



北京市高等教育精品教材立项项目

PLANETARY SCIENCE

行星科学

焦维新 邹 鸿 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目

行星科学

焦维新 邹 鸿 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

行星科学/焦维新,邹鸿编著. —北京:北京大学出版社,2009.7

ISBN 978-7-301-15465-6

I. 行… II. ①焦… ②邹… III. 行星物理学 IV. P185

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 116502 号

书 名: 行星科学

著作责任者: 焦维新 邹 鸿 编著

责任编辑: 王树通

标准书号: ISBN 978-7-301-15465-6/P·0070

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021 出版部 62754962

电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

印刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 527 千字 18 页彩插

2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

前言

行星科学是关于行星系统的科学。所谓行星系统,是指围绕太阳运行的行星及其卫星、矮行星、小行星、流星体、彗星和行星际尘埃。行星科学是与许多学科有关的交叉学科,涉及空间科学/等离子体物理学、天文学/天体物理学、地球物理学/地质学、大气科学、生命科学和化学。行星科学研究的主要内容包括行星系统的运动学和动力学特性、物理和化学特性、太阳辐射变化对行星系统的影响;行星表面形态与内部结构、行星大气层与电离层、行星磁场与磁层、行星的卫星与环;彗星的结构与演变;行星比较学。近年来,行星科学研究还扩展到太阳系外行星。

笔者近年来主讲本科生的“太空探索”和研究生的“空间科学与应用概论”课程,这两门课程都不同程度地涉及行星科学的知识。“空间科学与技术”专业于 2004 年成立后,新的教学计划增设了“行星科学概论”课程,因此笔者在讲授上述两门课程的同时,一直为开设新课做准备,此为其一。

促使笔者下决心编写“行星科学”教材的另一个因素是我国探月计划的进展。2007 年 10 月 24 日,我国发射了第一颗月球探测卫星“嫦娥 1 号”。随着探月计划的实施,探测火星、小行星以及更远的太阳系天体,已经引起有关部门和科技人员的关注。在这种情况下,及时编写出既适合教学,又能满足广大科技人员需要的教材,是北京大学空间科学与技术专业教师义不容辞的任务。

行星科学的内容非常丰富,但作为本科生教材,究竟选择哪些内容,遵循什么样的体系,如何掌握难度,是我们编写教材过程中一直在思考的问题。

近年来,国外出版了许多关于太阳系方面的著作,这些著作充分反映了太阳系探索的新成果。《太阳系百科全书》(*Encyclopedia of the Solar System*)(第二版)几乎包含了有关太阳系所有的科学知识,汇集了当代太阳系探测的最新成果。该书可认为是高级科普书,适合广大科技人员参考,也可以作为相关学科领域的教学参考书。《太阳系引论》(*An introduction to the Solar System*)和《今日天文学》(*Astronomy Today*)则是图文并茂、深入浅出地介绍了太阳系天体的基本知识。《行星科学》(*Planetary Sciences*)、《太阳系物理学》(*Physics of the Solar System*)以及《太阳系物理与化学》(*Physics and Chemistry of the Solar System*)则从物理学和化学的基本原理出发,系统地阐述了太阳系天体的物理学和化学特性,具有相当的深度。在《行星科学》每章之后,还有大量的习题和思考题,比较适合研究生和专门研究人员参考。第三版的《太阳系》(*The Solar System*)将最新探测结果与基础知识有机结合,内容系统、难度适中,比较适合大学本科生参考。除了上述综合的著作外,还出版了一些专门介绍某个天体研究成果的著作,如《木星》(*Jupiter*)、《探索水星》(*Exploring Mercury*)、《金星》(*Venus*)、《探索月球》(*Lunar Exploration*)、《重返月球》(*Return to the Moon*)、《月球基地手册》(*Lunar Base Handbook*)以及《火星上的水和生命》(*Water on Mars and Life*)等。《木星》全面系统地反映了“伽利略”飞船的探测成果;《探索水星》在概述了“水手 10 号”飞船探测结果的同时,对水星的轨道特征描述得非常详尽;《重返月球》对月球氦 3 资源及其开发利用问题进行了深入描述;

而《月球基地手册》则系统地介绍了人类目前在月球基地研究方面所取得的成果。单从书名《火星上的水和生命》我们就能知道该书的特色,确实,如果想要了解火星是否存在液体水、什么历史时期可能存在液体水、如何寻找液体水和生命,从该书中我们可以了解很多知识和线索。另外,国外著名的学术刊物 *Science* 和 *Nature* 也都及时地刊登了有关行星探测和学术研究的最新成果。这些著作和学术论文无疑为本教材的编写提供了丰富的资料。

在阅读和分析上述著作的基础上,本书以第三版的《太阳系》为基本框架,吸收了其他著作最有特色的成果,参考了 *Science* 和 *Nature* 上的一些论文,根据教学要求,重新组织内容。

