裂成双线，又由双线合成单线。观测得到子星的光谱后，分析谱线的多普勒位移，绘出视向速度曲线，就可以解出双星的轨道要素及与质量有关的函数。

对于双谱分光双星观测得到两条视向速度曲线，由分光双星的视向速度曲线可以直接求出双星的轨道周期 P 和质心的视向速度(视向速曲线的平分线)，并且可以直接求出两个子星分别的视向速度曲线的半振幅 K_1 和 K_2，即

$$K_1=1/2(A_1+B_1)$$

$$K_2=1/2(A_2+B_2)$$

由图 18.4，不难证明：$K_1/K_2=m_2/m_1$，如果这个分光双星又是目视双星，求出两个子星的质量和，则可以求出两个子星分别的质量。

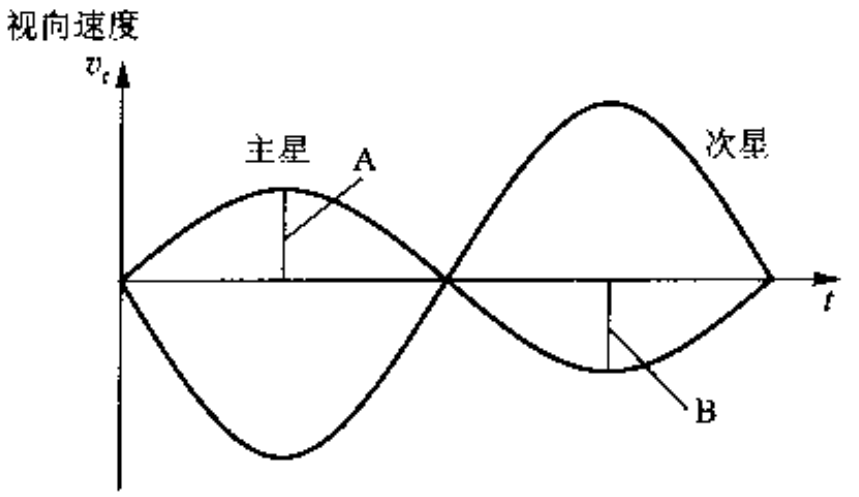


图 18.4　分光双星的视向速度曲线

* 分光双星的质量函数

对于分光双星，因为由光谱观测到的是它的视向速度，即轨道运动速度在视线方向的投影，只能求出它们的质量函数。下面我们推出它的表达式：

观测得到的是分光双星的绝对轨道，由开普勒第三定律：

$$(m_1+m_2)P^2=a^3=(a_1+a_2)^3$$

式中 a_1 和 a_2 是两个子星轨道的半长径，上式可以改写为

$$(m_1+m_2)P^2=(a_1+\frac{m_1}{m_2}a_1)^3=\frac{(m_1+m_2)^3}{m_2{}^3}a_1{}^3$$

或

$$\frac{m_2{}^3}{(m_1+m_2)^2}P^2=a_1{}^3$$

a_1 不能单独定出，只能定出 $a_1\sin i$（因为观测得到的是轨道速度在视线方向的投影），i 是绝对轨道平面和天球切面的交角。所以把上式都乘上 $\sin^3 i$ 将 P^2 移到右端，得到

$$\frac{m_2{}^3\sin^3 i}{(m_1+m_2)^2}=\frac{a_1{}^3\sin^3 i}{P^2}=f(m)$$

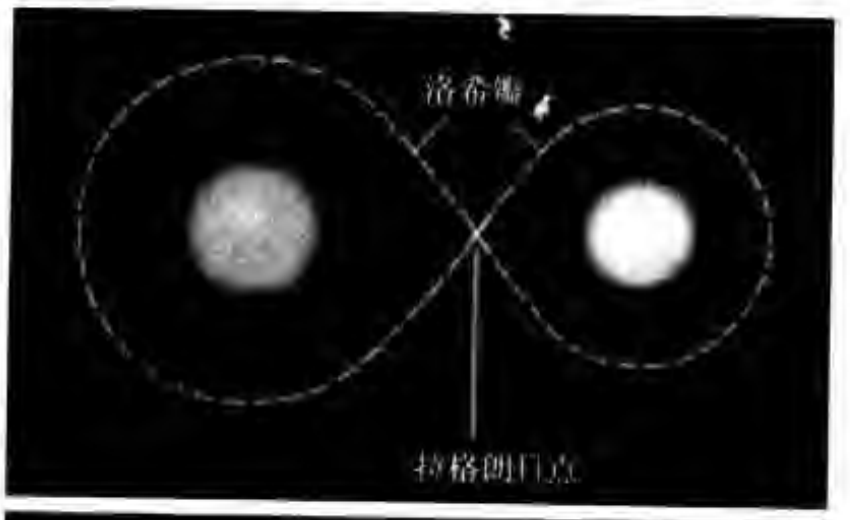
$f(m)$ 称为分光双星的“质量函数”，如果两个子星的光谱都能观测到，还可以写成

$$\frac{m_1{}^3\sin^3 i}{(m_1+m_2)^2}=\frac{a_2{}^3\sin^3 i}{P^2}=f(m)$$

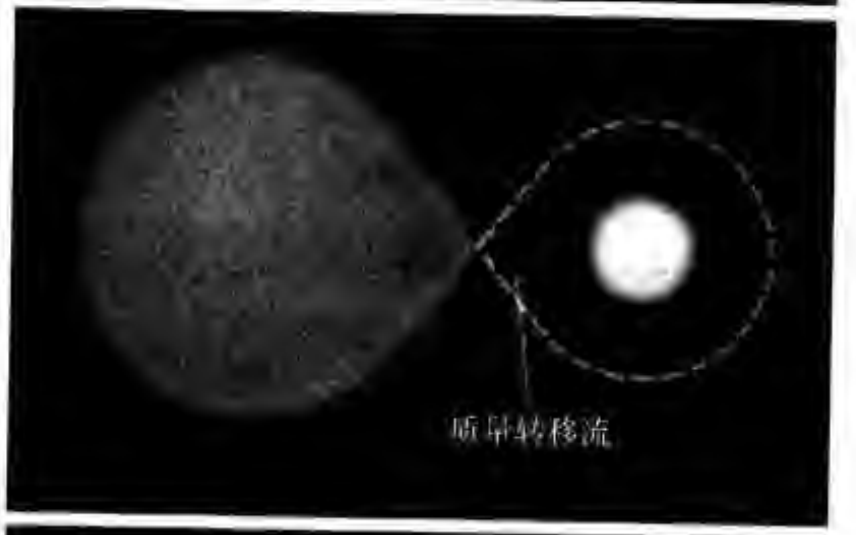
* 第 4 节　双星的洛希模型

19 世纪中期，法国数学家爱得华·洛希找到一种简单的方法建立了双星模型，并沿用至今，称为洛希模型。洛希理论把子星看作是聚集了子星质量的两个质点，它们的引力作用也用质点的情况来考虑，由此来计算系统内一质点在双星间的运动。

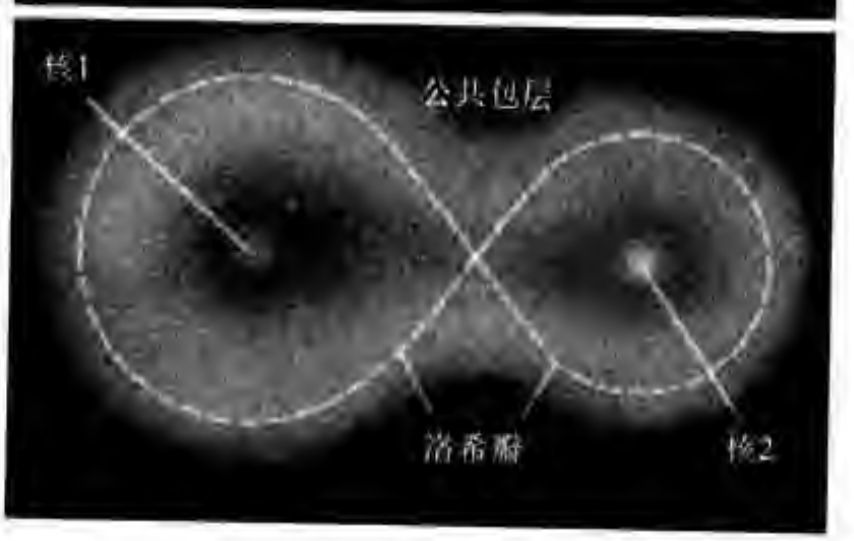
洛希模型是用于描述双星系统中物质的受力和气流运动状况的模型。双星系统中两个子星互相绕着它们的公共质心做椭圆运动，系统内物质的气流运动的受力情况比单星复杂得多，它除了受到两个子星的引力外，还受到两个子星互相绕转产生的离心力，以及由于转动惯性产生的柯里奥利力。对于单星，它的等势面是球形，但是对于双星，两个子星的等势面（或叫等位面）离球心近处为球形，离球心远处为椭圆形。在这一族等势面中有一个等势面是两个子星相接的，那个等势面是包络两个子星的闭合曲面，这个曲面叫内临界等势面。内临界等势面的存在，决定了子星表面的最大的形状和界限。势面的内交点，即 L_1 叫拉格朗日内点，两个星之间的物质交流必然要通过它。包络两个子星的另一等势面叫外临界等势面，



(a) 不接双星



(b) 半接双星



(c) 相接双星

图 18.5　三类食双星

其上的一个交点叫拉格朗日外点 L_2。气流通过拉格朗日外点 L_2 可以逃逸出双星系统，所以它是物质流出双星的“溢口”。由于这个洛希双星模型很好地解释了双星内部气流的运动规律和演化状况，至今仍是研究双星结构和演化的理论基础。

双星系统按照它们结合的位势能情况分为不接双星、半接双星和相接双星三类(见图 18.5)：

(1) 不接双星　双星系统中两颗子星的光球位于各自的洛希瓣之下，都没有充满洛希瓣，两个子星离得较远，通过引力相互作用。例如大陵五双星。

(2) 半接双星　双星系统中的一颗子星的光球与其洛希等势面重合，充满了洛希瓣，而另一颗子星位于其洛希瓣之下。充满洛希瓣的恒星叫相接子星，另一颗叫不接子星，例如天琴座 β 双星。

(3) 相接双星　双星系统中的两颗子星的光球都充满了各自的洛希瓣。在这种情况下，内临界面把两颗恒星都包裹在一起，它们有着一个共同的对流包层。例如大熊座 W 双星。

第 5 节　色球活动双星

色球活动星有类太阳的活动现象，而且其表面活动现象比太阳活动来得更剧烈，更频繁。现代多波段的观测研究已揭示，色球活动双星表面常有特大的黑子群出现，并常发生白光耀斑爆发和谱斑活动等现象。在这类双星的紫外谱中，发现有许多色球过渡区发射的高次电离金属发射线，如在可见光谱区的一次电离钙(Ca Ⅱ)的 H、K 线有核心发射，氢的 H_α 谱线有发射或者发射填充吸收线；在射电波段常发生射电耀发事件，并且伴有 X 射线的发射。

1976 年美国天文学家海尔提出光谱中一次电离钙(Ca Ⅱ)的 H、K 线的核心发射强弱是反映色球活动双星活动性的重要判据。这类星的光谱型从 A 型到 M 型都有，光度型有矮星、亚矮星和巨星。1993 年再版的“色球活动双星表”汇总了 206 个色球活动双星系统的重要参量。RS CVn 双星和 BY Dra 双星是典型的色球活动双星。活动性强的色球活动星的光谱，不仅一次电离钙的 H、K 线核心发射较强，而且 H_α 线也是发射线或呈现为有一部分发射填充了吸收线。依据这类双星的光谱中的谱线轮廓变化可以研究恒星活动的规律和机制。例如 HR1099 是颗著名的色球活动双星，由其谱线轮廓的变化及活动引起的视向速度变化可研究其表面黑子活动的图像。

* 第 6 节　X 射线双星

近几十年来，随着空间科技的发展，发现了一批 X 射线双星。例如 1970 年

"乌呼鲁"(自由号)卫星提供了两颗X射线源:武仙座X-1和半人马座X-3具有双星性质的证据。后知天蝎座X-1也是一个X射线双星。1977年发射的"高能天文台1号"和"高能天文台2号"卫星以及1988年6月德国、美国和英国共同发射的伦琴X射线卫星(ROSAT)上天后,在银河系发现了三千多颗X射线源,在河外星系仙女座大星云中也发现了80多个X射线源,其中有一批是X射线双星。1999年7月23日由美国航天局发射的钱德拉X射线天文台以及同年12月欧洲空间局发射的X射线反射镜航天器正在飞行,它们将会提供我们更多的X射线双星的资料。

X射线双星系统中的伴星是中子星。下面我们列举几个X射线双星。

武仙座X-1 它的脉冲周期为1.24 s。武仙座X-1双星系统包括一个中子星和一个光学子星。光学子星的物质受中子星的吸极,物质流向中子星,并激发产生X射线,所以叫做X射线双星。

"乌呼鲁"卫星接收到的武仙座X-1的X射线是一系列间隔为1.24 s的脉冲,并发现它们的脉冲间隔不是一成不变,而是以1.0071天的周期循环。这使人们推测出,此X射线源是在绕着某一子星运转。还观测到每隔1.0071天有一个大约5小时的空缺,这反映那时X射线源被另一子星遮掩,发生了食,后来又观测发现其中有23天X射线完全消失;再往后,又继续重复这一过程。这又是怎么回事呢?原来这颗X射线星活动性很强,其X射线有时增强有时消失。天文学家还发现武仙座HZ变星靠这颗X射线源很近,原来它就是与这颗X射线源组成双星的那个子星,它的光变是X射线源对它照射加热的结果。当它被掩食时,若被加热的子星半球背着我们,就会看到武仙座HZ星变暗;反之,当它加热的半球面向我们时,会观测到武仙座HZ星增亮。

天鹅座X-1 它发射的X射线强度没有测到交食现象的变化,但通过对它的光学对应体的研究揭示了它的双星性质。双星系统中的一颗子星是B0超巨星,另一颗子星是看不见的X射线源。它的光学子星谱线有周期性的多普勒位移,周期为5.6天。据推算这个X射线源的质量约为10～15 $m_{\odot}$,它大大超过了白矮星与中子星的最大质量限。此外天鹅座X-1发射的X射线的变化时标为几十毫秒,这表明这个X射线源自转很快,发射区的面积很小,约小于太阳半径的1%,而发射X射线需要几百万度的高温。因此,天文学家认为,此X射线双星中发射X射线的子星应该是一颗致密星——黑洞。光学子星的物质被黑洞强大的引力所吸积,以极高的速度流向黑洞,就会激发X射线。

*第7节 密近双星的演化

密近双星的演化比单星的演化复杂。我们在前面提到双星按照它们的位形

可分为三种类型：(1)不接双星；(2)半接双星；(3)相接双星。对于不接双星，即分离双星，两个子星都没有充满洛希瓣。在演化过程中双星中具有大质量的子星(主星)比小质量的子星(伴星)演化得快，主星先膨胀为红巨星，随着膨胀其物质逐渐充满了洛希临界等势面，此时气流物质受到伴星的吸积，气流通过拉格朗日 L_1 点流向次星，结果使伴星的质量逐渐增加，主星本身的质量逐渐减小。当次星的物质也充满了它的洛希临界等势面时，气流就反向流动，即由伴星流向主星。

对于半相接双星系统，由子双星系统中较大质量子星已经先膨胀，光球与它的洛希等势面重合，另一个子星还没有充满洛希瓣。充满洛希瓣的子星气流一定会通过 L_1 点流向它的伴星。由于在 L_1 点，充满洛希瓣的恒星一边有气流而另一边是真空，所以在 L_1 点处流体静力学不平衡，没有任何力阻止充满洛希瓣的恒星气体流冲向另一边的真空区域，这就实现了物质的转移。由于流动的气流携带有过剩的角动量，所以气流不会直接落到不接的伴星上，而是围绕着伴星旋转形成气环。充满洛希瓣的子星流失气体，下层的气体由膨胀而补充，如此，气流从充满洛希瓣的主星源源不断地通过 L_1 点流向伴星，实现了物质转移。

相接双星的演化与能量转移是这样的，当两个子星都充满了洛希瓣，由子演化膨胀，质量转移一直进行，直到 L_1 两边的压力平衡时，就失去了进行质量转移的动力，气体包容在两个洛希瓣之内的区域，即在包围两个星的共同外壳之内，最终两个子星相接，共同拥有一个公共的大气包层(如 W UMa 食变双星)。这时，系统内有些物质从拉格朗日 L_2 点逃逸出双星系统。当双星的大部分物质都流失到太空，双星的伴侣结合也就终结了，最终作为单星继续它的漫漫一生。

在双星系统的演化过程中潮汐作用会引起轨道变化。周期约为 10 天或更短的双星系统的轨道是圆形或近似圆形的，绝大部分系统是同步自转，即自转周期等于公转周期。如果两个子星距离很近，则会引起潮汐作用，这种潮汐力激发星体的较差运动。双星系统由子存在摩擦和压缩效应，会有热量耗散。因潮汐引起的持续能量耗散会导致两个星的轨道动能和自转动能受到消耗。此外，系统不断地向外辐射，也必然导致总角动量守恒到最低能态。在这种状态下，轨道是圆形的，而且具有同步自转。

不同类型的双星系统演化历程不同，两个子星的质量决定了它的演化速度，两个子星的互相作用与物质交流的复杂过程使得它们的演化进程复杂而且充满了传奇，目前双星的演化还有许多问题是未解之谜。

【例题 1】 天狼星是目视双星，主星天狼 A 是一颗 A0 型主序星，伴星是一颗白矮星，轨道周期 $P=49.94$ a，轨道半长径的角距离为 $a=7.57''$，$\pi=0.37''$，求两个子星的质量和。

解答：由开普勒第三定律，可以求出

$$m_1+m_2=\frac{(7.57)^3}{(0.37)^3\times(49.94)^2}=3.43\ m_\odot$$

所以，天狼星这个目视双星的质量和为 3.43 $m_\odot$。

【例题 2】 有一个双星离我们的距离是 10 pc，两个子星的最大角距离是 7″，最小角距离是 1″，轨道周期是 100 年，假定这颗双星的轨道平面和视线是垂直的。已知一个子星轨道的半长轴对应的角距 $a_1=3''$，求双星的两个子星的质量。

解答：双星轨道半长径为

$$a=1/2(7+1)\times 10=4/206\ 265\times 10\times 206\ 265=40\ \text{AU}$$

依据开普勒第三定律：

$$m_1+m_2=a^3/p^2=(40)^3/(100)^2=6.4\ m_\odot$$

由于一个子星的半长轴对应的角距 $a_1=3''$，另一个子星 $a_2=1''$，则可以求出两个子星的质量比，即

$$m_1/m_2=a_2/a_1$$

所以

$$m_1=1.6\ m_\odot,m_2=4.8\ m_\odot$$

【例题 3】 观测到一颗食分光双星里的两颗子星，它的轨道周期是 10 天，它的轨道是圆的，两颗星距离 0.5 AU，一颗星是另一颗星质量的 1.5 倍，两子星的质量分别是多少？

解答：由 $m_1+m_2=\dfrac{a^3}{p^2}$ 得

$$m_1+m_2=\frac{(0.5)^3}{\left(\dfrac{10}{365.242\ 2}\right)^2}=166.75\ m_\odot$$

$$1.5m_2+m_2=166.75\ m_\odot,m_2=66.7\ m_\odot$$

所以，子星 1 质量为 100.05 $m_\odot$；子星 2 的质量为 66.7 $m_\odot$。

【例题 4】 交食双星的两个子星半径相同，它们的有效温度分别为 $T_A=5\times 10^4$ K，$T_B=1.2\times 10^4$ K 求出光变曲线的主极小深度与次极小深度。

解答：光变曲线的光极大与光变曲线主极小的星等差叫主极小深度；光极大与光变次极小的星等差叫次极小深度。

设主极小的深度为 $m_A-m_{最}$，次极小的深度 $m_B-m_{最}$，则有

$$m_A-m_{最}=-2.5\ \lg L_A/L_{最}$$

由 $L=4\pi R^2\sigma T_e^4$，所以 $L_A/L_{最}=\left(\dfrac{T_A}{T_A+T_B}\right)^4$。

$$m_A-m_{最}=2.5\ \lg[1+(T_B/T_A)^4]$$

$$=2.5\ \lg[1+(12\ 000/5\ 000)^4]=3.8^m$$

同理，$m_B-m_{最}=0.03^m$，所以，光变曲线主极小深度为 3.8^m，次极小深度为 0.03^m。

习 题

1. 北河二是由一颗 2.0^m 和一颗 2.8^m 的子星组成的目视双星，问该双星的亮度为几等星？

2. 设双星五车二轨道半长径等于 0.85 AU，而转动周期为 0.285 年，求双星的质量和。

3. 双星半人马座α星的轨道半长径相对地球张角为 17.65″。问此距离比

地球离太阳的距离大多少倍？此星的视差等于0.75″，周期为79年，求出双星半人马座α星的质量。

4. 长蛇座ε双星，轨道周期15.3年，视差为0.020″及轨道半长径的角距0.23″，试确定轨道半长径的大小和两子星的质量和。

5. 假定两个子星的视角距离至少是0.2″方能被一个望远镜分辨开；设此双星离我们的距离为500 pc，求两个子星的距离是多少天文单位才能被此望远镜分开？若每个子星的质量都等于太阳的质量，则它们的轨道周期是多少？

6. 目视双星北河二的周年视差等于0.076″，其自行是0.20″/a，此系统的视向速度为3 km/s，求出该双星系统的空间运动速度是多少？两个子星分别的视星等为2.0^{m}与2.8^m，轨道半长径为6.6″，转动周期为306年。试确定：轨道半长径等于多少公里？每个子星是太阳光度的多少倍？两子星的质量和与它们的半径之比(两个子星的温度一样)是多少？

7. 假设双星子星的密度等于太阳的密度，两子星彼此相接；若每颗星的质量等于太阳质量的1/10，问它们的转动周期是多少？它们的相对速度是多少？

8. 在开阳星的光谱中，两个子星的氢线H_γ($\lambda=434$ nm)，周期分裂的最大距离为0.05 nm问两个子星相对速度在视线方向的投影为多少(km/s)？

9. 一个目视双星，它的两个子星都是G型主序星，视星等都是7.3^m，其圆形轨道面与视线夹角为45°，所测得到的伴星相对于主星的最大视向速度等于20 km/s，而所测的伴星最大运动速度为每年0.05″，双星的轨道周期为6年；轨道为圆形。试确定该双星系统的视差，两个子星的质量和光度，以及相对轨道半长径。

第十九章

变　星

在恒星世界中，有一类光度起伏变化的恒星，叫做变星。变星大都处于恒星演化的不稳定阶段，其光变之中蕴藏着有关恒星结构和演化的丰富信息，其中的造父变星更可作为标准烛光，在量度星团、河外星系距离方面发挥着重要作用。

早期我们观测到的变星，大多都是银河系内的变星；哈勃空间望远镜揭示了越来越多的河外星系里变星的奥秘。目前已使3万多颗变星榜上有名，随着望远镜的发展会发现更多的奇特变星，例如，近年哈勃空间望远镜发现船帆座η星变星正在爆发(见图19.1)，从1997年10月到1999年2月的14个月间，其亮度增加了近一倍。

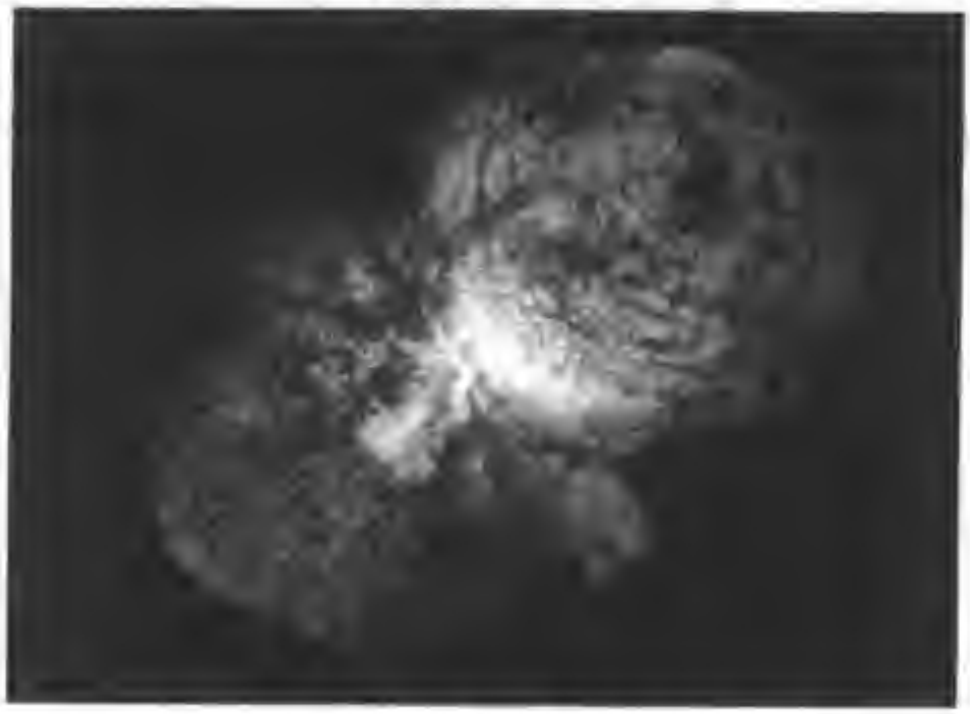


图19.1　船帆座η星变星正在爆发的图像

第1节　变星的分类

变星的光变形式多姿多彩，按照变星的亮度变化和光谱变化的原因可以把它们分为物理变星和几何变星(食变星)。物理变星包括脉动变星、爆发变星、灾变变星、激变变星和不规则变星等。

1. 脉动变星

脉动变星是由于自身不断地膨胀和收缩，即不停地脉动而引起光度变化的。脉动变星包括长周期造父变星和短周期造父变星。长周期造父变星包括经典造父变星和室女座 W 型变星。经典造父变星属于星族 I 星，是相当年轻的星，以“造父一”(δ Cep)为代表；而室女座 W 型变星属于星族 II 型变星，都是老年星，以室女座 W(W Vir)变星为代表。长周期的脉动变星还有雏鼓型变星。短周期造父变星包括有天琴座 RR 型变星，仙王座 β 型变星和盾牌座 δ 型变星等。

2. 爆发变星

这类变星的色球或冕中经常发生激烈的活动(如耀斑爆发)，并由此引起星风和光变，其光度变化的幅度较大，有时突然增亮可达几个星等。这类变星有金牛座 T 型变星，后发座 γ 型变星，北冕座 R 型变星和鲸鱼座 UV 型变星等。

3. 灾变变星

灾变变星是由于热核爆炸发生灾难性的爆发活动而引起光度变化的。超新星爆发就属这一类。

4. 激变变星

这类变星经常发生激烈的恒星活动，但爆发的规模比较小，没有达到发生灾难性变化的程度。这类星实际上是包含白矮星子星的密近双星。新星、类新星、矮新星等属于这类变星。

5. 不规则变星

不规则变星的光度变化不规则，光变幅一般在 $1^m \sim 3^m$。由于它们总和星云物质在一起，所以也叫星云变星。这类变星是一些年轻的不稳定星，如金牛座 T 型变星和猎户座星云型变星。

几何变星包括食变星和自转变星。食变星就是食变双星，在前面双星一章中已叙述。自转变星是指那些由于表面亮度不均匀，或者由于椭球形状，自转起来会使我们观察到它的亮度变化的星，如室女座 α 星、后发座 FK 和金牛座 CM 等都属此类。

第 2 节　脉 动 变 星

一、造父变星

英国天才的聋哑天文爱好者约翰·古德利克于 1784 年发现了仙王座 δ 变星的亮度变化。这颗星的中文名叫造父一，它光变一周约为 5.4 天，变幅从 4.4^m 变到 3.7^m，是典型的脉动变星。后来，人们又发现许多这种类型的变星，统称为造父变星。截止到目前，已观测到约 15 000 余颗造父变星。

1. 长周期造父变星的特征

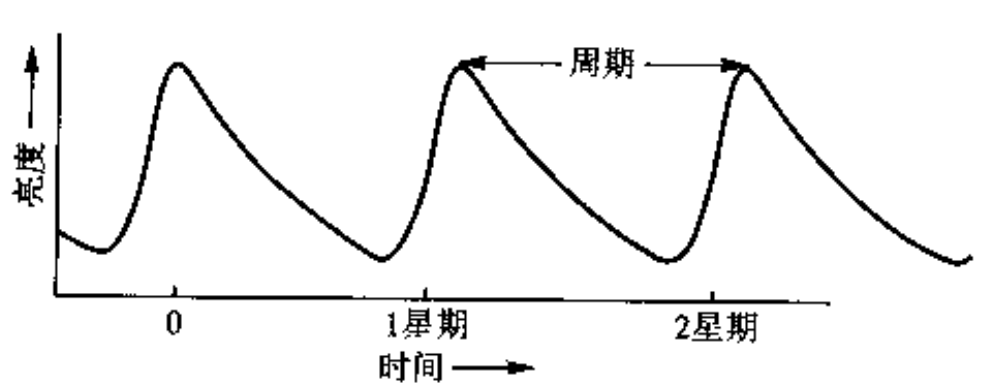
长周期造父变星的光变周期在 1 天到 135 天之间，光变幅度是百分之几到两个星等，表面温度大约 5 300 K。周期造父变星都是已经演化到晚期的红超巨星。

造父变星的光度变化周期就是它的膨胀、收缩的振动周期。在脉动过程中，星的亮度变化、视向速度变化及星半径的变化都相呼应。而且，随着亮度的变化，有效温度、颜色也发生变化。随着星体的一胀一缩，光谱中的谱线有周期性的来回摆动，通过它可以测定星表面振动的视向速度变化。造父变星的视向速度变化曲线的形状与光变曲线的形状很相似，但视向速度曲线的极大值对应着光变曲线的极小值，即两者呈镜像。这意味着，星体膨胀到最大时，视向速度最大，星最暗；当星体收缩到最小的，视向速度最小，星最亮。

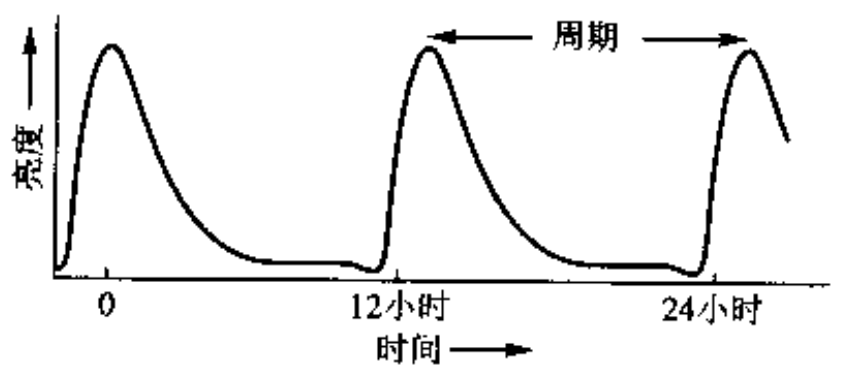
经典造父变星的光变曲线如图 19.2(a)所示。

2. 天琴座 RR 型变星

在脉动变星中有一类周期短的脉动变星——天琴座 RR 型变星，也叫短周期造父变星，典型星是天琴座 RR 变星。它们是一些迅速脉动着的巨星，其光变周期为 0.2 天至 1.2 天，光变幅为 0.2^m 至 2^m。天琴座 RR 型变星的光变曲线如图 19.2(b)所示。这些变星大多位于银河系的球状星团内。



(a) 经典造父变星的光变曲线



(b) 天琴座RR型变星的光变曲线

图 19.2

当星体膨胀时，变星内部的压力和密度都减小，温度也随着降低，所以膨胀到最大时，光度极小；相反，当星体收缩时，内部压力和密度都增加，温度也随着增高，此时相应的光度最大。根据大量观测统计和研究知道，所有天琴座 RR 型变星的绝对星等大约是一个定值，$M_v = 0.5^m \pm 0.2^m$。因此，欲测某星团的距离，可以通过

测定其内的天琴座 RR 型变星的视星等 m_v；根据此类变星的绝对星等可以求出星团离我们的距离 r。因此，天琴座 RR 变星也是天文学家的一把“量天尺”。

二、造父变星的周光关系

大量的观测表明，造父变星的光度与光变周期有一定的关系，即存在所谓周光关系。人们测出光变周期就可以知道它们的光度（绝对星等），因而利用造父变星的周期和光度的关系，就可以确定造父变星所在的星团或星系的距离。所以，此类变星获有宇宙中“量天尺”的美誉，也有人称之为“标准烛光”。

周光关系　观测和统计分析表明，造父变星的光变周期（P）和它的光度即绝对星等（M）有线性关系，称做周光关系（如图 19.3 所示）。其线性式的常数项叫做周光关系的零点。

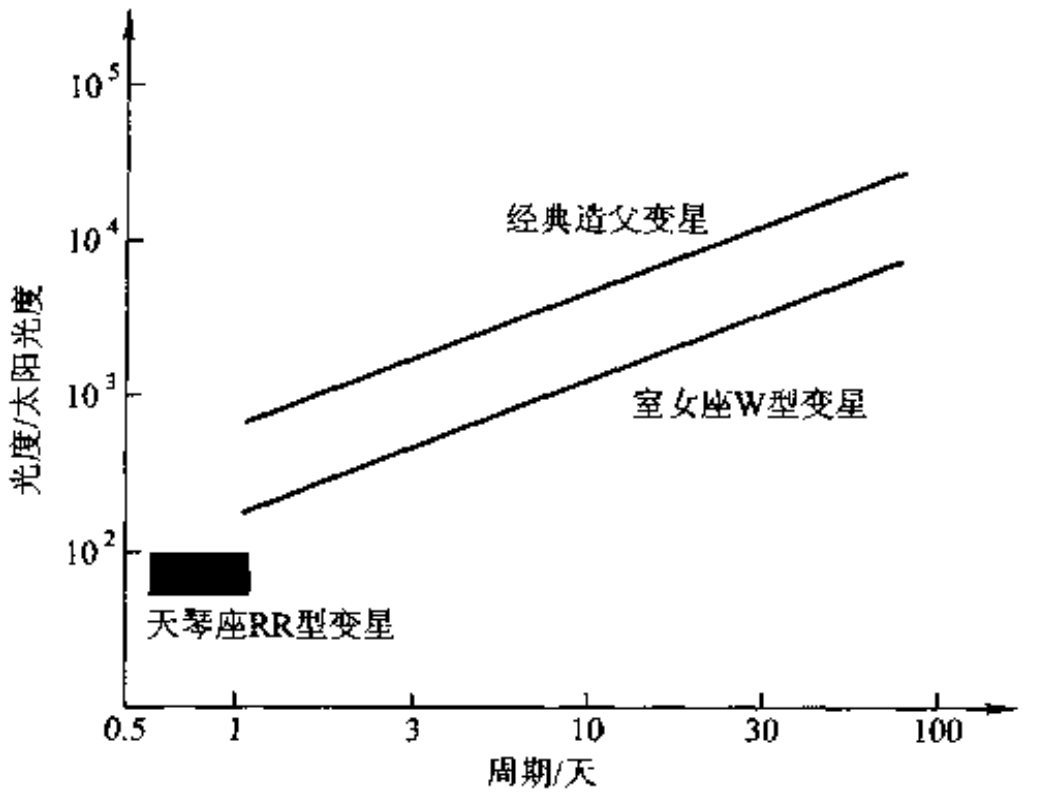


图 19.3　造父变星的周光关系图

早期，由于周光关系的零点测得不准确，求出的天体距离有很大误差。直到 1952 年，巴德发现造父变星的两种类型：经典造父变星和室女座 W 型变星的周光关系零点不同。他指出：经典造父变星和室女座 W 型变星的零点差 1.45^m。于是他根据大量的观测统计给出两种类型的造父变星的周光关系公式：

$$M_p = -1.80 - 1.74 \lg P \quad \text{（对于经典造父变星）}$$

$$M_p = -0.35 - 1.75 \lg P \quad \text{（对于室女座 W 型变星）}$$

式中 M_p 为绝对照相星等的平均值，P 为光变周期（P 以天为单位）。我们前面已经讲过，绝对星等 M 和观测的视星等 m 的关系为 $M = m + 5 - 5 \lg r$，由此，通过测定的光变周期 P，即可根据周光关系式，求出绝对星等；然后再由测定的视星等 m，计算出它的距离 r（pc）。注意所观测的是经典造父变星还是室女座 W

型变星，代入相应的周光关系式。

利用造父变星的周光关系测定天体距离的方法叫造父视差方法。它是测量星团和河外星系距离的重要方法。由上述公式我们看出周光关系的零点差会引起所测得的结果有很大的变化，这里就不是"差之毫厘，失之千里"了，而是"差之毫厘，失之光年"了。看来周光关系的零点的准确测定是非常重要的，但是至今这个值尚待精确的测定。

目前，哈勃空间望远镜可以观测到河外星系里的造父变星，因而，人们可以通过观测造父变星测量宇宙更深层次的河外星系的距离，可见造父变星的"量天尺"之誉并非言过其实。

三、盾牌座δ型变星

在变星中有一类光变速度比天琴座 RR 型变星更快，周期更短的脉动变星，这是以盾牌座 δ 为典型的变星，叫盾牌座 δ 型变星。它们的光变周期只有 0.01 天至 0.2 天，光变幅在 0.003^m 至 0.9^m。这类变星的脉动包括径向振动和复杂的非径向振动，偶尔还出现脉动的"休克"现象（观测不到光变），看起来，真是光怪陆离。它们的光变曲线的形状与由光谱观测得到的视向速度曲线的形状相比，也是几乎相反，成镜像。

四、雏蕤型变星

脉动变星中有一种周期很长的变星，叫作雏蕤型变星，其典型星是鲸鱼座 O 星（中文名雏蕤增二）。鲸鱼座 O 型变星的光变周期为 320 到 370 天，光极大时为 1.7^m，光极小时为 10^m，呈现出一年亮，一年暗的情况，好像神话中的魔鬼"眨眼"，所以古代西方人称此星为"魔眼"变星。

五、脉动变星的脉动机制

在恒星的一生中，这个不稳定的脉动演化阶段，很像是人的"更年期"。过了这一阶段后脉动就会停止，又恢复正常。这个脉动时期对不同质量恒星长短不一，质量大的恒星演化得快，所经历的时间就短些，大约需要几百年；质量小的恒星演化慢，经历的时间就非常的缓慢，脉动的时间有几千年，甚至几万年。

绝大多数变星都位于赫-罗图中的主星序与红巨星分支之间的一条不稳定带内。

大质量（如 7 $m_\odot$）的恒星，在演化过程中多次通过这个不稳定带，经历脉动阶段。大质量恒星第一次由左向右穿过造父变星带，大约需要几千年。第二次是由右向左穿过它，大约需要 35 万年。因为在这之前，恒星内部的氦早已开始燃烧，在氦燃烧控制下演化较慢。

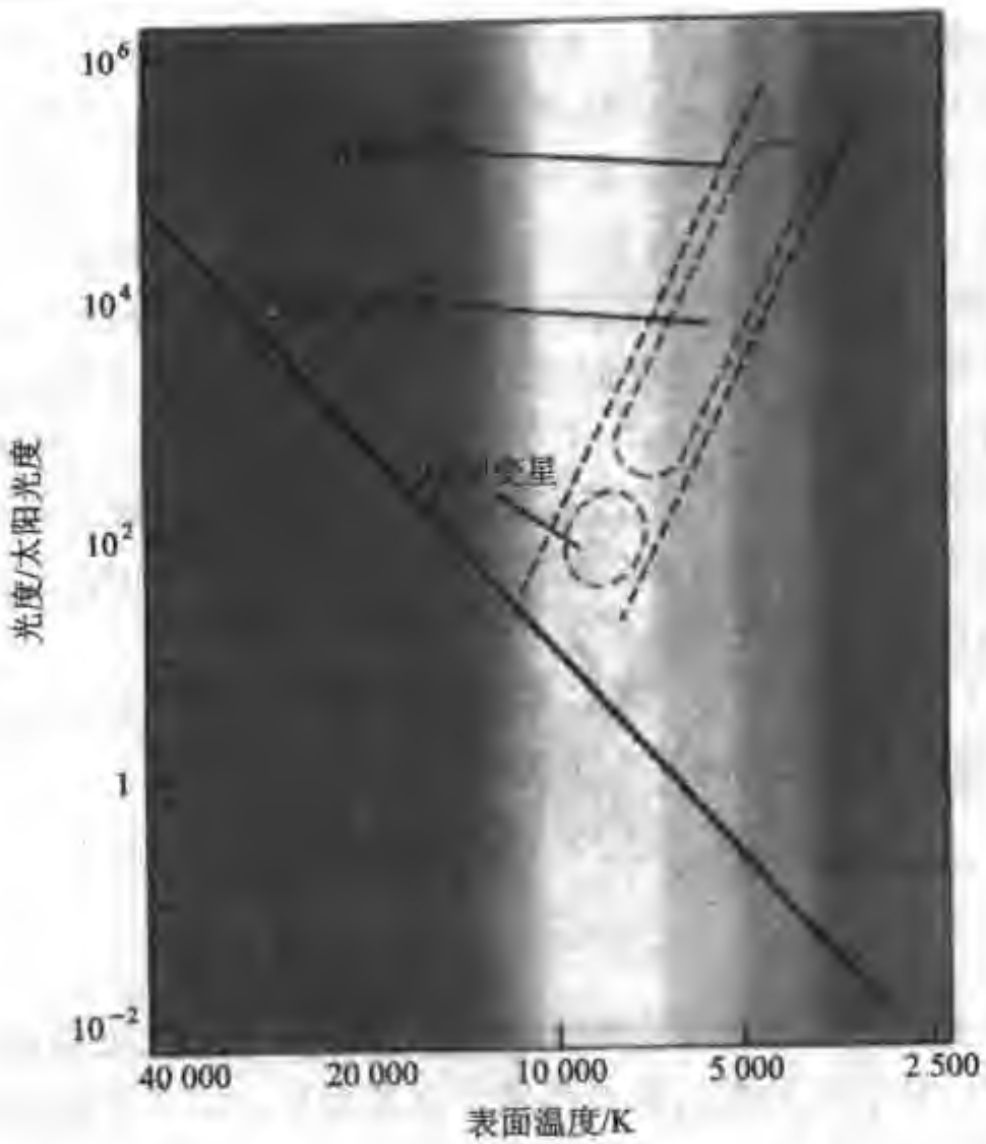


图 19.4　脉动变星在赫-罗图中的位置

为什么恒星步入赫-罗图中这个不稳定带(图 19.4)内时，它就会脉动起来呢？也就是说，恒星在这期间，如何将其他形式的能量转变为振动能，以维持其脉动呢？早在 1926 年英国天文学家爱丁顿就提出了有关的理论，指出在正常恒星内部，自身的引力和气体向外的压力正好处于平衡状态，整个星体是稳定的，既不会收缩也不会膨胀。但是到了恒星演化晚期，内部的氢、氦热核聚变减弱了，到了恒星内部热核反应产生的向外的气体压力不能与自身的引力相抗衡的时候，星体就开始收缩，体积变小，部分的引力势能转化为热能使星体温度升高，而且，星体的收缩导致了内部物质密度的增大，向外的气体压力就增大了。当它增加到一定程度，超过引力时，恒星又变为膨胀。膨胀使内部物质密度降低，压力减小，到一定程度之后，压力小于自身的引力时，再度收缩。如此反复循环。脉动之所以能维持，其重要原因是在恒星的某一大气层里，当物质被压缩时它会将部分的势能转变为热能，气体变热使星体膨胀，当恒星膨胀到最大时，物质又过于透明，它能透过更多的辐射，内部就变冷并使星体收缩。如此，恒星的这层大气物质对于向外的辐射起着阀门的作用，这个阀门开关的节奏和脉动节奏相同。

20 世纪 50 年代，经过进一步的研究人们知道爱丁顿理论对于解释恒星内

部的情况是正确的，但是恒星外层大气的情况正好与此相反。1952 年苏联数学家谢尔盖·热瓦金发展了爱丁顿的理论，称为爱丁顿-热瓦金理论，它可以较好地解释造父变星的脉动。此理论提出了脉动变星的外层大气内的氢原子和氦原子受热而电离，形成了大量氢与氦的离子。电离增加了物质的自由度，使其热容量变大，从而降低了气体的绝热膨胀系数，因此，电离效应抑制了密度变化所引起的气体温度变化。当星体收缩时，温度 T 不再上升(所以叫温度冻结效应)，造成辐射温度高于气体温度($T_R > T_g$)，气体吸热，引起膨胀。当星体膨胀时，气体温度高于辐射温度($T_g > T_R$)，气体放热制冷，释放的能量转变为电离能储存在恒星的外层大气之中，离子复合时释放出热能导致星体收缩，正是这种能量储存与释放的循环，维持着恒星的振动。

目前，关于变星的理论还有不少争议，正是这些不同的论点的争议推动了理论的发展，使其更加逼近观测的事实和真理。

第 3 节 激 变 变 星

激变变星是一类经常发生激烈的活动，但还不到发生灾难性爆发的变星。新星、再发新星、矮新星和类新星等都属于这类变星。由于这类变星的本质是双星，所以又叫激变双星。

激变变星的光变具有下列特征：在长时间的相对宁静之间出现突然爆发，使得天体的视亮度增加 10 倍(矮新星)到一百万倍(典型新星)。爆发的时间间隔，短的是几个星期(矮新星)，长的超过 100 年(再发新星)。

激变变星经常发生剧烈活动的原因是由于这类变星是双星系统。图 19.5 为激变变星的模型。它们的轨道周期一般在 1～10 小时，双星系统中包含一颗

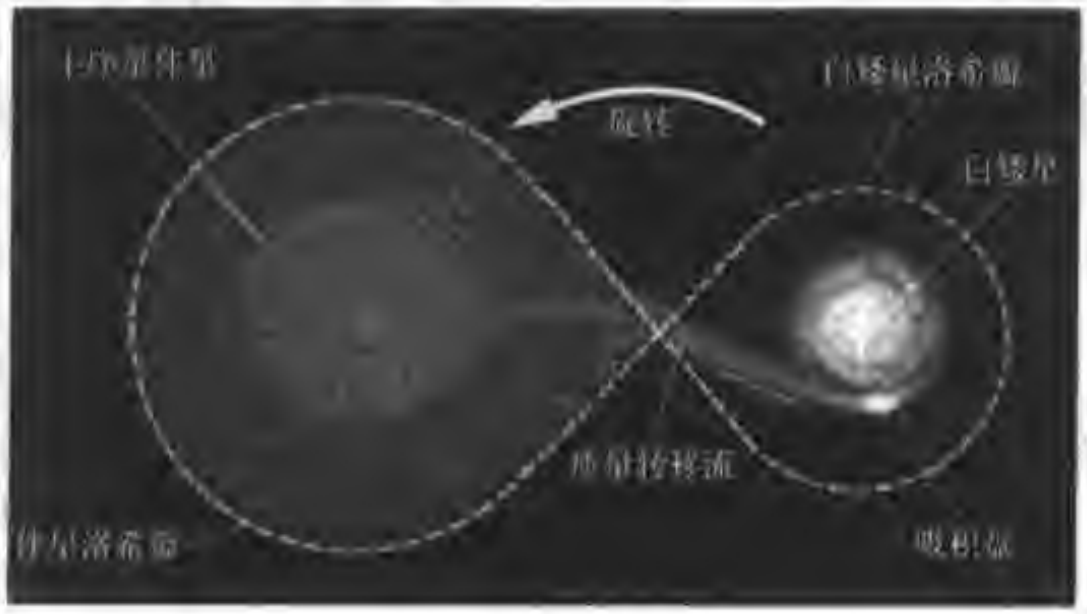


图 19.5 激变变星的模型(双星系统包括一个红巨星和一个白矮星)

白矮星(主星)和一颗晚型主序星或亚矮星(伴星),伴星的物质受白矮星的吸积,不断流向白矮星,并在白矮星周围形成一个旋转的吸积盘,由于气流不断冲击吸积盘,会形成热斑,于是频繁出现激烈的爆发活动。

一、新星

人们发现星空之中有的星,其亮度会突然发生引人注目的增亮,于是把这种星叫作新星。新星的光度可在几天内陡增上万倍,变亮 $7^m \sim 9^m$,爆发时释放的总能量约有 $10^{38} \sim 10^{39}$ J。然后在几个月到几年内亮度又缓缓下降到原来的亮度,但没有发生灾难性的变化,亮度变化的程度比超新星大约弱 1 000 倍。

我们知道在银河系里经常可以观测到新星。甚至在河外星系也可以观测到新星,如在仙女座星系内每年就可以看到 20～30 个新星。新星爆发突然发亮以后,经过一段时间又恢复到原来的状态,如 1975 年 8 月 29 日天鹅座出现了一颗新的亮星,它就是天鹅座新星 N Cyg1975(见图 19.6),如今它已经是一个不显眼的暗星了。又如,1934 年 12 月在武仙座出现的新星,当时它比这个星座中所有其他恒星都要亮。而 1935 年它的亮度大大降低,后来又稍微变亮一点,然后就一直暗弱的无法用肉眼直接观测,只能在望远镜里才能找到它。值得指出的是,1954 年美国人沃克在里克天文台发现这颗新星原来是一个双星系统,其轨道周期为 4 小时 39 分。双星系统中的一个子星是白矮星,另一个子星是主序星。据研究,这颗主序星充满了它的临界等势面,物质从它的表面流向白矮星。被白矮星吸积的物质在白矮星周围形成吸积盘。人们还发现这颗武仙座新星系统中的白矮星的亮度有周期性地变化。这是由于那颗主序星子星在运转中遮掩吸积盘造成的。



图 19.6　天鹅座新星(N Cyg1975)爆发前后的两幅图像

新星在光极大附近时,它的光谱呈现为 A 型～F 型的吸收光谱,光谱中氢的宽发射线及氦线和其他元素的发射线都有吸收分量,说明该星外边的气层正在膨胀。当新星的亮度衰减时光谱中显示出有星云谱线;光极小时的光谱是连续谱上叠加了许多发射线。

天文学家研究了大量的新星,提出了双星模型,认为它们都是双星系统,系

统内的主序星或冷巨星向另一个白矮星子星抛射物质，新星爆发就是由于系统内的冷巨星或主序星的物质在白矮星的吸积下，以高速冲击白矮星，由此发生温度剧增，引发外壳爆发。在爆发初期，由于爆发的物质离星体很近，像是星体膨胀，由于亮度剧烈增加，使人们观测发现了新星。以后，随着气壳物质的飞散，密度降低，气壳消散后形成环状星云。原被气壳遮住的星体又逐渐显露出来，于是新星又基本恢复了本来的“面目”。

二、再发新星

发生过两次以上爆发的新星叫再发新星。再发新星的两次爆发一般相隔十年以上，爆发时释放的能量约为 $10^{38}\sim 10^{39}$ J。观测研究表明，再发新星实质上也是双星系统，主星是白矮星，伴星是红巨星。

三、矮新星

这类星每隔几星期或几个月爆发一次，亮度增加 $2^m\sim5^m$，每秒释放出 $10^{38}\sim10^{39}$ J 的能量，比新星释放的能量小些。矮新星又分为双子座 U 型(U Gem)，鹿豹座 Z 型(Z Cam)和大熊座 SU 型(SU UMa)三个类型。双子座 U 型变星只有“正常”的爆发，虽然各次爆发强度不同，但一般不会相差 4 倍。鹿豹座 Z 型变星则有时在爆发后其亮度不返回爆发前的状态，而是在一个中间亮度停留几天或更长的时间。大熊座 SU 型变星，除正常的爆发外，还有“超爆发”，释放的能量是正常爆发的 8 倍以上。虽然超爆发不如正常爆发频繁，但却更有规律。

四、类新星

这类变星有着与新星类似的光学特征，常出现有几个星等的亮度起伏，但是没有新星那样的爆发活动。例如大熊座 UX 型变星和玉夫座 YY 型变星都是类新星。它们的系统中包含一颗白矮星(主星)和一颗晚型星(伴星)，晚型星的体积充满了洛希瓣，物质受白矮星吸积，流向白矮星，并在其星周围形成一个旋转的吸积盘，气流不断冲击吸积盘，导致频繁出现一些激烈活动。

【例题 1】 一颗经典造父变星的光变周期为 20 天，它的平均视星等为 $m=20^m$，求它距离我们为多少光年？

解答：按照本书中第十九章的周光关系图 19.2，可求出它的绝对星等 $M=-5$ 由绝对星等和距离的关系式，$M=m+5-5\lg r$

$$r = 10\times10^{(m-M)/5}=10\times10^{(20+5)/5}=10^6\ \text{pc}=3.26\times10^6\ \text{l.y.}$$

【例题 2】 一颗造父变星的亮度变化(光变幅)为 2^m，如果在光极大时它的有效温度是 6 000 K，在光极小时，它的温度是 5 000 K，问它的半径由于脉动产生的变化是多少？

解答：光度在 $L_{max}=4\pi R_{max}^2\sigma T_{max}^4$ 和 $L_{min}=4\pi R_{min}^2\sigma T_{min}^4$ 之间变化，所以 $\Delta m=$

$$-2.5\lg L_{min}/L_{max} \approx -5\lg R_{min}/R_{max} - 10\lg(T_{min}/T_{max})$$

$$\lg R_{min}/R_{max} = -0.2\Delta m - 2\lg(T_{min}/T_{max}) = -0.4 - 2\lg(5\,000/6\,000) = -0.24$$

所以 $R_{min}/R_{max} = 0.57$，即它的最小半径是最大半径的 0.57 倍。



习　　题

1. 观测一颗经典造父变星，它的平均星等为 8.2^m，光变周期为 100 天，问它的距离是多少秒差距？

2. 变星鲸鱼座 o 星亮度极大时达到 2.5^m，极小时为 9.2^m，问它的极大亮度为极小时的多少倍？

3. 大陵五食变星在 1938 年 1 月 3 日世界时 13 时 55 分。它的周期是 2.8673 天，计算出 2003 年 1 月 3 日北京时间 20 时，它的光变位相是多少？1 月几日几时又是它的下一个光变极小？能否观测到它的光变极小？

