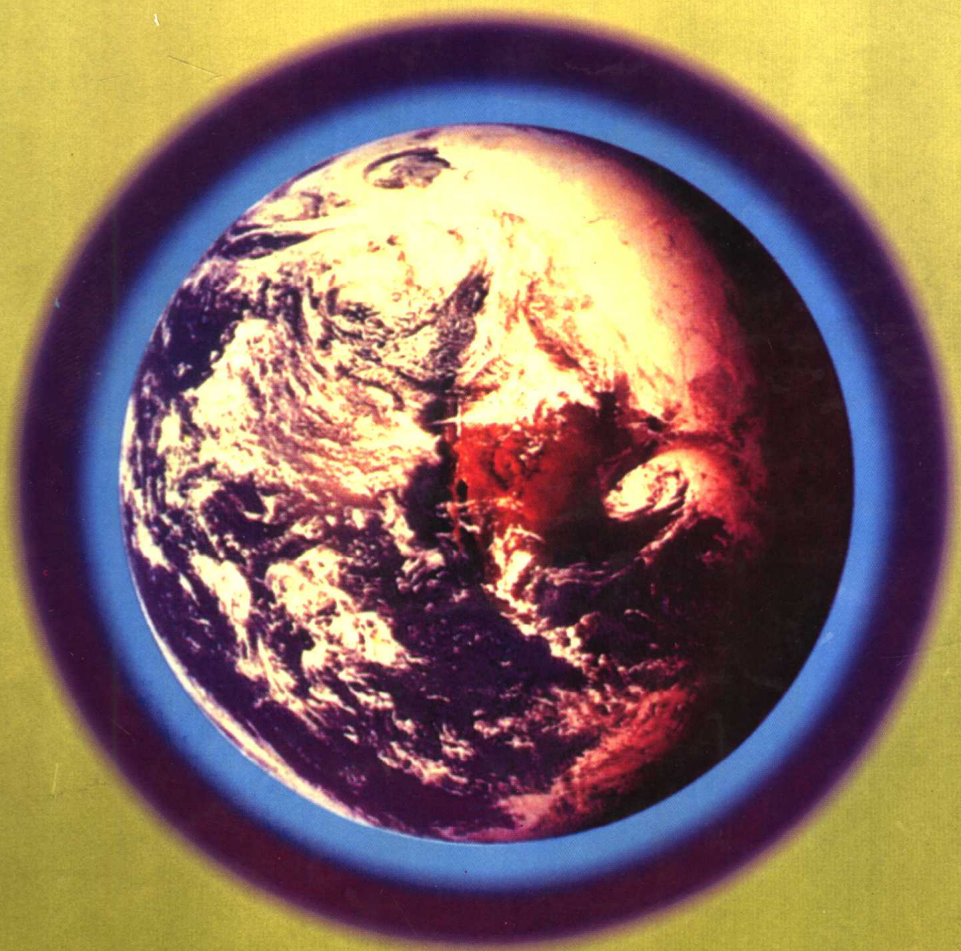


行星科学导论

胡中为 王尔康 编著

南京大学出版社



行星科学导论

胡中为 王尔康 编著

南京大学出版社

行星科学导论

胡中为 王尔康 编著

*

南京大学出版社出版

(南京大学校内 邮政编码:210093)

江苏省新华书店发行 扬中印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.375 字数:409千

1998年8月第1版 1998年8月第1次印刷

印数:1—1000

ISBN 7-305-03045-7/P·113

定价:19.50元

前 言

近 50 年来,由于航天科学技术的飞跃发展,太阳系的探测研究进入了黄金时代。行星等太阳系天体不仅是天文学的研究对象,而且成为地球科学各学科(地质学、地球物理学、地球化学、大气科学、地理学等)、物理学、化学、空间科学及生物学等多学科共同关心和研究的对象。一门新兴的边缘交叉学科——行星科学或行星学(Planetary Science, Planeto-logy)已出现,并迅猛地发展。

太阳系是由太阳、九大行星及其卫星、小行星、彗星等组成的天体系统。除了太阳在专门学科太阳物理学研究外,太阳系的其他天体都是行星科学的研究对象。行星科学研究的内容极其广泛,从内部结构到表面特征及大气结构,从形状、大小、质量、密度、引力场、磁场、运动等宏观物理性质到岩石矿物及有机物成分等化学性质,从极光、闪电、火山喷发等短期过程到地质演化及起源等长期过程。行星科学的研究方法不仅有多种从地球上所作的天文观测,而且有高空和大气外的多种观测,更有飞船莅临行星及其卫星的近距离探测,乃至着陆探测和取回样品到实验室分析,几乎所有可用的现代技术都被用于取得行星等天体的资料,相应地进行各种理论研究以及实验室和计算机模拟研究。行星科学的探测研究成果极其丰硕,展现出一幅幅新的画卷,引人入胜,惊奇不已。例如,过去只知道土星有美丽的光环,而今发现了木星、天王星、海王星各有其奇特的环系,发现土星竟有 20 个大大小小的卫星,木卫一上有正在喷发的活火山。

行星科学何以崛起并受到广泛重视呢?这是因为,无论在基础理论方面还是在实际应用方面,行星科学的研究都有重要意义。很显然地,任何太阳系天体的新信息都会增加对整个太阳系的认识 and 了解,会启迪人们对其他行星或卫星的认识,更重要的是加深人们对地球的了解。例如,金星有以二氧化碳为主的浓厚大气,造成很强的“温室效应”,使其表面达 500°C 的高温,还有几乎笼罩其全球的酸云;火星上经常发生席卷全球的大尘暴,有许多干涸的河床。诸如此类的现象警告人类要注意地球的环境保护。又如,地球经历了严重的演变,其 90% 地表是近 6 亿年以来形成的,而地球科学的很多重大问题要追溯到其形成和演化早期情况才能够得以解决,但地球早期的遗迹早已丧失殆尽;然而,月球、水星和火星等都在不同程度上保留了某些早期遗迹,可作为探讨地球早期的借鉴;尤其是它们表面的古老陨击盆地和陨击坑表明,陨击作用是类地行星的一种重要的普遍过程。因为各行星和卫星跟地球有一些相似性质和经历一些共同的演变过程;又有一些差异,可以把行星的普遍演化过程比作多参数的方程组,地球和行星都能提供一些参数,从而可以得出行星演化的一般规律及各种参数的影响,进而合理地描绘出地球的去、现在和未来。

