

目 录

(上 册)

第一章 绪论	1
§1.1 天文学的研究对象和意义	1
§1.2 宇宙中天体的层次	15
§1.3 天文学发展简史	29
§1.4 中国天文学发展简史	41
第二章 天球坐标和时间计量系统	51
§2.1 天球	51
§2.2 球面三角初步	55
§2.3 常用的几种天球坐标系	62
§2.4 天体的周日视运动和星空的周年变化	70
§2.5 时间及其计量	78
§2.6 不同时间计量系统的换算	90
§2.7 历法简介	97
第三章 天文观测与仪器	111
§3.1 天体的电磁辐射	111
§3.2 光学望远镜	117
§3.3 射电望远镜	136
§3.4 其他波段的观测和观测仪器	148
§3.5 天体测量仪器	158
第四章 地球和月球	165
§4.1 地球的形状和大小	165
§4.2 地球的内部结构	171

§ 4.3 地球的大气	175
§ 4.4 地球的磁场	180
§ 4.5 地球的运动	183
§ 4.6 地球的潮汐	187
§ 4.7 月球概况	190
§ 4.8 月球的运动及其引起的天文现象	199
§ 4.9 月球的物理状况	209
§ 4.10 日食和月食	226
§ 4.11 月球的起源和演化	246
第五章 行星和卫星	255
§ 5.1 太阳系观念的确立	255
§ 5.2 行星的视运动	265
§ 5.3 行星和卫星的轨道	275
§ 5.4 开普勒定律及其应用	282
§ 5.5 行星和卫星的物理概况	291
§ 5.6 水星和金星	300
§ 5.7 火星及其卫星	306
§ 5.8 木星及木卫系统	311
§ 5.9 土星及土卫系统	321
§ 5.10 三颗远日行星	326
第六章 太阳系内的小天体	337
§ 6.1 小行星	337
§ 6.2 特殊小行星	348
§ 6.3 彗星	354
§ 6.4 一些著名的彗星	365
§ 6.5 流星和流星体	373
§ 6.6 陨星和流星雨	381
§ 6.7 行星际物质	392

§ 6.8 太阳系起源与演化概述.....	397
第七章 太阳	405
§ 7.1 太阳概述	405
§ 7.2 太阳的分层结构	412
§ 7.3 光球	420
§ 7.4 色球.....	429
§ 7.5 日冕.....	437
§ 7.6 黑子.....	444
§ 7.7 日珥.....	457
§ 7.8 光斑、谱斑和耀斑	465
§ 7.9 太阳的射电辐射	474
§ 7.10 日地关系	480
附录 I 哥白尼以来天文学大事记	
附录 II 球面三角的一些基本公式	
附录 III 星官和星座	
附录 IV 日面坐标	

第一章 绪 论

§ 1.1 天文学的研究对象和意义

天文学是自然科学的基础学科之一，它有着极其悠久的历史，经久不衰的魅力。至今仍在蓬勃发展，是当代科学前沿阵地上非常活跃的一门学科。

一、天文学研究的对象及方法

简单地说，天文学是研究广袤无垠的宇宙中各类天体及其系统的科学，是研究它的位置、分布、运动、形态、结构、物理状况、化学组成、相互关系及其起源演化的科学。

所谓天体或天体系统，一般是指地球大气以外宇宙空间中各种客体的总称。因此，“天上”的云彩、振翅的鸟禽以及穿云破雾的飞机并不属于天体的范畴，只有象远在地球大气之外的太阳、月亮及繁星才是天文学研究的对象。根据这样的原则，虽已落到地面上的陨星，因为它们来自地球大气之外，所以仍是天体。当然以地球大气划分的标准也不是绝对的，如流星的明亮余迹也在大气层内，但总把它看作天文现象。而且，人造卫星、宇宙火箭乃至航天飞机一般都称为人造天体。另一方面，人类的摇篮地球是太阳系内九大行星之一，它就在宇宙空间绕太阳运动，所以从天文学的角度来看，地球是一个普通的行星，也是一个天体(彩照1)。

天文学与气象学各有不同的研究对象。气象学研究的是局限于地球大气范围内的客体和现象，以及这些现象的物理实质、演变规律，它的对象是风云雨雪、雾霁霓虹、电闪雷鸣、冷热变化

等等。

然而，人类就生活在地球的大气层中，因此天文学必然会在一些地方与气象学发生关联。如天文学的主要研究手段——观测就与大气密切相关，不仅天气状况能决定天文观测的成败（历史上不乏坏天气使天文学家几年辛苦付之东流的先例），大气扰动严重影响天体成象的质量，而且大气造成的折射也影响到天文观测的精度，大气造成的吸收使人类在过去几千年中只能局限于天体可见光的研究。

另一方面，也确实有一些天文现象本身与气象现象直接有关，如地球绕太阳的公转与黄赤交角的存在才造成了气候上的四季循环，地球的自转运动决定了南北两半球季风的不同方向。近年来，还有人研究了太阳活动对地球大气有着复杂的长期影响，甚至有人认为，其他几个大行星的不同位置也会对地球大气产生某种作用，从而影响全球性的气候。

从上述可知天文学与气象学是两门互相独立又互相关联的学科。

五十年代末，人类开始了航天飞行，七十年代中所进行的大规模的太阳系空间探测活动，使人们对其他行星大气有了新的认识，大量的资料又孕育出一门介于天文、气象两者之间的边缘学科——“行星气象学”。

由于天文学以遥远的天体作为研究对象，它的主要研究手段便是观测，所以天文学是观测的科学。诚然，今天人们已经飞出了地球，可以对一些行星和卫星进行实地勘测，在上面进行某些科学实验，但从整体看来，人类总不能去解剖恒星，也无法搬动太阳、加热星云。在一般情况下，还是只能通过接收天体的辐射来寻找解开它们奥秘的钥匙。正因为观测在天文学中占有特殊的地位，因此观测方法的每一次革新，观测工具的任何改进，常常会促使天文学更快地向前发展，甚至引起深刻的革命。

在几乎没有什么天文仪器的古代，人们只能凭肉眼对天体进行粗略的观测，对天象进行大致的记录，只能从直观上简单区分恒星的不同亮度。那时候，人们不知道恒星的真实距离、天体的实际大小，当然更无法了解其性质、规律。十七世纪初，意大利科学家伽利略(G. Galileo) 首先用望远镜观察天空，他看到了荒凉寂寞的月面上峰峦迭起(图1.1)、木星的大卫星的周期运

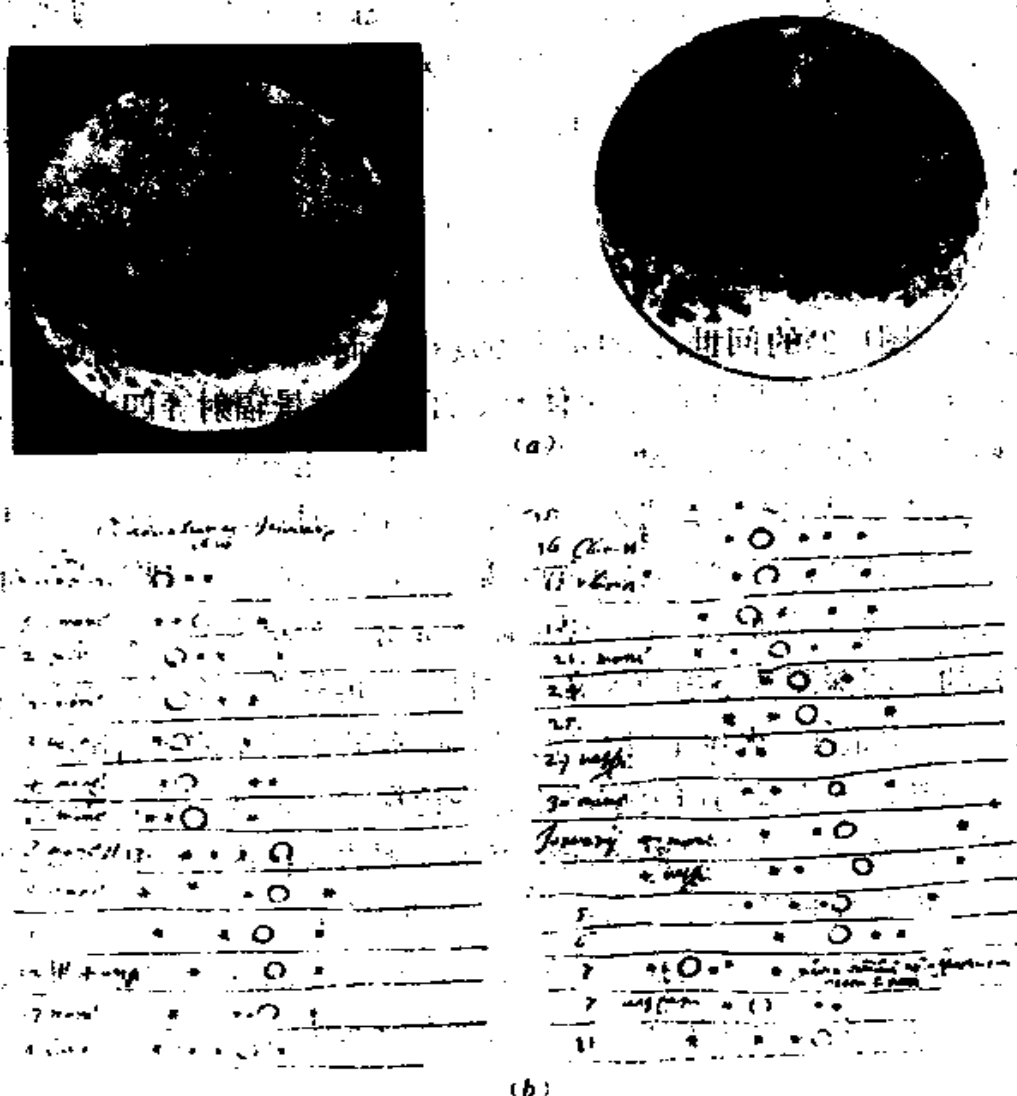


图1.1 伽利略的新发现

(a) 伽利略手描的第一张月面图

(b) 伽利略记录的四颗大木卫位置

动、金星的盈亏现象、太阳上的黑子变化、银河中包含的繁星……，这一系列的惊人发现，有力地证明了哥白尼(N. Copernicus)的日心学说，从而使天文学进入“望远镜天文学”的新时代。可以毫不夸张地说，哥伦布(C. Columbus)发现了新大陆，伽利略发现了新宇宙。

十九世纪，天文学家开始把测光、分光及照相术运用于天文观测中，这又使天文学发生了一个新的飞跃：诞生出一门新的分支——天体物理学。天体物理学通过对天体物理状况、化学组成、内部结构及其演化规律的研究，使人类对天体的认识、对宇宙的认识又大大向前迈进了一步。

第二次世界大战后发展起来的射电望远镜使人们突破了可见光的界限，摆脱了地球大气及气候的影响，随着新型的大射电望远镜^①(图1.2)的问世，新的重大发现接踵而来：仅六十年代就有脉冲星、星际有机分子、类星体及3开普勒背景辐射等四大发现，这些重大成果极大地推动了现代天文学的迅速发展。

人造卫星上天后，进入了全波天文学的时代，获得了更加丰富的资料，同时随着航天飞船的发射，人们不仅六次降临月球，对它进行实地科学研究；空间探测器还降落于金星和火星表面，大规模的空间探测甚至迫使天文学教科书一再修改：金星决不是地球的“孪生姐妹”、火星上没有什么运河、木星竟是个液体行星……

当然，天文学的研究也离不开理论探讨，需要运用许多现代的科学理论和方法去推断尚无法直接观测的天体内部和不可见的现象。但任何理论模型都必须接受观测的检验。

因此，当代大量新技术的应用，新理论的问世，正在逐步改变着天文学上许多传统的观念，以致不少人认为，目前天文学很

① 美国阿雷西博天文台建于火山口上的射电望远镜原来的直径为305米，最近已经扩大为366米。



图 1.2 直径305米的射电望远镜

有可能正在孕育着一场更深刻的变革。

二、天文学研究的意义

众所周知，天文学是一门最古老的学科，它之所以能最早得到发展，正是由于它当时与人们的生产活动和日常生活有着休戚相关的联系。在原始社会中，人们日出而作、日没而息，昼夜便是他们最自然的时间单位。为了获得果腹的粮食，他们必须不误季节、掌握好播种、收割的时令，这些都离不开对天象的观察。游牧民族为了在莽野中寻找水源和草场，需要不断地在辽阔的大地上搬迁，指导他们方向的就是天穹上的星星。中国早在公元前二十四世纪时便有了专司观象的天文官员。至今，玛雅人的阿兹台克历碑、尼罗河畔的金字塔、巴比伦的古泥碑、我国系统的天象资料都是天文学从一开始就为人类生产服务的最好历史见证。

1. 基础学科的作用 天文学作为自然科学的基础学科,它必然具有重要的科学意义。它不仅帮助人们逐步认识物质世界的客观规律,其研究成果推动了其他学科的发展,而它所提出的许多新的课题也常成为其他学科发展的巨大动力。

天文学家通过观测获得的资料需要用科学方法来处理。例如记录天体的方位、计算相互间的距离、测定地球周长,都离不开数学的帮助,因而过去几乎所有天文学家都是同时在数学上有所建树的数学家。而反过来,天文学对数学的需要也常常会成为推动数学发展的动力。

万有引力定律的发现和经典力学体系的建成在很大程度上是为了说明太阳系内天体的运动。事实上,牛顿(I. Newton)当初在研究万有引力时,首先是用地球和月球来验证的。而1846年人们用纸和笔发现第八颗大行星——肉眼看不见的海王星时,万有引力定律及力学理论才最终得到了学术界的公认。

天文学上的发现对化学的发展也曾起过作用。第一个惰性元素氮,首先是天文学家在太阳上发现的,氮的拉丁文原意正是“太阳元素”。化学家们为了在地球上寻觅这种太阳元素,才陆续发现了其他一系列的惰性气体,从而深化了人们对元素本质的认识。

本世纪初,爱因斯坦(A. Einstein)先后提出了狭义相对论和广义相对论,这是物理学上的一个里程碑,也使人类的时空观发生了深刻的变化,但最先对广义相对论进行科学验证的却是天文学家!在相当长一段时间内,天文学三大验证^①——恒星光线通过太阳边缘时发生弯曲、水星轨道近日点的进动、白矮星光谱线的引力红移——是广义相对论的重要支柱。

^① 天文学家早已观测到水星的近日点存在着牛顿力学无法说明的“进动”现象——每世纪东移43.11",广义相对论的理论计算为每世纪43.03",与此相符。光线弯曲见§4.9,引力红移见§9.7

天文学研究的是天体及浩瀚的宇宙，而宇宙中有许多人类无法模拟的特殊条件。在这些极端条件下，是否存在新的特殊物质和特殊自然规律？能否使它造福于人类？这些诱人的课题已吸引着越来越多的人的密切注意。

2. 对哲学研究的意义 天文学几乎从萌芽时期就与占星术混杂在一起，成为人们认识自然、解释自然的工具。事实上，它在人类认识宇宙的思想发展史上也曾起过举足轻重的作用。至今，天文学上许多重大问题仍是哲学上两大阵营争论的基本问题：宇宙有限还是无限？它的运动和发展是否遵循自然规律？能不能为人们逐步认识？世界中的物质是不是对立统一的？时空的本质是什么？地球与太阳从何而来？……，这都是哲学中的基本问题。

天文学知识可以帮助人们正确认识人类在自然界中的地位，使一切愚昧迷信都无容身之地。1543年，波兰天文学家哥白尼通过“四个九年”的研究提出的“日心体系”，虽然仅仅把“宇宙中心”从地球搬到太阳，但却是人类思想史上第一次最伟大的革命，它宣告了自然科学的独立，把自然科学从神学中解放出来，不仅推动了世界科学的发展，也促进了欧洲资本主义的发展。

随着机械力学的建立，十七、十八世纪欧洲自然科学又被一种僵化的形而上学的自然观深深禁锢起来，冲破这种桎梏的又是天文学——年青的德国哲学家康德(I. Kant)，1755年提出的太阳系起源星云说阐明了太阳系乃至整个自然界都处于永恒的运动、变化和发展之中，它们都有其发生、发展乃至灭亡的过程史，这是人类认识史上的第二次大飞跃。

当然，新科学、新技术的大量运用，使天文学不断有新的惊人发现，如何认识这些独特的天文现象？如何认识各种奇特的天体？宇宙是不是会一直膨胀下去？……，这些都是现代哲学上激动人心的课题。作为一个天文工作者，必须自觉用唯物辩证法来积极探索宇宙的奥秘。同时以自己的研究成果来丰富和发展辩证

唯物主义，帮助人民群众树立唯物主义的科学的宇宙观。

3. 与生产实际密切联系的天文问题 天文学中还有不少课题直接关系到经济建设、国防和人民生活的。例如正确的时间标准在过去促进了航海事业，从而推动了资本主义的发展，科学高度发展的今天，准确地计量时间更是人们日常生活、任何工农业部门所不可缺少的。现代天文学已能测定准确到十亿分之一的标准频率，为尖端科学提供极其精密的时间标准。

又如编制年历和星表亦是与国计民生有关的一项天文工作，因为大地测量、重力测量及航海、航空、航天都离不开天文年历和星表。历法又是人们生活绝对不可缺少的准则。中外历史上，各国统治者都把改革历法当作重大国事对待，而错误的历法则会造成生产上的混乱。

太阳活动会引起地球磁场和电离层的变化，甚至使短波通讯中断。太阳的活动还会发出大量高能粒子、紫外辐射及 X 射线，对于发射载人的航天飞船和人造卫星构成不小的威胁。此外，人们还发现太阳活动的变化对于地球还有广泛的影响，例如大气气流、天气的长期变化等等，因此太阳活动的预报及研究也是一项具有重要意义天文工作。

人造地球卫星、空间探测器广泛地用于通讯、气象、测绘、探矿、医药、军事……，当然这涉及到现代科学的许多部门，但如何以最小的代价取得最多的、最重要的信息，这就需要天文学家来精心设计探测器的轨道。如“水手10号”飞船既探测了金星又能来回三次飞临水星上空，二艘“旅行者”飞船则巧借了木星的引力，使它们同时完成对好几颗行星的科学探测。

总之，天文学的研究虽然不象农业、化工、机械等应用学科可以在生产中直接收益，但它确实是国民经济建设与精神文明建设中不可缺少的组成部分。事实上，世界上一些工业发达、科学先进的国家无不每年都在天文学研究中投下巨资，这也从另一角

度说明了天文学的重大意义。

三、天文学的分支

从史前时代已经萌芽开始到今天，经过了几千年漫长发展的天文学已经成为一门内涵十分丰富的基础学科。如果说过去不少天文学家都能谙知天文学一切领域的知识的话，那末今天任何一位“权威”都只能在某些领域中大显身手，再也没有任何人可自诩为无所不知的“通才”了。随着科学技术的迅猛发展，各种新技术，特别是电子计算机及空间探测器、轨道天文台的问世，近几年来获得的天文学新资料实在叫人应接不暇，不少新的天文学分支及边缘学科也蓬勃发展起来，因此现在要对天文学的分支状况作一个完整而详尽的描述是相当困难的。再说，不同的分类标准就有不同的系统，如从观测手段区分便可分成“光学天文学”、“红外天文学”、“射电天文学”、“空间天文学”等等，由于它们的发展程度很不平衡，光学天文学在几千年中一直占有统治地位，它的发展程度已是如此成熟，历史地位已是如此突出，内容已是如此庞大，以致在传统的概念中，天文学本身几乎就是“光学天文学”了。

如果以天文学发展的历史阶段结合研究目的来区分，则天文学可分为天体测量学、天体力学及天体物理学三大类，为了强调射电天文学的发展，也有把射电天文学列为第四大类。

1. 天体测量学 这是天文学中最早萌芽和发展起来的分支学科。它的主要任务是研究和测定天体的位置及其变化，天体的运动，并尽可能地消除各种误差的影响，提高精度，在此基础上建立起基本的参考坐标系，确定地面点的准确坐标，确定一套精密自洽的“天文常数”系统。它又包括球面天文学、方位天文学、实用天文学以及天文地球动力学等二级分支学科。

(1) 球面天文学：运用球面三角和其他数学方法（如矩阵运算）来研究天体的视位置以及用各种天球坐标系来表示天体位置

的方法。球面天文学还深入研究造成天体坐标出现误差的各种因素，找出改正方法。因此，球面天文学是天文学各分支的基础理论之一。

(2) 实用天文学：早期的实用天文学包含很广泛的内容，如大地天文学、航海天文学、航空天文学等等。而现代实用天文学却是以球面天文学为基础，研究并测定地面点的天文定位问题（坐标及两点间的方位角等）。而航海、航空天文学有时也作为导航学中的一个分支。实用天文学的具体研究课题有：时间计量、地极移动、天文大地测量以及天文导航等，因此它对于国民经济建设有比较重要的实用价值。

(3) 方位天文学：它既是天体测量学的一个分支又是天体测量学的基础，其任务是研究和测定天体的位置及运动。测定天体在天球上的位置可有许多种不同的方法和手段，例如经典的天体测量、照相定位、射电测量和空间的天体测量（用人造地球卫星）等，由于激光等新技术的应用，使方位天文学及实用天文学的精度得到了极大的提高。方位天文学还研究如何建立参考坐标系以及天体的运动，它与其他分支学科也是互相促进和渗透的。

(4) 天文地球动力学：这是近年来新发展起来的一个分支，也是天体测量与地学之间交叉的边缘学科。具体说来，即是以天文手段来研究地球各种运动状态及其力学机制。因而它涉及到地球内部、地壳、水圈、大气圈的物质运动，这些物质运动又必然与地球内部结构、地壳的相互作用、地幔的物质运动、地磁的结构变化等有关，因而它有十分广泛的研究课题，也有一定的实用意义。目前，这门学科发展很快，越来越引起天体测量界及地学界的广泛重视。

2. 天体力学 也是天文学中较早形成的一个分支学科。它主要研究太阳系天体的力学形状和运动规律。五十年代以后，研究内容又扩大到人造天体（人造卫星、运载火箭、空间探测器）及小

的恒星系统(如星团)。在目前阶段,天体力学的理论基础仍是牛顿的万有引力定律,只是在某些特殊场合下才要应用广义相对论或其他引力理论。力学形状则包括由于自转而具有的形状等等。根据研究的对象及范围,它一般又可分为:摄动理论、数值方法、定性理论、天文动力学、历书天文学、天体形状与自转理论等二级分支学科。

(1) 摄动理论:研究“多体问题”所受的摄动是经典天体力学中一个主要内容。摄动理论用分析的方法来求出它们的坐标或轨道要素的近似摄动值。其中研究最多的是“三体问题”。近年来由于新技术的运用,又为摄动理论提出了许多新的课题,如具体天体(月球、大行星、小行星、卫星等)的摄动理论。此外,它还研究共同性的理论问题。

(2) 定性理论:顾名思义,它只是研究天体运动轨道应当具有的性质,如轨道的稳定值、可能性问题、天体间的碰撞问题、俘获问题等。目前由于很多情况下还无法进行定量计算,而且有时人们只是研究全局性的图象并不需要个别天体的运动细节,所以这种方法具有十分重要的意义,近年来它常用到拓扑学的理论,故有时也称为拓扑方法。

(3) 数值方法:对天体力学运动方程进行数值解,以计算天体在不同时刻的具体坐标位置,从而解决一些天体力学中的实际问题。作为数值方法,它还包括研究和改进各种计算方法,误差讨论等等。由于电子计算机技术的飞速发展,数值方法已得到了广泛的应用。

(4) 历书天文学:利用天体力学的运动理论来考虑摄动的作用,从观测天体所得的数据(位置、距离等),利用数值计算的方法来确定天体的轨道参数,从而推算天体在不同时刻的位置,编制各种天体星历表,如天文年历,行星、小行星历表,并由此预报各种特异天象,如日月食、彗星的出现、掩星等。此外,天文

常数系统也是它的一个研究课题。

(5) 天体形状和自转理论：天体几乎无一不在自转，自转必然会影响到天体的形状，而形状的变化又会改变天体的引力场，因此该分支主要研究各种状态下的天体在自转时的平衡形状、稳定性以及自转速度和自转轴的变化规律。近年来由于空间技术提供了大量有关地球、月球和大行星的数据，使它得到了很大的发展和提高。

(6) 天文动力学：又称人造天体动力学；是人造天体上天后出现的一门与行星际航行学交叉的边缘学科。它的任务是在天体力学的基础上研究行星际飞行中的动力学问题，即如何设计人造天体的轨道，估计它们的轨道变化等等。它的研究对象则是人造地球卫星、月球火箭、空间探测器等，因此与国民经济建设和现代化国防有密切关系。

3. 天体物理学：天体物理诞生于十九世纪中叶，至今不过一百多年历史，然而它的发展却是后来居上，大大超过了天体测量学及天体力学。因为天体物理学是应用现代科学（尤其是物理学）的先进技术、方法和理论来探讨各类天体的本质——形态、内部结构、物理状态、化学组成、相互关系、起源、演化规律等。

就天体物理的研究方法而言，可以粗略地分为实测天体物理与理论天体物理两类。前者主要研究观测技术以及如何取得和处理观测资料，从而为理论提供依据或者检验理论模型的可靠性。而理论天体物理是解释、预言天象的有力工具，然而归根到底，它的理论解释或者预言还得依靠观测实践的检验。

根据研究对象的不同，天体物理学可分为：

(1) 太阳物理学：用物理的方法研究太阳的本质、能源等问题。太阳是唯一能够让人类进行详细观测研究的恒星。“窥其一斑，知其全豹”，恒星的许多知识可从研究太阳而获得。另一方面，太阳又是太阳系的主宰，太阳的变化影响着太阳系，尤其是地球

的物理条件及生态环境，因此太阳物理自然是一门重要的分支学科。

(2) 太阳系物理学(行星物理)：研究太阳系内除太阳外的其他天体的本质就是太阳系物理学的主要内容。主要包括行星、卫星、小行星、流星、陨星、彗星、行星际物质、行星际磁场等，随着空间探测的飞快发展，太阳系物理是目前进展最快的分支之一。

(3) 恒星物理学：其任务是从实验和理论两方面研究各类恒星的结构、物理状况、化学组成。恒星世界是丰富多彩、形形色色的，不同类型的恒星常常会展现出一些奇异的物理现象，而对这些奇特现象的深入讨论可以启发或推动现代科学的发展。

(4) 恒星天文学：以银河系为范围，研究恒星、恒星集团及星云、星际介质的分布和运动特性，以深入探讨银河系的结构和本质。恒星天文学往往采用统计物理、分子运动学的方法，它所得到的结果可以对于研究星系及恒星集团的起源和演化提供线索。

(5) 星系天文学(河外天文学)：研究银河系之外的星系和星系际空间的分支学科。它主要探讨星系的形态、运动、结构、起源、演化以及星系在星系群、星系团中的作用。由于它涉及到更大空间范围的物质分布及其运动规律，因此是宇宙学的重要基础之一。

(6) 高能天体物理学：主要研究宇宙天体上的有高能粒子和光子参与的高能现象及其过程，涉及到的天体则有类星体、活动星系、脉冲星、超新星、X射线源、 γ 射线源等。它对于了解微观世界的物质过程有重大意义，由于近年来空间探测的资料甚多，高能天体物理研究显得异常活跃。

(7) 等离子体天体物理学：应用等离子体物理学的基本理论和实验结果来研究天体的性质及天文现象。由于宇宙间的物质绝大部分处于等离子体状态，所以用等离子体的方法来处理天文问题常可获得很好的结果；目前它已逐步成为天体物理学的一个重

要手段。

(8) 相对论天体物理学：以广义相对论等引力理论为主要工具来研究有关天文现象的分支学科。它包括宇宙大尺度时空结构、致密天体、引力波、引力理论的研究，常涉及到一些比较特殊的天体及天文现象。目前，这也是相当活跃的一个分支。

(9) 宇宙学：从整体的角度来研究宇宙的结构和演化，即是宇宙学的主要内容，包括侧重于去发现大尺度观测特征的观测宇宙学及主要为建立宇宙模型的理论宇宙学。六十年代天文学的四大发现大大促进了宇宙学的发展，它与哲学研究也有密切的关联。

(10) 天体演化学：天体的起源与演化是自然科学三大基本理论问题之一，有重大的理论意义和哲学意义。一般说来，演化也常常包含起源问题，天体演化是研究各类天体及天体系统的形成、发展及衰亡的科学。具体说来，即是研究天体是在什么时候、以什么形态的物质、以什么样的方式形成的，形成以后如何演化，有多长寿命以及它最后的归宿等。目前，研究进展最快的是恒星的起源与演化问题，太阳系演化的研究也获得了许多重要成果，星系的演化问题则尚在摸索阶段。

(11) 射电天文学：通过天体的无线电辐射来研究天体，它是本世纪四十年代以后才发展起来的新学科。但由于它开辟了另一个观测波段范围，因此后来居上，取得了许多令人瞩目的成就，六十年代的天文学四大发现都是由射电方法得到的。它的研究对象几乎遍及所有各类天体，因而也有人把它列于更多的层次上。除了单纯的接收外，对于太阳系内天体如流星、月球、太阳、水星、金星、火星、木星、小行星、伽利略卫星、土星光环和彗星等现已可用雷达向它们发射无线电波，从接收的回波来研究这些天体。

(12) 空间天文学：在大气高层或大气层外进行天文观测和研究的一门学科。由于摆脱了地球大气的影响，使得天文学进入了一个“全波天文学”的时代，由此导致了红外天文学、紫外天文

学、X 射线天文学、 γ 射线天文学等新学科的诞生和发展，并都已取得了许多重大的成果。目前研究的手段有高空气球、探空火箭、人造地球卫星、空间实验室、轨道天文台及空间探测器等。

(13) 宇宙化学：它是天文学与化学间的边缘学科，主要研究宇宙物质的化学组成及其演化的规律。它又可分为以下若干二级分支：陨石化学、行星系化学、恒星化学、星际化学、同位素宇宙化学、宇宙线核化学等。它的成果对于化学元素起源、生命起源、恒星与太阳系的演化研究都有重大的意义。

总之，天文学的分支情况比较复杂，它们之间相互交叉的关系，可大致表现为一个平面方框图(图1.3)。

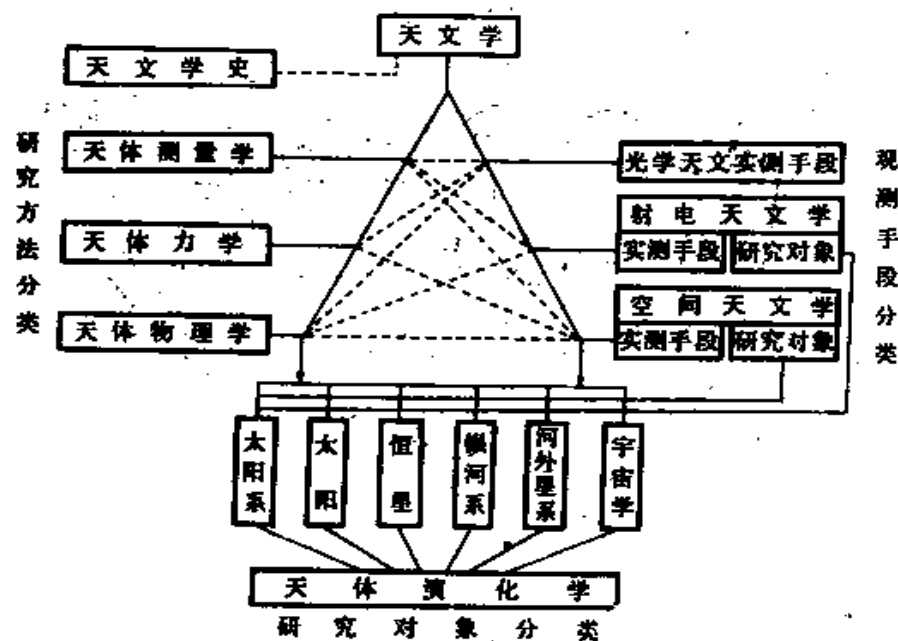


图 1.3 天文学分支情况示意图

§ 1.2 宇宙中天体的层次

在广袤无垠的宇宙中，分布着各种不同的天体，小到微乎其微的基本粒子、微尘，大到难以想象的星系、星系团。它们各自

的形态、大小、性质千差万别，而且在自然界的“阶梯结构”中占有不同的位置，或者说它们处于不同的层次中(图1.4)。

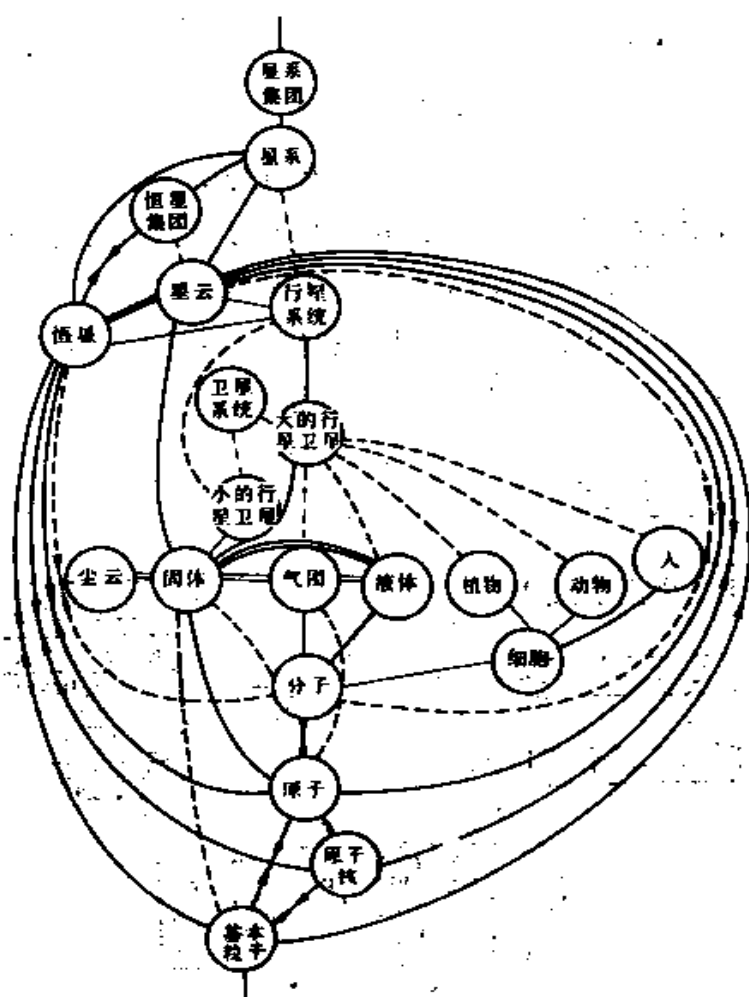


图-1.4. 物质的层次关系

一、地月系统

1. 地球 地球是人类的摇篮,自1543年哥白尼提出“日心说”后,人们才逐渐认识到地球是太阳系中的一颗普通的行星(彩照2),它大致呈现为球状,在不停地绕太阳公转。

今天,人们对于地球的实际形状已经有了深刻的了解,虽然

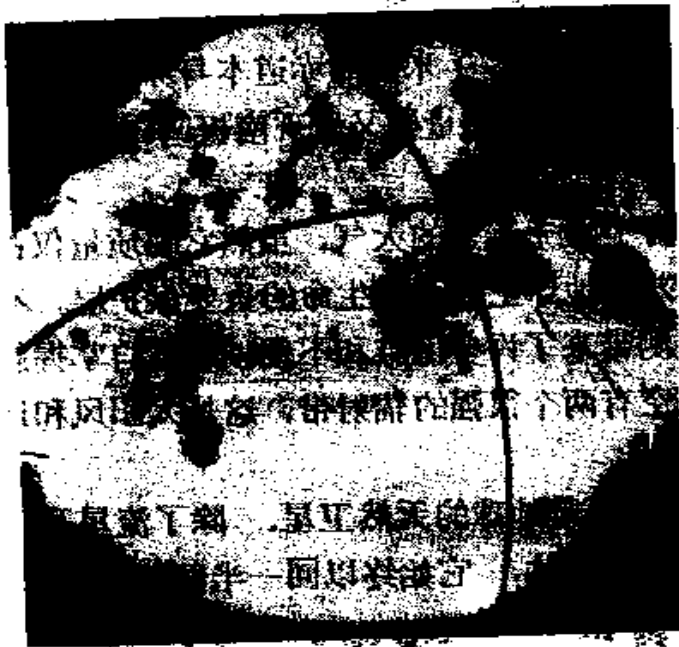
可以近似地讲,它是个球体,但实际上却是一个很复杂的几何体:赤道半径比两极地区的半径长20多千米,而赤道本身亦是一个二轴相差200多米的椭圆,更精确的测量则又发现南极凹、北极凸,彼此也有几十米之差。

地球的周围有一层厚达几千千米的大气,虽然它的质量仅占地球质量的 10^{-6} ,但它却是地球上的万千生命的重要保护层。不过地球大气也给天文观测带来了许多困难和不便。人类自掌握航天技术后,发现地球上空有两个很强的辐射带,这是太阳风和地磁相互作用造成的。

2. 月球 月球(图1.5)是地球的天然卫星,除了流星及陨星外,月球是离人们最近的天体,它始终以同一半面朝向地球。



(a) 正面图



(b) 背面图

图1.5 月球

自1959年人类获得了第一张月球背面图后(图1.5b), 1969—1972年, 已有六批12名宇航员与科学家登上了月宫, 进行科学实地考察和研究。

月球离地球的平均距离为38万千米, 其半径和质量分别相当于地球27%和1.2%, 它的朔望盈亏变化是制订历法的重要

依据。月亮的运动还曾为牛顿验证万有引力提供了依据。

用不大的望远镜就可发现美丽的月球实际上是荒凉死寂的不毛之地, 上面布满了大大小小的圆环状的山——环形山, 一些肉眼看来的暗区只是较平坦的陆地——“海”或“湖”, 月面上还有不少陡深的沟壑、深谷以及壮观的辐射纹。

月面上既没有空气, 也没有水, 昼夜温差可达300℃以上, 显然不适应生命发展, 因而是一片不毛之地。

二、太阳系

经过长时间的探索, 人们才对自己所在的太阳系有了正确的认识。太阳系是以恒星太阳为中心的天体系统(见图5.1), 它主要包含行星及其卫星、小行星、彗星、流星体以及行星际物质等天体。

1. 太阳 太阳是太阳系的中心天体, 太阳系中唯一能发出大量光和热的恒星。太阳的质量占整个系统的99.865%, 半径为地球的109倍, 因此, 太阳的引力控制着所有太阳系天体的运动。

地球绕太阳公转的轨道是个椭圆，其半长径即是日地平均距离，过去称之为“天文单位”，现在已经规定，其准确值为149,597,870,000米，太阳系内的天体距离通常都以此作为长度单位，地球公转的轨道平面称之为黄道面。

太阳是一个炽热的气态等离子体球，表面温度高达5770开，而中心区域温度则高达1500万开以上，那儿进行着剧烈的热核反应，正是这种反应，才使太阳能够在百亿年的时间内源源不断地、稳定地发出大量的光和热，为地球上孕育出亿万生命创造条件。

2. 九大行星 是太阳系中的主要天体，有时也称太阳系为行星系。目前已知有九大行星，按照远近的次序分别为：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星及冥王星。冥王星的轨道半长径近似为40天文单位。

行星在天球上的视运动比较复杂(图1.6)，天文学的发展及人类对宇宙认识的逐步深入，在很大程度上就是为了解释行星的这种看来奇特的视运动。

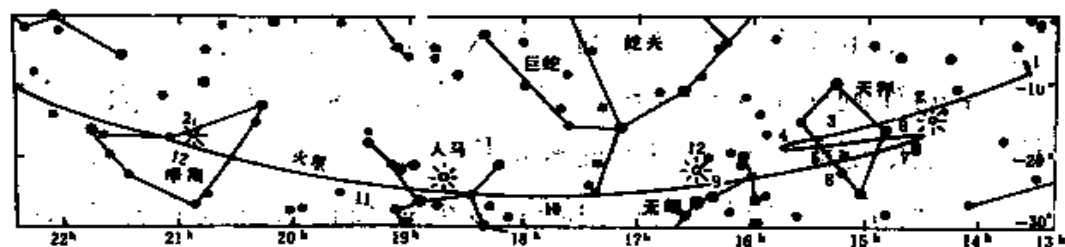


图 1.6 1984年火星在恒星间的运动路径

根据九大行星的特性和化学组成，可以明显地划分为三类：最近太阳的四颗行星(水、金、地、火)称之为类地行星；木星、土星为巨行星，而肉眼一般见不到的三颗(天王、海王、冥王)可归纳为远日行星，它们各自都有自己明显的特征。

除了太阳系外，宇宙中是否还有其他行星系统？这是十分诱人的问题，从理论上讲来，它们是客观存在的，甚至有人估计银

河系中大约有10%的恒星可能具有自己的行星系统。近年来,美国天文学家报导说他们已经发现了三个地外行星系统。

3. 小行星 在火星与木星的轨道之间,有许多肉眼看不见的小天体在绕太阳运动,这就是十九世纪初才发现的小行星。到1985年止,已经算出轨道、正式命名编号的小行星已达三千颗以上。它们都很小,最大的谷神星直径不超过1000千米,小的则仅二、三百米。小行星的质量不易测定,但一般估计总数以几十万计的小行星的总质量约为地球质量的万分之三至四。

七十年代后期,意外地发现了某些小行星居然也有绕它转动的卫星!而且拥有卫星的小行星可能有十来颗之多。

4. 卫星 除了水星和金星之外,所有行星都有自己的天然卫星。人们最早知道、最熟悉的卫星就是月球。在望远镜发明之后,才陆续发现了其他行星的卫星。1979年以前,人们仅知道34颗卫星,由于空间探测的成果,到1984年为止,卫星的数目已超过了50颗^①。

卫星的大小相差非常悬殊,最大的木卫3、土卫6的直径比水星、冥王星还大,但最小的卫星大小只不过几千米。

空间探测使卫星研究也获得了重大的进展,人们甚至已为好几颗大卫星绘制了详尽的表面地形图。

5. 彗星 彗星是一种奇特的、以很扁长轨道绕太阳公转的小天体(图1.7)。它的质量非常小,最大的彗星不过地球质量的 10^{-6} ,小彗星仅 10^{12} 千克左右。但它们在接近太阳时,体积急剧膨胀,许多时候还会形成长达几千万甚至几亿千米的彗尾。

彗星的密度极小,结构很松散,因此它们在不断的瓦解中,瓦解了的彗星物质成为流星体的重要来源,并且是造成流星雨的原因。

^① 1986年“旅行者”2号飞到了天王星附近,又有许多新的天王卫被发现,故太阳系的卫星数已超过了80颗。



图 1.7 形状奇特的彗星——1975 # (紫金山天文台摄)

彗星肉眼不常见，但望远镜内平均每年都能找到 7—11 颗。

6. 流星体、流星、陨星 在太阳系空间中还有无数极小的小天体——流星体。它们也在绕太阳公转，但轨道却各种各样，多数的流星体质量还不到 1 克，因此平时无从觉察它们的存在。只有当它们闯入地球大气层时，因为它们以很大的速度与大气分子发生碰撞和摩擦，就会产生光和热，遂成为人们熟知的流星现象(图1.8)。

绝大多数流星体都在大气中化作了气体，也有少数本来很大的流星体会有残骸落到地面，这就是陨星。有些大的陨星可能来自小行星。在人类实现登月以前，陨星是唯一可以直接对其分析研究的天体，即使在今天，陨星仍具有十分重要的科学价值。

7. 行星际物质 在太阳系的广阔空间里还充满着行星际物质，主要是极稀薄的气体 and 极少量的尘埃物质。在地球轨道附近的区域，行星际物质的数密度大约为 $5 \times 10^6 / \text{米}^3$ 。除了气体、尘

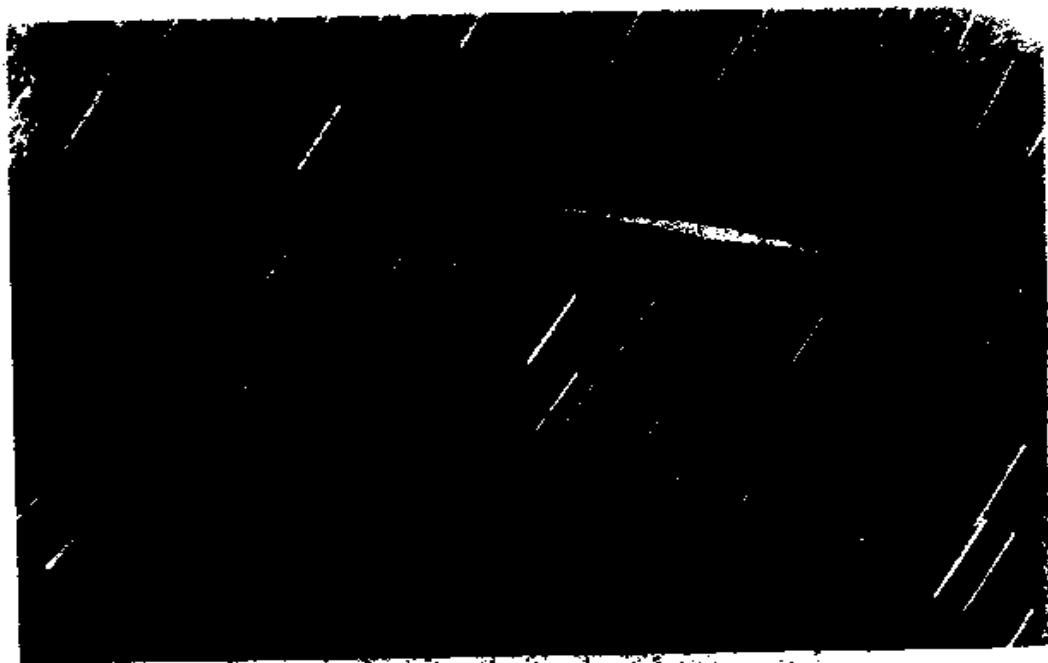


图 1.8 恒星

埃外，行星际物质还包括宇宙线及作为物质存在形式之一的场和波即行星际磁场和电磁波。

三、星座和恒星世界

恒星是宇宙中的主要天体，肉眼所见布满天穹的星星，除了五颗大行星之外，都是象太阳一样的恒星。恒星都是能长时间发出大量光和热的等离子体气态球。

恒星的距离都十分遥远，因而常用“光年”作为单位。光年是光在一年中经过的距离，相当于 9.46×10^{15} 米。与太阳距离最近的一颗恒星叫比邻星（半人马 α ），距离为4.22光年。正因为如此，即使在大望远镜中，恒星仍然是个光点。

通过光谱分析得知，绝大多数恒星的化学组成大致相仿，氢和氦约占总质量的98%，这说明了宇宙间物质的统一性。

研究表明，恒星的半径、密度、光度、表面温度等物理参数相差都十分悬殊，仅质量的变化范围只有三个数量级。

恒星的亮度差别很大，在消除了距离等因素后，恒星的真亮度(称为光度)相差甚至更加悬殊。光度小的恒星称之为矮星，太阳属于矮星之列。光度大的称为巨星，更大的称超巨星。造成光度差异的主要原因是由于它们的半径，即表面积不同。

绝大多数恒星的亮度至少在人类有生之年内看不出有什么变化，但也有部分恒星的亮度却一直在变化着，这就是变星，变星的种类很多，具有重要的研究价值。恒星世界还有突然爆发的现象，使其光度在几天内增加几万倍，这就是新星。超新星的光度则可增加上亿倍，超新星爆发后，恒星一般也就解体了。

虽然恒星在宇宙空间中都在高速运动着，但由于遥远的距离，故从肉眼看来，恒星在天空中的相对位置似乎是永恒不变的，这也是“恒星”名字的由来。



图1.9 古人想象的星座:(a) 猎户座;(b) 狮子座;(c) 天蝎座;(d) 双子座

古人为了认星的方便，把天穹上的众多恒星划分成不同形状的区域，这就是星座。中国称之为星官，中国古代把全天分成三垣二十八宿，具有浓厚的东方色彩，并有“步天歌”之类的认星口诀。

西方划分的星座更富有浪漫的色彩，它常与许多神话故事互相联系起来(图1.9)。经过漫长的岁月，现经国际天文学联合会讨论决定，全天共分88个星座(附录II)其中北天29个，南天47个，另有12个在黄道区域。

必须指出，星座完全是人类自己杜撰出来的，实际上同一星座内的众多恒星并非一定有真正的物理联系，它们往往处于不同的距离上，只是因为投影的效应才使人们看来处于同一区域。

四、恒星集团

现代研究表明，恒星有“群居”的趋向，众多恒星组成了不同的恒星系统。最简单的恒星系统即是两颗互相绕转的双星。双星的两颗子星通常还有更密切的物理联系，一般质量大的子星称主星，质量小的子星称伴星。大约有一半的恒星都是双星。双星的研究有很重要的意义。

由两颗以上多颗恒星组成的恒星集团是聚星，也称多合星。如比邻星实质上是三颗子星在绕共同的质心旋转，故称三合星，开阳(大熊 ζ)是一组七合星，以此类推，还有四合星、五合星……，直至十合星。

当在一起绕转的恒星数超过十颗时，则称之为星团。星团的成员星相对于周围的场星常有一个整体运动。星团又可分为疏散星团和球状星团两大类。疏散星团又称银河星团，它们比较稀疏，成员星较少，在十几颗到几百颗之间，外形也不太规则，昴星团即是著名的代表。

球状星团(图1.10)的成员星常达几万甚至上千万颗之多，尤

其在球状星团的中心部分，即使用大望远镜也很难把它的成员星——分清。它们的形状比较规则，在银河系中分布也较均匀。

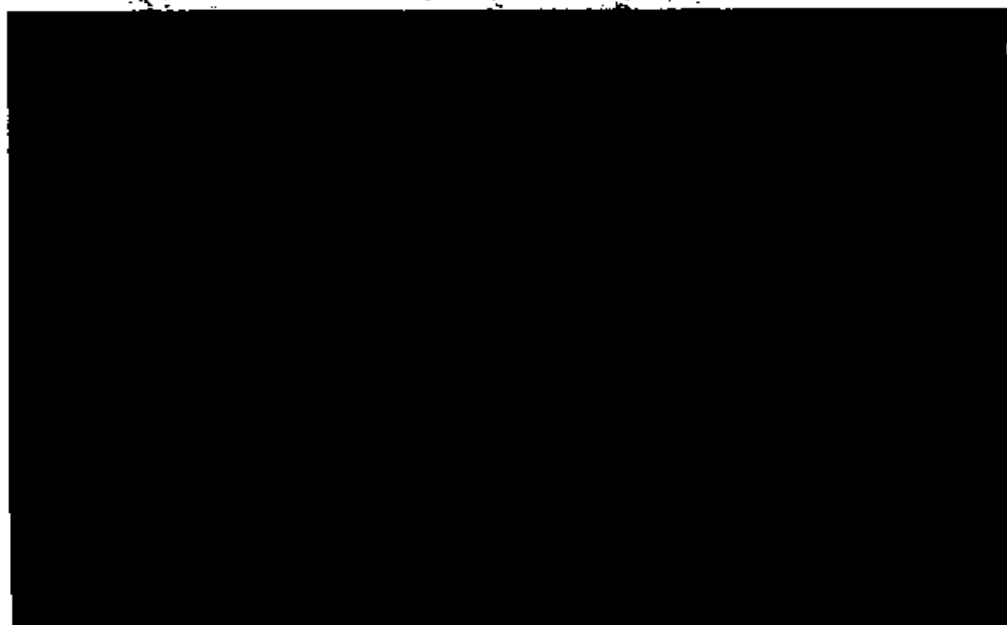


图 1.10 球状星团M3

五、银河系和星系

比星团更高一级的层次是星系。星系是包含了几亿至几千亿颗恒星、无数双星、聚星、星团的庞大恒星系统，太阳系所在的星系称为银河系。

1. 银河系 银河系的外形粗略说来象一凸透镜。恒星高度集中于它的对称面——银道面上。但由于太阳并不位于银河系的中心区域，所以地球上的观测者在夏秋之夜见到的是一条茫茫的光带，即古时人们所称的银河。

银河系内除了恒星及星团外，还有许多云雾状的、轮廓模糊的斑点，这就是星云，如图1.11便是著名的幕状星云的一部分。

星云没有固定的形状，它们都是由气体和尘埃组成的，由于内部或邻近恒星的照亮而为人们所见，没有被星光照亮的星云是



图 1.11 幕状星云之一角

不能直接见到的。星云的体积都十分庞大，但密度却极小，远比实验室的“真空”稀得多。

在恒星之间的浩瀚空间内，还充满着比星云更稀薄的弥漫物质，这就是星际物质。星际物质对于可见光有消光作用，正是银道面上星际物质的这种消光作用，使得人类看不到银河系的中心区域。

六十年代，在恒星际空间内还发现了许多分子，称为星际分子，其中有许多是比较复杂的有机分子。这对生命起源的研究有很重大的意义。

在对银河系进行深入研究时发现，各类天体在空间分布、运动状况、化学组成等方面有显著不同。粗略地分成为星族Ⅰ和星族Ⅱ两大类。属于星族Ⅰ的天体相对比较年轻，属于星族Ⅱ的天体则相对比较年老。

2. 河外星系 除了银河系外，其他星系都称为河外星系。河外星系的形态各不相同，大致有旋涡星系、棒旋星系、椭圆星系、透镜星系和不规则星系等几种。大熊座 M81 (图1.12) 和银河系便是典型的旋涡星系。

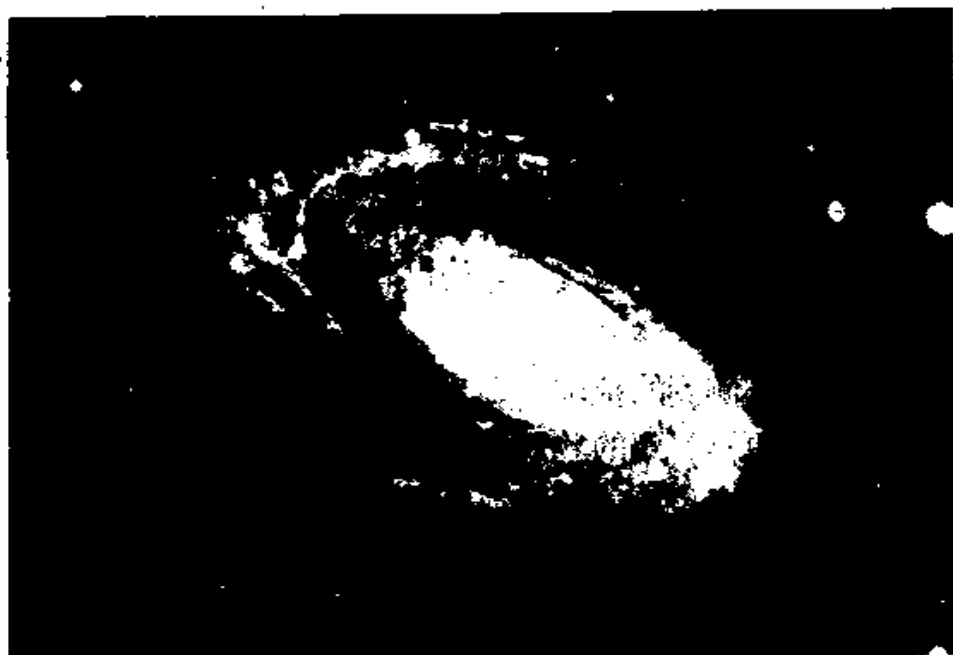


图 1.12 大熊座 M81 —— 典型的旋涡星系

星系之间相隔的距离更是十分遥远。肉眼能见的最近的河外星系是大麦哲伦云，但它位于南半天球，距离银河系16.9万光年。随着观测技术的进步，目前已能观测到 150 亿光年左右的河外星系。

意味深长的是本世纪二十年代末，美国天文学家哈勃(E. P. Hubble)发现，除了银河系附近的少数几个星系在向银河系靠近

外，几乎所有其他星系都在以巨大的速度离去。而且逃离的速度大致与它的距离成正比，对于这种现象的科学解释正是现代宇宙学的重大课题。

六、星系集团

观测表明，星系成团的倾向甚至比恒星更为强烈，在已发现的数十亿个河外星系中，很少是单个独立存在的。同样，两个互相有物理联系的星系称为双重星系，三、五个或十来个在一起运动的则称为多重星系，而10—100个星系组成的星系集团称为星系群，100—1000个星系组成的则叫星系团。个别很大的星系团如后发星系团则包含着上万个河外星系，目前已发现了近万个大小不等的星系团。

二、三个星系团又常常组成了更高级层次的超星系团。它大致具有扁长的形状，这表明它们也有自转运动，但一般认为超星系团是不稳定的天体系统。

人类所能观测到的范围称之为总星系，但也有人认为总星系是比超星系团更高一级的物质层次，其范围与目前观测到的区域相比，可能相当，也可能更大或更小。

从总星系的大尺度看来，宇宙间的物质分布是相当均匀的，运动也是各向同性的，这种认识也涉及到人类对宇宙本质的看法。

什么是宇宙？这是一个不易回答的问题。宇宙也是一个哲学上的概念，中国古书《淮南子·原道训》说：“四方上下曰宇，古往今来曰宙”那是指所有时间和空间的总和。但宇宙也有其科学上的含义，不少人就把总星系当作宇宙，因此，这是与哲学上的宇宙既有联系又有区别的两个不同概念。

七、一些常用的天文符号

天文学有许多特定的专用符号，不仅在本书中经常出现，而

且许多天文书刊、星图、星表中也常会遇见，故将它们列成表1.1—表1.3。

表 1.1 天体符号

天 体	符 号
太 阳	☉
月 球	☾
水 星	♿
金 星	♀
地 球	⊕或🌍
火 星	♂
木 星	♃
土 星	♄
天王星	♅或♁
海王星	♆
冥王星	♇
彗 星	♁
恒 星	★或☆

表 1.2 黄道十二宫及
分、至点符号

符 号	含 义
♈	白羊宫，春分点
♉	金牛宫
♊	双子宫
♋	巨蟹宫，夏至点
♌	狮子宫
♍	室女宫
♎	天秤宫，秋分点
♏	天蝎宫
♐	人马宫
♑	摩羯宫，冬至点
♒	宝瓶宫
♓	双鱼宫

表 1.3 天体运动现
象符号

符 号	含 义
●	新 月
◐	上 弦
◑	下 弦
○	满 月
♌	合
☐	方 照
♋	冲
♎	升交点
♏	降交点
☿	离银心距离

§ 1.3 天文学发展简史

天文学是最古老的一门学科。在古代原始社会，游牧和农业民族都需要掌握季节变化的规律，都需要辨认方向，他们也常常试图探讨昼夜的成因、天地的起源及宇宙的结构，因此世界各文明古国的古代天文学都有那辉煌的一页。

一、古代天文学的产生和发展

1. 埃及 尼罗河是埃及的命脉，它的涨落泛滥是古埃及人

生死攸关的大问题，正如马克思(K. Marx)所说：“计算尼罗河水的涨落的需要，产生了埃及天文学。”早在公元前三千年左右的时候，他们便把天狼星(大犬 α)随太阳升起的日子作为新年的起点，大约此后60天，尼罗河即开始泛滥。这说明他们早已注意到太阳在恒星之间的运动，把一年从360天改为365天，创造了最原始的太阳历——现代公历的最早雏型。

闻名于世的埃及金字塔不仅是世界古建筑史上的一大奇迹，近代更有人为它披上了神秘的色彩，例如他们认为金字塔表示了许多天文上的意义，它底座的南北方向非常准确，有个金字塔正北有一个下俯的入口，其倾斜方向正好是指向当时的北极星。

2. 巴比伦 在现在伊拉克境内的底格拉斯河及幼发拉底斯河流域的美索不达米亚平原上，天文学的萌芽也很早发展起来了。他们的历法也可追溯到公元前三十世纪前后，在近代发现的古代泥碑(图1.13)上已载有12个月的名称。西方星座的最早起源也应归功于巴比伦人。他们对于日食、月食之类的特异天象尤其关切，

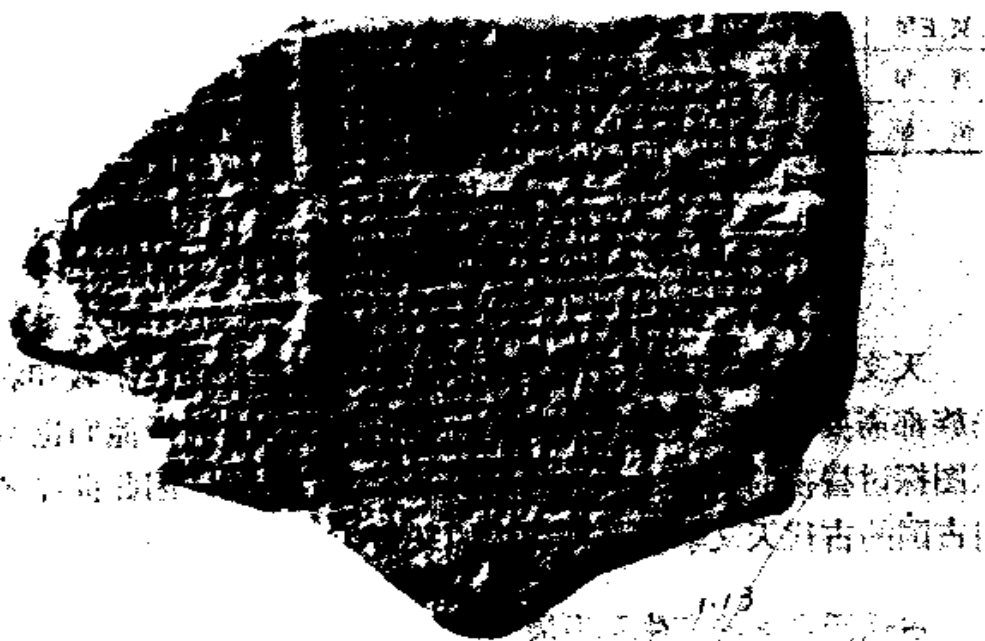


图 1.13 巴比伦泥碑上的楔形文字

不仅有众多的记录可查，而且早在公元前三世纪时，便发现了计算日、月食的“沙罗周期”，开始作日月食的预报。

巴比伦人特别崇奉月亮，因此很早便定出了朔望月和近点月的长度，其误差前者仅0.4秒，后者为3.6秒。他们测得的一些行星会合周期与今天的正确值也相去不远。在历法中他们与埃及人不同，以月球运动为据，以新月初见作为每月的开始，是回历的鼻祖。他们的有些知识如把圆周划为 360° 、把黄道分成12个星座、一小时分成60分、一分划为60秒、把七天定为一星期等都一直沿用至今。

3. 印度 印度的天文学起源很早。印度的古历是一种阴阳历，它用观测恒星的偕日出(与太阳同时从东方升起)来调节年的长度，同时又以月亮的盈亏作为月的依据。印度人调节年、月、日的原则刊载在一本《吠陀支节录——天文篇》中，基本上以五年中设二个闰月，即包括62个朔望月。为了研究太阳的运动，印度人把黄道分为27等分——二十七宿，但因为是完全等分的，所以有些宿内并无显著的亮星。

印度古代天文学在历法和宇宙论上自具特色，但由于受佛教的影响甚深，一直不太重视天文的实际观测，这是一个较大的弱点。

4. 古印第安人 由于众所周知的原因，以前人们对美洲古印第安人的历史文化所知甚少。但近来研究表明，大约在公元前1000年前后，古印第安人中的一支玛雅人曾在这块古老的“新大陆”上也创造和发展了灿烂的“玛雅文化”，而其中玛雅天文学也占有重要的一席之地。

根据考察，玛雅人也有自己的古天文观象台，这是一组颇具特色的古建筑群，它有几个特定的方向正表示了当时一年中春分、秋分及夏至、冬至日太阳升起的位置。他们也创造了自己的历法，从发现的古石碑上所刻的记载看来，应属太阳历的范畴，但也有

迹象表明,似乎同时流传有太阳历和太阴历两种不同的历。此外,玛雅人对行星的运动,尤其是金星的运动进行了仔细的研究,并定出了它的会合周期为584天(现在测得为583.92天)。

由于玛雅人早已灭绝,因此对于他们的文化目前还在发掘、研究之中。

5. 古希腊 希腊人承继了埃及和巴比伦丰富的文化遗产,曾创造了对欧洲各国具有深远影响的“古典文化”,从公元前七世纪到托勒玫(C. Ptolemy)为止的八百多年间,希腊的天文学有许多辉煌的成就,在世界天文史上占有极重要的地位。

希腊天文学的最大特色是发展了一套几何系统来描述天体的运动。从毕达哥拉斯(Pythagoras)开始,便认为地球是球形的,位于宇宙的中心,而柏拉图(Plato)学派中的欧多克斯(Eudoxus)则创立了“水晶球”(同心球宇宙体系)理论,亚里士多德(Aristotle)又把它发展成“九重天”的地心说,到公元前二世纪,托勒玫写出了《天文学大成》,地心说达到了巅峰。托勒玫这本巨著总结了到当时为止的古希腊天文学、数学上的成就,并把它们推向新的高度,对以后的天文学、数学发展有着深远巨大的影响,因而占着重要的历史地位。只是到了中世纪时代,反动教会把它阉割改造后才利用地心说中“地球处于宇宙中心”的思想作为宗教的理论支柱。从那以后,地心说遂成为束缚、阻碍科学发展的桎梏。

古希腊的天文学成就甚多:公元前四世纪,赫拉克利德(Heracleides)就以地球的自转来说明天体的周日运动;公元前三世纪,阿里斯塔克(Aristarchus)巧妙地求出日地距离是月地距离的18—20倍(应389倍),从而得出结论:是地球绕太阳转,这是历史上最早的“日心说”。几乎与此同时,埃拉托斯特尼(Eratosthenes)利用比较科学的方法算出了地球的周长为25万古希腊里(约合39600千米,误差仅1%)。

古希腊还有一位杰出的天文学家喜帕恰斯(Hipparchus)他不

仅以精密的观测著称于世，为后人留下了大量珍贵的天文观测资料，是方位天文学、三角学、球面三角学的创始人，他还定出了月球的轨道要素，求出月地距离为地球直径的 $30\frac{1}{6}$ 倍，知道了一年的长度应为 $(365\frac{1}{4} - \frac{1}{300})$ 天，发现了岁差现象，编制了有850颗星的星表。

近年来，考古天文学的兴起又为研究古代天文学提供了许多新资料。例如英国索尔兹伯里以北存有公元前2000年左右兴建的巨石阵(图1.14)。研究表明，这很可能就是当时人们为了进行天文观测而建造的原始天文台遗迹，因为它的主轴线方位及其结构都可找到相应的天文意义。这一切又使人们更加相信天文学确是



图 1.14 原始天文台的遗迹——巨石阵

最古老的一门学科。

二、近代天文学的发展

进入中世纪后，欧洲的一切科学几乎停滞不前，甚至还出现

倒退的局面。天文学也不例外，在此期间，只有阿拉伯、中亚细亚地区的天文学才有些缓慢的发展。

但是历史不会停止前进，黑暗总有尽头。从十三世纪开始，资本主义萌芽开始在欧洲发展起来，公元前8年调整的儒略历到了十六世纪时已有了十天的误差。工商业的发展、大规模航海事业都促进了天文学及其他科学的革命。

1. 从日心体系到牛顿力学

(1) “日心体系”的确立：随着科学技术的发展，托勒玫学说的破绽已越来越多，而航海又特别要求解决测时、导航等问题，矛盾十分尖锐。波兰天文学家哥白尼，经过毕生的研究和探索，终于在他临终之前，出版了具有划时代意义的《天体运行论》，指出地球不是宇宙中心，而是一颗普通行星，地球和其他行星一样在绕太阳旋转，而天球的周日运动也仅是地球自转造成的假象。

由于历史的局限，哥白尼的日心体系还有若干错误之处，但白璧微瑕，它仍不失为是近代天文学的奠基石，是科学从此不再是神学奴婢的标志，它还使其他科学“从此便大踏步地前进”，这实在是人类思想史上的一次伟大飞跃。

(2) 望远镜的发明：荷兰人发明了能窥看远物的“幻镜”的消息不胫而走，不几个月便传到了意大利。伽利略立即加以研究，并于1609年造成了一架长1.2米、口径4.4厘米、能放大33倍的望远镜，然而他的更伟大之处却在于他并不把它当作玩具，而是第一个指向天空作天文观测。他用这人类第一架天文望远镜使天文学进入了“望远镜天文学”的新时代，大大开拓了人们对宇宙世界的认识，为哥白尼的日心学说提供了最生动有力的观测依据。

伽利略之后，人们为了更深入研究宇宙，开始努力建造口径越来越大，性能越来越好的天文望远镜，而望远镜的每一次改进和革新几乎都会有新的发现，它引导着人类在认识宇宙的过程中步步深入。

(3) 行星运动规律的确立: 开普勒(J. Kepler)是与伽利略同时代的另一位伟大天文学家。他继承了第谷·布拉赫^①(Tycho, Brahe)的全部观测资料, 抓住观测与理论间有8' 误差不放, 埋头研究了十多年, 终于在1619年发表了著名的行星运动三大定律, 改正了哥白尼学说中的误差, 指出了行星绕太阳的轨道是椭圆, 因而也不是匀速运动, 从而巩固了哥白尼学说的地位, 因而开普勒被人称誉为“天空的立法者”。

伽利略为哥白尼理论找到了大量的观测证据, 开普勒则从理论的高度巩固了日心说的地位。更重要的是, 开普勒发现的行星运动定律为后来牛顿发现万有引力定律、建立牛顿力学打下了坚实的基础。

牛顿是近代科学史上一个巨人。他发明了微积分, 创建了牛顿力学, 而万有引力的发现正是天体力学诞生的标志, 同时他作的分光实验也可看作天体物理学的萌芽。他磨制的第一台反射望远镜也正是天体物理不可缺少的主要观测工具。

在此期间, 由于理论研究日益深入和提高, 望远镜制作不断改进与发展, 使得第一批拥有望远镜的新型天文台相继在各地建立起来。作为现代天文台的先驱, 那就是1677年建立的(1671年落成)巴黎天文台及1675年问世的格林尼治天文台。

2. 十八世纪的天文学 由于望远镜的不断进步, 观测水平的日渐提高, 使得天文学在十八世纪有了很大的发展。

(1) 天体测量学方面的成就主要有: 英国天文学家布拉得雷(J. Bradley)发现了恒星的周年光行差及地球的章动现象, 进一步证明了地球的公转和自转运动; 1716年哈雷(E. Halley)提出利用金星凌日来改进测定日地平均距离的新方法; 为满足大规模航海需要, 测定钟差和各地经纬度的难题已基本解决; 同时, 一批较好的近代星表陆续问世。

^① 按照天文学上的惯例, 以后都称作第谷。

(2) 太阳系研究的进展: 自1672年乔·卡西尼(G. D. Cassini)第一次得到日地距离值后, 1761年俄国罗蒙诺索夫(M. B. Ломоносов)首先发现了金星大气; 1766年德国提丢斯(J. D. Titius)提出了关于行星距离的提丢斯定则, 为十九世纪发现小行星打下了基础; 最为轰动的是1781年威廉·赫歇耳(F. W. Herschel)发现了天王星——人类第一次发现行星, 大大突破了旧有太阳系的边界, 为以后发现小行星、海王星、冥王星创造了条件; 哈雷1705年预言的彗星(后称哈雷彗星)也于1759年按时回归, 使彗星研究进入了新的阶段; 到十八世纪末, 太阳系的卫星已经发现了十四颗。

(3) 恒星天文学的创立: 1718年哈雷发现了恒星的自行, 使人们首次认识到“恒星不恒”。到十八世纪中叶, 已有不少人提出了恒星组成扁平圆盘状的银河系的概念, 甚至还有人推测银河系外还有其他星系(宇宙岛)。1783年威廉·赫歇耳首创利用统计恒星数目来研究银河系结构的方法, 并得到了太阳相对于其他恒星的运动(本动), 从此恒星天文学开始发展起来。

(4) 天体力学方面: 在数学家欧拉(L. Euler)、拉普拉斯(P. S. Laplace)等人的推动下, 天体力学在十八世纪逐步发展成熟起来, 已经开始了摄动^①理论的研究, 而太阳系中一些天体如月球和大行星的运动特性也得到了较好的说明。

(5) 天体演化学的诞生: 牛顿力学所取得的成就使人们习惯于把自然界分门别类, 各自隔离起来进行研究。这样, 机械的形而上学自然观逐渐发展起来, 又成为阻碍科学发展的樊笼。最早冲开缺口, 导致人类思想第二次大解放的又是天文学——1755年康德及1796年拉普拉斯提出的太阳系起源星云学说。这两个人彼此互不相知, 事隔41年独立提出的两个学说却有着异曲同工之妙, 第一次从科学上阐明了天体都有时间上的发展史, 使人们第一次

^① 在天体的绕转轨道运动中, 除了中心体的万有引力外的任何作用, 都称为摄动。太阳系中, 一般说来, 木星的引力常是最重要的摄动之一。

把自然界在发展变化的观念用到自然科学的研究中来，认识到自然界并不是孤立的、僵死不变的，而是在按照客观规律在前进、在发展，因而有人认为：“这是从哥白尼以来天文学取得的最大的进步”，“在康德的发现中包含着一切继续进步的起点”^①。

3. 十九世纪的天文学 这一百年中最重要的事件是天体物理学的诞生和迅速发展，它标志着现代天文学的新起点，使人们对天体的认识发生了由表及里的深刻变化。

1814年德国的夫琅和费(J. Fraunhofer)制成了第一架分光镜，并且发现了太阳的谱线。1859年，德国的基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)逐步建立了光谱理论——基尔霍夫三定律，加上前不久发展起来的光度学，照相技术一起运用到天文研究上，使一门崭新的分支——天体物理学初露锋芒：证认了太阳上的元素组成，表明了世界物质的统一性；首次从太阳上发现新的元素氦；弄清了太阳大气的分层结构；测定了恒星的光谱分类；从谱线的位移中测出了恒星的视向速度；发现了分光双星；测定了行星的自转；探明了土星光环内的结构……。

十九世纪天文学上还有两件轰动世界的大事，一是1837—1839年三位天文学家——俄国瓦·雅·斯特鲁维(В. Я. Струве)、德国贝塞耳(F. W. Bessel)及英国亨德森(T. Henderson)——几乎同时分别独立地测定了织女星(天琴 α)、天鹅61和南门二(半人马 α)三颗距离较近的恒星的周年视差，从而得到了它们的距离值，从此地心体系的最后一个顽固堡垒被攻破。第二件大事是两个青年用纸和笔发现了肉眼看不见的海王星——英国的约翰·亚当斯(J. C. Adams)和法国的勒威耶(U. Le Verrier)在互不了解的情况下，从天王星位置的偏差中算得了未知行星的轨道。虽然亚当斯于1845年先算出了结果，但柏林天文台是根据勒威耶的计算，于

^① 恩格斯《自然辩证法》1971年版12页。

1846年找到了太阳系的第八颗大行星的。

十九世纪中叶，人们已经从太阳黑子数统计中认识到了太阳活动的11年周期规律，1877年又开始了彗星物理性质的讨论。天体测量上1888年证实了极移现象，天体力学方面则已建立起完整的大行星及月球运动理论，提出了轨道共振等重要概念。在恒星天文研究中值得一提的工作还有：在1802—1804年威廉·赫歇耳发现了双星之间互相绕转的轨道运动，从而为准确测定恒星质量提供了依据。同时光度测量方面的进展也使变星研究开始活跃起来。

在这段时期内，仪器发展得更加迅速，望远镜口径越造越大，附件越来越好，出现了诸如赤道式装置和转仪钟等设备，折射望远镜已发展到了最高峰——1897年一架口径1.02米(焦距18.6米)的望远镜在美国叶凯士天文台落成。一直到今天，它仍是世界上折射望远镜之冠。而目前，迅速发展的红外天文研究也发端于威廉·赫歇耳的发现。他在十九世纪初首先发现了太阳的红外辐射。1869年罗斯(W. P. Rosse)正式用热电偶测量了月球的红外辐射，只是因为各种条件(如大气、仪器)的限制，才使它的发展推迟了一百年。

三、现代天文学的飞速发展

天文学在二十世纪获得了前所未有的大发展，十九世纪才诞生的天体物理学终于成了天文学的主流。四十年代发展起来的射电天文，在六十年代得到了轰动整个科学界的“四大发现”，随五十年代末人造地球卫星上天而来的大规模太阳系空间探测及观测范围扩展到“全波”范围，天文学在许多方面取得了有史以来空前的成就，部分地改变了过去天文学的内容及面貌，这一切又可能促使现代天文学上在孕育着一次更大的飞跃。

发展是十分惊人的。十九世纪时，除了利克折射望远镜外，能

正常使用的最大反射望远镜只有一台(口径90厘米), 而到七十年代末口径在2米以上的仪器已遍布全球, 达25台之多。最大的达5米、6米, 而且下一代望远镜(口径10—25米)也正在研制之中。此外, 新型的大光力的折反射望远镜、各种类型的太阳望远镜、先进的光电技术、无线电技术、电子学技术及计算机越来越显示出巨大威力。最大的光学望远镜比人眼灵敏度提高 10^6 倍, 化了足足三百多年时间, 但从最早的X射线探测到1978年的“爱因斯坦X射线天文台”, 同样提高了 10^6 倍灵敏度, 相隔却只有16年。总之, 在最近二十多年中, “全波”天文学所用的各种仪器都得到了空前的发展, 所以各个分支学科的成就也常常超过了过去多少年的总和。

(1) 天体测量学: 随着观测精度的逐步提高, 发现了地球自转的不均匀性, 由此出现了从世界时到历书时、原子时的新的时间计量系统, 进一步加深了人们对时间问题的认识。人造地球卫星、激光测距等新技术又使这个古老的分支面临着新的革命, 也导致了如天文地球动力学等新学科的兴起。

(2) 天体力学: 二十世纪的天体力学更臻成熟。而快速电子计算机的出现, 使得数值方法迅速发展起来而成为一支非常活跃的方面军。同时, 人造地球卫星上天后, 人造天体也成为天体力学的又一研究对象, 推动了天文动力学的发展。数学上的进展又使天体力学还可以把研究对象扩充到成员不多的恒星系统, 并取得了许多积极的成果。

(3) 天体物理学: 通过测光和分光的研究, 已经确定了大批恒星的各種重要的物理参数: 质量、半径(平均密度)、光度、表面温度、压力、磁场、自转速度、化学组成、空间运动等等, 为深入研究恒星世界创造了条件。爱丁顿(A. S. Eddington)等人卓有成效地探讨了恒星大气理论和内部结构, 三十年代提出的热核反应为恒星发光机制还获得了1967年的诺贝尔物理奖, 这也是第一

次因天文学的重大成果而获得的最高奖。

本世纪初得到的赫罗图揭开了恒星演化研究的新篇章。到五十年代末，恒星起源和演化的科学理论已经初步确立起来，人们终于逐步弄清了恒星“一生”中的各个重大环节，这也大大促进了太阳系起源的研究工作，经过与各种灾变学说的争论，加上空间探测的丰硕成果，使现代太阳系起源新星云说也取得了重大的进展，目前现代星云说已进入了半定量、定量研究和部分实验的新阶段。

造父变星周光关系的发现及恒星天文的工作，使人们逐步了解了银河系中的结构和范围，得出了银河系较差自转的公式，逐步确定银河系各部分的质量，否定了太阳在银河系中的特殊地位。造父变星提供的测距方法又确证了河外星系的存在。二十年代末，美国天文学家哈勃发现了哈勃定律即河外星系的谱线红移与它们的距离成正比，这正是广义相对论所预言的“宇宙膨胀”，因而成为现代宇宙学的重要基础，它也使人们的宇宙观念发生了又一次深刻的变化。

天文学为广义相对论提供的“三大验证”至今仍是科学发展史上的佳话，而“引力透镜”的发现，引力辐射的间接证明，越加支持了爱因斯坦的广义相对论。而广义相对论也为人们正确认识宇宙、正确认识时空提供了理论武器，这样使大望远镜开创的河外星系研究迅速蓬勃地开展起来。

六十年代中，射电天文学异军突起，先后得到了四项有深远影响的天文学上的重大发现：类星体(1963年)、星际有机分子(1963年)、3开微波背景辐射(1965年)、及脉冲星(1967)①。

航天技术的发展改变了人类在宇宙中的地位。举世瞩目的“阿波罗”登月(1969年)，使人类第一次在其他天体上留下了足迹。七

① 其中脉冲星已获1974年诺贝尔物理学奖，3开微波背景辐射获1978年诺贝尔物理学奖，星际分子的主要发现者也以其他项目为名获得了1964年诺贝尔物理学奖。

十年代中所作的大规模空间探测甚至影响到整个科学技术的发展,也使人们对太阳系的认识发生了许多深刻的变化,迫使六十年代以前有关太阳系的章节非得重写不可。

§ 1.4 中国天文学发展简史

中国是具有五千多年文明历史的著名古国之一,天文学也有十分悠久的历史,并且具有独特的东方特色。在世界天文学史上占有重要的地位,其中最突出的就是丰富而有系统的天象记录、精湛的历法研究、灵巧的古代天文仪器。同时,中国古代对宇宙本源问题的探讨也不乏精辟的真知灼见。

一、萌芽时期

在近代出土的距今约4500年的许多陶尊上,经常可以发现一些刻有具有天象意义的原始图形符号。这表明,远在有文字记载以前,中国古代就已经注意到季节更迭与星空变化之间的联系。从古书《尚书·尧典》中可知,甚至在帝尧时代(公元前二十四世纪)便已设立了“观象授时”的专职官员,已经懂得了“日中星鸟”,以殷仲春”、“日永星火,以正仲夏”……的道理。这表明那时人们已用黄昏时刻出现在南方天空中的不同恒星来确定时令季节。文献表明,这时中国已把一年定为366天,并且用闰月来调节月份和四季。

到夏朝时(约公元前二十一世纪)中国开始进入奴隶社会,从《夏小正》的记载可以知道,那时几乎每个月都以一些显著的天象作为标志,并且还注意到不同季节的“昏中星”、“旦中星”^①以及北斗七星的斗柄每月指向的变化。

① 昏中星、旦中星分别是指在黄昏和黎明时在南方天空所见的恒星。

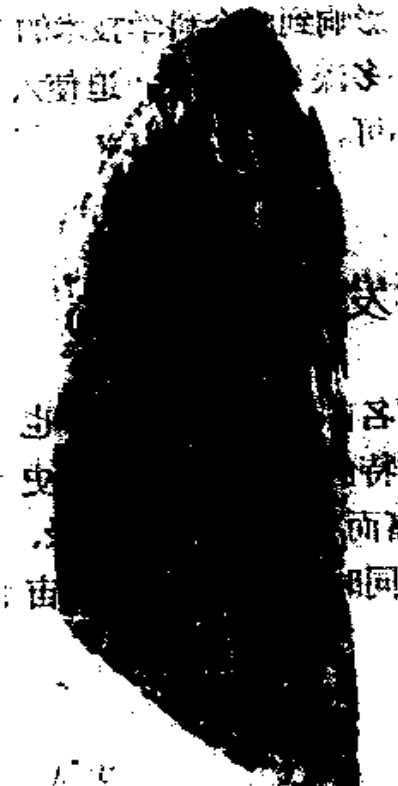


图 1.15 甲骨片上的新星记录

殷商时代(公元前十六世纪至公元前十一世纪),从甲骨卜辞中可以看出,那时已经发明并采用了“六十干支”的方法来纪日,并且分出了大月(30天)和小月(29天),闰月则称为十三月。所以,那时候的季节与月份已大致有了固定的关系。在那些甲骨片中,还有大量珍贵的天象资料——世界上最早的新星记录(图1.15)及众多的日、月食记载。

西周时代(公元前1066至公元前771年)的天文学知识已有了一定的普及,已有了月相变化的记载,并开始利用土圭来测定方向,刻漏来记量时间,还认识了金星及银河,并且也出现了以二十八宿划分天区的方法。因此一般认为,到西周末年时中国天文学已经初具规模了。

二、形成体系时期

在春秋时代(公元前770至公元前476年),中国的天文观测已逐步发展到了定量观测的水平,已经能以二十八宿为标准,逐月给出每月月初时的昏中星、旦中星及太阳的所在位置。《春秋》、《左传》中记录的37次日食,至少已有32次考证出是可靠的,其中还有世界最早的流星雨记录(公元前687年)及著名哈雷彗星最早的回归记录(公元前613年)①。

① 据中国天文学家张钰哲最近考证,中国还有公元前1056年的哈雷彗星回归的记录。

到公元前600年左右,土圭不仅用来测定方向,而且也用以确定夏至、冬至的日期来改进历法,所以战国时代各国基本上都采用了一年为 $365\frac{1}{4}$ 日的“四分历”,已懂得了十九年七闰的原则。在秦统一中国后,出现了第一部在全国通用的、比较完整的“颛顼历”(公元前221年),这比罗马的儒略历早近两个世纪。值得注意的是,颛顼历中还包含有设置闰月的原则、五星(日、月、金星、火星、木星)的运行情况、日月食的计算及中国特有的二十四节气,为后代历法树立了楷模。

战国时代还开始有了中国最早的天文学专著——齐国甘德的《天文星占》(八卷)及魏国石申的《天文》(八卷),实际上这就是世界上最早的星表。到汉末,中国天文学已发展到了较高的水平。1973年西汉古墓马王堆出土的许多帛书中,就有八千字的《五星占》,它详细地描述了水星、金星、火星、木星、土星的运行情况,还——列出了从公元前246年(秦始皇元年)到公元前177年(汉文帝三年)的七十年间,金星、木星和土星的准确位置,推算了它们的公转周期和会合周期。这至少比西方的喜帕恰斯早一百多年。帛书中还有对彗星的描绘,上面画出了29种不同的彗星形状,更令人折服的是有的图上还可看出彗头中尚有核的结构(图1.16),因此有很

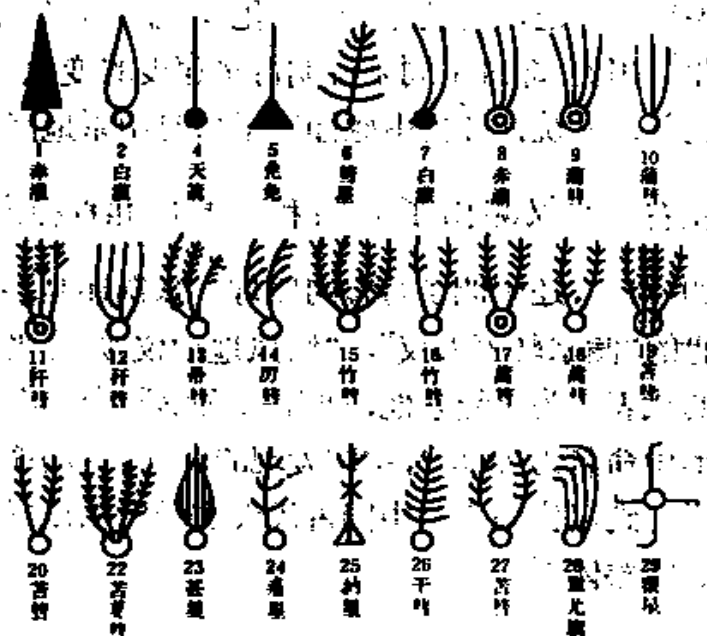


图 1.16 马王堆出土的中国古代彗星图

高的学术价值。此外，《汉书·五行志》中还有世界上第一次黑子记录(公元前28年)，而所记载的一次日全食(公元前89年)已有了非常具体的食分大小，初亏、复圆的时刻和太阳方位。在《汉书·天文志》中所记载的客星(即新星，公元前134年)虽然也为喜帕恰斯所见，但他却没想到记下它的方位及出现的时间，比中国资料大为逊色。

对于宇宙本源和结构的认真探索也开始于这个时期。为了回答这些问题，中国出现了不同的“宇宙论”，其中有先是“天圆如张盖，地方如棋局”，后改为“天似盖笠，地法覆槃”的“盖天说”；也有“天圆如弹丸，地如卵中黄”的“浑天说”，还有主张宇宙无定形、无边际的“宣夜说”。对于天地的形成，《淮南子》也试图作出回答，它还给宇宙作了一个很好的定义：“上下四方曰宇，古往今来曰宙”。

这段时期杰出的代表人物是张衡，他是中国古代科学史上十分伟大的科学家。在天文学上，他丰富、发展了“浑天说”，在《灵宪》中，他以比较朴素的变化发展的思想来说明天地的起源与演化，用距离的不同来说明行星速度的变化(“近天则迟，远天则速”)，从统计分析中他知道了当时中原地区可见的恒星数在2500左右。不仅测出了太阳和月亮的角直径为周天的 $\frac{1}{736}$ (相当于 $29'.24''$)，还阐明了月食的原理。张衡还是杰出的发明家，闻名于世的“漏水转浑天仪”，“候风地动仪”则是当时世界科学最高水平的代表。为了纪念他，国际天文学联合会把月球背面的一座环形山命名为“张衡”，中国发现的(1802)号小行星的命名也是张衡。

到汉代为止，中国古代天文学已初步形成了有强烈东方特色的完整体系。

三、繁荣发展时期

从东汉末年三国到五代十国的七百多年(公元220—960年)中,中国的天文事业各方面都有较大的发展。

在持续不断观测的基础上,三国时代的杨伟发现了黄白交点的移动,提高了计算日月食的精度;东晋虞喜发现了岁差现象(后为祖冲之引入历法计算);祖暅也发现了北天极的移动;北齐张子信则观测到了太阳运动的不均匀性;唐代李淳风绘制的“敦煌星图”(包含1350多颗星)也具有很高的水平。

天文仪器也有很大提高。李淳风的“浑天黄道仪”、一行及梁令瓚所制的“黄道游仪”、“开元水运浑天俯视图”都有了很大改进。一行从黄道游仪中还发现过恒星位置的变化,他还领导了世界上第一次子午线的实测工作,纠正了自古流传的“日影千里差一寸”的错误观点。

仪器的改善、观测上的发现,必然使历法更加进步。在此期间,出现了多达三四十种富有特色而较好的历:魏国所用的《景初历》(237年),后秦的《三纪甲子元历》(384年),何承天的《元嘉历》(443年),祖冲之的《大明历》(463年)、隋朝的《开皇历》(584年)、李淳风的《麟德历》(665年)、一行编的《大衍历》(728年)……,有的提出了比“十九年七闰”更好的置闰法,有的则从月食来求太阳的位置,祖冲之把岁差引入大明历更是一个创举,一行在计算中使用了含有三次差的近似内插法,在二十四节气上也把以圆周24等分的“平气”改为根据太阳运动实际情况而定的“定气”。

在对宇宙的探讨上,这段时期也有一定的特色。一行首先从方法论上批判了前人计算“天的大小”的错误,刹住了这种非常荒唐而又十分繁冗的计算。柳宗元则在《天对》中更明确提出了宇宙的无限性,认为天没有青、黄、赤、黑的颜色之分,也没有中心和边缘之别,更不能人为地去划分几个部分。他还指出:“天地之

无倪，阴阳之无穷，以涵洞轳轳乎其中，或会或离、或吸或吹、如轮如机”（《非国语·三川震》）以此来说明宇宙中的矛盾在不断的变化、发展，这种深刻的认识在一千多年前的古代是非常难能可贵的。

四、高潮及衰落

中国的封建经济在宋代得到了进一步的发展，古代天文学也差不多在宋朝到明初时达到了鼎盛时期。

宋朝关于1006年及1054年的超新星史料至今还吸引着大批中外天文学家。而多次大规模的恒星测量的结果之一，就是产生了大量的古代星图，苏州石刻星图是其中的佼佼者(图1.17)。

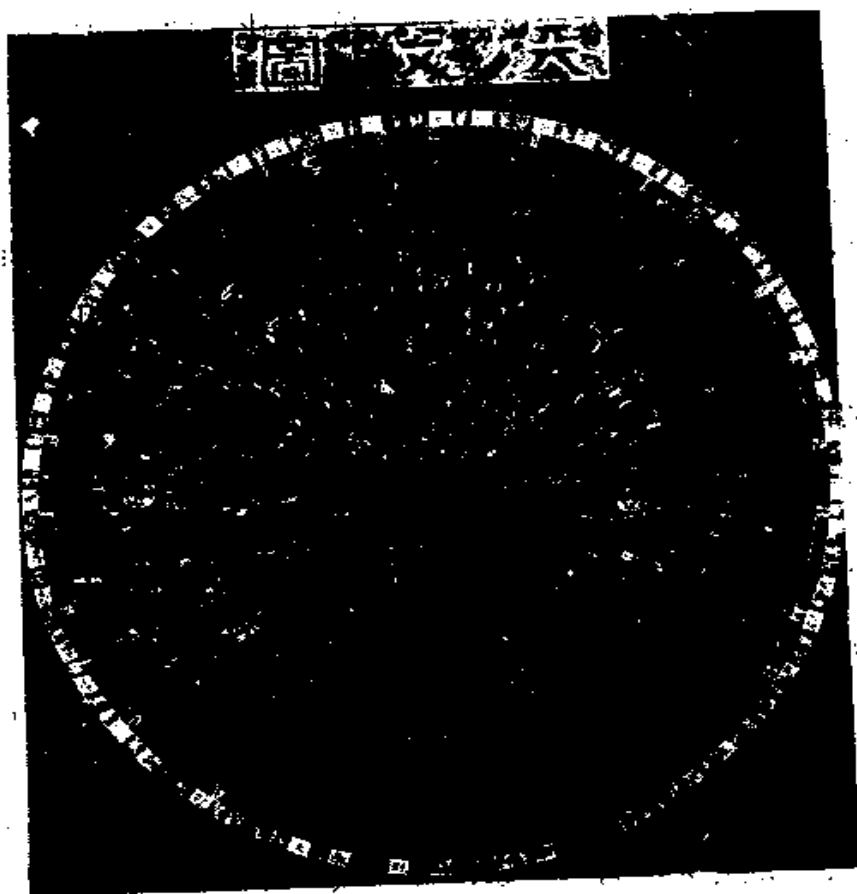


图 1.17 苏州石刻星图

苏颂、韩公廉制造的“水运仪象台”(1092年),既是一架可以在室内表现星空景象的“假天仪”(类似天象仪)又是现代天文钟的最早雏型。另一个大科学家沈括也对天文学发展作出了重要贡献,他对光学、地磁等很有研究,记录了陨星陨落的过程,还对不少天文仪器作了一些有益的改进,既做到了简单化,又提高了观测精度,在历法上,他创造的十二气历也很有特色。在1199年使用的杨忠辅的《统天历》中规定的历年长度为365.2425日,已与现代公历完全相同,但这比公历早了383年。

元朝的郭守敬则把中国古天文推向了新的高峰。郭守敬等人的工作主要在三个方面:

(1) 发明创造了许多别具匠心、观测精度很高的新的天文仪器,其中最著名的有:简仪(图1.18)、仰仪、高表和景符。简仪大胆地把浑仪一分为二,避免了众多环管互相挡掩的弊病,具有很高的观测精度。仰仪则一反抬头观测的习惯,利用针孔成像



图 1.18 简仪

的原理，让太阳象成在朝天的半个球壳面上，使观测更加方便。而高表和景符则是对圭表的改进，以提高观测的精度。

(2) 大规模的天文实测工作，在郭守敬的领导、主持下，元代建立了全国规模的天文观测网，从北纬 15° 到 65° 的辽阔土地上，建立了27个观测所，对一系列天文数据进行了长期的系统的实测，因而观测精度达到了空前的高度。如二十八宿的距度误差不到 $5'$ ，求得的黄赤交角误差已只有 $1'$ 左右，在望远镜使用前，这样的精度是极其难得的。

(3) 在大量实测的基础上，郭守敬编制了古历中比较先进的《授时历》(1280年)，它使用了三次差内插法来求太阳及月亮的视运动速度，并用类似于球面三角的方法——弧矢割圆术——来作黄道赤道坐标的转换、求白赤交角、白赤交点的赤经等等，这在中国天文史和数学史上都是一个创举。

明朝以后，统治阶级为了加强中央集权，采取了摧残科学文化、窒息人们思想的“八股取士”，严令不准民间私习天文、研究历法，中国天文学的发展，从此进入了一个没有很大作为的低潮衰落阶段。

同时，西方传教士来华也对明朝以后的科学技术发展产生了重大影响。一方面那些进行学术传教的教士也的确给中国带来了一定的西方科学，那时候如徐光启等人也翻译了很多西方科学著作，包括天文学的书籍，介绍了托勒玫的地心学说、望远镜，同时还有西方的数学和计算方法，如几何学、球面三角学等等，这是有一定积极影响的方面。

然而，从整体讲来，西方国家并无真正帮助中国发展科学的意图，即使其中少数人有一定的积极作用，也是局部的、有限的，他们从未把最先进的东西带到中国。虽然那时哥白尼学说已在欧洲取得了决定性胜利，但他们只讲托勒玫地心体系，至多也只是把

在欧洲从无真正市场的折衷的第谷体系^①来搪塞，更令人气愤的是在他们把持了中国官方天文机构后，有个传教士还借口中国古仪器落后，把郭守敬等人设计制造的天文仪器全部熔毁一空！

当然清代天文学上也有一些成果，如组织了二次大规模的经纬度测量工作，并首次得到了地球是椭圆球体的实测资料。另一方面，清代还涌现出了一批很有成就的民间天文学家，如梅文鼎、薛凤祚、王锡阐等等，他们都有一些创新和发展。

五、近代天文的创立和发展

中国的近代天文从何开始？一般认为可以从清末学者李善兰与英国伟烈亚力(A. Wylie)合译《谈天》作为起点。《谈天》的英文原著是约翰·赫歇耳(J. F. Herschel)所著的《天文学纲要》，虽然那是多少带有一些科普性的著作，但却更是一本重要的总结性的学术著作，它对到那时为止的所有天文学新成就进行了非常好的总结和概括，因而在欧洲产生了长久而深远的影响。李善兰翻译的《谈天》不仅在学术上有很重要的意义，更重要的是使哥白尼学说、开普勒定律、第一次在中国得以传播，使中国的古天文从此慢慢纳入近代天文学的轨道。

当然在封建时代，先进的近代天文学是无法真正得到发展的，西方来的仪器锁进了深宫大院，一些书籍也被束之高阁。中国的第一批装备有望远镜等仪器的近代天文台也都是帝国主义为了侵华目的所建的。如1873年法国所建上海徐家汇天文台、1894年日本在台湾建造的台北测候所、1900年德国在青岛设立的气象天测所等等，其主要任务是收集中国沿海地区气象等情报。

1916年，江苏南通人张謇在南通军山搞了一个小天文台，兼

① 第谷体系是这样—个折衷体系：其他行星在绕太阳旋转，但是太阳却带着这些行星在围绕宇宙中心——地球转动。这个学说连他的学生开普勒也不相信，在欧洲几乎没有什么影响，但在中国却流行了几百年。

做气象、天文方面工作，这是唯一的中国人私人办的天文台，但张謇1926年逝世，台务限于经济拮据，无从发展至1938年为日帝侵略者的炮火所毁。

辛亥革命、五四运动之后，科学民主的思潮在中国开始发展起来，中国天文学会也于1922年正式成立。但在旧中国，天文学与其他学科一样，充其量只是一种点缀，并无真正的建树，都处于奄奄一息的为生存而苦苦挣扎的状态之中。

中国近代、现代天文学的发展是在新中国成立之后。通过三十多年的努力，中国天文研究单位和教育机构都作了重大调整。目前全国已有了南京紫金山、北京、上海、云南、陕西等五个具有相当规模的天文台和一个专门的天文仪器厂。教育单位除了1952年创建的南京大学天文系外，1960年北京师范大学也设置了天文系，北京大学则在地球物理系中增添了天体物理专业。此外，中国科技大学也在最近设立了天体物理研究中心。在天文研究方面，从无到有建立了许多分支学科，在许多领域诸如世界时测定、光电等高仪制造、人造卫星轨道计算、恒星和太阳的观测与理论、射电天文、高能天体物理、太阳系起源、天文学史等方面都取得了重要的成果。

成绩是喜人的，但差距仍然很大。甚至到今天我国还没有设备能观测到六十年代的“四大发现”。这不仅有愧于文明古国的称号，更不能适应四化建设的要求。因此，发奋学习，努力攀登天文科学高峰乃是当今中国天文工作者责无旁贷的艰巨任务。

第二章 天球坐标和时间计量系统

§ 2.1 天 球

一、天球概念

即令是在原始蒙昧的时代，人们在生存斗争中总是要不断地观察周围的自然环境。每当他们抬头仰望时，总觉得苍茫天穹是一个坚实无比的半球，太阳、月亮以及熠熠发光的星星都牢牢镶嵌在这个硕大无朋的球面上。而且不管人们走到哪儿，他总是觉得自己始终处于这个半球的中心，总感到天穹笼罩着整个大地。中国古时候就盛行着“天圆如张盖，地方如棋局”之类的说法。古埃及人也总是认为大地如同一只大盒子的平底，天是中央拱起的盒盖。西方则把天空看作为一个清彻透明、庞大无比的水晶球——“天球”。

当然这是一种很直观的认识。就在这种朴素直观认识的基础上，古人运用这种“天球”的概念开始了最早的天文学研究，探讨天体在天球上的位置及其分布状况，这样天文学的最古老的分支——球面天文学，也就首先发展了起来。

感觉决不等于科学，直观的感觉更不一定就是真理。水晶组成的天球只是人类肉眼缺陷所造成的一种错觉。天上并没有什么球面。因为人的双眼不过相距 6、7 厘米，根本无从区分遥远天体的实际远近，总是以为所有天体都分布在以自己为中心的天球表面上。然而正如利用视觉暂留可以欣赏电影一样，这种与直观感觉吻合的天球也可以作为人们学习天文学的辅助工具，帮助人们

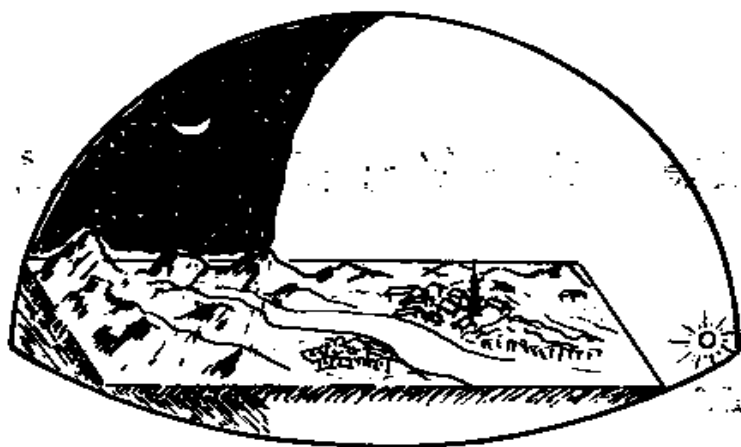


图 2.1 中国的天圆地方说示意图

确立起空间的观念。因此人们不仅保留了天球的概念，并在此基础上发展了一整套的数学公式，而且还出现了与此有关的天球模型——天球仪，以及表现星空的天象仪等。

必须指出的是：

(1) 天体在天球上的视位置是人们对于天体的视线在天球上的投影，因而天球的半径完全可以自由选取，而不影响研究问题的实质。

(2) 天球上任意两个天体之间的距离一般都是指它们之间的角距离，亦即是它们对于观测者的张角。在天球上，线距离是没有意义的。

(3) 一般说来，天体离开地球的距离都可看作是数学上的“无穷大”，因此，在地面上不同地方看同一天体的视线方向可以认为是互相平行的。或者也可以反过来说，一个天体发射到地球上不同地方的光互相平行。因此所有平行的方向在天球上都相交，交于天球上的同一点。

(4) 一般情况下，天球的中心就是观测者的眼睛，但有时为了研究问题的方便，需要把球心假想移到地球中心或者太阳的中

心，这样的天球则分别称为“地心天球”和“日心天球”，以示与一般天球有所区别。

二、天球上的基本点和基本圈

为了研究天体在天球上的位置和分布状况，必须要建立一定的坐标系统并规定度量的方法。而任何坐标系统都离不开一些基本点和基本线，在球面上即是基本点和基本圈。

(1) 天顶和天底：通过天球中心 O （观测者的眼睛）作铅垂线（即观测者的重力方向） ZOZ' ，与天球分别交于 Z 和 Z' （图2.2）。不难想象， Z 正好位于观测者的头顶上，好象是天球上的最高点，故称 Z 为天顶。

与 Z 相对的另一个交点 Z' ，必然位于观测者的脚下，所以 Z' 称为天底。因此，观测者总是见不到天底的。

(2) 真地平圈：通过天球中心 O 作一个与直线 ZOZ' 相垂直的平面——天球地平平面。显然，它与天球的交线是一个大圆，天文上称之为真地平线或真地平圈，有时也可称为数学地平（图2.2）。

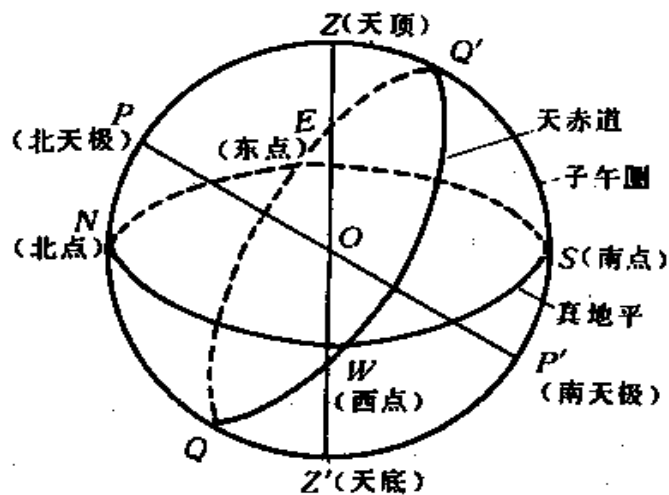


图 2.2 天球上的基本点和基本圈

(3) 天极：仔细观察星空便可以发现，恒星与太阳、月亮一样，同样在作东升西落的周日旋转运动。这本是地球自转的反映，可是古人却认为这是天球旋转的结果，并假想有一条天轴 POP' ，天球绕着天轴在均匀地转动。实际上， POP' 正是地球自转轴的延

长线, P 与地球上的北极相对应, 称之为北天极。 P' 与地球南极对应, 故称为南天极。

(4) 天赤道: 通过天球中心 O , 作一个与天轴 POP' 相垂直的平面 QQ' ——天赤道面。显然, 它与天球的交线也是一个大圆, 称之为天赤道。不难想象, 它实际上是地球赤道面的延伸。

(5) 天子午圈: 经过天顶 Z , 北天极 P , 天底 Z' 作一平面, 与天球的交线——天子午圈 ZPZ' 也是一个大圆。可以证明南天极 P' 在天子午圈上。

(6) 四方点: 天子午圈与真地平有两个交点: N 、 S , 靠近北天极 P 的 N 点称之为北点, 与南天极 P' 较近的 S 称之为南点。实际上 ON 正是观测者所在地的正北方向, 而 OS 即为正南方向。

天赤道 QQ' 与真地平亦有两个交点, E 、 W , 分别称之为东点 E 和西点 W 。同样, OE 、 OW 也正是观测者所在地的正东、正西方向。

E 、 N 、 W 、 S 统称为四方点。

(7) 天卯酉圈: 过天顶 Z , 东点 E , 西点 W 作一平面, 与天球的交线称之为天卯酉圈, 它也是一个大圆。可以证明, 天底 Z' 也必在天卯酉圈上。

以后可以证明, 真地平、天子午圈、天卯酉圈是三个互相两两垂直的大圆。

必须指出, 由于地面上不同地方的重力方向都不相同, 所以不同观测者所作的天球都是不一样的, 或者说各地观测者都有“自己的”天顶、天底、真地平、天子午圈、天卯酉圈及四方点, 它们都具有强烈的“地方性”。

(8) 黄道: 通过天球中心作一与地球公转轨道平面相平行的平面——黄道面, 黄道面与天球的交线是一个大圆, 称之为黄道。

黄道与赤道斜交, 其交角称为“黄赤交角”。用小写希腊字母 ϵ 表示, 现阶段 $\epsilon \approx 23^\circ 27'$ (图2.3)。

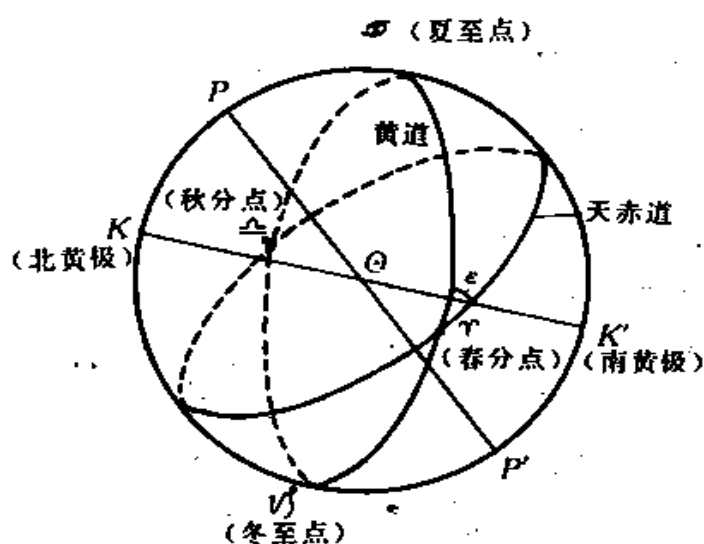


图 2.3 黄道和二分二至点

(9) 二分二至点：黄道与天赤道交于两点 Υ 、 Ω ，分别称为春分点和秋分点。从北半球上看来，当黄道按逆时针方向从天赤道之南穿到天赤道之北的交点即为春分点 Υ 。另一个交点 Ω 即为秋分点。

黄道上与春分点 Υ 相距 90° ，并位于天赤道以北的点称之为夏至点，记为 $\♊$ ；而在天赤道之南的另一点则为冬至点，记为 $\♋$ 。

(10) 黄极：通过天球中心 O ，作一垂直于黄道面的直线 KOK' ，与天球交于 K 、 K' 两点， K 与北天极 P 相近，称为北黄极，反之与 P' 相近的 K' ，称为南黄极。

§ 2.2 球面三角初步

确立了天球概念之后，人们便能把所有恒星都看作是分布在天球表面上的点，这样就有必要对球面的一些最基本性质加以探讨。

一、球面的基本性质

1. 球面上的圆 立体几何已经证明过,任何与球面相交的平面,其截口总是圆。倘若切割的平面不经过球心,则截出的圆是“小圆”,而如果相切割的平面通过其球心,则截出的圆最大,称之为“大圆”。大圆的半径正是球半径。

不难证明,通过球面上不在同一直径两端的任意两点,可以作无数个小圆,但只能也必能作一个大圆。因而在球面三角中,一般只涉及大圆,只研究大圆的性质和关系。

显然,地理中的纬度圈,除了赤道外,都是小圆。而所有地理经圈都是大圆,所以前面所讲的一些基本圈,如:真地平、天赤道、天子午圈、天卯酉圈、黄道等都是大圆。

球面上两点 A 、 B 的距离也要用大圆来量度,过 A 、 B 两点作一大圆。当然 $\widehat{AB}$ 可以用弧长表示,也可用角度表示,由于天球的半径不定,故天球上只用角度来计量,即 $\widehat{AB}$ 等于它所对的中心角 $\angle AOB$ 的值(图2.4)。

2. 球面上圆的极 设 ABC 是球面上一个圆,过其圆心 O'

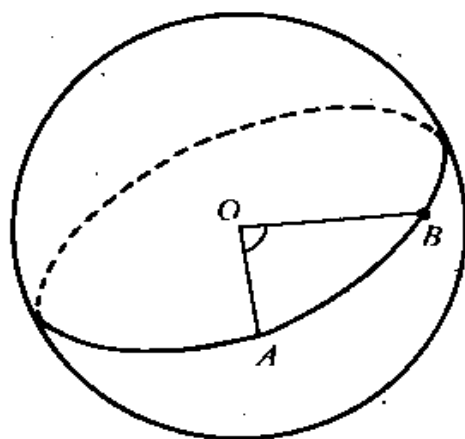


图 2.4 A 、 B 的角距

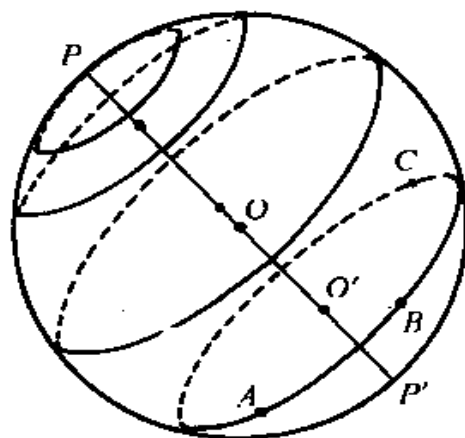


图 2.5 球面上圆的极

作垂直于 ABC 平面的直线 POP' ，显然直线经过球面中心 O ，若与球面相交于 P, P' (图2.5), 则 P 和 P' 就是圆 ABC 的两个极。

显然，球面上每一个圆都有两个极，而从极到它对应的圆上各点的距离都相等，并把此角距称之为“极距”。

若 ABC 是大圆，则两极 P, P' 到大圆上各点的距离都是 90° ，如天顶到真地平各点，天极到天赤道各点，黄极到黄道各点，其角距都是 90° ；同样，东点 E 、西点 W 是天子午圈的极；南点 S 、北点 N 是天卯酉圈的极。

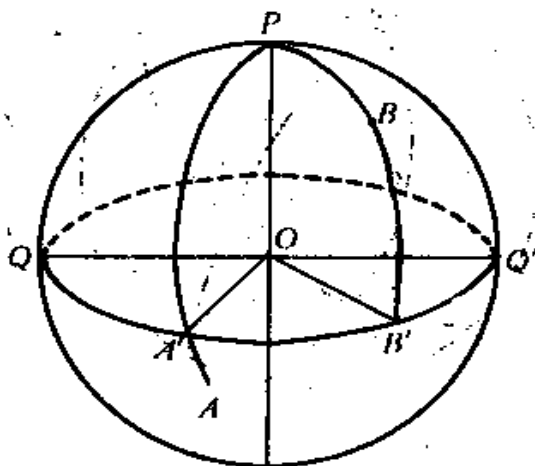


图 2.6 球面角的量度

不难证明，球面上的每个圆都有两个极，而一个极可以对应于无数个圆（它们所在的平面相互平行），但与之对应的大圆却只有一个，也总有一个。

3. 球面角 球面上两条大圆弧 $\widehat{PA}, \widehat{PB}$ 所夹的角称为“球面角”。两大圆弧的交点 P 称为球面角的顶点，而两大圆弧 $\widehat{PA}, \widehat{PB}$ 则称为球面角的边(图2.6)，显然球面角既不同于平面角，也区别于立体角。

球面角的值是这样量度的：以球面角顶点 P 为极，可作大圆 QQ' ，延长 $\widehat{PA}, \widehat{PB}$ ，分别交 QQ' 于 A', B' ，球面角 APB 可以由平面 POA, POB 所构成的二面角来量度。但更方便、更直接可由弧 $\widehat{A'B'}$ 或 $\angle A'OB'$ 来量度。

二、球面三角形

把球面上三个不同点 A, B, C 用三段大圆弧联结起来，这样所围成的几何图形称为球面三角形。这三条大圆弧 $\widehat{AB}, \widehat{AC}, \widehat{BC}$

称为球面三角形的边(图2.7)。

球面三角形是天文学中经常遇到的基本几何图形之一,有必要对其进行较详细的讨论。

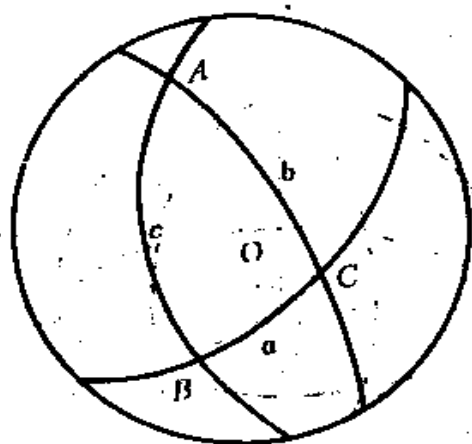


图 2.7 球面三角形

习惯上,球面三角形的三条边 $\widehat{BC}$ 、 $\widehat{AC}$ 、 $\widehat{AB}$ 常用小写的拉丁字母 a 、 b 、 c 表示。而三条边所构成的三个球面角则称之为球面三角形的角,分别用大写拉丁字母 A 、 B 、 C 表示,而且 A 角与 a 边相对, B 角与 b 边相对, C 角与 c 边相对。

球面三角形的边和角都是互相独立的,都称为“元素”。也就

是说,一个球面三角形有 6 个元素。

要判断两个球面三角形 ABC 和 $A'B'C'$ 是否全等,首先要看它们是否在同一球面上,或者所在的两个球面的半径是否相等。对于不同半径球面上的球面三角形是不可能全等的。而对于半径相同的球面上的两个球面三角形,它们全等的充要条件是满足下列之中任一条即可。

(1) 三条边——对应相等

即 $a = a'$ 、 $b = b'$ 、 $c = c'$ 。

(2) 两条边及其所夹的角对应相等

即 $a = a'$ 、 $b = b'$ 、 $C = C'$ 。

(3) 两角及其所夹的边对应相等

即 $A = A'$ 、 $B = B'$ 、 $c = c'$ 。

(4) 三只内角——对应相等

即 $A = A'$ 、 $B = B'$ 、 $C = C'$ 。

三、球面三角形边和角的基本性质

球面三角形不同于平面三角形，它们的边和角有些什么性质是必须弄清的。只有研究了它们的各种基本性质，才能进一步利用球面三角形来研究和解决天文学问题。简单说来，可以把它们重要的基本性质归纳为以下六条：

(1) 球面三角形的任两边之和必大于第三边。

$$\text{即 } a + b > c.$$

(2) 球面三角形的任两边之差必小于第三边。

$$\text{即 } a - b < c.$$

(3) 若球面三角形有两条边相等，则它们所对应的两角必然相等。反之，倘球面三角形有两个角相等，则它们所对应的两条边也必然相等。

$$\text{即 当 } a = b \text{ 时必有 } A = B; \text{ 当 } A = B \text{ 时必有 } a = b.$$

(4) 在同一球面三角形中，大的角所对应的边较长，小的角对应的边较短；反之，较长的边所对应的角也较大，较短的边对应的角较小。

$$\text{即 当 } A > B \text{ 时有 } a > b; \text{ 当 } a > b \text{ 时有 } A > B.$$

(5) 球面三角形的三条边之和必大于 0° ，小于 360° 。

$$\text{即 } 0 < a + b + c < 360^\circ.$$

(6) 球面三角形的三角之和必大于 180° ，小于 540° 。

$$\text{即 } 180^\circ < A + B + C < 540^\circ.$$

要严格证明这些性质并不难，这儿作为例子仅举其一，其余的读者可以作为练习试证之，亦可参阅附录II。

设：球面三角形 ABC 的三条边分别为 a 、 b 、 c (图2.8)。

求证： $a + b > c$

证明：分别联结球面三角形三顶点与球心， OA 、 OB 、 OC ，
显然 $OA = OB = OC = r$ 。

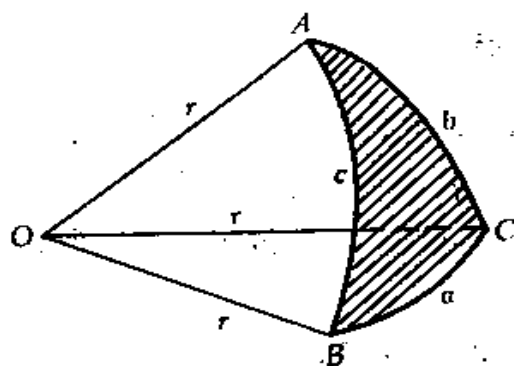


图 2.8 两边之和大于第三边

而角 $OABC$ 是一个三面角。立体几何中早已证明过：三面角中两个面角之和必大于第三角，

即：
$$\angle BOC + \angle AOC > \angle AOB.$$

在弧度制中

$$\angle BOC = a/r,$$

$$\angle AOC = b/r,$$

$$\angle AOB = c/r.$$

所以

$$\frac{a}{r} + \frac{b}{r} > \frac{c}{r}.$$

又因为

$$r \neq 0,$$

故

$$a + b > c.$$

同理可证

$$b + c > a \text{ 及 } c + a > b.$$

由此即可推理得两边之差小于第三边：

$$a > b - c, \quad b > a - c, \quad c > a - b.$$

四、球面三角形的基本公式

如上所述，球面三角形有 6 个独立元素，因此它们之间相互联系的公式很多。同样，这儿证明其中之一，其余的在本书后的附录中有其证法。

1. 边的正弦公式

球面三角形各边的正弦与其对角的正弦成正比。

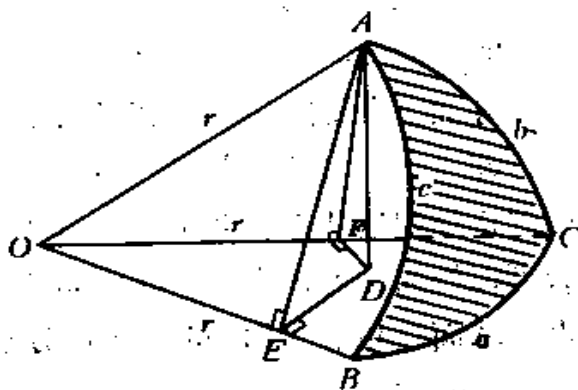


图 2.9 正弦公式的证明

即
$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} \quad (2.1)$$

证明: 联结球面三角形 ABC 顶点与球心 O , $OA=OB=OC=r$.
过 A 作 AD 垂直于平面 OBC , D 为垂足.

又作 $DE \perp OB$, $DF \perp OC$, 根据立体几何中三垂线定理, 必有 $AE \perp OB$, 及 $AF \perp OC$, 并且 $B = \angle AED$, $C = \angle AFD$.

因为:

$$\begin{aligned} \sin b &= \sin \angle AOC = AF/r, \\ \sin B &= \sin \angle AED = AD/r, \\ \sin c &= \sin \angle AOB = AE/r, \\ \sin C &= \sin \angle AFD = DF/r. \end{aligned}$$

所以:

$$\frac{\sin b}{\sin B} = \frac{AF/r}{AD/AE} = \frac{AE}{r} \cdot \frac{AF}{AD} = \frac{\sin c}{\sin C}.$$

同理可以证得:

$$\frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin a}{\sin A}.$$

2. 边的余弦公式 球面三角形任一边的余弦等于其他两边余弦的积加上这两边的正弦及其所夹角的余弦的连乘积. 以 a 边为例即是:

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \sin c \cos A. \quad (2.2)$$

其他两边的余弦公式与此完全对称, 可参见附录 II.

3. 角的余弦公式 球面三角形的任一角的余弦等于其他两角余弦积的相反数加上这两角的正弦及其所夹边的余弦连乘积.