4. 若造父变星的光变幅等于 1.5^m，而单位面积亮度保持一定，问它的半径会改变多少倍？

5. 仙王座 δ 变星，光变周期为 5 天，平均视星等为 4.4^m，问此仙王座 δ 变星位于离我们多少秒差距的地方？

6. 若某变星的热星等的变幅等于 2.0^m，如果它的亮度变化是由于脉动引起的，在亮度极大时，恒星的温度 $T_1 = 9\,000$ K，亮度极小时 $T_2 = 7\,000$ K，问它的半径变化多少？

7. 1918 年天鹰座新星亮度极大时具有绝对星等 $M = -88^m$。问它比太阳亮多少倍？若它的视星等 $m = -1.1^m$ 问它位于怎样的距离上？在怎样距离处，它看来像满月一样亮(满月的视星等为 -12.6^m)？

第二十章

超 新 星

超新星是典型的灾变变星，是大质量恒星在死亡之前都要经历的一次颇为壮观的爆炸过程。超新星爆发的规模远远超过新星，是宇宙中的“明星”。超新星爆发释放出巨大的能量，爆发时释放的总能量约为$10^{44}\sim10^{46}$J，其亮度突然增亮一百亿倍以上，光变幅度超过17^m，发出的光度比一般的星系总的光度还亮；它在几个月内所释放出的能量，相当于太阳在10亿年期间所发出能量的总和！

超新星爆发在一定光变阶段的光度可以校准，因而可以作为标准烛光，并且对研究哈勃常数，宇宙的膨胀速率和未来，以及宇宙中的暗物质都有重要意义。

第1节 超新星的分类

已观测到的超新星，光变形态不同，化学成分也有所不同。通常按照超新星的光度变化（光变曲线的形状）和光极大时的光谱特征分为两大类：Ⅰ型超新星和Ⅱ型超新星。Ⅰ型超新星的光变曲线如图20.1所示，超新星爆发光度达到极大以后，在几十天内迅速下降，而后缓慢地下降。Ⅱ型超新星的光度达到极大后，在数天内迅速下降，后来出现光度几乎不变的平台，数月后又缓慢下降。目前根据其光变曲线的形状又分为更细的次型：Ⅱ型超新星的光变曲线有平台的叫SN Ⅱ-P型超新星；而在光极大后几乎线性衰减的超新星被称为SN Ⅱ-L型超新星。

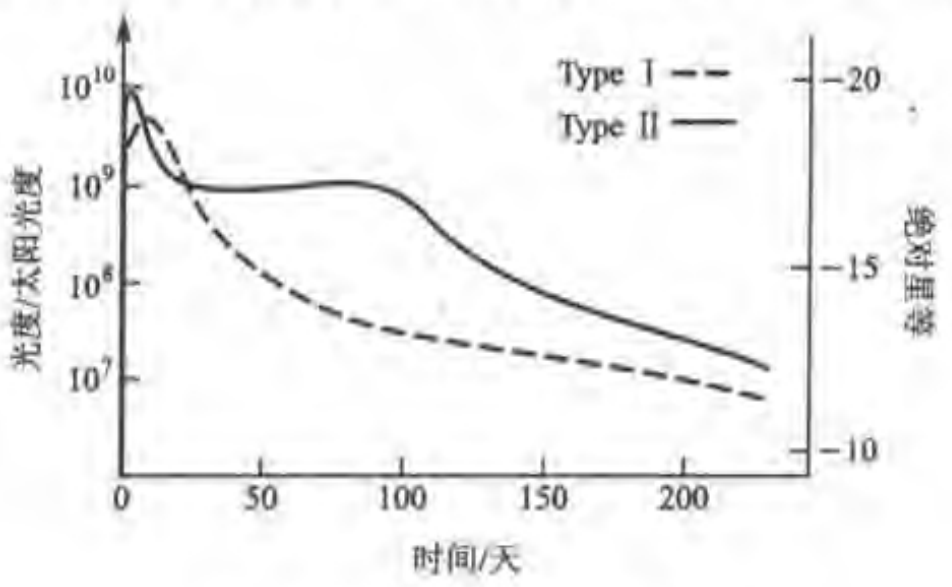


图20.1 两类超新星的光变曲线

两类超新星的光谱的重要区别是：凡是在光极大时光谱中有氢线的被称为Ⅱ型超新星，而没有氢线的则称为Ⅰ型超新星。Ⅰ型超新星根据光极大时的光谱进一步分类。分类的原则是光谱中是否有一次电离硅(Si Ⅱ)的吸收线。有 Si Ⅱ的强吸收线的叫做Ⅰa型超新星；没有这条强吸收线的超新星又根据其光谱中有无强的氦线(He Ⅰ)而分为两个次型。光谱中有 He Ⅰ线的是Ⅰb型超新星；光谱中没有 He Ⅰ线，或者只有很弱的 He Ⅰ线的被称为Ⅰc型超新星(如图 20.2 所示)。

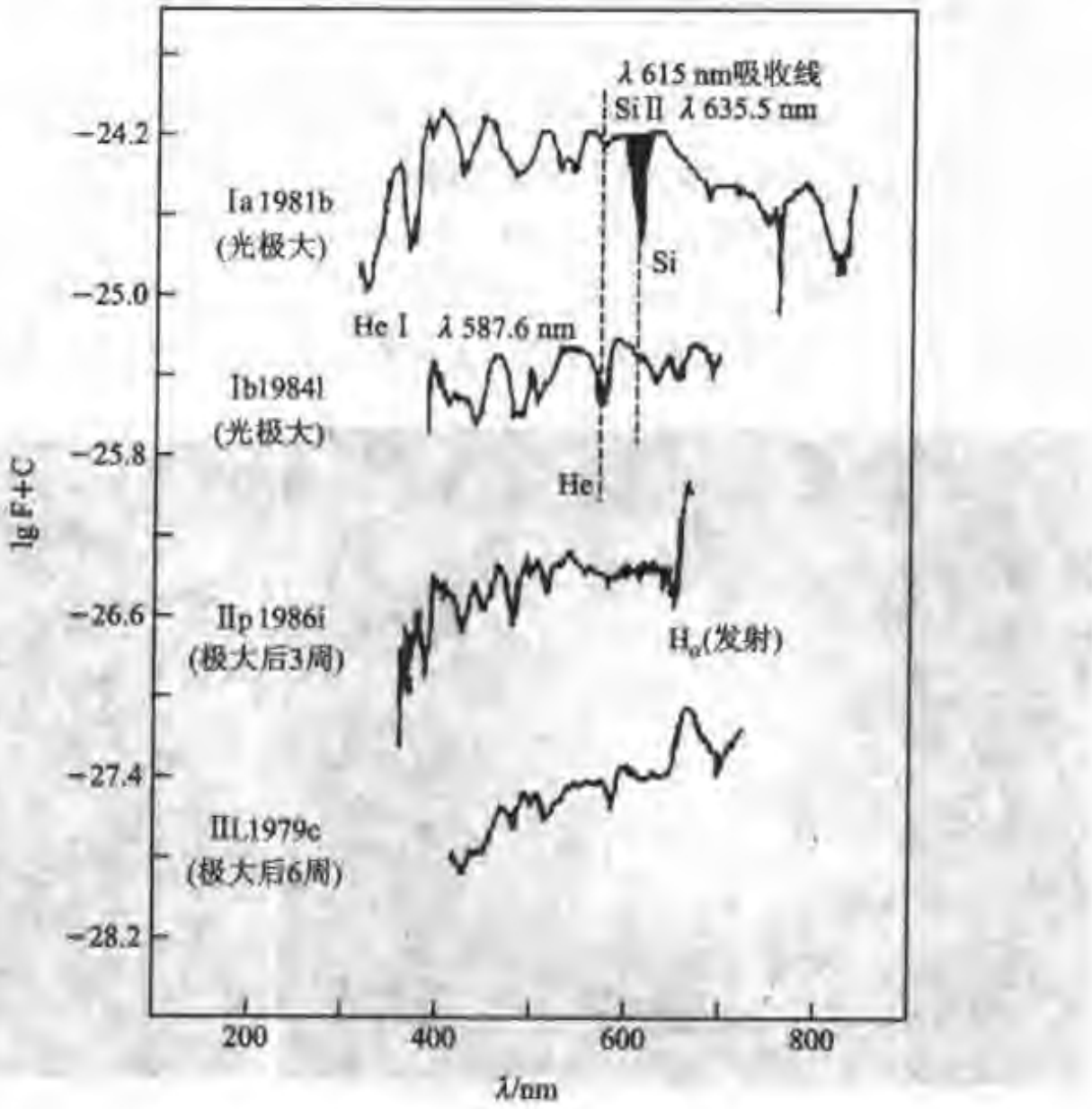


图 20.2　两类超新星的分光光度图

第 2 节　著名的超新星

超新星爆发大多发生在河外星系，在银河系内超新星的出现率小些，在过去近 1 千年里的历史记载中被确认为银河系内的超型星爆发只有 8 次，即：公元 185 年，公元 393 年，公元 1006 年，公元 1054 年，公元 1181 年，公元 1408 年，公元 1572 年和公元 1604 年。近代，随着大望远镜的发展和先进探测器、观测手段的更新，观测到的超新星的数量也剧增，到 2002 年 10 月为止已发现了 2 274 颗

超新星，绝大多数在河外星系。

超新星的命名原则是这样的，在 SN(超新星)后加上发现的年份，再加上用大写的英文字母表示的发现的次序，若发现的数目超过 26 颗，则用小写的英文字母，如 SN1987A 是 1987 年发现的第一颗超新星，而 SN2001a 则代表 2001 年发现的第 27 颗超新星。下面介绍几颗著名的超新星。

1. SN1054——中国超新星

目前我们在金牛座观测到的蟹状星云是 900 多年前我们祖先发现的一个超新星爆发的遗迹(图 20.3)。公元 1054 年 7 月 4 日的早晨，在金牛座 ζ 星(中文名"天关星")附近突然出现了一颗非常明亮的星。我们的祖先以"客星"的名字最完整地记载了这颗超新星爆发的情况，包括爆发时间、位置和亮度变化等。据宋代史书记载，这颗星在白天都能看到，像金星那样明亮，一连亮了 23 天后才开始暗下来，但肉眼仍能看到；直至经过了 643 天后，才变暗到看不见。这就是国际上称为"中国超新星"的 SN1054 的爆发情况。此后，这个客星消失了，几个世纪都没露面。



图 20.3　超新星遗迹——蟹状星云的图像以及中国古代的相关记载

1731 年，英国天文爱好者贝维斯用望远镜发现在曾观测到那颗超新星的位置有一个云雾状的亮斑；1771 年法国天文学家梅西耶把它称做星云 M1，记载在梅西耶星云星团表中的榜首。后人发现该星云有纤维状结构，很像一个舞爪横行的螃蟹，就起名为蟹状星云。

观测发现，整个蟹状星云的纤维系统正在膨胀，膨胀速度约为 1 200 km/s。按照这个膨胀的线速度和由天体测量测出的自行速度 0.23″/a，推知星云离我们的距离约为 5 540 l.y.。这个距离与由 1054 年超新星视星等的估算的距离值相当符合，因此，天文界公认蟹状星云就是公元 1054 年超新星爆发后留下的遗迹。

1963年，蟹状星云又成为第一个被证认的X射线源。6年后，在超新星SN1054的位置上发现了一颗脉冲星(中子星)，参见图20.4。蟹状星云脉冲星的发现解开了这个长期未解决的谜，说明了蟹状星云是900多年前的一个超新星爆发的遗迹。它确认不久，天文学家从观测立即发现，蟹状星云脉冲星的射电脉冲到达观测者的时间间隔，稍稍地但稳定地变长。假如发射这些射电脉冲的"钟"被认证是一颗旋转的中子星的话，那么旋转运动变慢是必然的。观测得到的蟹状星云脉冲星自转速率变慢所转移的能量正好能提供蟹状星云所必需的能量3×10^{31}J/s。于是，蟹状星云脉冲星的发现解决了两个大难题：(1)蟹状星云的能量源是脉冲星；(2)超新星1054爆炸后，星核是留下了蟹状星云的脉冲星，即一颗中子星。这颗脉冲星是人们首次观测到自转周期变长的脉冲星，在研究脉冲星的特性中具有重要作用。这个重要的发现，引起了全世界天文学家的极大兴趣和关注，它使SN1054再度扬名，并为超新星爆发后产生中子星的论断提供了有力的科学证据。



图20.4　蟹状星云和它的脉冲星

2. SN1987A

在大麦哲伦云中发现的超新星SN1987A是1987年2月23日由加拿大天文学家希尔顿(Shelton)，用25 cm口径的天体照相仪在拍摄大麦哲伦云时发现的。这颗超新星爆发前等星为12^m，爆发时最亮为3.6^m，释放的能量高达4×10^{43} J。

在它爆发时检测到它发射出的27个中微子事件，这一事实对研究超新星爆发机制及恒星的演化有重要意义，也开创了太阳系外中微子天文学。分析表明，观测到的中微子是大质量星在发生超新星爆发时释放出的。

超新星SN1987A的光变曲线如图20.5，它的光变曲线与其他超新星的光变曲线十分不同。

1990年哈勃望远镜拍摄SN1987A的照片显示它有一个明亮的光环，不久欧洲南方天文台观测到在它的亮光环之外还有两个更大的光环，以后哈勃望远镜拍摄的照片证实了这点(参见图20.6)。有的天文学家解释说，SN1987A在爆发前几万年就向外抛射物质，沿着其赤道面最剧烈，最稠密，形成一个气体环，当超新星爆发时产生冲击波，冲击波进入物质环，激发而形成了亮环。至于外环如何形成，目前还是说法不一。

SN1987A在爆发早期的光谱是黑体谱上重叠某些发射线和吸收线，有氢

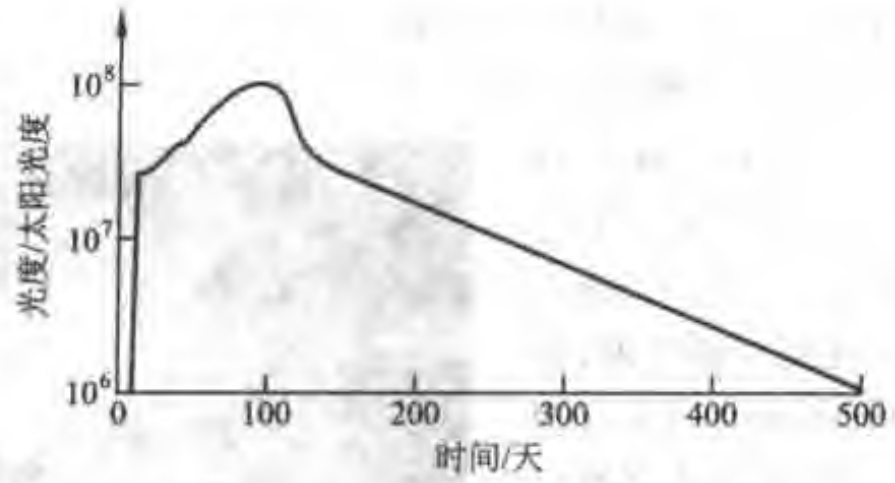


图 20.5 超新星 SN1987A 的光变曲线

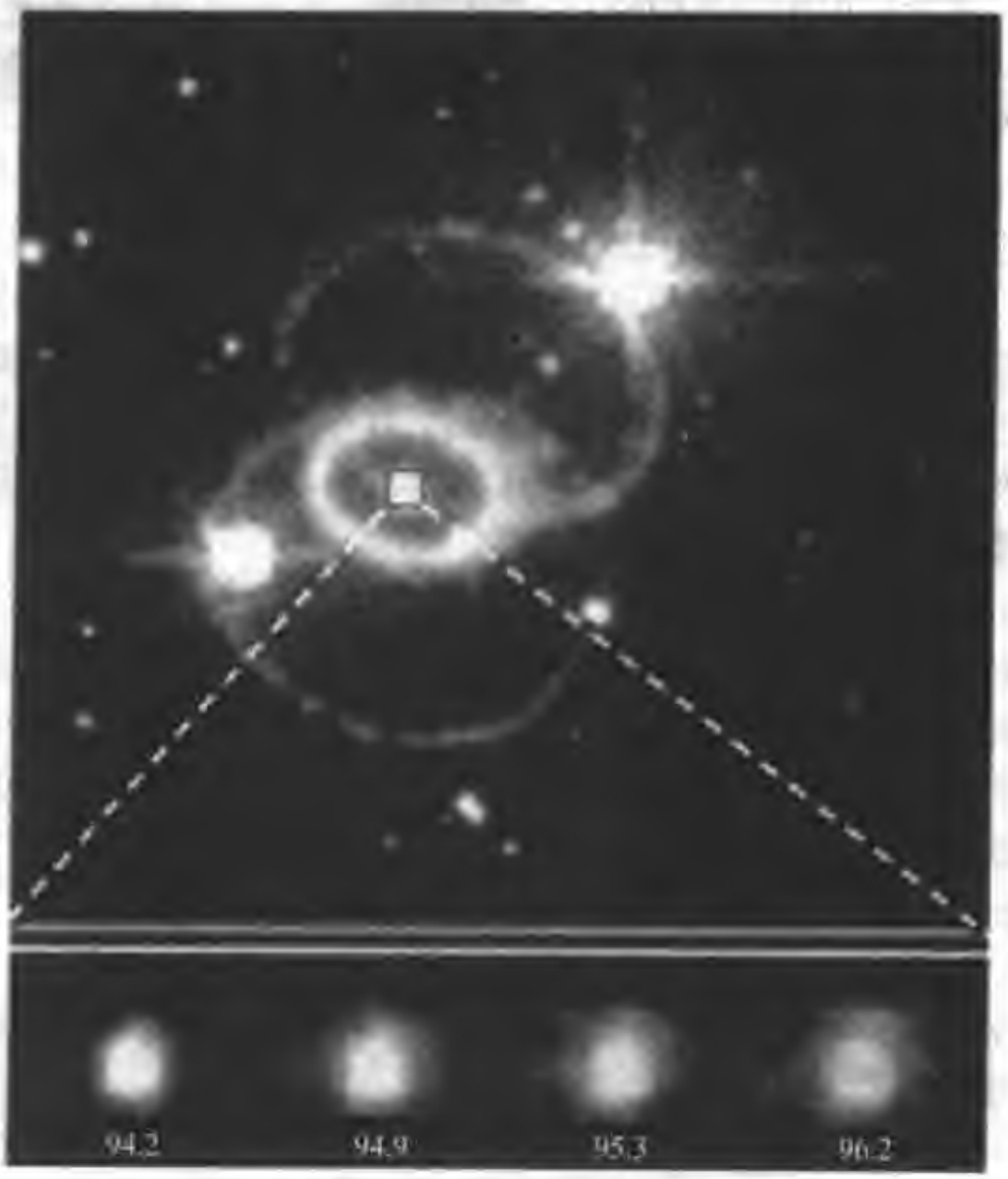


图 20.6 哈勃望远镜拍摄到超新星 SN1987A 周围的环结构，
下图是核心区不同时间的亮度变化情况

线，与其他Ⅱ型超新星很类似。后期(1987 年 12 月以后)光学谱和红外谱中的发射线也与Ⅱ型超新星相似，但是强氢线出现较早，谱线演变快，有强紫外线覆盖。一些天文学家认为它的前身可能是双星系统，有一个蓝超巨星(B3 Ⅰ型)和

一个红超巨星，都发生了爆发。

3. SN1993J

1993 年 3 月 28 日在旋涡星系 M81 中爆发了一颗超新星，名为 SN1993J。它是西班牙的业余天文学家葛西亚用一架口径 25 cm 的望远镜发现的。这颗超新星的光谱中有明显的氢线，因此属于Ⅱ型超新星。它的光变曲线很特殊，开始亮度上升，几天后又暗下来；两周后接着上升到二次极大(10.8^m)。然后它的亮度以每天变暗约 0.02^m 的速率下降。观测到它发射有 X 射线辐射和射电辐射。它的光谱特征在Ⅰ、Ⅱ型的特征之间变化，如爆发初期观测的光谱中有氢线，到 4 月中旬氢 H_α 线出现双峰，后来氢线消失了，取而代之的是氦线和氧线，此时它由Ⅱ型转为Ⅰb 型。

4. SN1998bw 和 SN1998eg

1998 年 4 月 25 日，BeppoSAX 卫星探测到来自望远镜座的一个 γ 射线暴，此后在此处的一个小旋涡星系的旋臂上发现有一颗亮的超新星，SN1998bw。几天之后观测到了它的强射电辐射，而一般超新星是在几周之后才会发生强射电辐射。天文学家认为这颗超新星是一个特大质量的恒星坍缩成黑洞的过程，而不是形成

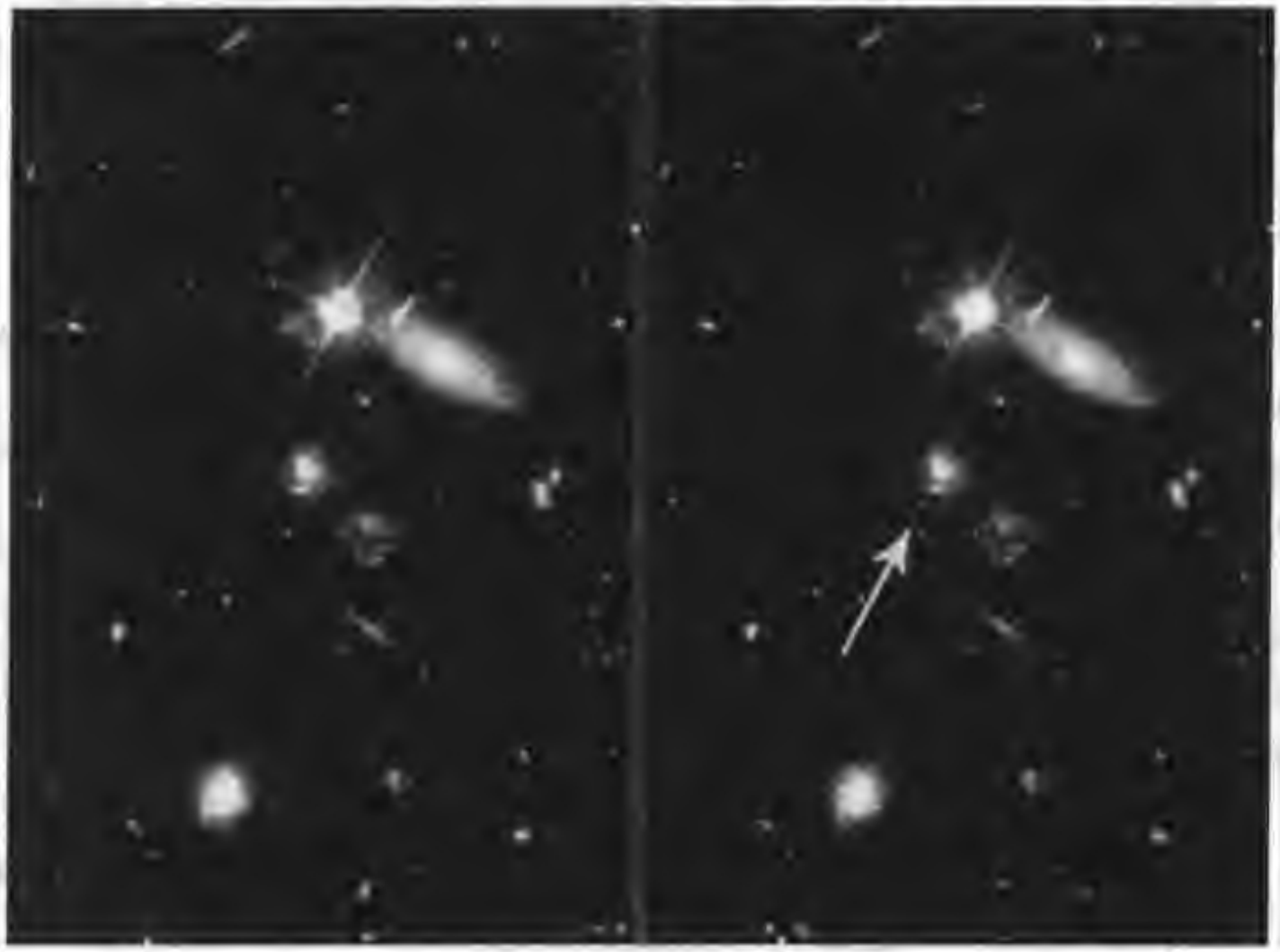


图 20.7 哈勃望远镜拍摄到的超新星 SN2002dd
爆发前、后(箭头所指)的两幅图像

通常的中子星的过程。它爆发产生非常强大的激波，并形成了γ射线暴。

1998 年 10 月 19 日英国业余天文学家博尔斯用一架 26 cm 的施米特-卡塞格林小望远镜和 CCD 成像系统拍摄到遥远星系 NGC12133，发现了一颗 16^m 的超新星，编号 1998eg，这为小望远镜可有重大发现的事实又添了例证。

2002 年，哈勃望远镜又拍摄到的超新星 SN2002dd 爆发前、后的图像，如图 20.7 所示。

近些年来，我国天文工作者的超新星巡天观测研究有了很大的飞跃，在天体物理领域产生了深远的影响。仅从 1996 年 10 月到 2002 年 10 月就发现了 50 余颗超新星，在天文学史上又谱写了新篇章。

*第 3 节 超新星的爆发机制

超新星的爆发是大质量恒星死亡前的"回光返照"，其爆发是由于恒星晚期发生灾难性坍缩，造成强大的引力能释放的结果。至于爆发原因自然是由于恒星演化。

我们知道，在恒星的主序星阶段，其内部一直处于热核反应产生的气体热压力与恒星自身引力相平衡的状态。这时候恒星是稳定的。当恒星演化到晚期氢大部分变为氦之后，氢燃烧产生的热压力抵抗不了自身的重力，于是恒星开始坍缩并使恒星内部的温度升高。当温度的升高点燃了氦，氦燃烧成为碳的核反应开始，这样热压力又战胜了引力，使恒星向外扩张，直到达到新的平衡。就这样，恒星经历了从收缩到膨胀，从膨胀到收缩的过程，同时它本身的物质也从氢燃烧到氦，从氦燃烧到碳，再燃烧到氧、硅、镁等，直到燃烧到铁。铁是一种不能燃烧的物质。这样，当越来越多的物质燃烧成为铁之后，恒星就再也没有能力抵抗它自身的引力了，于是物质开始向恒星的中心快速塌缩，使密度增加，核体变硬。当核变硬超过某一极限值时，发生核反弹。物质从塌缩到反弹，核中心向外反弹的物质与向中心塌缩的物质迎面相碰，最终引起了激烈的爆炸，中心变硬的内核最终会演变成为中子星或黑洞。这就是Ⅱ型超新星爆发的基本过程，发生这种爆发的恒星的前身星质量一般都大于 8 $m_\odot$。

关于Ⅰ型超新星的爆发机制，多数天文学家认为，Ⅰ型超新星的前身星是含氦丰富的密近双星。系统中由于白矮星的强烈吸积，其伴星的物质流向白矮星，有的物质落到它的表面，碰撞加热，并增添了白矮星的碳-氧核心的质量。最后碳在中心被点火并在一个向外传播的波中燃烧，这就像一根导火线在燃烧，引起了星球的爆燃，造成了超新星的爆发。有的天文学家认为 SNⅠa 型超新星的前身星只是吸积的白矮星，因为观测和理论都指出 SNⅠa 的前身星质量比 SNⅡ

的要小，比 SN Ⅰb、SN Ⅰc 的前身星的质量也要小。

两类超新星的爆发机制如图 20.8 所示。

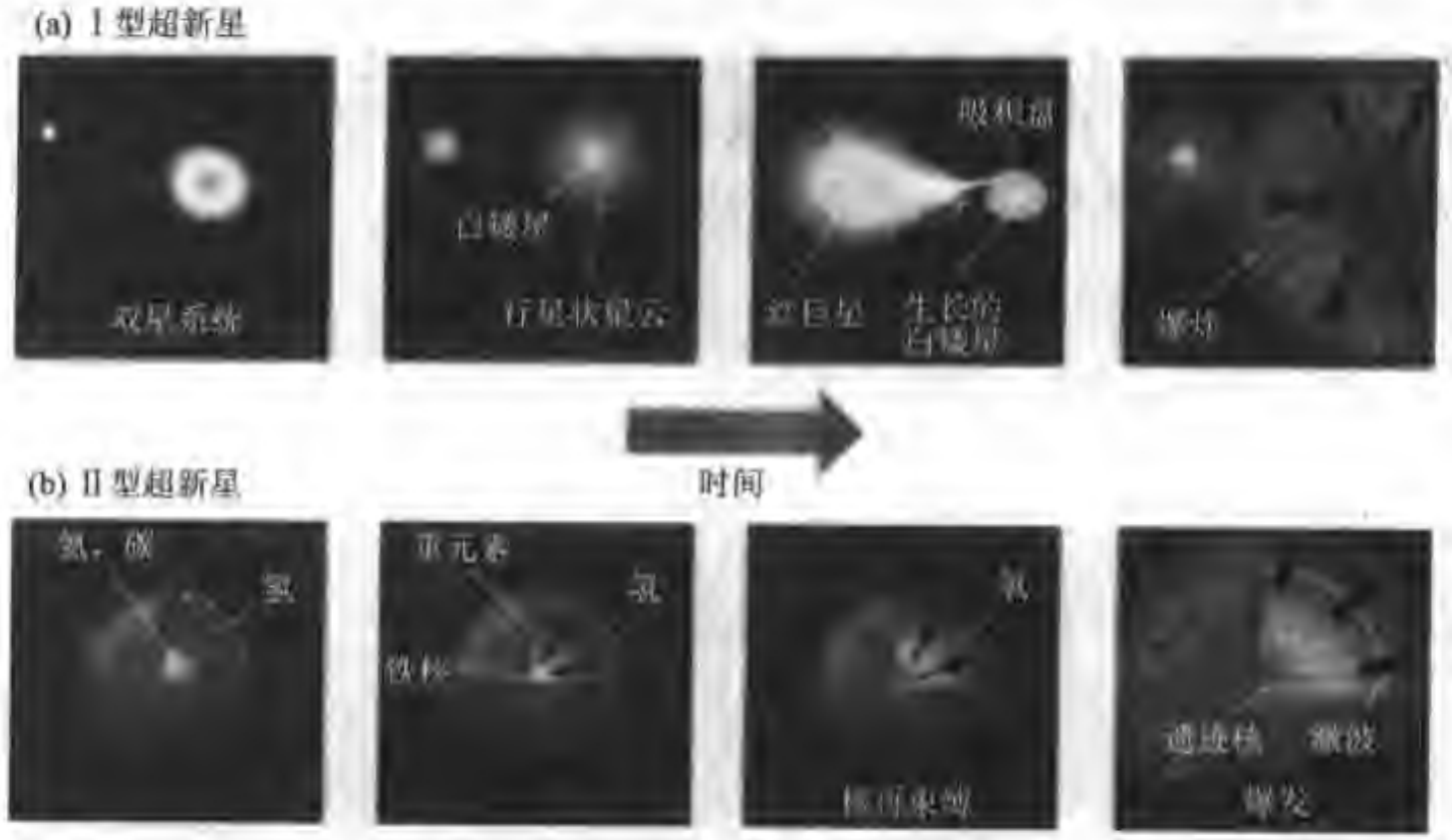


图 20.8 两类超新星的爆发机制图解

超新星的剧烈爆发，经历了“昙花一现”之后的死亡并非意味着物质的消灭，而是随着超新星的爆发，带来宇宙中新生“婴儿星”的孕育和诞生。因为超新星爆发对周围的星际物质产生巨大的冲击作用，从而促使较轻的元素合成较重的元素，并把它们抛洒在宇宙太空，这对周围星际物质起到了加热和掺入重元素的作用。同时，超新星爆发时产生的冲击波、引力辐射、中微子、X 射线和 γ 射线辐射等，都起着搅动星系物质的作用。这些，都有利于孕育新的恒星，甚至会影响到星系的形成与演化，这就是宇宙间物质和天体生生不息的道理。

习 题

1. 一个密近双星系统，包括一个 0.5 $m_\odot$ 的白矮星，和一颗具有 2 $m_\odot$，半径为 10$R_\odot$ 的亚巨星，由于白矮星的吸积，伴星表面物质脱出流到白矮星，估计它们之间的距离有多大？

2. 某一望远镜刚刚能检测到在 10 000 pc 距离处光度等于太阳光度的一颗星。问在多远能观察到一个光度最亮是太阳光度的 10^5 倍的新星？

3. 在多远的距离处一颗绝对星等为 -20^m 的超新星看起来像太阳一样亮？

4. 假设一颗超新星在 20 pc 距离，它的绝对星等为 -20^m，将它的视星等与如下的视星等进行比较：(a)满月(-12.6^m)；(b)最亮时的金星(-4.4^m)。

5. 一颗超新星的能量通常可以与太阳一生发出的总能量相比，利用太阳当

前发出的能量，计算它的一生（主序星的寿命为 10^{10} 年）发出的总能量，与这个超新星爆发的能量相比如何？

6. 目前蟹状星云半径大约 1 pc 如果在公元 1054 年观测到超新星爆发，如果假设它的膨胀率是常数，它的膨胀速度有多快？这假定是否合适？

7. 简述超新星Ⅰ型与Ⅱ型超新星的特性有什么区别，为什么说超新星可以作为天体的“标准烛光”用来测定星系的距离？

第四篇

银河系与河外星系

第二十一章

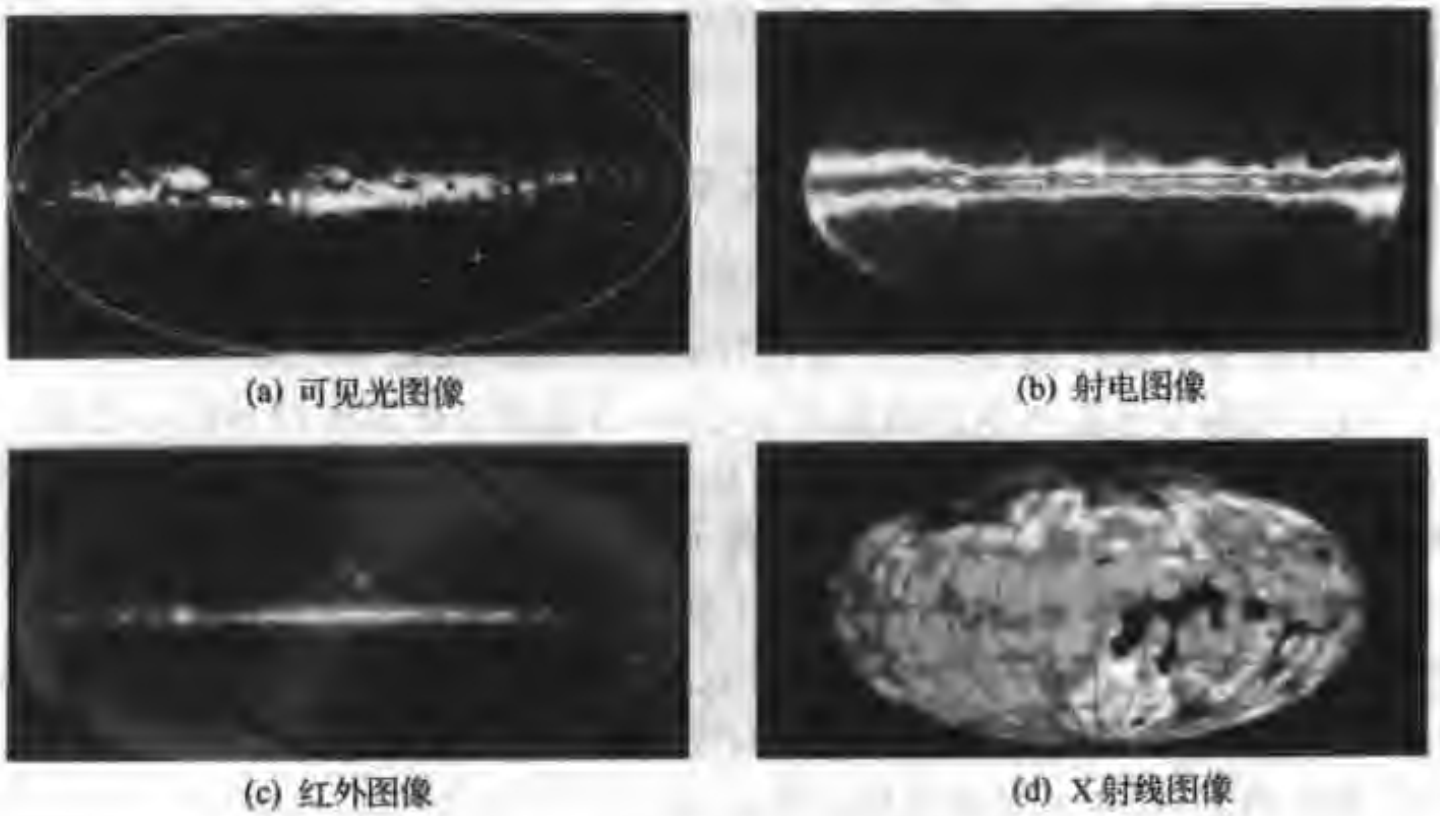
银 河 系

第 1 节 银河系的外貌

北半球的人们在盛夏、秋初的晴朗夜晚仰望星空，会看到一条淡淡的光带从东北向南横贯天穹，宛如奔腾的河流一泻千里，这就是我们太阳系所在的家园——银河系。古代，中国人称它为“天河”。在中国民间很早就流传着牛郎织女星在天河鹊桥相会的神话故事。欧洲人称它为“牛奶路”。美丽的银河令人心弛神往，激发了人们许多美丽的遐想。

一、银河系的形状和结构

1610 年，意大利天文学家伽利略首先用望远镜观测银河，发现银河是由许多密集的恒星组成的。1784 年发现天王星的英国天文学家赫歇尔开始了对全天的恒星计数，在 1 083 次观测中，他共计数了 683 个天区中的 11 万多颗恒星，



(a) 可见光图像　(b) 射电图像

(c) 红外图像　(d) X射线图像

图 21.1　银河系的四个波段的图像

终于发现银河内的恒星同属一个形似透镜的恒星系统。

银河系的多波段观测(参见图 21.1)研究表明,银河系的外貌像一个中间突起的透镜,这个恒星系统的直径约为 50 kpc,厚度约 1～2 kpc。它的主体是银盘,众多的高光度亮星、银河星团和银河星云组成了四条旋涡结构,叠加在银盘上。从银河系的核心展出四条旋臂:人马臂、英仙臂、猎户臂和天鹅臂。在银河系内大约有 3 千亿颗恒星,其中人们能用眼睛直接观察到的只有大约 6 000 颗较亮的星;银河系内还有众多的亮星云、暗星云、星团和无数的弥漫星际气体和尘埃物质及隐蔽的暗物质与暗能量。

很长一段时间以来,人们一直认为银河系是个旋涡星系。1995 年一个美、英及澳大利亚科学小组的年轻人大胆地用微引力透镜的分析方法,揭示出**银河系不是车轮状的旋涡星系,而是一个有棒状结构核心的棒旋星系。**这种论点越来越多的被空间观测所证实,如近年宇宙背景探测卫星探测结果表明,银河系核心区有着"花生"状的短棒结构。

银河系分为核球、银盘、旋臂、银晕几个部分。许多恒星、星团、星云和星际物质密集在银河系中心平面(银道面)附近,称为银盘,现在称此盘为薄盘,如果把银道面两侧密集的老年恒星都算在一起,离银道面上、下 2 kpc 范围称为厚盘。银河系的银盘中心隆起的球形部分叫核球,它是恒星和星际物质密集区,核球的半长轴约 4～5 kpc,半短轴约 4 kpc。在核球最里层距银心约 3 kpc 范围内的恒星致密区叫银核,那里有最密集的恒星群及电离气体、分子云和尘埃。银核的中心叫银心。银河系的厚盘外围是近似为球形的银晕,银晕的直径达 100 kpc,在这远离银河核心的银晕区,恒星和星际物质的密度稀薄,银晕中最亮的成员是球状星团。银晕外面更稀薄的庞大区域叫银冕,它离银心更为遥远,宛如银河系的一顶美丽"凤冠"。

二、太阳系在银河系的位置

太阳带领它的家族——太阳系位居于银道面以北约 8 kpc 的地方,与银河系中心相距 8.5 kpc,处在银河系猎户臂的外边缘(参见图 21.2)。

由于太阳系在银河系内是偏离银心的,当地球公转到太阳和银心之间时,我们的视线所穿越的银河系的恒星、星团、星云及星际物质比相反方向上更多。这时,地球的北半球是夏天。在晚上,人们沿着银道面朝银河系中心方向望去时,所看到的恒星非常密集,所以夜空中呈现出的是银河最亮的一段,天鹅座,天鹰座和人马座高悬天顶,到了秋天,银河的这段亮区就西斜而下了;冬夜和春夜,由于地球公转,地球运行到远离银心的一方,晚上看到的是与银心相反方向的星空,所见恒星就较稀少些,在天顶附近只能见到银河系较窄较暗的一段。

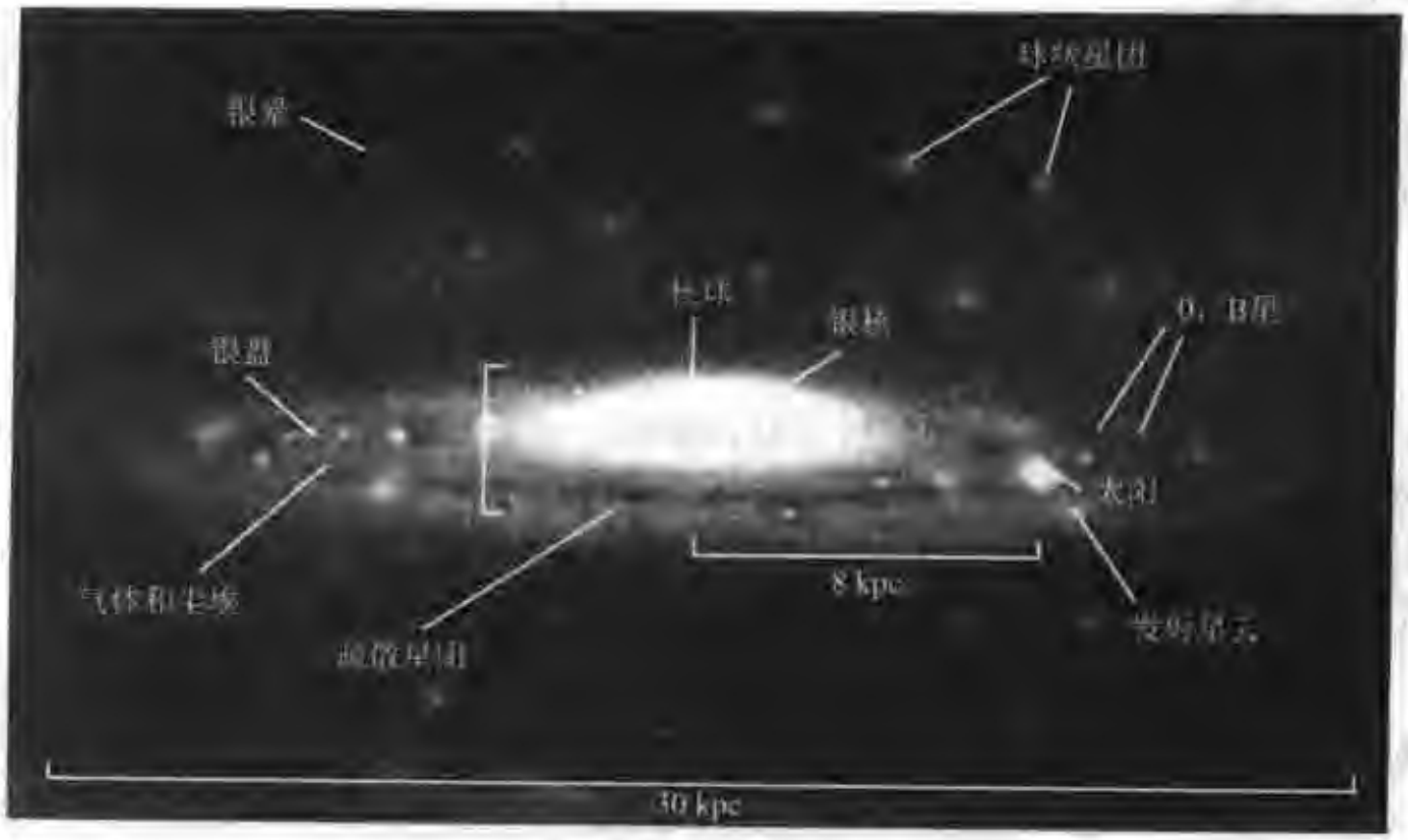


图 21.2 银河系的外貌

第 2 节 银河系里的恒星族

银河系内的 3 000 亿的恒星成员星中有单星，还有双星、聚星和变星，按年龄分有老年星，也有青壮年星和刚刚形成的恒星。恒星的重金属元素含量反映了年龄的区别。观测研究表明，恒星含重元素丰度高低不同的恒星在银河系的分布不同。含重元素丰度高的恒星大都分布在银盘里，也称盘星，它们都是些年轻而富有金属的星，并与电离氢气体云有密切联系，这些星叫**星族Ⅰ星**。

在银晕里的恒星大多是老年贫金属星，它们在宇宙的早期演化阶段就诞生了，叫**星族Ⅱ星**。

在银河系核球内的成员星是由星族Ⅰ和星族Ⅱ的恒星混合组成。

在银河系中也演绎着恒星生老兴衰的历史。在银河系的旋臂，有许多从浓密的分子云中刚刚诞生的原恒星；这里也不断发生超新星的壮烈爆发，它们在“昙花一现”之后，把自己的外壳携带着重元素抛散到太空，然后这些重元素又被一些星云吸收并孕育新的一代恒星生命。银晕是个古老而寂静的世界，它保持着银河系的原始风貌。虽然银晕中星际气体已消散无遗，但在那儿可以找到与星系同龄的老态龙钟的恒星，最老的恒星可能有 150 亿岁的高龄。大质量的恒星经历超新星爆发后，留下了中子星或着黑洞，它们已演化到了生命的尽头；在银晕中也有许多小质量星（$<3\ m_{\odot}$），它们慢慢地度过自己漫长的一生，逐渐演

变成白矮星。

近期的空间探测表明，在星族Ⅱ老年星的聚集区也发现了一些新诞生的原恒星。可见恒星和宇宙间的万物一样，都是生生不息、生灭转化、永无止境地循环着。

第3节 星 团

银河系里除了单星、双星外，还有许多由三五成群的在一起，互相有物理联系的恒星组成的多重星系统，称为**聚星**。按照恒星成员星的数目可称为三合星、四合星等。著名的北斗星中的开阳看起来是两颗星，实际上是由七颗星组成的七合聚星。

星数超过10个由万有引力联系在一起的星群，称作**星团**。大的星团有的可包含几十到几十万甚至几百万颗星。冬季夜空中明亮的昴星团"七姐妹"是由300多颗星组成的。

在银河系内有众多的星团，根据恒星密集度的大小，星团分为疏散星团（又称银河星团）和球状星团。

一、疏散星团（银河星团）

疏散星团的形状不规则，结构松散，但有共同的运动特性。疏散星团高度集中于银道面两旁，大都分布在银纬$-15°\sim+15°$处，所以称为**银河星团**，其中大多数成员星属于星族Ⅰ，是些年轻的恒星。

星团亮度用"累积视星等"表示，即把星团图像聚集到一点相应的视星等。较亮的疏散星团或银河星团有天蝎座的M6（NGC6405），金牛座的M45昴星团、NGC1647、NGC1746，双子座的M35（NGC2168）与天鹅座的NGC7092和大犬座的M41（NGC2287）等。图21.3是船尾座M46（NGC2437）疏散星团的图像，它距离我们5 400 l.y.，大约包含100颗星，累积视星等为6.1^m。

疏散星团的直径从1.5 pc到15 pc，大多数在2 pc到6 pc之间。有些银河星团外围部分叫团冕，其内包含了大量的暗星。



图21.3 疏散星团M46的图像

天文学家一般是利用高精度观测仪器测定恒星的自行，来研究疏散星团的质量和速度分层效应，并通过星团的各向同性特性来研究星团内恒星的运动。疏散星团的寿命与成员星的个数有关，成员稀少的星团寿命明显低于成员众多的星团。此外还发现，距离银心的距离越远、星团的平均寿命越长。在众多的疏散星团中，极年轻的星团所占比例相当大。

在疏散星团中有一类叫移动星团，它们离我们较近，成员星在空间互相平行运动，由于透视效应，我们看起来，这些成员星似乎来自一个辐射点。这种能够看出有辐射点的银河星团叫**移动星团**。著名的昴星团、毕星团、鬼星团、大熊星团、英仙星团、后发星团、天蝎-半人马星团和猎户星团都是移动星团。除了移动星团外银河星团都有共同的自行。

二、球状星团

众多的非常密集的星聚集在一起呈球状或椭球状的星团叫做**球状星团**。球状星团所含的成员星数一般比疏散星团多，多至几百万颗星。

确定星团成员星的主要标志是，相邻的恒星靠得很近，它们的空间运动大致相同；它们还作为一个整体在空间运动，其成员星都具有大致相同的自行。球状星团有非常高的光度(绝对星等-4^m～-10^m)。大部分球状星团的直径在20 pc～150 pc之间。

天蝎座M4(NGC6121)是较亮的球状星团，它距离地球约6 800 l. y.，累积视星等为5.93^m，视直径约$22.8'$。猎犬座M3(NGC5272)距离我们3.2×10^4 l. y.，累积视星等为6.2^m，视直径为$18.6'$。半人马座的NGC5139是很亮的球状星团，累积视星等为3.65^m，距离我们1.7×10^4 l. y.，视直径为$36.3'$。在银河系内大约有200多个球状星团。图21.4为NGC6934球状星团的图像。



图21.4 NGC6934球状星团的图像

银河系中球状星团的银面聚集程度小，而是围绕着银河系中心呈球形分布。球状星团内的大多成员星是星族Ⅱ星，即老年星，最老的恒星的年龄约150亿年。由于球状星团的累积光度很大，所以我们可以观测到较远的球状星团。

由于在银河系中的球状星团呈球形分布，所以利用球状星团可以很好地测定银河系的中心位置与银盘的直径。

第 4 节 银河系的质量

一、银河系的质量

由前述我们知道，银河系内的物质分布是不均匀的，在银河系核心的物质是致密的，旋臂处的恒星、星际物质和尘埃也非常密集，而在旋臂之间恒星和星际物质的密度是很稀薄的，银晕的可见物质也很稀薄的，但是可能还包含大量的暗物质，所以银河系的质量分布自然是不均匀的，也不能精确测定，只可大略的估算。比如我们了解太阳绕银心旋转的轨道速度以后，可以先估计太阳绕银心运动旋转半径以内的银河系质量。假定太阳绕银河系做圆轨道运动，并假设太阳轨道以内银河系的质量都集中在中心，由于银河系的质量比太阳大得多，根据万有引力定律，我们可以得到太阳旋转轨道内部银河系的质量 m_G 为

$$m_G = rv^2/G$$

其中 r 是太阳离银心的距离，G 为万有引力常量。已知 $r=8.5$ kpc，太阳处银河系自转速度 $v=220$ km/s，所以我们求得

$$m_G = 1.3\times10^{11}\ m_\odot$$

这就是说在太阳轨道以内的银河系的质量约为 1 300 亿个太阳质量。整个

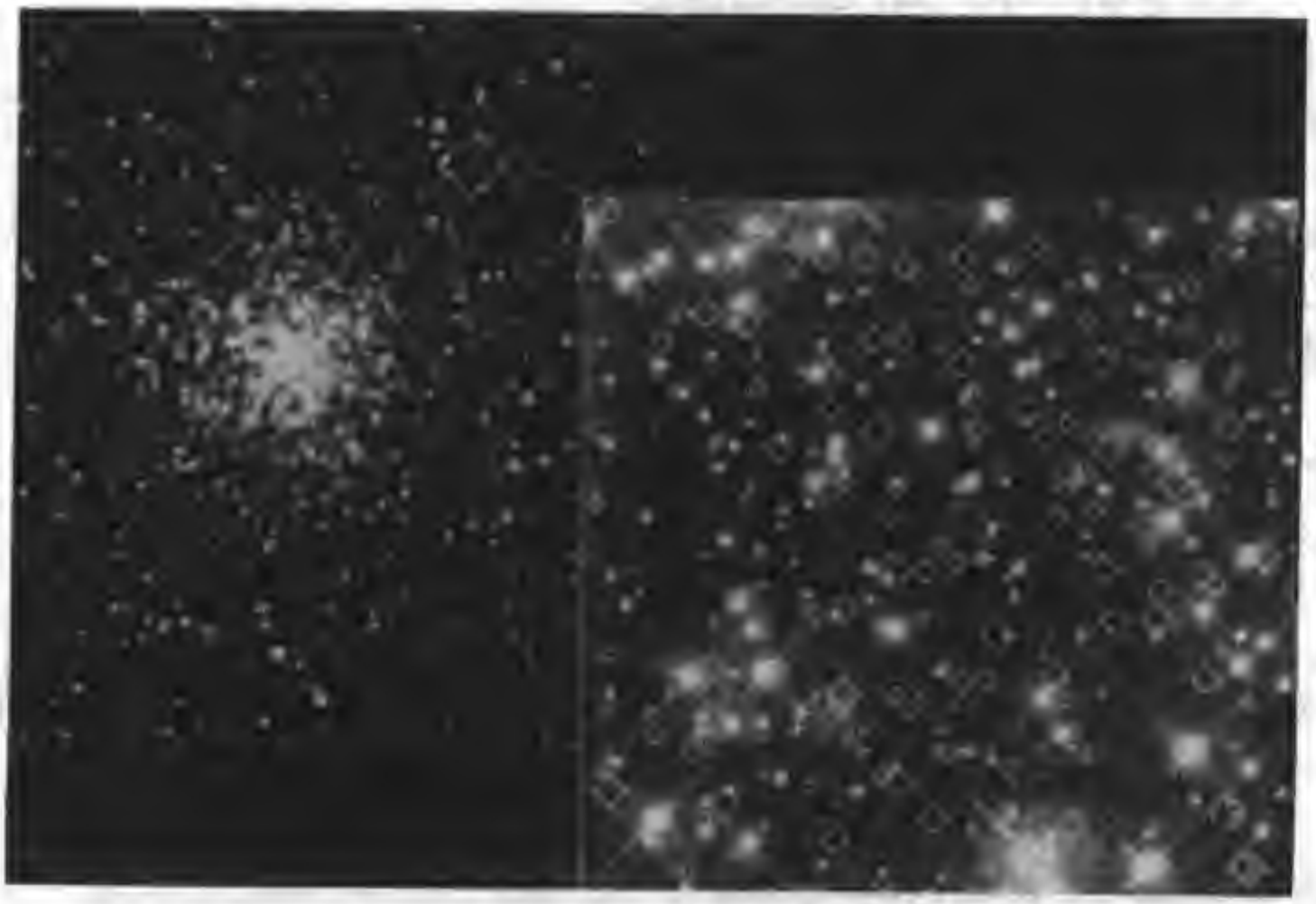


图 21.5 哈勃空间望远镜拍摄的银河系内的球状星团 NGC6397 的图像

银河系的总质量自然是远大于此。按照开普勒第三定律$m\approx a^3/P^2$推算，由银河系的自转周期P为2.25亿年，银河系半径a为25 kpc计算，银河系的总质量的数量级至少是$10^{12}\ m_\odot$，即银河系这个庞大的恒星系统约有1万亿个太阳质量，这里还没有计算银河系内弥漫的星际物质和被遮住的恒星及星际暗物质的质量。图21.5为哈勃空间望远镜拍摄的银河系内的球状星团NGC6397的图像，在0.4 pc范围的高分辨图像中发现了许多红矮星，它们(小方块所指)很可能就是暗物质。