在国外,很多大学设有行星科学系或专业,然而,我国在这一领域还相当薄弱,必然有一批人才从不同专业走上行星科学的研究领域或者应用行星科学的成果。为促进我国的行星科学的发展、应用和普及,需要有系统的概述行星科学知识的基础教材。本书是作者为理科大学学生开设选修课讲义基础上写成的,可供一学期 60 学时讲授。书中先从总体上叙述太阳系概况和研究方法。接着概述作为行星的地球及其卫星(月球)的基本知识,然后

分别阐述其他各行星及其卫星与环系、小行星、彗星、陨石和宇宙尘的研究成果和研究现状，最后综合地论述比较行星学和太阳系起源。在编著过程中，曾得到很多同志的支持和帮助，书中插图由严家荣、徐富林和郑意春同志绘制，谨此致谢。书中错误和不足之处，望读者指正。

编著者

1997年12月

目 录

前 言

第一章 太阳系概况和研究方法	(1)
1.1 太阳系概况	(1)
1.2 太阳系在宇宙中的地位	(3)
1.3 太阳概况	(4)
1.4 行星的轨道运动	(7)
1.5 行星的基本物理性质	(10)
1.6 行星的结构	(12)
1.7 卫星和环系的一般特征	(14)
1.8 行星科学的研究方法	(16)
第二章 行星地球	(21)
2.1 地球大气圈	(21)
2.2 地球磁场、磁层和辐射带	(27)
2.3 地球的水圈	(29)
2.4 地球的内部结构	(30)
2.5 地球岩石圈	(37)
2.6 大陆漂移、海底扩张和板块构造	(38)
2.7 地质过程	(41)
2.8 陨击坑和冲击变质作用	(42)
2.9 地球的年龄和地质年代表	(46)
第三章 月球	(49)
3.1 轨道和物理特性	(49)
3.2 月貌	(50)
3.3 月球表面物质	(57)
3.4 月球的地质过程	(60)
3.5 月球的地层学	(62)
3.6 月球的内部	(64)
3.7 月球的演化	(67)
第四章 类地行星	(69)
4.1 水星的基本资料	(69)
4.2 水星的表面	(70)
4.3 水星的内部结构和演化史	(74)
4.4 金星的基本资料	(76)
4.5 金星大气	(77)

4.6	金星的表面	(80)
4.7	金星的内部结构和演化史	(84)
4.8	火星的基本资料	(85)
4.9	火星大气	(86)
4.10	火星表面	(89)
4.11	火星内部结构、演化史及生命问题	(96)
4.12	火星的卫星	(98)
第五章	外行星及其卫星和环系	(100)
5.1	木星	(100)
5.2	木星的卫星	(106)
5.3	土星	(112)
5.4	土星的卫星	(116)
5.5	天王星及其卫星	(122)
5.6	海王星及其卫星	(127)
5.7	行星的环系	(133)
5.8	冥王星及其卫星	(139)
第六章	小行星和彗星	(142)
6.1	小行星的命名和轨道特性	(142)
6.2	小行星的物理性质	(145)
6.3	小行星的表面特性和分类	(148)
6.4	小行星的卫星和演化史	(151)
6.5	彗星的命名和轨道特性	(153)
6.6	彗星的形态变化	(156)
6.7	彗星的性质	(158)
6.8	彗星的物理—化学过程与演化史	(160)
6.9	哈雷彗星	(163)
第七章	陨石和宇宙尘	(165)
7.1	陨石的类型	(165)
7.2	陨石的化学成分、矿物和有机物	(170)
7.3	陨石的演化史	(174)
7.4	玻璃陨石	(178)
7.5	宇宙尘的研究方法	(181)
7.6	宇宙尘的研究结果	(187)
7.7	陨冰	(192)
第八章	比较行星学	(194)
8.1	行星的内部结构和磁场	(194)
8.2	类地行星的热演化	(200)
8.3	行星地质学	(202)
8.4	行星大气	(211)
8.5	行星的演化	(216)

第九章 太阳系的起源	(220)
9.1 太阳系起源的基本问题	(220)
9.2 太阳系起源的早期假说	(221)
9.3 星云假说的复兴	(224)
9.4 对太阳系起源的一些新认识	(225)
9.5 几种现代太阳系起源学说	(234)
附录一	(243)
1. 行星的轨道特性.....	(243)
2. 行星的物理特性.....	(243)
附录二 卫星的轨道特性和物理特性	(244)
附录三	(245)
表 1. 太阳系的元素丰度	(245)
表 2. 太阳系核素(同位素)丰度	(246)
附录四 类地行星模式化学成分	(248)
附录五 原生陨石矿物	(249)
附录六 月球和行星探测器	(251)
1. 月球探测器.....	(251)
2. 行星探测器.....	(253)

第一章 太阳系概况和研究方法

太阳系是由太阳、九大行星和它们的卫星、众多的小行星、彗星和流星体以及行星际物质组成的天体系统,除了太阳之外,此天体系统的主要成员是行星,常称作行星系。本章从整体上叙述太阳系的概况,并简述太阳的基本知识以及太阳系在宇宙中的地位,然后介绍行星科学研究的一般方法,以提供全书的背景知识和常用概念及理论基础。