同样仅以 A 角为例, 其他 B 角、 C 角的公式见附录 II.

$$\cos A = -\cos B \cdot \cos C + \sin B \sin C \cos a. \quad (2.3)$$

球面三角形的元素较多, 所以仅仅依靠上面三类公式往往还

不能解决所有问题，因此还有其他一些重要公式。但一般它们涉及元素较多，关系也较复杂，不易用简洁的文字来表达，故直接用数学公式表示，它们是：

4. 第一五元素公式 是表示边的正弦与角的余弦积与其他元素关系的公式：

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A. \quad (2.4)$$

如这一类的公式用不同的搭配共有 6 个。

5. 第二五元素公式 与第一五元素相对称的第二五元素公式是表示角的正弦与边的余弦积与其他元素的关系公式。同样，一套也有 6 个。

$$\sin A \cos b = \cos B \sin C + \sin B \cos C \cos a. \quad (2.5)$$

6. 四元素公式 涉及两条边、两个角之间关系的公式。同样有 6 个

$$\operatorname{ctg} A \sin B = -\cos B \cos c + \sin c \operatorname{ctg} a. \quad (2.6)$$

§ 2.3 常用的几种天球坐标系

一、一般的球面坐标系

从平面解析几何中知道，平面上任何一点都可由直角坐标系的一组坐标 (x, y) 来唯一确定，确定球面上的位置则需要用球面坐标系。例如，只要知道了某处的地理经度和地理纬度，人们便不难知道其相应的实际位置，地理坐标就是一种球面坐标系。

球面坐标系与直角坐标系也有某些相似之处：直角坐标系有两条互相垂直的 X 、 Y 轴，球面坐标系相应的有两个互相垂直的大圆， BCB' 和 ABA' (图2.10)，它们即分别相当于 OX 、 OY 轴，一般称它们为球面坐标的基本圈。两大圆的交点之一 B 也与原点 O 相当，称为球面坐标系的基本点或原点。

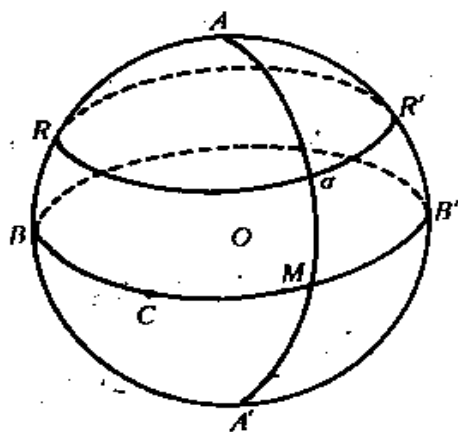
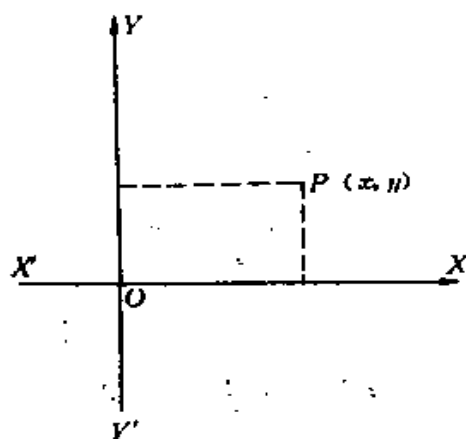


图 2.10 直角坐标和球面坐标

这样,天球上任何一点 σ 的球面坐标可用下法确定:通过 $A\sigma$ 作大圆 $A\sigma A'$,与基本圈 BCB' 交于 M ,则 $A\sigma A'$ 称为第一坐标线。

通过 σ 作平行于基本圈 BCB' 的小圆 $R\sigma R'$,与大圆 ABA' 交于 R, R' ,则 $R\sigma R'$ 称为第二坐标线。

$\widehat{BM}$ 即为 σ 的第一坐标, $\widehat{BR}$ 即为 σ 的第二坐标,因为 $\widehat{BR} \equiv \widehat{M\sigma}$,所以通常把 σ 的第二坐标取为 $\widehat{M\sigma}$,因为它们都是弧长,常用角度表示。

在天文学中,经常因研究对象和方法的不同而选取不同的天球坐标系。其实各种天球坐标系并没有什么本质的区别,不同的只是选用的基本圈、基本点或者量度的方法不同而已。最常用的天文坐标系有五种:地平坐标系、时角坐标系(第一赤道坐标系)、赤道坐标系(第二赤道坐标系)、黄道坐标系以及将在中册介绍的银道坐标系。

二、地平坐标系

在实用天文学中,包括航海、航空、大地测量、人造地球卫

星观测等部门中，广泛地使用着这种地平坐标系，它的特点是简便、形象、直观。

地平坐标系的基本圈是真地平，基本点(原点)一般取作南点 S (也有选用北点 N 的)，这样，天顶 Z 便是基本圈的极。所有经过 Z 的大圆都与真地平相垂直，并称为地平经圈。

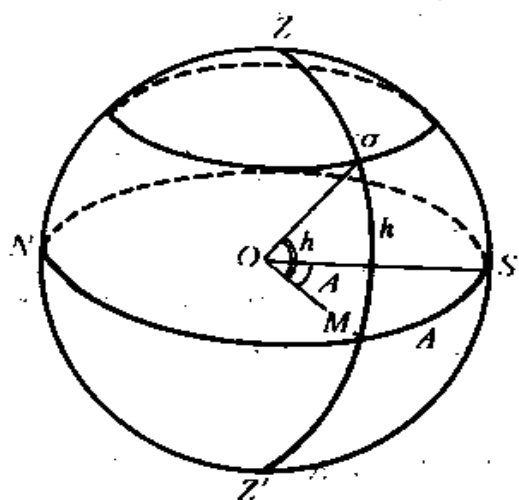


图 2.11 地平坐标系

对于任一天体 σ ，则可由它的地平经度和地平纬度或者天顶距 z 唯一确定，通过 σ 作地平经圈 $Z\sigma Z'$ 交真地平于 M (图2.11)， $\widehat{SM}$ 称为地平经度或方位角，记作 A 。 $\widehat{\sigma M}$ 称为地平纬度或地平高度，记作 h 。

地平经度 A 一般规定从南点 S ，按顺时针方向 $0^\circ-360^\circ$ 量度，也有的由 S 分别向西、东 $0^\circ-\pm 180^\circ$ 计量，向西为正，向东为负。地平纬度 h 则从真地

平向南、北二边分别量度，真地平向天顶 $0^\circ-90^\circ$ ，真地平到天底 $0^\circ-90^\circ$ 。对于离天顶较近的天体，人们喜欢用天顶距 z 即 $\widehat{Z\sigma}$ 来代替地平纬度 h ，显然有：

$$z = 90^\circ - h, \quad (2.7)$$

须注意的是 z 的量度方法是从天顶到天底 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

地平坐标系虽然简便、直观，但也有许多局限和不便，它有强烈的“地方性”。对于同一天体，它的坐标 (A, h) 不仅随观测者在不同地点而异，即使在同一观测点，同一天体的坐标仍然随着时间而不断变化。而且，这种变化不是简单的线性函数关系，这使它的用途受到相当的局限。

三、时角坐标系(第一赤道坐标系)

针对地平坐标的缺陷,人们引入了以天赤道为基本圈的时角坐标系,过去亦称第一赤道坐标系。

时角坐标系的基本圈是天赤道 QQ' , 原点是天赤道与子午圈的交点之一——近南点的 Q' , 显然基本圈的极正是北天极 P 。

通过天体 σ 和北天极 P 作大圆 $P\sigma P'$, 交 QQ' 于 T , $P\sigma P'$ 称为时圈, 也称赤经圈。它也是天体的第一坐标线。

$\widehat{QT}$ 即为天体 σ 的第一坐标, 称为时角, 记作 t 。它一般从 Q' 顺时针方向 $0^h \sim 24^h$, (或 $0^\circ \sim 360^\circ$) 计量, 但也有人从 Q' 分别向二边 $0^h \sim \pm 12^h$ (或 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$) 计量, 并规定向西为正, 向东为负。

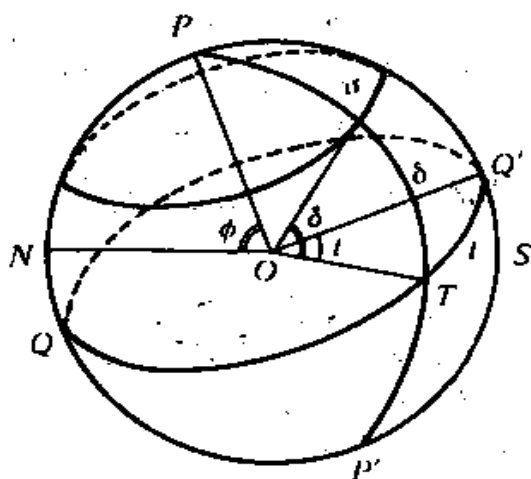


图 2.12 时角坐标系

$\widehat{T\sigma}$ 为天体 σ 的第二坐标, 称为赤纬, 记作 δ 。它由天赤道分别向南、北计量(与地理纬度相类似), 规定天赤道向北 $0^\circ \sim 90^\circ$, 天赤道向南 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

同样对于北天极附近的星, 人们有时用极距 $\widehat{P\sigma}$ (记作 p) 来代替赤纬 δ 。

$$p = 90^\circ - \delta \quad (2.8)$$

并且 p 从北天极开始 $0^\circ \sim 180^\circ$, 到南天极 P' 。

在时角坐标系中, 任何天体的第二坐标即赤纬 δ 不因观测的时间、地点而改变。对于同一地区(或同一经度)的观测者而言, 一个天体的时角随时间而同步增大。与地平坐标系相比, 这有明显的方便之处。但是, 因为各地的子午圈各不相同, 基本点 Q' 也是随

地而异的,所以同一天体的第一坐标时角 t 仍随地点不同而不同。

从图2.12还可看出,任何地方的北天极的地平高度 h_p ,正好就是那儿的地理纬度 φ ,即

$$h_p = \varphi \quad (2.9)$$

这是一个十分有用的性质,给大地测量带来了方便。

四、赤道坐标系(第二赤道坐标系)

为了进一步解决时角坐标系中第一坐标随地点变化的问题,人们重新选取了原点,即把基本点选在春分点 Υ 上。因为春分点本身也在作周日运动,它相对于天体而言,基本上是静止不动的。当然,在量度方法上也作了相应的改变。

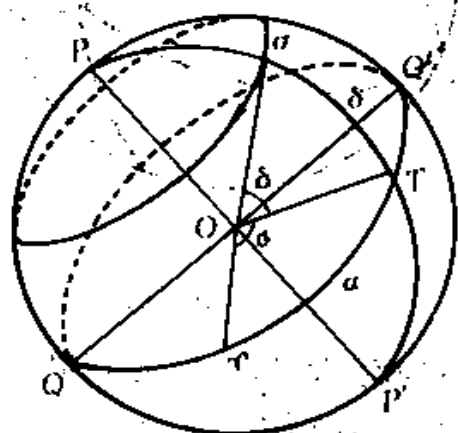


图 2.13 赤道坐标系

天体 σ 的第一坐标为 $\Upsilon\sigma$ 称为赤经,记作 α 。它由春分点开始沿逆时针方向(即与周日运动相反方向) $0^\circ-360^\circ$ (或 0^h-24^h)度量。特别要指出的是,赤经没有负值(图2.13)。

天体 σ 的第二坐标即 σT ,与时角坐标一样仍叫赤纬,仍记为 δ 。

如上所述,因为春分点本身也在作周日运动,所以在赤道坐标系中,任何天体的坐标 (α, δ) 都是固定的,不会因观测者在不同地点,或在不同时间内观测而变化。如天鹰 α (牛郎星) $\alpha = 19^\circ 46'$, $\delta = +8^\circ 36'$,大犬 α (天狼星) $\alpha = 6^\circ 41'$, $\delta = -16^\circ 35'$ 等等。

① 严格讲来,春分点 Υ 在天球上并不固定,它每年都有微小的变化(岁差),所以说它不变仅是指有限的时间间隔及一定的精度范围内而言的。

春分点 Υ 的时角 t_{Υ} ($Q'\Upsilon$) 也随时间而增加, 显然应有

$$t_{\Upsilon} = t_{\sigma} + \alpha_{\sigma} = l + \alpha \quad (2.10)$$

即春分点的时角等于任何天体的时角与其赤经之和。

五、黄道坐标系

由于太阳和众行星以及月球始终在黄道上或黄道附近运行, 因此使用黄道坐标系来研究太阳系内天体的运动问题是十分自然的。事实上, 西方最早使用的不是赤道坐标系而是黄道坐标系。而且今天, 这种坐标系仍有广泛的应用。

不言而喻, 黄道坐标系中的基本圈是黄道。其原点仍然取春分点 Υ (图2.14)。

过天体 σ 和北黄极 K 作大圆 $K\sigma K'$ 交黄道于 L , $K\sigma K'$

称为黄经圈, ΥL 即为天体的第一坐标黄经, 记作 λ , 量度方法与赤经相类似。

有几个特殊点的黄经应当记住: $\lambda_{\rho} = 90^{\circ}$; $\lambda_{\rho'} = 270^{\circ}$, $\lambda_{\sigma} = 90^{\circ}$, $\lambda_{\sigma'} = 180^{\circ}$, $\lambda_{\kappa} = 270^{\circ}$, $\lambda_{\Upsilon} = 0^{\circ}$ 。

过 σ 作平行于黄道的小圆 $R\sigma R'$ ——黄纬圈, σL 称第二坐标黄纬, 记作 β 。从黄道向北黄极 0° — 90° , 从黄道向南黄极 0° — -90° 。

天体的黄道坐标 (λ, β) 与 (α, δ) 一样, 均不随时间、地点而变。

对于这四种坐标系可以简单总结如表2.1。

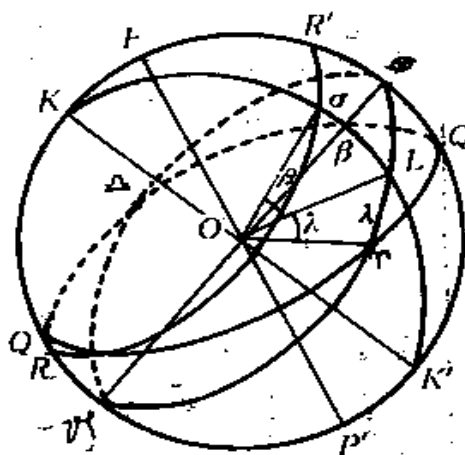


图 2.14 黄道坐标系

表 2.1 四种天球坐标系

	地平坐标系 (A, h)	时间坐标系 (t, δ) (第一赤道坐标系)	赤道坐标系 (α, δ) (第二赤道坐标系)	黄道坐标系 (λ, β)
基 本 图	真地平 (NS)	天赤道 (QQ')	天赤道 (QQ')	黄道 (TU)
原点(基本点)	南点 (S)	天赤道与天子午圈近 S 的交点 Q'	春分点 (γ)	春分点 (τ)
第一坐标 及计量方法	方位角 (A)。南 点 (S) 起, 顺时 针 $0^\circ - 360^\circ$	时角 (t)。自 Q' 起按顺 时针 $0^h - 24^h$ (或 $0^\circ - 360^\circ$)	赤经 (α)。自春分点 (τ) 起反时针计量 $0^\circ - 360^\circ$ (或 $0^h - 24^h$)	黄经 (λ)。自春分 点 (τ) 起反时针计 量 $0^\circ - 360^\circ$
第二坐标 及计量方法	高度 (h)。自真 地平分别向南顶 及天底计量 $0^\circ - \pm 90^\circ$	赤纬 (δ)。自天赤道向北天极计量时 $0^\circ - +90^\circ$ 自天赤道向南天极计量时 $0^\circ - -90^\circ$		黄纬 (β)。自黄 道向北黄极 $0^\circ -$ $+90^\circ$, 自黄道向 南黄极 $0^\circ - -90^\circ$
坐标与时间关系	A, h 都变化	δ 不变, t 随时间而 均匀增加	(α, δ) 不变	(λ, β) 不变
坐标与地点关系	A, h 都变化	δ 不变, t 随地点而变	(α, δ) 不变	(λ, β) 不变

六、天球坐标的变换公式

在实际天文工作中,经常需要根据具体情况使用不同的天球坐标系,而一般的天文年历或者星表中都只给出天体的 (α, δ) ,因此常需要进行坐标变换。天文坐标系的变换通常都利用“天文三角形”及基本的球面三角公式(如余弦、正弦、五元素公式等)。

1. 地平坐标与时角坐标的互换 即已知天体的 (A, h) 求相应的 (t, δ) 或反过来从 (t, δ) 求天体的 (A, h) 。根据图2.15a可得:

$$\left. \begin{aligned} \sin \delta &= \sin \varphi \sin h - \cos \varphi \cos h \cos A, \\ \cos \delta \sin t &= \cos h \sin A, \\ \cos \delta \cos t &= \sin h \cos \varphi + \cos h \sin \varphi \cos A. \end{aligned} \right\} (2.11)$$

其中 φ 为观测地的地理纬度,所以要用三个公式是为了确定 t 的象限问题。

已知 t 要求赤道坐标系中的赤经则可用(2.10)式。

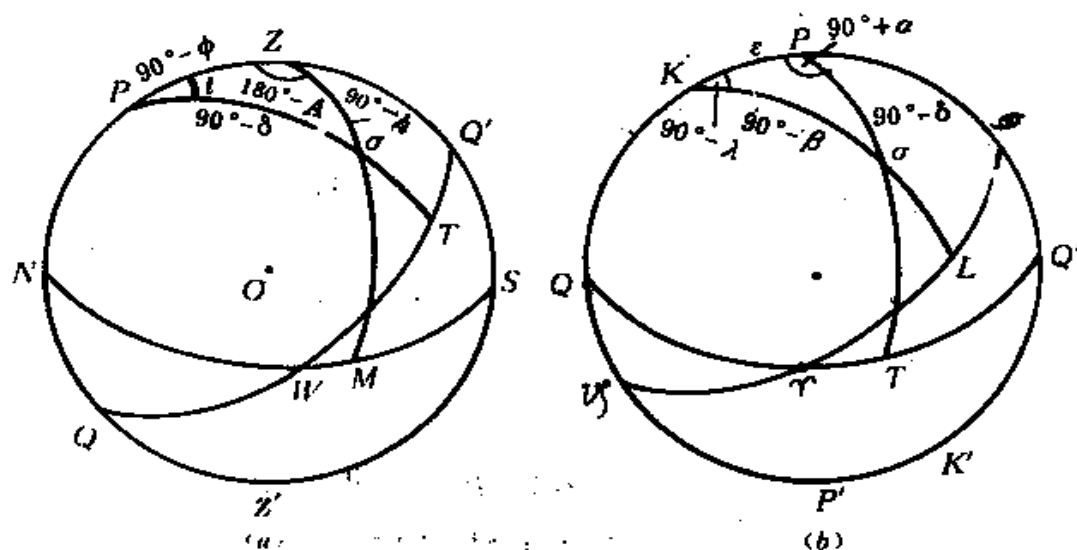


图 2.15 坐标变换中的天文三角形

(a) 地平坐标与时间坐标互换 (b) 赤道坐标与黄道坐标互换

反过来,已知 (t, δ) 求 (A, h) 时,则可用(2.12)一组公式:

$$\left. \begin{aligned} \sin h &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \\ \cos h \sin A &= \cos \delta \sin t, \\ \cos h \cos A &= -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos t. \end{aligned} \right\} (2.12)$$

2. 赤道坐标与黄道坐标的互换 即已知天体的 (α, δ) 求相应的 (λ, β) ，或反过来，已知 (λ, β) 求相应的 (α, δ) 。

从图2.15 b 中的天文三角形不难得到两组公式：

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \cos \varepsilon \sin \delta - \sin \varepsilon \cos \delta \sin \alpha, \\ \cos \beta \cos \lambda &= \cos \delta \cos \alpha, \\ \cos \beta \sin \lambda &= \sin \delta \sin \varepsilon + \cos \delta \cos \varepsilon \sin \alpha. \end{aligned} \right\} (2.13)$$

其中 ε 为黄赤交角，现阶段可取 $\varepsilon = 23^\circ 27'$ 。

$$\left. \begin{aligned} \sin \delta &= \cos \varepsilon \sin \beta + \sin \varepsilon \cos \beta \sin \lambda, \\ \cos \delta \cos \alpha &= \cos \beta \cos \lambda, \\ \cos \delta \sin \alpha &= -\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon \sin \lambda. \end{aligned} \right\} (2.14)$$

例如，北天极 P 与南天极 P' 的黄道坐标可从(2.13)式得到：

$$P: \begin{cases} \lambda_P = 90^\circ, \\ \beta_P = 66^\circ 33'. \end{cases} \quad P': \begin{cases} \lambda_{P'} = 270^\circ, \\ \beta_{P'} = -66^\circ 33'. \end{cases}$$

而北黄极 K 与南黄极 K' 的赤道坐标可从(2.14)式得：

$$K: \begin{cases} \alpha_K = 270^\circ = 18^h, \\ \delta_K = 66^\circ 33'. \end{cases} \quad K': \begin{cases} \alpha_{K'} = 90^\circ = 6^h, \\ \delta_{K'} = -66^\circ 33'. \end{cases}$$

至于黄道坐标与地平坐标的互换则要联合运用 (2.10) — (2.14) 式。

§ 2.4 天体的周日视运动和 星空的周年变化

一、天球的旋转

人们从直观上总觉得所有天体都有东升西落的运动，而且它

们很有规律，每天重复出现。太阳每天早晨从东方升起，傍晚在西方降落，天天如此，年年如此。星星和月亮也有类似的周日运动。因此，人们以为天球在绕着天轴不停地作自东向西的顺时针方向的旋转。直到哥白尼的日心说确立后，人们才知道原来这仅是一种视现象，是地球自转运动的反映。

天体的周日视运动是十分明显的。在晴朗无月之夜，只要支起一架照相机对准北天极进行长时间(如一、二小时)的曝光，就可以得到天体视运动的轨迹——一个个同心圆的圆弧(图2.16)。所以人们把天体周日视运动的轨迹称之为周日平行圈。

北天极只是天球上的基本点，并没有什么明显的标志，不过在现阶段它与小熊 α (中国星名有二：勾陈一或北辰)相距还不到



图 2.16 天体的周日视运动圈

1°。因此肉眼看来它似乎不参加周日运动，好象它就是所有天体周日平行圈的圆心。正因为这样，人们称小熊 α 为北极星。目前一般都以它作为北天极的标志。

显然，所有天体(除了 $\delta = 0^\circ$ 的天体外)的周日平行圈都是平行于天赤道的小圆，即赤纬圈。天体离北极星越近(赤纬较大)，则所画出的周日平行圈越小，北极星所画的圈肉眼几乎无法辨认。反之，天体越接近赤道(赤纬越小)，它们所画出的周日平行圈越大。所以，天赤道即是最大的周日平行圈。

二、不同纬度处天体的周日视运动

1. 极地($\varphi = \pm 90^\circ$) 以北极为例，在北极地区的观测者看来，北天极即为天顶 Z ，天赤道与真地平亦相重合。这时，所有天体的周日平行圈都毫无例外地与真地平相平行(图2.17a)，它们的地平高度正好与其赤纬相等。所以，任何天体的地平高度 h 始终不变。这样便不难理解，在北极的观测者看来，所有 $\delta > 0^\circ$ 的天体都永不下落，而所有 $\delta < 0^\circ$ 的南半天球的天体则永不上升。对于太阳而言，在从春分(3月21日)到秋分(9月23日)的半年时间内，太阳始终不下落，而在另外的半年中，北极地区则是漫长的不明长夜。南极地区的情况类同，但时间上相差半年。

2. 赤道($\varphi = 0^\circ$)，从图2.17b可看出在赤道上的观测者看来，北天极 P 已在真地平上，且与北点重合，南天极与南点 S 重合。而天顶 Z 却在天赤道上，或者反过来说，天赤道相当于经过东西点的卯酉圈。所以，所有天体的周日平行圈都垂直于地平，它们12小时在地平之上，12小时在地平之下。对于 $\delta > 0^\circ$ 的天体从东北方向升起，西北方落下，相反 $\delta < 0^\circ$ 的天体则升起于东南，下落于西南。

3. 一般地区($\varphi \neq 0^\circ, \pm 90^\circ$) 以北半球地理纬度 φ 处为例：北天极的地平高度 $h_p = \varphi$ ，而天体的周日平行圈与真地平的倾角

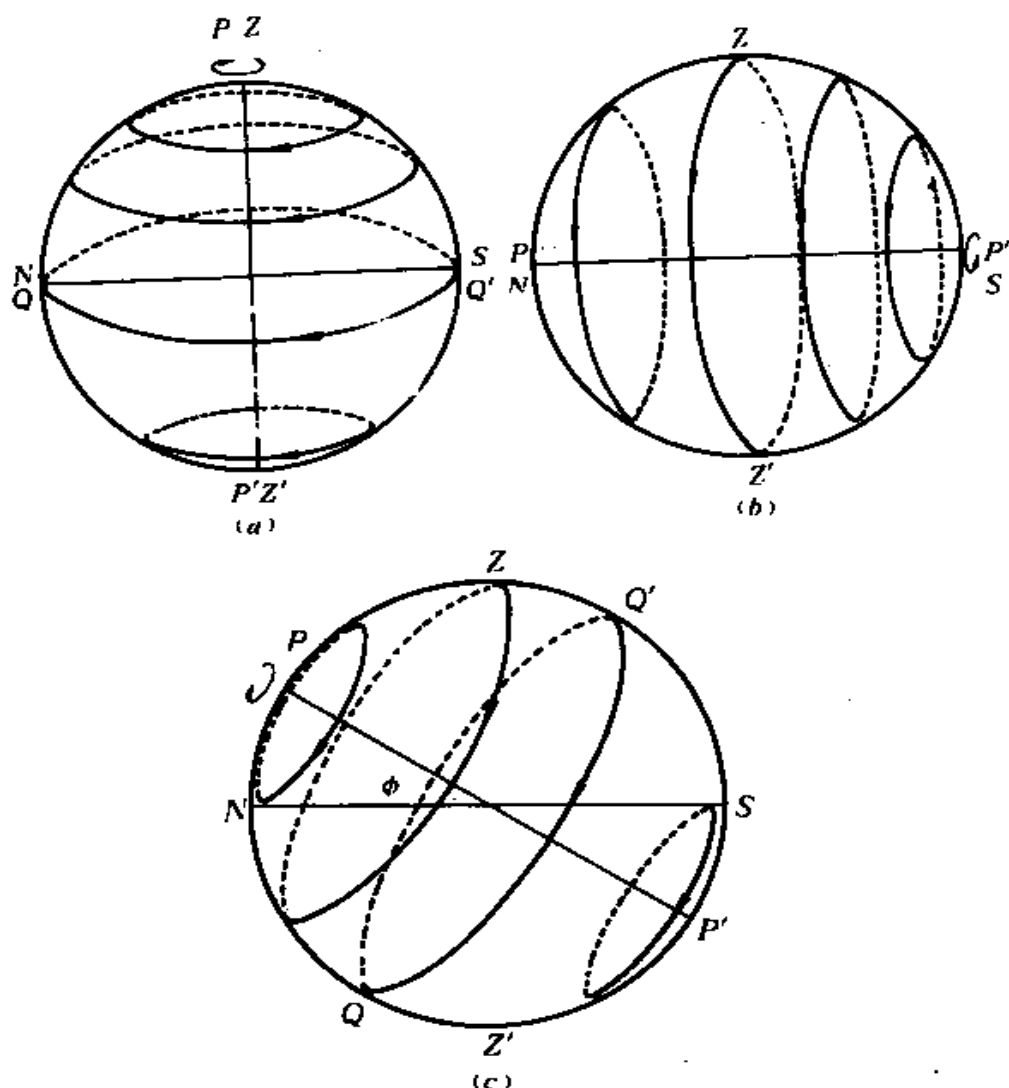


图 2.17 不同纬度处所见的天体周日视运动情况

(a) 极地: (b) 赤道 (c) 一般地区 ($\varphi \neq 0, \pm 90^\circ$)

为 $90^\circ - \varphi$ 。这时, 除了天赤道上的天体 ($\delta = 0^\circ$) 周日平行圈是大圆、因而12小时在地平之上, 12小时在地平之下外, 其余的天体都沿着小圆运动。当 $\delta > 0^\circ$ 时, 大半个小圆在地平之上, 故可观测的时间长于12小时, 反之 $\delta < 0^\circ$ 的天体在地平上的时间短于12小时。

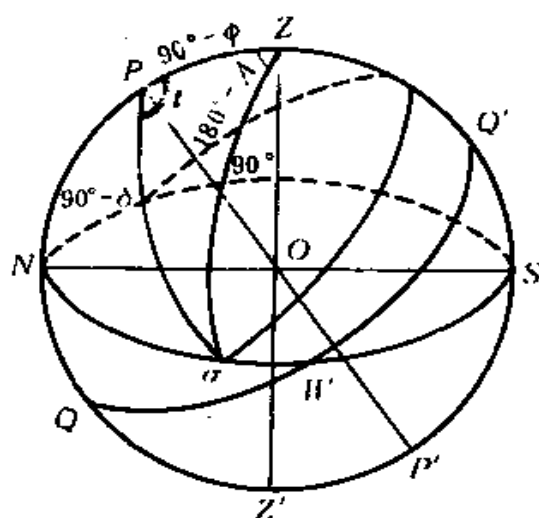
显然对于纬度为 φ 的地方, 只要天体的 $\delta > 90^\circ - \varphi$, 它就永不下落, $\delta < \varphi - 90^\circ$ 的天体则永不上升。如南京地区 $\varphi = 32^\circ 04'$,

则 $\delta = 57^{\circ}56'$ 的恒星永远在地平线上, 而 $\delta = -57^{\circ}56'$ 的恒星则没有观测的可能。

三、天体的出没和中天

1. 天体的出没 利用已学得的知识, 可以来讨论天体出没的

时间和出没的方位问题。因为天体出没时必有 $h = 0^{\circ}$, 或者 $z = 90^{\circ}$, 以下落为例, 天文三角形 $PZ\sigma$ (图2.18) 中的几个量为:



$$\widehat{Z\sigma} = z = 90^{\circ},$$

$$\widehat{P\sigma} = 90^{\circ} - \delta,$$

$$\widehat{PZ} = 90^{\circ} - \varphi,$$

$$\angle PZ\sigma = 180^{\circ} - A,$$

$$\angle ZP\sigma = t,$$

天体的 α 、 δ 是可以从《天

文年历》有关的星表或书籍中

查得。这样, 在已知 φ 后利用 (2.2) 式便不难求得天体下落的时间 t_w ¹ 和方位角 A_w 。

$$\left. \begin{aligned} \cos z &= \cos (90^{\circ} - \varphi) \cos (90^{\circ} - \delta) \\ &\quad + \sin (90^{\circ} - \varphi) \sin (90^{\circ} - \delta) \cos t, \\ \cos (90^{\circ} - \delta) &= \cos (90^{\circ} - \varphi) \cos z \\ &\quad + \sin (90^{\circ} - \varphi) \sin z \cos (180^{\circ} - A). \end{aligned} \right\} (2.15)$$

用 $z = 90^{\circ}$ 代入 (2.15) 式, 稍加整理则得:

$$\left. \begin{aligned} \cos t_w &= -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta, \\ \cos A_w &= -\sin \delta / \cos \varphi. \end{aligned} \right\} (2.16)$$

1 这儿与 (2.15) 式中的 t 实际上是天体的时角, 它并不就是日常生活中用的时间。然而, 在学习了 § 2.5 后就可由 t 得到真正的时间了。

至于天体上升的时间 t_E 和方位角 A_E ，可由(2.17)式求得：

$$\left. \begin{aligned} t_E &= -t_W, \\ A_E &= 360^\circ - A_W. \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

2. 天体的中天 天体通过子午圈叫“中天”。显然，所有天体的周日平行圈与子午圈都有两个交点 σ_1, σ'_1 。对于在 P 以南的一个交点 σ_1 称为上中天，这是天体所能达到的最高位置。 σ'_1 则称为下中天，即是天体的最低位置，有些天体下中天时在地平之下，这时人们就无法观测。

中天是天文学中的重要概念，天体上中天时，方位角与时角均为 0° (图2.19)。即对于 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ ， $A_E = t_E = 0^\circ$ ，从图2.19还不难看出：

$$h_E = \widehat{SQ} = \widehat{SQ'} + \widehat{Q'\sigma} = 90^\circ - \varphi + \delta, \quad (2.18)$$

对于下中天 $\sigma_1, \sigma'_2, \sigma'_3, \sigma'_4$ 有：

$$\left. \begin{aligned} A_F &= t_F = 180^\circ, \\ h_F &= \widehat{N\sigma'} = \widehat{Q\sigma'} - \widehat{NQ} \\ &= \delta - (90^\circ - \varphi) = \delta + \varphi - 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

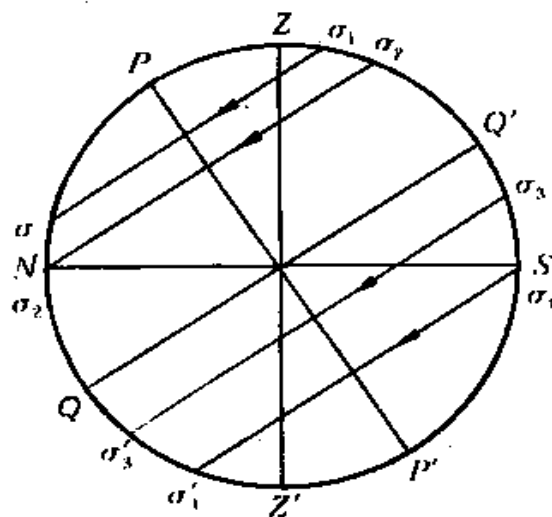


图 2.19 天体的中天

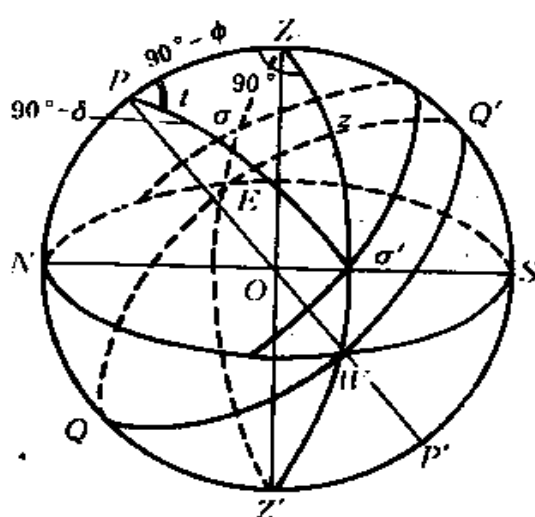


图 2.20 天体过卯酉圈

3. 天体经过卯酉圈 卯酉圈是通过天顶东点(E)、西点(W)的大圆, 对于已知(α, δ)的天体 σ , 在地理纬度 φ 确定的地点, 则也有一个天文三角形 $PZ\sigma'$ (图2.20), 并有 $\widehat{PZ} = 90^\circ - \varphi$, $\widehat{Z\sigma'} = z$, $\widehat{P\sigma'} = 90^\circ - \delta$, $\angle PZ\sigma' = 90^\circ$, $\angle ZP\sigma' = t$

所以这是一个直角球面三角形。利用直角球面三角形的公式(见附录公式(II. 20)), 可得经过卯酉圈西部的时间 t_1 和地平高度 h_1

$$\left. \begin{aligned} \cos t_1 &= \operatorname{tg} \delta / \operatorname{tg} \varphi, \\ \sin h_1 &= \sin \delta / \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

同样, 天体经过卯酉圈东部的时间 t_2 , 及地平高度 h_2 则可以从(2.21)式求出

$$\left. \begin{aligned} t_2 &= -t_1, \\ h_2 &= h_1. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

四、星空的周年变化

与地球的自转运动造成了天球旋转和天体的周日视运动同样的道理, 地球绕太阳的公转运动也使地球上的人们在不同日子里看到的星空景象各不相同。反映在天球上, 那就是太阳不同于一般恒星, 它除了有顺时针方向(自东向西)的周日运动外, 还同时在沿黄道作逆时针方向(自西向东)的运动, 这种恒星所没有的运动是一种周年运动。

如图2.21a, 地球在黄道面上沿着椭圆轨道 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 绕太阳公转, 在 E_1 时, 太阳投影到天球上是 S_1 , 这样, S_1 方向上的所有星星将与太阳一起升落, 即是只有白天时间才在地球上空, 因此人们将看不见它们。同样, 在 E_3 时, 太阳在天球上的投影是 S_3 , 这时 S_3 方向上的星座将无法观测, 因此一年四季中, 人们看到的星空的景象是完全不同的。例如夏夜纳凉时, 银河迢

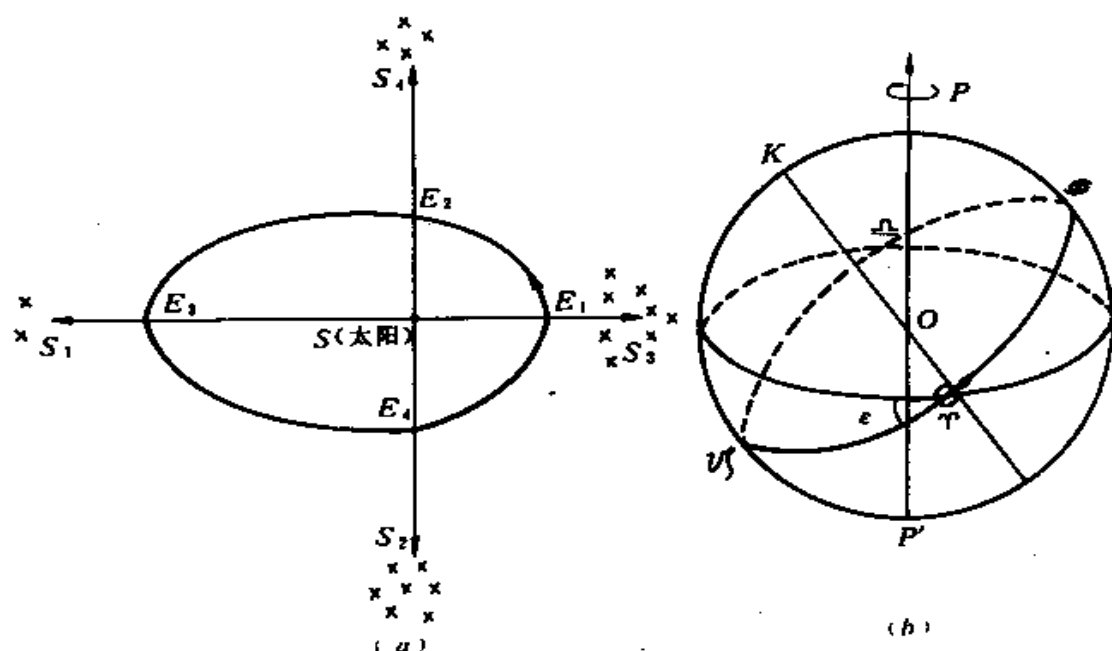


图 2.21 地球的公转运动造成了星空的周年变化

(a) 地球绕太阳的公转运动 (b) 太阳在天球上的周年和周日视运动

迢，南天中则有一只巨大的蝎子，中间一颗红星(天蝎 α ，中名叫心宿二)熠熠生辉；冬天星空最令人瞩目的则是雄伟的猎户星座和最明亮的恒星——大犬 α (天狼星)；在春天的夜空中，称霸的则是一匹威风凛凛的雄狮……，当然，严格讲来，星空的景象是每月甚至每天(同一时刻观测)都是有所区别的。

表 2.2 太阳在二分点和二至点的赤道坐标

	赤经($\alpha_{\odot}$)	赤纬($\delta_{\odot}$)
☐ 春分(3月21日)	0 ^h	0°
● 夏至(6月22日)	6 ^h	23°27' (= ϵ)
◐ 秋分(9月23日)	12 ^h	0°
☾ 冬至(12月22日)	18 ^h	-23°27' (= - ϵ)

在天球上看来(图2.21b),太阳每年沿着黄道从 γ 、 ϕ 、 ψ 、 ω 再回到春分点 γ (回归年正是这样定义的),所以太阳的周年运动方向与周日运动方向正相反。由此可以推知,太阳连续二次中天的时间应比天球自转周期略长一些。

记住二分点和二至点的太阳赤道坐标值是非常有用的(表2.2)。

§ 2.5 时间及其计量

一、时间的本质

时间的重要性是不言而喻的。古往今来,政治家、思想家、哲学家、科学家关于时间的名言警句比比皆是,有些至今还可作为我们的座右铭。马克思也说过:“一切节省,归根到底都归结为时间的节省。”

然而时间的本质是什么?或者说,什么是时间?这是一个曾经困惑人们多少年的重大问题。对这样一个深刻问题的回答,不仅要求人们作出科学的解释,还需要从哲学上加以阐明。不少人认为探讨时间的本质本身是一个重大的哲学问题。事实上,这的确历来是唯心主义与唯物主义两大哲学阵营长期争论的重大课题之一。难怪一些研究过时间的人会发出这样的哀叹:“时间是什么,不问谁都明白,一问谁也说不清楚。”这表明人们需要对时间作深入的研究。

远在古代希腊时代,柏拉图便认为空间是一个早已存在着的框架,宇宙便装在其中,而时间则是从宇宙中产生的。他强调说时间是“运动着的永恒的形象”。随着十七世纪科学革命的发展,时间观念的重要性与日俱增,使得哲学家们不得不努力探讨其本质问题。当时的代表人物是德国唯心主义哲学家、二元论的鼻祖康

德。康德的结论是：时间不是外部客观事物的特征，而只是人们主观对客观存在的一种感受，是人类本能的一种表现形式。

作为科学家对时间的论述，最有权威及影响的是牛顿提出的著名的绝对时间和绝对空间。他在1687年出版的传世名著《自然哲学的数学原理》中，曾对时间有过一个著名的定义：“绝对的、真实的数学时间，就其自身及其本质而言，是永远均匀地流动的，它不依赖于任何外界事物。”他把空间想象为一个大的三维容器（箱子），而把时间比作一条一维的几何直线，各个瞬间的时间就可与几何直线上的点互相对应起来。牛顿也承认，可以根据它来精确测定时间的那种理想的均匀流动在现实世界上或许并不存在。但他强调，从原则上讲这种理想的时间尺度是应当有的，至少理论上是可以存在的。

牛顿的这种时空观正好与人们的常识互相吻合。加上他那巨大的声望，使得他的观点有着极其深远而广泛的影响。在爱因斯坦以前，人们普遍认为绝对时间以均匀的速度流去，与任何事物无关。即使宇宙空间内一无所有，时间还是在均匀地流着。因而认为一个独一无二、普遍适用并不依赖于其他任何事物的时间体系是的确存在的。

二十世纪，爱因斯坦提出了相对论，对牛顿的这种绝对时空观点提出了科学的挑战。他指出：时间并不能孤立存在，而与空间有关。两个事件之间的时间间隔也不是固定不变的，其长短与观察者处于什么运动状态有密切的关系，甚至在一定的环境条件下，连两个事件的时间顺序也与观察者有关。

辩证唯物主义的时间观认为：时间是建立在物质的运动和变化的基础上的，时间和空间都是物质存在的基本形式，物质的运动与变化永远是在时间和空间中进行的。因此，如果脱离了物质，脱离了物质的运动和变化，时间和空间都将是毫无意义的。

二、计时仪器

与测量长度需要尺，称衡重量需要秤一样，计量时间也要有其标准的“原器”——有规律的、均匀的、周而复始的物质运动。人们不可能造出时间的“标准原器”这是与长度和重量的原器根本不同之处。

还在原始蒙昧时期，即使还没有发明文字，人们总能感到寒来暑往的四季循环，光明黑暗的昼夜交替，实质上这正是地球的公转运动和自转运动的反映。古人不自觉地运用了“年”、“日”作为时间单位，都在一定程度上体现了时间的本质所在。

通过对太阳的周年运动或者星空的变化，可以知道年的更替。而从东升西落的天体的周日运动或者日影的长度、方位变化也不难测定一日中的时间。人类最早的天文仪器——圭表和日晷就是最原始的钟表。当然在那时，日晷或者漏壶（用滴水测定时间的一种古代计时仪）只能使人得知大致的时间概念。远古的原始人“日出而作、日没而息”，知道大致的时间就满足生产和生活的需要了。

机械钟的发明不仅使人们能够获得比较准确的时间，而且也使人类对于时间的均匀性、连续性有了新的认识，从而推动了人们对时间本质的研究。机械钟使得时间可以从人类的活动中分离出来，并且帮助人们建立独立的科学世界的信念。值得指出的是世界上第一台可以称得上机械钟是中国制造的。这就是宋代天文学家苏颂、韩公廉经过六年时间的努力，于1092年制成的“水运仪象台”^①（图2.22）。

十七世纪中叶，荷兰物理学家、天文学家惠更斯（C. Huygens）把伽利略发现的悬摆等时性原理用到机械钟上，使得计时进入精

① 这是一架独具匠心的天文仪器，它的最上面部分是用以天文观测的浑仪，中间是表现天象的浑象（类似天球仪），下层则是设计巧妙的报时装置和动力系统，整个系统以水流为动力，已经使用了擒纵器，故水可循环使用。

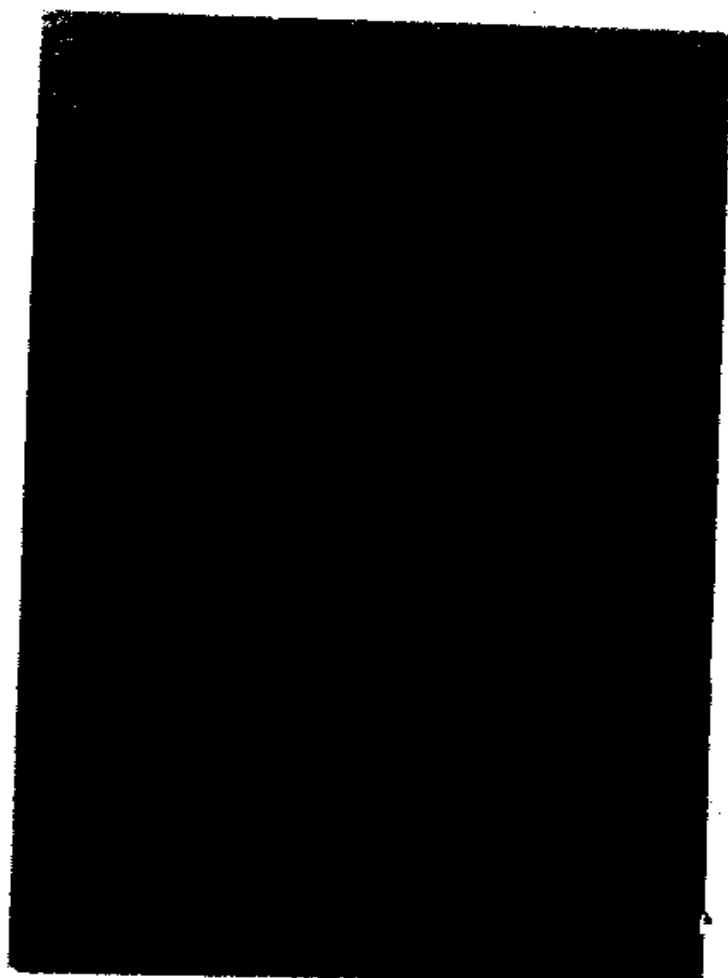


图 2.22 世界上第一台机械钟——水运仪象台

确化的时代。经过人们二、三百年的不断改进，天文台曾经使用过的最好的天文摆钟——雪特摆钟——达到每天误差仅千分之几秒的精确度。

1929年发明的石英钟使人们发现，原来人们用作时间标准的均匀运动——地球自转，并非真是均匀的。除了它因潮汐摩擦作用在长期变慢（目前变慢的速度是每昼夜在一世纪中增长0.0016秒）外，还有些非常微小的、多种原因引起的复杂的周期性变化和不规则变化。

科学技术的飞速发展使人们对时间精度提出更加精确的要

求。原子钟于1949年应运而生。它是根据原子能级之间的跃迁所发射或吸收的电磁波的频率来决定的，与宏观的地球运动没有直接的关系。由于原子的能级是十分稳定的，基本上不受任何外界物理条件的影响，所以其发射或吸收的电磁波的频率也是稳定不变的。基于这种原理所造出的原子钟精确度便达到了无与伦比的程度。现代世界上最好的大型铯原子钟的走时已达到五百万年只差一秒的精确度。除了有极高的准确度、稳定度等优点外，原子钟还有极好的复制性，即一台原子钟从这次开机到另一次开机或者两台原子钟所指示的时间，可以完全相同。

三、几种时间计量系统

在有了计时仪器之后还有两个必须解决的问题：一是时间的起算点，只有明确了起算点，才能说明某一事件究竟发生在什么时刻。第二是如何计算时间的间隔？即要求有一种标准单位，以唯一确定两事件之间的时间间隔究竟是多少。各种不同的时间计量系统，实质上就是在这两点上互有区别而已。

1. 恒星时(ST) 以春分点作为基本参考点，由它的周日视运动所确定的时间即为恒星时。因此恒星日的定义是春分点 γ 连续两次上中天的时间间隔。

不言而喻，春分点的周日视运动是地球自转的反映，在过去很长的时期内，人们都以为地球自转是十分均匀而稳定的运动，是理想的时间标准。1恒星日划分为24恒星小时，1恒星小时=60恒星分，1恒星分又分成60恒星秒。

恒星时的起点是春分点 γ 的上中天时刻，因此恒星时在数值上等于春分点的时角，即有：

$$S = \tau \quad (2.22)$$

然而，春分点仅是天球上的一个假想点，无法直接观测。因此，恒星时总是通过观测恒星测得的，因为从图2.23不难得到：

$$S = t_* + \alpha_* = t + \alpha \quad (2.23)$$

当恒星上中天时, (2.23)式变为:

$$S = \alpha_* \quad (2.24)$$

由此可知, 一个地方的恒星时正好等于上中天恒星的赤经。(2.24)式是有广泛用途的公式。

当然严格讲来, 由于岁差及章动 (§ 13.4) 的影响, 春分点 τ 在天球上的位置也是在逐年变化的, 因此恒星的赤道坐标 (α, δ) 亦每年均有微小变化。所以恒星时实质上还有个“历元”——即要标明是什么时候的春分点问题。

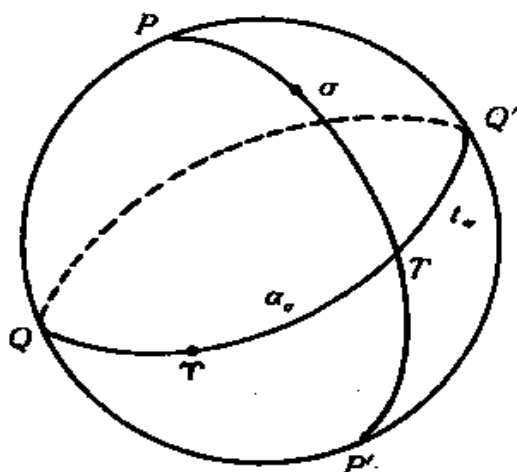


图 2.23 通过观测恒星来确定恒星时

2. 真太阳时 太阳视圆

面中心连续二次上中天的时间

间隔称为真太阳日。同样有 1 真太阳日 = 24 真太阳小时, 1 真太阳小时 = 60 真太阳分, 1 真太阳分 = 60 真太阳秒等关系。显然真太阳时把基本参考点定为真太阳的视圆面中心, 真太阳时就是其时角 $t_\odot$, 但为了照顾生活习惯, 实际上把真太阳时定为: $m_\odot = t_\odot \pm 12^h$ 。亦可理解为起点定在真太阳的下中天时刻。

真太阳的视运动是地球自转及公转运动的共同反映, 由于地球的公转轨道是椭圆, 它的公转速度不是匀速的, 而且公转轨道面(黄道面)与天赤道并不重合。这两个原因使得真太阳日的长度天天都不相同, 最长的真太阳日(12月23日前后)与最短的真太阳日(9月13日左右)相差可达51秒之多, 显然这种时间标准是不能适应科学发展需要的。

从天球上看太阳的周日与周年运动方向相反, 因此不难理解, 真太阳时的长度比恒星时要长。

3. 平太阳和平太阳时 (mT) 为了利用太阳的视运动建立合理的时间系统, 十九世纪末美国天文学家纽康 (S. Newcomb) 引入了一个假想的参考点——平太阳。

首先在黄道上找一个匀速运动的第一辅助点, 其视运动的速度等于太阳视运动速度的平均值, 并且与真太阳同时经过近地点 (1月3日左右) 和远地点 (7月4日前后)。然而再引入第二辅助点: 它在赤道上作等速运动, 不仅与在黄道上的第一辅助点速度相同, 而且两者同时通过春分点 (3月21日) 和秋分点 (9月23日)。这个在天赤道上作匀速运动的第二个辅助点就是平太阳。

称平太阳上中天的时刻为平正午, 下中天的时刻为平子夜。因此平太阳日的定义是: 连续两次平子夜的时间间隔。也可以理解为平太阳连续两次下中天的时间间隔。同样, 平太阳日也可划分为平太阳小时 (平时)、平太阳分、平太阳秒等等。

由于平太阳时是从下中天的时刻起算的, 因此平太阳时 m 可由下式决定:

$$m = t_m \pm 12^h \quad \left(\begin{array}{l} t_m < 12^h \text{ 用加} \\ t_m > 12^h \text{ 用减} \end{array} \right) \quad (2.25)$$

平太阳时与人们日常生活中的时间概念是一致的, 通常钟表所指示的时刻正是平太阳时。以后本书中的时间若不加特别说明都是平太阳时系统。

如前所述, 平太阳是一个人为引入无法观测的假想辅助点, 所以它只能通过真太阳时来推算。为了推算平太阳时, 引入二者的时差 η ——真太阳时与平太阳时的差值 (当然也即是它们的时角差)。

$$\eta = t_{\odot} - t_m = m_{\odot} - m \quad (2.26)$$

式中右下标 $\odot$ 为真太阳时系统。经过前人的长期观测和研究, 每日的 η 值都已算出 (可从《天文年历》中查得), 其变化的曲线如图2.24。图中曲线1是因为地球轨道是椭圆, 公转速度不均匀而

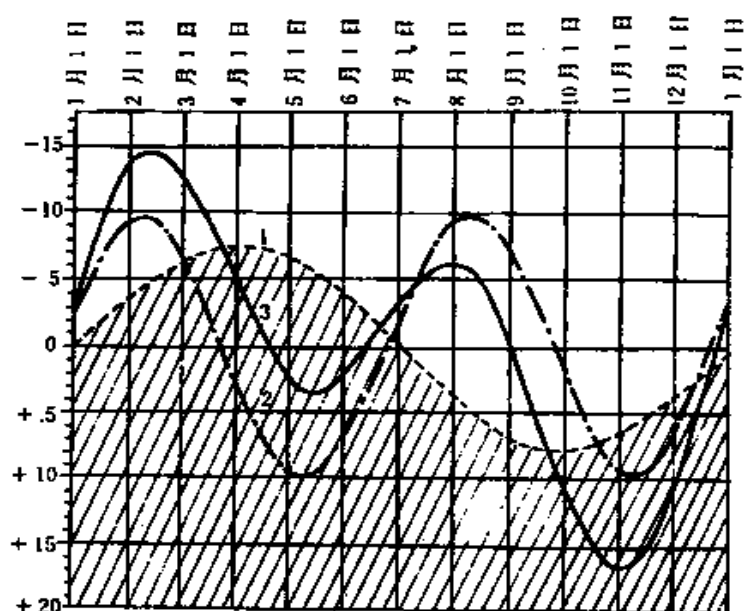


图 2.24 时差曲线

引起的时差。曲线 2 是因黄道面与赤道面之间有 $23^{\circ}27'$ 的交角引起的。其两者迭加的结果就是曲线 3。

- 从图可看出，一年中的时差 η 值有四次为 0，四次达到极值（表 2.3）。

表 2.3 η 的零点与极值

日期	4月16日	6月15日	9月1日	12月24日	2月12日	5月15日	7月26日	11月3日
η	0	0	0	0	$-14^{\circ}24'$	$+3^{\circ}48'$	$-6^{\circ}18'$	$+16^{\circ}24'$

4. 地方时、区时和世界时(UT) 如前所述，天体的时角都是有其“地方性”的，在地球上不同经度处有不同的子午圈，所以春分点、真太阳、平太阳的上中天时刻也随观测地点不同而异，因此对于各个不同地方，都有自己的恒星时、真太阳时、平太阳时——地方时系统。根据平太阳测定的结果就称为地方平时，根据春分点的结果则是地方恒星时。

众所周知, 地理经度每增加 1° , 则相应的地方平时增加 4 分钟。倘以经度以 $0^\circ - \pm 12^\circ$ 计, 则经度的差值正好与时间的差值相同。例如, 北京和南京的地理经度分别为 $7^\circ 45' 26''$ 及 $7^\circ 55' 04''$, 两地的经度差为 $9^\circ 38'$, 所以当南京的地方平时为 12 点 (平太阳上中天) 时, 北京的地方平时是 $11^\circ 50' 22''$, 或者说, 北京的平正午比南京迟 $9^\circ 38'$ 。

因此, A 、 B 两地平时的差别 (Δm) 等于其经度差 ($\Delta \lambda$)^①;

$$m_A - m_B = \lambda_A - \lambda_B = \Delta \lambda \quad (2.27)$$

显然, 对于两地的恒星时而言, 同样也有

$$S_A - S_B = \lambda_A - \lambda_B = \Delta \lambda \quad (2.28)$$

为了避免各地都采用地方时带来的不便和混乱, 1879 年加拿大一个铁路工程师弗莱明 (S. Fleming) 提出了区时系统, 即以格林尼治 (经度为 0°) 为准, 每隔 15° 的经线把地球分为 24 个时区, 相邻时区的分界线是距中央子午线东西各 $7^\circ 30'$ 的经线。当然有些实际时区线因考虑到政治、地理等因素, 与经线稍有偏离 (图 2.25)。

由于历史及地理原因, 东经 0° (此经线穿过格林尼治天文台旧址) 即零时区的区时, 称之为世界时 (UT), 记作 M 。

我国地域辽阔, 从东经 74° 到 135° 跨 61° 之多, 为有利于国家建设、促进民族交往, 新中国成立后, 除新疆、西藏及台湾等少数地区以外, 目前全国各地均使用东 8 时区的区时——“北京时间”。实际上它是东经 120° (8^h) 的地方平时。

我国地处北半球, 根据实际的地理位置和能源供需情况, 从 1986 年开始, 在全国范围内统一实行夏时制, 即每年从四月上旬到九月中旬把时针向前拨快 1 小时。1986 年则是从 5 月 4 日 (星期日) 起, 把凌晨 2 时变为 3 时, 到 9 月 14 日 (星期日) 凌晨 2 时复原, 拨回到 1 时。在夏时制期间的的时间称为北京夏令时。

① 习惯上规定, 东经的经度取为负值, 西经称之为正值。

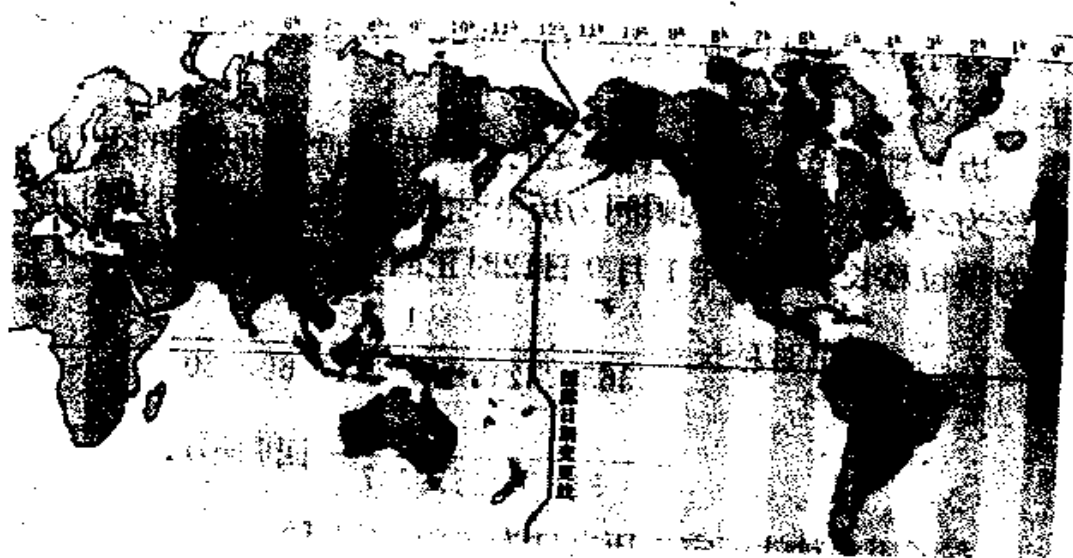


图 2.25 24时区图

根据世界上很多国家实行夏时制的经验证明，这可以收到很好的经济效益和社会效益。

四、新的世界时计量系统

在1960年以前，世界时曾作为基本的时间系统而广泛地应用于生活和科学各领域。随着天文观测精度的提高，理论研究的逐步深入，人们发现地球自转的速度并非均匀不变，除了由于潮汐摩擦造成平太阳日的长度平均每百年增长0.0016秒外，另外还有季节变化及一些无法预测的地球内部物质运动或其他原因引起的非均匀变化，这种复杂的变化极大地动摇了以平太阳时为基础的世界时。因此人们又开始寻找新的时间系统。

1. 历书时 (ET) 地球自转的速度有不均匀的变化，但其公转却是已经为人们精确研究过的周期运动。1952年国际天文学联合会在罗马召开了第八届大会。大会决定，自1960年起天文年历及一切星历表的时间都采用新的时间系统——历书时 (ET)。

历书时纯粹是从力学定律确定的均匀时间，与地球自转无关，

故又称为牛顿时。现代天体力学已十分精确地掌握了二体问题,所以历书时的基础就以地球公转为基础——用地球公转速度的平均值来定义。

历书时的起算点是这样规定的:公元1900年初太阳的几何平黄经为 $279^{\circ}41'48.04''$ 的瞬间为历书时的1900年1月0日12时正。它的单位秒长是1900年1月0日12时正回归年长度的倒数,即

$$\begin{aligned}\text{历书时秒长} &= \frac{1}{365.24219878 \times 24 \times 60 \times 60} \\ &= \frac{1}{31556925.9747} (\text{回归年}).\end{aligned}$$

有了历书秒就可定义历书日为86400历书秒。即

$$\text{历书日} = \frac{86400}{31556925.9747} (\text{回归年}).$$

在实际使用中,历书时也是通过世界时来推求的:

$$ET = UT + \Delta T \quad (2.29)$$

只要求得 ΔT , ET便不难求得了。从理论上可知, ΔT 中包括有不规则因素,所以只能由实际的观测来确定。但在长期实践中,人们也得到了一个半经验性的理论公式(2.30):

$$\Delta T = 24.349 + 72.318 T + 29.950 T^2 + 1.82144 B. \quad (2.30)$$

式中右端的 T 是自1900年1月0日格林尼治平午起计算的儒略世纪数(一儒略世纪为36525日), B 即为月球的黄经变动,是一个无法预测的不规则项。

太阳是个光耀夺目、边缘不规则的圆面,中心很难确定,而且运动速度也比月球慢得多,故实际上历书时的观测都是从月亮运动来决定的,近几年的 ΔT 值可见表2.4。

目前历书时的精度较低,大约只能达到 $0.1''$ 左右,但它最大的优点是这是一个均匀的时间系统,而且使得观测到的天体的实际位置与由天文年历计算出的理论位置完全一致,使各种特异天象

表 2.4 近几年的 ΔT 值

年 份	1971	1972	1973	1975	1978	1981
ΔT	+41.0°	+42.0°	+43.0°	+46.0°	+49.0°	+52.0°

的预报更趋精确化。

2. 原子时(AT) 历书时虽然解决了时间均匀性的问题,但它仍存在观测复杂、精度不高的缺陷。为了改进这些问题,科学家们的目光从无限的宇宙空间终于转向了精细的微观世界。因为人们发现原子内部运动的稳定性远比地球运动高得多,原子内部的电子在能级之间的跃迁所吸收或发射的电磁波,其频率是极其稳定的,而且不受外界物理条件(如温度、压力、重力)的影响,而时间计量正需要这种稳定均匀的物质运动或变化。

1949年美国首先造出了第一台氨分子钟,为用作时间新标准作了可贵的尝试。1955年英国制成了第一台铯原子钟。以后原子钟的精确度、稳定度不断提高,终于在1967年召开的第十三届国际计量大会上正式规定了新的秒的定义,并以原子秒作为国际单位制的时间单位。由此得出的一套时间计量系统称为原子时(AT)。

原子时的秒长是这样定义的: 铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射9,192,631,770个周期的持续时间。

原子时的起点是世界时1958年1月1日0时。即规定在这一瞬间原子时与世界时重合。但是事后人们发现当初取的这一瞬间二者并非真正完全重合,而是相差了0.0039秒,这一微小的差别已作为历史事实一直被保留了下来。

3. 协调世界时(UTC) 原子时的标准是原子间的能级跃迁,而人们日常用的世界时的依据是地球自转,显然两个风马牛不相及的物质运动是不会完全同步的。事实上,由于地球自转的不均匀性的影响,目前世界时的秒长已比原子时的秒长约长 3×10^{-8} ,

这样一年下来的累积误差甚至可达到1秒左右。而且这种累积误差将越来越大。为了解决这个矛盾,使得同一标准振荡器能同时满足天文学与物理界两方面的严格要求,国际无线电咨询委员会、国际天文学联合会分别于1960、1961年召开了专门会议,提出了协调的具体方案——协调世界时(UTC),这是一种介于原子时与世界时之间的又一种新时间系统。并得到了一致的公认。

在早期1960—1971年间,UTC以原子时为基础,通过频率补偿及跳秒来保持与世界时的差别小于 ± 0.1 秒,但这样的秒长是逐年不同的。因此自1972年1月1日起采用:协调世界时的秒长严格等于原子时的秒长(即铯原子跃迁辐射9,192,631,770个周期的时间),但在必要时作一整秒的调整——“闰秒”以保持两者之差小于 ± 0.9 秒。

跳秒由国际时间局根据观测决定,但只能在以下两个时刻调整,即年底12月31日和年中6月30日的最后一秒。如果增加一秒则叫“正闰秒”,扣去一秒就是“负闰秒”。如1978年12月31日、1982年12月31日及1982年6月30日都曾在午夜的最后一秒钟加进过1“闰秒”,使1979年、1983年的元旦迟了一秒来到。而负闰秒则至今还未出现过。

§ 2.6 不同时间计量系统的换算

一、平时系统中的地方时、区时、世界时的互换

在§ 2.4中已知 A 、 B 两地的地方平时差 $m_A - m_B$ 在数值上是与其经度差 $\lambda_A - \lambda_B$ 相等的;亦即有(2.27)式成立。

地方平时与区时 T_N 的差别也即是其经度与时区中心经度之差,而第 N 时区的中心经度即为 $N \times 15^\circ$ 或 N^h ,因此该时区内某处 A 的地方平时与区时的关系即为:

$$m_A = T_N + (\lambda_A - N^h) \quad (2.31)$$

例如, 南京的地理经度 $\lambda_A = 7^h 55^m 04^s$, 东8时区中心经度 $N^h = 8^h$, 所以, $m_A = T_N - 4^m 56^s$ 。也即南京的地方平时比“北京时间”数值上小 $4^m 56^s$ 。或者平太阳中天迟 $4^m 56^s$ 。利用(2.31)式也可从地方平时 m_A 求得区时 T_N 。

世界时可看作经度为0处的地方时, 即可从(2.31)式取 $N^h = 0^h$, $T_0 = M$ 的特例:

即

$$\left. \begin{aligned} m_A &= M + \lambda_A, \\ M &= m_A - \lambda_A. \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

至于区时与世界时的互换则更加简单

$$T_N = M + N^h \quad (2.33)$$

利用此式也可从任何一地的区时求得世界时。例如, 北京位于东8时区, 即 $N=8$, 美国华盛顿处于西5时区 $N=5W$, 所以当世界时为9月1日0^h时

$$T_0 = 0^h + 8^h = 8^h$$

北京是9月1日8^h, 华盛顿处于 $T_{5W} = 24^h - 5^h = 19^h$, 即18月31日19^h。

至于地方恒星时与世界恒星时的换算, 原理也是相同的, 也可利用(2.31)式, 但须注意, 此时的单位都是恒星时系统。

二、日界线

地球是个球体, 各地时间是连续变化的, 而每天的日期总有起始点(0^h)。从哪儿开始新的一天呢? 或者从(2.33)式看来, 当格林尼治为某日, 如3月21日(春分)12^h时, 东1、2、3……12时区分别为3月21日的13^h、14^h、15^h……24^h, 在东12时区即是3月21日子夜, 一天的最后时刻亦即3月22日0时。与此同时, 西1、

① 在时间系统中, 倘不够减可加上24^h, 但日期相应减去一日; 当加后的和大于24^h则应减24^h, 日期移过一日。

2、3……12时区则分别是3月21日的11时、10时、9时……0时,或是3月20日24时。但是实际上180°E与180°W是同一经线,也即东12时区与西12时区是同一地方。在经度180°处,既是3月21日的24时又是3月20日的24时,或者说既是3月22日的0时又是3月21日的0时,这岂非荒谬吗?

为了解决这个矛盾,人们在那儿规定了一条“国际日期变更线”——日界线。它基本上就是180°的经线(见图2.25)。在日界线的东面比西边迟整整24小时,即一日。如在上述例子中,其西侧的亚洲地区应是3月21日24时或3月22日的0时,而在线东侧的美洲则是3月21日0时或3月20日24时。

当然,实际的日界线并不完全根据180°经线来划定,投影到平面图上,它是一条弯成几段的折线,个别地方甚至折过了本时区。这是因为考虑到地理及政治的原因而采取的变更。它使得日期变更线尽量避开人类居住区,也不使一个地区同时使用两种不同的日期,以免造成不必要的混乱和麻烦。值得庆幸的是180°经线本来大部分从海洋穿过,所以个别地方调整比较容易。

随着科学技术的进步、国际交往的频繁,日界线的重要性也比前增大了,尤其是在作环球航行时,日界线更是不可忽略的问题。当环球航行者的旅行路线取为自西向东时,则他在跨过日界线时,将重复过一天,似乎平白无故地多出了24小时。反之,倘若自东向西旅行,则在跨过日界线时,他会发现他少过了一天,好象丢失了24小时。

三、恒星时(ST)与平时(mT)的相互换算

如前所述,恒星时的参考点是春分点,平太阳时的参考点是平太阳。在不计岁差、章动(§13.4)等影响时,春分点是天球上的固定点,而平太阳却因地球公转在天球上并不固定。根据长时间的测量知道,平太阳连续两次通过春分点的时间(即回归年)

是365.2422平太阳日，因此平太阳周年视运动的速度为：每平太阳日

$$\frac{360}{365.2422} = 59.1388' = 59'08.3''.$$

如图2.26，设春分日某一瞬间平太阳与春分点 Υ 重合于 A_1 点所在的子午圈上，当天球按顺时针方向转过360（相当于一恒星日）后，平太阳却向东移动了 $59'08.3''$ ，到达 A_2 ，只有当 A_2 转到 A_1 时才是平太阳日。由此可见，平太阳日比恒星日更长一些，而且平太阳顺次 A_2 、 A_3 ……再第二次回到

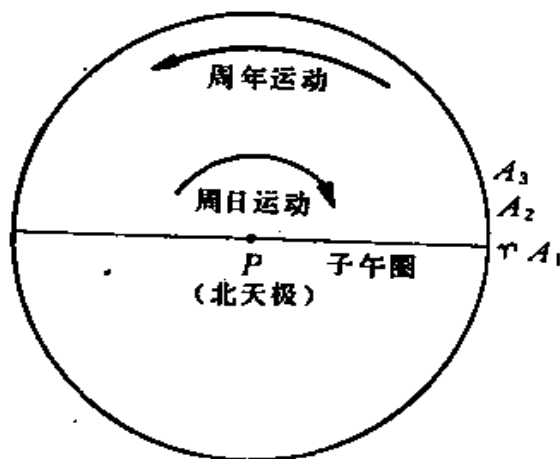


图 2.26 平太阳时与恒星时换算，
纸平面为天赤道面

A_1 时，平太阳走了365.2422平太阳日，而春分点 Υ 却多转了一圈为366.2422恒星日。因此在平时系统中：

1平太阳日=24平太阳时，

1恒星日=23^h56^m04.1^s（平太阳时系统）。

而在恒星时系统中：

1恒星日=24恒星时，

1平太阳日=24^h03^m56.6^s（恒星时系统）。

这个关系也可从

$$365.2422 \text{ 平太阳日} = 366.2422 \text{ 恒星日} \quad (2.34)$$

推出，由此不难得到：

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ 平太阳日} &= 1 + \mu \text{ 恒星日}, \\ 1 \text{ 平太阳小时} &= 1 + \mu \text{ 恒星小时}, \\ 1 \text{ 平太阳分} &= 1 + \mu \text{ 恒星分}, \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

$$1 \text{ 平太阳秒} = 1 + \mu \text{ 恒星秒。} \quad]$$

(2.35)式中

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{365.2422} = 2.737909256 \times 10^{-3} \\ &= 3^m 56.5554' \text{ 恒星时/平太阳日} \\ &= 9.8565' \text{ 恒星时/平太阳小时} \\ &= 0.1643'' \text{ 恒星时/平太阳分} \\ &= 0.0027'' \text{ 恒星时/平太阳秒} \end{aligned}$$

当需把以平时系统计量的某两事件时间间隔化为恒星时系统时, 可通过(2.36)式实现。

$$s = m + m\mu \quad (2.36)$$

相反的换算可由(2.35)式得到:

$$\text{恒星时} = \frac{1}{1 + \mu} \text{ 平太阳时} = 1 - \nu \quad \text{平太阳时}$$

所以:

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ 恒星日} &= 1 - \nu && \text{平太阳日,} \\ 1 \text{ 恒星小时} &= 1 - \nu && \text{平太阳小时,} \\ 1 \text{ 恒星分} &= 1 - \nu && \text{平太阳分,} \\ 1 \text{ 恒星秒} &= 1 - \nu && \text{平太阳秒.} \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

(2.37)式中

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu}} = \frac{1}{366.2422} = 2.730433576 \times 10^{-3} \\ &= 3^m 55.909' \text{ 平太阳时/恒星日,} \\ &= 9.8296' \text{ 平太阳时/恒星小时,} \\ &= 0.1638'' \text{ 平太阳时/恒星分,} \\ &= 0.0027'' \text{ 平太阳时/恒星秒.} \end{aligned}$$

当需把以恒星时系统计量的某两事件的时间间隔化为平时系

统时，应用(2.38)式：

$$m = s - s_v \quad (2.38)$$

$m\mu$ 、 s_v 都不必具体计算，可从《天文年历》的有关附表中查得。

(2.36)和(2.38)式只是换算时间间隔即单位的公式，但某一事件的发生时刻换算则还涉及到起算点即何种时间系统的问题。即有：

$$\left. \begin{aligned} s &= m + S_0 + M\mu \\ m &= s + M_0 - S_v \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

式中 m, s 是地方平时和地方恒星时，而 M, S 则分别是对应的格林尼治的平时和格林尼治恒星时， M_0 及 S_0 为格林尼治恒星时 0^h 的平时和世界时 0^h 的恒星时。

四、实例

在日常生活、工作中，人们习惯使用区时，中国则普遍使用东8时区的区时，他们的手表上所指示的正是这种“北京时间”。但是在天文观测中，常需要知道当地当时的恒星时（地方恒星时）以了解天体的方位，调整仪器的指向，有时则反过来，通过具体的天体观测来校正平太阳时和区时。

在精度不高（误差在几分钟内）时，换算有一种简易的方法，其优点可不求助于《天文年历》之类的工具书，运算简单。方法如下：先记时四个时间的时间改正值 S_0 ①（表2.5），以后每隔一天加4分，每隔一月加2小时（不管大月小月）。

例：求南京市3月31日北京时间 $19^h 35^m$ 时的地方恒星时（ $\lambda_A = 7^h 55^m 04^s$ ）。

〔解一〕：

3月31日 - 3月21日 = 10日，改正值为 $4^m \times 10 = 40^m$ 。

① 可把 S_0 理解为那四天平子夜的地方恒星时，在更粗略时可取春分日的 $S_0 = 12^h$ ，秋分日的 S_0 为 0^h 。

由 (2.31) 式, $m_1 = T_8 - 4^m 56^s = 19^h 30^m 04^s$, 所以

$$s = 19^h 30^m 04^s + 11^h 53^m + 40^m = 32^h 03^m 04^s.$$

即 $s = 8^h 03^m$.

表 2.5 二分点和二至点的 S_0 值

日 期	$\alpha_{\text{平}\odot}$	S_0
春分(3月21日)	0^h	$11^h 53^m$
夏至(6月22日)	6^h	18^m
秋分(9月23日)	12^h	$0^h 07^m$
冬至(12月22日)	18^h	6^h

[解二]:

(1) 求出地方平时 m , 由 (2.31) 式

$$m = 19^h 35^m - 4^m 56^s = 19^h 30^m 04^s.$$

(2) 求世界时 M , 由 (2.32) 式

$$M = m - \lambda_1 = 19^h 30^m 04^s - 7^h 55^m 04^s = 11^h 35^m.$$

(3) 求世界时对应的恒星时 S_0

查《中国天文年历》“世界时和恒星时表”

$$S_0 = 12^h 33^m 08^s.$$

(4) 求 $M\mu$

查《中国天文年历》附表3“化平太阳时为恒星时”

$$M = 11^h 35^m \text{ 时, } M\mu = 1^m 54^s.$$

所以由 (2.39) 式,

$$\begin{aligned} s &= 19^h 30^m 04^s + 12^h 33^m 08^s + 1^m 54^s, \\ &= 32^h 05^m 06^s. \end{aligned}$$

即 $8^h 05^m 06^s$.

对比结果, 两者也仅差 2^m 而已。

§2.7 历法简介

历法是天文学中一个重要的内容。日历对于人类的生产和生活都有重大的意义,因而世界各文明古国都历来十分重视历法的编制和研究工作。中国古代一向把历法的改革当作重大国事,自有文字记载的几千年来,中国历史上曾先后提出过100多种不同的历,在世界历法史上占有重要的地位。

一部好的历可以促进生产,在中外历史上都有过因改历不妥而导致社会骚乱的记载。

一、制历的原则和科学依据

说到底,所谓历法就是推算年、月、日的时间长度和如何协调它们之间的关系,以制定一定的时间序列法则。具体地讲来,就是合理安排年、月、日的关系,显然年中的月、日必须是整数。

历的单位通常包括比“日”更长的单位,这也是实践的需要。比“日”更长的有月和年。“年”的长度实际反映了地球绕太阳公转的周期。从地球看来,即是太阳在天球上作周年运动。然而,如果选用不同的参考点则就有不同长度的“年”,常用的历是以春分点 γ 为参考点的,这就是“回归年”——太阳在天球上连续两次经过春分点的时间间隔。其长度大致为365.2422日。

值得指出的是:回归年并不是地球的公转周期。地球在宇宙空间中的运动应以恒星作参考点,因此地球的公转周期称作“恒星年”。反映到天球上,即是太阳连续两次通过某一恒星的时间间隔,其长度约为365.2564日,比回归年略长一些。其原因是因为春分点由于岁差、章动的影响,平均每年向西移动50"左右。

月也是一种比日长的时间单位,它原来的意义是以月球绕地

球的公转运动为基础的。古人很早就利用月球的这种运动来测定时间,同样因参考系不一就有各种不同长度、不同意义的“月”。在历法中常用的是“朔望月”,它是月相盈亏的变化周期,一个朔望月约为29.5306日。自然,它也不是月球的公转周期。月球的公转周期叫“恒星月”,是指月球连续两次通过某恒星的时间间隔,长度为27.3217日。

从理论上说来,回归年、朔望月、平太阳日是完全独立的三种运动为基础的时间单位,因而它们之间没有简单的通约关系也是很自然的。但人们为了生产和生活的需要,都希望在一定的精度下,把它们统一起来,这就是制历的基本原则。

绝对精确的历法是不可能有的,因为回归年和朔望月的长度本身亦是逐年有微小的变化的。经过天文学家多年的研究,它们的长度可由下面经验公式求出:

$$\text{回归年} = 365.24219878 - 0.0000000614(t-1900) \text{ (平太阳日)}.$$

$$\text{朔望月} = 29.53058867 + 0.0000000019(t-1900) \text{ (平太阳日)}.$$

式中 t 是公元年份数。例如 §2.5 中历书时的秒长所用1900年回归年长度,即可由上式 $t=1900$ 代入得

$$365.24219878 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ 秒}.$$

作为一部好的历法,至少还得满足以下要求:

(1) 尽可能准确反映出天文学的客观规律;如年是地球公转的反映,月又应与它的位相相吻合^①,日是地球自转的反映。只有基本符合这些运动规律的历法才能正确反映出天象和四季变化,为人类的生产、生活服务。

(2) 日历必须简单、明瞭、易于记忆。过份复杂的法则往往在使用中感到不便,而不受人欢迎。人们甚至宁愿牺牲一定的精度来满足简单性。

① 目前公历中的月已与月相无关

(3) 日历必须具有通用性,能适用于更广泛的范围,为广大地区所接受。

从古到今,在中外历史上出现过许多种形形色色的不同历法。如1927年各国天文学家提出的改历方案就有140多个,它们名目繁多,真是五花八门。但就基本原理来看,以往所有方法大致可归纳为三大类型——以朔望月为据的太阴历;以太阳周年视运动为标准的太阳历以及兼顾二者的阴阳历。

二、太阴历

太阴历是人类历史上使用最早的一种历法,它又称阴历(注意,不是我国民间说的“阴历”)、回历、回回历、伊斯兰历。

太阴历以月亮的圆缺盈亏为基准,把这种朔望的周期称之为“月”。在远古时代,这常伴有浓重的宗教色彩,宗教界的专门祭司在新月时都要举行盛大的庆典。

古人已测得朔望月大致平均长度为29.5日,而12个月大致完成一个季节循环,因此“太阴年”由12个朔望月组成,每月的天数是这样安排的:每逢奇数月,如1月、3月……11月每月为29日,而偶数月如2月、4月……12月,则每月为30天。因而太阴年的长度为 $29.5 \times 12 = 354$ (日)。

可是,朔望月的实际长度是29.53059日,12个朔望月应当为354.36708日,比太阴历中的历年长 $8^h.48^m.36^s$ 。为了消除这一差别,使历年的平均长度与12个朔望月的实际长度尽可能地接近,并保证每年的年初和每月的月初都是峨眉月,因此人们就以30太阴年为周期,在30年间增加11个“闰日”,这样30个历年的长度变为:

$$354 \times 30 + 11 = 10631 \text{ (日)},$$

而实际的长度是:

$$29.53059 \times 12 \times 30 = 10631.0124 \text{ (日)}.$$

所以太阴历的30个历年后的误差仅仅只有0.0124日或 $17^{\text{m}} 51^{\text{s}}$ 。其历年的平均长度为354.36667日与实际长已相差无几了。

太阴历中的闰日大致设在第2、5、7、10、13、16、18、21、24、26、29年的年底,算作第355天。太阴历的优点是日期与月相吻合得较好,对于海洋潮汐、渔业等有一定的作用。但太阴历的

历年长 $354\frac{11}{30}$ 日,几乎比回归年(365.2422日)短了11日,因而每

年的岁首将逐年提前,太阴历经过三个历年后就落在季节循环后33日。例如,倘若某年的新年在冬天,则8年后的新年就移到了秋季,17年之后又要在盛夏中过年。正是这种与季节变化脱节的重大缺陷,使得太阴历慢慢地为不少地区所遗弃。现在,除了少数伊斯兰教国家和地区外,大都已不再使用太阴历了。

目前的伊斯兰回历正是这样安排年月的,但其纪元相当于在公元622年7月16日,即622年7月份是伊斯兰纪元元年,公元1987年时,伊斯兰纪元为1407年,大约在公元20874年时,它的纪元也正好是20874年。

三、太阳历(阳历)

制历时只考虑太阳周年运动的历法,其基础是“回归年”长度。太阳历起源于古埃及。最早时,由于观测条件限制,埃及人的历法中一年仅有360天,以后才逐步改为365天。经过几千年的发展,逐渐变成一种现在广大地区使用的“公历”。

公历的最早雏型是“儒略历”。公元前46年,儒略·凯撒(Julius Caesar)作为罗马帝国的最高统治者为了巩固其政权,在天文学家的协助下,对当时混乱的历法作了较大的改革,并把改历的原则作为政府法令颁布。经过改革后的历称为儒略历,其主要内容有:

(1) 每年为365日,并大致均匀地分为十二个月。

(2) 每年的岁首放于冬至后的第十日。

(3) 每隔三年设置一闰年，闰年为366日，多出的一天放于2月之末。

儒略死后，公元前8年奥古斯都(Augustus)大帝又进行过一次改革，把月份的大小又作了一次人为的变动，直到1582年教皇格里果里(R. Gregory)十三世又作了一次重大改进，才使公历基本定型下来，成为现用的公历，故公历实际上就是格里历。

格里历比儒略历更为精确。儒略历的历年长度是365.25日，格里历提出400年内97闰的原则，即把那些不能被4整除的世纪年如1700年、1800年、1900年仍作365日的平年，并果断地扣除了10天，把1582年10月4日的翌日定为10月15日，以消除了一千多年来已积累下来的十天误差。

格里果里十三世是罗马的教皇，因此，格里历首先在天主教国家内使用，而当时的欧洲大多数国家已依皈新教，宗教上愚蠢的成见使得英国等一些国家不肯接受格里历。一直过了170年后，天象与历误差越来越大，英国及其管辖下的美洲殖民地才于1752年正式放弃儒略历，并一下子从日历中扣除了11天（因为1700年又多闰了一天）。

苏联直到1918年2月1日才采用格里历。

我国是辛亥革命以后于1912年采用格里历，但当时并未采用公元纪元，直到1949年中华人民共和国成立后，才正式使用公元纪年。

格里历的历年长度为 $365 + \frac{97}{400} = 365.2425$ 日，这比回归年的实际长度365.2422日长0.0003日即25.9秒，四百年内仅仅差0.12日或 $2^{\circ} 52' 48''$ ，差不多要3300多年才相差一天，这已是足够精确的了。

公历中的“月”是一种人为的单位，它最初可能是从太阴历中的“月”概念借用而来的。但演变到后来，已与月相无关了，仅仅

是作为介于年与日之间的中等长度的时间单位而已。正因为公历中的月已没有什么实际天文意义，所以每月包含的天数也完全是人为的安排，并不包含什么科学道理。今天大小月的安排只是因为便于记忆，才让它作为历史陈迹保留下来。

四、阴阳历

兼顾太阴月和回归年的阴阳合历，最有代表性的就是中国的农历，又称夏历、中历、旧历。中国自古以来基本上都采用这种历法（清代有一短时期用过回回历）。它既能使时令符合季节气候的变化，又兼顾到月球朔望的位相周期，所以民间也有一些人称之为“阴历”（注意不要与上面的“太阴历”相混淆）。在中国几千年的历史长河中，农历对于指导生产起了巨大的推动作用。

中国农历中的“月”也是严格依照朔望月来确定的。月首总是在朔日（所以每次日食总是发生在农历初一），大月为30日，小月为29日。与太阴历不同的是：大小月不固定，需要根据实际天象来推算确定。

农历中的年长短相差较大，因而农历新年有时在一月下旬开始，有时在二月中上旬，并不固定。一般年份（平年）是354日或355日，而“闰年”时可长达383或384日，整整多一个月——闰月。正是靠了这种闰月，才使其历年与回归年的长度大致保持一致，也使新年相差不会太远，总在上述范围内。

远在春秋时代，中国的历法中已规定了“19年7闰”的原则。人所共知，19个回归年的长度是：

$$365.2422 \times 19 = 6939.6018 \quad (\text{日}),$$

而19个农历年中有 $19 \times 12 + 7 = 235$ 朔望月，共

$$29.53059 \times 235 = 6936.68865 \quad (\text{日}).$$

即19年间相差0.08685日即 $2^{\text{h}} 05^{\text{m}} 04^{\text{s}}$ 。所加的七个闰月的具体安置根据实际天象推算来确定，但一般大致在第3、6、9、11、14、

17、19年，但具体放在这一年的哪一个月则有另外的规则。

在南北朝期间，中国天文学家祖冲之对19年7闰的原则又作了改进，他提出了“391年144闰”的更准确方法。

391回归年长度为： $365.2422 \times 391 = 142809.7002$ (日)。

391农历年长度为： $29.53059 \times (391 \times 12 + 144)$
 $= 142809.9332$ (日)。

这样在391年间仅相差0.233日或 $5^h 35^m 31^s$ ，平均每年只差 51.5^s ，然而这种置闰法比较复杂，又涉及到近四百年的时间，一般人不容易掌握，这限制了它的推广、使用。

五、几个有关问题

1. 历元 在天文学的研究中，所使用的数据必须有同一起始时刻，这就是同一“历元”的问题。在制历中也同样有以什么时间作为起始点的问题。例如，中国以前均使用“王位纪年法”。例如，世界公认的最早的黑子纪录，中国史书上记载是：“汉成帝河平元年三月乙未”。而唐代天文学家一行领导的世界上第一次子午线长度的实测工作，又是在“唐玄宗开元12年”开始的，实际上这在公元系统中分别是公元前28年及公元724年。又如著名的1054超新星(公元1054年出现的)中国史书上记载的是“至和元年”，至和乃是北宋仁宗使用过的一个年号。这种历元各行其是，给科学工作者带来许多不便，因此新中国成立后统一改用公历的历元。

然而公历的历元也是人为的，显然格里历从1582年至今仅有400多年的历史，而当初儒略历又是在公元前46年施行的，那末公元元年是如何确定的呢？

原来相当于公元六世纪时，有一个基督教的僧侣为了推算耶稣“复活节”的日子，杜撰了一个耶稣诞生的年份，并要求把它作为公元开始的元年。由于当时宗教权力显赫，而且历法的制定权本来就掌握在这些人手中，这样经过一千多年的流传，人们已普

遍接受了这种概念，而不去追究其原来的宗教意义了。

回历的历元也带有宗教色彩，它以希吉来为纪元。相传这是伊斯兰教创始人穆罕默德(Mohammed)从麦加逃亡到麦地那的日子。而据推算，在公历系统中，它相当于公元622年7月16日。

2. 儒略日(JD) 《天文年历》的附表刊有“儒略日表”。实际上这是一种不用年和月的长期纪日法，以JD表示。儒略日以公元前4713^①儒略历1月1日世界时12^h (格林尼治平正午)为起算点，日复一日连续不断。所以现在对应的儒略日是七位数。对于需要计算相距若干年的两事件之间的天数，用这种JD系统是最方便的。

如中国第一颗人造地球卫星上天是1970年4月24日，而中华人民共和国成立是1949年10月1日，二者间相隔多少天呢？

从《天文年历》的儒略日表查得：

$$\begin{array}{r} 1970.4.24 \quad \cdots \cdots 2440701 \\ 1949.10.1 \quad \cdots \cdots 2433191 \\ \hline 7510 \end{array}$$

即在建国后7510天，人造地球卫星就升上了天空。

由于儒略日的数字很大，而实际计算中大多数的两事件相隔时间并不太远，为简化计算，天文上还有一种约化儒略日(MJD)，它相当于把其起点挪后6500多年。

$$MJD = JD - 2400000.5. \quad (2.40)$$

式中的“.5”表示把起算点从平正午改为平子夜，与一般平时系统一致。

3. 星期 公元中还有一种循环的连续纪日法——星期制，它以七天为一周期循环，至今这种七天制的周期亦已为人们所广泛接受。学校的课程、工厂企业的休假，通常都是依照星期制编排

① 公元纪年中无公元0年，公元前一年在天文上称0年，所以公元前4713年即为-4712年，因此从天文上讲公元前某年不能简单地写为“负某年”。

的。西方一些国家的工资、房租、税收也都以星期结算，因而星期制与人们的经济生活有着直接的关系。

星期制的溯源很早，远在两千多年前古巴比伦就有了这种七天纪日制的原型。中国周朝期间也有类似的把一个朔望月分为几个七天、八天的方法。看来星期制最初与天体尤其是月球的运动有关，因为除去有一天(新月)看不见月亮后，朔望月仅剩28天，正好为四个星期的长度。

在古巴比伦，一星期的七天每天都以专门的天体名称来命名，至今日语中还保留着这种名称：日曜日(星期日)、月曜日(星期一)、火曜日(星期二)、水曜日(星期三)、木曜日(星期四)、金曜日(星期五)、土曜日(星期六)。英语中则还有三天 Sunday (星期日)、Monday (星期一)、Saturday (星期六) 分别是 Sun (太阳)、Moon (月亮) 及 Saturn (土星) 派生出来的。

后来由于宗教的介入，又硬把它与“礼拜”——上帝创造天体的神话附会起来，因此“礼拜”是一个宗教名词，而星期仅是一种纪日法，二者的意义大相径庭，不可混为一谈。

4. 干支 中国自古以来就有一种特殊的纪日、纪年法，这就是“干支”。所谓干支就是十个“天干”(甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸)与十二个“地支”(子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥)互相配合而成的。因为从“甲子”到“癸亥”正好有60种组合，所以又称作“六十干支”或“六十花甲子”(见表2.6)。

干支的起源很早，大约可追溯到殷商年代。干支纪日自那时起就日复一日从未间断。只要顺着干支前推，历史事件的日子便不难求得，因此这也是一种很长的纪日系统。中国用干支来纪年，这大约自东汉开始，也有了近2000年历史了。而中国历史上不少著名事件就是以干支记叙的：如孙中山领导的辛亥革命、中日甲午战争、戊戌变法等等。

从公历纪元求干支是不难的，只要根据六十干支表及(2.41)

表2.6 六十干支表

0. 甲子	1. 乙丑	2. 丙寅	3. 丁卯	4. 戊辰	5. 己巳	6. 庚午	7. 辛未	8. 壬申	9. 癸酉
10. 甲戌	11. 乙亥	12. 丙子	13. 丁丑	14. 戊寅	15. 己卯	16. 庚辰	17. 辛巳	18. 壬午	19. 癸未
20. 甲申	21. 乙酉	22. 丙戌	23. 丁亥	24. 戊子	25. 己丑	26. 庚寅	27. 辛卯	28. 壬辰	29. 癸巳
30. 甲午	31. 乙未	32. 丙申	33. 丁酉	34. 戊戌	35. 己亥	36. 庚子	37. 辛丑	38. 壬寅	39. 癸卯
40. 甲辰	41. 乙巳	42. 丙午	43. 丁未	44. 戊申	45. 己酉	46. 庚戌	47. 辛亥	48. 壬子	49. 癸丑
50. 甲寅	51. 乙卯	52. 丙辰	53. 丁巳	54. 戊午	55. 己未	56. 庚申	57. 辛酉	58. 壬戌	59. 癸亥

式即算出。

$$n = t - 4 - 60m. \quad (2.41)$$

(2.41)式中 n 即为干支表中的干支序数,如11为乙亥、57为辛酉……, t 是要求干支的公元的纪年数如1981年等, $m = 0, 1, 2, \dots$, 取正整数, 以保证算出的 n 处于0—59之间。如求1911年的干支则取 $m = 31$, 由(2.41)式:

$$n = 1911 - 4 - 60 \times 31 = 47$$

由表2.5知47为辛亥, 所以1911年的干支为辛亥。

从“干支”去推算公元的年份则有:

$$t = n + 4 + 60m. \quad (2.42)$$

但(2.42)式中由于 m 值的不同而可得出不同的 t 。如辛亥革命的领导人孙中山诞生于1866年逝世于1925年。或者说辛亥革命后不久就发生了第一次世界大战(1914—1918)这样就可确定是辛亥革命发生在1911年无疑了。

这对于遥远的历史年代常常比较麻烦。干支的这种缺陷, 使得它的运用范围日益缩小, 如中国第一颗人造地球卫星上天, 现在只说是1970年, 而不再记作“庚戌年”了。

5. 节气 在中国农历中还有一些特殊的表示太阳位置的办法, 那就是二十四节气。节气是中国历法的独特创造、一大特色, 几千年来对于推动农牧业生产起了巨大的积极作用。节气的名称最早出现在殷商时代, 到西汉二十四节气便全部完备了。因为每一节气都表示准确的太阳位置, 具有严格的季节特性。因此, 二十四节气无疑属于太阳历的范畴。节气在公历中的日期是大致固定的, 每月通常有两个节气, 上半年在5日、21日, 下半年在8日、23日, 前后至多相差一两天(表2.7)。

必须指出, 每个节气间太阳黄经是均匀增加 15° , 但时间间隔却并不一样长。这是因为地球的实际公转速度并不均匀, 1月初地球处于近日点附近, 速度最快, 两节气的间隔的时间相应较短。

表 2.7 节气、中气表

季	节气名	立 春 (正月节)	雨 水 (正月中)	惊 蛰 (二月节)	春 分 (二月中)	清 明 (三月节)	谷 雨 (三月中)
		公历日期	公历日期	公历日期	公历日期	公历日期	公历日期
春 季	节气名	2月 4或5日	2月 19或20日	3月 5或6日	3月 20或21日	4月 4或5日	4月 20或21日
	太阳黄经	315	330	345	0	15	30
	节气名	立 夏 (四月节)	小 满 (四月中)	芒 种 (五月节)	夏 至 (五月中)	小 暑 (六月节)	大 暑 (六月中)
夏 季	公历日期	5月 5或6日	5月 21或22日	6月 5或6日	6月 21或22日	7月 7或8日	7月 23或24日
	太阳黄经	45	60	75	90	105	120
	节气名	立 秋 (七月节)	处 暑 (七月中)	白 露 (八月节)	秋 分 (八月中)	寒 露 (九月节)	霜 降 (九月中)
秋 季	公历日期	8月 7或8日	8月 23或24日	9月 7或8日	9月 23或24日	10月 8或9日	10月 23或24日
	太阳黄经	135	150	165	180	195	210
	节气名	立 冬 (十月节)	小 雪 (十月中)	大 雪 (十一月节)	冬 至 (十一月中)	小 寒 (十二月节)	大 寒 (十二月中)
冬 季	公历日期	11月 7或8日	11月 22或23日	12月 7或8日	12月 21或22日	1月 5或6日	1月 20或21日
	太阳黄经	225	240	255	270	285	300
	节气名	春 分 (二月中)	雨 水 (正月中)	惊 蛰 (二月节)	春 分 (二月中)	清 明 (三月节)	谷 雨 (三月中)

二十四节气又可分为两大类：节气和中气。从冬至开始，大寒、雨水、春分……直到小雪，即在表上带“某月中”的都称为中气。而另十二个称为节气。节气、中气两两相间。早从西汉开始，中国农历已规定，闰月只能加于没有中气的月份(朔望月)中，如加在四月则称闰四月，七月则闰七月……。

为了便于记忆，人们编写了一首可以朗朗上口的“节气歌”：

“春雨惊春清谷天，夏满芒夏暑相连。

秋处露秋寒霜降，冬雪雪冬小大寒。”

每句包含六个节气，共四句。囊括了所有二十四节气的顺序和名称。

第三章 天文观测与仪器

天文学的研究对象是十分遥远的天体，尽管人类已经进行了规模不小的空间探测，但就整体而言，天文学仍然是一门“观测的科学”。天文观测是天文学家进行科学研究的最基本的手段之一，也是检验理论模型、科学假设的准绳。

§ 3.1 天体的电磁辐射

一、全波天文学

由于地球大气的阻挡，以及科学技术的限止，很长时间以来，天文学家只能接收天体发出的可见光。现在知道，在电磁辐射中这是一个极其狭窄的范围。事实上，不仅那些发出可见光的天体（如恒星、星系）常常伴有射电，红外或 X 射线、 γ 射线辐射，就是那些暗黑的天体，如暗星云、星际物质也有一定的红外或射电辐射。由于科学技术的飞跃发展，尤其是在人类进入空间探测、彻底摆脱了地球大气的羁绊后，整个电磁辐射的所有波段（图3.1）都得到了观测资料。随着四十年代的射电天文学问世，红外天文学、紫外天文学、X 射线天文学、 γ 射线天文学……，一系列新的天文学分支学科也纷纷应运而生。

天文学从光学时代进入了全波时代后，面貌已焕然一新，大量的新发现、新资料、新问题纷至沓来，甚至使人们对于天体及宇宙的认识和观念发生了深刻的变化。因而古老的天文学不仅获得了新生，而且又一跃而为当代自然科学中最活跃的前沿阵地之

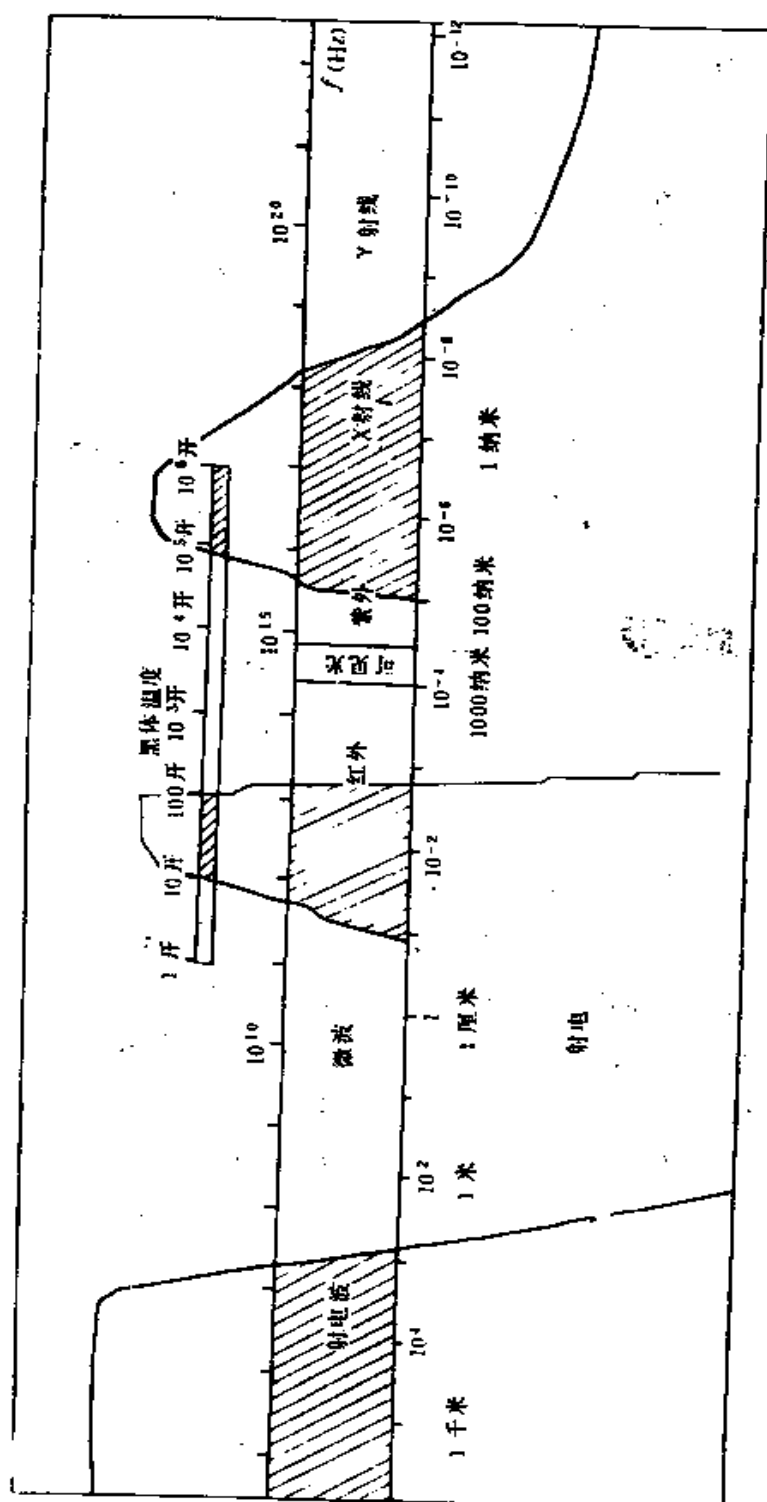


图 3.1 人体的电磁辐射波谱

一。

二、大气窗口

地球表面外有一层浓厚的大气(§4.3),由于地球大气中各种粒子与天体辐射的互相作用(主要是吸收和漫反射),使得大部分波段范围内的天体辐射无法达到地面。人们把能到达地面的波段范围形象地称为“大气窗口”(图3.2)。根据研究,地球大气的“窗口”有三个。

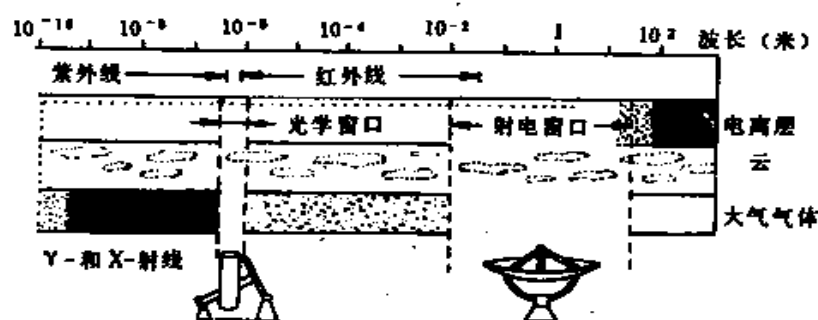


图 3.2 天体辐射可通过地球大气的三个“窗口”

(1) 光学窗口: 这是最重要的窗口, 波长在300—700纳米^①的范围, 也即包括了可见光的波段(400—700纳米), 人类幸而有这样的窗口, 否则地球上将是一片永恒的黑暗。

(2) 红外窗口: 红外波段(0.7—1000微米)的情况比较复杂。这是因为地球大气中有许多成分, 不同分子吸收的红外波段并不一致(表3.1), 在水汽分子和二氧化碳所吸收的间隙中都可以作为小窗口, 最宽的一段在8—13微米范围(但其中在9.5微米附近有一小段臭氧造成的吸收带)。

17—22微米实质是半透明的窗口, 在高山地区由于避开了大部分水汽, 则可以观测到一些波长大于22微米的红外辐射。

^① 国际单位制中, 波长常用纳米作单位。(纳米 = 10^{-9} 米 = 10埃)

表 3.1 大气的红外吸收

吸收范围(微米)		吸收的分子
0.71—0.735,	0.81—0.84	水汽
0.89—0.99,	1.07—1.20	
1.3—1.5,	1.7—2.0	
2.4—3.3,	4.8—8.0	
13.5—17		二氧化碳
22—1000		水汽

对于天文研究常用的有七个红外窗口：J(1.2 微米)、H(1.6 微米)、K(2.2微米)、L(3.6微米)、M(5.0微米)、N(10.6微米)、Q(21微米)，作为测光系统的标准。

(3) 射电窗口：对于射电波段(波长 $\lambda > 1$ 毫米)也有少量的吸收带，但在13.5毫米(22222兆赫)以后，大气对射电辐射逐渐透明，在40毫米—30米的大片波段中大气几乎完全透明。因此一般把1毫米(300000兆赫)—30米(10兆赫)的范围称为射电窗口。

除此之外，还有“磁波窗口”和“粒子窗口”。前者是指波长大于30米的低频波，后者是指能量大于500兆电子伏的宇宙线，大气对它们在某种意义上讲也是透明的。

三、大气消光和大气色散

其实，对于可见光而言，地球大气也并非是绝对透明的，可见光同样会受到地球大气对它们的吸收和散射，造成了天体辐射的减弱和颜色变化，这称为大气消光。

大气消光的作用与辐射的波长有关。空气分子的消光作用与波长4次方成反比，而尘埃、水滴的消光作用大致与波长1.3次方成反比，因而蓝光比红光受到更多的消光作用，这也是天空呈现蓝色的原因所在。

大气消光还与天体辐射穿过的大气厚度有关，所以天体的地平高度越大，受到的消光作用越小。例如，对于同一颗恒星而言，在地平附近时要暗得多，与它在天顶时(若能达到)相比，星等①可以差三等左右。

根据大气消光理论，对于天顶距为 z 的天体有

$$m(z) = m + KF(z) \quad (3.1)$$

式中 $m(z)$ 是天体的天顶距为 z 时的星等， m 是天体不受消光“应有”的星等， K 为与波长 λ 有关的消光因子(表3.2)。 $F(z)$ 称为“大气质量”，也是一个较复杂的函数，但在 $z < 75^\circ$ 时，有 $F(z) \simeq \frac{1}{\cos z}$ 。

实际上，不同高度处的消光作用可以从有关专门表中查得。

表 3.2 消光因子与波长关系

λ (纳米)	300	400	500	600	800	1000
K	4.9	0.5	0.25	0.18	0.07	0.04

地球大气是一种介质，因而对于不同波长的光线有不同的折射率。这样，大气对于天体的光还有一种色散效应——大气色散。它可以把天体的辐射变为一条沿着地平经圈的短短的小光谱。而这种大气色散度的大小又与天顶距有关：天顶距越大，色散度越大。

当然，地球大气的色散度非常小，在天顶附近的光谱，角距仅3"左右，但在一些精密测量中却是不容忽视的。

四、大气折射和大气湍动

地球大气是上疏下密的介质。到达地面上的天体辐射在经过地球大气时必然会受到折射作用(图3.3)，以致使观测者见到的天

① 天体的亮度以星等表示。人眼能见到的最暗的恒星是6等星，其亮度为最亮的1等星的1/100，关于恒星的星等可详见§8.2。

体视位置 S' 已偏离了原来的真位置 S ，这种大气的折射作用称为大气折射或蒙气差。

蒙气差以角 $\rho = z_0 - z$ 来量度，如果把地球大气看作为一层层同心的均质球壳，在天顶附近就近似于平行的平面层，则可得一个近似的公式：

$$\rho \simeq A \operatorname{tg} z + B \operatorname{tg}^3 z.$$

(3.2)

A 、 B 与大气的物理参数——温度、压力——有关，而在 z 不大于 45° 时，(3.2) 式还可近似地写为

$$\rho \simeq 60.29'' \operatorname{tg} z. \quad (3.3)$$

式中 $60.29''$ 称之为大气折射常数。在 $z = 70^\circ$ 时，(3.2) 式的误差略大于 $1''$ ，但当 z 超过 80° 时，(3.2) 式已不能成立。

一般情况下，蒙气差有专门表可查，较有权威性的是苏联普尔科沃天文台于 1870 年颁布的《大气折射表》。在《中国天文年历》中也刊有天顶距 $0^\circ - 76^\circ$ 的蒙气差表。

实际上地球大气的密度分布情况相当复杂，同心均质球壳仅是理想化的模型，真正的地球大气不同密度的层次彼此并不平行，也不完全呈球形。同时，大气中还不时有各种扰动、湍流，使大气密度出现随机的起伏和不规则变化，这样导致折射率的畸变，从而影响了天体的成像质量。肉眼所见的恒星光闪烁不定也是其表现形式之一。

对于望远镜观测，大气湍动的影响更加严重。它使得视场中的恒星像出现频率约 2000 赫的“闪烁”，使其亮度和颜色呈现出不规则的微小变化，湍动还使恒星像在视场中的位置不停地抖动，不呈点像而为小的视圆面，这些都给天文观测造成了很为不利的影

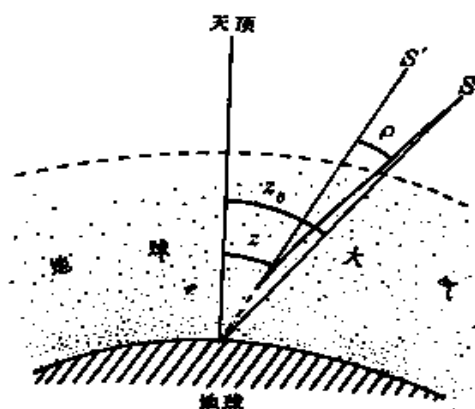


图 3.3 大气折射

响。

一般天文台建立在远离城市的高山上，主要就是为了尽量减少地球大气造成的这种无法消除的有害影响和城市灯光的干扰。

五、天体的四种信息源

除了少数陨石及阿波罗宇航员带来的月球岩石标本可以作分析实验外，人类对于天体的一切知识，都直接、间接来自于四种信息亦即天体所发出的各种辐射及宇宙线：

(1) 电磁波：天体的电磁波波谱很广，从长达几千米的射电波到能量很高的 γ 射线(表3.3)。过去天文学的历史是光学天文学的研究发展史，并取得了巨大的成就。人造卫星上天后，全波天文学又为人们展示了广阔的前景。可以相信，天体的电磁辐射仍是当今人们认识宇宙、研究天体的最主要途径，今后一定还会有许多重大的发现。

表 3.3 天体的电磁辐射

分 域		波 长 范 围
射* 电	米 波(米)	1—30
	厘米波(厘米)	1—100
	毫米波(毫米)	1—10
红 外	远红外(微米)	25—1000
	近红外(微米)	0.7—25
可见光 (纳米)		400—700
紫 外 (纳米)		10—400
X 射线** (纳米)		0.01—10
γ 射线 (纳米)		<0.01

* 厘米波和毫米波也称之为微波(0.3毫米—10厘米)。

** 也有认为X射线波长是0.001—10纳米。

(2) 宇宙线：宇宙线实质上是来自宇宙空间的各种高能粒子，如质子、 α 粒子、高能电子等等。这也是人类能够直接“捕获”的天体“样品”之一。因此常常用以研究天体演化，太阳系和银河系

的磁场以及各种高能现象。

可惜的是，由于宇宙线是带电粒子，所以它在传播过程中受到星际磁场、行星际磁场的复杂作用，使得地球上观测到的宇宙线已是各向同性的了。这样，人们无法根据地球上测出的宇宙线方向来寻找发射源。这是一个很大的局限。

(3) 引力辐射：爱因斯坦广义相对论预言了引力波的存在。毫无疑问，引力辐射一定也会载着有关波源的信息。但由于它的作用极其微弱，目前有关它的研究还刚刚开始，已有一些观测可以间接证明引力波的存在，相信随着科学的不断发展，这方面的研究一定也会获得重大的成果。

(4) 中微子辐射：严格说来，中微子也应属于宇宙线。但由于其特殊性和重要性足以使它独树一帜。

中微子是一种不带电、静止质量接近为零^①与一般物质几乎不发生作用的基本粒子。因此只有中微子才可能从恒星内部逃逸出来，而且它又不受磁场的影响，这样可对中微子进行探测，也只有对中微子进行研究，才有可能获得有关恒星内部的第一手资料。此外，在恒星演化的晚期阶段，中微子也扮演着重要的“角色”。在类星体、活动星系及宇宙学的研究中，也有许多中微子过程。所以尽管就目前的接收技术而言，探测中微子还有相当大的困难，但仍然已获得了一些进展。

§ 3.2 光学望远镜

望远镜是人眼的延长，人眼的瞳孔睁大时直径不过在6—8

① 中微子的静止质量以前认为等于零，但由于“太阳中微子失踪案”(§ 7.2)，使得中微子质量问题引起了很大争论，至今尚未有确切定论，但可以肯定，即使不等于零，也一定十分微小。

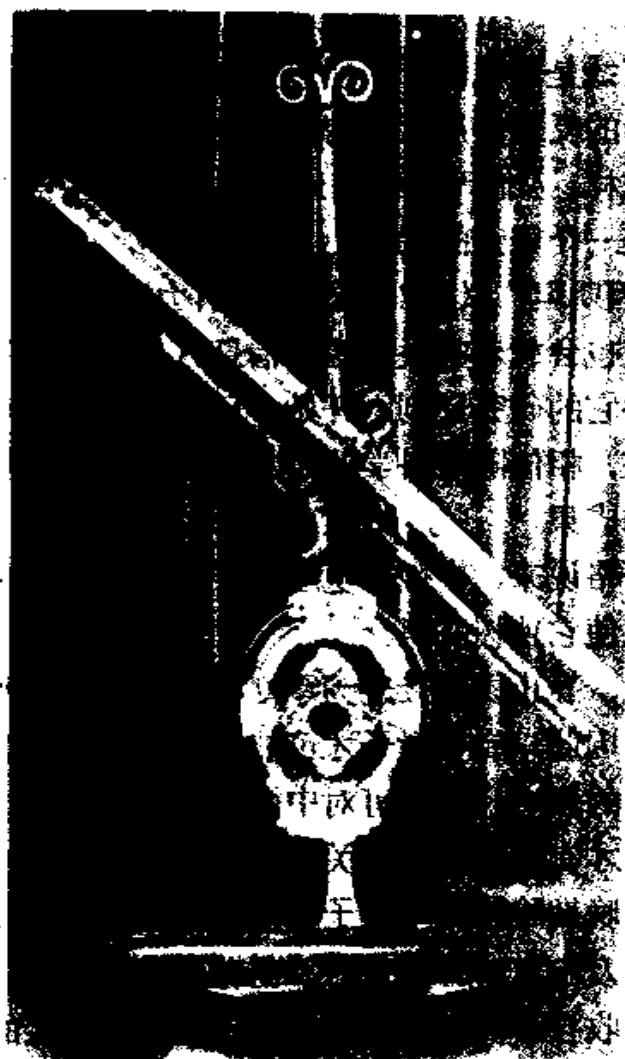


图 3.4 伽利略手制的第一架天文望远镜

毫米之间，接收遥远天体的辐射的能力比较微弱。因此当1608年荷兰人发明望远镜的信息传到意大利时，伽利略立即动手自制了两架最简单的望远镜（图3.4）。1609年底，他把它指向了天空，获得了许多激动人心的重大发现，为哥白尼日心说提供了观测依据，从而开创了“望远镜天文学”的新时代。

三百多年来，望远镜的制作已获得了巨大的发展，不仅建造了许多大型望远镜，使接收光学辐射的能力提高了 10^6 倍。而且发明了许多性能很好的附属设备和

辐射接收器，使人们能从事多方面的研究。

顺便说明，因为光学望远镜是天文学研究的最基本工具，所以通常所说的望远镜如不特别说明，一般都是指光学望远镜。

一、折射望远镜

最早建造的天文望远镜都是由透镜组成的折射式。伽利略式以一块凸透镜作物镜，一块凹透镜作目镜。后来的开普勒式则把目镜也改为凸透镜，这样既可获得较大的视场，又可安装瞄准十

字丝，因此为目前天文界所普遍采用。

折射望远镜的光学原理如图3.5。但是单透镜常有严重的各种像差，影响成像的质量。因而现代折射望远镜的物镜、目镜都是复合透镜——用具有不同折射率的光学玻璃，经过精心设计、磨制而成的。

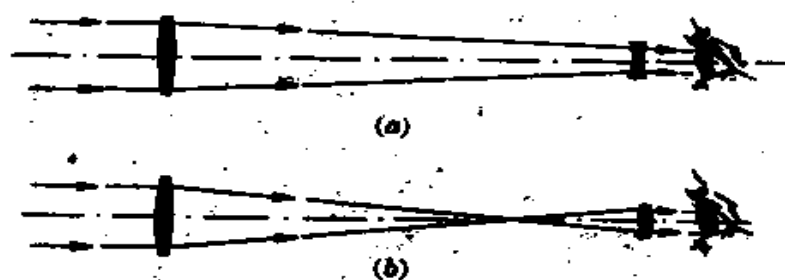


图 3.5 折射望远镜的光路图

(a) 伽利略式； (b) 开普勒式

折射望远镜的优点是焦距长、底片比例尺大、对镜筒弯曲不敏感，最适合于做天体测量方面的工作。缺点是它总有残余色差，对紫外、红外波段的辐射吸收很厉害。巨大的光学玻璃也十分难以浇制，加上造价甚高，因此于1897年建造的直径1.02米的利克望远镜(图3.6)至今仍是“世界之最”。目前世界上较大的、口径在70厘米以上的折射望远镜共有8架(表3.4)。

表 3.4 世界上最大的八台折射望远镜

口径(厘米)	焦距(米)	所属天文台	所在国家	天文台海拔(米)	启用年份
102	19.4	叶凯士天文台	美国	334	1897
91	17.6	利克天文台	美国	1283	1888
83	16.2	巴黎默东天文台	法国	162	1893
80	12.0	中央天体物理研究所	民主德国	107	1899
76	14.0	普尔科沃中心天文台	苏联	75	1885
76	14.1	阿勒格尼天文台	美国	370	1914
74	17.9	尼斯天文台	法国	376	1886
72	8.5	原格林尼治天文台	英国	47	1894



图 3.6 世界上最大的折射望远镜，口径1.02米

二、反射望远镜

物镜是凹面反射镜的望远镜统称为反射望远镜。它们的光学结构可有许多种不同的型式，目前常用的有以下四种：牛顿式、卡塞格林式、格雷果里式及折轴式(图3.7a、b、c、d)。

反射望远镜由于光路通过二次反射或折射，因而比折射望远镜短得多，有时还可以省却笨重的镜筒装置。反射望远镜还有一大优点是完全没有色差，可以获得质量极高的像和光谱，特别适合于天体物理的研究工作，此外，它还有许多其他的优点，如对

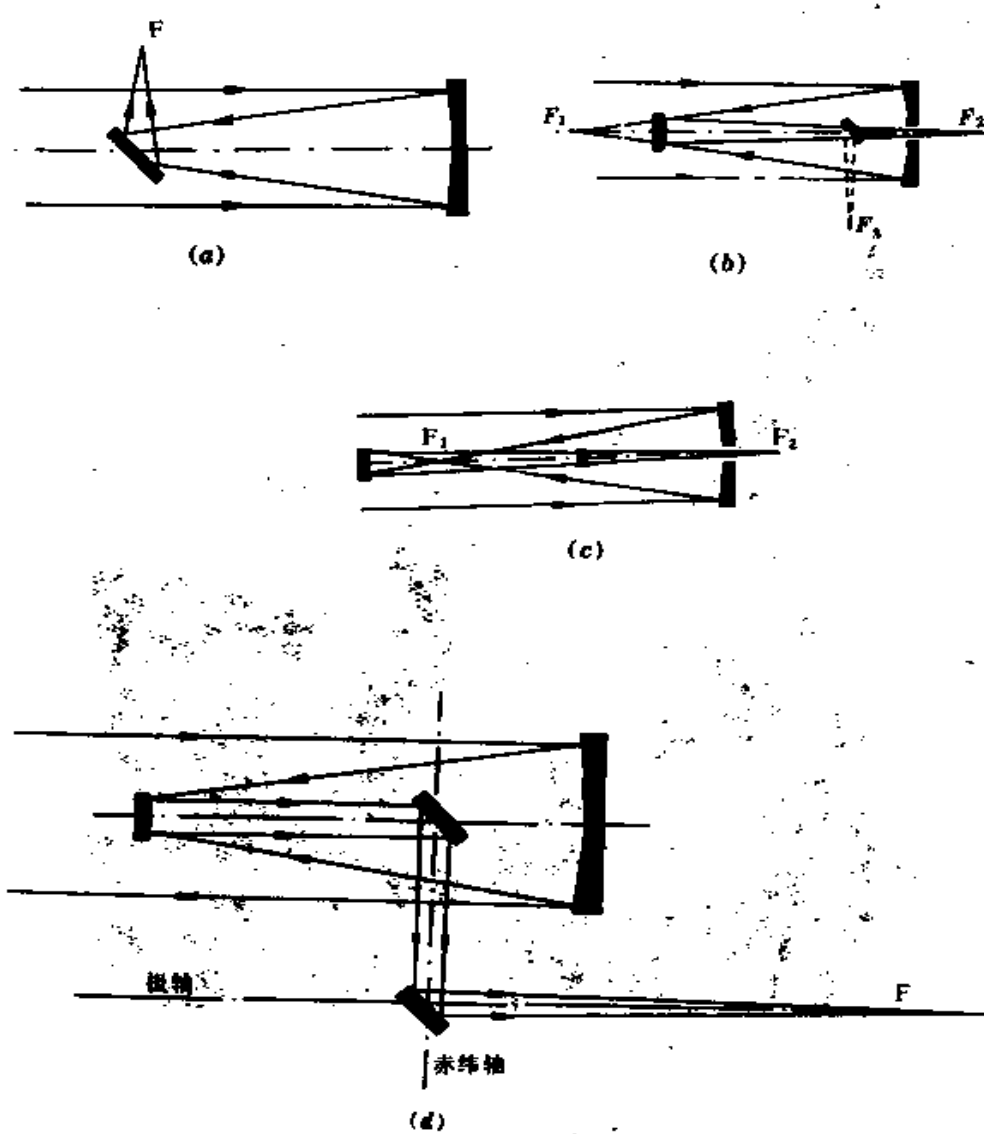


图 3.7 反射望远镜的光路图

(a) 牛顿式; (b) 卡塞格林式; (c) 格雷果里式; (d) 折轴式

镜面材料要求较低,磨制起来比较容易,成本也远比折射望远镜低廉。目前世界上最大的两架反射望远镜是苏联的6米镜(图3.8)和美国的5.08米镜(图3.9)。苏联的6米镜由于设计上的问题,并未达到预期的效果,建树不多,相反美国的5米镜在天文学中有着特殊的地位。



图 3.8 苏联的6米反射镜

据统计,口径在2.5米以上的反射望远镜,目前世界上共有1台(表3.5)。

反射望远镜不可能完全取代折射望远镜,因为它也存在着一些固有的不足:视场太小;没有镜筒的反射镜有散射光的影响;镜面总有些互相挡光,无形减少了所接收的辐射;它的物镜镀层易被氧化,使用一段时期后就需要重新镀铝。

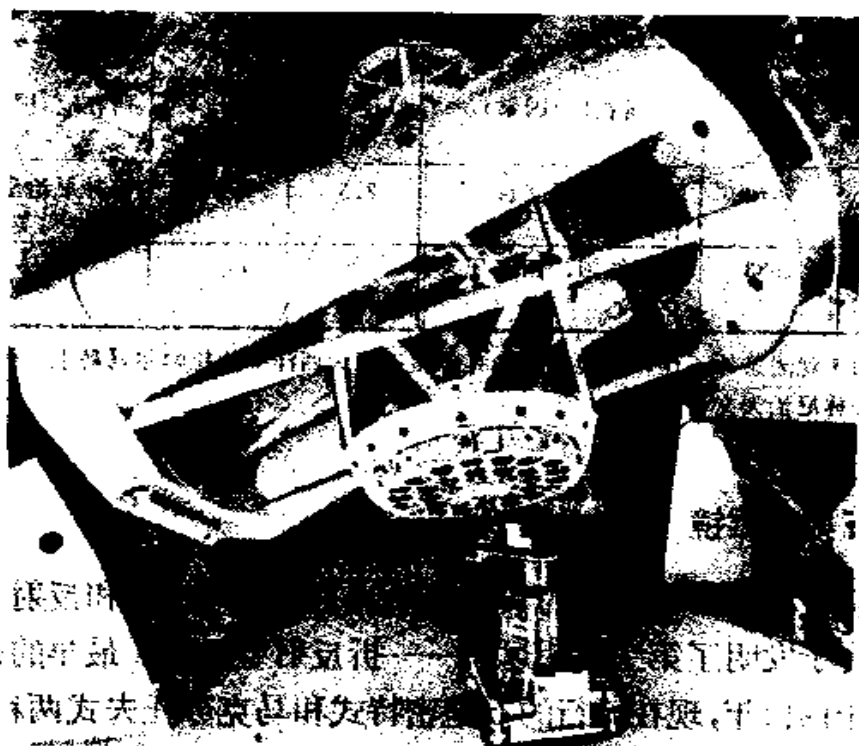


图 3.9 美国的 5 米反射镜

表 3.5 世界上口径超过 2.5 米的 17 架反射望远镜

口径(米)	完成时间 (年)	所在地(国家)	口径(米)	完成时间 (年)	所在地(国家)
6.0	1976	专门天体物理天文台 (苏联)	3.2	1979	莫纳克亚红外望 远镜(美国)
5.08	1948	帕洛玛天文台(美国)	3.0	1959	利克天文台(美 国)
4.0	1973	基特峰国家天文台 (美国)	2.7	1989	麦克唐纳天文台 (美国)
4.0	1976	美国美洲际天文台 (智利)	2.6	1961	克里米亚天体物 理台(苏联)
3.9	1975	英、澳赛丁斯普天文 台(澳大利亚)	2.6	1975	比拉子天体物理 台(苏联)
3.8	1978	英、法、美莫纳克亚 天文台(美国)	2.5	1917	威尔逊山天文台 (美国)
3.6	1979	加、法夏威夷天文台 (美国)	2.5	1976	美国海耳南天文 台(智利)

(续表)

口径(米)	完成时间 (年)	所在地(国家)	口径(米)	完成时间 (年)	所在地(国家)
3.6	1976	欧洲南天天文台(智利)	2.5	1967	格林尼治皇家天文台* (英国)
3.5	1983	联邦德国、西班牙天文中心			

* 由于观测条件不佳,该镜已于1981年搬迁至大西洋中的拉帕尔马岛上,但仍属格林尼治天文台。

三、折反射望远镜

在制造和使用望远镜的实践中,为了能兼顾折射和反射镜的优点,终于发明了第三类望远镜——折反射望远镜。最早的折反射镜制于1814年,现在流行的有施密特式和马克苏托夫式两种(图3.10)。两者的不同处是反射镜前面的改正镜形状不一样,施密特式改正镜的形状是比较奇特的非球面镜;马克苏托夫式则近似为弯月形。

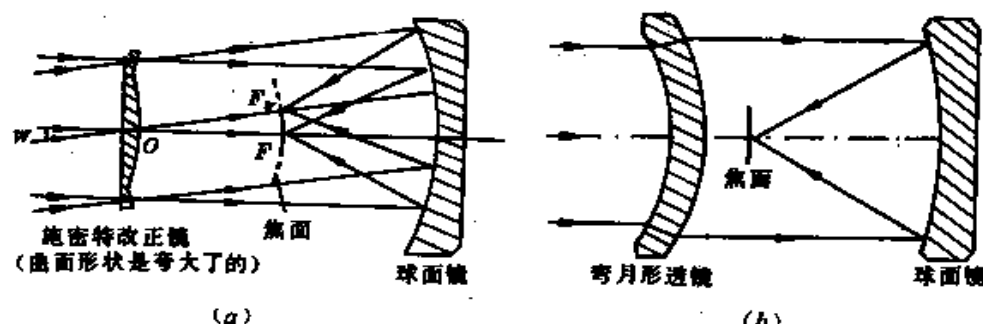


图 3.10 折反射望远镜的光路图

(a) 施密特式; (b) 马克苏托夫式

折反射望远镜的最大优点在于光力强、视场大、像差小,是观测有视面天体(如行星、星云)的最好工具。同时也适合于做巡天工作以及流星、人造地球卫星的观测。

美中不足的是改正镜很难磨制,无法做得很大。现在世界上最



图 3.11 美国帕洛玛山天文台的施密特望远镜

大的折反射望远镜是民主德国科学院天文台的口径为1.34/2.03 (米)望远镜^①,其次是美国帕洛玛山天文台的1.22/1.86 (米)施密特望远镜(图3.11),迄今改正镜超过1米的仅有8台(表3.6)。

表 3.6 改正镜超过1米的折反射望远镜(8架)

口径(厘米)		焦 距 (厘米)	所属天文台及国家、所在地	天文台高度 海拔(米)	启用年份
改正镜	主镜				
134	203	400	德国科学院天文台(民主德国)	331	1960
122	186	307	帕洛玛山天文台(美国)	1706	1948
122	183	307	爱丁堡皇家天文台(英国);位于澳大利亚	1131	1973

① 折反射望远镜的口径通常都有两个数字:前一个是改正透镜的直径,后一个是反射镜的直径。

(续表)

口径(厘米)		焦 距 (厘米)	所属天文台及国家、所在地	天文台高度 海拔(米)	启用年份
改正镜	主镜				
105	150	330	东京天文台(日本)	1130	1974
102	137	300	乌普萨拉大学天文台(瑞典)	33	1964
100	162	305	欧洲南天天文台(西欧六国)(位于智利)	2400	1969
100	150	301	委内瑞拉天文研究所(委内瑞拉)	3600	1978
100	132	213	比拉干天体物理台(苏联)	1450	1961

四、下一代望远镜 (NGT)

随着望远镜口径的增大,一系列技术问题接踵而来。美国5米镜的镜头自重达14.5吨,可动部分的重量为530吨,6米镜则是重达800吨的庞然大物,望远镜的自重引起的镜头变形已很可观。热传递使巨大的反射镜产生不规则的热膨胀,造成镜面畸变而影响成像质量。而且制造更大的镜面材料也存在着巨大的困难,加上传统方法制造大望远镜的费用几乎与口径的平方甚至立方成正比,因而,要制作更大口径的望远镜必须另辟新径。

下一代望远镜除了具备更强的集光能力和更高的分辨本领外,还应考虑同时可用于红外及毫米波的观测,能进行干涉测量。天文学家对此已提出了几种方案,其中有一类是多镜面望远镜(MMT)。第一台这种新式望远镜已于1979年在美国亚利桑那州的霍普金斯天文台建成使用。它由6个口径1.8米的卡塞格林式望远镜组成(图3.12)利用一个“光束合成器”把六束光全聚在一个共同的焦点上,其合成的效果相当于一个口径4.5米的反射镜。

多镜面望远镜的主要优点在于可以制成更大口径的望远镜,造价也远远低于单镜,因此很可能这是今后建立巨型望远镜的主要发展方向。例如,美国得克萨斯大学准备在MMT基础上,建造MMT₂——用8块直径5米镜合成一个相当于14米的巨型望远镜,另外美国基特峰国家天文台、加拿大和苏联都在酝酿制造相

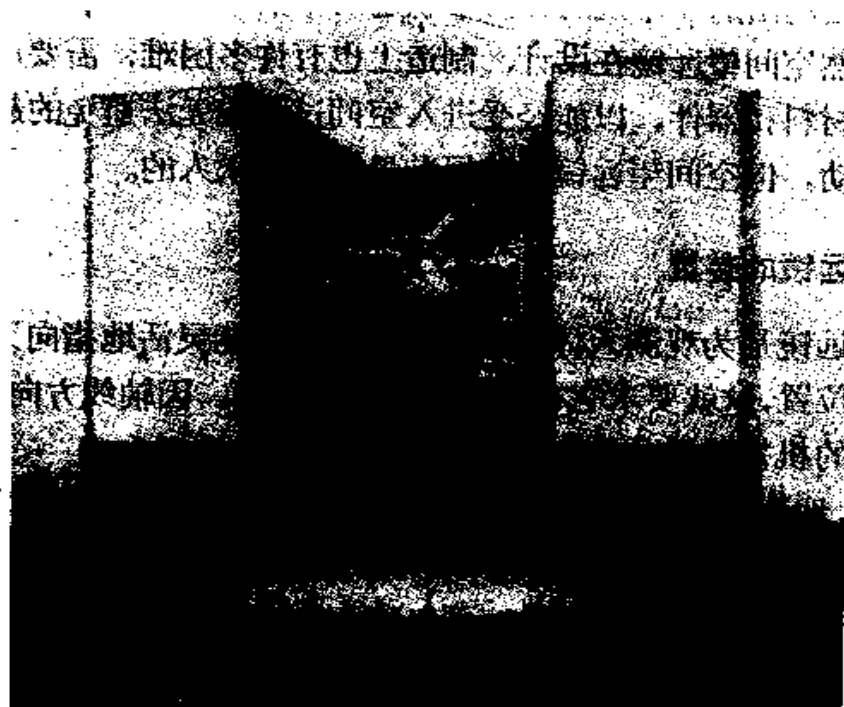


图 3.12 1979年建成的第一台多镜面望远镜

当于直径25米的合成望远镜,苏联拟用500块小镜片合成,加拿大则用60多个3米镜来合成……。

可以相信,下一代望远镜建成后必将促使人类对宇宙的认识更加深化。

五、空间望远镜(ST)

如前所述,地球大气对于天文观测有严重的无法消除的影响,因而在人造地球卫星上天后,人们更希望能进行大气外的天文观测,空间望远镜就是为此而设计制造的光学望远镜。与地面观测相比,它有许多无与伦比的优点:它可以接收到宽得多的波段,在短波方面至少可延伸到100纳米处。没有大气抖动后,分辨本领可以得到很大的提高,空间没有重力影响,仪器不会因自重而形变。美国早就计划在八十年代中把一架口径2.4米的空间望远镜送上天去,并在轨道上能工作10年以上时间。它的分辨角小于 $0.1''$,甚

至比帕洛玛山的 5 米镜的分辨本领还高十倍。

当然空间望远镜在设计、制造上也有许多困难，需要用许多特殊的材料和器件，以能经受进入空间过程中无法避免的超重和剧烈振动，但空间望远镜的美好前景是非常诱人的。

六、望远镜的装置

望远镜是为观测天体而制造的，它必须能灵活地指向天球上的任意位置，这就要求它有两条互相垂直的轴。因轴线方向不一，望远镜的机械装置分为地平式与赤道式两大类。

1. 地平式 与地平坐标相对应，它的两条轴分别在垂直和水

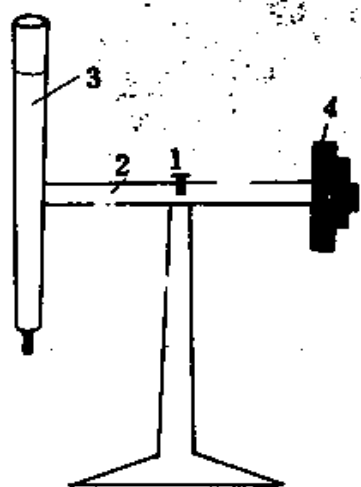


图 3.13 地平装置示意图

1. 垂直轴；2. 水平轴
3. 望远镜；4. 平衡锤

平方向，当望远镜绕垂直轴转动时，它的地平经度在连续地变化，但地平纬度保持不变，而当它绕水平轴转动时则地平经度不变(或改变 180°)，仅使地平高度变化(图3.13)。

天体测量仪器，观测人造卫星和寻找彗星的望远镜一般都采用地平式装置，而一些重量很大的大望远镜如苏联 6 米镜、及大型射电望远镜(§3.3)都是采用这种稳定性较好的地平装置的。

2. 赤道式 赤道式的两条轴分别称之为极轴(指向北天极或南天极)和赤纬轴。当望远镜绕极轴(又称赤经轴)旋转时，只改变赤经而不改变赤纬，实际上这就是天体的周日运动圈；赤纬轴是垂直于极轴的，当绕赤纬轴转动时，望远镜始终在同一子午圈上，因此赤经不变(或改变 180°)仅在不断改变赤纬。赤道式装置装上转仪钟后就可补偿天体的周日运动，而达到长时间跟踪某一天体的目的。

赤道式装置还有不同的型式，大体上有德国式、英国式、摇

篮式、马蹄式和叉式五种(图3.14)。

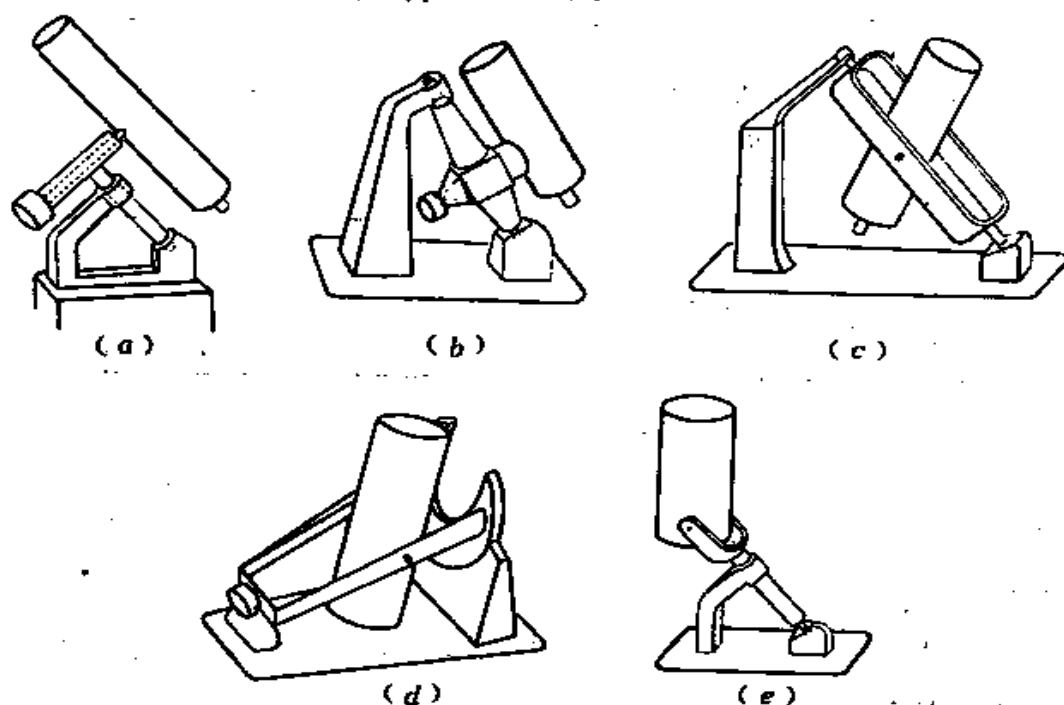


图 3.14 五种赤道式装置

(a) 德国式; (b) 英国式; (c) 摇篮式(英); (d) 马蹄式(美); (e) 叉式(美)

七、望远镜的主要参数

许多人常常误解,以为天文望远镜越好,它的放大倍数应越大。实际上决定天文望远镜的光学性能有6个,而其中最重要的参数是有效口径,并不是放大倍数。

1. 口径 也称有效口径,以符号 D 表示。一般说来,望远镜的口径是指其物镜未被遮掩,真正起集光作用部分的直径。显然,收集天体辐射的能力与 D^2 成正比。因此在望远镜里,恒星虽然仍然呈现为一个个光点,但亮度却增加了很多倍,而且口径越大,星象越亮,或者说能见到越暗弱的恒星。在作恒星的照相观测时,口径越大,需要的曝光时间越短;反过来,以同样的时间曝光,大口径的望远镜能拍到更暗的恒星。

2. 极限星等 也称贯穿本领, 以 m_l 表示。它是指在理想的观测条件下, 把望远镜指向天顶时, 能观测到的最暗的星等, 贯穿本领越大, m_l 值也越大。对于目视观测而言, 有人统计直径与极限星等的关系可如表3.7。

表 3.7 望远镜直径与极限星等关系

D (毫米)	40	50	60	70	80	90	100	150	600	5000
m_l (星等)	9.9	10.3	10.7	11.0	11.3	11.5	11.8	12.7	15.3	20.1

也有人得到了一个经验近似公式

$$m_l \approx K + 5 \lg D \quad (3.4)$$

当 D 以毫米作单位时, 有 $K \approx 1.9$ 。作为对照, 图3.15列出了一些天体的星等数。

3. 相对口径 通常又称光力, 以 A 作符号。定义为: 有效口径 D 与焦距 F 之比, 即:

$$A = \frac{D}{F} \quad (3.5)$$

相对口径是观测有视面天体的重要参数, 因为在焦平面上, 所成的像的亮度与收集的辐射、即口径平方 D^2 成正比, 而同时与其像的面积成反比, 即 $\propto F^{-2}$, 因此, 象的亮度与相对口径平方成正比, 也即是说在观测行星、彗星、星云之类有视面天体时, 重要的不是有效口径 D , 而是相对口径 A 。由于受到光学原理的限制, 望远镜的相对口径不能任意选取。折反射望远镜可以达到较大的值, 一般可达 $1/2 \sim 1/3$, 有的甚至还可以大于 1; 折射望远镜的相对口径最小, 很少能超过 $1/7$ 的, 对于双透镜物镜, 相对口径不大于 $1/15$, 反射望远镜居于其中, 一般为 $1/3 \sim 1/5$ 。

4. 分辨角 这也是衡量天文望远镜的又一重要参数, 其意义是像点刚能分辨开的两个发光点的角距。望远镜性能越好, 其分辨角便越小, 分辨本领就越高。一架磨制得很好的望远镜, 理论

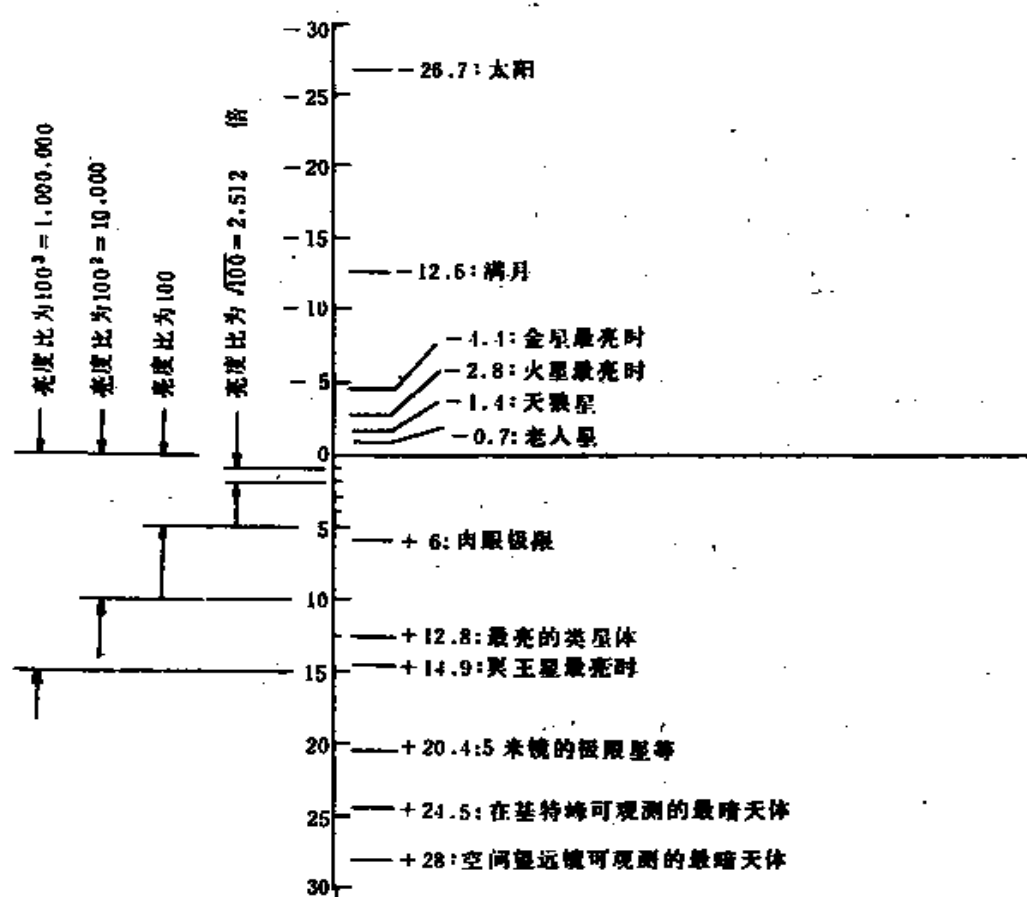


图 3.15 5 米望远镜的极限星等与一些天体的亮度

上的分辨角由下式可以算得:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (3.6)$$

式中 λ 为观测时的波长; 单位与口径相同。例如, 目视观测时, 人眼最敏感的波长为550纳米的黄绿光, 照相观测时, 最敏感的是440纳米, 因此, θ 用角秒, D 为毫米时有:

$$\left. \begin{aligned} \theta_v'' &= \frac{140''}{D} \\ \theta_p'' &= \frac{110''}{D} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