二、银河系的质光比

天文学家常用星系的质光比，来研究星系的质量及演化。利用恒星计数可估计太阳系附近银盘的平均表面亮度。星系的质光比是这样定义的，即每单位面积的质量μ(质量面密度)除以单位面积的光度l，叫做质光比。质光比以太阳的质光比为单位，即$\frac{m_\odot}{L_\odot}=1$，所以银河系太阳附近的质光比

$$\mu/l=5m_\odot/L_\odot=5$$

这意味着银河系每单位质量平均产生的光效率比太阳低。这个结论与银河内有大量K型或M型矮暗星的观测事实一致，因为这些恒星质量虽小，但光度更低。银河系的辐射主要来自少数的大质量O型亮星、B型亮星和一些晚型巨星。

第5节 银河系的较差自转

银河系作为整体的自旋，这个事实是1887年俄国天文学家奥托·斯特鲁维发现的。他首次测定了银河系的自转速度。1927年，荷兰天文学家奥尔特根据大量恒星的视向速度的研究，证明了银盘上所有的恒星(包括太阳在内)都沿着一个近乎圆形的轨道绕银河系中心旋转，而且运动的速度是不同的：距银心比太阳近的恒星绕银心运转的运动速度比太阳快，距银心较太阳远的恒星运转速度比太阳慢。

根据银河系内太阳附近恒星运动规律的研究，银河系自转不像刚体那样处处均匀，随着离银河系中心的距离不同，旋转速度也不同，是一种较差自转。

较差自转这样明显的特征直到1927年研究了太阳附近的恒星运动才被发现。这是由于测量银盘旋转时，太阳也是一颗在银盘里的星，它与其他盘星一样绕着银心旋转。太阳的运动几乎与太阳周围恒星和气体云的平均运动相一致。因此，这个区域的物质相对于太阳系几乎是静止的。

银河系较差自转效应的初期研究，受空间尺度的限制，因为银河系很大，而光学天文允许观测的范围只限于银盘内太阳系近邻的区域。为了研究银河系的

大尺度结构，得到整个银河系的质量分布和较差自转的情况，需要知道太阳系附近以外位置的旋转速度。为了观测离太阳很远距离的目标，天文学家必须利用射电观测。因为光学观测受星际消光影响较大，而在射电的观测波段星际消光的影响可以忽略。近代，天文学家利用射电观测（观测原子氢 21 cm 谱线）创新了银河天文学的研究道路。测定的方法是利用射电望远镜观测银河系的 21 cm 谱线轮廓的极大值，由它的多普勒位移来测定在银经 L 方向，距离银心为 r 位置恒星的视向速度，再通过天体测量测定其自行和距离，最终确定银河系内恒星的旋转速度。把射电望远镜指向各个不同的银经 L，我们可以得到一系列离银心各个不同切点的径向距离 r 处的旋转速度。很明显，这个方法也只适合于那些径向 r 较小的值（银心到太阳距离之内）。

为了得到太阳轨道圆以外银河系的旋转曲线，天文学家观测造父变星，利用造父关系确定其距离。但是，当银盘里的恒星距离大于数千秒差距时，受星际消光影响大，天体亮度太暗，光谱观测很难，使我们还是不能测出太阳轨道圆以外很远处的银河系旋转速度。

近年来，利用射电望远镜观测位于银盘边缘区的一次电离氢 H Ⅱ 复合体是较好的方法，因为尘埃遮掩的影响对它相对比较小。研究这些 H Ⅱ 复合体中激发星的光学特性，并用测光的方法得到它的距离，最后确定它的旋转速度。然而由于 H Ⅱ 复合体往往与巨分子云相伴，所以这种方法也不完善。最近，人们通过射电观测 CO 分子线的视向速度来测定不同距离处的银河系旋转速度。利用这种方法，银河系旋转曲线几乎可以延展到 2 倍银心到太阳的距离。加上太阳圆轨道范围里 H Ⅰ 的观测，得到了范围较大的银河系旋转曲线（图 21.6 所示）。

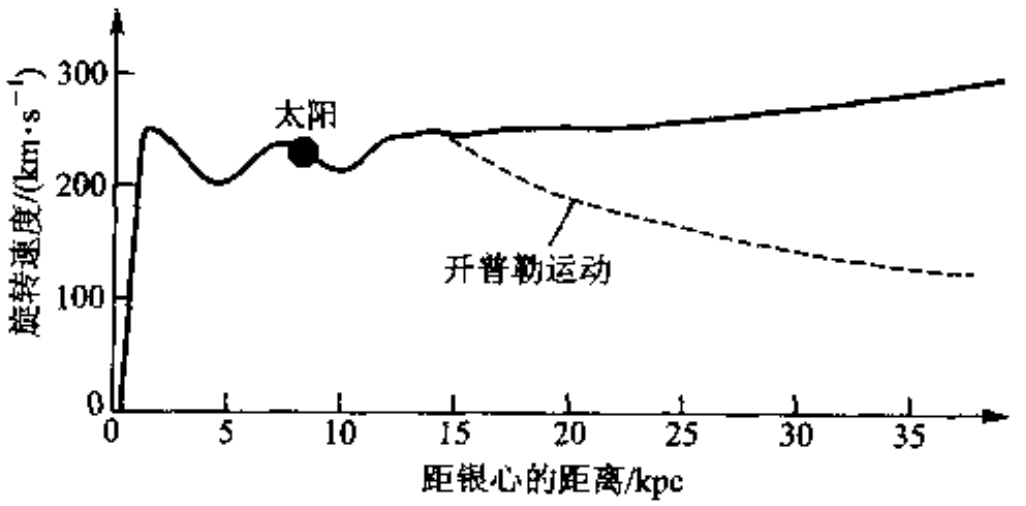


图 21.6 银河系的较差自转曲线（图中虚线是指按照开普勒运动定律计算出的旋转速度曲线，显然它与实际测定的旋转曲线偏离很远）

由图 21.6 我们很清楚，银河系确实存在**较差自转**，沿着银河系的径向自转速度变化很大。在银河系中心区域，即距银心距离 r 很小时，自转速度宛如一个刚体转动那样，各处的旋转角速度都一样，线转速度 v 与随着距离 r 增大，旋转

线速度徒升，直到 250 km/s，之后又随 r 的增加旋转速度减慢，到了离银心3 kpc 左右的地方，银河系的自转速度减到最慢，再往外的银盘区，恒星的公转速度又随着离银心距离 r 的增大而缓慢增加了。可见银河系的旋转曲线是条偏离开普勒运动的复杂曲线。

银河系内恒星的运动，可以看作两部分：(a)绕银心旋转的平均运动：任何恒星与附近其他所有恒星都有这种绕银心的运动。(b)随机运动：银河系内成员星除了围绕银河系中心转以外还有随机运动(也叫恒星的本动)，它叠加在平均运动之上，不同恒星有不同的固有运动。

恒星绕银河系中心的速度，一般要比随机运动速度大得多。在太阳附近的恒星，到银心的距离约为 8.5 kpc，太阳绕银心旋转的速度为 250 km/s，即每小时约 9×10^5 km。而太阳带领着它的“家族”——太阳系除了绕银河系中心运动外，还朝着武仙座方向奔驰，速度为 21 km/s。

在银河系中央核球里，大部分包含的是圆轨道速度小的恒星。于是，这些恒星形成一个几乎球形分布的中央核球。银河系晕包含着高速随机运动的恒星，这些恒星受银河系的束缚程度比中央核球里的恒星小。大多数恒星的随机运动速度为 20～30 km/s，而少数的“高速星”的随机速度竟高达 300 km/s。

上述说明两个很重要的事实：第一，银河系的确是一个浩瀚的恒星系统和一个庞大的天体系统。因为即使太阳以每小时 9×10^5 km 的速度飞行，它绕银心一周仍然需要 2.3 亿年的时间。第二，说明相对性原理，尽管太阳系绕银河系中心的运动速度非常之大，但是居住在地球上的人们并没有什么感觉。

假如银河系里一颗恒星的典型质量是半个太阳质量，上面粗略的质量估计给出太阳旋转轨道内部的银河系部分的质量大致包含 3 千亿颗恒星。在银河系里各类天体：恒星、双星、星云、星团以及所有星际物质(包括暗物质)等都处在永恒不息的运动之中。但是银河系很庞大，以至于恒星之间的空间距离平均竟有几百光年。如此大的距离，恒星永远不可能相互碰撞。除了双星和聚合星系统以外，事实上恒星很难有相互之间的引力交会，恒星主要是受到整个银河系的引力，而没有单个恒星的单独的引力拖曳。

银河系和其他星系一样是一个处于束缚态的恒星系统，单个恒星的轨道运动使得它们不因为整个系统有引力场的作用而掉进浓密质量的银心。

银河系作为一个整体除了自旋运动以外，还在宇宙空间向着一定方向做飞盘式运动。我们住在银河系里，虽然不能直接测定银河系本身在宇宙空间的运动，但是可以通过观测其他一些恒星系统相对于银河系的运动来研究银河系本身的运动。现在，人们已经测出，银河系除了自转以外，还朝着麒麟座的方向，以 211 km/s 的速度飞奔，也就是说银河系一边旋转一边向前飞行，像一个莫大的“飞盘”沿着一条复杂而奇妙的路线在太空中飞驰。

最近伊巴谷卫星的观测发现一批离我们有 1 600 l. y. 远的蓝星朝着银河系的边缘方向运动，致使银河系的银盘形状发生不对称的翘曲变形，这种翘曲从太阳轨道内侧就开始了，这说明我们的银河系在演化的里程里不断改变着自己的风貌。

银河系伴随着运动发生着动力学和化学元素的演化，并随着时间的演进改变着自己的风貌。

第 6 节 银河系的旋臂

银河系有着明显的旋涡结构，从核球伸展出来四条旋臂，这些旋臂主要是由 OB 亮星与一次电离氢(H Ⅱ)复合体聚集一起，而勾画出来的。

1951 年，摩根(Morgen)等首先勾画出银河系最靠近太阳的三条光学旋臂。当射电天文学发展以后，人们才知道银河系旋涡结构的全貌。多波段综合观测表明：银河系的旋臂密集了大量的 O 型和 B 型恒星(简称 OB 星)以及与它们成协的 H Ⅱ 复合体、分子云、超新星遗迹和 γ 射线源等，它们是银河系旋臂的示踪物。银河系的旋涡结构可能延伸到太阳轨道以外很远的地方，但是，在遥远的地方旋涡结构的上述示踪物的辐射明显地变弱了，很难观测到。



图 21.7 M74 的图像

银河系内的物质分布是不均匀的。银河系中心有棒状的核球，由此延伸出四条旋臂，在旋臂处恒星、星际物质和尘埃非常密集，而在旋臂之间恒星和星际物质的密度却很稀薄；旋臂处恒星和星际物质的密度大约是旋臂之间密度的 10 倍。假如我们能正面看银河系，也可能会看到像 M74(参见图 21.7)那样的一幅图像。

M74 的光学照片展示出由两条旋臂组成的很漂亮的旋涡图样，旋涡结构看起来非常清晰，因为旋臂是由光彩夺目的年轻 OB 亮星和一次电离氢(HⅡ)复合体描绘出来的。看起来它们像闪闪发亮佛珠被串在旋臂上。这些所谓的"佛珠"际上是巨大的一次电离氢(HⅡ)复合体，沉浸在里面的 OB 星使得这些复合体发射出可能比猎户星云大几千倍的荧光。这种 OB 恒星在主序星的寿命只有几百万年。于是，与可能有一百亿年年龄的银河系比较，这些大质量恒星的寿命是很短暂的。新的恒星不断地从弥漫在星际空间的气体和尘埃云中产生，且不断地替代那些年老的恒星。

有人可能误认为银河系的旋臂是由固定的 OB 恒星和一次电离氢(HⅡ)复合体及气体和尘埃组成的物质臂。1942 年瑞典科学家林德布拉德否定了这种说法，提出了密度波理论。他提出了银河系的旋臂不是由一些固定恒星、气体和尘埃物质组成的，而是运动的密度波的呈现。因为如果旋臂真的是由固定的恒星、气体和尘埃组成的话，在银河系较差自转的带动下，旋臂会因为里面比外面转得快而越转越紧，也就是说随着时间的推移旋臂会变得越来越密(如图 21.8 所示)。然而，直到目前并没有找到旋臂旋紧成一圈或多圈的任何观测证据。



图 21.8 按照银河系较差自转解释旋臂形成，物质旋臂应该绕转得越来越紧

1963 年天文学家林家翘和徐遐生等人发展了密度波理论。他们认为旋涡结构是一种波现象，此波是大尺度物质分布维持与自引力平衡的一种密度波。恒星在绕银心旋转时，绕转速度和空间密度都是波动变化的。当恒星和星际物

质进入引力势较低的区域时速度变慢，恒星显得密集，波密度极大的波峰处就呈现为旋臂的图像。为了理解密度波理论的基本概念，可以把恒星与汽车的运行类比，即把较差旋转星系中的恒星，想像成运动在圆形高速公路上各个不同速度车道上的汽车。如图 21.9 所示，假定因修路关闭了某一个车道中的某一路段，这个区域交通堵塞会使汽车密度增加，但是汽车最集中的区域不是由相同的汽车组成的。更确切地说，每辆汽车都通过了汽车拥挤的地方，但是从空中直升飞机拍摄的照片显示，汽车最集中的地方总是发生在正在修路的路段。很清楚，单个汽车跑的速度和修路工程进行的速度是完全不同的。用科学术语来说，交通阻塞代表汽车的密度波，密度极大值的速度（密度波的速度）完全不同于单个汽车的速度（物质的速度）。由于旋涡星系物质不完全是轴对称分布的，它的引力场使恒星和气体云运动转向，这类似于汽车到修路段时转向比较通顺的车道。

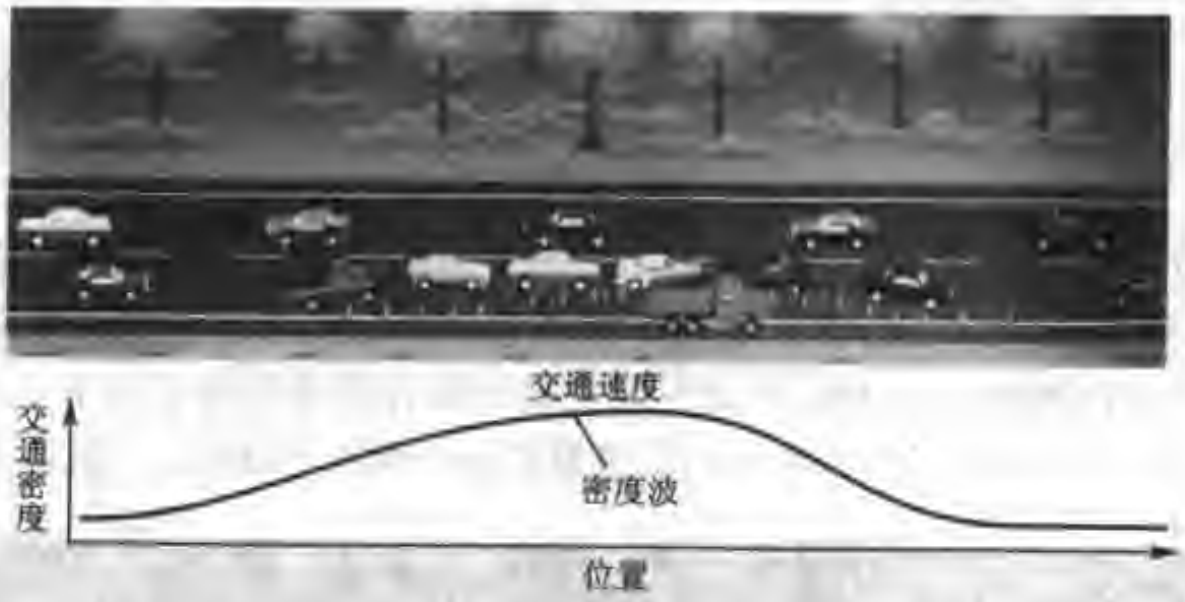


图 21.9

密度波理论设想星系中恒星和气体在绕星系中心旋转时，转动速度与空间密度都是以波动变化的。运动快时，空间密度变稀；运动慢时，空间密度变密。这种波动变化既绕中心环行传播，又沿径向方向传播，密度极大的波峰构成了旋涡状的旋臂（参见图 21.10）。恒星进入旋臂时，因恒星密集，其引力场强，速度就放慢。另一方面，也正因为速度放慢，使恒星挤在一起，密度加大，引力增强，因而使这种状态得以维持，使旋臂的图样保持不变，但旋臂上的物质却是川流不息。

为什么快速较差旋转的星系会产生密度波呢？这是由于星系总是要使它内部获得较多的束缚能而引起的。像银河系这样的快速旋转的盘星系，内部发生任何收缩都必须遵循系统总角动量守恒原理。假设由于内部原因迫使一个旋转星系收缩，角动量守恒的趋向将加快它的旋转速率，它在旋转中又把部分物质抛回到外空间。为了得到持续的变化，星系内部的某些角动量必然要向外转移。

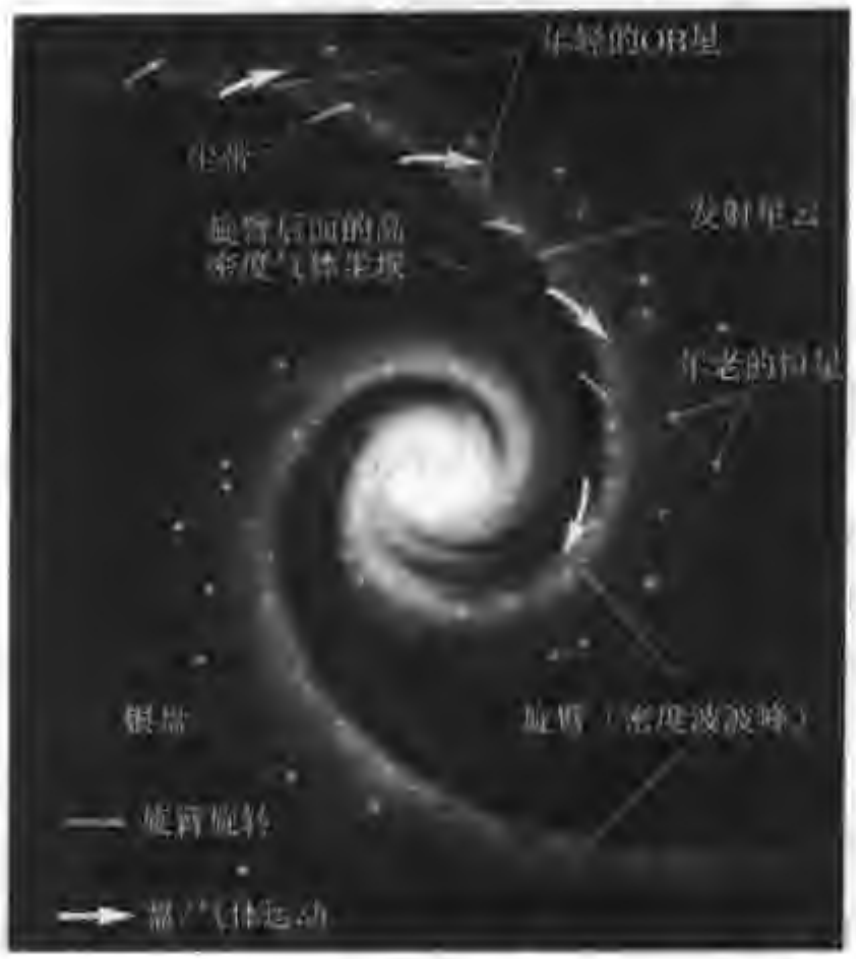


图 21.10　银河系旋臂的密度波解释图示(白箭头是旋臂的运动方向,黑箭头表示恒星运动方向,它们要穿越旋臂)

这种转移实际上是由拖曳的旋涡密度波来完成的。

在既窄又长的整个旋涡径迹上,是什么机制触发恒星同时形成呢?理论和观测都能证明:大部分 OB 恒星在旋臂里诞生特别频繁,其程度远大于星系总质量的增加所估计的恒星诞生数。这是由于星际气体和尘埃的随机速度比典型的盘星小得多,于是对于小振幅的密度波,气体和尘埃的响应要比盘星大得多,可能发展成激波。经历一段时间以后,激波后面大量原始物质聚集,这会促使在激波前沿下恒星的形成。

毫无疑问,在这种激波后面,星际物质的压缩提供了大质量恒星诞生的有利条件。在盘上新恒星的形成又驱动了波。比如超新星爆发时在星周围形成发射星云,并传播出激波,激波穿越星际气体时就可能触发了新的恒星形成。

实际上,旋臂旋转速度(密度波速度)落后于星系旋转速度。因为 OB 恒星的寿命比起它从一个旋臂诞生到另一个旋臂迁移所花费的时间是很短暂的。于是连续不断形成的 OB 恒星与成协的 H Ⅱ 复合体,应该是旋涡图样的最好示踪物。虽然 OB 恒星包含一小部分星系质量,但它们的易见性使得它们成为旋涡密度波波峰的标志。这如同白沫浪是冲击水波的波峰标志那样。这些物质粒子(如白沫浪)的运动速度与波不同,而且形成和出现的时间比物质粒子从一个波峰到另一个波峰所需时间短。OB 恒星和与它们成协的 H Ⅱ 复合体坐落在波峰

上，不是因为它们的运动与波有同样的速度，而是当我们后来再看这个波的时候，我们看到的不是原来的 OB 恒星与 H Ⅱ 复合体。

第 7 节 银河系的中心

在银河系的核球里，很多恒星和气体云、分子云、尘埃云密集在一个小的体积内，核球的密度大约是太阳附近区域密度的 1 百万倍。核球的中心叫银心。银河系中心在人马座方向（赤道坐标 1950.0 $\alpha = 17^h42^m29^s$，$\delta = -28°59'18''$）。由于太阳是一个盘星，受星际尘埃遮掩的影响，使我们几乎看不清银心的另一边甚至银心附近的天体。虽然光学手段不能观测银河系中心深处，但是现代，应用射电波、红外、X 射线和 γ 射线波段的观测人们可以清晰的看到银河系中心深处。

一、银河系中心的黑洞

近年来，由射电和空间探测，在距离银河系中心约 1～2 l. y. 的范围内，发现有两个射电辐射很强的射电源。一个叫人马座 A 东；另一个叫人马座 A 西。来自人马座 A 西的中心区有一个尺度小于 30 亿 km 的致密区，发射的辐射不是热辐射而是高速电子（接近光速）在磁场中产生的同步辐射。这个结构复杂的非热辐射源是个小的致密区叫做人马座 A*（图 21.11）。它的质量约为 250 万个太阳质量，它发出的射电辐射没有脉冲，非常稳定，其光度比亮的脉

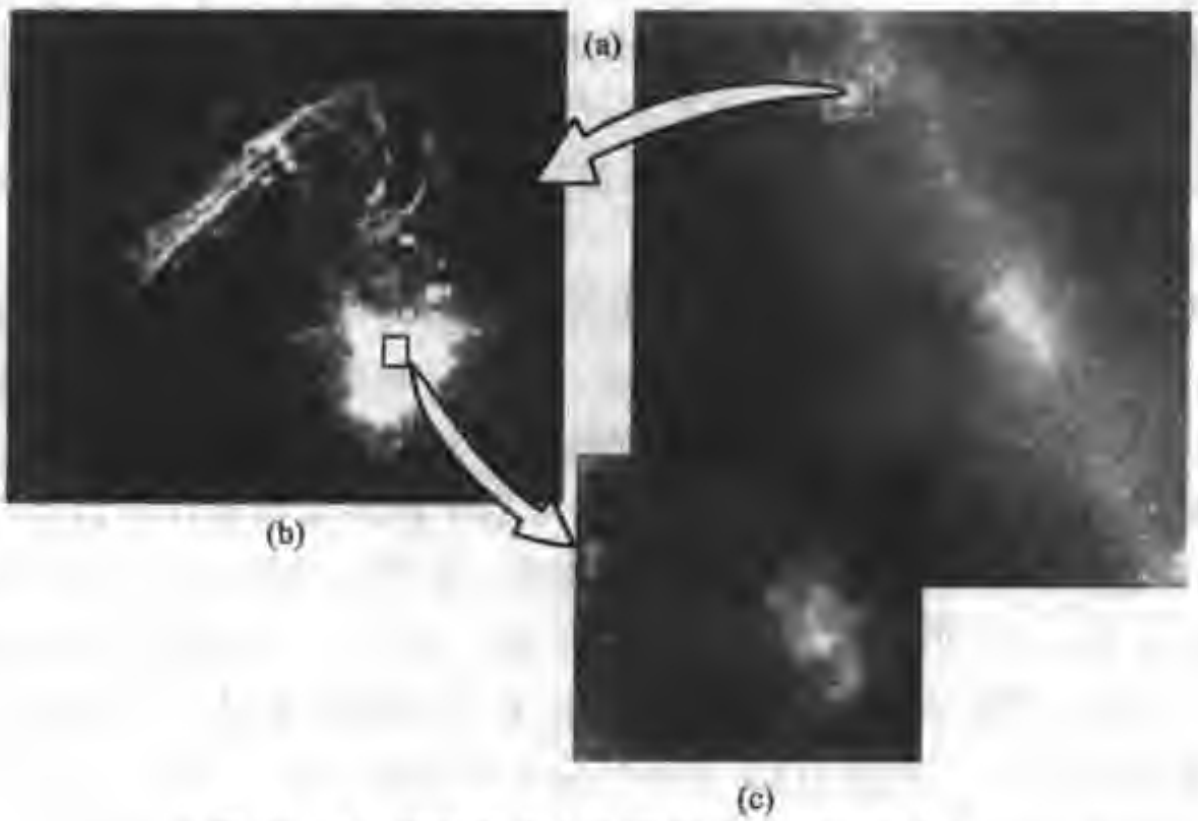


图 21.11 银河系中心人马座 A*（Sgr A*）

(a) 人马座 A* 红外波段的图像；(b)、(c) 局部的射电图像

冲星强 1 万倍左右，所以它不可能是脉冲星。此外观测到的 X 射线强度比一般 X 射线源的强度弱很多，然而它的射电流量比一般 X 射线源要强 10 万倍，甚至比 X 射线暴还强 10 倍。此外，红外天文卫星(IRAS)发现了一个红外源 IRS16，它与人马座 A* 的位置完全重合。这个红外源非常致密，光谱测量表明，围绕它的轨道上的气体云被加热到 300 K；根据气体云的运动，推测这个红外源的总质量约为 500～800 万个太阳质量，然而在这个区域，由多波段观测推测出的恒星总质量只有 250 万个太阳质量；那么必定有 300～600 万个太阳质量的物质是看不见的物质。因此，众多天文学家认为，人马座 A*（SgrA*）很可能是巨型黑洞。

1997 年 6 月中国科学家张双南等根据日本 ASCA 卫星及美国 RXTE 卫星的观测资料，论证了银河系有两个 X 射线源(GRO1655－40 和 GRS1915＋105)都是 X 射线双星，这两个双星系统中都包含一个自旋的黑洞。

近期有的天文学家估计，在银河系已存在的 100 亿年里，只有那些出现在距离银河中心 15 l. y. 以内的黑洞才有足够的时间移到银心附近，假设有 1/5 的恒星具有大于 8 $m_\odot$ 以上的质量，在超新星爆发后留下黑洞，那么银河系中心充斥着许多由爆发恒星形成的黑洞，大约有 2.5×10^4 个黑洞隐藏在我们银河系的核心。

二、银河系的 γ 射线晕

在 80 年代初，γ 射线天文卫星 COS－B 完成了对整个银河系的 γ 射线探测。COS－B 卫星发现在银河系的高银纬处存在着弥散的 γ 射线辐射。1997 年 11 月，科学家又进一步找到银河系存在有巨大 γ 射线晕的证据。观测到的 γ 射线图像分析表明，除了已知的点源和在银心区的辐射增强外，还有延伸到高银纬的大尺度弥散的 γ 射线辐射笼罩在整个银河系周围，称作 γ 射线晕。分析认为，这些暗 γ 射线可能来自中子星，也可能是宇宙线中较低能量光子的散射，也可能与反物质有关，因为反物质与正物质相遇发生湮没，可同时产生 γ 射线。

三、银河系中心区的磁场与喷流

最近爱因斯坦天文台卫星观测发现在距离银心小于几光年范围内有一个低能 X 射线源，在其附近还有一个高能 X 射线源。据磁场的观测分析表明，银河系的磁场从银心延伸到 6 400 l. y. 范围内，磁场的强度为 10^{-8} T(特拉斯)。在银河系中心区还探测到了有抛射高速气流的喷流现象，有的喷流长达 13 l. y.，其方向垂直于银道面。澳大利亚天文学家在银心附近也发现了一个长约 150 l. y. 的很窄的纤维状天体，它不同于其他纤维天体，至少有一个明显的扭结。这是否也是喷流？为什么存在扭结？目前不得其解。

四、银河系内发现有反物质喷泉

1997 年，美国科学家根据美国卫星康普顿 γ 射线天文台 CGRO 的观测，经过分析处理，得到的银心附近区域 511 keV 的 γ 射线的精细图像，发现一个位于银河系中心的巨大的反物质喷泉。我们知道正电子是电子的反物质形式，它和电子相碰会互相湮没，发出两个能量为 511 keV 的 γ 射线光子。若认为这一反物质喷泉在银河系的核心，那么该反物质喷泉须每秒产生 1 042 个正电子(约 10 亿吨)，才可能达到我们观测到的 511 keV 射电亮度。有的科学家认为，高速的反物质喷泉位于银河系核心附近的恒星形成区，经过非常长的旅程后，速度下降并和周围的电子湮没，最后形成人们观测到的 511 keV 的 γ 射线辐射亮度。

第 8 节 银河系的形成和演化

在银河系中球状星团内都是些老年星，他们至少有 100 亿岁的高龄，换句话说，它们是银河系里最早形成的天体。银河系的年龄至少比它们大。天文学家根据大量的观测事实提出了许多银河系形成的理论假说，这里我们介绍一种有关气体云的主要论述。

宇宙中有许多的浩大的密度分布不均匀的星云，其中有一个质量至少包含现在我们银河系的总质量，它的形状是不规则的，在自身的引力作用下不断地收缩凝聚，内部逐渐形成许多密度较大的球状团块。每一个球状团块至少有 10 万倍的太阳质量。这些团块在自身引力作用下又进一步收缩，而且它们比银河系整体收缩得更快，最终破碎成许多小块的密度凝聚区，它们后来演化成新生的恒星。众多的恒星和星际气体物质形成了球状星团。这些球状星团在空间成球状分布，并在空间沿着圆轨道运动。其余的气体云继续塌缩，压扁成盘状。核区的气体物质塌缩得最快，所以核区密度最大。由于物质的角动量是守恒的，伴随着气体云的塌缩，引力能的释放加速了旋转，这就形成了银河系的自转。在核区内都是些老年星，在银晕的球状星团里也聚集着高龄的老年星，然而在银盘里居住的大都是些中、青年星。银河系从形成起，在运动中演化，不断地成长和发展。

上面描述只是银河系形成的简化模式，忽略了伴星系及内部磁场的作用，也没有解释银河系的细致结构及旋臂的形成。银河系并不是孤立的，它的诞生与生命历程都要考虑与邻近星系的相互作用。最近哈勃望远镜就探测到：距离我们银河系中心 5 万光年的人马座矮星系正朝着银河系方向落下，它将在几亿年内被银河系吞食掉。由此可见，绝不能忽视星系之间的作用。我们的银河系与河外星系的碰撞与合并在形成与演化的历程中起着重要的作用。最近宇宙学家提出一种“碰撞星暴”的恒星形成假说(参见图 21.12)，即认为两个星系之间碰

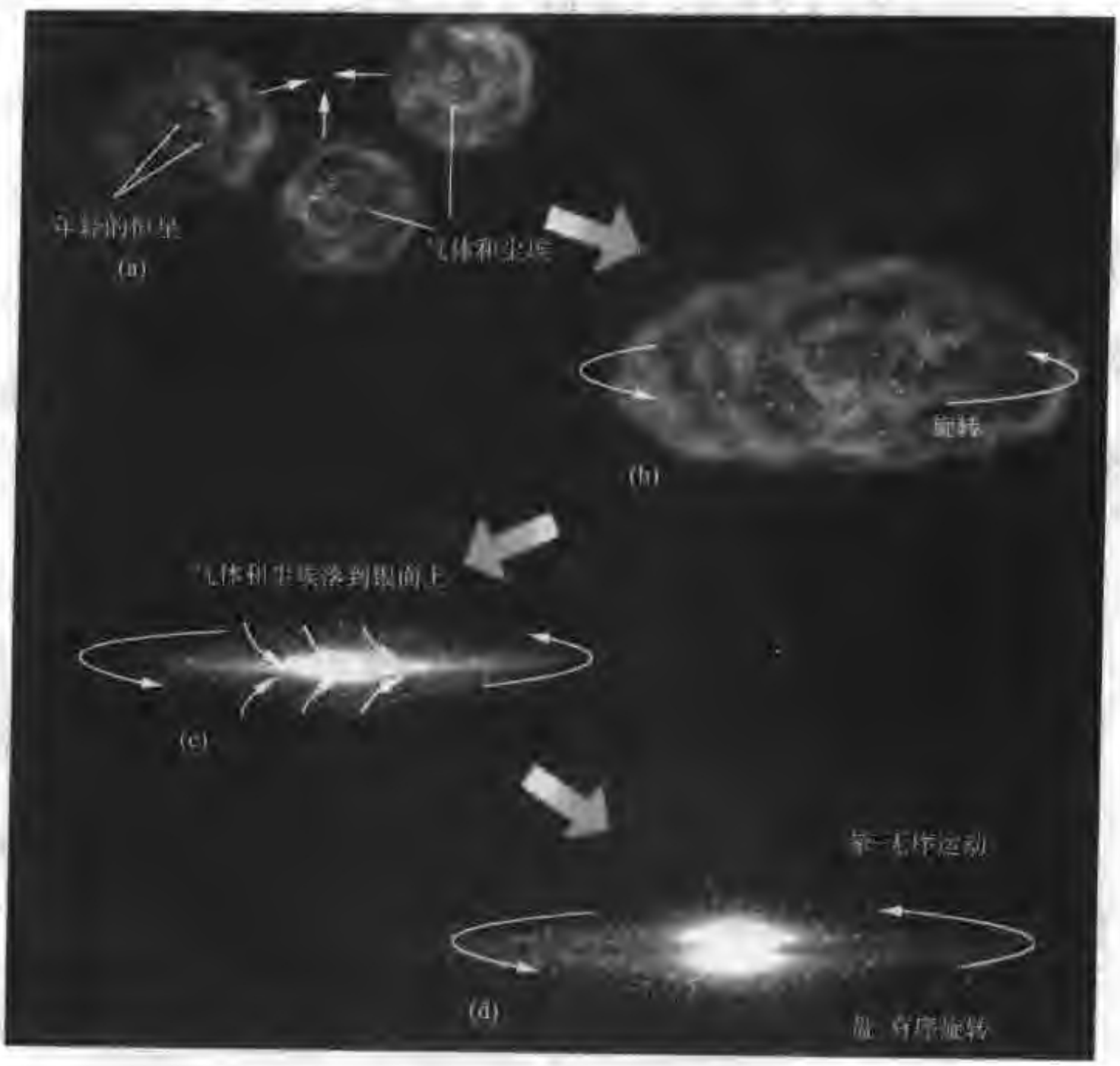


图 21.12 银河系形成的一种星云假说

(a) 由年轻恒星、气体和尘埃碰撞合并形成了星云;(b) 星云收缩并开始旋转;

(c) 气体和尘埃落向盘面,释放的引力能加速了盘的旋转;

(d) 银盘有序的旋转,银晕物质有随机的运动

撞时,气体云朝着较大星系的中心聚集凝结,与此同时,低密度的气体云凝聚块以非常高的速度凝结,并发生爆发,形成恒星。这种理论还有待于新的观测研究来证实。

习 题

1. 计算一个星云的角直径,此星云的半径为 100 AU 与地球距离为 100 pc,并与具有角直径大约 6°的仙女座星系做比较。

2. 天琴座 RR 星的绝对星等为 0^m,它可以被一个能检测到 20^m 的望远镜看到,问天琴座 RR 星的最远距离是多少?

3. 一个典型的造父变星比天琴座 RR 星的亮度亮 100 倍，作为距离、星等的量天尺工具，造父变星比天琴座 RR 星可以测的距离远多少倍？

4. 哈勃空间望远镜可以观测到在 10^7 pc 远的类太阳的星；造父变星的光度是 3×10^4 倍太阳的光度，问用哈勃空间望远镜能观测到多远的造父变星？

5. 一个球状星团具有 200 km/s 的切向速度，距离地球 3 kpc 求它的自行($''$/a)？

6. 如果在距离银河系中心 20 kpc 半径处的旋转速度是 240 km/s，求在 20 pc范围内的总质量。

7. 一个密度波形成两个旋臂，此密度波正在穿行银河系的圆盘，在距离银河系中心 8 kpc 的太阳轨道半径处绕银心的密度波速是 120 km/s；银河系的旋转速度是 220 km/s，问此密度波自从 46 亿年以前以来太阳已穿行一个旋臂多少次？

8. 观测到在距离银河系中心角距为 0.1$''$处的物质具有轨道速度 1 100 km/s。如果太阳距离银河系中心 8 kpc，物质运动的轨道是圆的，而且可以看到边缘，计算物质做圆轨道运动的轨道以内的物质的总质量。

9. 天琴座中的行星状星云具有角直径 83$''$，离开我们的距离为 660 pc，求它的线直径是多少天文单位？

10. 武仙座星团距离我们 1.05×10^4 pc，它的角直径等于 12$'$，累计亮度为 5.9^m，算出此星团的线直径和它的绝对星等。

第二十二章

河外星系

我们的银河系在宇宙的汪洋大海之中只是"沧海一粟",在银河系以外是一个更为广阔、更为壮观的河外星系世界(图 22.1),它们是由恒星、气体和尘埃组成的庞大天体系统。著名的大麦哲伦云、小麦哲伦云及仙女座大星云都是河外星系。众多的河外星系千姿百态、神采各异,有幼儿星系、中年星系和处于暮年的老年星系。星系之间有的互相作用,也有的正在分裂瓦解或互相吞食,展现在人们面前的是一个神奇壮观、魅力无穷的星系世界。



图 22.1　宇宙中五彩纷呈的河外星系

第 1 节　星系的形态分类

人们对河外星系的认识经历过漫长的过程。早期,人们通过望远镜看到深邃的星空有一些朦朦胧胧、形态各异的云雾状光斑,认为都是气体星云。直到 1926 年,美国天文学家哈勃观测仙女座大星云时,才发现所谓星云是由大量很暗的恒星组成的。他利用其中的造父变星求出仙女座大星云离我们有 80 万光

年之遥(据现代观测这个距离应当是 220 万光年),由此推算出它不属于银河系,而是在银河系之外的另一个星系。此后,人们发现许多原来的星云其实就是河外星系。

哈勃关于仙女座星系距离的开创性发现,打开了河外星系研究的前沿。现在估计,在观测宇宙里大约有 10^{10} 个星系。这当中有不少质量与银河系不相上下,但绝大部分都很小,也有一些质量非常巨大的星系。

一、哈勃星系形态分类

在浩瀚的宇宙中,河外星系的形态各异、婀娜多姿。为了研究方便,哈勃按照星系的形态将星系大致分为椭圆星系(E)、旋涡星系(S)棒旋星系(SB)和不规则星系(Irr);此外,有少数星系像旋涡星系那样扁平,但却看不见旋涡结构的,叫透镜形星系(S0),带有旋棒的透镜形星系叫 SB0,它们是一种过渡类型。如图 22.2 所示。旋涡星系和棒旋星系可能占所有星系的百分之七十。不规则星系只占百分之几,其余是椭圆星系等。因此,大部分可观测宇宙的质量包含在旋涡星系、棒旋星系和椭圆星系里面。

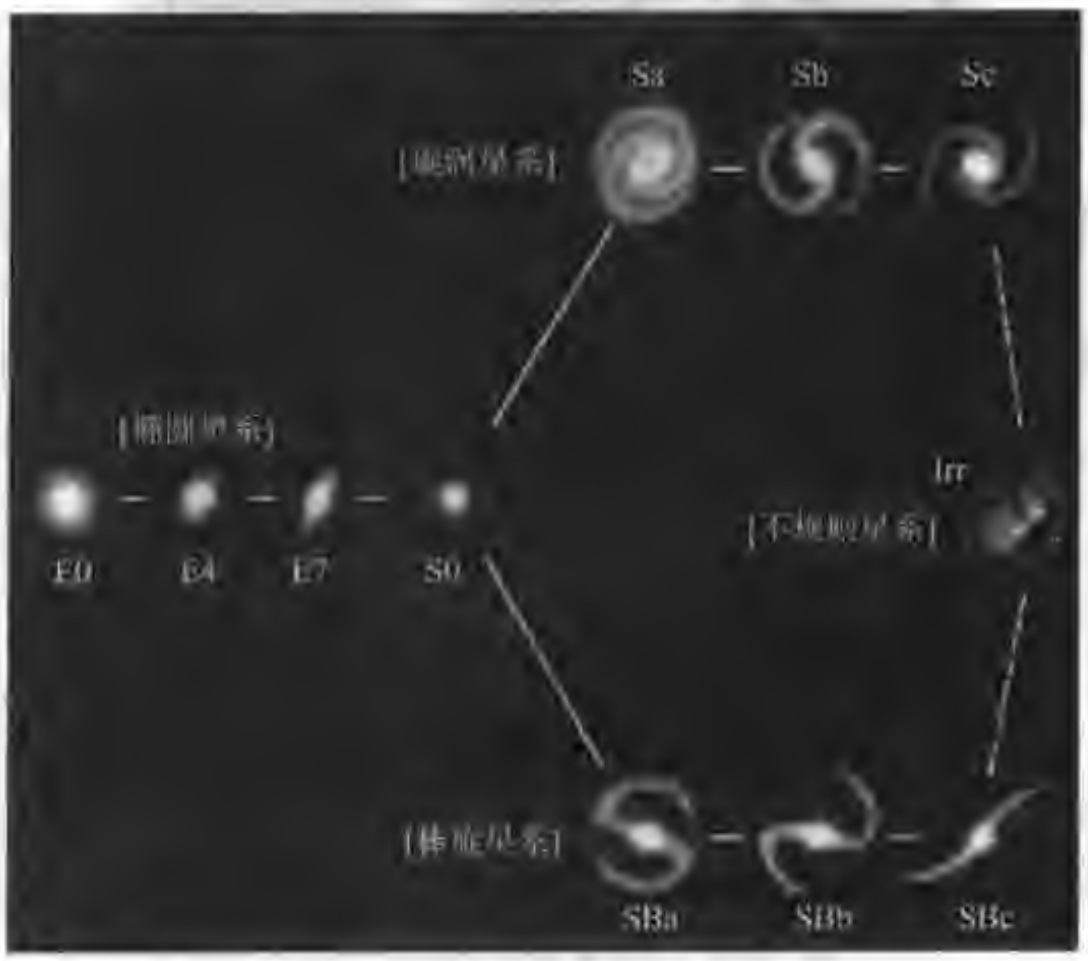
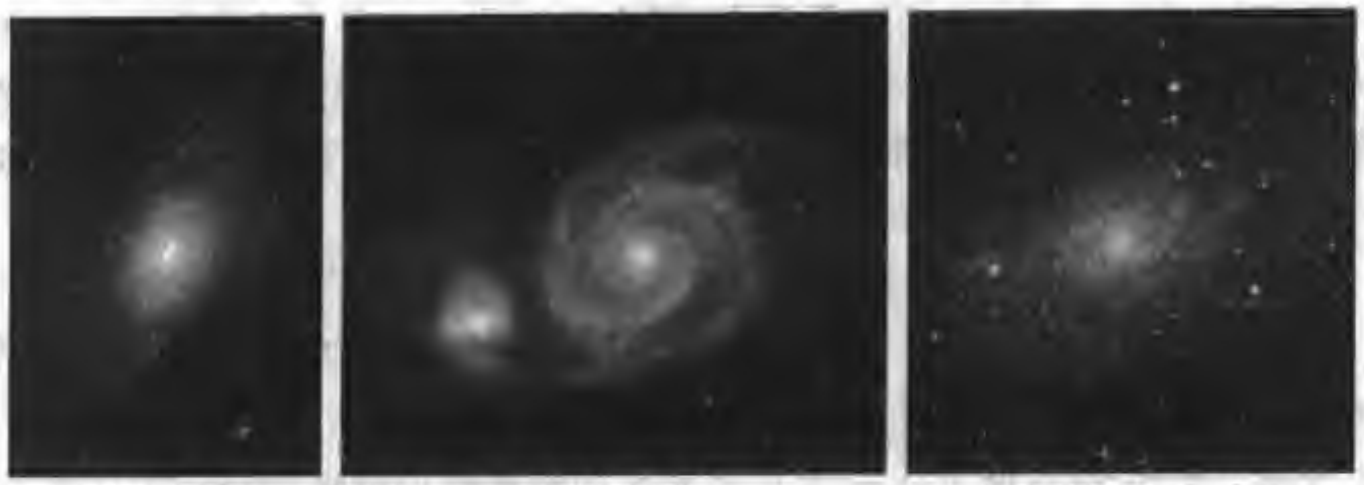


图 22.2 哈勃的星系形态分类

1. 旋涡星系(S)

旋涡星系的特征是有由中心核球螺旋式地伸展出去,像车轮状包围着星系的旋臂,呈旋涡状。旋涡星系一般按中心核球的突起程度和旋臂缠绕的松紧分

成三大次型：Sa，Sb 和 Sc。参见图 22.3。其中 Sa 星系中心的球核最大，旋臂收得最紧，例如 M81 星系。Sc 星系的球核最小，旋臂散得最开，例如 NGC2997 星系。Sb 型的旋臂散开的程度介于 Sa 和 Sc 型之间，例如 M51 星系。



M81　Sa型　　M51　Sb型　　NGC2997　Sc型

图 22.3　三种类型的旋涡星系



图 22.4　草帽星系 M104(Sa 型)



图 22.5　仙女座大星云——M31 星系(Sb)和它的伴星系 NGC205(E6 型，在图的左下方)

草帽星系 M104(图 22.4)属于旋涡星系 Sa 型,由于它的旋臂的边缘向着我们,所以看不到旋臂,星系中间的暗带是由星际气体和尘埃组成的。仙女座星系是距离我们最近的旋涡星系之一,属于 Sb 型,它斜对着我们,看起来是长长的椭圆形(图 22.5)。它的中心部分最亮,因为那里的恒星最密集。在它的旋臂上有热巨星、星际气体、尘埃状物质、疏散星团等。NGC3642 星系,三角座的 M33 星系及 NGC2841 星系等都属于 Sb 型。S0 型星系介于椭圆星系与旋涡星系之间,其旋涡结构不明显,例如 NGC1332 星系就是 S0 型。

2. 棒旋星系(SB)

棒旋星系的核心部分具有一个亮的棒状结构,棒的两端向不同方向延展出旋臂。根据核球的大小和旋臂缠绕的松紧程度,棒旋星系分为 SBa、SBb 和 SBc 三个次型。如图 22.6 所示,SBa 型棒旋星系的旋臂缠得最紧,例如 NGC3992;SBc 型棒旋星系旋臂伸展得最开,例如 NGC1300 星系;SBb 型棒旋星系的情况介于 Sba 型和 SBc 型之间,例如 NGC1443。



NGC3992 SBa型　　NGC1443 SBb型　　NGC1365 SBc型

图 22.6 三个不同次型的棒旋星系

最近,棒旋星系的发现又有新进展。天文学家利用大望远镜附加 CCD 探测器和红外阵列器件,发现了一些原来利用照相方法不可见的旋棒;而且很多棒旋星系不仅有一个大尺度的主棒,还有较小的次棒镶嵌在核内,平均来说,这些次棒的尺度是主棒的七分之一。例如飞马座旋涡星系 NGC7479 在核心区有三个层次的棒镶嵌在核球内。在不同星系里,这些次棒相对于主棒的轴向角不同。星系的气体很可能是通过次棒转移到核心的,而在核心那里,黑洞正等待着"吞食"星系物质和星际气体。

大多数旋棒星系呈二维椭圆图像,其半短轴和半长轴之比,$b/a \approx 1/5$,在一个次型内,此比率可能有些变化。不同星系旋棒的长度和盘面的相对大小也相差很大。一般,棒旋星系中心的棒结构并不是平滑的,即有明显的"盒"状物或"花生"状结构,例如,IC4767 的 R 波段图像就呈现出类似花生的结构。

3. 椭圆星系(E)

椭圆星系是很普遍的一类星系，外形呈卵形，看起来是椭圆形或正圆形。有的椭圆星系很扁，也有的椭圆星系很圆。按椭球的扁平程度 n，细分为 8 个次型：E0，E1，E2，…，E7。

扁度 n 的定义：设半短轴 b 和半长轴 a，则扁平度为 $n=10(a-b)/a$。

需要指出的是，我们看到的只是星系的视扁度，真扁度由于短轴的取向不清楚而无法确定。

非常圆的球形星系定义为 E0 型，椭率越大的，椭圆拉得越长；E7 为最扁的椭圆星系。例如 M49 星系为 E1 型(图 22.7(a))；M84 星系为 E3 型(图 22.7(b))；仙后座星系近旁的 NGC147 星系属于 E4 型，仙女座星系的伴星系 NGC205 属于 E6 型。椭圆星系的总光度比较低，特别明亮而巨大的占少数。



(a) M49　E1型　　(b) M84　E3型

图 22.7　两种类型的椭圆星系

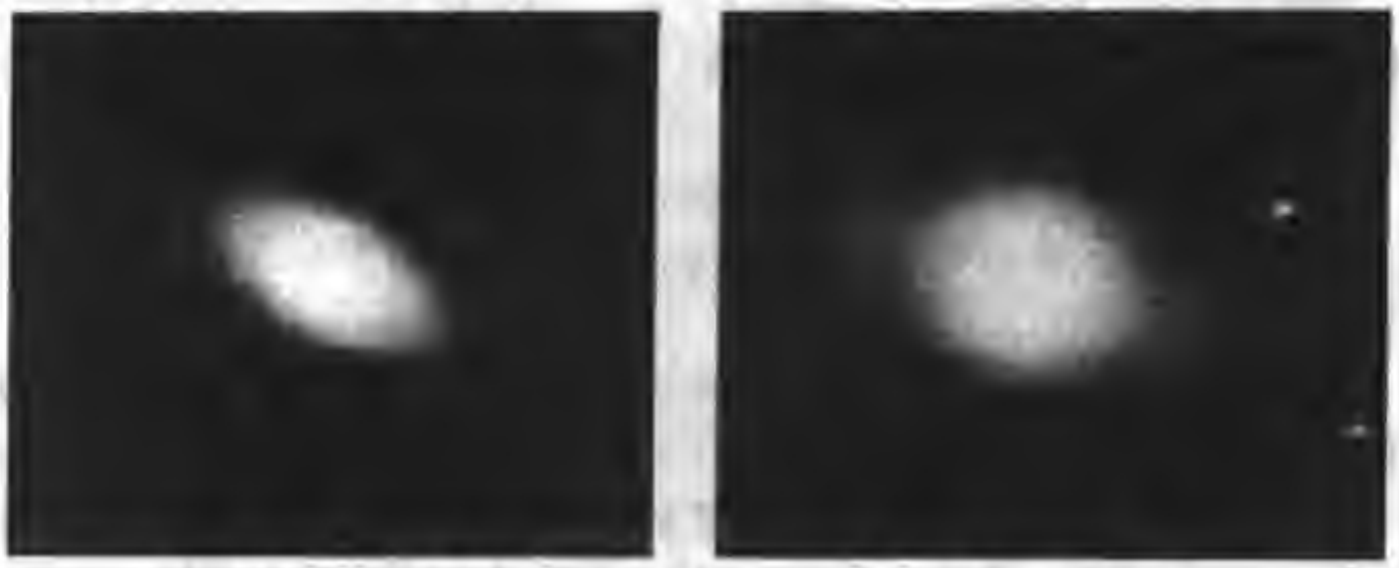
M87 星系原来由地面望远镜观测时，它是一个标准的椭圆星系属 E0 类，然而 1998 年哈勃空间望远镜拍摄的 M87 核心的图像却可分辨出有三条旋臂。最近，“轨道天文台”卫星还发现在 M87 星系核心处有喷流，并揭示出有星系盘存在，而且此盘的中央有可能是黑洞，于是它应当属于活动星系。

4. S0 型和 SB0 型星系

在哈勃星系分类的 E7 型和 Sa 型之间有一种类型星系具有薄的盘，中间部位的隆起比较平坦，不包含气体晕也没有旋臂，称为透镜星系。透镜星系有明亮的核球和盘，核球内没有棒的是 S0 型星系，例如 NGC1201；如果核心区是棒状则叫 SB0 型，例如 NGC2859 星系。参见 22.8。

5. 不规则星系(Irr)