1.1 太阳系概况

古人观察星空,注意到大多数星星的相对位置长期不变,好像嵌在天球上一起东升西落,把它们称作恒星;也注意到五颗亮星在众恒星之间游荡,称作行星,并分别称之为金星、木星、水星、火星和土星。约在公元 140 年,古希腊天文学家托勒密在《天文学大成》中总结了前人对宇宙的看法,提出“地心体系”或“地心说”,认为地球不动地位于宇宙中心,每颗行星在称为本轮的小圆形轨道上匀速转动,本轮中心在称为均轮的大圆形轨道上绕地球转动,又加上其他一些规定,就可以解释行星在众恒星之间的视运动,并推算行星在天球上的视位置。在古代的观测精度不高的情况下,这种描述行星视运动的方法还是相当好的,应当肯定托勒密的历史功绩,只是后来被宗教统治者作为工具而利用,败坏了托勒密的名誉。人类的认识总是不断发展的。波兰天文学家哥白尼总结和分析了前人对日、月和行星的观测资料,并毕生作了大量观测研究,于 1543 年发表了《天体运行论》,提出“日心体系”或“日心说”,得出如下的科学结论:地球也是一颗行星,跟其他行星一样绕太阳公转;日月星辰的东升西落是地球自转的反映;月球是地球的卫星,绕地球转动,并随地球绕太阳公转。这是人类认识史上的一次大飞跃,把自然科学从神学中解放出来。

通过实践检验,日心说得到进一步证实和发展。1609 年意大利著名科学家伽利略第一个用望远镜观测星空,发现了木星的四颗卫星(常称作伽利略卫星)。1781 年英国天文学家威廉·赫歇耳发现天王星,后又发现天王星和土星有卫星。17 世纪初,德国天文学家开普勒分析了第谷的大量观测资料,得出行星运动三大定律。17 世纪 80 年代,英国著名科学家牛顿发现万有引力定律,奠定了天体力学的基础,用以由观测资料推算行星轨道和编算星历表。18 世纪初,英国天文学家哈雷计算出 20 多颗彗星的轨道,第一次成功地预言一颗彗星(哈雷彗星)回归。从 1801 年元旦发现第一颗小行星(谷神星)后,接连发现多颗小行星。年轻的英国天文学家亚当斯和法国天文学家勒威耶各自独立地推算并预报了海王星,于 1846 年由德国天文学家伽勒找到。预报哈雷彗星回归和海王星的成功都是科学史上的奇迹。经过推算和长期搜寻,终于在 1930 年由美国天文学家汤博发现了冥王星。太阳系的概
念经过几代学者的探索就这样建立和扩充了。

1755 年德国青年哲学家康德、1796 年法国科学家拉普拉斯先后独立地提出了太阳系起源的两个星云假说,论述了太阳系有其形成演化的发展历史,在宇宙万物不变的僵化自然观上打开了第一个缺口,导致人类认识史上又一次飞跃。

太阳系的早期研究,主要是观测行星等天体的位置和计算轨道,也描述用望远镜看到的特征。从上世纪以来,由于照相术、光度测量和分光光学的发展,天体物理学兴起,开始了太阳系天体的性质和过程的观测研究时期。本世纪以来,现代技术和理论的发展,在太阳系天体的观测研究方面取得了很多重要发现和成果。然而,行星和卫星等天体毕竟离我们很远,在望远镜中也仅仅看到不大的视面,难于分辨细节。近 30 年来,一方面地面观测技术有了更大发展(例如,红外和射电观测技术),更重要的是航天技术的发展,探测器已飞临除冥王星之外的八大行星及其卫星,作近距探测,对月球、火星、金星作了着陆考察,取得大量的新资料。

太阳是太阳系的中心天体,太阳质量(以符号 $M_{\odot}$ 表示)占整个太阳系总质量的 99% 以上,在它的万有引力作用下,太阳系其他天体都绕它公转(图 1.1)。太阳系有九大行星,按离

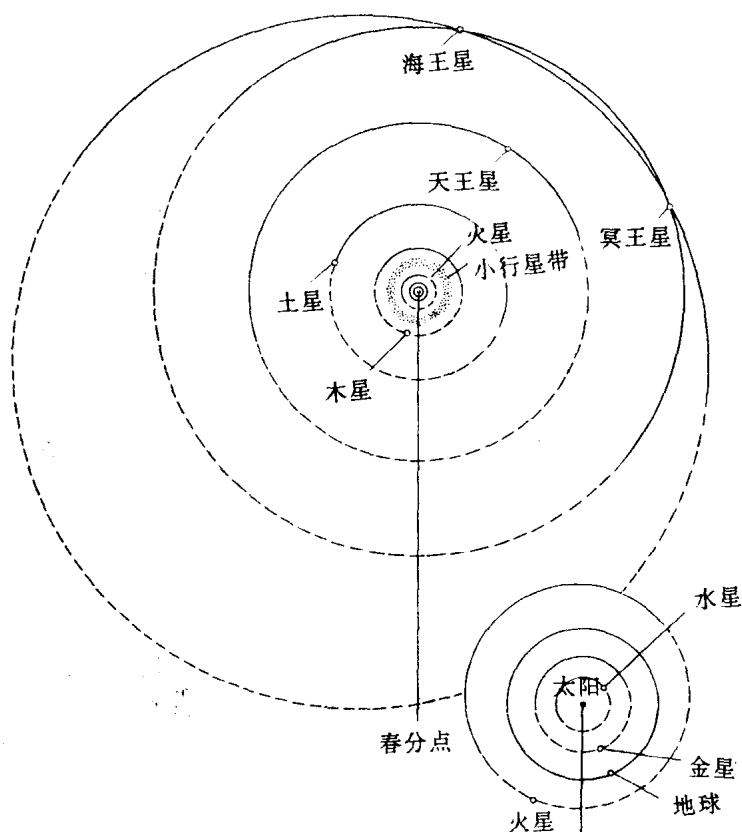


图 1.1 行星的公转轨道(黄道面投影)