全书分十章。第一章是引言,概括地介绍了太阳系的基本特征、行星科学研究的对象、内容和方法,特别介绍了后续章节中经常遇到的一些基本概念。第二至第六章论述类地行星和月球。作为太阳系乃至宇宙最有特色的行星地球,有维持生命存在的必要条件,那就是液体水、空气及适宜的温度。本部分突出论述了大气层、液体海洋以及二者间的相互作用,此外,还系统地描述了地球内部结构、表面形态、地磁场、电离层和磁层。这些内容也是其他行星涉及的内容,只有系统地了解了地球,才能将行星与地球做比较研究。在论述其他行星时,所述内容不完全与地球的雷同,而是侧重于各自特点。如水星围绕密度大、磁场强做文章,金星则突出厚重大气层以及大气层与地表的相互作用。火星一直是人类探索太阳系的重点目标,在介绍一般特征的基础上,突出了火星液体水的历史、异常的磁场和气候变化特征。月球是人类当前探测与研究的重点,中国“嫦娥1号”的成功发射,标志着人类对月球的探测与研究进入了深入发展的新阶段。人类探测月球已经取得了哪些主要成果?未来月球探测的科学目标是什么?怎样才能实现这些科学目标?为什么要建立月球基地?月球基地建设需要解决哪些问题?月球上的氦3是怎样分布的?如何获取这类资源?这些问题是本部分所要回答的主要问题。第七和第八章介绍类木行星及其卫星,分析了这类行星奇特的大气层、形态各异的环和千奇百怪的卫星,重点加强了对可能存在生命的几颗卫星的描述,如泰坦和土卫二。第九章是关于太阳系中的小天体,主要包括矮行星、小行星和彗星。强调了探测和研究小行星及彗星的方法和意义。第十章是行星科学的前沿问题,包括开珀带、奥尔特云天体以及太阳系外行星的探测与研究方法。

与国内外目前已经出版的有关行星科学著作相比,本书具有以下特点:(1)作为本科生的教材,注意了内容的循序渐进,各章之间的衔接,理论体系的一致性。(2)吸收与借鉴了相应著作最具特色之处,取百家之长,为我所用。如《太阳系百科全书》数据的完整性与权威性、《火星上的水和生命》一书对火星地表下含水量的分析方法、《太阳系》对类木行星大气层特点的分析与论述等。(3)比较系统地介绍了行星探测的历史、现状、未来以及方法和技术问题。阅览全书后,读者对深空探测的方法和技术将有全面的认识。(4)突出重点而又不失系统性。月球、金星、火星以及可能存在生命的木星的卫星欧罗巴、土星的卫星泰坦和土卫二是当前关注的热点,也是本书的重点。在强调这些热点问题的同时,也比较系统地介绍了类木行星和开珀带天体。(5)对行星的大气层、电离层和磁层进行了较详细的分析和论述。(6)充分考虑到不同类型读者的需求,阅读内容便于取舍。在每章的概述部分,比较全面地介绍了该天体的基本特征,对于从事深空探测的工程技术人员和科普爱好者,阅读这部分内容是容易的,而且也基本达到了全面了解各类天体基本特征的目的。而对于学生和与行星科学研究有关的学者,则可在在此基础上深入阅读后面层层展开的内容。

该书可作为空间科学和天文学专业的教材,也可作为大学理科各类专业二年级以上学生

的通选课教材,可供从事深空探测的工程技术人员参考,对广大科普爱好者也是一本很好的读物。

本书的火星大气层与电离层以及金星电离层部分由邹鸿编写,其他章节由焦维新编写。焦维新还选编了全书的图片,并对全书文字进行了统稿。

在编写本书过程中,参考了上述许多著作和 *Science*、*Nature* 等学术刊物的论文,特别是引用了这些文献中的大量图形,作者对这些书的编辑、作者表示衷心的感谢。

由于本书内容涉及面广,加之作者对一些问题的认识还比较肤浅,因此缺点甚至错误之处在所难免,希望读者批评指正。

焦维新 邹鸿

2009年3月

目 录

第一章 引言	(1)
1.1 太阳系构成和基本特性	(1)
1.2 行星科学概述	(15)
复习思考题与习题	(19)
参考文献	(19)
第二章 地球	(20)
2.1 地球的基本特征	(20)
2.2 地球的结构	(22)
2.3 地球表层	(26)
2.4 地磁场	(27)
2.5 大气层与海洋	(32)
2.6 电离层	(39)
2.7 磁层	(47)
复习思考题与习题	(52)
参考文献	(52)
第三章 月球	(53)
3.1 月球概述	(53)
3.2 月壤	(61)
3.3 月球资源	(67)
3.4 月球探测	(76)
3.5 月球基地	(88)
复习思考题与习题	(96)
参考文献	(96)
第四章 水星	(97)
4.1 轨道特征与宏观性质	(97)
4.2 水星的外逸层	(104)
4.3 水星的磁层	(106)
4.4 水星探测	(107)
复习思考题与习题	(113)
参考文献	(113)
第五章 金星	(114)
5.1 金星的整体特征	(114)
5.2 大气层	(120)