应当指出(3.7)式只是理论值。由于大气湍动等外界因素, 望远镜设计、制作等内部缺陷, 一般望远镜的分辨角比(3.7)式给出的要大。同时, 在地球上, 不管望远镜口径多大, 由于地球大气的影响, 分辨角常不小于1"。

5. 放大倍率或底片比例尺 天文望远镜的放大率是指角度的放大率 G , 从图 3.16 不难看出:

$$G = \operatorname{tg} \omega' / \operatorname{tg} \omega \quad (3.8)$$

由于 ω' 一般都很小, 不难将(3.8)式变为

$$G = F / f \quad (3.9)$$

式中 F 、 f 分别是物镜与目镜的焦距, 通常通过改变不同焦距的目镜, 使同一望远镜能有不同的放大倍率。

应当指出的是, 在天文观测时, 一般并不追求过大的放大率。

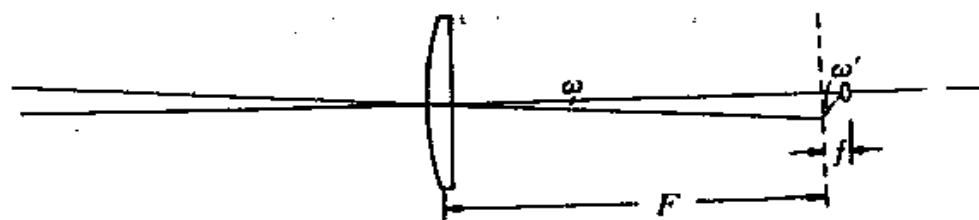


图 3.16 望远镜的放大率

因为对于恒星，不管有多大的放大率，星像仍然只是光点，而大气抖动的影响却增大，造成星像的漂移。对于有视面天体， G 过大后，像变得很暗淡，加上大气的抖动，效果也反而不佳，因此一般控制在30—300倍之间。

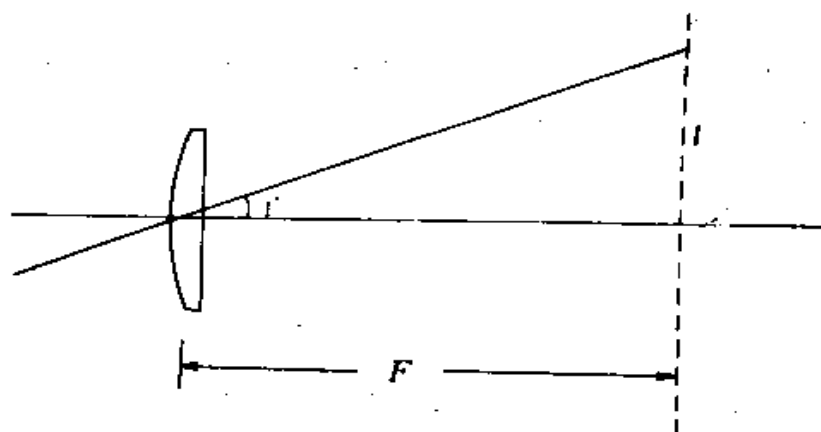


图 3.17 底片比例尺

在照相观测中，目镜被底片盒代替，因此第五个性能指标是底片比例尺——角径为 $1'$ 的像在底片上的线距离，以 l 表示。如图3.17，不难推得：

$$l = F \cdot \operatorname{tg} 1' \simeq 2.91 \times 10^{-4} F \quad (3.10)$$

例如，若一架望远镜的焦距为1500毫米，则由(3.10)式可得其底片比例尺为0.44毫米，用它来拍摄月亮，则满月(角直径为 $31'$)象的直径为13.6毫米。

6. 视场 目视观测的视场即是可见天空部分的角直径 2ω (图3.16)。有趣的是视场与口径 D 无关，而仅与放大倍率有关。从图3.16知望远镜的视场 ω ，满足下式

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{1}{G} \operatorname{tg} \omega' \quad (3.11)$$

因为目镜的工作视场 $2\omega'$ 通常都是 40° ，故(3.11)式可化为

$$\tau g \omega \simeq \frac{1}{G} \tau g 20'' \simeq \frac{0.364}{G} \quad (3.12)$$

在照相观测时，视场仅是指恒星成像比较好的中央部分的角直径。三类望远镜中，反射望远镜的视场最小，一般都不大于30'。折反射望远镜的视场最大，一般都可达十多度，有的甚至可达几十度。折射望远镜居其中，一般在2—3°间。

八、分光仪器

研究天体的光谱是天体物理学的一个重要内容。事实上，许多天体的物理性质和参数都来自于光谱分析。但除太阳外，一般所接收到的天体的辐射都十分微弱，因此获得天体光谱的分光仪器通常要借助于大望远镜，天文学上常用的分光仪器有：恒星摄谱仪（有缝和无缝）、物端棱镜、非物端光栅、星云摄谱仪等。

1. 恒星（有缝）摄谱仪 获取恒星光谱的主要仪器。它在望远镜的焦平面上放置一个非常精密的狭缝，其两边缘不仅要十分平直，而且要严格平行，宽度还可调节。使用宽度取决于底片分辨率，通常为0.02—0.03毫米，其高度一般为几厘米左右。准直镜把经过狭缝的恒星光又变成平行光射向光栅（图3.18），由于光栅的色散作用，使得恒星光变为光谱而被拍摄下来。

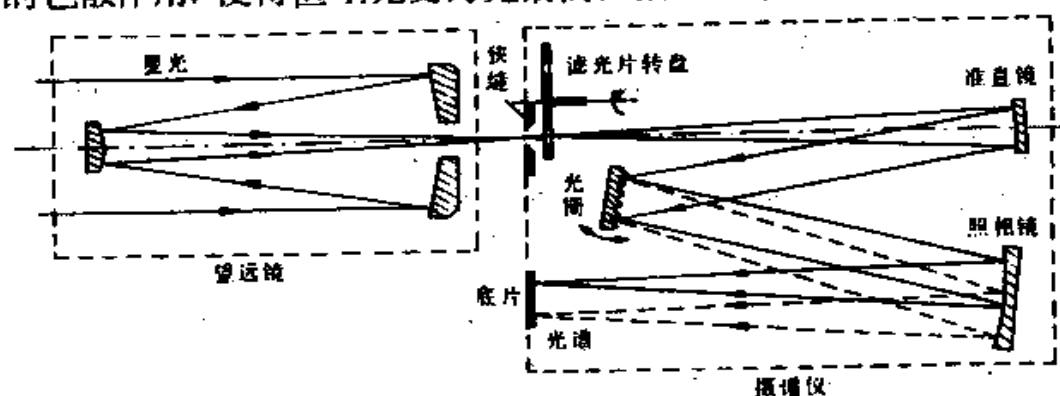


图 3.18 恒星（有缝）摄谱仪光学系统图

色散度 $\frac{d\lambda}{dl}$ 应根据所研究的天体的亮度或研究目的而定, 低的色散度仅为20纳米/毫米, 而高色散度可达 10^{-1} — 10^{-2} 纳米/毫米。

恒星摄谱仪的一个突出优点是可以同时拍得一系列强度的定标光谱, 以便进行“绝对测量”, 从而获得有关恒星的许多资料: 恒星的视向速度、自转情况, 求得它的表面温度、压力、电子密度、化学组成、磁场强度, 并推算出它们的直径、质量等重要参数。

2. 物端棱镜 在作照相观测时, 于望远镜物镜前放一块小顶角的棱镜 (图 3.19)。恒星光先由棱镜色散, 再经望远镜聚焦而成光谱, 其角色散度为:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = - \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \frac{C}{(\lambda - \lambda_0)^2} \quad (3.13)$$

式中 A 为棱镜顶角, 如南大天文系的棱镜 $A = 15^\circ$, n 为棱镜折射率, C 为与仪器有关的常数, 可通过实测而定出。其负号表示波长减小时, 偏向角增加, 其线色散度则还与望远镜的焦距有关, 但通常在10—100纳米/毫米之间。

物端棱镜的优点是比较简单, 因为没有狭缝装置, 光的损失较少, 能对较暗弱的恒星进行观测, 而且它能一次同时拍得视场内所有恒星的光谱资料, 对于研究恒星光谱的分类效率特别高。但它也有许多重大的缺陷: 棱镜暴露在外, 受外界影响较大, 所以

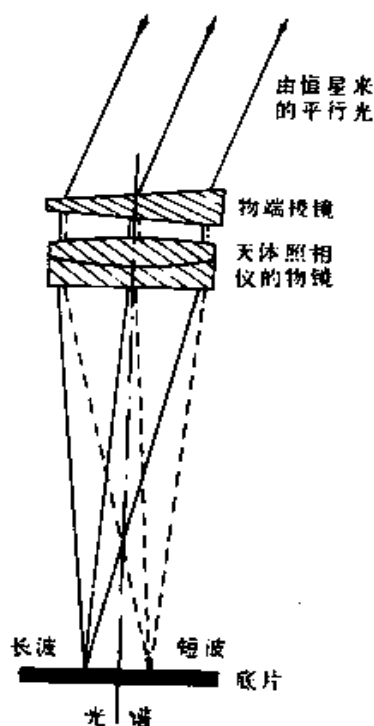


图 3.19 物端棱镜

光谱的质量比有缝摄谱仪低，同时它无法拍摄比较光谱，所以一般只能作定性分析和半定量的研究。

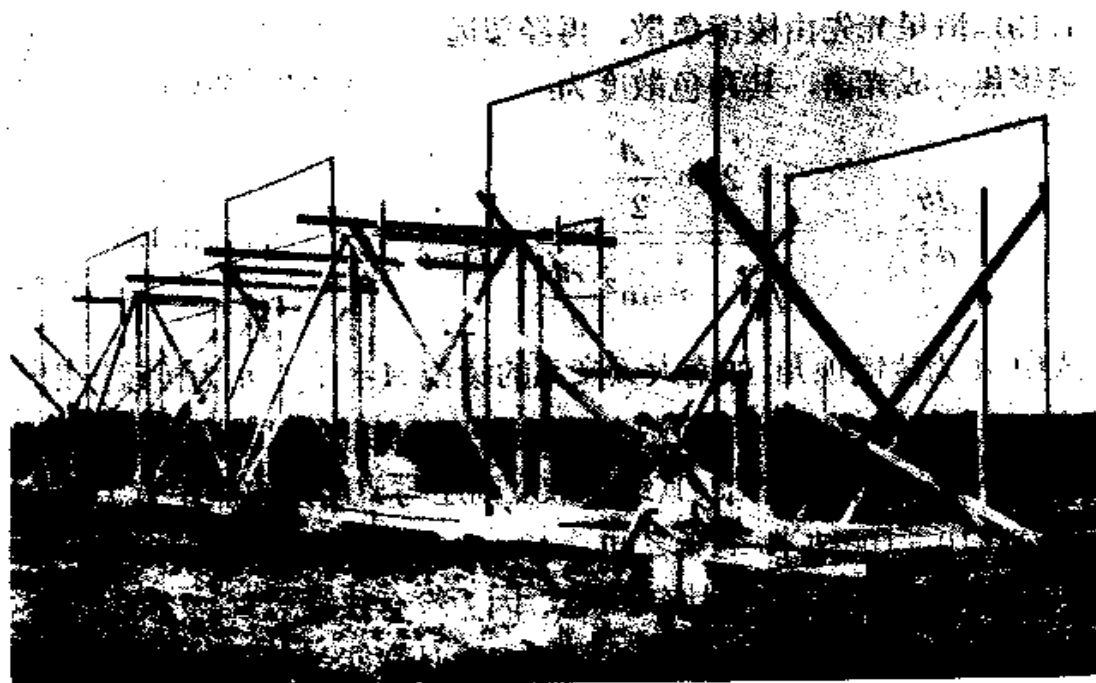
其他分光仪器原理大致相同，不再一一介绍。

§ 3.3 射电望远镜

一、发明简史

射电望远镜的发现无疑是二十世纪天文学上最重大的事件之一，它破天荒地使人们了解到，除了光学辐射之外，天体还存在非常有价值的射电辐射。

1931—1932年，捷裔美籍无线电工程师央斯基(K. Jansky)正在埋头研究无线电短波通讯工作，为了探明天电干扰的来源，他制造了一架类似“旋转木马”的天线(图3.20a)进行探测，从而发现



(a) 央斯基的“旋转木马”



(b) 雷伯的第一架天线

图3.20 最早的射电望远镜

了来自银河系中心区域的射电辐射。

央斯基的发现虽然成了美国许多报纸的“头号新闻”，但学术界却对此无动于衷，没有什么反响。1937年，美国又一位无线电工程师雷伯(G. Reber)继续了央斯基的研究工作，他制造了一台直径9.45米的抛物面天线(图3.20 b)，用以进行探测，并获得了许多重要的观测资料，但是第二次世界大战使得研究被迫中断，其

间一些射电天文学上的发现亦因属“军事机密”而被封锁在军方。

二次大战结束后，射电天文学脱颖而出，1946年，英国开始建造直径66.5米的固定抛物面，1955年直径76米的现代化射电望远镜已开始在英国工作。此外，其他国家也竞相建造了各种型式的射电望远镜，现代的射电望远镜直径不仅达到了305米（见图1.2）（美国阿雷西博天文台的固定抛物面）及100米（图3.21）（联邦德国的全动抛物面），而且发明了高灵敏度及高分辨率、可获得图象的



图 3.21 联邦德国直径100米射电望远镜

综合孔径射电望远镜，发展了分辨率可达万分之几角秒的甚长基线干涉技术，目前世界上一些最大的射电望远镜可见表3.8。

表 3.8 11架最大的射电望远镜

口径(米)	型 式	所在地(国家)
305	固定抛物面	阿雷西博天文台(美国)
100	全动抛物面	射电天文研究所(西德)
91	全动抛物面	国家射电天文台(美国)
76	全动抛物面	焦德雷尔班克(英国)
530×30	赤道式(可动)	基础科学研究所(印度)
300×35	子午式	巴黎天文台南锡观测站(法国)
600	环形反射面	专门天体物理台(苏联)
1620	综合孔径25米×11	韦斯特博克射电天文台(荷兰)
5000	综合孔径12.8米×8	穆拉德射电天文台(英国)
1600	十字形天线	悉尼大学射电中心(澳大利亚)
Y形每臂长42000	综合孔径25米×27	索科罗观测站(美国)

虽然射电望远镜一般得不到光学图象，但它常能观测到光学所见不到的现象。而且除了在短的波长工作的射电望远镜外，它们还是“全天候”的观测仪器，并不受白天黑夜的限制，在浓雾密云下也能照常工作。半个世纪以来，射电望远镜取得了许多重大的发现，大大推动了天文学的发展。

二、基本原理

射电望远镜接收的是天体的无线电辐射，与光学相比，它们都是电磁辐射，因而除了波长范围不一样外，其他没有什么原则性的区别。

经典的射电天文望远镜与光学的反射望远镜一样，利用抛物面把天体的电磁波会聚到前面的焦点上，这个抛物面也常称作为“天线”。通常的射电望远镜包括天线、接收机(包括校准源)、资

料集录设备三大部分(图3.20)。

从波动原理可知,抛物面的精确度应达到工作波长的 $1/10 \sim 1/16$ 。因此,对于米波可用金属网作天线,而在厘米、毫米波观测时,抛物面要用光滑精确的金属板。在抛物面的焦点上有一个收集射电波的装置,称为照明器,它把收到的天体的射电波通过同轴电缆或波导管输入接收机。

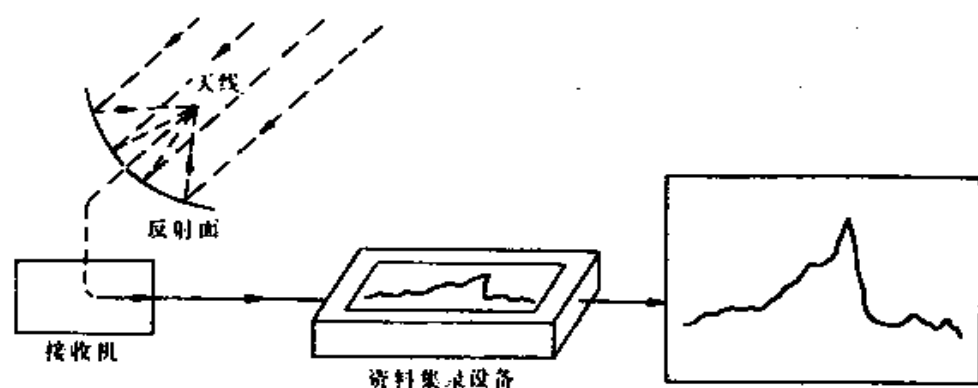


图 3.22 射电望远镜的结构方框图

接收机的作用有两个:一是把由同轴电缆或波导管输入的极微弱的电讯号尽可能地放大,现代高灵敏的接收机通常都能把讯号放大 10^{12} 倍以上;二是通过检波的作用,把高频讯号转化为低频讯号,供集录设备测量和记录下来。

集录设备包括信息处理、记录及显示系统。不同型式、不同目的射电望远镜都有特定的集录系统,现在多数还与电子计算机终端相联接。

应当注意,任何一架射电望远镜都只能在某一波长附近工作,它只能接收所选定的天体某一波长的射电辐射,例如南京大学天文系的太阳射电望远镜的工作波长为3.2厘米,因此对于太阳的毫米波、分米波、米波辐射,它都是无能为力的。这好象光学观测中的单色光观测。

三、基本参数

射电望远镜的基本参数一般只有两个，即灵敏度及分辨率。

1. 灵敏度 是指射电望远镜可以观测到的最小讯号，以 $S_{\min}$ 表示，或者说在观测强射电讯号时能测得的最小变化的能力。

$$S_{\min} = \frac{2kT_s}{A\sqrt{\tau \cdot \Delta f}} \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{赫}^{-1} \quad (3.14)$$

式中各量的物理意义如下： $S_{\min}$ 为可检测的最小功率流量密度，即灵敏度； $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦/开，即玻耳兹曼常数； T_s 是系统的噪声温度， Δf 是接收的频带范围， A 为天线的接收面积， τ 为信号检测积分时间，单位为秒， Δf 为接收带宽，单位为赫。

从(3.14)式可知，灵敏度固然与天线的大小，即接收面积 A 有关，但常常还取决于其他因素，尤其是“噪声”。现代电子学技术可以设计制造放大倍率极高的接收机，但是由于电子器件中电子的热运动，接收机本身就有无法消除的噪声，加上外界的干扰（而它们也同样会被接收机所放大），所以对于固定的天线而言，灵敏度实际上是由信号与噪声之比——信噪比——决定的。因而在无法增加 A 的情况下，最有效的办法是降低 T_s 。近年来，低噪声器件的发展比较迅速，这为提高射电望远镜的灵敏度创造了很好的条件。

2. 分辨率 也称为分辨本领，与光学望远镜相类似，它是指能够区分两个彼此靠近的相同点源的能力，常以分辨角 θ 来量度。

从电子学中得知，天线本身是有方向性的，而且常用其功率方向图(图 3.23)来表示，方向图上 Z 方向功率最大称之为主瓣。向径表示该方向接收功率的大小，两个半功率点之间的夹角 θ 称之为主瓣宽度，同时也是分辨角。

由(3.6)式知道，射电望远镜的分辨角与天线直径成正比、与

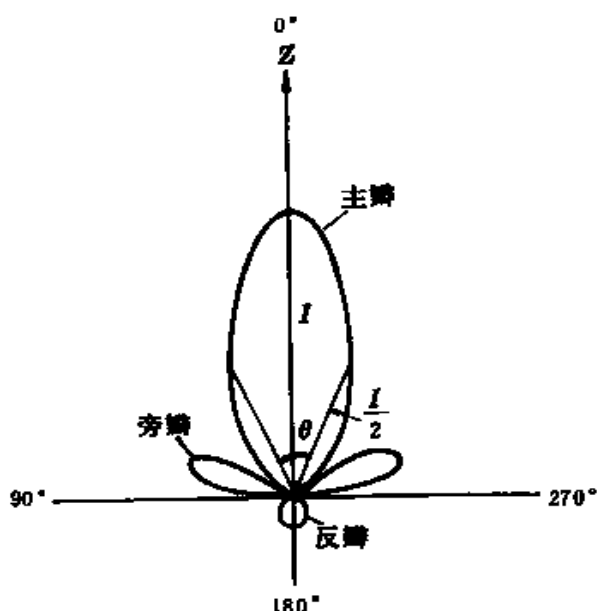


图 3.23 天线的功率方向图

接收波长成反比，所以一般都比光学望远镜差得多，例如雷伯造的第一架射电望远镜 $D = 9.45$ 米， $\lambda = 1.87$ 米，其分辨角竟达 13.8° ，相当于 27 个月球的视直径。难怪当时人们对这样的望远镜不屑一顾了，它根本无法识别辐射源在什么具体的方位。

四、射电望远镜的分类

按设计的要求不同，射电望远镜因天线孔径的构成方式不同而分为连续孔径和非连续孔径两大类。连续孔径是最简单的一种，其天线孔径为接收单元所布满，而后者则并不布满，主要是各类射电干涉仪。

从机械装置看又可分为三种：

(1) 全可转型，又称可跟踪型：它可以迅速改变天线方向，并长时间跟踪观测天体，因此是射电望远镜使用最广泛的一种，各种形式的现代射电望远镜中的基本单元也都是这种全可转型，如著名的英国 76 米及联邦德国的 100 米，都属这种形式。同样，由于两个互相垂直的转动轴不一，也有地平式、赤道式之分，但多数大型射电望远镜都取地平装置。

(2) 部分可转型：由于地球本身在自转，或者说天体有周日运动，因此有一类射电望远镜设计成仅能改变赤纬指向，赤经方向则是作周日扫描，故又称子午式。一些“带形射电望远镜”常采用这类结构，其优点是建造的精度很高，且适合多频段的工作，如法国南锡观测站的仪器就属这类系统。

(3) 固定型：主要天线的反射面固定不动。这样可以减少工程上的巨大困难，大大降低建造成本。这种反射面是球面，没有主光轴，因而可以接收较大角度范围内的天体射电辐射，同时又可采用移动照明器或改变馈源位相的办法，使其方向来回移动。例如在美国阿雷西博的305米射电望远镜就是这种形式。

射电望远镜的种类远比光学望远镜繁复多样，因此，它的分类也有不同的准则。例如按外观，天线的形式则可分为抛物面、抛物柱面、球面、抛物面截带、喇叭、螺旋、行波、偶极天线等多种；而按功率方向束则常常又可分为扇束、铅笔束、多束等几种；按工作类型可分为全功率、扫描、快速成象等三种；按观测目的又可分为测绘、定位、定标、偏振、频谱、日象等六种……。

五、射电干涉仪

射电望远镜开始并不受人重视，这主要是它的分辨率太低，使观测资料的价值不大，因此提高分辨率是最重要的关键。各种类型的射电干涉仪就是为此而发明制造的。

1. 原理 干涉仪的基本原理就是电磁波的干涉原理，不妨以最基本、也是最简单的一种——双天线射电干涉仪来说明之（图3.24a）。将 A 、 B 两个取向一致的天线分别放于东西方向的基线两端，并用两条性能相同、长度相等的“馈电线”连接到同一个接收机上，这就组成了最简单的双天线干涉仪。

这样当它们观测一个与基线的垂线成 θ 角的射电源时，射电波到达 B 的路程比 A 多走的程差 $BC = D \sin \theta$ ，若程差是 $\lambda/2$ 的偶数倍，则两信号同相，强度相加；而若程差为 $\lambda/2$ 的奇数倍，则两信号相位相反、互相抵消。故成为图3.24b 那样的干涉图像，从而大大提高了分辨率。在理想情况下，其分辨角 $\Delta\theta$ 由下式决定：

$$\Delta\theta \simeq \frac{\lambda}{r} \quad (3.15)$$

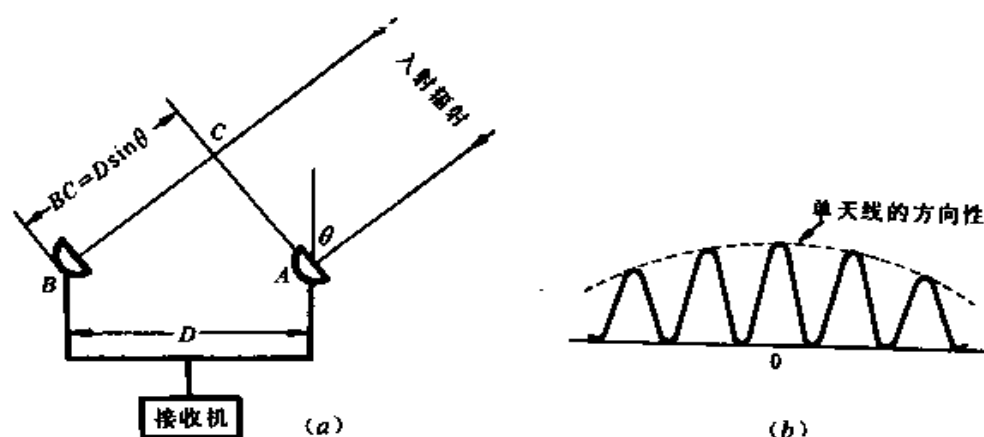


图 3.24 双天线干涉仪
(a) 工作原理图; (b) 方向图

式中 r 是基线长度, 要求有 $r = n\lambda$ 。显然设计长基线比增大望远镜口径容易得多, 但如果在单天线方向图的范围内不止有一个源, 或源的角径 (如太阳) 大于相邻两方向瓣的角距, 则所得的信息仍将是混淆不清的。

后来又发展了其他类型的干涉仪, 如用多个天线等间隔地排在一条直线上, 若相邻两天线间距为 S , 天线数目为 N , 则干涉瓣的主瓣半宽 $\Delta\theta \simeq \frac{\lambda}{NS}$, 两干涉瓣之间的角距 $\delta\theta \simeq \frac{\lambda}{S}$, 这样, 即使基线长度不变, 只要增加天线数目, S 即减小; $\delta\theta$ 迅速增大, 从而也可有效地提高分辨率 (图3.25)。

2. 几种重要的干涉仪 (1) 米尔斯十字: 双天线、多天线干涉仪仅仅只提高了一维方向的分辨率。对于有视面天体的观测则就显得不能满足要求。为此, 澳大利亚的米尔斯 (B. Y. Mills) 设计并制成了一种十字天线 (图3.26), 可以直接获得二维的高分辨率, 两组天线分别排成东西向和南北向。

米尔斯十字的最大的优点是以简单的排列获得了很高的二维分辨率。例如六十年代制造的澳大利亚莫朗格洛的一架米尔斯十字由长1600米, 宽12米的两个抛物柱面组成, 在其两个工作波

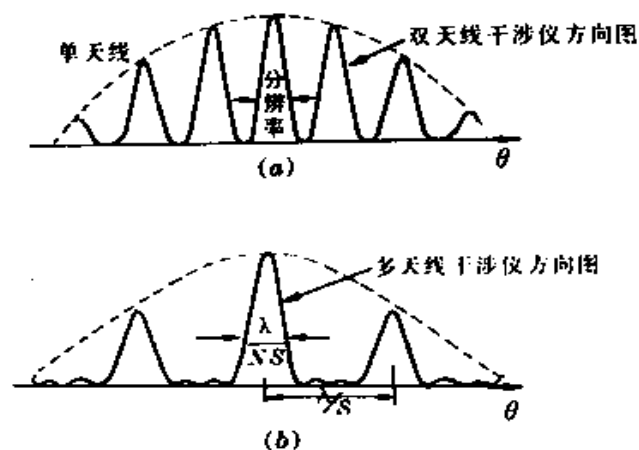


图 3.25 多天线干涉仪的方向图

(a) 双天线; (b) 多天线

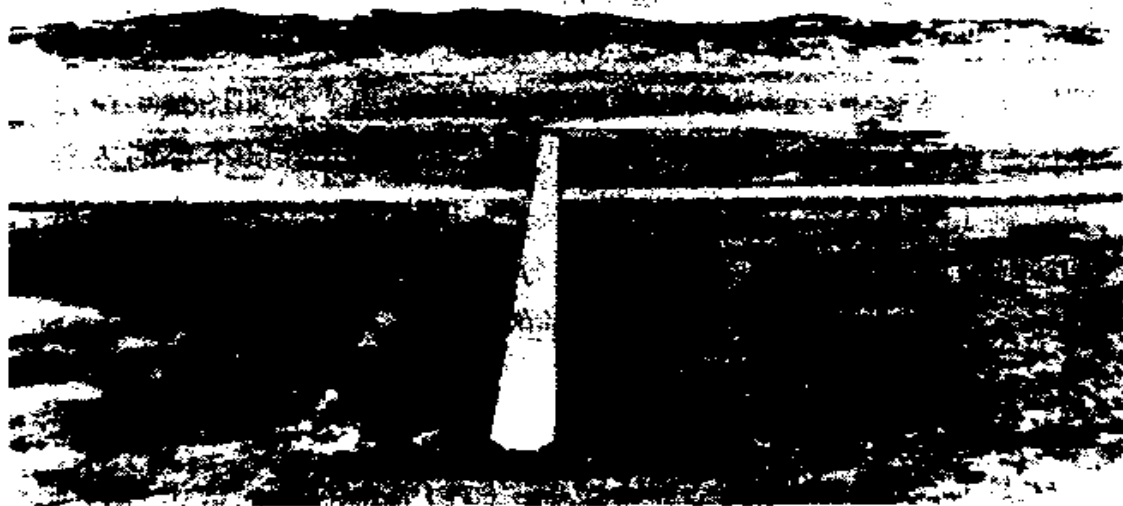


图 3.26 米尔斯十字天线

长——73厘米和270厘米处的分辨角分别为 $1.4'$ 及 $5.8'$ 。

(2) 复合干涉仪: 将多天线干涉仪的信号分别送入可以起乘法作用的相关接收机中, 便组成了复合干涉仪。它通常由两部分组元组成。一个组元就是普通多天线干涉仪, 另一组元则可以是

一个大天线，也可以是多天线干涉仪。由于它们的讯号在相关接收机内构成相关干涉系统，所以分辨率只取决于阵中的最大距离，从而提高了效益。例如，我国北京天文台密云站的一架由16个天线组成的多天线干涉仪^①，分辨角为 $2.1'$ ，但在同一基线方向上加上四个天线构成复合射电干涉仪，则分辨角可减小到 $1'$ 。

(3) 甚长基线干涉仪(VLBI)：通常双天线干涉仪的基线不过几百米长，由于同轴电缆线的限制，使得基线不能无限增大。开始，一些国家的天文学家先后采用微波接力来代替电缆线，使基线长度达到了100千米以上。但是微波在传输过程中，存在有相位不稳定的问题，使得其使用受到了限制。

六十年代的甚长基线干涉仪开创了崭新的局面，它完全消除了电的连接问题。这种新技术可以把各个单个干涉仪与稳定度极高的原子频率标准相联接，其输出的信号又连同精确的时间标志同时记录于磁带上，然后一起由计算机进行统一处理(图3.27)，这样使干涉仪的基线不仅可以达到洲际的长度，原则上还可以将一端置于月球之上，即基线的长度达到月地距离。例如1981年11月中国与联邦德国搞了一次甚长基线干涉仪测量，在50个小时内总共观测了十几个类星体射电源，其基线的长度达8200千米，分辨角达到 $0.002''$ 。目前，这类设备的分辨角最好的已达到 $0.0002''$ 的记录，大大超过了光学望远镜目前的水平。

六、综合孔径射电望远镜

射电望远镜接收的是射电辐射，所以显示的是射电讯号的强度和位相，并不是辐射源的具体图象。

英国射电天文学家赖尔(M·Ryle)经过多年研究，终于制成了一种具有很高灵敏度、很小分辨角、能够成象的新型射电望远

^① 目前该仪器已改成了综合孔径射电望远镜，可做更好的工作。

镜——综合孔径射电望远镜。这项重大的技术突破，使得赖尔荣获了1974年诺贝尔物理奖。

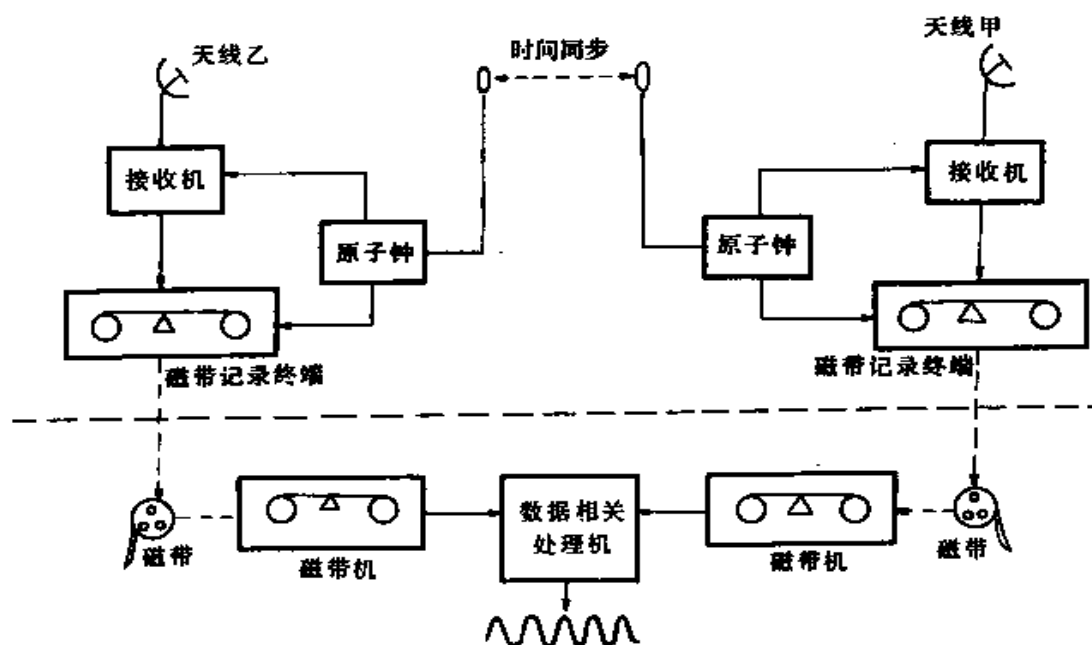


图 3.27 甚长基线干涉仪系统原理图



图 3.28 甚大天线阵，Y形每臂长21千米

这种射电望远镜特别适合于观测不变的射电源，它的成像原理与电视成像的原理有一定的类同之处。把一个天线 A 作为固定不动的“参考天线”，天线 B 则逐次进行扫描，把讯号变成“亮度”，并通过一定的处理就可得到一张图象。

现在世界上很多国家都在建造大、中型的综合孔径射电望远镜，也有的是利用其他型式的干涉仪进行改装，当前世界上最大的综合孔径射电望远镜是美国国家射电天文台的甚大天线阵 (VLA)，它有27个天线，每具天线的直径为25米，排列成“Y”形状(图3.28)，每臂长21千米，在厘米波段处它可以在8小时内获得一张分辨角达到角秒量级的图象，其清晰度不比任何最好的光学照片逊色。

§ 3.4 其他波段的观测和探测器

对于大气窗口以外波段的观测是在大气层外或高层大气中进行的。四十年代时，人们只能借助于高空气球和探空火箭做一些初步的、有限的工作，人造地球卫星上天后，则逐步使空间天文学成为一门迅速发展起来的分支学科。有人认为，它可能成为将来天文学又一次革命的触发剂。

由于空间观测已突破了地球大气的屏障，使光学观测也得到了极大的改善，更重要的是使红外、紫外、X射线、 γ 射线的观测迅速发展起来。

一、红外观测

最早发现天体有红外辐射的是威廉·赫歇耳，但由于大气吸收及观测技术两方面的原因，红外观测直至二次大战后才陆续取得了一些重要成果，尤其是1961年美籍华裔天文学家黄授书

(S.S. Huang)预言的红外星于1965年得到了美国天文学家的观测证实,更是红外观测的一个重要里程碑。

一般说来,天体的红外辐射都是十分微弱的,所以红外观测的关键是提高接收的能力及抑制背景噪声。

红外波段与可见光红端相近,因此红外望远镜常常与光学望远镜有许多类同和相似之处。正因为如此,不少大型地面光学望远镜也正在进行一些改装,使它同时也可从事红外观测。但它毕竟与光学望远镜不一样,它最后的终端设备与光学观测迥然不同,它成的图像也与光学像大相径庭。它需要采用调制技术——抑制背景干扰、使天体的红外辐射变为交流信号以便处理,同时还可采用干涉方法提高它的分辨本领,而它对镜面的精度要求也因波长较长而相应较低。美国在六十年代中期作红外巡天时,观测到了红外星及各种红外源——太阳系天体、星云、银核、河外星系、类星体等等,从而证明了红外观测也是一种强有力的手段。

除了地面进行红外观测外,随着航天技术的发展,越来越多的红外望远镜被高空飞机、气球、火箭、宇宙飞行器带上了高空或宇宙空间进行高效率的红外观测。

目前地面上最大的红外望远镜在美国,口径为10米,装上气球的最大口径为1米。

二、紫外观测

紫外是指介于X射线和可见光区之间的频谱范围,即波长为10—400纳米,不仅地球大气对紫外辐射有严重的吸收,就是到了地球大气之外,非太阳系天体的紫外辐射也受到星际气体的吸收影响,而只能在91.2—300纳米的范围内作有效的观测。当然对于太阳系天体,是不受星际气体的限制的。

目前,紫外观测常与传统的光学观测密切配合进行,在方法和技术上也有许多相通之处,但是它对透镜的材料有特殊的要求,

对反射镜则要在铝反射层外加适当的保护层，以得到较好的反射性能。

通常元素的中性和电离态的共振线大多集中在紫外区，而这种共振线对于天体的物理状况、化学组成最为敏感。因此，紫外观测是天体物理研究的一个重要组成部分。

紫外观测对于太阳、早型星、太阳系天体及星际物质的研究亦有特殊意义。根据观测研究对象而言，有太阳紫外望远镜和恒星紫外望远镜两类。由于太阳较近，辐射较强，又不受星际物质吸收影响，它一般采用反射镜，口径要求不高。而恒星的紫外辐射比太阳至少弱6—7个量级，因而要求灵敏度很高，口径不小于25厘米。

紫外望远镜大多投入空间观测，如轨道太阳观测台(OSO)、轨道天文台(OAO)“天空实验室”(SL)等，至少也得装在探空火箭上，飞到30千米以上的高层大气中，才能避开大气中臭氧层对它的强烈吸收。

三、X 射线观测

天体的X射线是完全到达不了地面的，因此只有当人造地球卫星上天之后，它才能获得重要的观测成果。早期集中于太阳的X射线辐射研究，现在则因为一系列天文卫星，如高能天文台(HEAO)探测到了1000多个X射线源，从而使X射线天文学蓬勃的发展起来。

X射线辐射的波段范围一般取为0.01—10纳米，能量较高(波长较短)的称硬X射线，能量较低的称软X射线。硬X射线都无法成像，所以都用粒子计数器之类仪器进行探测。对于软X射线，除了计数器外，还有X射线针孔成像及掠射X射线望远镜两种重要仪器。1960年4月，美国布莱克(R. L. Blake)等人用针孔直径为0.127毫米的针孔照相机获得了太阳的X射线照片，并算出

了X射线的流量。早期时,它比较粗糙、分辨率较低,现在则已得到了分辨角小于 $1'$ 的0.8—2纳米波段的太阳X射线像。

X射线的性质决定了它必须使用反射式:因为当入射角不大时,它会被反射面吸收,而在入射角很大时则又变成全反射,因而人们制造了掠射X射线望远镜,它常采用两个共轴同焦的旋转圆锥面(一个为抛物面,一个为双曲面)的光学系统(图3.29)。

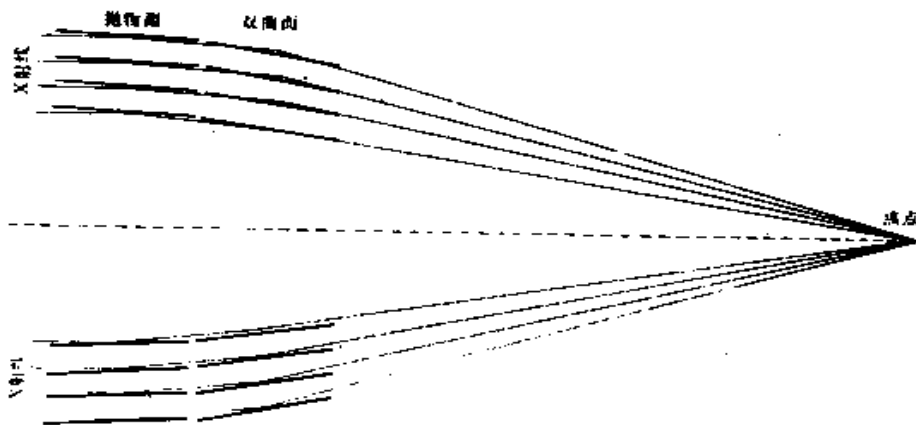


图 3.29 掠射X射线望远镜的工作原理

观测恒星X射线辐射的掠射X射线望远镜同样也要求有更大的有效集光面积和高灵敏的探测器,除此之外,与观测太阳的仪器没有太大的区别。

X射线观测已取得了巨大的成果,如太阳上的冕洞(图7.19),已证认出多种X射线源,其中有超新星遗迹、X射线脉冲星、双星及星系层次中的强射电星系、赛弗特星系等。同时,有人还认为,X射线源可能也是寻找黑洞的有效手段之一。

四、 γ 射线观测

γ 射线观测的仪器是实验室内常用的那些粒子探测器,如闪烁计数器、火花室、切伦科夫计数器等,而不是那种传统的“望远镜”。这有两个原因,一是因 γ 射线的波长比X射线更短,小于

0.01 纳米,而望远镜镜面的精度是与波长 λ 成正比的,这样技术上就有巨大的困难。另一个原因是 γ 射线的能量很高,大于几十万电子伏,对于物质有很强的穿透能力,而不反射,只是对于那些能量高于 10^{11} 电子伏的 γ 射线辐射,由于它在地球大气中会引起相应的切伦科夫辐射,才可以利用地面大望远镜对于这种辐射进行间接观测。

在通常情况下,天体的 γ 射线辐射流量极其微弱,而仪器的背景流量却很高,加上仪器上的问题,使得 γ 射线观测的进展不如 X 射线迅速。例如,对于超新星,理论上虽早已预言了超新星遗迹有 γ 射线辐射,但至今资料仍很少。太阳的 γ 射线探测直到 1958 年才有比较可信的观测资料(但具体的能量还不清楚)、较完整的结果还是七十年代的“轨道太阳观测台(OSO)-7”观测到了 1972 年 8 月两次强耀斑事件后得到的。

五、探测器

探测器是将天体辐射能转换为可测信号的器件,它的种类极其繁多,功能也各不相同。广义的说,望远镜、用于天文观测的人造卫星、航天飞船整体都可算作一个探测器。最简单、用得最多的探测器就是人类自己的眼睛。

探测器一般有几个性能指标:

(1) 量子效率:它主要描述探测器接收并记录信息的能力,以入射光子数与产生光子事件数之比来衡量。

(2) 响应度:即输出信号与射入的辐射信号的功率比,故它又称之为灵敏度,好的探测器应当具有线性的特性。

(3) 分光响应:也称分光灵敏度,是指单色辐射时的灵敏度,有的探测器对所有波长一样灵敏,称为非选择性的,但大多探测器都有选择性。

(4) 探测率:探测器能探测到的最小辐射功率之倒数。它主

要受到仪器的噪声所限制。

(5) 分辨率: 探测器的分辨率仍可借用(3.6)式的分辨角来表证, 分辨角越小, 分辨率就越高。

天体的辐射大多十分微弱, 因此用作天文观测的探测器有很严格的要求, 不仅要求它有很高的量子效率和高探测率, 还要求有宽敏感波段和高灵敏度、高分辨率。能满足或部分满足这些要求, 因而用于天文观测的探测器有人眼、照相底片、各种光电探测器及许多其他器件(表3.9)。

表 3.9 不同波段辐射常用的探测器

辐射名称	波长或粒子能量	常 用 的 探 测 器
射电波	> 1 毫米	偶极子天线、波导管(配合接收机)
红外光	1 毫米—700 纳米	红外底片、辐射计、硫化铅光电池
可见光	700—400 纳米	人眼、照相底片、光电信增管、光电二极管阵、像增强器 电荷耦合器件
紫外光	400—10 纳米	光电信增管、紫外底片
X 射线	10^2 — 5×10^5 电子伏	光电信增管、核乳胶、正比计数器、闪烁计数器
γ 射线	5×10^5 — 10^9 电子伏	闪烁计数器、火花室、切伦科夫计数器
高能粒子	$> 10^{10}$ 电子伏	电离室、火花室、切伦科夫计数器

六、最常用的几种探测器

1. 人眼 人类自己的眼睛是使用最广泛的探测器, 而且人眼也是比较灵敏的探测器, 可以发现相当微弱的辐射。实验表明, 正常人眼的灵敏度——所能觉察到的最小辐射是 5×10^{-17} 瓦, 即能探知 5—14 个光子的作用。对于颜色也有非凡的判别能力, 最敏感的波长在 550 纳米附近。

人眼的瞳孔直径最大为 6—8 毫米, 在白天仅为 2 毫米左右, 根据(3.7)式不难算得在理想条件下, 人眼可分辨 $0.5'$, 但由于种种客观原因, 一般仅达到 $1'$ 左右。对于天文观测而言, 这是远远

不够的。在分辨亮度的差别上，人眼的极限是仅能识别1%以上的亮度差。另一个缺陷是人眼的“视觉暂留效应”，这使它无法计数来自不同瞬间的光子，再加上它对辐射的反应是非线性的，这样使人眼无法进行较准确的定量测量。

2. 照相底片 照相技术对于天文学的发展作出了特殊的贡献。它不仅用来记录天像，而且广泛应用于精密定位、光度测量和分光测量中。经过一些特殊的处理，天文照相底片工作的波长也可扩充到红外与紫外波段。

照相底片以照相密度(也称黑度)的方式来记录天体辐射的强

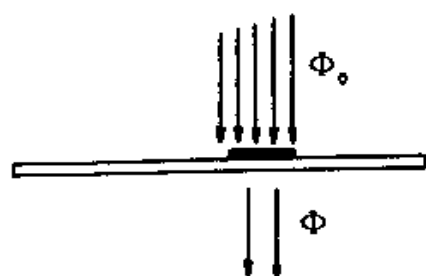


图 3.30 密度 D 的定义

弱。底片上天体像的密度 D 是这样定义的(图3.30):

$$D = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi} \quad (3.16)$$

式中 Φ_0 和 Φ 分别表示入射的和出射的辐射流，天体的辐射越强，底片上的象越暗， Φ 越小，密度 D 就越大。

研究表明，密度 D 与曝光量 H 的关系是一条很复杂的曲线——底片特性曲线，其中有一段线性部分，照相观测必须正确把握住使曝光量控制在这线性部分。

与人眼相比，照相底片有许多可贵的优点。如它可以把微弱辐射累积起来，所以同样的望远镜，照相观测通过长时间曝光可以观测到比肉眼更暗的天体，即照相极限星等比目视常可提高1—2星等。此外，它还具有客观性、文献性等长处，与光电等探测器相比，则它又以低廉、方便等优点见长。

底片的缺点也是显而易见的，它的量子效率很低。研究表明，入射光中只有百分之几的光子起到了成像作用，例如用其他灵敏的探测器，在口径1米的望远镜上可取得与5米大望远镜照相观测相媲美的结果。另外，由于底片的颗粒性，使它的分辨本领也

受到很大限制。颗粒性和玻璃层、乳胶层都会对天体像造成某些歪曲。照相也不能记录天体的瞬时变化，所以也有它的局限性。

3. 光电器件 有些物质在受到一定频率的光的照射后，能够释放出电子、产生电动势，这就是通常所说的光电效应。利用这种性质可以进行天文观测，常用的有光电管、光电池、光敏电阻及光电倍增管等等。

光电器件的灵敏度一般都很高，尤其光电倍增管(图3.31)可以把初级阴极放出的电子数放大 10^8-10^{10} 倍。因而是探测微弱辐射的有力工具。此外，它的输出电流与入射光子是成正比的，所以它可以用作精密测量，还可测量天体的快速变化。

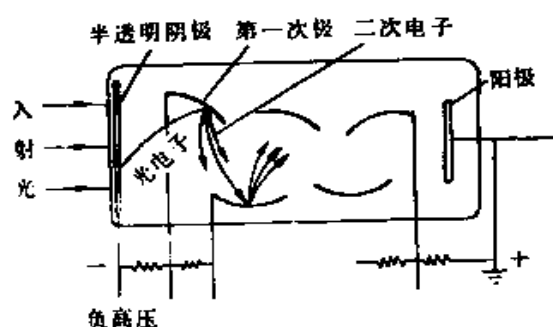


图 3.31 光电倍增管原理图

光电管的缺点是随着使用时间增长，灵敏度会下降——衰老现象。就是在同一次使用过程中也会出现疲乏现象，而且辐射越强，疲乏现象越严重。

七、一些新型的探测器

光电像转换器的出现使电子接收器出现了一个很大的飞跃，它们既有光电倍增管定量测光的能力，又能如照相那样变为可见的图象，因此很快地发展起来，逐步用于天文观测之中。

1. 电子照相机 1967年法国巴黎天文台研制出一架电子成像机，它灵敏到足以探测到单个光子。现在的电子照相机可以高效率地记录天体的精确图象，特别适合于暗弱天体的测光和分光工作。

电子照相机的基本原理和结构都比较复杂。简单说来，它的光子图象形成在光电阴极上，由入射光所打出的光电子被电子光

学聚焦并成像在对电子敏感的照相乳胶上。它大致分为三个部分：光电阴极、电子透镜及底片(图3.32)。

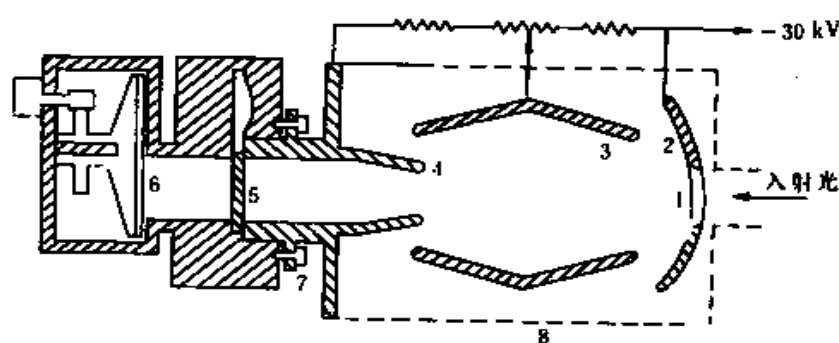


图 3.32 电子照相机结构图

1. 蓝宝石上的光电阴极；2、3、4. 电子透镜的电极；5. 高真空阀门；6. 底片盒；7. 阀门操作机构；8. 硬屏蔽套

2. 像增强器 又称为像管，它的组成与电子照相机很为相似，所不同的是后面底片改成荧光屏而已。因此成的像既可用肉眼直接观测，也可以用底片记录下来。用几个单级管串联后，亮度可增益 10^3 — 10^5 倍，曝光时间可以缩短到普通照相的千分之一，这对于红外谱区尤其重要，因为普通底片对红外波段很不敏感。增益的提高使分辨率有所损失，一般单级像管的图象分辨力为每毫米80—100线对，而多级像管则减少到20—50线对。

3. 光子计数照相机 第一台光子计数照相机诞生于1970年，它的效能极高，能精确地探测同单个光子相应的信号，甚至可以用来观测那些亮度比天空背景还暗的极微弱天体，因此把它放于摄谱仪后，就能得到暗弱天体的光谱，这是难能可贵的优点。但要注意它绝不能用来观测亮的天体。

4. 电荷耦合器件(CCD) 七十年代初期，科学家们便在设想制造大功率的电荷耦合器件——CCD¹⁾，这种耦合器件利用金属

¹⁾ CCD是英文 Charge Coupled Device 的缩写。

中的电子序列能造成一些位阱，把一些荷电质子“囚禁”其中。当一些电极的电位有所改变时，这些电荷便可以无损耗地从一处流向另一处，而且其流动前后的电容量也几乎保持不变。这样，人们便可使得一些电荷在晶体放大器的结上直接跃进，消除了一般接收器无法避免的“解读噪声”。现在一些较好的 CCD 装置中解读的精度达 $20e$ (e 即表示电子电荷)。

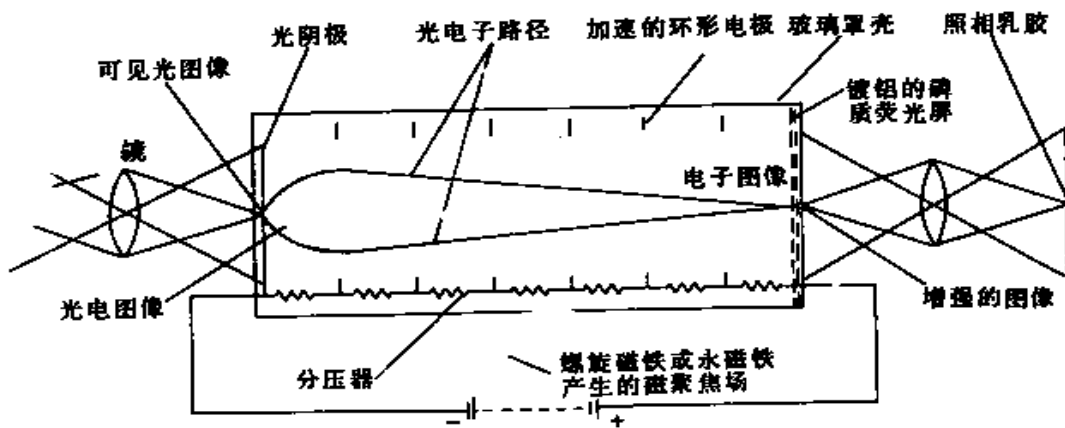


图 3.33 像管工作原理图

CCD 又是固体元件，因此可以实现微型化，比较安全可靠，现在已成为空间探测和地面观测的理想器件之一，而且其重要性正在与日俱增。它装于光学望远镜终端，可使极限星等提高 3—5 等。美国有人用 5 米望远镜加上 CCD 于 1982 年 10 月 16 日最早探测到了亮度为 24.2^m 的哈雷彗星 (5 米望远镜的极限星等为 20.4^m)，值得指出的是 CCD 还可用于其他波段，如红外，可以探测正在星际云中逐渐形成的恒星。

CCD 还可用来改装光子计数照相机，所以有人认为，CCD 不久即将完全替代光子计数照相机。

§ 3.5 天体测量仪器

准确测定天体的方位是十分重要的，它曾经促使人类对于宇宙的认识发生深刻的变化，天体测量的发展使托勒玫地心学说日益破绽百出，从而导致了哥白尼提出日心学说；火星位置 $8'$ 的误差，促使开普勒埋头研究，并发现了行星运动三大定律，后来，海王星的发现，爱因斯坦广义相对论的验证都离不开天体的精密定位工作。事实上，近年来的科学进展已使天文学家能把测定角距的精度提高到 10^{-3} 角秒的水平，而对月球距离的测定则达到 10^{-2} 米的量级。

一、综述

天文学是从测定天体的位置开始发展起来的。用以测定各类天体的位置和距离的天文仪器统称为天体测量仪器。

虽然光学天体测量的仪器种类繁多，但由于其工作的性质决定了它们有共同的特点——长焦距，而对口径的要求反而不高，所以它们都是折射式的望远镜。早期的有六分仪和经纬仪。前者用于飞机和海轮的定位工作，后者则是大地测量的主要仪器。精密测定天体坐标的有子午环、天体照相机等，还有许多仪器如中星仪、等高仪、照相天顶筒及天顶仪等，则主要是用来测定世界时（即地理经度）及极移（从纬度变化而得）。

在望远镜发明之前，中国的郭守敬、欧洲的第谷都可堪称观测的一代宗师。第谷留下的许多资料表明，他的观测精度已在 $4'$ 以内。望远镜发明之后，测量的精度飞速提高，二十世纪五十年代后，光电记录法逐步得到普遍的应用，加上日益发展的电子技术及计算机控制，一方面使得天体测量工作日趋自动化，消除了

人为的误差，另一方面仪器本身也有了巨大的进步和提高，使得它的观测误差已小于大气反常折射^①所引入的测角误差。

六十年代开始发展起来的甚长基线射电干涉仪也逐步运用到天体测量中，它使定位观测的精度一下提高了几个数量级。由它测定的河外射电源的位置误差仅只 $\pm 0.001''$ ，它还能使人们对银河系的射电源进行精确测距。

此外，在测距中现在还常运用雷达及激光、人造地球卫星等先进手段，使一些基本天文常数(如天文单位)及月地距离值等的精度都有了极大的提高。

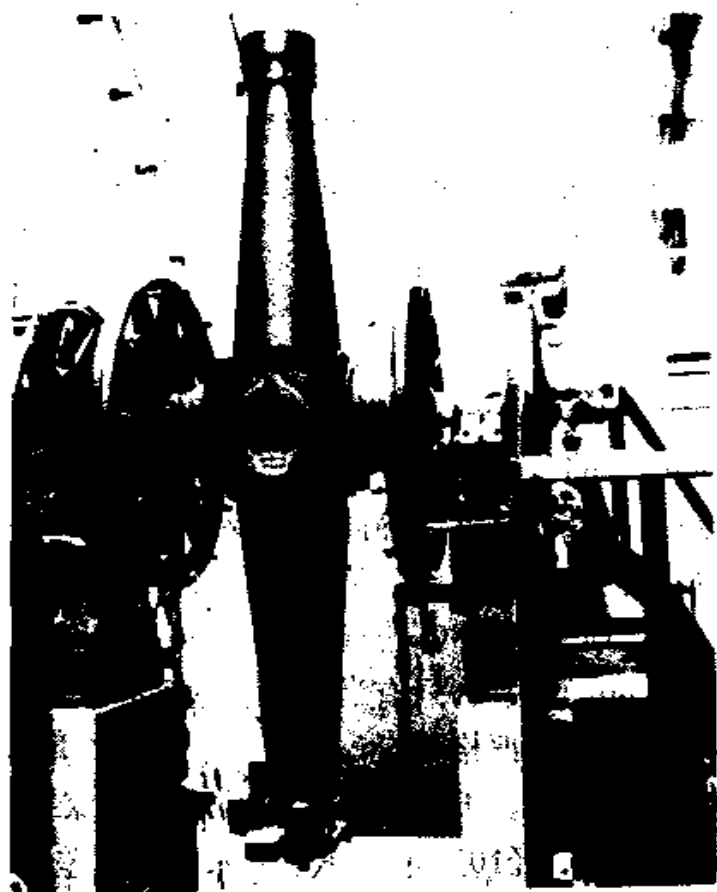


图 3.34 子午环

① 由于观测者周围环境及气象因素(温度、气压、水汽量)变化引起大气层的变动造成的大气折射，称之为反常大气折射。

二、子午环

子午环是测定恒星位置的最主要仪器，也曾被誉为最精密的天文仪器（图3.34）。子午环的口径一般为10—20厘米，焦距为1.5—2.5米，其有效视场大约为 0.3° 。子午环与一般望远镜所不同的是仅有一条东西方向的水平轴，使它能在子午面、也只能在子午面内转动，因而得名。这样来观测天体过子午圈的时刻和天顶距。在水平轴上套有一个直径较大的精密的垂直度盘，并配有若干对读数显微镜，过去都是用目视来观测、读数的，现在大部分已采用光电系统或照相记录，并把观测数据直接输入电子计算机归算、储存。

子午环一般用以观测亮于9等的恒星，一次观测（一颗星中天）的时间一般不超过两分钟，而赤经的误差在 $\pm 0.20''$ — $\pm 0.30''$ ，赤纬的误差则在 $\pm 0.30''$ — $\pm 0.45''$ 间。

三、等高仪

等高仪是用以观测两颗或多颗恒星相继通过一个固定天顶距——等高圈——的仪器。记录它们分别到达等高的不同时刻，即可算出观测点的经度和纬度。等高仪主要有两种：

1. 棱镜等高仪 最初有 45° 及 60° 两种，现在已多采用 60° 的结构，即用以观测地平高度 60° 的等高圈上的恒星（图3.35）。它在物镜前端有一个 60° 的棱镜，只有当恒星的地平高度正好为 60° 时，通过棱镜的两条光束才严格平行，焦平面上的两个星像重合，从而记下这个瞬间的时刻。五十年代初法国天文学家丹戎（A. L. Danjon）制成了一架口径10厘米、焦距1米的超人差棱镜等高仪，又提高了它的精度，使其天顶距观测的精度达到 $\pm 0.17''$ 。其缺点是由于光束被分散，所以只能观测亮于6等的恒星，使观测对象受到较大的限制。

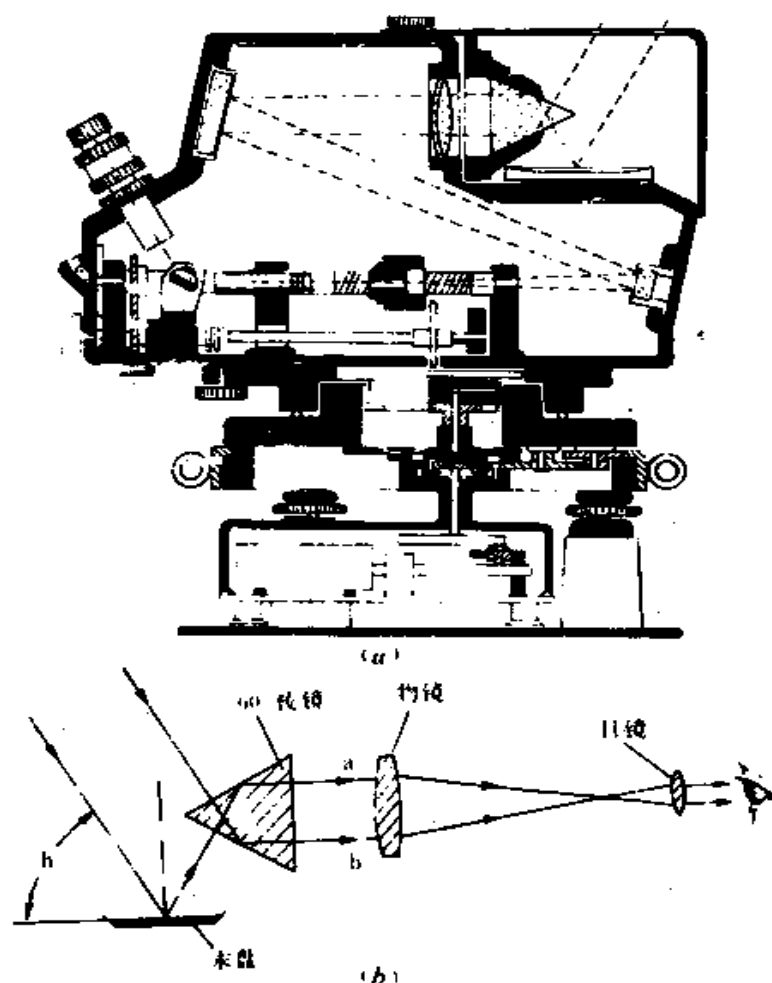


图 3.35 棱镜等高仪
(a) 轮廓图: (b) 光学原理图

2. 光电等高仪 如果把棱镜等高仪的记录方式由目视改为光电自动记录, 则棱镜等高仪变成了光电等高仪。当然两者还有一些其他的区别, 在光学结构、机械性能上也有所改进。

我国在1974年研制成功一架Ⅱ型光电等高仪, 口径达20厘米, 焦距2.4米, 它废除了传统的棱镜而代之以两块镀有铝膜的熔石英组成的角镜, 它可以观测到肉眼看不见的7等星, 天顶距的观测误差为 $\pm 0.13''$ 。

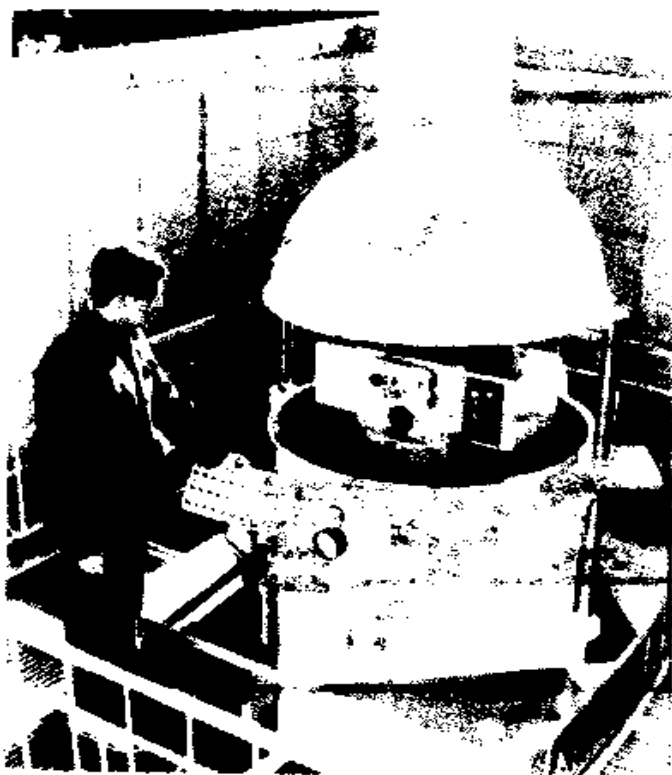


图 3.36 北京天文台的照相天顶筒

四、照相天顶筒

照相天顶筒也是测定经纬度的主要仪器之一，实质上它是一架对准天顶的照相望远镜(图3.36)，一般照相天顶筒的口径为20—25厘米，焦距一般为口径的15—20倍，例如美国最新的一架照相天顶筒，其口径为65厘米，焦距为13米。

它也仅限于对亮于9等、而且能在天

顶附近中天的恒星进行观测，对每颗恒星在上中天前曝光两次，上中天后曝光两次，并同时记下这四次曝光的准确时刻，整个过程大约共需二分钟时间，一夜中它可观测的恒星为30颗左右。对于单星观测，测时和测纬的均方误差都在 $\pm 0.1''$ — $\pm 0.3''$ 间。

五、天顶仪

精密测定纬度及纬度变化的仪器，一般安装在北纬 39° 线附近的天文台、站内。现在使用的天顶仪(图3.37)口径规定为110、135、180毫米三种。它能绕东西向水平轴在子午面内旋转，在望远镜指向某一天顶距后，可以和水平轴锁紧，然后一起绕垂直轴转过 180° 以观测两颗分别在天顶之南、北上中天的恒星，这样只需观测已知赤纬的恒星之天顶距差，从而提高了精度，得到的纬度均方误



图 3.37 安装在天津纬度站的天顶仪

差约为 $\pm 0.1''$ — $\pm 0.3''$ 。

六、中星仪

中星仪又称子午仪，结构上与子午环有不少相似之处，只是没有精密度盘而已。它专门用以观测恒星的中天时刻，用以测时。

中星仪也是有悠久历史的仪器，1684年由丹麦人罗默（J. Romer）首先发明，经过几百年的实践改进，现在已广泛采用折轴式的结构，其水平轴是中空的圆柱体，由棱镜把光路改变。

现在的中星仪口径多在70—100毫米间，焦距为650—1000毫米，它与天顶仪一样，也能在子午面内旋转，也可转过 180° 。它

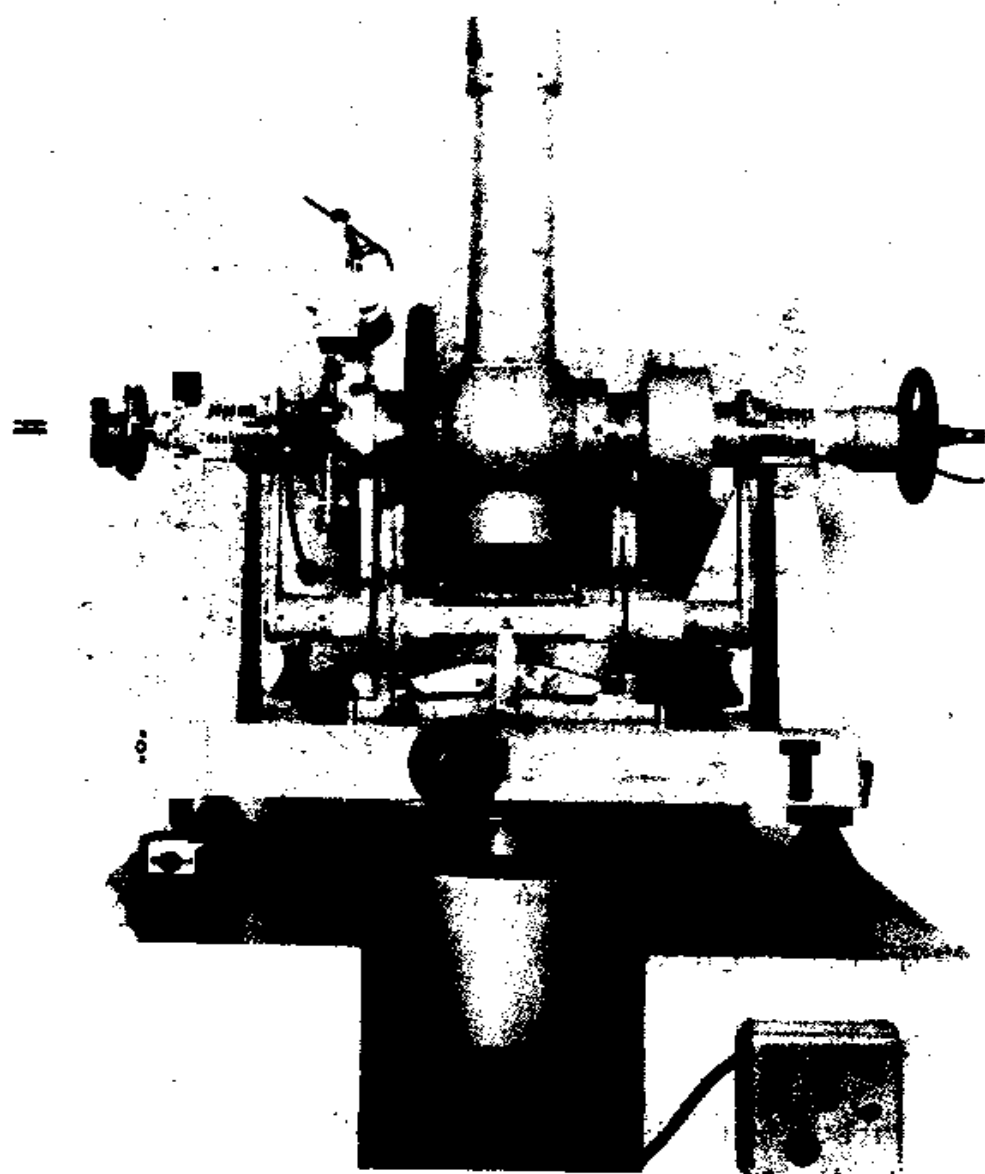


图 3.38 上海天文台的光电中星仪

的计时精度可达百分之几时秒。

1946年发明的光电中星仪(图3.38)，即是在中星仪的基础上加一个导星镜和光电记录的装置，它的单星观测误差可小到 $\pm 0.012''$ 。因此已成为当前世界上最主要的测时仪器之一。

第四章 地球和月球

地球是太阳系的一颗行星。月球是地球的卫星。研究地球在天文学上具有重要意义。这不仅有助于解决行星天文学及太阳系起源和演化等问题，而且有助于廓清从而消除源自地球的各种因素(如地球运动、大气和磁场等)对于天文观测和研究的影响。人造地球卫星在地球重力场内运动，同时受到来自地球的各种摄动，人造卫星的发射和运动的研究，也离不开对地球本身的研究。特别要强调指出，研究地球是天文学为生产实践服务最直接和最重要的方面之一。人类在征服和改造自然的长期实践中，创建了许多专门研究地球的地学学科，如气象学、地质学、地理学、海洋学等等。天文学和地学相结合，在推动生产进步和促进学科本身的发展上，取得了许多成果。进入航天时代以后，人们利用火箭和人造卫星，取得了许多关于地球和月球的全新资料，更丰富和深化了对于它们的认识。本章主要从天文学的角度概要叙述地球和月球的基本知识。

§ 4.1 地球的形状和大小

一、地球的形状

许多事实说明，地球的形状是球形。举例如下

(1) 最直观的证据是“站得高看得远”。这是因为人的视线与球形表面的切点，随着登高而扩展。

(2) 南方和北方的居民所见星空不同。南方居民所见北极星

较低且南天星较多，而北方居民所见则相反。这表明地球表面各地的地平线在空间改变，恰是地球表面弯曲的反映。

(3) 月食时地球投到月球上的影子边缘是圆弧。

(4) 人们可以实现环绕地球的旅行。

(5) 从人造地球卫星或月球上拍摄的照片更直接显示地球是球形的(见彩照1)。

二、地球测量简史

公元前六世纪，古希腊的毕达哥拉斯学派认识到地球的形状是球形的。亚里士多德肯定了这看法后，地为球形的观念即成定论。公元前250年左右，亚历山大城的天文学家埃拉托斯特尼发现夏至日中午太阳在塞恩(今埃及阿斯旺)直照水井的底部，也就是正在天顶。而在其北的亚历山大城用仪器测得太阳的天顶距为圆周的 $1/50$ 。他认为这个角度就是两地的纬度之差，因而地球的周长即是两地距离的50倍。由此算得地球周长为25万希腊里，折合现在的长度值为39600千米，这是相当准确的值。这一测量的原理如下所述。

图4.1中的圆周为通过亚历山大城(A)和塞恩(T)的地理经圈。OTS和OAZ分别为T点和A点的天顶方向。夏至日中午太阳就在S方向。作AS'平行于TS，则 $\angle ZAS'$ 就是太阳在A点的天顶距 z 。从图可见，若A和T的纬度差为 $\Delta\varphi$ 则有 $z = \Delta\varphi$ ，令弧长 $\widehat{AT} = d$ ，于是地球的周长为 $D = d \cdot \frac{360}{\Delta\varphi} = 360^\circ \cdot \frac{d}{z}$ 。

中世纪时，人们并不重视关于地球形状和大小的知识，直到十六世纪航海事业发展以后，这方面的工作才重新开始。1687年牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中提出，在引力和自转产生的离心力的联合作用下，地球的形状应该是微扁的球形。

为了验证地球的形状，从十七世纪开始，在荷兰和法国先后

进行了子午线弧长的测量。如果地球是扁球形的，并且两极处较扁，则纬度越高，间隔1°的弧长较大。长时间大量测量的结果，证实了这一看法。

十八世纪以来，在全世界开展了大地测量工作，到十九世纪中叶，已经得到了关于地球形状的可靠资料。结果表明，地球的形状基本上是一个绕短轴旋转的旋转椭球体，短轴和地球的自转轴重合，长轴在赤道面内。近代利用人造地球卫星所作的测量，给出如下数据

半长轴(赤道半径) $a = 6378.140$ 千米，

半短轴(极半径) $b = 6356.755$ 千米，

$$\text{扁率} \quad \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298.257} .$$

由这些值决定的一个旋转椭球面叫做地球的参考椭球面。

进一步的研究表明，地球赤道也是椭圆，所以地球实际上是一个三轴椭球体，不过赤道的扁率仅约十万分之三，因此通常仍把它看成为圆。

三、大地水准面

地球表面的实际形状是极不规则的，大陆上有高山(最高的珠穆朗玛峰高8848米)，海底下有深渊(最深的马里亚纳海沟深11521米)。在谈到地球形状时，并不是指它的固体表面，而是指大地水准面(图4.2)。它是一个假想的表面，即设想把占地球表面3/4的海平面延伸穿透大陆构成的一个封闭曲面。大地水准面也就是地

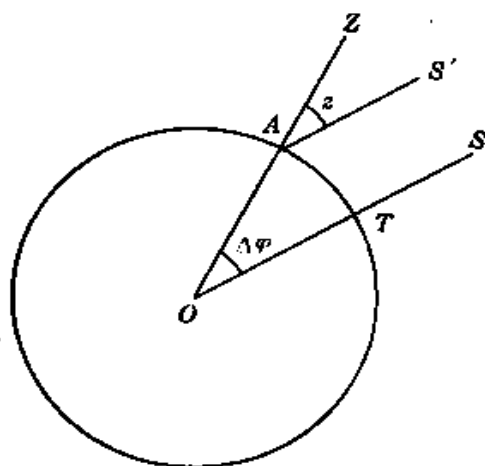


图 4.1 测定子午线长度的原理



图 1.2 大地水准面和旋转椭球面

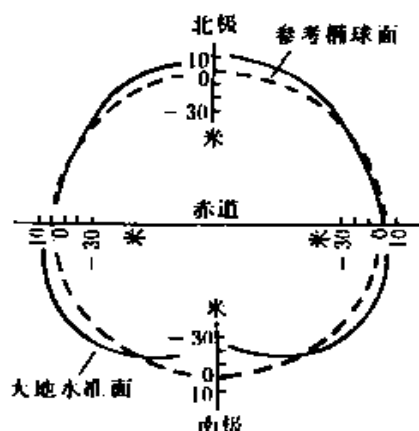


图 1.3 大地水准面和参考椭球面的偏差

球重力在海平面处的等势面。实际上大地水准面并不是一个规则的数学曲面，甚至南北两半球也都不对称，北极略凸出，南极略扁平；夸张地说，地球象个梨子形。可是这种不规则起伏与极大的地球半径相比，毕竟微不足道。图4.3画出地球的一个剖面图（比例已夸大）。从图上所标尺度可见，大地水准面跟与它逼近的参考椭球面的最大偏差只不过几十米。因此，能用球面作为大地水准面的第一近似，用旋转椭球面作为第二近似，而用三轴椭球面作为第三近似。

四、地球的重力

1. 重力的概念 地球上的质点，一般都受到地心引力和地球自转产生的惯性离心力的作用。这两个力的合力就是该点的重力。关于重力的大小和分布，通常讨论的是重力大小，也就是单位质量所受的重力。这个量等价于重力加速度，它的单位是米/秒²。

2. 重力的大小及其分布 在不同的高度或深度上，地球上的重力会有很大的差别。在同一高度，如同在地面，则这一差异很小。这里讨论地面重力的大小及其随纬度的分布。

地心引力 f ，是地球的全部质量对地面上所讨论的单位质量的引力，按下式计算

$$f = \frac{Gm_{\oplus}}{R^2}, \quad (4.1)$$

式中 G 是万有引力常数, $m_{\oplus}$ 和 R 分别为地球的质量和平均半径。其值约为 9.8 米/秒^2 。由于地球自转的惯性离心力很小, 这个引力值可以看成是地球海平面上的平均重力。各地的实际重力, 对于这个平均值, 只有 $0.02-0.03 \text{ 米/秒}^2$ 的差别。

由于地球半径的纬度差异, 地面上的引力以两极为最大, 达 9.832 米/秒^2 , 在赤道上引力最小, 为 9.780 米/秒^2 。

因地球自转作用在地面上单位质量的惯性离心力是

$$p = \omega^2 R \cos \varphi, \quad (4.2)$$

式中 ω 为地球自转角速度, φ 为质点的地理纬度(图4.4)。

下面考察重力分布规律。先把地球当作球体, 在这种情况下, 地面上各点引力 f 都大小相等并且指向球心。由于离心力 p 和引力 f 比较小得可以忽略(赤道上离心力最大也只及引力的 0.3%), 则就可以用如下近似方法来计算重力 g 的数值。把离心力 p 分解为两个分力: p_1 平行于 f , p_2 垂直于 f 。可以近似地认为 p_1 只改变 f 的大小, 而 p_2 只改变 f 的方向, 于是得

$$g = f - p_1, \quad (4.3)$$

由图4.4可知 $p_1 = p \cos \varphi$, 所以

$$\begin{aligned} g &= f - p \cos \varphi = f - \omega^2 R \cos^2 \varphi \\ &= f - \omega^2 R + \omega^2 R \sin^2 \varphi. \end{aligned} \quad (4.4)$$

由此式可得赤道上($\varphi = 0^\circ$)和两极处($\varphi = \pm 90^\circ$)的 g 值依次为

$$g_0 = f - \omega^2 R, \quad (4.5)$$

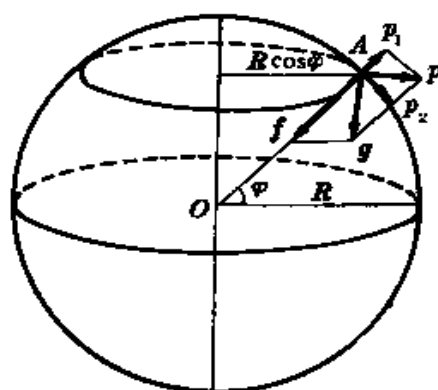


图 4.4 地球的重力

$$g_{90} = f. \quad (4.6)$$

把(4.5)和(4.6)式代入(4.4)式, 可把(4.4)式化为通常采用的形式

$$g = g_0 + (g_{90} - g_0) \sin^2 \varphi. \quad (4.7)$$

引入符号 $\beta = \frac{g_{90} - g_0}{g_0}$, (4.7) 式还可以化为

$$g = g_0 (1 + \beta \sin^2 \varphi). \quad (4.8)$$

(4.8)式就是把地球作为球体而得到的重力分布的理论公式。

把地球当作旋转椭球体的重力分布的理论公式为

$$g = g_0 (1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi). \quad (4.9)$$

把地球当作三轴椭球体的重力分布的理论公式为

$$g = g_0 [1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi + \beta_2 \cos^2 \varphi \cos 2(\lambda - \lambda_0)], \quad (4.10)$$

式中 λ 为所讨论点的经度。以上诸式中 g_0 , β , β_1 , β_2 和 λ_0 都是常数。由理论公式算出的 g 叫做正常重力。

3. 重力异常 实际测出的重力值 $\bar{g}$, 有时不等于正常重力值 g , 其差 $\Delta g = \bar{g} - g$ 叫做重力异常。造成重力异常的原因有两个: 一是地球内部物质分布不规则; 二是大地水准面和所取的地球形状不符合。地内物质的分布情况往往同地质构造和矿体的存在有关联。因此, 重力异常可以用来勘探矿藏以及研究地球的形状和内部结构。

五、三种纬度

由于地球不是一个正球体, 真正的地球表面不同于旋转椭球面以及地球内部质量分布的不规则性和地球自转, 地球上某点 M 的向径(地心到该点的直线)方向、 M 点的参考椭球面法线方向和 M 点的铅垂线(重力)方向, 一般说来是互不重合的。因此, 在精密的大地测量工作中应区分三种纬度(图4.5):

(3) 天文纬度，这是地面一点的铅垂线和地球赤道面的交角。通常天文纬度被采用为地理纬度。

φ , 地心纬度 φ' 可按下式由天文纬度算得:

$$\varphi' - \varphi = -11' 32.6267'' \sin 2\varphi + 1.1629'' \sin 4\varphi - 0.0026'' \sin 6\varphi \quad (4.11)$$

大地纬度 B 和天文纬度之差叫做垂线偏差。地面上各点的垂线偏差通常都在 $\pm 1.5''$ — $2''$ 的范围之内；在个别地区，可能超过此值。至于大地纬度，则要由地面上广大地区内测量得到的许多天文纬度以及大地测量和重力测量的结果归算而得。

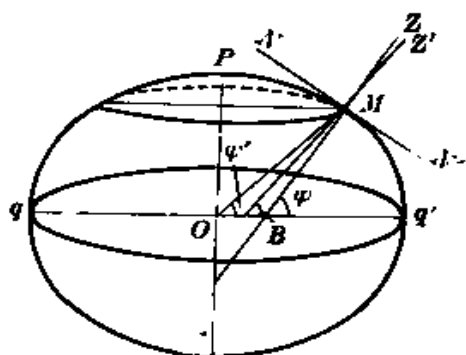


图 1.5 三种纬度 M 为地面点, O 为地心
 MZ 为 M 点的铅垂线 NN' 为过 M 点的
 的切平面 MZ' 为过 M 点的法线

§ 4.2 地球的内部结构

地球内部结构的知识，对于研究其他行星的结构及解决行星的起源和演化问题，都极为重要：某些天文现象如章动和极移的理论，也与此紧密相关。地球的结构在整体上可看成由同心圈层组成，不同的圈层有不同的大小和不同的物质成分。

由对地球表面重力加速度的测量,得出地球的质量为 5.976×10^{24} 千克,而地球的体积为 1.0832×10^{21} 米³,由此可以算出地球的平均密度为 5.515×10^3 千克/米³。

一、内部结构的探测

探测地球内部结构和物理性质，主要根据地震波的传播，因为地震波的传播情况与地球内部物质的弹性和密度有关。地震波有两种来源：天然地震和人工爆炸，有两种类型：纵波和横波。地震波在地球内传播时受到折射、反射和衰减，传播情况十分复杂。对地震波的分析可以得出它们在不同深度的传播速度(图1.6)，这反映了地球的圈层结构，主要分为三部分，即地壳、地幔和地核(图1.7)。

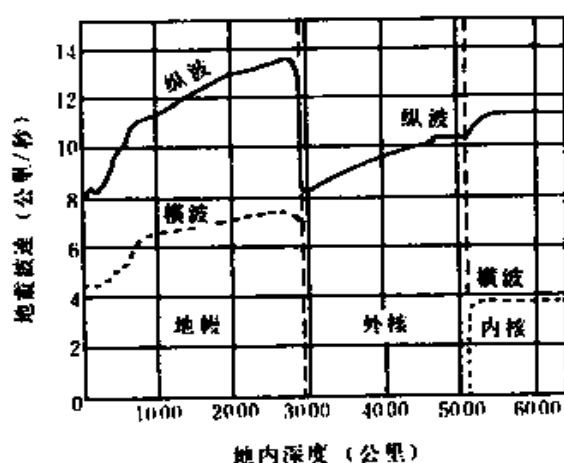


图 1.6 地内各深度地震波的波速分布

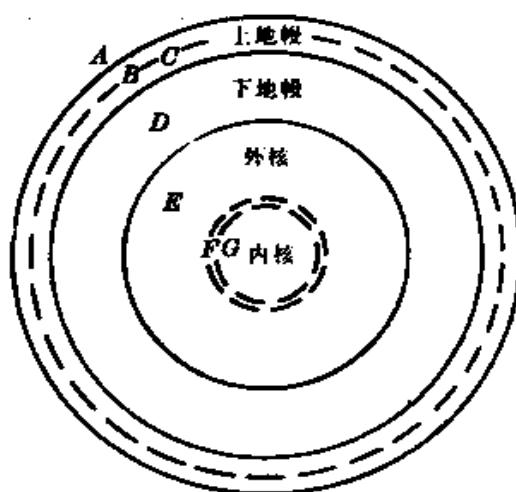


图 1.7 地球的内部结构

二、内部结构

根据三个界面的深度，可知地壳的厚度平均是33千米；地幔的厚度大约是2865千米；外核的厚度大约是1742千米；过渡层的厚度约515千米；内核的半径大约是1216千米。地壳、地幔和地核分别占地球体积的1%、83%和16%；占地球质量的0.4%、68.1%和31.5%。

1. 地壳 地壳的外部与广阔的海洋(水圈)和大气层(气圈)

相连,呈现高低起伏的形态,下部由间断面与地幔分开。这个面叫莫霍间断面,以发现者南斯拉夫地质学家莫霍洛维奇(Mohorovičić)命名。地壳的厚度各处不同,大陆之下的平均厚度约35千米;海洋下面只有5—10千米;我国青藏高原的地壳厚度达60—80千米。测量表明,在100米深度以下,地壳温度完全不受太阳辐射影响,而随深度不断增高。在地壳表层,温度上升较快,温度增高率平均为每千米30℃。随着深度增加,温度虽还上升,但增高趋势转缓。在地壳深处,温度不超过1000℃。

地壳主要成分是花岗岩和玄武岩;一切矿产资源都蕴藏在地壳层内。各种地质现象,如构造运动、岩浆活动、变质作用等,也都发生在这里。关于“地壳变移”的一些学说在近二十年来得到确认和发展,解释了许多复杂的地表结构和地壳运动问题,并具有重要的实际意义。分述如下:

(1) 大陆漂移:1912年奥地利工程师韦格纳(A. Wegener)提出大陆漂移假说。他根据地质学和古生物学的大量资料,例如非洲西部和南美洲东部的海岸线形状相似,在地层、构造、岩相、古生物及古气候等方面也有种种的相似性和连贯性,认为所有大陆在中生代以前(约2亿年前)曾联成一个巨大的陆块。但这一假说在提出以后的长时期里未得到公认。直到五十年代中期,这一学说重新受到重视,并获得了新的发展。现在认为远古时代地球上有两个大陆块,即南半球的冈瓦纳古陆和北半球的劳亚古陆。后来古陆破裂,各裂块相对漂移而分离,逐渐成为目前的各大陆。现代观测表明地球上层存在大规模平移断裂,证明这种漂移至今还在继续进行。

(2) 洋底扩张:六十年代初提出的洋底扩张假说认为,地壳和上地幔顶部是岩石层,厚70—100千米。这下面数百千米厚的地幔上部内的物质,进行着对流循环的缓慢流动。在两股相向对流的上升带,形成了大洋底部高耸的海岭(又称洋中脊)。对流物质

上升后，在这里向两侧分流，带动上面的岩石层，在海岭顶部造成裂谷。深处岩浆由此不断充填，形成新的洋底；而老洋底不断向两侧扩张，扩张速度为每年2—6厘米。当洋底扩张把大洋地壳推进到大陆边缘时，大洋地壳向大陆地壳下面俯冲，在大陆边缘形成海沟。在这种对流循环的作用下，整个洋底在2—3亿年间被更新一次。

(3) 板块运动：六十年代末期出现了板块构造学说。地球的岩石层并不是整体一块，而是为一些活动的构造，如海岭、岛弧、水平大断层等所割裂，形成若干个相对运动着的板块。所谓岛弧是呈弧形排列的群岛，如阿留申群岛、千岛群岛、大巽他群岛、小安德列斯群岛等。全球岩石层可划分为六大板块，即欧亚板块、美洲板块（包括北美板块和南美板块）、非洲板块、太平洋板块、澳大利亚板块和南极板块（图4.8）。板块分界处是大地构造活动比较剧烈的地带。喜马拉雅山和我国的青藏高原是印度洋-澳大利亚板块向欧亚板块方向运动，挤压和抬升形成的，现在还在不断上升之中。

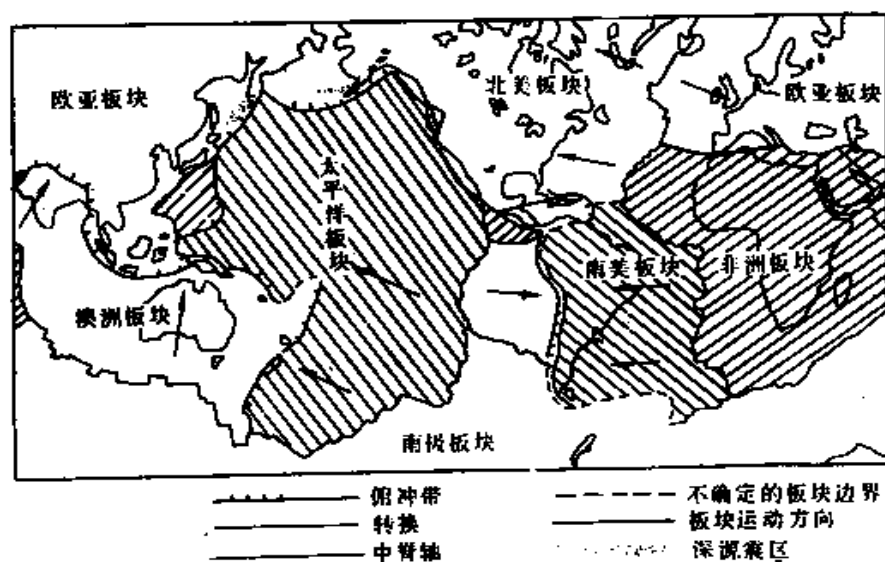


图 4.8 板块运动

2. 地幔 莫霍间断面以下是地幔，分为三层，即上地幔、过渡层和下地幔。地震探测表明，地幔呈固态。地幔物质与球粒陨石相近，由橄榄石、辉石、斜长石和铁镍合金等组成。地幔的密度和温度都随深度增加而增加，但是温度随深度的增高比较缓慢。地幔物质在较高的温度和压力下，具有一定的可塑性。地幔和地核被另一个称为古登堡间断面的界面所分隔。

3. 地核 地幔之下是地核。地核也分为三层：外核、过渡层和内核。地核物质主要是铁镍等重元素。外核是液态而内核是固态。在地核里，温度和压力都随深度而增高，物质的熔点也随压力增高而上升。比较起来，熔点的增加较快，而温度的增加较慢。在外核里，温度稍高于熔点，物质熔化。反之，在内核里，物质的熔点在高压下升得很高，以致超过了温度，物质以固态存在。据推算，地心的压力可能超过370万大气压，密度高达 1.3×10^4 千克/米³，温度高达6000℃。

地球内部的热能主要来自地球本身。在地球上层，积聚着放射性元素衰变产生的能量。此外，地球是由低温的颗粒物质积聚形成的。在这一过程中，引力势能转变为热能，对地球物质加温，使之分化为地壳、地幔和地核。而这种分层过程，导致重物质下沉，轻物质上升，引力势能降低，又产生了大量热能。这就形成了地球中心的高温。具体计算表明，这样产生的热能，均不足以使整个地球熔化。因此，地球从来不曾有过全部熔化的状态。

§ 4.3 地球的大气

在地球引力作用下，大量气体聚集在地球周围，形成了地球的大气层。大气层对地面的物理状况和生态环境有决定性的影响。大气质量为 5.136×10^{18} 千克，约占地球总质量的百万分之一。大

气密度随高度的增加而按指数函数下降，所以其总质量的90%集中在离地表15千米的高度以内，99.9%在50千米高度以内。在2000千米高度以上，大气极其稀薄，逐渐向行星际空间过渡，而无明显的上界。

一、地球大气的组成

地球大气是由多种气体以及少量水汽和微尘等混合组成的，各组成部分的情况如下：

(1) 干洁空气：在低层大气里，干洁空气的成分及其质量和体积百分比如下表所列。

表 4.1 干洁空气的成分

成 分	质量百分比	体积百分比
氮(N ₂)	75.52	78.08
氧(O ₂)	23.14	20.95
氩(Ar)	1.29	0.934
二氧化碳(CO ₂)	0.05	0.032
氪(Kr)	3.3×10^{-4}	1.14×10^{-4}
氖(Ne)	1.27×10^{-3}	1.82×10^{-3}
氦(He)	0.72×10^{-4}	5.24×10^{-4}
甲烷(CH ₄)	1.0×10^{-4}	1.8×10^{-4}
氢(H ₂)、一氧化碳(CO)、氙(Xe)、臭氧(O ₃)、氡(Rn)等	1.5×10^{-4}	1×10^{-4}

(2) 水汽：干洁空气是不包含水汽的空气，实际上地球大气含有一定比例的水汽。水汽是大气中最不稳定的组成部分。在夏季湿热处，水汽在大气中的含量可达4%；而在冬季干寒处，其含量降到0.01%。水汽主要集中在离地面2千米以下的大气层中，与天气变化有密切关系。

(3) 微尘：在离地表3千米以内的空气中，悬浮着大量固体微粒。它们的成分包括尘埃、花粉、细菌、火山灰等，还有海浪卷入空中的水滴蒸发后留下的盐粒和从空间落入大气的宇宙尘、流

大气中经常发生上升气流和下降气流。水汽大部集中于此层，一切天气现象也都发生于此层。另一个特点是空气温度随高度的递增而降低，平均每升高150米温度降低1℃，其顶部约为-55℃。

(2) 平流层又称同温层：从对流层顶到高度50千米的一层，大气主要是平流运动。大气中的臭氧大部分分布在这一层里；臭氧吸收太阳紫外辐射，使温度随高度增加而缓慢上升，到平流层顶部，达到极大值(约-10—+20℃)。

(3) 中间层又称散逸层：高度50—85千米的一层，温度随高度而下降，到中间层顶，温度接近最小值，约为-80℃。

(4) 热层：位于中间层之上的一层，温度随高度增加而上升，开始时增加很快，150千米以上增加变慢，再往上几乎接近等温。在500千米处的热层顶，达到1100℃左右。增温的原因是由于这一层的大气大量吸收太阳紫外辐射。热层顶以上为外大气层。这里的大气已极稀薄，密度在 10^{13} 个原子/米³以下(而海平面处为 10^{25} 个原子/米³)。

2. 按大气的组成分层 大气按其成分可以分为均质层和非均质层。

(1) 均质层：离地表约100千米以下的一层，由各种气体混合组成，平均分子量为常数。这一层内高度10—50千米处，太阳紫外辐射的光化作用产生臭氧，形成臭氧层(高度大致与平流层相当)。在20—30千米处，臭氧浓度最大。臭氧层吸收了危害生命的太阳紫外辐射。

(2) 非均质层：位于均质层以上的一层，平均分子量随高度增加而减少。在500—1000千米，大气已很稀薄。那些速度大于逃逸速度的粒子，则飞到行星际空间去了。高度1000千米以上的大气主要由氢和氦组成。地球大气的这一最外层称为地冕，地冕可扩展到6万公里高空。

整个地球大气层的压力和密度随高度的分布见图4.10。

3. 按大气的电离程度分层 大气按电离程度可以分为中性层和电离层。

(1) 中性层: 从地表到高度80千米的一层, 其中分子和原子都处于中性状态。

(2) 电离层: 离地表80—1000千米的一

层, 大气中的原子在太阳辐射(主要是紫外辐射)作用下电离, 形成大量的正离子和电子。电子浓度极大处形成几个层: 高度80—100千米为D层; 100—120千米为E层; 150—250千米为 F_1 层; 250—500千米为 F_2 层。每一层的高度和电离情况随每天不同时刻, 每年不同季节和太阳活动程度而发生变化。某些天文现象, 如极光、流星等都发生在电离层中。电离层还能反射无线电短波, 从而使地面上可以实现短波无线电通讯。太阳上发生的剧烈活动(如耀斑和大黑子出现), 会严重地影响电离层, 发生电离层骚扰。这时短波传输受到干扰, 甚至间断。

三、地球大气的起源

现在一般认为地球大气经历了原始大气、还原大气和氧化大气三个演化阶段。

地球形成初期的原始大气已不存在, 它已全部或大部散逸到了空间。后来, 由于放射性元素的衰变和引力势能的转化, 部分地球物质处于熔化状态, 加速了气体从地球内部逸出的过程。地球的引力使这些逸出的气体渐渐积蓄在地球的周围, 形成“第二代”大气。它的主要成分是二氧化碳、一氧化碳、甲烷和氨, 称为

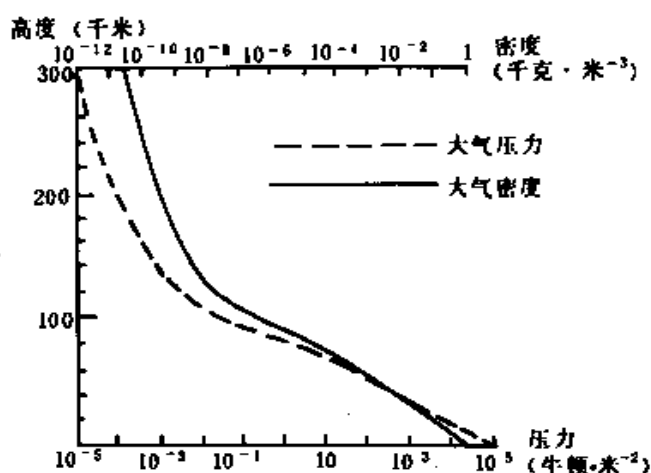


图 4.10 地球大气压力和密度的分布

还原大气。后来,主要由于绿色植物的光合作用还原二氧化碳,其次因太阳辐射使水分解,产生出游离氧,从而使还原大气变为现代的以氮和氧为主的氧化大气。

§4.4 地球的磁场

一、概况

观测表明,地球磁场与一个棒状磁体的偶极场相似,其磁力

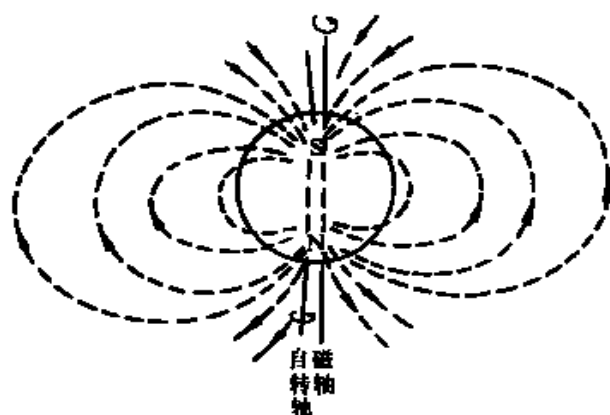


图 4.11 地球磁场示意图

线分布如图4.11所示。地磁轴与自转轴不重合,其交角随时间缓慢变化,现代可取值 11.5° 。磁场强度在磁极处为 6×10^{-5} 特,磁赤道处为 3×10^{-5} 特,地球磁场的总能量约为 3.4×10^{19} 焦。

长期的系统观测表明,各地的地磁要素,即磁偏角(磁场强度方向对南北向的偏角)、磁倾角(磁场强度方向对水平面的倾角)和磁场强度都在逐年逐日地变化着。这种变化可分为两类:

(1) 无扰变化: 进行得较平静而有规则, 包括周日变化、周年变化和长期变化。

(2) 干扰变化: 所有地磁要素在平均值附近零乱无序地上下起伏。

地磁场的强烈扰动叫做磁暴, 强度变化达 10^{-7} — 10^{-6} 特, 可持续几小时到几天。这是由太阳的大黑子群或大耀斑发出的强大

的微粒辐射引起的。磁暴对电离层骚扰非常大，使短波无线电通讯中断，高纬地区出现极光(参见 § 7.10)。

资料表明，地磁在远古时代发生过几次极性的倒转，原因尚在探索中。

二、磁层

地球磁场在高空中受到太阳风 (§ 7.5) 的影响，磁力线都向后弯曲，地磁场朝太阳方向的最前沿形成一个包层，并向着背太阳方向延伸。这个被太阳风包围的、彗星状的地磁场区域叫做地球磁层(图4.12)。它始于地表以上高度600—1000千米处，向空间延伸到太阳风动能密度与地磁场能密度相平衡的曲面上，即磁层顶。在朝向太阳的一面，磁层顶离地心距离为8—11个地球半径。在太阳活动激烈时，太阳风增强，磁层顶被压缩到5—7个地球半径。在背向太阳的一面，磁层形成一个柱形长尾——磁尾，其截面宽约40个地球半径，长度达几百个甚至一千个地球半径以外。在磁尾中存在一个特殊的界面，其两边磁力线突然改变方向，此界面称为中性片。在地球朝向太阳的一面由于太阳风的冲击，形成一个叫做地球弓形激波的波阵面。波阵面与磁层顶之间的过渡区

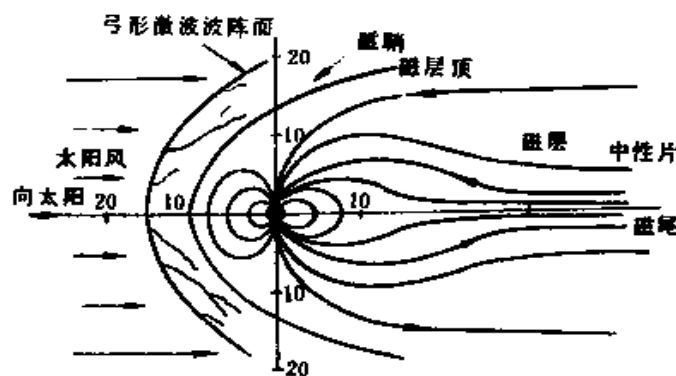


图 4.12 地球磁层
图中数字均以地球半径为单位

叫做磁鞘，厚度为3—4个地球半径。

三、辐射带

地磁场俘获带电粒子，把它们约束在大气的一定区域内，形成地球辐射带(图4.13)。辐射带内的带电粒子是太阳风、宇宙线

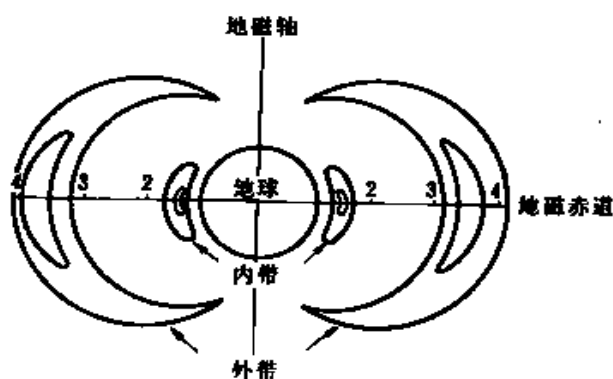


图 4.13 地球辐射带

与地球高层大气相互作用而产生的高能粒子。它们在地磁场作用下，沿磁力线作螺旋运动并不断辐射出电磁波。1959年范爱伦(J. A. Van Allen)从美国人造地球卫星“探险者1号”的资料分析中证实了辐射带的存在，因此也称

为范爱伦带。地球辐射带在地球磁层内，只局限于一定磁纬地区的上空，在南北磁极和高磁纬地区的上空则不存在。

辐射带分为两个：

(1) 内辐射带：中心在离地心1.5个地球半径处，范围限于磁纬度 $\pm 40^\circ$ 之间。含有能量为50兆电子伏的质子和能量大于30兆电子伏的电子。带电粒子数相对稳定。

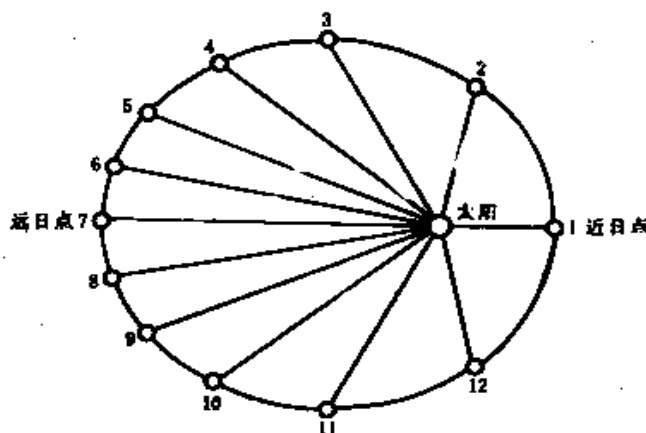
(2) 外辐射带：中心在3—4个地球半径处，比内辐射带宽得多，范围延伸到磁纬度 50° — 60° 。带电粒子的能量较小，也比较稀薄，且带电粒子数变化甚大，差别可达到100倍。

辐射带的范围和形状受地磁场制约，也和太阳活动有关。

§ 4.5 地球的运动

一、地球的公转

地球绕太阳的周期运动称为公转，其轨道为椭圆。轨道半长径①即是日地平均距离，历史上曾称其为天文单位，作为重要的天文基本常数之一。观测表明，目前地球于每年1月3日前后经过近日点，这时的日地距离约为 1.471×10^8 千米，公转速度达到最大值，为30.3千米/秒；大约在7月4日左右经过远日点，离太阳的距离增大到 1.521×10^8 千米，公转速度减低到最小值，为29.3千米/秒(图



4.14)。

图 4.14 日地距离的逐月变化，数字均表示月初

观测还表明，地球连续两次经过近日点的时间间隔为365.25964日，比回归年长25分07秒，在天文上称之为近点年。由此可知，每过60年，地球经过近日点的日期将推迟一日。

二、地球的自转

天体的周日运动是地球自转的反映，以下现象和实验都足以证明这个事实。

(1) 落体偏东：地球自转的线速度随地心距增大而增加，高

① 严格说来，应是地月系质心绕太阳公转的无摄动椭圆轨道的半长径。

处的物体向东的线速度较大，因而它的落点比原来的方位要稍稍偏东一些。

(2) 轨道偏移：从力学中知道，在一个转动系统中，存在着科里奥利力。

$$\vec{f} = -2\vec{\omega} \times \vec{v} \quad (4.12)$$

式中 $\vec{\omega}$ 为地球的自转角速度， $\vec{v}$ 为地面上运动物体的线速度。在北半球上，如果物体速度向北， f 的方向则向东；反之，向南运动的物体受到的科里奥利力方向朝西。即均向右偏移，因此北半球的南北向河流、铁路总是右侧磨损得厉害些，北半球的信风终于转为东北风……，这些都是科里奥利力造成的。

(3) 傅科摆：1851年，法国物理学家傅科(J. B. L. Foucault)

在巴黎国葬院的圆顶内摆了一个长67米的自由摆，一段时间后，摆动平面明显向西偏过了一个角度。这雄辩地证明了地球的确在自转着。

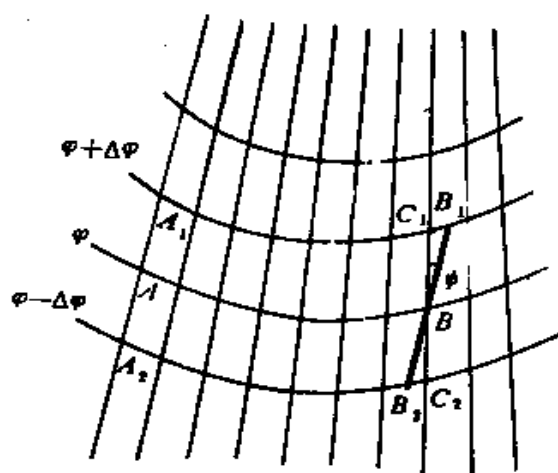


图 4.15 傅科摆的偏转

在巴黎国葬院的圆顶内摆了一个长67米的自由摆，一段时间后，摆动平面明显向西偏过了一个角度。这雄辩地证明了地球的确在自转着。

设观测者位于地理纬度为 φ 的 A 处，为了计算方便，假定开始时摆动平面 A_1A_2 就是 A 点的子午线方向。经过时间 t 后， A 点已转到了 B 处，而 B 处的子午线方向是 C_1BC_2 (图4.15)，而摆平面在空间的位置不变，即 B_1BB_2 是与 A_1AA_2 平行的。设 B_1BB_2 与 C_1BC_2 的夹角为 ψ ，而这正是地面观测者所见的摆偏转的角度。

可以认为 B_1 的纬度为 $\varphi + \Delta\varphi$ ，

则

$$BB_1 \simeq BC_1 = AA_1 = R\Delta\varphi,$$

$$C_1B_1 = A_1B_1 - A_1C_1 \simeq AB - A_1C_1,$$

令地球的自转周期为 T ，则不难得到

$$AB = 2\pi R \cos \varphi \cdot \frac{t}{T}$$

$$A_1C_1 = 2\pi R \cos (\varphi + \Delta \varphi) \cdot \frac{t}{T}$$

因而

$$C_1B_1 = 2\pi R \frac{t}{T} [\cos \varphi - \cos (\varphi + \Delta \varphi)]$$

于是从小三角形 C_1BB_1 中可得：

$$\psi = \frac{C_1B_1}{BC_1} = 2\pi \frac{t}{T} \cdot \frac{\cos \varphi - \cos (\varphi + \Delta \varphi)}{\Delta \varphi}$$

$\Delta \varphi$ 是微量，根据微分定义则上式简化为：

$$\psi = 2\pi \frac{t}{T} \sin \varphi \quad (4.13)$$

由此不难得出摆转动角速度为 $15^\circ \sin \varphi$ / 小时，在极地转动最明显，赤道地区则不偏转，北京和南京每小时偏转角分别为 9.6° 及 7.9° 。

地球自转可以它的角速度矢量 $\vec{\omega}$ 表征，长期观测表明， $\vec{\omega}$ 的方向和大小都在变化。其方向（即自转轴的指向）在空间的变化叫做岁差和章动；其方向在地球体内的变化则称为极移。极移与自转速率的变化这两种重要现象将在 § 15.2 及 § 15.6 分别讨论。

三、岁差和章动

快速旋转的陀螺倾斜的时候，在地球重力作用下，它的旋转轴会作圆锥式的运动，叫做陀螺的进动。地球也是一个旋转着的“陀螺”。如果地球是正球体，而且密度分布球形对称，那么，太阳和月球对它的引力集中在球心。可是实际并非如此，地球赤道的突出部分会受到一种附加吸引，使地球赤道面有向黄道面重合的趋势。可是地球同时在自转着，自转运动的惯性使赤道面和黄道

面的夹角不会改变,却使地球产生运动,即地轴的进动(图4.16)。这就是地轴环绕垂直黄道面的轴线作缓慢的圆锥运动,这个圆锥的顶角显然是黄赤交角的两倍。进动的方向和地球自转方向相反,即自东向西,速度是 $50.37''/\text{年}$,周期约25800年。

地轴进动的一个直接效应是天极绕黄极作缓慢的圆周运动,这个圆的半径等于黄赤交角。通过精密的天文观测,能发现北天极在恒星间位置的变动。我国古书记载,公元前3000年的北极星是紫微垣右枢星(天龙 α)。现在北天极在小熊 α 附近,相距不到 1° 。这距离还在不断变短,到公元2100年达到 $28'$,以后它要离开现在的北极星而去。到公元7000年,仙王 α 将成为北极星;到公元13000年,天琴 α (织女星)将成为北极星(图4.17)。

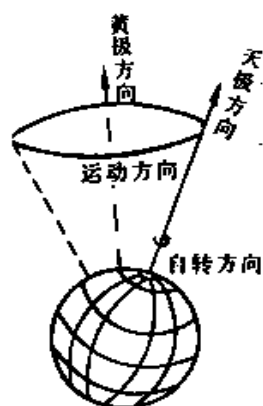


图 4.16 地轴的进动

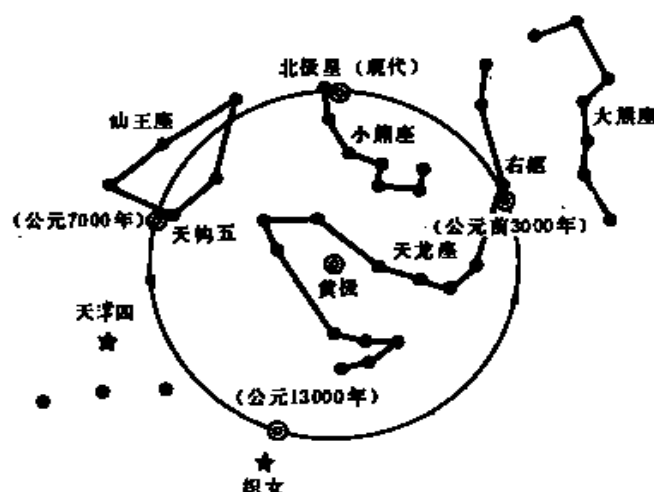


图 4.17 北极星的变迁

地轴的进动使天极改变至少会造成两种天文现象,一是使各地的所见星空状况发生变化,例如六千年前我国许多地区都可见到南十字座,但现在只有海南岛以南的地区才可对它观测,对于广大的中纬度地区,它已成了永不升起的天体。

地轴的进动还造成另一效果,这就是春分点和秋分点向西移动。这一西移的平均速度是 $50.24''/\text{年}$,叫做二分点的岁差。当前

春分点是在双鱼座。公元前二千年至公元初年，春分点曾在白羊座。春分点的符号 γ 就是白羊座的标志，这沿袭了公元初人们的习惯。几百年后，春分点将要移到宝瓶座去了。由于春分点移动的方向和太阳周年视运动方向相反，回归年就要比恒星年短。岁差的名字就是这样来的。地轴的这种进动及其效应统称为日月岁差。

以上描绘的地轴进动图象是假定月球位于黄道上得出的。实际上，月球沿着白道运动，经常在黄道两侧改变位置。此外，月球和太阳到地球的距离也不断改变，因此引起天极和春分点更复杂的运动。可以用一些振幅微小的短周期变化来表示这类运动，称为章动。章动叠加在岁差上，构成天极在天球上的实际运动(图4.18)。章动包括振幅和周期不等的许多项，主要章动项的振幅为 $9.211''$ ，周期为18.6年。

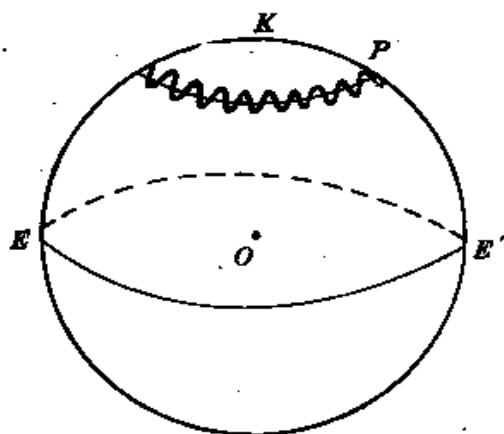


图 4.18 岁差和章动引起的天极运动

行星因为远，质量又小，它们的引力作用实际上对地轴的进动不起作用，但却能够使地球轨道面(黄道)引起变化，产生行星岁差。

日月岁差、行星岁差和章动的计量以及它们对天体坐标的影响将在§13.4里介绍。

§4.6 地球的潮汐

一、潮汐现象

居住在海边的人们，每天都看到海水作周期性的涨落。白天

出现的海水高涨叫做潮，晚上的叫做汐，统称为潮汐。大致说来，每天有两次涨潮，两次退潮。经过仔细观测，发现两次涨潮（或退潮）之间所经过的时间平均是12小时25分；第二天涨潮的时间比前一天平均推迟了50分钟，这正是月球中天每天推迟的平均时间。我国古代人们已察觉到潮汐同月球有关系，东汉王充在《论衡》一书里已提到：“涛之起也，随月盛衰”。但对潮汐现象作出科学的解释，是在万有引力定律发现之后。

潮汐现象实质上是由于月球和太阳对地表海水和地球中心的引力之差产生的（见§5.4）。潮汐形成的原理虽然很简单，但具体的潮汐现象却是非常复杂的。实际上地球表面并不是全部被海洋覆盖着，大陆的形状和分布毫无规则，海岸线曲曲弯弯，海底地形高低起伏，海水有粘滞性，种种因素都阻碍着潮汐的传播，使涨潮的高度、时刻、持续时间错综复杂，因时因地而异。因此，每天高潮的到来常比月球中天要迟1小时至数小时；每月大潮并不正好发生在朔望，总要落后二、三天。世界上最大的海潮高达16米，我国的钱塘潮也举世闻名，蔚为壮观。

除了海洋的潮汐外，还有大气潮和固体潮，前者是月日对大气的潮汐作用，后者则是对地壳的作用，但它们远不如海洋潮明显，常要借助仪器才可测出。

二、潮汐的天文效应

潮汐与人类的生产和生活有密切的关系，作为能源它可以为人利用来建造潮汐发电站，同样它对农业、渔业、盐业也有很大的影响，此外还有许多天文效应值得人们重视

（1）潮汐摩擦：潮汐是自东向西传播的，与地球自转方向相反，所以它必将消耗地球自转的动能，使地球自转速度减慢、周期延长——使日长每过一百年约增加0.0016秒。而地球对月球的潮汐作用则已使它的自转周期长到与公转周期相等。

由于角动量守恒，地月系统中地球自转变慢的结果使月地距离增大，这一过程将延续到地球以同一面朝向月球，一天的长度和月的长度相等——1030小时为止。

(2) 地球引力场的变化。地球在其周围空间引力场的大小和分布取决于地球的形状和物质密度的分布。潮汐作用(包括海洋潮和固体潮)改变了地球的形状和密度,导致引力场的变化。这类变化将对在地球引力场内运动的人造地球卫星产生一种称为潮汐摄动的附加摄动。它的大小可以达到月球对人造卫星直接摄动力的15%。

(3) 垂线偏离。地面上一点的铅垂线方向,投影在天球上,就是该点的天顶;这是天球上的一个基本点,因为天顶方向是地平坐标系的参考方向。垂线方向由地球重力场在该点的梯度方向所决定,地球引力场在起潮力作用下的变化,也引起铅垂线方向的改变,叫做垂线偏离。虽然垂线偏离的振幅只有约 $0.025''$,但精密天体测量必须改正这一影响。

(4) 测站位移。固体潮所致地壳形变和海洋潮所致海水质量的大规模迁移而施于局部地壳上的负荷,会引起地面点的垂直方向和水平方向的位移,即潮汐位移。这种位移可达几十厘米。现代天体测量和大地测量新技术如甚长基线干涉测量、激光测月、激光测人造卫星等的测距精度已达几厘米至10厘米量级,因此观测站的潮汐位移是绝对不能忽视的。

此外,由于岁差、章动和潮汐效应有完全相同的起源,潮汐的理论研究和实际测量,对于深入研究岁差、章动的规律有直接的意义。潮汐理论在天体力学中形成了一个专题,有其重要的应用。

§4.7 月球概况

除了流星、陨星和少量人造天体(卫星、火箭及其碎片)外,离地球最近的天体就是月球。月球是地球唯一的天然卫星,通过对于月球的了解即可窥见卫星世界之一斑。

一、月球的距离

尽管月球是最近的天体,可仍是相当遥远的。虽然古代人极其希望了解月球的情况,可是对于月地距离的科学测量(1751年)甚至比日地距离(1672年)更晚。

1. 古代测距的尝试 公元前三世纪,古希腊学者阿利斯塔克曾巧妙地做了第一次科学尝试。他测定的原理相当简单:利用月球上、下弦的机会去测量 $\angle SEM$ 的值。因为他知道,这时太阳、地球、月球组成了一个直角三角形(图4.19),在求得 $\angle SEM$ 后就可利用几何学的方法,得到月地距离 EM 与日地距离 ES 的比值。

阿利斯塔克的方法既简单又巧妙,只是由于限于当时科学水平,测量工具太简单,因此未能得到科学的结论。当时阿利斯塔

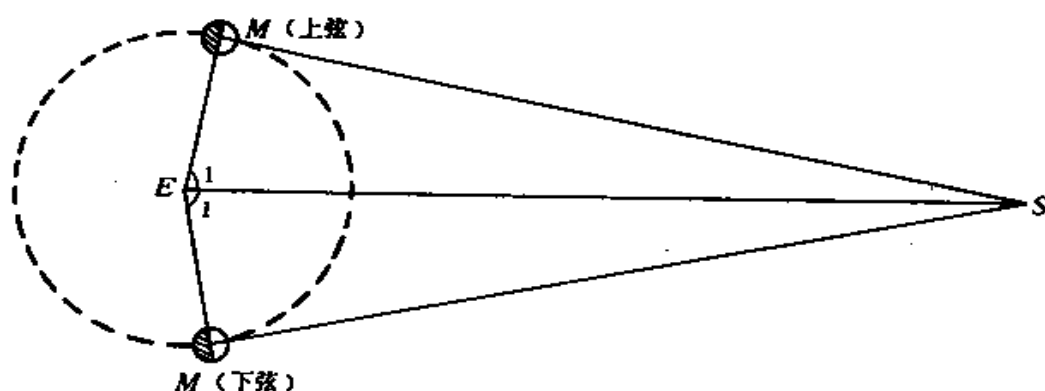


图 4.19 阿利斯塔克利用上、下弦测月地距离的相对值

克测得 $\angle SEM = 87^\circ$ (实际应为 $89^\circ 51'$)，所以他认为月地距离是日地距离的 $\frac{1}{18} - \frac{1}{20}$ 。尽管这与实际的 $\frac{1}{389}$ 相去甚大，但阿利斯塔克却由此得到一个极其精辟的重要结论：太阳比地球大，应当是地球绕太阳转而不是象地心说所说的太阳绕地球转。

差不多一个世纪以后，另一个古希腊大天文学家喜帕恰斯从日食时地球投在月球上的弧状影子，用几何学的方法测定月球的距离，他得到了比较准确的结论：月地距离值是地球直径的 $30\frac{1}{6}$ 倍^①。

2. 三角视差法 对于不能直接到达的目标，原则上都可运用这种方法来测定距离。例如对于河岸对面的目标 C ，只要选定一条基线 AB ，测出 AB 的长度再量出 $\angle A$ 和 $\angle B$ ，则可算出 $\angle C$ ，于

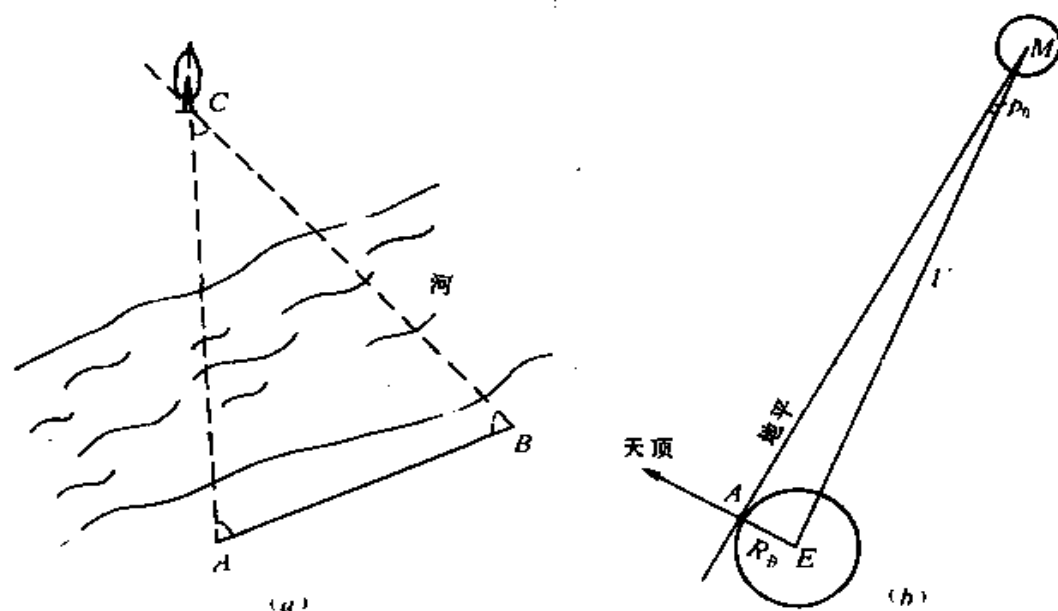


图 4.20 三角视差测距 (a)原理: (b)月球的地平视差

① 表面看来，喜帕恰斯的数值很准，因为这个比值确为 30.48 ，但实际上，当时人们并不知道地球直径的准确值（当时人们心目中的地球半径值比现在所知的小得多），所以实际上他并未得出具体的月球距离值。

是 AB 、 BC 均可确定 (见图4.20a)。一般把 $\angle C$ 称之为“视差”。测量月球的距离也可利用这种方法, 如图4.20b, M 是处于地平线上的月球, A 为地面上一点, E 为地球球心, 因为地球半径 $R_{\oplus}$ 是已知的, 只要测出 $\angle p_0$ 的值, 便不难得到月球的距离 l , 这 p_0 一般称之为月球的地平视差, 这相当于站在月球中心看到的地球半径的视角。显然:

$$\sin p_0 = \frac{R_{\oplus}}{l} \quad (4.14)$$

这样, 测定月地距离 l 的问题就归结为测定月球的地平视差 p_0 的问题。然而, 实际上地心 E 是不能到达的, 所以通常是通过地面上处于同一子午线上的两地 (它们相距越远越好) 来达到此目的 (图4.21)。

在图4.21中, A 是纬度为 ϕ_A 的某地, 设 A 处所见的月球视差为 p_A , 而 A 处与地心 E 处所测得的月球的赤纬及天顶距分别为 δ_A , δ , z_A , z 。

在 $\triangle AME$ 中,

$$\frac{\sin p_A}{R_{\oplus}} = \frac{\sin (180^\circ - z_A)}{l},$$

所以, 用 (4.14) 式代入, 可得:

$$\sin p_A = \sin p_0 \cdot \sin z_A, \quad (4.15)$$

不难看出

$$\left. \begin{aligned} p_A &= z_A - z = \delta - \delta_A, \\ z_A &= \phi_A - \delta_A. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

把 (4.16) 式代入 (4.15) 式:

$$\sin (\delta - \delta_A) = \sin p_0 \cdot \sin (\phi_A - \delta_A) \quad (4.17)$$

在同一子午线上另选纬度为 ϕ_B 的 B 点, 同理有:

$$\sin (\delta - \delta_B) = \sin p_0 \cdot \sin (\phi_B - \delta_B). \quad (4.18)$$

由 (4.17) 和 (4.18) 式可得:

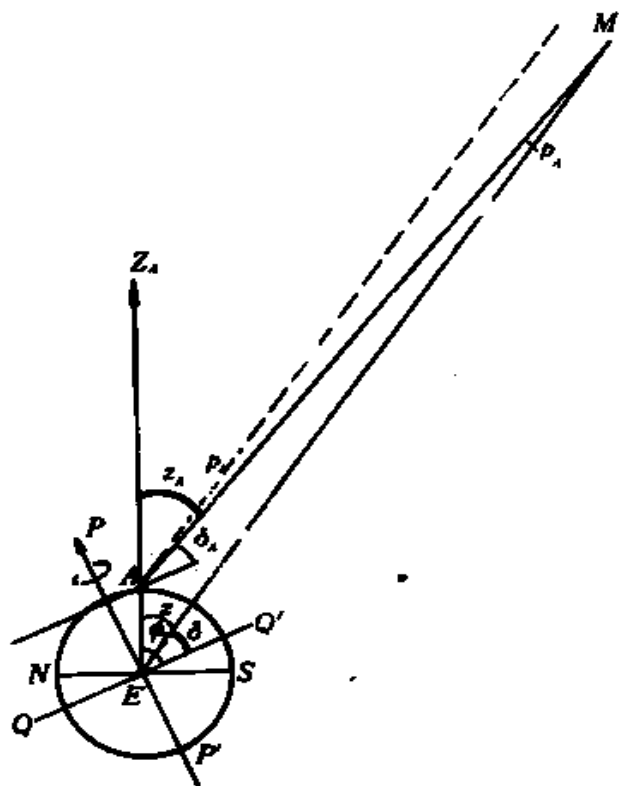


图 4.21 通过同一子午线上两地测月距(仅画 A 处)

$$\sin p_0 = \frac{\sin(\delta - \delta_A) - \sin(\delta - \delta_B)}{\sin(\phi_A - \delta_A) - \sin(\phi_B - \delta_B)}$$

由于 $\delta - \delta_A$ 和 $\delta - \delta_B$ 都是微量, 故有:

$$\sin p_0 = \frac{\delta_B - \delta_A}{\sin(\phi_A - \delta_A) - \sin(\phi_B - \delta_B)} \quad (4.19)$$

p_0 也可以用天顶距来表示:

$$\sin p_0 = \frac{(z_A - z_B) - (\phi_A - \phi_B)}{\sin z_A - \sin z_B} \quad (4.20)$$

最早运用这种方法求得月球地平视差的是两个法国天文学家：拉卡伊(N. L. LaCaille)和勒朗德(J. J. Lalande)。他们在1751—1753年间分别在柏林和好望角联测。这种方法几经改进，现在归算的结果是：

$$p_0 = 3422.60'' = 57' 02.6''$$

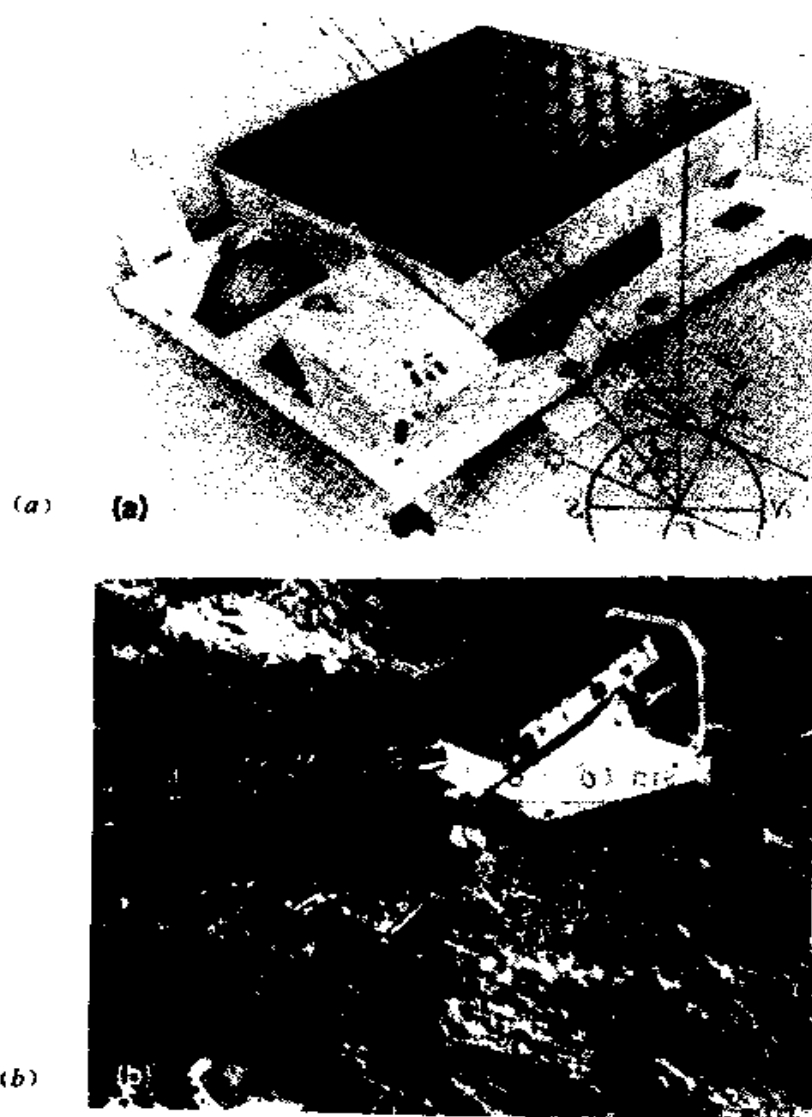


图 4.22 “阿波罗”11号宇航员放置于月面上的
激光“角反射器阵列”，质量30千克
(a) 原件；(b) 在月面上

于是从(4.14)式求得 $l = 384400$ 千米。

3. 新技术测距 上述的三角视差法虽经二百多年来的不断改进,但由于方法本身的局限,所得结果的误差总在 ± 3.2 千米以上。为了提高月地距离值测量的精度,人们不得不求助于新的测距技术。

射电天文学诞生后,尤其是雷达技术的不断提高,使得天体测距精度大为提高。1957年天文学家用雷达对准月球,并成功地接收到了它的反射讯号,从而得到了更准确的月球距离值: 384402 ± 1 千米。

激光问世后不久,美国麻省理工学院的科学家即在1962年做了第一次激光测月试验,“阿波罗”登月的成功更使激光测月获得了圆满的成功。1969年8月1日,人们利用“阿波罗”11号宇航员安置在月面上的激光反射器(图4.22),测得了误差仅为 ± 7 米的月地距离值。后来“阿波罗”15号的宇航员安置了性能更好的激光反射器,使这个值的误差减小到 ± 15 厘米。目前又把精度提高到了 ± 8 厘米,相对精度为 2×10^{-11} 。