太阳平均距离由近到远,它们是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。除了水星和金星没有卫星之外,其余七颗行星都有卫星,卫星绕行星转动,同时随行星绕太阳公转。地球有一颗天然卫星——月球,火星有 2 颗卫星,木星有 16 颗卫星,土星有 21 颗(或 23 颗)卫星,天王星有 15 颗卫星,海王星有 8 颗卫星,冥王星有 1 颗卫星,至今已发现的卫星总数达 64 颗(或 66 颗)。行星和卫星都有自转。除了土星有美丽的光环外,近年还发现木星、天王星和海王星都有由小物体组成的转动环系。行星和卫星在大小、质量和性质上参差不一,最大的是木星,其半径是地球的 11.209 倍,其质量约为地球的 318 倍,平均密度为

1.33 克/厘米³(或吨/米³);其次是土星,其半径和质量分别是地球的 9.449 倍和 95.2 倍,平均密度为 0.69 克/厘米³;冥王星是九大行星中最小的,其半径和质量分别为地球的 0.18 倍和 0.0022 倍,平均密度为 2.03 克/厘米³;地球是九大行星中较小的,其半径为 6378 公里,质量为 5.976×10^{24} 千克;其平均密度(5.52 克/厘米³)是行星中最大的;最大的卫星是木卫三,其半径为 2631 公里(大于水星和冥王星),其质量为 1.48×10^{23} 千克(也大于冥王星),平均密度为 1.94 克/厘米³;火卫二是很小的,平均半径约 6 公里,质量为 1.8×10^{15} 千克,平均密度约 1.7 克/厘米³。图 1.2 给出太阳、行星及某些卫星的大小比较。

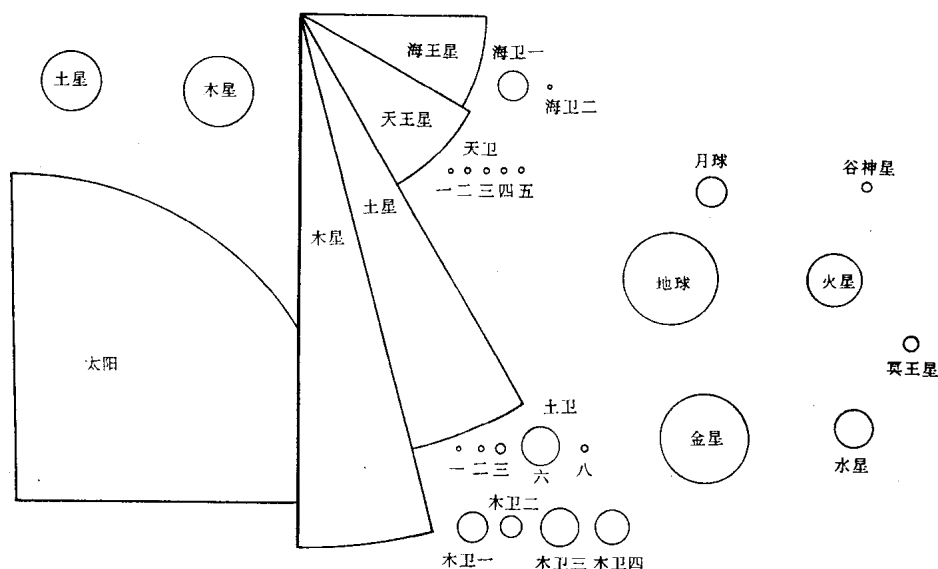


图 1.2 太阳与巨行星(左)、行星与卫星(右)的大小对比

小行星都是独立绕太阳公转的固态小天体,大多在火星与木星的轨道之间,称为小行星带。最大的小行星是谷神星,其直径约 1000 公里,而小的小行星甚至只有 1 公里大小。已算出轨道并编号的小行星有 4000 多颗,估计实际数目还要多得多。有些小行星还有伴星或小卫星。彗星是绕太阳公转的另一类小天体,其主体是脏雪球彗核,大小一般在 10 公里以下,多数在扁长轨道上绕太阳公转,当走入太阳系内部时,受到较强的太阳辐射,从彗核表层蒸发出气体和尘埃,形成体积庞大的彗发和长长的彗尾。已观测到的彗星有 1600 多颗。多数彗星来自离太阳约 5 万到 10 万天文单位(天文单位是太阳到地球的平均距离,它等于 1.4959787 亿公里)的彗星库(常称作奥尔特云),估计那里有上千亿颗彗星。流星体是绕太阳公转的更小物体,实际上最小的行星和彗星跟大的流星体之间并没有明确界限。流星体的质量为 10^{-16} 到 10^8 克,微小的流星体又称作“行星际尘”或“宇宙尘”。当流星体高速闯入地球大气时,会燃烧发光,形成流星现象,烧不尽的残骸落到地面而成为“陨石”。行星际还有极稀疏的气体、质子和电子等粒子以及电磁场,统称作行星际物质。

1.2 太阳系在宇宙中的地位

九大行星所占的空间范围不到 50 天文单位,奥尔特云达 10 万天文单位,太阳系的最大引力范围(“希尔范围”)为 23 万天文单位,再往外就是恒星际空间了。离我们最近的恒星是