5.3 金星探测	(136)
复习思考题与习题	(142)
参考文献	(142)
第六章 火星	(143)
6.1 火星概述	(143)
6.2 火星大气层	(153)
6.3 火星上的水	(163)
6.4 火星上的生命	(174)
6.5 火星探测	(180)
复习思考题与习题	(185)
参考文献	(185)
第七章 类木行星	(187)
7.1 概述	(187)
7.2 中性大气层	(191)
7.3 内部结构	(206)
7.4 磁场与磁层	(209)
7.5 环	(215)
复习思考题与习题	(224)
参考文献	(224)
第八章 类木行星的卫星与类木行星探测	(225)
8.1 泰坦	(225)
8.2 土卫二	(234)
8.3 类木行星的其他卫星	(239)
8.4 类木行星探测	(248)
复习思考题与习题	(258)
参考文献	(258)
第九章 矮行星与小天体	(259)
9.1 矮行星	(259)
9.2 小行星	(265)
9.3 彗星	(278)
复习思考题与习题	(296)
参考文献	(297)
第十章 行星科学的新领域	(298)
10.1 开珀带与海王星外天体	(298)
10.2 奥尔特云	(304)
10.3 太阳系外行星	(305)
复习思考题与习题	(311)
参考文献	(311)

第一章 引言

1.1 太阳系构成和基本特性

1.1.1 太阳系中的天体

太阳和以太阳为中心、受其引力支配而环绕它运动的天体构成的系统称为太阳系。具体来说,太阳系包括太阳、行星(planet)及其卫星、矮行星(dwarf planet)、小天体和行星际尘埃。中心天体太阳是唯一可见到视圆面的恒星,质量占系统总质量的 99.86% 以上,但角动量只占 0.5%。

2006 年 8 月,国际天文学联合会(IAU)明确提出了行星的定义。根据这个定义,将冥王星定位矮行星。这样,行星家族就剩下 8 颗。IAU 对太阳系三类天体提出的定义是:

一颗行星是一个天体,它满足:(1) 围绕太阳运转;(2) 有足够大的质量来克服固体应力以达到流体静力平衡的(近于圆球)形状;(3) 清空了所在轨道上的其他天体。一般来说,行星的直径必须在 800 km 以上,质量必须在 5×10^{17} t 以上。

一颗矮行星是一个天体,它满足:(1) 围绕太阳运转;(2) 有足够大的质量来克服固体应力以达到流体静力平衡的(近于圆球)形状;(3) 没有清空所在轨道上的其他天体;(4) 不是一颗卫星。

至 2008 年 9 月 17 日,IAU 确认 5 颗天体为矮行星:冥王星(Pluto)、谷神星(Ceres)、阋神星(Eris)、鸟神星(Makemake)和岩神星(Haumea)。

2008 年 6 月 11 日,IAU 定义了一类新的天体——类冥王星(Plutoid):围绕太阳公转,轨道在海王星之外,有足够大的质量来克服固体应力以达到流体静力平衡的(近于圆球)形状,没有清空所在轨道上的其他天体,同时不是一颗卫星。目前符合“类冥王星”定义的除了冥王星之外,还有阋神星、鸟神星和岩神星。谷神星则不符合“类冥王星”的定义,因为它位于火星和木星之间的小行星主带之中。

其他围绕太阳运转的天体(卫星除外),统称为“太阳系小天体”。

按离太阳由近及远,八颗行星依次为水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。它们绕太阳的轨道均为偏心率不大的椭圆(近圆性)。如果从太阳的北极上空往下观察,八颗行星都在接近同一平面的近圆形轨道上(共面性),逆时针绕太阳公转(同向性)。除了金星和天王星外,行星的自转与公转方向相同。

按行星的组成特征,可分为类地行星和类木行星。类地行星包括水星、金星、地球和火星,基本上是由岩石和金属组成的,密度高、旋转缓慢、固体表面、没有环、卫星少;类木行星包括木星、土星、海王星和天王星。主要由氢和氦等物质组成,密度较低、旋转快、深的大气层、有环、大量的卫星。

除了水星和金星之外,其他 6 个行星都有自己的自然卫星。地球有 1 颗卫星,火星、木星、土星、天王星和海王星分别有 2、63、60、27 和 13 颗。

在太阳系的行星和卫星当中,有 11 个天体的密度大于 3 g/cm^3 。

小行星是指沿椭圆轨道绕太阳公转的、自然形成的固态小天体,直径从大约 50 m 到几百千米。大多数分布在火星和土星轨道之间的小行星带内。按小行星在太阳系的位置,可将它们分为主带、近地和脱罗央(Trojans)小行星。