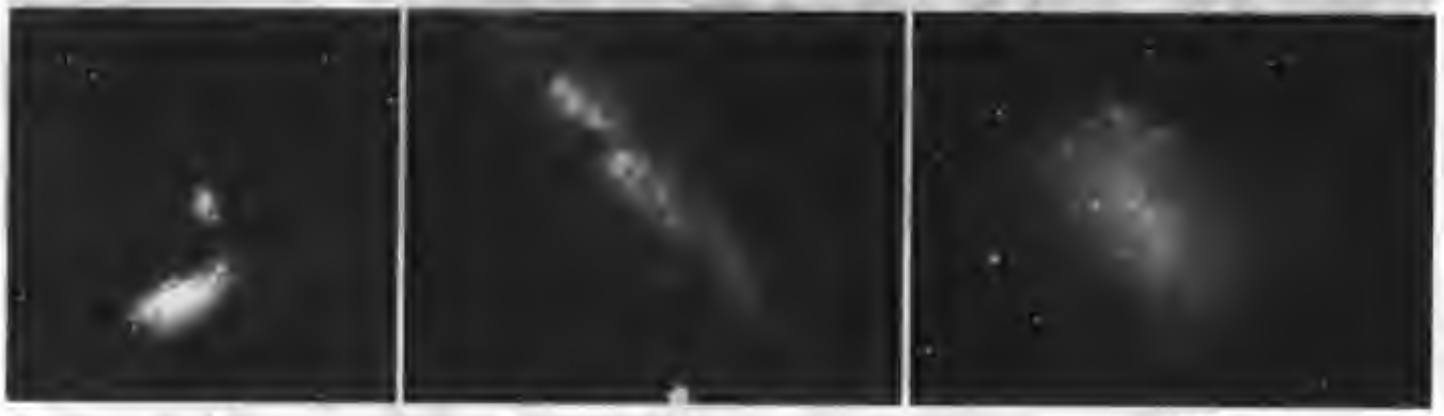
这类星系形状很不规则，它们形态向各个方向伸展。很可能是由于近邻星系的引力拖曳使它失去了原形，成了不规则的样子。如图 22.9，M82、



(a) NGC1201 S0型　　(b) NGC2859 SB0型

图 22.8 河外星系 NGC1201(S0 型)与 NGC2859(SB0 型)

NGC4485、NGC4490 及 NGC6822 等都是比较典型的不规则星系。此外，南半天球肉眼可见的大麦哲伦云、小麦哲伦云都属于不规则星系。最近发现小麦哲伦云实际上是两个星系。它们似乎是被银河系的引力撕裂成不规则的外形，并发现大麦哲伦云内有暗弱的旋涡结构。



(a)　　(b)　　(c)

图 22.9 三个不规则的河外星系

(a) NGC4485 星系和 NGC4490 星系靠得很近，彼此之间很可能有引力作用；(b) M82 星系呈现出爆发的外貌图像；(c) NGC4449 星系，它的大小和光度都和我们的银河系相当

6. cD 星系与矮星系

除了以上各种类型的星系外，还有一类星系尺度特别大，直径可达几百万秒差距(Mpc)，形状类似椭圆，有些弥漫并有很延伸的色层的星系叫做 cD 星系(c 表示“超巨”；D 表示“弥漫”)。

近年发现了一批尺度比较小的矮星系。矮星系多数是椭圆的，表示成 dE。它与正常星系的差别是缺少亮核区。另一类矮星系是矮不规则星系，表示为 d_{Ir}。1994 年英国天文学家伊巴塔等发现了一个新的较小星系。因为它位于人马座，故称为人马座矮星系，距银河系中心的距离只有 5 万光年。由于它靠我们

太近，正在向银河系下落并将在几亿年内被银河系吞食掉。从地球上看来，它处于银河系核球的后面，因而无法直接由光学影像中看到它，天文学家是根据那里恒星的速度不同于银河系恒星来判断的。它的直径约为银河系直径的 1/4 到 1/5，即大约 2.8 万光年，质量只有银河系的千分之一。1994 年 8 月在仙后座方向也发现了一个新的星系，被命名为"德温格鲁 1 号"星系。根据其旋转速率推测，其质量为银河系的 1/3，后来在离它 0.33°的地方，又发现了一个新星系-德温格鲁 2 号星系，它的直径为德温格鲁 1 号的一半，质量是它的 1/10，它们都是矮星系。1997 年英籍华人侯建德等人在银河系附近也发现两个矮星系(也叫微型星系)，它们与银河系的距离分别为约 300 万光年与 1 300 万光年。

二、哈勃形态分类的改进

近年，沃库利尔斯(De Vaucouleurs)等认为星系的哈勃分类过于简单，他发现了棒、环和旋涡结构连续渐变的序列。他采用非常类似的符号 SA 和 SB 来表示哈勃类 S 和 SB。他扩展了哈勃分类框架中的标志 a，b 和 c，加进子类型 d 和 m(对于麦哲伦不规则星系)来表示从有明显旋臂到非常无序结构之间的过程星系类。他还附加了标志 r 和(或)s，表示环和(或)旋涡特征突出的星系。如图 22.10 所示的车轮星系就属于特殊分类。

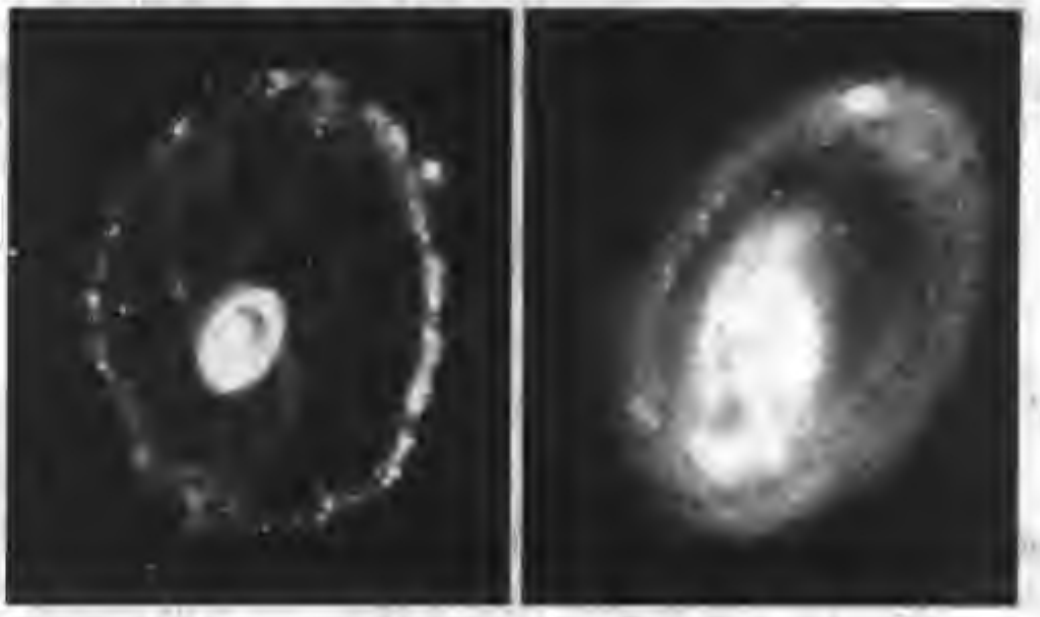


图 22.10　哈勃望远镜拍摄的车轮星系(右图为它的核心部分)

摩根(W. W. Morgan)等对哈勃形态分类增加了包含星系的恒星化学组成的内容。摩根指出，旋涡星系中央核球光的复合光谱型，可能晚于盘星和旋臂上恒星的光谱型，因而，他提出，用聚集度 af、f、fg 和 k 来标志星系的中央核球的光度比整个星系盘的光度强弱的不同程度。

三、星系的尺度

我们知道星系大小的测量是首先通过 CCD 的成像观测或射电观测得到星

系的角直径，如果能通过造父变星的周光关系或其他方法测定出星系的距离，就可以计算出它的线直径。

矮星系多数是椭圆的，矮椭圆星系与矮不规则星系是最小尺度的星系，有些直径仅是 3 kpc。一般典型的星系直径约 15 kpc。巨椭圆星系的直径达 60 kpc。超巨大的 cD 星系直径可达 2 Mpc，这个直径比银河系到仙女座大星云的距离还大。我们银河系的银盘直径约 50 kpc，看来在宇宙中是个中等尺度的星系。

四、星系的累积颜色与光谱

星系光谱的观测可以使我们获得星系的退行速度，星系核的类型以及星系内不同星族的化学成分等许多重要信息。一般椭圆星系比旋涡星系更红，旋涡星系比不规则星系稍红。星系的最外边与核球区的颜色是不同的，这对于旋涡星系更为突出。

星系的光谱型和颜色很大程度上依赖于恒星群体的特征年龄，部分决定于恒星的重元素含量的多少。一般来说，椭圆星系和旋涡星系的中央核球区大部分是老年的晚型恒星，年龄大约在 10^{10} 年左右。旋涡星系的盘是晚型恒星与年轻恒星的混合体，其中最年轻的恒星集中在旋臂上。一些不规则星系罕见地蓝，这可能是因为大质量年轻恒星发出的辐射中蓝光比较强。

星系的光谱分类非常类似于恒星的光谱分类，一般椭圆星系的光谱型为 K 型，旋涡星系中形态 Sa 型的光谱为 K 型，形态 Sb 型的谱型为 F～K 型，形态 Sc 型的谱型为 A～F 型。

第 2 节 星系的红移

20 世纪 20 年代，美国天文学家哈勃首先应用河外星系内的造父变星的周光关系测定了仙女座大星云的距离，开创了研究河外星系距离的新途径。这种方法原来仅限于测定近距的河外星系，但是自从哈勃空间望远镜上天后，可以观测到距离遥远的星系内的造父变星，因而用造父视差方法可以测定造父变星所在的遥远星系的距离。

哈勃观测研究了大量的河外星系，他发现绝大多数的星系都远离我们而去（所以称为“退行”）；而且河外星系的距离与其视向速度之间成正比，即距离越远的星系退行速度越大，此观测总结得出的规律称为**哈勃定律**。图 22.11 为哈勃定律示意图。

哈勃定律的数学描述是这样的，设星系的退行速度（视向速度）为 v_r；星系离我们的距离为 r，则有：

$$v_r = H_0 r$$

式中的 H_0 叫**哈勃常数**，它是测定星系距离的关键性的量，因为利用哈勃定律求星系的距离，关键在于哈勃常数的取值。长期以来，天文学家对 H_0 的取值一直有争论，大多数人认为 H_0 在 50～100 km/(s·Mpc)之间，目前一般取 $H_0=65$ km/(s·Mpc)。按照哈勃定律，如果一个星系与我们的距离是另一个星系的 5 倍，那么这个星系就以 5 倍于那个星系的速率远离我们。有些星系团的退行速度非常巨大，如长蛇座星系团正以 6×10^4 km/s 的速度远离我们，根据哈勃定理，可以推算出它与银河系的距离约为 12 亿光年。由于测定的结果是绝大多数星系都是远离我们而去，所以叫星系红移。

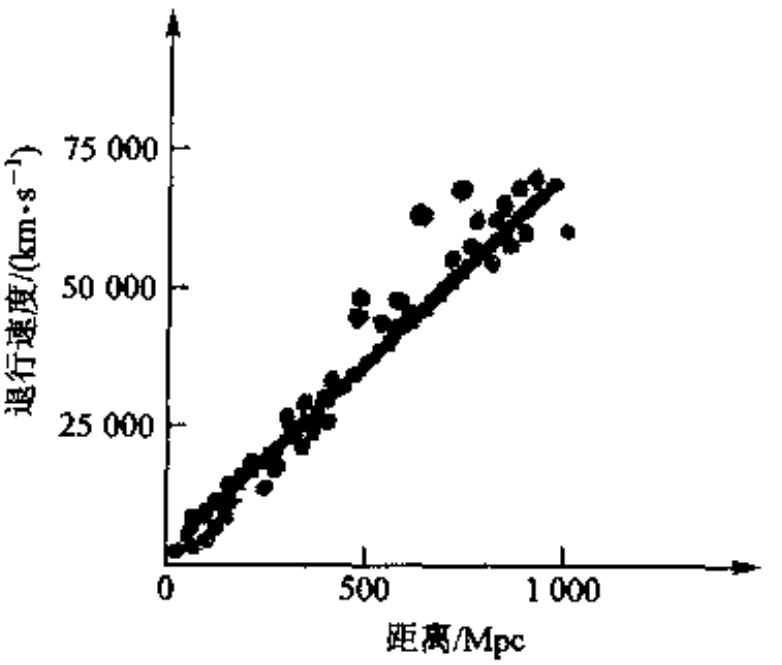


图 22.11　哈勃定律示意图(图中观测点是地球附近 1 百万 kpc 距离内的一些星系)

按照哈勃定律星系的距离越远，其视向速度(红移速度)也越大。为了研究谱线红移的大小，引入了红移量 Z。

定义**红移量** Z 为谱线的波长变化量 $\Delta\lambda$($\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$)与原实验室的波长 λ_0 之比，即

$$Z=\Delta\lambda/\lambda_0$$

当天体的速度远远小于光速时，天体的退行速度 v_r 与光速 c 之比为

$$v_r/c=Z$$

对于遥远的星系，红移量接近 1 或大于 1 时，即天体的退行速度达到或接近光速的时候，应当考虑相对论效应，按照相对论推出的公式来求星系的退行速度即

$$v_r/c=[(Z+1)^2-1]/[(Z+1)^2+1]$$

观测研究表明哈勃定律对于在 10 亿光年以内的河外星系是适用的。对于更远的星系，遇到了时间延迟的问题。因为来自几十亿光年之外天体的光要经过几十亿年才到达我们这里。此外对于相互作用很强的星系群可能也不适用。

星系距离的测定还有其他途径，比如观测河外星系测定其角直径 α(用弧度表示)，由于它们的线直径 d 可以依据大量统计结果而获得平均值，由 $D=d/\alpha$ 我们可计算出它的距离 D。例如，利用射电望远镜观测亮星系的电离氢区(HⅡ)，可以测得星系的角直径，而它的线直径，可以由大量观测获得的资料中取其平均值。由此就可以估算出这些电离氢区所在星系的距离。

天文学家在测定河外星系距离方面，一再打破发现最远星系的记录。例如遥远星系 0140+326RD1，它的红移量 $Z=5.34$。这是人们观测到的第一个红移超过 5 的星系，按照哈勃定律，星系的距离越远，其视向速度也越大，即退行速度越大。按照 $H_0=50$ km/(s·Mpc)计算，并考虑到相对论效应，它距离我们约有 186 亿光年。由于它的质量和光度都比银河系小，被称为蓝矮星系。近年哈勃空间望远镜观测的图像说明蓝矮星系含有大量热的、年轻的蓝星，但令人诧异的是里面还有许多老年的红巨星。这就意味着这个蓝矮星系不是新形成的星系，而是一个经历过爆发后的星系。这些新的发现引起了天文界的极大关注和兴趣。

第 3 节 星系的光度

一、范登贝尔光度分类

范登贝尔的星系光度分类法是在哈勃光度级标记的后面，加上罗马数字 I 到 V 来划分，非常类似于恒星的光度分类。光度级 I ～ V 依次分别表示固有非常亮的旋涡星系，亮星系，比较亮的星系，暗星系到固有最暗旋涡星系。现在知道星系总的光辐射大略与总的可见质量成正比，所以光度级 I 星系也是质量最大的星系，光度级为 V 的星系也是质量最小的星系。

范登贝尔光度级分类是很有用的，因为它与旋涡结构的规则性有很好的关系。最亮，也是质量最大的旋涡星系总有最规则最漂亮的旋涡结构。例如 ScI 星系是一个非常亮的寻常旋涡星系，包含一个小的中央核球，有非常明显而规则的缠卷旋臂。这种类型的星系，往往也有非常多的星际气体，当然也有非常大 H Ⅱ 复合体。

二、星系的光度分布

星系总光度是指整个星系每秒发出的总辐射能量。可是星系是有视面天体，光度的分布是不均匀的，而且它的光度分布很难用数学准确描述，只有大略的表达式。

对于椭圆星系，设 I 为星系单位面积的光度或称光强，I_0 是星系中心的光强，则有 $I=I_0/(r/a+1)^2$，式中星系某点到星系中心的距离为 r，a 是常量，叫选择尺度因子，取决于星系的类型。观测表明，该表达式一直到 $r/a=14$ 仍然是相当准确的。

对于旋涡星系，中心部分的光度分布和椭圆星系类似，星系的外盘部分可以表示为，$I=I_0r^{-ar}$，式中 a 为常数。至于旋臂部分，由于结构各异，无法用统一的公式描述。

星系总光度也是一个有用的参量，它对应用于量度星系的累积星等。总强度是将局部强度按面积积分而得到 $L_T = \int I ds$。

三、星系的自转

星系的自转主要通过谱线的多普勒位移测定，但是星系必须是侧向观测者或是接近侧向的才能测定。观测时将摄谱仪的狭缝位置放在星系的边缘上，即星系的长轴方向上，由于自转效应，星系边缘的一半朝向观测者运动，另一半远离观测者运动。因此，所拍下的光谱的谱线向一边倾斜，根据倾斜的多少，便可以测量出沿星系长轴各点的旋转速度。

测量星系自转用发射线要比用吸收线容易测量，但有些星系发射线不明显，只能用吸收线来测量。比如椭圆星系 S0 和旋涡星系 Sa 都没有明显的发射线，可选用吸收线。

测量星系自转的另一手段是利用中性氢的 21 cm 谱线。由于中性氢在星系中分布广泛，用该方法可以测量出距星系中心更远的距离。

自转的测量结果表明，大多数星系的自转曲线（参见图 22.12）同银河系的自转曲线类似。在星系的核心部分，自转受中心引力支配，呈牛顿式的引力和离心力平衡的关系。在远离核心部分，似乎应该是满足质点绕中心运动的开普勒式运动规律。但事实上，所有星系的自转曲线都呈现平滑状态，不再随距离明显增加，其原因是在星系的外部存在着暗物质，还有尘埃和气体的阻尼作用。

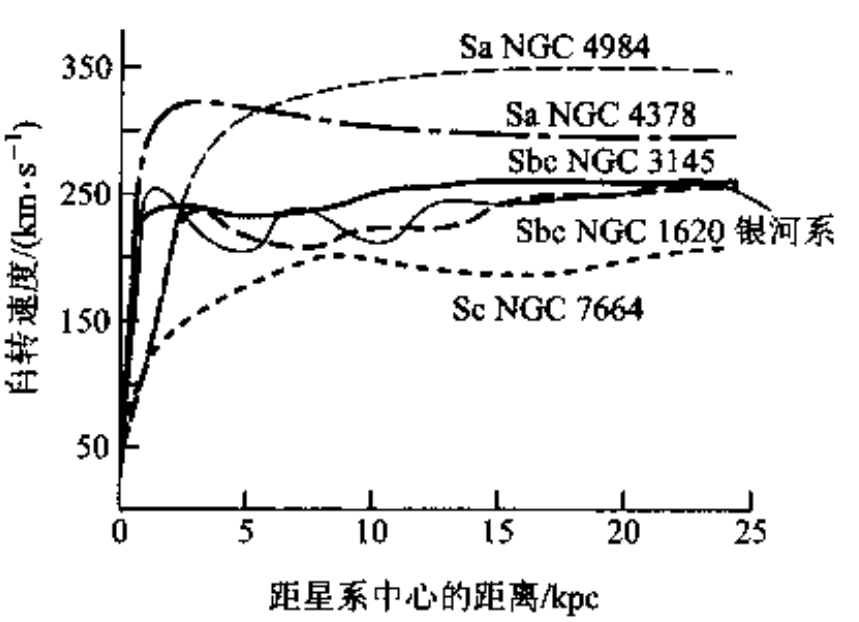


图 22.12　旋涡星系的自转曲线

大多数星系的角直径都很小，不能详细地研究星系内部的运动学，但是测量星系可见部分辐射线轮廓总的速度展宽（弥散）是比较容易的。在椭圆星系里，旋转速度 v 是由恒星的随机速度引起的，而在旋涡星系里，v 是由气体的旋转速度引起的。

四、光度与自旋速度的关系

大量的观测研究表明，椭圆星系由谱线展宽相应求出的星系自旋速度 v 与

光度 L 有密切的关系，即

$$L \propto v^4$$

假如一个椭圆星系的速度弥散是另一个的两倍，则前者的光度可能比后者亮 16 倍。对于椭圆星系和旋涡星系，方程的比例系数是不同的，这可以从已知距离的校准星系的观测中得到。

这个由经验建立起来的规律对于旋涡星系的重要性在于，测量 21 cm 谱线的展宽求自转速度 v 相对比较容易，已知了 v，就可以估计它的光度 L，即可知道绝对星等，再由观测获得它的视星等，最终可以求得该星系的距离。

*第 4 节 星系的质量

星系的质量是重要的天体物理量，研究它可以使我们知道可见物质是否是星系总质量的主要部分；是否有大量暗物质；此外星系的质量涉及到宇宙的总体密度，这个问题涉及到我们现在膨胀的宇宙是否最终会再收缩。

大量的研究表明，宇宙中星系质量的跨度极大，从 $10^5 m_\odot$ 的矮星系到 $10^{13} m_\odot$ 的巨椭圆星系都有。确定星系质量的方法主要有：星系的旋转曲线法；恒星速度弥散法（对椭圆星系）；双星系统的质量测定法。

一、旋转曲线法

旋转曲线方法测量天体质量是考虑受它的引力影响的物质的轨道运动。星系毫无例外服从这个规则，只是推断出来的质量，指的是星系可观测部分（内部的）的质量，而不是它们的总质量。

对于旋涡星系和棒旋星系，星系的质量与恒星或者气体绕星系中心的旋转速度或旋转动能有关。

假设 v 表示距离星系中心 r 处星系的旋转速度，则 r 以内星系的总质量 m 可以粗略地估计为

$$m(r) = rv^2/G$$

其中 G 是引力常量；v 以 km/s 为单位，r 以 kpc 为单位。

此方程在应用于星系时应注意：首先需要对方程中系数做改正，它的精确值依赖于系统内的详细运动学结构和质量分布，利用质量分布的理论模型可以部分地解决这个问题。其次，直接可测量的量是离星系中心的角距离 θ，而不是线距离 r。为了从 θ 获得 r，我们需要知道星系的距离。再者，星系的旋转速度 v 不易得到。许多天文学家广泛地应用光谱技术，即拍摄星系的光谱，测量恒星群的吸收线或 H Ⅱ 区的发射线的多普勒位移，可以得到旋涡星系的旋转速度。近年来，利用射电观测 H Ⅰ 的 21 cm 射电波的速度轮廓和星系内热星周围星际气

体的禁戒发射线(如[NⅡ],[SⅡ]线),可以测定离星系中心距离约 50 kpc 处的旋转速度。此外,在距离星系中心较远的 r 处,有平坦的旋转曲线,它意味着包含在半径 r 内的质量 $m(r)$ 应该随着 r 的增加而线性地增大。这个随距离 r 线性发散的质量定律显然不可能延伸到任意远的距离,这个质量定律 $m(r)\propto r$ 能适用到多远?目前的研究还不清楚。这种方法局限于被包括的质量是球形分布的星系。

二、速度弥散方法

对于椭圆星系,它的观测谱不是任何一个单星的光谱,而是整个星系中相当部分的恒星的总光谱。几十亿颗星不同的随机运动速度在视线方向的叠加,由于多普勒效应明显地加宽了所观测的谱线。适当地选择一颗星拍得它的固有光谱,把它与加宽的吸收谱比较,可以估计通过星系沿着整个视线方向几十亿颗恒星的速度弥散。我们把它叫做平均速度弥散 $v_{球}$,以区别于局部点的三维速度值 v(一般有 $v=\sqrt{3}v_{球}$)。

对于某一椭圆星系,我们设一气团的总动能是旋转能和或然运动的动能之和:

$$E_k=\frac{1}{2}\sum m_i v_i^2+E_{旋}=\frac{1}{2}\langle v^2\rangle+E_{旋}$$

式中$\langle v^2\rangle$是 v_i^2 相对于星系中心的平均值。恒星的运动速度相对于星系中心可以看作按高斯统计规律分布,即速度弥散值 $\sigma^2=\langle v^2\rangle$。恒星的速度只有视线速度才能依据谱线多普勒位移测定。设速度弥散在各方向上相同,按照高斯统计则有,$\langle v_i^2\rangle=3\sigma_r^2$,式中 σ_r^2 是视线方向的速度分量的弥散值。

对于球形分布的横向分量,它们一般绕星系中心以很大的椭率运动。$E_{旋}$ 为星系整体运动的旋转能,定义旋转动能为

$$E_{旋}=\frac{1}{2}\beta m\langle v^2\rangle$$

式中 m 为星系的总质量;β 为取决于星系类型的常数,由经验取值例如,M32 是椭圆星系 E2 型,β 为 0.47。

设星系气团内的总引力势能为 E_p,$E_p=\frac{1}{2}\sum_{i\neq j}\frac{m_i m_j G}{|r_i-r_j|}=-\alpha\frac{m^2G}{R}$

式中 m_i 为单个恒星的质量,m 为星系的总质量;$2R$ 是星系的特征直径,α 是一个与星系类型有关的常数;G 为万有引力常量。则对于一个处于平衡的宏观上稳定的星系,它的引力势与总动能应当符合位力定律,即有 $2E_k+E_p=0$,由此,我们可以求出星系的总质量为

$$m=\frac{3\sigma_r^2R(1+\beta)}{\alpha G}$$

采用上述技术测出的巨椭圆星系 M87(E0 型)在光学可见部分具有大约 $10^{12}\ m_\odot$ 质量,在椭圆星系光学可见部分之外究竟包含多少质量,目前还没研究清楚。

三、双星系的质量测定

两个星系围绕它们公共的质心绕转的星系对叫双星系。一般,成对的星系的间距小于 0.2 Mpc,双星系相对速度为 200 km/s,平均间距为 0.15 Mpc,轨道周期约为 5×10^9 年。双星系的质量测定原则上与双星质量的测定方法相同,利用开普勒定律可以求出两个星系的质量和。

四、星系的质光比

星系的质量 m 与光度 L 之比,称为质光比 m/L。它对于了解星系的组成成分,分类特征和物理本质是一个重要的参量。例如,一些巨椭圆星系的质光比远大于银河系,说明它有可能蕴藏着大量的暗物质。一些星暴星系的质光比(m/L)很低,并且恒星的形成率很高,说明其内部正在形成大质量的恒星,而且恒星的形成过程具有爆发的特征。表 22.1 列出了各类型星系的质光比,其单位为太阳的质光比

表 22.1 一般星系的质光比

星系类型	星系的质光比/($m_\odot\cdot L_\odot^{-1}$)	星系类型	星系的质光比/($m_\odot\cdot L_\odot^{-1}$)
E	20－40	SBb,Sb	约 10
S0	10－15	SBc,Sc	<10
SBa,Sa	10－13	Ir	约 3

对于一个星系,测量其星系中心到外部的质光比 m/L 的变化,对于了解星系本身的结构是很有意义的。对于旋涡星系,一般认为存在着一个延伸的晕,如果 m/L 的数值随着与中心的距离的增加而增加,则表明晕中有低光度的恒星以及有暗物质。

第 5 节 星系的形成和演化

一、互扰星系与星系的合并

现代观测研究表明,一些星系间具有强相互作用,它比地月的潮汐引力的相互作用远为强烈。虽然这类星系只占很小的百分比,但非常引人关注。1997 年哈勃空间望远镜拍摄到了距离地球 6 300 万光年的河外星系图像,显示出在南

天乌鸦座中有一对碰撞星系，NGC4038 和 NGC4039，参见图 22.13。这两个星系都是旋涡星系，彼此十分靠近，正在发生碰撞，碰撞涉及的范围约有几万光年。

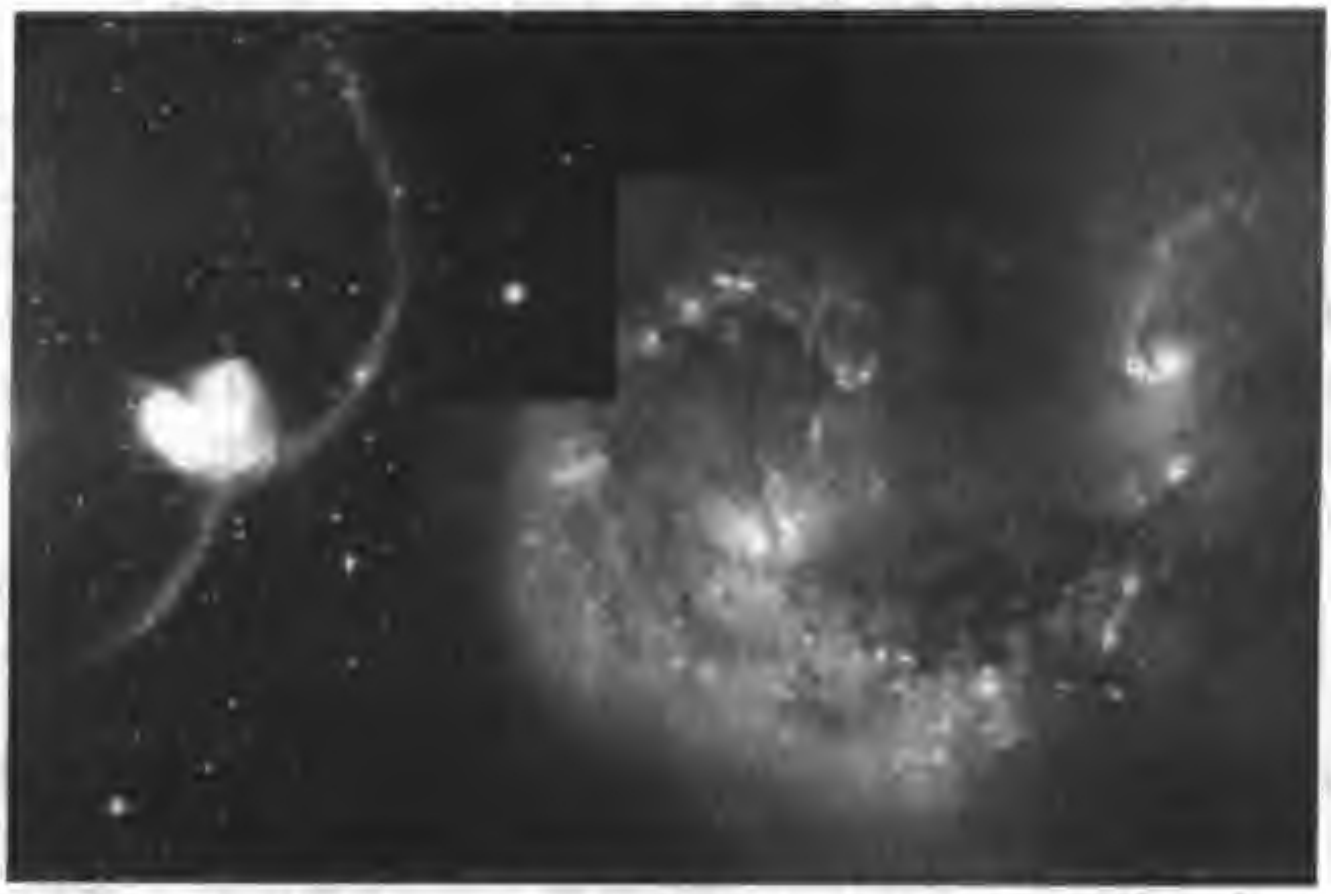


图 22.13　触须星系对 NGC4038 和 NGC4039 正在发生碰撞



图 22.14　哈勃空间望远镜拍摄的 NGC2207 和 IC2163 两个互扰星系的图像

这对星系的核心呈橙黄色，其间有很宽的暗黑尘埃带相连接，蓝色的旋涡状光带中有大量由新诞生恒星组成的年轻星团，约有 1 000 多个亮星团，星团内聚集的都是些年轻的、质量很大的恒星。这表明，星系的碰撞很可能触发了大量恒星的迅速形成。用地面大望远镜拍摄的照片也可以看到这两个星系有两支像昆

虫的触须一样的明亮气流从星系流出，所以称这两个星系为“触须星系”。1999年钱德拉X射线卫星对触须星系进行了观测，观测的图像表明两个相撞的星系吹出许多“泡泡”，这些泡泡发出强烈的X射线，泡泡与泡泡相遇、融合，形成了直径达5千光年的超级泡泡。此外，还发现有数十个更加强烈的X射线亮点。

当两个星系靠得很近并相遇时，显然会激发起星系内部的激烈运动（参见图22.14），产生这些运动的能量一定来自轨道运动。当两个星系相遇之际，星系内的恒星运动轨道会受另一星系总体的引力作用而偏转，星际气体也会发生非弹性碰撞相聚，虽然星系内的总能量守恒，但是恒星可能把它的轨道能转化成另一种能量，比如随机运动能。从统计学可以证明，在总角动量和总能量守恒的前提下，当两个受束缚的星系反复相遇时，必然导致它们越来越接近，最终引起合并成为一个更大的星系集团。

两个质量相当的旋涡星系发生的碰撞至少会延续上亿年，以后大约需要5亿年的时间才有可能演化成一个椭圆星系，在此期间，质量巨大、直径可达几百光年的气体和尘埃发生碰撞，因而产生激波，使这些云团受到压缩，数百万颗新生恒星就在这些受到压缩的云团中迅速形成。泡泡是恒星演化到超新星爆发后留下的遗迹，由于温度高达几千万度，X射线很强。

星系间不仅有碰撞的情况，还有相互渗透，互相吞并的情景。当两个星系互相渗透时，能形成奇特的“环状星系”。我们的银河系在形成初期就经历了吞并其他较小伴星系的过程，在此后几十亿年才诞生了我们的太阳系，我们今天呼吸的氧气及现有的各种化学元素，可能就是在那样的事件中生成的。最近的观测表明，仙女座星系（M31）正在向我们的银河系移动，估计很可能在50亿年后与银河系相撞，并最终与银河系融为一体。虽然它们相撞时由于它们各自的恒星很小，又相距很远，恒星不可能撞在一起，但是一个星系的尘埃云可以穿过另一星系的尘埃云，从而使星际气体通过撞击而会发生坍缩，而且银河系在激烈的坍缩中会形成百万颗新的恒星，这将会改变地球未来所处的宇宙环境。近年空间探测揭示出银河系和它的近邻星系大麦哲伦云与小麦哲伦云之间有气流相互作用。从这些近邻恒星系统涌出的气流，叫麦哲伦气流。此气流的迹线长达银河系直径的2倍。在这条麦哲伦气流的对面还观测到有另一条细细的气流，它的迹线表明从麦哲伦云到银河系平面之间有气流连续运动，似乎要把银河系“割裂”。科学家认为气流是星系间的密近交会引起的强潮汐力从麦哲伦云里拉出一条物质带。

二、星系的形成和演化

宇宙大爆炸之后，随着宇宙的膨胀，辐射温度不断降低，因而辐射能密度不断减小。但在宇宙中的基本粒子（包括重子、轻子和电荷）却是守恒的。在宇宙

膨胀过程中，辐射密度的减小速度要比物质密度的减小速度快，大约到了 5×10^5 年，宇宙中的物质密度开始和辐射密度相等，到了 7×10^5 年，变成以物质为主的复合期。宇宙进入复合期后，引力的作用使离子聚集起来。聚集成团的物质内部压力增加，(压力包括气体压力和辐射压力；在复合之后辐射压力减小，只需考虑气体压力)，直至物质的自引力与内部向外的压力相抗衡。这时宇宙中一旦有小的微扰，就会引起局部密度增加。密度增加又会引起局部的引力增强，进一步吸引更多的粒子，从而使引力进一步增强，如此下去，形成大的团块，这种现象叫引力不稳定性。星系形成的主要原因就是由于原始星云的引力不稳定性。形成后的巨大星云团块不再随宇宙膨胀，而是在团块的自引力下塌缩，塌缩的结果便形成小的星系。在星系形成之后，由于星系间的互相作用，它们的形态是可以改变的。小星系在碰撞过程中被大星系吞食，合并形成了更大的星系。如果星系在旋转时的角动量大，则形成旋涡星系；如果角动量小，则形成椭圆星系。但是，也有一些天文学家认为，星系的形态不是由角动量的大小决定的，而是由形成星系的原始星云决定的，密度大的形成椭圆星系，密度小的形成旋涡星系。这两种观点都否认在两种星系之间存在演化关系。20 世纪 40 年代一些天文学家认为两种星系之间存在着演化关系，他们认为椭圆星系是由丧失掉旋臂的旋涡星系演化而来的。而哈勃在对星系分类时，将椭圆星系称为早型星系，将旋涡星系和不规则星系称为晚型星系，似乎在表示星系的年龄情况。这两种演化顺序恰好相反。目前研究发现，随着哈勃序列的由早到迟，星系的颜色也逐渐由红到蓝，即椭圆星系要红些，旋涡星系和不规则星系要蓝些。这说明在通常情况下，椭圆星系的年龄的确比旋涡星系和不规则星系要老些。

研究深空的高红移星系可以进一步揭示遥远星系的形态。现有的观测表明，红移超过 1 的星系可能由于星系并合而具有强烈的扰动形态。目前，已经发现了红移高达 6.68 的星系，该星系从它们年轻的时代以来已经有了明显的演化。我们可以想像，红移约为 1 000 的星系发出宇宙的背景辐射反映的是宇宙演化早期的“复合”时代，目前对于那段时期还探索不到。

星系往往存在于星系团中，而这些星系团是由较小的星系群并合而长大的。当气团落入星系团中时，它将被加热到非常高的温度并发出 X 射线。星系中的星际介质制约着恒星形成率和恒星形成的周围物质，从而也制约着星系本身的演化。星际介质可以说是恒星中产生的重元素的储藏所，如果恒星形成变得太猛烈，星际气体可以从星系中被抛入周围的星系介质中。

第一代星系是从巨大的中性氢云中形成的。星系形成以后，主要成分仍然是原子氢，虽然星系内有大质量的年老的恒星将新元素抛入星际介质(如超新星爆发)，使星系内重元素含量逐渐增加，但是氢原子所占比重仍是很大。在星系内部，有些原子气体在结合为恒星的途中转变为分子形式。新形成的恒星可以

使某些气体电离，产生发射线，从而可以被探测到。从探测这种热气体的 X 射线可以探知热等离子体的温度、压力和元素丰度。当代天文学家由此可以追溯星系中的气体随宇宙的演化，研究形成行星和孕育生命所需的元素是怎样在宇宙中合成的。



习　题

1. 一颗在室女星团里的经典造父变星，测光测出它的周期为 10 天，它的视星等是 26.3^{m}，求室女星团的距离。

2. 仙女座星系以 266 km/s 的视向速度靠近我们银河系，已知目前两个星系的距离为 930 kpc，忽略两个星系的切向速度分量和在加速运动中的引力效应，估计两个星系什么时候碰撞？

3. 计算温度为 5×10^{7} K 的氢分子气体的平均速度。并与在典型的星系团中星系的平均轨道速度 1 000 km/s 相比较。

（提示：气体分子的平均速度$\propto\sqrt{\frac{\text{气体的温度}}{\text{分子的质量}}}$；氢的相对分子质量为 2。）

4. 根据书中旋涡星系自转曲线图的资料，估计观测到的 NGC4984 星系光谱中的 H 656.3 nm 谱线的展宽量（即波长极大值减去极小值）。

5. 两个星系在距离 500 kpc 处彼此绕转，他们的轨道周期估计是 300 亿年。利用开普勒定律求两个星系的总质量。

6. 利用开普勒第三定律估计一个星系维持以 1 000 km/s 的速度运动在半径为 3 Mpc 围绕星系团中心的圆轨道运动，星系的质量应当是多少？给出一个有关测定星系质量的演算式，你认为这种估计星团质量的好方法吗？

7. 两个有大小相似的星系碰撞彼此穿过，其合成的相对速度为 1 500 km/s，如果每个星系横跨 100 kpc，问持续多少时这个碰撞事件才结束？

8. 按照哈勃定律，$H_0=65$ km/(s · Mpc)，在距离 200 Mpc 的一个星系的退行速度是多少？退行速度为 4 000 km/s 的星系的距离是多少？当 H_0 取 $H_0=50$ km/(s · Mpc)与 $H_0=80$ km/(s · Mpc)又如何？

9. 按照哈勃定律，$H_0=65$ km/(s · Mpc)，室女星系团的退行速度为 1 210 km/s，计算由银河系到室女星系团中心的距离是多少？

第二十三章

活动星系

一些河外星系经常发生激烈的物理过程，如激波、喷流和恒星爆发等，同时伴随着在各种电磁波段的巨大的能量释放，这类星系叫活动星系。由于所有激烈活动过程都主要集中在核心，或者是由核心引发出来的，所以活动星系也称活动星系核（简称 AGN）。活动星系核研究是现代天文研究中的重要课题之一。

活动星系核的类型有类星体、赛弗特星系、蝎虎座 BL 天体，N 星系，强射电星系和星暴星系等，多达数十种。

第 1 节 类 星 体

类星体是 20 世纪 60 年代天文学的四大发现之一，它是活动性很强的一种活动星系。由于它在望远镜里看来很类似恒星的样子，天文学家把它叫做类星体。其实它们不是恒星，而是遥远的河外星系。

类星体的尺度不比太阳系大，是高光度的天体。光度最低的类星体与正常星系的光度相当，而光度高的要比正常星系高出 10 万倍！类星体的辐射能量极大，辐射的范围包括从射电波段到 γ 射线的所有波段。类星体发射的能量同热核反应的核能相比如同核能与煤油灯的能量相比。一个类星体发出的能量相当于 1 000 个银河系发出的总能量，这就是说类星体的能量产能率远超过银河系，是银河系的一亿倍！

一、类星体的发现

类星体的发现应追溯到 20 世纪 50 年代。二次世界大战后，英国先进的雷达技术应用于射电天文的研究，使英国的射电天文学在世界一度领先。1950 年至 1959 年剑桥大学发表了 3 个射电源表（简称 1C，2C 和 3C）。当天文学家寻找这些射电源的光学对应体时，发现了类星体。

1960 年美国天文学家桑德齐首先在三角座找到了 3C48（3C 表中第 48 号）的光学对应体。看起来它像一颗普通的恒星，但它的光谱很不寻常，具有宽的发射线，紫外辐射比较强，亮度还有变化。当时他对光谱中的发射线很难确认其对应元素。1962 年，哈扎德利用月掩星的机会测量了 3C273 的位置（图 23.1 为类

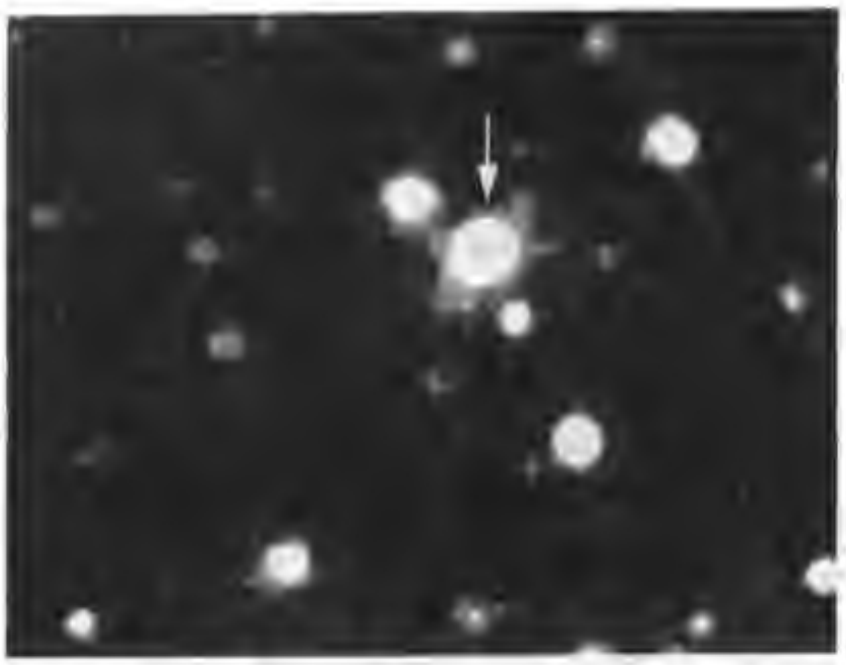


图 23.1 类星体 3C273 的光学图像

星体 3C273 的光学图像),发现它是一个双源,其中一个是 13^m 的蓝色星体,这个蓝色星体和 3C48 一样,也具有宽的发射线,然而这些发射线也无法证认。1963 年,施米特用帕洛玛山的 5m 望远镜进一步观测 3C273,准确地测量了这些发射线的位置。他用了 6 周时间思考这些发射线究竟是什么,最后终于弄清楚它们就是氢的巴尔末线和电离氧线,只不过是向红端的方向位移了很多。后来施米特测定了 3C273 射电源的光学对应体,光谱中的 4 条谱线的红移量 Z 相同,得到红移量 $Z=0.158$。很快,3C48 的红移量也被测出,$Z=0.367$。至此,类星体被正式宣告发现。类星体自发现以来,由于观测技术不断改进,发现类星体的效率提高很快。1977 年由赫维特(Hewitt)和柏比奇(Burhidge)编辑的第一个类星体总表包括 637 颗类星体。2001 年由维隆(Veron)夫妇编辑的"类星体和活动星系核表"(第 10 版)就包括了23 760颗类星体,可见新发现的类星体与日俱增。

发现类星体的过程,首先是选择类星体的候选体,然后在对每一颗候选体单独进行分光观测,辨认其发射线,测出红移。

二、类星体的观测特征

类星体有下列明显的观测物理特征:

1. 类星体的光学星像与恒星类似,尺度小于 0.1 pc

2. 光谱中有明显的发射线,发射线的宽度至少大于 2 nm;而且发射线有高的红移。高红移类星体的光谱中常伴有吸收线出现。

3. 连续谱的能量分布为非热辐射幂律谱,辐射流量 F 和频率 ν 的关系可表示为 $F(\nu)\propto \nu^{-1}$。

4. 类星体是高光度的活动星系核,$L=10^{43}\sim10^{48}$ erg/s,绝对星等很亮,M_V

约-23^m～-30^m。

5. 许多类星体具有光变特性，而且光变没有规律，光变周期从几周到几个月不等。

6. 大多数类星体具有偏振辐射，但大多偏振度很低，不到1%，个别的类星体偏振度高，可达10%；光变的时标和偏振度大小之间有很强的相关性。

下面我们较详细地阐明类星体的光谱观测物理特征。

类星体的光谱由三部分组成：连续谱、发射线和吸收线。从图23.2我们看出类星体3C273的光谱内有很强的发射线（氢线H_δ、H_γ、H_β和二次电离的氧线）和连续谱；在350 nm～900 nm波段，还可以看到有L_α及CⅡ、CⅢ、SiⅣ、AlⅢ、AlⅢ和MgⅡ等发射线，这些发射线近旁常伴有很强的同条谱线的吸收线。

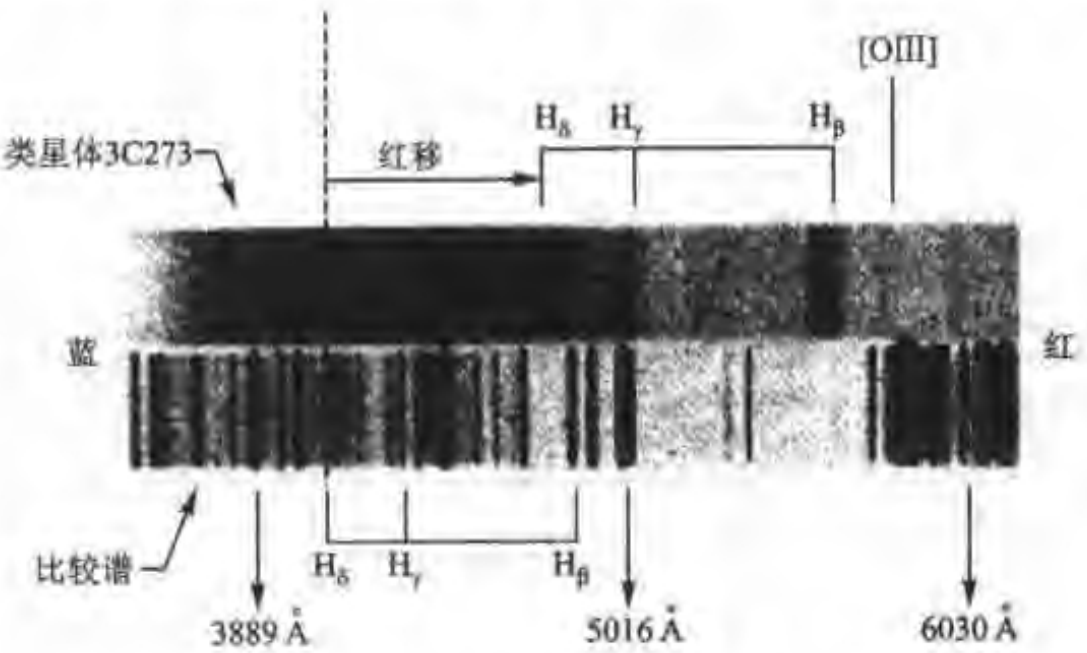


图23.2　类星体3C273的光谱

（1）连续谱

在光学波段，类星体的连续谱可以用一个简单的幂律谱表示，在10^{11} Hz的范围内，谱流量强度F_ν与频率ν的关系为

$$F_\nu \propto \nu^{-1}$$

在不同的波段连续谱会出现相当的不连续现象，这表明它们的辐射机制和起源不同。

在红外波段，辐射由两部分组成：热辐射和非热辐射。红外连续谱呈现出显著的非热辐射特征，这并不意味着没有尘埃辐射的影响，事实上，一些类星体的红外光度大大超过它的射电光度，这说明有大量的热辐射成分在内。

射电波段的连续谱分为平谱和陡谱。定义谱指数$\alpha \geqslant -0.5$为平谱，$\alpha < -0.5$为陡谱。致密源大都是平谱，展源是陡谱。而且，一个致密源是由许多致密的子源集合而成的。辐射机制主要是相对论性电子的非相干同步加速辐射。

紫外连续谱和光学谱相似，虽然也基本上是幂律谱，但形成机制相当复杂。

目前已发现数百个类星体是强 X 射线源，许多类星体都发射很强的 X 射线辐射。X 射线来源于类星体的核心附近，最可能的辐射机制是同步康普顿辐射。许多类星体的 X 射线的谱指数$\alpha=-0.7$，到了紫外附近变为$\alpha=-1.3$。

(2) 发射线

类星体的发射线有 60 多条，出现频率较多的发射线及其相对强度列在表 23.1 中。

表 23.1 类星体的主要发射线及其相对强度(连续谱强度=1)

波长/nm	离子	相对强度	波长/nm	离子	相对强度
103.4	OⅥ	20	342.6	[NeⅤ]	5
121.6	HⅠ(Lyα)	100	372.7	[OⅡ]	10
124.0	NⅤ	20	386.9	[NeⅢ]	5
140.0	SiⅣ+OⅣ	10	486.1	HⅠ(H_β)	20
154.9	CⅣ	50	495.9	[OⅢ]	20
164.0	HeⅡ	5	500.7	[OⅢ]	60
190.9	[CⅢ]	20	656.2	HⅠ(H_α)	100
279.8	MgⅡ	20			

图 23.3 给出了标准类星体光谱的分光光度图。

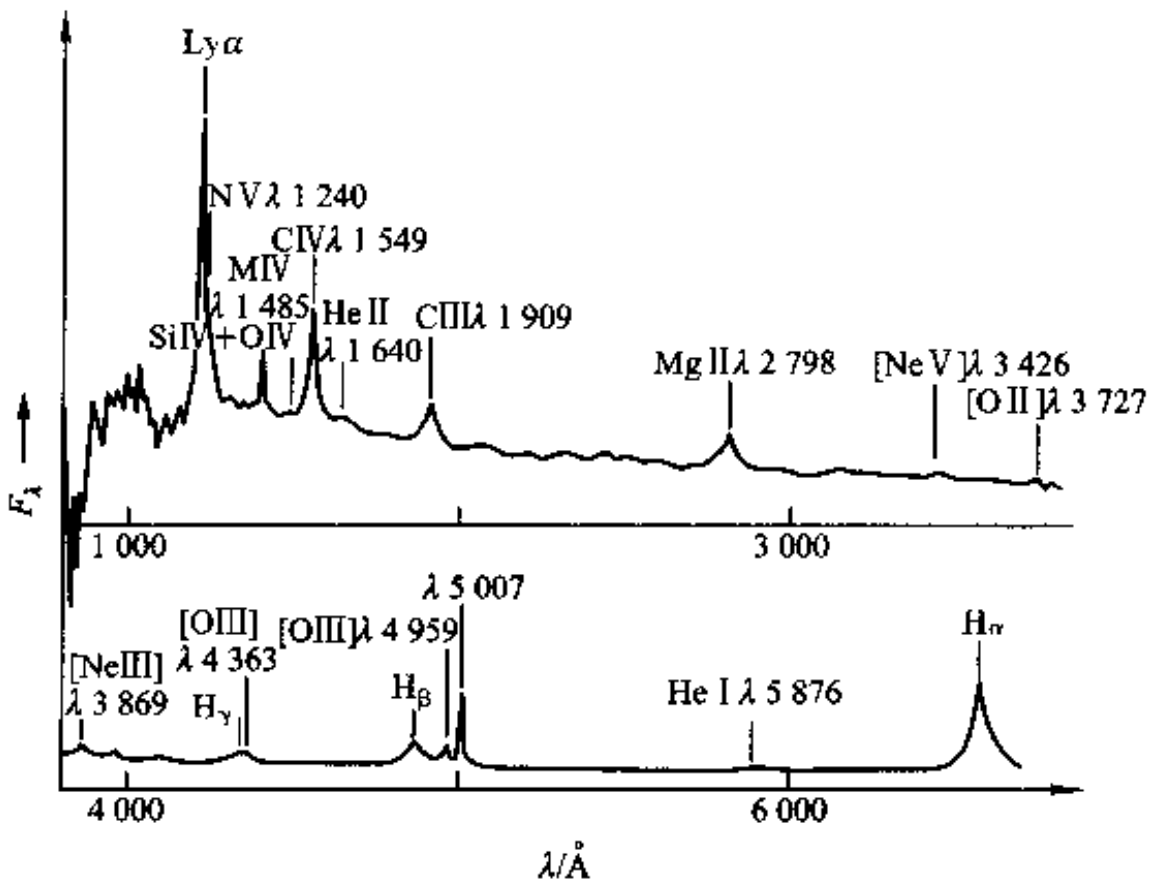


图 23.3 标准类星体的分光光度图

目前认为发射线的形成机制是由于中心区的高能连续辐射使发射区的气体光致电离，电离气体在复合时形成的。除了光致电离模型外也有人用其他辐射机制说明，但没有令人满意的解释。