半人马(星)座的比邻星,距离为 27 万天文单位或 4.22 光年(1 光年=63240 天文单位=9.4605×10¹²公里)。

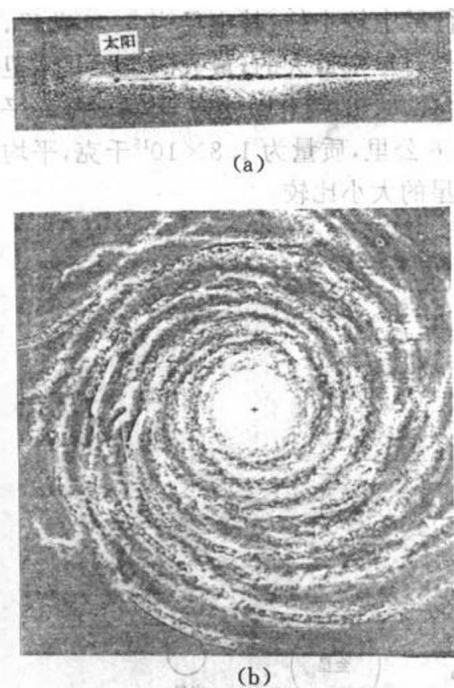


图 1.3 银河系结构(示意图)
(a)侧视 (b)俯视

太阳系是更大天体系统——银河系的成员。银河系的物质密集部分称作“银盘”,其外形呈现运动员所掷铁饼状(图 1.3),直径约 85000 光年,厚约 2000 光年;银盘中央的扁球状部分称作“核球”,直径约 15000 光年,其中心致密区称作“银核”。包围银盘的是近球形的“银晕”,物质密度较小。银晕外面还有物质密度更小的“银冕”,直径约 68 万光年。银盘有“旋臂”结构,是气体、尘埃和年轻恒星密集的地方。银河系有 4 条旋臂和几条短的臂段。

从观测见到的物质推算出银河系总质量约为太阳质量的 2 万亿倍,其中约有 3 千亿颗恒星,占总质量的 90%,而由气体和尘埃组成的星际物质约占 10%。近年还从其引力影响推断出银河系外部存在不可见的暗物质,其质量可达可见物质的 4 倍。因此,银河系总质量超过 6×10¹¹M_⊙。这些暗物质是什么,现在还不清楚。

太阳位于银盘中央平面——银道面附近,离银河系中心(“银心”)约 25000 光年,在银道面北约 26 光年,在猎户旋臂附近。太阳带领行星系统银心转动,速度约 250 公里/秒,约 2 亿年转一大圈。正是由于太阳系处于这样的地位,我们看到的银盘在夜空呈现为亮带的银河或天河。太阳附近的银河系物质(包括恒星和星际物质)的平均密度约 8.8×10⁻²⁴克/厘米³。

宇宙有很多银河系级别的天体系统,称为星系。离我们最近的星系是大麦哲伦云和小麦哲伦云,距离我们分别为 17 万和 21 万光年,它们与银河系一起组成三重星系,星系又组成星系群、星系团等更大的天体系统。

1.3 太阳概况

虽然太阳不属于行星科学的研究对象,但是行星系的状况跟太阳有密切关系。因此,需要了解一些太阳的基本知识。

太阳是一颗典型的恒星,其内部进行着氢聚变为氦的热核反应,产生巨大的能量,发出光和其他辐射。太阳的基本资料列于表 1.1,其结构示于图 1.4。

表 1.1 太阳的基本资料

质量(M _⊙)	1.9891×10 ³⁰ 千克	表面温度	5770K
半径(R _⊙)	696000 公里	表面重力加速度	274 米/秒 ²
平均密度(ρ _⊙)	1.40 克/厘米 ³	表面逃逸速度	617.7 公里/秒
光度(总辐射功率)(L _⊙)	3.83×10 ²⁶ 焦耳/秒	中心密度	约 160 克/厘米 ³
自转周期 { 赤道 极区	25.4 天	中心温度	约 1.5×10 ⁷ K
	35 天	年 龄	约 50 亿年

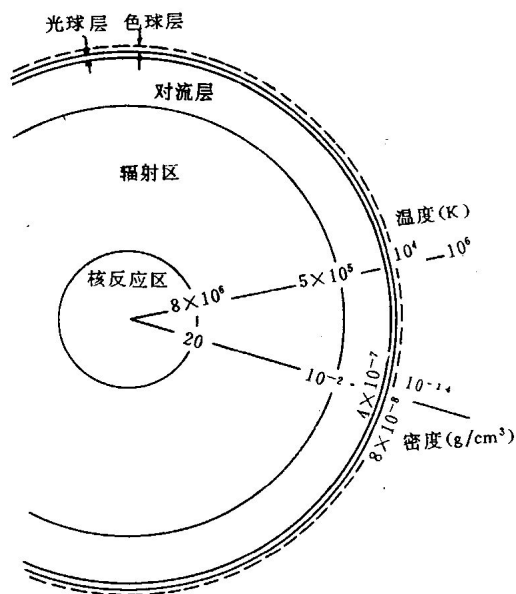
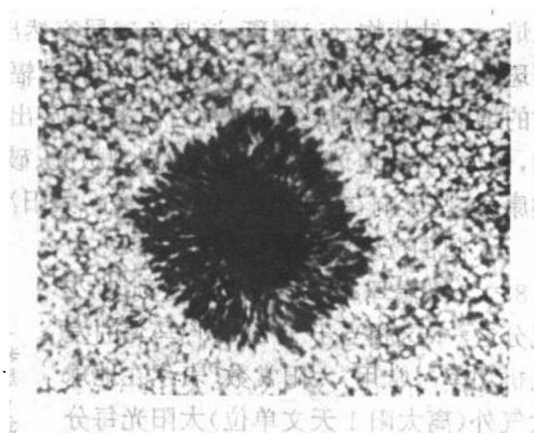


图 1.4 (a) 太阳的结构



(b) 太阳黑子与光球米粒

太阳的结构从中心向外依次分为 6 层：(1)核反应区，其范围从中心到 $1/4$ 太阳半径 ($R_{\odot}$) 左右，此区所含质量占太阳质量一半以上，正进行氢聚变为氦的热核反应(常称作氢燃烧)，产生巨大的能量；(2)辐射区，范围从 $1/4 R_{\odot}$ 到 $4/5 R_{\odot}$ ，其物质吸收辐射并且再发出辐射，把能量向外转移；(3)对流区或对流层，主要通过对流方式把内部能量向外转移。对流区以上称作太阳大气；(4)光球层，厚约 500 公里，我们观测到的太阳辐射绝大部分来自此层，我们看到的日面或日轮就是此层，太阳半径就是指此层到日心的距离；(5)色球层，厚约 2000 公里，物质稀疏透明，此层的辐射仅约为光球辐射的几千分之一；(6)日冕，这是太阳最外层的极稀疏大气，延伸到几百 $R_{\odot}$ 处，此层的辐射仅为光球的百万分之几。由于色球和日冕的辐射比光球弱得多，平时肉眼看不到这两层，仅日全食时(日轮被月球遮住)才能见到。