彗星是一种形状奇特的小天体,其轨道一般十分扁长,倾角也大得多,不少彗星的轨道是非封闭的抛物线和双曲线。当接近太阳时,彗星常变得十分庞大,并生出长长的彗尾,但其质量极小。

开珀带(Kuiper Belt)是一个巨大冰冻天体的仓库,位于海王星轨道的外部,可扩展到 50 个天文单位(AU)。第一个开珀带天体是 1992 年发现的,目前普遍认为开珀带是短周期彗星的源,千米大小的彗星将超过 10 亿颗。冥王星也普遍认为是开珀带天体。

1950 年,荷兰天文学家奥尔特用彗星轨道的统计材料,说明彗星都来自围绕太阳的一个类似球状的云层,其空间范围是距离太阳 5000AU 到 10 万 AU,称奥尔特(Oort)云。而离太阳系最近的恒星(半人马星座 α 星)离我们约 15 万个 AU。从那附近经过的恒星自然会对彗星云产生一些影响,这类扰动有规律地从彗星云中“派出”彗星到太阳和地球附近,使人类有机会观测到它们发生的各种有趣现象。此外,这种影响既限制了彗星云的大小,又使彗星轨道多样化。在奥尔特的彗星云中,估计存在 2000 亿颗彗星,其质量总和约为地球质量的十分之一。自然,这些数据都是非常不确切的。

太阳系空间还有众多的流星体(meteoroid),它们的尺度大于 $100 \mu\text{m}$,小于 50 m。成群的流星体可能来自彗星的抛射或瓦解。流星体闯入地球大气即成为流星,大的流星有时会变成落到地面的陨星。此外还有行星际尘埃,尺度在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。

太阳系大小的确定是一件复杂的事情。如果将太阳磁场终止的地方(日球顶)作为边界,则太阳系半径的范围是 $86 \sim 100 \text{ AU}$ 。

目前所知围绕太阳轨道运行最远的天体是赛德纳(Sedna),其近日点在 75 AU 左右,远日点将达到 900 AU,它可能是内奥尔特云天体。而奥尔特云的半径大约是 10 万 AU。因此,如果将奥尔特云作为太阳系的边界,则太阳系的尺度大约是 20 万 AU。但目前人类对太阳系的了解还没有达到这么远,主要的认识限于距太阳几十个 AU 以内的区域。

表 1-1-1 和表 1-1-2 分别给出了行星的轨道特征和物理参数。

表 1-1-1 行星与矮行星的轨道特征

名 字	半主轴/AU	偏心率	倾角/(°)	轨道周期/年
水 星	0.38710	0.205631	7.0049	0.2408
金 星	0.72333	0.006773	3.3947	0.6152
地 球	1.00000	0.016710	0.0000	1.0000
火 星	1.22366	0.093412	1.8506	1.8807
谷神星	2.76650	0.078375	10.5834	4.6010
木 星	5.20336	0.048393	1.3053	11.8560
土 星	9.53707	0.054151	2.4845	29.4240
天王星	19.19130	0.047168	0.7699	83.7470
海王星	30.06900	0.008586	1.7692	163.7230
冥王星	39.48170	0.248808	17.1417	248.4000
阋神星	68.14610	0.432439	43.7408	562.5500
鸟神星	45.79100	0.159000	28.9600	309.8800
岩神星	43.33500	0.188740	28.1900	285.4000

表 1-1-2 行星与矮行星的物理参数

名 字	质量/kg	赤道半径/km	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	自旋周期	黄赤交角/ $^{\circ}$	逃逸速度/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
水 星	3.302×10^{23}	2440	5.43	56.646 d	0	4.25
金 星	4.869×10^{24}	6052	5.24	243.018 d	177.33	10.36
地 球	5.974×10^{24}	6378	5.52	23.934 h	23.45	11.18
火 星	6.419×10^{23}	3397	3.94	24.623 h	25.19	5.02
谷神星	9.470×10^{20}	474	2.10	9.075 h	—	0.52
木 星	1.899×10^{27}	71492	1.33	9.925 h	3.08	59.54
土 星	5.685×10^{26}	60268	0.70	10.656 h	26.73	35.49
天王星	8.662×10^{25}	25559	1.30	17.24 h	97.92	21.26
海王星	1.028×10^{26}	24764	1.76	16.11 h	28.80	23.53
冥王星	1.314×10^{22}	1151	2.00	6.387 d	119.6	1.23
阋神星	1.500×10^{22}	1200	2.10	$>8 \text{ h}$	—	1.29
鸟神星	$\sim 4.000 \times 10^{21}$	650~950	~ 2.00	—	—	~ 0.84
岩神星	$(4.2 \pm 0.1) \times 10^{21}$	575~700	2.60~3.30	3.915 h	—	0.84

1.1.2 描述太阳系天体特征的参数

1. 天球(celestial sphere)