雷达和激光测距技术的原理十分简单,只要测出讯号从发射到反射回来的时间间隔 Δt ,则目标的距离为:

$$l = \frac{\Delta t}{2} c, \quad (4.21)$$

式中 c 即为光速。当然,月球运行的轨道本身是椭圆,所以月地实际距离是随时间而变化的。现在国际上采用的月地距离平均值是384401千米。

二、月球的大小和质量

1. 半径 在距离已知后,便不难从角半径得到线半径。如图4.23. 因为:

$$R_{\odot} = l \sin \rho, \quad (4.22)$$

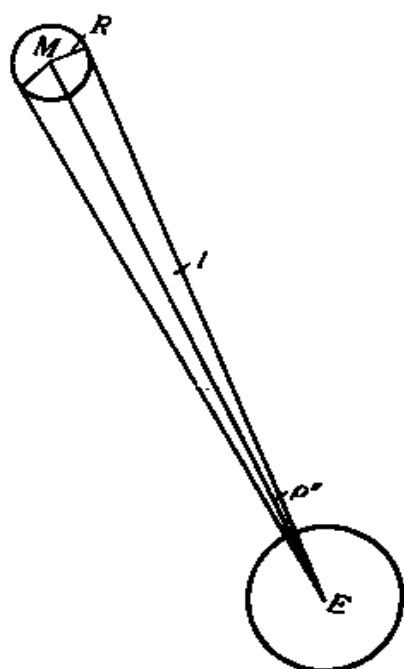


图 4.23 月球的半径

而月球 ρ 很小, 所以可直接化为:

$$R_{\text{C}} = \frac{l}{206265} \rho'' \quad (4.23)$$

ρ'' 是以角秒表示的月球半径 (但要归算到地心), 在实际测量中得到的都是角直径 $2\rho''$, $2\rho'' = 31' 05.2'' = 1865.2''$ 。

如用地球半径 $R_{\oplus}$ 来表示月球半径, 则有:

$$R_{\text{C}} = \frac{\rho''}{\rho_0''} R_{\oplus} \quad (4.24)$$

用上述求得的 l 值, 则可得:

$R_{\text{C}} = 1738$ 千米, 相当于地球半径

的 0.2728。按体积而言, 仅及地球 2%。

当然上述的 ρ 值是月球角半径的平均值, 实际上它们因月地距离的不同而在变化 (图 4.24), 最大时为 $16' 45''$, 最小时为 $14' 41''$ 。

现代的测量还表明, 月球也不是标准的球体。如把向地球方向、轨道方向、月极方向的月球半径分别记为 a 、 b 、 c , 则有:

$$a - c = 1.09 \text{ 千米,}$$

$$a - b = 0.31 \text{ 千米.}$$

2. 质量 月球质量 m_{C} 的测定远比大小更为复杂, 因为月球本身是地球的卫星, 并没有绕月球转动的天体, 所以无法通过简单的方法去直接测定月球的质量。虽然从理论上说来, 可以通过测定潮汐作用来推算它的质量, 但实际上这是很困难的, 因为地球上的潮汐大小还与地形、海水深度、气候等许多复杂的因素有关。

一个可行的方法是测定地月系统的质心 C 的位置, 以此来推

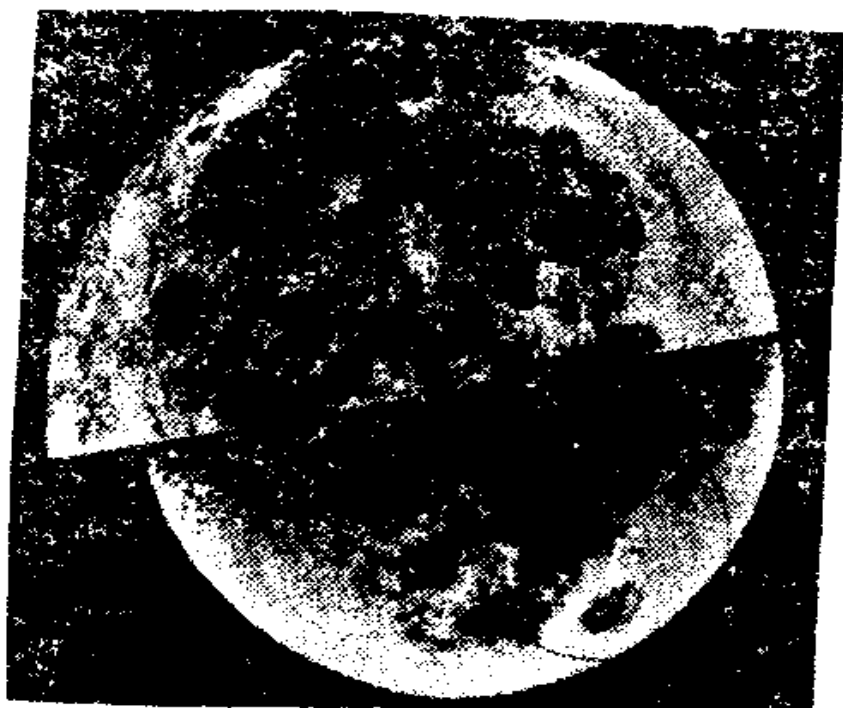


图 4.24 月球角半径最大时(右)与最小时(左)的比较

算月地的质量比。天文学家正是首先用这种方法求得 m_{C} 的，而质心 C 是通过精确测定太阳在天球上的位置，由它的黄经的细微变化中推算得到 EC 的(图4.25)。

从力学中关于质心的定义知，

$$m_{\oplus} \cdot EC = m_{\text{C}} (1 - EC)$$

天文学家们测得 $EC = 4671$ 千米(即质心在地壳内)。所以，这样算得的质量比为：

$$\frac{m_{\text{C}}}{m_{\oplus}} = \frac{1}{81.30}$$

现在，人类已能发射各种探测器进行逼近飞行、绕转飞行、软着陆，因此从绕月球飞行的火箭运动，可以得到月球的质量值(见 § 5.4)。

现在一般认为 $m_{\text{C}} = 7.35 \times 10^{22}$ 千克或 $\frac{1}{81.30} m_{\oplus}$ 。

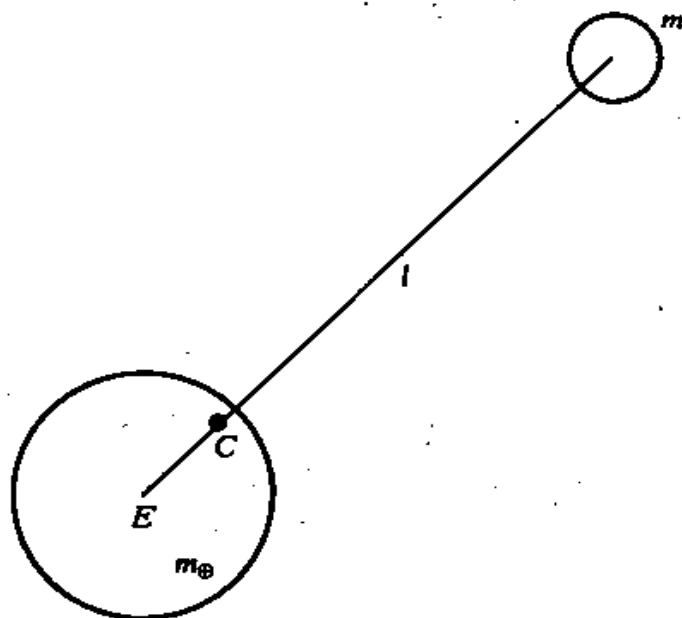


图 4.25 从地月质心求月球质量

从 m_C 及 R_C 不难求出月球的平均密度为 3.341×10^3 千克/米³。这个值仅相当于地球平均密度的60%，这表明地球、月球的内部结构有较大的差别。

3. 表面重力加速度及逃逸速度 从万有引力定律很容易推出月球表面的重力加速度：

$$g_C = \frac{Gm_C}{R_C^2} \quad (4.25)$$

式中 G 为万有引力常数, $G = 6.672 \times 10^{-11}$ 牛顿·米²/千克²。把 m_C 、 R_C 代入即得：

$$g_C = 1.623 \text{ 米/秒}^2 \approx \frac{1}{6} g_E.$$

因此同样质量的物体,在月面上的重量仅及地球重量的1/6。这种重力变异曾使登月的宇航员一时很不适应,他们发现在月面上最有效的前进方式是象袋鼠那样向前跳跃。

因为表面重力较小,所以要脱离月球的“逃逸速度”也比地球

小得多,为2.4千米/秒。这使得“阿波罗”宇航员离开月球比较方便。人们也因此设想将来把它作为航天飞行的中继站。但是这也带来了另外的严重后果——使月球上无法保持大气,而成为奇特的荒漠世界。

§4.8 月球的运动及其引起的天文现象

一、月球的轨道运动

月球是地球的天然卫星,它以椭圆轨道在绕地球运转。然而月球的轨道运动却是天体力学中最复杂的问题之一,精确的运动方程长达几千项。这是因为有许多因素都会对月球的运动产生影响,使月球的轨道表现出很复杂的变化。

1. 白道平面 月球轨道平面在天球上截出的大圆称之为“白道”。白道平面既不重合于天赤道也不平行于黄道面,而且它的空间位置在不断变化,白道与黄道的交角以 i 表示,它的变化范围为 $4^{\circ}57' - 5^{\circ}19'$, 平均值为 $5^{\circ}09'$, 变化的周期为173日。

黄道与白道的两个交点也在不断变动。按天文学上的惯例,白道从黄道面之南到黄道面之北的那个交点称之为白道的升交点(图4.26 a),那么另外一点称为白道的降交点(图4.26 c)。在太阳引力的作用下,这两个交点都在不断西退, (与“岁差”相仿), 这种退行运动很迅速,每18.61年便转过 360° , 相当于平均每年西退 $19^{\circ}21'$ 。

由此可知,白道与赤道的交角 Δ 可在一个较大的范围内变化,其最大值是 $\Delta_{\max} = \varepsilon + i$ (图4.26 a), 最小值则是 $\Delta_{\min} = -(\varepsilon - i)$ (图4.26 c)。取 i 最大时:

$$\Delta_{\max} = 23^{\circ}27' + 5^{\circ}19' = 28^{\circ}46' ;$$

$$\Delta_{\min} = -(23^{\circ}27' - 5^{\circ}19') = -18^{\circ}08' ,$$

而一般情况 Δ 可从球面三角公式求得(图4.26 b, d):

地距离大致在363297—405505千米之间变化,变化的范围约11% (图4.24)。

此外,月球轨道的近地点和远地点的空间位置也在不断改变。或者说,其拱线——近地点与远地点的联线在沿着月球公转的方向即自西向东不断进动,进动的速度平均每年 $40^{\circ}41'$,相当于周期为8.85年(图4.27)。

二、月相和月龄

自古以来“月有阴晴圆缺”,这种位相变化或不同的月面视形状,或镰刀形、或半圆形、或圆形……,这些统称为月相。

造成各种月相的原因有两个:(1)月球与地球一样是本身不发光的天体,从地球上只能见到它被阳光照射到的部分,对于阳光照射不到的部分则是不易见的。(2)月球在绕地球作周期性的公转,地球本身又在绕太阳公转,这就造成了三者的相对位置在经常不断地变化(图4.28),人们看来即呈不同的月相。而且因为这种互相的绕转运动都是周期运动,所以月相变化也必然有严格的周期。

1. 朔 当月球处于图上a的位置时,对着地球的月球半面是黑暗面,这样地球上的人们便无法看到月球,这种月相称之为“朔”或“新月”,它出现于农历每月的初一。从天球上看来,朔是太阳与月亮黄经相等的时刻。即:

$$\lambda_{\text{月}} - \lambda_{\text{日}} = 0^{\circ}.$$

二者几乎差不多同时从地平线上出没、升降。

2. 上弦 在新月

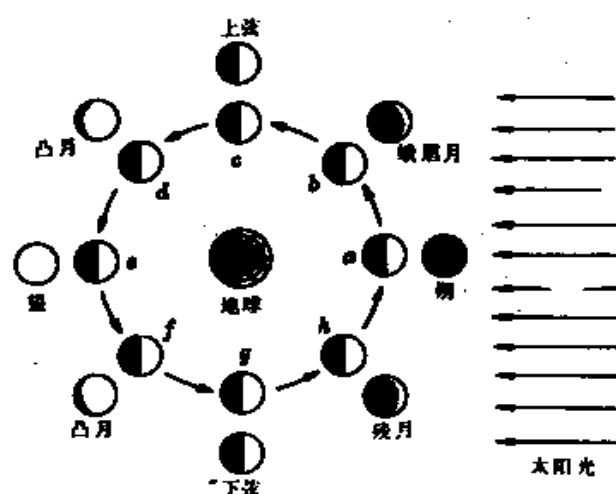


图4.28 月球的各种位相

之后,月球慢慢离开太阳向东运动,亦即 $\lambda_{\text{☾}} - \lambda_{\text{☉}}$ 值逐渐增大,月球升起的时间越来越迟,从月相上说便是“蛾眉月”(b)的月面日渐增大。当到达 c 的相对位置时, $\lambda_{\text{☾}} - \lambda_{\text{☉}} = 90^\circ$, (或者说太阳、月球、地球构成直角三角形)朝向地球的月面正好有一半被阳光照亮,恰似一张弓,这时的月相称为“弦”。出现于新月之后的称“上弦”,上弦时见到的是月球西半圆。因为这时月球在天球上位于太阳东边 90° 处,所以大约正午时升起(但在白天不可见),而太阳落入西方地平线,上弦月差不多正处于中天位置,因此上弦月是出现于上半夜,位置在西方夜空。

3. 望(满月) 上弦月经过“凸月”(d)到达 e 时,称之为“望”,或者满月,地球上即见皓月当空。由于 $\lambda_{\text{☾}} - \lambda_{\text{☉}} = 180^\circ$, 即当太阳西落时,它即东升;太阳下中天时(子夜)它上中天,因此明月整夜可见,望发生在农历每月的十五或十六。

4. 下弦 经过满月之后,可见月面慢慢变小,并又经过一次“凸月”(f)到达 g 的相对位置,这称为下弦。它的东半面被阳光照亮,从天球上看,月球处于太阳的西边 90° 处,这时候 $\lambda_{\text{☾}} - \lambda_{\text{☉}} = 270^\circ$, 或者说 $\lambda_{\text{☉}} - \lambda_{\text{☾}} = 90^\circ$ 。所以当太阳下中天时,它才从东方升起;而当它快到上中天时,天已拂晓了。所以下弦月是出现在下半夜的东方夜空,人们早晨能见到的月亮则是下弦月及以后的“残月”(h)。月球从 g 经过 h 又回到新月(a),又开始新的一次周期变化。

5. 月龄 月相是一种定性的描述,如要进行定量的研究则需要引入“月龄”的概念。月龄是这样定义的:以日为单位表示的该月相与新月的时间间隔,由于朔望的变化周期平均为29.53日,所以

表 4.2 月龄与相对亮度

月龄	3	5	7	上弦	9	11	13	望	17	19	21	下弦	24	26	28
$\lambda_{\text{☾}} - \lambda_{\text{☉}}$	37	61	85	90	110	134	159	180	207	232	256	270	293	317	341
相对亮度 %	0.7	2.6	6.8	8.3	16	30	58	100	49	26	13	7.8	3.6	1.1	0.2

朔、上弦、望、下弦的相应月龄分别为0、7.4、14.8及22.1,这大致与农历的日期相一致。月龄与月,日的黄经差及其相对亮度大致如表4.2。

三、五种“月”

太阴历中以月球运动为基础,但实际上“月”有各种不同的标准和长度。

1. 朔望月 月相变化周期的时间长度,即连续两次朔(或望)的时间间隔,它等于29.53059日。朔望月最易观测,因此太阴历都以朔望月为准,中国的农历亦很严格地以朔日作为每月的开始。

2. 恒星月 以某恒星为标准,月球在白道运行一周时间。实际上,它即相当于月球绕地球的公转周期。恒星月和朔望月是两个相互关联的量,它们与地球的公转周期三者之间有相当简单而又重要的关系。

如图4.29, 其中 σ 、 P 、 M 分别表示太阳、地球和月球。 A 和 B 是正好一个朔望月的连续两次朔的情况,而恒星月是相当于从 M_1 到 M'_2 的时间。

显然,朔望月的长度大于恒星月。

令 S 、 T 、 E 分别表示朔望月,恒星月与恒星年(365.25637日)的长度。因 $P_1M_1 \parallel P_2M'_2$, 故有

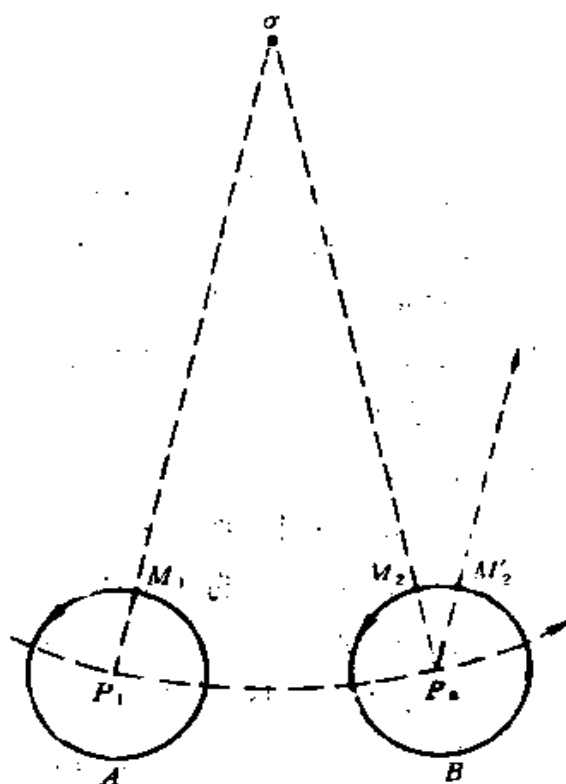


图 4.29 朔望月和恒星月

$$\frac{360^\circ}{T} \cdot S - \frac{360^\circ}{E} \cdot S = 360^\circ$$

即:
$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{E} \quad (4.27)$$

(4.27)式常称为“会合运动方程式”，会合运动是天文学上一个相当有用的概念，以后还会经常遇到。把已知的 S 、 E 的值代入，即可从(4.27)式算得恒星月：

$$T = 27.32166 \text{ 日}$$

3. 近点月 月球连续两次经过近地点的时间间隔。由于拱线在不断的东进，因而近点月的长度略长于恒星月。根据实际的测定，它的长度为27.55455日。近点月与月球的近地点相联系在一起，有人认为，月地距离的变化可能对潮汐、地震活动等会产生一定的影响。

4. 交点月 以月球轨道升交点作为标准，月球连续两次经过升交点的时间间隔称之为交点月。不难理解，由于它的升交点具有类似“岁差”那样的西退运动，交点月的时间是最短的，根据测定为27.21222日。月球在交点时，便与太阳的黄纬相等，因此交点月与是否发生日月食有关。

5. 分点月 以春分点为准，月球连续两次 $\lambda_\zeta = 0^\circ$ 的时间间隔称为分点月。也有人称它为“回归月”，回归月的长度比交点月长，但略短于恒星月，为27.32158日。

四、月球的自转

月球在绕地球公转的同时还在不停的自转，以前有人以为月球始终以同一半球面朝向地球，所以它没有自转。虽然，这是一种误解，自转与否的标准不是地球，而是恒星。

月球自转的情况可见图4.30, E 表示地球, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 是月球在轨道上四个不同位置。从地球上看到的总是 abc 月面。如

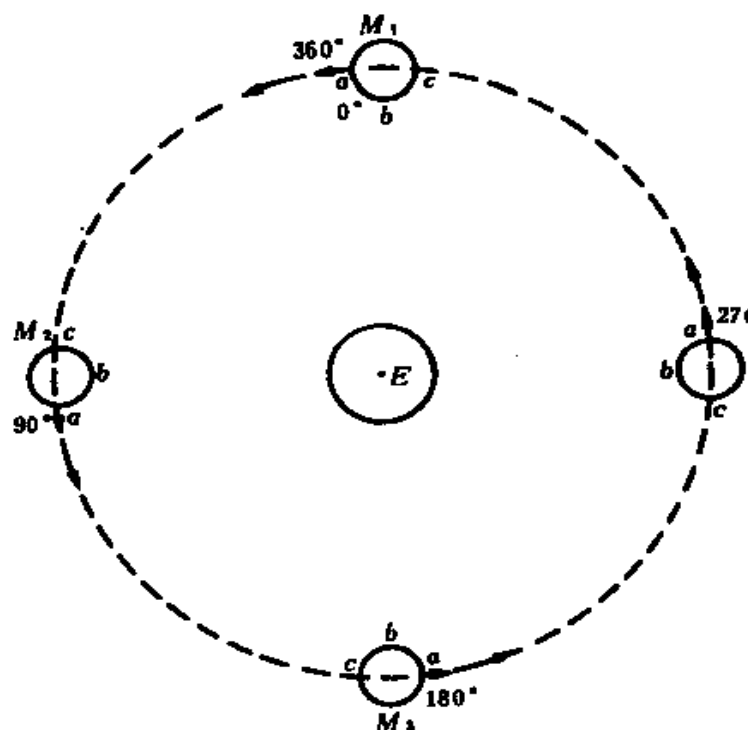


图 4.30 月球的自转周期与公转周期相等，
使它始终以 abc 半圆面朝向地球

在 M_1 时, a 朝着某一恒星的方向。到 M_2 时, a 已逆时针方向转过了 90° 。同样到 M_3 时则已转过了 180° ……。

由此可见, 月球的确在空间自转着, 自转的方向和周期都与它公转一样, 周期正好是一个恒星月即 27.32166 日。

自转周期(或角速度)与公转周期(或角速度)相等, 这不仅存在于地月系统, 而且几乎是卫星世界的普遍规律, 天文学上称这种自转为“同步自转”。一般认为同步自转是因为行星对卫星长期潮汐作用的必然结果。

月球的自转轴并不垂直于其轨道平面, 或者说月球的赤道面与白道面、黄道面都不重合, 实际的观测表明, 月球赤道面与黄道面的交角为 $1^\circ 32'$ 左右。而且用

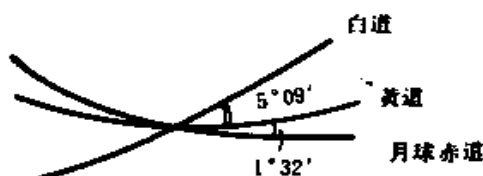


图 4.31 月球赤道、白道、黄道三平面
始终相交于一直线

天体力学的方法可以证明：月球赤道面与白道面的交点始终在黄道面上，（图4.31），因此，月球的赤道面与其轨道面的交角平均为 $6^{\circ}41'$ ，这比地球的黄赤交角 ϵ 小得多。

五、天平动

长期仔细观测不难发现，“月球始终以同一半面朝着地球”的说法并不严格。对照不同月龄的月球照片便可以发现，月面的边缘不尽一致，总有一些微小的、但是明显的变化。人们实际观测到的月面面积并不是50%，而是59%左右。地球上真正看不到的月球背面部分只占整个面积的41%，天文学上称这种现象为“天平动”。根据造成原因的不同，天平动有以下几类：

1. 经(度)天平动 既然月球绕地球的轨道是椭圆，那末它的公转角速度就不是均匀的，在处于近地点 M_1 附近时（图4.32），它的公转角速度最快，而在远地点 M_3 附近时，公转角速度最慢。然而月球的自转角速度却基本上是均匀的，所以从 M_1 到 M_2 的 $1/4$

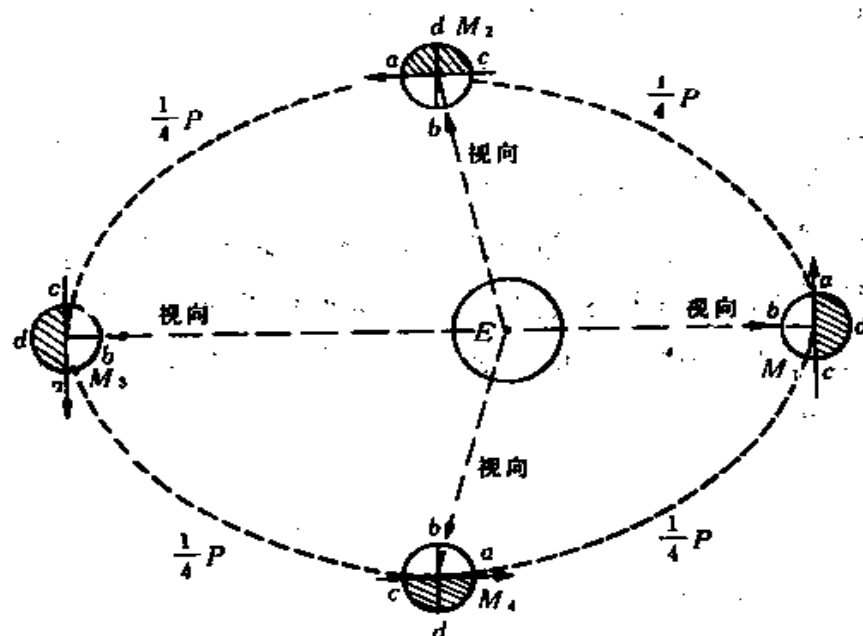


图 4.32 月球的经天平动，阴影部分是不可见面

圈时，自转所转过的角度还不满 90° ，这样从地球上看来，本来月面的中心 b 都偏向于东侧。（以地球上东、西作标准，下同。）原来在 c 边缘（西边缘）后面的部分月球背面也变成可以观测的了。

月球从 $M_2 \rightarrow M_3$ 或者 $M_3 \rightarrow M_4$ 时，运动时间显然又大于 $1/4$ 周期，自转转过的角度超过了 90° ，因而在 M_3 时，月面上的 b 又回到了中心；到 M_4 时， b 又偏向于西侧，使人们可以窥见原来在东边缘 a 后面的部分月球背面地区。

月球可见面的这种变化表现为经度方向的摆动，所以称之为经(度)天平动。经天平动也是几种天平动中最显著的，平均可以达 $7^\circ 54'$ ，显然它的摆动周期是近点月。

2. 纬(度)天平动 如前所述，月球的赤道面与白道面并不重合，而是有一交角，交角的平均值为 $6^\circ 41'$ 。但自转轴在空间的指向是不变的，所以月球在轨道上不同的位置，地球上看到的月面的南北方向也会有些摆动。如在 M_1 时，人们可以看到月球南极后面的月面；而当月球转到 M_2 位置时，人们便又可以观测到月球北极后的地区（图4.33）了。这样也不难理解，在 M_1 与 M_2 中间的两个位置，人们看到的才是“标准”的月球正面。

月球可见面的这种变化主要在纬度方向，所以称之为纬(度)天平动。纬天平动的值即是月球赤道与白道的交角，在 $6^\circ 29' - 6^\circ 51'$ 的范围内，平均为 $6^\circ 41'$ 。显然，它的摆动周期应为交点月。

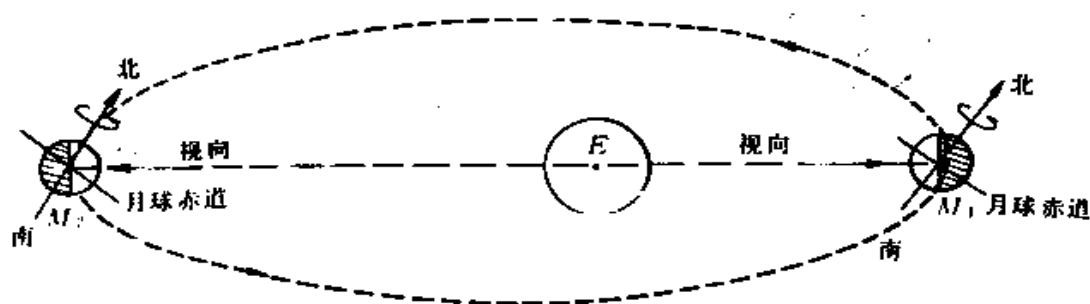


图 4.33 月球的纬天平动，阴影部分是不可见月面

3. 周日天平动 因为月球的距离较近,所以由于视差又产生了两种天平动。视差是由于地球不同观测地点造成的,这两种周日天平动实质上相当于由于观测所处的地理纬度和经度不同而引起的变化。月球由于周日的东升西落(也可看作同一时刻地球上经度相差 180° 的两个地方),如在 M_1 (月球东升),地面上看到的月面,能见到 c 后面——西边缘以外的月面;而在月落时,地面上则能看到其东边缘 a 后的一部分(图4.34a)。

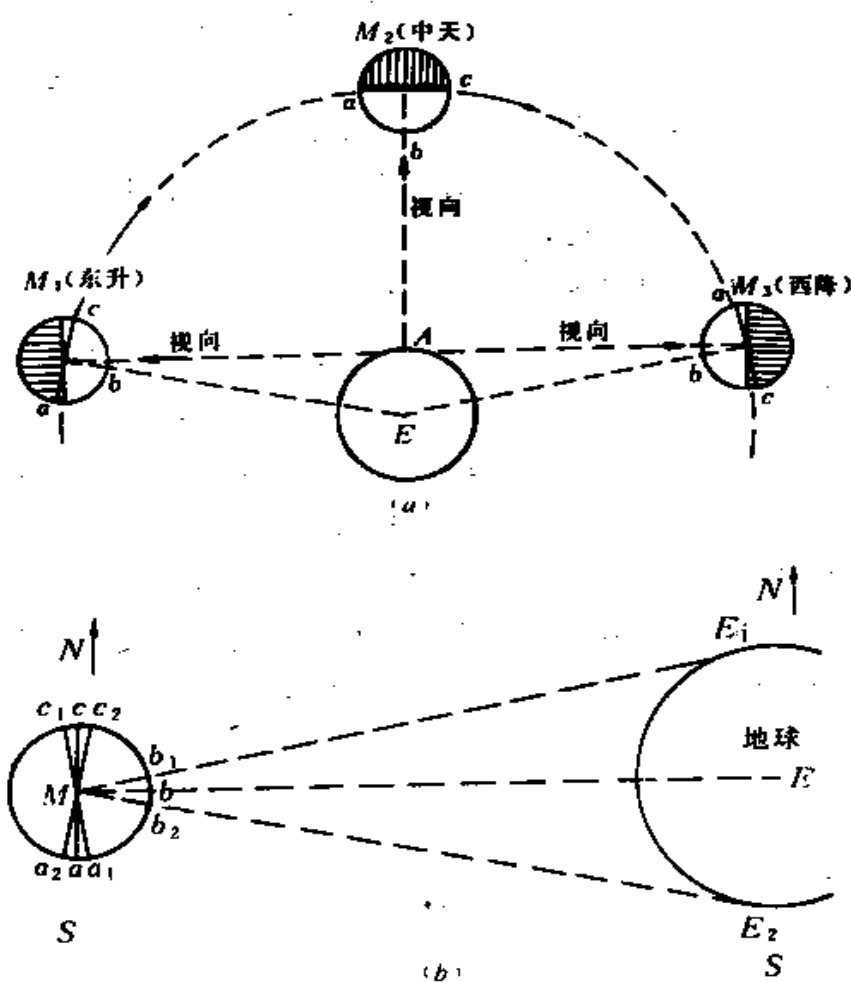


图 4.34 月球的周日天平动
(a) 不同经度引起的; (b) 不同纬度造成的

第二种周日天平动是因地理纬度的不同而造成的(图4.34b),在 E_1 处看到的月面是 $a_1b_1c_1$,可以看到月球北极后面的边缘;在 E_2 处则看到了 $a_2b_2c_2$ 的月面,即可见到其南极以外的区域。

这两种天平动的范围并不太大,合起来大约只有 1° 左右。起因于视差,也称为视差天平动。

4. 物理天平动 上述三种天平动并非是月球本身在空间晃动,仅是视现象,故称之为视天平动或者光学天平动。除了视天平动外,月球并非是一个理想的球体,它的物质分布也不完全均匀,其几何中心与质心并不重合。加上赤道面与白道面有一个小交角,因此在地球引力的作用下,它在空间也的确有很微小的摆动。早在十七世纪,牛顿已从理论上提出了这种天平动的可能。

然而,物理天平动造成的摆动甚微,至多只有 $2'$ 左右,而在地球上能觉察到的还不到其中1%——即大约只有 $1''$,所以只是到了近代依仗了精密仪器,才真正观测到了这种极其细小的真正的物理天平动。

在空间探测之前,天平动是人们研究月球背面的唯一途径。如今,空间探测的巨大成就不仅已得到了完整的月球背面照片,而且人类早已实现了登月的理想,因此,天平动的重要性已远非昔比了。

§ 4.9 月球的物理状况

一、月面地形

从伽利略画出了第一张观测的月面图以来(图1.1a),经过几百年来的不断观测研究,人们绘制的月面图已不计其数,先后公开发表、有一定科学价值的便有150幅以上,其中最大的一幅月面图直径达7.5米。迄今为止,人类已六次12人登上了月球(图4.35,表4.3),另外还有9名宇航员作了绕月飞行,他们拍摄了15000多

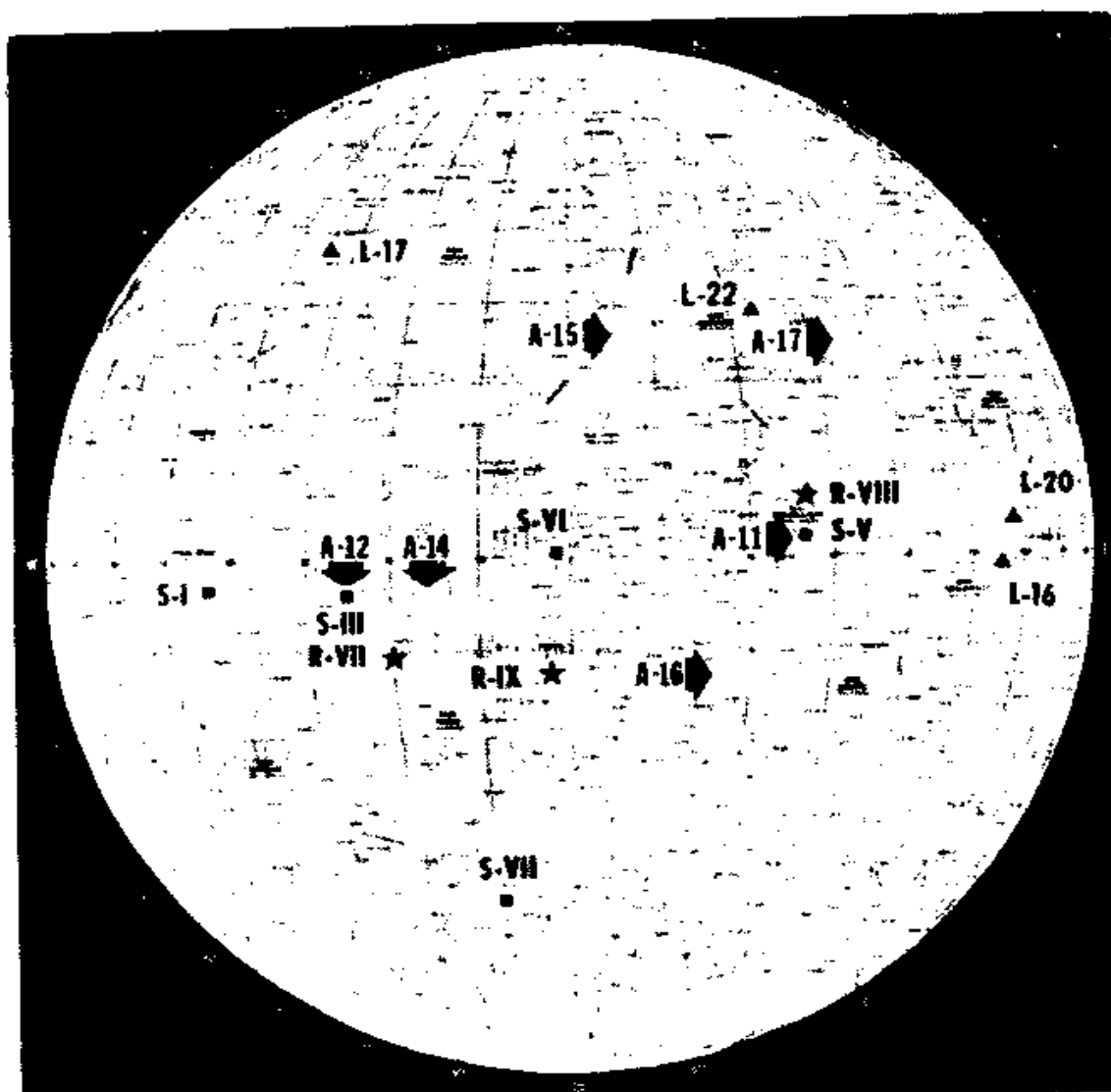


图 4.35 苏美航天飞船登月处位置

R——美国“徘徊者”(硬着陆)

S——美国“勘测者”

L——苏联“月球轨道飞行器”

A——美国“阿波罗号”

张清晰的月球近距照片、长达几公里的电影胶卷，“阿波罗”登月的宇航员带回的月岩有380公斤。此外，苏联“月球16”(1970年9月)、“月球20”(1972年2月)、“月球24”(1976年8月)无人飞船也取得了许多月球土壤的样品，因而现在甚至有人这样认为：今天

表 4.3 “阿波罗”登月情况¹⁾

“阿波罗” 编 号	登 月 时 间	登 月 地 点			带回月岩 (公斤)	主 要 研 究 月 球 项 目
		地 点	经 度	纬 度		
11	1969. 7. 21	静 海	23°26' (东)	0°41' (北)	22	月球地质、激光测距、 月震试验、近距照相
12	1969. 11. 18	风 暴 洋	23°24' (西)	2°27' (南)	34.6	月球地质、月球磁场、 近距照相
14	1971. 2. 5	弗拉摩洛环形山北	17°28' (西)	3°40' (南)	42.6	月球地质、激光测距、 月球磁场、月壤力学
15	1971. 7. 31	哈德利月谷东	3°39' (东)	26°26' (北)	77	月球地质、激光测距、 月震试验、月球磁场、月球环境
16	1972. 4. 20	笛卡尔环形山	15°30' (东)	9° (南)	95	月球地质、激光测距、 月震试验、月球磁场、月壤力学
17	1972. 12. 12	利特罗夫环形山	34°45' (东)	20°10' (北)	109	月球地质、表面电性能、月震试验、 月球大气、重力、月球喷出物

1) 阿波罗13号中途发生故障，经历无数艰险后，三名宇航员最后放弃登月计划而返回了地球。

天文学家对于月球表面的了解，甚至已超过了地质学家对海洋底层状况的知识。

月面地形主要有以下几种构造：

1. 环形山(月坑) “环形山”是当年伽利略为月面上密密麻麻的圆环状突起物的名称，一直沿用到了今天。环形山是月面上最显著的特征，它们犬牙交错，星罗棋布，几乎布满了整个月球表面。尤其在其中南地带，环形山更加显得鳞次栉比，密度甚大(图4.36)。

环形山大小不一，直径相差悬殊。最大的是月球南极附近的贝利环形山，直径为295千米，可容纳整个海南岛。而多数环形山不过几千米，有的甚至只是几十厘米的坑洞而已。以直径不小于1千米为限，环形山的数目约为33000左右，占月球表面积的7—

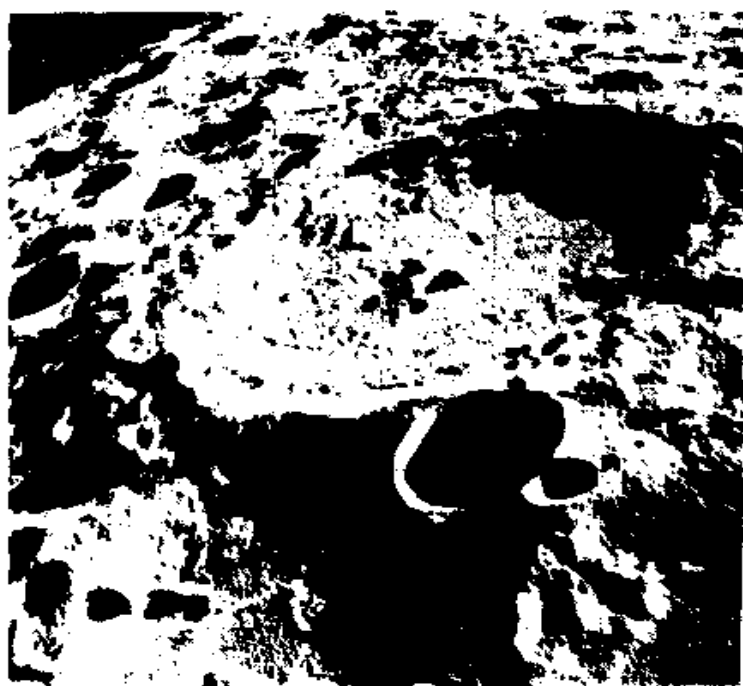


图 4.36 月面环形山，图中的大环形山在月球背面，直径80千米

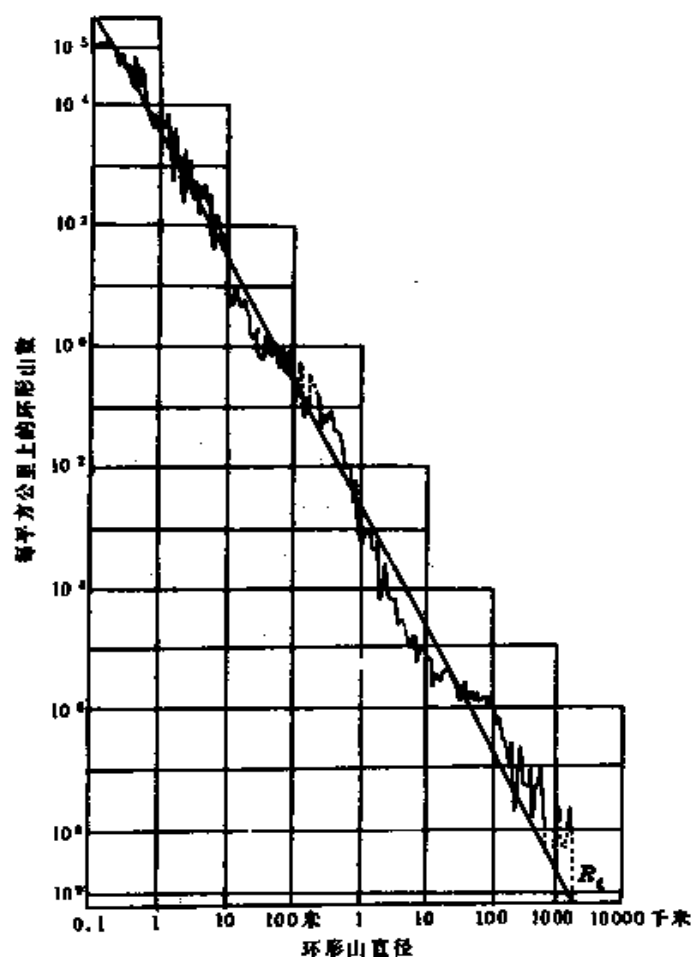


图 4.37 环形山数与直径的关系

10%。根据统计，环形山的数目与环形山直径之间有着明显的关系(图4.37)。

环形山多以科学家名字命名，如哥白尼环形山、牛顿环形山、张衡环形山等等。

环形山酷似地球上的火山口或陨星坑。它们的共同特点是内壁陡峭、坡度很大，通常在 25° — 50° 之间，平均为 35° 左右。而其外侧则相当平缓，一般不超过 8° ，多数在 5° 以下。在环形山底部，有时中间还常有一个“中央峰”。

多数人认为环形山主要是因长期的陨星轰击造成的，所以环

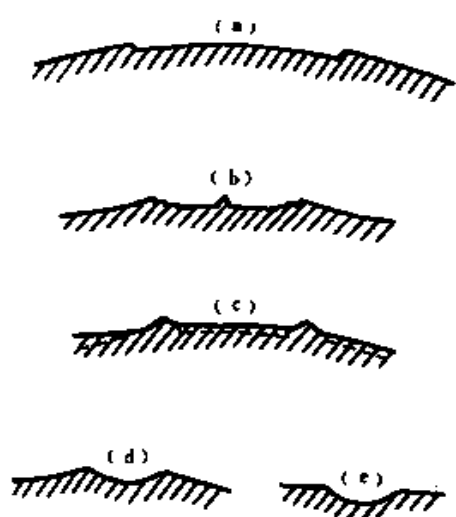


图 4.38 五类环形山

(a) 克拉维型; (b) 哥白尼型; (c) 阿基米德型; (d) 碗型; (e) 酒窝型

形山的形成年代彼此也有很大的差别。而细细考察, 环形山的构造细节也是丰富多彩的, 所以有不同的分类法。比较简单实用的是一个日本学者于1969年提出的标准, 他把环形山分为五类(图4.38)。

(1) 克拉维型: 这是一类较为古老的环形山, 由于年代久远, 其周壁大多遭到了严重的破坏, 有的已变得面目全非, 几乎失去了原来的面貌。

(2) 哥白尼型: 较年轻的环形山, 它们常带有清晰的“辐射纹”, 它们的内壁坡常有同心圆阶梯状段丘, 中央则有明显的“中央峰”之类隆起物。

(3) 阿基米德型: 由于山底的平面与外围的月海平面高度相仿, 故环壁较低, 很可能是由(2)演化而来的。

(4) 碗型及(5)酒窝型: 都是较小的环形山, 有的因太小, 直径只在米的数量级。

2. 月海 肉眼所见月面上的暗黑地区实际上是月面上的广阔平原。由于历史上的原因, 所以这个名不符实的名称保留到了今天。

已确定的月海共有22个, 此外还有些地形也有称之为“月海”或“类月海”的, 公认的22个海绝大部分在月球正面(图4.39), 背面只有3个, 还有4个海则在边缘地区(表4.4)。在正面的月海的面积略大于50%, 其中最大的“风暴洋”面积约有五百万平方千米, 差不多有九个法国面积的总和。

大多数月海大致呈圆形、椭圆形, 而且四周多为一些山脉封

表 4.4 月海及其平均直径

正 面				背 面		跨正、背面	
海 名	直 径 (千米)	海 名	直 径 (千米)	海 名	直 径 (千米)	海 名	直 径 (千米)
风暴洋	1740	冷 海	410	莫斯科海	250	南 海	410
雨 海	1150	湿 海	360	东 海	230	史密斯海	300
静 海	990	知 海	350	智 海	200	界 海	225
澄 海	620	汽 海	270			洪德堡海	200
丰富海	550	浪 海	230				
云 海	430	泡 海	160				
危 海	420	蛇 海	125				
酒 海	410						

闭住，但也有一些海则是彼此相联成一大片的。除了海以外，还有五个与“海”地形类似，但面积略小的“湖”——梦湖、死湖、夏湖、秋湖、春湖。但也有的湖比海还大，如梦湖的面积达7万平方千米，比汽海等还大得多。

月海伸向陆地的部分称之为“湾”和“沼”，它们都分布在正面。湾共有五个：露湾、暑湾、中央湾、虹湾和眉月湾；沼有腐沼、疫沼及

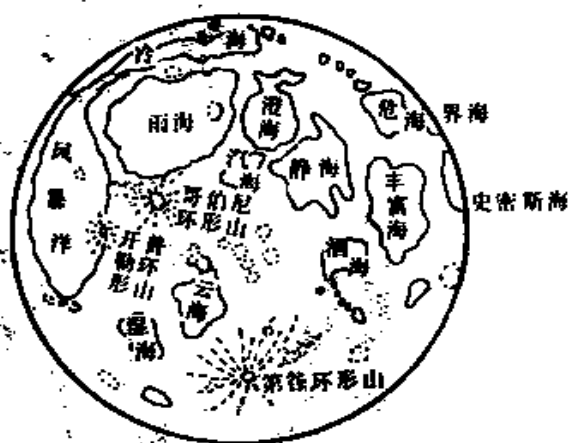


图 4.39 正面的月海

梦沼三个。其实，湾与沼并没有实质性的区别。

月海的地势一般较低，类似于地球上的盆地，月海比月球平均水准面低1—2千米，个别最低的海如雨海的东南部甚至比周围低6000米。月海的反照率(一种量度反射阳光本领的物理量，见§5.5)也比较低，因而看来显得比较黝黑。

3. 月陆与山脉 月面上高出月海的地区称之为月陆，它一般比月海水准高出2—3千米，由于它的反照率较高，因此月陆看来比较明亮。在月球正面，月陆的面积与月海大致相仿，但在月球背面，月陆的面积显然比月海大得多(图4.40)。

从同位素测定知道月陆比月海古老得多，它是月球上最古老的地形特征。

在月球上，除了犬牙交错的众多环形山外，也存在着一些与

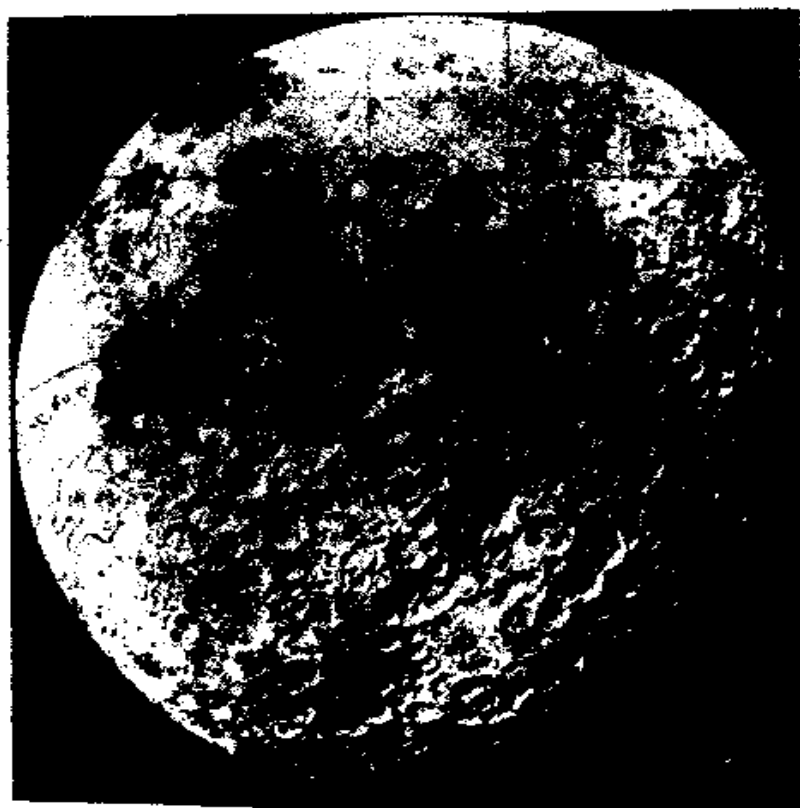


图 4.40 月球的背面海较少

地球上相似的山脉。月球上的山脉常借用地球上的山脉之名，如阿尔卑斯山脉、高加索山脉等等，其中最长的山脉为亚平宁山脉，绵延1000千米，但其高度不过比海面高三、四千米。

山脉上也有一些峻岭和山峰，过去人们曾过高地估计了月球上山峰的高度。现在知道，月球上大多数山脉的高度和地球相仿，最高的山峰(亦在月南极附近)也不过是9000米和8000米，与地球之巅峰穆朗玛峰所差无几。月面上6000米以上的山峰有6个，5000—6000米的有20个，4000—5000米的则有80个，高达1000米的有200个。

月球上的山脉有一普遍的特征：两边的坡度很不对称，向海的一边坡度甚大，有时甚至呈现为断崖状，而另一侧面则相当平缓。

除了山脉和山群外，月面上还有四座长达数百千米的峭壁悬崖。其中三座突出在月海之中，这种峭壁也有“月堑”之称。

4. 月面辐射纹 月面上还有一个主要特征是一些较“年青”的环形山常带有美丽的“辐射纹”，这是一种以环形山为辐射点向四面八方延伸的亮带。它几乎以笔直的方向穿过山系、月海和环形山。

辐射纹的长度和宽度彼此不一，最引人注目的是第谷环形山，它具有几条明晰的亮纹，最长的一条长度约1800千米，尤其在满月的时候蔚为壮观。其次，哥白尼和开普勒两个环形山也有相当美丽的辐射纹(图4.41)，根据统计，具有辐射纹的环形山有50个。其中表4.5列出了辐射纹最长的前十名。

形成辐射纹的原因至今未有最后定论。实质上，这是与环形山的形成理论密切相联系的，现在多数人倾向于陨星撞击说，在没有大气的月球上，陨星撞击可能使那些高温的碎块四溅很远。但也有些科学家认为不能排除火山作用，认为那些辐射纹是火山灰物质，月球火山爆发的喷射，因为没有大气层风的活动，也会



图 4.41 哥白尼山的辐射纹

成为向四处飞散的辐射形状。

5. 月谷(月隙) 地球上有许多著名的裂谷, 如东非大裂谷。月面上也有这种地形构造——那些看来弯弯曲曲的黑色大裂缝即是月谷, 它们有的绵延几百到上千千米, 宽度从几千米到几十千米不等。

那些较宽的大月谷大多出现在月陆上较平坦的地区, 而那些较窄、较小的月谷(有时称之为月溪)则似乎到处都有。最著名的月谷是在柏拉图环形山东南联结雨海和冷海的阿尔卑斯大月谷

表 4.5 有辐射纹的十个环形山

环形山名	位 置		山直径 (千米)	辐射纹 (千米)	环形山名	位 置		山直径 (千米)	辐射纹 (千米)
	经 度	纬 度				经 度	纬 度		
第 谷	11 20' (西)	43 20' (南)	86	3000	奥 伯 斯	76 15' (西)	7 12' (北)	67	800
朗格林诺斯	61 15' (东)	8 36' (南)	132	1520	开 普 勒	37 46' (西)	8 (北)	32	640
哥 白 尼	19 40' (西)	9 30' (北)	91	1200	阿里斯基尔	1 15' (东)	35 (北)	56	640
捷奥菲勒斯	24 26' (东)	13 (南)	102	1080	史蒂芬斯	54 20' (东)	32 16' (南)	25	640
亚诺萨戈腊斯	10 (西)	73 45' (北)	51	960	斯托雷波	55 (东)	62 (北)	55	640

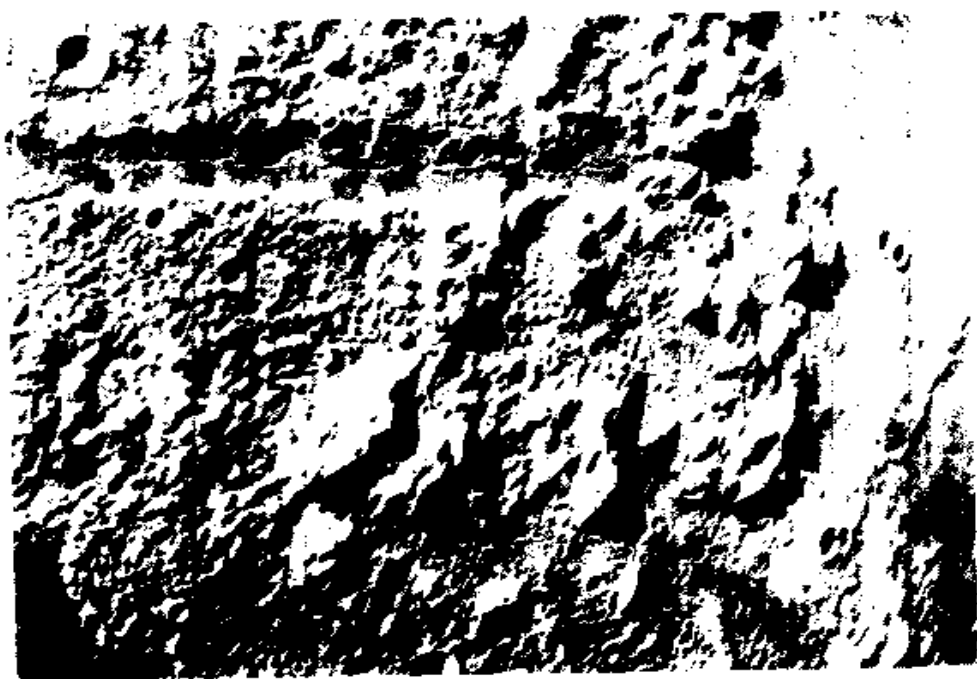


图 4.42 阿尔卑斯大月谷

(图4.42), 它把月面上的阿尔卑斯山拦腰截断, 很是壮观。从太空拍得的照片估计, 它长达130千米, 宽10—12千米。

表 4.6 月谷概况

月 谷 名	估 测 (千 米)		月 面 大 致 位 置
	长	宽	
里 塔	500	20—30	南海东北面, 詹森环形山东的月陆上
巴 德	210	20—30	东海盆地南边的月陆上
莫希拉米	200	40—55	东海盆地南边的月陆上, 在巴德环形山附近
施罗特里	150	5—10	风暴洋北部区域, 阿利斯塔克环形山附近
阿尔卑斯	130	10—20	柏拉图环形山东南, 联结冷海和南海

二、月面的物理状况

1. 大气 各种迹象表明,月球上没有永久性的**大气**。只有极微量的氮和氩原子,其数密度在 3×10^7 — 6×10^{10} 个/米³,至少比地球表面的大气稀 10^{12} 倍,或者相当于地球上空2000—3000多千米处的大气密度。“阿波罗号”登月进一步证明,月球上只有一些偶尔的火山气体而没有永久性的**大气**存在,其原因是因为月球的质量太小,它产生的引力不足以维持**大气**。因此,即使月球以前曾有过**大气**,或者在它的岩石或月球内部可以经常释放出一些气体,但因为月面上的逃逸速度比气体分子运动的速度还小,所以它们很快便逃逸到宇宙空间中。

因为没有**太气**,月面上也就不存在液态水,没有**大气**,月球上也不会有地球上风云雾雨等一切气象现象;没有**大气**,月球的天空永远是一片黝黑,即令在阳光灿烂的白天,也有万千星星争辉。没有**大气**,声音失去了传播的媒介,所以月球是万籁俱寂的无声世界;没有**大气**,月面上的黑白反差特别强烈,正如登月的宇航员所说:“月面上不是黑便是白,没有一点其它颜色。”

失去了**大气的**保护,小小的陨石,太阳的X辐射、高能宇宙射线都能长驱直入射到月面,因此月面上斑痕累累,也不会有什么生命能自然生存下去。

2. 磁场 月球周围没有明显的**磁场**。登月后的实地测量表明,月球整体的**磁场**强度极小,不超过地磁场的 10^{-3} ,月球周围也没有磁层和辐射带。这也表明,它的内部结构与地球有明显的差别,可能并没有金属核心。

月球上没有明显的整体**磁场**并不意味着月球任何地方都没有磁性。“阿波罗号”宇航员带回的月岩就有许多带有磁性,强度有从几十伽到几百伽(1伽= 10^{-9} 特)不等。

1973年,在伦敦举行的第四届月球科学讨论会专门研究了月

球的磁性质,认为在月球表面以下300—400千米的区域内含有3—4%的铁类元素,因而局部地区存在不同磁化方向和强度的磁场是完全可能的。如“阿波罗”15号和16号着陆处,其岩石的磁场强度分别为4和313伽,几乎相差100倍。

测量还表明,月球背面的磁场比月球正面略强一些,主要原因是月球正面与背面的岩石性质不一所造成的。

3. 温度 月球上没有空气,没有液态水,加之它上面的昼夜很长(即一个朔望月),白天和黑夜都长达两周多,因此昼夜间的温差十分惊人。通常,白天在阳光的直射下,月面温度常超过水的沸点,最高时可达130—140℃,而在漫长的黑夜,它的温度则低至-150℃,甚至也有测到-180℃以下的(图4.43)。

然而严格说来,由于月面上没有大气,即使同在白天,阳光下和山峦阴影中的温度也有极大的差别。

在月食时,月面温度在一小时内可以下降100℃以上,这表明月球表面物质的热容量很小,热导率很低,因此人们早就推测月球表面上覆盖着一层疏松而细微的尘粒。“阿波罗号”登月考察表

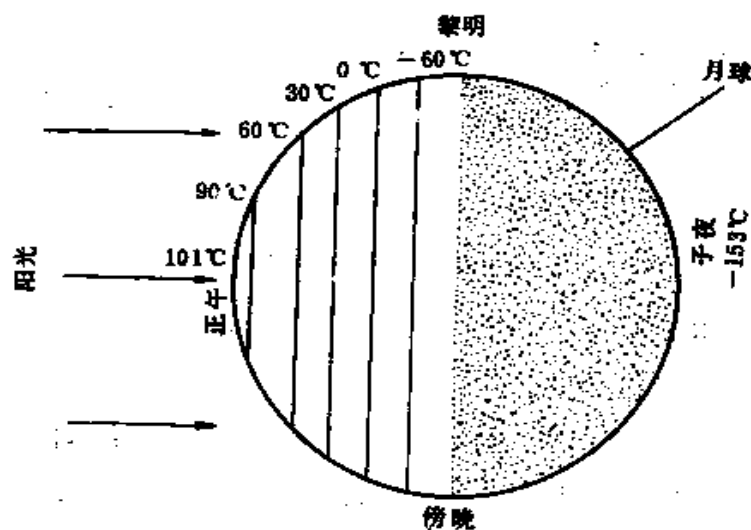


图 4.43 月面上各处的温度

明情况确实如此。宇航员刚踏上月面就留下了许多带有历史意义的人类脚印(图4.44),而且他们发现,在这些细细的尘土中,还杂有大量细微的玻璃质小球粒。



图 4.44 人类在月面上的第一个足迹

4. 内部结构 同研究地球内部结构一样,月球内部的探索也得依靠对“月震”的研究。“阿波罗号”宇航员在月球上放置了灵敏度很高的、专门的月震记录仪。从它们记录的资料看来,“月震”无论是规模还是频数都远比地震小得多,它的最大震级只相当于里氏1—2级,每年月震释放的总能量只相当于地震的 10^{-6} 。因此,“阿波罗号”宇航员制造了数次较强烈的“人造月震”,以弥补资料的不足。

目前认为,月球大致可分为三个层次:月壳、月幔、月核(图4.45)。也有人根据其岩石地质上的不同分为如表4.7所列的六层。但是大致的结构是相同的。月壳厚65千米左右,中心部分的核芯很小,半径在700千米左右,中间则是月幔。

月球的半径是地球的27%,然而月壳的厚度却超过了地壳。由此可见,月壳把月球紧紧的箍住了,科学家们曾把它比喻为“盛着

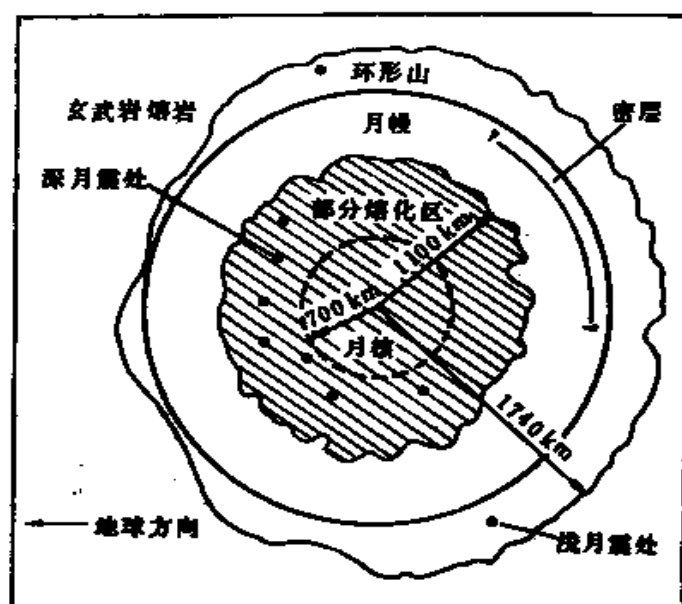


图 4.45 月球的内部结构

表 4.7 月球内部各层的厚度(千米)

表 层	月 壳		月 幔		月 核
	上	下	上	下	
0—2	2—25	25—65	65—250	250—1000	1000

小包熔岩的硅酸盐密封坍塌”，这也正是月震不能与地震相比的原因所在。

从绕月飞行中，人们发现了月球上还有一些“重力异常区”，一般称之为“质量瘤”或“重力瘤”。现在正面已发现有12处，大部分位于月海区域内。至于“质量瘤”形成的原因，有认为是小天体坠入月球表层造成的，也有认为是月球演化本身的一种产物。

5. 月球背面 在1959年以前，人们只是通过天平动才窥测到月背边缘上的一小部分地区，对于月背的整体状况几乎全然无知。1959年10月7日苏联发射的“月球”3号自动行星际站运动到月背

上空7000千米处(当时是新月前后,月背正处于“白天”),使人类得到了第一批有关月球背面的科学资料(图1.5*b*)。

现在知道,月球正、背面的结构有比较明显的差别:月背上的海很少,却有更多的环形山,因此它的高低起伏也远比正面大。月背上有五座环形山的名字与中国人有关,其中四座是中国古代天文学家,一座是纪念明代一个官员万户,他为人类进入太空探险、遨游太空献了身(表4.8)。

月球不是一个正球,而最短半径和最长半径都在月背,它们之间彼此相差9千米。

月球背面月壳的平均厚度也比正面大,正面月壳的厚度平均在60—65千米左右,而背面则在85千米以上,最厚的地方甚至达150千米。

另外,月球背面至今没有发现过“质量瘤”。总的说来,月背半球的质量比正半球小,所以月球质心离地球比几何中心离地球近约2千米。

表 4.8 五个与中国人有关的环形山

环 形 山	位 置		直径(千米)
	经 度	纬 度	
石 申	102 (东)	75 (北)	55
张 衡	112 (东)	19 (北)	35
祖 冲 之	144 (东)	16 (北)	30
郭 守 敬	145 (西)	9 (北)	26
万 户	139 (西)	11 (南)	?

§ 4.10 日食和月食

在太阳系中,通常所说的交食是指日食和月食,但实际上,所谓“食”或者“交食”即是指一个天体被另一个天体或其黑影全部或部分掩盖的天文现象。所以广义的说,凌日、掩星、卫星食、双星互掩交食等都属于“交食”,但本节仅研究日食和月食。

一、交食现象

日、月食是一种十分蔚丽壮观的天象,尤其是日全食(图4.46)

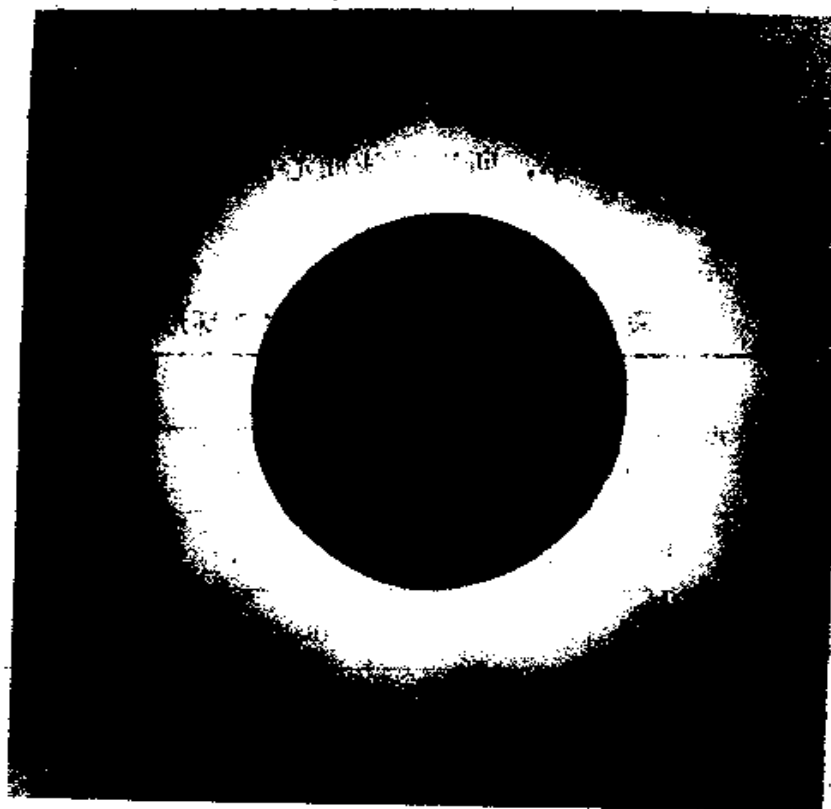


图4.46 全食时刻



(b) 带食而落

图 4.16 1980年2月16日云南日全食(中国科学院日食观测队摄)

更是奇特、令人难忘。古代由于人们不知道日月食的原因，生怕因而失去生死攸关的太阳和神圣的明月，因此每次交食都使他们惶惶不安、惊恐万分。甚至在1969年时，柬埔寨朗诺军队的士兵，在一次日全食之际竟吓得停止了战斗，面对失去了光芒、慢慢变小的太阳纷纷举起了自动步枪，对其频频射击不止。

日全食都发生在农历的朔日。在那阳光灿烂的白天，光焰无际的红日突然被一团黑影逐渐蚕食、吞噬，当黑影把日轮完全挡住的时候，天空的亮度骤然下降一百万倍。刹那间，夜幕降临，天空中露出了闪烁的繁星，昏暗的大地上凉风习习，气温陡降，鸡

犬惊叫着逃回自己的巢穴，空中的飞鸟也会失去自控而坠落到地上……。

月全食则都在望日之夜出现，它的情景也很动人，高悬天庭的一轮皓月慢慢地会变得残缺不全，巨大的黑影无情地慢慢侵蚀着媚人的光泽，最后终于使它消失在黑暗的天穹中，但随着人们肉眼慢慢适应了暗黑的环境时，又会依稀地发现，那个已经沉沦在黑暗中的月轮还在发射着带有神秘古怪的铜红色微光，产生这种微光的原因是地球大气对太阳光折射，使部分红光到达了月面造成的。

在古代，也有不少有识之士不乏真知灼见。他们早就窥破了日月食的原因。早在几千年前，巴比伦、中国、埃及等一些文明古国就有人对这种天象作了系统的记录和研究。亚里士多德曾利用月全食的机会来证明地球大地不是平直而是呈球的形状，而喜帕恰斯则以此测定了月地距离的相对值。在公元前四世纪时，中国的天文学家石申便提出了日月食是由于天体间互相遮掩而产生的想法。东汉时的王充也驳斥了日月食与人间政治因素有关的主张，他认为“日食者，月掩之也”，“食有常数，不在政治”（《论衡》）。张衡则直接指出了月食的原因，正如他在《灵宪》中所说：“月光生于日之所照……，当日之冲，光常不合者，蔽于地也，是谓阏虚，……过月则食。”即是说，月食是因为地球的影子挡住了不发光的月球而造成的。

近代天体物理学诞生并发展起来后，人们开始通过日全食的难得机会来研究太阳，尤其是太阳大气（色球层和日冕）。过去有关太阳大气的许多信息都是从历次日全食观测中得到的。甚至在人类科学发展史上，日全食也作出过贡献，在1868年8月18日发生的一次日全食中，人们发现了当时地球上还不知道的“氦”元素，这也是人们知道的第一个惰性元素。而1869年的日全食资料又导致了人们对“禁戒谱线”（§ 7.5）的研究……，更加令人激动是1919

年5月29日的日全食观测，爱丁顿成功地为爱因斯坦的广义相对论提供了又一个无可辩驳的验证¹。此外，日全食还为改进天体力学理论、深入研究太阳射电分布、日地空间情况、地球物理等提供了珍贵的资料。有时日全食还为天文学家提出了新的研究课题，如在1954年6月30日的一次日全食中，人们意外地发现了一种“引力偏转”现象——当日全食时，单摆的摆动平面会发生突然的偏转。

中国古代有着极其丰富的日月食资料记录。日食的史料即使不计甲骨片上的记载，从古代到清朝，至少也有一千多次可靠的记录。世界公认的最早日食记录是中国《尚书·胤征》中所载的“乃季秋月朔，辰弗集于房……。”那是四千年以前的日食记录；中国的月食记录也很早，《逸周书》中所载的月食发生于公元前1137年1月29日。

但进入近代以后，中国的日全食观测只是在新中国成立之后才获得了真正的发展。在旧中国，天文界仅留下了一次观测资料（1941年9月21日），而限于当时的条件，这次观测的项目甚少，所得有限。新中国成立后，观测队伍不断壮大，并成功地进行了多次科学观测，获得了丰富的资料，尤其是1968年9月22日的新疆日全食、1980年2月16日的昆明日全食都进行了多学科、多项目的联合观测，取得了丰硕的成果。在1980年的观测中还第一次获得了珍贵的“闪光光谱”（见§7.4）²。

月全食的场面远不及日全食那样震撼人心，在科学价值上虽然有些相形见绌，但除了以此来改正月亮的星历表和测定地理经度外，还可以通过月食时月面亮度的变化来研究地球大气不同高

-
1. 根据广义相对论计算，光线经过太阳表面附近将向太阳中心弯过 $1.75''$ ，爱丁顿当时的观测值为 $1.98'' \pm 0.12''$ 与理论基本相吻合。
 2. 1983年中国科学院组织了一支观测队伍，到位于南半球的巴布亚新几内亚，观测了于6月11日发生的日全食，获得的科学资料更加丰富和完整。

度处的物理状况和密度变化；从对月面温度的测定中，又使人们在登月之前便知道了有关月面的一些物理状况，而对它的射电测量又可获得月球表面地貌的资料。

二、交食的原理和过程

根据月影的情况，日食主要有日全食、日偏食及日环食三类。月食则一般仅有全食和月偏食二类。

1. 日食的原理 日食是地球局部地区被月影所遮掩而造成的。科学地讲，应当把“日食”称之为“地食”才更确切。

在朔日时，虽然有 $\lambda_{\text{☾}} = \lambda_{\text{☉}}$ ，但因为黄道面与白道面并不重合，因此朔只是发生日食的必要条件而不是充分条件。只有在朔的同时太阳恰位于黄道、白道交点附近，即 $\beta_{\text{☾}} \simeq \beta_{\text{☉}}$ 时，才使日、月、地几乎位于一直线上，导致发生日食(图4.47)。

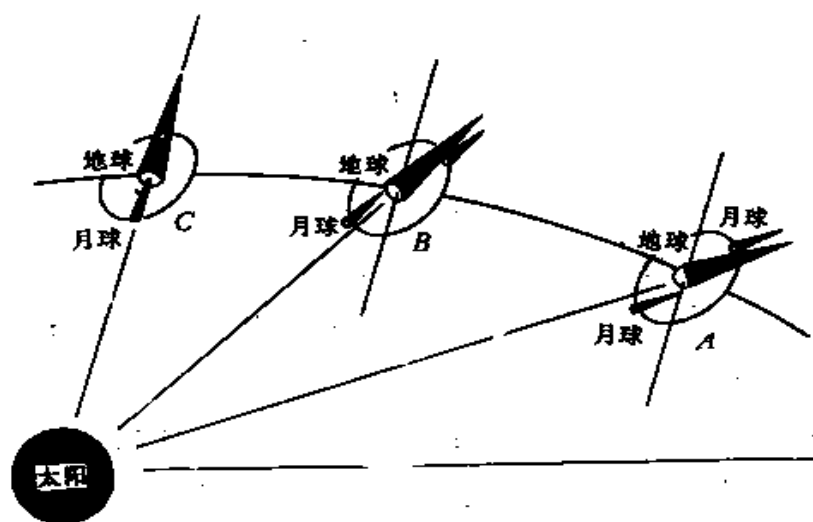


图 4.47 朔日不一定发生日食：只有C处才发生交食

太阳的直径约是月球的400倍，因此月球在阳光下造成的影子实际上是一个影锥，这个影锥常称为本影，本影中的观测者都见不到太阳，而在本影周围则有庞大的半影区域，从图4.48不难理

解，只有处于本影中的地区(A)才能观测到日全食，而在半影中的区域(B)却只能见到不同程度的日偏食，离本影越近，所见偏食的部分越大，而在半影之外的广大地区则一切如常，无法见到交食。

事实上，月球是在以平均1.02千米/秒的速度绕地球转动，地球也在不停地自转，但在纬度 φ 处，自转的速度是 $0.46 \cdot \cos \varphi$ 千米/秒，小于月球速度，所以实际上每次日食时月影是自西向东扫过地球。因此，日食区是一条狭长的影带——日食带。而能有幸见到日全食的全食带更是一条宽不超过300千米、长数千千米的狭长区域，其面积仅占地球表面积的千分之几。统计表明，每一地方连续发生两次日全食相隔的时间平均长达二、三百年，所以终生没有见过日全食的人比比皆是。

人类能在地球上见到日月食实在是偶然的极大的幸运，因为

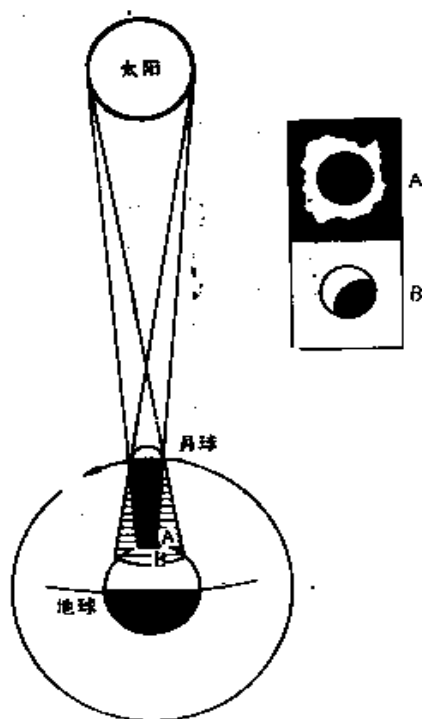


图 4.18 日食原理：A 处全食；B 处偏食

月球和太阳的视半径 $\rho_{\odot}$ 与 $\rho_{\text{月}}$ 相差无几，这是太阳系中得天独厚的条件。显然日全食发生在 $\rho_{\odot} < \rho_{\text{月}}$ 时，但因为月球轨道的偏心率较大，所以地面上(不是地心处)看到的 $\rho_{\text{月}}$ 为 $14'58'' - 16'44''$ ，而 $\rho_{\odot}$ 是在 $15'44'' - 16'16''$ 之间。显然当 $\rho_{\odot} > \rho_{\text{月}}$ 时，月球的影锥顶点不能到达地面，地球上只有半影和“伪本影”(A)(图4.49)，在A内见到的是别有韵味的日环食，也称为“金环食”、“珍珠食”。这时的太阳，中间全被稍小的黑暗月面挡住，但四周却如一只奇异的钻石戒指那样金光四射、十分美丽。

此外，还有一种更加罕见的“日全环食”(图4.50)，它发生于 $\rho_{\odot} = \rho_{\text{月}}$ 时。这种时候，月球影锥的顶点刚好抵达地球表面上，但是地球本身是有曲率的球面，这样，在月影扫动时，仅有极小的一块地方(A')见到的是极短暂的日全食，而在它前后的食带内只能见到日环食(B')，至于在半影区域(C')则仍是日偏食。

根据长期的日食资料统计，在每世纪发生的236.7次日食中，日偏食有82.5次，占34.85%；日环食有82.2次，占34.73%；日全食仅67.2次，占28.39%；日全环食仅仅4.8次，占2.03%。

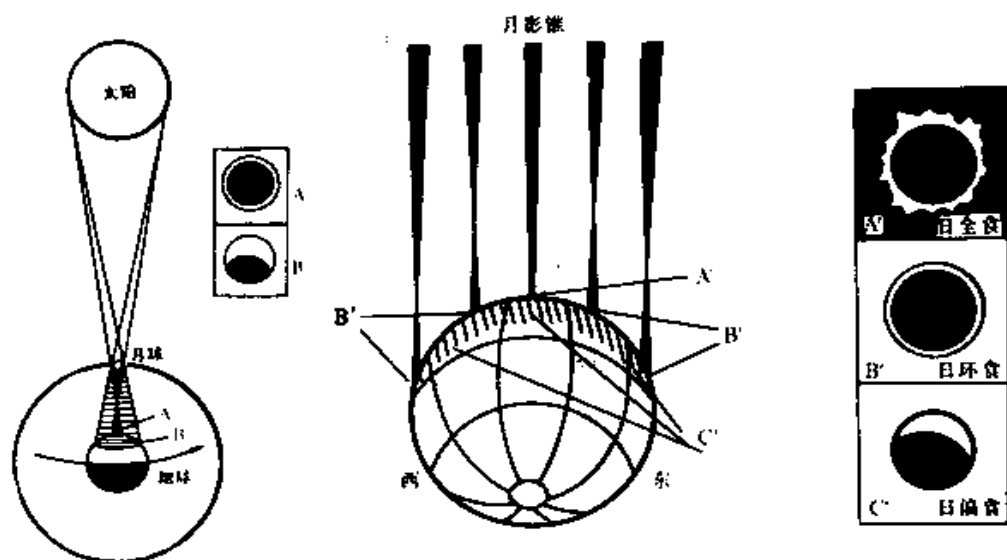


图 4.49 日食时，若月球离地球较远，则发生日环食(A)及偏食(B)

图 4.50 月球影锥顶点刚好在地球表面时，则发生日全环食

2. 月食原理 月食都是在“望”的时候发生的,即农历的十五或十六。同样,虽然望时有 $\lambda_{\text{月}} - \lambda_{\text{日}} = 180^\circ$,地球介于日、月之间,但因为黄白交角存在,所以只有少数望夜才发生月食,即只有当 $\beta_{\text{月}} \approx \beta_{\text{日}}$ 时,地球的影子才会触及月球表面(图4.51)。

由于地球的直径大约是月球的4倍,所以在月球轨道处,地球本影的直径仍相当于月球2.5倍左右。显然月球轨道处的地影直径永远大于月球,也即是说,决不会发生“月环食”。

当月球始终只有部分为地球本影遮住时,这就是月偏食。而月球能全部进入地球本影的月食称之为月全食。

地球的影锥周围也有半影,月球也可能只进入半影区域,在天文上称它为“半影月食”。但因为实际上阳光被遮挡一部分后仍然

十分强烈,所以半影月食时,多数情况下人们凭肉眼并不能见到月面亮度有明显变化,所以通常人们也不把它与月全食、月偏食相提并论。

但是,从统计可以看出,半影月食却是最常见的:每世纪中半影月食、月偏食、月全食的次数分别为89.0、83.8、70.4,分别占的比例是36.60%、34.46%、28.94%。

3. 交食过程 因为日食是月轮挡住发光的太阳,而月球是自西向东运动的,所以日食总是从太阳的右半圆面(地球上看来是西边缘)开始的,而月食是月球本身追上地球本影的,所以它与日食相反,开始于月面的东部边缘。

日全食和月全食一般都可分为五个阶段(图4.52):

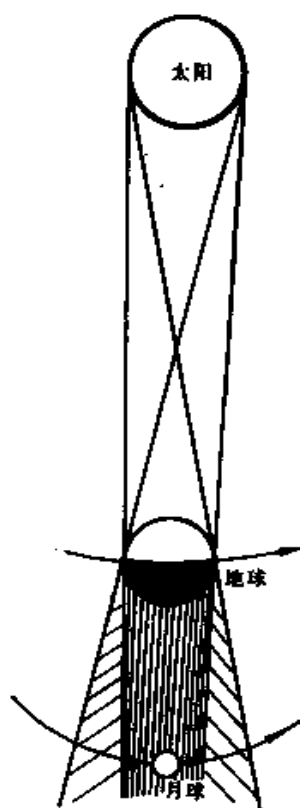


图 4.51 月球跑进了地球影锥就发生月食

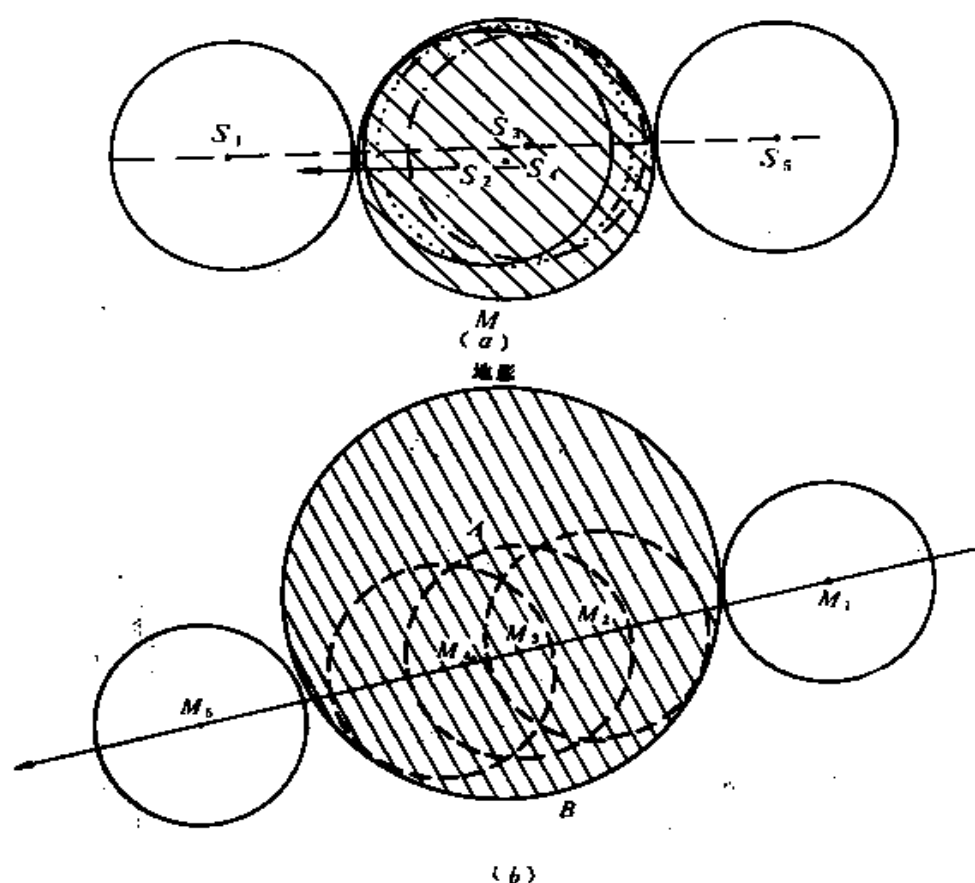


图 4.52 全食的五阶段: S ——太阳; M ——月球; (a) 日全食; (b) 月全食
1. 初亏; 2. 食既; 3. 食甚; 4. 生光; 5. 复圆

(1) 初亏: 两交食天体视面①边缘刚刚外切的时刻称之为初亏。这也是交食的起算时刻, 初亏时并无什么动人之处, 一般人倘不知道预报也不易觉察, 但记录初亏的精确时刻却有很大的意义。

(2) 食既: 初亏之后被食天体的可见视面渐渐变小, 当两交食天体视面边缘刚内切的时刻称之为食既, 这时天象大变。日食即是使白天倏地变成夜晚, 月食即是月轮消失的时刻。所以食既是全食的开始时刻。

① 对于日食而言, 指日和月的视面, 对月食而言, 是指地球影锥与月视面, 下同

(3) 食甚：两交食天体的视面中心距离最近的时刻。

(4) 生光：两交食天体的视面边缘又一次内切的时刻。生光表示全食的结束，对于日食言，日面立即就要吐出万丈光芒，对月食则马上就要显出一丝月牙。

(5) 复圆：两交食天体的视面边缘第二次外切，此后它们彼此越来越远，复圆的时刻即是一次交食的全部结束。

在日全食的食既和生光时刻，还有一种极为壮观的天象，即会出现绚丽的“倍利珠”(图4.53)。这是因为月球表面崎岖不平，边缘参差不齐，所以当太阳被月球挡成一条弯弯细线时，月球上高低不一的山峰便把这灿烂的细线——切断，阳光可能从一些环形山凹孔中透射出来，形成一串发光的亮点，犹如美丽的珍珠，这种瞬息即逝的景象常使人终生不忘。

在日全食阶段，平时的太阳圆面已隐而不见，但人们能见到平时看不见的太阳外层大气——色球层和日冕(见第七章，图7.18)，因为日冕的光度仅有平时太阳光的 10^{-6} ，所以日全食为人们提供了观测研究它们的极好机会。

对于偏食，显然没有食既和生

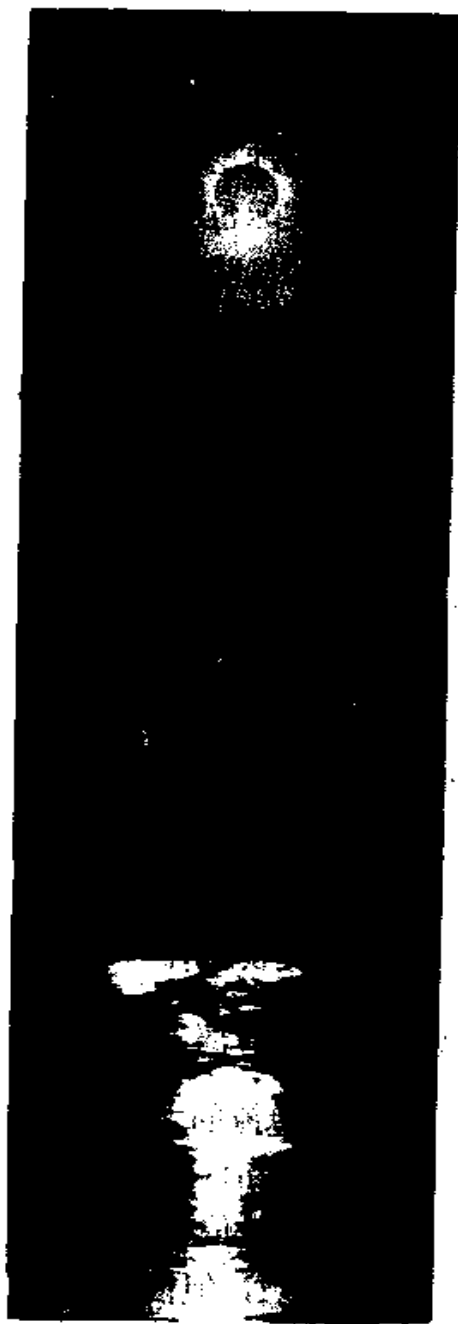


图 4.53 倍利珠(中国科学院
日食观测队摄)

光两个过程，因此日偏食和月偏食都只有初亏、食甚、复圆三个阶段。

4. 交食时间和食分 由于 ρ_c 与 $\rho_\odot$ 相差无几，因而日全食的时间十分短暂，从食既到生光一般只有短短几分钟的光景。从天体力学的理论也可以计算出月全食最长的极限时间不超过 7 分 31 秒，但实际每次日全食的观测时间常不过二、三分钟。1980 年春节发生的昆明日全食仅 1 分 37 秒。过去将近一百多年来历次日全食观测，光谱观测的总时间还不足 1 小时。为了尽量延长这段宝贵的观测时机，现在人们登上了飞机去追赶疾驰的月影。1973 年 6 月 30 日，法国科学家在非洲利用协和式飞机，竟使全食的观测时间延长到令人难以置信的 74 分钟。

日环食的时间比日全食稍长，可达 12 分 04 秒，如 1955 年 12 月 14 日海南岛观测到的日环食就达 12 分钟。日偏食的时间因从初亏起算，所以时间更长得多，常在 1 小时以上。

月全食因为地影比月球半径大得多，所以它一般都长达一、二小时，如 1982 年 12 月 30 日的月全食，从初亏(北京时间 17 时 50 分，下同)到复圆(21 时 07 分)共历时 3 小时 17 分，而其中全食的时间也长达 1 小时 01 分。

衡量交食还有一个标志——食分。简单的说来，食分就是食甚时被遮掩的部分，具体说来：日偏食即是指在食甚时刻 $\frac{\rho'_\odot}{\rho_\odot}$ ($\rho'_\odot$ 为被遮掩的太阳视半径)。

日环食和日全食的食分都是 $\rho_c / \rho_\odot$ 。

因此，日偏食的食分小于 1，日全食的食分大于 1，日环食的食分虽小于 1，但很接近 1，一般讲来食分越大交食的时间越长。

月食的食分是这样定义的：在食甚时进入本影部分的视直径与月球视直径之比(图 4.52b)，即 $\frac{AB}{2\rho_c}$ 。显然月全食时食分大于

或等于1，而月偏食的食分总小于1。

半影月食的食分即是月球进入半影部分与 ρ_c 之比，只有当半影月食的食分大于0.7时，肉眼才可以觉察到这种天象。

三、交食的周期和规律

日、月食既是由于地球和月球运动而产生的天文现象，而这两种运动都是有规律的周期运动，因而交食也有一定的规律性，必然会周期性地出现。

古代巴比伦人很早就发现了著名的“沙罗周期”，“沙罗”的原意本是重复的意思。他们发现每次交食在经过了6585.32天以后，必然会发生另外一次很为类似的交食。如1980年2月16日昆明日全食之前的一个周期即1962年2月5日也发生过日全食，而在此后一个周期即1998年2月27日也必然将又一次发生日全食。

6585.32天中可能有4个闰年，也可能跨5个闰年，如前者则合18年11.32天，如后者则是18年10.32天。

我国古代也曾提出过好几种类似的日月食规律，如汉代的《太初历》中就记载了交食的周期为135个朔望月，这就是“三统历周期”。三统历周期是相当科学的，例如1958年4月19日发生过日环食，一个周期即3986.63天后，1969年3月18日又出现了一次日偏食；1980年2月16日出现了日全食，到1991年1月16日又会发生日环食。三统历周期各次发生的交食情况不尽相同，这与沙罗周期略有区别。

在近代，美国天文学家纽康则从天体力学的理论出发，总结出了著名的“纽康周期”——358个朔望月，即10571.95日。

在表4.9及4.10中，列出了最近到2020年期间我国可见的日、月食。

表 4.9 1987—2020年我国能见到的日食简况*(27次)

日 期	食型	主要地区的食分及食甚时间(北京时间)
1987年9月23日	环	拉萨0.56(9时28分); 乌鲁木齐0.96(9时32分); 昆明0.56(9时44分); 兰州0.87(9时44分); 北京0.85(10时00分); 武汉0.85(10时00分); 广州0.63(10时04分); 哈尔滨0.56(10时12分); 上海0.98(10时12分);
1988年3月18日	全	昆明0.36(9时03分); 拉萨0.23(9时07分); 广州0.50(9时07分); 兰州0.24(9时23分); 武汉0.40(9时27分); 乌鲁木齐0.06(9时31分); 上海0.48(9时38分); 北京0.30(9时47分); 哈尔滨0.38(10时11分);
1990年7月22日	全	乌鲁木齐0.21(9时30分); 哈尔滨0.23(10时22分);
1992年12月24日	偏	广州0.02(6时55分); 武汉0.22(7时03分); 上海0.30(7时11分); 北京0.42(7时19分); 哈尔滨0.58(7时35分);
1995年10月24日	全	乌鲁木齐0.45(11时25分); 拉萨0.77(11时25分); 兰州0.45(11时49分); 昆明0.73(11时49分); 北京0.23(12时17分); 广州0.62(12时17分); 武汉0.43(12时21分); 上海0.38(12时37分);
1997年3月9日	全	广州0.50(8时09分); 昆明0.56(8时09分); 拉萨0.67(8时09分); 武汉0.67(8时21分); 兰州0.82(8时21分); 上海0.65(8时29分); 乌鲁木齐0.93(8时33分); 北京0.85(8时41分); 哈尔滨0.88(9时05分);
1998年8月22日	环	昆明0.28(8时27分); 广州0.38(8时35分); 武汉0.15(8时39分); 上海0.13(8时46分);
1999年8月11日	全	乌鲁木齐0.47(20时03分); 拉萨0.69(20时23分);
2002年6月11日	环	广州0.40(6时13分); 昆明0.25(6时17分); 武汉0.25(6时21分); 上海0.33(6时21分); 北京0.13(6时33分); 哈尔滨0.14(6时41分);
2003年5月31日	环	乌鲁木齐0.15(11时33分);
2004年10月14日	偏	哈尔滨0.18(9时51分);
2005年10月3日	环	拉萨0.05(19时28分);

续上表

日 期	食型	主要地区的食分及食甚时间(北京时间)
2006年3月29日	全	拉萨0.30(20时00分); 乌鲁木齐0.75(20时00分)
2007年3月19日	偏	拉萨0.54(9时44分); 昆明0.38(9时48分); 广州0.21(10时00分); 乌鲁木齐0.72(10时08分); 武汉0.30(10时12分); 上海0.18(10时24分); 北京0.40(10时32分); 哈尔滨0.32(10时56分);
2008年8月1日	全	哈尔滨0.83(18时57分); 乌鲁木齐0.98(19时05分); 北京0.90(19时14分); 兰州1.00(19时22分); 武汉0.96(19时26分); 拉萨0.82(19时33分); 昆明0.83(19时33分);
2009年1月26日	环	昆明0.12(17时43分); 武汉0.10(17时47分); 上海0.15(17时47分); 广州0.30(17时47分);
2009年7月22日	全	拉萨0.93(8时55分); 昆明0.88(9时03分); 兰州0.83(9时07分); 广州0.77(9时15分); 武汉1.00(9时19分); 北京0.75(9时23分); 上海1.00(9时31分); 哈尔滨0.50(9时47分);
2010年1月15日	环	乌鲁木齐0.39(16时11分); 拉萨0.68(16时23分); 兰州0.75(16时35分); 昆明0.93(16时39分); 北京0.80(16时44分); 广州0.73(16时51分); 武汉0.90(16时51分); 上海0.83(16时55分);
2011年1月4日	偏	乌鲁木齐0.21(18时15分);
2011年6月2日	偏	哈尔滨0.21(4时08分);
2012年5月21日	环	广州0.95(6时17分); 昆明0.85(6时21分); 武汉0.83(6时25分); 上海0.88(6时25分); 兰州0.65(6时33分); 拉萨0.67(6时33分); 北京0.69(6时37分); 乌鲁木齐0.42(6时49分); 哈尔滨0.67(6时49分);
2015年3月20日	全	乌鲁木齐0.06(19时23分);
2016年3月9日	全	拉萨0.12(8时46分); 昆明0.23(8时46分); 广州0.32(8时50分); 武汉0.13(9时02分); 上海0.18(9时13分);
2018年8月11日	偏	乌鲁木齐0.17(18时38分); 北京0.35(18时54分); 兰州0.19(18时59分); 武汉0.17(19时06分);

续上表

日 期	食 型	主要地区的食分及食甚时间(北京时间)
2019年1月6日	偏	武汉0.08(8时21分); 上海0.17(8时33分); 北京0.30(8时31分); 哈尔滨0.15(8时53分);
2019年12月26日	环	乌鲁木齐0.18(12时12分); 拉萨0.40(12时12分); 兰州0.23(13时11分); 昆明0.42(13时11分); 武汉0.32(13时16分); 广州0.17(13时16分); 北京0.18(13时12分); 哈尔滨0.13(13时51分); 上海0.35(14时02分);
2020年6月21日	环	乌鲁木齐0.62(14时59分); 拉萨0.93(15时07分); 昆明0.87(15时35分); 兰州0.80(15时36分); 哈尔滨0.37(15时51分); 北京0.58(15时52分); 广州0.90(15时59分); 武汉0.87(16时00分); 上海0.77(16时07分);

* 本表及表4.10均摘录自紫金山天文台编《1821—2020年二百年历表》。

表 4.10 1988—2020年我国能见的月食简况(31次)

日 期	食 型	交 食 时 间 (北京时间)	
		初 亏	复 圆
1988年8月2日	偏	18时05分	20时07分
1989年2月20日	全	21时51分	(21日)1时23分
1990年2月10日	全	1时30分	4时54分
1990年8月6日	偏	20时10分	23时34分
1991年12月21日	偏	17时59分	19时09分
1992年12月10日	全	5时57分	9时29分
1993年6月1日	全	19时10分	22时50分

续上表

日 期	食 型	交食时间 (北京时间)	
		初 亏	复 圆
1995年1月15日	偏	19时38分	20时56分
1997年9月17日	全	18时02分	18时32分
1999年7月28日	偏	18时25分	20时17分
2000年7月16日	全	20时03分	23时47分
2001年1月10日	全	2时36分	6时06分
2001年7月5日	偏	21时41分	(6日)0时15分
2004年5月5日	全	2时43分	6时17分
2005年10月17日	偏	19时29分	20时35分
2006年9月8日	偏	2时04分	3时42分
2007年3月4日	全	3时36分	9时06分
2007年8月28日	全	16时45分	20时25分
2008年8月17日	偏	3时34分	6时40分
2010年1月1日	偏	2时52分	3时58分
2010年6月26日	偏	18时18分	20时54分
2011年6月16日	全	2时19分	6时03分
2011年12月10日	全	20时48分	(11日)0时14分
2012年6月4日	偏	17时53分	20时13分

续上表

日期	食型	交食时间(北京时间)	
		初亏	复圆
2013年4月26日	偏	3时52分	4时28分
2014年10月8日	全	17时08分	20时36分
2015年4月4日	全	18时23分	21时43分
2017年8月8日	偏	1时21分	3时15分
2018年1月31日	全	19时45分	23时19分
2018年7月28日	全	2时33分	6时13分
2019年7月17日	偏	1时06分	6时58分

四、食限、食季和食年

1. 食限 太阳、地球、月球都不是几何点,而是有视面的天体。所以交食并不要求三者中心严格处于一条直线上。以日食为例,

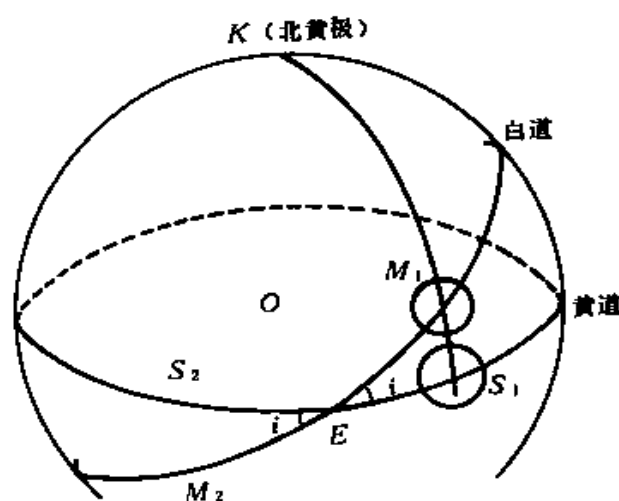


图 4.54 日食的食限

只要求日、月视面相切就意味着可能有日食发生(图4.54)。换言之,只要太阳在黄、白交点 E 附近的 S_1S_2 间,就会发生日食。通常把 $\widehat{ES_1}$ 或 $\widehat{ES_2}$ 称之为“食限”。

如图4.54, ES_1M_1 是一个直角球面三角

形, 利用附录 II 中的有关公式可得:

$$\sin \widehat{S_1 E} = \frac{\operatorname{tg} \widehat{M_1 S_1}}{\operatorname{tg} i} \quad (4.28)$$

注意, $\widehat{M_1 S_1}$ 并非日月视角半径之和, 从图 4.55 可知, 在地球上 E'

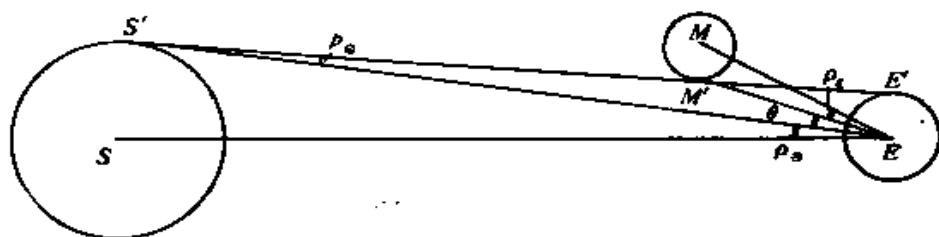


图 4.55 日食食限公式推导图

的地方是见食的极限范围。但

$$\rho_{\odot} = \angle M' E M,$$

$$\rho_{\odot} = \angle S' E S,$$

$$\widehat{MS} = \angle MES = \rho_{\odot} + \rho_{\odot} + \theta. \quad (4.29)$$

而从 $\triangle S' M' E$ 即可知:

$$\theta = \angle E' M' E - \angle E' S' E = \rho_{\odot} - \rho_{\odot}. \quad (4.30)$$

将(4.29)和(4.30)式代入(4.28)式:

$$\sin \widehat{S_1 E} = \frac{1}{\operatorname{tg} i} \cdot \operatorname{tg}(\rho_{\odot} + \rho_{\odot} + \rho_{\odot} - \rho_{\odot}) \quad (4.31)$$

用同样的方法亦可求得月食的食限:

$$\sin (\widehat{S_1 E}) = \frac{1}{\operatorname{tg} i} \cdot \operatorname{tg}(\rho_{\odot} + \rho_{\odot} + \rho_{\odot} - \rho_{\odot}) \quad (4.32)$$

由于 i 、 $\rho_{\odot}$ 、 $\rho_{\odot}$ 、 $\rho_{\odot}$ 、 $\rho_{\odot}$ 都有微小的变化范围, 所以食限($\widehat{S_1 E}$ 或 $\widehat{S_2 E}$)也是变化的(表 4.11)。

2. 食季和食年 食限是 $\widehat{ES_1}$ 或 $\widehat{ES_2}$, 太阳在 $\widehat{S_1 S_2}$ 上的时间为“食季”。太阳在黄道上的运动平均为每天东移 $59' 08''$, 由此可知, 日食的食季长度为 31.11—37.00 日, 月食的食季长度为

表 4. 11 日月食的食限和食季

		日 食	月 食
食 限	最 大	18° 11' 01"	11° 54' 30"
	最 小	15° 19' 52"	9° 30' 42"
食 季	最 大	37.00	24.16
	最 小	31.11	19.30

19.30—24.16日。日食的食季比朔望月长,月食的食季却比朔望月短,因为白道与黄道有两个交点,所以一年至少应有两个食季。

黄白交点有向西退行的运动,所以太阳连续两次通过黄白升交点的时间——食年——显然比回归年要短得多。据测定,食年的长度为346.62003日。

日月食的周期实际上是朔望月、交点月及食年的某种配合。如三统历周期是135朔望月,合

$$29.53059 \times 135 = 3986.62965 \text{ 日,}$$

相当于146.5 个交点月及11.5食年。

$$27.21222 \times 146.5 = 3986.59023 \text{ 日,}$$

$$346.62003 \times 11.5 = 3986.130345 \text{ 日.}$$

而“沙罗周期”是6585.32157日 = 223 朔望月,正好与 242 个交点月或19食年相当:

$$29.53059 \times 223 = 6585.32157 \text{ 日,}$$

$$27.21222 \times 242 = 6585.35724 \text{ 日,}$$

$$346.62003 \times 19 = 6585.78057 \text{ 日.}$$

从此可知沙罗周期比三统历周期更为准确些。显然,也不难发现纽康周期(358朔望月)的精度又比它更有所提高。

3. 交食次数 从表4.11可知,在一个日食食季内至少总有一个朔日,有可能甚至有两个朔日(在食季头、尾),所以每个日食

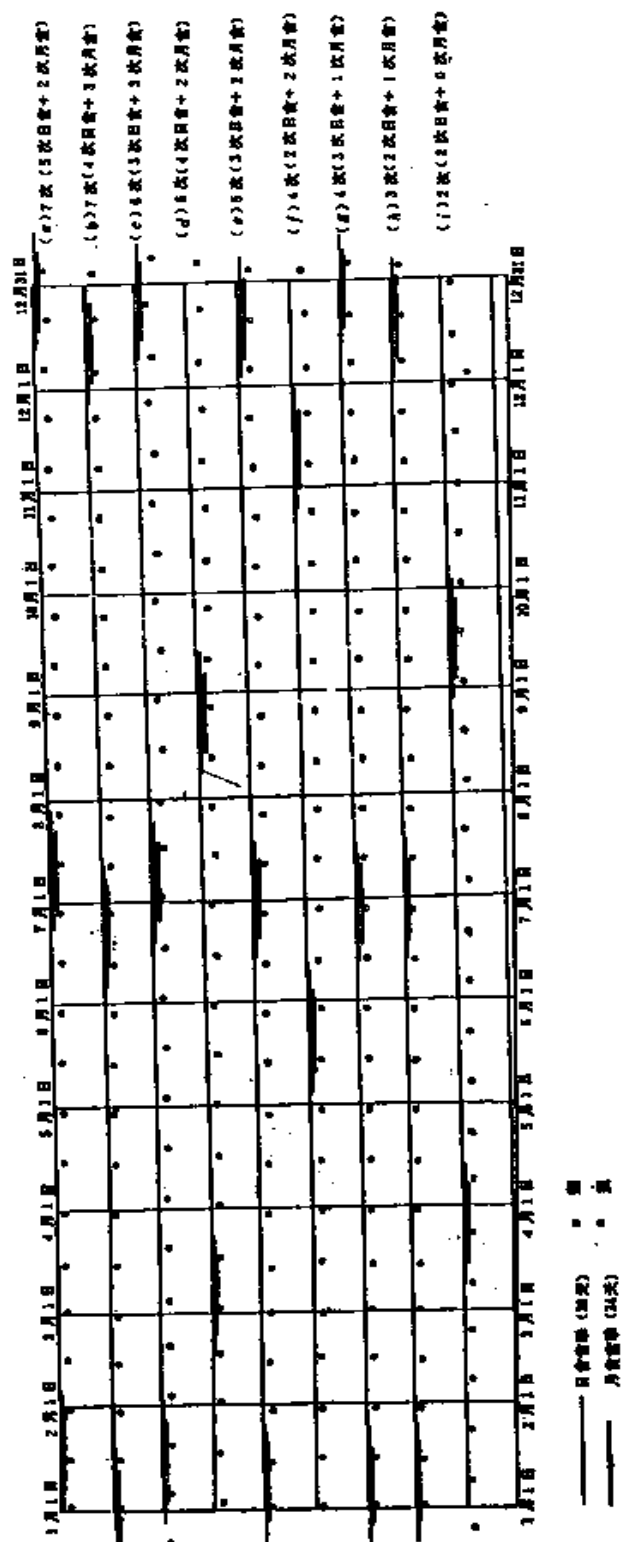


图 4.56 每年交食次数示意图

食季内至少总有一次日食，而一年至少有两个食季，所以每年的日食数不少于2次。而在月食的食季内至多只能遇到一个望日，不少时候食季内恰恰没有望，所以有时可能整年内没有月食。

食年比回归年短18.62天，所以有时一年内可有2.5个食季。这样，日食的最多次数为5次，月食的最多次数为3次，但是每年交食的次数最多为7次，最少为2次(图4.56)。例如图中的(a)，因为有2.5个食季，故发生5次日食，2次月食；而1982年的7次则是日食4次，月食3次，如图中(b)，大多数年份则为4次——日、月食各二次。如图中(f)的情况，少数时候一年只有二次日食，没有月食，如图中(i)，其他的交食次数都可从图4.56得到说明。

应当指出，尽管发生日食的次数比月食多，但事实上见到过日食的人却远少于见过月食的人。这是因为日食的可见区极小，时间十分短促，而月食发生时，处于夜晚的半个地球都可见到，而且因时间长，即使暂时天气不佳(偶尔的云彩)也无碍大局。

§ 4.11 月球的起源和演化

月球从何而来？这是令人极感兴趣的研究课题。月球的起源和演化决不是一个孤立的问题，而是整个太阳系起源演化问题的一部分，而目前有关太阳系起源的各种学说已达四、五十种之多，其中不少都对月球起源问题作了探讨，但综观各家所说，虽然都不乏可取之处，但还未达到成熟的阶段。事实上，月球的起源问题只能在对太阳系的“过去”有了彻底的了解之后才可得到真正的解决。但是，另一方面，对于月球起源、演化的研究和探讨也可以为太阳系起源提供新的线索，有助于它的深化。

月球起源的学说也有很多理论，但就实质而言大致可归为三大类：

一、潮汐分裂说

分裂学说的鼻祖是英国物理学家乔治·达尔文(G. Darwin),他在十九世纪末深入研究了康德提出的潮汐摩擦理论后,提出了人类第一个月球起源假说。该学说认为,从现在的地月系统所具有的角动量推算,当初它们“没有分裂”时,地球的自转速度几乎是现在的6倍,强大的离心力加上太阳的潮汐力作用,使得处于熔融状态下的地球从赤道处分裂出一大块物质,这块东西慢慢形成了月球。达尔文认为,分裂的地方即是现在的太平洋。有人认为,太平洋底盆的形状大致与月球形状吻合,而且,太平洋底也的确没有通常应有的大陆花岗岩,这为它提供了论据。

二十世纪后,一些科学家进一步深入研究发展了这种潮汐分裂说。例如,怀斯(D. U. Wise)认为,在几十亿年前地球的自转较快,简直快达到了它能保持稳定状态的极限边缘,而地球内部的放射性元素所产生的大量热量使地球内部变成熔融状态,这样,那些较重的铁、镍等元素便沉到核心区,而重元素下沉又使地球的转动惯量变小,因而自转速度便超过了稳定性的界限,于是地球在赤道处越来越拉长,终于分裂出一块物质,开始时,它离地球很近,由于长期的潮汐摩擦作用,使月球转移到现在的位置,而且潮汐摩擦的作用至今还在起作用。

潮汐分裂说可以解释月球的平均密度、化学组成与地球表层相仿的事实,也可以说明地球原始大气消失等现象。但是有很多的困难之处:(1)这样分裂出去的月球其轨道面应在地球赤道面上,但事实却非如此;(2)定量计算表明,即使地月系统全部角动量都放于原始地球,地球的转动速度也不会造成分裂。反过来,倘若当初因自转太快而分裂,则应当说明还有不少角动量是怎么散失的。(3)英国天文学家里特顿(R. A. Lyttleton)曾从力学上推出,对于球状的原始行星因自转而分裂成的二块,其质量比应

为10:1才是稳定的,而地月的质量比是81:1,其间相差8倍。

(1)潮汐分裂也难以说明太阳系其他行星有众多卫星的普遍性。

因此时至今日,虽然还有少数人在为它修修补补,但再也没有昔日那样风靡一时的吸引力了。

二、俘获说

最早由格斯腾孔(H. Gerstenkorn)提出,而目前最有影响的俘获理论当推阿尔文等人的理论。

阿尔文(H. Alfvén)是瑞典著名电磁理论家。他从1942年开始致力于探讨太阳系的起源问题,以后不断丰富和改进他的看法。他认为太阳系内所有天体都起源于一些在磁场作用下的电离气体云,行星和卫星间有明显的相关性(图4.57)。阿尔文从中得出结论,月球原来是在火星区域与火星一起形成的独立天体,只是后来才为地球所俘获,变成了卫星。而月球被地球俘获后,也把地球原来的十来个较小的天然卫星“并吞”了,形成了今天见到的“月瘤”。

阿尔文进一步作了一些半定量的计算。他认为七亿多年前,月

球尚未被俘获时的轨道相对于地球是逆行的,与黄道面的交角为 $i = 149^\circ$,在走到 $26 R_\oplus$ 处,即发生一种“轨道共振”的效应。地球刚俘获它时 $i = 125^\circ$,到离地球仅 $6-7 R_\oplus$ 时,共振作用消失。以后则由于潮汐作用, i 慢慢变小,距离越来越远,1000万年后即

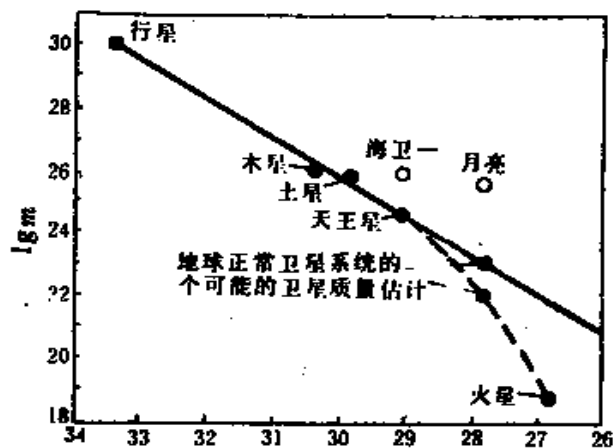


图 4.57 行星、卫星质量关系

变成顺行 $i = 35^\circ$ ，月地距离增大到 $25 R_\oplus$ ，5000 万年后即 $i = 27^\circ$ ，距离增大到 $30 R_\oplus$ ，以后再逐渐变到今天的 $60.3 R_\oplus$ ，及 $i = 5^\circ$ 。

主张俘获说的天文学家很多，它的确甚有吸引力，能说明许多月球的特征。例如，月球的密度比地球小得多，俘获说就很容易说明，而对于月球的形状，朝向地球方向稍有膨胀，这也只有俘获说可以成功地加以说明。所以象麦克唐纳 (J. F. MacDonald) 等人在 1964 年还是“同源说”的提出人之一，相隔不过五年时间，他又转而支持俘获说了。

然而，众多的俘获说彼此间也有许多区别。如阿尔文认为月球原来是一颗独立行星，而尤里 (H. C. Urey) 却认为它原来不过是一种“中介天体”。质量在 10^{26} 千克左右，挥发性物质散逸后即成为月球。同样，所有的行星、小行星都是来源于这种“中介天体”，他还认为俘获月球事件发生于 45 亿年前。而辛格 (S. F. Singer) 在 1968 年认为月球被俘获时正是在它刚形成之际。

三、共同形成说

亦称为同源说，这是现代太阳系起源学派中最有影响的理论。这类学说认为太阳系内所有天体都是由同一块星云物质在相同的自然规律下一起逐渐形成的，在不同的区域内产生了相应的行星及它的卫星。

主张地月同时形成的学者甚多，最早的影响较大的是苏联地球物理学家奥·尤·施米特 (О. Ю. Шмидт) 他认为卫星的形成乃是行星形成的“附带结果”，“行星胎”周围大部分的流星物质都先后落到行星胎上，使它逐渐长大而成为行星，但行星胎周围附近的这些流星体，也完全有可能同时形成一些较大的凝聚物——“卫星胎”，它们的引力也能吸引其他一些流星物质，从而慢慢成为比行星较小的卫星。他认为形成月球的“卫星胎”当初离开地球仅仅 $5-10 R_\oplus$ ，整个月球形成的时间他算得是 3—5 亿年。

奥罗万(E. Orowan)又发展了这种共同形成说,认为地球和月球虽是在同一块云中形成,但在此前元素已略有分化:一些非挥发性的金属元素先已沉积凝聚为一些星子,这些金属元素较多的星子结合成“地球胎”,以后形成了地球。那个“胎”则成为今日地球的铁镍核心,月球形成稍晚一些,因此其“原料”已是缺少铁、镍之类的“剩余物质”了,这样才能说明二者之间在化学组成上的重大差异。

1972年鲁斯科尔(E. U. Ruskol)又对这种过程作了具体的计算,得出这样的形成过程会使月球、地球含铁量有很大不同,地球含铁可高达35%,而月球只有14%。

加拿大原子核物理学家、天文学家卡梅伦(A. G. W. Cameron)提出的同源说又略有不同:他认为,在星云逐渐凝聚时,中心形成了太阳,而其周围的物质则也渐渐集聚起来,成为大大小小的“星子”,星子间又通过吸积而增大。而在地球所在的区域内,有两个“大星子”得天独厚,已大到能吸附周围的气体,形成了自己的“气壳”,当它们在互相接近时,两个气壳结合起来变成一个气盘,两个星子的掠碰产生了大量热能,使它们中的金属元素熔化了,并积聚在气盘中,它们结合成地球,同时在地球周围又形成另一个次级盘状物,这个盘状物便形成了月球。

灵伍德(A. E. Ringwood)的学说又有不同,他主张形成月球的物质原是处于地球洛希极限^①内的一个环带,这与今日的土星光环相仿,但所含的物质更多。他认为原始地球主要由CO、H₂及少量硅酸盐组成,它们形成浓厚的原始大气。在漫长的岁月中,这大气被“太阳风”(§ 7.5)驱散殆尽,但其中已有的少量金属及其氧化物凝聚在地球周围的环上,这个环后来慢慢离开地球,并逐渐

① 洛希极限是指潮汐力大于绕转体自身的引力的界限。对于行星、卫星而言。若二者的平均密度相同,则此界限大约是离行星2.16半径处,在更近的距离内,卫星将被地球的潮汐粉碎,土星光环便是其最好的例证,详见§ 5.1。

形成了月球。由于原始大气冷却的氧化过程很不充分，因而剩有少量的金属铁，这可以说明现代登月探测得到的结果——月海玄武岩中缺乏亲铁元素和还原铁。

综合上述三大派学说的优劣，尽管都可或多或少地说明月球的化学组成、结构、运行轨道及地月关系的一些基本特征，但看来潮汐分裂说已在逐渐走向衰落，而俘获说与共同形成说则还在不断地发展之中。目前，它们都还有许多不足之处，但同源说略占一些优势。

四、月球形成后的演化

从各种研究结果得到的结论看来，月球的年龄与地球大致相仿，约为46亿年左右，这也是太阳系的年龄。在这40多亿年时间内，月球虽不象地球那样早已面目全非，或多或少保留着一些当年的征状，但亦是有很大的变化的。例如，地月之间的距离就增大了十倍，这从古地球物理和古生物的研究中可以得到证实，地球一年中的天数在远古时期要比现代多（自转快，说明地月距离小，见表4.12）。

表 4.12 不同时期地球一昼夜的长度(小时)

距今时间 (10 ⁸ 年)	0	0.46	0.72	2.00	3.40	3.80	5.10	45.5
相当的地质时代	现代	始新世	白垩纪	三叠纪	石炭纪	泥盆纪	隐寒武世	地球初期
昼夜长度 (小时)	24	23.7	23.5	22.7	21.8	21.6	20.8	~ 4

在几十亿年内，月球整个面貌有过几次巨大的变动，根据这些变动可以划分它的“月质年代”。由于研究的方法不同，也有不同种划分月球编年史的方法，目前较常用的则是舍马克(E. M. Shoemaker)及哈克曼(R. J. Hackman)的五纪划分法。

1. 前雨海纪 月面演化史中最早的4—5亿年时间,也是月球形成之后到“雨海事件”之前的时代的总称。那时,形成之后的月亮——固体表面——又重新熔化,温度达1000℃以上,造成这种变化的原因可能是放射性元素释放的核能,也可能是大量大流星体的频频撞击的动能,也可能二者兼而有之,但熔融的表面没过多久又重新冷却凝固起来。有人估计,这时期内形成的环形山和月坑大约有11000多个,然而完整保存至今的已很少,除了被熔岩填满、淹没外,还有一些环形山上则又迭加上了新的环形山,或被月谷所破坏。

2. 雨海纪 从41亿年前开始,月球上开始形成雨海盆地。虽然这一纪只有二亿年光景,但触目惊心的“雨海事件”却很有特色。在大约39—40亿年前,一颗直径100千米左右的小行星猛烈撞到月球上现在的雨海地区,溅起的物质被抛到了500千米之外。而据研究,月海和多数山系大致都是在这段时间内形成的。在猛烈而频繁的陨星轰击下,月海盆地区域形成了,抛出的溅射物堆积起来,成了山脉,如亚平宁山脉、阿基米德型环形山可能都是这样形成的。

3. 风暴洋纪 雨海纪之后直到31亿年前,在这段时期内,落到月面的陨星数量逐渐减少,但月面本身却又一次发生了大规模的熔岩活动:火山频频喷发,熔岩四处流淌,低洼地区的坑洞和小环形山又一次被完全淹埋,于是月海盆地成了今天的模样。根据同位素测定,一些月海被充填的先后大致是这样的次序:雨海(先西后东)、湿海、危海、静海、丰富海、澄海、风暴洋。到这一纪末期,月球内部的大规模演变已经停滞了。

4. 爱拉托逊纪 从距今31亿年到5亿年前的26亿年时间内,虽然月球内部活动已明确减少,但外界的影响仍十分巨大。这一时期内,它又经历了一场陨星的轰击,形成了大量新的环形山。而且它们大多数并未受到严重破坏而保存至今天,不过月面上的各

种作用仍可以使它们的辐射纹基本上被磨灭而消失。

5. 哥白尼纪 5亿年前至今则是雨海时期的最后阶段。一些最年轻的带有清晰辐射纹的环形山，如哥白尼山、第谷山等都是在8亿年前形成的。有人认为这时期内形成的这种环形山约有8000多个，但其直径都较小，最大的不过55千米，小的仅是一些米级、厘米级的坑洞而已。

整个过程可表示如图4.58。

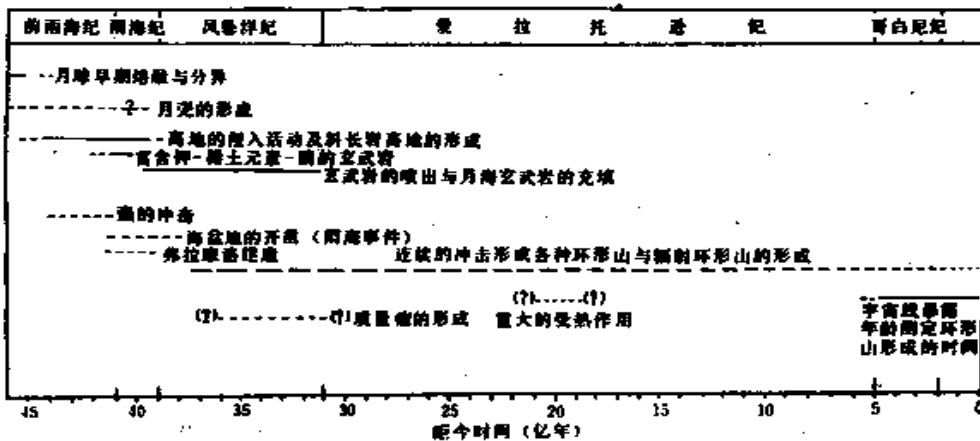


图 4.58 月球演化序列

五、月面暂现现象(TLP)

人们常说月球是一个死寂的世界,已经没有任何变化,这只能是指在最近的50万年中月球上已没有全球性的大规模变化,因为月面上局部的变化至今还是时有发生,奇怪的月面暂现现象即是其中之一。月面尚有活动先由英国天文学家穆尔(P. Moore)提出,后为苏联天文学家科兹洛夫(B. B. Козлов)所证实。他在1958年11月3、4日夜利用1.28米口径的望远镜观测月球时,在阿尔卑斯山发现了一种奇特的淡红色的光斑,他认为这很可能是月球内部散逸出来的气体经太阳照射而发光。现在知道,月面暂现现象最容易出现于月球处于近地点的时刻。

其实，月面局部发光的现象早在800多年前就有了记录：1178年6月18日西方同时有五个人见到了蛾眉月上出现的闪光。而十八世纪的观测大师威廉·赫歇耳也有过两次类似的记录：一次是在1783年，一次在1787年。他还作了这样的描述：闪光“好象是燃烧着的木炭，薄薄地蒙上了一层热灰。”

1866年希腊天文台台长甚至宣称，澄海中一个环形山突然消失了。二年之后又有人报告说，他见到一座原来直径只有500米的环形山现在已增大到了3千米……。据不完全统计，数百年来天文学家收到的各种有关月球表面变化的报告达1400多起。当然，这其中也不乏是观测者的幻觉，甚至还可能有蓄意的欺骗，但是即使剔除了那些存疑很大的例子之后，资料仍然很多，所以人们不得不认为，月面上的这种短时标的局部变化是客观存在的。研究它，对于进一步探索月球的起源及演化将有重要的意义。事实上“阿波罗”14号登月宇航员安置在月面上的仪器已经提供了一个陨石轰击月球的实例：1972年5月13日，一颗大陨星落在仪器附近，陨落时月岩飞溅持续了将近一分钟，并在陨落处造成了一个足球场大小的坑洞。据测算，它的能量与1000吨梯恩梯炸药相仿，有四个月震仪还记下了由此引起的月震曲线。

第五章 行星和卫星

§ 5.1 太阳系观念的确立

人们经过千百年的探索,到十六世纪后才逐渐明白地球是绕太阳公转的行星之一。太阳连同绕它旋转的九大行星(包括它们的卫星)及万千小行星、彗星组成了一个比地月系统更高一层次的天体系统——太阳系(图 5.1)。

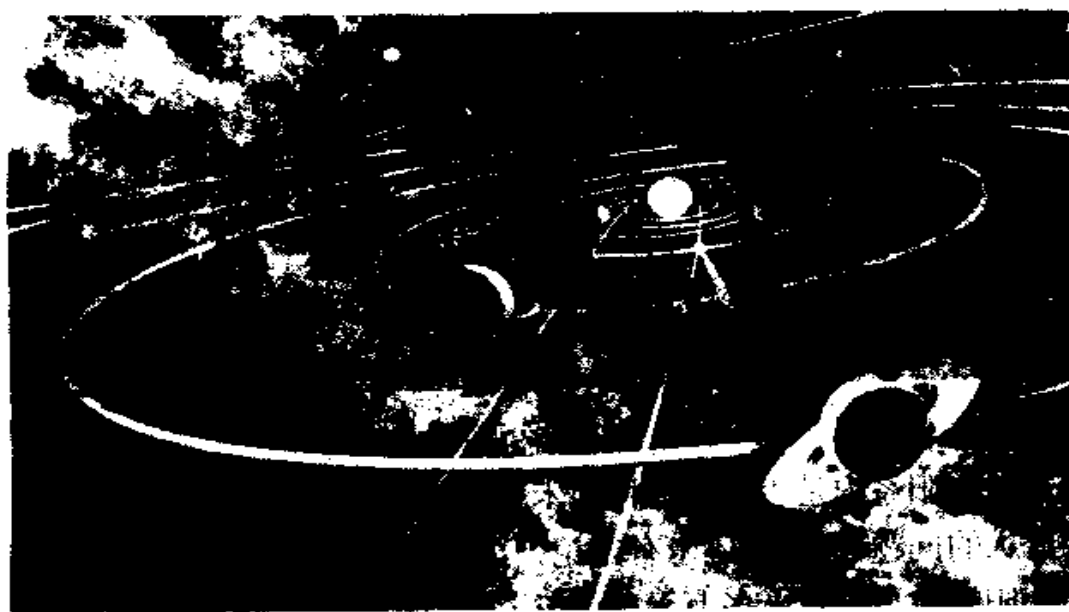


图 5.1 太阳系

一、太阳系概况

太阳系的中心天体是太阳,太阳是太阳系光和能量的源泉。它

的质量比地球大33万倍,有 1.99×10^{30} 千克,占整个太阳系质量的99.865%,因此它是太阳系的质量中心,其引力使太阳系内所有天体都绕它运动。

太阳也是太阳系中最庞大的天体,其半径为 6.96×10^5 千米,差不多为地球半径的109倍,甚至是地月距离的1.8倍(图5.2)。目前人们知道的大行星共九颗,按照与太阳由近及远的次序是:水星(♿)、金星(♀)、地球(♁或⊕)、火星(♂)、木星(♃)、土星(♄)、天王星(♅或♁)、海王星(♆)、冥王星(♇)它们的物理参数见表5.1。



图 5.2 太阳与九大行星的大小比较

太阳系内是否还存在目前未知的其他大行星?这是一个十分诱人的问题,但迄今还未有定论。主张还存在未知行星的人认为,太阳系的范围达十多万天文单位,而目前九大行星不超过50天文单位,冥王星发现至今尚不过半个多世纪,从天王星、海王星运动与理论计算存在着微小偏离、彗星运动情况分析等方面看来,似乎在冥王星轨道以外还存在着若干未知行星是很有可能,发现它们只是时间问题。

表 5.1 太阳和九大行星的一些物理参数

行星	质量 (10^{24} 千克)	赤道半径 (10^3 千米)	平均密度 (10^3 千克/米 ³)	公转周期 (日)	自转周期	自转轴 倾角	表面温度 (开)	已知 卫星数*	环绕速度 (千米/秒)	逃逸速度 (千米/秒)
太阳(☉)	1.989×10^6	6.960×10^2	1.41	—	25.2 天(赤道)	—	5770	—	436.8	617.7
水星(♿)	0.3309	2.440	5.44	87.969	58.6 天	3	600	0	3.0	4.2
金星(♀)	4.869	6.070	5.2	224.701	243 天	177	750	0	7.3	10.3
地球(♁)	5.974	6.378	5.52	365.256	$23^h 56^m 4.1^s$	$23^{\circ} 27'$	300	1	7.9	11.2
火星(♂)	0.6421	3.395	3.95	686.980	$24^h 37^m 22.6^s$	$23^{\circ} 59'$	230	2	3.5	5.0
木星(♃)	1.989×10^3	71.400	1.33	4332.589	$9^h 50.5^m$ (赤道)	$3^{\circ} 05'$	128	18 ⁺	42.1	59.5
土星(♄)	568.4	60.000	0.70	10759.2	$10^h 14^m$ (赤道)	$26^{\circ} 41'$	105	22 ⁺	25.2	35.6
天王星(♅)	86.86	25.400	1.34	30685.4	$11^h 36^m$	$97^{\circ} 55'$	70	15 ⁺	15.1	21.4
海王星(♆)	102.9	24.750	1.66	60189	$17^h 50^m$	$28^{\circ} 48'$	57	3 ⁺	16.7	23.6
冥王星(♇)	1.4×10^{-2}	1.350	1.5	90465	6.387 天	60	50	1	0.85	1.2

* 数字右上角的“+”表示可能还有未发现的卫星。

但持相反意见的科学家则认为，太阳系空间的物质并不是均匀分布的，有理由认为在海王星轨道外，太阳系空间已十分稀薄，形成冥王星后剩下的物质难以聚成一颗大行星。至于在水星轨道以内的“水内行星”，一百多年来的搜索史表明，它并不存在。

九大行星除了离太阳最近的水星、金星外，都有若干颗天然卫星。人类最早知道的卫星就是月球，直到1610年才发现了木星的四个大木卫。到本世纪七十年代后期，太阳系内的卫星达33颗，人类大规模的空间探测又使卫星数目达到了60颗以上，而且随着大量资料的处理和证认，卫星数目可能还会有所增加。

还有三颗行星(木星、土星、天王星)具有“环带”。环带以前亦称为“光环”，它们是在行星赤道平面内由无数碎石、冰块、砂砾等物质组成的，也与卫星一样在绕行星作开普勒运动。一般认为，环带或许是被行星潮汐力粉碎了的卫星，也可能是在太阳系演化初期未能凝聚成卫星的“原始物质”。

十九世纪初开始，人们陆续发现了许多小行星，至今数目已突破了三千颗。所谓“小行星”，是指形态、运动特征与九大行星(尤其是类地行星)相仿，但大小质量却又小得无法比拟的天体，绝大多数小行星存在于火星与木星轨道之间。最大的小行星是1号谷神星，它的直径比月球还小一半，质量在 10^{21} 千克量级。已发现的小行星中，许多大小能以千米计，最小的直径只有300米。至于还未发现的那些更小的小行星可能只是一些在绕太阳运转的碎块游石而已。人们估计，所有小行星的质量之和不到 $10^{-3}m_{\oplus}$ ，因此人们又称小行星为太阳系的小天体。然而令人意外的是，七十年代末居然发现一些半径几十至上百千米的小行星也有绕它转动的“卫星”，有卫星的小行星至今已发现了十多个。

太阳系内还有一种小天体是彗星，它们是宇宙中的“脏雪球”。彗星的轨道大多十分扁长，有的甚至是抛物线或双曲线，因而与太阳的距离变化极大。彗星处于远离太阳的地方时，它几乎无法

为人觉察：但当走到太阳附近时，因受热而急剧膨胀起来，体积可与太阳相当甚至更大，长长的彗尾可达几千万、数亿千米。但它们的质量极小，最大的一般仅有 10^{19} 千克，绝大多数仅只 10^{13} 千克，最小的小于 10^{12} 千克，因此尽管有人估计彗星总数在 10^{11} 个以上(已算出轨道的彗星仅一千个左右)但其总质量还不及地球质量。

第三种小天体则是流星体，它们大多非常微小，在遇到地球大气成为流星之前，一般都无法对它们进行观测。然而陨落于地球上的流星体——陨星，则又为人类带来了无比珍贵的科学信息。