太阳的物质密度自中心向外减少，中心密度约 160 克/厘米³，到光球外界减至 3×10^{-8} 克/厘米³，到色球顶减至 10^{-14} 克/厘米³，日冕的物质密度更小。太阳的温度先是从中心 (1.5×10^7 K) 向光球 (5770 K) 递减，再向外反而递增，色球层温度升到上万度，到日冕又升到百万度。太阳各层次之间一般没有严格界限，而是逐渐过渡的。

太阳通常是较宁静的，但也常出现各种程度的“太阳活动”，表现为以下几种：(1)黑子，这是日面上暗于光球背景的斑点。小黑子大小约公里，刚可辨认。大黑子可达 20 万公里，其中央是暗黑的“本影”，外部是稍亮些的“半影”，常呈螺旋形的精细结构。黑子的温度比光球低 1000 到 1500 度。黑子有较强的磁场，强度为 0.1~0.5 特斯拉。黑子有的单个出现，也常成群出现，一般存在几天，也有存在几个月的。黑子数目有 11 年的周期变化，而黑子磁场的极性则有 22 年的周期变化。(2)光斑，这是光球层的较亮小区域，大小为几千至几万公里，温度比光球高 1000 度左右，寿命一般为几小时到几天，光斑数目也有 11 年的周期变化。(3)谱斑，这是发生在色球层的活动，常在单色光色球照片上见到亮谱斑和暗谱斑，它们类似于光球层的光斑和黑子，大小为几千到几十万公里，寿命为几个月。有些谱斑跟黑子有联系。谱斑的面积和亮度也有 11 年的周期变化。(4)日珥，这是从色球向上的突出物，好似喷出的火焰，大小不一，一般可达几万公里高度，形态多样，有喷泉状的、拱桥状的等。有些日珥是宁静

的,有些是活动的,还有爆发式变化的。在日轮外看到的日珥是亮的,而在日面上的日珥因暗于光球而呈现为“暗条”。日珥活动也有 11 年的周期变化。此外,在色球边缘常有大量的小火焰——针状物。(5)耀斑,这是色球层突然出现的剧烈爆发现象,在几秒到几分钟内往往在谱斑处突然增亮 10 倍以上,同时伴有光学辐射、射电(即无线电辐射)、X 射线及高能粒子抛射的增强。耀斑常持续几分钟后消失,可放出能量 $10^{24} \sim 10^{26}$ 焦耳。太阳活动对地球有很大影响,例如,引起地球磁场的扰动、出现极光、破坏电离层并干扰短波通讯,也影响气象和人类健康,这些影响在“日地关系”中研究。太阳活动对其他行星也会有类似的影响。

太阳的光度(即总辐射功率) $L_{\odot}$ 为 3.83×10^{26} 焦耳/秒,地球仅接受到其 22 亿分之一(这相当于 5.2×10^{23} 马力的发电机功率)。常用“太阳常数”表示在地球大气外(离太阳 1 天文单位)太阳光每分钟垂直照射 1 平方厘米表面的能量,其值为 1.89 卡/厘米²·分钟。由于地球大气的吸收,地面实际接收的太阳能要少一半。近年精确测量表明,“太阳常数”(太阳光度)随时间变化(跟太阳活动有关),并用“太阳辐照”代替“太阳常数”,太阳辐照平均值为 1373 瓦/米²,1967~1980 年每年增加 0.029%,1980 年后每年减少 0.018%。

太阳的辐射可分为两种,即电磁(波)辐射和粒子辐射。电磁辐射包括可见光、红外线、紫外线、X 射线及射电等各种波长的辐射,其能谱如图 1.5 所示,变化大的是远紫外到 X 射线及射电。太阳的粒子辐射就是它抛出的带电粒子流(常称作为“太阳风”)。太阳风的主要成分是质子、电子和 α 粒子(即氦核)。在地球轨道附近,太阳风的电子和质子的数密度都约有 8 个/厘米³,速度约 450 公里/秒,质子温度约为 4×10^4 K,电子温度约 $1 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5$ K。太阳风还耦合着磁场,其强度约 5×10^{-5} 高斯;此磁场也常称作行星际磁场,往往呈现为扇形结构(图 1.6),相邻的扇形磁场有相反的极性。太阳活动(尤其发生耀斑)时,太阳风的粒子数目和速度都增大(高速太阳风)。