假想的以地球为中心、半径为无穷大的圆球面(图 1-1-1)。除地球以外的所有天体都可以投影在天球上,并以投影点在天球上的位置标志天体的方位。由于地球由西向东自转,在地球上的观测者看起来天球由东向西旋转,每 23 小时 56 分 4 秒旋转一周。地球自转轴与天球的交点称“天极”。北天极在北极星附近。与地球的经度与纬度类似,在天球中可引入赤经和赤纬,并用此确定一个天体在天球上的位置,这称为天球坐标系。天体的赤经是沿着天球赤道至基准点的角距离,为方便起见,一般选春分点的赤经为零度。赤纬与地球的纬度圈类似,天球

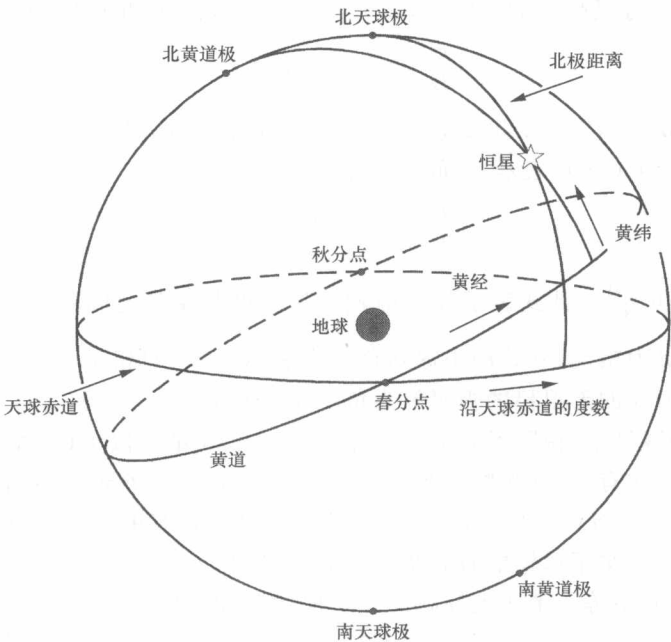


图 1-1-1 天球

赤道的纬度是零度,北天球极是 $+90^\circ$,南天球极是 -90° 。

2. 黄道面(ecliptic plane)

地球绕太阳公转的轨道平面称为黄道面。黄道面与天球相交的大圆称为“黄道”。黄道面与地球赤道面的交角为 $23^\circ 27'$ 。在天球上距离黄道 90° 的两个点叫“黄极”。

3. 黄赤交角(obliquity of the ecliptic)

行星的赤道平面与黄道面之间的夹角。根据国际天文学联合会的约定,行星的北极位于黄道面上面。按照这个约定,金星和天王星为逆向旋转,或者说,它们的自转方向与其他行星相反。

4. 秒差距(parsec)

用于度量距离的单位,英文缩写为“pc”。天体距离为1秒差距意味着若以1天文单位为基线,则该天体的视差为1弧秒(arcsecond)(见图1-1-2)。1秒差距 $= 3.2616$ 光年 $= 206\,265\text{ AU} = 308\,568 \times 10^8\text{ km}$ 。更大的距离可用千秒差距(kpc)和百万秒差距(Mpc)表示。

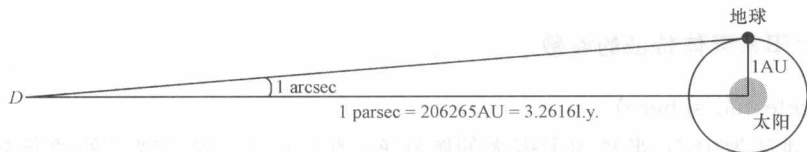


图 1-1-2 秒差距

5. 星等(magnitude)

早在公元前2世纪,古希腊的一名天文学家就按亮度把恒星分为6个等级,将最亮的星定位1等星,肉眼刚能看见的为6等星。星等是表示天体亮度的一种方法,记为 m 。这里的亮度是指观测者在单位面积上所接收的天体辐射流量,相当于光学中的照度。19世纪中叶,天文学家发现,1等星是6等星亮度的100倍,以 E_6 、 E_1 表示6等星和1等星的照度,则有

$$\frac{E_1}{E_6} = 100 = \rho^{6-1}.$$

由此式可求出 $\rho = \sqrt[5]{100} = 2.512$,这就是说星等相差1等,其亮度比为2.512。根据上述关系建立的星等和亮度(以 E 表示)之间的关系为

$$\frac{E_1}{E_2} = 2.512^{m_2 - m_1},$$

即 $m_1 - m_2 = -2.511 \lg \frac{E_1}{E_2}$ 。此式表示任意两颗恒星亮度与星等之间的换算关系。后来,利用望远镜把星等定得更精确,开始用小数和负数来表示星等,即亮于1等星的向零等、负星等方向扩展。如全天最亮的天狼星的视星等为负1.46,通常记作 -1.46 。