二、地心体系

天穹像一个硕大无朋的半球，地球处于中心的位置，日、月、星辰都在绕地球每天东升西落，这是最直观的自然现象之一。以此为基础来说明宇宙图像的假设或理论都属于“地心体系”范畴。中国古代的“盖天说”、“浑天说”，古希腊亚里士多德的“水晶球”模型，阿波隆尼(Apollonius)的“本轮、均轮偏心模型”，喜帕恰斯的偏心图像都是以“地球为宇宙中心”作理论基础的。到公元二世纪，亚历山大学派的托勒玫在前人工作的基础上作了系统的发展和提高，总结为《天文学大成》，使地心体系成为一个完整的科学理论。

托勒玫的巨著《天文学大成》是当时天文学和数学上成就的最好总结。该书共13卷，它不仅包括了地心体系所描绘的宇宙图像(图5.3)，列举了证明地心体系的基本观测事实和数学基础，叙述了日、月、行星的运动规律，还有推算日、月食以及行星未来位置的方法，天球仪的原理和制作工艺，并包括有1022颗恒星的位置、亮度的星表。实际上，古希腊人在天文学上所取得的辉煌成就多数是因为托勒玫在他著作中作了转述才为今人所知晓。

为了说明行星的视运动，预报行星在天空中的位置及即将发

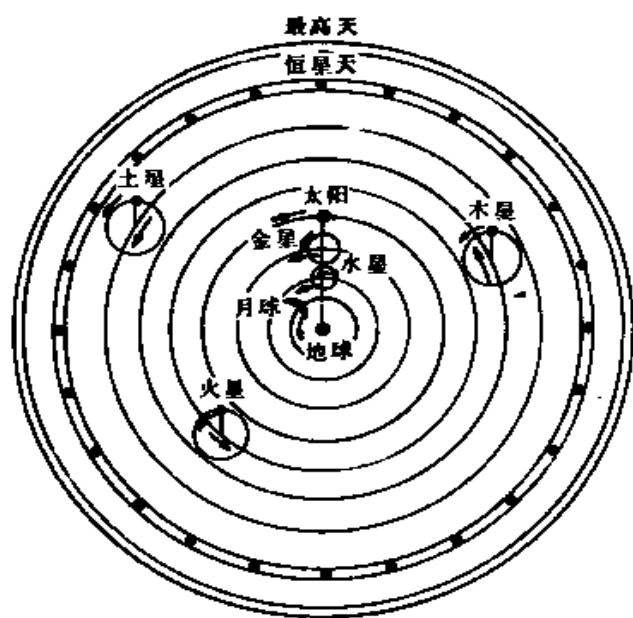


图 5.3 托勒玫的地心体系简图

生的日、月食，托勒玫的著作对数学的发展也起了很好的推动作用，因此可以认为托勒玫的地心说是当时科学的高峰，是人类认识史上的一大进步。

托勒玫地心说所描述的宇宙图像可大致概括为这样几点：

(1) 地球是球状的，巍然不动地位于整个宇宙的中心，按与地

球由近及远的天体是：月球、水星、金星、太阳、火星、木星、土星、恒星；在恒星之外还有一层“最高天”(图5.3)。

(2) 五大行星都在一个较小的“本轮”上作匀速圆周运动，但本轮的圆心又在一个庞大的“均轮”上绕地球作匀速圆周运动。但太阳和月球没有“本轮”，直接在均轮上运动，而地球又稍稍偏离所有均轮的中心。这样，托勒玫通过选择各个本轮、均轮半径的比例，它们转动的不同速度比例以及两种轮子轨道平面的不同倾斜角，就可以得到足以满足当时观测水平的结果。

(3) 水星和金星的本轮中心始终位于日地的联线上，而火星、木星、土星这三颗行星与本轮中心的连线始终与日地连线平行，前者用以说明水星和金星只能出现在黄昏后和黎明前的现象。

(4) 日、月、行星除了作这样复杂的轨道运动外，还跟随恒星一起每天作东升西落的周日运动。

如上所述，托勒玫对古希腊的科学作出了很大的贡献，不愧是一个伟大的天文学家。他总结的地心体系中天体是按固有的

规律运动的，否认了上帝的自由意志。他也反对灵魂不朽和大地平直的观点，因此在很长一段时期中托勒玫的著作是教会所不容的禁书。公元1029年罗马教会又严厉查禁了一次亚里士多德及托勒玫的书籍，并在翌年把十多名相信地球为球形的青年学生送上了火刑架。直到1215年教廷还再次重申禁止在大学中教授托勒玫学说，任何人都不得抄录、阅读或保存亚里士多德的著作。

格里果里九世当了教皇后，这种一味镇压的局势发生了微妙的变化。这是一个颇有心计的统治者，他积极鼓励神学家们去研究亚里士多德和托勒玫的著作，以便对它们进行改头换面的删节、阉割，再塞进圣经、神学中的一些说教，使之与教义并行不悖。经过他们精心的多次改造后，原来具有进步意义的科学理论变成了支持神学的“理论支柱”。洪水猛兽般的禁书变成了必读的“范本”。他们强调：地球居于宇宙的中心决不是偶然的，这是因为“上帝”既然按照自己的形像创造了“人”，就一定会把他们放到宇宙中心去管理天地万物，在宇宙图像中又加进了“晶莹天”、“净火天”成为上帝和众神栖息的天堂……。

从此，长眠了一千多年的托勒玫成为“偶像”、“圣人”。地心说变为必须信奉、不容亵渎的金科玉律，人们唯一可以做的事情是在这个宇宙图像的基础上，如在本轮上添加更小的“二级本轮”、“三级本轮”……，以便修补日渐显露出的破绽而已。科学被宗教操纵、介入后必然成为束缚一切进步思想的紧箍咒，扼杀先进事物的刽子手，尤其是当十五世纪欧洲资本主义开始萌芽、发展的时刻，地心说的反动性更加日益突出了。

三、日心体系及其胜利

即便在远古时代也有许多真知灼见者，中外科学史上都不乏这种很有远见的先哲。我国早在战国时代，庄子和尸佼都提出过“地动”的观点。西汉末年成书的《尚书纬·考灵曜》中更明确指出：

“一年之中地有四游”。并以例作证：“地恒动不止，而人不知，譬如人在大舟中，闭牖而坐，舟行不觉也。”令人拍案叫绝的是这与一千多年后哥白尼提出日心说时举的例证几乎是不谋而合。

在古希腊柏拉图之前的菲洛劳斯(Philolaus)就提出过地球与其他天体都在绕一个“宇宙的炉灶”转动的观念。古代原子论创造者德谟克利特(Democritus)除了提出“宇宙无限”外，还论证了太阳远大于地球；到公元前三世纪时，另一个伟大的学者阿利斯塔克不仅已经知道了太阳远比月球更远，还从日、月食算出地球的直径约是月球的 $7/2$ 倍，因而太阳应比地球大5、6倍。他还相信，大的物体不应当绕小物体转。因此，于公元前270年，他提出了人类最早的“日心说”，主张地球一方面每天自西向东地自转一周，同时又在每年绕太阳公转一周；其他行星也在绕太阳公转，与地球绕太阳的轨道直径相比，恒星的距离要远得多。

遗憾的是阿利斯塔克的光辉思想远远超出了他所处的时代，两千多年前的科学技术水平还不能为他的理论提供足够的观测证据，这种思辨性的正确结论反而经不起与地心说的论争，而因被托勒玫嘲笑为“滑稽可笑的”。

但是，事实毕竟是地球在绕太阳转。随着生产的发展、观测水平的提高，主观杜撰出来的地心说也日见其拙。尽管不时有人不断地加进一个个小本轮，乃至到哥白尼时代，纵横交叉的圆圈竟达79个，已经到了令人头晕目眩的程度，但仍然是顾此失彼，预报的行星位置及天象屡屡失灵。哥白尼经过“四个9年”的埋头研究，确信这个体系“不是忽略了一些必不可少的细节，就是塞进了毫不相干的东西”，非得重起炉灶不可。

在他的学生和朋友的鼓励和支持下，哥白尼同意把自己的研究著书出版。公元1543年，科学史上划时代的巨著——《天体运行论》出版了(图5.4)，尽管成书于5月24日送到他家时，他已奄奄一息，仅仅触摸了一下就与世长逝了，但书中提出的日心体系却是科

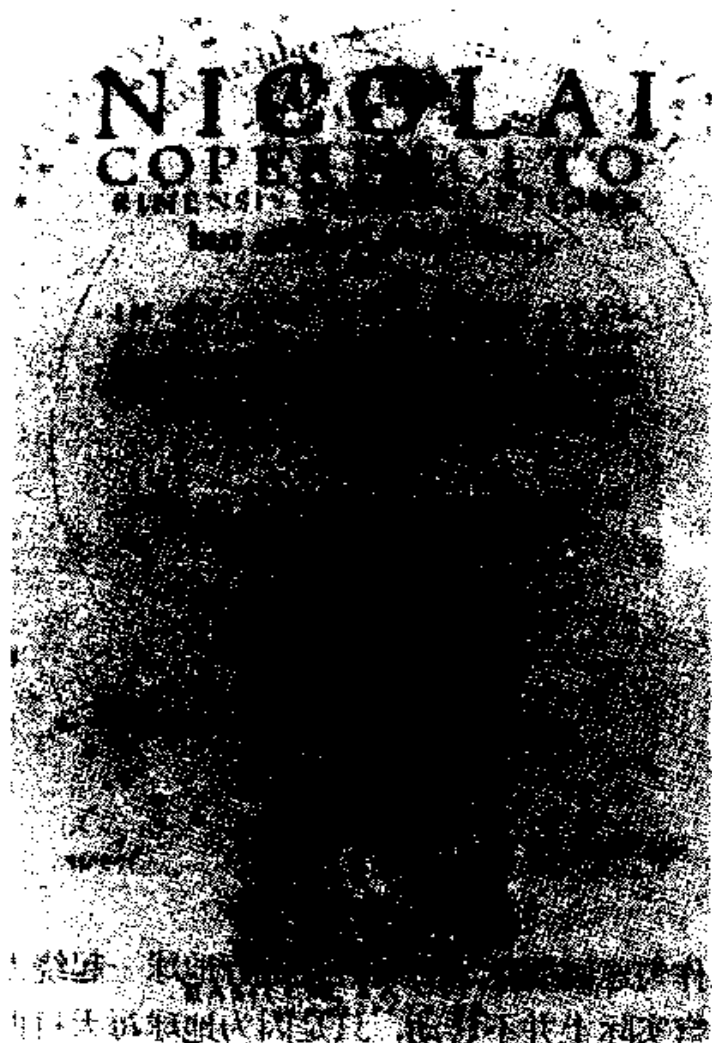


图 5.4 哥白尼的巨著《天体运行论》

学史上一场伟大的革命。

《天体运行论》全书共六卷，第一卷“宇宙概观”是其理论精华，它包含了日心说的基本论点：

(1) 宇宙的中心不是地球而是太阳，所有行星都在绕太阳作匀速的圆轨道运动，由太阳向外的次序是：水星、金星、地球、火星、木星、土星(图5.5)。

(2) 地球是绕太阳转的普通行星，月球则是绕地球转的卫星，

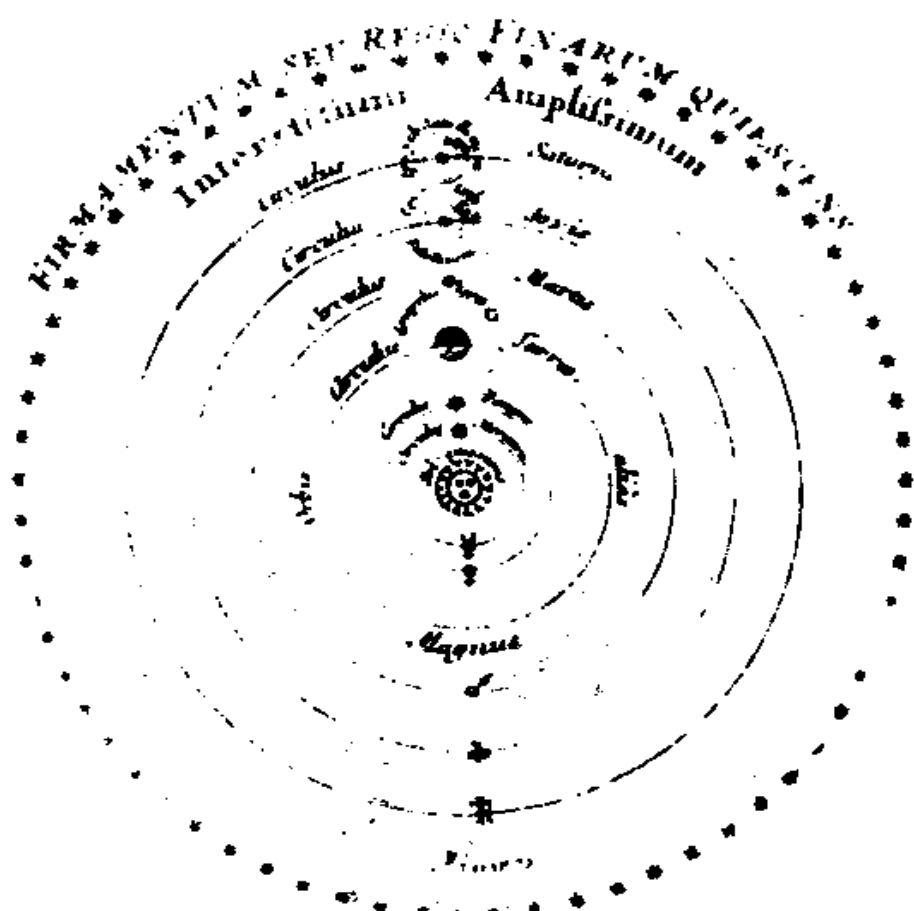


图 5.5 哥白尼的日心体系

它在绕地球作匀速圆周运动的同时又跟着地球一起绕太阳运动。

(3) 天穹实际上并不转动，只是因为地球每天自西向东自转一周才造成了天体每天东升西落的视现象。

(1) 与日地的距离相比，恒星离地球都十分遥远。

尽管哥白尼在书中提出的这些观点在今天看来有许多明显的错误之处，但瑕不掩瑜，丝毫不影响其划时代的革命作用。《天体运行论》是科学向神学的宣战书，正如恩格斯 (F. Engels) 指出的那样：“从此自然科学便开始从神学中解放出来”开始“大踏步地前进”了。

然而，哥白尼的日心说的发展却经历了相当曲折的道路。来

自教会封建势力的攻击是不言而喻的,他们恐惧科学真理的传播,采取了赤裸裸的高压白色恐怖:查禁哥白尼的著作,搜捕相信“异端邪说”的“危险分子”,烧死布鲁诺(G. Bruno)、审讯伽利略……,无所不用其极。更值得吸取教训的是:哥白尼学说还受到了旧习惯势力的顽固阻挠。人们在感情上对“地球”在宇宙中地位的降低极为反感,对与直观相抵触的理论也感到大惑不解,连哥白尼的家乡也对日心说冷嘲热讽,甚至还有人编写了讽刺哥白尼的话剧演出,旧的习惯势力使象第谷、乔·卡西尼那样第一流的天文学家也扮演了反对日心说的不光彩角色。

哥白尼逝世后不久,伽利略从望远镜里发现了木星有4个卫星、金星的位相变化、太阳表面上的黑子运动……,这些都为日心说提供了无可争辩的观测依据。与伽利略同时代的德国天文学家开普勒发现了行星运动三大定律,从理论上论证并改进了日心体系。牛顿发现的万有引力定律则为日心说奠定了坚实的理论基础。1725—1728年,英国天文学家布拉得雷发现的光行差即是地球公转的第一个直接观测证据。1837—1839年,德国贝塞尔、英国亨德森、俄国瓦·雅·斯特鲁维先后独立地分别测得了天鹅61、半人马 α 及织女星的视差,攻克了地心说的最后营垒。1846年,二个年轻人约翰·亚当斯和勒威耶用纸和笔发现了第八颗行星海王星。从此,日心体系成为真正的科学理论体系,哥白尼的学说终于取得了彻底的胜利,成为今天妇孺皆知的常识。1983年,罗马教廷也不得不承认,十七世纪宗教裁判所对于伽利略的审判是错误的,宣布为350年前的错案“平反”。

§ 5.2 行星的视运动

在地球上看来,行星除了参加东升西落的周日运动外,它们

还在恒星之间不断游移。若以恒星作为背景，行星的行径显得十分复杂而奇怪(图5.6)，多数时间内按自西向东的方向(即赤经逐日增加)运动——“顺行”，但总有一段时间表现为反向的自东向西运动(赤经减小)的“逆行”运动，而且它们每天移动的速度也时时在变化着。在从顺行变逆行或逆行变顺行中间，会表现为“留”，在留的几天时间内，行星的赤经、赤纬几乎不变。

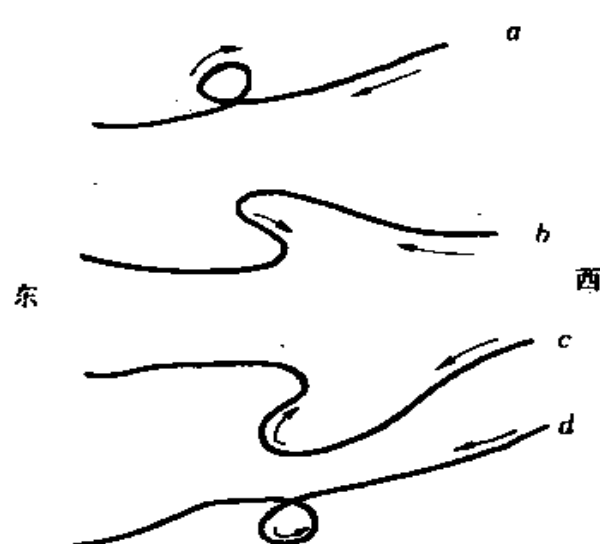


图 5.6 行星的几种视运动路径

行星这种视运动的根本原因是因为九大行星都在几乎同一平面上，以相同的方向绕太阳作公转，或者说是地球与行星公转运动的合成。然而古代人们却对此困惑不解。在一定程度上可以认为，天文学家和星占家为了解释行星的视运动、预报行星的未来位置，才促使了古代天文学的不断发展。

一、内行星的视运动

习惯上常把位于地球轨道之内的两颗行星——水星、金星——称为内行星，而把地球轨道之外的六颗行星称为外行星。

由图5.7可知，内行星与太

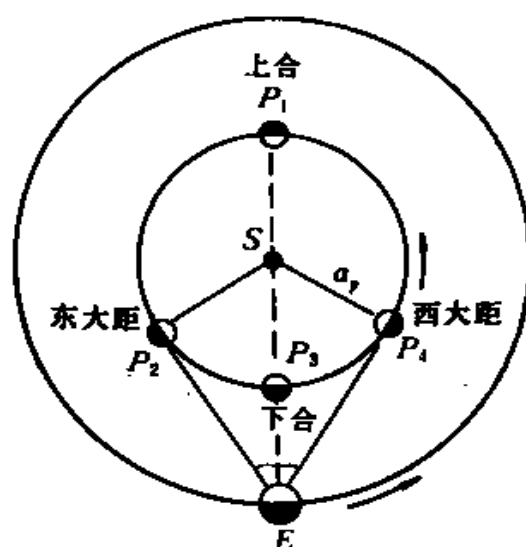


图 5.7 内行星的视运动特征

S——太阳，P——内行星，E——地球

阳的黄经差不会很大,或者说它们始终只能在太阳的周围“徘徊”。

1. 上合和下合 如图5.7,当行星处于 P_1 及 P_3 位置即 $\lambda_p = \lambda_\odot$ 时,内行星与太阳的黄经相等,称之为“合日”。 P_1 与地球分处太阳两侧,离地球最远,称之为“上合”, P_3 则称为“下合”。

由于它们的黄经相等,在此时刻及其前后,内行星与太阳一起升降,因而一般说来,在合日时人们是观测不到行星的。

2. 东大距和西大距 合日后,行星渐渐离开太阳,角距日渐增大。如上合之后,内行星慢慢跑到太阳的东侧,即 $\lambda_p - \lambda_\odot$ 值逐渐增大。或下合后,它逐渐跑到太阳的西边天空, $\lambda_\odot - \lambda_p$ 逐渐增大。当两者的黄经差达最大时,即称为“大距”, P_2 称为东大距, P_4 称为西大距。

显然,在大距时,太阳、内行星及地球构成一个直角三角形。因此,理论上它的大距角可由下式算得:

$$\text{大距角} = \sin^{-1}\left(\frac{a_p}{a_\oplus}\right) \quad (5.1)$$

考虑到内行星及地球的实际轨道都是椭圆,所以大距角的值不是常数,水星在 $18^\circ - 28^\circ$ 之间,金星在 $45^\circ - 48^\circ$ 之间。

3. 顺行 由于行星的视运动是地球和行星公转运动的合成,所以在上合前后相当长的时间内,行星表现为顺行,而且顺行的速度在上合时达到极大(正是地球公转速度与行星公转速度的相加)。以后顺行的速度日渐变小,经过东大距之后慢慢减小到零。

4. 逆行 在下合前后,从地球上看来,内行星的运动方向是自东向西,表现为逆行,而且由于投影的效应,下合时刻逆行的速度达到极大(正是行星公转与地球公转运动的速度差)。由图5.8可知,内行星的逆行仅是当它们在II—IV之间,因而在天球上逆行的路程都比顺行短得多。

5. 留 在内行星经过东大距之后以及未到西大距之前,有二个特定的位置II、IV,内行星与地球合成运动的方向正好落在视

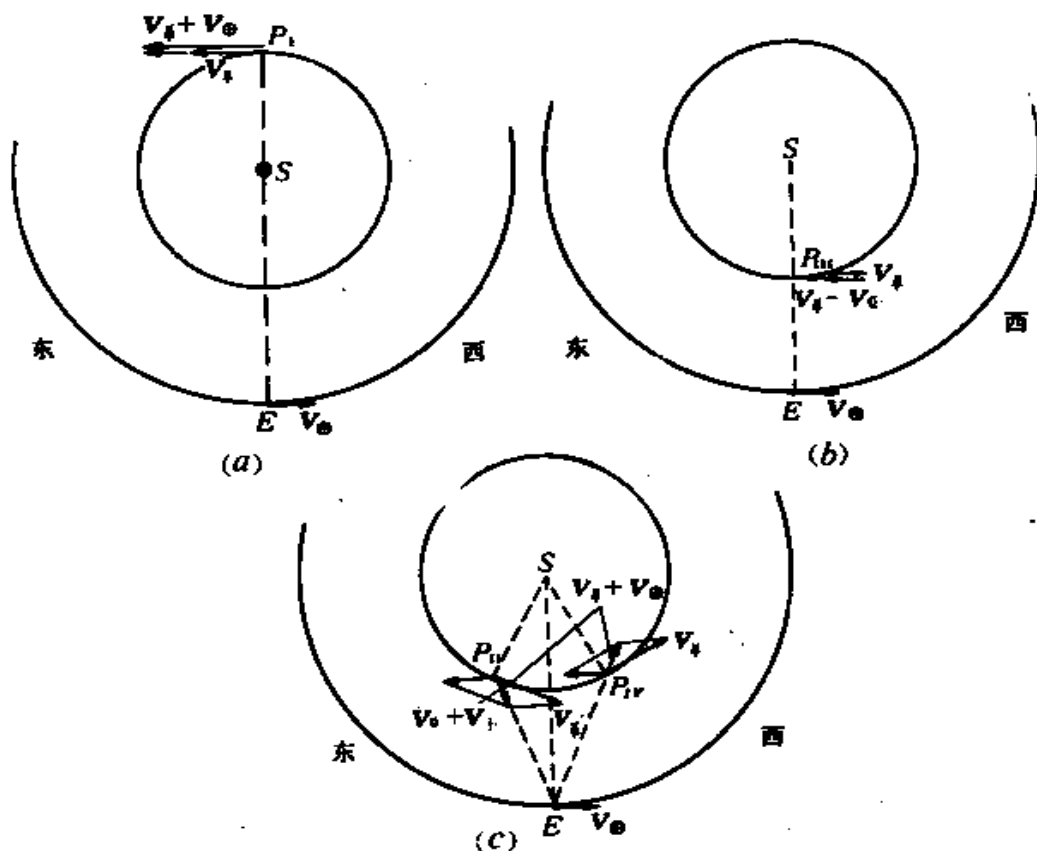


图 5.8 行星视运动是行星与地球公转的合成(内行星):
(a) 上合时顺行速度最大; (b) 下合时逆行速度最大;
(c) P_1 、 P_2 处合成的运动在视线方向表现为留

线方向。因而它们在天穹中的视位置并不变化。留是顺行转向逆行或逆行变为顺行的转折点, 而在留的前后, 行星在天球上的视运动速度也是很小的。

长期观测表明: 金星的留发生在 $|\lambda_{\text{金}} - \lambda_{\odot}| \approx 29^\circ$ 处, 水星的留发生于 $|\lambda_{\text{水}} - \lambda_{\odot}| = 11^\circ - 13^\circ$ 之间。

6. 昏星和晨星 由图5.7可知从上合 P_1 到下合 P_2 的半周内 $\lambda_p - \lambda_{\odot} > 0^\circ$, 即内行星始终位于太阳的东边, 因此只有在太阳西沉后, 它们才有可能出现在西方地平附近, 而且不久后即没入地平之下, 所以仅表现为黄昏可见的行星——昏星。显然, 距角越大, 它出现时的地平高度越大, 在昏夜中逗留的时间也越长。

同理可知，在从下合 P_3 到上合 P_1 的半圈内， $\lambda_p - \lambda_\odot < 0^\circ$ ，内行星始终位于太阳之西。所以，只有当早晨太阳未升起的黎明之前，才有见到它的可能，故称之为晨星。同样，达到西大距时，它的地平高度最大，逗留的时间最长。

由于水星的大距角较小，地球大气造成的晨昏蒙影^①作用，加上城市灯光、大气污染、地面建筑物或地形本身的限制，使人们凭肉眼很难观测到水星。

7. 位相变化 行星本身不发可见光，因此当它与地球的相对位置发生变化时，便会出现不同的位相(图5.9)，在下合前后，地球上看到的内行星相当于朔时的“新月”。在上合附近，其位相类似于望的“满月”，而大距时的位相相当于“弦”(东大距相当于上弦，西大距相当于下弦)。

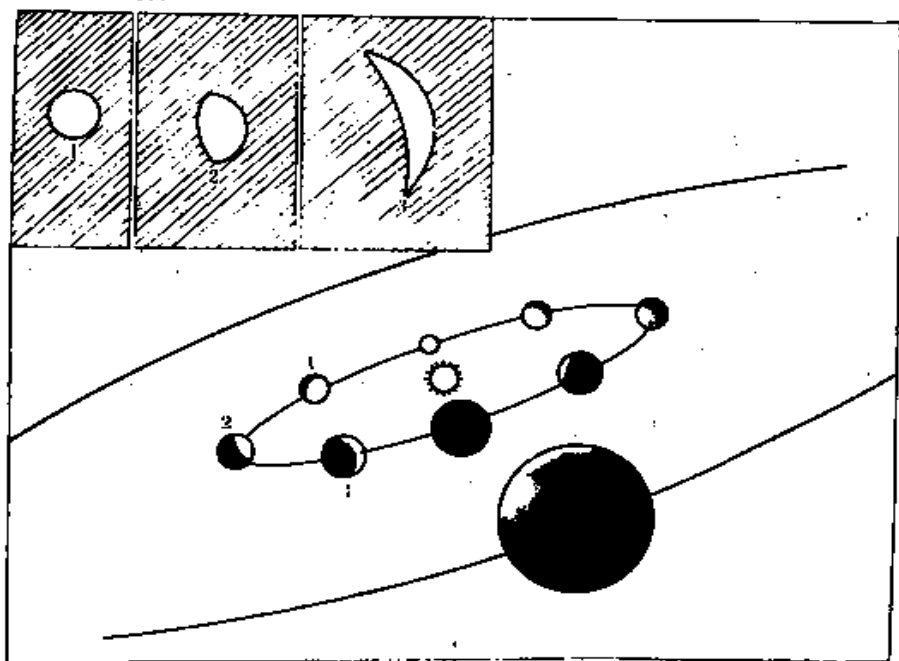


图 5.9 内行星的位相

① 由于地球大气对太阳光的散射作用，太阳在升起之前和降落之后，天空仍然相当明亮，这称之为晨昏蒙影。一般规定，民用晨昏蒙影指 $h_\odot$ 在 $0^\circ - 6^\circ$ 之间，即日出前及日落后半小时，天文晨昏蒙影则是指 $h_\odot$ 在 $0^\circ - 18^\circ$ 间。

1610年,伽利略用望远镜发现了金星的这种独特的位相变化,并用以作为日心说最有力的观测证据之一。

当然,内行星的位相毕竟与月相有不同的特点。首先,“弦”(大距)离“朔”(下合)的时间比离“望”(上合)的时间短得多,同时因为内行星与地球的距离时时不同,所以在不同位相时的视圆面角径有很大的差别。例如,“新月”状的金星角直径可达 $64''$,而“满月”状的金星视直径仅只 $10''$ 左右,前者是后者的6.4倍。第二,金星的位相的顺序是:“新月”、“下弦”、“满月”、“上弦”,而与月相变的顺序不一样。

内行星的视亮度也时时在变化着。在“望”时因为距离最远,而最近时又恰值“朔”,所以它最明亮的时刻既不在上合、下合,也不在大距,而是在大距和留之间的某一时刻。

二、凌日

内行星凌日实际上是一种交食现象,只是由于 $\rho_p \ll \rho_\odot$,视直径相差很大才使得凌日表现为太阳圆面上出现一个缓缓移动着的小黑点而已。也正因为如此,凌日现象到很迟时才为人们所了解和观测。

由于内行星的轨道平面与黄道面并不重合,故合时虽有 $\lambda_p \simeq \lambda_\odot$,但一般情况下此时两者的黄纬并不相等,所以凌日是罕见的天象之一。实际上,只有当下合时候,地球和内行星恰好又位于它们轨道的交点附近,三个天体才会真正成为一直线,而发生这种天象。例如,地球经过水星轨道的升交点在11月10日前后,经过其降交点是在5月8日左右,因此水星凌日只能发生于5月8日和11月10日前后。同样,金星凌日也只发生在6月7日及12月9日附近,这分别是地球通过金星轨道升交点和降交点的日子。

根据长期观测统计,水星凌日平均每100年发生13次,金星凌日的机会更加稀少,约243年内共四次(表5.2)。

表 5.2 内行星凌日

水				金			
升交点凌日时间	与上次相 距年数	降交点凌日时间	与上次相 距年数	升交点凌日时间	与上次相 距年数	降交点凌日时间	与上次相 距年数
1907年11月13日 1914年11月7日	7年			1631年12月6日 1639年12月4日	8年		
		1921年5月7日	9.5年			1761年6月5日 1769年6月3日	121.5年 8年
1927年11月10日	3.5年						
		1937年5月11日	9.5年	1874年12月8日 1882年12月6日	104.5年 8年		
1940年11月12日 1953年11月14日	3.5年 13年					2004年6月8日 2012年6月6日	121.5年 8年
		1957年5月6日	3.5年				
1960年11月7日	3.5年			2117年12月10日 2125年12月8日	104.5年 8年		
		1970年5月9日	9.5年				
1973年11月10日 1986年11月13日 1999年11月15日	3.5年 13年 13年					2247年6月11日 2255年6月8日	121.5年 8年

观测凌日具有一定的科学价值。十七世纪时,英国天文学家哈雷曾经提出过利用不同地方金星凌日的观测资料,可以测定比较准确的日地距离值。俄国学者罗蒙诺索夫巧妙地利用了发生于1761年的金星凌日机会,证明了金星上存在有大气——这是其他行星也可能具有大气的第一次证明。

三、外行星的视运动

外行星的视运动有许多特征与内行星类似,如大多数时间内顺行,少部分时间逆行,并在其间也经过两次“留”。它们同样也有“上合”的时刻,而且合日前后亦是顺行的阶段。然而,它们毕竟与内行星还有不同之处。

1. 方照 外行星的轨道都在地球之外,所以不会有大距的限止,即是说 $\lambda_P - \lambda_\odot$ 可在 $0^\circ - 360^\circ$ 间取任何值。因而不存在大距的时刻,与此相似的则是“方照”(图5.10)方照时也构成了直角三角形,但是位于直角顶点的是地球。

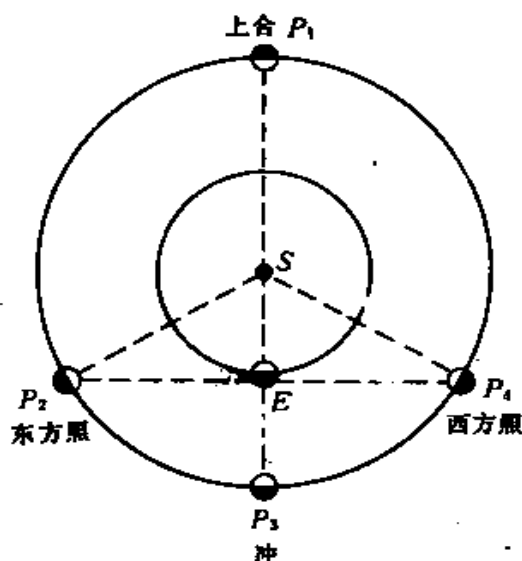


图 5.10 外行星的视运动特征,
S——太阳, E——地球, P——外行星

当行星处于 P_2 时,称之为东方照。在这时,行星的黄经比太阳大 90° ,太阳降落后行星在中天附近,故而它总是上半夜出现在西部的天空。

西方照(P_4)时有 $\lambda_P - \lambda_\odot = 270^\circ$ 或 $\lambda_\odot - \lambda_P = 90^\circ$,这时的行星始终在太阳西 90° 处,所以它在太阳下中天(子夜)时从东方地平升起,而在太阳东升时它正中天。即在它达到最高的位置时消失在晨曦中。

2. 冲日 与内行星下合相当(P_3)的位置是冲日, 简称冲。冲日时, 外行星整夜可见, 离地球更近, 是观测它们的大好时机。火星的轨道偏心率较大, 倘冲日又恰逢它处于近日点附近, 则称它为大冲。一般说来火星每隔15—17年发生一次大冲, 但也有连续两次冲日均为大冲的, 例如1986年7月及1988年9月的两次冲日均为大冲。

值得指出的是, 冲日和离地球最近是两个不同的概念, 前者是外行星与太阳黄经差为 180° 的时刻, 但因为行星轨道面与黄道面并不重合, 所以冲日时一般都不是最近时刻, 例如1986年和1988年火星的冲日(大冲)分别发生于7月10日和9月27日, 但与地球距离最近的时间却分别是7月16日和9月22日, 有五六天之差。

由于除了火星以外其他外行星轨道都离太阳很远, 因此外行星几乎总是呈现为“望”似的圆面, 而没有什么位相的变化, 仅仅对于火星在方照附近时才会略略显示为有些“凸月”似的大半个圆面。

还有一个重要不同是在上合后, 内行星是走到太阳的东边, 而外行星却是跑到太阳的西边, 并先达到西方照, 其原因有二: 一是地球的公转周期比外行星短, 二是地球的轨道速度比外行星快。

四、会合周期

众所周知, 行星绕太阳的公转周期称为恒星周期, 如地球绕太阳一圈的时间为365.2564日, 这个长度称为恒星年, 恒星年既不同于回归年(365.2422日)也不同于历年(365.2425日)。

在地球上人类所见到的行星运动都是它们与地球公转运动的合成, 所以行星连续两次合日(或外行星的冲日时刻)的时间间隔既不是地球的公转周期, 也不是行星的公转周期, 而是一种“会合周期”。

不难推导会合周期 S 、地球公转周期 E 、行星公转周期 P 三者之间的相互关系, 这与朔望月、恒星月、恒星年之间的关系有

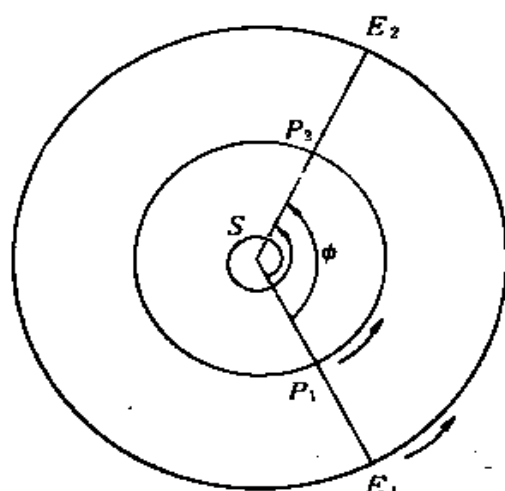


图 5.11 会合周期(内行星)
S——太阳, E——地球, P——内行星

不少类同之处。

以内行星为例 (图5.11), 第一次下合发生在 E_1, P_1 , 到内行星第二次下合 E_2, P_2 时, 地球走过了 $\angle E_1 S E_2$, 但行星却走了 $360^\circ + \angle P_1 S P_2$ 。

近似地把它们的轨道看作同一平面上的两个圆, 则有:

$$\frac{360^\circ}{E} \cdot S + 360^\circ = \frac{360^\circ}{P_{\text{内}}} \cdot S \quad (5.2)$$

整理并化简(5.2)式, 不难得到会合周期 S :

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P_{\text{内}}} - \frac{1}{E} \quad (5.3)$$

对于外行星类似的公式是

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{E} - \frac{1}{P_{\text{外}}} \quad (5.4)$$

(5.3)与(5.4)式中的 $P_{\text{内}}$ 、 $P_{\text{外}}$ 分别是内行星和外行星的公转周期。

当然实际上行星的轨道都是椭圆, 也并不共面, (5.3)和(5.4)式都是不严格的, 但由于行星轨道的偏心率及倾角一般都不太大, 因而一般情况下, 上二式均可使用。中国古代很早测定了一些行星的“会合周期”, 在马王堆出土的《五星占》中就列出了金星、木星、土星的会合周期(表5.3)。

表 5.3 中国 2000 多年前测得的行星会合周期(天)

	金星	木星	土星
古测值	584.4	395.41	377
今测值	583.92	398.88	378.09

§ 5.3 行星和卫星的轨道

从力学定律可以证明,两个天体在万有引力作用下互相绕转的轨道是圆锥曲线——椭圆、抛物线或双曲线。天文学上把仅考虑中心天体和绕转天体互相作用的运动叫作二体问题。

在空间运动着的行星、小行星和卫星,在一般情况下都可简化为这种二体问题来处理。它们的轨道基本上都是椭圆,而要在空间完全确定绕转体的运动状况需要若干个独立量——轨道要素。

一 轨道要素

行星或卫星的轨道要素也称“轨道根数”,它包括如下六个量:

(1) 轨道倾角(i):通常行星或卫星轨道所在的平面(轨道面)与黄道面并不重合,这两个平面的夹角称之为轨道倾角 i ($i < 180^\circ$)。

天文学上规定,当天体是自西向东运动时有 $i < 90^\circ$,反之,当天体向西运动则有 $i > 90^\circ$ 。九大行星的轨道倾角都较小,所以都是“顺行”的,已发现的三千多颗小行星和绝大多数卫星的倾角也都满足 $i < 90^\circ$,但也有少数卫星和相当多的彗星 $i > 90^\circ$,它们绕太阳运动的方向与九大行星相反,是逆行的。

(2) 升交点黄经(Ω):一般讲来行(卫)星轨道与黄道面有两个交点,行(卫)星由南向北穿过黄道面的交点称为升交点,与此相对的另一交点称为降交点。升交点黄经是指升交点从春分点起算的日心黄经。

在 i 和 Ω 确定之后,行(卫)星轨道面的空间位置也就完全确定了(图5.12)。

(3) 半长径(a):轨道半长径即是绕转体与中心天体的平均

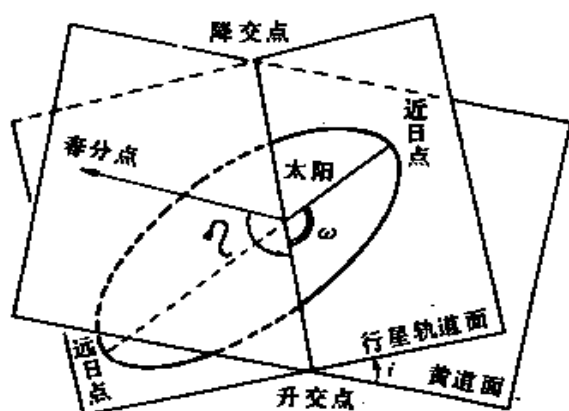


图 5.12 行星轨道要素

距离，它决定了轨道的大小范围。九大行星的 a 相差很大，最近的水星 $a_M = 0.387$ 天文单位，而最远的冥王星 $a_P \approx 40$ 天文单位。

行星运动定律发现后，人们又知道半长径 a 与公转周期 P 有一一对应的函数关系。

(4) 偏心率(e): a 只能决定轨道的大小，不能表示它的扁度。表示椭圆形状的要素是偏心率 e ，从解析几何可知 $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ ，显然 $e = 0$ 时，即为圆； e 越大， a 、 b 相差越大，即椭圆越扁长；当 $e = 1$ 时，则椭圆不再封闭，成为抛物线； $e > 1$ 时，则圆锥曲线又演变为双曲线，在彗星世界中，有许多彗星 $e > 1$ 。

(5) 近日点黄经(π): a 和 e 决定了太阳系天体轨道的大小和形状，但椭圆的具体“方位”还需要另一个量——近日点黄经 π ——来决定。它也表示了椭圆长轴在轨道面内的方向。

有时也用另一个独立量——近日点角距 ω 作为第五轨道要素。这是从升交点开始，在轨道平面上沿行星运动方向度量的角。显然， ω 和 π 是两个相关的量，但 ω 更直观。

此外，还有一些人甚至用二个异面角 $\mathcal{N} + \omega$ 来表征第五轨道要素。

(6) 过近日点时刻(τ_0): 虽然上述五个轨道要素已能唯一地把行星轨道的空间位置完全确定了，但运动总是与时间相关联的，预报和观测都与时间密切相关。因此， τ_0 即是轨道的第六个要素，只有确定了行星过近日点的时刻 τ_0 ，人们才能用算出的轨道去预

报它未来时刻的位置，或者追溯它过去的行踪。

τ_0 对于小行星和彗星同样是十分重要的轨道根数。对于卫星而言， τ_0 是指过近行星点的时刻。

二、行星和卫星轨道的一般特征

现代天体演化理论认为太阳系天体都有类似的起源方式和演化途径。因而，九大行星和许多卫星的运动轨道特性必有许多雷同之处。

(1) 同向性：太阳系中所有行星、小行星绕太阳运动的方向都是自西向东——逆时针方向，大多数卫星绕行星的运动方向也是如此，而且太阳系的中心天体太阳的自转方向，除了金星和天王星外的其他大行星的自转方向也都是自西向东的，这种现象天文学上称之为同向性。

(2) 共面性：从表5.4中可看出九大行星的 i 都不太大，除了与太阳最近的水星及最远的冥王星外，其他行星的 i 几乎都在 3° 以下，因而实际上它们的轨道平面几乎与黄道平面相差无几。如果考虑到太阳系天体的运动特性以“不变平面”^① 代替黄道面，倾角则更小(表5.5)。人们把这种特性称为“共面性”。

(3) 近圆性：从表5.4还不难看出大行星轨道 $e < 0.1$ (除水星、冥王星之外)。因而实际上它们的轨道与正圆相差无几，正因为如此，哥白尼当年以圆轨道匀速运动来计算和预测行星的运动也可以达到一定的精确度。

在卫星世界中，绝大部分卫星绕行星的轨道偏心率甚至比行星更小。

一般认为，行星和卫星轨道上述的三个特性决非是偶然的巧合，而是共同起源和长期演化的必然结果。

① 不变平面是通过太阳中心与太阳系总角动量矢量垂直的平面。

表 5.4 九大行星的轨道要素

行星	轨道倾角 i ($^{\circ}$)	升交点黄经 Ω ($^{\circ}$)	半长径 a (天文单位)	偏心率 e	近日点黄经 ϖ ($^{\circ}$)	1980年底前过近日点日期
水星	7.0	48.1	0.387	0.206	77.2	1980年11月9日
金星	3.4	76.5	0.723	0.001	131.2	1980年11月6日
地球	0.0		1.000	0.017	102.6	1980年1月3日
火星	1.9	49.4	1.524	0.093	335.7	1979年3月18日
木星	1.3	100.3	5.205	0.048	13.9	1975年8月7日
土星	2.5	113.5	9.576	0.055	92.5	1974年1月8日
天王星	0.8	74.0	19.28	0.051	172.4	1966年3月20日
海王星	1.8	131.5	30.13	0.006	46.4	1876年9月2日
冥王星	17.1	110.0	39.87	0.256	223.1	1741年10月24日

表 5.5 大行星的轨道平面对不变平面的倾角

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
与黄道面倾角	7 $^{\circ}$	3 $^{\circ}$ 24'	—	1 $^{\circ}$ 51'	1 $^{\circ}$ 18'	2 $^{\circ}$ 29'	0 $^{\circ}$ 46'	1 $^{\circ}$ 46'	17 $^{\circ}$ 10'
与不变平面的交角	6 $^{\circ}$ 17'	2 $^{\circ}$ 10'	1 $^{\circ}$ 37'	1 $^{\circ}$ 12'	0 $^{\circ}$ 23'	0 $^{\circ}$ 57'	1 $^{\circ}$ 06'	0 $^{\circ}$ 46'	15 $^{\circ}$ 34'

三、提丢斯-波得定则

行星在太阳系内的分布是有一定的规律，还是完全随机分布的？这是人们很早就一直在努力探索、至今尚有争议的问题。开普勒在年青时就醉心于研究“宇宙谐和”即行星离太阳距离的规律问题，还提出过一个正多面体的宇宙模式。

开普勒以后，不少人继续潜心研究。1766年德国一位中学教师提丢斯在翻译一本荷兰文著作《自然的探索》时煞费苦心地加进了一个不署名的脚注，阐述了他对行星距离的研究结果：

“如果把土星的距离看作100，则水星为4，金星为 $4 + 3 = 7$ ，地球为 $4 + 6 = 10$ ，火星为 $4 + 12 = 16$ ，然后跳过一个空隙($4 + 24 = 28$)，木星 $4 + 48 = 52$ ，土星 $4 + 96 = 100$ ”。

1772年，年青的德国柏林天文台台长波得(J. E. Bode)见到了提丢斯的再版译作，并几乎原封不动地把这规律搬进他的《星空研究指南》一书，他还总结出—个经验公式：

$$a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2} \quad (5.5)$$

由于波得的“疏忽”，这个规律长期以来被人不恰当地称之为“波得定则”。

对行星距离规律的研究导致人们去寻找位于火星、木星之间的未知行星。1781年，威廉·赫歇耳发现了第七颗行星天王星，它与太阳的距离正好处于提丢斯-波得定则延伸出去的位置附近： $0.4 + 19.2 = 19.6$ ，这就更加激起了人们寻找未知行星的巨大热情，1801年意大利天文学家皮亚齐(G. Piazzi)果然发现了第一颗小行星。

然而天王星及小行星的发现并没有使“距离是否有规律”的争论平息下来，尤其是1846年发现的海王星和1930年发现的冥王星并不符合(5.5)式，不免仍叫人疑窦重重。

不同意见的争鸣是推动科学发展的动力。提丢斯-波得定则的

表 5.6 木卫系统

卫星名	轨道半长径 a (10^3 千米)	β
木卫十五	129.0	
木卫五	181.3	1.41
木卫十四	221.9	1.22
木卫一	421.6	1.90
木卫二	670.9	1.59
木卫三	1070	1.59
木卫四	1880	1.76

表 5.7 土卫系统

卫星名	轨道半径 a (10^3 千米)	β
土卫十	151.47	
土卫一	185.54	1.22
土卫二	238.04	1.28
土卫三	294.67	1.24
土卫四	377.42	1.28
土卫五	527.04	1.40
土卫六	1221.86	2.32
土卫七	1481.1	1.21

表 5.8 天卫系统

卫星名	轨道半长径 a (10^3 千米)	β
天卫五	129.4	
天卫一	191.0	1.48
天卫二	266.3	1.39
天卫三	435.9	1.64
天卫四	583.9	1.34

支持者提出了多种不同形式的经验公式，使问题得到了深化，并逐渐揭露出它蕴含着的物理意义。目前更常用的一种经验表达式为：

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} \simeq \beta, \quad (5.6)$$

式中的 β 为常数，以后又有人指出：这是一个与相应的行星质量有关的“常数”。

耐人寻味的是，在一些卫星系统中也可以找出类似的规律（表 5.6—5.8）。

从表中可以看出： $\frac{a_{n+1}}{a_n}$ 的值对于同一卫星系统虽然还有涨落，但若考虑到质量因素，这个偏离将进一步减小。这表明，距离定律的确是有其物理意义的。事实上，许多现代太阳系起源新星云说中都力图对这定则作出论证和说明。

四、规则卫星和不规则卫星

由于空间探测的成果，使人们已知的卫星数目在最近几年增加很快。在八十年代以前，公认的卫星数仅 33 颗，但现在已经超过了 60 颗。

卫星世界比行星更加丰富多采，它们在大小、形状、轨道等方面的差异也超过了行星。一些大的卫星如木卫三、土卫六、海卫一等，其半径超过了冥王星，最大的甚至比水星还大。轨道的倾角多数很小，但也有 6 颗卫星很奇特，是反方向绕行星转动的，故称它们为逆行卫星。如土卫九轨道平面与土星赤道面的交角 $i = 175^\circ$ 。就轨道的形状而言，有 $e = 0$ 的圆形轨道（如海卫一），也有 $e = 0.38$ 的卫星（木卫八）。

通常把那些分布符合距离定律、轨道倾角很小、偏心率不大的卫星称为“规则卫星”。例如，在表 5.6—5.8 中所列出的 20 多颗卫星，它们的 $e < 0.1$ （不少还小于 0.01）， $i < 4^\circ$ （个别的如天卫五

约为 4°), 因而显然都属规则卫星。

有些卫星或者轨道倾角较大 (甚至大于 90°), 或者偏心率较大, 而且它们与行星的距离也无明显的规律可寻, 则可把它们列入“不规则卫星”之列。例如, 火卫一、火卫二、木卫十三、木卫六、木卫十、木卫七、土卫八、土卫九等便是不规则卫星。

还有一些卫星, 如月球则既不属规则卫星, 也不属不规则卫星。

现在天文学家一般认为, 规则卫星与不规则卫星可能具有截然不同的起源方式和演化途径。简言之, 规则卫星可能是与行星属于同一团星云物质, 与行星一起形成的。而不规则卫星, 尤其是那些逆行、质量不大、形状不规则的卫星, 则很可能是在行星形成之后, 偶尔闯入行星区而被它俘获的小行星。

§ 5.4 开普勒定律及其应用

德国天文学家开普勒是著名丹麦天文学家第谷的学生和继承人, 他与意大利的伽利略是同时代的两位科学巨人。如果说伽利略首先把天文望远镜指向天穹, 获得了一系列激动人心的新发现, 为哥白尼日心学说提供了生动的观测依据, 开创了“望远镜天文学”的新时代, 那末开普勒则是从理论的高度上对哥白尼学说作了科学论证, 使它更加提高了一大步。他所发现的行星运动定律“改变了整个天文学”, 为后来牛顿发现万有引力定律奠定了基础。开普勒也为后人赞誉为“天空的立法者”。

一、开普勒定律

开普勒根据第谷毕生观测所留下的宝贵资料, 孜孜不倦地对行星运动进行深入的研究。他发现, 根据哥白尼的匀速圆形轨道

算出的行星位置与第谷的记录总有偏差，尤其对于火星而言，误差可能达 $8'$ 。 $8'$ 的数值并不大，尤其是在没有望远镜的时代，但开普勒却以此作为突破口。正是这样一个 $8'$ ，引起了天文学的全部革新！1609年，他出版了《新天文学》一书，提出了轰动天文界的行星运动第一、第二定律：

(1) 行星运动第一定律(椭圆定律)：所有行星绕太阳的运动轨道是椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。

开普勒第一定律把圆形轨道改为椭圆，从而彻底取消了本轮、均轮系统，从根本上改进了哥白尼学说，使理论更加完善。同时，也为以后牛顿发现万有引力定律奠定了基础。

开普勒第一定律也可推广到彗星围绕太阳、卫星围绕行星以及两颗恒星互相绕转的运动。

牛顿力学可以严格证明：在仅考虑太阳引力作用的情况下，行星的轨道面是一个严格的平面，其轨道就是该平面上的圆锥曲线，椭圆是其中一种形式。

如果以极坐标表示行星绕太阳的轨道可写为：

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta} \quad (5.7)$$

式中 p 称为半通径，

$$p = a(1 - e^2),$$

(5.7)式还可推广到抛物线和双曲线(表 5.9)。

表 5.9 圆锥曲线的 a 、 e 、 p

	椭 圆	抛 物 线	双 曲 线
a	> 0	∞	< 0
e	< 1	$= 1$	> 1
p	> 0	$= 0$	< 0

(2) 行星运动第二定律(面积定律)：行星的向径(从太阳中

心到行星中心的连线) 在相等的时间内扫过的面积相等(图5.14)。
这可以表示为:

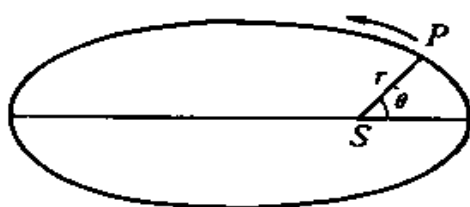


图 5.13 椭圆的极坐标形式

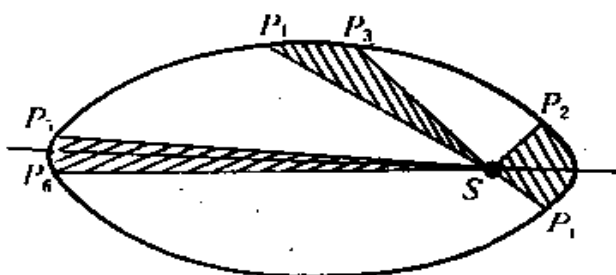


图 5.14 面积定律

$$r^2 \dot{\theta} = h. \quad (5.8)$$

显然, 行星在经过近日点时 r 最小, 故角速度 $\dot{\theta}$ 最大; 在远日点时, 角速度将最小。实际上(5.8)式即是动量矩守恒定律的表达式。

(3) 行星运动第三定律(调和定律): 《新天文学》的成功并没有使开普勒陶醉, 他仍在埋头研究行星距离分布的规律问题。通过十年的辛勤努力, 他终于如愿以偿, 1619年他又发表了《宇宙谐和论》, 书中提出了著名的开普勒第三定律: 行星绕太阳运动的公转周期(P)的平方与它们的轨道半长径(a)的立方成正比。即:

$$\frac{a_1^3}{P_1^2} = \frac{a_2^3}{P_2^2} = \frac{a_3^3}{P_3^2} = \dots = \text{常数}. \quad (5.9)$$

表 5.10 开普勒第三定律的验证

行 星	离太阳距离 a (天文单位)	绕太阳周期 P (回归年)	a^3	P^2
水 星	0.3871	0.24084	0.05801	0.05800
金 星	0.7233	0.61519	0.37840	0.37846
地 球	1.0000	1.0000	1.00000	1.00000
火 星	1.5237	1.8808	3.5375	3.5374
木 星	5.2028	11.862	140.84	140.71
土 星	9.5388	29.457	867.92	867.71

开普勒当初是从具体数字的繁复计算中发现这个规律的(表5.10)。当时他本人并不明白定律所含的深刻物理意义,也不知道(5.9)式中的常数的数值。但即使如此,第三定律立即得到了广泛的应用。因为至少可以利用对天体运动的观测确定其周期,从而求得离太阳的准确距离(与日地距离之比值)。

二、开普勒定律的运用

1. 准确测定行星距离 自古以来,人们都极想了解行星的真实距离,但谈何容易。开普勒第三定律为此提供了一个可靠的方法,若取 a 以天文单位为单位, P 以恒星年^①为单位,则有:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{a_{\oplus}^3}{P_{\oplus}^2} = 1. \quad (5.10)$$

行星的周期 P ,可通过会合周期的测定,即利用(5.3)或(5.4)式求得。

2. 求天体质量 质量是天体最重要的物理参数,而迄今为止利用开普勒定律测定天体质量仍是最可靠、最准确的方法。

牛顿发现万有引力定律以后,揭示了开普勒定律的物理实质。并指出(5.9)式仅是一种近似,因为右端的“常数”实质上是一个与天体质量有关的量。准确的公式(见§16.1)为:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2). \quad (5.11)$$

式中 G 为万有引力常数, M_1 、 M_2 是两个互相绕转的天体的质量。取 $M_1 = M_{\odot}$ 、 $M_2 = m_{\text{行}}$,即是行星系统;若取 $M_1 = m_{\text{行}}$ 、 $M_2 = m_{\text{卫}}$,即适用于卫星系统;对双星则 M_1 、 M_2 就是两颗恒星的质量。

对于太阳系的行星而言, $M_{\odot} \gg m_{\text{行}}$,即使是最大的木星
 $\frac{m_{\text{木}}}{M_{\odot}} \simeq 0.001$,故有

① 在日常生活中,人们习惯用“回归年”作时间单位,所以一般的行星轨道根数表中经过了这种换算,是以回归年作单位的。在精度要求不高时,两者相差无几。

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} M_{\odot}. \quad (5.12)$$

只要测出行星的半长径 a 和公转周期 P , 则不难求出太阳质量 $M_{\odot}$:

$$M_{\odot} = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a^3}{P^2} = 5.917 \times 10^{11} \frac{a^3}{P^2}. \quad (5.13)$$

例如: $a_{\oplus} = 1.496 \times 10^{11}$ 米, $P_{\oplus} = 365.256$ 日 $= 3.15581 \times 10^7$ 秒, 代入 (5.13) 式, 便可算出太阳的质量 $M_{\odot} = 1.9892 \times 10^{30}$ 千克。

类似的方法更广泛运用于求有卫星的行星的质量。显然绝大多数卫星的质量与绕转的行星质量相比都是可以忽略的小量, 因此与 (5.13) 式相似有:

$$m_{\text{卫}} = 5.917 \times 10^{11} \frac{a^3}{P_{\text{卫}}^2} \quad (5.14)$$

当然也可联合 (5.13)、(5.14) 式求出行星与太阳的质量比:

$$\frac{m_{\text{卫}}}{M_{\odot}} = \left(\frac{a_{\text{卫}}}{a} \right)^3 \times \left(\frac{P}{P_{\text{卫}}} \right)^2. \quad (5.15)$$

在双星系统中, 从 (5.11) 式求得的是两恒星质量和 $M_1 + M_2$, 但在许多情况下, 可通过观测确定 M_1/M_2 (见 § 9.2), 这样便不难分别得到两恒星的质量。现在知道, 恒星世界中双星是很多的, 可能占恒星数的一半, 因此利用开普勒定律求恒星质量得到了广泛的应用。

三、活力公式

在二体问题中有一个十分简单而又有广泛用途的关系, 称之为“活力公式”(见 § 16.8)。

$$v^2 = G(M_{\odot} + m) \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right). \quad (5.16)$$

同样考虑到 $m \ll M_{\odot}$, 可简化为:

$$v^2 = GM_{\odot} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) \quad (5.17)$$

活力公式适用于任何轨道为圆锥曲线的天体，借助(5.17)式可求得行星或卫星在轨道不同处的公转速度，例如，当绕转体处于近日点 q 时，因 $r = a(1 - e) = q$ ，则有：

$$v_q = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{a}} \cdot \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \quad (5.18)$$

而当行星处于远日点 Q 时，因 $r = a(1 + e) = Q$ ，则有：

$$v_Q = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{a}} \cdot \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \quad (5.19)$$

$\sqrt{\frac{GM_{\odot}}{a}}$ 正是圆轨道时的绕转速度，或可看作行星的轨道平均速

度。显然当 r 越小时 v 越大，这与第二定律得到的定性结论是一致的。

也可用(5.17)式来研究卫星尤其是人造地球卫星的轨道飞行情况，当人造卫星在地球表面上空作圆轨道运动时，则有：

$$v_c = \sqrt{\frac{Gm_{\oplus}}{R_{\oplus}}} = 7.9 \text{ (千米/秒)},$$

v_c 称之为地球上的“第一宇宙速度”或“环绕速度”。这也是人造地球卫星不致坠地的最小速度极限。如果要使人造天体脱离地球(如飞向月球或其他行星)，则至少应是抛物线轨道，即 $a \rightarrow \infty$ ，代入(5.17)式则有：

$$v_e = \sqrt{\frac{2Gm_{\oplus}}{R_{\oplus}}} = 11.2 \text{ (公里/秒)}$$

v_e 称之为“第二宇宙速度”，也叫“逃逸速度”。对于一般人造地球卫星，它的运行速度 v 满足 $v_c < v < v_e$ 的条件。

四、潮汐及潮汐作用

地球表面的70%以上都是一片汪洋，大海有十分显著的涨落规律，即大约在24小时50分钟内，水面有两次较大的涨落。中国古代把白天出现的最高水位称“潮”，而将夜间来临的涨潮叫“汐”，并很早就懂得了“涛之起也，随月盛衰”的规律。

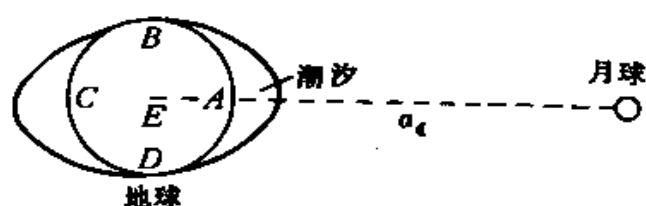


图 5.15 月球引起的潮汐

地球上的潮汐主要是因为月球对地球不同部位的引力不同而引起的。如图5.15，考虑地球中心 E 处与表面四点 A 、 B 、 C 、 D 处，每单

位质量物质受到的月球的引力之差为：

$$\begin{aligned} g_{AE} &= \frac{Gm_c}{(a_c - R_\oplus)^2} - \frac{Gm_c}{a_c^2} ; \\ g_{CE} &= \frac{Gm_c}{(a_c + R_\oplus)^2} - \frac{Gm_c}{a_c^2} . \end{aligned} \quad (5.20)$$

式中 a_c 为月地距离，因为 $R_\oplus \ll a_c$ ，故可把(5.20)式简化为：

$$\left. \begin{aligned} g_{AE} &\approx \frac{2Gm_c R_\oplus}{a_c^3} \\ g_{CE} &\approx -\frac{2Gm_c R_\oplus}{a_c^3} \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

即在 A 、 C 处的物质都有远离中心 E 的倾向。而在 B 、 D 两处，则有向 E 靠近的趋势，这样液态的表面势必各处水位不一，在 A 、 C 处(月亮中天及下中天)水位高于平均水位——涨潮，而在 B 、 D 处则低于原来水位——落潮。由于地球自转的原因，所以大致每昼夜有两次涨落。

太阳和行星也能引起地球的潮，但因为潮汐作用与距离的立

方成反比，所以太阳引起的潮比月球引起的小。而行星对地球的潮汐作用更加微不足道。以木星冲日为例，

$$g_{\odot} = \frac{2GM_{\odot} R_{\oplus}}{a_{\oplus}^3} \quad (5.22)$$

$$g_{\text{木}} = \frac{2Gm_{\text{木}} R_{\oplus}}{(a_{\text{木}} - a_{\oplus})^3} \quad (5.23)$$

从(5.21)—(5.23)式，不难算得：

$$g_{\odot} / g_{\oplus} = 0.46, \quad g_{\text{木}} / g_{\oplus} = 1.29 \times 10^{-5}.$$

可见，太阳的潮汐作用不及月球作用一半，行星的潮汐完全可予以忽略。在朔与望的时刻，日、月的两种潮汐作用正好叠加，产生的潮最大，称大潮；而在上弦或下弦时，两者的作用是此长彼消，因此潮汐也比一般小，称之为“小潮”。当然各地潮汐的大小还与许多复杂的因素有密切关系。

除了液体海洋有潮汐现象外，大气也受到这种影响。精密的大地测量还可发现，地壳也有微小的起伏，这就是“固体潮”。当然，固体潮很小，非仪器不易察觉。

潮汐对地球自转会产生一种制动作用——潮汐摩擦，这也是地球自转长期变慢的主要原因。在现阶段，因潮汐作用使得每日的长度每一世纪增加0.0016秒。地球自转角动量的减小，势必还会使月地距离增大。精密的天文观测表明，在现阶段月球正以0.05—0.15千米/年的速度离地球远去，这种远离趋势一直要到地球自转周期、月球绕地球公转周期、月球自转周期三者相等时才会停止。

作用总是相互的，所以地球也对月球产生潮汐摩擦作用，而且由于 $m_{\oplus}$ 更大，地球对月球的潮汐力是 $g_{\oplus}$ 的22倍左右。正是这种巨大的潮汐摩擦的长期作用，使今天月球的自转周期已经增加到与公转周期相同了，所以现在地球对月球的潮汐摩擦已经不起作用。卫星世界中，绝大多数卫星都是这样“同步自转”的原因也盖出于此。

五、洛希(Roche) 极限

一般认为行星、卫星很可能都是由一些小的团块(称之为“星子”)在万有引力作用下逐渐集聚成的,而潮汐力却又有使天体瓦解的作用,所以形成行星、卫星的必要条件之一是引力大于潮汐力。

设离太阳距离 D 处有两小团半径为 b , 质量为 m 的物质(图 5.16)。显然两者间的引力

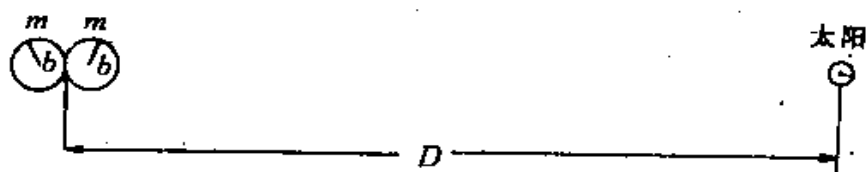


图 5.16 洛希极限

$$f_{引} = \frac{Gm^2}{(2b)^2}.$$

太阳对其的潮汐力(引力差)

$$f_{潮} \approx \frac{4GM_{\odot} mb}{D^3}$$

天体能在万有引力作用下凝聚时必须要有:

$$f_{引} > f_{潮},$$

即有:

$$D^3 \geq 16 \left(\frac{M_{\odot}}{m} \right) b^3. \quad (5.24)$$

对于球形天体

$$M_{\odot} = \frac{4}{3} \pi R_{\odot}^3 \rho_{\odot}, \quad m = \frac{4}{3} \pi b^3 \rho,$$

$$\text{所以} \quad D \geq 2.52 \left(\frac{\rho_{\odot}}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} R_{\odot} = D_R. \quad (5.25)$$

D_R 称为洛希极限, 如果考虑其他因素——如团块有自转等的影

响, 进行严格的数学推导, 则有:

$$D_R = 2.455 \left(\frac{\rho_{\odot}}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} R_{\odot} . \quad (5.26)$$

对于卫星系统而言, (5.26) 式同样适用, 只需把 $\rho_{\odot}$ 、 $R_{\odot}$ 分别换上行星的密度和半径。例如, 对于土星 $\rho_s = 0.704 \times 10^3$ 千克/米³, 对不同密度的团块的洛希极限即“安全距离”可如下表 5.11。

表 5.11 土星对不同密度团块的洛希极限值

$\rho^* (10^3 \text{ 千克 米}^3)$		(空气)	(土星)	(水)	(木星)	(月球)	(火星)	(地球)
		0.001	0.704	1.00	1.33	3.34	3.95	5.52
D_R	(土星半径)	21.84	2.46	2.18	1.99	1.46	1.38	1.21
	(10^3 千米)	1310.4	147.6	130.8	119.4	87.6	82.8	74.4

* 括号内表示与此密度值相当的物体。如 0.001 表示地球低层大气密度, 5.52 表示地球平均密度等等

行星的周围所以有环带存在, 原因就在于此: 或者是某些卫星(或大星子)落入 D_R 之内, 被潮汐力所粉碎; 或者是原始物质在相应的 D_R 之内, 万有引力无法使其凝聚成卫星。

§ 5.5 行星和卫星的物理概况

七十年代以来, 人们对太阳系进行了大规模的空间探测, 获得了非常丰富的信息, 使人类对行星的认识有了很大的变化, 因此对于行星的研究也是当代最活跃的科学领域之一。

一、行星的分类

对于太阳系中九大行星有各种不同的分类方法。

(1) 从视运动特征的不同, 可如 § 5.2 中那样分为内行星和外

行星。但这种分类却把地球本身排除在外了，因此有人建议应以小行星(带)为界，把水星、金星、地球、火星称为“带内行星”，把另外五颗即木星、土星、天王星、海王星及冥王星统称为“带外行星”。

(2) 从行星的特征(见表5.1)来区分。过去把它们分成“类地行星”和“类木行星”。前者的特点是离太阳近，质量和半径都较小，平均密度较大、卫星少……，明显属于类地行星的是水星、金星、地球及火星，而类木行星各项特性都与此相反恰成鲜明的对照，明显属于这一类的是木星、土星、天王星、海王星。至于冥王星在这种分类中始终没有合适的位置。

(3) 我国天文学家戴文赛从行星起源于不同形态的物质出发，明确主张把九大行星分为三类：类地行星(包括水、金、地、火)、巨行星(木、土)及远日行星(天王、海王、冥王)，这三类的共同特点如表5.12所示。

表 5.12 三类行星的不同特征*

分 类	成 员	离太阳 距离	质 量	半 径	平均密度	天 然 卫星数	主要组成物
类地行星	水星、金星、地球、火星	近	小	小	大	少	硅酸盐、铁
巨行星	木星、土星	中	大	大	小	多	氢、氦、
远日行星	天王星、海王星、冥王星	远	大	大	中	多	氢、氦、冰等

* 根据最新资料，天王星的卫星已达15颗，应属“多”之例，在密度上后两类也可能有些交叉。

二、行星与卫星的表面

过去人们仅仅由于月球、火星离我们较近，加上它们表面大气较少，所以才有粗浅的了解，现在人们借助于雷达可以穿透金星浓密的大气，空间探测器可以临近许多行星和卫星上空。因

此,今天人们已有可能对于行星、卫星的表面进行深入的研究,一些大卫星的详尽表面图亦已陆续被绘制出来。行星表面学、行星地质学等一些新兴边缘学科也就应运而生了。

一般讲来,由于化学组成及表面物理状况(主要是温度、压力)的不同,三类行星的表面并不一样,类地行星及所有卫星都有硅酸盐类(岩石)组成的坚硬“壳层”,有类似地球或月球的各种特征。对于没有大气的星球,如水星的外貌类似于月球,连小小的火卫一和火卫二上也发现有环形山及小“坑洞”,沟纹(图5.17)……,而对于像有浓密大气的金星和土卫六,则它们的表面地形更像地球。一方面大气减小了流星体的撞击作用,另一方面漫长的岁月也有严重的风化作用。



图 5.17 火卫一的表面

对于巨行星,在浓密大气下并无坚实的表面,而是一片沸腾

着的氢组成的“汪洋大海”。所以它们实质上是液态行星，至于远日行星，则通常有一层非常厚的甲烷冰、氨冰之类的冰物质覆盖在其表面上。

三、反照率

不同物体对于光的反射本领不一。有时，同一物体因表面状况的差异也会有不同的反射能力，人们把物体对于光的反射能力定义为反照率，用 A 表示。

$$A = \frac{\text{反射光强度}}{\text{入射光强度}} \quad (5.27)$$

显然， A 越大物体显得越明亮。

天文上常常通过测定天体的反照率来研究它们的表面状况：它们的化学组成及表面的物理状况，对于小行星和一些卫星还可通过反照率及光度的测定而推算出它们的大小(直径)。

在实际运用中，有各种不同意义的反照率，而且还与辐射的波长也有关。对于九大行星，不同观测者用不同的仪器和方法测得的反照率也有较大的区别(见表5.13)。

四、大气

1761年，俄国学者罗蒙诺索夫通过凌日观测发现了金星的大气，现在已知有大气行星和卫星有十个以上。行星和卫星是否有大气主要取决于两个因素：表面的逃逸速度 v_e 及温度 T ；因为 T 越高，气体分子热运动速度 v_r 越大，

$$v_r = \sqrt{\frac{3kT}{\mu m_H}}$$

式中 k 、 μ 、 m_H 分别表示玻耳兹曼常数，平均分子量及氢原子的质量，当行星或卫星表面上 $v_e < 5 v_r$ 时，就不可能有可观的永久性的大气存在，一般说来， v_e 越大， T 越低，大气就越浓密。

表 5.13 不同时期不同观测者所测定的行星反照率

行星	罗素(H. N. Russell) (1916年)	斯坦普夫(K. Stumpff) (1948年)	艾伦(C. W. Allen) (1973年)	现代采用值
水星	0.069	0.063	0.056	0.08
金星	0.59	0.585	0.72	0.76
地球	0.45	0.401	0.39	0.39
火星	0.154	0.155	0.16	0.15
木星	0.56	0.414	0.70	0.51
土星	0.63	0.451	0.75	0.50
天王星	0.63	—	0.90	0.66
海王星	0.73	—	0.82	0.67
冥王星	—	—	0.145	0.80

类地行星的大气主要成分应当是二氧化碳(图 5.18)一般认为,目前地球大气已非当初的原始大气,而是“二级”或“三级”大气,其中生物的活动起了很大的作用。

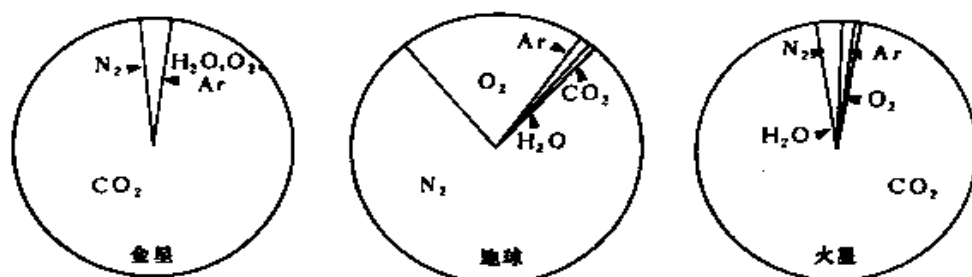


图 5.18 类地行星的大气成分

巨行星的大气一般都十分浓厚,高达几千千米。其主要成分是氢、氦、甲烷、氨等。

远日行星也有以甲烷为主的大气层。

因此大行星中仅有水星没有大气层。

在卫星世界中已确定有大气的有四颗:木卫一、三、土卫六海王卫一(表5.14)。

表 5.14 行星和卫星的大气状况

行星与卫星	大气中最主要的成分	大气状况
金星	CO ₂ 、N ₂ 、Ar、CO、H ₂ O、HCl、H ₂ SO ₄ 、HF、H ₂ 、O ₂	浓密
火星	CO ₂ 、CO、N ₂ 、H ₂ O、Kr、Xe、O ₂ (微量)、H ₂	稀薄
木星	H ₂ 、He、CH ₄ 、NH ₃ 、C ₂ H ₂ 、C ₂ H ₆ 、PH ₃	浓密
土星	H ₂ 、He、CH ₄ 、NH ₃ 、C ₂ H ₆ (微量)	浓密
天王星	CH ₄ 、H ₂	较厚
海王星	CH ₄ 、H ₂	较厚
冥王星	H ₂ 、He、CH ₄	较稀
土卫六	N ₂ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆	较厚
木卫一	Na、K、He、S	较厚
木卫三	CH ₄ 、NH ₃	较稀
海卫一	CH ₄ 、He	较稀

五、表面温度

一般讲来,行星和卫星不会发光,它们的能量都来自太阳辐射。因此九大行星的表面温度基本上是由内向外递减的,而卫星则几乎与绕转的行星同一量级。

对于离太阳距离为 a , 半径为 R 的行星(图5.19), 接收到的太阳辐射为

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi a^2} \times \pi R^2,$$

行星受热后即向周围辐射热量, 若看作“黑体”, 则辐射能为 $4\pi R^2 \sigma T^4$, 这儿 $L_{\odot}$ 表示为太阳的辐射能, σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数。

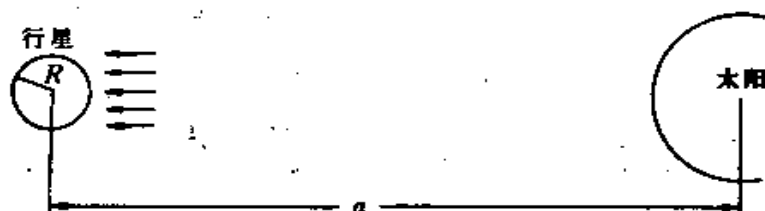


图 5.19 行星的表面温度

1. 若行星或卫星自转较快、表面导热良好, 则天体表面温度较均匀, 因而整个表面同样辐射热量, 这样, 当两者平衡时, 便有:

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi a^2} \times \pi R^2 = 4\pi R^2 \sigma T_1^4, \quad (5.28)$$

由此

$$T_1 = 278 / \sqrt{a}. \quad (5.29)$$

其中 a 以天文单位表示, T 为开氏温标。

2. 若天体表面导热率很小(如月球), 自转又较慢, 则背阳面的辐射基本可忽略, 与(5.29)式相应向阳面的平衡温度 T_2 为

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi a^2} \times \pi R^2 = \pi R^2 \sigma T_2^4 \quad (5.30)$$

$$T_2 = 393/\sqrt{a} \quad (5.31)$$

3. 实际上任何天体都不可能把太阳辐射能全部吸收, 吸收部分应为 $1-A$ (A 为反照率), 这样实际的温度应是 T_3 或 T_4 。

$$T_3 = \frac{278}{\sqrt{a}} (1-A)^{1/4}; \quad (5.32)$$

$$T_4 = \frac{393}{\sqrt{a}} (1-A)^{1/4}. \quad (5.33)$$

根据理论计算, 各行星表面温度如表5.15。当然, 这仅是两种极端情况下的理论值, 实际情况要复杂得多。如金星虽然是自转最慢的行星, 可由于温室效应^①却是太阳系中表面温度最高的行星, 而木星、土星则很可能还有自己的能源, 实际表面温度也比理论值高。

表 5.15 行星的表面温度 (开)

温度 (开) 行星 不同方法	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
T_1	447	327	278	225	122	90	63	51	44
T_2	632	462	393	318	172	127	90	72	63
T_3	440	229	246	216	102	76	48	39	35
T_4	621	324	347	305	144	107	68	55	49
实 测	~600*	756	300	230	128	105	70	57	50

* 水星表面昼夜温度相差极大, 此为白天平均值

① 金星大气中的二氧化碳能让太阳能对金星加热, 而行星受热后的辐射因在红外波段将为二氧化碳阻挡, 这样使金星表面温度大大升高, 就像玻璃暖房一样, 起到了温室作用。

六、磁场和内部结构

空间探测的重要成果之一是对一些行星的磁场情况有了初步的了解。目前所知木星的磁场最强,而且它的磁场结构很复杂,其磁极情况与地球相反,强度比地磁场强度大一个量级。土星同样也有较强的磁场,对于远日行星则需待“旅行者”(1986年抵达天王星)的探测结果,目前还不清楚。类地行星中除地球外,其他三颗行星的磁场都很小,磁轴与自转轴也总有一个交角存在。水星的磁场仅及地磁场的 10^{-2} ,火星则更小约 10^{-3} ,金星的磁场即使有也不会超过地磁场的万分之一。

行星磁场在太阳风作用下形成了磁层结构,磁层的基本形状大体上差不多(§4.3)。

磁场是行星重要的物理性质之一,它与行星的内部结构有密切关系,对于行星的演化也会有较大的影响。

有趣的是至今还没有发现有磁场存在的卫星,即使是比水星还大的木卫三,“旅行者”也没有测到它的磁场。

对于行星的内部结构,目前也取得了较大的进展。类地行星的平均密度除火星外都在 5×10^3 千克/米³以上,因此内部都有一个较密的铁镍核(火星的核可能为硫化铁组成),一层较厚的幔(图5.20)。

巨行星的内部结构与类地行星大相径庭,它既没有通常的固体岩石为壳,也没有半流体的幔,甚至是否有一个较密的固态铁石内核,至今尚未有定论。即使有,也一定较小(图5.21),尤其是土星,有人认为可能内部还有一大层冰层。核外一层是液态的金属氢,再

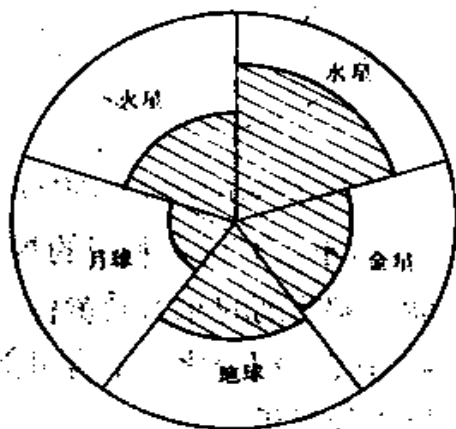


图 5.20 类地行星核、幔的相对大小

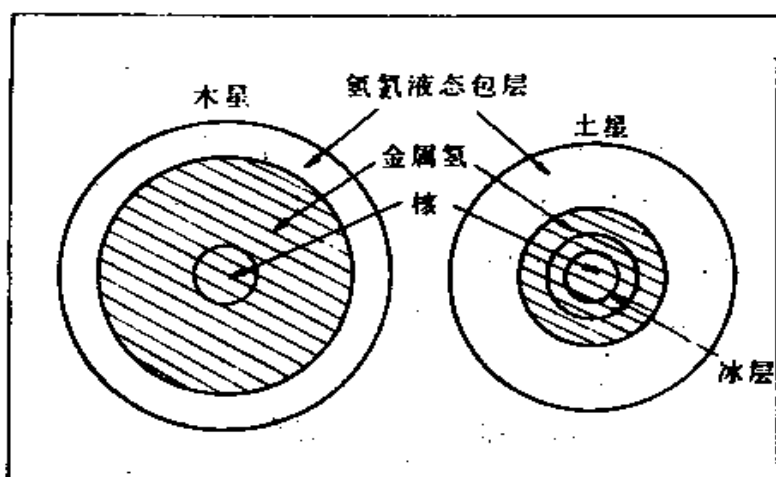


图 5.21 巨行星的内部结构

外面则是液态的分子氢。

远日行星的资料目前并不多，从它们的平均密度与表面温度等物理特性进行推测，其结构很可能介于巨行星和类地行星之间，由外向内是：分子氢、冰层、岩核(图5.22)。

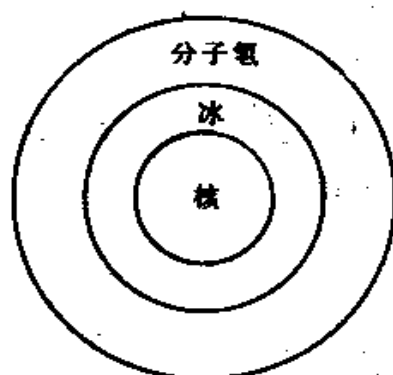


图 5.22 远日行星的内部结构

§5.6 水星和金星

一、共同的特征

水星和金星是离太阳最近的两颗行星，不仅有许多相同的视运动特征：离太阳的角距都不太大，只能在黎明前的东方及黄昏后的西方观测；望远镜中还可见到类似盈亏的位相变化；下合可能“凌日”……，而且还有许多物理性质也十分接近。

(1) 表面温度高：水星与太阳的距离仅是地球的1/3左右，它受到阳光的强烈照射，因此在阳光直射下，它的温度最高时达700开左右。金星虽然离太阳比水星远一倍，而且浓密的云层只允许

透过30%的阳光,但由于大气中二氧化碳产生的温室效应,使得其表面温度甚至比水星更高,可达750开左右。足以使那些熔点不太高的金属(锡、铅、锌)熔化。

(2) 自转缓慢、昼夜漫长:水星和金星的自转周期都是在六十年代以后靠雷达确定的。以前认为,水星是“同步自转”,即与公转周期88天相等;而金星则各人有截然不同的结论。1965年,人们用雷达进行了探测,后经“水手10号”飞船的探测所证实,水星的自转周期为58.6天,金星的自转周期为243天。用类似于会合周期的方法可以推算出水星上一昼夜的时间为176日(公转周期的2倍),金星的昼夜则为117日(差不多1/2公转周期)。

(3) 没有天然卫星:这是九大行星中仅见的两个例子。因而,这两颗行星的质量值是通过其他小天体的摄动进行估算的。近来已有人对水星的质量值提出了不同的看法。

此外,它们的平均密度相仿,表面上没有液态水,这些都是共同之处。然而,它们也各有自己的明显特征。

二、水星(♿)

中国古代称之为“辰星”。过去一直认为它是太阳系中最小的大行星,1978年发现了冥王星的卫星后,人们才得知它比冥王星略大。由于它自转缓慢,所以向阳与背阳面的温差可达六百度。远远超过了月面上的温差。

水星的质量比较小,仅相当于地球质量的5.5%,所以其逃逸速度为4.2千米/秒,加上它白天的高温, v_{esc} 很大,所以没有大气是不言而喻的。1974—1975年“水手10号”飞船三次飞临水星表面上空(图5.23)进行了实地探测,结果也证实了水星无大气的结论。

水星的自转是独特的,自转周期与公转周期可以通约, $P_{\text{自}} = 2/3 P_{\text{公}}$,这是“共振效应”^①的结果。天文上也称为“自转-公转耦

^① 二体问题也有类似物理中共振现象的效应,它使得行星或卫星只能分布在某些可以通约的周期值上。轨道共振的具体机制至今还不太清楚。

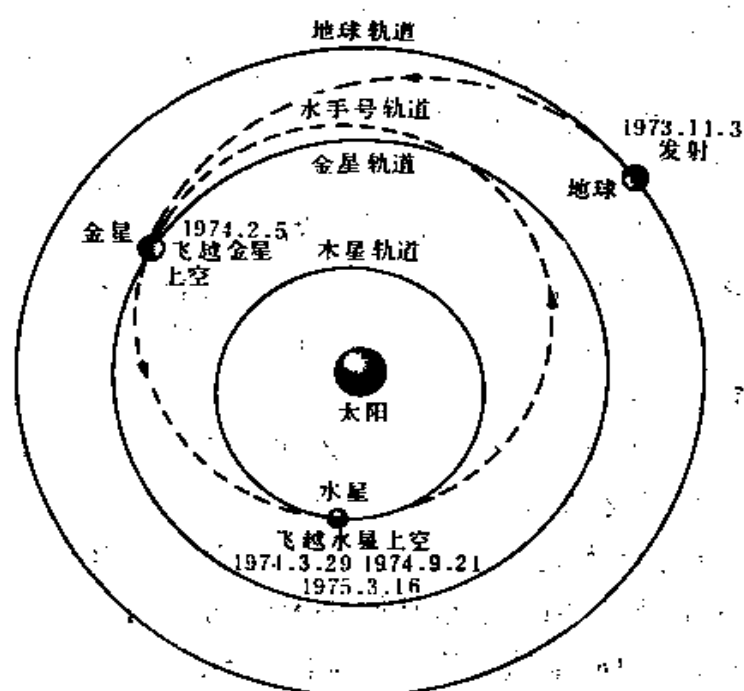


图 5.23 1973年美国发射的“水手10号”曾三次飞临水星上空

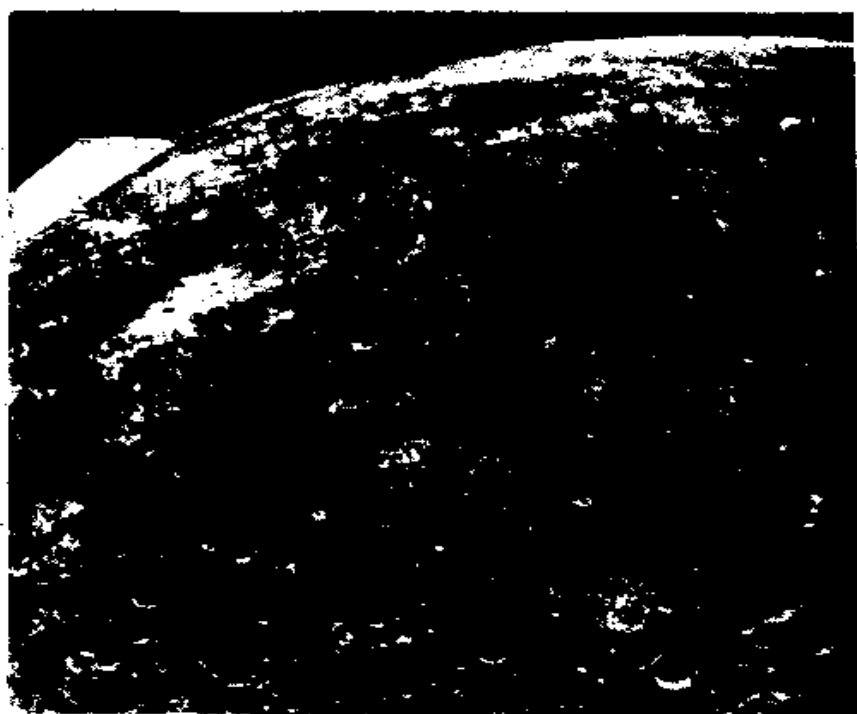


图 5.24 水星的表面酷似月球

合”现象。

过去,人们从月球反照率为0.07,水星反照率亦在0.06—0.07间而推断两者的表面可能比较接近。1975年3月16日,“水手10号”第三次光临水星上空,这时它离水星表面仅320千米。因此拍得了几千帧足以辨认204米以上细节的水星照片。这证实了人们的推论:水星表面与月球的确十分类似。乍一看来几乎难以辨别它们(图5.24),密密麻麻的环形山多得不可胜数。直径在100千米以上的大环形山有近千个;同样它也有类似月海的阴暗部分——低洼的盆地,也有真正的高山峻岭,甚至还能找到美丽的辐射纹。此外,水星上还有月面上少见的地形特征——大断壁。最高的悬崖高达3000米,而它们长度可绵延500千米以上。

“水手10号”探测的另一重大成果是探明了水星的磁场情况。原先人们以为水星自转很慢,核内不会有对流电流,因此不会有磁场。但探测表明,水星有一个与地球磁场极性相同的偶极场,磁轴与自转轴的交角为 7° — 12° ,赤道表面的磁场强度为 4×10^{-7} 特。

水星的磁场也在周围形成了与地球类似的磁层结构(图5.25)。

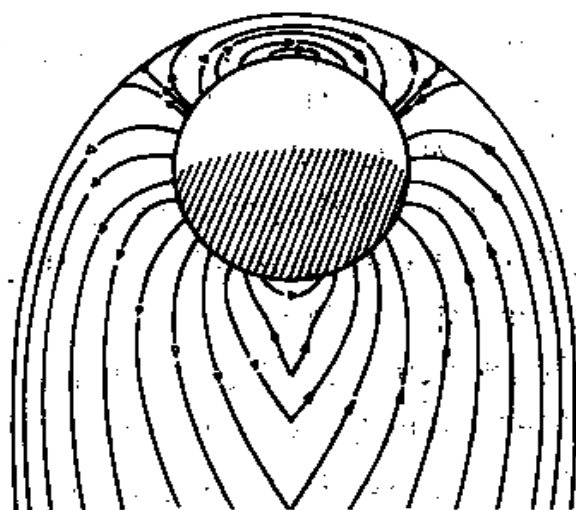


图 5.25 水星的磁场与磁层

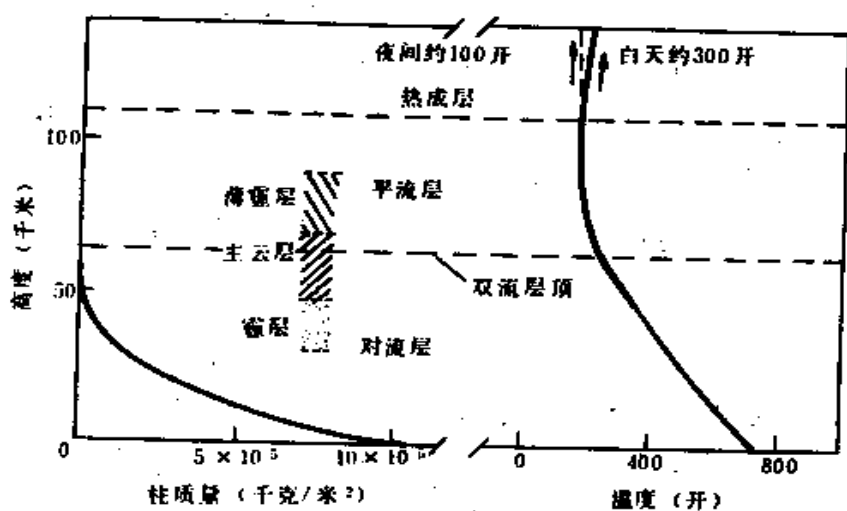


图 5.26 金星大气的分层结构

但由于它的磁场强度仅只地磁场强度的 10^{-2} ，又离太阳很近，所以被压缩在很小的范围之内。

三、金星(♀)

金星是除太阳、月球外视亮度最大的星体，最大亮度可达 -4.4^m ，非常醒目。中国古时称它为“启明”（晨星时）和“长庚”（昏星时），西方称之为“爱神星”。

金星的直径、质量、平均密度都与地球十分接近，又有浓密的大气，因此以往有地球的“姐妹星”之称。但是人们对金星的真正了解是在六十年代雷达探测之后。

金星的大气十分浓密，几乎是地球的100倍，表面的气压高达88大气压。大气的主要成份是 CO_2 (96%以上)、 N_2 (~3.5%)，此外还有 SO_2 、Ar、CO、Ne、HCl、HF、 H_2SO_4 、H 等等。金星大气也有明显的分层(图5.26)，近表面32公里之内是一层很透明洁净的大气，往上到48公里是一层浓霾区，在48—70公里的区间是

一层终年不散的厚云区，它使人们无法见到金星表面，70公里以上则是薄霾区。1974年，“水手10号”飞船在飞往水星的途中顺便走访了金星，首次拍得了很有特征的“Y”形云，那儿的云层平均4天就可绕金星一圈，其速度在100米/秒左右，而近金星表面的大气却几乎是宁静的。霾层中主要成份是浓度很高的硫酸雾滴。金星大气中有频繁的放电现象，平均每分钟20次，苏联“金星号”飞船曾记录到一个持续15分钟的大闪电。大气中的同位素 $^{36}\text{Ar} : ^{40}\text{Ar}$ 值比地球大200—300倍，这表明两者经过了不同的演化途径。

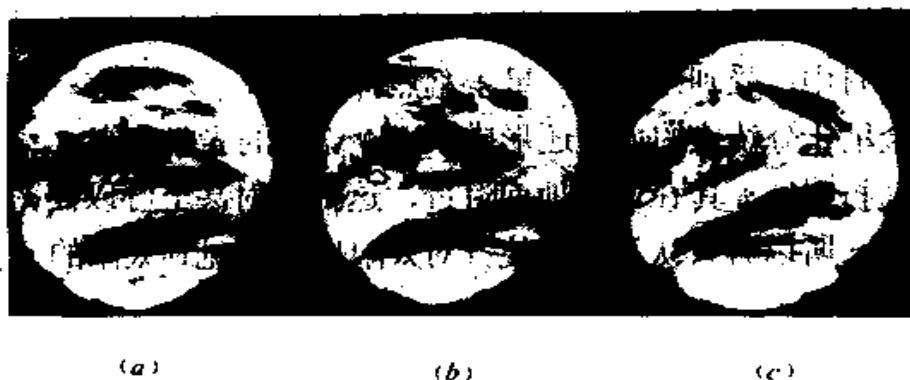


图 5.27 金星表面上显著的横“Y”云
(a) 开始时；(b) 7小时后；(c) 14小时后

金星大气造成的温室效应还使金星表面温度各处相差无几，始终是足以熔化锡、铅、锌之类金属的高温。

因为有浓密大气的保护，金星表面几乎找不到陨星撞击的痕迹——环形山。它的地形与地球比较相似。1972年，苏联“金星8号”飞船成功地降落金星表面，首次发回了金星地面情况的照片。目前美、苏两国已有若干探测器降落于金星表面，绘制了金星的地形图。

金星表面上一般起伏不大，60%的地区比较平坦，但也有高山、峡谷。北半球上有一个长3200千米，宽1600千米的大高原。最

高的麦克斯威尔山的高达11000米,著名的金星大峡谷宽280千米,深达3千米,全长达2250千米,从南半球穿过赤道到达北半球。赤道区域也有一些大而浅的圆形圈,酷似地球上的火山口。金星地面上风速很小,探测器窗外到处怪石嶙嶙、荒凉异常。

金星没有磁场(至少在地磁场强度的 10^{-4} 以下),也没有辐射带和磁层,因此太阳的紫外辐射、太阳风、宇宙线可以穿透大气,形成一个离金星表面很近的薄薄的电离层。

还有一个奇特之处在于金星的自转方向是自东向西逆转的,这不仅与多数行星的自转方向迥然不同,也是太阳系中天体运转“同向性”的例外。因此在金星上,太阳和其他天体的视运动是西升东落的。造成这种反常现象的原因,可能是在金星演化过程的漫长岁月中,受到了一个大星子猛烈撞击。

金星十分浓密的大气还形成了一个奇特的光学现象——强烈的大气折射,尤其在金星地面附近,这种折射甚至可以使光线偏转 180° 。所以有人认为,即使背对太阳也可以见到太阳的升落奇景。

§ 5.7 火星及其卫星

一、火星(♂)概况

火星由于它发出特殊的红光而令人侧目。西方把它当作为“战神”,中国古代称之为“荧惑”。望远镜发明之后,由于观测到多种特性与地球有相近之处,一度被誉为“天空中的小地球”。关于“火星”、“火星生命”等激动人心的议题争论了将近一个世纪。

火星的运确实和地球有相似之处。它绕太阳的周期为687天,相当于1.9回归年,而它的自转周期仅比地球长41分,更令人惊奇的是它的自转轴倾角也只比地球的黄赤交角大 $32'$ 。因此,火

星上不仅有类似地球的季节之分,还可明显地区分出“五带”(即热带、南、北温带、南、北寒带)。此外又发现火星上有一定的大气,有白皑皑的极冠,而且随季节变化它的大小范围有明显的改变。因此,人类对火星寄予深切希望是顺理成章的事。

火星的平均温度与地球相差不大,在赤道区(热带)的昼夜温度在 20°C — 80°C 之间;而最寒冷的极区的温度变化于 -70°C — -140°C 。

火星是地球的近邻之一,尤其在它冲日时(780天一次冲)离地球的距离差不多是两者轨道半长径之差。尤其是在大冲期间,火星与地球间的间距可缩小到5500万千米左右(图5.28),在空间探测以前,人类关于火星的认识,其资料绝大多数都是在它大冲期

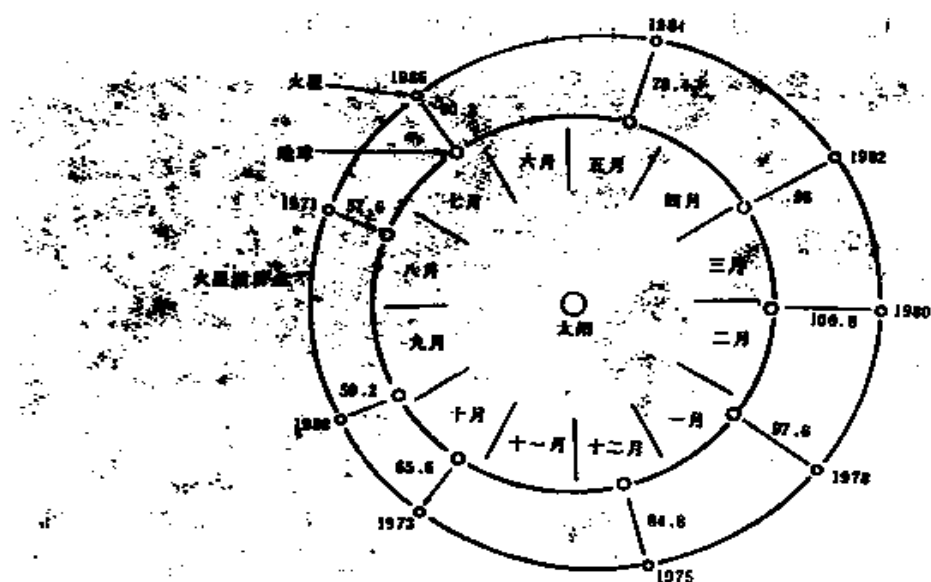


图 5.28 火星的冲日: 距离单位为 10^6 千米

液态水、大气中的水含量也极低、白色极冠主要成分是干冰(固态二氧化碳)它所含的水即使全部溶化也只能把火星表面复盖10米左右。但在火星形成早期,可能当时火星大气有较强的温室效应,

间的观测得到的。上次的大冲发生于1971年8月，即将来临的大冲日期是1986年7月及1988年9月。

对于火星的空间探测始于六十年代，获得成功的有11次。苏、美两国最初的6艘飞船都未能抵达目标，没有取得资料。最早获得成功的是美国1964年11月发射的“水手4号”飞船。它于1965年7月15日在离火星9850千米处飞过，发回了21帧火星照片，从中首次发现了火星表面上的环形山。以后，美国的“水手”6、7、9号，苏联的“火星”3、6、7号都相继进行了广泛的科学探测。

对于火星探测最成功的是两艘“海盗号”飞船。它们在1976年7月降落到火星上(图5.29)，一直为人们发回了大量珍贵的资料，原来预计它们仅能工作90天，然而出乎意料之外的是，一艘登陆舱却整整连续工作了6年多，一直到1982年11月才停止了工作。因此，现在已有了详尽的火星表面地形图和地貌图。

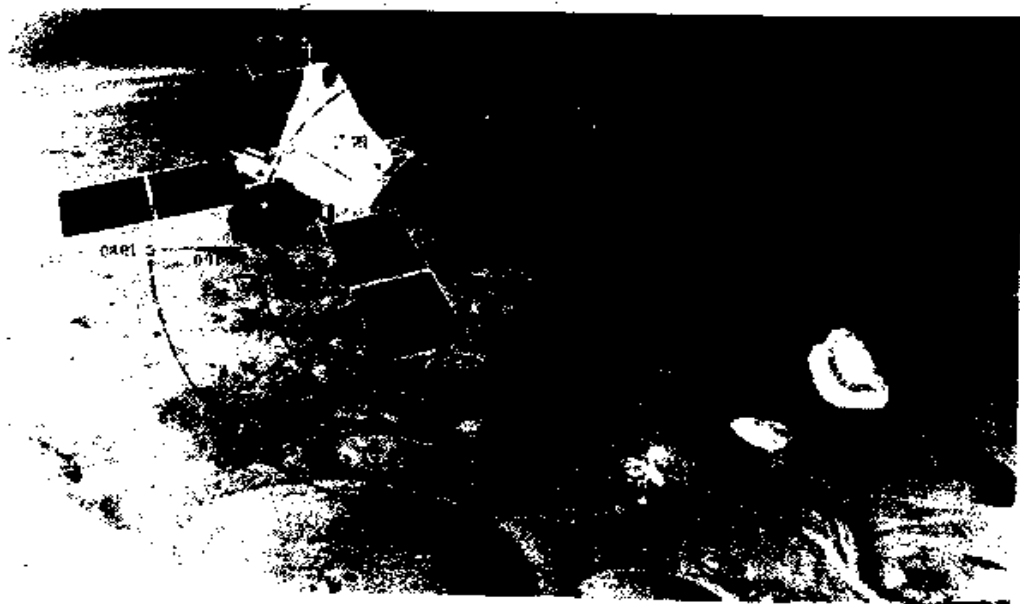


图 5.29 “海盗号”探测器向火星表面着陆

二、火星表面

1877年，意大利天文学家斯基帕雷利(G. V. Schiaparelli)发

现了火星表面上有一些纵横交叉的“线条”，后被称之为“运河”，消息传开，一片哗然。加上火星表面的颜色有明显的季节变化，其极冠在火星冬天可扩大到纬度50°的地区。因此在五十年代，还有人以为这是“火星植物”枯荣的证据……，1971年11月，美国“水手9号”又看到火星表面有宽阔的干涸的河床(图5.30)，这又引起了人们极大的兴趣。

现在知道，火星的表面十分荒凉。望远镜中看来明亮呈桔黄色的区域是它的“大陆”，那儿到处是红、黄色的沙丘和怪石(彩照3)。

火星的南、北半球有很明显的区别，北半球比较平坦，间或有些死火山，平均比南半球低4千米。而南半球则有比较多的大大小的环形山。一百多年前曾引起巨大的争论的“火星运河”，实际上只是这些环形山及其阴影造成的错觉。与月球和水星上的环形山相比，火星上的环形山比较稀疏，边缘的坡度也比较平缓，脊棱也受到过某种“风化”侵蚀作用。从大小比例来看，火星环形山除了起源于流星撞击外，还有不少是火山活动的结果。

除了圆形的环形山外，火星表面还有一些死火山，而且其范围比地球火山更大。例如，位于火星北纬18°处的奥林匹斯山直径约600千米，高达26千米。

火星上还有盆地和峡谷，它们大多分布在南半球，一般长几百千米、宽数千米。最长最大的“水手谷”在赤道附近连绵延伸5000多千米，最宽处达200千米，众多的削壁断垣令人惊心动魄。

火星上确有奇特的“河床”(图5.30)，这些干涸了的河床纵横交错，似乎主流支流相连，达几千条之多，可以形成一个分布广泛的“河网”。最长的主流长1500千米，宽几十千米。这种奇特地形的原因也有很大争论：比较多的人主张是过去火星在演化早期的活动时代，火山喷出来的巨大熔岩流造成的。但是，也有一些人认为不能排斥这是真正河流遗迹的可能。尽管目前火星上没有

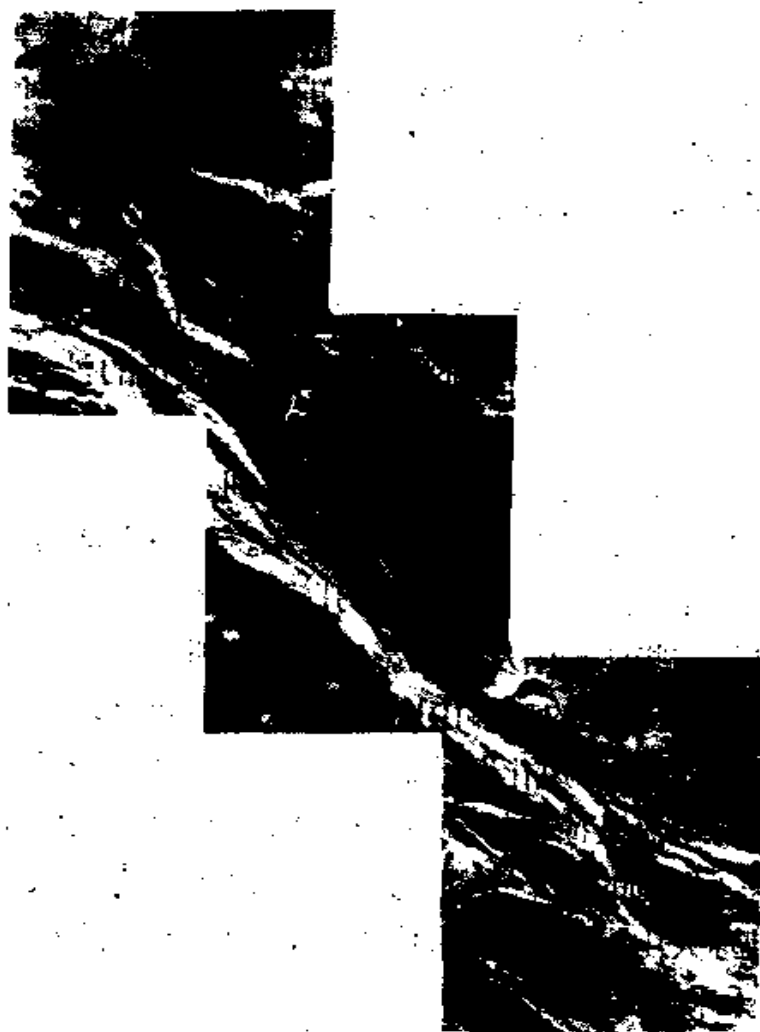


图 5.30 火星上的“河床”

温度较高，完全可以使极冠中水冰融化，岩石中水份蒸发而降落下来，造成真正的大江巨川。

三、卫星及“生命”问题

火星有两个很小的卫星，它们具有不规则的形状(图5.17)很像两个被鼠啃虫蛀的大土豆，其大小分别为 $27 \times 21 \times 19$ (千米)³及

$15 \times 12 \times 11$ (千米)³。但在那小小的天体上也有众多的陨石坑。火卫一上还有一个环形山, 直径达 8 千米。上面还有许多宽窄不一的沟纹, 最宽的也有 500 米。

火星的卫星直至 1877 年大冲时才为美国天文学家霍尔 (A. Hall) 所发现。由于火卫一的轨道周期仅 $7^{\text{h}}39^{\text{m}}21^{\text{s}}$, 所以火星上看到的火卫一是西升东落的。许多天文学家认为这两颗火卫都是被火星俘获的小行星。

火星上有没有生命存在? 是否有类似人类的“火星文明”? 撇开以往的科学幻想不论, 自 1877 年发现了火星表面上交叉的直线条被认为是运河起, 这个问题已激烈争论了百年之久。美国天文学家洛韦尔 (P. Lowell) 专门为此建造了洛韦尔天文台。四十年代时, 苏联一学者季霍夫 (Т. А. Тихов) 还在大学中开出“火星植物学”的课程。甚至到了 1958 年, 苏联还有一个教授作出了惊人之语: 两个火星卫星是中空的, 因而必是史前时期“火星人”为保存他们的文明而发射的“太空博物馆”……。

随着空间探测器的飞行, “火星人”、“火星生命”的争论自然结束了。在火星表面上工作了六年之久的“海盗号”飞船作了认真的分析研究, 否定了火星生命的可能。然而对于“火星生命”的争论, 在一定程度上也促进了人们对火星的深入研究。洛韦尔天文台在天文学的发展中也曾作出过积极的贡献, 例如冥王星就是这个天文台所发现的。

§ 5.8 木星及木卫系统

一、巨大的木星(4)

木星是行星世界的巨人。西方称它为朱庇特(主神), 中国古代称之为岁星。它的赤道半径为地球的 11.2 倍, 赤道一圈的长度

远远超过了月地距离，以体积计则是地球的1316倍。即使把太阳系内其他行星、小行星、卫星全部合为一体，其总质量仍然只及它的40%。因此它是太阳系中对其他天体摄动的主要因素，甚至有人认为它可以和太阳组成一对“双星”。

木星表面重力加速度是地球的2.64倍。木星又是自转最快的行星，在赤道处的自转周期仅为 $9^{\text{h}}50^{\text{m}}30^{\text{s}}$ ，因而赤道上的自转速度达12.7千米/秒，竟比地球上的第二宇宙速度 v_2 还大。木星的高速自转使它的形状明显变扁，极半径比赤道半径短7%左右。



图 5.31 木星的大红斑有很复杂的细节结构

木星的大气厚达1000千米以上，其组成与太阳大气相仿：氢79%、氦20%。还有1%的其他元素，大多集中在它的云中，由于动力学的原因，木星大气的对流、环流、涡流都十分剧烈，形成一条条色彩斑斑、明暗相间的“带纹”，它们的排列相当整齐，都平行于赤道(彩照4)。而更奇异的是木星南半球上有一个持续了

几百年的“大红斑”，它的范围可容纳好几个地球。空间探测表明，大红斑在作逆时针方向高速运动(图5.31)，另外木星大气中类似的大气涡流很多，因此尽管大气的平均温度很低，但运动之剧烈和复杂的程度却出乎意料。

二、对木星的空间探测

木星离地球距离最近时也有6亿千米，因此目前的许多资料

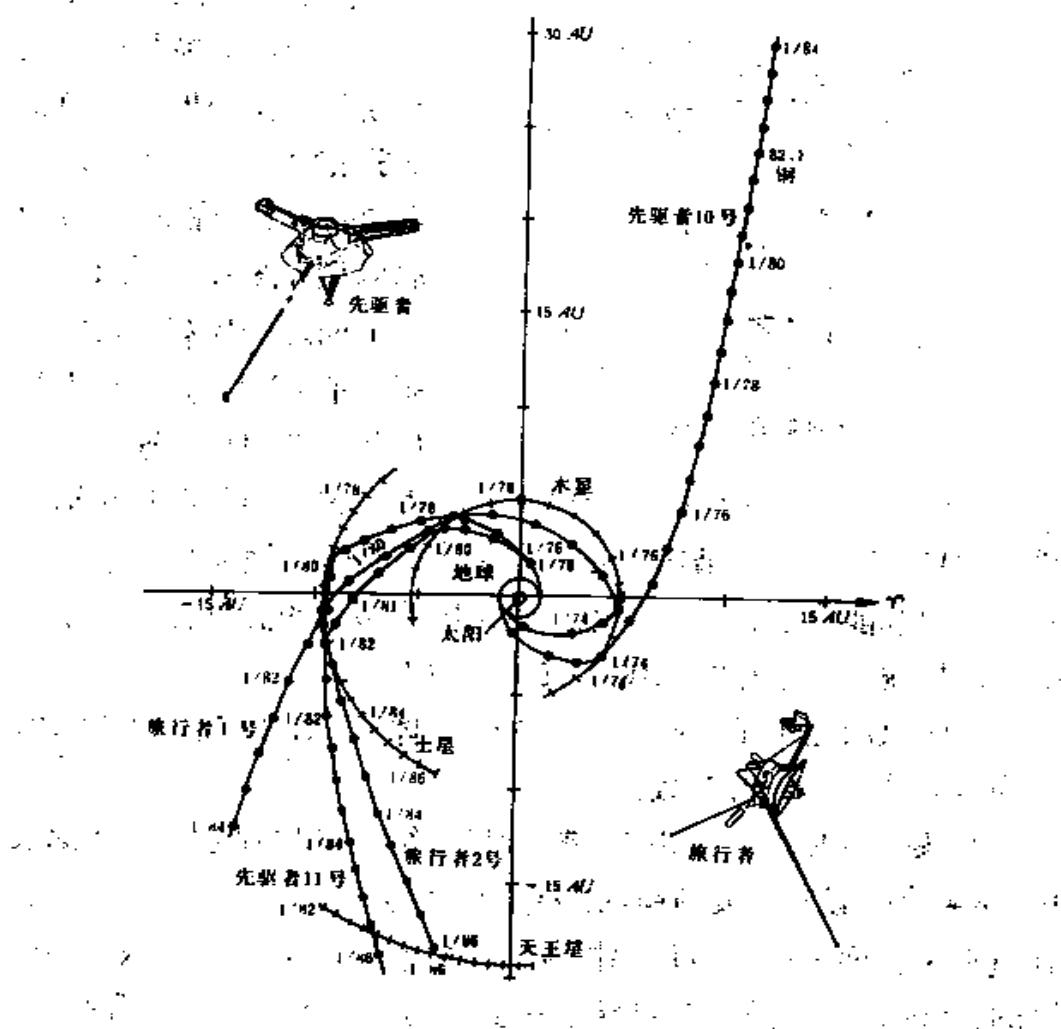


图 5.32 “先驱者”和“旅行者”对巨行星和远日行星的空间探测路径

都来自于空间探测。在七十年代中已有四艘飞船（图5.32及表5.16）对木星进行了红外、紫外和可见光的近距观测。“先驱者”11号飞船飞抵木星上空46400千米处，因此获得了高分辨率的大量资料。而两艘“旅行者”则更有计划的对木星进行了全面研究。人们认为，它们使人类对于木星的认知远远超过了过去几千年的总和。

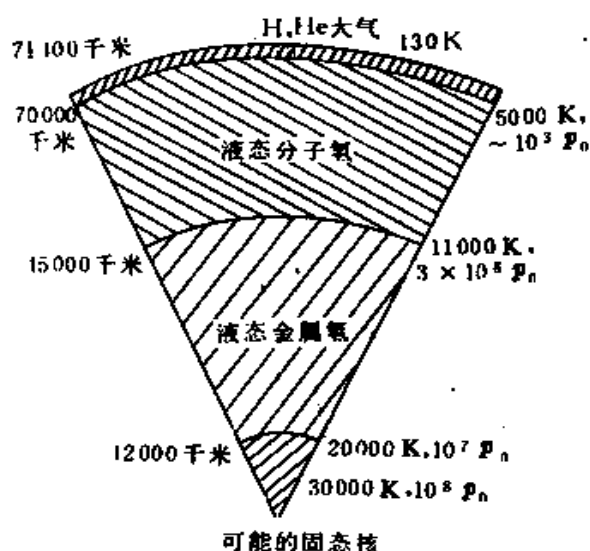


图 5.33 木星内部的分层结构模型

1. 内部结构 通过“先驱者”对木星周围引力场的探测，人们建立了令人意外的内部模型，而这种模型不仅与地面上模拟试验相吻合，也为“旅行者”的资料所佐证。木星内部模型如图5.33所示。大气下面是一片蒸腾着的液态分子氢“大海”。正因为如此，它的自转速度与纬度有关，而且明显呈扁球状。

在厚达25000千米液氢下是一层更为奇特的金属氢层，它也呈液态，但却能像金属一样导电。这是因为极高的温度使氢原子的电子都挣脱了原子核的束缚而成了自由电子。

金属氢层之下是否有一个不大的固体核，则目前尚无定论，但认为有固体核的人占多数。

2. 磁场和磁层 木星的磁场很强，结构也特别复杂。在离木星 $3R_J$ 处近似为四极场和八极场，强度为 $3 \times 10^{-4} - 11 \times 10^{-4}$ 特。在近木星表面又可以看作偶极场，其中心的偶极矩为地球磁场极矩的19000倍^①。磁轴与自转轴的交角为 79.2° ，磁场中心离质量

① 这是指中心偶极矩，若与表面上的磁场比较，则木星表面磁场仅比地球表面磁场大几十倍。

表 5.16 四艘飞船的旅程

飞船型号	发射年月	到 木 星		到 土 星		到天王星	到 海 王 星
		时 间	距木星(10^3 千米)	时 间	距土星(10^3 千米)		
"先驱"10	1972. 3. 2	1973. 12. 4	131	—	—	—	1982年6月14日飞过海王星轨道,以13.6千米/秒的速度向"罗斯248"恒星飞去,估计需85万年。
"先驱"11	1973. 4. 6	1974. 12. 3	46.4	1979. 9. 6	—	1985. 7	—
"旅行者"1	1977. 9. 5	1979. 3. 5	278.4	1980. 11. 12	124.3	—	—
"旅行者"2	1977. 8. 20	1979. 7. 5	640	1981. 8. 23	101	1986. 1	1989.

中心 $0.1R_J$ ，根据磁场测定的木星自转周期为 $9^h55^m29.37^s$ 。

木星的磁层半径差不多比地球磁层大100倍，大致可分成三个区域：内区（ $\sim 20R_J$ ）、中介区（ $20-60R_J$ ）、外区（ $60-90R_J$ ），内区可当作偶极场，中介区则较稀松且弯弯曲曲，由于强大的离心力使带电粒子约束在很薄的一片——电流片内，称片形场。外区的合成场则可扫及几个木卫。

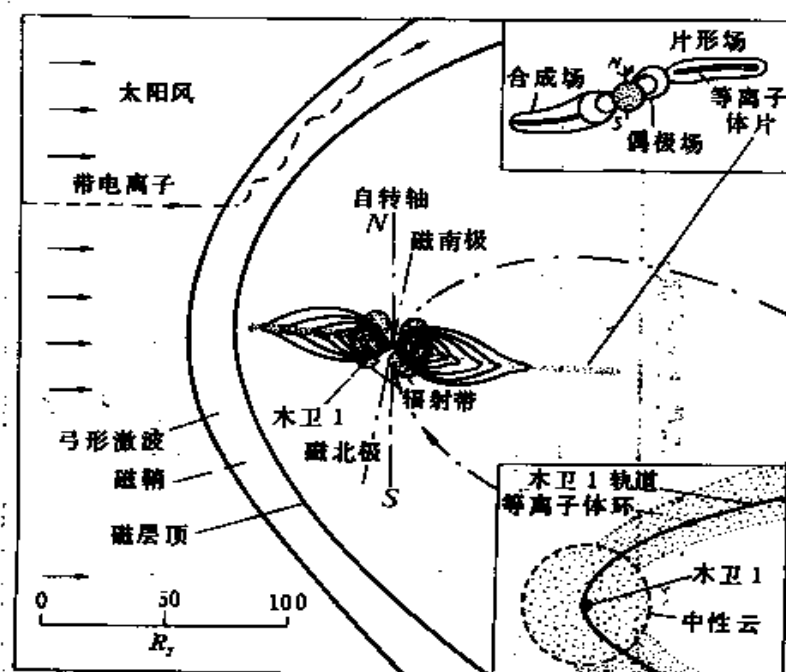


图 5.34 木星的磁场和磁层

“旅行者”还发现木星在背太阳方向伸出一段长长的磁尾，有时可达9亿千米甚至触及土星。此外，木星大气内也常常发生闪电，更惊奇的是在木星背阳面还观测到范围达3万千米的极光。这也是第一次观测到地球以外的极光。

3. 木星的能源 近年来发现木星向外的辐射能竟是它接收的太阳能量的2.5倍。而对其大气表面的温度测定也比理论值高20多度，这表明木星在红外及射电波段确实有自己的辐射能。

此外，木星还有很强的射电辐射及猝发的高能电子。它的高

能电子辐射一直可以达到水星区域,密度比宁静太阳发射的还大。空间探测还发现木星甚至还有 X 射线辐射。

由我国史料分析,我国有人还以为木星的亮度一直在增大。苏联甚至有人认为木星将来可能会演化成真正的恒星。

木星的能源从何而来? 目前还没有找到满意的答案。

4. 木星环 “旅行者”发现了木星也有环,从而使人们对行星环的起源有了新的认识(图5.35)。木星的环很暗,地面上无法观测到。它的宽度不足9000千米,厚仅1千米左右。其外边缘离木星约 $1.82R_J$ (130000千米)已接近到木卫14和16了。木卫环也在绕木星旋转,周期在7天左右,比木星自转速度还快。后来发现,木星环实际上分为两个。内环物质很稀,几乎与木星大气相连(图5.36),木星环都是由微米级大小的尘埃组成的,间或也有一些碎石,它们的反照率很低,因此不易观测到。

现在已知有环的行星已有三颗:木星、土星、天王星,因此环可能与某种演化过程密切有关。有人据此推论,海王星和冥王



图 5.35 “旅行者”发现的木星环带

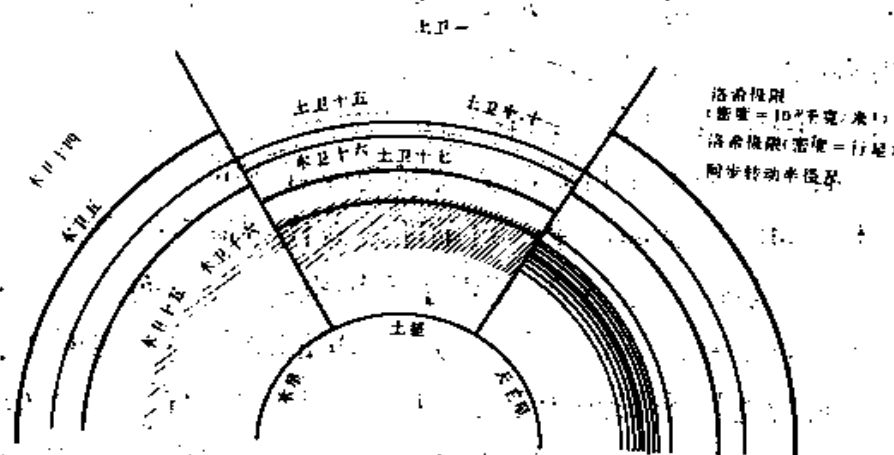


图 5.36 行星的环

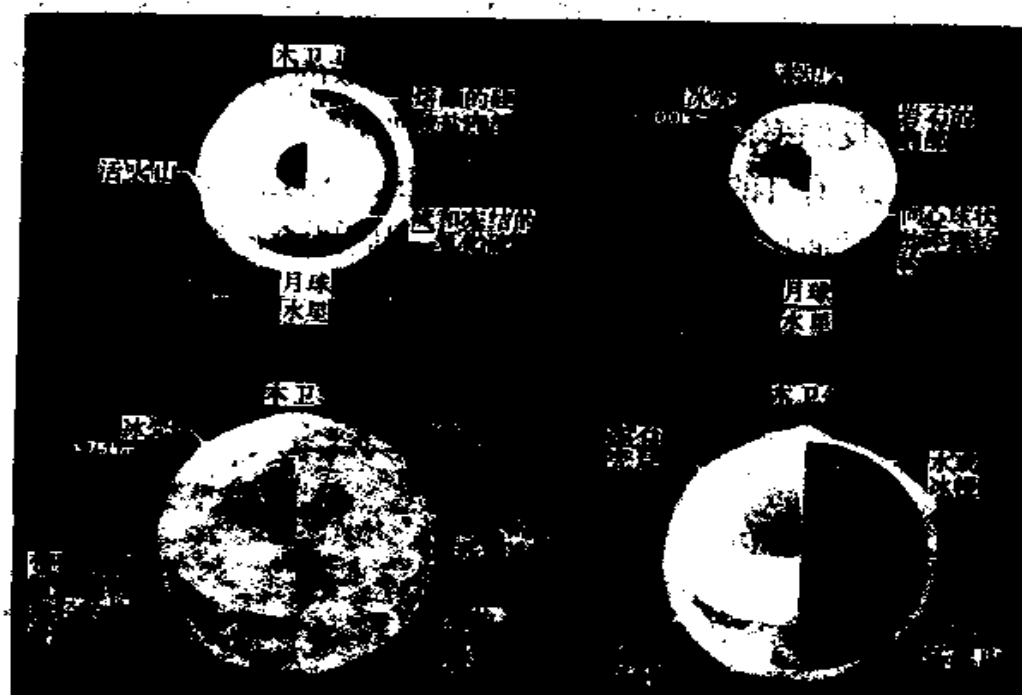


图 5.37 四颗伽利略卫星及其可能的内部结构

星或许也会有类似的环结构。

当然，环并非是一块连续的整体，一般都有较复杂的细节结构。

5. 木卫系统 木卫的数目从七十年代的13颗已增加到现在

的18颗，随着资料逐步处理还有可能会有新的木卫发现。有16颗的木卫数据比较可靠(表5.17)。由于空间探测的成果，今天人们对木卫的了解已经比以前深入了一大步，甚至已经绘制了木卫——木卫五的地形、地貌图，推断出它们可能的内部结构(图5.37)。

在木卫一上，人们第一次看到地球之外的火山喷发，它的表面活动十分激烈，火山的熔岩常使它表面更新，因而除了火山外，它的表面上竟见不到通常的环形山。

木卫三是太阳系中最大的卫星，直径超过了水星，它的表面上除了有一些稀疏的中、小环形山外还有许多纵横交叉的直线条，可能是山脊或峡谷。

木卫四表面上则有许多奇怪的同心环，环形山的数目也明显增多，说明它的表面年代是较老的。

除了伽利略卫星(木卫一—四)外，其他木卫明显小得多，但它们在绕木星共同运动中，会造成许多有趣的天文现象，如：木卫食(木卫沉浸在木星影锥中)、木卫掩(木卫被木星视表面遮掩住)、木卫凌木(卫星本体通过木星视圆面)、木卫影凌木(卫星的

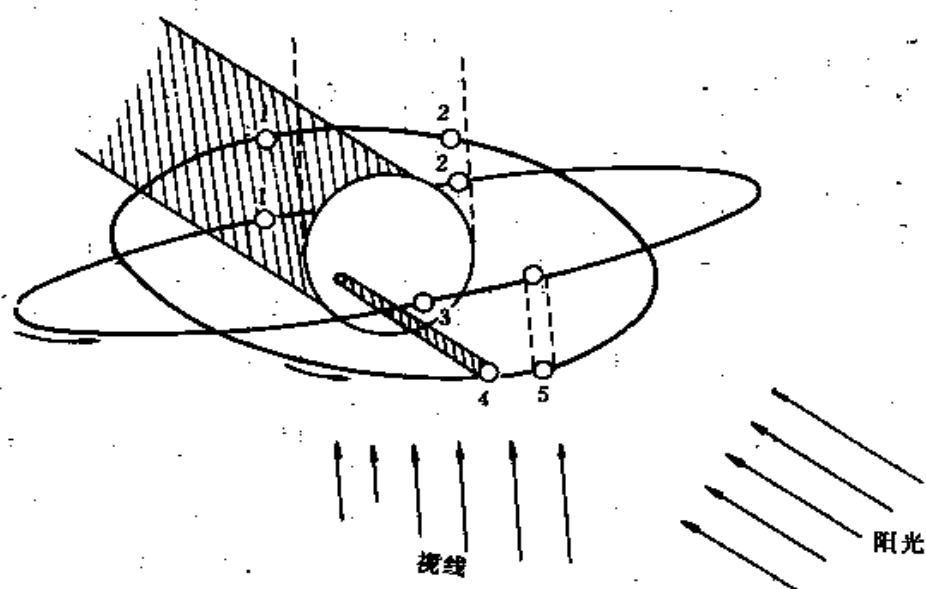


图 5.38 众多的木卫现象

表 5.17 木卫系统 (按与木星距离排列)

木卫名	发现年份	轨道半长径 a ($\times 10^3$ 千米)	轨道周期 P (日)	轨道偏心率 e	与木星赤道面交角 i (度)	半径 R (千米)	平均密度 ρ (千克/米 ³)
木卫十六	1980	127.96	0.295	很小	很小	~20	?
木卫十五*	1979	128.96	0.298	很小	很小	$12 \times 10 \times 8$	?
木卫五	1892	181.3	0.498	0.003	0.455	$135 \times 85 \times 75$	?
木卫十四	1980	221.9	0.675	很小	很小	$55 \times ? \times 45$	?
木卫一	1610	421.6	1.769	0.004	0.04	1815	3550
木卫二	1610	670.9	3.551	0.000	0.488	1569	3040
木卫三	1610	1070	7.155	0.001	0.183	2631	1930
木卫四	1610	1880	16.689	0.007	0.253	2400	1830
木卫十三	1974	11110	240	0.147	26.7	~5	?
木卫六	1904	11470	250.6	0.158	27.6	90	?
木卫十	1938	11710	260	0.120	28.0	~10	?
木卫七	1905	11740	260.1	0.207	24.8	40	?
木卫十二	1951	20700	617	0.169	147	~10	?
木卫十一	1938	22350	692	0.207	163	~15	?
木卫八	1908	23300	735	0.40	147	~20	?
木卫九	1914	23700	758	0.275	156	~15	?