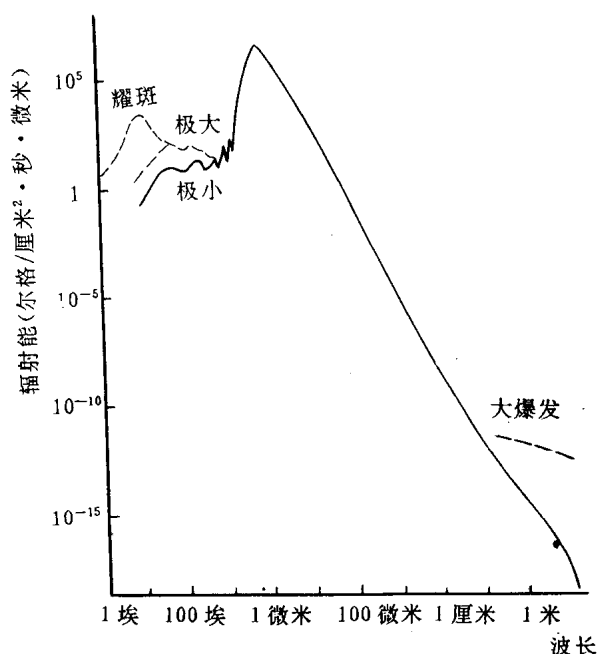


图 1.5 太阳(电磁)辐射能谱

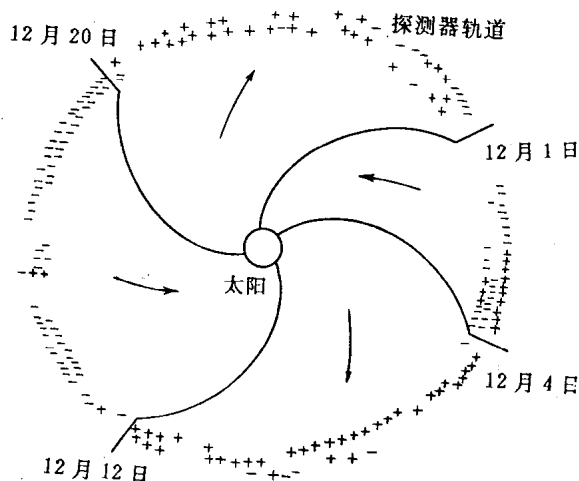


图 1.6 行星际磁场扇形结构

1.4 行星的轨道运动

一、开普勒定律和牛顿万有引力定律

17 世纪初,德国天文学家开普勒继承了第谷·布拉赫的长期观测资料,经过分析和推算,总结出行星运动的三定律:(1)行星绕太阳公转的轨道是椭圆,太阳位于椭圆的一个焦点上;(2)连结太阳到行星的直线(向径)所扫过的面积跟所用时间成正比,或单位时间扫过的面积相等。这称作面积定律(图 1.7);(3)行星绕太阳公转周期的平方跟轨道半径的立方成正比。

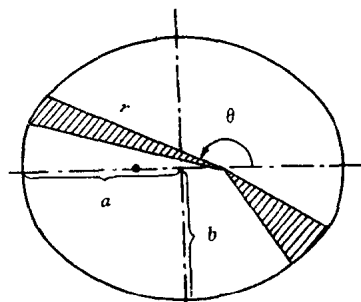


图 1.7 行星椭圆轨道和面积定律

牛顿从开普勒定律导出了万有引力定律,奠定了天体力学的理论基础,并用于计算行星的轨道。按照万有引力定律,质量为 m_1 和 m_2 的两个天体,距离为 r 时,它们之间的引力为

$$f = Gm_1m_2/r^2 \quad (1.1)$$

其中, $G=6.6720 \times 10^{-13}$ 牛顿·厘米²/克² 是万有引力常数。

二、轨道要素

由于行星的质量都远小于太阳质量,且距离差别不太大,因而行星之间的引力远小于太阳对每颗行星的引力。于是,作为很好的近似,可以忽略行星之间的引力,而只考虑每颗行星在太阳引力作用下的运动,也就是作为天体力学的二体问题来处理。从万有引力定律可以导出行星相对于太阳的运动方程,它是二阶微分方程组,其解含有 6 个独立的积分常数,通常用行星的 6 个轨道要素来表示。从运动方程解得出,行星轨道面是平面(地球轨道面称作“黄道面”);轨道是椭圆(图 1.7),其方程是

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta} \quad (1.2)$$

太阳位于椭圆的一个焦点上,这正是开普勒第一定律。6 个轨道要素如下:

(1) 轨道半长径 a , 即椭圆的半长轴,它表示轨道的大小,常称作行星到太阳的平均距离。

(2) 轨道偏心率 e , 它是焦点到椭圆中心的距离与半长径之比,即 $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ (b 为半短轴,见图 1.7),它表示轨道的形状。

(3) 轨道(面)倾角 i , 常取行星轨道面对黄道面的倾角(图 1.8)。

(4) 升交点黄经 Ω 。行星轨道面与黄道面的交线称作交点线,行星从南向北运动过交点线上的“升交点”。从太阳到春分点(春分点是地球赤道面与黄道面交线上的升交点)方向与到行星轨道升交点方向的交角,称作升交点黄经。轨道倾角 i 和升交点黄经 Ω 表征行星轨道

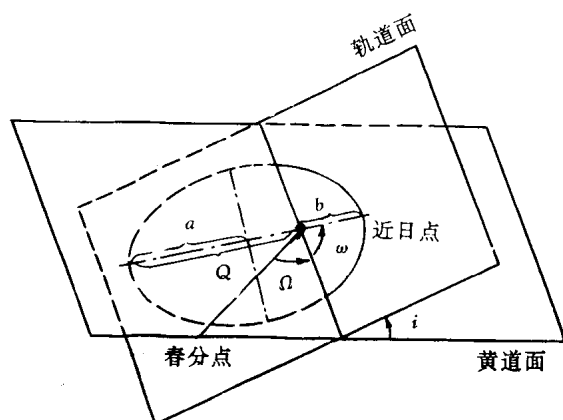


图 1.8 行星轨道要素

于太阳的引力作用,因而称作摄动),行星轨道要素并不是不变常数,而是随时间缓慢变化的,精确的行星轨道要素表都注明相应时刻(称为“历元”)的瞬时(或吻切)要素,例如,表 1.2 给出 1992 年 6 月 27.0 日历元的行星吻切轨道要素。

表 1.2 行星的轨道要素(1992 年 6 月 27.0 日)