一般说来,星等数越小,说明星越亮。天空中亮度在6星等以上(即星等数小于6),也就是我们可以看到的星体有6000多颗。当然,每个晚上我们只能看到其中的一半。满月时月亮的亮度相当于 -12.6 星等($-12.6m$);太阳是我们看到的最亮的天体,它的亮度是 $-26.7m$;而当今世界上最大的天文望远镜能看到暗至 $24m$ 的天体。

我们在这里说的“星等”,事实上反映的是从地球上“看到的”天体的明暗程度,在天文学上称为“视星等”。太阳看上去比所有的星星都亮,它的视星等比所有的星星都小得多,这只是沾了它离地球近的光。更有甚者,像月亮,自己根本不发光,只不过反射些太阳的光,就俨然成了

人们眼中第二亮的天体。天文学上还有个“绝对星等”的概念,这个数值才能真正反映星体实际发光本领。绝对星等是假定把恒星放在距地球 10 秒差距的地方测得的恒星的亮度,用以区别于视星等,它反映了天体的真实发光本领。如果绝对星等用 M 表示,恒星的距离化成秒差距数为 r ,那么 $M=m+5-5\lg r$ 。这样,太阳的绝对星等为 4.83。太阳系行星和月球的亮度(视星等)示于表 1-1-3。

表 1-1-3 太阳系行星和月球的最大亮度

单位:视星等

水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	太阳	月球
-1.9	-4.4	—	-2.8	-2.5	-0.4	+5.6	+7.9	-26.8	-12.7

1.1.3 行星动力学

1. 开普勒定律(Kepler's Laws)

17 世纪,德国天文学家、数学家开普勒在“日心说”的基础上,整理了他的老师第谷临终前馈赠给他的大量火星观测资料,深入地研究了火星的运动,发现火星的公转轨道是椭圆,太阳位于其一个焦点上,还发现火星的向径在单位时间内扫过相等的面积,不久他指出这两个定律也适用于其他行星,它们被称为行星运动的第一和第二定律。1609 年,开普勒在他的《新天文学》一书中公布了这两个定律。1619 年,开普勒又发现了行星运动第三定律:“行星公转周期的平方与其赤道半长轴的立方成正比。”该定律刊登在他 1619 年出版的《宇宙和谐论》一书中。

开普勒第一定律可表述为: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(见图 1-1-3(a))。行星的运动可用以下公式表示:

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

这里 r 是日心距离, a 是椭圆的半长轴(最小和最大日心距的平均), e 是椭圆的偏心率, f 是行星位置矢量与近日点矢量间的夹角。

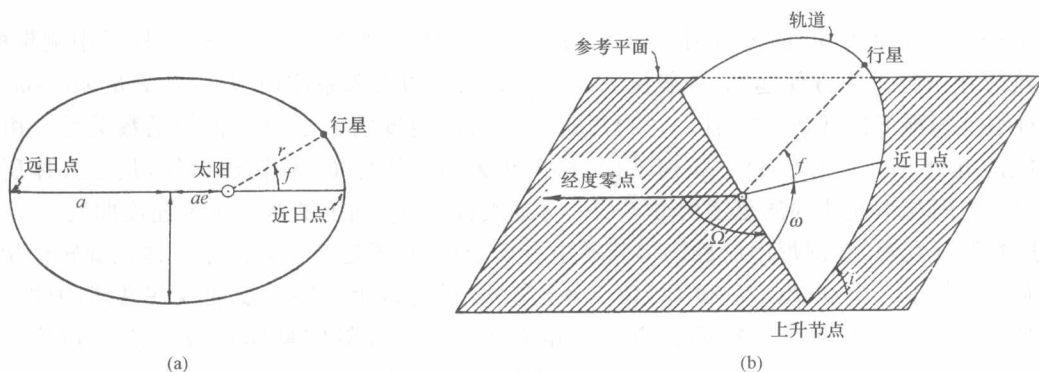


图 1-1-3 椭圆轨道参数

第二定律可表述为:连接行星和太阳的径向矢量在相等的时间内扫过的面积相等(面积定律)。这个定律可表示为

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} \left(r^2 \frac{df}{dt} \right) = \frac{h}{2} \quad (1-1-2)$$

这里 A 是径向矢量扫过的面积, h 是面积常数。

第二定律的另一种表达式为

$$\frac{dL}{dt} = 0, \quad (1-1-2a)$$

这里

$$L = r \times mv, \quad (1-1-2b)$$

(1-1-2a)式的物理意义是角动量守恒。

第三定律:行星绕太阳运动的公转周期(用年表示)的平方等于轨道半主轴(用 AU 表示)的立方。用公式表示为

$$p_{yr}^2 = a_{AU}^3. \quad (1-1-3)$$

2. 限制性三体问题

引力并不限于太阳与行星或行星与卫星之间的相互作用,任何一个天体,它都会感受到其他天体的引力。前面给出的公式,仅适用于二体问题,也就是忽略了其他天体对它们的引力作用。如果考虑第三个天体的存在,问题一般是比较复杂的,但如果第三个天体的质量比另两个天体的质量小到可以忽略的程度,这类问题称为限制性三体问题。一般地把这个小质量的天体称为无限小质量体,或简称小天体;把两个大质量的天体称为有限质量体。如果小天体的初始位置和初始速度都在两个有限质量体的轨道平面上,则小天体将永远在该轨道平面上运动,这就成为平面限制性三体问题,下面主要讨论这种问题。