(3) 吸收线

一些类星体，特别是高红移的类星体，其光谱除了发射线外，还伴随有吸收线。根据维曼(Weymann)建议，类星体的吸收线分为 A、B、C 和 D 四种类型。

A 型　光谱中有非常宽的吸收线，除了具有 Ly α($\lambda=121.6$nm)宽发射线以外，还具有其他的宽吸收线，如 CⅣ 的 λ 154.9 nm 吸收线展宽达 135 nm 到 160 nm。

B 型　光谱中有锐的吸收线。发射线红移 Z_e 与相邻吸收线红移 Z_a 的关系满足 $\frac{Z_e-Z_a}{1+Z_e}\leqslant 0.01$，这就是说，吸收线和发射线之间的速度差大约要超过 3 000 km/s，这种现象可以理解为造成吸收线的吸收物质是类星体周围的物质。

C 型　在光谱中有锐的吸收线组及一些锐的吸收双线。出现最多的是 CⅣ 和 MgⅡ 的双线，最常观测到的一些吸收双线如表 23.2 所示。这些吸收线可能是由于一些延伸的、低密度的星系晕形成的。这些星系处于类星体和观测着之间，距离类星体很远，由于它们的距离不同，因而形成多重红移。在一些高红移的类星体中，多重红移的数目达到 10 重以上。

表 23.2　类星体谱中最常见的吸收双线

谱线	波长/nm	谱线	波长/nm
NⅤ	123.88	AlⅢ	185.47
	124.28		186.28
SiⅡ	126.04	MgⅡ	279.63
	1304.4		280.35
SiⅣ	139.38	CaⅡ	393.48
	1402.8		396.96
CⅣ	154.82	NaⅠ	589.16
	155.08		589.76

有的吸收线分类把 B 和 C 型合成一类，统称为重元素吸收线。

D 型　这种类型的类星体的光谱在吸收线 Ly α 短波一侧有大量多重吸收线。1970 年，林茨(Lynds)首先指出，在 Ly α 发射线短波一侧的吸收线只能是 Ly α 吸收线，因为比 Ly α 线波长更短的天然谱线十分稀少。显然，光学波段能观测到 Ly α 多重吸收线系统的条件只能是高红移的类星体，红移值应该大于 2。进一步观测表明：从红移 $Z=1.5$ 到 $Z=4$ 的类星体都发现了大量这种多重吸收线。在一颗类星体的谱线中往往能观测到几十根这种吸收线，所以又称为

Ly α 森林或线丛。

由于这个线丛的成因和其他类星体的吸收线的性质完全不同，它们是由于类星体与观测者之间的星际云产生的。这些星际云可能是原始星系，或者是星系际介质。由于这些星际云的光度很低，目前只能通过 Ly α 线丛探测到。

三、类星体的红移

至今类星体的物理本质仍然存在许多未解之谜，首先是“红移之谜”。观测事实表明，类星体的红移特别大，比一般星系的红移量大得多。

天体物理学家一直热衷于寻找大红移类星体，因为这标志着人们对宇宙探测

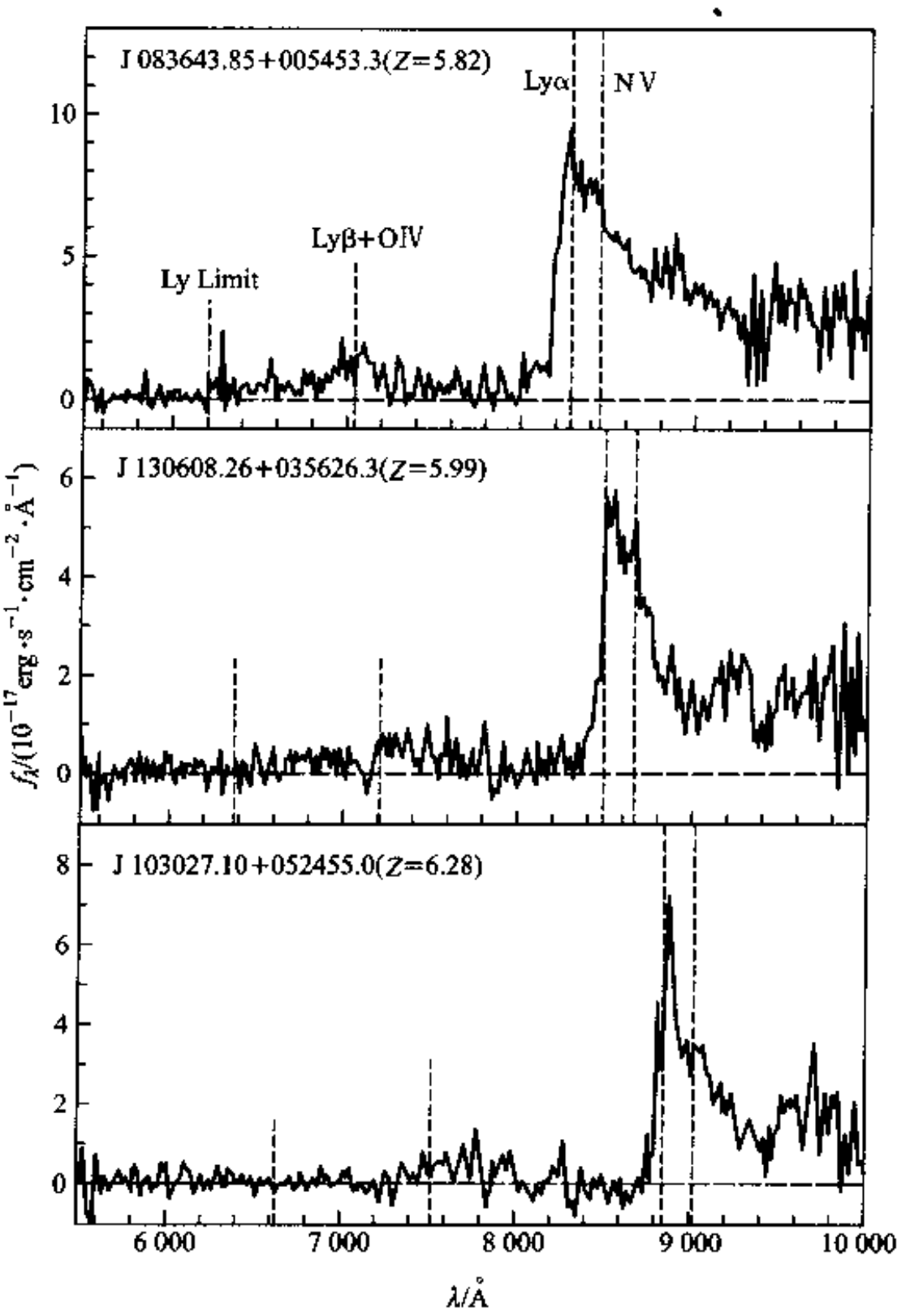


图 23.4 三个大红移类星体的分光光度图

的最远距离的极限。随着科学技术的发展，科学家们探测的宇宙深度也越来越远。20 世纪 70 年代发现的红移最大的类星体 PKS2000－330，$Z=3.78$，而 80 年代发现的类星体 PC1247+3406，视星等为 20.4 m，退行速度为 2.8×10^5 km/s，其 $Z=4.897$，它距离我们大约 142 亿光年。在 2000 年基特峰天文台发现的红移最大的类星体 J030117+002025 的红移量 $Z=5.5$。在 2001 年 SLOAN 巡天观测发现的红移很大的类星体 J103027.10+052455.0，其 $Z=6.28$。图 23.4 给出了三个大红移类星体的分光光度图。

最大红移类星体的宇宙距离有多远呢？这个问题涉及到宇宙的年龄和类星体形成时期。依据哈勃常数 H_0 的倒数可以计算宇宙的年龄，宇宙的特征膨胀年龄大致可按 $1/H_0$ 来估计，宇宙的年龄大约在 100 亿到 200 亿年之间。类星体距离的光年数意味着类星体的年龄的下限，由红移量 Z 值，我们可以推算出类星体在宇宙中的形成年代。例如一个 $Z=5$ 的类星体，取哈勃常数 $H_0=65$ km/(s·Mpc)，由 $v/c=[(1+Z)^2-1]/[(1+Z)^2+1]=0.946$，求出该类星体的退行速度 v 为 2.84×10^5 km/s，则此类星体距离我们有 4 365.9 Mpc，即 113.5 亿光年，这意味着这个类星体的年龄至少有 113.5 亿年。

由宇宙的年龄也可以推算出类星体距离的上限。按照宇宙大爆炸学说，宇宙的年龄大约是 200 亿年，因此，估计最远的星系距离（包括类星体）不会超过 200 亿光年。

表 23.3 给出极高红移类星体的基本物理参量，其中类星体的名称 SDSS 是美国的斯隆基数字巡天（Sloan Digital Sky Survey）的简称。SDSS 的排号是按类星体的赤经、赤纬进行的。SDSS 观测配有 640 条光纤，可进行测光巡天，也可进行分光观测。在测光系统中采用 5 种颜色的滤光片，中心波长分别为

$u=354.3$ nm；$g=477.0$ nm；$r=623.1$ nm；$i=762.5$ nm；$z=913.4$ nm

表 23.3　极离红移类星体的物理参数

名称	红移	i 星等	z 星等	D_A	D_B	吸收线红移
SDSS 1044--0125	5.80	21.81	19.23	0.91	0.95	5.5
SDSS 0836+0054	5.82	21.04	18.74	0.90	0.91	5.5
SDSS 1306+0356	5.99	22.58	19.47	0.92	0.95	5.7
SDSS 1030+0524	6.28	23.52	20.05	0.93	0.99	6.0

注：D_A 表示从 Ly α～Lyβ 波段连续谱的减弱量，D_B 表示从 Lyβ～Ly 线系限波段连续谱的减弱量。

由于在宇宙中分布着大量的星系际中性氢云，所以类星体发射的氢 Ly α 辐射，穿过星系际空间时，会被吸收和再辐射，从而减弱了连续谱的辐射强度。这样

在 Ly α 发射线的短波一侧的连续谱会减弱，这叫做冈-皮特森(Gunn - Peterson)效应。由冈-皮特森效应引起的连续谱的减弱会出现吸收带，这是由于从类星体到观测者之间分布着大量的中性氢云。我们定义连续谱的减弱量 D 为

$$D=1-\frac{f_{观}}{f_{连}}$$

式中，$f_{观}$ 为观测到的连续谱强度，$f_{连}$ 为理论计算的连续谱强度。按连续谱为幂律谱处理，取谱指数 $\alpha=-0.5$。在实测中，D 取两段分别测量，D_A 表示从 Ly α ～Lyβ 波段连续谱的减弱量，D_B 表示从 Lyβ～Ly 线系限波段连续谱的减弱量。由表 23.3 可见，D_A 与 D_B 减弱量只有 10%左右，但是，却随着红移的大小而改变，红移越大，这种效应越小，这说明它们之间存在着演化效应。

*四、类星体红移的本质

目前关于类星体红移的原因仍存在争论，主要有两种对立的看法：大多数天文学家认为类星体红移与河外星系红移一样是宇宙膨胀随动引起的，类星体仍然服从哈勃定律，其距离由红移量来决定，这种看法称为宇宙学红移。少数天文学家认为，类星体的红移是由其内部的物理性质决定的，称为内禀性红移或非宇宙论性红移。下面我们对这两种观点分述如下。

1. 宇宙论性红移

宇宙论性红移论点的主要观测依据：(1)类星体的光谱和一般发射线星系的光谱没有本质的区别，尤其是赛弗特星系的光谱和类星体的光谱完全一致，只是在光度上有所不同。(2)类星体的光谱有吸收线，有的吸收线和发射线一一相伴，说明它们是由类星体周围的气体星云形成的。(3)Ly α 线丛的存在被解释为类星体与观测者之间的星云造成的。(4)在和星系靠近的类星体中观测到了红移量和星系距离关系一致的吸收线。(5)在成对的类星体中观测到了属于对方的吸收线。(6)引力透镜现象得到证实，而且观测到了引力透镜效应的透镜天体。(7)观测到了类星体周围的气体云，而且测得的气体云的距离和类星体一样，表明类星体是活动星系核。

以上大量的观测事实都支持类星体的红移是宇宙性红移，即类星体与星系的红移都是由于宇宙膨胀而形成的，它们只不过比普通星系远得多。

2. 非宇宙论性红移

美国天文学家阿尔普(Arp)和柏比奇(Burbidge)、英国天文学家霍伊尔(Hoyle)及印度天文学家纳卡尔(Narlikar)共同倡导非宇宙论性学说，他们列举的主要事实：(1)一些类星体和星系非常靠近，似乎有物理联系，但它们的红移量却相差很大。(2)类星体和星系存在着一定的统计的相关性。(3)一些亮星系周围的类星体的数密度明显高于场类星体的数密度。(4)发现一些亮星系存在着

"特区",即某些亮斑或旋臂的一些特殊部位,其视向速度和星系本身的视向速度相差甚大,甚至差到一个数量级。非宇宙论性红移的观点正是以此来佐证星系可以和类星体共存。(5)类星体往往存在着特殊的排列或成团性,与星系有很大区别。(6)观测上缺乏足够的证据来证明每一个类星体都必然存在着黑洞。(7)观测到的类星体产能率与计算的发射能量有矛盾,然而解释不能令人满意。

目前,大多数天文学家认为类星体的红移是宇宙性红移,少数人坚持非宇宙性红移,认为是类星体特有的内秉性红移,两种观点一直争论至今。

五、引力透镜效应

类星体可以作为宇宙的探针,一是它们具有大的红移,另一有力手段是类星体的引力透镜现象。引力透镜的理论基于伟大的物理学家爱因斯坦在 1915 年创立的广义相对论。广义相对论说明了空间和时间是怎样因大质量物体的存在而畸变的原理,认为物质弯曲了空间,而空间的弯曲又反过来影响穿越空间物体的运动。宇宙中大质量物体将使穿行的天体的光线发生偏折,沿着弯曲的轨迹前进(如图 23.5 所示)。

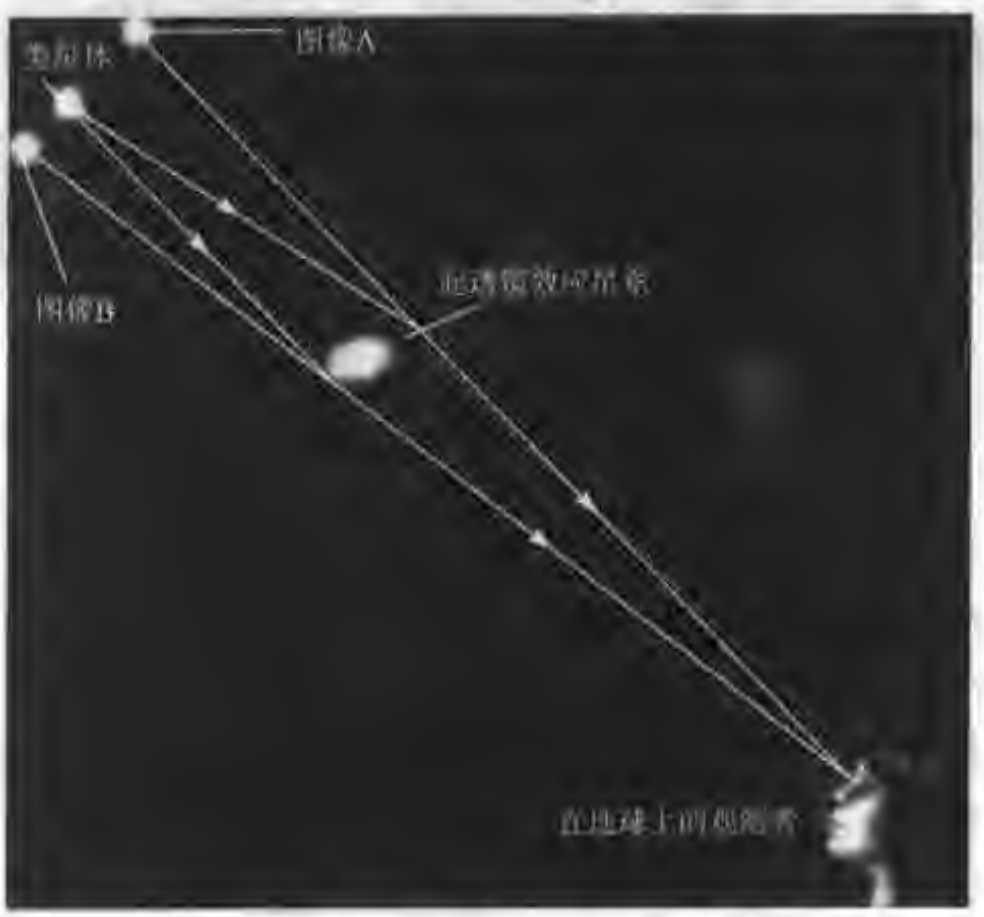


图 23.5　引力透镜效应的原理

1919 年,英国天文学家爱丁顿利用日全食机会验证了广义相对论的光学弯曲理论的正确。同年,英国物理学家罗杰(O. Lodge)提出了大质量天体作为引力透镜汇聚星光,并形成多重像的观点。1979 年果真发现了引力透镜形成的类星体双像 Q0957+561A、B。它们分开只有 6.15″,光谱完全相同,红移量都是

$Z=1.41$。天文学家分析指出，这是同一颗类星体，由于在它与我们之间有一个大质量的暗星系，此星系的引力场使类星体的光线弯曲，如同经过光学透镜一样，通过引力透镜中心的光线不发生偏折；而离开中心的便发生偏折；在某个特定距离处偏折最大，因此，由于引力透镜的作用，结果会产生了 2 个像（如图 23.6）。这个类星体双像令人信服的证实了引力透镜确实存在。

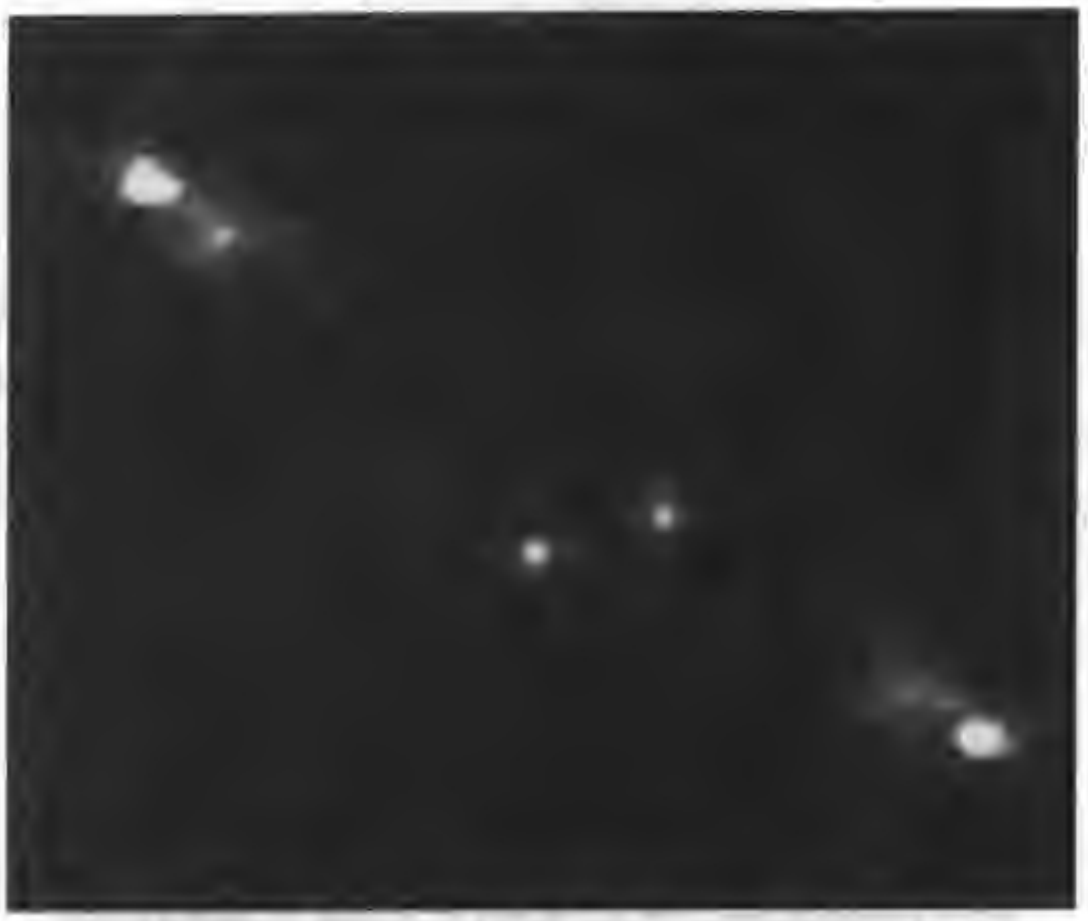


图 23.6 类星体的引力透镜效应

六、类星体的模型

类星体是典型的活动星系核。从观测光谱特征上看，类星体与一些活动星系，如赛弗特星系、蝎虎座 BL 星系等很相似。从类星体的分布上看，也发现它与星系存在着成协现象，它们彼此靠得相当近。1980 年发现有 117 颗类星体与星系成协。近年，美国天文学家用 5 m 望远镜观测到 3C48 周围的暗云，测出了这些暗云具有发射线和吸收线，并且与类星体的红移量相同，这说明类星体与周围的星云或星系成协。

大量观测事实表明类星体是活动性很强的活动星系核，核心本质是什么呢？理论研究认为，核心很可能是一个黑洞，而黑洞的周围被一层一层气体包围着。图 23.7 给出了类星体的核心是黑洞的模型。我们所能观测到的来自类星体的各种辐射可能是从这些气体发出的。类星体核心黑洞核的半径，由史瓦西半径来计算：

$$R_g = 2Gm/c^2$$

式中 G 为万有引力常量，c 为真空中的光速，m 为黑洞的质量。类星体的质量绝大部分都集中在这里。黑洞质量约为 $10^8 \sim 10^{12} m_\odot$。对于一个 $10^8 m_\odot$ 的类星体，黑洞的半径约为 3×10^8 km，是太阳半径的 500 多倍。在黑洞周围 $3\times10^8 \sim 10^{10}$ km之间的区域，主要辐射高能 X 射线和紫外辐射，再往外大约在 10^{14} km 范围是稀薄的气体，它们发射可见光，我们观测到的发射线是从这里发出的。类星体延伸的外层可达 10^{18} km 之外，主要发射射电辐射。

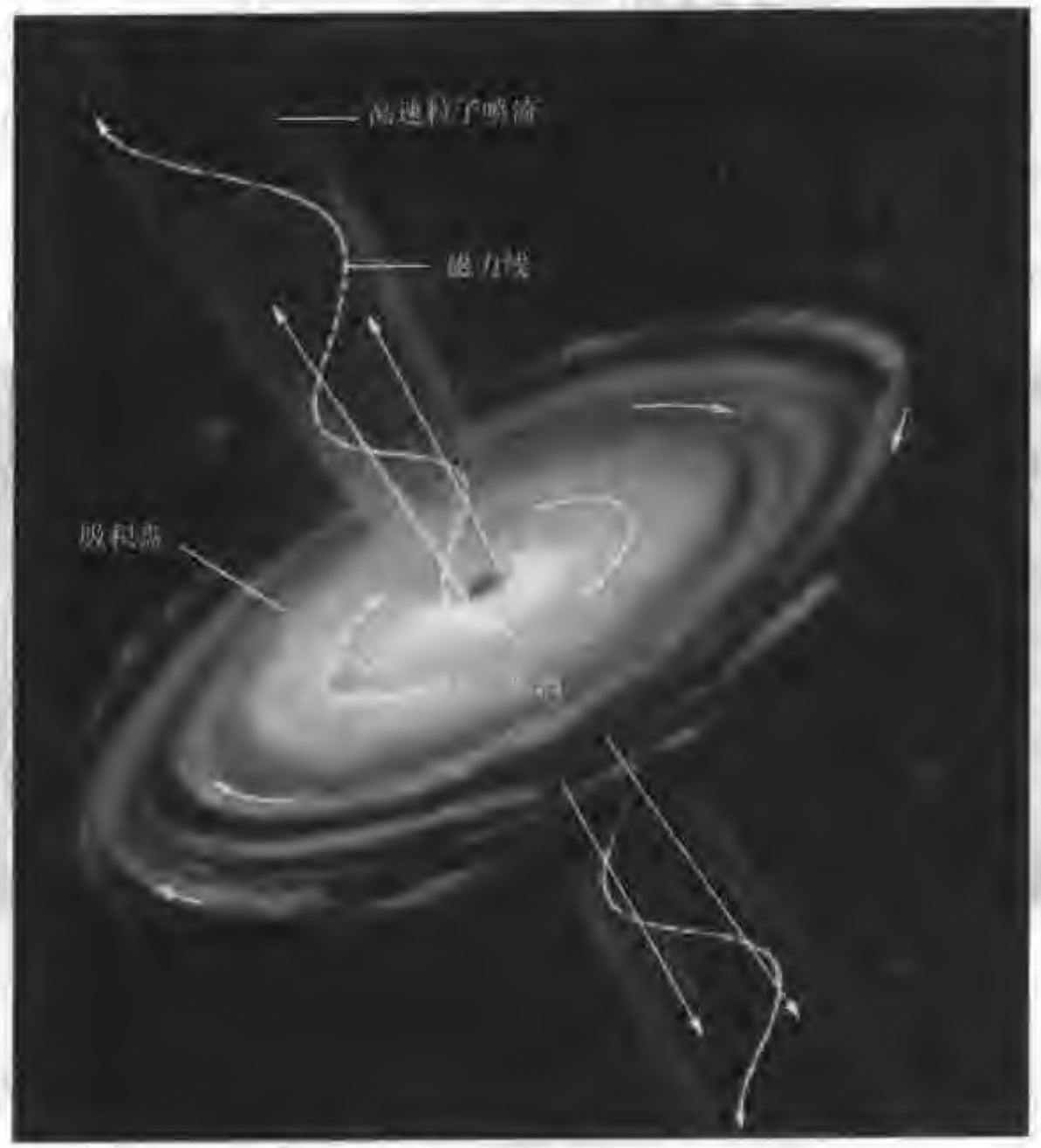


图 23.7　类星体的模型

从宇宙学角度来看，类星体是宇宙中最早形成的天体。类星体是成团的吗？这个问题至今还没有定论。

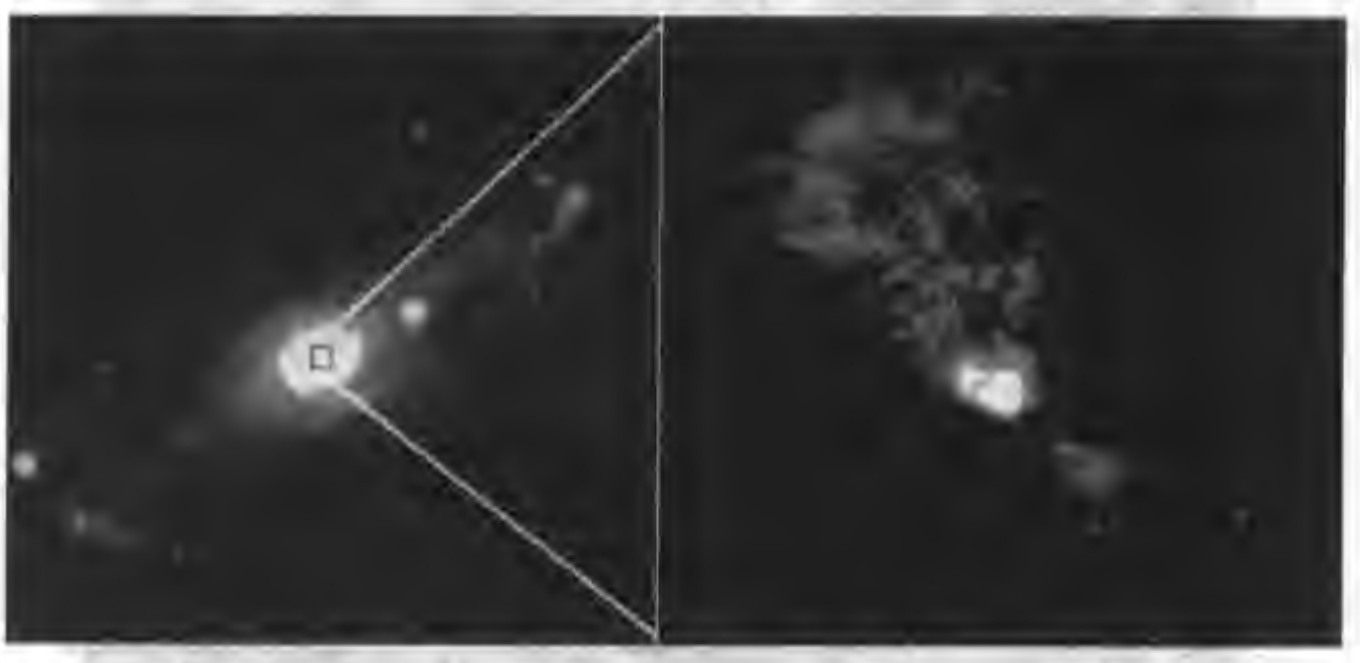
第 2 节　赛弗特活动星系

美国天文学家赛弗特(Carl Seyfert)于 1943 年在威尔孙天文台从事星系的

红外研究。他发现一些星系具有反常的发射线和明显的星系核，且星系核有剧烈活动现象，这种类型的星系后来被命名为赛弗特星系。苏联天文学家马卡良从事了大量的星系巡天观测，他发表的"马卡良天体星表"中有 10%的天体是赛弗特星系。截止到 2000 年，天文学家已发现了 1 711 个赛弗特活动星系。这类星系离我们比较遥远，大多有几百兆秒差距，少数距离我们20～30 Mpc。

一、观测特征

赛弗特活动星系的明显观测特征是中心有明亮的恒星状活动星系核，其大小仅约 1 pc，星系核的亮度比我们银河系亮 1 万倍。星系核的周围有暗弱的旋涡结构，星系一般是 Sa 型或 Sb 型的旋涡星系。此外，星系核有很强的紫外、红外及射电辐射，有人推测赛弗特星系中心是个具有强磁场的高速旋转的大质量星体或者黑洞。例如距离我们大约 40 Mpc 远的赛弗特星系 NGC5728 的图像(图 23.8)显示出星系的核心有喷流，这很可能就是黑洞。



(a) (b)

图 23.8 赛弗特星系 NGC5728

(a) 是地面望远镜拍到的照片；(b) 环球轨道上拍到的图像，此图是(a)图的两条锥线所交部分的放大图，可以清楚看到亮的星系核及由核心喷射出的喷流

在这类星系核的光谱中有明显的宽发射线，包括原子光谱的允许线、半禁戒线和禁线。允许线的宽度一般都比较宽，如巴耳末线的多普勒宽度可达到500～10^4 km/s，甚至有高次电离谱线如有 13 次电离的铁线；谱线红移比较大，说明核内的物质以很高的速度脱离星系核。光谱中除了强发射线外，也有相对弱的吸收线。

连续谱呈蓝色或紫外超，为非热谱或不完全是非热谱，由此可以推测这类星系的温度很高。而且，这类星系的连续谱在几天到一年内常发生强度方面的变化。

赛弗特星系是低光度活动星系核。这类星系的绝对星等 M_v 约-19^m～-22^m。

二、赛弗特星系的分类

20 世纪 70 年代初，这类星系被分成两个次型：赛弗特 Ⅰ 型和赛弗特 Ⅱ 型。两者的划分主要是根据谱线宽度，确切地说，是谱线极大值一半所对应的谱线全宽度(FWHM)。其中谱线宽度 $\Delta\lambda$ 的单位是 nm，可通过公式 $(\Delta\lambda/\lambda)c=v$，换算成 km/s 的单位。观测表明，赛弗特 Ⅰ 型星系的允许线宽度非常宽，氢的 H_α 线的谱线宽度大于 3 000 km/s；而赛弗特 Ⅱ 型星系的允许线宽度和禁线宽度差不多，一般在 500～1 000 km/s。

现代典型的判断方法是用比较谱线 H_β($\lambda=486.3$ nm)和氧的禁线[OⅢ]($\lambda=500.7$ nm)谱线的 FWHM(谱线强度极大值的一半所对应的全宽)的比值来划分赛弗特星系。

对于赛弗特 Ⅰ 型，FWHM(H_β)/FWHM([OⅢ])≈1。

对于赛弗特 Ⅱ 型，FWHM(H_β)/FWHM([OⅢ])≈0.1。

此外，单独根据[OⅢ]($\lambda=500.7$ nm)谱线的 FWHM 也可以区分两个次型的赛弗特星系，即

对于赛弗特 Ⅰ 型，FWHM($\lambda=500.7$ nm)≈370 km/s。

对于赛弗特 Ⅱ 型，FWHM($\lambda=500.7$ nm)≈500km/s。

在光变方面赛弗特 Ⅰ 型一般都有光变，光变的时标从几周到几个月；而赛弗特 Ⅱ 型一般没有光变。

在偏振度方面，赛弗特 Ⅰ 型的偏振度要高，达到 1%～8%；而赛弗特 Ⅱ 型的偏振度只有 1%～4%。

20 世纪 80 年代，有的天文学家在仔细研究赛弗特星系时把它分成更多的次型。例如根据谱线的相对强度，若所有的谱线轮廓都清楚的是赛弗特 1.5 型；若 HI 的发射线中 H_α 相对弱但出现 H_β 的是赛弗特 1.8 型；而 H_β 几乎看不出的是赛弗特 1.9 型等。表 23.4 给出一些赛弗特星系的观测物理参量。

表 23.4　一些赛弗特星系的观测物理参量

星系名	类型	累积视星等 m_1	$Cz/(\mathrm{km\cdot s^{-1}})$	$U-B$	$B-V$	M_B
NGC1068	Ⅱ	10.5	1 134	1.0	0.0	20
NGC1566	Ⅰ	10.3	1 178	0.8	0.0	20
NGC3227	Ⅱ	11.7	1 050	0.8	−0.1	−19
NGC3516	Ⅰ	12.6	2 710	0.8	−0.2	−20
NGC4051	Ⅰ	11.0	726	0.7	−0.4	−19
NGC4151	Ⅰ	11.1	1 002	0.5	−0.7	−19
NGC6814	Ⅰ	12.0	1 578	1.1	+0.4	−19

注：Cz 为光速乘以红移量；$U-B$ 和 $B-V$ 是色指数；M_B 是蓝色的绝对 B 星等。

三、赛弗特星系的电磁谱

赛弗特星系的光谱是由连续谱叠加发射线组成。发射线的组成与类星体非常相似，有许多高激发态的禁线，例如[Fe X](λ637.4 nm)，激发电势为 234 eV；[Fe XI](λ 789.2 nm)，激发电势为 262 eV；[Fe X IV](λ 530.3 nm)，激发电势为 361 eV。

赛弗特星系光谱中的巴耳末线 H_α、H_β、H_γ 之间的强度比有反常的陡降，红端的 H_α 比预计的强度要强。造成这种现象的原因可能有二：第一，由于碰撞激发或辐射激发，或者巴耳末线的自吸收，使得氢原子的能态分布出现反常。第二，光谱整个被红化，这意味着能量被尘埃大量吸收，然后在偏红波段再辐射。目前观测已证明，赛弗特星系大多都是很强的红外源。这说明赛弗特星系核的附近有大量的尘埃使核的亮度减弱。

赛弗特星系的连续谱明显地偏离通常由恒星组成的星系核光谱，呈现为热谱和非热谱的混合谱。赛佛特 I 星系的连续谱大都是幂律谱，而赛弗特 II 星系的连续谱常混有恒星的光谱以及由尘埃造成的红化。一般认为热辐射和非热辐射结合的辐射机制有三种情况：(1)相对论性电子的同步辐射；(2)恒星的光球辐射；(3)尘埃的红外辐射。

赛弗特星系连续谱的突出特征是具有很强的红外辐射(从近红外到大于 100μm 的远红外)，在红外波段的辐射还表现出光变现象和偏振现象。IRAS 卫星发现的大部分红外源被验证是新的赛弗特星系。

赛弗特星系连续谱的紫外波段呈现为非热谱，只是谱指数小些。这类星系的 X 射线辐射普遍很强，同强红外辐射一样，这也是这类星系的一个重要物理特征。赛弗特星系的 X 射线光度为 $10^{40}\sim10^{45}$ erg/s。此外，X 射线辐射具有光变特征，光变时标从几分钟到数十天，光变幅度可以成倍地变化。许多赛弗特星系的 X 射线谱(包括软 X 射线)可以用单一的谱指数去拟合。X 射线的辐射与其他波段的辐射存在着相关性，特别是光学波段和红外辐射有明显的相关性。有的科学家分析出 X 射线与 H_α、H_β、[O III](λ 500.7 nm)甚至与 21 cm 射电谱线之间也存在着联系。

*第 3 节 蝎虎座 BL 天体

1966 年天文学家在致密星系巡天中发现了一类新的活动星系核，因为它以蝎虎星座 BL 为典型的天体，便称为 BL Lac 天体(或蝎虎天体)。大多数蝎虎座 BL 天体是通过射电波段的巡天观测发现的。平谱射电源的光学对应体至少亮于 20^m。光学光谱中没有或只有很弱的发射线。后来通过卫星的 X 射线巡天观

测发现了一批与 BL Lac 类似的天体，于是把它们统称为蝎虎座 BL 天体或简称蝎虎天体。到 2000 年总共发现了 462 颗蝎虎天体。其中，有一半是通过射电方法发现的，大约 1/3 是通过 X 射线源探测方法发现的。随着观测技术的不断改进，尤其是高灵敏 X 射线卫星的探测，将会发现更多的蝎虎天体。

现已证明蝎虎天体是活动星系核，这主要依据两个观测事实：第一，某些蝎虎天体似乎是镶在星系的核心区之中；第二，用 21 cm 波段的射电望远镜观测蝎虎天体与地球之间的星系，它们吸收蝎虎天体的光，产生的氢吸收线红移很大。这说明蝎虎天体比这些河外星系更远。

一、BL Lac 天体的主要观测特征

1. 非热型的连续谱

蝎虎天体的辐射在射电波段呈现出平谱，有很强的辐射。从射电、红外、光学到紫外甚至延伸到 X 射线都呈现为典型的非热幂律谱。波段流量随着波长的减短而逐渐减少，连续谱的强度随着波长的变化按照幂指数规律而变化。它在红外波段的辐射也很强，这是 BL Lac 天体的另一个显著特征。X 射线谱同样表现为非热型，过去都是用单一的幂律谱来描述。后来发现仅 X 射线谱也需要用双幂律谱才能符合观测的结果。造成双谱的原因一般认为软 X 射线部分是由于同步辐射形成的，而硬 X 射线部分是由于逆康普顿辐射过程形成的。

2. 快速光变

蝎虎天体的光度有剧烈变化，但没有周期性，是不规则的，光变时标往往在几十分钟到几个月，光变幅度可达到几个星等。个别的 BL Lac 天体呈现出巨大的灾变性的变化，在几周内光变幅达 5^m，相当于光度变化 100 倍。蝎虎天体最亮时比正常星系亮约 1 万倍。BL Lac 天体的光变现象不仅发生在光学波段，在红外和 X 射线波段同样有光变。

BL Lac 天体的光变时标与波段有关，光学波段的光变时标往往是从几小时到月的量级，而射电波段的变化这到月的量级。由于光变的不规则性，BL Lac 天体还出现双重光变周期，即在长的时标变化上叠加有短时标的变化。

3. 高偏振度

蝎虎天体的光学和射电辐射都是偏振辐射。在活动星系核中 BL Lac 天体的偏振度可能是最高的，往往可以这到 30%。偏振度同样与波长有关，随波长的增加而减少，而且偏振度本身也有变化。

4. 发射线很弱

近代高信噪比、高分辨的光谱观测揭示出大多数 BL Lac 具有弱而窄的发射线，如[O Ⅲ](λ 500.7 nm)的发射线强度与其连续谱相比很弱。特别是当 BL Lac天体处于光变极小期时更为明显。

由于 BL Lac 天体的发射线很弱，测量红移只能通过弱的吸收线，个别的 BL Lac天体可以用 21 cm 射电谱线的位移来测量红移。

以 BL Lac 天体为代表的这类活动星系核的典型物理特性是光变和偏振，所以近年来又称这类天体为“闪偏天体”(BLAZAR)，它们是当今热门的研究课题之一。

二、蝎虎天体的分类

目前将蝎虎天体分为两类：一类是中等强度的射电星系，称为 FR Ⅰ，其喷流方向朝向观测者，因而形成了光变和偏振现象。另一类是强射电源，称为 FR Ⅱ，他们处在更远的距离上，其喷流方向几乎正对向我们，因此呈现更快速的光变现象。

理论研究认为蝎虎天体是一种独具特色、活动特别激烈的活动星系核。核内很可能由黑洞和吸积盘及喷流组成。也有人认为 BL Lac 天体就是类星体，只不过在到达观测者的路上受到了微引力透镜的影响。目前有关 BL Lac 天体的理论模型的研究还不够充分，仍有许多奥秘未被揭开。

第 4 节 其他活动星系

一、N 星系

这类星系的名称最早是由摩根(Morgen)引入的，其特征是中心具有一个亮的恒星核，周围被低亮度的延伸的星云包围，中心亮核的颜色和类星体相似，而延伸云的颜色和亮度分布类似一个巨椭圆星系。由于它的活动星系核周围有星云(Nebula)，所以称为 N 星系。

美国天文学家桑德奇认为，N 星系可能是通常的椭圆星系(E 型星系)中间有一个微型类星体。后来发现不仅仅是椭圆星系，个别的旋涡星系也有同样特征的。

二、具有低电离窄发射线区的星系——LINER 活动星系核

LINER 活动星系核的全称是“具有低电离窄发射线区的星系”，即 Low Ionization Narrow Emission - line Region 的缩写。在 LINER 活动星系核的光谱中有几个显著的特点：(1)低电离电势[OI](λ 630.0 nm)的谱线很强，而高电离电势线[Ne Ⅴ]和[Fe Ⅶ]观测不到。(2)两条线的强度之比：[OII](λ 372.7 nm)/[OIII](λ 500.7 nm)≈1，而在赛弗特星系光谱中，这两条线的强度比只有 0.5 左右。此外 H_β 线显得很弱。因此，用[OIII](λ 500.7 nm)/H_β 的谱线强度比也可以

将 LINER 区分出来。这类活动星系核的光谱中典型的发射线宽度只有200～400 km/s，远远窄于其他活动星系核。

目前，关于 LINER 活动星系的理论模型还正在研究。

三、星暴星系

星暴星系是指有大质量恒星爆发或正在形成的星系，这是一类内部正在发生极为剧烈恒星形成过程的河外星系。它们有比形态相同的其他星系更蓝更亮的核，例如 NGC253、M82 和 NGC7714 等。

如图 23.9 所示，M82 星系就是一个典型的星暴星系，观测到它的星系核有猛烈的爆发现象，从星系核中抛出的物质流的速度高达 1 000 km/s。可以推算出它喷出的氢至少相当于 500 万颗普通恒星的氢的总量。

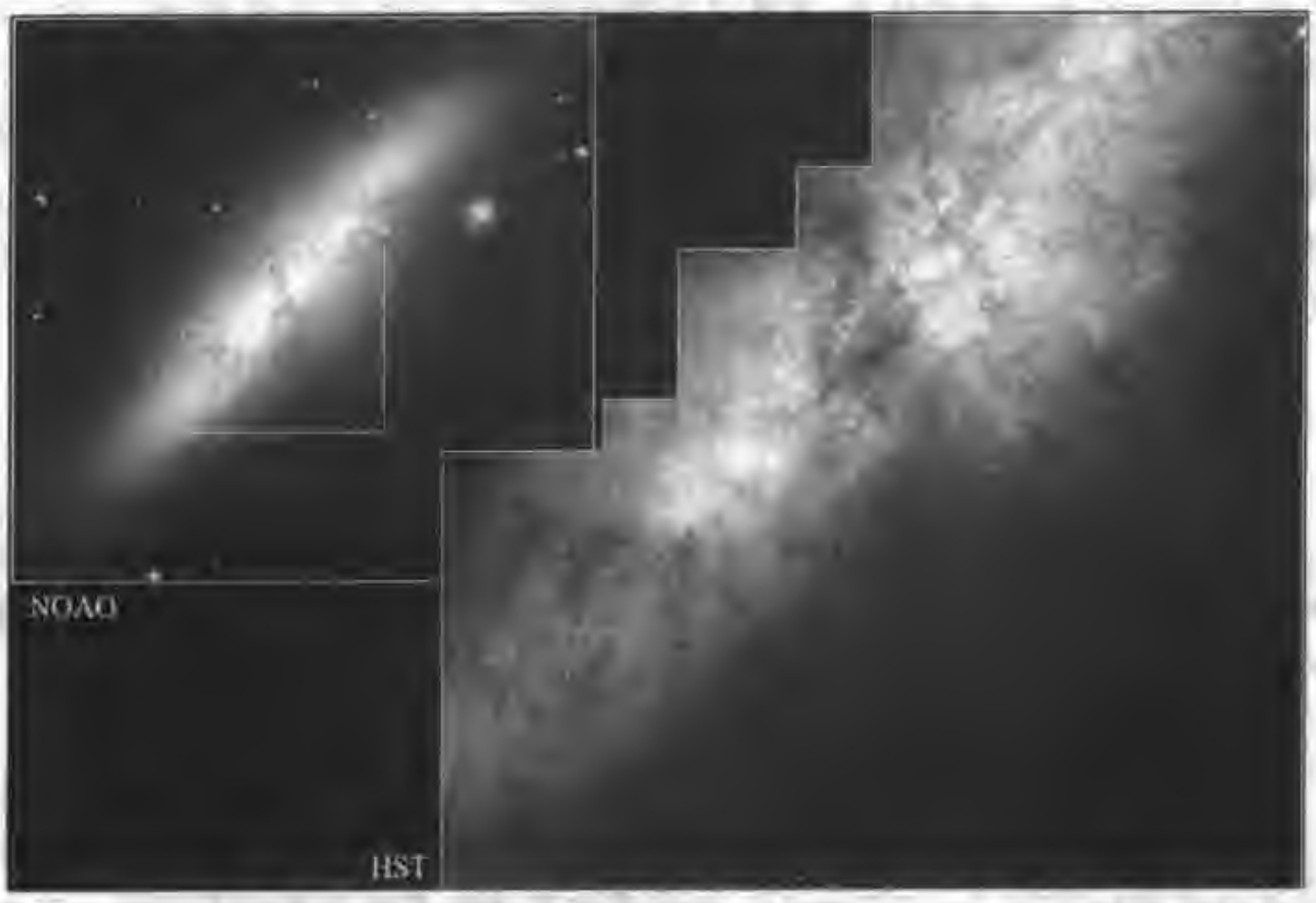


图 23.9　哈勃空间望远镜拍摄的 M82 星暴星系(右图为 M82 的星系核部分)

观测研究表明，星暴星系的红外光度远大于光学波段的辐射强度；核区的光度远大于星系其他部分的光度之和。在近距离的旋涡星系和不规则星系中约有10%的星系具有极强的红外辐射、X 射线辐射和射电辐射，它们有可能是星暴星系。

此外，星暴星系的光谱中有很强且窄的星云发射线。这些都表明在星系中伴随着大质量恒星的爆发过程。星暴星系的质光比(m/L)很低，并且恒星的形成率很高，说明其内部正在形成大质量的恒星，而且恒星的形成过程具有爆发的

特征。

天文学家认为星暴星系和普通星系中恒星的形成有本质上的区别：第一是时标短，对于星暴星系来说典型的爆发时标只有约 10^7 年，而对于普通星系的恒星形成过程，大约是 $10^9 \sim 10^{10}$ 年。第二是爆发的区域不同，星暴星系的爆发出现在核心区域，尺度仅仅约 1 kpc。而普通星系中的恒星形成区是在星系盘或旋臂中。有人认为超新星的爆发是星系爆发的主要能源。

在连续谱的分布上，如果同一般的活动星系核相比，星暴星系在远红外波段（60 μm～100 μm）呈现出明显的峰值。而且在这些波段上有尘埃谱线和分子吸收线及氢和氦的共振线。同时，观测到了只有激波才能激发的高电离谱线。根据氢线和氦线的强度分析，得出星暴星系的有效温度 T_{eff} 的范围为 $3.85\times10^4 \sim 4.7\times10^4$ K。根据质量在 30～60 $m_\odot$ 的 O7、O6、O5 型星的谱线，得出星系年龄只有 $10^7 \sim 10^8$ 年。通常认为，星暴星系是活动星系核演化的前身，作为演化的初始阶段，星暴星系和 LINER 以及赛弗特 Ⅱ 星系十分相似，都处于大质量的热主序星形成阶段。这一阶段的后期，可能出现大质量的沃尔夫-拉叶型恒星，当温度达到 10^5 K 时，中心区域开始形成黑洞，进一步演化则出现超新星型的恒星爆发，形成具有中心为黑洞的标准活动星系核。目前，星暴星系的爆发机制和演化过程尚在探讨之中。

*第 5 节 活动星系核的统一模型

依据活动星系核的观测特征，可以对活动星系核整体结构和特性做出概括的分析。经过研究天文学家们认为存在一个共同的模型（图 23.10），不同类型的活动星系核仅仅是观测角度的不同而造成的。

一、活动星系核的光度、尺度和质量

活动星系核往往在所有电磁波段都有极强的辐射。一般来说，活动星系核的总光度大约有 $10^{43} \sim 10^{48}$ erg/s。如类星体是普通星系光度的 1 千到 1 万倍。然而，活动星系的尺度比一般星系小，观测到的星系的射电展源的范围约 1 Mpc，星系的核心部分大约 1 kpc，其中致密射电核约 0.1 pc。由观测到的光度可以估计出活动星系核的质量约 $10^5 \sim 10^{10}\ m_\odot$。

二、核心是黑洞

如上所述活动星系核的质量这样大，尺度又如此小，因此，中心一定是超高密度的黑洞，这个思想的观测依据是：

1. 快速光变现象：光变周期和天体的直径大小（D）的关系为，$\Delta t \geqslant D/c$（c 为

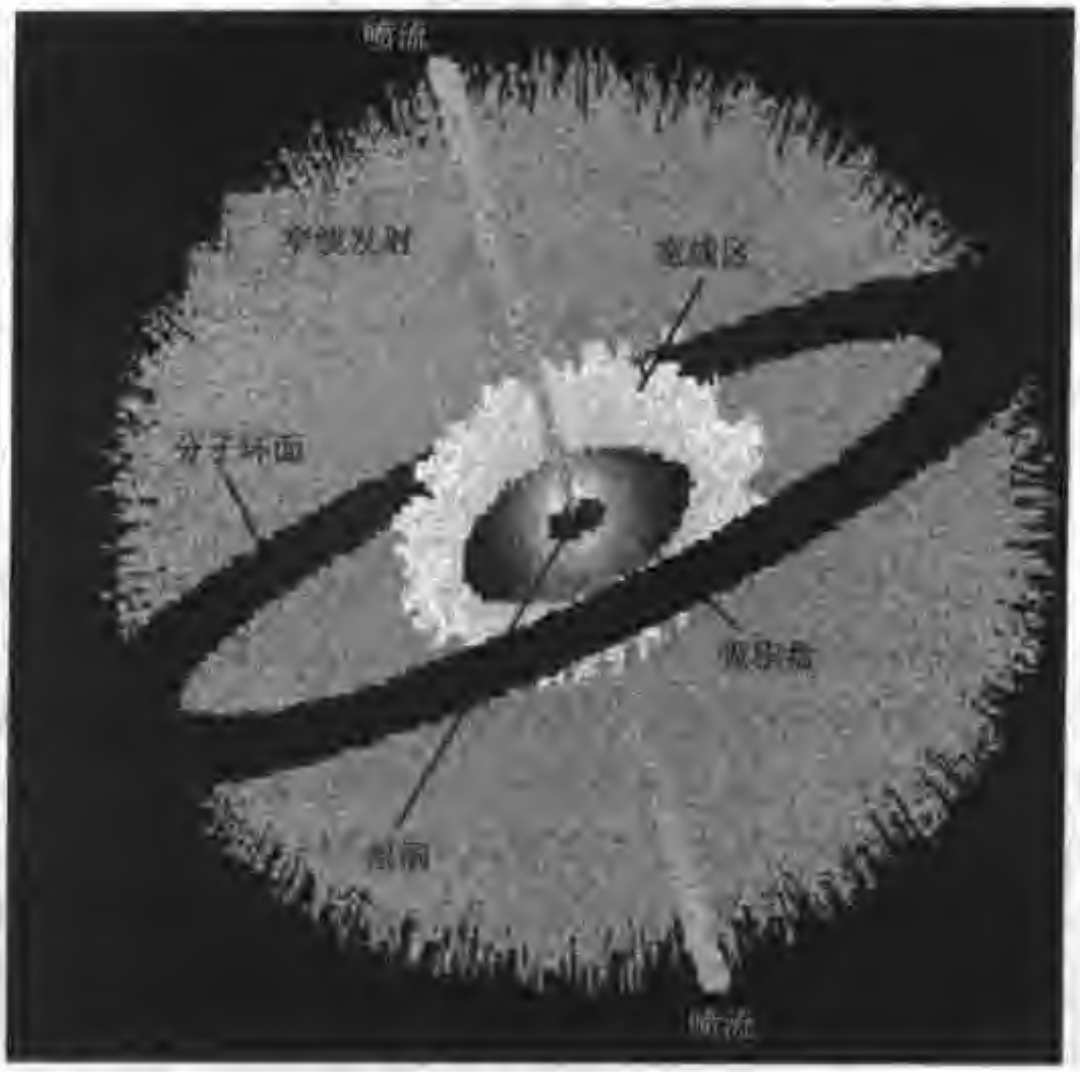


图 23.10 活动星系核的统一模型示意图

光速)。赛弗特星系的光变时标仅有 1 分钟,相当于穿越一个约 $10^7\ m_\odot$ 的史瓦西黑洞,而且光变时标的长度有随光度增加的趋势。

2. 极高效率的能量转换:普通恒星或正常星系都没有活动星系核的辐射能量效率高。

3. 视超光速现象:活动星系核的核心喷出的物质流速度,测出来有超光速现象,称做活动星系核的视超光速膨胀。这涉及活动星系核内应有相对论性的流体,并具有相对论性运动速度,所以核心应当有相对论性的引力势。