* 已有一些天文学家把木卫十五与木卫十四的顺序与本表所列相反。

影子投影到木星视圆面上)及木卫互掩(一个木卫被另一木卫遮掩)。利用这些特殊的天象(图5.38),除了有助于测定它们本身的大小、地球上的时间和经度外,1675年丹麦天文学家罗默还以此最早测出了光的传播速度。

§ 5.9 土星及土卫系统

一、土星(h)概况

土星是最美丽的天体之一(彩照5),也是肉眼所能见的最远行星。西方把它奉为“农业神”,在中国古代称它为镇星或填星。它与木星犹如孪生兄弟,有许多十分相似的地方。它的半径和质量仅次于木星(表5.1)都比地球大得多;也有浓厚的、色彩绚丽的大气及云带;非常快速的自转(周期 $10^h 14^m$)使它的形状甚至比木星更扁,高纬度处自转也明显变慢;同样没有固体表面;它也有庞大的卫星系统;它的光环远比木星明亮而美丽动人……。

土星离太阳几乎比木星远一倍,因而它的表面温度比木星更低,据测定为105开左右。但因它大气中不仅有众多的氢、氦,还有相当的氨、甲烷、故其云带呈淡淡的桔黄色。土星大气中也有类似木星大红斑的旋涡结构——白斑,不过规模比较小而已。

土星内部结构大致与木星相当,然而土星的平均密度只有 700千克/米^3 ,比水还小,因此有些人认为它内部可能有一层5000千米的冰层,它的液态

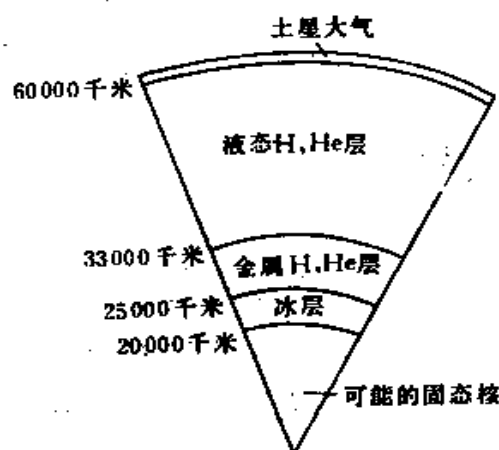


图 5.39 土星内部的结构模型

表面中不仅有氢还有氮(图5.39)。

土星表面温度理论计算值 T_3 为76开,实测为105开,高29开,可见土星与木星一样,有着自己的能源。

“先驱者”已确证了土星有磁场,“旅行者”则定出强度为木星的1/35,但比地球磁场强。土星偶极场的极性与木星相似,与地球相反(图5.40)。但它的磁轴与自转轴几乎重合(179°),磁场中心与质心相差也不大($0.04R_h$)。它的磁层结构比木星更复杂一些,在等离子体外面它还有氢环。

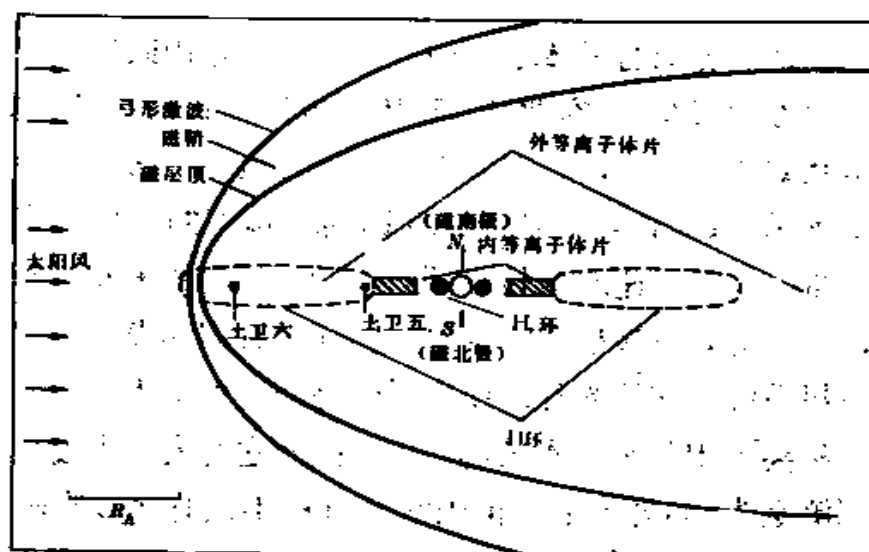


图 5.40 土星的磁场与磁层

二、光环

土星的环十分明亮,故称光环。早在1656年土星光环就为荷兰物理学家、天文学家惠更斯所证认了。1856年,英国物理学家麦克斯韦(J. Maxwell)从理论上否定了光环为一整块固体的看法,认为它由无数小卫星构成。现在知道,环内确实有着无数在绕土星转动的小冰块。

土星光环在望远镜中显得十分引人注目。由于它位于土星的

赤道面上，而与黄道交角为 26.7° ，所以地球上看来，它有迥然不同的外形(图5.41)。以前人们把它分为A、B、C三个环，其宽度一直延伸到137000千米($2.27R_n$)处。后来，又增加了D环、E环。“旅行者”从土星光环中穿过，它的观测分辨率可达100米，除了确证新发现的F、G环外，更清楚地见到了土星的光环就象一张巨大的密纹唱片，多得不可胜数，何止成百上千(图5.42)。而且，通过电子计算机处理表面，土星的光环内还有许多更复杂的细节结构，有的大环中还有小环，有的环明显地偏心了，有的几条小环又如“辫发”那样扭结在一起，环中还有一些小的卫星(图5.43)。

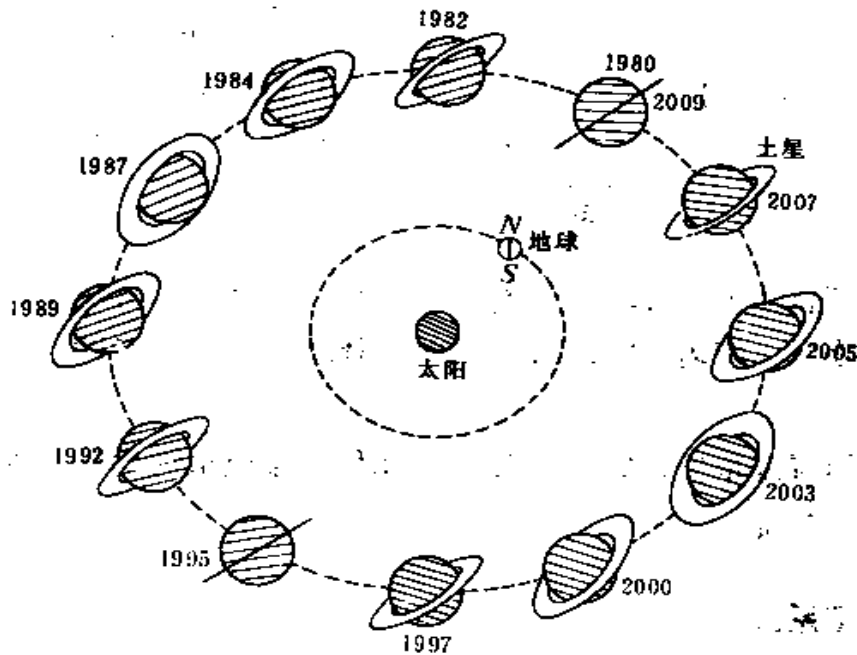


图 5.41 土星光环在不同时期有不同的形态



图 5.42 土星的光环何止成千上万。这是“旅行者”1号1980年12月12日所摄的土星背阳面的光环

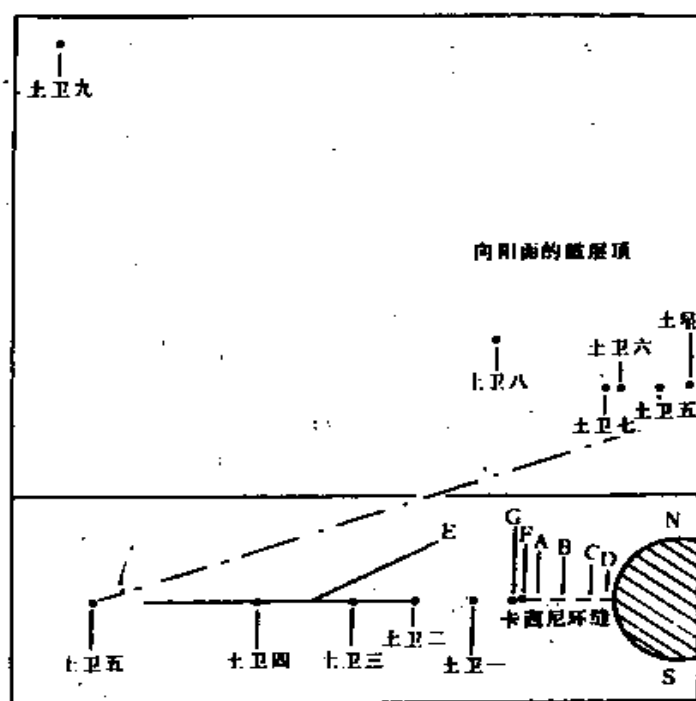


图 5.43 土卫系与光环

光环的几个主环之间还有一些空隙——环缝，环缝中几乎没有什么物质。较著名的环缝有卡西尼环缝(A、B环之间)，恩克环缝(A环中间)。

环的温度很低，约65—75开。光环的总质量约为 $10^{-6}m_h$ ，相当于 10^{20} 千克。

三、土卫系统

在“先驱者”飞越土星之前，土星的卫星数是10颗，仅次于木星，但现在根据美国航天局1982年宣称，较确定的有22—23个，已超过了木星。而且土星的卫星确切颗数看来还不易弄清，因为有待认证的候选者尚有37颗，但已公布资料的有18颗(表5.18)。

土卫系统中除了有与木卫同样的有趣天象(但罕见得很)外，还有许多独特之处：即有一些卫星占有同一轨道，形成一些奇妙的天空正三角形(第十七章)。例如在土卫三前、后 60° 附近，分别

表 5.18 土卫系统 (按与土星距离排列)

土卫名	发现年份	轨道半长径 a ($\times 10^3$ 千米)	轨道周期 P (日)	轨道偏心率 e	与土星赤道面交角 i (度)	半径 R (千米)	平均密度 ρ (千克 米 ⁻³)
土卫十八	1980	124.4	0.517	很小	很小	~40	?
土卫十五	1980	137.7	0.602	0.002	0.30	19 ~ ? ~ 13	?
土卫十六	1980	139.4	0.613	0.003	0.00	70 ~ 50 ~ 37	?
土卫十七	1980	141.7	0.629	0.004	0.05	55 ~ 42 ~ 33	?
土卫十一	1966	151.4	0.691	0.009	0.30	70 ~ 57 ~ 50	?
土卫十	1966	151.5	0.695	0.007	0.10	110 ~ 95 ~ 80	?
土卫一	1789	185.5	0.942	0.020	1.517	196	1200
土卫二	1789	238.0	1.370	0.001	0.023	250	1100
土卫三	1684	294.7	1.888	0.000	1.093	530	1000
土卫十三	1980	294.7	1.888	?	?	12 ~ 11 ~ 11	?
土卫十四	1980	294.7	1.888	?	?	15 ~ 12 ~ 8	?
土卫四	1684	377.4	2.737	0.002	0.023	560	1400
土卫十二	1980	378.1	2.739	0.005	0.15	17 ~ 16 ~ 15	?
土卫五	1672	527.0	4.518	0.001	0.35	765	1300
土卫六	1655	1222	15.94	0.029	0.33	2575	1900
土卫七	1848	1481	21.28	0.104	0.1	175 ~ 117 ~ 100	?
土卫八	1671	3561	79.33	0.028	14.7	730	1200
土卫九	1898	12954	550.4	0.363	150	110	?

是土卫十三及十四(图5.44),又如土卫十、十一两颗卫星虽然轨道半长径几乎相同,但因它们的近土点、偏心率不一,所以它们彼此有时会“擦肩而过”。有些土卫实际上处于光环之中,它们与光环的互相作用正是造成土星光环结构特别复杂的一个主要原因

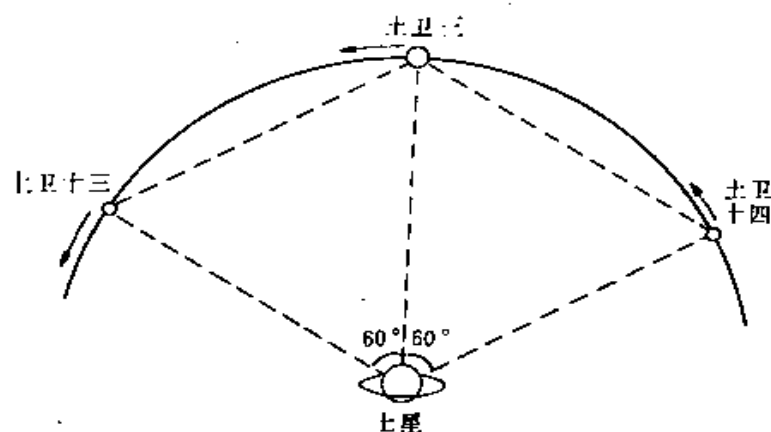


图 5.44 土卫中奇妙的“正三角形”

土卫中最大的卫星是土卫六,过去普遍认为它是卫星之冠,现在精确测量得知它的半径比木卫三小56千米,但土卫六是最早确定有大气的卫星,它的大气除 N_2 、 H_2 、 He 、 CH_4 外,还有大量的有机物质,所以一度对它是否具有原始形态的生命寄予厚望。

§ 5.10 三颗远日行星

天王星、海王星、冥王星是发明望远镜之后人类发现的三颗肉眼看不见的行星。由于遥远的距离及发现年代不长,过去人们对它们的了解并不多,即使在其他领域都获得重大进展的七十年代,除了1977年发现的天王星环,1978年发现冥王星卫星外,并无重大进展。能寄予希望的是“先驱者”11号(1985年抵天王星)及

“旅行者”2号(1986年到天王星、1989年到海王星)届时可能会获得丰硕的成果。

一、天王星(♅)

1781年3月,一个出身于德国的英国天文学家威廉·赫歇耳偶然发现了太阳系第七颗大行星——天王星。这使人类认识的太阳系疆域扩大了一倍。也激起了人们寻找火星、木星之间天体的努力。

在望远镜中,天王星的视圆面略呈蓝绿色,它上面也有浓厚的大气,但并没有木星、土星那种与赤道平行的带纹,很可能这是因为它的表面温度比土星更低。天王星大气的主要成份仍是氢、氦,但含甲烷、氨的比例比土星高得多。

天王星一个很独特之处是它的“侧向自转”,即它的自转轴与轨道平面法线的交角为 $97^{\circ}55'$,自转周期几经反复,现定为 $14^{\text{h}}36^{\text{m}}$ 。这也是太阳系中比较独特的自转方式(图5.45)。其原因一般认为同金星一样,是在行星形成后为残余的大星子撞击造成的。

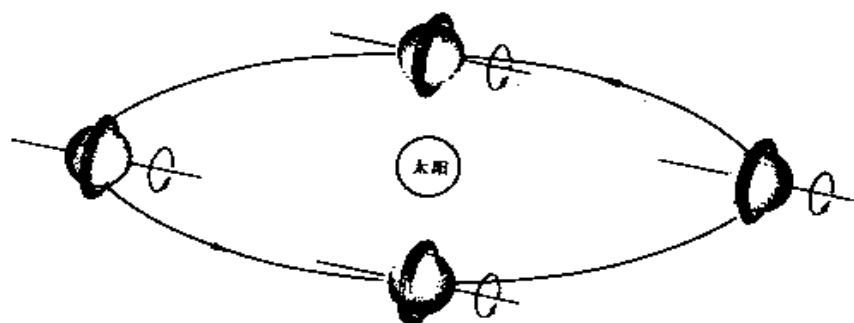


图 5.45 天王星的侧向自转

天王星的内部结构只能从理论上推断。根据“缓热模型”则可大致分成氢氦为主的大气、冰物质的幔和岩石的内核(图5.46)。从天文卫星最新资料中可知,天王星可能也有磁场存在,但还未能得到最后的确证。由于天王星的自转轴比较特别,所以其磁层结构也非同一般。在不同的轨道位置上,其磁层结构及形态会有极

表 5.19 天卫系统

卫 星 名	发现年份	轨道半长径 a ($\times 10^3$ 千米)	轨道周期 P (日)	轨道偏心率 e	与天王星赤道面交角 i (度)	半径 R (千米)
天 卫 五	1948	129.4	1.111	0.027	3.4	~200
天 卫 一	1851	191.0	2.520	0.0028	0.0	665
天 卫 二	1851	266.3	4.144	0.0035	0.0	555
天 卫 三	1787	435.9	8.706	0.0024	0.0	800
天 卫 四	1787	583.9	13.16	0.0007	0.0	815

大的不同。

天王星的五颗¹卫星都属于规则卫星之列(表5.19)。

1977年3月,天王星掩恒星SAO158687,美国、澳大利亚、中国、印度及

南非的天文学家分别进行了观测,都得出了天王星具有环的结论。这是自1930年发现冥王星后太阳系中最重大的发现之一。也正是因为有了此先例,才使人们想到了去探索木星有无环的问题,并得到了“旅行者”资料的证实。

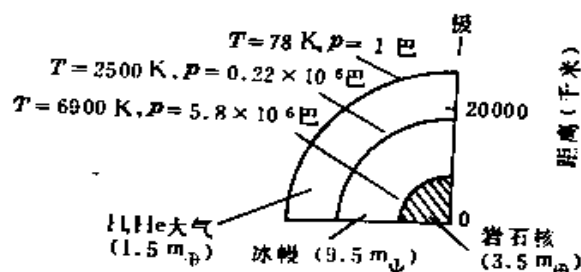


图 5.46 从缓热模型得出的天王星内部分层结构

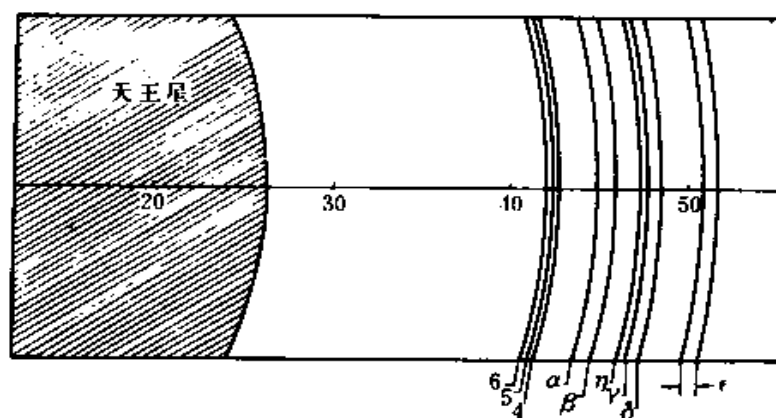


图 5.47 天王星的环带

天王星的环有九条²,主环 ϵ 环宽度小于100千米,其他的环更窄小,都位于天王星的洛希极限之内(图5.47及5.36),所以地面上的光学常规观测是无法看到的。

二、海王星(♆)

海王星是人们从“笔头上发现的行星”。自天王星发现之后,人

1 “旅行者”2号于1986年初飞抵天王星上空,据已发表的新资料,天卫的数目为15颗

2 同样根据“旅行者”2号探测,天王星的环有20条

们发现对其他行星都适用的牛顿引力理论在天王星总有不小的一点偏差，观测与预报的位置总有偏离，而到十八世纪四十年代累积的偏差已达到 $2'$ 左右。多数天文学家认为可能在天王星之外还有一颗未知行星，正是它对天王星的摄动才造成天王星运动的反常，有人建议，可以从这种偏差去估计摄动的大小，从而推算出未知行星的位置。然而这种工作在数学上有着巨大的困难，令人望而却步，但当时有两个青年——英国亚当斯和法国勒威耶在互不知晓的情况下分别进行了整整二年的工作；1845年亚当斯先算出结果，但格林尼治天文台却把他的论文束之高阁；1846年9月18日，勒威耶把结果寄到了柏林，却受到了重视。柏林天文台的伽勒(J. G. Galle)于第二晚就进行了搜索，并且在离勒威耶预报位置 $50'$ 的地方发现了这颗亮度相当于8等星的新行星(图5.48)。

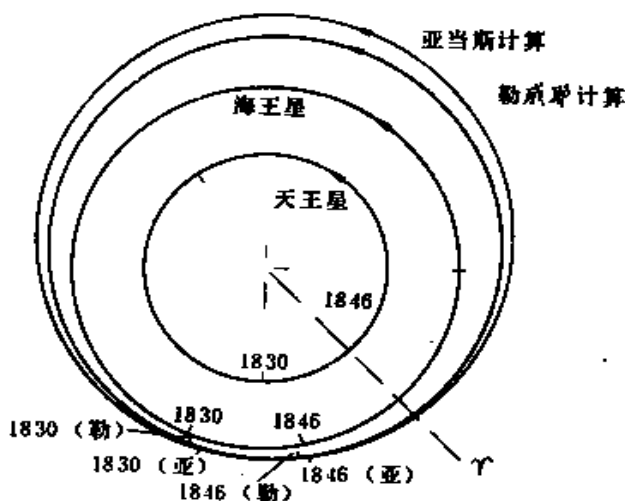


图 5.48 亚当斯、勒威耶计算的轨道与海王星的实际轨道，三者相差甚小

海王星的发现使哥白尼学说和牛顿力学得到了最好的证明，也成为科学史上一段脍炙人口的佳话。

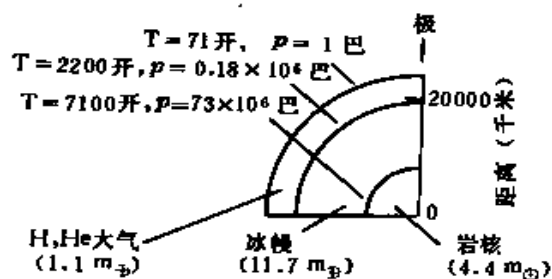


图 5.49 海王星的内部分层结构模型

海王星与天王星的特性、结构都十分接近，它同样有天王星般的云层结构，相似的化学组成(图5.49)，然而其磁场情况至今不明。它的自转情况并不像天王星，其自转轴与轨道法线的

表 5.20 海王星卫星系统 (未按离行星距离排列)

海卫名	发现年份	轨道半长径 a ($\times 10^3$ 千米)	轨道周期 P (日)	轨道偏心率 (e)	与海王星赤道面交角 i (度)	半径 R (千米)	平均密度 (千克/米 ³)
海卫一	1846	355	5.877	0.00	159.9	1800—2600	5600—1800
海卫二	1949	5560	360	0.75	27.6	110—240	?
海卫三	1981	50	?	?	?	45	?
海卫四*	(1980)	37	?	?	?	?	?

* 对于海卫四的存在,多数天文学家抱有怀疑的态度。

交角为 $28^{\circ}48'$ ，自转周期为 $17^{\text{h}}50^{\text{m}}$ 。海王星是否有环尚未有定论，在1981年5月发生的海王星掩星观测中，有人宣称记录到了与天王星1977年掩星类似的现象，因而认为海王星也有环，但是也有一些天文学家在同样的这次观测中却得到了完全不同的结论——认为是一颗新的海卫。1984年又有人提出，海王星可能有不连续的环，这与传统的观念又有很大区别，看来最后的结论还寄希望于空间探测，“旅行者”2号将于1989年抵达海王星邻近。

海卫数同样尚不太确定，过去认为是两颗，但现在倾向于3—4颗(表5.20)，值得指出的是，海卫一、二的情况很特别：海卫一特别大，超过了月球。它离海王星较近，一般这样的卫星应是顺行轨道，但它的 i 却约为 159.9° ，是一个逆行的圆轨道。而相反，海王卫二虽很小、很远，其轨道却是一个顺行的很扁的椭圆。至于另两颗卫星，则目前资料尚很贫乏。

三、冥王星(P)

有人沿袭从天王星所受摄动中推算未知海王星的方法，根据海王星运动的细小的不规则变化，也去推求更远的未知行星的轨道，而且的确根据预报的位置，一位美国青年天文学家汤博(C. W. Tombaugh)于1930年初居然也找到了一颗行星——冥王星。然而，进一步的计算表明：新发现的冥王星的质量很小，不足以对海王星产生可见的影响。因此，这一发现带有明显的偶然性。

冥王星是目前太阳系中最远的行星($a \approx 40$)，其轨道最扁($e \approx 0.25$)，以致最近20年间冥王星离太阳比海王星还近(图5.50)。它的轨道倾角也是最大的($i = 17^{\circ}$)，所以它与海王星的距离从不小于2.6天文单位。迄今为止，人们只看到它在轨道上走了不到1/4圈，因此过去对其知之甚少。冥王星的发现使行星简单分成二类的分类法一度出现了危机。1978年夏天发现了冥王星的卫星(图5.51)，使得人们对冥王星的了解陡增，也使很多怀疑它是否有行

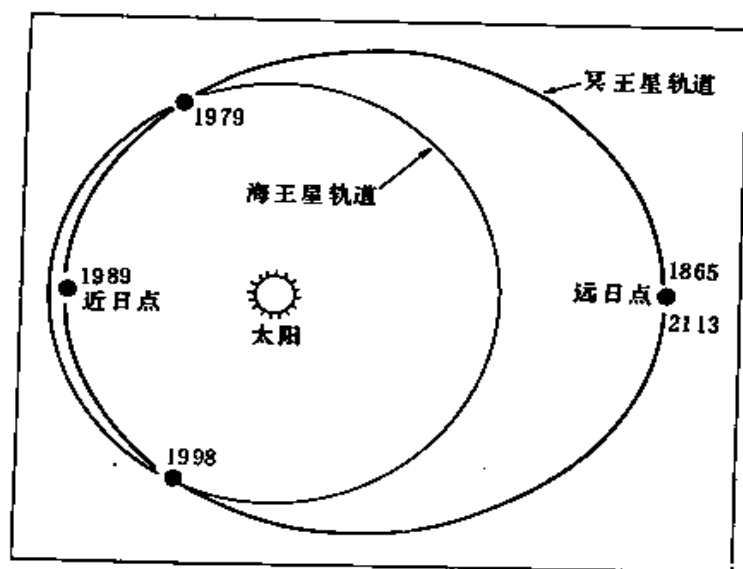


图 5.50 冥王星的轨道 e 很大，故最近20年间比海王星更近

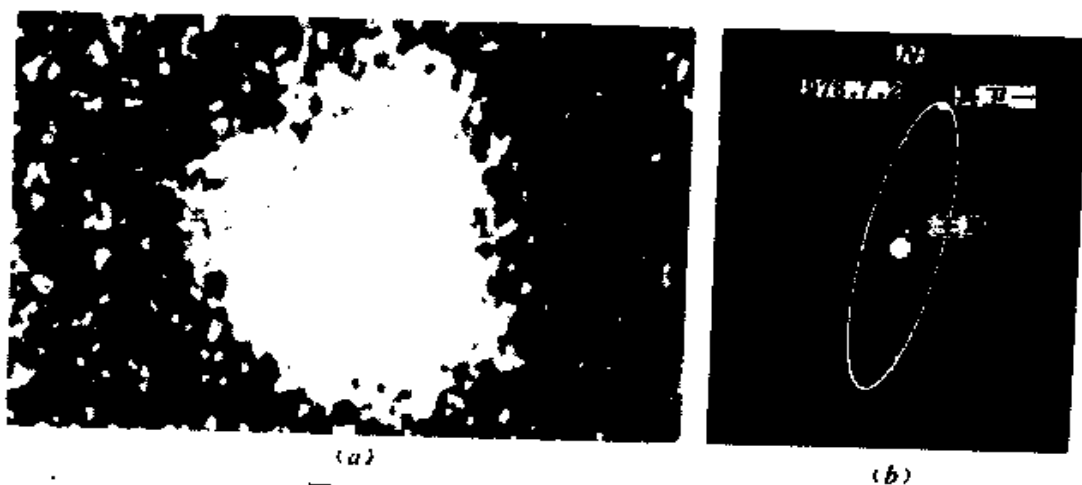


图 5.51 1978年发现的冥王星卫星；

(a) 卫星使冥王星像在一个方向拉长了；(b) 冥王卫轨道的投影图

星资格的异议得到了澄清。

冥王星的质量仅为 $0.0024m_{\oplus}$ ，远比其他行星小，甚至在卫星世界中它也只能排在第七、第八左右。

冥王星的表面温度很低，即使在阳光直射下也只有50开左右，因而它上面绝大多数物质只能是固态或液态，即其冰幔特别厚，只有氢、氮、氦可能保持气态。如果上面有大气的话也只能由这三

种元素组成。

冥卫一的半径约 425 千米，与绕转行星的质量比可达 3 % ($m_{\text{e}} : m_{\text{p}} \approx 10^{-3}$)。它的轨道半长径(即离冥王星的距离)为 19000 千米。有趣的是冥卫一的自转周期、绕冥王星的公转周期以及冥王星的自转周期都为 6.3867 日。因而，不仅冥卫一始终以同一半球对向冥王星，而且冥王星也是以同一面朝向冥卫一。这也是太阳系中特有的“天然同步卫星”。

四、有关第十颗大行星的问题

除了九大行星外，太阳系内是否还存在其他未知的大行星，即第十颗大行星？这是一个十分诱人的科学悬案。自 1846 年海王星发现后，人们对此更有强烈的兴趣。一方面在水星轨道内寻找“水内行星”，另一方面则在海王星外找寻“海外行星”。水内行星虽也有过几次“发现”的报道，并有人已为它准备了“火神星”的名字，但尤其在水星近日点运动为广义相对论所论证后，经过多少次的仔细搜索，现在已可基本上予以否定。但在海王星外的问题却仍然没有定论。1930 年发现的冥王星由于质量太小，并没有使疑团获释。

许多人认为冥王星外存在一颗乃至若干颗至今未被发现的大行星是完全可能的。其理由是：

(1) 太阳系的范围很大，从理论计算可知(见 § 16.8) 它的范围约有 15 万天文单位，而望远镜发明后的三百年来，人们几经扩大了对太阳系范围的认识，九大行星不过 40—50 天文单位。只是上述值的 0.03%，在其余广阔的空间内存在着未被发现的大行星是毫不足怪的。

(2) 天王星、海王星的运动与牛顿力学计算的位置仍常有细微的差别，但冥王星的质量是如此之小，它对它们的摄动影响是微不足道的，只有用另外的“冥外行星”才可能加以说明。美国海军

天文台曾通过大型电子计算机算得了它的一些轨道及质量数据： $a=50-100$ 天文单位， e, i 都较大，质量为 $2-5 m_{\oplus}$ 。

(3) 通过对彗星(见第六章)运动及轨道的研究，如哈雷彗星几次回归都比计算值有所推迟，归咎于未知行星的摄动作用是最方便的。而从彗星轨道的分析知道尚可能存在有4个属于未知行星的彗星族，有人因此认为至少还有4颗冥外行星尚待人们去发现。

但是与此相反，也有不少天文学家对此提出了异议，他们认为冥王星外不可能再有未知行星了，这有如下的理由：

(1) 从现今流行的现代太阳系起源学说(§6.8)看来，当初星云盘内的物质分布在海王星轨道外已经如此稀薄，以致不可能再通过自吸引而集聚成有相当质量的大行星。

(2) 彗星运动变化完全可用其他原因说明。如非引力作用(§6.3)。只要彗星有自转，便足以造成几天甚至几十天的误差，而彗星也是普遍都有自转的(虽然已测定的还不多)。

(3) 对于天王星、海王星运动的不规则性其原因也可能在冥王星外存在其他类型的天体。如美国一位天文学家认为是太阳的“暗伴星”(恒星)，英国有人却认为可能是太阳附近的中子星或小黑洞。

(4) 所谓的运动偏离，可能是观测误差引起的，因而规律性不明显，这样冥外行星的存在也就失去了前提。

当然这个问题目前还无法定论。因为在遥远的距离上搜索一颗亮度很弱的未知行星，其困难不亚于大海捞针。目前人们一方面通过大型电子计算机进行模拟计算，企图预先算出可能的位置，再从事有效的观测，另一方面人们还寄希望于两艘即将飞出太阳系的宇宙飞船——“先驱者”10、11号。它们是从两个不同方向飞离太阳系的(图5.52)。倘若在离太阳60—70天文单位处确有一颗质量为地球质量4—5倍的未知行星，那末它的引力影响将对“先

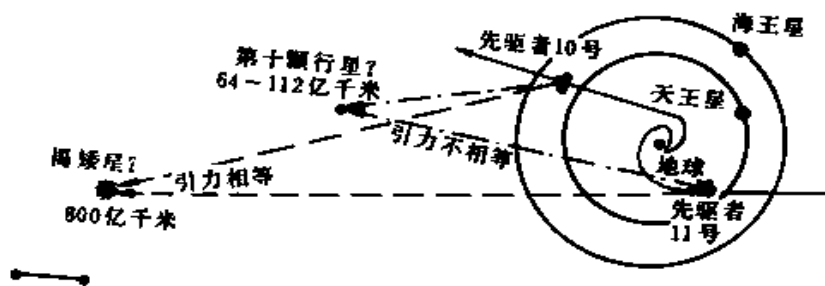


图 5.52 “先驱者”10,11号飞船将对未知行星作出验证

驱者”10号产生微小的、可以测定的影响,而对“先驱者”11号几乎没有什么作用。而如果存在太阳的暗伴星,则对两艘飞船都会产生相当大的摄动,或许这能有助于这个问题的解决。

第六章 太阳系内的小天体

太阳系内的小天体是指那些质量较小、绕太阳作开普勒运动的天体。主要包括：小行星、彗星、流星体和行星际物质。有时广义而言也可以包括行星际磁场、太阳风、宇宙线等。大行星的卫星虽然也不太大，但由于它们与行星有更直接的关联，所以一般不属于“小天体”的范畴，尽管有时它们之间还有直接的演化关系（如一些人认为某些不规则卫星可能与小行星有相同的起源）。

§ 6.1 小行星

一、发现简史

天文学家很早就发现，火星与木星之间的距离似乎太大了些，信奉“宇宙和谐”的开普勒当年在他的著作中曾经对此作过专门的讨论，他的结论是“在火星与木星之间还应当有一颗行星存在！”1772年，提丢斯-波得定则又尖锐地提出了这个问题。根据(5.5)式在 $n=5$ 即离太阳2.8天文单位处也应当有行星存在，波得甚至根据开普勒定律预言：“在火星与木星之间的大行星，完成绕太阳一周的时间应为4.5年。”

1781年3月，威廉·赫歇耳在英国意外地发现了太阳系的第七颗大行星——天王星。从观测资料计算出来的轨道表明：它的轨道半长径为19.18天文单位，正好与提丢斯定则 $n=8$, $a_8=19.6$ 差不多。这种惊人的吻合无疑成了提丢斯-波得定则最有力的支持。

十八世纪末，多数天文学家一致认为应当努力设法寻找这颗“失踪”了的行星，一些天文学家还自动集会讨论这个“未知行星”的问题，协商共同搜索黄道区域的星空。然而，有趣的是捷足先登者却是一个“局外人”——意大利天文学家皮亚齐。1801年元旦之夜他在无意之中发现了小行星谷神星，从此揭开了小行星研究的序幕。

1802年德国医生奥伯斯 (H. W. M. Olbers) 发现了第二颗小行星智神星。接着又连续发现了(3)婚神星、(4)灶神星。但此后却中断了38年，直到1845年底才发现了(5)义神星(表6.1)。小行星数目随之很快地增加起来，1868年突破了100颗，1923年11月20日小行星数进入四位数。近年来由于探测技术及轨道计算方法都有了很大的改进，因此每年发现的小行星数竟达二、三百颗，到1983年年中，正式编号命名的小行星为2763颗，到1985年8月，则已达到3301颗。当然，太阳系内小行星的实际数目要比这多得多，有人估计，冲日星等为19星等的小行星数约为44000颗，而21.2星等的小行星则近50万颗。

表 6.1 最早发现的十颗小行星

编号	小行星名	平均冲日星等 (m)	发现年、月、日	发 现 者
1	谷神星	7.4	1801. 1. 1.	皮亚齐
2	智神星	8.5	1802. 3. 28.	奥伯斯
3	婚神星	9.6	1804. 9. 1.	哈 丁(K. Harding)
4	灶神星	6.8	1807. 3. 29.	奥伯斯
5	义神星	10.9	1845. 12. 8.	亨 克(K. L. Hencke)
6	春神星	9.3	1847. 7. 1.	亨 克
7	虹神星	9.3	1847. 8. 13.	欣 德(J. R. Hind)
8	花神星	9.5	1847. 10. 18.	欣 德
9	海神星	9.8	1848. 4. 26.	格拉汉姆(A. Graham)
10	健神星	10.6	1849. 4. 12.	德加斯帕里(A. De Gasparis)

二、小行星的命名规则

小行星一般十分暗弱，如果不知道其轨道情况则很难对它观测研究。历史上也不乏“得而复失”的教训。为此，国际天文学联合会后来规定，对于新发现的小行星只给予临时编号：发现年份加两个拉丁字母，其中第一个字母表示发现的哪个半月，后面的字母则表示是这半个月中观测到的第几颗(表 6.2)。如“1975RB”即为1975年9月上半月发现的第2颗小行星，而要得到正式编号，则必须要算出其运行轨道，并且再观测到以后的两次回归(即冲日)。例如：1955年我国紫金山天文台发现的 $P. O. 331$ (即紫金山天文台观测到的第331颗小行星)，直到1965及1975年观测到了它的冲日、列出了：

$$“1955 DA=1965 YN=1975 SD”$$

表 6.2 小行星的临时编号

月 份	上 半 月	下 半 月
1	<i>A</i>	<i>B</i>
2	<i>C</i>	<i>D</i>
3	<i>E</i>	<i>F</i>
4	<i>G</i>	<i>H</i>
5	<i>J</i> *	<i>K</i>
6	<i>L</i>	<i>M</i>
7	<i>N</i>	<i>O</i>
8	<i>P</i>	<i>Q</i>
9	<i>R</i>	<i>S</i>
10	<i>T</i>	<i>U</i>
11	<i>V</i>	<i>W</i>
12	<i>X</i>	<i>Y</i>

* *I* 字母不用

这样的结果，才得到了国际天文学联合会的正式编号——(2197)^①，此后发现者才有权给予正式名字：“上海”。由此不难理解，每年“发现”的小行星数目虽然很多，但正式编号的数目增加得并不是十分迅速的(表6.3)。

表 6.3 小行星“发现”和正式编号数

年 份	“发 现”		正 式 编 号	
	“发 现”	累 计	编 号	累 计
1801—1849	10	10	10	10
1850—1859	47	57	47	57
1860—1869	53	110	52	109
1870—1879	105	215	102	211
1880—1889	80	295	76	287
1890—1899	264	559	165	452
1900—1909	776	1335	213	665
1910—1919	788	2223	249	914
1920—1929	1262	3485	202	1116
1930—1939	2799	6284	373	1489
1940—1949*	•		76	1565
1950—1959			73	1638
1960—1969			109	1747
1970—1979			348	2095
1980—1985			1048	3143**

* 由于此后观测到的小行星数目急剧增加，无法精确统计。

** 按1986年小行星星历表上统计为3143。

凡经正式编号的小行星都可由发现者为它起一个专门的名字。最早发现的小行星沿用大行星的惯例，都是神话中的人物名(占很大比例)，也有许多小行星以科学家名字命名，如(662)牛顿、

① 小行星的正式编号一般有两种表示方法，一是带括号，如(2197)，一是数字后面加一“号”字，如2197号。

(1134)开普勒、(2001)爱因斯坦、(1802)张衡等等。还有些小行星用国家及地名为名的：(1125)中华、(727)日本、(787)莫斯科等等。此外还有些怪名字：(227)哲学、(443)照相术、(1620)地理星等等。

三、小行星的一般性质

1. 质量 小行星的质量绝大多数只能根据一些间接的方法去推算。以前只能从它们之间的摄动影响去估算，所以只有三颗小行星的质量值，其他都是从半径值去估计的，仅有数量级的概念。1978年，天文学家发现了某些小行星也有“卫星”在绕它旋转，这将为确定某些小行星质量值提供又一种可靠的途径(表6.4)。

表 6.4 几颗小行星的质量、半径和自转周期

小 行 星 名	质量($\times 10^{20}$ 千克)	半径(千米)	自转周期(小时)
(1) 谷神星	11.7 ± 0.6	385	9.08
(2) 智神星	2.6 ± 0.8	245	7.90
(4) 灶神星	2.4 ± 0.2	195	5.33
(532) 赫克列娜	0.2	122	9.41

一般认为小行星的总质量值在 10^{21} 千克左右，约为地球质量的万分之三、四，其中谷神星大约占总质量的一半。有人估计，前面四颗小行星的总质量可能集中了小行星总质量的80%左右。

2. 半径 小行星的直径很小，除了几颗较大、较近的小行星可能进行直接测量外，其他可以用光度法、红外法、偏振法等来测定大小。因此已获得了几百颗小行星的半径值。现在知道，直径在50千米以上的小行星大约有560颗，绝大多数小行星的直径都在1千米以下。

有人对小行星的数目进行了统计(图6.1)发现当绝对星等①

① 小行星的绝对星等 M 是这样定义的：当小行星与太阳和地球的距离都为1天文单位，位相角为0（相当于“望”）时的视星等。一般讲来，太阳系天体包括行星的绝对星等都是这样定义的。

$M > 12^m$ (相当于其半径小于10千米)的小行星数 可由下式得出:

$$N = CM^{5.3} \quad (6.1)$$

式中 C 为常数, M 为小行星绝对星等数。这与由于频繁碰撞碎片

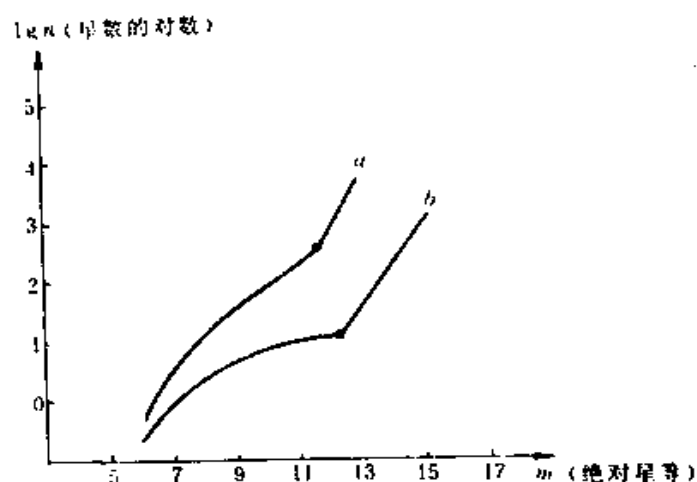


图 6.1 小行星数的统计规律

a 轨道半长径在2.0—3.5天文单位之间;

b 轨道半长径在2.0—2.6天文单位之间

的数目随大小分布的规律相近。

3. 反照率 小行星的反照率取决于它们的化学组成和表面状况。研究表明,按照反照率的大小可以把小行星分成若干类型,而这些分类与陨星有某种对应的关系。近年来,通过红外、偏振、雷达测量以及光谱分析,表明多数小行星是表面粗糙的碳质小行星,其中有的还含有水份及氨基酸。各类小行星的平均密度也都不相同(表6.5)。

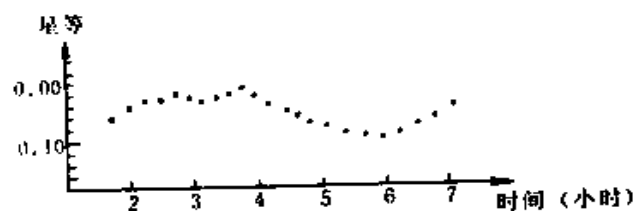


图 6.4 11 灶神星的光变曲线
光变幅为0.10—0.13星等

一般说来,碳质小行星的密度较小,金属型最大。从轨道分布而言,碳质小行星比石质小行星更远离太阳。

4. 自转及形状

表 6.5 按反照率大小区分的四类小行星

分 类	典 型 小 行 星 名	反照率	轨道半长径 (天文单位)	直 径 (千米)	绝对星等 (等)	占比例 (%)
碳 质 (C)	(95) 海神星	0.019	3.47	230	8.08	76
	(10) 健神星	0.041	3.15	320	5.80	
	(1) 谷神星	0.054	2.77	770	3.76	
金 属 (M)	(16) 灵神星	0.493	2.92	249	6.19	5
	(22) 诗神星	0.130	2.91	177	6.56	
石 质 (S)	(15) 法神星	0.155	2.64	272	5.48	16
	(1566) 伊卡普斯	0.166	1.08	1.4	16.82	
	(1620) 地理星	0.181	1.24	3	15.10	
其 他 (E)	(64) 安厄里娜	0.312	2.68	56	8.07	3
	(41) 娜莎	0.377	2.42	82	7.15	

从小行星的光变曲线知道，它们也有自转运动，小行星的光变曲线有两种不同类型。当小行星的形状比较规则，接近球形，则其光变主要是各处的反照率有所不同(因地形或组成有差异)而引起的。这种自转引起的光变并不太大，例如(4)灶神星 $\Delta m = 0.10 - 0.13^m$ (图6.2)，谷神星仅有 0.04^m 。

当小行星的形状不太规则(小的小行星多数为非球形)，其自转轴与视线方向有一定交角时，则光变可能很大，如(1620)地理星，其长度比宽度大4—5倍， $\Delta m = 1.2 - 2.0^m$ (图6.3)。

小行星的自转资料几乎都是

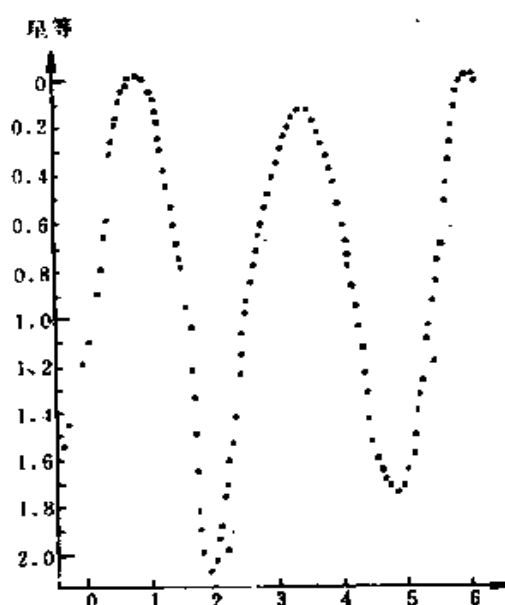


图 6.3 (1620) 地理星的光变曲线
光变幅为1.2—2.0星等

从它们的光变曲线归算求得的。但由于观测方法、使用的仪器及分析手段不一，因而各人得到的具体结果不尽相同，有的甚至相差很大。例如(2)智神星，有的认为 $P = 5.69^h$ ，有的得到 11^h ，而一般人取 $P = 7.9^h$ 。但从目前已知自转的200多颗小行星看来，多数在 $4^h - 16^h$ 间，平均为 11.47^h 。已知最快的是(1566)伊卡鲁斯， $P = 2.273^h$ ，最慢的是(182)伊尔莎， $P = 85^h$ 。但有人认为(288)格劳克的自转周期长达47天。

自转轴的取向目前看不出有什么规律性，是随机分布的。

直径大于100千米的小行星形状一般比较规则，基本上接近球体，而直径小于100千米时，多数小行星的形状很不规则，如(433)爱神星基本上为一个三轴椭球体 $36 \times 15 \times 13$ (千米)³；而(1620)地理星则如同一段香肠，长为宽的4.5倍；(624)赫克托犹如一个“哑铃”。

四、轨道分布

小行星的公转轨道都是椭圆，它们多数集中于火星与木星轨道之间，半长径的平均值为2.77天文单位，与提丢斯定则给出的2.8天文单位偏离甚小。根据统计，95%以上的小行星轨道半长径在2.17—3.64天文单位之间——这称为小行星的主环带，位于此环带内的小行星称“主带小行星”。图6.4表示主环带内侧的33颗较大的小行星的轨道分布及大体的形状。

后来发现，即使在主环带内，小行星的分布也并不均匀。在 a 为2.50、2.82、2.96、3.28、3.70天文单位附近，几乎找不到小行星，称为扣克伍德空隙；而在1.97、3.97、4.29、5.20天文单位处，又明显地比较集中(图6.5)，形成一些小行星群。这种空隙或成群现象在天文学上称之为“轨道共振”，小行星轨道共振是由于外侧的木星的引力作用引起的，所以这些共振点对应的公转周期与木星的公转周期可以互相通约，即成简单的比例关系。对

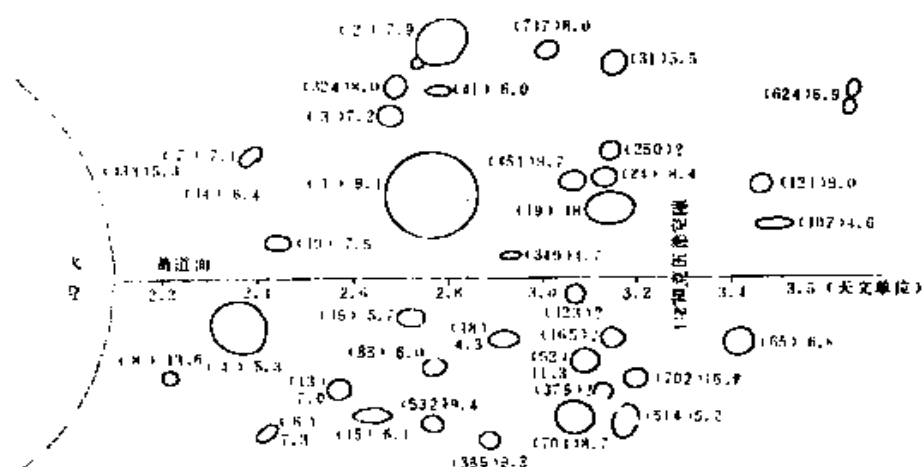


图 6.4 主环带内侧33颗小行星的轨道分布、自转周期及大体形状。图中小行星旁带括号的数字是小行星的编号，不带括号的数字是它的自转周期，单位为小时

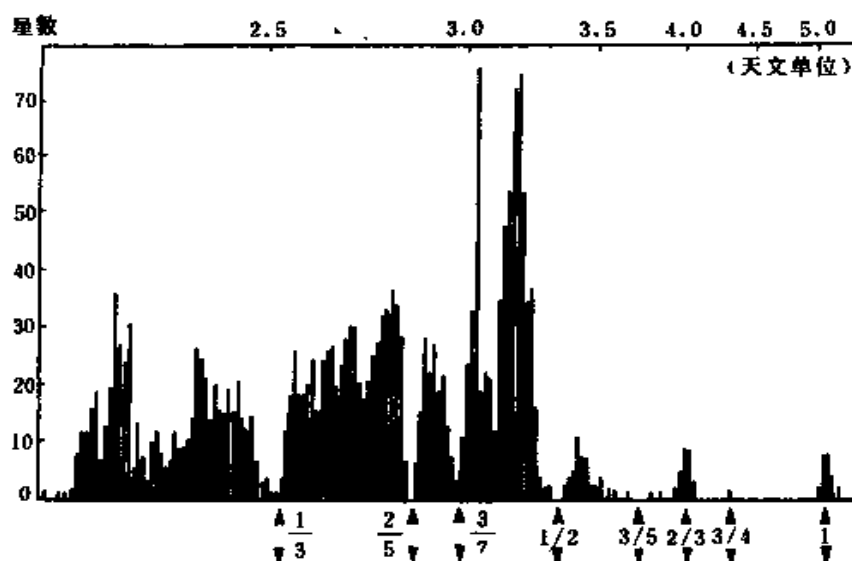


图 6.5 小行星的轨道共振现象

于上述空隙处，公转周期比分别为： $1/3$ 、 $2/5$ 、 $3/7$ 、 $1/2$ ；对于那些成群处，则比值相应为 $2/9$ 、 $2/3$ 、 $3/4$ 、 1 。

小行星的轨道偏心率 e 及倾角 i 的弥散很大，有些小行星的轨道 e 、 i 较小，与九大行星相仿。但绝大多数都明显比大行星大，如偏心率最大的两颗小行星是(2212)火神星($e=0.8352$)与

(1566)伊卡鲁斯($e = 0.8266$);轨道倾角最大的是(2102)坦塔罗斯($i = 64^\circ$)及(1580)贝肯丽娅($i = 52^\circ$), 已知的3000多颗小行星偏心率平均为0.147, 轨道倾角平均为 9.4° 。

五、研究小行星的意义

从质量而言, 小行星确实无足轻重, 但是在天文学的发展史上小行星曾经起过相当的作用。

1. 天文单位的准确确定 甚至直到开普勒发现行星三大定律时, 人们所知的行星距离都是相对值——日地距离的倍数, 至于各行星离太阳的实际距离, 谁也不清楚。1672年, 法国天文学家乔·卡西尼利用火星大冲的机会首次测出的天文单位值为13800万千米(§7.1), 尽管与现在的准确值相差8%, 但在当时再也找不到更接近地球的小天体了。

小行星的发现为测定天文单位的准确值提供了可能性。因为有些小行星在冲日时可以跑到比火星近几倍的地方, 而且小行星本身是一个光点, 定位远比有视面的火星准确。如1873年德国天文学家伽勒(即观测证实勒威耶计算、发现的海王星的人)利用(8)花神星冲日, 1877年英国天文学家吉尔(D. Gill)利用(4)灶神星冲日都得到了很好的结果。

1930—1931年, (433)爱神星大冲时与地球的距离仅2600万千米。国际天文学联合会组织了全世界14个国家、24个天文台站进行了空前规模的联合观测, 并对所有资料进行统一的归算, 得到了三角测量所能达到的最小误差——14958万千米^①。

2. 测定行星质量 行星的质量值当然可以用开普勒第三定律来求得。然而, 有些卫星的轨道也不易精确测定, 而且九大行

^① 现代有更准确的新的测量方法。国际天文学联合会规定, 从1984年开始, 天文单位的定义已不再是日地平均距离, 而是149597870000米, 但从数值上而言, 它与日地距离平均值十分接近。

星也并非都有天然卫星。火卫是1877年才发现，冥卫一则在1978年夏天才证实，而水星、金星则根本没有卫星绕转。

利用小行星测定行星质量的理论基础是：当某小行星接近大行星时，大行星对它的摄动作用必然影响它的轨道，从它轨道的微小变化中即可算得行星的实际质量。由于小行星是没有视面的光点，所以这种方法可以达到很高的精度。如1870年人们利用(29)爱姆菲特列塔接近木星时测得木星的质量为太阳质量的 $1/1047$ 。一百多年过去了，但这个数值至今仍为天文学家采用。而水星和金星的质量是利用(433)爱神星及(1566)伊卡鲁斯测定的。历史上还利用(659)涅斯托尔及(433)爱神星测定过土星的质量及火星的质量，测出的值都是相当准确的。

3. 对于天体测量学的作用 天球坐标必须借助的基本圈(如天赤道、黄道)，原点在天空中并没有对应的天体，需要从一些已知运动规律，如知道精密轨道根数的天体去反推，小行星便是理想的对象。事实上现在国际天文学联合会委托十多个天文台对十颗小行星进行长期的监测和归算，从实测的数据及已知的轨道根数去求得黄道和天赤道的准确位置，从而可以改进和提高星表的精度。

这十颗负有特殊使命的小行星是：(1)谷神星、(2)智神星、(3)婚神星、(4)灶神星、(6)春神星、(7)虹神星、(11)妖神星、(18)郁神星、(39)喜神星、(40)谐神星。

4. 为研究太阳系起源和演化提供线索 太阳系的起源和演化是自然科学基本理论问题之一，有重大的科学意义。但由于问题十分困难，至今还未有根本性突破，仅有大致的轮廓：太阳系是在46亿年前从一团混沌星云凝聚而来的。

当初星云形成太阳和行星、卫星、小行星的具体过程，不可能从地球上找到任何痕迹，也不可能从其他行星或月球上获取什么资料。因几十亿年来，它们都历经沧桑，早已面目全非了，唯

有小行星，由于它很可能就是残存的大、小“星子”^①，因此保留着许多太阳系形成初期的状态，被天文学家称之为太阳系早期的“活化石”。所以，深入研究小行星必将极大地帮助和促进太阳系演化学的发展。

此外，在人类进入航天飞机时代后，小行星可能成为空间探测的重要基地和廉价的中继站。

§6.2 特殊小行星

除了主带小行星外还有许多轨道比较特殊的小行星，对于它们的研究也有重要的意义。

一、近地小行星

有一些小行星或者因为 a 较小，或者因为 e 较大，使它们有时可以非常接近地球。例如1932年发现的(1862)阿波罗，曾经走到离地球1140万千米(0.076天文单位)处，而1937年有颗叫“赫米斯”的小行星曾有一天仅离地球70万千米。成为除月球外的最近记录。近地小行星习惯上又分二类：

1. 阿波罗型 凡近日距 $q < 1$ 天文单位的近地小行星称之为阿波罗型。从1932年以来已发现了大约36颗。阿波罗型小行星一般都很小，大多数的半径仅1千米左右，至今还未发现大于5千米的。

2. 阿莫尔型 近日距 q 等于或稍大于1天文单位的近地小行星称为阿莫尔型。最早发现的成员是(433)爱神星(1898年)，迄今为止这一组小行星已超过了25颗。

① 根据太阳系起源星云说，星子是行星形成前的一种固体团块，有大有小，最大的质量在 $10^5 - 10^{17}$ 千克间。

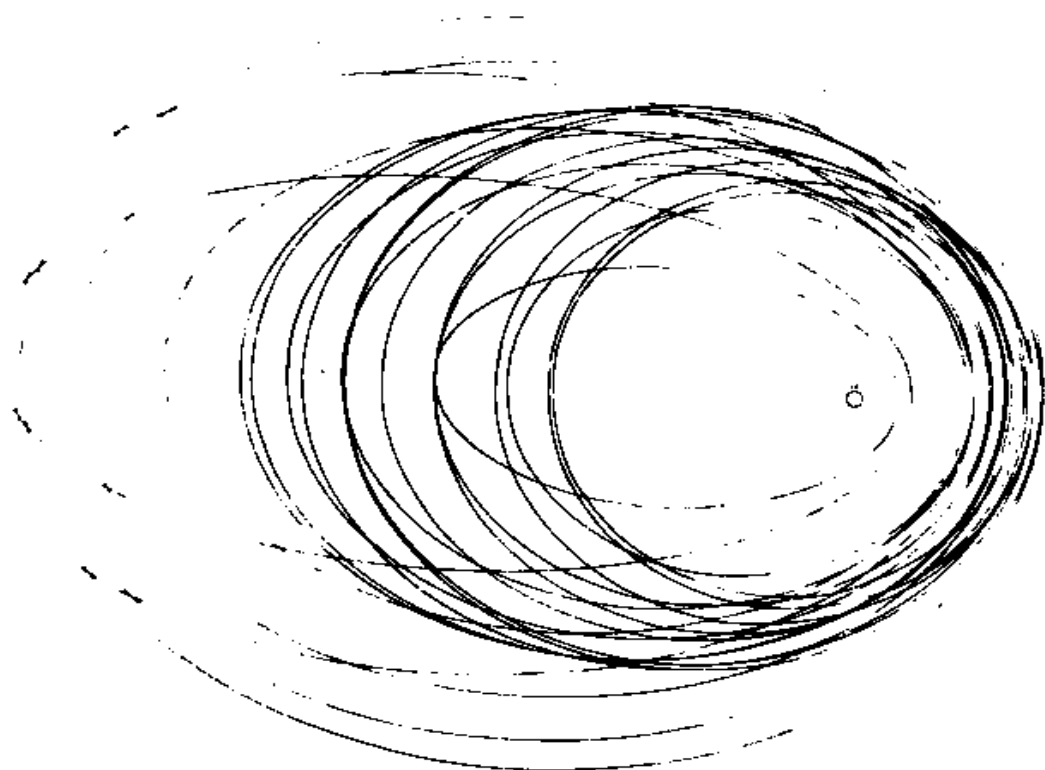


图 6.6 21颗阿波罗小行星的轨道

值得注意的是近地小行星只是因为与人类关系密切才专门分类的，其实就其轨道半径而言，它们的差别甚大，最小的(2100)赖-夏洛姆 $a=0.83$ 天文单位，而(1134)开普勒则为2.68天文单位(图6.6)。

一些近地小行星在大行星的摄动作用下，轨道可以和地球轨道相交，这样就有可能使它与地球相撞，在过去的几十亿年岁月中，这种事件可能已发生过多。例如恐龙的绝迹，现在有人认为就是6500万年前一颗阿波罗型小行星陨落的结果。为了预防这种不测事件，一些国家正在考虑发射专门监测近地小行星的人造地球卫星，以便可以及早发现危险，采取相应的预防措施。

二、脱罗央群小行星

如前所述，与木星轨道周期比为 1，即轨道半长径与木星相当的小行星轨道，是小行星密集所在区之一，这即是著名的脱罗央

央(特洛伊)群小行星。

天体力学中的“三体问题”有一个特解 (§ 17.5)：如果某一时刻有三个天体恰构成一个等边三角形，而且初始速度满足一定的条件，那末，它们将始终以同一周期绕着共同的质心作开普勒运动，三个天体的椭圆轨道大小可以不同，但偏心率却

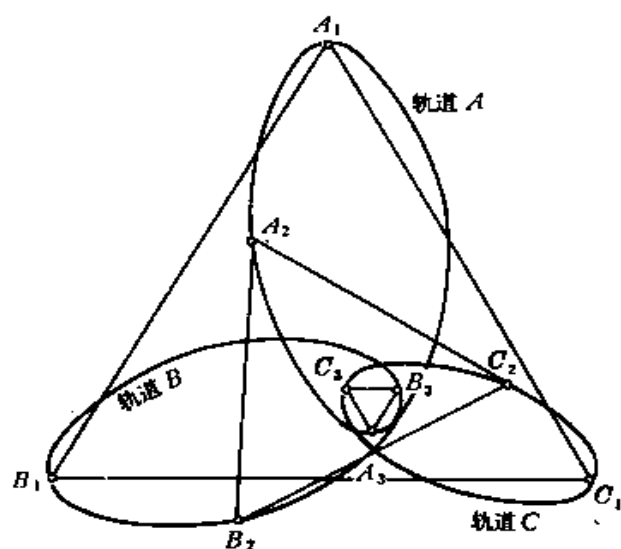


图 6.7 三体问题的一个特解正三角形

是一样的，因此任何时候这三个天体的连线始终保持为一个等边三角形(图6.7)。

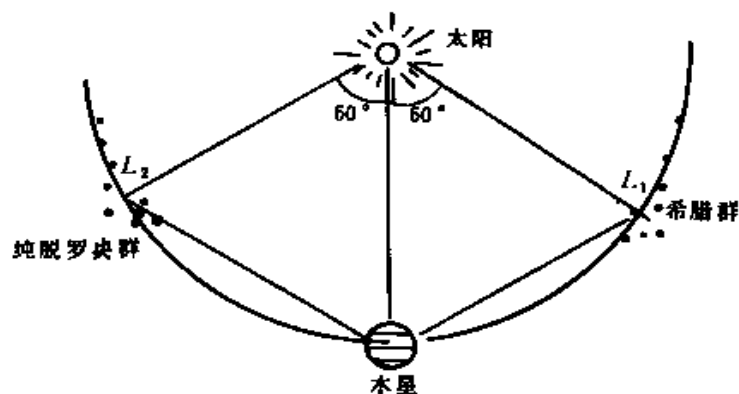


图 6.8 希腊群和纯脱罗央群小行星

后来发现脱罗央群小行星、木星与太阳正是这种数学上特解的实例。最早的两颗脱罗央小行星——(588)阿基琉斯、(617)帕特罗克勒斯分别发现于1906年2月和10月，正好构成了两个正三角形(图6.8)，它们一个位于木星“前面”，一个跟在木星的“后边”。在天体力学中这两个区域也称为“拉格朗日平动点(L_1 、 L_2)”。

此后在这两个平动点附近，人们又陆续发现了许多这类小行星，它们大致都满足上述条件，但彼此之间的轨道参数却又不尽相同。为了区别它们，现在则把在 L_1 附近的那一组称之为希腊群，而把位于 L_2 附近的那一组称之为纯脱罗央群¹。

迄今为止，已正式编号的脱罗央群小行星共31颗，其中17颗属于希腊群，另外14颗则属于纯脱罗央群。值得指出的是31颗中有四颗是我国天文学家在最近几年发现并命名的。它们是：1977年发现的(2223)萨耳珀冬(当时曾命名为“喜马拉雅”)、和(2363)刻布里奥涅斯，1975年发现的(2260)涅俄普托勒摩斯(曾命名为“昆仑”)以及1966年发现的(2456)帕拉墨德斯。

三、柯瓦尔天体

除了脱罗央群小行星在主环带之外，还有一些很特殊的小行星甚至跑出了木星的轨道区域。例如1920年发现的(944)希达尔戈小行星，其轨道半长径为5.86天文单位，由于它的偏心率和轨道倾角都相当大($e = 0.65646$ ， $i = 42.4^\circ$)，所以在远日点时已到达土星的轨道区域，而且也有人起初把它误作为彗星。

在希达尔戈的轨道之外是否还存在其他小行星呢？以前人们都倾向于否定的结论。但是1977年10月，美国天文学家柯瓦尔

1 在文学中脱罗央都译作特洛伊，这原是荷马史诗《伊利亚特》中的一个城市名，因发生了一场旷日持久的大战及“特洛伊木马”而闻名，希腊群都以攻打特洛伊城的希腊英雄人物命名，而纯脱罗央群中的小行星名字则都是保卫城市的英雄名字。

(C. T. Kowal)发现了一个不寻常的天体1977UB。它在天空中移动极慢，亮度仅相当于一颗18等星，根据观测的资料算得其轨道半长径为13.695天文单位，介于土星与天王星之间（表6.6、图6.9），而它的偏心率、轨道倾角都不很大，因此它的发现曾使人一度认为已经找到了太阳系的“第十颗大行星”。

然而进一步的观测又表明：1977UB的半径仅只100千米左右，充其量不过是一个不太大的小行星而已。根据已知的轨道已查得它以前的资料，因此而得到了(2060)的正式编号，取名为“喀戎”。

表 6.6 希达尔戈及喀戎部分轨道要素

小行星编号名	a (天文单位)	e	i	Ω	ω
(944) 希达尔戈	5.86079	0.65646	42.404	20.966	57.412
(2060) 喀戎	13.69545	0.37860	6.923	208.715	339.104

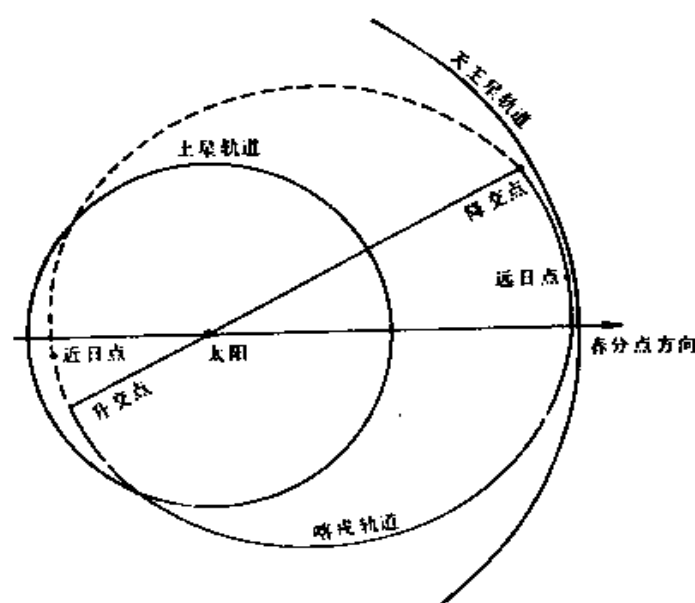


图 6.9 (2060) 喀戎的轨道

柯瓦尔天体的发现又一次证明了太阳系起源新星云说，认为这是太阳系早期残存的“大星子”，由于某些原因它没有来得及参

与大行星的形成。也有人认为它过去曾是土星的一颗卫星,由于受到某个天体的摄动影响而脱离了土星的引力范围。

四、小行星的卫星

小行星的卫星完全是偶然发现的,1978年6月7日,(532)赫克列娜掩食恒星 SAQ120774,人们通过这次掩星资料分析得到结论:距直径243千米的赫克列娜中心977千米处有一个小天体伴随着,其直径为46千米。无独有偶的是半年之后,天文学家又从(18)郁神星掩食 SAQ14159 的资料中得出了它也有卫星的结论,这一对小天体中心距为460千米,两者直径分别为135及37千米。此后,又有不少人报告说,重新处理过去的一些小行星掩星资料也得出了若干小行星有卫星的结论,其中包括:(2)智神星、(6)春神星、(9)海神星、(12)凯神星等等,共有三、四十之多。

1980年美国一些人利用光斑干涉测量的新技术对智神星进行了验证,结果证明它确有卫星在绕转。理论上可以证明,即使小行星卫星产生于互相接近而俘获,具有卫星的小行星也可能占1—10%,而倘若认为是共同形成的,则比例更要高得多。所以几十颗小行星具有卫星是有可能的。

但小行星卫星在天体系统中属于什么层次?能否与月球或木卫等相提并论?则至今未有定论,甚至其正式的名称还未统一,只权且暂把最早的两颗记为“1978(532)I”和“1978(18)I”——即1978年发现的绕(532)、(18)小行星转动的第一颗小天体。既然行星层次中有小行星,所以这些小天体也不妨可称为小卫星。

原则上说来,小行星卫星的发现为准确测定小行星的质量创造了条件,但实际上由于它们光度太弱、相距太近,故很难得出它的准确的绕转周期。

五、中国人发现的小行星

由于历史原因，直至1928年才首次有中国人列入小行星发现者的名单——那年11月22日，年轻的中国学者张钰哲在美国叶凯士天文台发现了(1125)小行星，并取名为“中华”^①。

新中国成立后，紫金山天文台行星室经过多年坚持不懈的努力，到七十年代末他们已发现了 800 多颗尚未有记载的新的的小行星，其中已有41颗获得了国际编号并被赋与富有中国特色的名字，其中最早的五颗是以中国古代科学家命名的，32颗则是中国的省市地名区，4 颗属于脱罗央群。

国际天文学联合会为了表彰中国天文学家在小行星探索方面的贡献，专门把两颗小行星冠以目前仍然健在的中国天文学家的姓名：中国紫金山天文台前台长张钰哲研究员，中国台北天文台专门研究行星、变星的蔡章献台长，它们分别是美国哈佛天文台1976年发现的(2051)张(Chang)及1978年发现的(2240)蔡(Tsai)。

§6.3 彗 星

一、彗星现象

彗星是宇宙间最奇特的天象之一，它形态奇特，迅速地在繁星中穿越(图6.10)，它每夜，甚至每个小时都在改变着自己的亮度和形状。由于古代人们不知其运动规律，所以对天空中的不速之客不免惊慌失措，甚至引起社会骚乱。直到1857年，一本法国

① 张钰哲当初发现的那颗小行星因为旧中国科学凋零，一直没有能继续观测，因而现在几乎已丢失了，至今仅保留了原来的临时编号：1928UF。而现在正式编号为(1125)名叫“中华”的小行星是紫金山天文台1957年10月30日发现的一颗与1928UF 轨道相似的小行星。

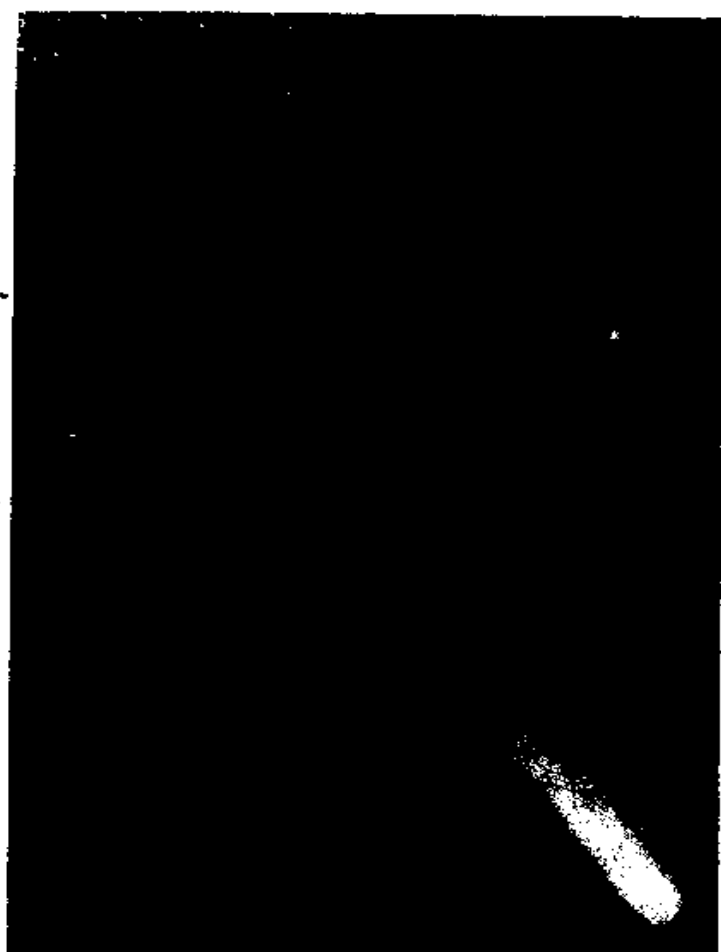


图 6.10 科胡特克彗星

书上还惧怕彗星把地球撞得粉碎(图6.11)。

中国史书上的彗星记录十分丰富，到晋代时对彗星已有了较正确的认识。如《晋书·天文志》指出：“彗体无光，傅日而为光，故夕见则东指，晨见则西指。在日南北，皆随日光而指。”但西方世界由于受到亚里士多德错误的影响——他认为彗星是地球大气中的一种燃烧现象，可能是某种灾害性气候的先兆。甚至哥白尼也未能从这种武断的错误中自拔出来，他依然认为“希腊人所谓的彗星，诞生在高层大气”。直至16世纪末，第谷才第一次从观测中证明，1577年的大彗星的距离比月球远得多。



图 6.11 十九世纪法国书上的一幅彗星图

1705年，英国天文学家哈雷出版了他的《彗星天文学论说》，第一次系统研究了24颗彗星的轨道情况，并指出：出现于1531、1607、1682年的大彗星实质上是同一颗彗星的三次回归(表6.7)，并预言这颗彗星将于1758年底或1759年初再次出现于天空，结果它于1759年3月按照人们事先计算的路线回归了。于是它遂被命名为哈雷彗星，彗星研究也进入了新的阶段。

表 6.7 哈雷发现三次彗星轨道十分相象

过近日点日期	与上次间隔日期	升交点黄经(度)	近日点黄经(度)	轨道倾角(度)	近日点距离(天文单位)
1531年8月24日		49°	301°	18°	0.57
1607年10月16日	76年2月	50°	302°	17°	0.59
1682年9月4日	74年1月	51°	303°	18°	0.58

• 当初对倾角定义还不太严格，实际上应为162°及163°。

二、命名

虽然肉眼能见的大彗星很少，平均十多年才有一颗，但用望远镜观测每年可发现彗星7—14颗，甚至更多。何况，彗星的形态变化很快，因此科学地命名所观测的彗星是十分重要的。

一般先给予临时命名。彗星的临时命名是“发现者(最多可并列三个人的名字)、发现年份及发现次序”例如“阿仑德 罗兰1956 *h*”彗星即是这两个人在1956年同时发现的该年中出现的第8颗彗星。而紫金山天文台1965年发现的两颗彗星即为1965*b*和1965*c*。

发现的彗星通过多次观测即可定出其轨道，彗星轨道一旦准确定出，便可知道其经过近日点的时间。永久命名则以年份加罗马字(表示该年中过近日点的先后次序)，如上述的1965*b*即为1965 I；1965*c*即为1965 II。值得指出的是，临时命名的年份与永久名字的年份很可能不同。例如：“沃尔夫—哈密顿1964*g*”的永久名字为1965 III，而1982*d*、1982*e*、1982*f*三颗彗星却早已有过正式名字——1873 II、1857 II、1976 IV。

当然，对于一些很著名的大彗星，一般都有专门的名字，如哈雷彗星、恩克彗星、池谷—关彗星……，有时对于那些短周期彗星($P < 200$ 年)在其名字前还专门加以符号“*P/*”如“*P/* Halley”、“*P/* Encke”等等。

根据目前的理论研究，太阳系中的彗星可能多达 10^{11} 颗之多，然而其中绝大部分都处于太阳系内离我们十分遥远之处而不易为人察觉，从历史资料分析，人们已经观测到的彗星还不到二千颗，是极小一部分。

三、轨道情况

彗星在太阳系中的运动可近似看作二体问题，因此它的轨道可近似地看作为圆锥曲线(5.7)式：

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$$

原则上当然也可以与行星、小行星一样，通过三次不同时刻的观测来求得彗星轨道，但实际上常遇到困难，一是因为彗星轨道大多极其扁长，很难由在太阳附近三点来定出其真实的轨道（图6.12）。例如历史上著名的1680年大彗星，不同科学家算出的结果大相径庭：欧拉得到其轨道周期为170年（ $a = 30.7$ 天文单位），但哈雷的结论是 $a = 69.15$ 天文单位即 P 为575年；而恩克（J. F. Encke）用较多的观测数据最后定出其 $a = 427$ 天文单位， $P = 8814$ 年。又如1944年出现的方根特彗星，不少人认为其 $e > 1$ ，是双曲线轨道，但一些苏联天文学家却得到了椭圆轨道¹（ $Q = 28$ 天文单位、 $q = 2.2$ 天文单位）。

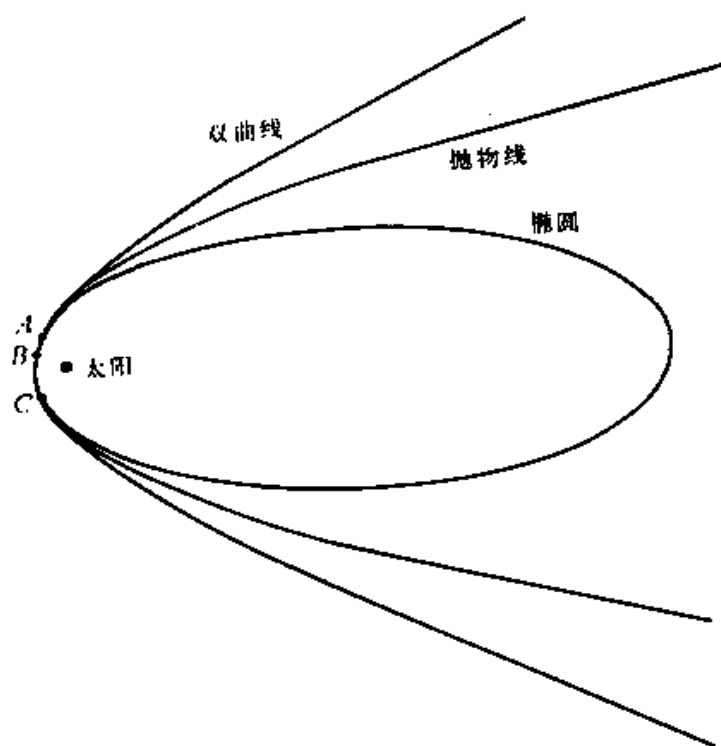


图6.12 很难从在太阳附近的三点来推算出彗星的轨道

¹ 对于彗星而言，常用 Q 、 q 来代替 a 、 e ，这样更方便。

二是因为彗星是太阳系中的小天体,其质量甚微($10^{12} - 10^{19}$ 千克)很易受到大行星摄动而改变轨道,即使象哈雷慧星,它每次回归轨道都有微小的变化(表6.8)。有时候,大行星的摄动引起的轨道变化很大,甚至可以从 $e \geq 1$ 变到 $e < 1$ (非周期变为周期),当然也有相反的情况。

表 6.8 哈雷彗星最近两次回归的轨道变化

	a (天文单位)	e	i (度)	Ω (度)	ω (度)
1911年回归时	17.91826	0.9672552	162.22010	57.87790	111.71588
1986年回归时	17.93092	0.9672725	162.23932	58.14397	111.84658

根据到1984年底所掌握轨道的992颗彗星看来,彗星的轨道倾角 i 可取 $0^\circ - 180^\circ$ 的任何值,而且似乎逆行彗星占一半以上。例如著名的哈雷彗星 $i = 162.2^\circ$ 。如以 e 来分类,则:

$e > 1$ (双曲线轨道)104颗, 占10.5%,

$e = 1$ (抛物线轨道)589颗, 占59.4%,

$e < 1$ (椭圆轨道)299颗, 占30.1%。

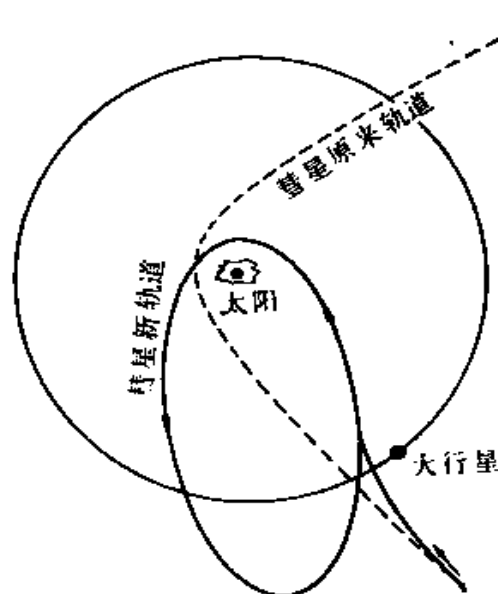


图 6.13 大行星俘获彗星

在周期彗星中,以200年为界又可分为:

$P > 200$ 年(长周期彗星),
169颗,

$P < 200$ 年(短周期彗星),
130颗。

根据近日点的距离,彗星又可分成行星族彗星(表6.9),而且一般认为这些彗星都是由行星在漫长的岁月中把它俘获的结果(图6.13、6.14)。

天文学上还把一些轨道有

表 6.9 行星族彗星

彗星族	周期(年)	平均 $\bar{a}$ (天文单位)	成员数
木星族彗星	3—10	5.5	70
土星族彗星	10—20	6.4	8
天王星族彗星	20—40	10.5	3
海王星族彗星	40—100	16.4	9
冥王星族彗星	120—170	24.3—30.0	5

些类似的彗星称为彗星群。有人认为，这种彗星群可能有几十个之多，其中最著名的即为克罗以茨群(§ 6.4)，又称为掠日彗星。然而也有人认为这种群不一定存在，可能原是一颗彗星分裂而出现的暂时现象。

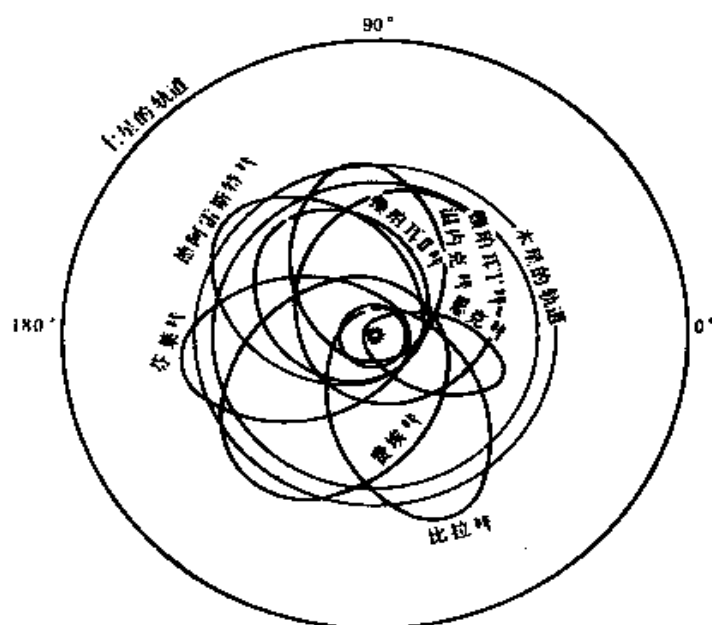


图 6.14 一些木星族彗星的轨道

四、彗星的结构

彗星的所有质量几乎都集中于不大的核上，在一般情况下，彗

星都在太阳系的边缘区域，这时即令被观测到也与极其微弱的恒星像相仿，看不出有什么细节结构。但当它逐渐接近太阳时，由于太阳的热辐射、太阳风和太阳光压作用的增大，尤其当它进入火星轨道区域后，即会出现通常所说的彗星现象，表现出其独特的结构。

1. 彗头 在太阳附近的彗星通常有比较复杂的结构（图 6.15），它有一个形态朦胧而明亮的“头”部——彗头，彗头明显包括二部分：中央密集而明亮的彗核及其雾状的包层——彗发。彗核通常很小，一般直径在 10^{-1} — 10^1 千米之间，很少有超过100千米的。彗星的质量都集中于核上。根据近代研究，彗核是含有尘埃物质的被冻结的气体团，一些人形象地喻之为“脏雪球”，其平均密度为 10 — 1000 千克/米³。彗发是彗核的蒸发物，因为形状和大小与离太阳距离密切相关，一般说来离太阳越近，彗发越亮、越

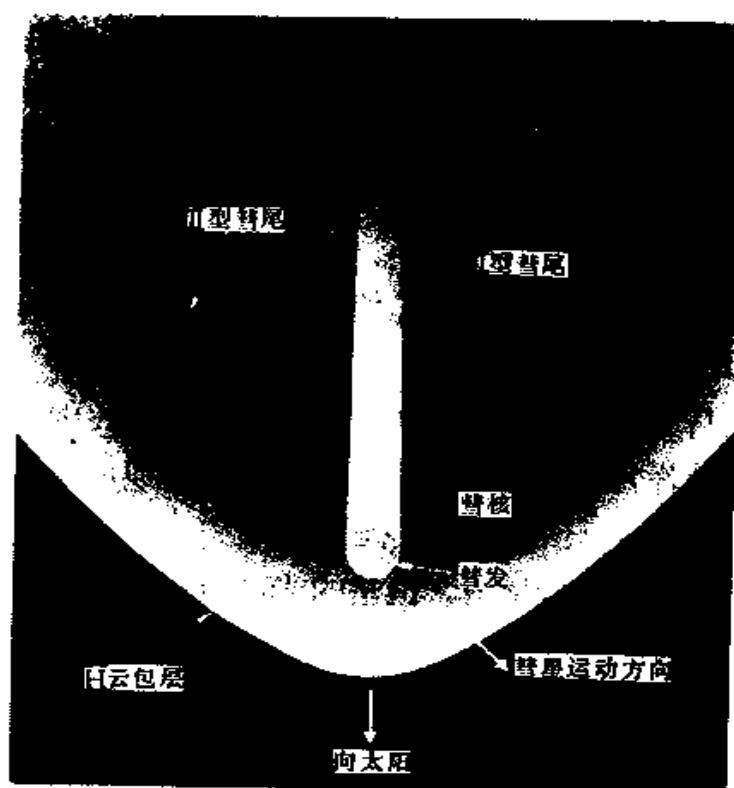


图 6.15 彗星的结构

大，直径可达几十万千米，有时还可与太阳相当，甚至超过太阳直径。

人类进行空间探测后，发现了彗发之外还有一个更大的、直径约100—1000万千米的包层——彗云，因为它几乎全是由氢原子组成的，故又称为氢云。氢云的物质密度极其稀薄，所以地面上一般观测不到。

2. 彗尾 肉眼可见大彗星的长长彗尾是彗星的主要特征之一，它也是太阳系内最长的天体。现在知道，彗尾主要是太阳风（§7.5）作用的结果，所以彗尾大小不仅与彗星质量大小有关，更取决于离太阳的距离，一些行星族彗星在望远镜内仅有朦胧的彗发而已。几乎所有彗尾都背向太阳，主要由气体组成的气体彗尾较直，而包含有许多尘埃物质的彗尾一般比较弯曲，称之为尘埃彗尾。此外还有少数彗星在某一阶段内出现反常彗尾——朝太阳方向伸出的尾状物质故称逆向彗尾，国内有人建议称它为“彗翎”。典型的例子是阿仑德-罗兰彗星，1957年4月22、23日它象一把“扇子”，至4月25日变成了一条细长的钉状物（图6.16）。有人认为这仅是地球经过彗星轨道面附近看到的一种投影效应，由于较大尘粒受到的太阳辐射作用小，这些从彗核扩散出来的物质沿彗星轨道的分布更加广延，于是使从地球上看来显得有部分彗尾朝向了太阳。

有些彗星的彗尾不止一条，历史上不乏有双尾甚至三尾彗星的先例，最著名的1744年歇索大彗星甚至出现过六条彗尾，宽达 44° 。

彗尾的物质十分稀薄，恒星的光可以自由穿过它而不受任何影响，稀的彗尾密度大约为 10^{-14} 千克/米³，远低于实验室内真空中的气体密度。

3. 化学组成 根据光谱资料分析可以得知彗星的化学组成。彗星的光谱与太阳光谱相似，但还有少量气体发射线，这是因为



图 6.16 阿仑德-罗兰彗星1957年4月25日出现的反常彗尾

彗星气体受到太阳激发后产生的。当然各每颗彗星的光谱、有时同一彗星不同部位(彗发与彗尾)的光谱都有一些细微的区别,甚至同一彗星的彗发或彗尾在离太阳不同距离处的光谱线也会有所不同。表6.10中列出了最近几年所得到的一些结果。从表6.10可知,由于彗星中条件特殊,有许多地球上不能稳定存在的分子、原子

表 6.10 彗星内已观测到的分子、原子和离子

彗 头	彗 尾
H, C, O, S, CH, NH, OH, C ₂ , CN, CO, CS, NH ₂ , H ₂ O, HCN, C ₃ , CH ₃ CN, Na, Si, Ca, K, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, 硅酸盐	C ⁺ , CH ⁺ , OH ⁺ , CO ⁺ , CN ⁺ , N ₂ ⁺ , H ₂ O ⁺ , CO ₂ , 硅酸盐

及分子离子,还有许多有机分子,这曾引起许多人浓厚的兴趣,甚至有人认为地球上的原始生命来源于彗星。

五、非引力效应及突然增亮问题

除了太阳的引力作用使彗星作开普勒运动、大行星的摄动使它的轨道发生各种变化外,在观测中还发现了一些不属引力作用的“非引力效应”。最早发现的非引力效应是恩克彗星的周期减小,后来发现许多彗星的实际回归日期与理论计算都不相符,即使扣除了大行星的摄动影响,仍常有几天的差别。

开始人们用行星际空间的“阻尼”来解释一些彗星的长期加速现象,但是这无法说明彗星“迟到”的现象。1836年贝塞耳提出了彗星抛射物质的模型。抛射物质产生的反冲力造成了非引力效应,彗核逆向(与其轨道运动异向)自转使彗星抛射物质流的最大方向不在径向,而已转过了一个角度(图6.17),这样反冲力在切向的分量就成为运动的阻力,起到了减速作用;相反如果彗核是顺向自转的(与轨道转动同向),则就会起加速作用。

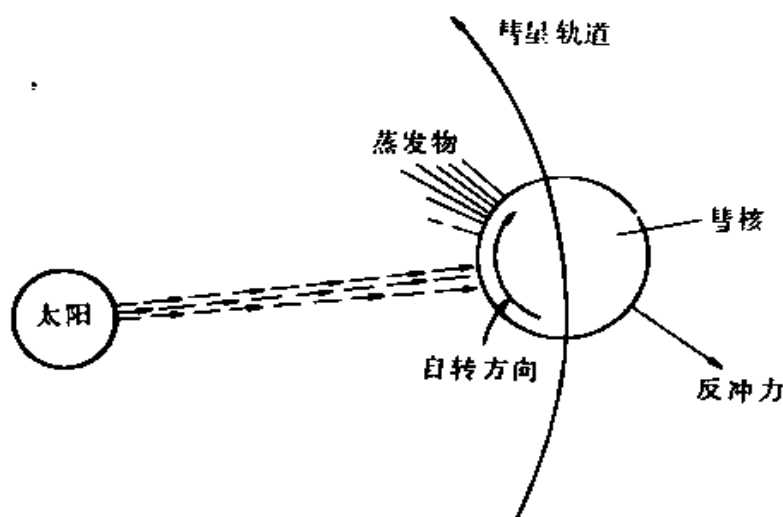


图 6.17 彗核逆向自转造成彗星轨道运动减速

彗星喷射物质后来也称“火箭效应”,是变质量物质运动。当

然, 实际的情况远比上述的理想模型要复杂得多, 但是这种模型与大量的观测事实符合较好, 所以已为人们普遍接受。

在离太阳很远的时候, 彗星的亮度仅是反射太阳光, 因而十分微弱, 随着与太阳的日益接近, 它的体积急剧膨胀起来, 此外由于受到太阳辐射(尤其是紫外、X 射线)影响, 彗星内的气体也会受到激发而发光, 因此它的绝对亮度也在变化。根据长期观测, 彗星的视星等 m 与绝对星等 M 有如下的统计关系

$$m = M + 5 \lg \Delta + 2.5 n \lg r \quad (6.2)$$

式中 r, Δ 分别是彗星离太阳与地球距离, n 为光度参数, 一般可取 $n = 4$ 。

有时彗星还有令人困惑的爆发现象——彗星亮度在短期内发生突变。例如 1858 III 彗星($p = 5.5$ 年)在 1973 年 5 月 20 日亮度为 14^m , 但七天后却亮至 4^m , 猛增了一万倍。以后在 7 月 4 日到 7 月 7 日的三天内又一次发亮, 从 14^m 变为 5^m 增亮了四千倍。霍尔姆彗星($P = 6.9$ 年)几乎每次接近太阳都会发生某种爆发, 一些苏联天文学家研究了最近 130 年来的彗星爆发现象, 认为至少有 270 颗彗星都有可靠的爆发记录。

彗星爆发的原因尚在研究之中, 很可能它与太阳某种活动有关, 有人认为是太阳高速等离子体流与彗核作用的结果。

§ 6.4 一些著名的彗星

一、哈雷彗星

彗星世界中最著名的代表、也是第一颗算出正确轨道并预言按时回归的彗星便是哈雷彗星, 其公转周期平均为 76 年, 但由于大行星的摄动影响, 周期最长时达 79.7 年, 而最短时仅有 72.8 年, 上次回归是 1910 年 4 月 20 日, 这次回归则是 1986 年 2 月 9 日 (图

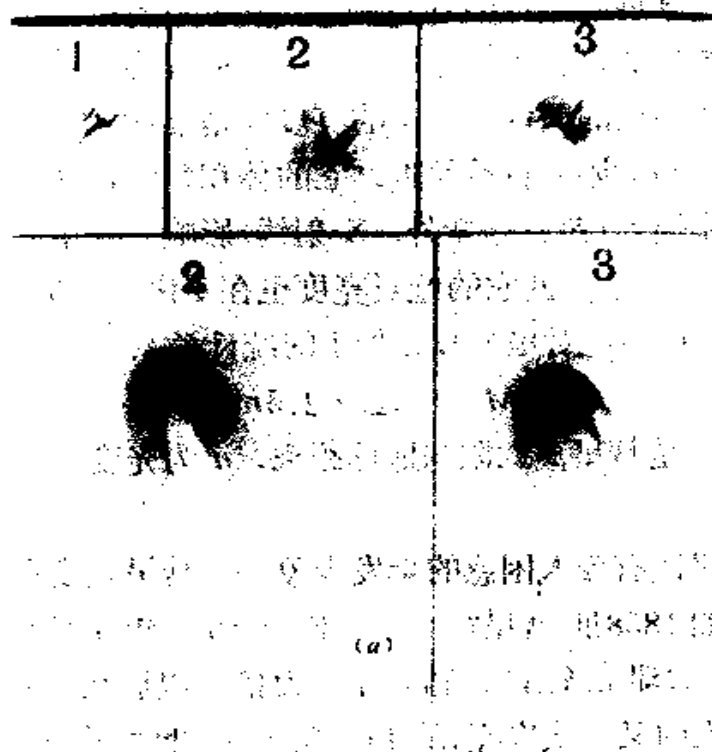


图 6.18 著名的哈雷彗星

(a) 1910年的哈雷彗星(负片) 日期分别为(1) 5月13日;
(2) 5月24日; (3) 5月29日(余山天文台摄)

6.18)。

哈雷彗星的轨道根数如表6.8, 其近日距为8800万千米, 在金星轨道之内, 远日距则达52.8亿千米, 跑出了海王星的轨道范围(图6.19)。

哈雷彗星在我国历史上有十分丰富的记录, 自秦始皇七年(公元前240年)至清宣统二年(1910年)的29次回归, 都可从中国史书上找到记载, 据张钰哲考证《淮南子·兵略训》中: “武王伐纣东面而迎岁, 至汜而水, 至共头而坠, 彗星出而授殷人其柄。”即是最早的哈雷彗星的珍贵资料, 而时间是公元前1056年。

在历史上哈雷彗星曾引起过很大的风波, 直到1910年还有许多庸人自扰, 认为在5月18日夜间长长的哈雷彗尾要扫过地球, 其



(b) 1986年的哈雷彗星 日期为3月9日
(南京大学天文系摄)

中剧毒的氰化物、一氧化碳将使一切生灵涂炭，因而不少人惶惶不可终日、甚至举枪自戕，充分说明缺乏科学知识的可悲。

哈雷彗星是一颗比较年轻的明亮的大彗星。在公元837年的那次回归时有一夜竟出现过两条彗尾……，据估计，它的原始质量约为 10^{16} 千克，其彗核的直径不超过25千米^①。而每回归一次，它损失的质量有 2×10^{12} 千克左右，所以估计其寿命不过几十万年时间。

美国天文学家惠普尔(F. L. Whipple)利用1910年的回归资料——从1月8日到6

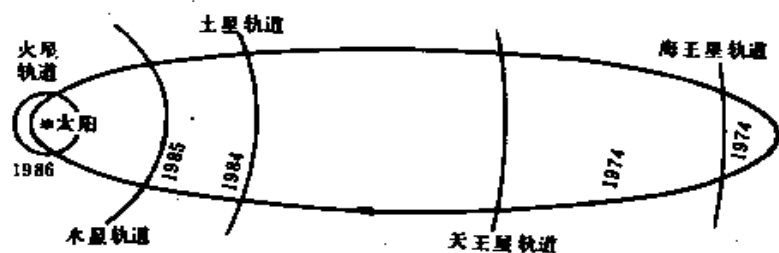


图 6.19 哈雷彗星的轨道

① 根据1986年空间探测，哈雷彗星的核形同花生果，大小为 15×8 千米，颜色十分黝黑。

月25日洛韦尔天文台拍得的45张底片，曾研究得出结论，它的自转周期为 0.4297 ± 0.088 日这对于研究哈雷彗星有重大意义，因而1986年回归期间人们将进一步研究这个问题。

根据计算，这次哈雷彗星回归与地球的距离始终不太近，一共有两次接近机会：1985年11月27日彗星离太阳1.54天文单位，离地球0.62天文单位，所以其亮度在6等以下；第二次是1986年4月11日，它离太阳、地球的距离分别为1.33及0.42天文单位，估计亮度为4.5^m，但由于那时哈雷彗星在南半天球，其赤纬为 $-47^{\circ}10'$ ，所以只有在纬度较低的地方才能作观测。

对于这次回归，国际天文学联合会十分重视，早在八十年代初就成立了专门的IHW(国际哈雷彗星联测)来协调世界各国天文台及业余爱好者的观测事宜。一些国家还准备发射专门的空间探测器来研究哈雷彗星。因此，通过这次世界范围的通力协作研究，将大大深化人们对于彗星的认识。

二、恩克彗星

恩克彗星是木星族彗星之一，虽然它很暗弱，现在一般都需要用望远镜才可观测到，而且已没有了彗尾，但它是人类第二颗预言归来的彗星，也是周期最短($P=3.29845$ 年)的一颗。最初的发现报告，使它得到的临时编号为1818*b*及正式编号1819 I。后来才知道，它早已在1786年就被发现过。

德国天文学家恩克首先算出了它的轨道(表6.11)，并不厌其烦地追索了它的过去和以后的23次回归日期(表6.12)，表中已消除了大行星的摄动，但仍然可以看出，每回归一次，它的周期便减小0.10—0.13日。这表明它的轨道正在逐渐减小，原因即为非引力效应，它的自转方向与轨道运动方向相同。

据此，有人进一步推算了今后恩克彗星的轨道，并认为它将在1994年2月回归时坠入太阳。

表 6.11 恩克当年计算的恩克彗星轨道参数

周期(年)	q (天文单位)	Q (天文单位)	e	i
3.29845	0.33802	4.0937	0.84745	12.3815°

表 6.12 恩克彗星23次回归的周期变化

回归年份	周期(日)	回归年份	周期(日)	回归年份	周期(日)
1786		(1812)	1212.00	1838	1211.11
(1789)*	12 12.79	(1815)	1211.89	1842	1210.98
(1792)	12 12.67	(1819)	1211.78	1845	1210.88
1795	12 12.55	1822	1211.66	1848	1210.77
(1799)	12 12.44	1825	1211.55	1852	1210.65
(1802)	12 12.33	1829	1211.44	1855	1210.55
1805	12 12.22	1832	1211.33	1858	1210.44
(1809)	12 12.10	1835	1211.22		

* 有()的回归仅是理论推算结果,并无实际观测资料。

不过也有人认为,虽然从1819年后恩克彗星已暗弱得肉眼无法观测了,但最近几十年的多次回归中,它散发出的气体并未见到减少,而且加速度似乎也有所变化,1868年回归以后加速度竟减少了一半,所以很可能它还会存在较长一段时间。

三、比拉彗星

比拉(W. Biela)是奥地利的一个陆军军官,他于1826年3月发现了它,但算出轨道后(表6.13)才知道早在1772年时已有人记录在案了。它也属于木星族彗星。

表 6.13 比拉彗星部分轨道参数

周期(年)	q (天文单位)	Q (天文单位)	e	i
6.62	0.86	6.19	0.75	12.55°

比拉彗星最闻名之处在于它是第一颗在众目睽睽之下分裂的彗星。根据计算，比拉彗星于1846年2月16日回归，罗马一位天文学家首先于1845年11月底找到了它。进入1846年后，它更吸引了众多的观测者。1月13日夜，这颗不太明亮的彗星的彗核分成了两块，分裂出的物质开始时是又小又暗，但过不多久，居然也长出了自己的彗尾。在过近日点时，两者之间的距离已达24万千米(图6.20)。



图6.20 比拉彗星在太阳的潮汐作用下分裂为二

1852年9月，它再度回归时，两颗彗星比翼齐飞，彼此相距240万千米，再也分不出哪是本体，哪是分裂物了。更令人吃惊的是，此后比拉彗星就此消声匿迹，不再出现。1872年11月应回归的比拉彗星仍然无声无息，但人们却在11月27日夜见到了一场极其蔚丽壮观的流星雨(图6.21)，在六、七个小时内，人们见到从仙女座方向迸发出的流星约有16万之多。这使人们第一次领悟到彗星与流星雨之间的演化关系。



图 6.21 比拉彗星的瓦解造成了仙女座流星雨

然而彗星的分裂在历史上早已有过记载。我国《新唐书·天文志》中有“乾宁……三年十月，有客星三，一大二小，在虚危间，乍合乍离，相随东行，状如斗，经三日而二小星先没，其大星后没。”这是世界上彗星分裂的最早记录。在比拉彗星分裂之后，欧洲才认真对待彗星的分裂现象：例如，1860年2月有一个法国天文学家曾在巴西观测到1860 I 分裂为三；1868年5月14日，又有人观测到1868 I 分裂为四颗；1965 VII (池谷-关) 彗星则在过近日点后亦分裂成三颗。而且

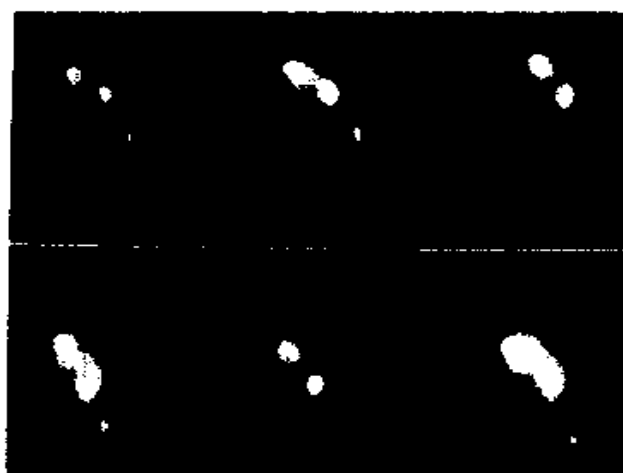


图 6.22 1976年威斯特彗星的分裂，依次的日期为3.8； 3.12； 3.14； 3.18； 3.24； 3.31； 4.1； 4.2； 4.3； 4.7； 4.8

研究后还发现，池谷-关大彗星与1882 II 本是1106年大彗星的两块分裂物。1976年威斯特彗星在经过近日点（2月25日）后的三、四月间分裂成四块(图6.22)。

四、科胡特克彗星

1973年春，捷克斯

洛伐克天文学家科胡特克(L. Kohoutek)发现了一颗很暗弱的小亮点——1973 f。根据当时的亮度(16^m)、距离(离太阳和地球分别为4.8及4.2天文单位)及位置推算轨道,它将于当年12月29日过近日点($q=0.14$ 天文单位),其时的亮度若按一般彗星亮度公式(6.2)式将达到 -10^m 。所以一些人预言这将成为最壮观的“本世纪彗星”,在那年圣诞节前后,不少人兴致勃勃地登上豪华的“伊丽莎白”游轮,希望在大海上饱览大彗星的丰彩。岂料这颗彗星的亮度增加十分缓慢,直到12月间方能勉强用肉眼看见,1600名游客怨声载道,天文学家则窘迫不已,根据事后观测资料,它的最大亮度不足 2^m ,比预计的暗弱几万倍。

五、池谷-关和掠日彗星

池谷(Ikeya)和关(Seki)是日本两位业余天文爱好者,他们独立地同时在不同地方发现了这颗“神话般的大彗星”1965 f,在它过近日点(10月2日)后几天,其总亮度在 -11^m 以上,足可与满月媲美。根据计算,池谷-关彗星的近日距仅只116万千米,即是说它以480千米/秒的高速度在日面上空46万千米(0.67太阳半径)处疾驰而过。

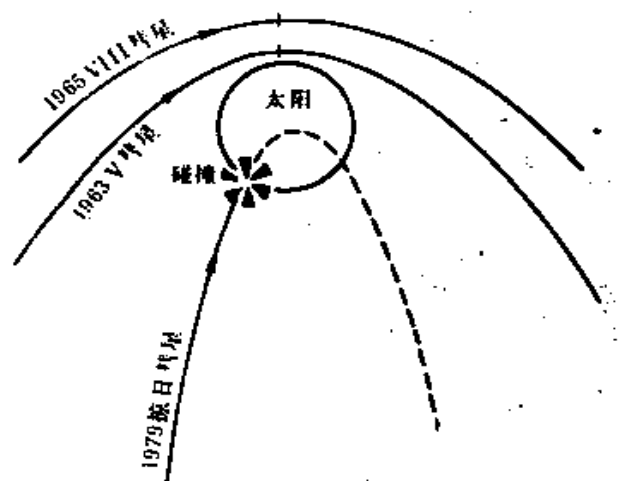


图 6.23 几颗掠日彗星的轨道

由于它的近日点离日面极近,故称之为掠日彗星。历史上最著名的掠日彗星是1608 I,据推测,它最大亮度达 -18^m 。它离太阳最近时还不到日面半径的 $1/3$ 即23万千米。到1970年为止,人们所知的掠日彗星共有9颗:1843 I、

1880 I、1882 II、1887 I、1945 VII、派列拉彗星、池谷-关彗星、1970 VI。由于其近日点的位置相差无几，因此也称为克罗伊茨掠日彗星群(图6.23)。掠日彗星是在温度高达一、二百万度的日冕中穿过近日点的，再加上太阳对它的巨大的起潮力，因此很易熔化或瓦解、分裂，池谷-关彗星在1965年11月4日亦被撕裂为三颗。也有人认为整个掠日彗星群过去都源出于同一颗大彗星。

还有一些掠日彗星的近日距更小，当比日面半径还小时，彗星便必然会与太阳相撞。但由于彗星的质量与太阳相比实在微不足道，其结果只是彗星的毁灭而已。根据美国人造地球卫星P78-1的资料，已发现了几起这样的“事故”。例如1979年8月30日，它拍到了1979 XI彗星与太阳相撞被毁的资料；1981年1月27日又记录到一颗彗星与太阳相撞，同年7月20日，则发现一颗掠日彗星在经过日面之后消失了，很可能它已被太阳的高温全部熔化殆尽。

§ 6.5 流星和流星体

一、流星现象

晴朗的夜晚，蓦地一条明亮的光芒划破星幕，这就是几乎人人都见过的流星现象(图6.24)。流星原是运行在行星际空间的尘埃般的小天体——流星体，当它们闯入地球大气、与大气中分子剧烈碰撞和摩擦时，使得在流星体的周围形成一个由炽热气体和冲击波组成的明亮的包层而为人们所见，同时，它在运行中留下了一条明亮的轨迹——流星余迹。

流星体一般都十分微小、例如亮度相当于1^m的亮流星，其质量不过0.1克左右，因此绝大多数流星均在大气高层中全部烧焚气化了。

对于流星的认识，西方同样深受亚里士多德错误判断的影响，

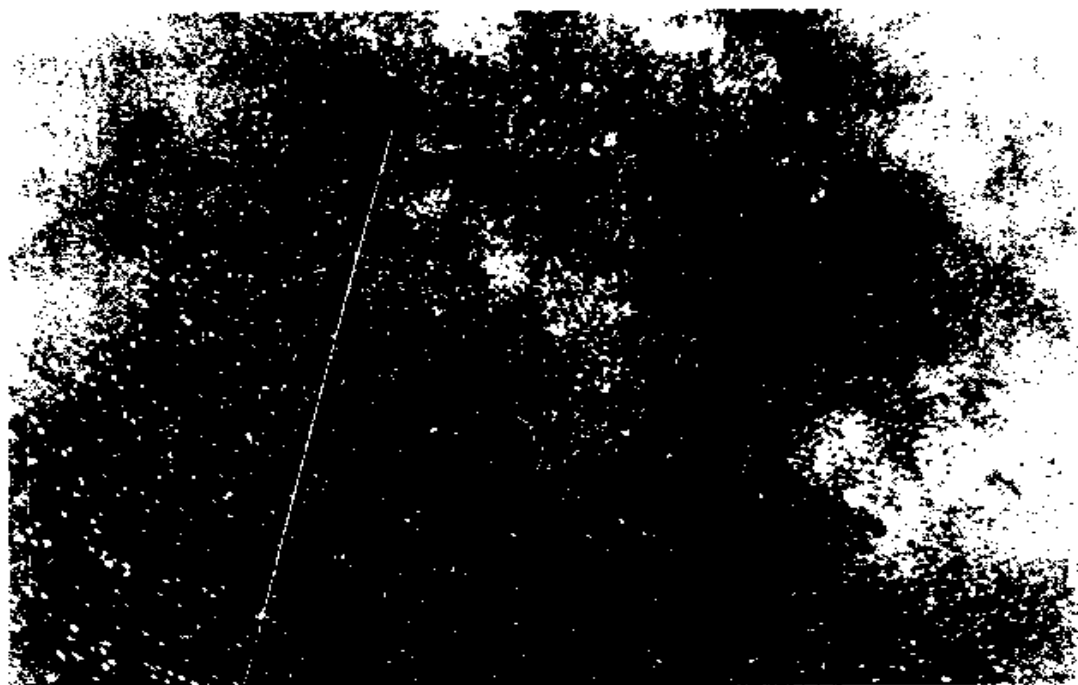


图 6.24 一颗流星划破夜空

他认为流星是地球的某种蒸发物，因而西方长期来拒不承认流星是天文现象。相反在我国却有丰富而系统的流星、陨星资料，在古籍《春秋》中记述了鲁庄公七年（前687年）的流星雨，这是天琴座流星雨的最早记录。

长期观测流星可取得很有价值的资料，可以了解流星体在太阳系空间的分布状况和运动状况，对于研究太阳系演化提供有用的线索，保证航天飞行的安全。而流星余迹可以利用来进行不受干扰的无线电通讯，至今在国防上还有重要的意义。通过对流星体在大气中产生的声、光、热、电磁等效应，还可以研究地球大气的物理状况。

二、偶发流星和周期流星

通常情况下，一夜内肉眼所见的流星大约在十颗左右，它们象夜空中的“散兵游勇”，完全随机地出现于各个方位和天区，也

很难预料何时会出现流星。流星体越小，它的亮度越低，当流星体的原始质量在几百克以上时，它在高空不会完全气化，会有部分残骸进入低层大气，成为明亮夺目、沙沙作响的火流星。特别巨大的火流星甚至在白天都能赫然可见。例如1947年2月12日陨落于苏联的西霍得·阿林陨星比清晨的太阳更加耀眼。

除了上述那种偶发流星外，还有一类常常成群出现的流星群（图6.21）。它们有十分明显的规律性，出现在大致固定的日期、同样的天区范围，因此称其为周期流星，或流星群。流星群是一群轨道大致相同的流星体，当与地球大气相遇时，则成为颇为壮丽的流星雨。流星雨有大有小，少则几十颗、多则成千上万；宛如节日礼花。由于透视的原因，流星群都有一个辐射点（图6.25），似乎万千流星都从这辐射点附近的区域内迸发出来，而通常把辐射点所在的星座名或附近的恒星名作为该流星群的名字。例如1833年11月出现于狮子座的那次流星雨便称为狮子流星雨。这也是历史上最为壮观的一次大流星雨。每小时下落的流星数达35000多，一夜间的流星大约在24万以上（图6.26）。

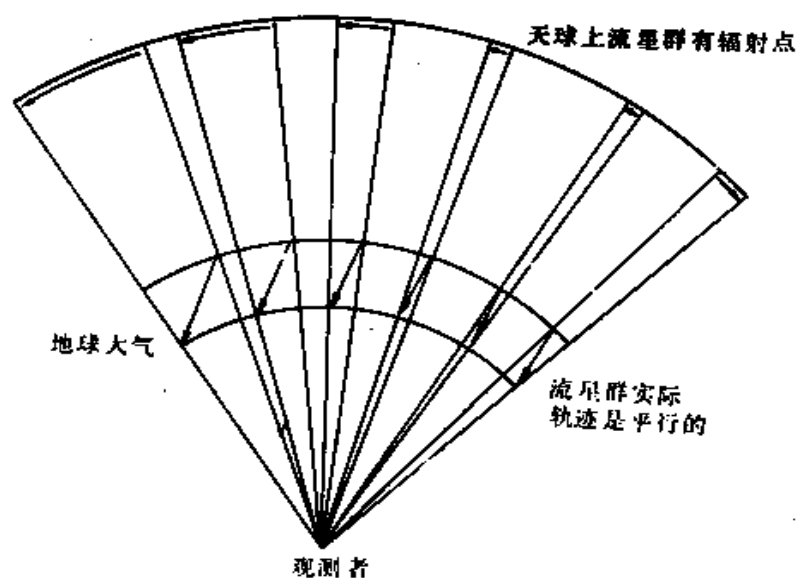


图 6.25 由于透视的原因使流星群出现辐射点



图 6.26 1833年11月波士頓地区所见的狮子大流星雨

三、流星数的变化规律

长期观测表明，流星的出现存在一些规律：

(1) 流星数与其大小有关，对于肉眼不能见的暗弱流星平均每降低^①一个星等，流星数平均增加2.5倍。即流星体质量越小，数目越多。

① 因为星等数小的星更亮，所以天文学上习惯把星等数增加称为降低，例如8等星变为9等星

(2) 在同一天中, 流星出现的几率以黎明前为最大, 傍晚时为最小。即下半夜的流星比上半夜多。

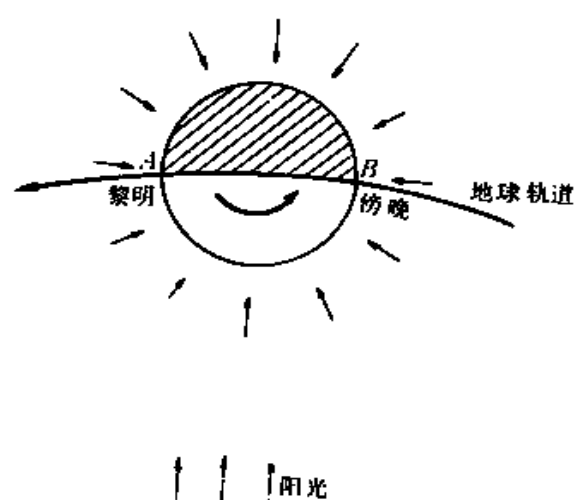


图 6.27 流星数周日变化的原因

(3) 在同一年中, 下半年的流星数比上半年多, 秋季的流星比春季多。

每天落向地球的流星数目由于观测手段不一, 有不同的结果, 但大体上的规律是相仿的。表6.14就是一些苏联天文学家的研究结果。

流星的周日变化可以用图6.27来说明: 假定地球周围的流星体是均匀分布的,

则正如雨中骑车一样, 背上淋到的雨显然比胸前少得多, A处(相当于黎明)遇到的流星体当然应比 B处(傍晚时)更多。

表 6.14 每天落向地球的流星数统计

目视星等	对应质量 (10^{-3} 克)	流星数目 (10^3 个)	倍 率	目视星等	对应质量 (10^{-3} 克)	流星数目 (10^3 个)	倍 率
-3	4600	28		4	6.3	18000	2.54
-2	1600	71	2.54	5	2.5	45000	2.50
-1	630	180	2.54	6	1.0	110000	2.44
0	250	450	2.50	7	0.40	280000	2.55
1	100	1100	2.44	8	0.16	710000	2.54
2	40	2800	2.55	9	0.063	1800000	2.54
3	16	7100	2.54	10	0.025	4500000	2.50

周年变化的规律同样可用运动的合成来解释(图6.28): 流星体多分布于黄道面附近, 地球的公转运动的方向始终在太阳西 90° 处; 在春分那天公转的向点即在冬至点 u ; 显然 $h_u = 90^\circ - (\phi + \epsilon)$,

是地平高度最小的时候，辐射点的地平高度越低，能见的流星数当然越少。

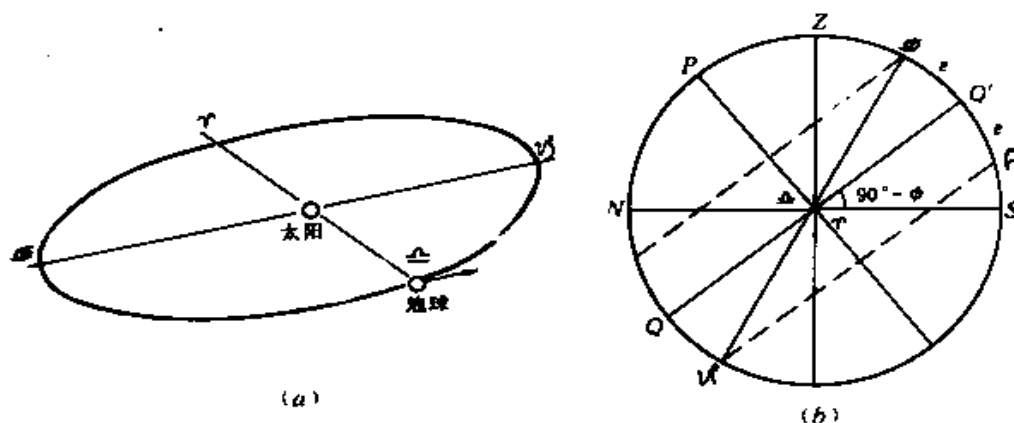


图 6.28 流星数周年变化的原因说明：

a. 春分时地球运动的向点在冬至点 u；

b. 春分日冬至点 u 的地平高度最低

四、流星的观测

流星是最易观测的项目之一，简单的目视观测几乎不需要任何仪器设备。它方便、灵活，当然单个零星资料价值并不太大，但只要持之以恒便会有很好的结果。如果使用小望远镜则可以看到更暗的流星，数目也必将大大增加。目视观测所需记录的是：流星出没的方位、时间、流星的亮度、颜色等等。

流星的照相观测要用强光力、大视场的照相机，为了获得较暗的流星资料还需要使用高灵敏的感光底片，并可用多架照相机联合观测。对于偶发流星，照相观测平均要几十小时才可得到一张照片，当出现流星雨时，获得观测资料的可能则大大增加。照相观测的流星资料比较准确、可靠，对于确定流星的高度及运动速度是十分有用的。如配置上光栅或棱镜后，更可以得到流星的光谱资料，以进行流星物理的研究工作。

四十年代后，流星的雷达观测崭露头角，因为流星余迹可以很好地反射无线电波。这种方法能有效地观测白天和阴雨天肉眼

无法见到的流星。一般观测流星所用的雷达波长选择在4—12米。

进入空间时代后，人们还发射了专门的人造地球卫星和行星际自动站来观测和研究流星，并取得了更大的进展。

一个观测点只能定出流星的视方位，即在天球上的投影。要定出其空间位置或高度、运行速度等就需要有两个以上的观测点，这些观测点既不能相距太远，也不宜太靠近，一般选择在50—100千米之间（图

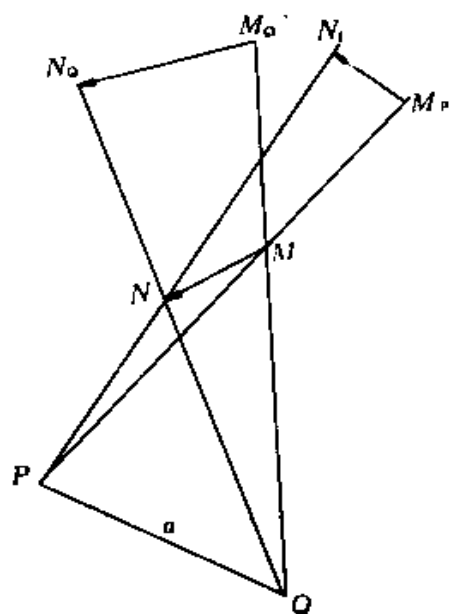


图 6.29 两观测点P、Q所见的流星
分别是 $M_o N_o$ 及 $M_o' N_o'$

6.29)。图中MN是流星余迹，在P点看来在天球上的投影是 $M_o N_o$ ，在Q点看来则是 $M_o' N_o'$ 。因为P、Q相距不远，它们的子午线方向可以看作平行线，只要已知PQ间的距离a及P对Q的方位角 Δ ，则不难从两地测得地平坐标(A, h)，求出流星的高度和距离。

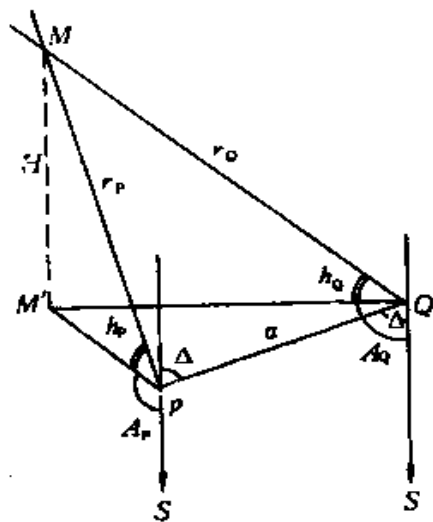


图 6.30 两地测流星的原理图

以M点为例，它在地面上投影为 M' （图6.30），则利用 $\triangle PQM'$ 的正弦定理有：

$$\frac{a}{\sin(A_p - A_q)} = \frac{PM'}{\sin(A_q - \Delta)} = \frac{QM'}{\sin(A_p - \Delta)} \quad (6.3)$$

则流星离地面的高度 H 及离 P 、 Q 的距离 r_P 、 r_Q 可由下式给出

$$\left. \begin{aligned} H &= \frac{a \sin(A_Q - \Delta)}{\sin(A_P - A_Q)} \operatorname{tg} h_P \\ H &= \frac{a \sin(A_P - \Delta)}{\sin(A_P - A_Q)} \operatorname{tg} h_Q \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

$$\left. \begin{aligned} r_P &= \frac{a \sin(A_Q - \Delta)}{\sin(A_P - A_Q) \cos h_P} \\ r_Q &= \frac{a \sin(A_P - \Delta)}{\sin(A_P - A_Q) \cos h_Q} \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

同样也可测得 N 点的高度和距离, 加上时间的记录则可测出流星的运行速度。从观测中统计得出, 大多数流星出现在80—120千米的高空范围, 更高处由于空气较稀而不会发光; 而在更低的高度, 大多数流星已燃烧气化不再存在, 只有那些原始质量很大, 进入大气速度较慢的流星才有可能进入更低的大气层。

流星相对于地心的速度均在11—72千米/秒之间。这表明流星体原来绕太阳的速度最大不超过42千米/秒, 小于那儿的对太阳的逃逸速度, 即流星体实际轨道是椭圆。

五、流星群的形成

应当说流星体有多种不同的来源, 它们可能是当初形成行星、卫星后的残余物质, 可能来自大行星某种爆发后的产物, 也有可能是太阳系小天体间互相撞击的碎片, 更可能是彗星的瓦解物。现在一般认为那些偶发流星, 尤其是那些巨大的火流星, 大多与近地小行星有关, 而对于周期流星或流星群而言, 显然与彗星的瓦解物有密切的关联。如前所述的比拉彗星, 人们便目睹了它逐渐瓦解的过程(图6.31)。有的彗星瓦解较为彻底, 整个轨道上物质分布比较均匀, 这样, 地球每年穿过它的轨道时都会有规模大致相同的流星雨发生。有些彗星的瓦解物在轨道上仍然成团分布, 并

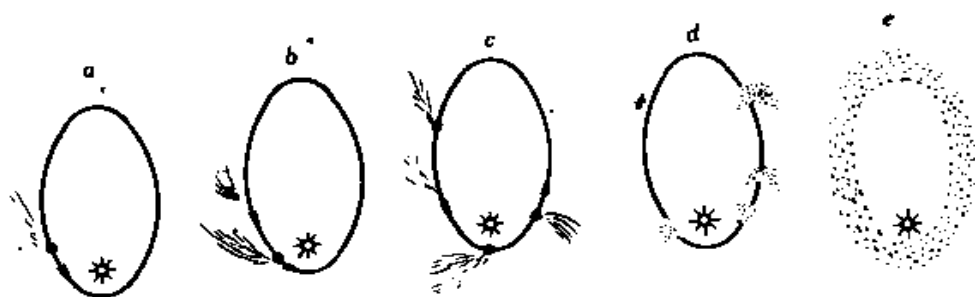


图 6.31 彗星逐渐瓦解为流星群

不均匀，这时虽然流星雨出现的日期和天区每次大致相同，但并不是每年都会发生，有的几十年才出现一次。

利用雷达及光学观测已测出了很多流星群的轨道，表6.15列出了一些最著名的流星群，有的流星群所对应的彗星一时找不到资料，很可能是早已瓦解殆尽了。

从流星雨开始出现到完全消失所持续的日期及单位时间内观测到的流星数目，便可以求出该流星群的分布范围及空间密度，从而推算出它的总质量。例如英仙座流星群总质量约为 5×10^{11} 千克，仅是地球质量的 10^{-13} 。当然，不同流星群的质量也不尽相同，但它的上限应当是彗星的质量。由此可知，流星群的质量不会很大，而统计表明，进入地球大气的流星绝大多数仍然是偶发流星，流星群仅占20—25%左右而已。

§ 6.6 陨星和陨星雨

当流星体的原始质量很大时，与空气摩擦产生的几千度高温并不能使它全部烧毁气化，在它们到达离地面20—25千米处时，大气阻力使它们失去了宇宙速度而大致以均匀的速度垂直陨落于地面，称之为陨星。我国早在铜器时代就用陨铁来制造兵刃、农具，史书上记载的陨星有700多次，其中50次有确凿的陨星实物。

表 6.15 九个主要的流星群与彗星关系

流星群名	可见日期	出现率最高日期	辐射点		对于地心的速度 (千米/秒)	有关彗星
			α	δ		
天琴流星群	4月20日—4月24日	4月22日	18 ^h 08 ^m	+32°	48	1861 I
宝瓶 η 流星群	5月2日—5月7日	5月5日	22 ^h 24 ^m	0°	59	哈雷
宝瓶 δ 流星群	7月22日—8月1日	7月31日	22 ^h 36 ^m	-8°	43	?
英仙流星群	7月27日—8月16日	8月12日	3 ^h 04 ^m	+58°	61	1862 III
猎户流星群	10月17日—10月25日	10月21日	6 ^h 24 ^m	+15°	66	哈雷
金牛流星群	10月25日—11月25日	11月8日	3 ^h 44 ^m	+18°	30	恩克
狮子流星群	11月16日—11月19日	11月17日	10 ^h 08 ^m	+22°	72	1866 I
仙女流星群	11月17日—11月27日	11月25日	1 ^h 40 ^m	+43°	16	比拉
双子流星群	12月7日—12月15日	12月14日	7 ^h 28 ^m	+32°	37	?