行 星	轨道半长径 a		公转周期		偏心率	倾角	升交点 黄经	近日点 黄经	历元时 平黄经
	天文单位	公里	恒星周期	会合周期(日)					
水 星	0.387	57.9	87.97 日	116	0.206	7.0	48.2	77.3	180.7
金 星	0.723	108.2	224.70 日	584	0.007	3.4	76.6	131.7	104.8
地 球	1.000	149.6	365.26 日	...	0.017	0.0	—	102.7	275.4
火 星	1.524	227.9	686.98 日	780	0.094	1.8	49.5	335.9	357.1
木 星	5.203	778.4	11.86 年	399	0.048	1.3	100.4	15.6	166.2
土 星	9.522	1424.5	29.46 年	378	0.054	2.5	113.6	93.5	318.0
天 王 星	19.201	2872.4	84.01 年	370	0.048	0.8	74.0	171.8	280.8
海 王 星	30.074	4499.0	164.79 年	367	0.007	1.8	131.7	50.6	288.2
冥 王 星	39.725	5942.8	247.69 年	367	0.253	17.1	110.2	223.7	227.8

经常还用另一些量表述行星的轨道特征,它们可以由 6 个轨道要素算出来,例如

$$\text{近日距} \quad q = a(1-e) \quad (1.3A)$$

$$\text{远日距} \quad Q = a(1+e) \quad (1.3B)$$

$$\begin{aligned} \text{公转周期} \quad T &= \frac{2\pi a^{3/2}}{[G(M_{\odot} + m)]^{1/2}} \\ &= \left[\frac{(M_{\odot} + m_{\oplus})}{(M_{\odot} + m)} \right]^{1/2} a^{3/2} (\text{年}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

其中, $M_{\odot}$ 、 $m_{\oplus}$ 和 m 分别是太阳、地球和行星的质量, a 为行星轨道半长径(以天文单位表示)。(1.4)式是修正的开普勒第三定律,若忽略比 $M_{\odot}$ 小得多的 $m_{\oplus}$ 和 m ,则(1.4)式就简化为 $T^2/a^3 = \text{常数}$,这就是开普勒第三定律。

三、行星的轨道速度、角动量和能量

从行星运动方程可得出一个积分——“活力公式”,即行星离太阳 r 远时的轨道速度 v 的公式:

$$v^2 = G(M_{\odot} + m)(2/r - 1/a) \quad (1.5A)$$

由于行星轨道椭圆很接近于圆, $r \approx a$, 所以近似地, 有

$$v^2 \approx G(M_{\odot} + m)/a \approx v_{\oplus}^2 / a \quad (1.5B)$$

这里, $v_{\oplus} = 29.79$ 公里/秒是地球的平均轨道速度, 而行星轨道半长径 a 应以天文单位表示。

从行星运动方程还可导出行星轨道运动的角动量(J)公式

$$J = \frac{mM_{\odot}}{m + M_{\odot}} \sqrt{G(M_{\odot} + m)a(1 - e^2)} \quad (1.6A)$$

J 为矢量, 其方向与向径 r 、速度 V 成右手螺旋。考虑到 $m \ll M_{\odot}$, $e \ll 1$, 近似地得到

$$J \approx m \sqrt{GM_{\odot}a} \quad (1.6B)$$

开普勒第二定律(面积定律)的物理意义就是轨道角动量。

行星轨道运动的动能为 $mv^2/2$, 引力势能为 $-G(M_{\odot} + m)m/r$, 借助活力公式(1.5), 可得出行星轨道运动的总能量 E

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{G(M_{\odot} + m)m}{r} = -\frac{G(M_{\odot} + m)m}{a} \quad (1.7)$$

公式(1.2)、(1.5)和(1.7)是非常有用的基本公式, 它们不仅适用于椭圆轨道, 也适用于双曲线和抛物线轨道, 但(1.2)式中的分子应改为 $2a$ 代替 $a(1 - e^2)$ 。事实上, 从运动方程可得出三种圆锥曲线解——椭圆、抛物线和双曲线, 有些彗星的轨道就是抛物线或双曲线。三种轨道的主要特性列于表 1.3 和图 1.9。

表 1.3 三种轨道的特性

类型	a	e	E
椭圆	$a > 0$	$0 < e < 1$	$E < 0$
抛物线	$a = \infty$	$e = 1$	$E = 0$
双曲线	$a < 0$	$e > 1$	$E > 0$

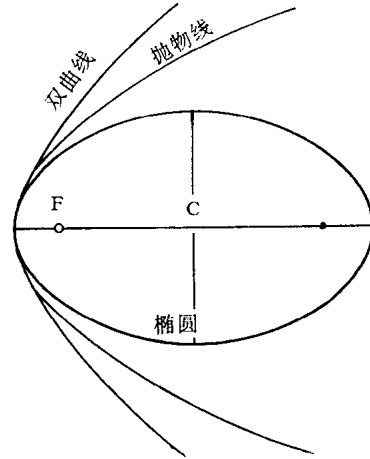


图 1.9 三种轨道

四、行星轨道运动的一般特征

行星轨道要素的变化是缓变的, 主要是周期性变化, 还不能肯定长期变化是否存在, 但至少可以说长期变化是微小的。从行星的平均轨道来看, 有以下的一般特征: (1) 近圆性, 九大行星的轨道偏心率 e 值都很小, 轨道近于圆 ($e = 0$); (2) 共面性, 各行星的轨道倾角 i 值都很小, 轨道面都与黄道面相近, 而且太阳的赤道面与黄道面交角也不大 ($7^\circ 15'$); (3) 同向性, 各行星的轨道运动方向都跟地球公转同向, 而且跟太阳自转方向相同; (4) 距离规律或提丢斯—波得定则, 行星轨道半长径有下面的近似经验关系,

$$a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2} \quad (\text{天文单位}) \quad (1.8)$$

式中 n 为行星的序号: 水星 $n = -\infty$, 金星 $n = 2$, 地球 $n = 3$, 火星 $n = 4$, 木星 $n = 6$, 土星 $n = 7$, 天王星 $n = 8$, 海王星 $n = 9$, 冥王星 $n = 10$, 但后两颗行星的计算 a_n 值与观测值很不符合。距离规律也可用其他经验公式表示, 如 $a_{n+1}/a_n \approx 1.73$ 。