4. 射电源在空间的轴向取向能维持在 10^7 年以上不变,只有旋转的黑洞才能维持这样长的时间。

5. 活动星系核显示出中心有强的引力势。目前,观测上还无法给出黑洞存在的直接证据。

三、活动星系核的电磁谱特征

活动星系核的典型连续辐射谱型是非热辐射谱型,呈幂律谱,谱流量强度 F_ν 与频率 ν 的关系为

$$F_\nu \propto \nu^{\alpha}$$

其中α为谱指数。多数活动星系核的谱指数$\alpha \approx -1$。

近年来的观测表明，有许多活动星系核在光学和红外波段表现出以热致辐射谱型为主的连续谱，这使活动星系核的连续谱特征显得更为复杂。有些活动星系核还具有光变现象而且光变的时标比较短，从几小时到几年。

人们最早观测到的光学波段的喷流现象是室女座星系团中 M87 的光学波段的喷流现象，近年来发现了大量的射电星系和类星体有喷流现象，喷流的尺度从 1 pc 直到 1 Mpc。

四、活动星系核的能源

某些星系核的体积比太阳系大不了多少，但是它的光度比整个银河系还亮。类星体就是最亮的活动星系核。理论家认为如此巨大的能量输出只能来自核心的超大质量黑洞。后来认识到能量也可以从黑洞的自转中抽取。这些想法的依据是许多星系核核心可能拥有超大质量的黑洞。近年来，甚长基线天线阵(VLBA)对星系 NGC4258 核心的观测，提供了存在超大质量黑洞的无可置疑的证据。哈勃空间望远镜的观测也证实，大多数近距星系的核心都隐藏着超大质量的黑洞。

这些超大质量的黑洞是如何形成和演化的呢？它们是由恒星"种子"长大而成，还是起源于星系形成的最初阶段呢？这是新千年天文学家的研究任务。要解决这个问题需要进一步对星系核的全波段的电磁辐射观测，以及探测大红移量 $Z=10$ 以上的活动星系核。大质量的黑洞不仅吸积物质，而且也在附近抛出近光速的强大喷流。按照相对论，这种高速喷流是相对论粒子流，会产生能量极高的光子，其频率比可见光要高 10^{11} 倍。一些大质量的黑洞也可能会合并。黑洞合并这种灾变事件会产生强大的引力波，能在非常远的距离(红移量至少高达20)被探测到。这种引力辐射可以在实际并合之前就被探知，从而使人们能够精确预报后随事件，以便采用全波段观测。由于强烈的恒星形成爆发或存在超大质量黑洞，因此星系核可以变得非常明亮。这种"星暴"可能与星系的初始形成有关，也可能是与别的星系的相互作用所触发的。

此外，活动星系核可能是超高能宇宙射线的来源(也有人建议 γ 射线暴和星系际激波是这类高能粒子源)。一般假设这些宇宙射线是被加速到非常高能量的质子。其能量是如此之高，以至等价于十亿到一千亿个静止质子的能量，这方面的研究也是当今天体物理学的重要课题。

【例题 1】 某一个类星体红移量为 0.17，如果它在 500 pc 远处具有太阳那样的视亮度，设哈勃常数为 65 km/(s · Mpc)，计算此类星体的光度。

解答：由类星体的红移 $Z=0.17$ 推出退行速度 $v/c=[(Z+1)^2-1]/[(Z+1)^2+1]=0.156$。

由哈勃定律 $v=H_0D$，所以此类星体的距离 $D=0.156\,c/65=720$ Mpc。

由于观测天体的星等与距离的平方成反比，所以 $m_2-m_1=5\ \lg(720\ \text{Mpc}/500\ \text{pc})$。

太阳的视星等为 -26.8^{m}，所以 $m_2=-26.8+30.79=3.99$。

$$M=3.99+5-5\ \lg(720)-30\approx-35.3$$

$$m-m_\odot\approx-2.5\ \lg L/L_\odot$$

$$2.5\ \lg L/L_\odot=(-35.3-4.75)$$

$$\lg(L/L_\odot)=16.02$$

$$L\approx1.05\times10^{16}\ L_\odot$$

【例题 2】 两个星系在距离 500 kpc 彼此绕转，它们的轨道周期估计是 300 亿年。利用开普勒定律求两个星系的总质量。

解答：由开普勒第三定律：

$$m_1+m_2=a^3/p^2=(5\times10^5/2\times206\ 265)^3/(3\times10^{10})^2$$

$$m_1+m_2=(2.5\times206\ 265)^3\times10^{15}/9\times10^{20}=1.523\times10^{11}\ m_\odot$$

所以，两个星系的总质量为 $1.523\times10^{11}\ m_\odot$。

【例题 3】 类星体 3C279 呈现有一光周（光运行一周的距离）的尺度变化，估计产生辐射区域的大小。它的视星等是 18^{m}。如果类星体的距离是 2 000 Mpc，它的绝对星等和光度是多少？每立方天文单位的空间 $(\text{AU})^3$ 产生多少能量？

解答：一光周相应的尺度 $=3\times10^5\times7\times86\ 400=1.814\times10^{11}$ km。

由于 $1\text{AU}=1.496\times10^8$ km，所以辐射区的直径即一光周的直径为 1 212.57 AU，由视星等和绝对星等与距离的关系公式：$M=m+5-5\ \lg r$，求出 $M\approx18+5-5\ \lg(2\ 000\times10^6)=-23.5$，假定它近似等于绝对热星等，则由 $m-m_\odot=-2.5\ \lg(L/L_\odot)$；所以 $-23.5-4.75=-2.5\ \lg(L/L_\odot)$，得到 $L=2\times10^{11}\ L_\odot$，这是每秒发出的总能量，辐射区的体积是 $(4/3)\pi(1\ 212.57/2)^3$，可得到相应的能量为 $220\ L_\odot/(\text{AU})^3$。

【例题 4】 星系 NGC772 类似于 M31 是 Sb 型旋涡星系，它的角直径是 7′，视星等是 12.0^{m}，而 M31 星系的角直径是 3.0°，视星等是 5.0^{m}。求：

(a) 假定两个星系的大小相等求两个星系的距离之比。

(b) 假定两个星系有相同的光度，求这两个星系的距离之比。

解答：设两个星系的距离分别是 r_1 和 r_2。

(a) 假定两个星系的大小相等，则

$$\frac{r_1}{r_2}=\frac{3\times60'}{7'}=25.7$$

两个星系的距离之比约为 26。

(b) 假定两个星系有相同的光度。

由 $M=m+5-5\ \lg r$ 得

$$12+5-5\ \lg r_1=5+5+5\ \lg r_2$$

$$5\ \lg(r_1/r_2)=12-5$$

$$r_1/r_2=25.1$$

所以两个星系的距离之比 25。

【例题 5】 观测一个类星体的光谱，其中静止波长为 300 nm 的谱线红移到了 1 500 nm，请估算：(a)这个类星体的退行速度；(b)根据哈勃定律，它到我们的距离是多少？（哈勃常数

为 $H_0=75$ km(s·Mpc)以上两项计算的精度要求为30%。)

解答:(a)红移 Z 用下面的公式描述:$Z=\Delta\lambda/\lambda_0$。式中 λ_0 是某谱线的静止波长,λ 是同一谱线在天体中的波长,$Z>0$ 时表示谱线由静止波长向波长较长的红端移动,称为红移;按照多普勒效应当天体的退行速度 v 比较大与光速 c 可以相比的情况下,需要考虑相对论效应,此时:

$$\frac{v}{c}=\frac{(Z+1)^2-1}{(Z+1)^2+1}$$

这个类星体的红移量 $Z=\dfrac{1\,500-300}{300}=4$,由于它的退行速度很大,必须考虑相对论效应,得到这个类星体的退行速度为 $v=0.92\times c=276\,000$ km/s。

(b) 利用哈勃定律求这个类星体的距离 D

由哈勃定律:$v=H_0D$,式中 v 为天体的视向退行速度 $v=276\,000$ km/s,H_0 为哈勃常数取 75 km(s·Mpc),D 为天体的距离。将 v 的值带入,可得这个类星体到我们的距离为 $D=3\,680$ Mpc。

习 题

1. 观测到的一个赛弗特星系的谱线致宽表明它在距离轨道中心 1 pc 处具有 1 000 km/s 的轨道速度。假设轨道是圆形的,利用开普勒定律估算 1 pc 半径范围的星系质量。

2. 人马座 A 从一个射电瓣一边到另一边横跨 1 Mpc,它离地球 4 Mpc,问人马座 A 的角直径是多少?并与月球的角直径对照。

3. 假设一喷流的速度为 $0.75\,c$,计算在人马座 A 的星系核与它的射电发射瓣之间横跨 500 kpc 的物质喷流要穿越多少时间?

4. 按照 $E=mc^2$ 可估算一个活动星的总能量,按照通常的产能效率,计算如果每天的辐射能量是消耗一个地球的质量(约 6×10^{24} kg),问此值相当于太阳光度的多少?

5. 哈勃望远镜观测的分辨率为 0.05",相当于能分辨 M87 的 5 pc 范围,在星系中心的这个区域范围内的质量大约 $3\times10^9\,m_\odot$,计算距离 M87 中心 0.5 pc 轨道上物质的轨道速度。

6. 假设一类星体的产能率(即释放的能量与可用质量所产生的总能量之比)为 10%,一个发光具有 10^{41} J 能量的类星体,如果它可利用的总质量为 $10^{10}\,m_\odot$,计算它发光可维持多久?

7. 一个遥远的类星体,它的光在偏离地球上探测器之前,距离星系团中心 10 Mpc(星系团直径约 3 Mpc),如果地球、星团和类星体都排列在一条线上,类星体在 750 Mpc 的远处,星系团在地球和类星体之间,计算星系团对类星体的光的引力弯曲的角度。

第二十四章

星际介质

在浩瀚的宇宙中充满着大量的由气体和尘埃组成的星际介质。星际介质中的不透明物质是以小的固体微粒形式存在的尘埃颗粒，星际气体是冷而稀薄的气体。星际介质对天体的光有消光和红化作用，是星际云的形成物，是宇宙中不可忽视的组成部分。

第1节 星际消光

银河系内的星际介质的质量可能有几十亿个太阳质量。星际介质的自引力作用小，非常稀薄，分布在广袤的恒星际之间，这种弥漫气体比地球上实验室里获得的所谓最好的“真空”还要稀薄。星际介质的温度从几开到几百开，这取决于它附近的恒星和辐射源，一般取星际介质的平均温度 100 K，我们知道水的结冰温度是 273 K，所以星际空间是很冷的。

星际介质的密度很稀薄，已观测到的星际气体的数密度为 $10^4/m^3 \sim 10^9/m^3$，它的密度比地球上实验室真空($10^{10}/m^3$)还低。星际尘埃颗粒的密度更低，平均数密度是约 $10^{-6}/m^3$。

虽然星际介质很稀薄，但它对我们观测到的星光和星云有重要影响，这就是星际消光与星际红化效应。星际消光是指我们观测到的恒星的光，由于被星际介质散射和吸收而减弱。由于大部分尘埃颗粒的直径小于可见光的波长，而且一般尘埃颗粒比星际气体粒子大 1 000 倍，星际介质中对消光起主要作用的是尘埃，而尘埃对蓝光的散射比对红光强，使得星光变红，所以这种效应叫做星际红化效应。星际介质的散射还可以使星光偏振化。

概括起来星际尘埃对星光的影响如下：(1)星际消光：由于悬浮在空间的尘埃粒子对通过的星光吸收和散射，使得背景星全体变暗。(2)星际红化：由于蓝光受到的消光选择性地比红光厉害，星际尘埃粒子使得星光变红。(3)星际偏振：星际尘埃会有选择性地减弱那些偏振矢量平行于尘埃粒子长轴的星光。假如尘埃长轴垂直于星际磁场，则经过星际尘埃消光的星光，其偏振方向平行于星际磁场方向。由星际尘埃颗粒引起的星际散射也导致星云的反射效应。于是我们可以根据反射的星光看见星际介质。最明显的例子是反射星云，即使最暗的

暗星云也反射一些星光。

星际介质的化学成分可从星际云的光谱分析研究得知。星际介质中的尘埃颗粒有硅、铁或者含碳的化合物，像石墨或碳化硅，可能还包含一些“干冰”。

第2节 气体星云

星际空间的尘埃和气体是完全混合在一起的，它们一般居留在星际云里或者在云复合体里面。在银河系里，总的尘埃质量和总的气体质量的比例大约是1%。由于银河系里的气体质量仅有恒星质量的百分之几，因此，星际尘埃只占银河质量的很小的一部分。不过星际尘埃对银河系的观测有很大的影响，因为在许多地方，尘埃遮挡了部分星光。气体和尘埃云的形态特征部分地决定于观测这些云的波长，另一方面也部分地决定于它们与附近恒星间的距离。银河系的星云是温度较低的，并处在极稀薄的状态下，它的亮度来自邻近或其内的恒星。

气体星云按照光学特征分为暗星云和亮星云，亮星云又分为发射星云、反射星云、超新星遗迹等。

一、暗星云与亮星云

1. 暗星云

由于遮挡背景星或某些亮的背景(如一次电离氢 HII 区)而被观测到的气体星云。气体和尘埃云往往遮挡了大部分或者所有它后面天空区域的星光。而在这个尘埃云的边缘，我们可以清楚地看到许多恒星，在星云里面只看到一些恒星。在暗



图 24.1 马头暗星云

星云之中，特别有趣的是那些由巴纳德(Barnard)和博克(Bok)所研究的圆暗星云，也叫“博克球状体”。它们具有规则的球形，说明它们是一种自引力球。著名的尘埃暗星云马头星云(见图 24.1)距离我们地球约 500 pc。

2. 反射星云

星云内的物质散射沉浸在云内的恒星的星光，由于反射恒星发出的光而发亮。反射星云的光谱是沉浸在云内恒星的吸收线谱。反射星云内部都有一颗非常炽热的中央星，中央星的紫外辐射被星云反射，发出霓虹灯一样的冷光。看起来反射星云里中心星发出的光比星云红些。这是因为中心恒星的光在穿过星云的路程上，蓝光比红光被星际尘埃粒子散射得更多的缘故。例如猎户座大星云(图 24.2)。



图 24.2　哈勃望远镜拍摄的猎户座大星云(M42)

3. 发射星云

也称热辐射星云(一次电离氢 H Ⅱ 区)，是围绕在新形成的亮的 O 型星、B 型星周围由电离氢离子和电子组成的 H Ⅱ 区。发射星云的光谱主要是发射线，

也有热连续辐射。在 H Ⅱ 区里面，电离氢和电子总是试图结合形成中性氢原子。但是，由于中心热恒星连续不断发射紫外辐射，使得这些等离子体几乎保持完全电离状态。紫外光子把任何新形成的氢原子拆散，接着这些被拆散的离子和电子又结合成新的原子。中心星发射的紫外辐射，使 H Ⅱ 区的复合和电离平衡。氢的正离子与电子的复合使得围绕一颗或者一群亮星的气体云发射可见光，这使我们能看到星云。因此可以说，在星云里刚刚形成的 O 型、B 型星，激发了周围的气体云。如 M20 是红色发射星云，直径约 4 pc，叫做三叶星云(见图 24.3)。



图 24.3 M20 又名三叶星云

*二、星云光谱

星际气体的化学成分也可以通过观测星云光谱来分析。一般人想像气体星云的光谱和核心区亮恒星的光谱一定混合一起不好分，实际上，由于星际气体是冷的、低密度的，天文学家很容易把星际介质的吸收线与恒星低层热大气形成的宽吸收线辨别开，因为它们形成的物理机制不同。稀薄的热气体产生明显的发射线，所以，如果拍摄到有恒星在视场内的星云谱，谱中有恒星产生的连续谱上叠加的吸收线，也有热气体星云产生的发射线。如果没有恒星在视场，观测到的光谱就只有热气体星云的发射线。图 24.4 是一个典型的发射星云的光谱(可见区及近紫外区光谱)，其中有氢、氮和氧等元素的发射线。所以据谱分析可知，气

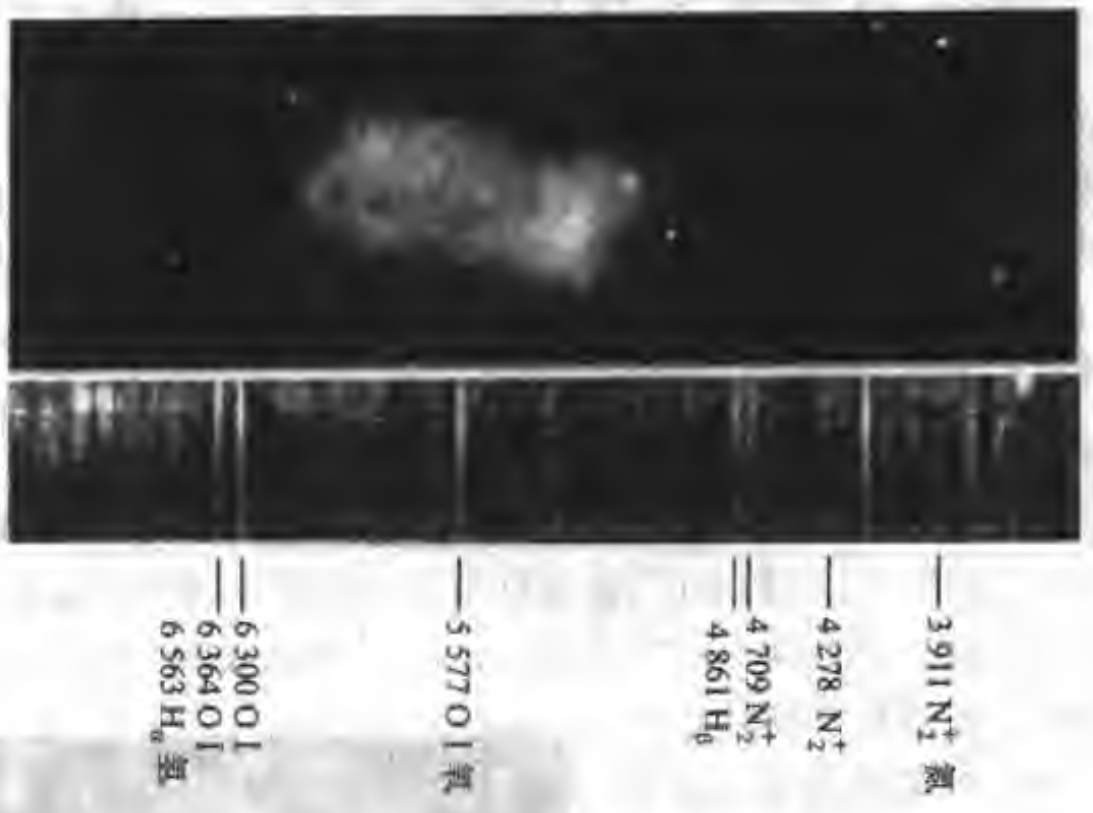


图 24.4　蝴蝶星云和它的光谱图

体星云中氢的化学丰度占 90%，氦占 9%，其余重元素等只占 1%。

三、星云光谱中的禁戒线

发生在 HⅡ区里面的辐射机制是光致电离和复合的平衡过程，正离子和电子的复合，形成一个处于激发态的中性氢原子，而后发射出另外的光子而衰变到基态。由于气体星云非常稀薄，辐射过程如此之有效，以至于绝大部分氢原子处于电子基态。假如星云包含足够的氢，则中心星发出的紫外连续辐射光子最后将衰变为 Ly α 线光子和巴尔末线光子以及能量更低的光子。所以在 HⅡ里，电离和复合的平衡也使得氢原子、离子和电子加热。在稳定状态下，热输入与随后的热输出是平衡的，处于加热状态的电子和离子频繁碰撞，其中一部分是非弹性碰撞，把一些部分电离的原子提高到激发电子态。这个原子在与另一个粒子发生弹性碰撞之前，可能发射一个光子，这叫辐射退激发。

处于基态能级上的原子的碰撞激发发生在大约 10^4 K 温度的情况下，热粒子之间的多数碰撞都相当弱，不可能把原子激发到比基态高一点点的能级水平上。氢原子没有这样容易达到激发态。但是，一次电离的氦、氧、硫以及两次电离的氧和氖相对比较丰富，在约 10^4 K 温度下，能获激发到达低能态的亚稳能级，这意味着原子发射的是不允许跃迁的辐射。这种退激发辐射在实验室不容易发生，因为在容器里原子数本身就不多。然而在广袤的星际空间，原子数量很大，即使辐射退激发率很低，也能产生可检测到的光子辐射。每个由非弹性碰撞引起的向上跃迁总伴随着一个“禁戒”光子的发射，相应的谱线叫“**禁戒谱线**”或

星云线。禁戒线几乎同一般的"允许跃迁"谱线一样强。有时甚至可能比"允许"谱线还强。

在亮星云的光谱中普遍存在波长分别为 495.9 nm 和 500.7 nm 的绿线对，其强度与其他氢线相似。根据已知的地面上的化学元素，不能认证出这些谱线。有人把它叫做"云"线。长期以来，这一直是困扰天文学家的问题。现在，我们知道，这两条星云绿线是由星云中二次电离氧的"禁戒跃迁"引起的。天文学家一般用方括号把相应的原子的名字括起来，来区分"禁戒跃迁"和"允许跃迁"。例如星云绿线表示为[O Ⅲ] 4959 和[O Ⅲ]5007。

由于星云的"禁戒"线主要是由热电子的碰撞而激发的，于是由观测到的"禁戒"线强度可以计算 HⅡ区的密度、温度以及它们的化学成分。研究分析表明，光学 HⅡ区的密度范围是 $10\sim10^3$ 个粒子/cm^3。更低密度的 HⅡ区也是存在的，但辐射很弱，很难被观测到。数密度比 $10^4/cm^3$ 更高的 HⅡ区也是存在的，但是，这种"致密"HⅡ区常常伴随着尘埃存在，尘埃几乎遮挡了全部的可见光，使得不易在光学波段观测到。一般认为，银河系里的HⅡ区的温度低于 10^4 K，化学成分类似于星族Ⅰ星的化学成分。

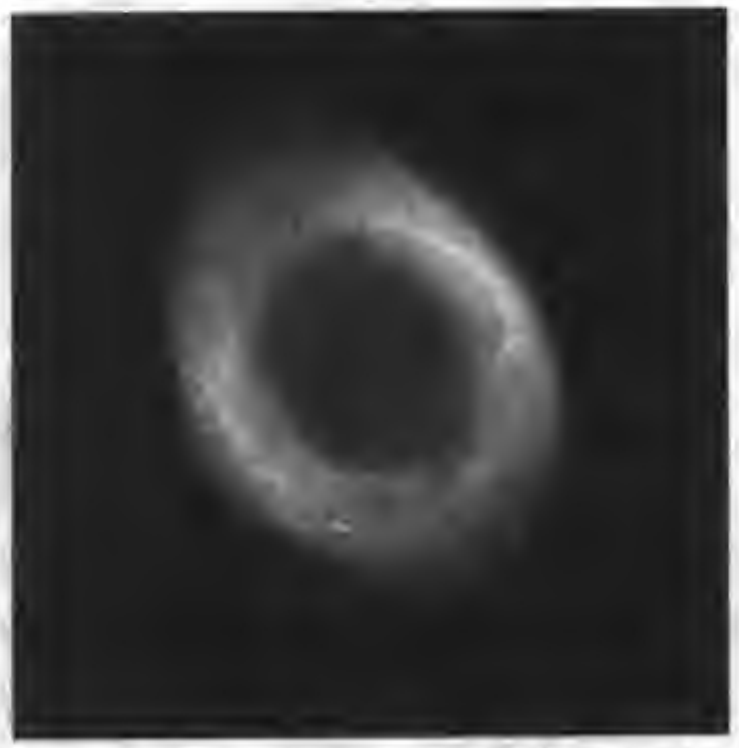


图 24.5 著名的天琴座行星状星云

四、行星状星云

天琴座星云是著名的行星状星云(图 24.5)。行星状星云类似于HⅡ区，但星云中心的激发源是一个濒临死亡的晚型星。行星状星云的密度一般比光学 HⅡ区的密度大，而尺度一般比光学 HⅡ区小。

*五、中性氢(HⅠ)区的 21 cm 射电辐射

HⅡ区在银河系中比较稀少，因为它们只可能在新形成的 OB 型星附近找到。大量的星际介质比较冷(温度 10～100 K)，大量氢以原子或分子的形式存在于这种又冷又稀薄的气体和尘埃云中。气体云也可以由其内的重元素原子吸收线来检测。然而光学技术只允许天文学家观测离太阳系比较近的那些气体云，且观测也不是直接的，因为最丰富的气体——氢气不能直接测量，在非常冷气体云中的氢气，不可能有任何光学波段可检测的辐射。1945 年，赫尔斯托(Van de Hulst)宣布 21 cm 波应该可以观测到原子氢的辐射。他的理论预言在

1951 年结出了硕果。在这一年，尤恩(Ewen)和珀塞尔(Purcell)以及米勒(Muller)和奥尔特(Oort)几乎同时检测到了星际介质的 21 cm 波长的射电辐射(参见图 24.6)。21 cm 波长的射电辐射的发现可能是星际介质天文学研究中最重要的研究成果。

当射电望远镜指向不亮的连续辐射背景源的星际气体时，一般可以看到具有两个分量的 21 cm 射电辐射。窄分量来自冷 H Ⅰ 云的辐射；宽肩分量来自热的 H Ⅰ 云介质的辐射。

当射电望远镜观测亮的射电连续辐射源的时候，常常在 21 cm 波段的位置看到一条窄的吸收线。这条吸收线可能是由亮连续源和望远镜之间温度稍低于 100 K 的 H Ⅰ 云引起的。其中看不到宽肩吸收分量，这意味着对应于宽肩分量的气体太热($T>1\,000$ K)而不能产生吸收。

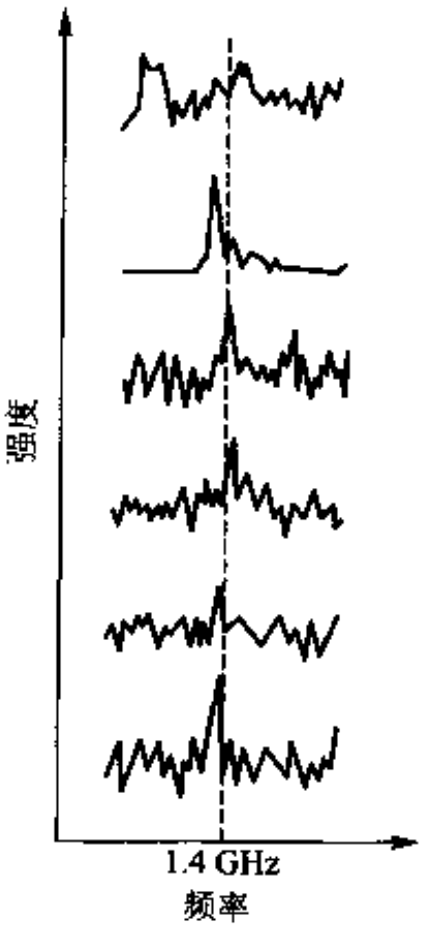


图 24.6　在一些不同星际空间区域所观测到的 21 cm 射电谱线

*六、分子云射电谱线与星际分子

在数密度为 $10^2/cm^3$ 或更大些，温度为 10 K 左右的星际气体云里，氢不再保持原子形式，氢原子与另外的氢原子很快形成氢分子 $H+H \longrightarrow H_2$。天文学家认为，在星际空间这种反应往往是由尘埃粒子的催化而进行的。尘埃粒子的表面提供有效的反应场所，吸收由这个反应释放的能量和动能。由原子氢到分子氢的转换，意味着 21 cm 线不可能用来研究星际空间最冷和最稠密的区域。这很可惜，因为许多有趣的过程，特别像年轻恒星的形成，只发生在星际空间最稠密的部分。而分子氢 H_2 没有射电辐射，于是不能用射电天文技术来直接观测。然而光学天文学家在星际空间已检测到 CH、CH^+ 和 CN 分子的吸收线。20 世纪 50 年代，贝茨(Bates)等及赫兹伯格(Herzberg)等由理论分析后提出：各种各样的简单分子，应该能在那些能屏蔽恒星紫外光子，不被离解的浓气体星云里形成。其中几种分子由子核的旋转与电子轨道角动量的相互作用引起的射电谱线是可以观测到的。1963 年，美国天文学家温雷伯(Weinreb)等首次用射电望远镜在仙后座 A 方向观测到羟基 OH 的分子的微波吸收线，这是首次观测到的星际分子谱线。

在发现 OH 分子射电谱线不久，一些天文学家在强射电连续辐射源的 H Ⅱ 区附近，进行 OH 发射线的搜索，观测到了 OH 发射线。这种 OH 线辐射非常强，有特别的精细结构与线强度比，且有非常窄的线宽和非常高的偏振度，以及

在几天时间尺度范围里的变化。假如它是由热过程引起的话，温度必须在 10^{12} K 量级！很显然这种天体的辐射过程不是热辐射。不久，珀金斯(Perkins)等提出了一个目前已被人们普遍接受的机制，即这种强辐射是 OH 分子的受激发射。

脉泽(maser) 是微波受激发射辐射放大的英文缩写。汤斯(Townes)和肖洛(Schawlow)在地面实验室里实现了这种脉泽现象。如果要产生脉泽，则激发态和基态的分子数的比率应与局部热动平衡态下所预计的比率不同，也就是说激发态和基态分子数的布局应该"反转"。对于热动平衡态，内部各个能态上电子为玻尔兹曼分布，即绝大部分应处于基态，次多的是第一激发态，等等。然而在星际介质里，原子和分子通常是偏离局部热动平衡的，在这个区域里较高能态上的粒子数多于基态上的粒子数。子是在星际介质中的原子和分子有相反的能级布局，这恰恰是激光和脉泽所需要的布局。对应于射电谱线跃迁的能级，这个差别很小，但是普遍存在。然而在一定天文环境里的 OH，有足够的能量并以某种方式，使得激发能级上有过多的 OH 分子布局。在这种激发态上有过多的分子的情况下，偶尔一个线光子就可能触发一连串辐射退激发的"雪崩"，这种雪崩导致了所观测到的强脉泽辐射。假如分子能连续不断的从基态抽运到激发态，则可以引起连续不断地脉泽辐射。

目前知道至少有两种不同的 OH 脉泽源：一种脉泽与年轻恒星诞生有关，这类源发现在最早被观测的致密 HⅡ区附近；另一类脉泽与演化到晚期阶段的晚型星成协。这两种脉泽辐射都发生在离中心星或原恒星几光天的距离，非常特别又非常稠密($n\approx10^8$/cm)的区域范围里。

1969 年汤斯科学小组又在人马座 B2，猎户座 A 以及 W49 等方向上检测到了 H_2O 分子的受激发射谱线(波长约 1.35 cm)。1968 年，琼(Cheung)、汤斯等宣称在银河系中心方向检测到了氨分子(NH_3)。紧接着这个惊人的发现之后，科学家们在星际空间的几个区域探测到 H_2CO(甲醛)分子的 4830 MHz 吸收线。至 2002 年，发现的星际分子数量已增加到 140 多个，其中的一些是相当复杂的有机分子。例如，在银河系中心附近发现大量的乙醇(CH_3CH_2OH)分子。

显然在相对比较低的温度环境下，当达到适当高的密度，星际介质趋向于形成分子，而不是保持原子状态。分子形成是利用了较大的分子有较高的化学束缚能的性质。除了发现的脉泽辐射以外，星际分子还有另外的使人惊奇的现象。甲醛的发现者——斯奈德(Snyder)等发现观测到的甲醛吸收充满整个宇宙的微波背景辐射。这意味着甲醛分子的激发温度低于宇宙微波背景辐射温度，令人难以理解地低。有人提出了一种反脉泽效应来解释此现象，但到目前还无定论。

星际分子，特别是 CO(一氧化碳)分子线，现在被用来探测银河系分子云的大尺度分布和运动。利用相同化学组成而有不同原子数的同位素，例如 $^{13}C^{16}O$ 和 $^{12}C^{18}O$ 强度之间的比较，可以得到银河系各个不同区域各种元素合成率的信息。

20世纪70年代后，载有紫外望远镜的卫星上天，发现了星际介质中最丰富的 H_2 分子，大批星际分子的发现促成了分子天体物理学的诞生。由于星际分子广泛存在于星际云、恒星形成区、恒星包层、类星体、年轻的超新星遗迹以及河外星系中的星际物质，因此，它可以提供我们大量的天体物理信息，所以，星际分子的发现被列为20世纪60年代的四大发现之一。

七、超新星遗迹

超新星爆发后留下的遗迹是些不规则的纤维体。它的光谱主要由发射线组成。1944年发现的蟹状星云就是著名的SN1054超新星遗迹。

另外，有几个纤维状星云，现在也已被证明与历史上的超新星有联系。对它们的纤维状体化学成分的研究表明，它们都是重元素丰富的区域。这个发现证实了这样一个思想：这些纤维状云体发生过相当多核反应过程，是很晚期恒星的喷射物。这也支持了星际介质中大部分丰富的重元素来自超新星爆发的观点。

超新星爆发留下的没有规则形状的星云状物质的辐射是一个连续谱，而且辐射是强偏振的。如蟹状星云里的光偏振很强，很难用尘埃颗粒的散射引起偏振来解释。阿尔芬(Alfven)等提出：超新星遗迹的辐射是由同步加速辐射过程引起的。有人有不同意见，但还是认为它的辐射是非热辐射，所以把超新星遗迹叫做非热辐射星云。

*第3节　宇宙线和星际磁场

宇宙空间存在许多高能带电粒子，其中一些具有非常高能量的粒子除受到地球磁场作用有一点点偏转以外，可以从各个方向打到地球，称为宇宙线。由于宇宙线粒子运动的速度接近于光速，它们不会受到银河系引力的制约。对任何宇宙线粒子来说，即使整个银河系的引力都不会对它的运动产生有意义的影响。然而，这种高速运动的相对论性的荷电粒子，会受到弱星际磁场的偏转作用。由于电离的热气体离子和电子都有沿着磁力线做螺旋运动的趋向，电离的热气体流和磁场是"冻结"在一起的，因而，高能带电粒子流组成的磁流体不可能克服银河系的引力而逃逸出去。由于这个间接的作用，星际磁场和宇宙线被束缚在银河系里面。然而，这种束缚是不稳定的。

宇宙线粒子的起源问题是天文学家努力探索的课题。一个非常重要的线索是宇宙线粒子的化学成分是清楚的，大部分宇宙线粒子是质子，即氢核。然而，在宇宙线中也有不少比氢核更重的重核，其中铁元素比其他元素的重核丰富一些。这种铁过剩现象可以说明宇宙线粒子是从非常年老的恒星，特别是从超新星里喷发出来的。当宇宙线从超新星里流出来的时候，它们激起磁场结构扰动，

其结果是妨碍宇宙线粒子传播得很远。因此，许多天文学家都抛弃了宇宙线直接来源于超新星的假说，而认为宇宙线粒子可能是由星际介质中各种各样的流体运动加速的粒子形成的。最有希望解决宇宙线粒子起源问题的理论是：具有异常高能量的荷电粒子，在与“无碰撞激波”相关联的“磁镜”里，反复地反射加速而形成相对论性粒子。

原则上，星际磁场的强度可以利用谱线的塞曼效应来测量。实际上，这个方法做起来是很困难的，一般是应用偏振测光，测量星际介质的线偏振连续辐射，并结合脉冲星的测量，可以得到星际空间磁场强度和自由电子数密度的信息。用这个方法导出的星际平均磁场强度约为 3 mGs。



习 题

1. 在离太阳 100 pc 的范围内星际气体的平均数密度是大约 $10^4/m^3$。氢原子的质量是 1.7×10^{-27} kg，计算在一个与地球相等的体积内的星际物质的总质量。

2. 假设与上题同样的星际气体的密度，计算在一个截面为 1 cm^2，长为从地球到南门二(α CenA)星的距离(4.3 l.y.)的圆柱体内包含的星际氢的质量。

3. 一束光穿过一个密集的分子云，每 3 pc 光减弱 1/2.5，如果云的总的厚度是 60 pc 问光总的减弱了多少？

4. 星际消光有时以每 1 kpc 多少星等来度量，光从距离观测者 250 pc 远的恒星穿行到观测者，星际消光使星光的强度减弱了 1/100，按照星光的亮度与距离的平方成反比的定律，问沿视线方向的平均消光是多少？

5. 为了使一个氢原子电离所需携带的足够的能量要求光子的波长必须短于 91.2 nm。利用维恩定律计算一个恒星的黑体曲线峰值波长所对应的温度值。

6. 估算 M8，M16，M17 和 M20(参看课文的资料)4 个发射星云接近边缘物质的逃逸速度，并且与这些星云中氢原子核的平均速度比较，你认为这些星云在它们的自引力作用下能保持在一起吗？

7. 计算 21 cm 辐射的频率，如果沿视线有一群星际云的视向速度在 75 km/s(后退)到 50 km/s(接近)，计算观测到的 21 cm 谱线频率和波长的范围是多少？

8. 假如一个球形的分子云，它的总质量等于太阳的质量，假定分子云的数密度是 $10^{12}/m^3$，计算此分子云的半径。

第二十五章

星系群与超星系团

许多星系通过相互碰撞、互相吞并可以聚集成星系群、星系团或超星系团。由星系分布的统计分析表明，孤立的星系只占少数，多数星系是成群的，它们相互间有动力学的联系。

第1节 星 系 群

由十个至几十个星系组成有动力学联系的天体系统叫星群，其中包含我们银河系的这个星系群称之为**本星系群**。本星系群(图 25.1)除了银河系和著名的 M31 仙女座星系以外还有大约 33 个星系成员，它们分布在大约 15 Mpc 的范围内。今后随着地面、空间探测的发展会发现更多的星系成员。本星系群的结构很松散，其成员星系的距离远远大于星系的尺度。在本星系群内有一些大的椭圆星系与旋涡星系，它们在光度和尺度上差不多，没有较亮的椭圆星系，但矮椭圆星系占一半多，而不规则星系很少。

本星系群分为银河系和 M31 仙女星系两个子群。在银河系子群中，银河系

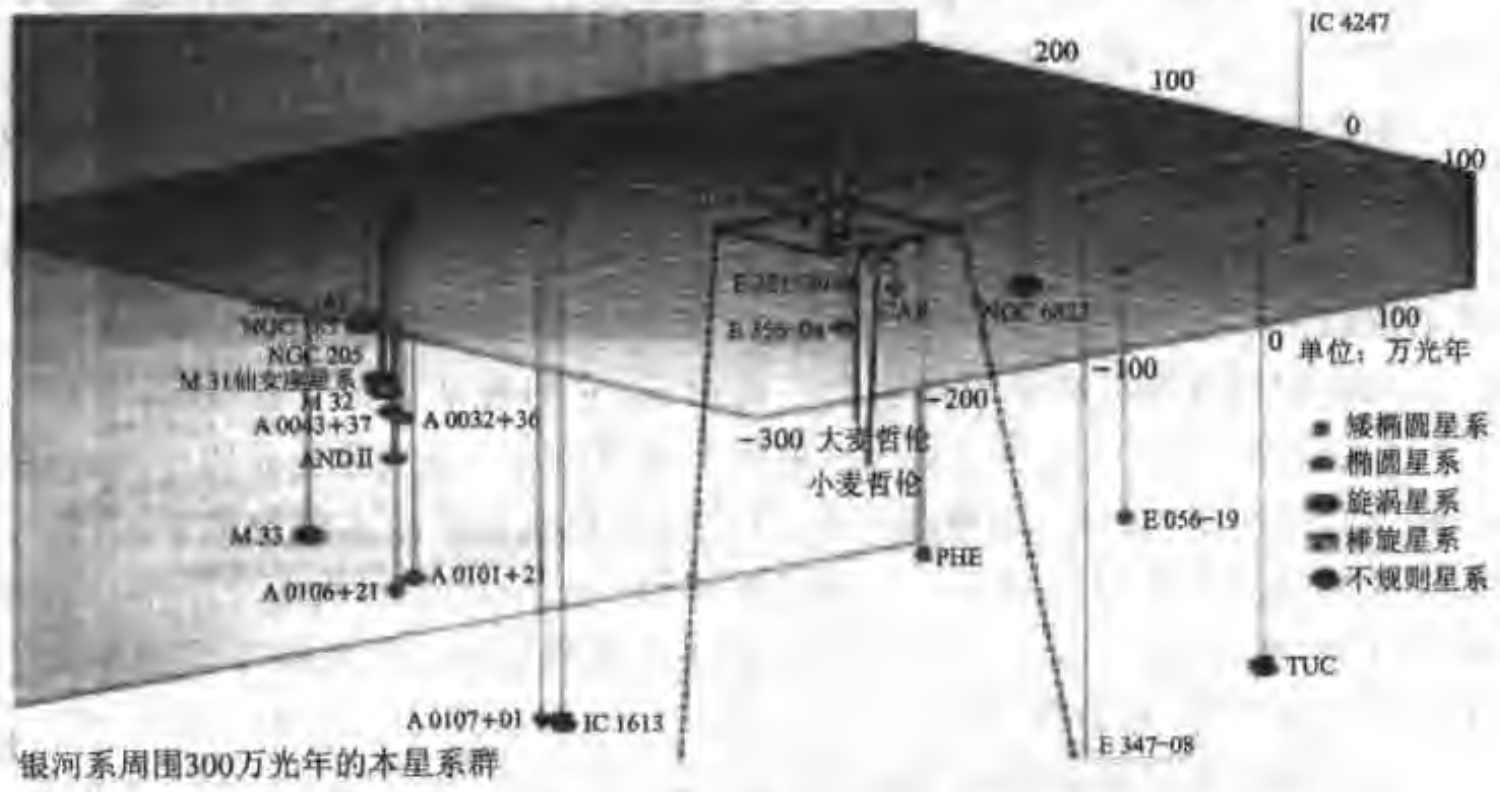


图 25.1 本星系群示意图

有两个伴星系:大麦哲伦云和小麦哲伦云,它们比 M31 距银河系的距离近 10 倍,离太阳的距离分别为 49 kpc 和 58 kpc,这两个星系都是不规则星系。M31 子群中 M31 有两个邻近的星系:M32 和 NGC205,以及更远些的双伴星系,矮椭圆星系 NGC147 和 NGC185。本星系群目前正朝着长蛇座的方向以大约 600 km/s的速度飞驰。

星系群之间也有吞并的情况,例如 NGC6166 是一个射电星系,它也是一个超巨椭圆星系(cD 星系),约有一百万光年的可见半径,比普通巨椭圆星系或旋涡星系大 20 倍左右。它通过吞食邻近较小的星系而逐渐膨胀。星系群的互相吸引与合并产生了更大的星系团和超星系团。

第 2 节 星系团与超星系团

一、星系团

许多相互有动力学联系的更多星系组成的集团叫**星系团**。星系团是比星系群更大的星系集团,是星系的系综,正如星系是恒星的系综一样。自 20 世纪 70 年代以来,星系团备受天文学家的关注。星系团是由快速运行的星系和聚集一起的众多暗物质构成的。它像一个西瓜,星系如同籽粒溶于稀薄的星系际物质和星际气体之中。这些稀薄的气体不能以可见光的形式被观测到;但在星系团中由于它非常热,温度在 $10^7 \sim 10^8$ K 以上,以致能激发出 X 射线辐射而被探测到。

目前,已知有大约数千个星系团,除了室女星系团以外,还有半人马星系团、长蛇星系团、船帆星系团、孔雀星系团、船底星系团和英仙-双鱼星系团等。我们银河系所属的这个星系团叫做**本星系团**。

按照包含星系的多少星系团可分为富星系团和贫星系团。其中富星系团包含几千个星系,它们分布在一千万光年的范围内,在星系团的中心附近存在一二个十分明亮的超巨椭圆星系,这些超巨椭圆星系支配着星系团的外观。贫星系团的成员星系相对富星团少些,旋涡星系在贫星系团里是很普遍的。

离我们最近的富星系团是室女座星系团,它约有 2 000 个星系,其中有约 200 个亮星系。图 25.2 为室女座星系团的局部照片。室女座星系团中,68%的亮星系是旋涡星系,19%是椭圆星系,其余是不规则星系或未分类的星系,其中最亮的椭圆星系是 M87 星系。后发星系团包括上万个星系,大部分星系是椭圆星系或 S0 星系,估计有 15%的旋涡星系或不规则星系。后发座星系团离我们有 3 亿光年之遥,它的 X 射线图像显示出一定规则形状,其中只有少量的团块。

著名的船底座星系团距离我们约有 6 500 万光年,它包容了约 650 个星系。

观测表明,在宇宙中,星系团的分布是不均匀的。星系团内的恒星由于彼此

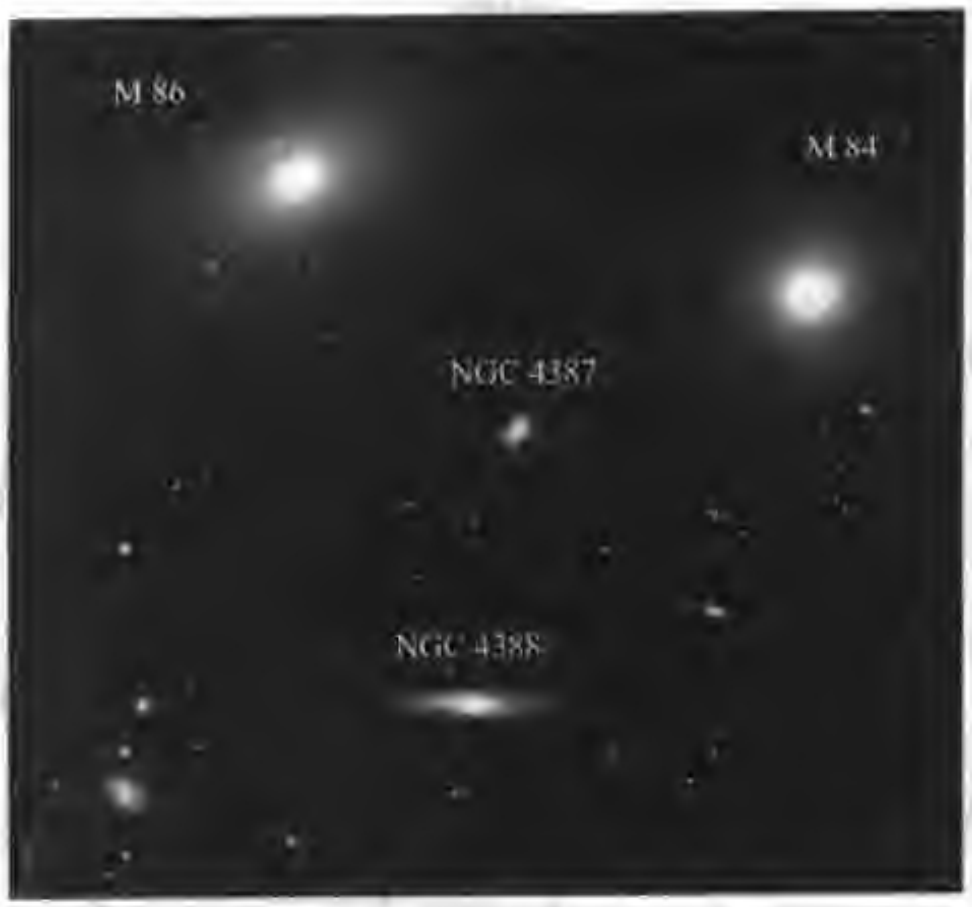


图 25.2　室女座星系团的局部

相距极其遥远，而且恒星的质量与整个星系的质量相比微不足道所以在星系的条件下，速度扩散，力学摩擦等都没有足够时间影响恒星的运动，这样我们可以认为星系里的恒星是不发生相遇碰撞的。然而，星系核要比任何单个恒星质量大得多，因此星系核由于力学的摩擦而发生的偏转不能忽略。

二、超星系团

近年来，除了一般的星系团之外，还发现由星系团组成的更大星系团，称之为超星系团。超星系团是引力在极大范围上作用的结果，它的结构和演变与宇宙本身的结构和演化密切相关。在超星系团中，包括我们银河系的超星系团叫做**本超星系团**。本超星系团以室女座星系团为中心，并且可能有自转。图 25.3 所示为本超星系团的局部。

20 世纪 50 年代提出的“超星系团”理论在当时掀起了一场争论的风波，可是现在天文学家们不再争论宇宙中“有”、“无”超星系团这种大尺度结构，而是寻求理解它的形成和性质。因为哈勃空间望远镜的观测结果已为超星系团等大宇宙结构提供了大量的有力证据。哈勃望远镜的观测范围超过了几十亿光年的立方的空间范围，发现了宇宙中数千个星系团和 50 多个超星系团，如武仙超星系团、北冕超星系团等。近期发现的蛇夫超星系团，距离我们地球有 3.7 亿光年，包容了数千个星系。有些超星系团极其庞大，例如后发超星系团，大约包含了 1 万个星系。从星系群、星系团到超星系团，可以看出宇宙中的星系之间存在着动

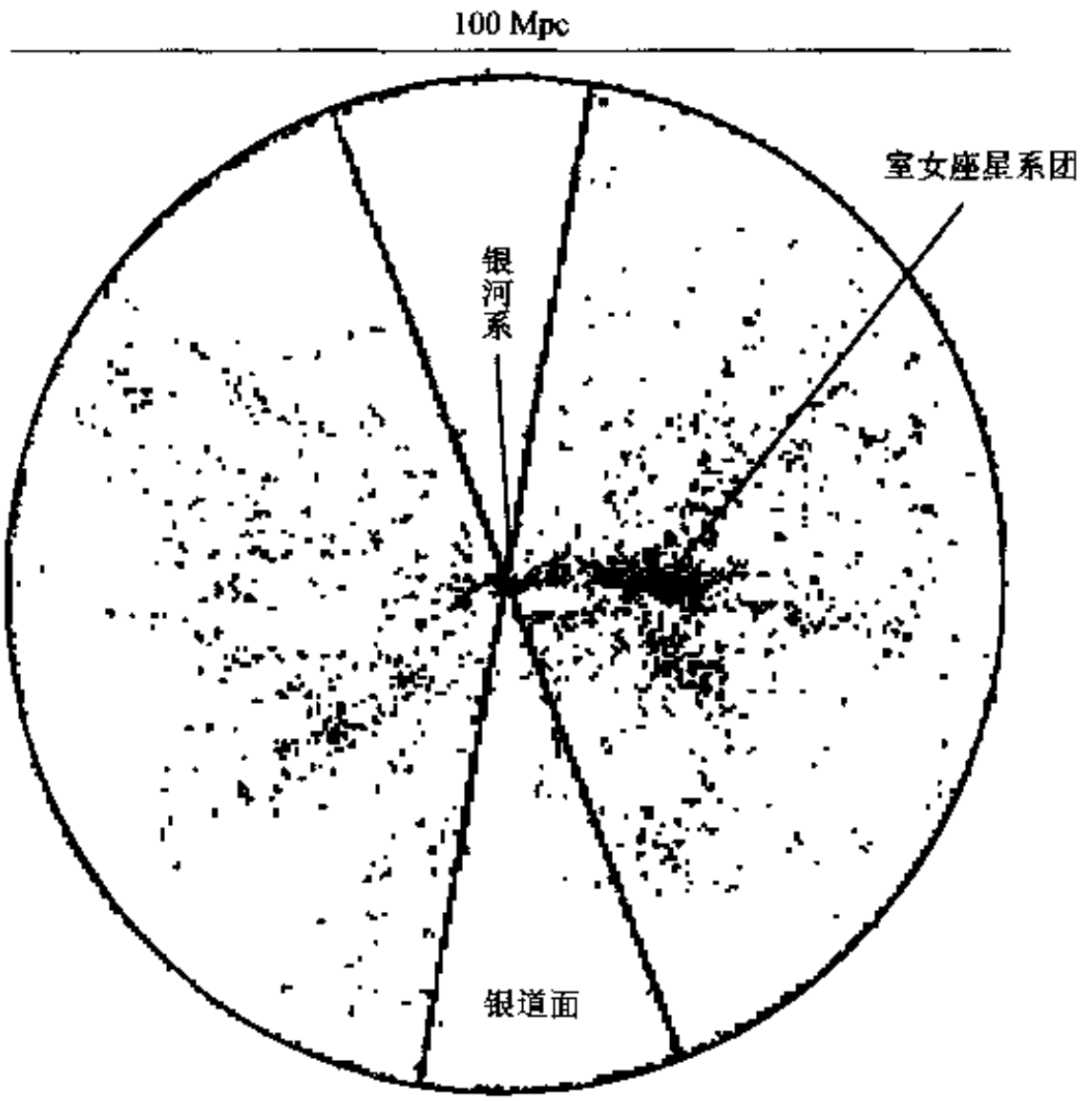


图 25.3 本超星系团的局部(100 Mpc),图中的2 200 个点代表星系,中心是银河系

力学联系,它们是宇宙的大尺度结构的重要标志,也是星系与宇宙环境相互作用及演化的重要场地,被视为河外天文学和宇宙大文学研究的"实验室"。

超星系团还不是宇宙中最大尺度的群体。最近在距银河系约 2 亿光年的地方发现一个巨大的重力源,总质量具有 $10^{17}\ m_{\odot}$,尺度有 100～150 Mpc,天文学家们把它叫做大吸引体,它牵引着**本超星系团**。这个大吸引体可能是许多超星系团组成的甚大超星系团集团的中心。

最近,美国哈佛-施密松天体物理中心的一个科学小组(cfA)的科学家们在做红移巡天观测中发现,宇宙中有泡沫样的结构,即宇宙中有些天区几乎空无一物,这些天区叫"**宇宙空洞**"。

令人震惊的是宇宙"长城"的发现。1989 年,这个 cfA 科学小组巡天观测了几千个星系,发现在距地球 3 亿光年的地方有一个长约 5 亿光年,高约 2 亿光年的星系"巨壁"。这是目前已知的宇宙中存在的最大的天体星系链,它们像"珍珠项链",交叉在浩瀚的宇宙之中,又宛如中国巍巍壮观的长城,所以天文学家把它叫做"宇宙链",也叫做"**宇宙长城**"。这种壮丽的宇宙奇观激起了人们更为活跃