一、陨星的成分及分类

按陨星的化学组成，一般可以分为三大类。

1. 铁陨星（陨铁） 主要成分是铁镍合金，平均密度在 $(7.5-8.0) \times 10^3$ 千克/米³间。根据分析，一般铁的含量在90%以上，镍占8—9%，此外还常含有钴(0.6%)、磷(0.2%)等，有些还有微量的碳、硫、铬和铜等。铁陨星在陨星中约占6%。

2. 石陨星（陨石） 这是陨星中最常见的一类，约占92%，它的主要成分是硅酸盐，也有一些铁镍合金，平均密度 $(3.0-3.5) \times 10^3$ 千克/米³。石陨星主要成分是氧(41.0%)、铁(15.5%)、硅(21.0%)、镁(14.3%)。

3. 石铁陨星（陨铁石） 介于前两者之间，铁镍和硅酸盐大约各占一半左右，其平均密度在 $(5.5-6.0) \times 10^3$ 千克/米³间。其主要成分是铁(55.3%)、氧(18.6%)、镁(12.3%)、硅(8.1%)。陨铁石更为少见，大约在陨星中仅占2%左右。

在航天飞行实现之前，陨星是人类唯一可以进行直接研究的天体，因而对陨星的分析工作很早就已开始了。大量资料表明，陨星中并没有地球上不存在的新元素，最丰富的有铁、氧、硅、镁、镍、硫、钙、铝等等，其中氧和硅都是以化合物的形式出现的。虽然在陨星中并没有新元素，但它们的丰度与地球并不相同。从矿物构成而言，已在陨星中发现的矿物有106种，其中大多数是地球上常见的，如橄榄石、长石、顽火石、辉石、石墨、铬铁矿等等，但也有24种矿物如镍碳铁石等却是地球上没有的，而地球上很多的氢氧化物及三价铁盐在陨星内则极少见。最近二十多年来，陨星的研究分析工作又取得了新的进展——发现了陨星中存在有水份及种类繁多的有机物，如烷族、芳香族、脂肪族烃类、卟啉、嘌呤、嘧啶、氨基酸等等，计有61种之多。对于这些有机物的由来，有几种不同的解释，但无疑这对于探讨有机物及生命起源有重要

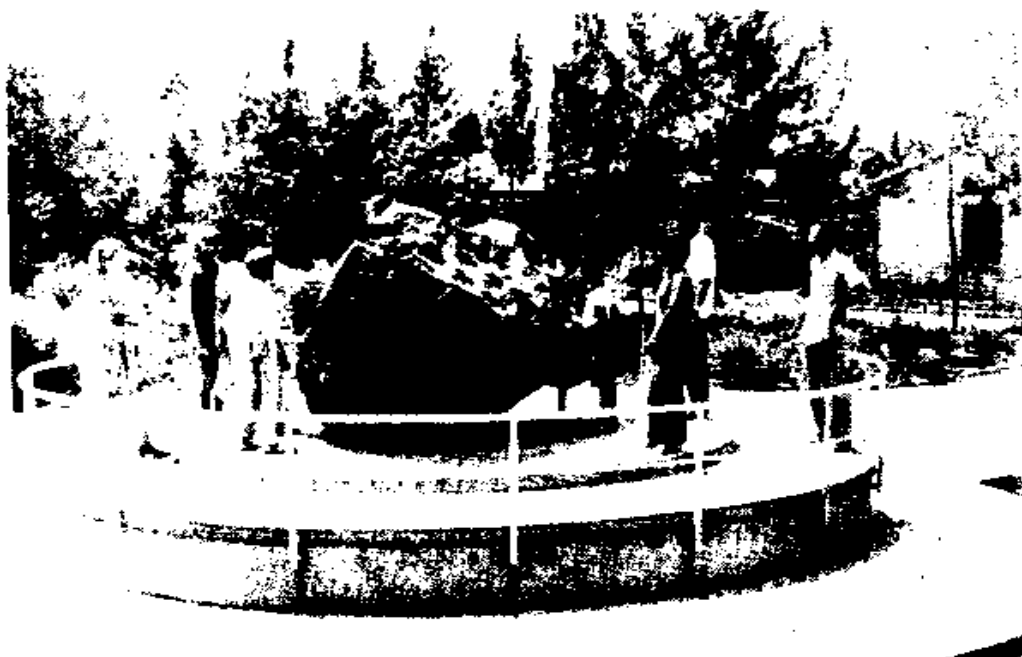


图 6.32 新疆大陨铁——世界第三大陨铁，重约30吨



图 6.33 吉林1号陨石——世界上最大的石陨石，重1770千克

的价值。

二、陨星的大小

陨星大小不一，过于细微的陨星常为人忽略而被埋没，因而尽管每天落于地球的陨星数以十万计，但以前人们所知的陨石或陨铁不过两千左右。七十年代末，科学家在南极地区却获得了意外的收获。冰雪及低温为人们保存了大量的陨星，短短几年中，美、日、苏等国在南极地区找到的大小陨石超过了3000块，并发现了来自月球及火星的陨星。日本科学家还在南极找到的陨星中发现了多种地外形成的氨基酸。这些发现无疑都有很深远的意义。

目前已知的，世界上最大的陨铁是落于纳米比亚的戈巴大陨铁，它大致成长方体，大小为 $2.5 \times 2.5 \times 2$ 米³，重量约在60吨左右，至今还在荒漠之中。这块陨铁的独特处在于它含镍量特别高，达16%以上。而地球上的自然铁中镍含量通常小于1%，最多不会超过3%。第二大的陨铁是1815年在格陵兰冰层中找到的约角1号陨铁，重33吨。第三位的是中国新疆大陨铁(图6.32)。它原陨落与新疆沙漠之中，现保存在乌鲁木齐市。

由于石陨星在陨落时经不起高温、高压气流的巨大冲击，常会在陨落中爆裂炸碎，因而陨石一般都比陨铁小。现在保存的最大石陨星是1976年3月8日陨落与吉林的吉林1号陨石，重1770千克(图6.33)。第二大的石陨星是1948年2月18日落在美国的诺顿——富尔内斯陨石(1079千克)。

石铁陨星由于实物很少，现知最大的石铁陨星仅不过200千克左右¹。

陨铁常具有一些特殊的合金结构，表面上与人工冶炼的铁块

1 据我国科学工作者最近考证，山东省莒南县有块被称为“神牛”的大铁块实际上是罕见的石铁陨星。倘能进一步加以确证，则它便为石铁陨星之冠——长1.4米，最大宽度0.8米，重约1吨。

有些相象，然而它具有灰色的熔壳，切开后还能见到黄色的硫化物包体。陨石则比一般的岩石密度大，表面有一层很薄的黑褐色熔壳，上面还常留有象指甲形的小凹纹——气印。

当然，实际陨落于地球的陨星应当很多的，只是大部分落入了海洋或荒芜人烟的地区而不为人们所知罢了。按不同的方法估计，每天落向地球的陨星物质在 10^4 — 10^6 千克之间。有人担心陨星是否会造成人身伤亡或其他意外事故？应当认为这种担心是完全多余的。目前所知道的“陨星事件”，最严重的只砸死了几只羊（1836年，巴西）和一条狗（1911年，埃及），也有过一些造成建筑物受损的情况，如1969年澳洲一颗陨星打穿了屋顶，但还未有任何人身伤亡的记录。

五十年代人造卫星上天后，又多了一种“人造陨星”，到1982年底为止，人类发射的人造天体总数已超过了13000个（包括卫星、



图 6.34 美国“天空实验室”在大气中坠毁

火箭及火箭碎片),已坠毁的近9000个。现在几乎每天都有碎片陨落,它们曾几度引起了人们极大的恐慌,尤其是苏联两颗带有核装置的“宇宙-954”(1978年1月24日)、“宇宙-1402”(1982年12月18日)及70多吨的美国“天空实验室”(1979年7月11日)的坠落都曾轰动一时(图6.34),甚至引起了一些外交纠纷。

三、玻璃陨石和陨冰

除了三类陨星外,还有一类更加稀罕的玻璃质陨石。它们一般比较小,只不过几厘米大小,多数呈钮扣或泪滴状,颜色有深褐色、墨绿色及黑色的,有的半透明状、有的象玻璃一样透明(图6.35)。分析表明,其中70—80%是二氧化硅,11—15%是三氧化二铝,还有少量的铁(氧化物)、镁、钙、钾、钠、钛、锰及其他微量的元素,但不含水。



图 6.35 奇妙的玻璃陨石

令人奇异的是它不象普通陨星那样遍布于全球各地,而仅限于某些特殊的地区(表6.16),在那些地区常可找到成千细微的玻

表 6.16 玻璃陨石的主要散布区域

散布区名	包括的主要地区	相应陨石年龄(万年)
亚澳散布区	中国(雷州半岛、海南岛)、印度支那半岛、菲律宾、印尼、澳大利亚	70*
象牙海岸散布区	象牙海岸、加纳及附近海域	100
莫尔达维散布区	捷克斯洛伐克西南部伏尔塔瓦河流域	1500
北美散布区	美国得克萨斯州、佐治亚州、华盛顿地区	3200—3400

* 澳大利亚的玻璃陨石年龄为400万年。

璃陨石。

中国早在1000多年前便有了有关玻璃陨石的记载，亦是世界上最早的记录，在海南地区称之为“雷公墨”，形容其“扣之铮然，光莹可爱”。西方最早是生物学家查·达尔文(C. Darwin)于1844年在澳大利亚的发现记录。

玻璃陨石的成因虽然尚未有定论，但一般倾向于它不是真正的“天外来客”。很可能是在史前时期在那些地区受到了大陨星猛烈撞击，地壳表层的沙岩物质在受到巨大冲击后成为高温的熔融状态，并在向四处溅飞过程中迅速冷却而形式了这种非结晶体的玻璃物质。“阿波罗”登月的宇航员发现，在月面的尘土中也夹杂着大量细小的玻璃小球便是这种假设的有力佐证。

近年来，人类又逐渐知道了还有另一种陨星——陨冰。

陨星在降落过程中表面温度常常达到三、四千度以上，很多物质都被灼热气化，过去谁也没有想到会有陨冰能到达地面。所以，1983年4月11日我国无锡市东门降下一块陨冰时，翌日《新华日报》首先报导说是气象史上罕见的“大冰雹”，后经我国天文学家的努力，从人造卫星拍摄的当天的云图上找到了它自宇宙空间进入大气的轨道痕迹，以此证明它是一块罕见的陨冰。

在国外，确凿的陨冰记录也仅有二次：1955年8月30日，有一块陨冰陨落在美国威斯康星州的卡什顿城郊外，据报道，它落

地时断成两截，重约3千克，表面上有许多宽而浅的凹槽。第二次陨冰落于苏联莫斯科地区一个农庄的果园中，时间为1963年8月27日，碎冰块的总重量估计为5千克。

陨冰记录所以如此绝无仅有也是容易理解的，因为它极难保存，在古代即使落下冰块也无法证实它是“天外来客”。在中国史籍中也仅见“同治元年(1862年)秋，日方午，有大星坠入零陵县西乡雷家冲田中。大如斗而圆，色白，其声訇訇，久之化为水。”这很可能也是世界最早的陨冰记录。

但至今仍有些学者对此尚有疑虑，认为证据尚不充分，他们倾向于上空降下的冰块可能仍是地球大气内的产物。

四、著名的大陨星及陨星坑

1. 通古斯陨星 1908年6月30日晨，一团来自太空的巨大火球掠过印度洋碧波，越过喜马拉雅山群麓，以雷霆万钧之力向西伯利亚飞驰而去，在贝加尔湖西北约800千米的通古斯地区上空猛烈地爆炸开来……。

当时下落的火球比清晨的太阳更加耀眼夺目，大爆炸的冲击波绕地球上空回荡了两圈，几乎世界上所有地震记录仪都描下了一段不寻常的曲线。下落时引起的森林大火使60千米范围变成了焦土，800千米以外都可见到不寻常的火光，惊心动魄的爆炸巨响传至1000千米之外。人们估计，通古斯陨星的原始质量可能有数万吨。然而令人惊讶的是以后多次考察(当时沙俄统治下，无法到达这荒漠的原始森林地区)，竟没有找到任何陨石或陨铁的碎片，陨星坑也出乎意料的小，最大的直径不超过50米，因此，这成为历史上著名的科学之谜。有各种各样的假设，甚至有人不惜以“外星人”或“黑洞”来说明这一异常事件。但看来，众多假设中“以彗星说”最有说明力，即认为通古斯陨星可能是恩克彗星彗核中的一块碎片，如果真是如此，那是罕见的特大陨冰事件。

2. 吉林陨石雨 1976年三八国际妇女节下午,我国吉林地区上百万群众目睹了一次十分壮观的大陨石雨。那天下午3时01分,一团光亮夺目的火球出现于东方天空,伴随着低沉的滚雷声向西疾驰而来。它先炸成几个小火球,随后又变成万千金石轰然下落。根据考察,这场陨石雨面积近500平方千米,是世界上分布面积最广的一次陨石雨。在当地群众的协助下找到了100多块陨石共2700千克。其中1号陨石重1770千克,当它落地时,地面上升起了一股高达50米的“蘑菇云”,地上砸出了直径2米、深6.5米的坑洞。近两世纪来比较大的7次陨石雨列于表6.17中。

表 6.17 几次著名的大陨石雨 (按时间先后)

陨 石 雨 名	国 家	日 期	找到陨石数
埃格里	法 国	1803年4月26日	3000
普尔图斯克	波 兰	1868年1月30日	3000
赫斯勒	瑞 典	1869年1月1日	1000
莫 格	罗马尼亚	1882年2月3日	3000
霍尔布鲁克	美 国	1912年7月19日	14000
西霍得阿林	苏 联	1947年2月12日	几千
吉 林	中 国	1976年3月8日	100多

对吉林陨石雨的研究使人们获得了极其宝贵的资料。从它的飞行轨迹推算出了它在宇宙间的原始轨道 (这也是现在仅知道四个陨星轨道之一), 而同位素分析又帮助人们了解太阳系形成初期物质的分馏和凝聚过程, 还证明了它的母体来自阿波罗型小行星。

3. 亚利桑那大陨星坑 1891 年在美国亚利桑那州北部的荒漠之中,发现了一个直径达1245米、深172 米的大陨星坑(图6.36), 石灰岩和砂岩组成的坑壁高出地平45米, 在它坑底的大堆石砾中有许多铁片, 其中的石块有明显的熔化痕迹, 内部还杂有许多细小的镍铁颗粒。这种奇特的石块一直遍布到10千米范围。人们在那儿已搜集到了几吨陨铁碎片, 最大的一块有 450 千克, 根据推

算，这是约在2万年前一块重10多万吨的铁质陨星坠落所造成的坑洞。



图 6.36 亚利桑那陨星坑直径1245米，深172 米

陨星坑是陨星撞击的产物，然而由于地球大气的风化作用，绝大多数早已被破坏得无从辨认了，现在确证的尚有150多个。人造地球卫星上天后，又陆续发现了一些更加巨大、直径达几十甚至上百千米的陨星坑，例如，最近在苏联东西伯利亚的哈坦加河的一条支流波皮伽伊河流域发现了一个直径达100千米、深400米的圆形凹地，形状与陨石坑极为相似。当然，这还有待于进一步证实。

五、陨星与小行星、彗星的关系

很多证据表明，陨星的母体最初是小行星，从现在仅知的四颗大陨星的轨迹看来，它们与阿波罗小行星几乎没什么区别（表6.18），加上 ^{38}Ar 同位素测定，已确证吉林陨石确实原是一颗阿波罗型小行星。大约在800万年前，它由于碰撞而碎裂，终于成为

表 6.18 四颗陨星与阿波罗小行星的轨道比较

名 称		a (天文单位)	e	i	q (天文单位)	Q (天文单位)
陨 星	吉林(中国)	1.82	0.48	6.3°	0.94	2.71
	普列布拉(捷克)	2.42	0.67	10.4°	0.79	4.05
	劳斯特城(美国)	1.66	0.42	12.0°	0.97	2.35
	英涅斯科夫(加拿大)	1.8	0.44	?	1.0	2.6
小 行 星	(1862)阿波罗	1.47	0.56	6.35°	0.65	2.29
	(2101)阿多尼斯	1.87	0.76	1.37°	0.45	3.29
	(1864)代达罗斯	1.46	0.61	22.16°	0.57	2.35
	(1866)西绪福斯	1.89	0.54	41.14°	0.87	2.91

一颗单独的，大约 5 吨重的流星体陨落。

不仅如此，从陨星的分类看，陨铁和陨铁石与 M 类小行星十分相似，而陨石则与 S 类小行星相当。

然而，陨星现象是丰富多彩的。如前所述，通古斯陨星实际上很可能是彗星中一块彗核物质。一些天文学家曾仔细研究了通古斯母体的空间轨道，发现它确与恩克彗星较接近，因而他们认为这块物质的原始质量在五千万到五十亿千克间，在它以大约 40 千米/秒的速度闯入大气时，它对空气的巨大冲击作用产生了数以千万吨计的氧化氮，于是导致了这惊天动地的大爆炸。

实际上，陨冰包括无锡陨冰都可能是彗星的碎块，但在落地以前人们是很难区分出它是陨石、陨铁还是陨冰的。

§ 6.7 行星际物质

随着人类对宇宙认识的逐渐深入，现在知道，在广袤的行星际空间里并非是一无所有的真空状态。尽管物质已经极其稀薄，但

还是有尘埃物质和气体充斥于整个太阳系的空间。事实上，作为行星际物质，除了行星际尘埃、行星际气体外还应包括行星磁场、宇宙线及各种波长的电磁辐射。

一、行星际尘埃

这是指散布在地球大气以外整个太阳系空间中的固态物质，它们十分细小，大小从微米到厘米都有。空间探测器甚至记录到了 10^{-18} 千克的固态粒子。当然，许多流星体也属于行星际尘埃，而且是它们的主要组成部分。此外，来自恒星际空间的宇宙尘、残存在太阳系内没有参加行星形成的小星子、小行星间碰碎的残骸、彗星的瓦解物等都是行星际尘埃的成员。

目前对于行星际尘埃的了解还很肤浅，根据地面的雷达观测和行星际探测器以及“阿波罗号”宇航员放置于月面上的仪器所得到的资料，尚不能对太阳系整个空间作整体描述，因为空间探测器所经历的地区仍是有很局限性的。研究表明，即使不考虑流星群的因素，流星物质分布仍是很不均匀的。地月系统附近的行星际尘埃密度比较大，在没有流星群的时候，计及质量 10^{-10} 千克的尘埃，平均每小时每平方米落向地球为 7.2×10^2 次，密度大约为 $10^{-18}—10^{-20}$ 千克/米³，而在离此不远的区域，几乎就小了一个数量级。

但也有一些资料认为，在内行星区域，行星际尘埃的密度变化并不太大，而从地球以外的区域却大致与 r^{-2} 成比例，而且似乎小行星带内的密度也没有太大的变化。

行星际尘埃大多集中在黄道面附近，它们同样也在绕太阳作开普勒运动，而且都是椭圆轨道，然而它们的轨道却是多种多样的，方向也是顺、逆均有，而不象行星那样具有“同向”、“共面”、“近圆”等特性。

二、行星际气体

行星际空间除了尘埃物质外，还有极其稀薄的由带电粒子组成的行星际气体，其主要成分是质子、电子以及氢、碳、氮、氧等元素的核，还有很微量的重元素的核，但从宏观上讲，行星际气体是电中性的。

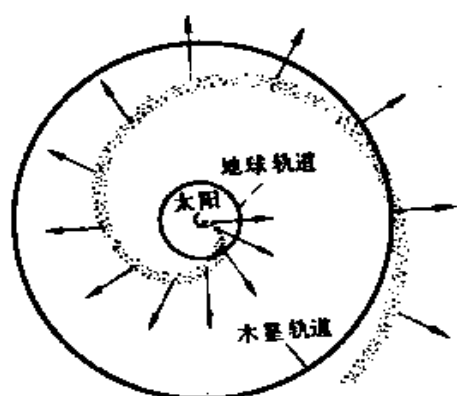


图 6.37 行星际气体主要来自太阳风

在本世纪初时，人们还以为行星际气体来自太阳的微粒辐射——即是太阳表面活动区所发出的高能电子，但现在查明并非如此。行星际气体来自太阳日冕区所发出的“太阳风”（图6.37）这首先是从彗尾研究而得到的结论，太阳风的各种参量都是经常在变化着的，但其主要的成分却

是不变的，主要为质子（氢原子核）和电子，其次是氦核（§ 7.5）。

除了太阳风外，行星际气体还有其他的来源：来自恒星际空间的中性氢原子气体，来自彗星（彗头、彗尾）蒸发出来的气体物质，来自大行星高层大气分子的逃逸……。

三、其他行星际物质

在行星际空间，除了有固体尘埃及等离子体状态的气体物质外，作为“物质”还应有各种波长的电磁波，从高能 γ 射线到无线电波都是一种物质，更加普遍的还有行星际磁场及宇宙线。各种电磁波不仅来自太阳，而且也有恒星的辐射，近年来还发现两颗巨行星也有红外辐射、射电辐射，甚至还有X射线辐射。

行星际磁场起源于太阳及行星的普遍磁场，但后者的影响较小，一方面太阳风大约以几百千米每秒的高速度沿径向向外运动，

另一方面,太阳又在不停地自转,这样就形成了一种独特的“扇形结构”(图6.38),在太阳的赤道面上呈现为典型的阿基米德螺线形式。一般它们可分为四个不同区域,在同一区域内磁场的极性相同,而相邻区域的磁场极性相反。

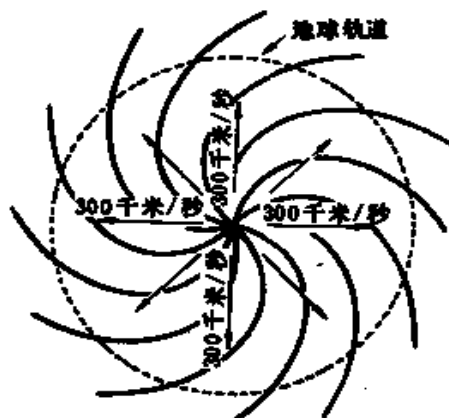


图 6.38 行星际磁场的扇形结构

行星际磁场从大尺度而言呈现出扇形结构,但从局部的小尺度讲来,却又有一些起伏和不规则性,尤其在太阳活动比较剧烈的时候,都会引起行星际磁场较大的变化,另外,太阳发出的带电粒子流也会产生磁场,并与之产生复杂的相互作用。在地球轨道处,通常的行星际磁场强度为几伽,虽然很弱,但却对宇宙线、地球及行星磁层都有重大影响。

四、黄道光

在低纬度观测条件较好的地方,在春季黄昏之后或者秋天的黎明之前,往往可以见到一种淡淡的银白色的三角形光锥,从地平沿黄道方向伸展开去,这就是黄道光(图6.39)。春天时候,它出现在西方,并随着夜幕渐降而很快没入地平之下;秋季它出现在东方,又很快就被晨曦所淹没,所以其可见的时间甚为短促。

从分光观测发现,黄道光的光谱与太阳光谱几乎完全相同,说明这是微粒物质(约0.1—1微米)反射太阳光,黄道光曾为行星际物质存在提供了一个有力的证明。在我国史籍上,在元初便有了记录,西方则从乔·卡西尼开始首先进行系统研究。

观测表明,黄道光对于黄道面大致对称分布,而朝太阳的方向增强,而且其随日心距的分布曲线可以与太阳上F日冕(§7.5)的分布曲线相衔接,因此也有人认为黄道光实质上是太阳F日冕



图. 6. 39 黄道光

(尘埃冕)的外围组成的。

黄道光的亮度并不固定，有较复杂的变化，其中有长期项也有短期项，但总的说来其强度很弱，而且常常受其他夜天光和地球大气散射的影响。

形成黄道光的尘埃物质的总质量极小，根据它们对太阳大致成透镜状的分布状况，有人推算从太阳到地球轨道其总质量不过 10^{15} 千克，仅与一个直径10千米的小行星质量相当。

五、对日照

在黄道上黄道光向太阳一直可以延伸到太阳的近旁，而在背太阳方向其亮度不断下降，然而到离太阳 135° 左右，亮度反而有所增加，并在离太阳 180° 处又达到极大值，这就是对日照。

对日照的亮度更比黄道光暗弱，但与周围背景相比，却明显地明亮些，其范围有时可达 $10^\circ \times 20^\circ$ ，大致呈卵形。由于它十分微弱，几乎任何人为的光亮都足以使它相形见绌而无法观测，所

以直到1856年才由丹麦天文学家勃罗森(T. Brorsen)首次观测到这种天文现象。一般讲来,观测对日照最好选择低纬度、远离城市的高山地区,最有利的观测日期是在三月和九月。

形成对日照的原因有多种假设,但一般说来倾向于它是行星际尘埃物质反射太阳光而形成的。

§ 6.8 太阳系起源与演化概述

众所周知,天体、地球、生物及人类的起源乃是当今自然科学基本理论中著名的“四大起源”问题,一直为世人所瞩目。而前二者都涉及到太阳系天体的起源及演化——太阳系起源问题。从古代盘古开天辟地的神话及《圣经》中“上帝创世”的宗教迷信,直到十七世纪初由西方称之为“哲学和现代宇宙学之父”的法国哲学家笛卡尔(R. Descartes)提出的旋涡假设以及今天的各种科学理论,人们对此进行了不倦的探索,虽然目前尚未有重大的、根本性的突破,但毕竟已有了巨大的进展。

一、灾变说和星云说

太阳系由何而来?至今已有五十多种不同的学说或假设,但就其实质而言,大致可归结为两大阵垒——灾变说和星云说。灾变说的实质是认为太阳系天体是在一次突然的巨大的剧变中产生的,太阳先于行星和卫星之前形成;星云说则主张整个太阳系(包括太阳)都是由同一块星云物质凝聚而成的。从最近半个世纪的发展看来,星云说取得了很大的进展,以致于一些原先主张灾变说的天文学家也先后放弃了原来的观点,改而从事研究星云说了。

历史上最早的星云说是笛卡尔在1644年提出的“旋涡说”(天、地、太阳系都在混沌的旋涡中产生),第一个灾变说是法国动物学

家布丰(G. L. L. Buffon)于1745年提出的“彗星说”(彗星从太阳上撞出的物质形成了行星、卫星等天体)。但由于宗教界的横加干预,前者的著作被列为“禁书”,后者在宗教法庭的淫威下被迫宣布“改变观点”。

第一个在科学上产生巨大影响的是“康德 拉普拉斯星云说”,分别由德国哲学家康德(1755年)及法国数学家拉普拉斯(1796年)独立提出,它们都能从科学的角度来说明太阳系的一些主要特征,并且都认为太阳系是由一团星云物质通过万有引力等自然规律作用而逐渐形成的。虽然康德学说比拉普拉斯学说早41年提出,但当时康德是以匿名发表的初作,仅仅只印了几十本,其中哲理多于科学,因而鲜为人知,直到拉普拉斯用数学和力学定律重又讨论这个问题时才使它风靡一时,并取得了空前的成功。

二十世纪四十年代以后出现的星云说称之为“现代星云说”,它有以下几个最显著的共同特点:

(1) 吸取了康德 拉普拉斯学说中精髓和合理部分——太阳系由同一团星云在自然规律作用下逐渐形成。

(2) 充分运用了现代科学的理论及空间探测新资料,包括现代恒星早期演化理论及灾变说中一些个别的合理部分。

(3) 逐渐进入定量计算及模拟试验的阶段。

几十种现代星云说中影响较大及比较成熟的有以下几个人提出的学说:1962—1976年瑞典的阿尔文(H. Alfvén)、1955年英国的霍伊尔(F. Hoyle)、1962年在美国工作的加拿大人卡梅伦、1969年苏联的萨夫龙诺夫(B. C. Сафронов),以及1970年日本的林忠四郎(G. Hayashi)。我国已故的著名天文学家戴文赛从五十年代后期也开始致力于研究太阳系起源问题,并且于1977—1978年提出了一个能比较全面、系统、有内在联系的论述太阳系主要特征的由来及太阳系各类天体起源的新星云说。

灾变说是在康德 拉普拉斯古典星云说遇到了无法逾越的困

难——角动量分布异常^①——而出现的。从1878年新西兰天文学家比克顿(A. W. Bickerton)开始,十九世纪末到二十世纪四、五十年代也曾出现过二十多种不同的灾变说,它们都仰仗两颗或三颗恒星的彼此接近或碰撞这样的偶然事件来解释太阳系的起源。但它们既不能真正解决角动量问题,又无法回避宇宙间恒星彼此接近的几率极小的矛盾,因此到五十年代便渐渐走向衰落。

二、行星和卫星的形成方法

在星云如何凝聚成行星和卫星问题上,现代星云说各学派观点互有较大的分歧,大致可以归结为有五种可能的途径:

- (1) 先形成环体,由各个环体独立集聚成行星。
- (2) 先形成大的原行星,在演化过程中再失去一部分或大部分物质而变成行星。
- (3) 先形成许多质量为 10^{25} 千克的“中介天体”,再形成行星、卫星。
- (4) 星云物质由于流体力学作用而形成规则的大小旋涡,旋涡形成行星、卫星。
- (5) 星云通过尘粒、粒子团形成星子,再由星子集聚成行星和卫星。

比较起来其中“星子集聚”学说更受人重视。戴文赛学说也主张星云在一面收缩一面旋转时,物质向对称面沉降,形成内薄外厚的星云盘(图6.40),并在中间形成一个固体微粒组成的“尘层”,在它达到一定的密度时,便会瓦解成许多粒子团,它们靠自身的

① 1861年法国科学家巴比内特(J. Barbinet)首次指出:太阳系既是同一星云形成,那末单位物质所有的角动量应当大致相同,但计算表明,太阳的质量占太阳系质量的99%以上,可是太阳的角动量却只是太阳系总角动量的2%左右。这即是著名的太阳系角动量分布异常的问题,所有关于太阳系起源的学说都必须首先对此作出回答。

引力收缩成大大小小不等的星子。由于星子活动范围有限，又有各种不同的轨道，因而频频发生碰撞。

星子间的碰撞可以产生两种结果：当彼此间大小相差悬殊，或

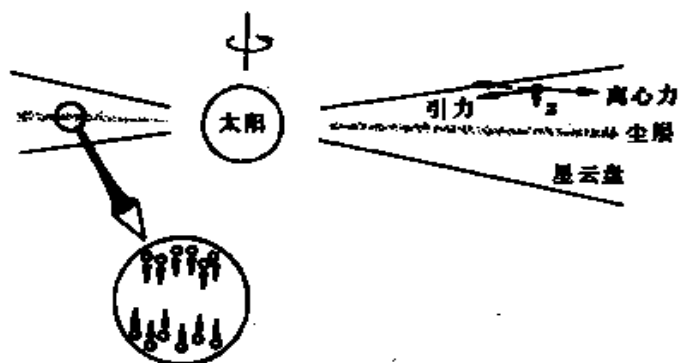


图 6.40 太阳系的星云盘和尘层

者相对速度不太大，则它们就会结合——

“碰撞吸积”；相反，若两者大小相差不大，又以高速接近，则会撞碎，变成更小的星子。但在漫长的岁月中，这些被碰碎的小

星子多数终究又会为大星子所吸积。在这种吸积过程中，一定的区域内会产生一个相对说来最大的大星子——行星胎，行星胎生长到一定质量时，还能以“引力吸积”^①的方式大大加快物质凝聚的速度，而成为行星。当然，星子具体如何集聚是个涉及到许多不确定量的复杂问题，因此各人具体的计算结果彼此不尽相同，也很难进行类比，作为一个数量级的概念，则可以戴文赛的工作为例(表6.19)。

如前所述，目前已知行星的卫星数已超过了60个，根据其轨

表 6.19 戴文赛计算的行星形成时间

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
尘粒大小(10^{-3} 米)	3.4	1.6	1.1	0.7	0.3	0.1	0.06	0.04
尘层厚度(10^3 米)	11.9	22.2	30.7	46.7	622	1.32×10^3	2.65×10^3	4.15×10^3
尘粒沉降时间(10^3 年)	45.4	67.8	85.3	109	199	294	460	615
行星形成时间(10^3 年)	0.05	0.33	0.89	2.8	26	170	820	2.4×10^3

① 行星胎周围的星子，即使并未与之碰撞，但由于行星胎的引力作用也会被行星胎所吸积，这即为引力吸积。

道情况又大致可分成规则卫星和不规则卫星。因此多数人认为,两类卫星可能有截然不同的起源方式:对于那些不规则卫星,尤其是象火卫一、二、木卫八、九直径很小的不规则卫星,很可能原来是小行星,只是它们在走近大行星时被摄动改变了轨道,成为绕行星旋转的卫星。而对于规则卫星而言,则倾向于认为“共同起源”说,即卫星与所绕转的行星是同一区域中的大小星子集聚而成的,正因为它们是由不同轨道的星子“合成”的,所以与大行星一样,有“共面性”、“同向性”、“近圆性”,与中心行星的距离符合“距离定则”等特性。

不仅两类卫星的起源不同,甚至有人认为木星、土星、天王星的规则卫星的起源方式也可能彼此各不相同。

三、小行星的起源问题

小行星问题也是任何太阳系起源学说无法回避的大问题,反过来,小行星起源问题的研究又有助于深化对太阳系起源、形成过程的认识。

最早研究小行星起源的是智神星和灶神星的发现者、德国医生奥伯斯。他认为火、木之间原也有一个如火星、地球那样的大行星,但后来却因某种未知的原因而爆炸了,大大小小的碎片残骸遂成为现在观测到的小行星。

“爆炸说”既不能说明其轨道分布特征(如共振现象),又找不到任何有效的爆炸机制,因而未能生根立足。但在近代,一些苏联天文学家企图复活这种学说。而美国天文学家柯伊伯(G. P. Kuiper)通过小行星的大小与数目关系的研究,曾提出另一种看法:在火、木星轨道之间原有十几个或几十个直径几百千米的小天体,它们在演化过程中不断地发生频繁的碰撞,于是使得小行星数越来越多。观测表明,较小的小行星数近似满足(6.1)式,而该式正是碰撞引起的碎片的分布规律。

柯伊伯的观点也有很多困难之处,因而目前最盛行的是“半成品说”,即是在火、木间的“行星胎”因某些原因而未能进一步吸积更多的物质。1979年,戴文赛通过定量的计算把这种论点大大丰富和推进了一步。

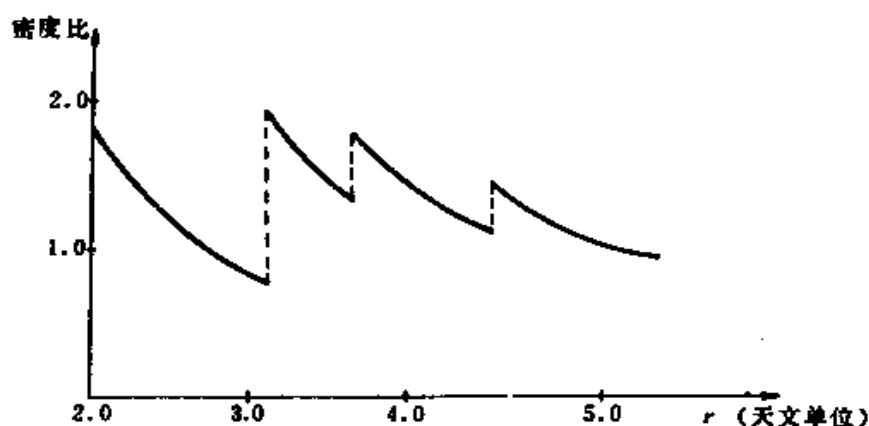


图 6.41 星云盘物质分布在小行星区出现间断性

戴文赛所作的计算表明,由于原始星云盘内温度、压力与距原始太阳的距离的关系,使得盘内的物质分布在现今的小行星区域出现了不连续的间断性(图6.41),以致在星子集聚过程开始之前,那儿的可吸积的物质——小星子——比较稀少,而邻近的木星胎又特别巨大,在它的摄动力的影响下,木星区的许多大星子便不断闯进小行星区、甚至火星区,从而把那儿的可吸积物质分别夺走了99.9%及99%,这样,小行星区内的演化只能停留在形成行星胎以前的大、小星子阶段,始终无法集聚成一颗大行星,同时也使得火星的质量比较小。

四、彗星起源问题

彗星从何而来?这是一个更加复杂的难题,少数人主张彗星由某些行星及卫星上的火山爆发时抛出的物质形成的。这种观点称之为“爆发说”,最早提出者是法国数学家拉格朗日(J. L. Lag-

range), 而现在的支柱则是以弗谢赫斯维亚茨基 (С. К. Всех-
святский) 为首的一部分苏联天文学家。此外, 还有人认为彗星
是从星际空间来的, 并不属于太阳系。

到本世纪五十年代初, 荷兰天文学家奥尔特 (J. H. Oort) 从
彗星轨道研究着手, 发现彗星最初都位于离太阳 5—20 万天文单
位的太阳系最边远地区 (最近的恒星比邻星离太阳约为 27 万天文
单位), 但这些原始彗星在邻近恒星摄动的影响下, 在 15 万天文单
位以上的彗星都已逃逸, 离开了太阳系, 而在此以内的彗星则也
有相当多的已经跑到了星际空间, 但尚有部分彗星集成了一片彗
星云——奥尔特云。它的质量在 $0.1-1m_{\odot}$ 之间, 估计云内彗星
的数目在 10^{11} 数量级。

由于奥尔特云离太阳与较近的恒星的距离几乎差不多, 因而
受到恒星摄动的影响比较明显。这种摄动
既可使一些彗星脱离太阳系, 也可使另
一些彗星改变轨道, 走到太阳附近的区域, 成
为人们可以观测到的彗星。而在大行星的
作用下, 有一些甚至变成 $P < 200$ 年的短周
期彗星。

近年来的许多观测事实都对奥尔特云
的假设比较有利。惠普尔提出的彗星核为
“脏雪球”的理论可以与它互相印证。

五、小天体的互相关系

太阳系中有不同类型的小天体: 小行
星、彗星、陨星、流星体、行星际尘埃、行星
际气体……, 广义地说还可包括一些卫星
在内, 它们的质量及大小范围可以相差很
多 (图 6.42), 但却明显地有演化上的联系。

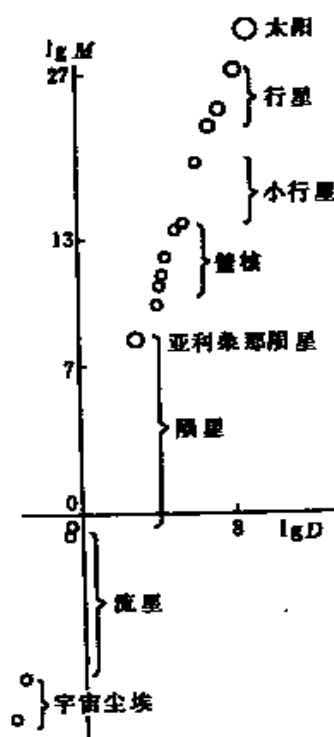


图 6.42 太阳系内小天体的大小 (D) 和质量 (m) 的分布

这些小天体演化过程中影响较大的有如下的因素：太阳的起潮力、热辐射、太阳风、辐射压、大行星的摄动作用、小天体的互相接近与碰撞……，因而有多种不同的演化途径和结果。总的说来其演化的大趋势是分裂和瓦解，当然也不排斥个别的集聚（如某些小天体发生非弹性碰撞而粘合起来）过程，最显然的是彗星的瓦解。

小行星可以被行星俘获而成为行星的卫星，反过来，一些离行星较远的卫星也可能因为其他天体的摄动而脱离行星成为小行星。如1977年发现的柯瓦尔天体（喀戎），有人认为它可能是天王星或土星原来的一颗卫星。

小行星与彗星也可能有演化上的联系，有一些小行星如(944)希达尔戈的轨道与一些短周期彗星比较相象，很可能是彗核碎裂后的产物。但也有些人认为，一些小天体在远离太阳的地方或许也会凝固成类似彗核的天体，其间的关系相当复杂，但大致可见下面图6.43。

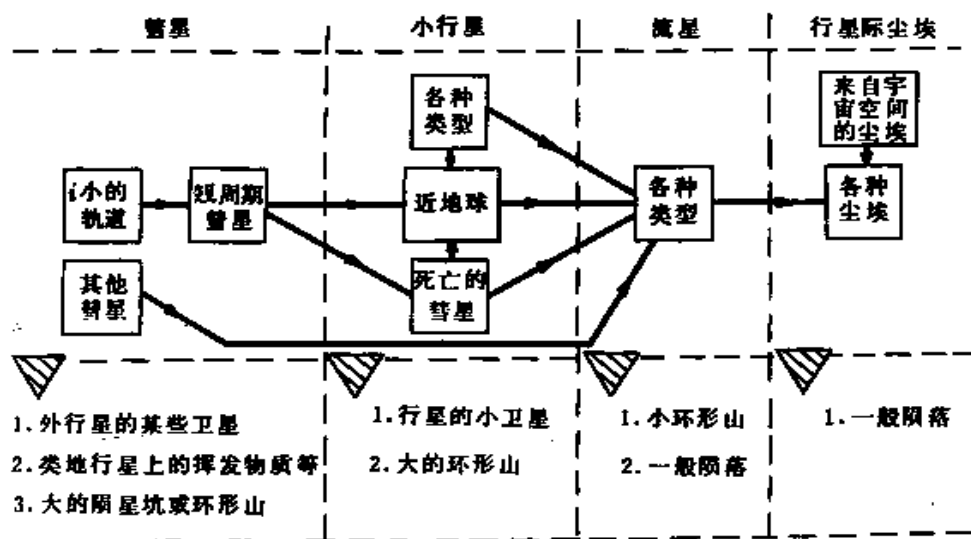


图 6.43 太阳系小天体的互相演化关系

第七章 太 阳

§ 7.1 太 阳 概 述

对于地球上的人类说来，光辉的太阳无疑是宇宙中最重要的天体。可以说，没有太阳，便不会有生机勃勃的万千世界，地球上也不会孕育出万物之灵的人类。太阳给人们以光明和温暖，为人们提供各种形式的能量，因此研究太阳的重要意义是十分明显的。

一、研究太阳的意义

太阳是太阳系的中心天体。太阳系中的行星、小行星、彗星等都在绕太阳运转，太阳也是太阳系中唯一的恒星，因而是太阳系光和热的源泉。太阳上的任何细微变化都会引起整个系统的明显变动；太阳质量的变化必然会改变行星、彗星轨道的大小；太阳上的局部活动会造成许多地球物理现象——极光增多，大气电离层、地磁及磁层的变化等。

对于太阳的研究、太阳活动规律及成因的探索，可以为气候的长期变化提供线索。虽然太阳活动与气候之间的关系比较复杂，但从许多史料可以断定，许多次全球性的大旱、大涝均与太阳黑子的盛衰有关。太阳活动还会严重干扰无线电通讯及航天计划。太阳耀斑爆发发出的强烈的短波辐射和微粒流会破坏地球大气电离层的结构，使得短波通讯突然中断。太阳活动的这种紫外辐射和微粒发射还会对宇航员造成致命的威胁，熟悉了太阳活动的规律

便能指导空间探测顺利进行。

众所周知,恒星是比行星更高层次的天体,也是银河系中物质存在的最主要形式。可是除了太阳以外,其他恒星都十分遥远,以致只呈现为一个个光点,使人们看不到它们表面的细节结构。现在所知的恒星大气及内部结构的知识很多就是通过太阳的研究取得的,而值得庆幸的是,无论从质量、大小,还是从其他物理参数看,太阳都居于平均值附近,因此它也可以作为恒星的典型,通过对于太阳的研究来了解有关恒星的知识。

太阳还是一个天然的超级实验室,它上面具有许多地球上难以实现的条件。过去,人们从日全食光谱中,首先发现了氦元素,促进了化学的发展。对于太阳能量的探索,促使人们去弄清热核反应^①的机制。爱丁顿的日全食观测资料为爱因斯坦的广义相对论提供了生动的实验验证。而今天对太阳奥秘的探索同样可以为科学的发展作出巨大的贡献。著名的“中微子失踪案”就是六十年代末,七十年代初从捕捉到太阳中微子后提出的科学疑案,对于这一问题的深入研究,将可推动粒子物理、恒星内部结构、宇宙学等研究的进展。而七十年代发现的太阳脉动也为太阳研究提出了新的课题。

二、太阳的基本数据

太阳是恒星世界的代表。以后将可看到,恒星的许多物理参数常常都以太阳的有关数据为单位,如质量以 $M_{\odot}$, 半径以 $R_{\odot}$, 光度以 $L_{\odot}$, 密度以 $\rho_{\odot}$ 为单位……, 因此有关太阳的一些数据乃是很重要的物理量(表7.1), 需要十分熟悉。

太阳的质量是由开普勒第三定律(5.12)式利用行星的轨道数

^① 在实验室, 常要使用巨大的回旋加速器使那些基本粒子获得巨大的能量, 从而克服“核力”而进行聚变反应, 在恒星内部则是藉高温来加速粒子的, 故一般称之为热核反应。

据而算得的。

求太阳的线半径需要知道日地距离值，而日地平均距离这个基本常数在以前定义为“天文单位”。1976年以后，国际天文学联合会已规定天文单位是一个导出常数（是光速及光行时间的乘积），其数值为： 149597870×10^3 米，在数值上它与日地平均距离值十分接近。

为了测定日地平均距离这个十分重要的基本常数，天文学家们进行了不懈的努力，最早的一个科学方法是法国

天文学家乔·卡西尼提出的。1672年，他利用火星大冲的机会，首次求出了太阳的视差 $p_{\odot}$ ，乔·卡西尼测太阳视差的原理如图7.1，

表 7.1 太阳的一些基本数据

参 数	所用符号	值
质 量	$M_{\odot}$	1.9891×10^{30} 千克
半 径	$R_{\odot}$	695990 千米
平均角半径	$\rho_{\odot}$	$15'59.63''$
平均密度	$\bar{\rho}_{\odot}$	1.409×10^3 千克/米 ³
辐射总功率	$L_{\odot}$	3.86×10^{26} 瓦
有效温度(表面)	$T_{\odot}$	5770 开
目视星等	$m_{\odot}$	-26.74^m
绝对目视星等	$M_{V\odot}$	$+4.83^m$
表面重力加速度	$g_{\odot}$	2.74×10^2 米/秒 ²
表面逃逸速度	$v_{e\odot}$	617.7 千米/秒
自转周期	$P_{\odot}$	25.2 日(赤道) 25.38 日($\phi = 17^\circ$)
中心温度	T_c	约 1.5×10^7 开
中心密度	ρ_c	约 1.60×10^5 千克/米 ³
中心压力	P_c	约 3.4×10^{16} 牛/米 ²
光 谱 型		G2V
日地平均距离	a	149597870 千米

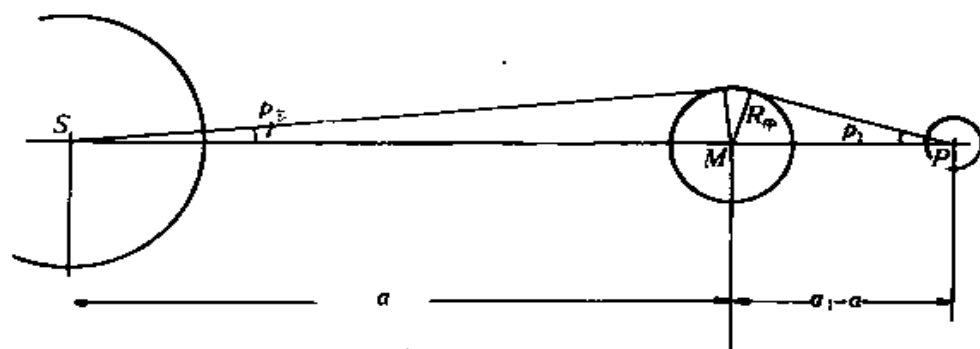


图 7.1 乔·卡西尼测定太阳视差的原理

从图不难得出

$$a \sin p_{\odot} = (a_1 - a) \sin p_1 \quad (7.1)$$

由于 p_1 、 $p_{\odot}$ 都是微量，则不难得出

$$p_{\odot} = \left(\frac{a_1}{a} - 1 \right) p_1 \quad (7.2)$$

乔·卡西尼的方法后来又改用于小行星，遂使精度得到了很大的提高，特别是1931年国际天文学联合会组织对(433)爱神星大冲联测，更使三角视差法达到了空前的准确度。

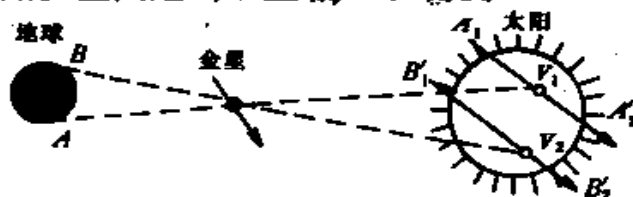


图 7.2 利用金星凌日测量太阳视差

哈雷提出过另一种测定法——金星凌日法。在地球上A、B两地的观测者所见的凌日在太阳视面上的路径分别是 A_1A_2 及 B_1B_2 (图7.2)。哈雷的方法是把测定 A_1A_2 与 B_1B_2 之间的角距 (从而推算出太阳的视差) 问题转化为测定凌日时间差 $t_{A_1A_2} - t_{B_1B_2}$ 问题。在当时，测定时间的精度远比测角的精度高。利用哈雷的方法也曾得到过很好的结果。

现在更新的方法是利用雷达测距，现代采用的天文单位值正是从此得到的。

三、太阳的自转

太阳是一个处于高温下的等离子体气体球。因此它的自转呈现为较差自转的方式。

测定太阳自转有两种基本方法，一是观测日面上的活动现象 (如黑子、日珥、暗条或耀斑) 在日面上的移动状况。二是测定太阳东、西边缘光谱线的多普勒位移 (见 § 8.7)。根据长期观测，太阳自转的角速度 Ω 与日面纬度 ϕ 有如下关系：

$$\Omega = a + b \sin^2 \phi + c \sin^4 \phi \quad (7.3)$$

表 7.2 太阳自转随纬度的变化

观测对象 \ 纬度	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
黑子	14.4	14.3	13.7	12.8	11.4	10.1	8.8
暗条	14.2	14.1	13.8	13.2	12.5	11.7	10.9
色球光谱	13.7	13.6	13.2	12.3	11.2	10.3	9.8

式中 a 、 b 、 c 是待定常数，常根据大量的观测资料，用“最小二乘法”求出。但事实上，因为观测的对象不一，其结果也常有所区别，七十年代初的结果可见表7.2。通常人们所说的太阳自转是指 $\phi = 17^\circ$ 处的值，其角速度是 2.865×10^{-6} 弧度/秒或者说自转周期为25.38日。但对于地球观测者而言，直接得到的是会合周期为

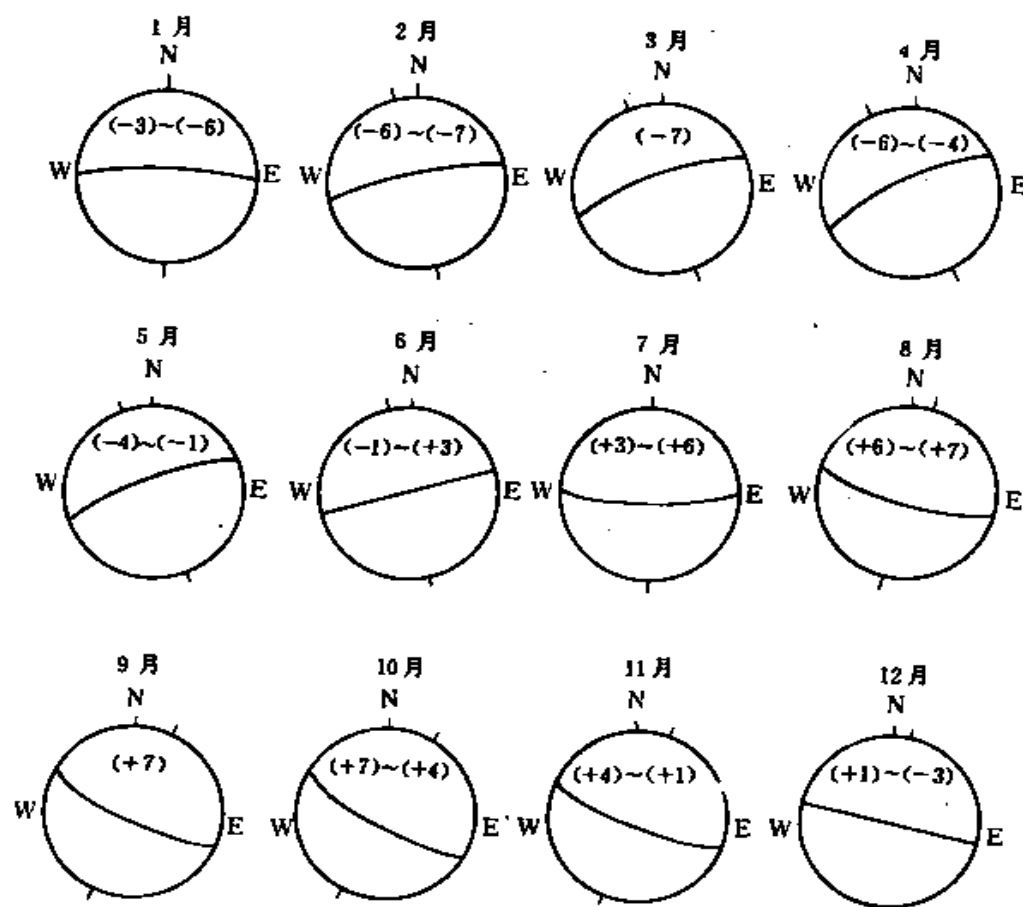


图 7.3 不同时刻所见的日面情况

27.275日。上述自转周期是通过(5.4)式归算得到的,与此相应的太阳赤道地区表面的自转线速度约为2千米/秒。

现代观测还表明,太阳自转的速率常常有 $\pm 10\%$ 的变化,其具体变化规律、变化的原因尚不太清楚。

太阳的自转轴与黄道面法线的交角为 $7^{\circ}15'$,因而从地球上看来,不同时刻的日面中心纬度不一(图7.3)。在观测时,需要参阅附录V“日面坐标”。

当然,这儿所讲的太阳自转都是指其表面层的状况。太阳内部的自转情况目前还不可能进行直接观测,只能根据一些模型来进行理论推断。正因为如此,不同人得到的结论都不相同,有人认为太阳内部的自转速度比表面快,或者快得多;但也有人却认为相反,内部的自转比表面更慢。

四、太阳活动和日面活动现象

众所周知,太阳是一颗比较稳定的恒星,其辐射功率在最近几十亿年内并没有显著的改变。但是,这并不表示太阳是没有任何活动的天体,相反,在局部区域总存在规模不同的活动现象。

表征太阳活动的日面现象很多,最显著而容易观测的就是太阳黑子(§7.6)。黑子数目的多寡和大小都是太阳活动的主要标志。此外还有光斑(§7.3)、日珥、暗条(§7.7)、谱斑、耀斑(§7.8)等等。

在太阳活动较强时,这些活动现象就频频出现,明显增多,当活动弱时,它们就很稀少,甚至根本不出现。太阳活动很早就引起了人们的广泛注意。据考证,中国在公元前就已经有了一些有关日珥和黑子的记录。根据长期统计结果,太阳活动的强弱大致呈现出周期变化,活动的周期最短的是7.3年,最长的可达17.1年,平均为11.2年,一般即称11年周期性。

太阳活动的本质至今仍不了解,因而对于太阳活动的规律本

身也有一些人持异议态度。最著名的就是所谓“蒙德极小期”问题。西方自1610年开始用望远镜观测黑子以来，到19世纪中叶已积累了大量资料，11年周期的规律似乎已经确立，但英国天文学家蒙德 (E. W. Maunder) 在1894 年指出，在1645—1715的71年间，几乎没有什么黑子记录。1976年，美国天文学家埃迪 (J. A. Eddy) 重新论证了这个现象，认为11年活动周期只是近二、三个世纪中的暂时现象。埃迪从古代黑子记录、极光资料、树木年轮 ^{14}C 同位素分析(图7.46)及日冕形状(从日食资料中可得)等四方面论证了他的观点。苏联天文学家甚至还提出了在过去8000年内有十次蒙德极小期的观点。

但也有许多人对此表示怀疑，认为西方的古代记录并不可靠，更可能疏漏，如果加上中国地方志的黑子记载，便得不到蒙德的结论。总之，问题尚需要继续探索和研究。

五、关于“五分钟振荡”

太阳表面除了那些局部活动以外，还有整体的表面起伏变化——五分钟振荡。这是美国天文学家莱顿 (R. B. Leighton) 1960 年的重大发现，这使人们对于太阳及太阳运动的认识发生了很大的变化，一度给传统的太阳内部结构理论带来了严重的“危机”。

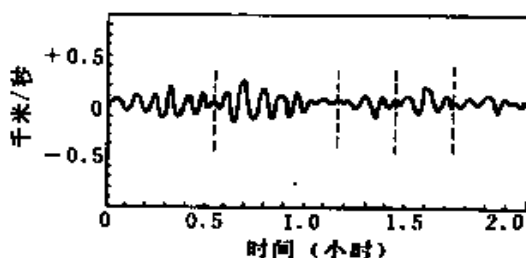


图 7.4 日面上一定点的五分钟振荡

太阳表面振荡所造成的径向起伏范围大约为25千米左右，而速度平均约为300米/秒，在振荡过程中，日面上1千—5万千米区域内的物质一起作整体的起落(图7.4)。

仔细分析，太阳振荡的周期并不是单一的，除了五分钟外，还含有其他周期。如最长的有160分钟即2小时40分的特长周期；

而振荡的振幅和周期随离太阳中心的距离增加而减小。

对于太阳振荡的本质及成因，至今仍只停留于假设和模型的阶段。不少人倾向于利用太阳不同层次结构中波动传播的理论来藉以说明。太阳振荡确可以为人们研究太阳内部结构提供又一条可靠的线索，有人就从分析中得出了太阳内部自转的方式。当然，这还有待于进一步证实。

§ 7.2 太阳的分层结构

人们只能观测太阳的表面情况，然而其表面状态往往取决于

其内部的结构和状态。三十年代，人们对于太阳及恒星能源的探索促进了原子物理、核物理的发展，而它们又反过来帮助人们建立了太阳的分层模型。现在普遍认为，太阳从物质状态及性质讲来，一般可以分成核反应区、辐射区、对流层、大气(图7.5)。

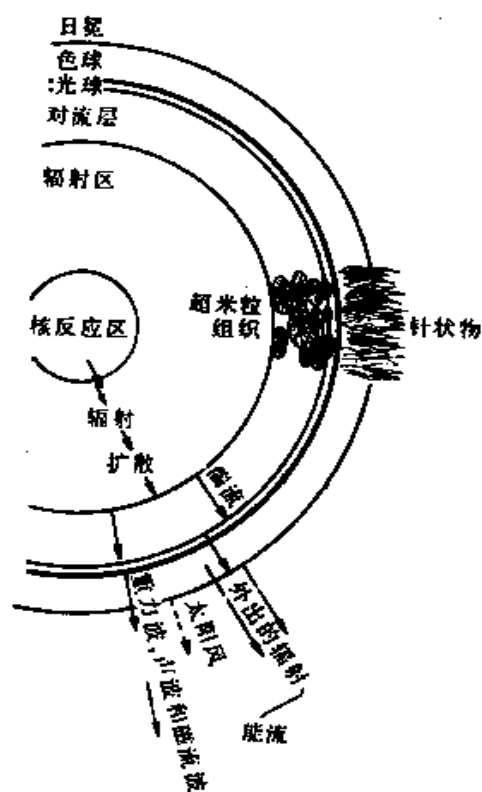


图 7.5 太阳剖面示意图

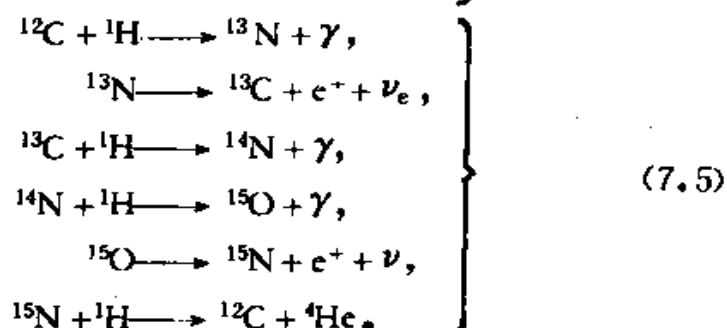
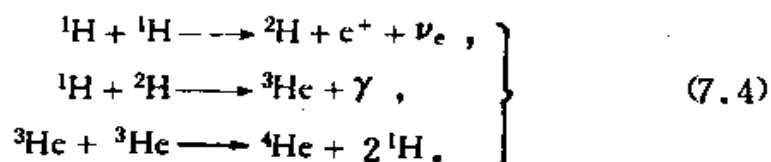
一、核反应区

太阳的核心区域虽然很小，半径大约只是太阳半径的 $1/4$ ，但由于天体的物质分布总是向核心高度集中的，所以根据理论推算，它核心内部区域的物质密度可达 1.60×10^5

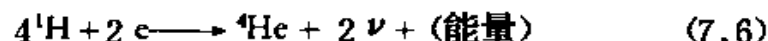
千克/米³。中心压力达3300亿大气压，温度高达1500万度(见表7.1)。

很多资料表明，太阳系形成至今已有46亿年的历史，对于太阳能源的探索长期以来困惑着人们，从十九世纪开始，先后提出过化学能、陨星降落、放射性元素蜕变、收缩时位能转化为热能等多种假设，但即使是当时看来最有效的收缩说也只能维持几千万年时间。直到德国物理学家魏茨泽克(C. F. Weizsäcker)和德裔美籍物理学家贝特(H. A. Bethe)分别于1937、1938年提出了由氢聚变为氦的热核反应理论，才圆满地解决了太阳(以及恒星)的能源问题。贝特的恒星核能源理论因而荣获了1967年诺贝尔物理奖。

太阳及大多数恒星内部的热核反应主要有两类：质子-质子反应(如7.4式)和碳氮循环(如7.5式)。



(7.4)及(7.5)式中的 e^+ 、 ν_{e} 、 γ 分别表示正电子、电子中微子和光子，但正电子产生后即会与电子发生湮灭而产生两个光子，因而上述二类核反应的净结果都是四个质子与两个电子生成一个氦原子核、两个中微子及大量的能量：



(7.6)式两端的总质量并不相等，其差额称为质量亏损。不难算得，左端比右端质量大0.028697原子质量单位，根据爱因斯坦

的质能关系式

$$E = mc^2, \quad (7.7)$$

不难算出，在上述热核反应中，每损失一千克氢就能放出 6.4×10^{14} 焦能量。

由于核反应是在最内部的核反应区内进行的，当核反应区内的氢消耗殆尽时，反应便不能再维持下去，这时太阳上损失的质量相当于 $0.1M_{\odot}$ 左右。核反应区内反应停止后，太阳就会向红巨星演化 (§ 10.6)。而上可知， $0.1M_{\odot}$ 的物质可转化的能量是：

$$\begin{aligned} & 6.4 \times 10^{14} \text{ (焦/千克)} \times 2 \times 10^{30} \text{ (千克)} \times 0.1 \\ & = 1.28 \times 10^{44} \text{ (焦)}. \end{aligned}$$

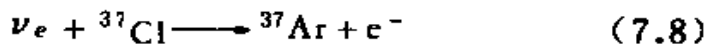
太阳的总辐射功率是 3.83×10^{26} 瓦，因此可以推出太阳作为稳定存在的寿命是

$$\frac{1.28 \times 10^{44} \text{ (焦)}}{3.86 \times 10^{26} \text{ (瓦)}} = 3.32 \times 10^{17} \text{ (秒)} \simeq 10^{10} \text{ (年)}.$$

恒星演化理论指出，对于质量较小的恒星(小于 $1.5M_{\odot}$)，内部的热核反应以(7.4)式为主，如太阳，96%的能源来自于质子-质子反应，仅仅4%的能量是由碳氮循环提供的。

上述两种核反应，同时都必然有大量中微子 ν_e 产生。粒子物理认为，中微子是一种不带电、静止质量为零、穿透力极强的基本粒子。因此即使在太阳中心区域也能轻而易举地辐射中微子，设法捕获自太阳核心区发出的中微子便可获得太阳内部的一些信息。

从五十年代开始，美国设计制造了一个“中微子俘获器”：在一个深达1500米的废金矿中放置了380千升的四氯化二碳溶液(图7.6)。它的反应机制是：



${}^{37}\text{Ar}$ 是放射性元素，半衰期35天，比较容易检测到。理论计算表明，这个装置应当每天俘获1.1个中微子，或者说为4.7

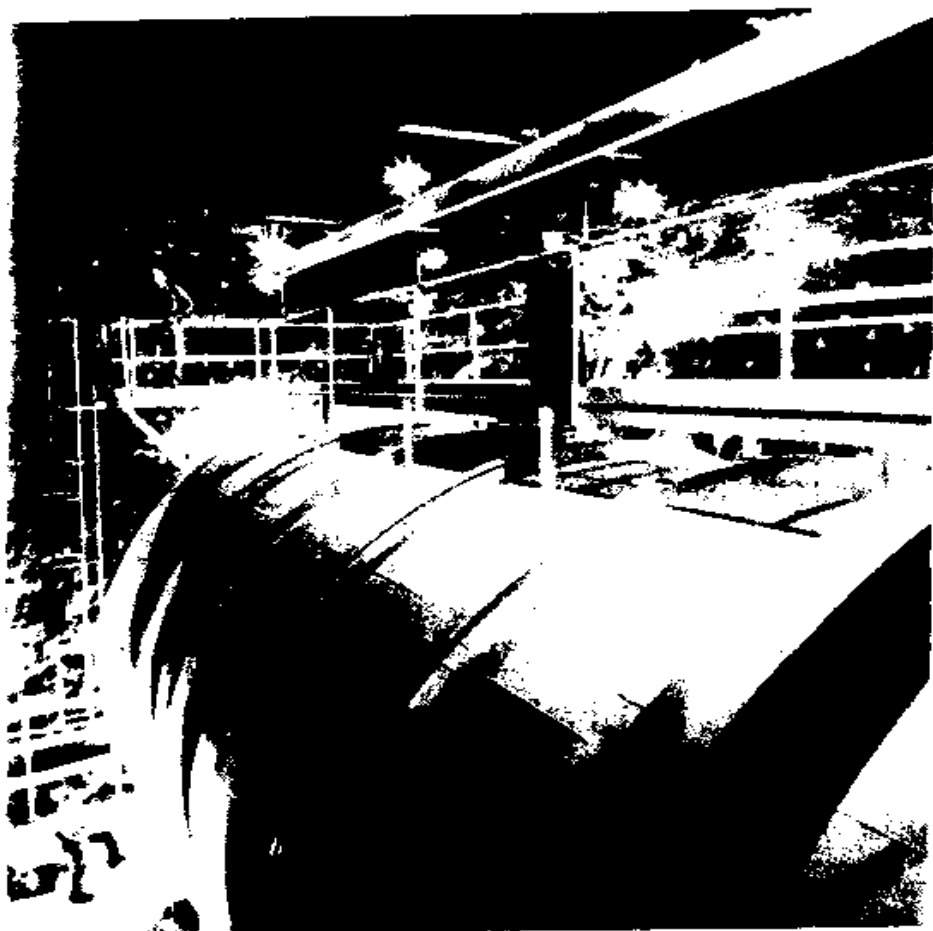
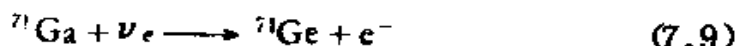


图 7.6 中微子俘获器

SNU^①，但是20多年来的探测的实际结果却平均为 1.7 ± 0.4 SNU，即平均每三天才有一个中微子被俘获。换言之，实际值仅是理论预言值的1/3左右。这便是著名的“太阳中微子之谜”。1978年，美国公布了这个结果后在科学界引起了一场轩然大波。因为这既是对太阳内部结构理论提出的严峻的挑战，也给粒子物理投下了严重的阴影，因而引起了许多著名科学家的密切注意。现在已提出了几种解释的机制。而美国天文学家则希望进一步改进实验装置，继续研究，计划利用俘获率更高的镓来代替氯，其机制是镓俘获

① SNU是一种专用计量单位，也称“太阳中微子单位”。定义为：单位时间(1秒)内，每个靶原子俘获 10^{-26} 个太阳中微子。

中微子后变为锗:



对于中微子的深入研究, 不仅能为解决太阳的有关问题提供线索, 也有助于宇宙学的研究, 如一旦能测出中微子静止质量不是零, 就能为宇宙膨胀的模式、为解决宇宙间的“短缺质量”找到出路(见 § 12.5)。

二、辐射区

核反应区的外面一层称为辐射区。这一层范围从 $0.25R_{\odot}$ — $0.8R_{\odot}$, 按体积而言, 约占太阳的一半, 但因为密度已急剧下降, 质量却与体积只有1.6%的核反应区相当。

辐射区内温度和压力仍然很大, 例如在 $0.8R_{\odot}$ 的外边缘, 理论推算的温度是 7×10^5 开, 压力是 1.5×10^{11} 牛/米², 密度是 18 千克/米³。

在辐射区内, 通过对光子的吸收、再发射而实现能量的传递——把核反应区产生的大量能量向外传送。在核反应区内, 通过核反应所产生的光子都是能量极高的高能光子, 辐射区的物质每吸收并再辐射一次, 就使它的频率降低(波长变长)一些, 经过无数次的这种再吸收、再辐射的漫长过程, 才使高能光子逐渐变为可见光。即是: 高能光子 $\xrightarrow{\text{吸收, 再辐射}}$ X 光子 $\xrightarrow{\text{吸收, 再辐射}}$ 远紫外光子 $\xrightarrow{\text{吸收, 再辐射}}$ 紫外光子 $\xrightarrow{\text{吸收, 再辐射}}$ 可见光, 因此, 倘若没有辐射区物质的作用, 太阳将是只发射高能射线的不可见的天体。

三、对流区

辐射区之外是对流区层, 它几乎已达到太阳的表面(差 500 千米左右)。对流区的厚度大约有 14 万千米左右, 但也有人认为对流层的厚度很小。在对流层内, 由于温度、压力及密度的梯度都

很大，所以物质的上下径向对流运动十分强烈，但这种运动并不均匀，因而也会产生低频率的声波——噪声，正是由于存在这种非均匀的对流、湍流及噪声，才使内部的巨大能量通过机械传输的方式，大部分都传送到光球的底层，并通过光球向外辐射出去。

此外，由于太阳本身还在作较差自转，所以在对流层内必然还存在大尺度的环流运动。环流及对流的联合作用对于太阳内外的物质交换起着桥梁作用，使得太阳表层的物质可以达到对流区的底层、甚至更深的内部，而太阳内部的一些物质也可能被带到太阳表面。

虽然人们无法直接观测到对流层，但是研究对流层的意义却并不因而逊色，这不仅是因为许多日面现象，如米粒、超米粒、黑子等产生于对流区，而且连太阳外层大气的一些活动现象，其动力和能源实际上也来自于这一层，因而近年来对流层的研究引起了许多人的注意。

四、太阳大气

这是太阳的最外层，也是可见层次。但因为性质不一，太阳大气还应分三个迥然不同的分层——光球、色球和日冕。

在通常情况下，人们所见的太阳就是大气的最底层——光球，范围是从表面到500千米深处，厚度仅是太阳半径的万分之四—七。但是，太阳的光能几乎全部来自于光球。太阳的光谱也是在光球内形成的。

太阳的辐射频谱很宽，从频率最高的 γ 射线一直到波长为十米以上的射电辐射都有(图7.7)。但是几乎99.9%的能量集中在0.2—10.0微米的波段间，其他波段的辐射能量与此相比是微不足道的，而且它们的来源是在太阳大气的高层——色球和日冕中。

色球位于光球之上，是太阳大气中层，其厚度一般取为光球之上的2000千米。由于其中物质更加稀薄，因此在可见光的区

域,色球的辐射仅是光球的 10^{-4} ,只有在日全食的短暂时刻才能看到其绚丽的光彩。

太阳大气最外层是物质极其稀薄的日冕,日冕的确切范围很难精确测定,有人甚至认为,它一直可以延伸到地球轨道附近。一般都认为它至少延伸到几个太阳半径处。日冕最令人惊讶之处是组成它原子的电离度极高,电子的运动温度在 10^6 开数量级。

关于太阳各层次的范围及主要物理参数,可见表7.3及图7.8。

表 7.3 太阳各层次概况

分层名	范围 ($R_{\odot}$)	质量 ($M_{\odot}$)	温度 (开)	压力 (大气压)	密度 ($\times 10^3$ 千克/米 ³)	产能 ($L_{\odot}$)
核反应区	0—1.4	50%	1.5×10^7 — 8×10^6	3.4×10^{11} — 2.6×10^{10}	160—20	99%
辐射区	1.4—4.5	49.9%	8×10^6 — 7×10^5	2.6×10^{10} — 1.5×10^6	20— 10^{-2}	1%
对流区	4.5—约1	0.1%	7×10^5 — 6.6×10^3	1.5×10^6 —1.4	10^{-2} — 4×10^{-7}	~0%
大气	光球	约500千米	6.6×10^3 —4560	1.4 —0	4×10^{-7} — 8×10^{-8}	~0%
	色球	约2000千米	4560 — 1×10^6	~0	8×10^{-8} — 1×10^{-14}	~0%
	日冕	约几个R	1×10^5 — 2×10^6	~0	1×10^{-14} — 1×10^{-22}	~0%

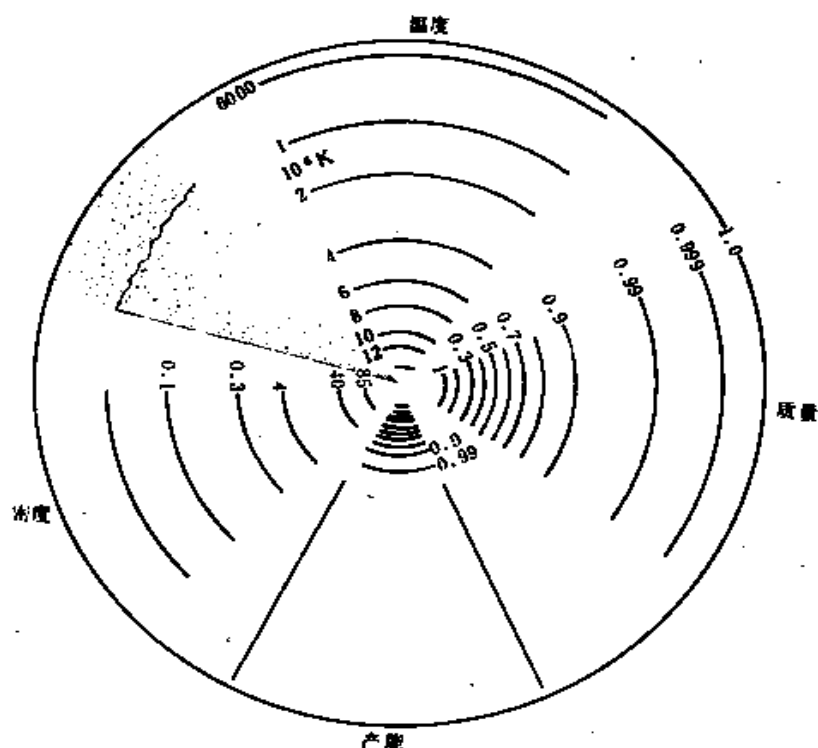


图 7.8 太阳各层次的物理参数示意图

§ 7.3 光 球

光球是太阳大气的底层，也是人们唯一可以直接观测到的部分。通过对于光球的研究，建立适当的理论模型，可以推断太阳的内部及高层大气。而关于太阳的内部结构的任何理论，均需根据太阳光球的实际观测来验证，因而光球的研究有十分重要的意义。

一、临边昏暗现象

人们平时所见到的太阳边缘乃是光球的最外层，而太阳上的能量是由内向外传播的，所以光球层的温度由深处向外逐渐降低，

这样,光球圆面必然呈现出一种中间比边缘更明亮的临边昏暗现象,其原因不难从图7.9藉以说明。

在日面中心及边缘部分,经过同样厚度的太阳大气时,对于太阳而言并不是同一球层。越是边缘处,离太阳中心越远,即温度越低,因而亮度越低。

从理论可以推导出离日面中心 θ 角处的辐射强度 $I(\theta)$ 为:

$$I(\theta) = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{3}{2} \cos \theta \right) \quad (7.10)$$

式中的 H 与 π 的乘积即是太阳表面单位时间的总辐射流,该式也可改写为另一种形式:

$$I(\theta) = I(0) (1 - u + u \cos \theta) \quad (7.11)$$

另一方面从 $\theta = 0$ 时由(7.10)式可得

$$I(0) = \frac{H}{2} \cdot \frac{5}{2}$$

于是

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \frac{2}{5} + \frac{3}{5} \cos \theta = 1 - \frac{3}{5} + \frac{3}{5} \cos \theta \quad (7.12)$$

与(7.11)式相比可知 $u = \frac{3}{5} = 0.6$, 而从观测定出的 $u = 0.56$,

这说明理论估计大致正确。

(7.11)式是对于可见光波段而言的,对于任一波长的单色光,

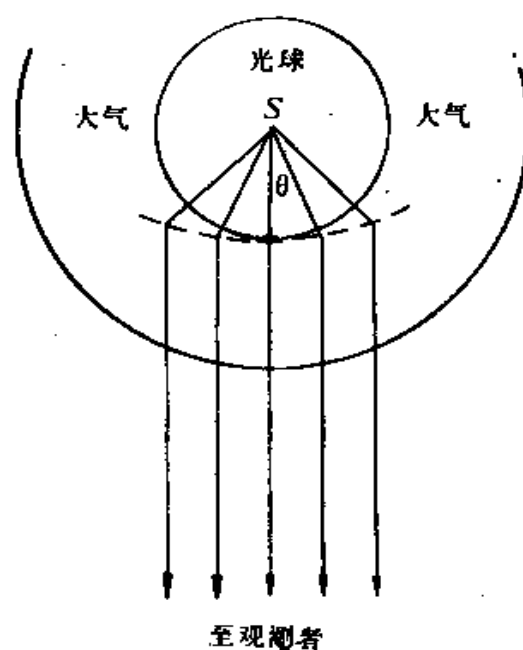


图 7.9 日面的临边昏暗

则有类似的关系,只是 $u(\lambda)$ 不同而已:

$$I_{\lambda}(\theta) = I_{\lambda}(\theta)[1 - u(\lambda) + u(\lambda) \cdot \cos\theta] \quad (7.13)$$

观测表明, $I_{\lambda}(\theta)$ 从波长 160 纳米一直到红外区都呈现为临边昏暗。然而在此波段以外,例如射电波段、远紫外区及 X 辐射线区却正好相反,呈现为“临边增亮”的现象。中心区域反而比边缘更“暗”。这是因为在远紫外等波段,太阳的高层大气的贡献较大。

二、太阳常数及有效温度

太阳的辐射能不仅对于太阳系的物质分布有决定性的影响,也是决定地球上生命起源和进化的主要因素,从(5.28)或(5.30)式可知,行星包括地球的表面温度主要取决于太阳的总辐射能。

长期以来,人们设计了各种方法和仪器,以求比较准确地测定太阳的总辐射能 $L_{\odot}$ 。

天文学上通常并不直接去测量 $L_{\odot}$,而是通过太阳常数 S 来推算的。太阳常数的定义是:在地球大气层之外,离太阳距离为一天文单位处,垂直于太阳光束方向的单位面积上,在单位时间内所接收到的太阳总辐射能量(包括各个波段),由于历史原因,它的量纲取为“卡/(厘米²·分)”。

实际上的测量工作都是在大气内进行的,所以对结果要作两种较为复杂的修正:大气吸收改正及日地实际距离的改正。尤其是第一项改正很难绝对精确,加上所用的仪器、方法不一,所以各人所得的 S 值都有一些差别,大致范围是 $S = 1.92 \sim 2.00$ 。七十年代初,人们通常采用 $S = 1.95$ 。但在1977年有人仔细研究了1966年—1976年间的高空观测结果,并进行了新的标度换算,认为 S 的最可几值是 $S = 1.97$ 卡/(厘米²·分),或为 1.374×10^3 瓦/(米²·秒)。由此很容易算得 $L_{\odot}$:

$$L_{\odot} = 4\pi a^2 \cdot S = 3.86 \times 10^{26} \text{ 瓦}$$

如上所述,太阳辐射能主要集中于可见光波段。因此实际上

太阳常数的测量波段一般只需包括0.2—10.0微米，这已占 $L_{\odot}$ 的99.9%了。

另外，也不难算出，落于整个地球上的太阳辐射能只是 $L_{\odot}$ 的极小的一部分：

$$\frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi a^2} = \frac{1}{4} \left(\frac{R_{\oplus}}{a} \right)^2 \simeq \frac{1}{2.2 \times 10^9}$$

太阳表面的温度则可以从黑体的辐射规律来求得：

$$\sigma T_e^4 = \frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2} \quad (7.14)$$

式中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数，等于 5.67×10^{-8} 瓦/(米²·开⁴)。 T_e 称之为有效温度，将有关数值代入(7.14)式：

$$T_e = \left[\frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2 \sigma} \right]^{1/4} = 5783 \text{ 开}$$

当然太阳并不真是绝对黑体，所以一般取太阳表面的有效温度为5770开。从图7.7也可以看出，实际上它与6000开的黑体辐射的能量分布偏离不大。

三、太阳光谱

最早把太阳光分解的是英国著名科学家牛顿。牛顿于1666年用三棱镜得到了人类第一条太阳的光谱带。

太阳的光谱通常是指光球产生的光谱，称为夫琅和费光谱。由于太阳光异常强烈，所以很易得到大色散度的光谱带，最长的甚至可达12米。太阳光谱是由连续谱与吸收线(夫琅和费线)组成的(彩照6)。

光谱是人们了解天体的主要途径之一。通过对天体光谱的分析研究，人们才能了解天体的许多奥秘，知道它们的各种物理参数、化学成分。光谱分析的理论基础是著名的基尔霍夫定律。十九世纪中叶，德国物理学家基尔霍夫在本生(R. W. Bunsen)实验

的基础上总结出三条定律:

(1) 一切白炽固体、液体或气体,在高压状态下所发出的光,其光谱为连续光谱,即是一条由红而紫的绚丽光带(图 7.10 a)。

(2) 处于低压下之炽热气体所形成的光谱为明线谱或发射线谱。它由黑色背景上的一些明线——发射线组成,而每一种物质(元素)都有自己特定的谱线(波长固定)(图 7.10 b)。

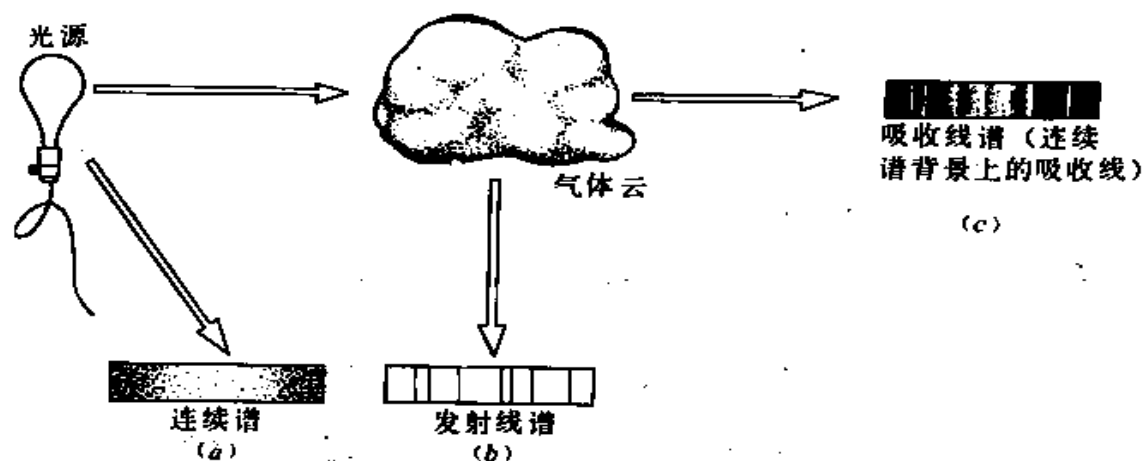


图 7.10 不同状态下产生的三种光谱
(a) 连续光谱; (b) 发射线谱; (c) 吸收线谱

(3) 当光来自高压中之炽热固体、液体或气体,且又通过一温度较低的低压气体时,则产生吸收光谱。它是由在连续光谱(热源产生的)上叠加若干条暗线(低压、低温气体产生)组成的,这些暗线称为吸收线。各种元素都有固有的吸收线,其波长与上述状态下产生的发射线相同。

正因为每一种元素都有自己特定的吸收线或发射线,所以人们可以从天体光谱中谱线出现的状况来确定其化学组成和其他有关的物理参数。例如,1868年人们从日全食观测的日珥光谱中发现了一条橙黄色的谱线,其波长为587.562纳米,从而发现了氦元素,从地球上分离出氦则是此后几十年的事情。

太阳的夫琅和费光谱中谱线极多,1814年夫琅和费观测到576条吸收线,并对其中一些较强的吸收线给予了特定的符号(表

7.4), 其中有些符号还沿用至今。1868 年发表的太阳光谱图中, 谱线已有1200条; 1897年谱线增至20027条(从297.5纳米到733.1 纳米); 1928 年英国穆尔进行了细致的校正工作, 并把波长扩大到红外的 1021.80 纳米, 共得到谱线 21835 条。现在证认出的谱线则已有 26000 多条, 波长亦扩大到从紫外的 279 纳米到红外的 1349.5 纳米, 每条谱线的精确波长有专门的表可查。

表 7.4 太阳光谱中若干较强的谱线

谱线波长 (纳米)	符号	产生 原子	谱线波长 (纳米)	符号	产生 原子	谱线波长 (纳米)	符号	产生 原子
279.54		Mg II *	404.5825		Fe I	588.9973	D ₂	Na I
280.23		Mg II	410.1748	h, H _δ	H I	589.5940	D ₁	Na I
285.16		Mg I	422.6740	g	Ca I	656.2808	C ₂ H ₂	HI
288.11		Si I	434.0475	f, H _γ	H I	686.70	B	O ₂
3581.209	N	Fe I	438.3557	d	Fe I	718.30	a	H ₂ O
373.4874	M	Fe I	486.1342	F, H _β	H I	759.30	A	O ₂
382.0436	L	Fe I	516.7327	b ₄	Mg I	849.8062		Ca II
393.3682	K	Ca II	517.2698	b ₂	Mg I	854.2144		Ca II
396.8492	H	Ca II	518.3619	b ₁	Mg I	866.2170		Ca II

* 天文上以元素符号后的罗马数字表示原子的电离情况: I——中性, II——一次电离, III——二次电离, ……其余类推。

从太阳的夫琅和费光谱中, 已证认出存在的元素有 69 种(表 7.5), 肯定不存在的元素共10种, 还有些元素则尚需进一步研究。这些元素的含量相差甚为悬殊, 按质量而言, 主要是氢(78.4%)及氦(19.8%); 其他元素的含量很低。含量较多的十种元素依次是氧(0.8%)、碳(0.3%)、氮(0.2%)、氟(0.2%)、镍(0.2%)、硅(0.06%)、硫(0.04%)、铁(0.04%)、镁(0.015%)、钙(0.009%)。

由于太阳光穿过地球大气, 所以地面上所得到的夫琅和费光谱中实际上还有一些“大气谱线”。主要是地球大气中的氧、水汽等吸收而成的, 分布在红端及红外区(表7.4)。要鉴别这些大气谱线并不困难: 可以比较不同地平高度时的太阳光谱, 谱线强度随地平高度增大而减小的即为大气谱线; 或者可以比较太阳东西边

缘的光谱，无多普勒位移的即为大气谱线。

表 7.5 太阳(光球)中的元素(按原子序数排列)

肯定存在的元素(69种)	肯定不存在的元素(10种)
氢(H) 氦(He) 锂(Li) 铍(Be) 硼(B) 碳(C) 氮(N) 氧(O)	硒(Se) 溴(Br)
氟(F) 氖(Ne) 钠(Na) 镁(Mg) 铝(Al) 硅(Si) 磷(P) 硫(S)	氙(Xe) 铊(Tl)
氯(Cl) 氩(Ar) 钾(K) 钙(Ca) 钪(Sc) 钛(Ti) 钒(V) 铬(Cr)	碲(Te) 碘(I)
锰(Mn) 铁(Fe) 钴(Co) 镍(Ni) 铜(Cu) 锌(Zn) 镓(Ga) 锗(Ge)	氡(Rn) 铋(Bi)
铷(Rb) 锶(Sr) 钇(Y) 锆(Zr) 铈(Ce) 钽(Ta) 铀(U) 钍(Th)	镱(Yb) 镱(Lu)
银(Ag) 镉(Cd) 铟(In) 锡(Sn) 锑(Sb) 铋(Bi) 钨(W) 铼(Re)	
铂(Pt) 铈(Ce) 钕(Nd) 钐(Sm) 铕(Eu) 钆(Gd) 铈(Er) 铈(Er)	
铈(Tm) 铈(Yb) 铈(Lu) 铈(W) 铈(Os) 铈(Ir) 金(Au) 汞(Hg)	
铈(Tl) 铈(Pb) 铈(Bi) 铈(Th) 铈(U)	

四、光球现象

光球十分明亮夺目,但实际上日面各部分的亮度并不均匀。在光球上有许多现象,宁静日面上有米粒组织及超米粒,而活动现象则有黑子、光斑、白光耀斑等。

1. 米粒组织 在大气比较宁静的时候,即使用小望远镜也可以观测到整个光球表面上的一种米粒状的图像(图7.11)。所谓“米粒”是形象的说法,实际上是光球中气体对流引起的一种日面现象。米粒的角直径大约0.5—2.5",最大的也可达到5"(太阳上1"大约相当于725千米),整个太阳表面上的米粒大约有四百万颗。

米粒组织的本质是对流着的气体。因为光球的底层实际上即是对流层的顶部,对流层中有剧烈的物质对流,高温的气体向上升腾,同时将多余的热量通过辐射的形式由光球散布出去,这样随着温度的降低,它又散开并沿米粒的边缘向下流回对流层(图7.12)。因此不难理解,米粒比周围背景亮10—30%。当然,米粒

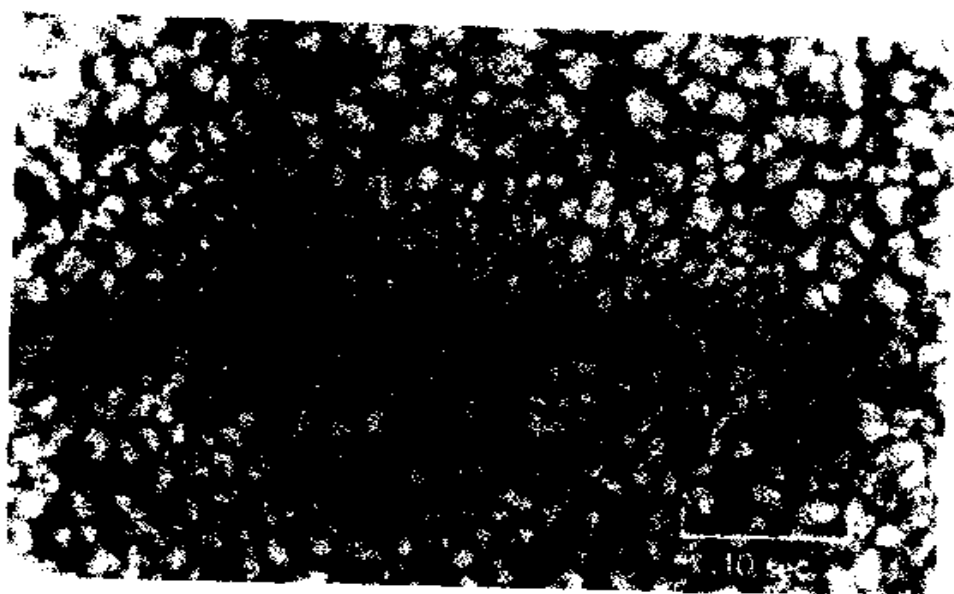


图 7.11 太阳表面上的米粒组织(白光照片)

的亮度与它的高度有关，而且各个米粒的亮度也不严格相同。米粒内的温度也比周围高大约100—300开。

既然米粒是剧烈运动着的气体元，所以其寿命并不长。用统计方法测出的米粒平均寿命约为8分钟，但个别的时间可维持15分钟以上。利用多普勒位移测得米粒中心的上升速度约为0.4千米/秒，并且还有大约0.25千米/秒的水平外流速度。

2. 超米粒 1954年，有人在测量太阳自转时发现光球上层有一种大尺度的水平方向运动，从而认为在太阳上还有一种“超米粒”存在。1960年莱顿的研究证实了这个结论。七十年代，通过太阳磁像仪及空间探测的手段，对超米粒的研究也达到了更加深入的阶段。在宁静太阳上，超米粒的数目大约保持在2500左右，其直径在20000到60000千米之间，而观测表明，其平均直径为30000—35000千米。超米粒的寿命也较长，一般为20—40小时，平均为24小时左右，比米粒的寿命长180倍。超米粒的运动图像如图7.12b，它中心区域的气体平均以0.04千米/秒的速度缓慢上升，然后其中一部分物质开始由中心区域向四周边缘流去，到了边缘才以比中心上浮速度大一倍的速度(约0.09千米/秒)向深处下沉。

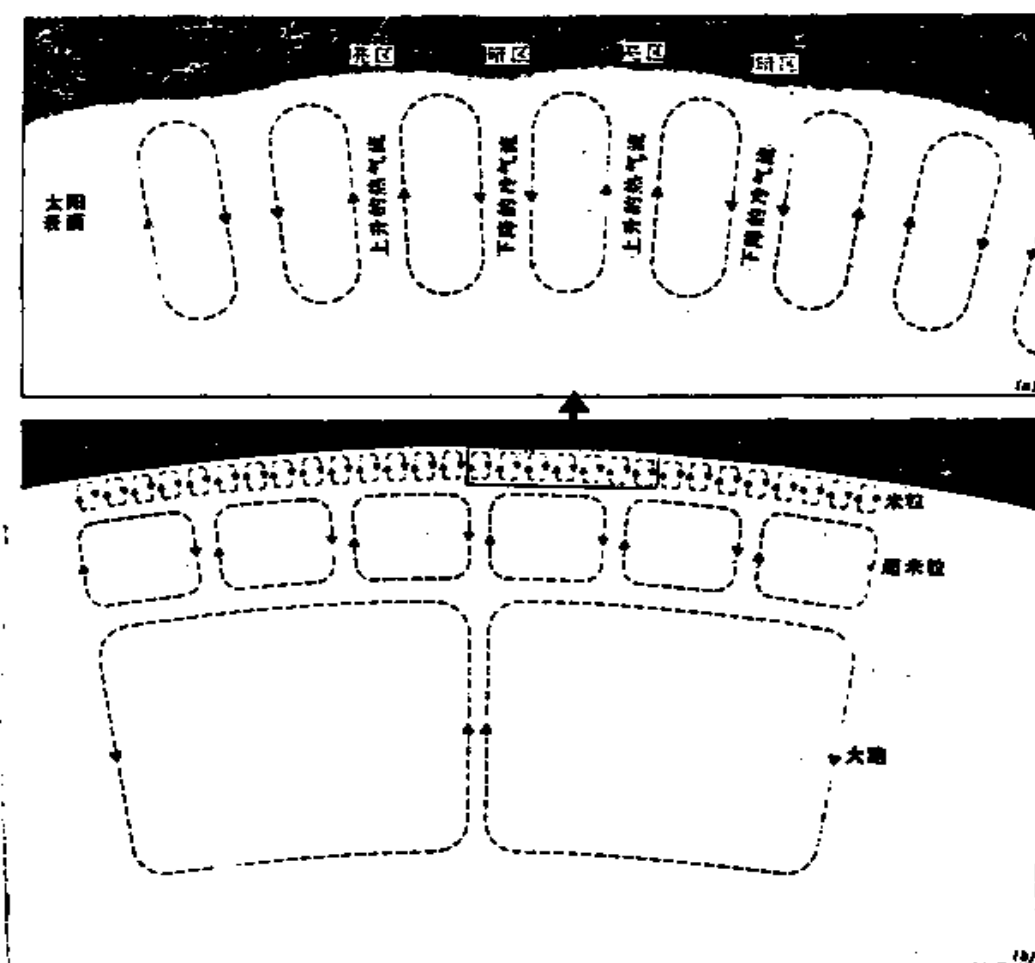


图7.12 米粒和超米粒

不能认为超米粒与米粒的区别仅在于形成它们的对流元大小不同而已。实际上，它们之间还有本质的差异。形成米粒的有效深度是400千米左右，位于光球层内，而超米粒却产生在对流层中，它们常位于光球之下7000—10000千米的深处；而且，米粒反映出来的是亮度上的差别、温度分布的不均匀，而超米粒却是光球速度场不均匀性的表征；米粒基本上没有磁场结构，至少小到目前仪器还无法测出，但超米粒的边缘却有比太阳普通磁场强百倍的磁场，强度可达 10^{-2} 特，因而不能把它看作是单纯的光球现象。

对于超米粒的成因，现有两种看法：一种观点认为是由于对流层内有一He II 和He III 区，它们造成了对流不稳定性，从而出现了这种超米粒；另一种理论则倾向于认为这是对流层内磁场和对流运动互相作用的产物。

§ 7.4 色 球

色球是太阳大气中层，但平时却不易观测。过去只是在日全食的短暂时刻，人们才发现日轮边缘上还有一层玫瑰红的绚丽色彩——色球层的名字也是由此而来的。1892年海耳(G. E. Hale)发明了用单色光观测太阳的方法，1933年李奥创制出专门观测色球的色球望远镜，使得色球的研究很快发展起来。

一、闪光光谱

在日全食的食既及生光的瞬间，月球视面刚好把整个太阳视圆面遮盖住，薄薄的色球层便呈现为一段狭窄的圆弧状，这相当于一个天然的狭缝，人们抓住这几秒钟内的大好时机便可直接拍到色球层的光谱(彩照7)。

闪光光谱是发射光谱，只有发射线而没有吸收线。第一条闪光光谱是在1870年得到的。过去人们认为闪光光谱仅仅是把光球的夫琅和费光谱的吸收线变为发射线而已，好象照相的正片、负片一样，本质上并无什么区别，所以过去把色球层又称之为“反变层”。但三十年代后，一系列事实使人们改变了看法，闪光光谱和夫琅和费光谱有许多差别：闪光光谱中有许多很强的氢线和氦线，其中656.28纳米的H_α线占绝对优势，这也是色球呈鲜艳红色的原因所在。而光球中氢线却很少，也不强，氦线在可见光区则根本不出现；而且闪光光谱中还有光球中没有的一些稀土元素的谱线。

两者差别的原因在于色球与光球的物理条件不一样。一方面，色球层内的物质密度和压力比光球低得多，另一方面，色球层的温度却又随高度而变，在色球底部接近光球处大约为4560开左右，而在中层处的温度却达8000开，高层则达10⁵开。

从光谱分析中还可以确定，色球层的化学组成与光球基本上相同。这是由于太阳大气内的物质经常在流动，使得各部分物质经常在互相混和的缘故。

我国的日全食观测起步较迟，但是在1980年2月16日昆明日全食时，第一次成功地拍得了闪光光谱。根据分析和处理，在479.9—584.5纳米的波段内已证认出了1042条色球谱线以及钠D₁ (589.6纳米)线、D₂ (589.0纳米)线、氢的D₃ (587.6纳米)线。此外还有三条日冕谱线，即530.3纳米的十三次电离铁线、544.6、569.4纳米的十四次电离的钙线。在所证认的谱线中，还有72条谱线是国外几次主要观测中均未见发表过的，从而可以认为这是我国的太阳外层大气光谱研究的里程碑。1983年，中国科学院又组织了一支观测队伍，专程赴南半球的巴布亚新几内亚观测于6月11日发生的日全食，得到了质量更高的色球有缝光谱，更为研究提供了珍贵的资料。

二、色球层的结构

色球层是一个充满磁场的等离子体层,其厚度大约为 2000 千米左右。用单色光观测色球层,发现它的边缘不象光球那样很有规则,而是呈现出很不匀滑的锯齿形状,因此色球层的结构明显地具有不规则性。

如果从平均温度随高度分布来进行研究(图7.13),则又常可把色球分为低层、中层、

高层,厚度大致分别为 400、1200、400 千米。有趣的是光球的温度是正常分布的,即随高度增大而降低,但色球层却与此相反,随着高度的增加,温度也逐步上升,

而且温度梯度也逐步增

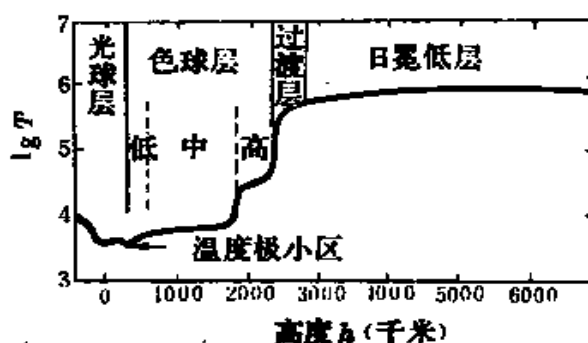


图 7.13 太阳大气内温度随高度的分布曲线

加。在低色球层,温度从光球顶部的4560开先稍降一些后又上升到5200开,与光球中部相仿;中色球层温度从5200开升至约8000开;而高色球层则急剧上升到10万开以上(表7.6)增加一个数量级。

当然这是按照温度分布曲线来分层的,但实际上色球内并没有明显的边界,而且其物质分布本身又很不均匀。

研究色球经常采用单色光观测。在一般白光观测时,所得到的太阳像是光球,而用单色光观测时,则可将光球其他波长的辐射滤去。例如,通常使用氢的 H_α (656.3纳米)和电离钙的K线(393.4纳米),如果把狭缝严格放在这些线的中心位置,则光球的辐射几乎全部被挡住,而只得到色球像。而这样得到的色球像的确也与光球像迥然不同(图7.14),更有意义的是调节狭缝离谱线中心的

距离（一般以0.01纳米为单位调节）还可得到色球层不同高度处的图像——离谱线中心越远，高度越小（即越接近光球）。例如，当狭缝离线心距离为0.05纳米时，几乎已到了色球的底层，这样的色球像与光球像的区别就很小了。

色球层上有许多现象值得研究，它们是：针状物（日芒）、色球网络、谱斑、冲浪、细链、日珥、耀斑等。

表 7.6 色球层的模型

高度(千米)	$R(R_{\odot}=1)$	$T(K)$	$\lg N^*$
0	1.0000	4560	22.13
200	1.0003	4180	21.35
500	1.0007	5230	20.08
1000	1.0014	6420	18.25
1500	1.0022	8000	17.17
1800	1.0027	11000	16.82
1990	1.0028	28000	16.40
2000	1.0029	100000	16.11
2010	1.0029	190000	15.77
2100	1.0030	470000	15.32

* N 为原子的数密度，单位是个/米³。



图 7.14 太阳的(单色光)色球像

三、针状物(日芒)

从高分辨率的色球的单色光观测中,可以清晰地看到色球的边缘是由许多细小的“火舌”组成的,宛如簇簇燃烧着的草丛,实际上当然是明亮而细长的流焰(图7.15)。



图 7.15 针状物

针状物的形状常在改变之中,其平均寿命约5分钟,它的高度大约6"—14"、宽约1"多,平时所见的针状物似乎极区比赤道区的更高些,但实际上的真高度相差不大——平均宽约800多千米,长约9800千米。因此也有人认为色球层的厚度应为10000千米以上。针状物的方向不是径向,而是与垂直方向有20°的交角,一般认为这是日面磁场作用的结果。

针状物的数目随着高度的增加而减少,有人估计,在色球中层处,大约有25万个,在离日面3000千米处则减少到93000个,而到15000千米时已剩下无几,约200来个了。从观测可以得知,针状物在色球中层处形成后即以25千米/秒的速度上升,显然这个速度远远小于太阳的逃逸速度618千米/秒,因此它迟早终将落回到色球中,但是它在上升中,必然会造成一些动力学的不均匀现象,因为无论从温度还是物质密度讲,色球与日冕都有巨大的差别,看来它在色球与日冕的能量平衡、质量平衡中有重大作用。

针状物内的物质密度为 2×10^{-10} 千克/米³,有人还观测到针状物有转动的现象,估计它内部的磁场强度为 6×10^{-3} 特。

七十年代中期,美国发射的“天空实验室”从远紫外观测中发

现了超针状物。它们的宽和高都是针状物的10多倍(高约60", 宽20"—30"), 其能量大100倍, 喷射的速度达140千米/秒, 一直可以上升到35000千米的高度, 即到日冕区后才落回色球, 其存在的时间可长达40分钟, 从升降过程中的能量计算表明, 超针状物的大部分物质落回色球, 但也有部分物质成为日冕的补充来源之一。

四、色球网络

在专门以单色光观测太阳的色球望远镜中, 太阳像是一个纵横交叉、又由众多的亮斑和暗斑组成的错综复杂的网络(图7.16), 被网络链所围住的“元”大小在30000—35000千米之间。

日面的色球网络图像随观测波长不同而呈现出不同的形态, 如在 H_{α} 线心是暗元背景反衬下的亮网络, 但在 H_{α} 线翼却正相反, 是亮元反衬下的暗网络, 而且它们的变化似乎也有区别。一般讲来, 钙网络(亮网络)组织比较稳定, 而氢网络却呈现出很复杂的变化; 在高分辨率的观测中, 还能发现网络中还有比较复杂的精细结构。

色球网络可以延伸到大约9000千米的高度, 与针状物相当, 其寿命大约为19—21小时。一般还认为, 色球网络是光球网络的向上延伸, 而后者又是前者的向下的顺延, 而且色球网络的亮边界和超米粒组织的边界也大致相吻合, 因此有人认为它们可能是同一种现象的不同表现。事实上, 它们都与光球上的磁场分布密切相关, 网络中纵向磁场的强度约 10^{-3} — 10^{-2} 特。

五、冲浪

色球中还有一种物质抛射现象——冲浪(图7.17)。实质上冲浪起源于光球中的活动区域, 在日面边缘处, 冲浪表现为一个小而明亮的小丘, 顶部以尖钉形状向外急速增长, 它的底部几乎即

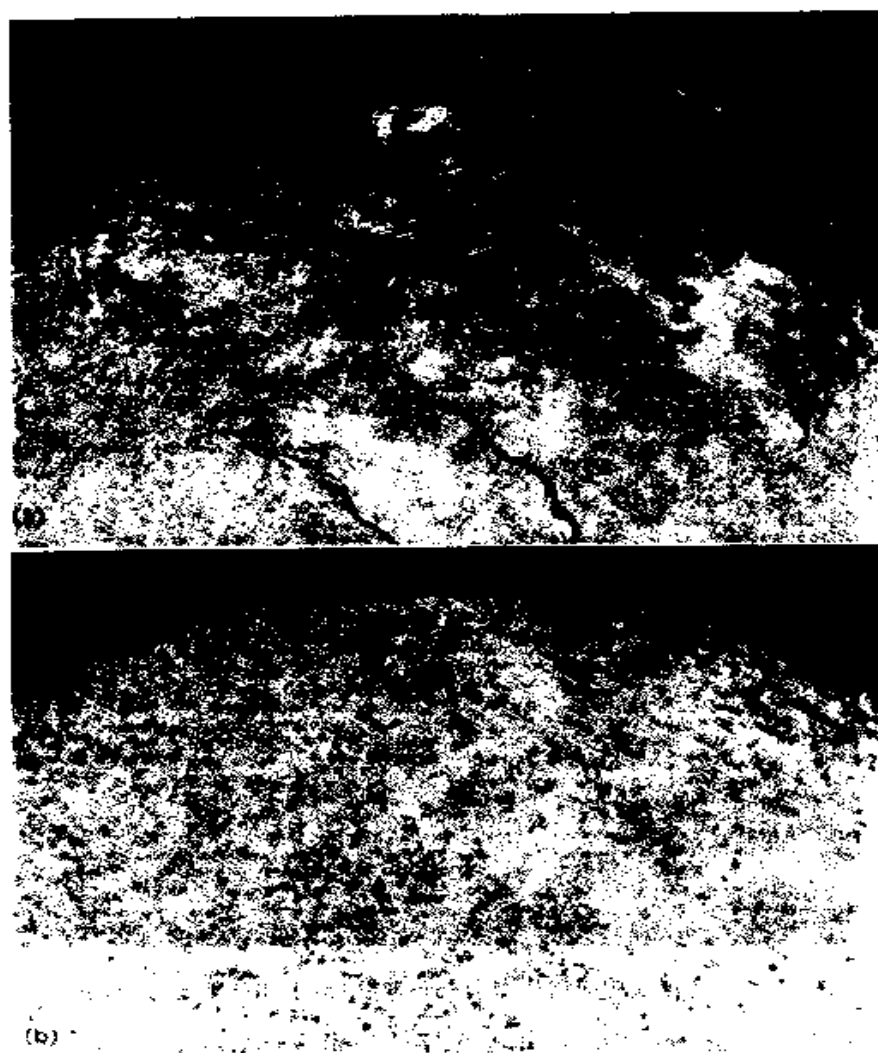


图 7.16 色球网络

(a) H_{α} 所摄: (b) 离 H_{α} 线心 0.07 纳米处摄

在黑子之中，而上升的高度则各不相同。小冲浪只有区区几百千米，大冲浪则可达 5000 千米，最大的竟可达一、二万千米，其中包含的物质质量约为 $10^{11}—10^{12}$ 千克。

高分辨率的观测资料还显示出冲浪内也有细节结构——它们由非常小的一束纤维组成，每条纤维间相距几角秒，但却是作为整体一起发亮、一起运动。冲浪的运动与针状物的匀速运动不同，



图 7.17 色球层中的物质抛射——冲浪(摄于1971年8月20日)

常常先以 1.2千米/秒^2 的加速度上升，使它达到 $100\text{—}200\text{千米/秒}$ 的速度，但到达最高点后又以加速度运动返回日面。

观测表明，冲浪有很强的重复出现的趋势，当它沿上升的轨道下落后，一般又会触发产生新的冲浪腾空而起，但规模及高度则一次比一次小，似乎受到了某种阻尼作用，一般认为它们的活动取决于太阳活动区的强磁场。

色球中还有诸如光斑、谱斑、日珥、耀斑等强活动现象，将在以后分别介绍。

§ 7.5 日 冕

在日全食的短暂瞬间里，人们常常可以见到太阳的周围除了绚丽的色球外，还有一大片异常洁白美丽的晕光，这就是太阳大气的最外层——日冕。由于日冕内的物质十分稀薄，其本身的形状又随太阳活动的强弱不同而有明显的变化(图 7.18)，所以很难确切地划定它的外边界。但一般常取为几个太阳半径。

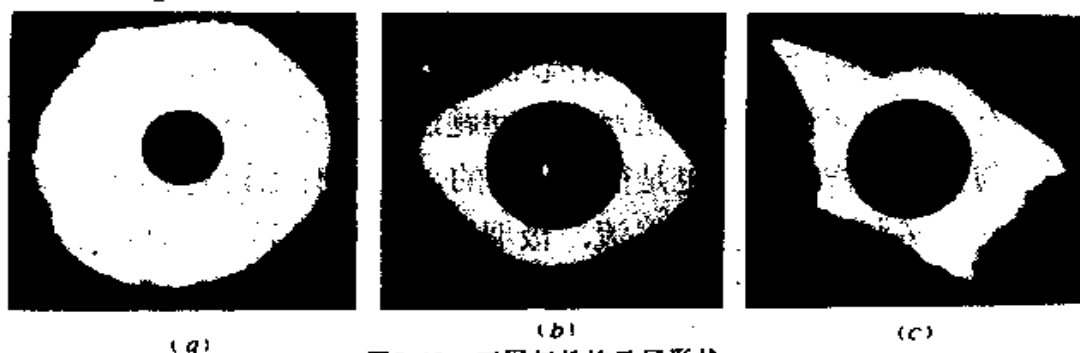


图 7.18 不同年份的日冕形状：

(a) 太阳活动极大年份； (b) 太阳活动极小年份； (c) 太阳活动一般年份

一、概况

日冕内的物质处于高度电离的状态，主要由质子、高速自由电子以及高度电离的离子所组成。在密度较大的日冕底层，其数密度也仅在 4×10^{14} 原子/米³ 左右，约相当于 2×10^{-12} 千克/米³。日冕的亮度很低，大约只有光球辐射的 10^{-6} ，在黑子极大时为 $1.3 \times 10^{-6} L_{\odot}$ ，而在太阳活动极小即黑子极少时还要小，仅 $0.8 \times 10^{-6} L_{\odot}$ ，几乎小一倍。所以在 1931 年日冕仪发明以前，人们唯有抓紧发生日全食的短短几分钟时间进行观测，获得的资料也相当有限。

日冕的辐射虽然很弱，但产生的机制却相当复杂，只是在可

见光区域的连续辐射比较简单，它是日冕物质对光球的连续辐射散射的结果，因此日冕的连续光谱的能量分布仍与普朗克分布相似。通常根据产生的机制不同而把日冕的白光大致分为K日冕、F日冕及E日冕(又称L日冕)三种成份。

日冕也可以人为地再分层，有人以离太阳中心 $1.3R_{\odot}$ 为界分为内冕和外冕两层，但也有人把 $1.3R_{\odot}$ 以外的“外冕”再分两层： $1.3-2.3R_{\odot}$ 称中冕，大于 $2.3R_{\odot}$ 处称外冕。广义地说来，外冕一直可以与黄道光相连，囊括地球轨道的范围。

日冕内的原子处于高度电离的状态，这表明它的温度在 10^6 开数量级。观测还表明，太阳大气中的温度分布总的说来是随高度增加而升高的，这种反常的增温现象长期以来困惑着天文学家，虽然有人提出了许多加温机制，但问题还远远没有解决。

与色球一样，日冕也是很不均匀的，同样有比较复杂的细节结构——冕洞、凝聚区、冕流、极羽等等，将在下面分别叙述。

二、光谱

日冕的光谱非常奇特，曾一度使人们感到茫然不解，观测表明，内冕与外冕的光谱竟然截然不同。内冕的光谱是由比较微弱的连续光谱叠加上几条发射线组成，完全没有吸收线，但外冕的光谱却几乎与夫琅和费光谱相同——连续谱上只有许多吸收线，没有任何发射线。这又一次证明了外冕的光谱是行星际尘埃对光球辐射的散射造成的。

内冕光谱为什么没有夫琅和费线呢？最好的解释便是因为日冕中百万度的高温使电子运动的速度十分可观，热运动的速度方向对于视线有各种倾斜角，这样使原来的谱线由于视向速度有很大的弥散而变得非常宽漫。例如夫琅和费光谱中最强的Ca II H和K线已宽达几百纳米，这样，通常的暗线也就不成其为吸收线了。

在可见光区域中，内冕除了有一些通常所见的发射线外，还

有20来条十分陌生的发射线(表7.7), 最突出的有三条, 波长分别为: 530.3 纳米(绿色)、637.4 纳米(红色) 及670.2 纳米(红色)。自1870年从日食中发现了这些奇特的谱线以来, 天文学家一度认为这是太阳上仅有的新元素, 还为其命名为“氦”。可是人们并没有像氦那样获得预期的成果, 几十年的努力都无法弄清“氦”的真面目, 因而它困惑了人们整整七十年。直到1941年, 这个“谜”才为瑞典的光谱学家埃德伦 (B. Edlen) 揭开。原来, 它们并不是什么新元素的谱线, 而是极普通的元素在日冕的特定条件下产生的“禁戒谱线”——禁线 (见 § 10.3)。例如, 最美丽、醒目的530.3 纳米绿线原来是十三次电离的铁离子 Fe XIV 产生的谱线; 而670.2 纳米与637.4 纳米这两条红线, 又分别是 Ni XV 和 Fe X 的产物。而这些禁线的出现也是说明日冕内的温度在一、二百万度左右的证据之一。

表 7.7 波长300—800纳米内较主要的日冕禁线

禁线波长 (纳米)	产生的离子	禁线波长 (纳米)	产生的离子
398.7	Fe XI	670.2 (红线)	Ni XV
637.4 (红线)	Fe X	706.0	Fe XV
789.2	Fe XI	332.9	Ca XII
338.8	Fe XIII	360.1	Ni XVI
364.3	Ni XIII	408.6	Ca XIII
423.2	Ni XII	441.2	Ar XIV
511.6	Ni XIII	544.6	Ca XV
530.3 (绿线)	Fe XIV	589.4 (黄线)	Ca XV

在实验室条件下, 禁线是不易出现的, 但日冕的奇特物理状态——极低的物质密度、极高的运动温度加上辐射场的能量密度特别小——对于禁线的产生提供了很有利的条件 (见 § 10.3), 加上日冕物质对于这些禁线几乎完全透明, 从而得以产生有一定强度的日冕禁线, 因而使它们成为内冕光谱的重要标志。

空间探测又使人们获得了高分辨率的紫外、远紫外和 X 射线

区域的日冕光谱，在这些频谱内有许多密集的发射线：如 217 纳米(Fe XII)、215 纳米(Si IX)，140 纳米(O IV)、124.2 纳米(Fe XII) 等等，这对论证日冕禁线、确定元素丰度都是很有帮助的。

三、冕洞

日冕并不是均匀的，早在1950年瓦尔德迈尔就认为日冕上有一些辐射和亮度都比周围小得多的区域——冕洞(图7.19)。六十年代之后，人们利用各种探测手段先后在X射线、远紫外线及射电波段都观测到了冕洞，从而使冕洞的存在得到了一致的公认。

冕洞大致可分为极区冕洞、孤立冕洞和延伸冕洞三种。根据美国“天空实验室”的观测，日面上冕洞的总面积约占日面的 $1/5$



图 7.19 用X射线拍得的冕洞照片

左右，而其中 $3/4$ 是面积很大的极区冕洞。有趣的是，一个极的冕洞变大时，另一个极的冕洞就变小，从而使两极的冕洞面积之和基本保持不变。

冕洞的寿命是比较长的，平均可以达到五到六个太阳自转周期，也有一些冕洞的寿命甚至可达一年。这种长寿命的冕洞过去曾称之为“M区”。因此，日冕的变化比较缓慢，有时在一个太阳自转周期内，面积几乎看不出什么变化，观测表明，它的增长或衰减速率为 $(1.5 \pm 0.4) \times 10^4$ 千米²/秒。

冕洞对于太阳表面的相对运动很小，赤道上的冕洞几乎与太阳一起在作刚性自转，而在纬度 40° 处的冕洞转动速率只比同纬度上的黑子快 7 %。

把冕洞边界与太阳大尺度磁场相比，冕洞多出现在大的单极磁区中。按单极磁区的极性，冕洞也就可分为正极型和负极型两种，但是决定冕洞存在的并不是磁场强度，因为观测表明，冕洞内外的磁场强度并无明显的改变，如极区冕洞的磁场总是为 1×10^{-4} 特左右，由此可知，冕洞实际上取决于太阳大尺度磁场势的几何形状。

冕洞的平均密度只有其周围的 $1/3$ 左右，而在冕洞中心区则更小，大约只有周围日冕的 $1/10$ 。

冕洞的发现是太阳研究中的重大成果，但是其形成的机制、冕洞的变化与太阳活动周期有什么关系，冕洞的边界如何演变等这一系列问题，还有待于进一步研究。

四、日冕凝聚区

与冕洞相反，日冕中还有一些电子密度比周围大的区域——日冕凝聚区。实际上，它只是太阳局部活动区在日冕中的延伸。

因观测使用的波段不同，凝聚区又有光学的和射电的之分，光学的日冕凝聚区大致成环状或亮节，内部还有精细结构，其高度

约为 $(0.5-1) \times 10^5$ 千米,厚约5000千米,其中的电子密度比周围日冕区大2—10倍,而温度也高得多,可达 4×10^6 开。

射电日冕凝聚区的大小及寿命都与观测使用的波长有关,总的说来随着波长的增加,其面积和寿命也增大,测得其温度为 $(0.6-3.8) \times 10^6$ 开,它同样也有精细结构。

实质上后来发现,光学日冕凝聚区和射电日冕凝聚区的空间位置有很好的相关性,因此现在认为,两者可能是同一个整体,所表现出来的某些局部差异是由于精细结构不同造成的。

日冕凝聚区还有较强的X射线辐射,比周围日冕区的X射线辐射强70倍,这也进一步证明了凝聚区内的电子密度确实比较高。

五、冕流与极羽

冕流也称为射流,它和极羽是日冕中比背景明亮的延伸结构。冕流的长度和宽度都随太阳活动而变化,大约在一、二个 $R_{\odot}$ 间,黑子多时较短,黑子少时则长,而宽度大约是长度的 $\frac{1}{10} - \frac{1}{20}$ 。

一般认为,冕流乃是日冕的非均匀磁场造成的。它向外膨胀、扩散的速度在1—10千米/秒之间。

极羽又是另一种比日冕背景明亮的延伸结构(图7.20a),但与冕流的区别是它的形状似片片羽毛,且也仅限于在太阳的两极地区出现。而极羽的名字也正体现了这两个特点。极羽在太

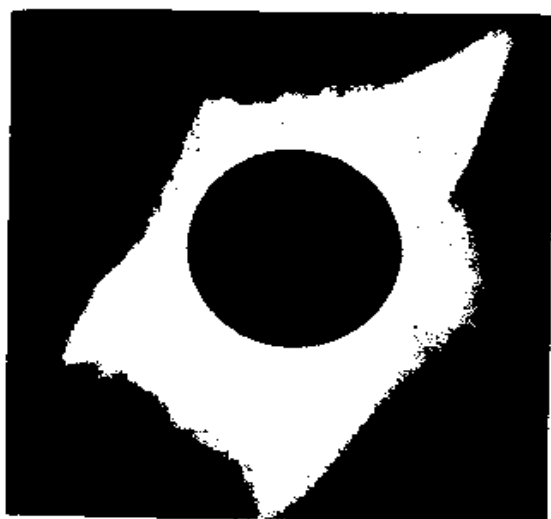
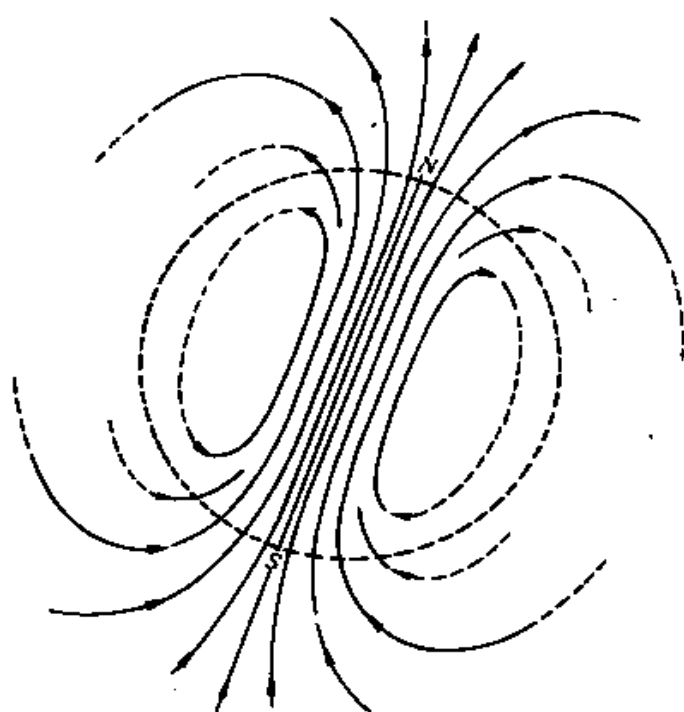


图7.20 极羽与磁场密切相关

(a) 极羽情形



(b) 磁场分布

图 7.20 极羽与磁场密切相关

阳活动极小时期更加明显。从观测发现，极羽与太阳的表面磁场有很强的相关性，因此可以通过观测极羽来画出太阳表面的偶极场来(图7.20b)。

七十年代的空间探测还发现了一些日冕的瞬时现象——突如其来的一些物质抛射，这就改变了人们以往认为日冕结构比较

稳定的看法。因为这种物质抛射不仅涉及到很大的质量和能量，而且发生也较频繁。据估计，每次抛射的物质为 10^{13} — 10^{14} 千克，抛射速度可达500千米/秒，即能量在 10^{24} 焦耳左右，持续时间长的可达一到二小时，短的也有十几分钟，这种抛射也会使日冕的结构产生局部的变化。

六、太阳风

六十年代研究太阳的另一个重大成果就是证实了太阳风的存在。

太阳风是一种形象的说法，实际上它是从太阳外层大气即日冕中不断发射出的一种比较稳定的粒子流，其中的粒子主要是质子和电子，其次是氦原子核，因此也是一种带电的粒子流。冕洞发现后，人们又证实了冕洞是真正的“风源”。原来，日冕中粒子

所受的引力小于内外的压力差,无法保持力学平衡,因而从冕洞中向外逸散。

经过长期测定,在地球轨道附近太阳风的流速为450千米/秒左右,质子和电子的数密度为 8×10^6 个/米³,电子运动温度在 $(1-1.5) \times 10^5$ 开,磁场强度为 5×10^{-9} 特。当然,有关太阳风的各种参数,因太阳活动的强弱而有变化,如在太阳活动极小的年份中,太阳风在地球附近的流速可减小至320千米/秒。

太阳风在经过地球轨道后仍然继续向外“吹”去,一直可达到太阳系之外与星风相混和。因此,太阳风能和各行星的磁层发生比较复杂的作用,导致许多等离子体及磁扰现象。

如前所述,太阳风也是造成彗尾背向太阳的主要原因。有人算得离太阳距离 r 处的太阳风的动力压力为: $2 \times 10^{-9} \cdot r^{-2}$ 牛/米²。显然,随着彗星接近太阳, r 减小时,其压力以平方律增大。

太阳风造成的太阳质量减小是微不足道的,一般估计为 $2 \times 10^{-14} M_{\odot}$ /年,因此,通常可不予考虑。

空间探测的资料表明,太阳风中的粒子成分与太阳大气有明显的差别,其中氦的比例尤为明显。太阳风中氦的相对丰度虽因太阳活动而有很大的起伏(可达一个数量级),但长期平均值为氢的4.5%,比太阳大气中的相对丰度明显低得多。这表明,不同荷质比(粒子的电荷与质量之比)的离子在日冕中已经初步被分离开了。

§ 7.6 黑 子

黑子是太阳光球上的暗黑斑点,是最先观测到的日面现象之一,也是太阳活动的最基本标志。黑子大多呈现为椭圆的形状



图 7.21 1982年6月18日出现的大黑子
(南京大学天文系摄)

(图7.21), 在明亮的光球背景下它显得比较暗黑, 但实际上它们都是高温的磁流气团, 其温度也在四千开以上, 倘若能把黑子单独取出, 一个大黑子也可发出相当于满月的光。

一、黑子的结构和形态

太阳光球上的黑子大小不一, 大的可达200000千米以上, 地球上可见的最小黑子约1000千米。统计表明, 黑子的寿命与其大小有关, 黑子越大, 寿命越长; 个别寿命短的小黑子, 几小时后即会消失, 但一般的都有几天、十几天, 大黑子则可长达几个太阳自转周期。

黑子, 尤其是较大的黑子都由本影和半影组成(图7.22)。本影是黑子的核心, 明显可见它向太阳表面凹陷下去, 有人算得当取光球有效温度为6050开时, 本影中的温度为4240开; 半影是黑子边缘稍亮的部分, 有效温度为5680开。



图 7.22 黑子的本影和半影 (南京大学天文系摄)

发展比较完全的黑子，本影的直径约为半影的40%，与光球相比，它们的亮度分别是光球的25%和75%。近年来对黑子进行的高分辨率观测表明，暗黑的本影内并不均匀，还有许多活动现象，例如存在本影点、本影闪耀、亮桥等。本影点是一种明亮的光点，其亮度与光球相仿，直径约200千米，寿命约25—60分钟；本影闪耀则是用单色光观测时发现的一种活动现象，它表现为一种迅速向外移动的小亮“结”，其寿命不过50秒左右，直径有2000千米，以平均40千米/秒的速度向半影移动。亮桥则是在黑子发展到后期才出现的跨越本影的奇特现象，它由多段亮节组成，亮桥

的形状、大小、亮度也各不相同，寿命是几小时到几天，亮的亮桥其亮度可与光球相当，亮桥出现过后，该黑子随即发生分裂或瓦解。

半影可以看作是本影与光球间的过渡区域，但它也常有复杂的精细结构：有许多大致径向排列的比半影更亮的纤维状结构，纤维的宽度平均为300千米，寿命平均为一小时。而那些结构复杂的黑子半影中还有一些形状不同的旋涡状结构，其亮度与光球相仿。

二、黑子在日面上的分布

太阳黑子的分布有明显的规律，这主要表现为纬度不均匀性及东西不对称性。

1. 纬度分布的不均匀性 早在十九世纪，英国天文爱好者卡林顿 (R. C. Carrington) 已经发现，几乎所有的黑子都分布在 $\pm 8^\circ$ — $\pm 45^\circ$ 的纬度范围之内。1894年斯玻勒 (G. Spörer) 进一步研究表明，绝大多数的黑子都出现在 $\pm 30^\circ$ 附近，在黑子极大的年份，黑子大多出现于纬度 $\pm 15^\circ$ 处。随着黑子的发展，它们的纬度逐步减小，但到 $\pm 8^\circ$ 处，绝大多数黑子即告消失，这也称之为斯玻勒定律。如果以日面纬度为纵坐标，时间为横坐标来描绘黑子的日面分布，则形如蝴蝶，故称“蝴蝶图”(图7.23)。

统计表明，黑子在太阳南北两半球的数目一般并不相同，往往是南半球更多一些，但是北半球的黑子常常发展得更早些。

2. 东西不对称性 1907年英国天文学家蒙德发现黑子在日面东西边缘的数目也不一样——日面东半边的黑子总比西半边更多，在东边形成的黑子比西边多，同时从日面东边缘转出来的黑子也比在西边缘消失的多。

一般认为，东西不对称性仅是一种视觉或光学现象，因为太阳自转时东半边是向着观测者，使黑子越看越清楚，而西边缘是

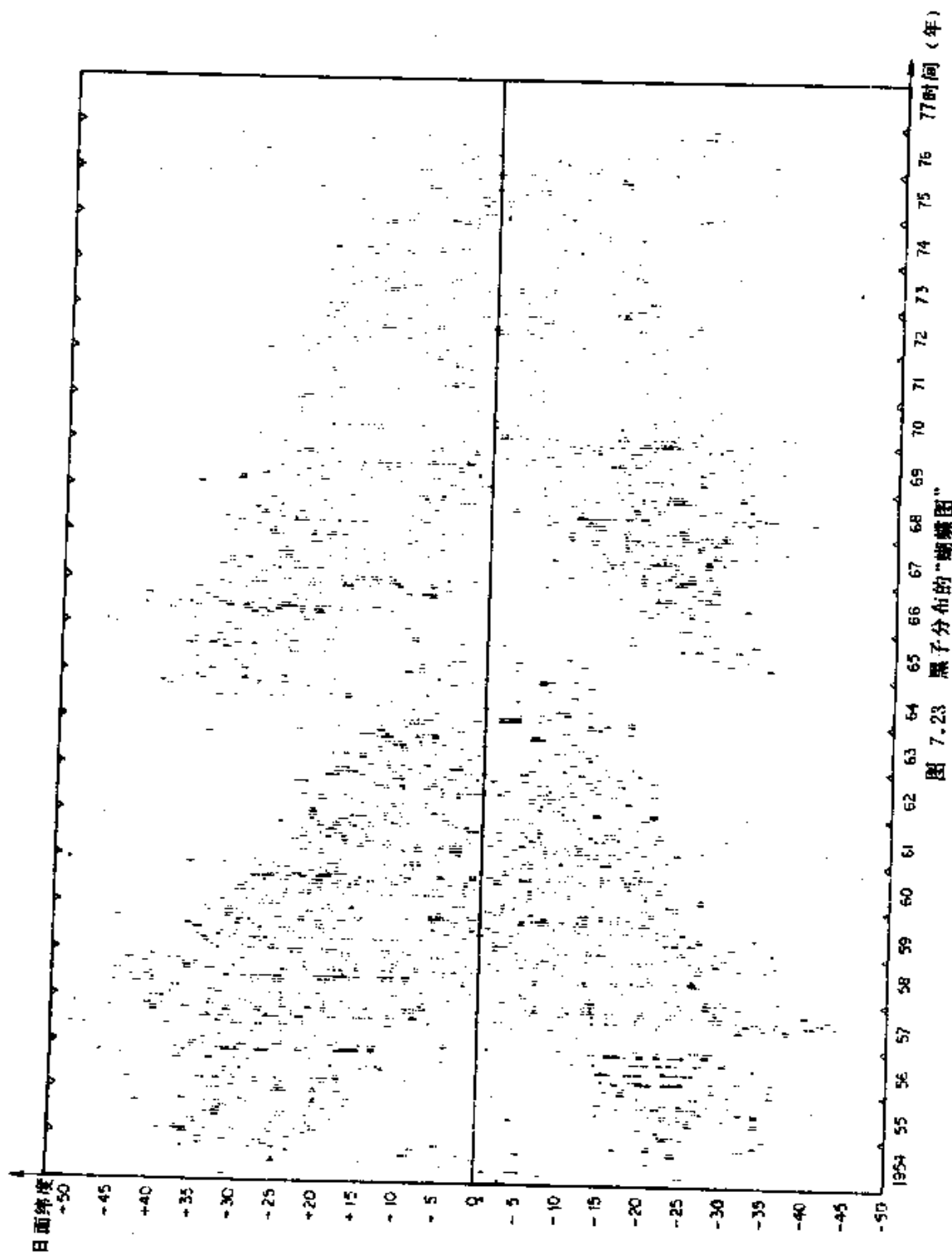


图 7.23 黑子分布的“蝴蝶图”

离开观测者，因此小黑子就不易被发现；其次的原因是黑子的长轴和太阳半径并不垂直，有一个向西的倾角(表7.8)，这样同一个黑子投影在东半边较大易见，而投影在西半边便显得小而不易看到(图7.24)；第三个原因可能是黑子成群时本身具有一定的不对称性。

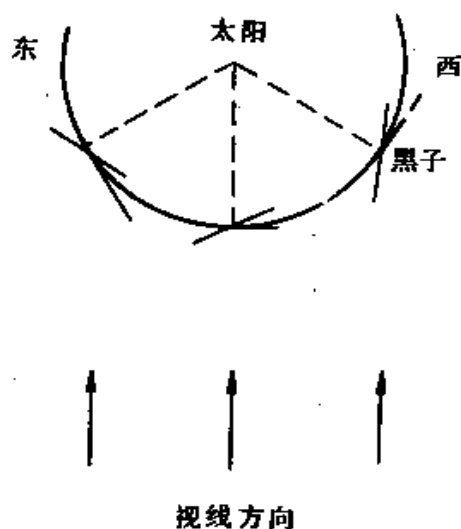


图 7.24 黑子长轴的倾角是东西不对称的原因之一

表 7.8 黑子长轴与太阳半径的夹角

日 面 纬 度 (度)	5—9	10—14	15—19	20—24	25—29	30—34
黑子轴与太阳半径的夹角(度)	3.6	5.4	7.2	9.9	14.4	19.0

三、黑子群及其分类

多数黑子是以成群的方式出现的，许多单个黑子也会发展为一群，一个黑子群包括的黑子少则几个、十几个，多则几十甚至一百以上。但一般说来，每个黑子群中有两个是主要黑子，群西部的(右边)称为前导黑子，东部的称后随黑子，两者的磁极通常相反。耐人寻味的是在同一太阳活动周内，无论前导黑子还是后随黑子，在同一半球上的极性始终不变，但南北半球却又正好相反。如第19活动周(1954—1964年)中，北半球的前导黑子为磁北极，后随黑子为磁南极；而在南半球上，前导黑子的磁极却为南极。然而在第20活动周(1965—1975年)中，北半球上的前导黑子却是磁南极，南半球的前导黑子为磁北极。因此有人认为，太阳活动的真正周期不是11年而是22年。

为了研究黑子的发展和变化，黑子也有不同的分类方法。

1. 苏黎世分类法 这是一种比较普通的分类法,按照黑子发展过程分为九类(图7.25)用大写拉丁字母表示,

A——无半影的黑子或单极小黑子群;

B——无半影的双极黑子群,长轴方向和日面东西线大致平行;

C——类似B的双极群。但其中至少有一黑子有半影;

D——双极群。两主要黑子都有半影,但其中有一个黑子的结构比较简单,东西方向延伸不大于 10° ;

E——大的双极群。两主要黑子都有半影,且结构比较复杂,群间有若干小黑子,东西方向延伸大于 10° ;

F——黑子发展的顶峰,成为范围很大、结构很复杂的黑子群,东西方向常在 15° 以上;

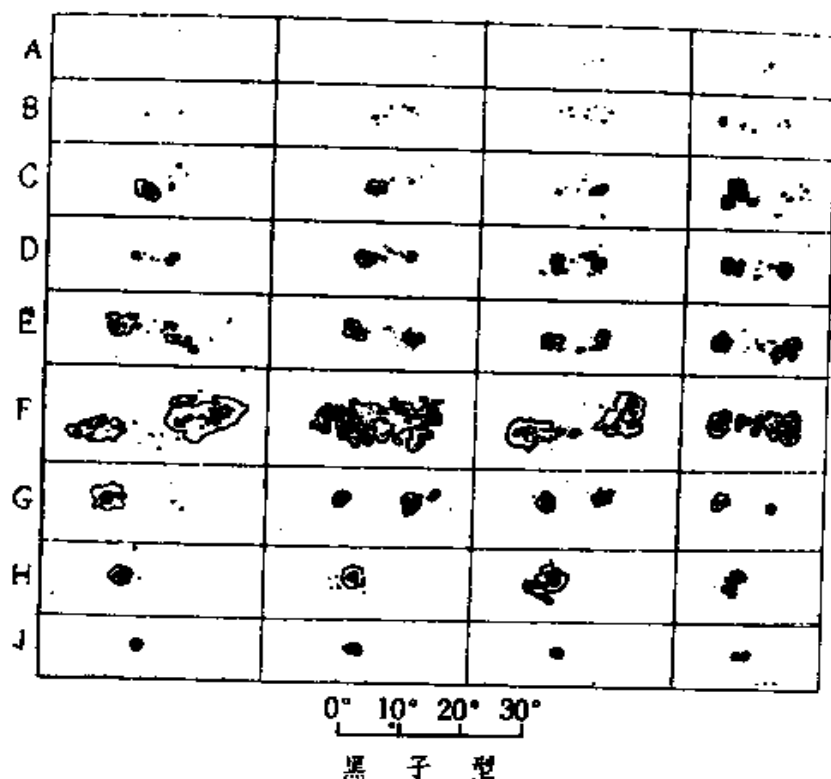


图 7.25 苏黎世黑子分类图

G——大的双极群，也在 10° 以上，但常只有几个大黑子而没有或很少小黑子；

H——有半影的单极群，直径大于 2.5° ，有时也有较复杂的结构；

J——有半影的单极群，直径小于 2.5° 。

2. 磁分类法 用两个字母表示，第一个字母着眼于黑子的磁极，分为单极(α 或A)、双极(β 或B)、复杂极性(γ 或r)；第二个字母以此极性是对应于前导黑子(P)或后随黑子(F)，其特征可见表7.9。

表 7.9 黑子的磁分类法

分 类 号	主 要 特 征
AP或 αp	单极群，极性为本活动周所在半球前导黑子的极性。
AF或 αf	单极群，极性为本活动周所在半球后随黑子的极性。
BP或 βp	双极群，前导黑子的极性占优势。
BF或 βf	双极群，后随黑子的极性占优势。
B或 β	双极群，前导黑子和后随黑子的极性几乎相等。
B τ 或 $\beta \gamma$	具有一般B型特征的双极群，但其中至少有一个小黑子的极性颠倒。
r或 γ	极性混杂的复杂群。
D*或 δ	同一半影内有彼此相距 2° 以内的异极性的黑子群。

* D型是在六十年代初补充进去的。

四、黑子相对数

太阳活动强弱最明显的标志就是黑子的多寡和大小，因此黑子计数是一项长期的观测项目。我国早在纪元前便有许多目视的观测记录，无疑这是十分珍贵的资料，然而只有在1610年望远镜用于天文观测后才有可能逐步积累完整的太阳黑子资料。1849年，瑞士苏黎世天文台的罗·沃尔夫(R. Wolf)提出了一种统计方法，因而也称沃尔夫黑子数，或沃尔夫相对数。这种记录的黑子数实质上是某种加权平均，故称黑子相对数，其定义是：

$$R = k(10g + f) \quad (7.15)$$

式中 g 是日面上黑子群的群数, f 为单个黑子数, k 是一个与观测仪器、方法, 观测时的天气、观测者的经验等多种因素有关的换算因子。沃尔夫把自己的因子定为 $k=1$, 其他观测者的 k 值则需要通过长期与苏黎世天文台的观测资料相比较而得, 即有

$$k = \frac{R_s}{10g + f} \quad (7.16)$$

式中 R_s 即为同时期的苏黎世天文台的黑子相对数。

显然黑子相对数受到投影效应的影响, 在日面边缘地区, 一些小黑子常不易见到。同时, 这也仅表示可见半球上的黑子数, 而不是“全球黑子数”, 而全球黑子数则要通过某种理论来估算。

不难想象, 太阳活动的强弱一定也与黑子的大小有关。1874年, 格林尼治天文台开始观测黑子的总面积 A (以太阳可见半球面积的 10^{-6} 为单位), 即把所有黑子归算到日面中心后相加。

A 与 R 之间是否有关? 目前也存在两种观点, 有人认为虽然每天的 A 与 R 似乎无关, 但从年平均值看有如下关系成立:

$$\frac{A}{R} = 16.7 \quad (7.17)$$

但也有人认为 A/R 值与太阳活动的极大或极小有关, 并非是常数, 如在黑子极小年, A/R 值较小, 极大年份的 A/R 值较大。

五、太阳黑子周期

通过长期观测积累的资料发现, 黑子相对数的年平均值大致有周期性的变化。在图7.26中曲线高峰处相对应的年份称为极大年或峰年, 如1969年、1979年等, 而曲线低谷处相对应的年份称极小年或谷年, 如1976年、1985年(表7.10)等等。

应当说明的是黑子周期仅是一种准周期或统计的平均值, 有

表 7.10 黑子极大、极小年的黑子数及周期

极 小			极 大		
年 份	黑子平均数	周期(年)	年 份	黑子相对数	周期(年)
1755	9.6		1761	85.9	
1766	11.4	11	1769	106.1	8
1775	7.0	9	1778	151.4	9
1784	10.2	9	1787	132.0	9
1798	4.1	14	1804	47.5	17
1810	0.0	12	1816	45.8	12
1823	1.8	13	1830	71.0	14
1833	8.5	10	1837	138.3	7
1843	10.7	10	1848	124.3	11
1856	4.3	13	1860	95.7	12
1867	7.3	11	1870	139.1	10
1878	3.4	11	1883	63.7	11
1889	6.3	11	1893	85.1	10
1901	2.7	12	1905	63.5	12
1913	1.4	12	1917	103.9	12
1923	5.8	10	1928	77.8	11
1933	5.6	10	1937	114.4	9
1944	9.6	11	1947	151.5	10
1954	4.4	10	1957	190.2	10
1964	10.2	10	1969	105.6	12
1976	12.6	12	1979	155.4	10
1985	17.9				

的不到9年，有的达13.6年^①，只是长期平均才为11.2年。同时随着研究的不断深入，人们又发现了其中还有22年及80年的周期，有人还认为黑子周期中可能还隐含着更长的周期值。严格地说，太

① 以黑子极大年计算周期的涨落较大，但一般以极小作准，故最长为13.6年。

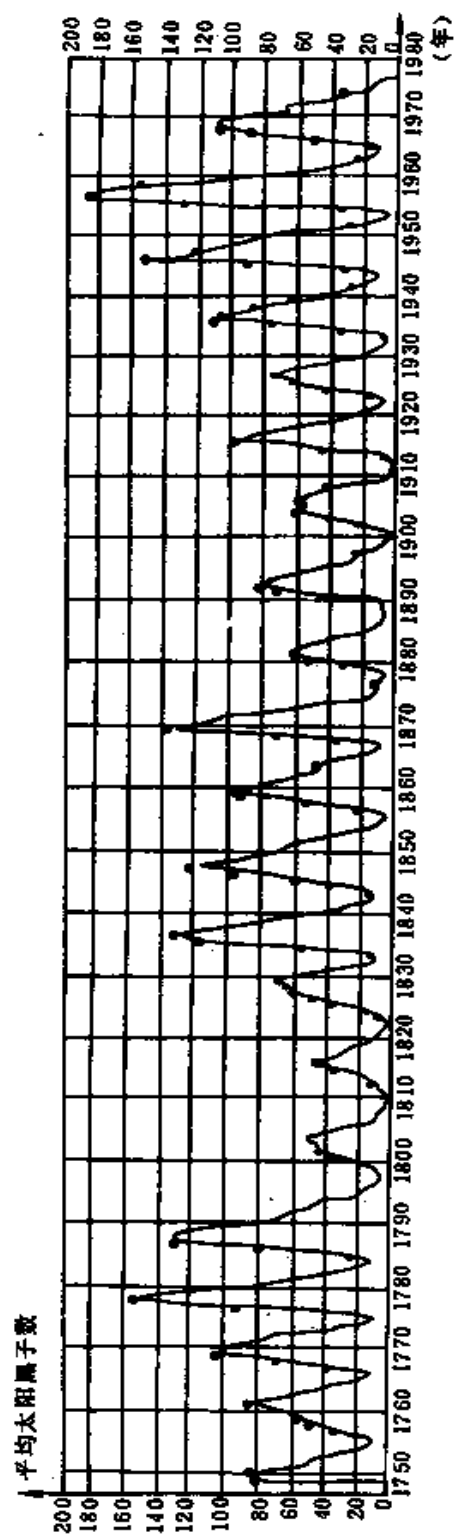


图 7.26 1750—1980 年太阳黑子年平均数

阳活动周期的计算应自黑子的极小年份算起，且以1755年开始的11年作为第一周期，1985年尚处于第22周期中。

太阳活动周期的原因至今仍未解决，目前有两种对立的理论，一种理论认为是九大行星对太阳的起潮力触发了太阳活动；但也有人认为太阳活动的根本原因是由于太阳内部的磁场和物质运动的互相作用所造成的。此外，还有少部分人认为200多年的资料并不能作为理论依据，很可能这11年的周期仅仅是二百年中的一种“反常”现象，因为他们从史料中推断在1645—1715年的71年中太阳活动基本上已告停止——“蒙德极小期”。因而对太阳活动的周期的研究还有许多工作要做。