选择一个非惯性坐标系,它围绕 z 轴以两个有限质量天体的轨道频率旋转。圆点为两个有限质量天体的质心,这两个天体保持固定在 x 轴的 x_1 和 x_2 点。采用无量纲的形式,二体之间的距离、质量和以及引力常数都取作 1,这意味着旋转框架的转动频率也等于 1(习题 6)。

通过分析在旋转坐标系的能量积分,雅可比得到小质量天体在圆形限制性三体问题的运动常数:

$$C_J = x^2 + y^2 + \frac{2m_1}{|r - r_1|} + \frac{2m_2}{|r - r_2|} - v^2. \quad (1-1-4)$$

这里 $|r - r_i|$ 是质量为 m_i 的天体到小天体的距离;小天体的速度 v 是在旋转坐标系中测量的, C_J 是雅可比常数。为方便起见,一般设 $m_1 \geq m_2$;在大多数太阳系应用中,一般满足 $m_1 \gg m_2$ 。

对给定的雅可比常数,方程(1-1-4)规定了小天体速度的大小与位置的函数关系。由于 v^2 不能是负数,在 $v=0$ 的表面(零速度面)给出小天体对固定 C_J 的轨道边界,是小天体所能够达到的范围与不能达到的范围的分界面。零速度面在 xy 面上的截线称零速度曲线。

拉格朗日发现,在圆形限制性三体问题中有 5 个点,位于这 5 个点的小天体在旋转框架中合力为零。其中三个点(L_1 、 L_2 和 L_3)位于 m_1 和 m_2 的连线上。零速度曲线在共线的的三个拉格朗日点相交。另两个拉格朗日点(L_4 和 L_5)与两个有限质量体构成等边三角形。在图 1-1-4(a)中,选择 $m_1/m_2 = 100$ 。虚线表示半径等于行星半主轴的圆。符号 T、H 和 P 表示与曲线相联系的轨道的类型:T 表示蝌蚪形,H 表示马蹄形,P 表示通过。每条曲线(阴影线)封闭的区域排除了小天体相应于 C_J 的运动。临界马蹄形曲线通过 L_1 和 L_2 ,临界蝌蚪形曲线通过 L_3 。马鞍形轨道可存在于这两个极端情况之间。图 1-1-4(b)是从旋转框架上看到的小天体蝌蚪形曲线的例子。图 1-1-4(c)类似于(b),但对应于偏心率小的马蹄形轨道。图 1-1-4(d)同(c),但对应于大偏心率的小天体轨道。图 1-1-4(e)表示马蹄形轨道与其伴随的零速度