的思想火花，也使天文界掀起了追寻宇宙大尺度结构形成和来源的热潮。

2003 年 10 月斯隆光谱巡天(SDSS)观测得到 100 万个星系的红移资料(图 25.4，右图为离我们最近的室女星系团)。



图 25.4　星系的红移资料

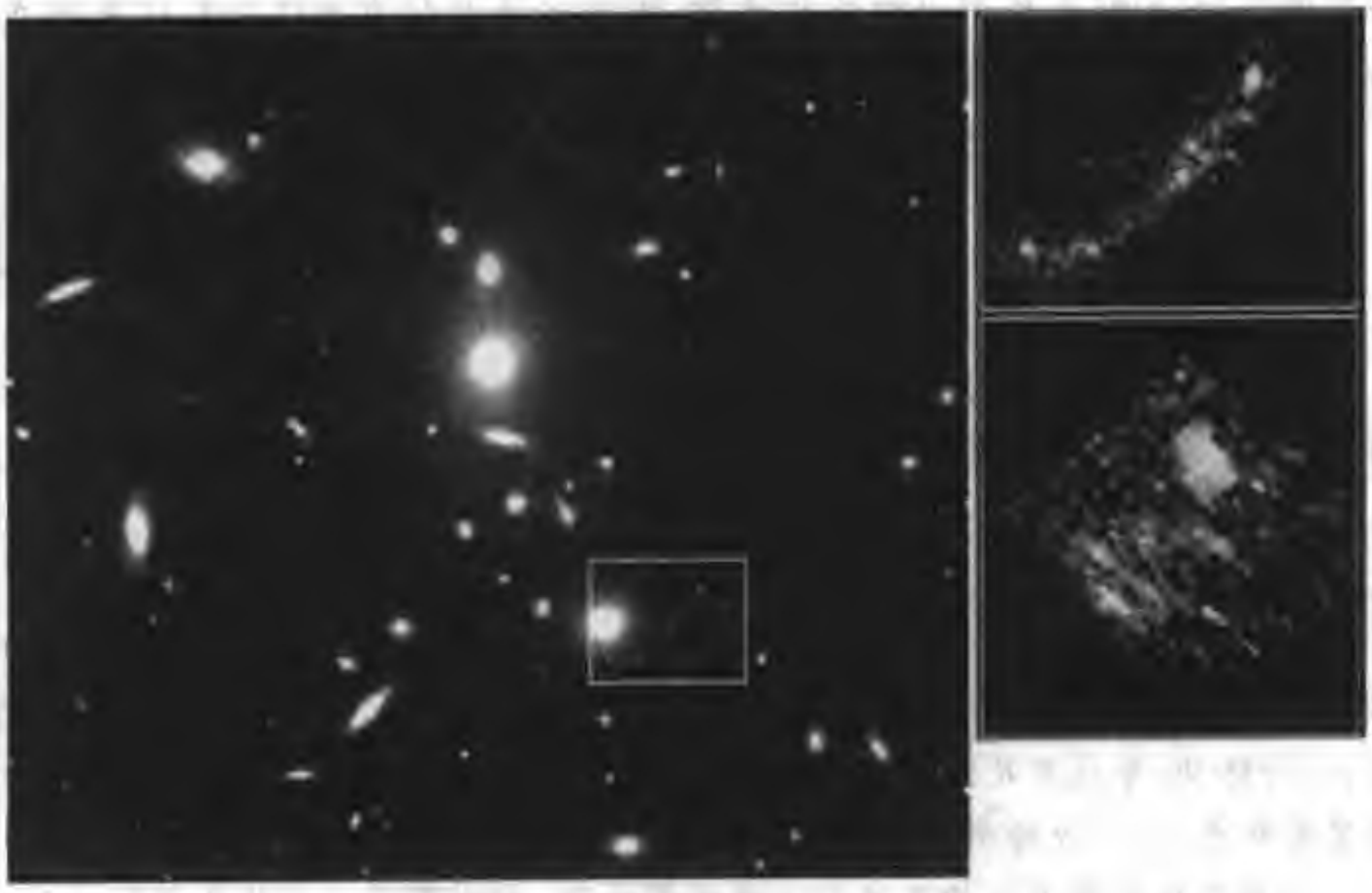


图 25.5　CL1358+62 高红移星系团($Z=4.92$)

图 25.5 为哈勃空间望远镜拍摄的 CL1358+62 高红移星系团($Z=4.92$)，其右图是左图方框部分的放大，背景星系受星系团的引力透镜效应的影响，使星系呈弧形，它们的形状与暗物质的引力有关。这个星系团离我们有 10 亿光年远，包含大量的星系，其中可以看到某些星系清晰的旋涡结构，有的星系互相作用，正在发生碰撞、吞并或撕裂的情景。

近年哈勃空间望远镜观测到宇宙深空的一些图像，可以明显地见到一些神奇的圆弧状物，有的像呈现为环状，它们分布在大吸引体(如大的星系、密集星系群等)的周围，它们是引力透镜所造成的星系像。这就是爱因斯坦曾预言的那种引力透镜的"光环"，被称为**爱因斯坦环**。我们已经知道，这是由于当光源、大质量星系和观测者位在一条线上时，星系的光线经过大质量吸引体(引力透镜)时，如果引力透镜是点源或是球形的，引力透镜效应就呈现出天体的环像。

第3节 暗 物 质

普通物质是由地球上我们知道的同类原子组成的。原子核由质子和中子组成。绕核旋转的电子数目和质子相等，不过当原子被电离时会有一些电子被剥掉。原子与原子可以结合在一起成分子，而分子又可以结合成各种物质。当今，对天体的观测除了光学、红外和射电手段外，空间观测可扩展到 X 射线、γ 射线和微波等波段。当天文学家用多波段观测星系或星系团时，发现由天体(恒星，热气体云等)的辐射推测出的物质质量，不足以通过引力把这些天体束缚在一起，因而设想还有暗物质存在，只是由于他们太暗而不能被观测到。

近期的空间探测表明，宇宙中物质和能量大约有 1/3 是可探测到的，普通物质占总数的 5%，而暗物质占 25%，暗能量 70%，其本质尚不清楚。

暗物质的大尺度分布可以通过引力透镜的观测来研究。引力透镜是观察星系团和某些个别星系周围有暗物质分布的最佳手段。

人们相信某些暗物质是由大爆炸后留下来的中微子、夸克和一些轻粒子等构成的，即是由宇宙最早创生时刻留下来的基本粒子构成；其余的暗物质可能是运动相对缓慢的粒子或**大质量致密晕天体**。然而，中微子与大质量致密晕天体这两种候选者的质量相差 57 个数量级，这是该领域中不能确定的疑难问题。

理论家认为大质量致密晕天体尽管太暗，不能通过自己的辐射被探测，却可以通过引力透镜效应被探测到，因为背景光经过大质量致密晕天体时会被增强。在 20 世纪 90 年代有几个科学小组探测到这种现象，由于这些引力透镜的质量同星系相比太小，故称微透镜。

大质量致密晕天体的本性是一个难解的谜：它们是普通物质构成的恒星呢，还是陌生物质构成的天体？准确测定它们的质量会有助于解决这个问题。目前

还不清楚大质量致密晕天体对银河系中的暗物质有多大贡献。

随着科技的发展，探测手段的拓新，人们对浩瀚宇宙的大尺度结构增进认识的同时，对微观世界的奥秘也加深了认识。当人们寻觅宇宙年轻时代的“化石”残骸，以求理解宇宙的演化时发现，将物理世界的最宏大的场面与最小的微观世界统一起来才能比较全面地认识宇宙。

第五篇

膨胀的宇宙与宇宙中生命的探寻

第二十六章

宇 宙 学

浩瀚的宇宙蕴藏了无穷的奥秘，历来是人们想像力纵横驰骋的原野，它吸引了无数的科学志士，为之不屈不挠地上下求索。我们无法回到时间的源头，也看不到宇宙的尽头，但是人们由天文观测结果和积累的科学知识可以追溯其源，也可以预测宇宙的未来。近百年来，随着科学技术的进步，人们建造出了越来越大，分辨能力也越来越高的天文望远镜，观测的波段也由可见光拓宽到了全波段，从地面发展到了空间观测，现今，人们的视野已延伸到 200 亿光年，在时间上，可以追溯到 200 亿年之前。

第 1 节　中国古代宇宙观

我们的祖先最早开始了探索宇宙的行程。远在战国时代，尸佼就在“尸子”一书中指出：“四方上下曰宇，古往今来曰宙”，意思是说：我们生活的空间叫宇，不停流逝的时间称为宙；宇宙就是时间和空间的总称。汉代天文学家张衡明确指出“宇之表无极，宙之端无极”，意思是讲空间和时间都是无限的。可见我们的祖先早就有了淳朴的唯物宇宙观。他们辛勤观测日、月、星辰、彗星、流星和超新星爆发等天象，研究它们的运动规律和特性，在 3 000 多年前就提出论述天与地的关系的“盖天说”、“浑天说”及“宣夜说”。

盖天说　出现于殷末周初。主要论点是：天在上，地在下，天为一个半球形的大罩子。南北朝时期鲜卑族歌手斛律金《敕勒歌》中“天似穹庐，笼盖四野”两句诗，是对盖天说的形象化说明。盖天说一共有两种。

第一种盖天说是“天圆地方”说。《晋书·天文志》说：“周髀家云：‘天员（圆）如张盖，地方如棋局。’”关于方形的大地，战国时代阴阳家齐人邹衍解释说，地上有九个州，中国是其中之一，叫赤县神州，每个州四周环绕着一个裨海。九州之外，还有一个大瀛海包围着，一直与下垂的天的四周相连接。穹庐般的天穹有一个极，天就像车轱辘一样绕着这个“极”旋转不息。天圆地方说的最大破绽，就是半球形的天穹和方形大地之间不能吻合。这迫使人们将它修改为：天并不与地相接，而是像一把大伞一样，高悬在大地上空，有绳子缚住它的枢纽，周围有八根柱子在支撑着。天空有如一座顶部为圆拱的凉亭。《列子·汤问》篇中所说的共

第二十六章

宇 宙 学

浩瀚的宇宙蕴藏了无穷的奥秘，历来是人们想像力纵横驰骋的原野，它吸引了无数的科学志士，为之不屈不挠地上下求索。我们无法回到时间的源头，也看不到宇宙的尽头，但是人们由天文观测结果和积累的科学知识可以追溯其源，也可以预测宇宙的未来。近百年来，随着科学技术的进步，人们建造出了越来越大，分辨能力也越来越高的天文望远镜，观测的波段也由可见光拓宽到了全波段，从地面发展到了空间观测，现今，人们的视野已延伸到 200 亿光年，在时间上，可以追溯到 200 亿年之前。

第 1 节　中国古代宇宙观

我们的祖先最早开始了探索宇宙的行程。远在战国时代，尸佼就在“尸子”一书中指出：“四方上下曰宇，古往今来曰宙”，意思是说：我们生活的空间叫宇，不停流逝的时间称为宙；宇宙就是时间和空间的总称。汉代天文学家张衡明确指出“宇之表无极，宙之端无极”，意思是讲空间和时间都是无限的。可见我们的祖先早就有了淳朴的唯物宇宙观。他们辛勤观测日、月、星辰、彗星、流星和超新星爆发等天象，研究它们的运动规律和特性，在 3 000 多年前就提出论述天与地的关系的“盖天说”、“浑天说”及“宣夜说”。

盖天说　出现于殷末周初。主要论点是：天在上，地在下，天为一个半球形的大罩子。南北朝时期鲜卑族歌手斛律金《敕勒歌》中“天似穹庐，笼盖四野”两句诗，是对盖天说的形象化说明。盖天说一共有两种。

第一种盖天说是“天圆地方”说。《晋书·天文志》说：“周髀家云：‘天员（圆）如张盖，地方如棋局。’”关于方形的大地，战国时代阴阳家齐人邹衍解释说，地上有九个州，中国是其中之一，叫赤县神州，每个州四周环绕着一个裨海。九州之外，还有一个大瀛海包围着，一直与下垂的天的四周相连接。穹庐般的天穹有一个极，天就像车轱辘一样绕着这个“极”旋转不息。天圆地方说的最大破绽，就是半球形的天穹和方形大地之间不能吻合。这迫使人们将它修改为：天并不与地相接，而是像一把大伞一样，高悬在大地上空，有绳子缚住它的枢纽，周围有八根柱子在支撑着。天空有如一座顶部为圆拱的凉亭。《列子·汤问》篇中所说的共

工触倒的那个不周山，就是八根擎天柱之一，所以女娲便出来炼石补天。天圆地方说提出的宇宙模型，只是凭感性的观察、又加入了许多规定。但在我国历史上却有广泛影响，因为符合儒家关于“天尊地卑”的说教，在封建王朝的天地理论体系中占据正统地位。如北京的天坛，是圆形的；地坛，是方形的。这是天圆地方的象征性模型。

第二种盖天说将方形大地改为拱表大地，在《晋书·天文志》中说“天象盖笠，地法覆盘。”这时已经有了拱形大地的设想，为以后球形大地的认识奠定了基础。但它仍然不能解释天体的运行，如太阳的东升西落和月亮的盈亏等问题。

浑天说 主张大地是个球形，外裹着一个球形的天穹，地球浮于天表内的水上。汉代天文学家张衡在《浑天仪图注》中说：“浑天如鸡子，天体圆如弹丸，地如鸡子中黄，孤居于天内，天大而地小。天表里有水，天之包地，犹壳之裹黄。天地各乘气而立，载水而浮。……天转如车毂之运也，周旋无端。其形浑浑，故曰浑天。”“浑天说”始于战国时期，战国人慎到、惠施都提出过关于球形大地的设想。关于球形大地如何悬在空中，最早的浑天说认为天球里盛满水，地球浮在水面。半边天在地上，半边天在地下。日月星辰附在天壳上，随天周日旋转。后来一些浑天论者纷纷反对地球浮于水面的说法。明代章潢《图书编·天地总论》中说：“《隋书》谓日入水中，妄也。水由地中行，不离乎地，地之四表皆天，安得有水？谓水浮天载地，尤妄也。”

宣夜说 自然观的基础是元气学说。战国时代道有中的宋尹学派，把宇宙万事万物的本源归结为“气”。这气可以上为日月星辰，下为山川草木。三国时代的宣夜说学者杨泉在《物理论》中说：“夫天，元气也，皓然而已，无他物焉。”他还进一步论证说：“夫地有形而天无全。譬如灰焉，烟在上，灰在下也。”随着元气体论的发展，浑天说改为地球浮于气中，与气天相似。宋张载在《正蒙.参两篇》中说“地在气中”。

“宣夜说”认为“天”并没有一固定的大穹，而只不过是无边无涯的气体，日月星辰就在气体中飘浮游动。关于宣夜说的命名，是因为观测星星常常到夜半不睡觉。宣夜说的历史渊源，可上溯到战国时代的庄子。《庄子·逍遥游》：“天之苍苍，其正色邪？其远而无所有至极邪？”用提问的方式表达了自己对宇宙无限的猜测。“宣夜说”的进一步发展，还牵涉到天体的物理性质问题。据《列子·天瑞》篇记载，有位杞国人听说日月星辰是在天空飘浮的，便“忧天地崩坠，身无所寄，废寝食者。”这便是成语故事杞人忧天的由来。劝杞人的人，还提出了不但天空充满气体，连日月星辰也是气体，只不过是发光的气体。后来的宣夜说学者又进而提出地球会坏，天地也会坏，但是用不着担忧。就其宇宙结构理论来说，宣夜说确实达到了较高水平，它提出了一个朴素的无限宇宙观。但是，从观测天文学的角度来看，宣夜说却不如浑天说的价值大。浑天说能够近似地说明太阳和

别独立地提出太阳系起源的星云说。他们认为太阳是由一团原始星云形成的，星云在万有引力的作用下凝聚收缩，先形成质点，逐渐扩大成更大的团块，中心形成太阳，周围的团块逐渐形成围绕太阳运动的行星。他们的研究开辟了人类对天体起源和演化的研究。1781 年，赫歇尔发现了天王星。他还对恒星进行了大量的观测，按一定的天区计数恒星，他计数的恒星数目是惊人的，在北半球计数达到 1.176×10^5 颗，在南半球计数了 7×10^4 颗。关于银河系的结构，他指出：银河系的恒星密集区域很像一个中间厚两边薄的盘，这些恒星同属一个恒星集团——银河系，太阳系位于银河系内。赫歇尔的儿子继承父业，继续观测和研究，使银河系的模型进一步完善。在这时代，人们有了以观测为基础的银河系模型，人类的视野从太阳系延伸到了银河系。

第 3 节 现代宇宙学的观测基础

20 世纪以来人们的视野扩展到了更遥远的河外星系，更大尺度的宇宙结构：星系群、星系团和超星系团。对宇宙的物质分布和平均密度及化学元素丰度、膨胀速度、宇宙背景辐射等也有了进一步的认识，开始建立以观测实验为基础，以现代物理学为背景知识的现代宇宙学。星系红移，宇宙背景辐射和轻元素的合成这三方面的观测实验结果，可以说是现代宇宙学的三大基石。

一、星系红移

1929 年，美国天文学家哈勃研究大量的星系观测结果发现河外星系的退行速度与离我们的距离有关，距离越远的星系离开我们的退行速度越大，这就是哈勃定理。据现代哈勃空间望远镜和地面大望远镜的新探测结果证实，宇宙中像银河系这样的星系约有 500 亿个，利用河外星系光谱中谱线的多普勒红移而得知，绝大多数河外星系都远离我们而去。这使人们联想到我们的宇宙像一个正在膨胀着的巨大“橡皮气球”，橡皮球上的固定点之间的距离在不断的增大，但是这种增大不仅仅是单纯的固定点之间的距离改变，而是固定点之间的距离随着气球的膨胀而增大。河外星系红移的观测事实揭示出：所有天体都随着宇宙的膨胀而相互远离，越远的星系退行的越快，即我们观测的宇宙正在膨胀。

前面已述，哈勃定理的数学描述是：星系的红移速度 v_r 与星系离我们的距离 r 有 $v_r=H_0r$ 的关系，比例系数 H_0 叫哈勃常数。哈勃常数描述了宇宙膨胀的比率。哈勃定律明显的线性规律暗示了宇宙是在均匀的膨胀。那么它的更深的含义是什么呢？首先，它意味着不管我们在哪一个星系内，实际上其他星系都是离我们而去的。这意味着星系在空间不是固定的，彼此之间距离一直在不断增加，随着空间膨胀逐渐远离。

月亮的运行，宣夜说只能指出它们运行的不同，却没有探讨其运行的规律性。修订历法时，浑天说有很重要的实用意义，宣夜说却仅仅具有理论意义。但在人类认识宇宙的历史上，宣夜说无疑应有重要意义。

第 2 节　欧洲宇宙学的发展

在欧洲，托勒玫的“地心学”说凭借宗教势力统治了近 1 500 年之久。直到 16 世纪波兰伟大的天文学家哥白尼提出了宇宙以太阳为中心的日心说，才打破了“地心说”的统治。1514 年哥白尼写了《要释》一文，概述了他的日心体系要点。1543 年他的巨著“天体运行论”出版了，此书共分 6 卷，阐明了太阳是宇宙的中心，地球和其他行星一样围绕着太阳旋转，并指出按距离顺序，水星离太阳最近，依次是金星、地球、火星、木星和土星。恒星则分布在最外层的球上。哥白尼还计算出了每颗星到太阳的距离；他应用球面天文学解释天体的视运动，叙述了太阳和月球的视运动；并讨论了岁差理论与日月食的计算方法；讨论了行星的运动规律，彻底批判了托勒玫的地心体系。哥白尼的日心说具有划时代的意义。1584 年意大利的布鲁诺极力宣传哥白尼学说，出版了《论无限宇宙和世界》一书，提出“宇宙是无限大的，其中的各个世界是无数的”。“恒星都是遥远的太阳、宇宙无限、太阳并非是宇宙中心”等见解，发展了哥白尼的学说。由于他坚持真理，遭到了教会反动势力的迫害，于 1600 年 2 月 17 日被烧死在罗马的白花广场，为坚持正确的宇宙观他献出了宝贵的生命。

1609 年，意大利天文学家伽利略首先利用自制的望远镜发现了银河是由众多恒星组成的。1610 年伽利略出版了《星际使者》一书，公布了他自 1609 年来用望远镜观测天体做出的许多重要发现，如月球上的环形山和山谷，肉眼看不见的恒星、银河，以及银河由恒星组成、木星的四颗卫星等。

德国的天文学家开普勒是哥白尼学说的热情支持者。开普勒继承了他的老师第谷的大量观测资料，经过几十年的潜心研究，于 1619 年发表了《宇宙和谐论》一书，公布了行星运动的三大定律。后来他又发表了《哥白尼天文学概要》，并出版了当时精度最高的《鲁道夫星表》。

牛顿研究地球对月球吸引力时，发现行星绕太阳的运动是受太阳的引力，这种引力都是与距离的平方成反比的。1687 年牛顿发表了《自然哲学的数学原理》，提出万有引力定律，并应用它解释了岁差、潮汐等许多重要天文现象。牛顿以万有引力定律为基础，完善地解决了太阳系各类天体的运动。牛顿的朋友哈雷预言了一颗彗星的回归，从而此彗星被命名为哈雷彗星。这期间，英国天文学家亚当斯和法国的勒威耶根据牛顿力学发现了海王星。

1755 年德国的哲学家康德和 1796 年法国的数学家、天文学家拉普拉斯分

别独立地提出太阳系起源的星云说。他们认为太阳是由一团原始星云形成的，星云在万有引力的作用下凝聚收缩，先形成质点，逐渐扩大成更大的团块，中心形成太阳，周围的团块逐渐形成围绕太阳运动的行星。他们的研究开辟了人类对天体起源和演化的研究。1781 年，赫歇尔发现了天王星。他还对恒星进行了大量的观测，按一定的天区计数恒星，他计数的恒星数目是惊人的，在北半球计数达到 1.176×10^5 颗，在南半球计数了 7×10^4 颗。关于银河系的结构，他指出：银河系的恒星密集区域很像一个中间厚两边薄的盘，这些恒星同属一个恒星集团——银河系，太阳系位于银河系内。赫歇尔的儿子继承父业，继续观测和研究，使银河系的模型进一步完善。在这时代，人们有了以观测为基础的银河系模型，人类的视野从太阳系延伸到了银河系。

第 3 节 现代宇宙学的观测基础

20 世纪以来人们的视野扩展到了更遥远的河外星系，更大尺度的宇宙结构：星系群、星系团和超星系团。对宇宙的物质分布和平均密度及化学元素丰度、膨胀速度、宇宙背景辐射等也有了进一步的认识，开始建立以观测实验为基础，以现代物理学为背景知识的现代宇宙学。星系红移，宇宙背景辐射和轻元素的合成这三方面的观测实验结果，可以说是现代宇宙学的三大基石。

一、星系红移

1929 年，美国天文学家哈勃研究大量的星系观测结果发现河外星系的退行速度与离我们的距离有关，距离越远的星系离开我们的退行速度越大，这就是哈勃定理。据现代哈勃空间望远镜和地面大望远镜的新探测结果证实，宇宙中像银河系这样的星系约有 500 亿个，利用河外星系光谱中谱线的多普勒红移而得知，绝大多数河外星系都远离我们而去。这使人们联想到我们的宇宙像一个正在膨胀着的巨大“橡皮气球”，橡皮球上的固定点之间的距离在不断的增大，但是这种增大不仅仅是单纯的固定点之间的距离改变，而是固定点之间的距离随着气球的膨胀而增大。河外星系红移的观测事实揭示出：所有天体都随着宇宙的膨胀而相互远离，越远的星系退行的越快，即我们观测的宇宙正在膨胀。

前面已述，哈勃定理的数学描述是：星系的红移速度 v_r 与星系离我们的距离 r 有 $v_r=H_0r$ 的关系，比例系数 H_0 叫哈勃常数。哈勃常数描述了宇宙膨胀的比率。哈勃定律明显的线性规律暗示了宇宙是在均匀的膨胀。那么它的更深的含义是什么呢？首先，它意味着不管我们在哪一个星系内，实际上其他星系都是离我们而去的。这意味着星系在空间不是固定的，彼此之间距离一直在不断增加，随着空间膨胀逐渐远离。

二、微波背景辐射

20 世纪 60 年代四大天文重要发现除了发现了脉冲星、类星体、星际分子之外，就是宇宙微波背景 3 K 辐射(图 26.1)的发现。这一重要发现为宇宙大爆炸的模型和宇宙暴胀理论提供了有利的证据，为观测宇宙学开辟了一个新领域，也为各种宇宙模型提供了一个新的观测约束。

早在 1948 年，宇宙大爆炸理论的先驱伽莫夫(Gamov)预言，应有宇宙大爆炸之后的热辐射背景。而在 17 年后美国贝尔实验室的工程师彭齐亚斯(Penzias)和威尔孙(Wilson)证实了宇宙背景辐射的存在。他们在 1964 年使用一架 20 英尺(约 7 m)工作波段为 7.35 cm 的低噪声喇叭形反射天线，与 4 号人造卫星做通讯联系，进行天体辐射的绝对测量。为了降低天线的噪音水平，他们进行了一系列的测量。天线的地面噪声在温度为 300 K 的辐射。他们估计对准天空测量时，应该只有 0.3 K，但当他们对准银河系平面测量时，却惊人的发现存在着 6.7 K 的辐射，而且这种辐射与方向无关。经过一年的反复测量，扣除大气吸收以及天线自身的影响，确认出：存在着来自宇宙各个方向 3.5 K 的微波背景辐射(温度为 3 K 的辐射的极大波长在微波)。1965 年他们在“天体物理杂志”发表了“在 4 080 MHz 率上对天线过热温度的一次测量”，这一结果引起了天文界的极大关注，此发现为宇宙大爆炸理论提供了强有力的证据，奠定了现代宇宙学的基础。因此，彭齐亚斯和威尔孙于 1978 年获得了诺贝尔物理学奖。

1989 年 11 月 18 日美国发射的宇宙背景辐射探测卫星(COBE)观测表明，在所观测波段范围内，宇宙微波背景辐射是一个标准的黑体谱，其对应的普朗克温度为 $T=2.735$ K，排除观测者自身运动的多普勒效应和其他天体的辐射，宇宙背景辐射是均匀的和各向同性的。1992 年，COBE 卫星上的 DMR 探测器发现宇宙微波背景辐射有十万分之一的不均匀性，这被宇宙学家称之为“宇宙大尺度结构的种子”。



宇宙背景辐射探测器

图 26.1 宇宙微波背景 3 K 辐射

三、轻元素的合成

科学家对宇宙各类天体(包括太阳)的化学丰富度测量的研究表明:不论什么天体,其氦元素的丰度都占总化学成分的24%左右。这一数值远远超过恒星内部热核反应所提供的氦丰富度。用恒星核反应机制不能说明为什么有如此多的氦,而根据大爆炸理论,宇宙早期温度很高,产生氦的效率也很高,则可以说明这一事实。只要知道今天热辐射的温度,由热大爆炸理论很容易计算出宇宙诞生后约1 s时各处的温度约为100亿开,这对现有的原子核的合成来说也是太高了。那时物质必定被撕裂成最基本的成分,形成一锅基本粒子汤,诸如质子、中子和电子。但是,随着这锅汤变冷,原子就可能出现了。特别是,中子和质子就很容易成对聚合在一起。接下来,这些粒子对合成元素氦的核。计算表明,合成氦核的活动延续了大约3分钟,大约有四分之一质量的物质聚合成氦。这个过程用完了所有可利用的中子。余下的核子是没有聚合的质子,自然就成了氢原子核。因此,这一理论预言了宇宙应当由大约75%的氢和25%的氦组成,这与天文测量结果极为吻合。

1964年霍伊尔(F. Hoyle)和泰勒(Taylor)根据大爆炸宇宙模型,对热演化史做了详细计算,结果表明,由大爆炸宇宙学核合成理论所产生的氦丰度为23%~25%。随后,一些科学家又给出了其他轻元素^{3}He、D和^{7}Li的丰度。由于大爆炸宇宙学的核合成理论阐述了所产生的轻元素丰度与位置无关,故而解释了最初的氦丰度的测量,而且实测的^{3}He和^{7}Li的元素丰度比氦的丰度相差9个数量级,这与大爆炸宇宙学的核合成理论预言的完全吻合。

第4节 现代宇宙学

一、牛顿静态宇宙模型

从力学上讲宇宙是一个自引力作用下的系统。在牛顿理论中,时间和空间是绝对的,相互独立的。时间和空间都是无限的。绝对空间是独立于运动着的物质之外的背景,是无限的而且是静止不动的;绝对时间是永远流逝的;空间和时间都永无止境,不存在起源的问题。当人们试图写出这个无限介质中一个任意物质元所受到的引力时,发现牛顿引力完全失效。

1826年德国的天文学家奥伯斯(H. W. M. Olbers)提出一种被称为"奥伯斯佯谬"论点,使牛顿静态模型陷入困境。他提出,为什么夜天空是暗的?如果宇宙中均匀分布着无限多个恒星。设每一个恒星的照度都是E,恒星的空间分布密度为N,考虑宇宙空间中任一点O,以O为球心,以r为半径的一个薄薄的球壳厚度为$\mathrm{d}r$,这层球壳的体积为$4\pi r^2\mathrm{d}r$,其中分布的恒星总数为$4\pi Nr^2\mathrm{d}r$,每一

颗星对 O 点产生的照度为 E/r^2，整个球壳对 O 点产生的照度为 $4\pi NE\mathrm{d}r$，这个量与距离 r 无关，整个无限宇宙中的无限多重球壳，对 O 点产生的总照度为 $4\pi NE$，结果是宇宙中任意一点的光强都是无限大，应当无论在任何位置看"天空总是无限明亮的"，所以叫做"奥伯斯佯谬"(图 26.2)。



图 26.2 "奥伯斯佯谬"论点的示意图

从牛顿引力来看，引力与距离的平方成反比，与质量成正比，然而，壳内的质量又正比于 r^2，因此远近不同的壳对质元 O 产生同样大的引力，这个锥体中物质对 O 点的总引力是无穷大。在相反方向也产生一个无穷大的引力。那么这两个无穷大之差是多大，在数学上是求不出来。这说明牛顿引力 论在研究宇宙动力学方面完全失效，牛顿静态宇宙模型不能自恰。

广义相对论建立的宇宙模型打破了经典的时空概念，指出时空的性质和空中的物质是联系在一起的，物质产生的引力会引起空间弯曲，不再遵守牛顿式的平直空间，宇宙不是无限的。此外，宇宙中天体的分布是逐级成团式的：星系团、星群、星系、恒星，恒星的分布不是均匀的。宇宙中存在着大量的暗物质会吸收星体发出的光，使星光减弱。如果宇宙中时间不是无限长，在有限的时间里光运行的路程也是有限的，更遥远的恒星，它的光还没传播到这里就不会产生照度的影响。奥伯斯论点的最根本错误是不了解宇宙正在膨胀，河外星系以一定速度远离我们，我们接受到的恒星的光能量自然会减少。

二、爱因斯坦的有限无界宇宙模型

现代宇宙学诞生于 20 世纪 30 年代，它是建立在宇宙学原理和广义相对论

的基础上的。1916 年广义相对论创立，爱因斯坦就其场方程发表了第一宇宙解，把宇宙作为一个整体加以研究，从而为宇宙学的发展建立了理论基础。

1912 年爱因斯坦在他的同班同学，数学教授格罗斯曼协助下，在黎曼几何和张量分析中找到了建立广义相对论的数学工具。他们经过一年的奋力合作，于 1913 年发表了重要论文《广义相对论纲要和引力理论》，提出了引力度规场理论。这是首次把引力和度规结合起来，使黎曼几何获得实在的物理意义。爱因斯坦在 1915 年 11 月发表了广义相对论，论文描写了满足守恒定律的普遍协变引力场方程；并根据新的引力场方程计算出了光线经过太阳表面会发生 1.7″的偏转；水星近日点每 100 年的进动是 43′。1916 年春，爱因斯坦又写出了一篇总结性的论文《广义相对论的基础》；同年底，又写了科普读物《狭义与广义相对论浅说》。1916 年 6 月他提出了引力波理论。后人泰勒等间接证明了引力波的存在，为此，泰勒获得 1993 年诺贝尔物理学奖。

广义相对论是在牛顿引力理论和狭义相对论的基础上发展起来的，它是研究空间、时间、物质和引力的理论，它进一步揭示了四维时空同物质的统一关系，指出空间和时间不能离开物质而单独存在。空间的结构性质取决于物质的分布。爱因斯坦说过："空间、时间未必能被看作是一种可以离开物理实在的实际客体而独立存在的东西。物理客观不是在空间中，而是这些客体有着空间的广延。因此'空虚空间'这概念就失去了意义"。空间处处都有物质，由物质产生的引力导致空间不是平坦的欧几里得空间，而是弯曲的黎曼空间。广义相对论认为时间和空间密不可分，时空的弯曲是引力场造成的，而引力场来源于物质的万有引力作用。只要有物质就存在引力场，引力场的大小决定了时空的弯曲程度。时间和空间的结构和性质是依赖于物质的，不能独立于物质而绝对地存在。

1917 年，爱因斯坦用广义相对论的结果来研究宇宙的时空结构，发表了开创性的论文《根据广义相对论对宇宙所作的考察》，提出了有限无界的宇宙模型，即现实的三维空间无论向哪个方向运动都永远走不到尽头，不可能遇到边界；宇宙中所有各处都具有同等地位，处处都是中心，又处处都不是中心，或者说宇宙没有中心。

爱因斯坦建立的有限无界的宇宙模型是一个静态宇宙模型。他指出宇宙的几何性质不随时间而改变，然而，它是不稳定的，一旦宇宙略微变小，宇宙中所有物体之间的距离都将略微缩短，从而引力增强，就会促使宇宙进一步收缩，并一直收缩下去；反过来，静态宇宙一旦略微有微小膨胀，必将一直膨胀下去。爱因斯坦为了得到一个稳定的静态宇宙模型，在引力场方程中加进了一个常数叫做宇宙项，表现为一种斥力，它抵消引力，起到了"负"物质的作用。正是这样一个常数项，后来被爱因斯坦称做"一生中最大的错事"。

1922 年，前苏联数学家弗里德曼（А. А. Фридман）发表了著名论文《论空间

的曲率〉，求出了不含引力常量的引力场方程的通解，得到了一个膨胀的，有限而无界的宇宙模型。

1927 年，爱丁顿的学生，比利时天文学家勒梅特(G. Lemaitre)通过求解引力场方程得出一个膨胀的宇宙模型。

1929 年哈勃的重要发现对宇宙学的发展起了巨大的推进作用。哈勃对河外星系进行了大量观测，发现不同星系的谱线红移随着星系的距离增大而增加，即距离我们越远的河外星系退行速度越大，这证实了宇宙正在膨胀。爱因斯坦在《关于宇宙学问题的评注》一文中说："人们不得不认为哈勃的发现就是说明宇宙的膨胀"，"倘若哈勃的膨胀是在广义相对论的创立时期发现的，宇宙项就决不会引进来"。爱因斯坦的宇宙模型虽然有它的局限性，但在现代宇宙学中具有开拓性的创新意义。

三、稳恒态宇宙模型

稳恒态宇宙模型是英国的天文学家邦迪(H. Bondi)、霍伊尔(F. Hoyle)和托马斯·高尔德(T. Gold)建立的。他们提出，当宇宙膨胀然后星系间距离越来越远时，物质从无到创生，并充满了宇宙空间。后来这些物质凝聚，形成新的恒星和星系。年轻的新生星系取代了老死的星系，宇宙在任何时刻都和其他时刻极其相像。因此，宇宙是处于一种稳定的状态。至今还有一些科学家坚持这种学说与多数科学家认可的标准宇宙学模型——大爆炸宇宙学说相抗衡。

第 5 节　标准宇宙学——宇宙大爆炸模型

在广义相对论基础上建立的各种宇宙模型中，最流行的现代宇宙模型是标准宇宙模型——宇宙大爆炸模型，也叫弗里德曼宇宙模型。宇宙大爆炸模型的理论基础是宇宙学原理和广义相对论。

一、宇宙学原理

天文观测表明，在 1 亿光年以下的尺度范围内，物质是成团分布的，行星、卫星和太阳组成太阳系，众多的恒星、星团、星云组成银河系，众多的星系组成星系团，超星系团还有"宇宙长城"及直径达几十兆秒差距的巨大空洞(气泡结构)。这些层次结构的尺度见图 26.3。这些不同层次宇宙结构的物质都在万有引力的作用下围绕着各自的重心转动。但是从更大的宇宙尺度，大于 1 亿光年的尺度上，天体的分布基本上是均匀的、各向同性的。宇宙学家建立了一个讨论问题的前提，叫做宇宙学原理。

宇宙学原理就是假设宇宙在空间上(大尺度范围)是均匀的和各向同性的。

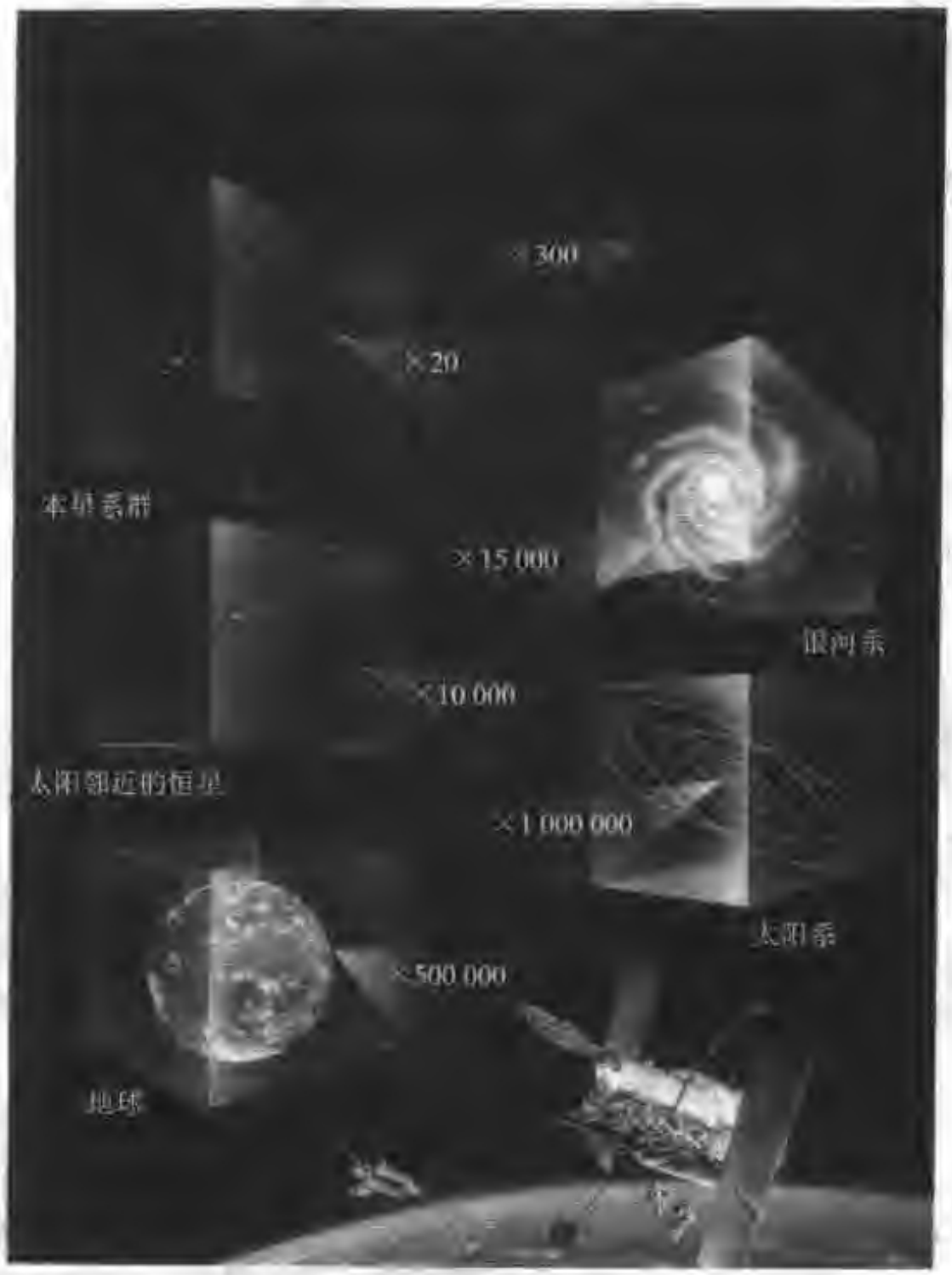


图 26.3 宇宙的层次结构(地球、太阳系、
银河系、星系团、大吸引体)

这一假设已被大尺度星系巡天,X 射线源的分布,深度射电星系巡天以及类星体的分布等观测所支持,尤其宇宙微波背景辐射是高度各向同性(各向异性的程度$\sim 10^{-5}$)更是对宇宙学原理的强有力的支持。

宇宙学原理的含义:(1)在宇宙尺度上,空间任何一点和任一点的任一方向,在物理上是不可分辨的,即在密度、能量、压强、曲率和红移等诸方面都是完全相同的。但同一点,在不同时刻,其各个物理量都可以不同,即允许存在宇宙演化。(2)从宇宙中任何一点进行观测,观察到的物理量和物理规律是完全相同的,没有任何一处是特殊的。我们把大于 1 亿光年的尺度称为宇观尺度。观测表明,在宇观尺度上,物质分布是均匀各向同性的。

*二、罗伯孙-沃尔克度规

一般引力场应当由四维时空的度规来描写。从物理概念上讲，引力场的存在是通过时空弯曲来体现的。空间可以是弯曲的，而且空间的尺度可以随时间而变化。在弯曲的时空中无法建立直角坐标系，时空的性质完全由度规来确定。

罗伯孙(Robertson)和沃尔克(Walker)给出了满足宇宙学原理的时空度规，叫 R－W 度规。

在球面坐标系(r,θ,ϕ)中，点(r,θ,ϕ)和点$(r+\mathrm{d}r,\theta+\mathrm{d}\theta,\phi+\mathrm{d}\phi)$之间线元的一般数学表达式：

$$\mathrm{d}s^2=c^2\mathrm{d}t^2-R^2(t)\left[\frac{\mathrm{d}r^2}{1-kr^2}+r^2(\mathrm{d}\theta^2+\sin^2\theta\mathrm{d}\phi^2)\right]$$

这个满足宇宙学原理的四维时空线元的度规叫罗伯孙-沃尔克度规。公式中 R 称为宇宙尺度因子，表示宇宙尺度的大小；t 为宇宙时；c 是光速；k 为空间的曲率，k 可以取－1，0，和 1(如果 $k=0$ 时，就回到了欧氏空间)；r 所表示的是测量距离 L 与尺度因子 R 的比。罗伯孙-沃尔克度规的表达式可以用来检验大尺度空间的性质：

(1) k 为正值，表示球面空间，对应的宇宙是有限封闭的、振荡型的。

(2) k 为负值，表示双曲面空间，对应的宇宙无限开放的。

(3) k 为零，表示平直空间，即欧氏空间。对应的宇宙是无限开放的，也称爱因斯坦-德西特宇宙。

式中的尺度因子 $R(t)$ 仅仅是时间的函数，与坐标无关。在一定意义下，$R(t)$可以理解为“宇宙的半径”。罗伯孙-沃尔克度规的精髓正是引入了$R(t)$，$R(t)$描述了宇宙的动力学性质。我们的宇宙目前正处于膨胀状态，$R(t)$随时间增加。但因 k 的不同，$R(t)$会有不同的走向，或者无限地膨胀下去，或者膨胀之后再收缩。

R－W 度规中的径向坐标 r 不是从观测者到天体的距离，而是径向共动距离坐标；由于我们观测到的星系的位置是遥远星系过去历元的位置，随着宇宙膨胀，星系随时间变化，所以 r 仅仅是和星系一起运动的标志，真实距离的改变都体现在 $R(t)$的变化中。

各种宇宙模型的实质都在于确定 $R(t)$随时间的变化形式。在标准宇宙模型中，$R(t)$随时间膨胀的变化可以用一个级数来表示。若目前的时间为 t_0，所讨论的时间为 t，且 t 与 t_0 的间隔不太大时，$R(t)$按泰勒级数展开为

$$R(t)=R(t_0)+\frac{\mathrm{d}R(t_0)}{\mathrm{d}t}(t-t_0)+\frac{1}{2!}\frac{\mathrm{d}^2R(t_0)}{\mathrm{d}t^2}(t-t_0)^2+\cdots$$

$$=R(t_0)\left[1+\frac{\dot{R}(t_0)}{R(t_0)}(t-t_0)+\frac{1}{2}\frac{\ddot{R}(t_0)}{R(t_0)}(t-t_0)^2+\cdots\right]$$

上式中的第二项的系数所表示的正是宇宙的膨胀速度，也就是哈勃常数 H_0，即

$$H_0=\frac{\dot{R}(t_0)}{R(t_0)}$$

至于第二项的系数则和宇宙膨胀的加速度有关。

大爆炸宇宙模型的基本内容概括起来有以下几点：(1)宇宙起源于一次热大爆炸；(2)宇宙中的物质分布是均匀的和各向同性的；(3)目前的宇宙处于膨胀状态之中；(4)宇宙时空用罗伯孙-沃尔克度规(R－W 度规)来描述。用公式概括表示即：罗伯孙-沃尔克度规＋爱因斯坦场方程＋物态方程⇒宇宙动力学方程(弗里德曼方程)⇒标准宇宙学。

三、宇宙大爆炸学说

在星系红移和哈勃定律发现之后，天文学家们普遍确认宇宙正在膨胀，空间正在伸展。那么如果由此往前推测又会得到什么结论呢？显然那就是回溯过去越久远，全部星系就靠得越近，那么必定在过去的某一时刻宇宙中的物质都聚集在一起，密度趋于无穷大，这也许就是宇宙的开端。

1932 年，比利时天文学家勒梅特基于这样的观测事实，提出原始宇宙是一个极端高温、极端压缩状态的“原始原子”。在一场无与伦比的爆炸中，诞生了我们今天的宇宙。也就是说，我们的宇宙是在整体膨胀、徐徐冷却并在不断稀化的状态中诞生和演化的。

1948 年美籍苏联物理学家伽莫夫等发表了“宇宙的起源”与“化学元素的起源”等文章。他依据宇宙在小尺度结构上分布不均匀，而在特大尺度上趋于均匀的事实及天体间的引力作用，提出了宇宙的大爆炸理论。他指出宇宙起始于超高温、超高密状态的“原始火球”，在原始火球里，物质以基本粒子的形态出现，在基本粒子的相互作用下原始火球发生大爆炸。这种爆炸不是物质向虚无的空间飞散，而是向四面八方均匀地膨胀，物质随膨胀而距离增大。原始火球的基本粒子开始时几乎全部都是中子，由宇宙膨胀导致的温度下降，使中子按照放射性衰变过程自由地转化为质子、电子等，逐渐产生由轻到重的化学元素。随着整个宇宙的膨胀和降温，各种粒子进一步形成星系、恒星等宇宙中的天体，然后逐渐演化到现在的宇宙。此理论解释了现今宇宙中存在的大量氢及占 25%～30%的氦。它认为这是早期宇宙的主要产物，单靠恒星内部的氢-氦反应不可能达到如此高的氦丰富度。此理论还预言了宇宙演变到今天应当遗留下温度约为 4 K 到 10 K 的宇宙背景辐射。

但是，由于当时射电天文学处于发展初期阶段，不能用观测证明宇宙背景辐射，所以此理论在当时不被大多数科学家接受，使大爆炸理论被冷落了 20 年。1965 年由于观测到了宇宙背景辐射加上核物理理论的发展使大爆炸宇宙模型

重放光彩。

大爆炸宇宙模型成功地解释了重要的观测事实：(1)观测到的星系红移，即河外星系都远离我们而去，距离越远的星系退行速度越大，这是由于宇宙正在膨胀。(2)大爆炸理论认为所有恒星都是在温度下降后产生的，因而任何天体的年龄都应比自温度下降至今天这一段时间为短，即应小于200亿年。目前，各种天体年龄的测量证明了这一点。(3)观测到各种不同天体的氦丰度相当大，约占25%。用恒星核反应机制不足以说明为什么有如此多的氦。而根据大爆炸理论，早期温度很高，产生氦的效率也很高，可以说明这一事实。(4)观测到宇宙背景的3 K温度的微波辐射说明了宇宙大爆炸模型的正确并为它提供了强有力的证据。

大爆炸理论得到了现代天文界的普遍赞同，称为"标准的大爆炸宇宙模型"。1967年伽莫夫因此功绩，获得诺贝尔物理学奖。

第6节　宇宙演化的简史

宇宙的时间演化大体分为三个演化阶段：①宇宙大爆炸后的10^{-13} s时期的宇宙；②大爆炸后30万年，经过暴涨到膨胀的宇宙(这个时期发出宇宙背景辐射)；③宇宙不断膨胀，恒星、星系、星系团逐渐形成阶段。如图26.4所示。

大爆炸宇宙模型给出了如下宇宙演化的简史。

在120～200亿年前发生了一次猛烈的空间爆炸，在那一瞬间，宇宙是无限地致密，并且具有超高的温度。从宇宙大爆炸开始到爆炸发生后的10^{-43} s之间这段时间，科学家现在还无法了解那时空间、时间和物质形态和物理状况等情况，但空间无疑是在膨胀着的粒子和反粒子混合的高能汤中猛烈地膨胀着的。

大爆炸发生后的10^{-43}～10^{-35} s的时期，即"大统一"时代，所有的物质和能量本质上是可交换的和守恒的，而且电磁力与强核力与弱核力是统一的。随着宇宙的膨胀，一次暴涨发生了，这是最初的暴涨，在此之前，夸克(反夸克)的数目与光子数是相等的。光子数与重子数之比为10^{9}～10^{10}。在宇宙暴胀之后，宇宙逐渐的冷却下来。

随着宇宙继续膨胀和冷却，强核力从弱电力中分离出来，夸克和反夸克粒子冷凝到重子，重子是最稳定的，也是我们最熟悉的，例如质子和中子。重子、介子数少量超过反重子和反介子的数量。

短程的强核力已经从其他力中分离，并将质子和中子拉在了一起，释放了巨大的能量。宇宙在10^{-44} s内膨胀了10^{50}倍，所以称为"宇宙的暴涨阶段"，宇宙在此阶段内按指数量级膨胀。在10^{-32} s时宇宙的暴涨结束。宇宙从10^{-77} m^{3}膨胀为0.1 m^{3}时，夸克和轻子、以及和它们相对应的反物质粒子不断的碰撞、湮灭并释放出能量。两个碰撞的光子能够同样创造新的物质和反物质。而且，夸

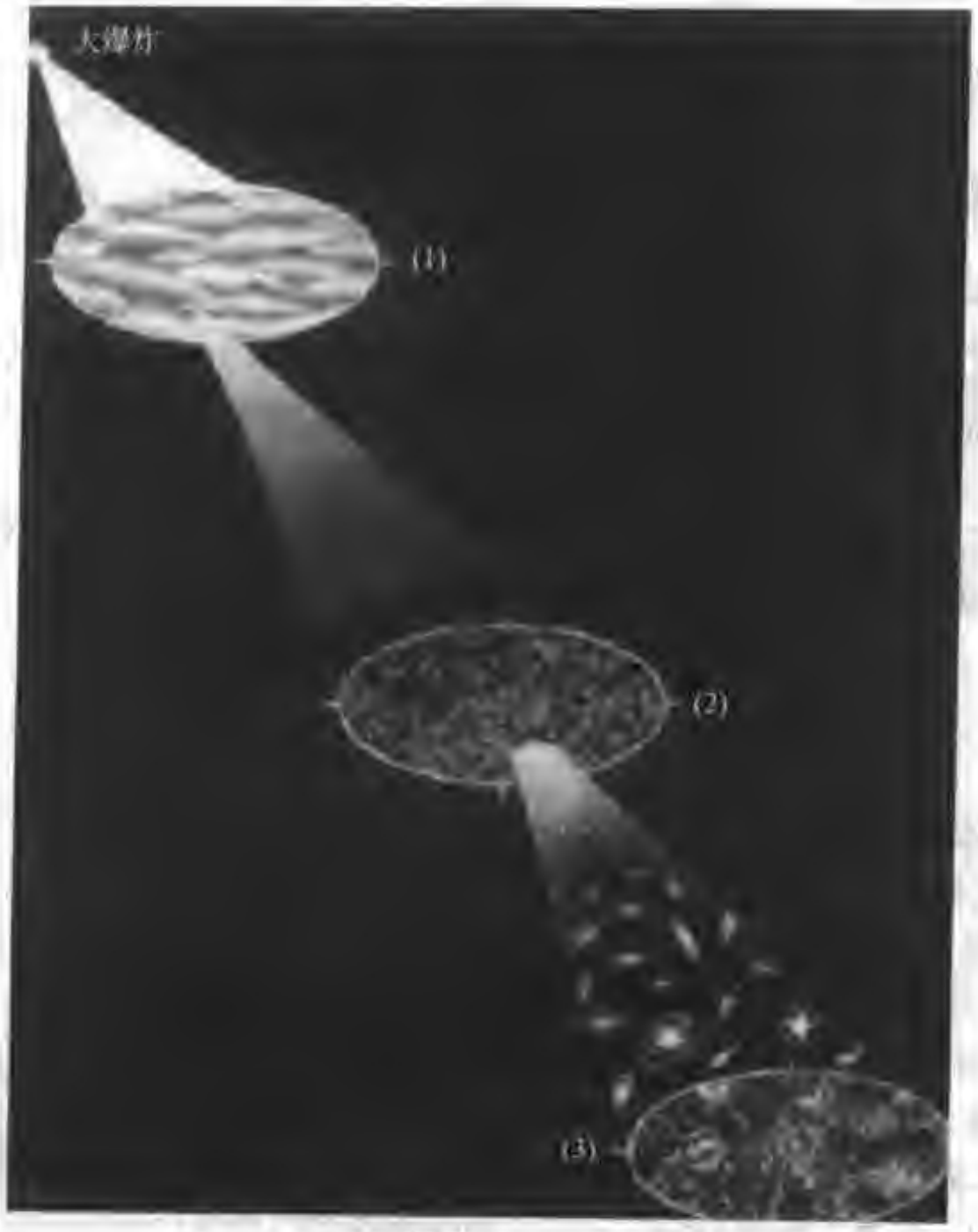


图 26.4 宇宙的时间演化

克能够衰变成轻子，也能创生。那时宇宙的主要组分是光子、夸克和反夸克，以及有色胶子。它的温度继续降低。这时的质子是不稳定的，这一阶段还无元素，甚至没有氢。

在 10^{-12} s 时，弱核力与电磁力分离，宇宙在此期间很少有活动，常称为“荒芜”时期。

大爆炸后少于 1 s 的时间内，物质的最初形式是光子、夸克、中微子和电子，然后是质子和中子。宇宙创生后一秒时，宇宙冷却到电子和反电子对不能创生。结果是一种物质的湮灭，创生了更多的光子并遗留下一些电子。弱电力也失去了它在中微子，反中微子和其他粒子之间的媒介作用。中微子不再和反中微子相互作用彼此湮灭。它们开始大量的游离于宇宙空间中，并一直持续到今天。一些科学家相信这些粒子可能是暗物质的一个重要部分。在我们的宇宙中最初的原子核氦、氘(重氢)和一些锂核几乎全是在核形成时期创生的，该时期开始于