六、黑子的光谱

黑子不管大小，其光谱都大致相同。与光球光谱相比亦有许多类似之处，但因为黑子中间的温度较低又有很强的磁场，因而与光球的夫琅和费光谱相比又有许多差异和不同。例如，氢的巴尔末线系较弱，但中性钙、铷、铟的一些谱线却能出现在黑子的光谱中，有时黑子光谱中甚至还有一些分子谱线。

黑子光谱的研究不仅可以求出它的温度、压力等，而且也可以藉此来研究黑子内部的物质运动状况。例如，1909年英国埃弗谢德(J. Evershed)通过研究黑子的光谱发现，其中物质除沿径向的垂直运动(1—3千米/秒)外，有些物质沿水平方向从里向外不断流出，也有物质刚好相反，从外面不断流入

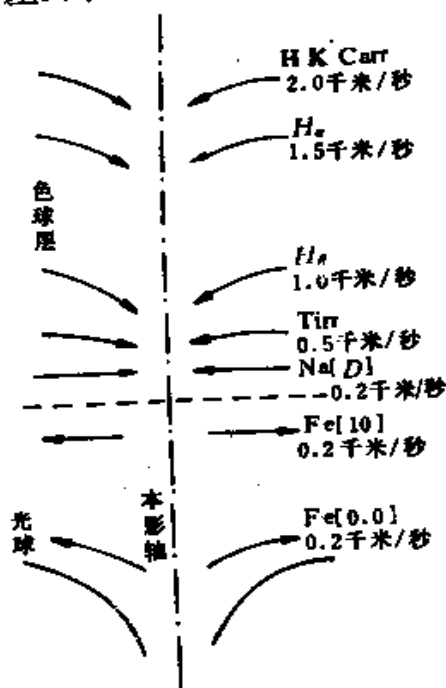


图 7.27 太阳黑子内的物质运动

黑子之内(图7.27)。一般说来,在黑子上层物质流入,在黑子下层则是流出。

磁场对于黑子光谱有重大的影响,它不仅会使谱线分裂,而且也会使谱线致宽。

七、黑子的磁场

利用塞曼效应^①很容易测得黑子的磁场。测量结果表明:黑子的磁场强度在 $(1-4) \times 10^{-1}$ 特之间。一般说来,黑子越大,其磁场越强,与太阳表面的平均磁场 $(1-2) \times 10^{-4}$ 特相比,显然黑子的磁场是非常突出的。

对于一个单极黑子而言,离黑子中心 r (以黑子半径为单位)处的磁场强度可以写为:

$$H(r) = \frac{H(0)}{1+r^2} \quad (7.18)$$

式中 $H(0)$ 、 $H(r)$ 分别代表黑子中心和距离中心 r 处的磁场强度,而磁力线的分布则有:

$$\alpha = 0.375 \pi r \quad (7.19)$$

其中 α 是黑子磁力线与黑子轴线的交角。显然在本影中心 $\alpha = 0$,随着 r 增大,交角逐渐增大,到了半影边缘,已基本上与太阳表面相平行了。

成对出现的黑子其磁极必然相反,磁力线从一个黑子表面出来,进入另一个黑子中去。观测还表明,黑子的磁场经常有变化,而这种变化对太阳活动区中的某些物理过程起着很重要的作用,很可能这就是产生诸如本影点、本影闪耀等比较特殊现象的原因。

① 1896年,荷兰物理学家塞曼(P. Zeeman)发现,在磁场中的光源谱线会发生分裂,当观测方向与磁场垂直时,则每条谱线分裂成三条,称之为“横效应”;而当观测方向与磁场平行时,则中间一条观测不到,只分裂为二条,称之为“纵效应”,见中册§9.3。

八、黑子的本质和形成机制

黑子有很强的磁场，因而一般认为黑子必是磁场与物质相互作用的产物。然而其具体的作用方式却至今还不了解。黑子为什么会温度较低，也存在两种不同看法：一种观点认为是由于黑子中的强大磁场抑制了光球的能量传递，使它深处的热量无法向上传到黑子，因而黑子温度低，显得暗黑；另一种看法是，黑子中的能量通过非辐射能量传输等多种途径大量向外传播，造成“入不敷出”的状态，因而变得暗黑。

黑子的形成过程也有多种不同的理论机制，但现在一般比较倾向于美国天文学家巴布科克(H. W. Babcock)于1961年提出的模型(图7.28)。他认为，在太阳光球层以下大约 $0.05R_{\odot}$ 的地方有一个磁偶极场，而其磁力线则被“冻结”在太阳物质中(图7.28a)，但是太阳在不停地自转，随着太阳的较差自转，这些磁力线便会慢慢地互相缠绕起来。这样，只要太阳上有任何扰动(如湍流)发生，它便会使这种缠绕成的“磁力线管”造成扭转(图7.28b)。当磁力线发生扭转时会成“结”，使那儿的磁场强度骤然大大增强，强度达到 10^{-1} 特，这样磁压也就逐渐增大，而当磁压超过电子压和气体压之和时，磁力线管便浮到了太阳光球上来，从而成为人们所见到的黑子(图7.30c)。

根据这种观点，可以说明黑子总是以成对的形式出现，而且也能较满意的解释为什么南、北半球上前导黑子的磁极正好相反的现象。

§ 7.7 日 珥

日珥是出现在太阳边缘的一种变化很快的活动现象，似乎是从日面喷发出来的红色火焰。因为与太阳光球相比，日珥的总光

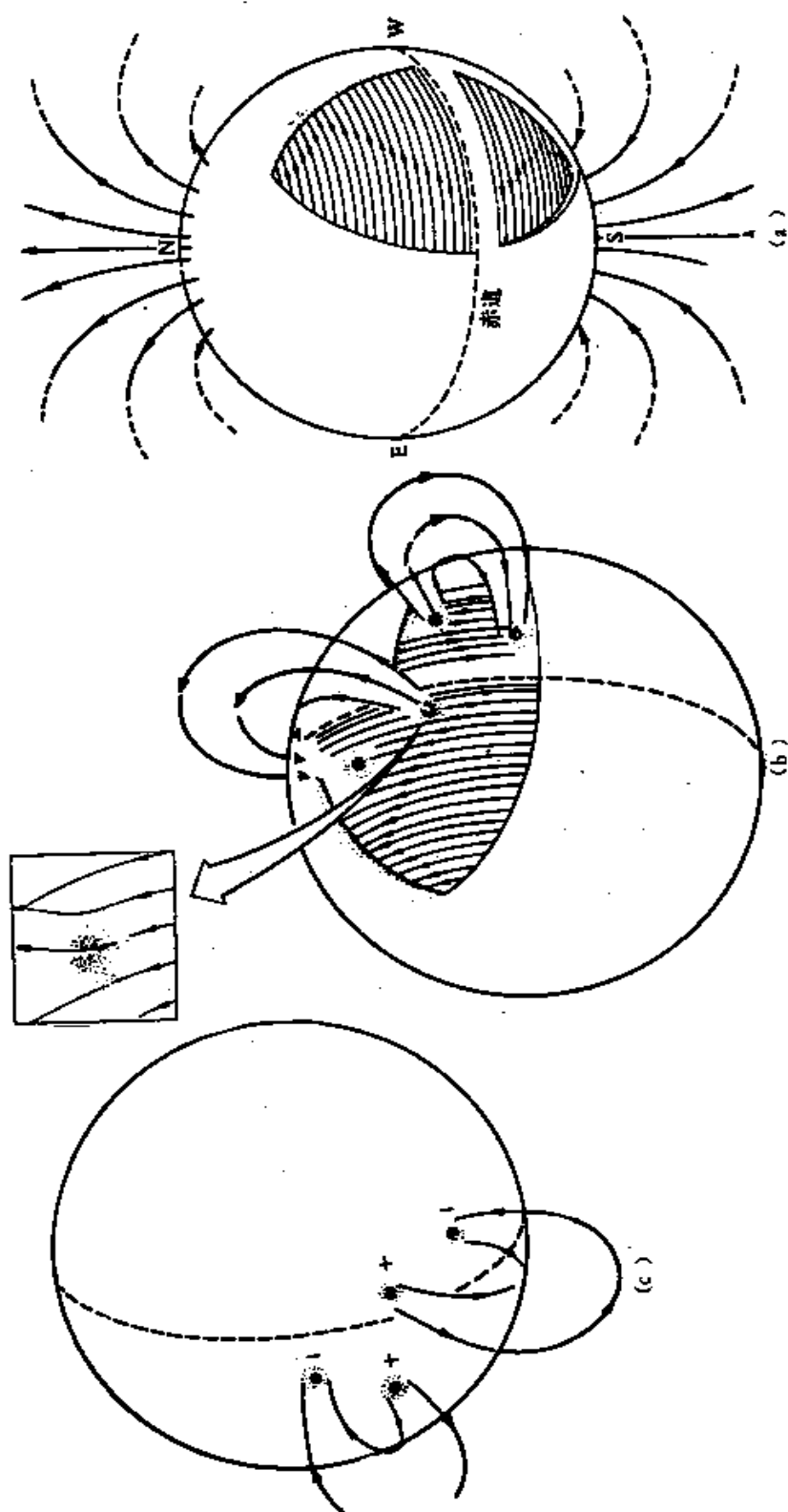


图7.28 巴布科克模型中黑子形成的过程

度很小，所以肉眼观测的机会不多，只有在日全食的瞬间才能见到。平时研究日珥则需要借助专门的天文仪器，如色球望远镜等来进行单色光观测。

公元前1400年的我国甲骨卜辞中的日全食资料内已曾有过日珥的记载，但明确的第一次日珥观测的科学记录却迟至1842年7月8日。在此后，日珥的研究工作进展甚快，尤其是在二十世纪以后，得到了许多很有价值的结果。

一、日珥的形状和分类

日珥是迅速变化着的活动现象，一次完整的日珥过程一般为几十分钟(图7.29)。同时，日珥的形状也是形形色色、多种多样的，有的如浮云烟雾、有的像公园喷泉、有的宛如一弯拱桥、有的酷似团团草莽，也有些日珥如圆环、如篱笆、如游蛇、如火舌……，真是不胜枚举(图7.30)，因而日珥的情况相当复杂。

不同的人也提出了不同的日珥分类法，但多数是以它们的形

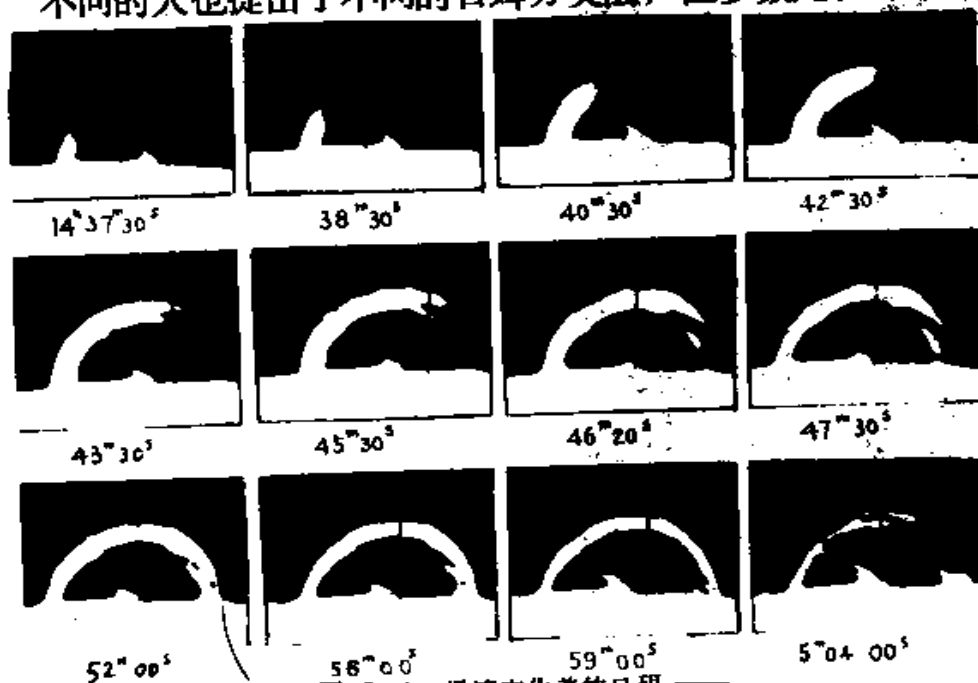


图 7.29 迅速变化着的日珥 ——
1982年12月20日的一次日珥，其过程不满30分钟
(南京大学天文系摄，时间为北京时)

态为主,兼考虑运动特性进行归纳。从形态变化规模的大小以及变化速度的快慢可粗分为三大类: 宁静日珥、活动日珥和爆发日珥。

1. 宁静日珥 宁静日珥的变化规模比较小,一般限于局部范围,变化的速度也很慢,需要长时期连续观测才得以发现。变化特别缓慢、特别小的日珥还称之为稳定日珥。但是,宁静也只是相对的、比较而言的,事实上,宁静日珥也有许多不规则的变化:

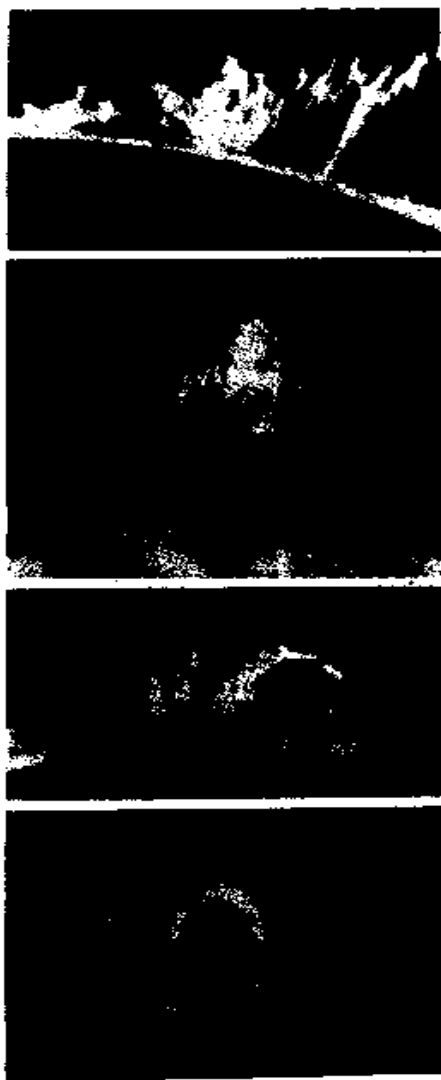


图7.30 不同形状の日珥

(a) 篱笆状的宁静日珥;
(b) 悬浮状的活动日珥; (c) 黑子日珥。
(d) 圈状的爆发日珥(南京大学天文系摄)

有时日珥的局部会慢慢消失,而不久在同一地方又会出现另一种形状的结构;有时它的个别部分会时而缩小、时而扩大。通过光谱观测,还发现宁静日珥中常有一些气流活动,其速度在10千米/秒左右。

2. 活动日珥 是最常见的一类日珥,变化比前者大而快得多。变化的形式也是多种多样的:有时似乎日珥内的气流流动有确定的某种曲线轨道;有时却是任意地流向太阳表面上一个或若干个确定的区域;有时物质先是沿一曲率很大的圆弧上升到某一高度,停滞一段时间后又从原“轨道”向下落回原来的区域,好似这是“吸引中心”。有些活动日珥甚至还发现有好几个这种吸引中心,物质运动此起彼落,显得相当复杂。有人还把活动日珥细

细分成若干种,如有黑子日珥出现在黑子群上空的一类活动日珥)、冕珥(从日冕空间发出的形如细流状の日珥)、龙卷日珥(气流沿螺线运动,形如龙卷风の日珥)、电磁日珥(气流沿太阳磁力线运动の日珥)、冕云(在活动黑子上空寿命较长、外形如云の日珥)等等。

3. 爆发日珥 顾名思义,这是变化最迅猛激烈的一类日珥,它从太阳表面以很高的速度加速升起,有的垂直腾空而起,有的倾斜抛出,也有的沿曲线很快上升,有时甚至可升到离日面150万千米的高处,速度达数百千米/秒,而且到达最高点后又会骤然消失不见,在原来升起的地方也无什么痕迹留下。有时爆发日珥呈现为拱形状态,爆发时拱形上升,而有些物质却沿弧的两端向下流动。爆发日珥大约只占日珥总数的5—10%。

当然这种分类仅是从形态而划分的,是否有什么物理意义尚不太清楚。何况宁静、活动、爆发也没有绝对的界限,有时还会互相演变,所以实际上的分类要比理论上更为复杂得多。

二、运动状况

日珥的运动是比较复杂的。它们的大小不一样,平均说来其尺度为长200000千米、厚5000千米、高30000千米,它的下部与色球层相连接,但主要部分则存在于日冕之中。

不同类型的日珥运动速度也不相同,如宁静日珥一般在10千米/秒左右;活动日珥则在几十到三百千米/秒之间;而爆发日珥常常以很大的加速度上升,曾经观测到上升速度超过700千米/秒的大日珥。然而它们也有一些共同的特点,如同一日珥中物质上抛或落下时,其中若干个亮点或亮块的运动轨道是一致的;而在物质上升阶段,一般都有加速度,有时,它还会受到突然的加速,使亮点的亮度增强。

最令人惊诧的是:日珥物质的密度在 10^{-8} 千克/米³左右,内冕中物质的密度在 10^{-11} 千克/米³以下,比日珥物质小二到三个数

量级：而日冕的温度是 10^6 开，日珥仅是其1%——在10000开以下，但是日珥，尤其是宁静日珥却能长期存在于日冕之中，既不瓦解又不下落，这真是一个难解之谜。

日珥的活动还会使宁静日珥顷刻之间变为活动日珥、甚至爆发日珥，能量骤然增加很多，其中的变化机制至今尚不太清楚。

三、日珥的日面分布

日珥可以出现在日面上的任何区域，不象黑子那样有纬度上的限止。但长期观测表明，无论太阳南半球还是北半球，仍是低纬度区域出现最多。而在低纬地区日珥的纬度分布规律又与黑子有一定的类似性：在太阳活动周开始时，日珥绝大多数发生在 $\pm 30^\circ - \pm 40^\circ$ 的范围内，以后逐渐向赤道靠近而去，但在活动周结束时，日珥的纬度仍比黑子高，大约为 $\pm 17^\circ$ 。

另外还有高纬度日珥，而且这些日珥的纬度并不随太阳活动周而变化，始终在 $\pm 45^\circ - \pm 50^\circ$ 的区域中。高纬度日珥在太阳活动极大时很少出现，一般要在峰年后三年才较多。

日珥也是太阳活动的一个标志，统计表明，日珥的数目与总面积也有平均为11.2年的周期，而且它们与黑子相对数亦相关。当黑子数极大时，日珥的总面积也差不多达到极大值，反之，黑子数极小时，日珥的总面积也处于极小的阶段。当然日珥面积的极大与极小之比值远比黑子的这种比值小，从表7.10可知，黑子极大与极小之比值平均在20左右，但日珥的相应比值却只有3。

由于日珥的亮度比光球要小二个数量级，所以不在日面边缘上的日珥投影在日面上必然是蜿蜒曲折的暗黑色的长条——暗条（图7.31）。当由于太阳的自转运动，暗条移向日面边缘时，即表现为日珥，因此赤道区暗条比两极区多得多。

暗条一般出现在黑子区域，随着它逐渐向高纬度移动而不断变长，并且较差自转使它逐渐变形，并慢慢地消失，但也有些暗条



图 7.31 暗条 —— 日珥在日面上的投影

会突然消失。它的寿命为几天到几十天。在那段时间，暗条几乎不变，处于宁静的状态；但有时在短短几分钟之内，暗条又突然活跃起来，形状很快改变，运动速度骤然剧增；有时两个暗条会合成一个复杂的日珥，有时暗条还会突然消失不见，有时活动一段时间后又趋向“宁静”状态。为什么会有这些复杂的变化，还有待于进一步研究。

四、日珥的光谱

三类日珥的光谱除了一些谱线强度不同外并没有什么根本的区别。在日面边缘处，投影在天空背景上的日珥光谱是发射谱，但投影在日面上的暗条光谱却是吸收谱——实际上是与太阳光谱的叠加，因而吸收线显得更强了。

最早的日珥光谱得于1868年8月18日，不仅由此确定其主要成分也是氢，还导致了氦元素的发现。现在人们通过对它的光谱分析，不仅可以测定日珥的化学成分及各种物理参数，了解日珥

物质的激发、电离状态，还可由此建立日珥的模型，研究它与日面物质的互相作用。

日珥的光谱是在暗弱的连续光谱背景上有许多发射线，表明其化学组成与光球、色球没有区别。利用不同元素的谱线宽度，有人求得日珥内的温度约为7000开，湍流的速度是4千米/秒，电子的数密度为 10^{17} 个/米³，其电离的程度也比光球高。

空间探测开始后，美国“天空实验室”得到了日珥的紫外谱。同样，它也有许多发射线（氢的赖曼线系）。此外，人们还得到了日珥的射电谱（毫米波）。

五、日珥的磁场

1960年，人们得到了日珥磁场强度的资料，宁静日珥为 10^{-3} 特，活动日珥则要比它强几十倍，可达 $(2-3) \times 10^{-2}$ 特，而磁力线方向则各不相同。宁静日珥大致呈水平方向，活动日珥的磁场结构比较复杂，爆发日珥则是螺旋状的。

日珥的运动特征显然与它的磁场密切相关。观测表明，许多日珥（特别是电磁日珥）的形状及运动轨迹本身就像磁力线的形状。也只有考虑到磁场的作用，才能说明日珥能在日冕中稳定存在的观测事实。实际上日珥的物质基本上来自比光球温度更高的色球层，都是高度电离的等离子体，因此有人认为日珥是出现在

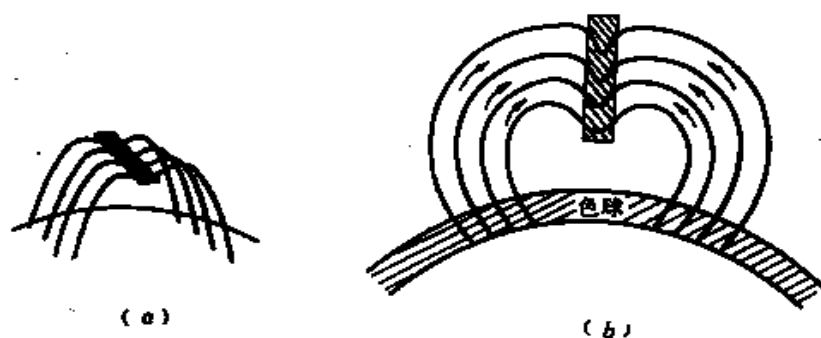


图 7.32 日珥的磁场
(a) 侧视图；(b) 剖面图

日冕磁力线马鞍形的凹陷处的(图7.32), 这样被磁场冻结的物质在沿磁力线运动时, 会有部分物质滞留在这个凹陷区域内, 从而形成了奇特的日珥。

日珥是太阳活动的一种形式, 因此与其他活动现象也有必然的联系, 有人观测到活动日珥有时会向黑子抛射物质, 而黑子也会通过冲浪向日珥补充物质, 所以它们两者之间有一定的物质交换乃是确切无疑的。

日珥与耀斑(§ 7.8)也有许多联系, 许多环状日珥就是耀斑的产物, 耀斑的活动也影响着日珥的运动, 因此, 日珥的研究还涉及到许多复杂的因素。

§ 7.8 光斑、谱斑和耀斑

一、光斑与谱斑

虽然光斑和谱斑似乎大相径庭, 前者是出现在日面边缘的大块明亮(比光球稍亮)组织(图7.33), 后者是用单色光观测到的色球上的大块增亮的区域(图7.34)。但研究表明, 两者的实质是一样的, 都是一种太阳活动现象, 光斑向上延伸到色球便是谱斑, 谱斑向下发展就是光斑。

光斑的温度比光球大约高 100 开, 亮度仅大 10% 左右, 因此在日面中心区域就不易观测到, 一般要在离日面中心 $0.6R_{\odot}$ 以外才可见。

光斑一般与黑子有密切的关系, 两者常互相伴随, 这种纤维状的光斑平均长 50000 千米, 宽 5000—10000 千米, 大致与赤道垂直, 比黑子先出现晚消失, 平均寿命比黑子长三倍。其纬度分布与黑子类似, 但更宽, 大约在 $\pm 5^{\circ}$ — $\pm 50^{\circ}$ 范围, 也有平均为 11 年的活动周期。



图 7.33 常与黑子群在一起的光斑



图 7.34 谱斑——延伸到色球的光斑

但也有一些光斑似乎与黑子并无什么联系，这种光斑并不呈纤维状而呈为近圆形亮斑，范围约2300千米，寿命平均30分钟，出现于 $\pm 70^\circ$ 以上的高纬地区，它们也具有11年的周期性。

仔细观测表明，光斑也有精细结构，它有强度为 10^{-2} 特的纵向磁场，也有与黑子群类似的偶极特性。

谱斑根据观测用的波长分为钙谱斑(电离钙的H和K线)或氢

谱斑(氢的H α 线),两者有明显的区别。钙谱斑比较清楚,与背景反衬较大,基本上是由密集的亮结(高温区)组成,亮结直径约为700—1600千米,而这些亮结又组成了网络结构,其间距有1000—6000千米;氢谱斑比较模糊,呈现为纤维状的结构,还可以看到其中有旋涡状的结构。谱斑的大小不一,从几千千米到几十万千米,线度可相差100倍以上。

谱斑与黑子的密切关系是不言而喻的,谱斑附近几乎都有黑子群,而反过来,黑子多时谱斑也必然比较多、比较大、比较明亮。凡是出现了很亮的谱斑的区域,在几个小时或者一天之后,必然会在那儿出现黑子。谱斑的寿命也比黑子长;而且谱斑的面积与亮度同样也存在着11年的周期变化。

谱斑中也有磁场,而且其亮度与磁场强度大致成正比,谱斑越亮磁场越强,最大的可达 2×10^{-2} 特。而钙谱斑的亮结与氢谱斑中的纤维与磁场的分布、结构也有密切的关系。

二、耀斑现象

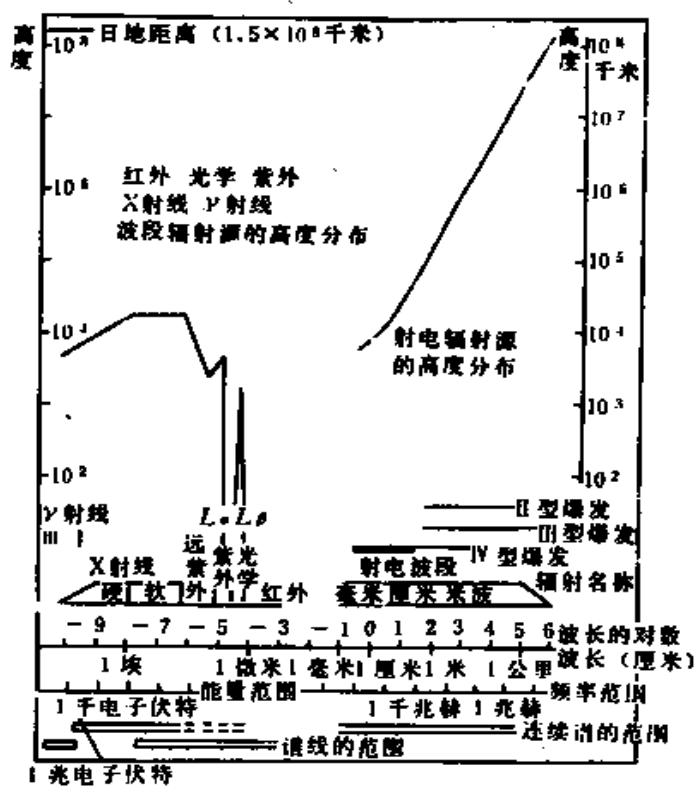
在作太阳的单色光观测时,日面上有时会发现突然出现迅速发展的亮斑,这是出现在色球—日冕过渡区中的一种不稳定过程,它在 10^2 — 10^3 秒的短暂时间内,可以释放出高达 10^{23} — 10^{26} 焦的能量,同时又发出大量粒子(质子、电子、中子)以及从射电到 γ 射线的各种电磁辐射,因而耀斑也常称为色球爆发(图7.35)。

一般的耀斑必须用单色光才可观测,但也有极少数耀斑即使使用白光也可看到,这称之为白光耀斑。自1859年首次观测到白光耀斑至今的一百多年中,仅有三十多次记录,它们一般都是特大耀斑,而且往往有两块发亮区域。

耀斑的寿命不长,大约在几分钟到几十分钟间,亮度上升较快,下降较慢,其时间比约为0.4—0.6。一般讲,面积越大,寿命越长(表7.12),而它发亮面积的大小与其亮度有关,在亮度增大时其面积就增大;相反,耀斑衰减时其面积也就随之而减小。



(a)



(b)

图7.35 耀斑——色球的爆发:

(a) 1972年8月7日出现的“海马”耀斑(形状如海马);

(b) 耀斑的电磁辐射频谱

耀斑是太阳活动中最剧烈的现象。在太阳活动峰年，耀斑活动比较频繁，数目增多、强度变强；而在黑子极小的谷年，耀斑则明显减少，但在每一活动周中，它的出现频数也有较大的起伏。

耀斑与黑子也有密切的关系。观测表明，绝大多数耀斑出现在双极黑子群与复杂的多极黑子群的附近，单极黑子区域则很少有耀斑产生，因此耀斑的日面分布也与黑子有类似之处，但由于耀斑与黑子之间还有一定的间距，平均为28000千米，最大间距可达100000千米，所以耀斑的纬度分布比黑子更广，可以在 $\pm 50^\circ$ 纬度出现，当然高纬度的耀斑为数不多。

耀斑亮区在日面上常有膨胀及缓慢的漂移现象，其运动速度大约是10千米/秒，在耀斑行将消失时，其附近常会出现一些很暗黑的纤维状物质，它们以大约300千米/秒的高速度可上升到离日面10万千米的高空，随即又急速地落回日面，这可能就是日珥中“吸引中心”的实质。

三、耀斑的级别与分类

耀斑的级别主要是以发亮的面积来区分的，然而通常观测到的耀斑的面积 S_r 首先应消除投影效应，归算到真实面积 S ，当耀斑的日心距 $r < 0.906R_\odot$ 时有

$$S_r = S \cdot \sec \theta \quad (7.20)$$

当 $r \geq 0.906R_\odot$ 时，则用表(7.11)根据 S_r 直接估算分级， $0.906R_\odot$ 表示从日心看观测者与耀斑的张角为 65° (图7.36)。

一般讲来，耀斑的面积越大，存在的时间也就越长。耀斑面积与黑子面积一样，以太阳半球面积的 10^{-6} 为单位。 $S_r < 100$ 者称为“亚耀斑”，在此限以上可分为四级(表7.12)。

有时在级别后还加字母 f 、 n 、 b 以区别耀斑在 H_α 线中的极大亮度的强弱， f 为最暗， n 为一般， b 为最亮，如 $4b$ 就是最大最亮的耀斑，白光耀斑几乎都属此类，而 $1f$ 则是最小最暗的耀斑。

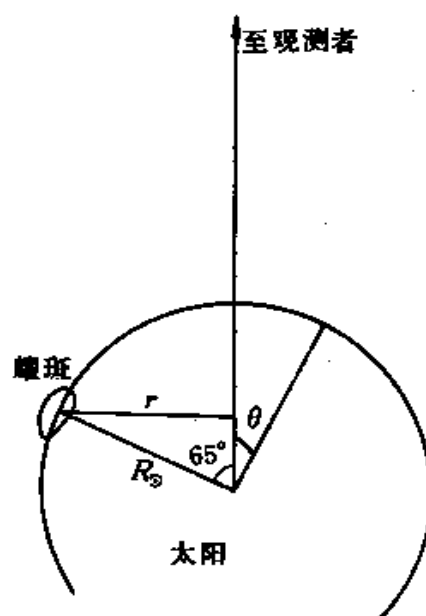


图 7.36 耀斑面积换算以 65° 为限

表 7.11 日面边缘处，视面积与级别关系

级别 S_v (10^{-6})	65°	70°	80°	90°
亚—1 级	90	75	50	45
1—2 级	280	240	180	175
2—3 级	600	500	350	300

表 7.12 四级耀斑的寿命和比例

级别	面积(10^{-6} 太阳 半球面积)	平均寿命 (分)	占比例 (%)
1	100 — 250	20	约70
2	250 — 600	30	26
3	600 — 1200	60	3
4	1200 — 15000	180	1

还有人以耀斑所产生的能量谱把耀斑分为三类:

(1) 质子耀斑: 爆发时还伴随发出大量高能质子(大于10兆电子伏)及高能电子(大于50千电子伏)的耀斑, 这一般也是3级以上的大耀斑。

(2) 电子耀斑: 爆发时所发出的粒子仅有软电子(小于40千电子伏的低能电子)的耀斑。

(3) 非粒子耀斑: 爆发时没有或发出很少粒子的耀斑。

四、耀斑的能谱

耀斑是最剧烈的太阳活动, 它常使得各种电磁辐射及粒子发射突然加强。耀斑的各种电磁辐射的爆发都产生在温度高达 10^5 — 10^6 开的日冕—色球过渡区或日冕中, 而耀斑的色球光学现象则产生在温度较低(只有 10^3 开)的光球上层或色球层内。

综合一些耀斑的观测结果, 各种辐射的能量如表7.13所示。这是从大耀斑中统计的, 可见大耀斑的总能量在 10^{25} — 10^{26} 焦间。

耀斑的光谱范围极宽, 表 7.13 耀斑现象的能量估计

波长从0.001纳米的 γ 射线到6千米的射电范围内都有, 但是不同类型的辐射来自耀斑的不同部分, 或者说是来自太阳大气的不同高度处。

在光学波段, 耀斑的光谱与色球及日珥的光谱相类似, 主要是发射线, 在340—660纳米的波段内中等强度以上的耀斑谱线有90条左右, 主要是氢的低项巴尔末线、电离钙的H和K线及许

耀 斑 辐 射	能量(焦)
H α 辐射	10^{24}
连续辐射	8×10^{24}
(不包括远紫外及X射线的)线辐射	5×10^{24}
远紫外辐射(赖曼 α)	10^{23}
软X射线(0.1—2 纳米)	2×10^{23}
总电磁辐射	10^{26}
高能电子(50千电子伏以上)	10^{24}
高能质子(>10兆电子伏)	2×10^{24}
宇宙线(1—30千电子伏)	3×10^{24}
可见的物质抛射	10^{24}
波现象	2×10^{25}

多中性及一次电离的金属线(主要是铁、钛及硅)。有趣的是,各级耀斑的亮度虽然相差十分悬殊,但其光谱却并没有什么重大的差异。

通过对耀斑的光谱分析可以得到许多有关耀斑的物理参数(表7.14),显然色球部分的耀斑应当是一个薄壳形的结构;综合看来,它是一个完全非均匀的介质,在不同高度处密度与温度都可能相差很大。

表 7.14 耀斑的一些物理参数

电子数密度 n_e (米 ⁻³)	日面耀斑	3×10^{18}
	边缘耀斑	2×10^{18}
电子温度 T_e (开)	H 线	7000—10000
	H ϵ -I 线	15000—20000
	远紫外线	24000— 10^6
色球部分的几何厚度(千米)		10—250

因为耀斑有如此丰富的辐射,因此它也会引起多种地球物理效应,如软 X 射线爆发会造成突发的电离层骚扰和磁暴等各种地磁效应,粒子流则引起极光……。

五、可能的耀斑机制

耀斑与黑子的密切关系说明,耀斑都发生在太阳的强磁场区域。观测表明,许多耀斑都是由于黑子发生急剧变化如本影分裂或出现磁场剧变后产生的,但是也确有许多耀斑,在发生前后其磁场几乎没有什么明显的变化。

耀斑究竟是怎么产生的呢?它的巨大能量从何而来?又如何在短短的时间中释放出来?任何耀斑的理论模型都必须说明这些问题。过去已有了许多模型和假设,如有一种“中性电流片”理论,认为耀斑产生于日面局部磁场为零的“中性片”的地方,在中

性点或中性片附近，由于湍流使两侧的磁场对其不断挤压，在那儿就形成了一个高温等离子体的区域，这便是耀斑。据计算，只要在 10^{23} 立方米的区域内有一个强度为 10^{-2} 特的磁场被瓦解，就足以释放出一个大耀斑的全部能量。但是随着观测技术的提高，尤其是高分辨率的磁场观测证明，多数耀斑发生前后光球磁场并无突变，这使中性点理论陷入了困境。

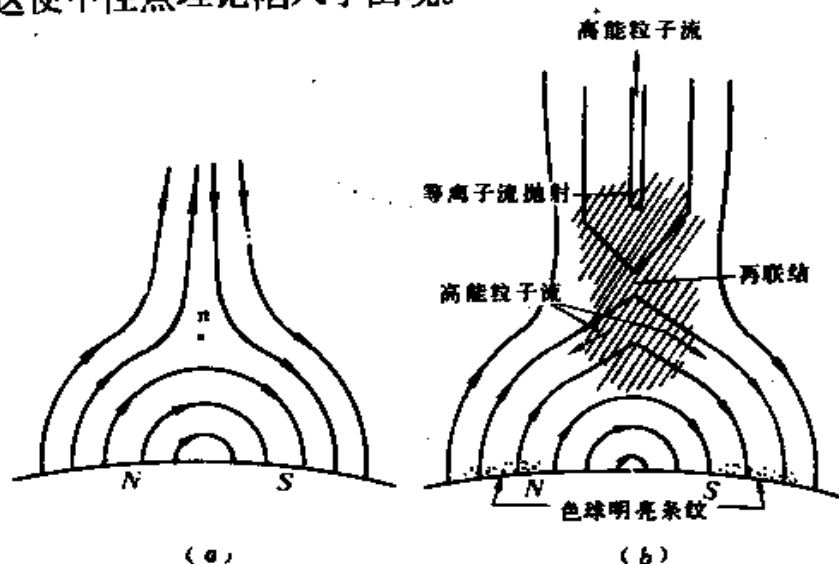


图 7.37 耀斑的“磁力线再联结”机制
(a) 联结之前；(b) 联结之后

七十年代后，一些美国天文学家提出了一种“磁力线再联结”的理论：在日冕的不稳定磁场中既有封闭磁场又有开放磁场(图 7.37a)，这样有一个中性点 n ，在那儿磁场为零，而下面的日面磁场即是黑子所在区，当外面物质压缩磁场时，原来开放的磁力线彼此接近而发生重新联结(图 7.37b)，因而产生冲向色球和光球的高能粒子，而使它们突然增亮，形成耀斑。

1973年6月15日，美国的“天空实验室”观测到了一个完整的耀斑过程，证实了这个新理论。

§ 7.9 太阳的射电辐射

太阳的射电辐射完全是偶然发现的。1942年第二次世界大战正在激烈地进行，英国的防空部队使用了刚发明不久的雷达。他们发现，工作波长4—6米的雷达有时会突然受到强烈的干扰，通过反复研究，科学家们终于发现原来是太阳的射电爆发影响了雷达的正常工作，并且确定了太阳的射电与黑子群、耀斑等太阳活动有密切的关系，而其强度甚至超过了太阳表面上6000开的黑体辐射。

太阳的研究从此开辟了崭新的途径和领域。

一、太阳射电的成分

最早发现的是太阳的米波射电辐射，以后又陆续发现了厘米波段及毫米波段的辐射。目前许多国家所采用的研究、观测波段从2毫米到40米。

研究表明，不同波段的射电辐射来自于太阳大气层的不同高度处，如米波主要产生于日冕层内，因而用米波射电观测到的太阳直径几乎与日冕(内冕)的大小相仿；分米观测到的太阳像直径比光学的直径大10—50%，这表明它们产生于色球—日冕过渡区；厘米波产生于色球的低层区域，所以厘米波的太阳像略大于光学太阳，毫米波产生于光球，它观测到的太阳大小与光学相近。

如把射电辐射与黑体辐射进行类比，这样从射电的辐射强度可以推出太阳大气的“温度”^①，这种计算的结果也证明了上述这

^① 天文学上称这种温度为亮温度，它是表征天体射电辐射强弱的一个参量。以符号 T_b 表示，即假定所研究的天体与某黑体有同样的亮度，则可以把黑体的温度作为天体的亮温度。对于非热性质的天体，亮温度只是表示了射电的亮度；而与天体的实际温度相差很大，而且不难发现，同一天体不同波段处的亮温度也是各不相同的。

种结论。

实际上,对于每架射电望远镜而言,工作波长是基本固定的,但它接收的太阳射电流量却常有很大的变化。因此为研究方便,太阳的射电一般按性质可分为宁静分量、缓变分量及射电爆发。它们实际上分别起源于宁静太阳大气、某些局部亮区即局部活动区及太阳耀斑之类的瞬变扰动。

二、宁静太阳射电及射电基本分量

太阳的宁静射电是指太阳不受扰动、日面上也无局部源时的太阳射电辐射,从毫米到10米的波段上都有这种宁静射电存在,这是持久存在的一种背景射电辐射。但是“宁静太阳”实际上不存在,因太阳上总是存在着或大或小的扰动,因而要定出它的强度也是相当困难的事。有时可以把一段时间内观测到曲线的若干下限(最低点)连接起来(图7.38),所对应的值可以看作是它的第一近似。也可用统计相关方法或用射电干涉仪在太阳谷年进行测定。

宁静分量来源于太阳大气的热辐射,因而是始终存在的,而且基本上不随时间而变化。

宁静太阳的射电可以延伸到光球以外的范围,例如用3米波

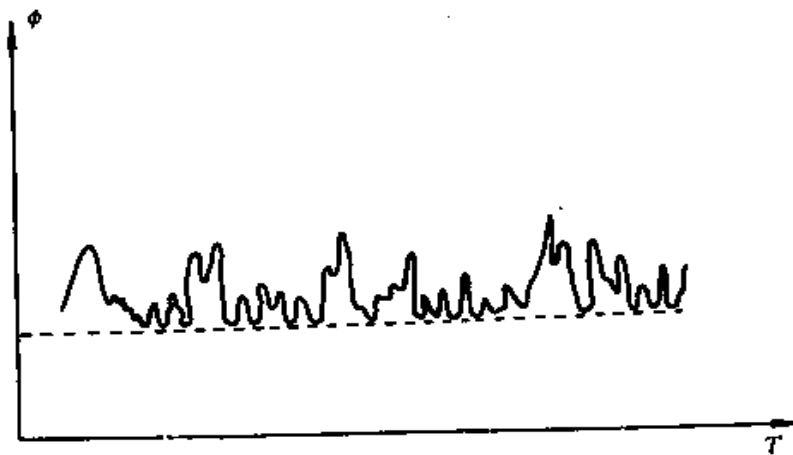


图 7.38 太阳射电的宁静分量

观测时可达 $2 R_{\odot}$ 处。然而就是在日面上, 它的分布既不均匀也不对称; 极区的辐射比赤道区域弱。

有趣的是, 光学上有临边昏暗, 而在厘米和分米波段却出现了临边增亮——在赤道方向上边缘比中心更“亮”, 但这仅限于赤道方向。在极轴方向上, 厘米波与分米波仍呈临边昏暗。米波观测时两个方向都仍是临边昏暗, 对于毫米波则迄今尚未有统一的结论, 不同时候会出现完全不同的情况, 有时是临边增亮, 有时却又是临边昏暗, 有时还有更复杂的情况。

太阳射电中的基本分量常又称为 B 分量, 这是由于日冕的 11 年周期变化而引起的太阳射电变化分量, 可称为日冕射电, B 分量不包括太阳宁静射电。但也有一些人仍把太阳宁静射电和基本分量一起称为 B 分量。

三、太阳的缓变射电

太阳射电中缓慢变化的分量称为 S 分量。观测表明, S 分量与黑子、谱斑等密切相关。缓变分量的频谱从 2.25 毫米到 1.76 米, 尤其是在波长 3 到 60 厘米的厘米波段和分米波段最为显著。观测还表明, 厘米波段的缓变分量主要与黑子的面积有关 (图 7.39), 而分米波段则主要取决于谱斑的大小。

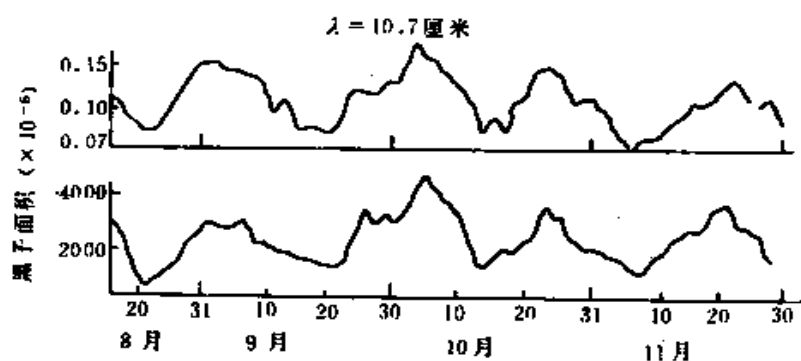


图 7.39 缓变分量与黑子的相关性

一般认为，缓变射电主要产生于黑子和谱斑上空的电子密度较大、磁场较强的日冕凝聚区。其存在的时间可达几个太阳自转周，而且隐含着周期约为半小时的变化。

有人发现，波长3厘米的缓变分量通常由两个辐射区域组成，一是角径不大于 $1.5'$ 的强辐射区，一是角径较大($5' - 8'$)的弱辐射区。其对应的亮温度分别为 5×10^5 开和 1×10^5 开，前者与黑子有关，后者则与谱斑相联系。而60厘米处的缓变分量其亮温度则接近日冕的电子运动温度即 10^6 开。

毫米波的缓变分量来自于色球层，它与钙谱斑、色球磁场有着密切的关系。后来人们又发现往往当毫米波缓变分量增强时，随后就会出现大耀斑，因而对于它的研究很可能为太阳活动预报提供新的途径。

四、太阳射电爆发

在太阳剧烈活动如出现大耀斑时，太阳射电的强度可以猛增几百万倍(图7.40)，这就是太阳的射电爆发，也是太阳活动的一

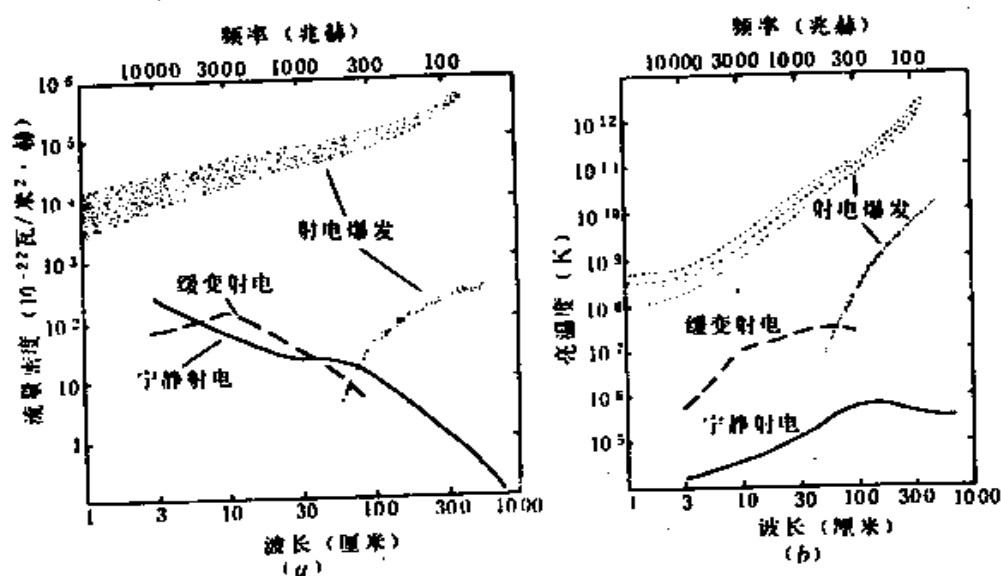


图 7.40 太阳射电频谱
(a) 流量密度频谱; (b) 亮温度频谱

种表现形式。太阳射电爆发的持续时间不一,有短到一秒钟的,也有长到几小时甚至几十小时的,包括频谱从3毫米到40米都有,但近年来空间射电天文得到了很大发展,因此已经得到了波长从一毫米到十几千米的极宽的射电爆发记录,对应的亮温度为 $10^7 - 10^{10}$ 开(个别可到 $10^{12} - 10^{13}$ 开)。这表明它们起源于从色球层到太阳外冕的整个太阳大气中。

太阳的射电爆发在不同波段的特性各不相同,因而一般都把它分为微波爆发、分米波爆发及米波爆发来分别研究。

1. 微波爆发 指波长为0.3-10厘米的射电爆发,而从其爆发的形式又可以分为以下三种:

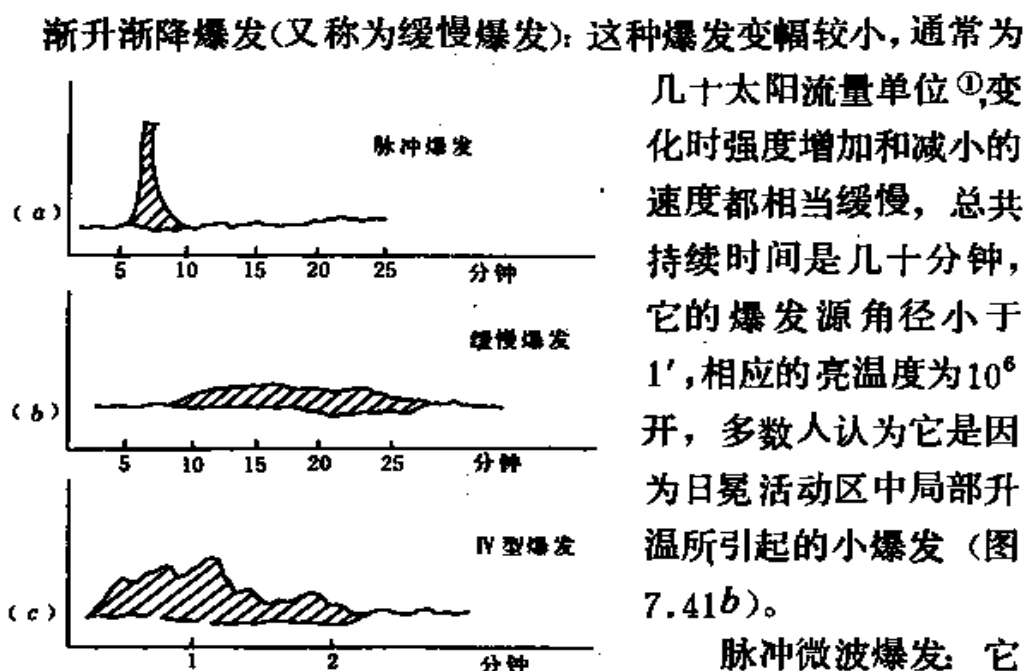


图 7.41 太阳射电微波爆发

的持续时间仅一至几分钟,变幅比较大,曲线上升很快下降稍缓(图7.41a),往往发生在耀斑的闪光阶段。在几种微波爆发中,它们出现最为频繁,在太阳活动峰年时,几乎每隔几个小时就会

① 1973年国际天文学联合会第十五届大会决定,天体射电流量密度以“央”作单位, $1 \text{ 央} = 10^{-26} \text{ 瓦}/(\text{米}^2 \cdot \text{赫})$,太阳流量单位为 $10^{-22} \text{ 瓦}/(\text{米}^2 \cdot \text{赫})$,所以它等于 10^4 央 。

出现一次。

微波大爆发：又称微波Ⅳ型爆发，这是强度很大而又特别复杂的微波射电爆发(图7.41c)，总的变幅可为宁静太阳射电的几十倍以上，持续时间也可达若干小时。从观测资料分析，它与耀斑有些“同步”的趋势，而且其爆发源比较固定，都在黑子上空几万千米的地方。

2. 分米波爆发 太阳射电分米波爆发远比微波爆发复杂得多。有人认为它可能是两部分作用叠加而成的，一是频率较宽的分米波连续辐射，由于它的形态与微波爆发类似，故可能是微波爆发在分米波处的延伸。但它的亮温度为 10^8-10^9 开，而辐射源的位置也位于微波缓变源之上；另一部分是分米波漂移爆发，这种爆发成群出现，但持续的时间很短。而且其辐射频率通常以100赫/秒以上的速度从高频向低频漂移，但也有少数的漂移的方向与此相反。

3. 米波爆发 米波(包括10米波)爆发是一种强度最大、形态极其复杂而多变的射电爆发，其亮温度为 10^7-10^{12} 开，个别大的米波射电爆发甚至可高达 10^{13} 开。

根据米波爆发谱的频谱变化曲线形状又常细分为五种：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ和U型。

Ⅰ型爆发：米波爆发中最突出的，有时形成“噪暴”，这种爆发出现最多、持续时间最长、强度最大，但目前了解得却最少，它们大约发生在大黑子群上空的日冕区域内。

Ⅱ型爆发：几乎都与耀斑相伴发生，持续时间约5到20分钟，流量密度也比较大，可达 10^7 央(1000太阳流量单位)，为宁静太阳射电辐射的100—1000倍，一般认为Ⅱ型爆发是激波扰动日冕等离子体后引起的等离子体辐射。

Ⅲ型爆发：它的最大特点是频率漂移极快，例如在100兆赫附近时常以20兆赫/秒的速度向低频漂移，到达某一终止频率时又

反向漂移到高频端，其上限可达600兆赫($\lambda = 0.5$ 米)，下限可达几十千赫($\lambda = 10^3 - 10^4$ 米)。Ⅲ型爆发的寿命只有1—10秒钟。

Ⅳ型爆发：也是与大耀斑共生的太阳射电爆发，但它的持续时间较长，从几十分钟到两小时，而且这种爆发几乎可以出现于任何波段，在微波段即是上面介绍的第三种微波大爆发。

V型和U型爆发：是Ⅲ型爆发的变型，V型爆发的寿命约为1分钟，U型爆发在运动频谱上表现为一个倒U型（“∩”），持续时间与Ⅲ型爆发类似。

太阳射电爆发常伴随着许多太阳活动一起产生，因此会引起众多的地球物理效应，这也是当前人们研究的重要课题之一。

§ 7.10 日地关系

太阳是太阳系的中心天体，光和能量的源泉。地球上生命的起源与进化都离不开太阳的光和热，除了太阳为地球创造了合适的生态环境外，太阳还以其他方式影响着地球。早在1801年英国天文学家威廉·赫歇耳首次指出年雨量与黑子数多少有关，这便是最早的日地关系研究。由于它的重要性，近年来这门介于太阳物理与地球物理之间的边缘学科发展很快，目前已经成为人们研究的重要课题。

近来，日地关系的研究范围不断扩大，例如太阳活动与气候关系的研究目前亦取得了重大的进展，因此新的日地关系还应包括更加广泛得多的领域。

一、太阳活动的地磁效应

从第四章知太阳风、宇宙线中的带电粒子在到达地球附近时与地球磁场的相互作用形成了地球的“辐射带”——范·艾伦带，而

太阳风与地磁的作用还形成了独特的地球磁层。

除此之外,还有许多其他的地磁效应显然也与太阳活动有关,例如地磁的变化,其中有一个原因就是太阳活动的影响。早在1850年,人们就发现了这种关系的存在。根据1870—1940年全世界40多个地磁台的资料分析,这种相关性特别明显(图7.42)。图中的地磁活动是指地磁要素,即它的水平分量、垂直分量、磁偏角的周日变化,以年为单位取平均,黑子数即通常的沃尔夫相对数。

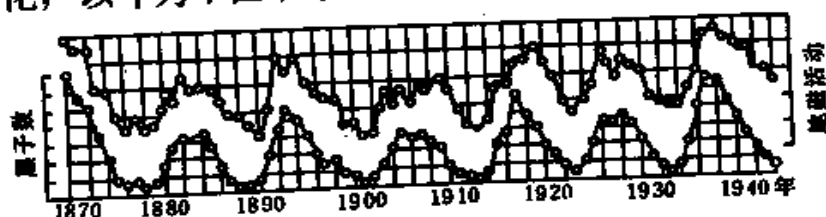


图 7.42 太阳黑子数与地磁变化

太阳活动对地磁影响最大时便出现磁暴。这是太阳活动中发出的高能带电粒子造成的地球磁场的突然的剧烈变化。统计资料表明,磁暴常发生于3、4级大耀斑产生后的一两天内,80%的4级耀斑、30%的3级耀斑都会引起这种地磁的磁暴,而且从两者的滞后时间也可推算出,4级耀斑的粒子速度为1900—2400千米/秒,3级耀斑的粒子速度为1200千米/秒。

观测还表明,当这种造成磁暴的耀斑发生时,必然同时也会产生射电爆发;而当日面出现伴有射电爆发的黑子群时也会引起磁暴,因此射电爆发与地磁暴也有密切的关系。

地磁效应中还有一个令人迷惑的现象,即地磁扰动中包含着周期为27天的重现现象。有人认为27天正是太阳自转的会合周期,可能在日面上有一种光学、射电波段见不到的太阳活动区,这种神秘的活动区造成了这种周期性。但也有人从七十年代空间探测的资料分析中推测,造成27天周期的原因在于冕洞所产生的太阳风。由于其粒子的能量较低,故引起的不是磁暴而是小的磁扰。

二、太阳活动的电离效应

地球上空的电离层是太阳紫外辐射、X射线及粒子辐射造成的，因此太阳活动一定会对电离层产生影响是顺理成章的事。简单说来，太阳活动的增强会使电离层的离子浓度增高，而耀斑爆发等剧烈活动更会造成复杂的电离层效应。

1. 短波衰减或中断 地面发射的无线电短波(6—30兆赫)的传播是依靠电离层中的E层和F层反射得以实现的，平时它们几乎可自由通过电子密度很低($n_e \approx 5 \times 10^8/\text{米}^3$)但中性气体分子密度很大($n \approx 4 \times 10^{20}/\text{米}^3$)的D层，出现耀斑时，耀斑发出的强烈的X射线使得D层的电离程度急剧增大，电波经过D层时会把能量传给电子，而电子又同D层中的中性粒子碰撞而损失能量。这样，短波讯号无法达到更高的E、F层，因而也就没有反射，即短波通讯严重衰减甚至完全中断，这种衰减或中断通常可持续几分钟到几小时。

2. 甚长波位相突然反常 甚长波同时通过地面传播及D层的反射传播，平时两者的位相差是一定的，但在太阳活动增强时，D层的反射高度下降，使得两者的位相差发生突然的反常变化，有人利用这种位相反常来测量D层的反射高度，以推求太阳活动的作用。

3. 长波增强 太阳活动造成D层电子浓度增大的另一个效应是使电波射入D层的高度下降，这样对长波电波就会产生某种类似镜面反射那样的现象，尤其是对于频率在15—50千赫的长波、超长波，因为这种镜面反射大大减少了原来的吸收而得到了增强，与此同时，10—50千赫的无线电信号也会得到增强。

4. 宇宙噪音突然吸收 平时宇宙的射电噪音可以穿过F、E、D层整个电离层直达地面上，但当D层的电子浓度大大增加时，就会使宇宙的射电噪音被严重吸收，这样到达地面上的这种宇宙噪

音就被大大减弱，甚至完全消失。

三、太阳活动与极光

早在二千多年前，我国史料上就有了陆续的极光记载。极光是一种十分绚丽壮观的自然现象，但古代不少人都把它视为不吉利的凶兆。直到十八世纪中叶，才有人发现了出现极光的同时存在着地磁的变化。

极光都发生在高纬度地区，形状奇特多变，有带状的、弧状的、幕状的、放射状的，色彩异常鲜艳，一般紫绿色的极光大约出现在110千米上空左右，而红色的极光则在200—400千米的高空，出现的时间短则几分钟、长达几小

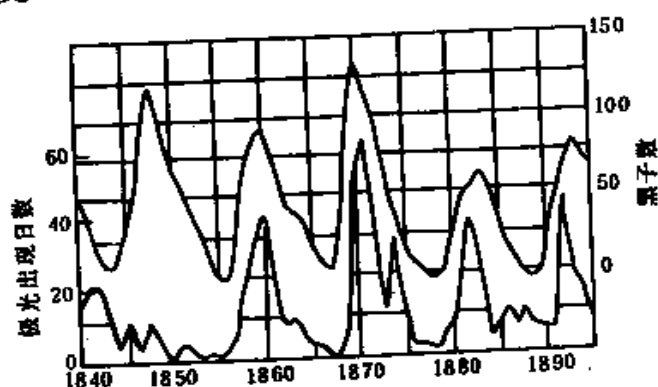


图 7.43 极光(下曲线)和黑子数(上曲线)的关系

时。在北半球极区出现的极光叫北极光，在南半球的极光则叫南极光，然而极光常常又是南北极同时出现的。

极光的出现与太阳活动密切相关(图7.43)，大耀斑以后一、二天内地球上总会出现明亮的极光。实际上，这是太阳活动发出的高能带电粒子在到达地球附近时，地球磁场的磁力线迫使它们只能向地球的两个磁极射去，在磁极上空，它们与地球大气中的分子、原子发生了频繁剧烈的碰撞，这是极光的根本原因。

统计还表明，强极光也含有27天的周期。

四、太阳活动和宇宙线

二十世纪初，科学家们在研究空气导电性时发现了来自宇宙空间的各種高能粒子，其最高能量可达 10^{20} 电子伏以上，当时人

们把这种粒子流不恰当地命名为“宇宙线”。

宇宙线的主要成分是质子(氢原子核)、其次是 α 粒子(氦原子核)、还有少量其他各种原子核以及电子和中微子等,它们的主要来自于超新星爆发(§ 9.6)、超新星遗迹或脉冲星(§ 9.8)。

然而在1946年,美国物理学家福布希(S. E. Forbush)发现了太阳宇宙线,经过研究分析得知,这是由大耀斑而引起的。大耀斑发生时常能发出大量质子及其他带电粒子,其能量可高达1—1000兆电子伏,因而造成了宇宙线地面增强,这又称太阳质子事件。

在大的太阳质子事件发生时,瞬时的质子强度甚至可以超过正常宇宙线三、四个数量级。在进入空间时代后,观测到的质子事件大大增加了,仅1956—1970年的15年中就有114次较大的质子事件。

由于行星际磁场的作用,宇宙线及太阳宇宙线的传播是各向异性的,因而同一事件地球上位于不同地方的探测器的记录会有很大的区别。

五、太阳活动对气候变化的影响

在威廉·赫歇耳之后,罗·沃尔夫也对黑子数与苏黎世城的气候关系作了研究,并得出了一些初步的结论。虽然迄今为止太阳活动如何影响气候的具体机制还远未为人们认识,但大量的统计资料表明,两者之间的相关性是很大的。有人统计了地球上不同区域约八十年的降雨量(图7.44),后来有人以黑子的22年磁周期的资料进一步研究,发现这种相关性尤为明显(图7.45)。

从太阳常数的测定中可知,虽然太阳常数并非绝对不变,但多年来的统计资料表明其变化的范围一般不超过 $\pm 1\%$,因此很难设想它是全球性气候变化的原因所在。

目前人们倾向于认为,造成地球上全球性气候变化的,因很可

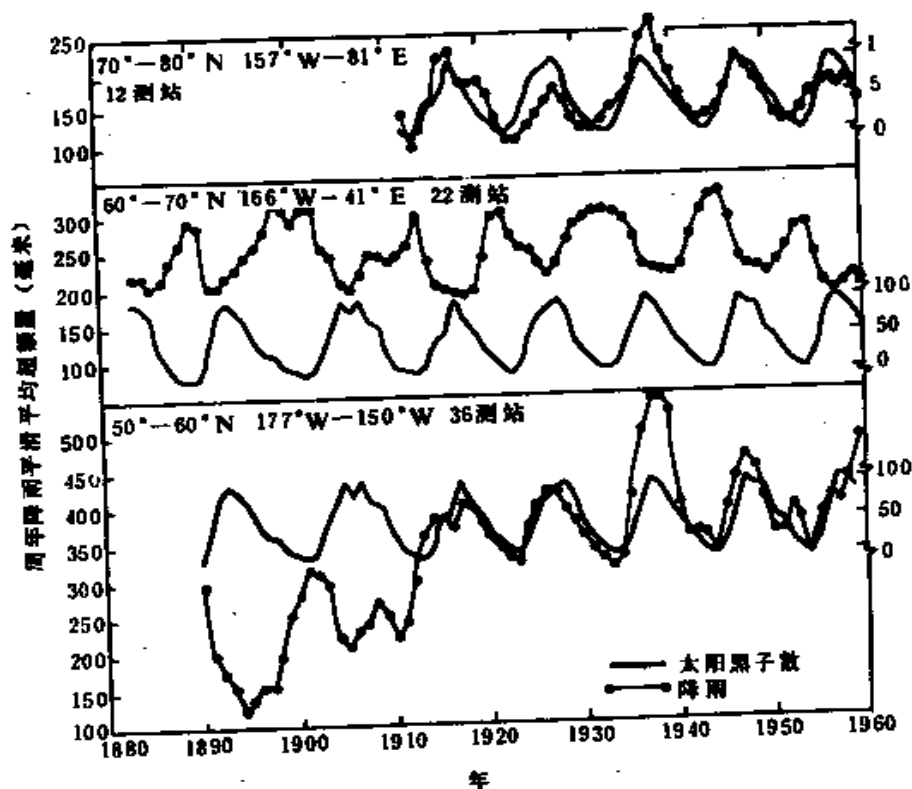


图 7.44 太阳活动与降水量的关系(北半球统计)

能是太阳活动中发生的某种辐射，因为在峰年与谷年，这种辐射流的强度差甚至可达几十倍。

最近几十年来，人们获得了一些有关太阳某些快速活动过程对天气影响的观测资料，例如在有些磁暴发生后的三、四天时间内，地球上许多地方观测到了有规则的气压变化(图7.46)有的还观测到了太阳风与大气涡流的互相作用。总之，最近十年来这方面研究已有了较大的突破。

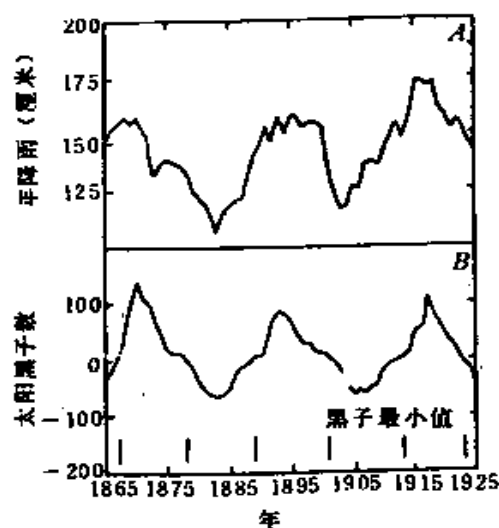


图 7.45 年降水量与22年黑子磁周期有关

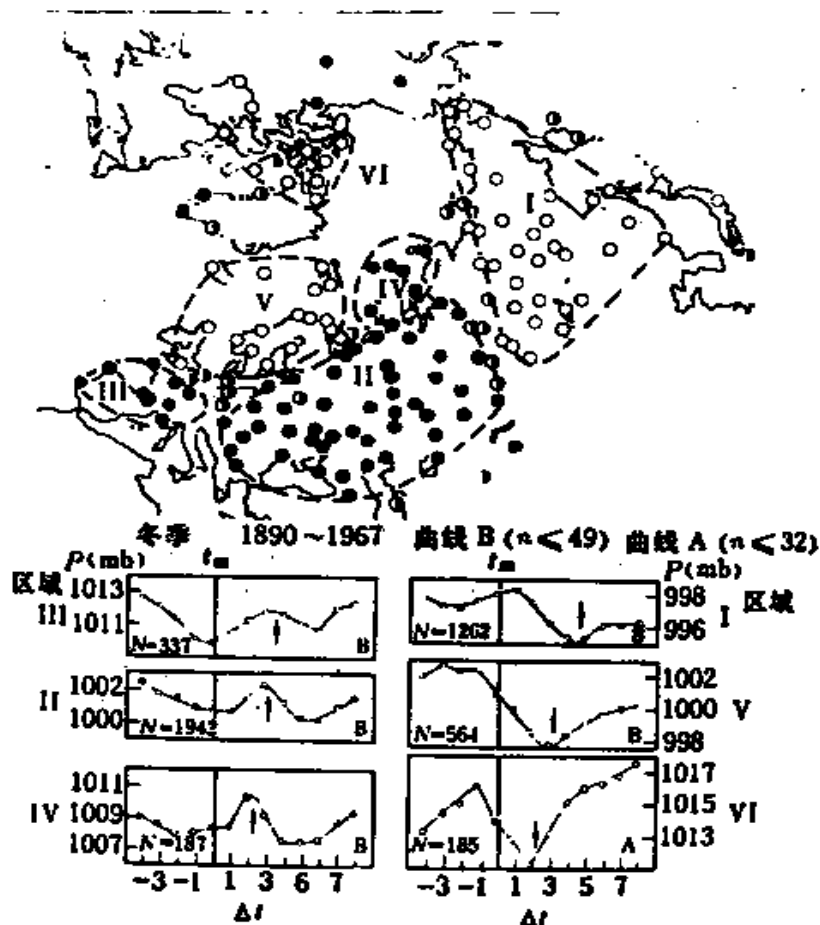


图 7.46 磁暴后的气压变化

· 气压升高；。 气压下降； I—IV 地理分区

六、太阳活动的其他效应

太阳活动对地球的影响可能是多方面的，有人甚至认为它对于生命活动也有某种微妙的作用，例如有人声称，一些细菌、微生物的活动也可能受到太阳辐射的制约，还有人认真地去统计一些疾病的发病率，认为诸如流行性感冒、心血管疾病等也与太阳黑子数有关。

在植物的生长方面，科学家们的确已找到了确凿无疑的证据——树木生长的年轮圈的疏密情况明显地呈现为11年的周期性(图7.47)。图中的曲线表明，树木的生长速度与太阳活动的关系

十分密切，树木的生长曲线有两个极大，主极大对应于活动峰年，次极大则对应于谷年。

由此可见，日地关系的研究虽然近年来进展很快，但是还有许多领域尚未为人所知，宇宙中的奥秘是无穷的。

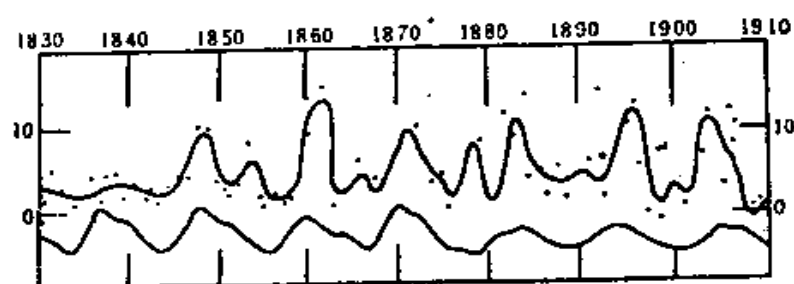


图7.17 树木年轮疏密——生长率(上曲线)与太阳黑子数(下曲线)的关系

附录 I 哥白尼以来天文学大事记

- 1543年 波兰的哥白尼经过毕生研究出版《天体运行论》，确立了日心体系的太阳系学说。
- 1609年 德国的开普勒发表《新天文学》，书中提出行星运动的第一、第二定律。
意大利的伽利略制成第一架天文望远镜，并于年底发现了木星的四颗大卫星。
- 1610年 伽利略的《星际使者》问世，发表了他用望远镜观测天空后的第一批重大发现。
- 1619年 开普勒出版《宇宙谐和论》，提出行星运动第三定律，为牛顿发现万有引力定律奠定了基础。
- 1655年 荷兰惠更斯确证了土星光环。
- 1667年 世界第一座拥有望远镜的现代天文台——巴黎天文台——落成。
- 1668年 牛顿发明并制成了世界上第一架反射望远镜。
- 1676年 丹麦的罗默利用木卫食现象首次测定光的传播速度。
- 1687年 牛顿的巨著《自然哲学的数学原理》问世，提出万有引力定律，天体力学诞生。
- 1705年 英国的哈雷发表的《彗星天文学论说》第一次预言彗星的回归，使彗星研究进入新阶段。
- 1728年 英国的布拉得雷发现光行差。
- 1750年 英国的赖特(T.Wright)首次提出银河系概念。
- 1755年 德国的康德发表了《自然通史和天体论》(匿名)，提出了第一个科学的天体演化学说——太阳系起源星云说。
- 1766年 德国的提丢斯发现了行星距离的经验关系——提丢斯定则。
- 1781年 英国的威廉·赫歇耳发现天王星，大大扩大了太阳系的旧范围。
- 1783年 威廉·赫歇耳发现太阳在星际间的空间运动。
- 1796年 法国的拉普拉斯发表《宇宙体系论》，重新提出太阳系起源星云说。
- 1801年 意大利的皮亚齐发现第一颗小行星——谷神星。

- 1837—1839年 三位天文学家几乎同时测定了恒星的周年视差：德国的贝塞耳(天鹅座61星)、英国的亨德森(半人马座 α)、俄国的瓦·雅·斯特鲁维(织女星)。
- 1846年 英国的约翰·亚当斯和法国的勒威耶独立地根据天王星运动的不规则变化算出了未知行星的轨道和空间位置，德国的伽勒根据后者的资料找到了太阳系的第八颗大行星——海王星。
- 十九世纪中叶 照相技术、测光、分光技术先后在天文学中得到应用以及基尔霍夫定律的发现，宣告了天体物理学的诞生。
- 1897年 美国叶凯士天文台建成世界最大的折射望远镜(口径1.02米)。
- 1905年 爱因斯坦发表狭义相对论。
- 1912年 美国的勒维特(H. S. Leavitt)发现造父变星的周光关系。
- 1913年 丹麦的赫茨普龙(E. Hertzsprung)与美国的罗素(H. N. Russell)分别得到了恒星的“颜色星等图”和“光谱光度图”，合称为“赫罗图”。
- 1915年 爱因斯坦发表了广义相对论。
- 1918年 美国的沙普利(H. Shapley)从球状星团的研究中证实太阳不在银河系中心区域。
- 1929年 美国的哈勃从河外星系的谱线红移中得出了哈勃定律。
- 1930年 美国的汤博发现太阳系的第九颗大行星——冥王星。
- 1931年 德国的贝·施密特(B. V. Schmidt)发明折反射望远镜——施密特望远镜。
- 美国央斯基发现银河中心的射电辐射。
- 1932年 苏联的朗道(Д. Ландау)预言中子星的存在。
- 1937年 美国的雷伯建成了第一架射电望远镜。
- 1937—1939年 德国的冯·魏茨泽克与美国的贝特创建恒星核能源理论，并因此获得1967年诺贝尔物理奖。
- 三十年代 美籍印度裔昌德拉塞卡(S. Chandrasekhar)对恒星及白矮星的研究获得重大成果，因此与人分享了1983年诺贝尔物理学奖金。
- 1948年 5米反射望远镜在美国帕洛玛山天文台正式启用。
- 1957年 苏联第一颗人造地球卫星发射成功，宣告了空间时代与全波天文学的开始。
- 1959年 苏联发射的“月球1号”月球火箭第一次绕过月球，并得到了第一批月球背面的照片。

- 1960年 美国利用高空气球第一次发现宇宙 γ 射线源。
- 1961年 苏联第一个载人卫星“东方1号”发射成功。
美籍华裔科学家黄授书预言红外星的存在。
- 1962年 美国天文学家首次发现太阳系外的X射线辐射源，X射线天文学宣告诞生。
- 1963年 美国首次用射电方法发现星际有机分子，标志着分子天文学的诞生。
荷兰的玛·施米特(M. Schmidt)在美国发现类星体。
- 1965年 美国的彭齐亚斯(A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)发现3开微波背景辐射，因而荣获1978年度的诺贝尔物理奖。
- 1967年 英国的休伊什(A. Hewish)和他的研究生贝尔(S. J. Bell)发现脉冲星，证实了35年前朗道的预言。该发现获得了1974年度诺贝尔物理奖。
加拿大和美国建成甚长基线干涉仪。
- 1969年 美国“阿波罗”11号实现首次登月，两名宇航员首次踏上月面。
- 1970年 中国的第一颗人造地球卫星发射成功。
- 1972年 美国发射第一艘太阳系外围空间探测器——“先驱者10号”，它于1973年飞临木星获得了大量资料，1983年它已越过海王星的轨道。
- 1973年 美国的“维拉”卫星发现宇宙 γ 射线爆发。
- 1975年 美国发现宇宙X射线爆发
- 1976年 苏联建成世界最大的地面望远镜(口径6米)。
- 1977年 许多国家的天文学家从掩星观测中都发现了天王星具有光环。
- 七十年代 “太阳中微子之谜”提出(美国)。
“黑洞热力学”理论的确立(美国)。
 10^{-30} 秒内的宇宙早期过程的讨论。
- 1978年 美国天文学家发现短周期射电脉冲双星的轨道周期变率，认为这是“引力波”存在的观测证明。美国从掩星观测发现(532)小行星有小卫星。
美国发现冥王星的卫星。
意大利及美国相继发现奇特的天体SS433。

1979年 美国空间探测器“旅行者”1号、2号先后飞临木星获得多项重大发现。木星光环、木卫一上的火山爆发以及若干新木卫。

美国发现双类星体。被认为是引力透境的效果，这是广义相对论的又一天文验证。

第一架新一代天文望远镜——多镜面望远镜在美国投入观测使用。它由6个1.8米镜头组成，效果足可与4.5米的单镜媲美。

1980年 “旅行者”飞过土星，得到了众多的新发现：光环的复杂结构、众多的新土卫及其奇特的土卫动力学现象。

1982年 美国开始证认类星体的本质——活动星系核。

发现一种前所未知的新型天体——毫秒级脉冲星PSR 1937+214。

美国天文学家提出宇宙中存在着一些3亿光年的“巨洞”，在巨洞中没有星系。

附录 I 球面三角的一些基本公式

一、圆弧与角度

在天文学中,角与弧有三种量度单位制:弧度制、度分秒($^{\circ}$ 、 $'$ 、 $''$)制及时分秒(h、m、s)制。弧度在中学已作过定义,它是弧长等于半径时所对应的圆心角,故

$$2\pi \text{ 弧度} = 360^{\circ} \quad (\text{II.1})$$

$$1 \text{ 弧度} \simeq 57.2958^{\circ} = 3437.747' = 206264.806''$$

一般情况下,可取:

$$1 \text{ 弧度} = 57.3^{\circ} = 3438' = 206265'' \quad (\text{II.2})$$

或者

$$\left. \begin{aligned} 1 &= \frac{1}{57.3} \text{ 弧度} = 1.7453 \times 10^{-2} \text{ 弧度} \\ 1' &= \frac{1}{3438} \text{ 弧度} = 2.9088 \times 10^{-4} \text{ 弧度} \\ 1'' &= \frac{1}{206265} \text{ 弧度} = 4.8481 \times 10^{-6} \text{ 弧度} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.3})$$

度分秒与时分秒的关系比较简单:

$$\left. \begin{aligned} 1^{\text{h}} &= 15^{\circ}, & 1^{\text{m}} &= 15', & 1^{\text{s}} &= 15'' \\ 1' &= 4', & 1'' &= 4'' \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.4})$$

若 θ 是以弧度表示的角, θ° 、 θ' 、 θ'' 分别是以度、分、秒表示的同一角,显然有:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= 57.3 \theta^{\circ}, & \theta' &= 3438 \theta^{\circ}, & \theta'' &= 206265 \theta^{\circ} \\ \theta &= \frac{\theta^{\circ}}{57.3} = \frac{\theta'}{3438} = \frac{\theta''}{206265} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.5})$$

当 θ 角为很小的微角时,即可忽略二级以上小量,有

$$\sin \theta = \text{tg} \theta = \theta. \quad (\text{II.6})$$

例如,当 $\theta = 1''$ 时,就有

$$\sin 1'' = \operatorname{tg} 1'' = \frac{1}{206265}.$$

对于一般的小角 θ'' 则可写成

$$\sin \theta'' = \operatorname{tg} \theta'' = \frac{\theta''}{206265},$$

为简化计,常以 $\sin 1''$ 来代替 $\frac{1}{206265}$,故有

$$\sin \theta'' = \theta'' \sin 1''. \quad (\text{II}.7)$$

二、极三角形

有一类性质颇为特殊的球面三角形——极三角形。极三角形是相对于某一球面三角形(称原三角形)而言的,因而总是成对的。如图 II.1, 极三角形 $A'B'C'$ 的三个顶点 A' 、 B' 、 C' 分别是原三角形 ABC 三条边 a 、 b 、 c 的极,在 $A'B'C'$ 与 ABC 之间有两个重要性质:

(1) 若球面三角形 $A'B'C'$ 是球面三角形 ABC 的极三角形,则球面三角形 ABC 也必然是球面三角形 $A'B'C'$ 的极三角形。

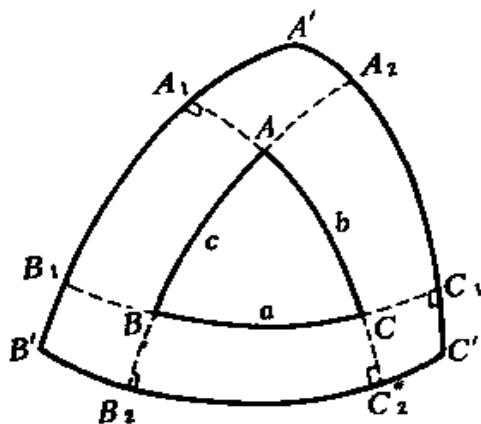


图 II.1 极三角形

[证明] 如图 II.1, 延长 $\widehat{AC}$ 交 $\widehat{A'B'}$ 于 A_1 , 交 $\widehat{B'C'}$ 于 C_2 。因为 B' 是 $\widehat{AC}$ 的极, 所以有:

$$\angle B'C_2A_1 = \angle B'A_1C_2 = 90$$

同样延长 $\widehat{AB}$ 及 $\widehat{BC}$, 得到四交点 B_1 、 C_1 、 A_2 、 B_2 。同理可证:

$$\angle AB_2C' = 90$$

在球面三角形 AB_2C_2 中, $\widehat{AB_2} \perp \widehat{B'C'}$, $\widehat{AC_2} \perp \widehat{B'C'}$, 所以 A 必为 $\widehat{B'C'}$ 的极。

同理可证 B 为 $\widehat{A'C'}$ 的极, C 为 $\widehat{A'B'}$ 的极。

则球面三角形 ABC 为球面三角形 $A'B'C'$ 的极三角形。

(2) 极三角形的边(或角)与原三角形的对应角(或边)互补。

[证明] 如图 II.1, 因为 B' 、 C' 分别是 b 、 c 的极, 所以 $\widehat{B'C_2} = 90$, $\widehat{C'B_2} = 90$ 。

$\widehat{B'C_2} + \widehat{C'B_2} = \widehat{B'C'} + \widehat{B_2C_2} = 180^\circ$.
而 A 是 $\widehat{B'C'}$ 的极, 所以 $\widehat{B_2C_2} = A$, $\widehat{B'C'} = a'$ 即有:

$$a' + A = 180^\circ .$$

同理可以得到其他两个相应的等式, 所以有

$$\left. \begin{aligned} a' + A &= 180^\circ , \\ b' + B &= 180^\circ , \\ c' + C &= 180^\circ . \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}.8)$$

而 B, C 又分别是 $b' c'$ 的极, 故 $\widehat{BC_1} = \widehat{CB_1} = 90^\circ$. 所以

$$\widehat{BC_1} + \widehat{CB_1} = \widehat{B_1C_1} + \widehat{BC} = 180^\circ ,$$

而

$$\widehat{BC} = a, \quad \widehat{B_1C_1} = A' .$$

于是

$$a + A' = 180^\circ .$$

同理可得其他二式, 于是

$$\left. \begin{aligned} a + A' &= 180^\circ , \\ b + B' &= 180^\circ , \\ c + C' &= 180^\circ . \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}.9)$$

三、球面三角形的基本性质及其证明

(1) 等边对应的角相等, 等角对应的边相等。

[证明] 设球面三角形 ABC 中有 $\widehat{AB} = \widehat{AC}$ (图 II.2). 取 $\widehat{BC}$ 的中点 D , 并用大圆弧联结 $\widehat{AD}$, 则在两个球面三角形 ABD 及 ACD 中, 有



图 II.2 等边与等角相对应

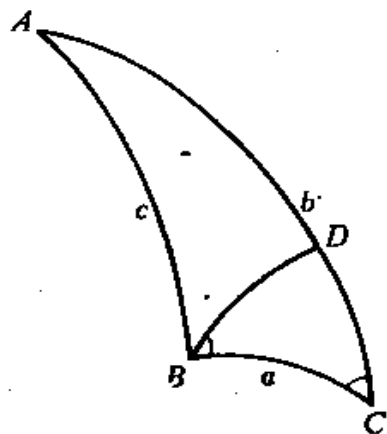


图 II.3 大角与大边相对应

$$\widehat{BD} = \widehat{CD}, \quad \widehat{AB} = \widehat{AC}, \quad \widehat{AD} = \widehat{AD},$$

则两球面三角形全等，即有

$$B = C.$$

(2) 大边对应的角大，大角对应的边长。如图 II.3，在球面三角形 ABC 中若 $B > C$ ，则 $b > c$ 。

[证明] 过 B 作大圆弧 $\widehat{BD}$ ，使 $\angle DBC = \angle BCD$ ，所以

$$\widehat{BD} = \widehat{CD}$$

在球面三角形 ABD 中，有 $\widehat{BD} + \widehat{AD} > c$ ，亦即

$$\widehat{AD} + \widehat{CD} = b > c.$$

利用极三角形的性质，非常容易证明其逆命题。

[证明] 设球面三角形 ABC 的极三角形为 $A'B'C'$

因有

$$b > c,$$

故

$$180^\circ - b < 180^\circ - c.$$

利用 (II.9) 式

$$B' = 180^\circ - b, \quad C' = 180^\circ - c,$$

则

$$B' < C'.$$

在球面三角形 $A'B'C'$ 中就有 $b' < c'$ (大角对大边)，所以

$$180^\circ - b' > 180^\circ - c',$$

即

$$B > C.$$

(3) 球面三角形三边之和大于 0 ，小于 360° 。

[证明] 如图 II.4，因为

$$a > 0, \quad b > 0, \quad c > 0$$

则有

$$a + b + c > 0.$$

联结球心 O 与球面三角形 ABC 三顶点 OA, OB, OC ，则有：

$$a = \angle BOC, \quad b = \angle AOC, \quad c = \angle AOB.$$

由立体几何中知，凸多面角的各面角之和

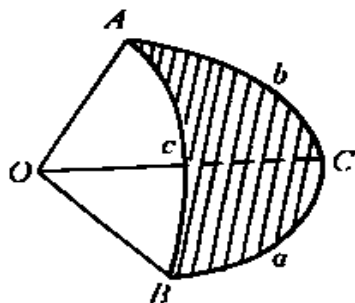


图 II.4. 球面三角形三边之和

小于 360° ，即：

$$\angle AOB + \angle BOC + \angle COA < 360^\circ. \quad (\text{II}.10)$$

所以

$$a + b + c < 360^\circ.$$

即是

$$0^\circ < a + b + c < 360^\circ.$$

(4) 球面三角形三内角之和大于 180° 小于 540° 。

[证明] 设球面三角形 $A'B'C'$ 是球面三角形 ABC 的极三角形，由 (II.8) 式，可直接得到：

$$A + B + C = 3 \times 180^\circ - (a' + b' + c'),$$

而 a' 、 b' 、 c' 又是一个球面三角形的三条边，满足 (II.10) 式即

$$0^\circ < a' + b' + c' < 360^\circ$$

所以

$$180^\circ < A + B + C < 540^\circ \quad (\text{II}.11)$$

(5) 球面三角形两边之和大于第三边，两边之差小于第三边。即是

$$\left. \begin{array}{l} a + b > c, \\ b + c > a, \\ c + a > b. \end{array} \right\} \quad (\text{II}.12) \quad \left. \begin{array}{l} a - b < c, \\ b - c < a, \\ c - a < b. \end{array} \right\} \quad (\text{II}.13)$$

这项证明比较容易，读者不妨自证。

(6) 球面三角形两内角之和减去第三角小于 180° ，即是

$$A + B - C < 180^\circ$$

[证明] 在球面三角形 ABC 的极三角形 $A'B'C'$ 中，有

$$a' = 180^\circ - A, \quad b' = 180^\circ - B, \quad c' = 180^\circ - C.$$

由 (II.12) 式 $a' + b' > c'$ 。即

$$180^\circ - A + 180^\circ - B > 180^\circ - C.$$

所以

$$A + B - C < 180^\circ.$$

同理可得其他两式，即有

$$\left. \begin{array}{l} A + B - C < 180^\circ, \\ A + C - B < 180^\circ, \\ B + C - A < 180^\circ. \end{array} \right\} \quad (\text{II}.14)$$

四、球面三角形的基本公式及其证明

(1) 正弦公式

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} \quad (\text{II} . 15)$$

有关证明已在正文 § 2.2 刊载, 这儿不再重复。

(2) 边的余弦公式

$$\left. \begin{aligned} \cos a &= \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A, \\ \cos b &= \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos B, \\ \cos c &= \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II} . 16)$$

[证明] 如图 II . 5, 联结并延长 OA 、 OB 、 OC , 过 A 作 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{AC}$ 的切线 AM 、 AN , 分别与 OB 、 OC 的延长线交于 M 、 N , 联结 MN , 显然有:

$$\begin{aligned} &AM \perp OA, \quad AN \perp OA, \\ &\text{在 } \triangle AMN \text{ 中, 有:} \\ &\overline{MN}^2 = \overline{AM}^2 + \overline{AN}^2 - 2 \overline{AM} \cdot \overline{AN} \cos \angle MAN. \end{aligned} \quad (\text{II} . 17)$$

而 $\overline{AM}$ 、 $\overline{AN}$ 分别是 c 、 b 的切线, 所以

$$\angle MAN = A,$$

(等于 AOM 与 AON 构成的二面角)

图 II . 5 余弦定理的证明

$$\text{所以 } \overline{MN}^2 = \overline{AM}^2 + \overline{AN}^2 - 2 \overline{AM} \cdot \overline{AN} \cos A. \quad (\text{II} . 18)$$

而在 $\triangle OMN$ 中, 又有:

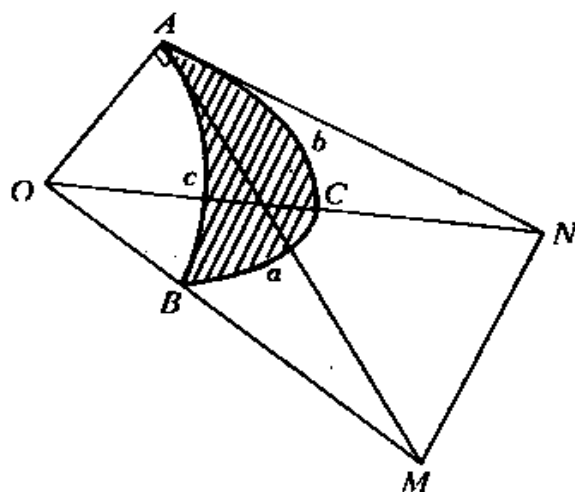
$$\overline{MN}^2 = \overline{OM}^2 + \overline{ON}^2 - 2 \overline{OM} \cdot \overline{ON} \cos \angle MON. \quad (\text{II} . 19)$$

而 $\angle MON = a$, 由 (II . 18)、(II . 19) 式得:

$$\overline{AM}^2 + \overline{AN}^2 - 2 \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN} \cos A = \overline{OM}^2 + \overline{ON}^2 - 2 \cdot \overline{OM} \cdot \overline{ON} \cos a.$$

即

$$\begin{aligned} 2 \overline{OM} \cdot \overline{ON} \cdot \cos a &= (\overline{OM}^2 - \overline{AM}^2) + (\overline{ON}^2 - \overline{AN}^2) \\ &\quad + 2 \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN} \cos A \\ &= \overline{OA}^2 + \overline{OA}^2 + 2 \overline{AM} \cdot \overline{AN} \cdot \cos A. \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\cos a &= \frac{\overline{OA}^2 + \overline{AM} \cdot \overline{AN} \cos A}{\overline{OM} \cdot \overline{ON}} = \frac{\overline{OA}}{\overline{OM}} \cdot \frac{\overline{OA}}{\overline{ON}} + \frac{\overline{AM}}{\overline{OM}} \cdot \frac{\overline{AN}}{\overline{ON}} \cos A \\ &= \cos \angle AOB \cdot \cos \angle AOC + \sin \angle AOB \cdot \sin \angle AOC \cos A \\ &= \cos b \cdot \cos c + \sin b \sin c \cos A.\end{aligned}$$

同理可以证明(II.16)式中的其他两式。

(3) 角的余弦公式:

$$\left. \begin{aligned}\cos A &= -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a, \\ \cos B &= -\cos C \cos A + \sin C \sin A \cos b, \\ \cos C &= -\cos A \cos B + \sin A \sin B \cos c.\end{aligned} \right\} \quad (\text{II.20})$$

[证明] 在球面三角形 ABC 的极三角形 $A'B'C'$ 中, 同样存在有边的余弦公式(II.16)式, 即有

$$\cos a' = \cos b' \cos c' + \sin b' \sin c' \cos A'. \quad (\text{II.21})$$

由(II.8)、(II.9)式

$$\begin{aligned}a' &= 180^\circ - A, & b' &= 180^\circ - B, & c' &= 180^\circ - C, \\ A' &= 180^\circ - a.\end{aligned}$$

代入(II.21)式,

$$\begin{aligned}\cos(180^\circ - A) &= \cos(180^\circ - B) \cos(180^\circ - C) \\ &+ \sin(180^\circ - B) \sin(180^\circ - C) \cos(180^\circ - a) = \cos A \\ &= \cos B \cos C - \sin B \sin C \cos a.\end{aligned}$$

即

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a.$$

(II.20)式中的其他两式也可用同样方法证明而得。

(4) 第一五元素公式:

$$\begin{aligned}\sin a \cos B &= \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A, \\ \sin a \cos C &= \cos c \sin b - \sin c \cos b \cos A, \\ \sin b \cos A &= \cos a \sin c - \sin a \cos c \cos B, \\ \sin b \cos C &= \cos c \sin a - \sin c \cos a \cos B, \\ \sin c \cos A &= \cos a \sin b - \sin a \cos b \cos C, \\ \sin c \cos B &= \cos b \sin a - \sin b \cos a \cos C.\end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

[证明] 把(II.16)式中的第二式改写为:

$$\sin c \sin a \cos B = \cos b - \cos C \cos a \quad (\text{II.23})$$

将(II.16)式中第一式代入(II.23)式

$$\begin{aligned}\sin c \sin a \cos B &= \cos b - \cos c (\cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A) \\ &= \cos b \sin c^2 - \sin b \cdot \sin c \cdot \cos c \cdot \cos A,\end{aligned}$$

两端同时除以 $\sin c$, 即得

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A.$$

(II.22) 式中的其他五式可利用轮换变更字母的方法一一证明之。

(5) 第二五元素公式:

$$\left. \begin{aligned}\sin A \cos b &= \cos B \sin C + \sin B \cos C \cos a, \\ \sin A \cos c &= \cos C \sin B + \sin C \cos B \cos a, \\ \sin B \cos a &= \cos A \sin C + \sin A \cos C \cos b, \\ \sin B \cos c &= \cos C \sin A + \sin C \cos A \cos b, \\ \sin C \cos a &= \cos A \sin B + \sin A \cos B \cos c, \\ \sin C \cos b &= \cos B \sin A + \sin B \cos A \cos c.\end{aligned}\right\} \quad (\text{II.24})$$

[证明] 对于球面三角形 ABC 的极三角形 $A'B'C'$, 同样应有第一五元素公式成立, 即有

$$\sin a' \cos B' = \cos b' \sin c' - \sin b' \cos c' \cos A$$

用(II.8)、(II.9)式中的有关公式代入,

$$\begin{aligned}\sin(180^\circ - A) \cos(180^\circ - b) &= \cos(180^\circ - B) \sin(180^\circ - C) \\ &\quad - \sin(180^\circ - B) \cos(180^\circ - C) \cos(180^\circ - a).\end{aligned}$$

即

$$-\sin A \cos b = -\cos B \sin C - \sin B \cos C \cos a.$$

所以有

$$\sin A \cos b = \cos B \cdot \sin C + \sin B \cos C \cos a.$$

(II.24) 式中的其他公式亦可分别从相应的(II.22)式中得到证明。

(6) 四元素公式:

$$\left. \begin{aligned}\operatorname{ctg} A \sin C &= -\cos C \cos b + \sin b \operatorname{ctg} a, \\ \operatorname{ctg} A \sin B &= -\cos B \cos c + \sin c \operatorname{ctg} a, \\ \operatorname{ctg} B \sin A &= -\cos A \cos c + \sin c \operatorname{ctg} b, \\ \operatorname{ctg} B \sin C &= -\cos C \cos a + \sin a \operatorname{ctg} b, \\ \operatorname{ctg} C \sin B &= -\cos B \cos a + \sin a \operatorname{ctg} c, \\ \operatorname{ctg} C \sin A &= -\cos A \cos b + \sin b \operatorname{ctg} c.\end{aligned}\right\} \quad (\text{II.25})$$

[证明] 由(II.16)式中第一式

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \sin c \cos A. \quad (\text{II.26})$$

把(II.16)式中第三式及(II.15)式代入(II.26)式的右端

$$\begin{aligned}\cos a &= \cos b (\cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C) + \sin b \frac{\sin a \sin C}{\sin A} \cos A \\ &= \cos a \cos^2 b + \sin a \sin b \cos b \cos C + \sin a \sin b \sin C \operatorname{ctg} A\end{aligned}$$

移项

$$\begin{aligned}\sin a \cdot \sin b \operatorname{ctg} A \sin C &= \cos a (1 - \cos^2 b) - \sin a \sin b \cos b \cos C \\ &= \cos a \sin^2 b - \sin a \sin b \cos b \cos C\end{aligned}$$

两端同除以 $\sin a \cdot \sin b$, 则得

$$\operatorname{ctg} A \sin C = -\cos C \cos b + \sin b \operatorname{ctg} a$$

(II.25)式中的其他五个公式也可依此方法证明之。

五、特殊球面三角形

1. 直角球面三角形 有一个角为 90° 的球面三角形称为直角球面三角形。如在球面三角形 ABC 中, 有 $C = 90^\circ$, 则 $\cos C = 0$, $\sin C = 1$ 。分别用于(II.15)、(II.16)、(II.20)、(II.22)、(II.24)、(II.25)等有关公式, 再通过一定的变换和简化, 则可得:

$$\begin{aligned}\sin a &= \sin c \sin A, & \sin a &= \operatorname{tg} b \operatorname{ctg} B, \\ \sin b &= \sin c \sin B, & \sin b &= \operatorname{tg} a \operatorname{ctg} A, \\ \cos c &= \cos a \cos b, & \cos c &= \operatorname{ctg} A \operatorname{ctg} B, \\ \cos A &= \operatorname{tg} b \operatorname{ctg} c, & \cos A &= \cos a \sin B, \\ \cos B &= \operatorname{tg} a \operatorname{ctg} c, & \cos B &= \cos b \sin A,\end{aligned}\quad (\text{II.27})$$

这一组公式共有十个, 有一个记忆法, 剔除直角 C , 用 $(90^\circ - A)$ 、 $(90^\circ - B)$

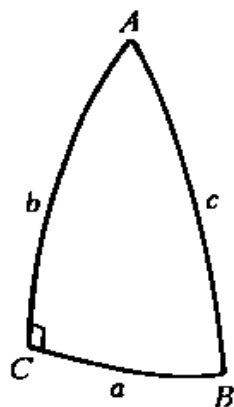


图 II.6 直角球面三角形
公式记忆法示意图

分别代替 A, B , 用 $(90^\circ - c)$

代替 c , 然后把这五个元素 a, b ,

$90^\circ - A$, $90^\circ - c$, $90^\circ - B$ 依

顺时针次序排成一个圆(图

II.6)。显然, 每个元素都有

两个与之相邻的元素, 而任何

一个元素的正弦等于两相邻元

素正切的积或者两相对元素余

弦的积。例如, 任选 $90^\circ - B$, 则有

$$\left. \begin{aligned}\sin(90^\circ - B) &= \operatorname{tg} a \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - c) \\ \sin(90^\circ - B) &= \cos b \cdot \cos(90^\circ - A)\end{aligned} \right\}$$

亦即

$$\cos B = \operatorname{tg} a \operatorname{ctg} c, \quad \cos B = \cos b \sin A,$$

2. 直边球面三角形 凡有一条边为 90° 的球面三角形称为直边球面三角形, 又称象限三角形。例如, 当球面三角形 ABC 中若 $c = 90^\circ$ 时便有 $\cos c = 0$, $\sin c = 1$, 代入(II.15)、(II.16)、(II.20)、(II.22)、(II.24)、(II.25)等有关公式也可得到类似于(II.27)式的十个公式。当然, 利用极三角形的性质(II.8)、(II.9)式, 也可直接由(II.27)式推出。

$$\left. \begin{aligned} \sin A &= \sin a \sin C, & \sin A &= \operatorname{ctg} b \operatorname{tg} B, \\ \sin B &= \sin b \sin C, & \sin B &= \operatorname{ctg} a \operatorname{tg} A, \\ \cos a &= \cos A \sin b, & \cos a &= -\operatorname{tg} B \operatorname{ctg} C, \\ \cos b &= \sin a \cos B, & \cos b &= -\operatorname{tg} A \operatorname{ctg} C, \\ \cos C &= -\cos A \cos B, & \cos C &= \operatorname{ctg} a \operatorname{ctg} b. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.28})$$

同样也有一个简便的方法可以用来帮助记忆(II.28)式。用 $(90^\circ - a)$ 、 $(90^\circ - b)$ 、 $(C - 90^\circ)$ 分别代替 a 、 b 、 C , 依次排成如图 II.7 的圆圈, 则同样就有这样的关系: 每一元素的正弦等于相邻两元素的正切的积, 也等于相对两元素的余弦的积。

3. 小球面三角形 三条边都很小的球面三角形称为小球面三角形。而在圆弧甚小时, 有:

$$\sin x \simeq x, \quad \operatorname{tg} x \simeq x,$$

$$\cos x \simeq 1 - \frac{x^2}{2}$$

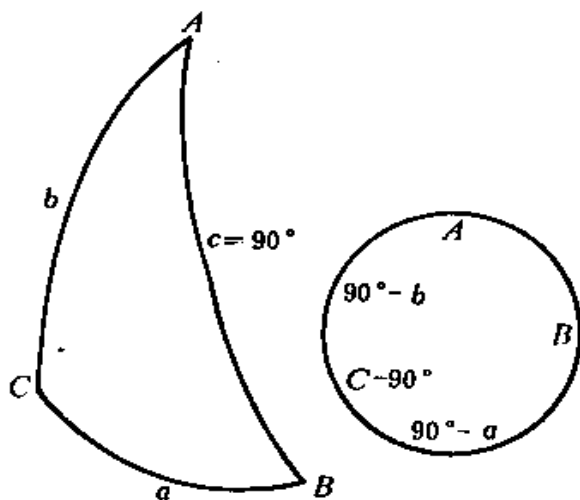


图 II.7 直边球面三角形公式
记忆法示意图

因而只要误差不超过所要求的精确度, 就有与平面三角形类似的正弦、余弦公式,

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{\sin A} &= \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} \\ a^2 &= b^2 + c^2 - 2bc \cos A. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.29})$$

可以认为小球面三角形相当于平面三角形。

1. 窄球面三角形 一条边远小于其他两边的球面三角形称为窄球面三角形。即有

$$a \ll b, \quad a \ll c.$$

在许多实际天文学问题中，通常遇到的窄球面三角形问题都是为了求得 A 及 $b - c$ (或 $c - b$)。

如图 II. 8，设 a 和 A 都是小量，过 C 作一大圆弧 $\widehat{CD}$ ，使 $\widehat{CD} \perp \widehat{AB}$ ，并交 $\widehat{AB}$ 于 D 。

这样，球面三角形 BCD 即为小球面三角形，球面三角形 ADC 是直角球面三角形。设 $\widehat{CD} = b'$ ，则在小球面三角形 BCD 中，有：

$$b' = a \cdot \sin B \quad (\text{II. 30})$$

在直角球面三角形 ACD 中，可取 $AD \simeq c$ ，由 (II. 27) 第一式：

$$\sin b' = \sin c \cdot \sin A \quad (\text{II. 31})$$

而 A, b' 是小量，则有

$$\sin b' \simeq b', \quad \sin A \simeq A,$$

代入 (II. 31) 式

$$b' = A \cdot \sin c \quad (\text{II. 32})$$

联合 (II. 30) 及 (II. 31) 式

$$a \sin B = A \cdot \sin c.$$

图 II. 8 窄球面三角形 即

$$A = a \frac{\sin B}{\sin c}$$

从 $\widehat{BD} = a \cos B$ 中也很易得到 $c - b$ 的有关公式，故有

$$\left. \begin{aligned} A &= a \frac{\sin B}{\sin c}, \\ c - b &= a \cos B. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 33})$$

附录Ⅲ 星官和星座

古人们为了认识星星、研究天体，很早便人为地把星空分成若干区域，中国称之为星官，西方唤之为星座。中国古代把天空分为三垣二十八宿，最早的完整文字记录见诸于《史记·天官书》中。

三垣者，北天极附近的三个区域：紫微垣、太微垣、天市垣。垣的划分并不太严格明确，紫微垣大致包括小熊座、天龙座、鹿豹座、仙王座、仙后座、大熊座、牧夫座、猎犬座、御夫座等。太微垣则相当于以下几个星座的区域：狮子座、后发座、室女座、猎犬座、大熊座、小狮座等。天市垣则相对更近夏秋的银河区域，即包括了蛇夫座、巨蛇座、盾牌座、天鹰座、武仙座、北冕座等等。

二十八宿分成四大星区，称作四象，以动物命名之：

东方苍龙：角、亢、氐、房、心、尾、箕等七宿；

北方玄武：斗、牛、女、虚、危、室、壁等七宿；

西方白虎：奎、娄、胃、昂、毕、觜、参等七宿；

南方朱雀：井、鬼、柳、星、张、翼、轸等七宿。

二十八宿在我国民间流传甚广，汉代天文学家曾形容为：“苍龙连蜷于左，白虎猛踞于右，朱雀奋飞于前，灵龟圈首于后。”实际上这描述了我国中原地区初春季节黄昏不久后的天象(图Ⅲ.1)。

二十八宿中最大的为井宿，赤经跨度约有 33° 左右，而最小的觜宿和鬼宿，仅只 $2-4^\circ$ 。它们与西方星座大致的对应关系可见表Ⅳ.1。

我国的恒星命名系统大约形成于公元270年，三国时代吴国太史令陈卓编成了一本包含283个星官、共1464颗恒星的星表。其中很多都是以封建皇朝帝王将相的官名来命名的。

西方的星座的起源可以追溯到公元以前大约三千年左右的巴比伦人。到公元二世纪时，古希腊的天文学家大体上已把北天区域的星座确定了下来，而南天区域的星座的确定则是在环球航行成功之后、十七世纪的事了。

1603年，根据德国天文学家巴耶(J.Bayer)的建议，恒星命名按星座分区，即在每个星座内根据亮度顺序，以希腊字母表示之。例如，著名的北斗

七星即是大熊座中最亮的七颗星，分别称为 αUMa （天枢）、 βUMa （天璇）、 γUMa （天玑）、 δUMa （天权）、 ϵUMa （玉衡）、 ζUMa （开阳）、 ηUMa （摇光）。但是希腊字母仅只24个，星座中的恒星数一般远不止24颗，如大熊星座内肉眼可见的恒星有125颗之多，为了解决这个矛盾，英国的弗兰斯提德（J. Flamsteed）于1712年发表了一个星表，其中的恒星都按星座中的赤经次序编号，因此，目前除星座中24颗亮星已有希腊字母表示之外，凡被包括在上述星表中的，都以该星表中的号数加上星座名命名，如天鹅座61星、大熊座81星等等。显然，这种数字与亮度顺序是无关的。

为了统一星座的划分，1928年国际天文学联合会经过研究讨论，公布了全天88个星座的名称及范围，并且规定星座的界限一律以赤经线和赤纬线来划分（表Ⅲ.2）。星座的大小相差十分悬殊，如最大的长蛇座占据的天区面积达1300平方度，而最小的南十字座却只有68平方度（全天面积为41253平方度）。从表Ⅲ.2还可看出，各个星座内所包含的肉眼可见星数也是有多有少，各不相等的。

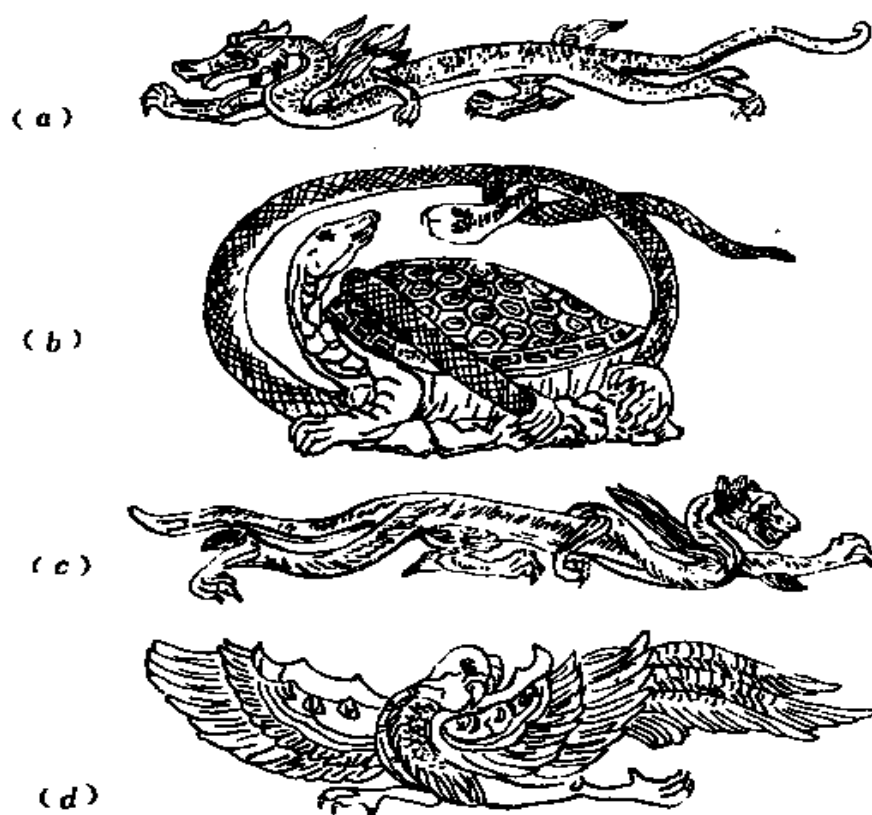


图 III.1 二十八宿的四象:

(a) 东方苍龙; (b) 北方玄武 (c) 西方白虎; (d) 南方朱雀

表 III.1 二十八宿与西方星座的大致对应关系

东方苍龙		北方玄武		西方白虎		南方朱雀	
星宿	对应星座	星宿	对应星座	星宿	对应星座	星宿	对应星座
角	室女	斗	人马	奎	仙女、双鱼	井	双子
亢	室女	牛	摩羯	娄	白羊	鬼	巨蟹
氐	天秤	女	宝瓶	胃	白羊	柳	长蛇
房	天蝎	虚	宝瓶、小马	昂	金牛	星	长蛇
心	天蝎	危	飞马、宝瓶	毕	金牛	张	长蛇
尾	天蝎	室	飞马	觜	猎户	翼	巨爵
箕	人马	壁	仙女、飞马	参	猎户	轸	乌鸦

表 III.2 88 个 星 座 表

略号	中名	拉丁名	俄名	日名	中心位置		占天区 面 积 (平方度)	可见星 数
					赤经 α (小时)	赤纬 δ (度)		
And	仙女	Andromeda	Андромеда	アンドロメダ	1	40	722	100
Ant	唧筒	Antlia	Насос	ポンプ (pump)	10	-35	239	20
Aps	天燕	Apus	Райская Птица	ふうちよう (風鳥)	16	-75	206	20
Aqr	宝瓶	Aquarius	Водолей	みずがめ (水瓶)	23	-15	980	90
Aql	天鹰	Aquila	Орёл	わし (鷲)	20	5	652	70
Ara	天坛	Ara	Жертвенник	さいだん (祭壇)	17	-55	237	30
Ari	白羊	Aries	Овен	おひつじ (牡羊)	3	20	441	50
Aur	御夫	Auriga	Возничий	ぎょしゃ (驭者)	6	40	657	90
Boo	牧夫	Bootes	Волопас	うしかい (牛飼)	15	30	907	90
Cae	雕具	Caelum	Резец	ちようこくぐ (彫刻具)	5	-40	125	10
Cam	施豹	Camelopardalis	Жираф	きりん (麒麟)	6	70	757	50
Cnc	巨蟹	Cancer	Рак	かに (蟹)	9	20	506	60
Cvn	猎犬	Canes Venatici	Гончие Псы或 Гончие Собаки	りようけん (獵犬)	13	40	465	30
CMa	大犬	Canis Major	Большой Пёс	おおいぬ (大犬)	7	-20	380	80
CMi	小犬	Canis Minor	Малый Пёс	こいぬ (小犬)	8	5	183	20

(续表)

略号	中名	拉丁名	俄名	日名	中心位置		占天区 面积 (平方度)	可见星 数
					赤经 α (小时)	赤纬 δ (度)		
Cap	摩羯座	Capricornus	Козерог	やぎ (山羊)	21	-20	414	50
Car	船底	Carina	Киль	りゅうこつ (龙骨)	9	-60	494	110
Cas	仙后	Cassiopeia	Кассиопея	カシオペア	1	60	598	90
Cen	半人马	Centaurus	Кентавр或Центавр	ケンタウルス	13	-50	1060	150
Cep	仙王	Cepheus	Цефей	ケフエウス	22	70	588	60
Cet	鲸鱼	Cetus	Кит	くじら (鯨)	2	-10	1230	100
Cha	堰蜓	Chamaeleon	Хамелеон	カメレオン	11	-80	132	20
Cir	圆规	Circinus	Циркуль	コンパス (compass)	15	-60	93	20
Col	天鸽	Columba	Голубь	はと (鳩)	6	-35	270	40
Com	后发	Coma Berenices	Волосы Бероники	かみのけ (髪)	13	20	386	53
CrA	南冕	Corona Austrina	Южная Корона	みなみのかんむり (南冠)	19	-40	128	25
CrB	北冕	Corona Borealis	Северная Корона	かんむり (冠)	16	30	179	20
Crv	乌鸦	Corvus	Ворон	からす (烏)	12	-20	184	15
Crt	巨爵	Crater	Чаша	コップ (荷, КОР)	11	-15	282	20
Cru	南十字	Crux	Южный Крест	みなみじゅうじ (南十字)	12	-60	68	30
Cyg	天鹅	Cygnus	Лебедь	はくちよう (白鳥)	21	40	804	150

(续表)

略号	中名	拉丁名	俄名	日名	中心位置		占天区 面积 (平方度)	可见星 数
					赤经 α (小时)	赤纬 δ (度)		
Del	海豚	Delphinus	Дельфин	いるか (海豚)	21	10	189	30
Dor	剑鱼	Dorado	Золотая Рыба	かじき (旗鱼)	5	-65	179	20
Dra	天龙	Draco	Дракон	りゅう (竜)	17	65	1083	80
Equ	小马	Equuleus	Малый Конь	てうま (小马)	21	10	72	10
Eri	波江	Eridanus	Эридан	エリダヌス	3	-20	1138	100
For	天炉	Fornax	Печь	ろ (炉)	3	-30	398	35
Gem	双子	Gemini	Близнецы	ふたご (双子)	7	20	514	70
Gru	天鹤	Grus	Журавль	つる (鹤)	22	-45	366	30
Her	武仙	Hercules	Геркулес	へルクレス	17	30	1225	140
Hor	时神	Horologium	Часы	とけい (時計)	3	-60	249	20
Hyd	长蛇	Hydra	Гидра	うみへび (海蛇)	10	-20	1300	130
Hyi	水蛇	Hydrus	Южный Эмей	みずへび (水蛇)	2	-75	243	20
Ind	印第安	Indus	Индеец	インディアン (Indian)	21	-55	294	20
Lac	蝎虎	Lacerta	Ящерица	とかげ (蜥蜴)	22	45	201	35
Leo	狮子	Leo	Лев	しし (狮子)	11	15	947	70
LMi	小狮	Leo Minor	Малый Лев	こしじ (小獅子)	10	35	232	20

(续表)

略号	中名	拉丁名	俄名	日名	中心位置	占天区 面积 (平方度)	可见星 数
					赤经 α (小时)	赤纬 δ (度)	
Lep	天兔	Lepus	Заяц	うさぎ (兔)	6	-20	40
Lib	天秤	Libra	Весы	てんびん (天秤)	15	-15	50
Lup	豺狼	Lupus	Волк	おおかみ (狼)	15	-45	70
Lyn	天猫	Lynx	Рысь	やまねこ (山猫)	8	45	60
Lyr	天琴	Lyra	Лира	こと (琴)	19	40	45
Men	山案	Mensa	Столовая Гора	デ—ブルさん (table山)	5	80	15
Mic	昴微镜	Microscopium	Микроскоп	けんびきょう (顕微鏡)	21	35	20
Mon	麒麟	Monoceros	Единорог	い—かくじゆう (一角獣)	7	-5	85
Mus	苍蝇	Musca	Муха	はえ (蝇)	12	-70	30
Nor	矩尺	Norma	Наугольник	じようど (定規)	16	-50	20
Oct	南极	Octans	Октант	はきふんど (八分儀)	22	-85	35
Oph	蛇夫	Orphiuchus	Эмееносец	へびつかい (蛇遣)	17	0	100
Ori	猎户	Orion	Орион	オリオン	5	5	120
Pav	孔雀	Pavo	Павлин	くじゃく (孔雀)	26	-65	45
Peg	飞马	Pegasus	Пегас	ペガサス	22	20	100
Per	英仙	Perseus	Персей	ペルセウス	3	45	90

(续表)

略号	中名	拉丁名	俄名	日名	中心位置		占天区 面积 (平方度)	可见星 数
					赤经 α (小时)	赤纬 δ (度)		
Phe	凤凰	Phoenix	Феникс	ほうおう (凤凰)	1	50	469	40
Pic	绘架	Pictor	Живописец	がが (画架)	6	-55	247	30
Psc	双鱼	Pisces	Рыбы	うお (鱼)	1	15	889	75
PsA	南鱼	Piscis Austrinus	Южная Рыба	みなみのうお (南鱼)	22	-30	245	25
Pup	船尾	Puppis	Корма	とも (船・船尾)	8	-40	673	140
Pyx	罗盘	Pixis	Компас	らしんばん (罗针盘)	9	30	221	25
Ret	网罟	Reticulum	Сетка	レチクル	4	60	114	15
Sgc	天箭	Sagitta	Стрела	や (矢)	20	10	80	20
Sgr	人马	Sagittarius	Стрелец	いて (射手)	19	-25	987	115
Sco	天蝎	Scorpius	Скорпион	とさり (蝎)	17	-40	497	100
ScI	玉夫	Sculptor	Скульптор	きょうこくしつ (彫刻室)	0	-30	475	30
Scr	盾牌	Scutum	Щит	たて (楯)	19	-10	109	20
Ser	巨蛇	Serpens	Змея	へび (蛇)	17	5	637	80
Sex	六分仪	Sextans	Секстант	ろくぶんぎ (六分儀)	10	0	314	25
Tau	金牛	Taurus	Телец	おうし (牡牛)	4	15	797	125
Tel	望远镜	Telescopium	Телескоп	ぼうえんきょう (望远镜)	19	-50	252	30

(续表)

略号	中名	拉丁名	俄名	日名	中心位置		占天区 面积 (平方度)	可见星 数
					赤经 α (小时)	赤纬 δ (度)		
Tri	三角	Triangulum	Треугольник	さんかく (三角)	2	30	132	15
TrA	南三角	Triangulum Australis	Южный Треугольник	みなみのさんかく (南三角)	16	-86	110	20
Tuc	杜鹃	Tucana	Тукан	きょうしやう (红嘴鸟)	0	-85	295	25
UMa	大熊	Ursa Major	Большая Медведица	おおぐま (大熊)	11	50	1280	125
UMi	小熊	Ursa Minor	Малая Медведица	こぐま (小熊)	15	70	258	20
Vel	船帆	Vela	Паруса	は (帆)	9	-50	500	110
Vir	室女	Virgo	Дева	おとめ (乙女)	13	0	1290	95
Vol	飞鱼	Volans	Летучая Рыба	とびうお (飛魚)	8	-70	141	20
Vul	狐狸	Vulpesula	Лисица или Лисичка	こびつね (小狐)	20	25	268	45

附录IV 日面坐标

因为太阳的自转轴、地球的自转轴、黄道面的法线彼此都不平行,所以,从地球上看到的太阳视面是随时间而变化的,为了描述日面上特征尤其是黑子,就需要建立专门的日面坐标系。

目前世界上通用的日面坐标是由日面经度 L 及日面纬度 B 决定的。日面经度是从“本初子午圈”向西以 0° 到 360° 计量,本初子午圈是这样定义的:1854年1月1日(JD2398220.0)格林尼治平午通过太阳赤道对黄道的升交点的经圈。日面纬度则是从太阳赤道分别向两边量,向北为 $0^\circ-90^\circ$,向南为 $0^\circ-90^\circ$ 。太阳赤道上的自转速度是 $14.18439716^\circ/\text{日}$,所以本初子午圈和赤道的交点每天也转过这样大的角度。

通常需要了解观测时刻的太阳自转轴的方位角 P 、日面(视面)中心的日面纬度 B_0 以及中心的日面经度 L_0 。这三个数据在《中国天文年历》中的“太阳球面位置表”内可按日查得。规定太阳自转轴的方位角 P 是以日轮的北点为起点,向东为正,向西为负。北点的测定并不困难,只要定出周日

运动圈方向即可,所以有多种方法。常用两种方法:关闭转仪钟,在同一底片上相隔几分钟曝光两次,这样可得到两个重叠的太阳像,它们的外切线即是周日运动圈的方向,切点之一就是日轮的北点;在用投影屏作目视观测时,则可在关闭转仪钟后标出某一黑子的移动轨迹,而这正是周日运动圈的方向。通过日轮中心作这轨迹的垂线,所交到圆面边上的点即为北点。

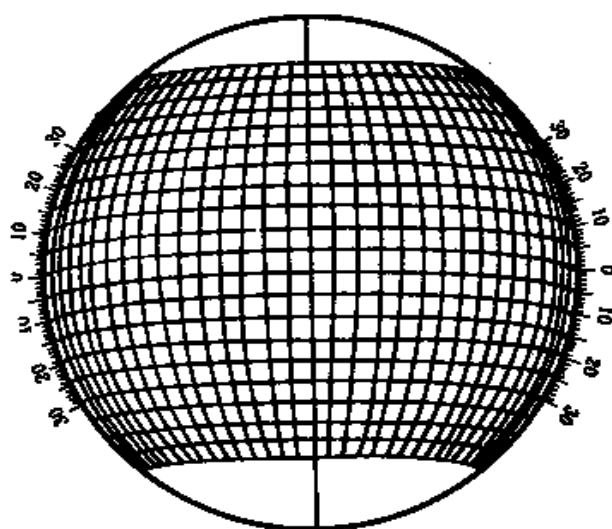


图 IV.1 日面网络图(全套8张,此为其中之一)

1. 日面坐标 L, B 的测定 在一般情况下, 人们对日面坐标的精度要求并不很高, 能准确到度便已满足需要了, 所以实用中通常不必要去作如下那样繁复的计算, 而直接利用一些特制的曲线图表或者日面网络图(图 IV.1)即可以解决问题。

如要准确求得日面特征的日面坐标, 则要进行较严格的推算, 虽然比较复杂, 但也可帮助确立明晰的空间概念。

如图 IV.2, 图中 C, O 分别为太阳的日轮中心和质心, NO 为太阳的自转轴, N 即为太阳的北极, F 是待测黑子, l 为视线方向, H 即为与 l 垂直的视平面, Π', F' 即为 Π, F 在 H 平面上的投影。故 $\angle NO\Pi' = \rho$ 即是自转轴的方位角, 可由《中国天文年历》表“太阳球面位置”查得, 黑子的方位角 $\theta = \angle NOF'$ 可从观测中测得。

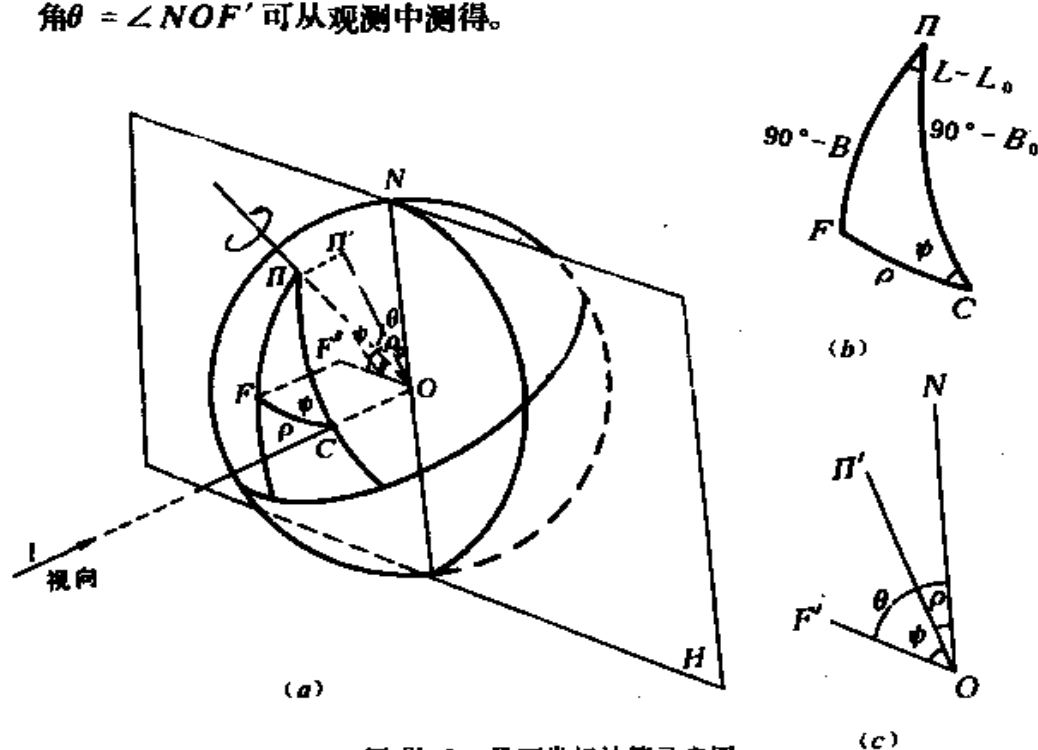


图 IV.2 日面坐标计算示意图

(a) 立体图; (b) 球面三角形; (c) 在 H 平面中

以大圆联结 FC , 则球面三角形 ΠFC 中各元素如下:

$$\begin{aligned} \Pi F &= 90^\circ - B, & \Pi C &= 90^\circ - B_0, & FC &= \rho, \\ \angle F\Pi C &= L - L_0, & \angle \Pi CF &= \phi. \end{aligned}$$

由 IV.2 的 c 图不难得到 $\phi = \theta - \rho$, L_0, B_0 同样可从《中国天文年历》表“太阳球面位置”中查得。利用球面三角形有关性质(II.16)、(II.15)、

(II. 22) 式不难得到如下公式:

$$\begin{aligned} \sin B &= \cos \rho \sin B_0 + \sin \rho \cos B_0 \cos(\theta - \rho), \\ \cos B \sin(L - L_0) &= -\sin \rho \sin(\theta - \rho), \\ \cos B \cos(L - L_0) &= \cos \rho \cos B_0 - \sin \rho \sin B_0 \cos(\theta - \rho). \end{aligned} \quad (\text{IV} \cdot 1)$$

(IV. 1) 式中第二式右端的负号是由于方位角与日面纬度的量度方向相反而引起的, 其中的 ρ 可以通过下面的方法求得。

如图 IV. 3, F 、 C 、 O 分别表示黑子、日轮中心和太阳中心, E 为地球, ρ_0 为太阳视半径, 可从《中国天文年历》表“太阳”查得, 设 $\angle FEC = \rho_1$, 显然 $\rho = \angle FOC$, 故有 $\angle EFO = 180^\circ - (\rho + \rho_1)$

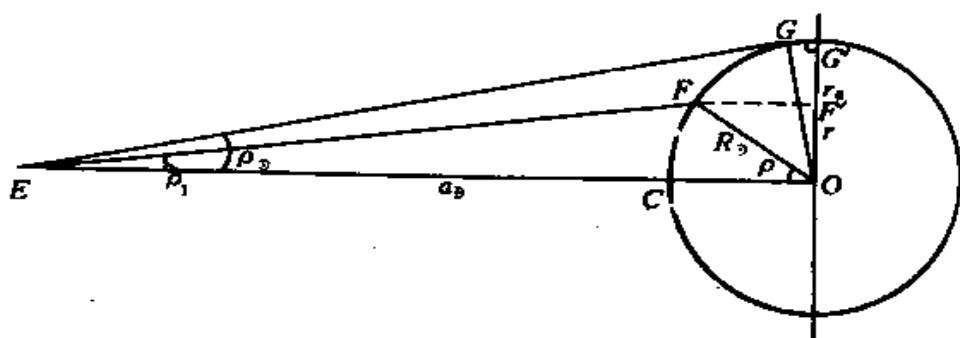


图 IV. 3 求 ρ 的示意图

在 $\triangle FEO$ 中, 有

$$\sin \angle EFC = \frac{a_+}{R_\odot} \sin \rho_1$$

式中 a_+ 为日地距离, $R_\odot$ 为太阳半径, 由于 ρ_1 不会超过 $16'$, 故有

$$\sin \rho_1' \simeq \rho_1' \sin 1'$$

于是

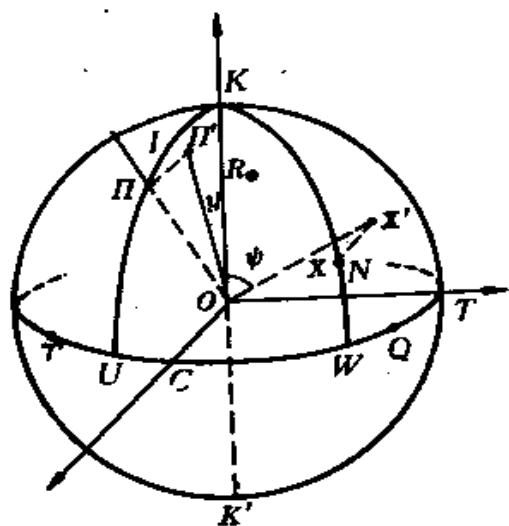
$$\sin(\rho + \rho_1) = \frac{a_+}{R_\odot} \rho_1' \sin 1' \quad (\text{IV} \cdot 2)$$

从图 IV. 3 还可知 $\rho_1 = \frac{OF'}{OG'} \rho_0$ (IV. 3)

上式中的 OF' , OG' 分别是黑子离日轮中心的线距离及日轮像的线大小, 可以直接从太阳像量得。

2. 日轮中心日面坐标 L_0 、 B_0 的推算方法 这两个量在《中国天文年

垂直的平面, $KT K'$ 即为日轮。过 K 、 X 作大圆设与黄道交于 W 。这样 X 的坐

图 IV.5 求日轴方位角 P

标为 $(R_0 \cos \widehat{CW} \cos \widehat{WX}, R_0 \sin \widehat{CW} \cos \widehat{WX}, R_0 \sin \widehat{WX})$, X' 在日轮上的直角坐标为 $(R_0 \sin \widehat{CW} \cdot \cos \widehat{WX}, R_0 \sin \widehat{WX})$, 令 $\psi = \angle KOX'$ 则有

$$\operatorname{tg} \psi = \sin \widehat{CW} \cdot \operatorname{tg} \widehat{KX} \quad (1.7)$$

如果 X 就是平行于地球自转轴的
太阳半径同面的交点 N (因 X 是任意
点, 现 $X \rightarrow N$), 则 $KX = \epsilon$, 即是黄赤
交角, Υ 春分点即为 $\widehat{KXW}$ 的极, 即
有 $\widehat{XW} = 90^\circ$, 而 $\widehat{XC} = \odot + 180^\circ$, 故
有 $\widehat{CW} = 90^\circ - (\odot + 180^\circ)$ 或 $\widehat{CW} =$
 $270^\circ - \odot$, 令

$$x = \widehat{\angle KOX'} = \psi$$

则有

$$\operatorname{tg} X = -\operatorname{tg} \epsilon \cos \Theta \quad (\text{IV.8})$$

令日轴 OP 在日轮上的投影 OP' 与 OK 的交角为 γ , 由 (IV.7) 式可得:

$$\operatorname{tg} y = \sin \widehat{UC} \cdot \operatorname{tg} \widehat{K\Pi}$$

不难证明, 太阳赤道对黄道升交点 Q 即是 $\widehat{K\pi U}$ 的极, 所以 $UQ = 90^\circ$, 而 $\widehat{rQ} = A$, 因此 $\widehat{rU} = \varphi - 90^\circ$ 。

又已知 $\widehat{C} = \odot + 180^\circ$, 故 $\widehat{UC} = 270^\circ + (\odot - \theta)$, 又 $\widehat{KN} = I$, 得

$$\operatorname{tg} \gamma = -\operatorname{tg} \beta \cdot \cos(\Theta - \alpha) \quad (IV.9)$$

面

$$\mathbf{P} = \mathbf{x} + \mathbf{y} \quad (\text{IV.10})$$

主 要 参 考 书

- [1] 戴文赛等, 天文学教程(上), 上海科学技术出版社, 1962年。
- [2] 中国大百科全书·天文学, 中国大百科全书出版社, 1980年。
- [3] 陈载璋等, 天文学导论(上), 科学出版社, 1983年。
- [4] 艾伦编, 杨建译, 物理量和天体物理量, 上海人民出版社, 1976年。
- [5] Beatty. J. K, O' Leary. B, Chaikin. A, The New Solar System, Sky Publishing Corporation, 1982.
- [6] Brandt. J. C, Chapman. R. D, Introduction to Comets, Cambridge University Press, 1981.
- [7] Gehrels. T, Asteroids, The University Arizona, 1979.
- [8] Jones. B. W, The Solar System, Pergamon Press, 1984.
- [9] Kaufmann. W. J, Exploration of the Solar System, Macmillan Publishing Co. Inc. 1978.
- [10] Parker. S. P, McGraw-Hill Encyclopedia of Astronomy, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [11] Pasachoff. J, Kutner. M, University Astronomy, W. B. Saunders Company, 1978.