大爆炸发生后的一秒，结束于大爆炸之后的 3 分 45 秒。大爆炸后 10～1 000 s 期间，是宇宙最初元素合成时期。

大爆炸 10^{11} s 后，光子和重子退耦，在此之前是辐射能密度高于物质密度，在此之后物质密度高于辐射能密度宇宙以物质为主。因为退耦伴随着自由电子与核结合形成原子。在这期间温度降低到了质子和中子能够在没有高能光子阻隔可以粘在一起的程度。中微子和反中微子失去了与质子或中子和所有的正电子(电子的反物质微粒)互相作用的能力，最终被湮没了。核形成的条件成熟，这时期形成的主要有最稳定的 2 个中子同 2 个质子组成的氦(占原始的轻元素的 24%)以及大量的氘(2 个质子)、氚(3 个质子)和锂(3 个质子和 4 个中子)。剩下的质子变为氢核。这些原子的核经过许多年以后和电子结合最终成为恒星的种子。所有其他的元素：从碳、氮、氧到铁、铜和金等金属都形成于恒星诞生和死亡的循环中。

在大爆炸 30 万年之后，核的物质和辐射物质组成的不透明的汤逐渐开始变得清晰。这个时候，宇宙的温度降低到了 4 000 K，光子不再有足够的能量将电子撞离原子核与质子，光子可以自由的穿过宇宙，最后从物质中分离。这个时期叫做复合时期，持续了大约一百万年左右。在复合之前的极早期，巨大的光子海在这期间坚持以宇宙的微波背景的形式向宇宙渗透。它不可能在宇宙膨胀了近 200 亿年后依然保持高温，高密度的状态，这种辐射现在已经冷却到了 2.73 K。1989 年宇宙背景探测者卫星(COBE)的观测显示这种辐射具有黑体谱，并检测到宇宙背景辐射的细微变化，温度涨落只有约 10^{-5} K。这反映了该辐射发出时宇宙的平滑性。微波背景的微小变化，说明在复合时期，物质的密度和能量存在微小的扰动。这些微小的扰动最终由于引力放大，便形成了我们今天的宇宙(参见图 26.5)。

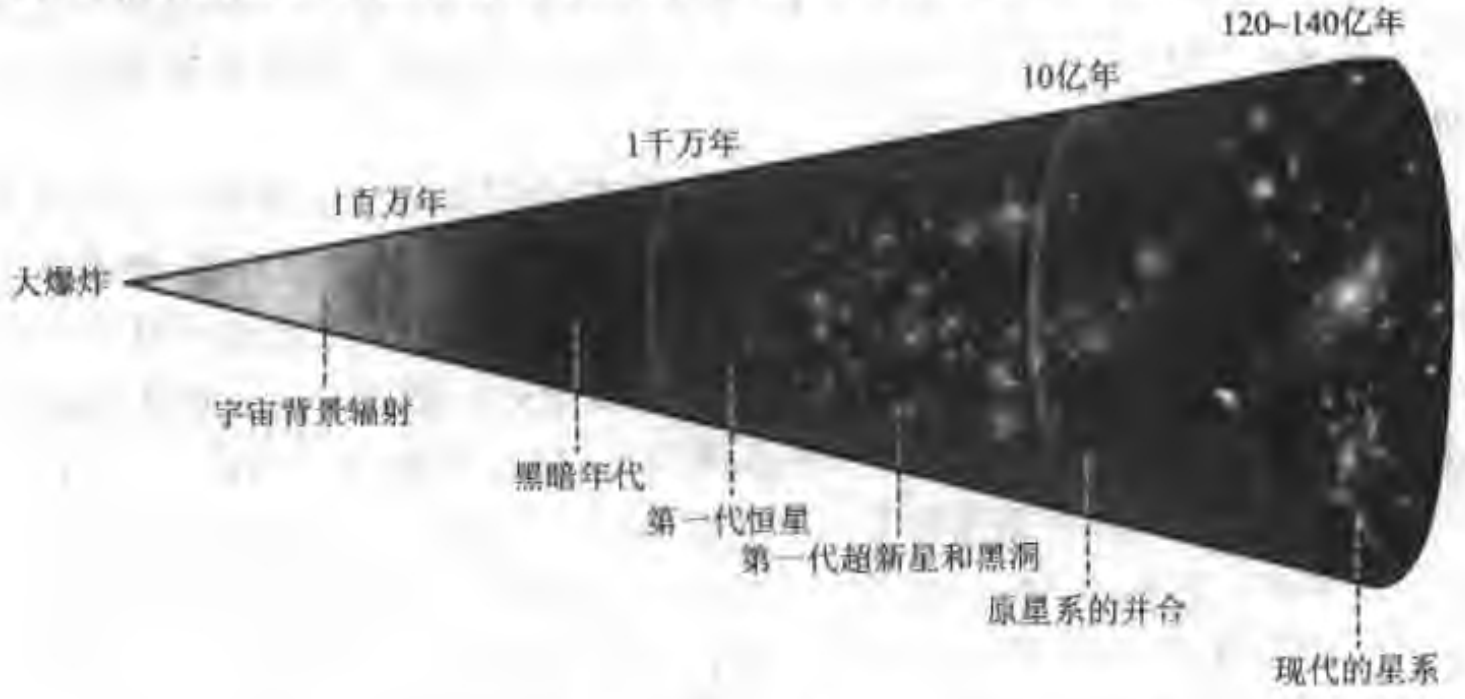


图 26.5 宇宙的演化

在大爆炸3亿多年后(10^{17}s)，星系、恒星和行星开始形成，宇宙继续膨胀，温度逐渐下降。现今我们的宇宙仍在膨胀之中。

第7节 宇宙的年龄与未来

一、宇宙的年龄

现代观测研究认为我们现在的宇宙的演化年龄约有140～200亿年。这段演化时间与人类的历史或地质年代相比，是那样的漫漫悠长，那么科学家是如何推算宇宙年龄的呢？从发现星系退行现象以后，天文学家便开始了测定宇宙年龄的工作。多年来，有好多个天文小组在用不同的方法估计宇宙的年龄，测定结果明显的不同，从80亿年到200亿年不等。因此，研究人员常常要对测定方法进行检验。在哈勃空间望远镜发射以前，天文学家经常用造父变星方法测邻近星系的距离，此外用较亮的超新星在爆发后的一定时间标度的光度作为标准烛光(绝对星等是一定值)来测定超新星所在的星系的距离。

天文学家普遍认为，在估计宇宙的年龄时首先需要求得准确的哈勃常数，因为哈勃常数是表明星系退行速度随距离而变的速率，哈勃常数的倒数可以估算宇宙的年龄。由哈勃定律可以方便的测定星系与类星体的距离，假设宇宙膨胀速度是常数，我们可以问给定的星系经过了多少时间穿过现在距离到我们这里。此时间等于距离被膨胀速度除，即

$$\text{宇宙年龄(时间)}=\frac{\text{星系距离}}{\text{星系退行速度}}=\frac{1}{H_0}$$

按照$H_0=50\ \text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$计算，宇宙的年龄为196亿年。但是如果按照$H_0=65\ \text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$计算，得出宇宙年龄约为150亿年。所以精确地测定哈勃常数是计算宇宙年龄的关键。

近年来，以弗里德曼为首的一些美国年轻科学家发展了一个估计哈勃常数的新方法。他们对哈勃望远镜拍摄的室女星系团中M100星系内20颗造父变星进行研究，这些造父变星的光变周期从20天到65天，光变幅度从25^m到27^m。他们测出M100星系距离我们为56±6 Ml. y.。结合该星系的退行速度，并在校正了银河系落向室女星系团的速度后，得出哈勃常数的值$H_0=80\pm17\ \text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$，比桑德奇的值($H_0=50\ \text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$)大得多，从而所得宇宙年龄值要小得多，即他们求出从宇宙创生大爆炸算起的宇宙年龄为80～120亿年。此外美国基特峰天文台的皮尔斯等观测室女星系团中旋涡星系MGC1571内的3颗造父变星的光变，求得哈勃常数之值$H_0=87\pm7\ \text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$，其推论与弗里德曼等人一样。由于目前已知最老的恒星年龄为150～

160 亿年。这就出现了年轻的宇宙与老龄的恒星的矛盾，因为按照常理恒星不可能在宇宙出现之前诞生。对此，一些科学家提出了有趣的解释：(1)在我们宇宙创生以前，有过另一次大爆炸，现在观测到的一些老年星是那次爆炸的产物，即存在着多个宇宙，多次大爆炸。(2)宇宙大爆炸是随机的，两次大爆炸之间的平均时间间隔可能达几十亿年，平均空间距离可能达几十亿光年。(3)印度天文学家辛格的理论研究认为只要宇宙常数 Λ(此常数指爱因斯坦的广义相对论方程式中的宇宙常数项)不为零，推测出宇宙的实际年龄就比我们由现代观测得到的年龄老得多。

今后为了正确估算宇宙年龄，天文学家将要进一步证实暗能量的存在，以及暗物质是否具有可以与普通物质相比拟的密度。而且仍然需要精确的对氘测量，进一步测定高红移的超新星以证实宇宙膨胀是否加速。要走出解决宇宙年龄的窘境，还需要详细了解大尺度宇宙结构的空间分布。

二、宇宙的未来

宇宙的膨胀史依赖于宇宙中物质的总密度(普通物质和暗物质)和可能的非零"宇宙学常数"，这一常数可能代表宇宙中的一种"暗能量"。这些参数决定着宇宙的几何性质和它的未来的命运，即它将永远膨胀或是再次塌缩。

理论揭示在宇宙几何是平直的情况下，物质和能量的总密度取其"临界值"。宇宙微波背景涨落的观测强烈暗示，宇宙的确是平直的，所以物质和能量的总密度应当取其临界值。然而根据星系团的观测，估计宇宙的物质只有临界值的30%，这意味着宇宙充塞着大量的暗物质和暗能量。暗能量可能占据物质和能量总密度的 70%。

20 世纪 90 年代，最激动人心的发展之一是发现宇宙常数可能不等于零。这一发现是基于两组独立的观测。首先，天文学家们找到一种方法可以从 Ia 型超新星亮度下降的速率决定其光度。知道了光度就能通过测量其亮度来测定这个超新星的距离。结果表明，遥远的超新星看来比理论预期的要暗，这意味着宇宙的膨胀正在加速，而且宇宙中充塞着大量的暗物质和暗能量。

我们生存的宇宙未来的命运如何呢？关于宇宙的前途，1922 年由苏联数学家弗里德曼发展起来的标准宇宙模型阐明了此问题。这一理论是建立在爱因斯坦的广义相对论方程基础上，但没有引入宇宙常数项。因为剔除了这一常数项，弗里德曼得到的宇宙模型解是动态的，即宇宙是运动着的而不是静止的。

弗里德曼宇宙学理论论述了宇宙前途的三种模型：开放式宇宙模型、闭合式宇宙模型和平直式宇宙模型，如图 26.6 所示。宇宙学家认为，宇宙的最后结局是从开始就决定了的，它取决于宇宙的平均密度。如果密度大于临界密度，则有

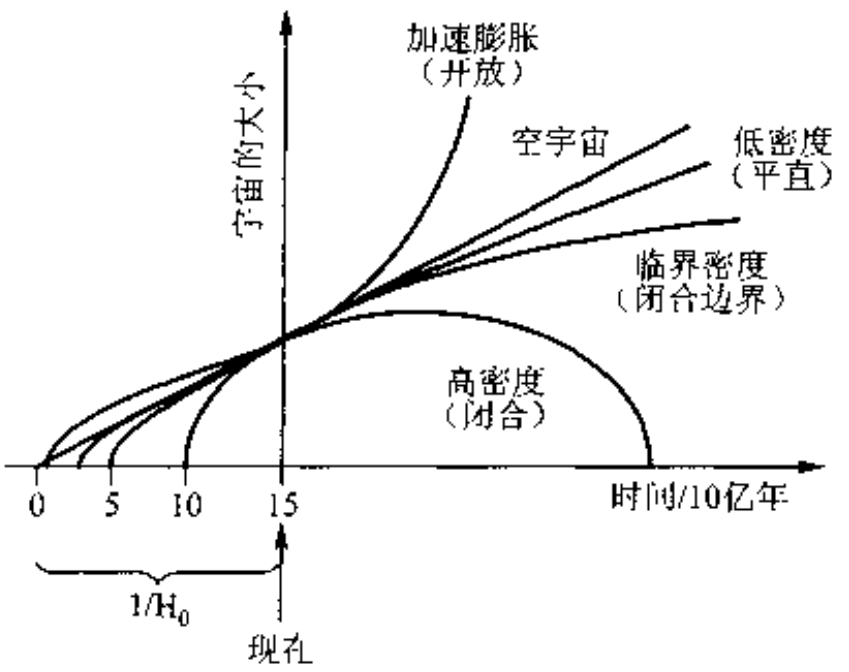


图 26.6　宇宙可能的三种命运
（开放式、平直式与闭合式宇宙模式）

足够的宇宙物质停止它的膨胀而且导致再收缩，叫封闭的宇宙；如果宇宙的密度小于临界密度值，则宇宙永远膨胀下去，叫开放的宇宙；如果宇宙的密度等于临界密度，则宇宙没有曲率是“平坦的”，叫临界宇宙。对于哈勃常数 $H_0=65$ km/(s·Mpc)，推出的临界密度大约是 10^{-26} kg/m^3。

天文学家描述宇宙密度参量用 Ω_0，在平直宇宙模式中，$\Omega_0=1$；开放宇宙模式中 $\Omega_0<1$；封闭式宇宙模式中 $\Omega_0>1$。

开放式宇宙模式是指宇宙从大爆炸开始，一旦开始了膨胀，便不停顿地永远膨胀下去。在这个过程中，各个星球将耗尽内部的核燃料，逐渐成为白矮星、中子星和黑洞；演化到后期，黑洞遍布宇宙，黑洞吞食万物，整个宇宙变成黑暗的世界；最后黑洞也蒸发，组成的基本粒子也会衰变，宇宙由此变成了一个混沌世界。

闭合式模式与之相反，是说宇宙膨胀后，由于自身的引力作用，膨胀到一定程度后转而逐渐收缩。随着宇宙的逐渐收缩，整个宇宙的温度升高，星球不断合并，最后形成一个大黑洞，最终又缩回到原来的状态。会不会再爆炸，产生第二代宇宙呢？这有待新世纪的天文学家来回答。

平直式宇宙模式介于上述两种情形之间。大爆炸之后宇宙暴胀，此后膨胀逐渐减慢，反复地膨胀、收缩，总是在坍缩的边缘来回摇摆、震荡，永无休止。

究竟那一种宇宙演化模式符合客观实际呢？至今尚无定论。从近年测定宇宙中的氘含量来推算，宇宙应当是开放得更合理些，即宇宙将无休止地膨胀下去。依据遥远星系和类星体所统计的退行速度减速情况，对宇宙是闭合的模型有利，但是，由于没有考虑宇宙中的暗物质，也不能令人置信。从 COSBE 卫星的观测，发现微波背景的 3 K 辐射的起伏非常小，仅为 10^{-5} K，这一事实说明宇

宙是平直的。总之，从观测和理论的研究的总体来看，一般是有利于宇宙的开放式模式与平直式模式。



习　题

1. 一个星系巡天观测的探测器，极限星等为 20^m，问它可探测的最远距离是多少？它能够探测到像银河系(绝对星等为 -20^m)这样亮的星系吗？

2. 如果整个宇宙充满了银河系这样的星系，平均密度为每立方百万秒差距 1 个星系，计算如果在上题，像银河系这样的星系覆盖整个天空，求可观测的星系数有多少？

3. 8 个星系分别位于一个立体块的每个角内，临近的两个星系间现在的距离是 10 Mpc，整个立体块按照哈勃定律膨胀以 $H_0=65$ km/(s·Mpc)。速度膨胀。计算星系相对于立体块内的相对的角落的退行速度。

4. 按照大爆炸理论，分别以哈勃常数 $H_0=50$ km/(s·Mpc)，$H_0=65$ km/(s·Mpc)；$H_0=80$ km/(s·Mpc)计算宇宙可能的极大年龄。

5. 哈勃常数 $H_0=65$ km/(s·Mpc)对应的宇宙临界密度是 8×10^{-27} kg/m^3，(a)一个立体天文单位的体积内的质量是多少？(b)包含 1 个地球质量(约 6×10^{24} kg)的物质要求的立体块有多大？(1AU= 1.496×10^{11} m)

6. 观测到室女星系团的退行速度为 1 200 km/s，假定 $H_0=65$ km/(s·Mpc)，宇宙的密度是临界密度，计算以室女星系团为中心，仅仅包含银河系的球内包含的总质量，这个球的表面的逃逸速度是多少？

7. 假设宇宙有临界密度，可观测宇宙约有 200 亿光年的距离，估计可观测宇宙内的总质量(用太阳质量表示)。

8. 宇宙的临界密度正比于哈勃常数的平方。如果临界密度等于“正常”物质(不是暗物质)的密度即大约 10^{-28} kg/m^3，相应的哈勃常数值是多少？此值是现代可接受的值吗？

9. 一个自旋体的旋转角动量是正比于它的质量、它的角速度，和它的半径的平方，一个具有 0.1 l.y. 直径，缓慢自转的星际云碎块，每百万年转一圈，开始坍缩，假定质量保持常数，估计星际当云收缩到太阳云的尺度即横跨约 100 AU 时此云的旋转周期。

第二十七章

茫茫宇宙觅知音

人类在探索宇宙的同时也寻找着自己的"知音"。自从人类登上月球以后，以更积极的行动在太阳系和银河系内继续探寻。目前，人类探索的脚步已越出了太阳系，已观测到了银河系内有些恒星存在行星系统，在那里闪烁着生命之光，可能是人类宇宙"知音"的故乡。

第 1 节　太阳系的生命探索

一、"飞碟"的误会

早在 1952 年 7 月，美国华盛顿国际机场的雷达探测到来历不明的飞行物，怀疑是否是来自前苏联的侦察物或某种秘密武器，安全部调查的结果否定了这个怀疑。以后，各地屡有类似的发现和报道，并把这种不明飞行物取名为飞碟。一些报纸刊载和报道了：几个人被外星人劫持到飞碟中去，并给他们安装上探测器，还致使他们失去记忆后，再放回来……，如此等等。不多时，有关"不明飞行物"(UFO)的传说沸沸扬扬。60 年代中期，美国亚利桑那气象部门的麦克唐纳和西北大学的海叶克为代表的一些学者，提出了外星人来访地球是可能的论断。此后，有关飞碟或外星人访地球的传闻、报道、科幻读物等在世界各地广为流传。这风波也冲击到了中国的广大天文爱好者，一段时间出现了一场"飞碟"热。

1968 年，以美国科罗拉多大学物理学教授康登为首的调查机构，组织了大规模的调查，于 1969 年完成了"康登报告"。此份报告认为外星人访问地球的说法是没有根据的。并认为没有必要再进行类似的调查。至此由美国空军负责登记的"不明飞行物"事件共有 1 万 2 千余件，以后不再登记。关于外星人访地球的传闻至今没有一件是被证实的。

二、月球及太阳系大行星的巡访

1969 年 7 月 20 日，阿波罗 11 号登月舱第一次实现了人类登上月球的梦想。从 1969 年 7 月至 1972 年 12 月，先后有 6 艘阿波罗飞船登月成功，共有 12 名宇航员登上月球考察。1994 年美国发射的"克莱门汀"号航天器，在月球南极

附近发现了冻土——"冰湖"。1998 年 1 月美国发射了"月球勘探者"号无人驾驶飞船，环绕月球飞行一年，探明月球的两极区域有大量的冰水存在，人类可以开发月球水源，并以月球为中间站到更遥远的空间寻觅"知音"。2003 年 6 月人类又发射 3 个宇宙飞船向火星进发，探索火星上的生命和水。

近十年来已有 12 个火星探测器对火星实施探测。虽说目前还没有发现火星上有智慧的生命，但火星上有无生命的问题还在探索。在火星上有证据表明在几十亿年前有微生命存在。1984 年在南极洲发现的 ALH84001 陨石，科学家认为是来自火星的陨石，它是火星表面与小行星或彗星碰撞后作为陨石落到地球上的。研究岩石的成分表明，这些陨石中存在化石微生物。这表明，在几十亿年前火星上的条件很可能有过相当温暖潮湿的气候，并且有过温泉，条件是适合生命的存在和维持的，有可能存在微观生命。

木星的卫星是现代人们探询地外生命的主要目标。1996 年 6 月 27 日"伽利略号"飞船飞临木卫二。拍摄的图像表明：木卫二表面布满环形山，有山脊、裂缝和沟槽，表面为冰层所覆盖，还不断释放出氢原子和带电的氢离子，两极还有臭氧，有自己的磁场。"伽利略号"还发现木卫二上面的白色冰层有浅浅的沟壑纵横和一些巨大的裂痕，证明冰层下有大量的水，这就很可能有某种形式的生命存在。

第 2 节　银河系里的生命之光

现代，人类探索"天外知音"的计划早已越出了太阳系，而且取得初步成功，目前已发现了百余颗类太阳恒星有行星系统，使人类看到了银河系的生命之光。

人类探索太阳系外恒星的行星系统主要通过如下手段：(1)直接用高分辨率的望远镜和探测器对其成像；(2)用高精度的分光观测恒星光谱，测量谱线位移求恒星的视向速度变化；也可通过测量能谱的形状或分析化学元素及有无生命生存需要的液态水，大气及臭氧、二氧化碳等；(3)高精度的测量恒星位置的变化；(4)高精度的测光观测恒星的光度变化；(5)采用高时间分辨率测量恒星信号到达时刻的变化(对于一些脉冲星采用此项技术)。

人们最先把射电望远镜指向鲸鱼座 τ 星和波江座 ε 星，向那里发射 21 cm 射电电波，并期待着回答。这两个恒星所以候选，不仅因为温度、光度和质量与太阳十分类似，而且离我们的距离比较近。即使这样，若能收到发来回音的话，从鲸鱼座 τ 星来的电磁波信息需要 11 年，而波江座 ε 的信息要 12 年才能传到地球。天文学家监测鲸鱼座 τ 星和波江座 ε 星，到目前为止，没有听到所搜寻的信号。这个搜寻计划称作"小绿人"计划，可是"小绿人"却总是杳无音信。此后，人类不再等待而是采取更主动的行动。

从 1960 年起，美国国家射电天文台用直径 90 m 的射电望远镜，对着天鹅座

61 星及巴纳德星，不断地发送出氢的 21 cm 射电波信号。1970—1971 年又向另外 10 颗可能有行星存在的恒星发送了更大功率的联络信号，并采用了灵敏度高超的信号接收机，至今还没有收到回音。说也奇怪，1988 年 11 月 15 日，这架向地外"知音"发送信号的 90 m 射电望远镜突然坍塌，有人怀疑是外星人所为，后来又建造了直径 100 m 的射电望远镜，取代了它的位置。

1972—1973 年美国发射的先驱者 11 号、先驱者 12 号行星际飞船，带有 14×22.5 cm^2 的镀金铝板，刻有用二进制编码编写的有关太阳系和地球的各种信息，还有地球上男、女的裸像图于 1984 年飞出了太阳系。1977 年 8 月发射的旅行者 1 号、旅行者 2 号行星际探测器带有更多的音像资料，包括地上的天象、环境、人体及各种自然界、动物和人类的声音，其中还有中国古典音乐《高山流水》，也已送出太阳系，向宇宙空间呼唤着太阳系外的知音。

1982 年国际天文学联合会成立了"探索地外文明专业委员会"，专门负责地外文明的探索，与太阳系以外的智慧生命通信联络，最主要的工作是"收听"地外文明的无线电波。

1992 年人们为发现环绕脉冲星的 PSR1257+12 有 3 颗行星而惊喜，奇怪的是脉冲星居然有行星系统，而且有 3 颗行星围绕它转。1995 年又发现飞马座 51(51 Peg)有一颗行星。同年 10 月哈佛大学的"十亿频道地外电波分析计划"开始启动。他们用三个方向不同的天线，十多台最快速度的微机联网，搜索天线接收的信号。直到目前为止，已搜检出大量无法解释的信号。这是"外星人的呼唤"？还是什么信息，有待进一步研究。

近年来，哈勃空间望远镜拍到绘架座 β 星周围有尘埃盘(图 27.1)，图中的



图 27.1 哈勃空间望远镜拍摄的绘架座 β 恒星周围的尘埃盘图像，该星距我们 50 光年，由图可见其尘埃盘轴线有些轻微扭曲，推测很可能是由绕行的大行星造成的。此图下方的假彩色的照片中，恒星发出的强烈的光被挡住了，尘埃盘清晰可见，但行星太暗无法观测到

暗区有冥王星的轨道这么大，很可能有绕行的大行星系统。自 1996 年以来，天文学家已发现了一批距地球 70 l.y. 以内的恒星具有行星系统，如室女座 70、大熊座 47 星和飞马座 51 等(如图 27.2 所示)。其中大熊 47 距离我们 46 l.y.，它有两个木星级的行星。这些发现给探索外星人和外星文明带来了希望，它们再次确信我们的地球并不是宇宙中唯一有文明的行星。

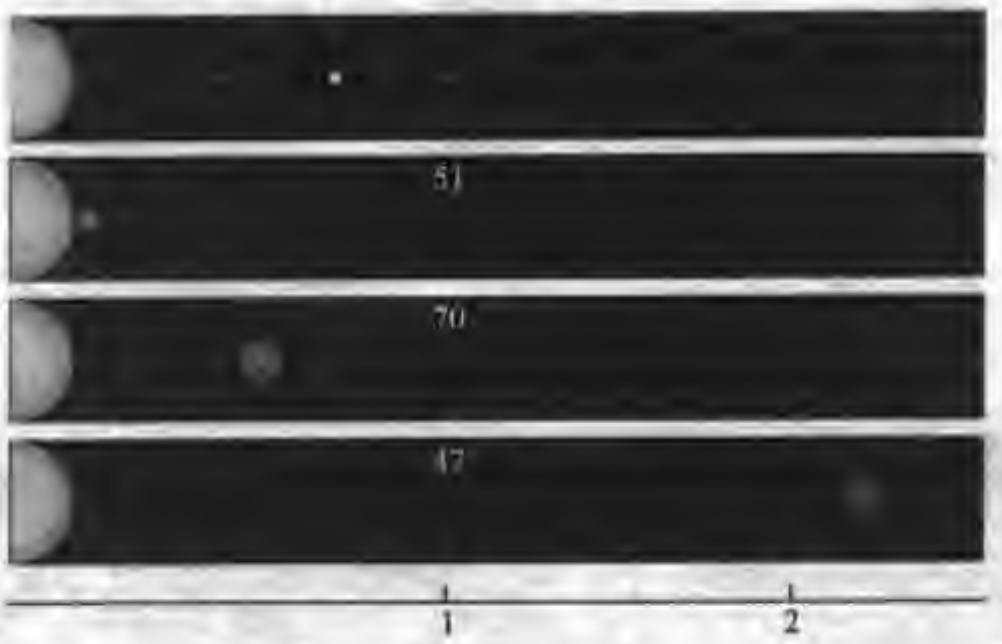


图 27.2　太阳、飞马座 51、室女座 70 和大熊座 47
以及它们自己的行星

1998 年哈勃空间望远镜在猎户座大星云中也发现盘状物，很可能是行星系统，如图 27.3 所示，该行星系统中的恒星与我们的太阳大小相当。

1999 年天文学家发现仙女座 υ 星(υ And)有 3 颗行星。同年还发现 HD209458 恒星有行星"凌日"现象。在 2000 年又探测到一颗叫 HD209458 的恒星由于被行星掩食发生的流量变化。

生命的起源不但需要适当的温度，而且必须具备碳、氢、氧、氮、硫和铁等重元素。这只有第二代的恒星才拥有。在银河系中，生态圈内的第二代太阳型的恒星总数约有 52 亿颗，第二代太阳型恒星的行星总数估计大约有 13 亿颗。环绕恒星周围的适合生命生存的温度带叫可居住带。较热的星如 A，F 型星有较大的可居住带，对于像太阳这样的恒星可居住带大约是 0.85 AU～2.0 AU；对于 F 型的星可居住带的范围是 1.2～2.8 AU；对于 M 型星可居住带是 0.02～0.06 AU；对于 O，B 型的恒星即使有行星也不用考虑，因为那里没有生命生存发展的条件。

1999 年，科学家启动了一项智能生物的研究工作(简称 SETI)(通信的网址是 http://setiathome.ssl.berkeley.edu)。此项研究是用一种全新的"分散计算"方法来搜索外星人，寻找地外智慧生命的信息和回音。"分散计算"可以将网上单机用户连接起来，把大量从阿西博射电望远镜得到的原始数据资料分发给

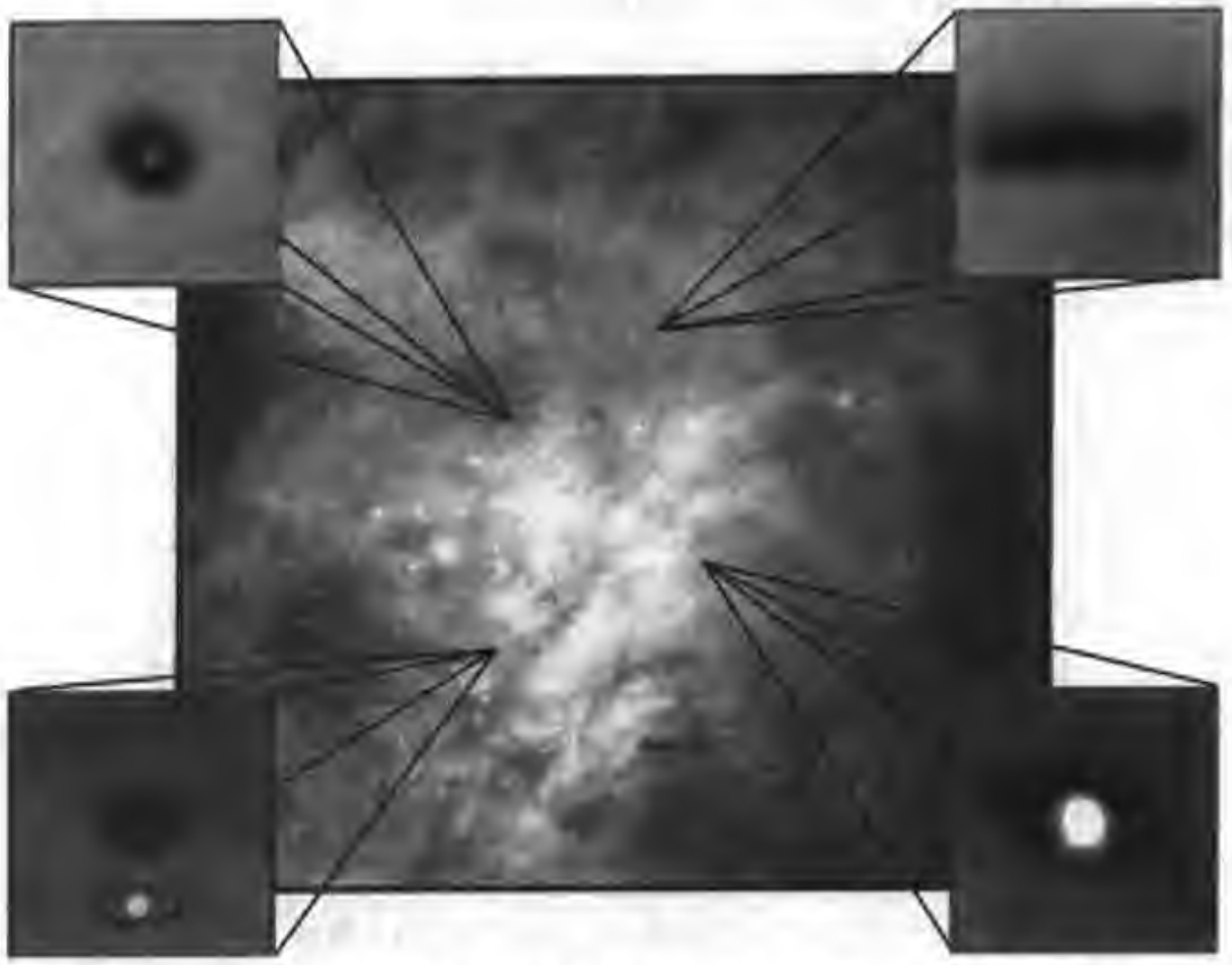


图 27.3 哈勃空间望远镜在猎户座大星云中发现盘状物，很可能是行星系统，左下脚的方块图所指行星系统中的恒星与我们的太阳大小相当

每一位计算机用户。阿雷西博射电望远镜被誉为人类所能修筑的通向宇宙的人类的“耳朵”。其巨大的球面天线实时监测着太空，寻找着宇宙智能物所能发出的任何射电波。

1999 年 4 月，一个国际科学家小组向 4 颗距离我们 50～70 l.y. 的类太阳恒星发出了一系列射电信息的“宇宙邀请卡”。科学家是利用乌克兰一架口径 70 m 的射电望远镜连接的一个 150 kW 的发报机发送的，发送的也是二进制数学语言，因为只有这种语言，我们和宇宙中假定存在的地外生命能够沟通。如果地外文明能截取并记录下这些信息，那么他们会理解地球、太阳系、人体和我们的文化和技术水平的大致情况。此次是继 1974 年之后 25 年来又发送的一次有意识的星际广播。这表明人类加快了探索地外文明的步伐，深入了银河系寻觅人类的知音。

近年天文学家通过地面大望远镜观测到一些近距的恒星，它们的运动有周期性的摆动。由此推测它们是受一颗或几颗行星的引力影响。根据此原理，在 2002 年 6 月发现了 20 多个新的太阳系外的行星。

2002 年发现距离我们地球 41 l.y. 的巨蟹座 55 恒星（视星等为 6^m，光谱型为 G8 型。比太阳的质量略小，光度为 0.62 $L_\odot$）有两个行星，一个行星的质量约 4 个木星质量，另一个行星的质量为 0.2 个木星质量（参见图 27.4）。



图 27.4　巨蟹座 55 行星系统的示意图

近年还发现距离地球 52 l. y. 的 HD190360A 恒星有颗行星，估计这颗行星最小质量与木星相同。在 HD46974 星的周围探测到一颗质量小的行星，只有木星质量的 0.12 倍。船尾座的 HD70642 有一个 2 倍于木星质量的行星，在近圆形轨道上运行，距母恒星的距离为木星距太阳距离的一半(如示意图 27.5)。



图 27.5　船尾座中一颗亮星 HD70642 有一个 2 倍于木星的行星，在近圆形轨道上运行，距母恒星的距离为木星距太阳距离的一半。此图是表示从这个行星的假想卫星上观看此行星系统。它距我们仅有 90 l. y. 的距离

截止到 2002 年底，已知道有行星系统的恒星总数达到 100 颗左右。表 27.1 列出了已探测到的银河系内除了太阳系之外，具有行星的恒星系统。图 27.6 所示为这些恒星系统的行星轨道半径与行星质量的关系图。

表 27.1 已探测到的银河系内除了太阳系外，具有行星的恒星系统

星名	光谱型	距离/l. y.	目视星等(m_V)	行星的质量/$m_木$
HD83443	K0		8.4	0.35;0.16
HD46375	G5		8.3	0.25
HD187123	G5		8.0	0.53
HD179949	F8 V	—	6.22	0.92
HD209458	F5		8.4	0.63
BD-103166				0.48
τ Boo	F7 V	49	4.51	4.1
HD75289	G0	148	6.36	0.46
51Peg	G2.5 V	50	5.5	0.45
ε And	F7 V	57	4.37	0.68
HD168746	G5 V		7.7	0.24
HD162020	G5 V		9.3	13
HD217107	G5		6.21	12
HD130322	G5		8.5	1.1
HD108147	G0		7.15	0.34
GJ86				4.2
55Cnc	K0 V	41		0.93
HD38529	G4 V		5.96	0.76
GJ876c				0.55
HD195019	G5		6.86	3.5
HD192263	K0		8.10	0.61
HD6434	G0		7.80	0.48
GJ876				0.6;1.9
ρ CrB	G2 V	57	5.40	0.99
HD168443	G5		6.98	7.6
HD121504	G5		8.10	0.89
HD16141	G0		6.78	0.21
HD114762	F9 V	90	—	10
70 Vir	G4 V	59	4.98	7.4
HD52265	F8		6.37	1.1
HD1237	Go		6.66	3.4
HD37124	G0		8.60	1.1
HD202206	G5		7.86	14

续表

星名	光谱型	距离/l. y.	目视星等(m_V)	行星的质量/m_*
HD12661	K0		8.1	2.8
HD134987	G4 V	125	6.44	1.5
HD168830	G0		9.5	2.9
HD89744	F6 V	55	5.81	7.1
HD92788	G5		7.18	3.8
ι Hor	G3 Ⅳ	45.9	5.4	2.9
HD177830	K0		7.22	1.2
HD210277	G0		6.63	1.2
HD27442	K1 V	56	4.44	1.4
HD82943	G0		6.73	2.3
HD222582	G5		7.9	5.1
HD160691	A2		9.5	1.9
16 CygB	G2.5 V	72	5.96	1.6
47 UMa	G0 V	46	5.06	2.6
HD10697	G4 V		6.15	6.0
HD190228	G5		7.60	5.0
14 Her				4.0
ε Eri	K2 V	10.76	3.75	0.87
PSR1829-10		33 000		0.03
PSR1257+12		1 600		0.008～0.01
O^2 Eri	K1 V	15.66	3.7	＜5.1
61 Vir	G6 V	28.3	4.74	0.9～7.4
β Boo	G8 Ⅲ	22.5	4.54	1.6～7.5
τ Cet	G8 V p	11.8	3.5	＜4.2
σ Dra	K0 V	18.2	4.68	＜6.1
61 CygA	K5 V	11.0	7.56	＜3.4
γ Cep	K1 Ⅳ	48.0	3.22	1.7
EV Lac	M4，S0	16.3	16.3	9.0
BD+68946	M3 V	15.3	9.2	8.0
ρ^1 Cnc	G8 Ⅱ-Ⅲ	44	5.15	0.93
$^2\rho$ Cnc	K0 V	41	5.94	0.93
HD46974	G5		7.6	0.12
HD190360A	G6 Ⅳ	71	5.70	1

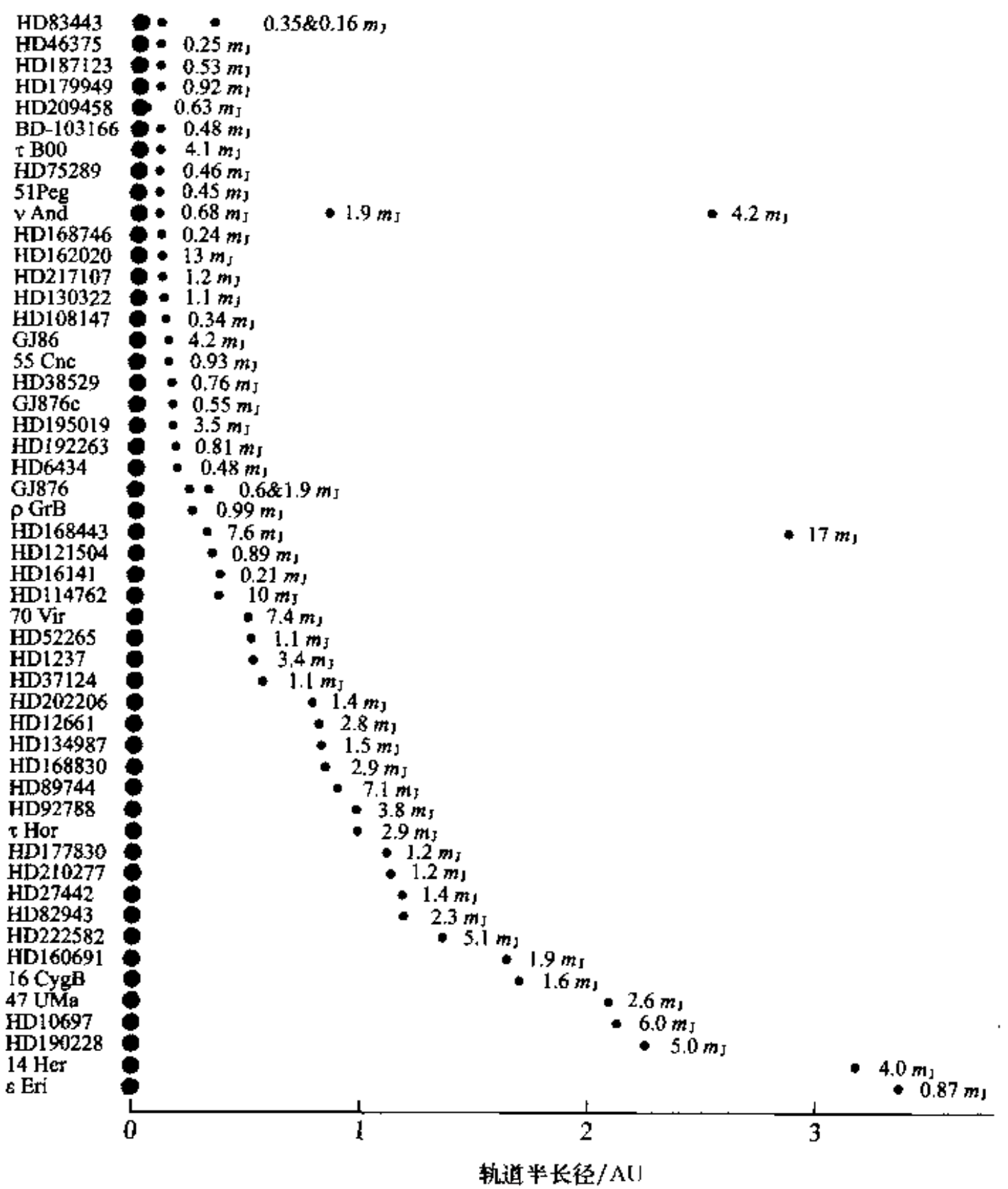


图 27.6 银河系内除了太阳系外的恒星系统，其行星其轨道半长径与行星的质量的关系图



习 题

1. 为什么说“人类并不孤独”？目前哪些恒星的行星和卫星有希望找到具有高级智慧的人类知音，为什么？

2. 假定恒星的平均寿命有 50 亿年，估算一下在银河系里可居住的行星有

多少?

3. 一个宇宙飞船完成一次从地球到半人马座 α 恒星(距离 1.3 pc)而且回来的时间要小于人的寿命(80 岁),它的速度需要多快?

4. 现代寻找地外行星有哪些重要方法?

5. 估计一下,光度为 0.1 $L_{\odot}$ 的 K 型星周围的可居住带的范围。

附录

常用天文、物理常量

光速	$c=2.997\ 924\ 58\times10^{8}$ m/s
万有引力常量	$G=6.672\ 59\times10^{-11}$ Nm^2/kg^2
普朗克常量	$h=6.626\ 0\times10^{-34}$ J. s
玻尔兹曼常量	$k=1.380\ 662\times10^{-23}$ J/K
斯特藩-玻尔兹曼常量	$\sigma=5.669\ 56\times10^{-8}$ $W/(m^2\cdot K^4)$
电子电量	$e=1.602\ 192\times10^{-19}$ C
电子静止质量	$m_e=9.109\ 56\times10^{-31}$ kg
精细结构常数	$1/\alpha=hc/2\pi e^2=137.036\ 0$
第一玻尔轨道半径	$a_0=h^2/4\pi^2m_ee^2=5.291\ 775\times10^{-11}$ m
经典电子半径	$r_e=e^2/m_ec^2=2.817\ 938\ 0\times10^{-15}$ m
质子静止质量	$m_p=1.672\ 661\times10^{-24}$ g
中子质量	$m_n=1.674\ 92\times10^{-24}$ g
电子静止能量	$m_ec^2=0.511\ 003\ 4$ MeV(兆电子伏特)
地球质量	$m_\oplus=5.976\times10^{24}$ kg
地球赤道半径	$R_\oplus=6\ 378.164$ km
天文单位	1 AU=$1.495\ 979\times10^{8}$ km
1 光年	1 l. y. =9.460×10^{12} km
1 秒差距	1 pc=3.086×10^{13} km=3.262 l. y.
地月平均距离	$3.844\ 01\times10^{5}$ km
太阳质量	$m_\odot=1.989\times10^{30}$ kg
太阳半径	$R_\odot=6.959\ 9\times10^{5}$ km
太阳光度	$L_\odot=3.826\times10^{26}$ W
太阳表面重力加速度	$g_\odot=2.74\times10^{4}$ cm/s
太阳有效温度	$T_e=5\ 800$ K
太阳 V 绝对星等	$M_V=4.84$
太阳 V 目视星等	$m_V=-26.73$
太阳常量(1976)	f=1.36×10^{3} W/m^2
黄赤交角(2000.0)	$\varepsilon=23°26'21.448''$

参考文献

[1] Chaisson, McMillan. Astronomy Today. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1998

[2] Karttunen H, Kröger P, Oja H, et al. Fundamental Astronomy. 3nd edition. Berlin: Springer, 1996

[3] Robbins R R, Jefferys W H, Shawl S J. Discovering Astronomy. 3nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1995

[4] 戴文赛主编. 天文学教程(上册). 上海: 上海科学技术出版社, 1961

[5] 李宗伟, 肖兴华. 天体物理学. 北京: 高等教育出版社, 2000

[6] 何香涛. 观测宇宙学. 北京: 科学出版社, 2002

[7] 刘学富. 观测天体物理学. 北京: 北京师范大学出版社, 1997

[8] 李启斌等. 90 年代天体物理学. 北京: 高等教育出版社, 1996

[9] 中国大百科全书(天文学卷). 上海: 中国大百科全书出版社, 1980

[10] 黄润乾. 恒星物理学. 北京: 科学出版社, 1998

[11] 余允强. 大爆炸宇宙学. 北京: 高等教育出版社, 1995

[12] 艾伦 CW. 物理量和天体物理量. 杨建译. 上海: 人民出版社, 1972

[13] 苏宜. 天文学新概论. 武昌: 华中理工大学出版社, 2000

[14] Rudolf K. 千亿个太阳 -恒星的诞生、演变和衰亡. 沈良照, 黄润乾译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1997

[15] Воровнцоь-Велъяминов, BA. 天文学习题和练习汇编. 胡挹刚, 桑志治译. 北京: 高等教育出版社, 1956

[16] 刘学富, 李志安. 太阳系新探. 北京: 地震出版社, 1999

[17] 刘学富, 李志安. 我爱天文观测. 北京: 地震出版社, 1999

[18] 刘学富, 李志安. 神奇宇宙探秘. 北京: 地震出版社, 2001

[19] Shu Frank H. The Physical Universe: An Introduction to Astronomy. California: Mill Valley, 1982

[20] 天文网上资源

美国航天航空局 NASA(National Aeronautics and Space Administration). http://www.nasa.gov

美国航天航空局喷气动力实验室(NASA's Jet Propulsion Laboratory). http://www.jpl.nasa.gov

哈勃空间望远镜电信服务(Space Telescope Electronic Information Service). http://www.stsci.edu/ftp/science/hdf/hdf.html

天空与望远镜杂志 SKY Online(SKy & Telescope). http://skyandtelescope.com

[General Information]
书名=普通高等教育“十五”国家级规划教材　　基础天文学
作者=
页数=400
SS号=0
出版日期=
Vss号=73310401

封面
书名
版权
前言
目录
目录
绪论
第一篇　天文观测的基础知识
第一章　星空运转与周日视运动
第 1 节　星座与四季星空
第 2 节　天体的周日视运动
第 3 节　太阳的周年视运动
第 4 节　天体的亮度和视星等
习题
第二章　天球和天球坐标系
第 1 节　天球和天球坐标系
＊第 2 节　天球坐标系的变换
习题
第三章　天文观测时间系统
第 1 节　平太阳时、世界时、区时与恒星时
＊第 2 节　原子时、历书时和力学时
第 3 节　历法与节气
＊第 4 节　天体的出没时刻
习题
第四章　天文望远镜
第 1 节　当代天文学望远镜
第 2 节　天文光学望远镜系统
第 3 节　天文光学望远镜的光学性能
＊第 4 节　光学望远镜的光学像差
＊第 5 节　光学望远镜的机械装置
第 6 节　射电望远镜
第 7 节　空间望远镜与空间探测器
习题
第二篇　我们的太阳系
第五章　太阳系大家族
第 1 节　太阳系大家族
第 2 节　行星的视运动
第 3 节　行星的轨道运动定律
＊第 4 节　行星运动轨道要素和运动方程
第 5 节　太阳系的形成和演化
习题
第六章　水星与金星
第 1 节　水星
第 2 节　金星
习题
第七章　地球与月球
第 1 节　地球在太阳系中得天独厚
第 2 节　地球的物理特征与结构
第 3 节　地球的内部构造
第 4 节　磁层与辐射带
＊第 5 节　地球自转

＊第６节　　地球内部的地极移动
　　第７节　　地球公转与四季
＊第８节　　地球轨道参数变化
＊第９节　　地球的沧桑演变
＊第１０节　　厄尔尼诺现象
＊第１１节　　地震
＊第１２节　　宇宙环境对气候的影响
　　第１３节　　保护环境珍惜地球
　　第１４节　　月球
　　习题
第八章　　地外行星
　　第１节　　火星
　　第２节　　木星
　　第３节　　土星
　　第４节　　天王星
　　第５节　　海王星
　　第６节　　冥王星
　　习题
第九章　　太阳系的小天体
　　第１节　　小行星
　　第２节　　彗星
　　第３节　　流星和流星雨
　　第４节　　陨石和陨石雨
　　习题
第十章　　日食与月食
　　第１节　　月食
　　第２节　　日食
　　习题
第三篇　　太阳和恒星世界
第十一章　　太阳是一颗主序星
　　第１节　　太阳的物理特征
　　第２节　　太阳的内部
＊第３节　　太阳的能量来源
＊第４节　　太阳的空间探测
第十二章　　太阳大气
　　第１节　　光球
　　第２节　　太阳的光球光谱
　　第３节　　色球
　　第４节　　过渡区和日冕
　　第５节　　太阳风
　　第６节　　太阳磁场
　　习题
第十三章　　太阳活动
　　第１节　　太阳黑子活动
　　第２节　　色球活动
　　第３节　　日冕活动
＊第４节　　日震
第十四章　　日地关系
　　第１节　　太阳是一个超级实验室
　　第２节　　太阳对地球环境的影响
＊第３节　　太阳对地球气候与地震的影响

习题
第十五章　恒星的测量
第 1 节　恒星的距离
第 2 节　恒星的绝对星等与光度
＊第 3 节　恒星的辐射与温度
第 4 节　恒星的光谱
第 5 节　恒星的大小
第 6 节　恒星的质量
第 7 节　恒星的运动
＊第 8 节　恒星的自转
第 9 节　恒星活动与能源
习题
第十六章　恒星的形成和演化
第 1 节　化学元素的形成
第 2 节　原恒星
第 3 节　主序前星
第 4 节　主序星
第 5 节　红巨星
第 6 节　恒星的归宿
习题
第十七章　白矮星、中子星和黑洞
第 1 节　白矮星
第 2 节　中子星
第 3 节　黑洞
习题
第十八章　双星
第 1 节　目视双星
第 2 节　食变双星
第 3 节　分光双星
＊第 4 节　双星的洛希模型
＊第 5 节　色球活动双星
＊第 6 节　X 射线双星
＊第 7 节　？近双星的演化
习题
第十九章　变星
第 1 节　变星的分类
第 2 节　脉动变星
第 3 节　激变变星
习题
第二十章　超新星
第 1 节　超新星的分类
第 2 节　著名的超新星
＊第 3 节　超新星的爆发机制
习题
第四篇　银河系与河外星系
第二十一章　银河系
第 1 节　银河系的外貌
第 2 节　银河系里的恒星族
第 3 节　星团
第 4 节　银河系的质量
第 5 节　银河系的较差自转

第 6 节　银河系的旋臂
第 7 节　银河系的中心
第 8 节　银河系的形成和演化
习题
第二十二章　河外星系
第 1 节　星系的形态分类
第 2 节　星系的红移
第 3 节　星系的光度
＊第 4 节　星系的质量
第 5 节　星系的形成和演化
习题
第二十三章　活动星系
第 1 节　类星体
第 2 节　赛弗特活动星系
＊第 3 节　蝎虎座 B L 天体
＊第 4 节　其他活动星系
＊第 5 节　活动星系核的统一模型
习题
第二十四章　星际介质
第 1 节　星际消光
第 2 节　气体星云
＊第 3 节　宇宙线和星际磁场
习题
第二十五章　星系群与超星系团
第 1 节　星系群
第 2 节　星系团与超星系团
＊第 3 节　暗物质
第五篇　膨胀的宇宙与宇宙中生命的探寻
第二十六章　宇宙学
第 1 节　中国古代宇宙观
第 2 节　欧洲宇宙学的发展
第 3 节　现代宇宙学的观测基础
＊第 4 节　现代宇宙学
第 5 节　标准宇宙学——宇宙大爆炸模型
第 6 节　宇宙演化的简史
第 7 节　宇宙的年龄与未来
习题
第二十七章　茫茫宇宙觅知音
第 1 节　太阳系的生命探索
第 2 节　银河系里的生命之光
习题
附录　常用天文、物理常量
参考文献