曲线的关系。在旋转坐标系中小天体的速度在接近零速度曲线时下降。

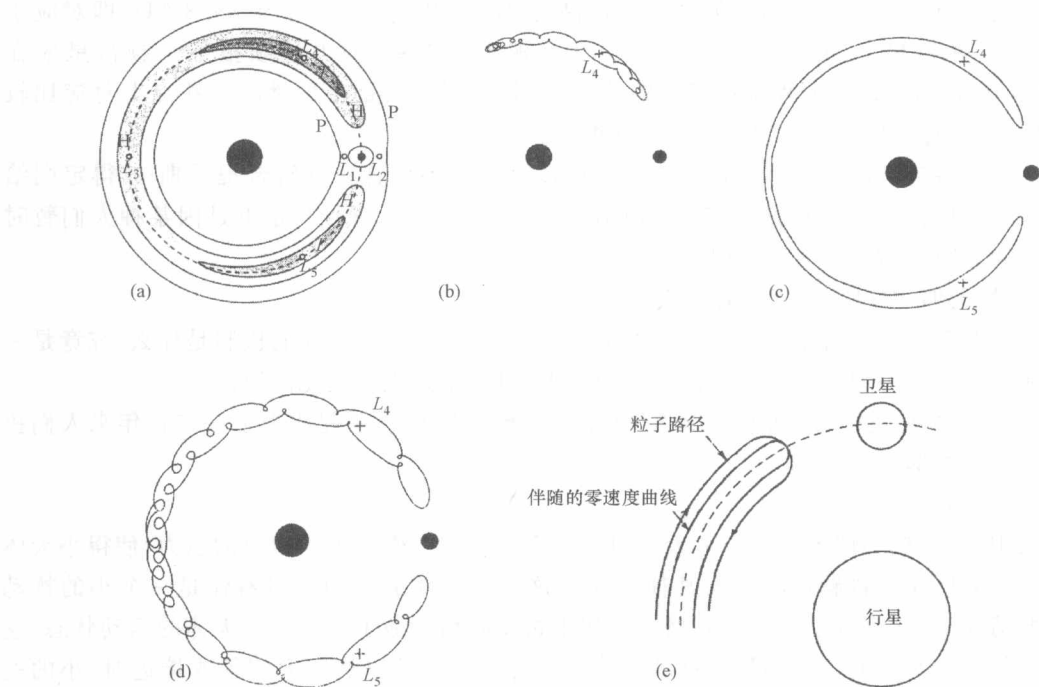


图 1-1-4 雅可比常数与拉格朗日点

3. 会合轨道周期(synodic orbital period)

考虑地球本身的运动,从地球上观察,一个天体返回到相对于太阳相同构型所用的时间称为会合轨道周期,简称为会合周期。

设地球的恒星周期为 P_E ,太阳系内另一个天体的恒星周期为 P ,则地球与这个天体的角速度分别是 $360^\circ/P_E$ 和 $360^\circ/P$,其超过地球的角速度为 $360^\circ/P - 360^\circ/P_E$ 。则该天体的会合周期 S 定义为它赶上地球所用的时间(即超过 360° 所用的时间),这三个周期的关系是:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P} - \frac{1}{P_E}. \quad (1-1-5)$$

对内行星水星和金星, S 是正的,外行星火星、木星、土星、天王星和海王星, S 是负的。

根据(1-1-5)式可算出地球与火星的会合周期为 780 天,也就是 26 个月。因此,探测火星的最佳时间为每 2 年多一次。

4. 提丢斯-彼得定则(Titius-Bode Law)

18 世纪,德国天文学家提丢斯和彼得以及后来的沃尔夫(Wolf)指出,6 个行星的平均日心距离可近似用一个方程表示:

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n. \quad (1-1-6)$$

对于水星, n 取 $-\infty$,金星、地球、火星、木星和土星分别取取 0、1、2、4 和 5。天王星在 19.18 AU 处被发现(预报值是 19.6 AU,对应于 $n=6$),第一个小行星“谷神星”(Ceres)(现在定义为矮行星)在 2.77 AU 被发现,可是根据预报,在 2.8 AU 处应有一个行星,对应于 $n=3$ 。这个结果表明,提丢斯-彼得给出的方程不完全正确。

位于 2 AU 和 3.5 AU 之间的主带小行星的发现使人们曾经产生一种观点,小行星是一个

位于由提丢斯-彼得方程决定位置的行星被毁坏后的剩余物。现在,这个观点已经被否定。

海王星在距离太阳 30.1 AU 处被发现,而提丢斯-彼得方程预报应在 38.8 AU(即对应于 $n=7$)处有一颗行星。1938 年在 39.4 AU 处发现了冥王星,而方程预报下一颗行星应在 77.2 AU,很显然,用这个方程预报行星的轨道是不恰当的,只是在少量的一些点上对应比较好。另外,也没有发现这个方程有什么物理根据。

据估计,主带小行星总数大约是 150 万颗,该带的中心位置正好符合提丢斯-彼得定则给出的数据。为什么大行星变成了 150 万颗小行星?当时便有人猜测:是不是因某种人们暂时无法知晓的原因,存在的大行星爆炸了?

那么,提丢斯-彼得定则到底有什么意义呢?

这个问题引起众多科学家旷日持久的争论,同时对于行星大爆炸的机制是什么,究竟是一种什么能量竟能使一颗大行星产生四分五裂的大爆炸,定则也完全无法说清。

最终,“提丢斯-彼得”定则连同“2.8”处行星大爆炸之谜,也一起成为了一二百年来人们孜孜以求的世纪之谜。

5. 谐振(resonance)

在太阳系中,典型情况是一个大天体对另一个小天体产生占主导地位的引力,使得小天体围绕这个大天体作开普勒运动。而其他天体对这个小天体的作用力可看作是一个小的扰动力。一般情况下,这个扰动力可以忽略。但如果希望高精度地了解这个小天体的运动状态,这个扰动力是不能忽略的。特别是在扰动力的频率与响应元的自然频率相等或接近时,小的扰动可能产生大的效应。在这种情况下,扰动附加一个相干作用,许多小的拽力可随时间积累,产生大幅度、长周期的响应。这是谐振力的一个实例,可发生在很宽范围的物理系统中。

谐振力的最简单例子是一维简谐振动,运动方程是:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + m\omega_0^2 x = F_d \cos \omega_d t. \quad (1-1-7)$$

这里, m 是振荡粒子的质量, F_d 是驱动力的幅度, ω_0 是振荡元的自然频率, ω_d 是驱动力的频率。方程(1-1-7)的解是:

$$x = \frac{F_d}{m(\omega_0^2 - \omega_d^2)} \cos \omega_d t + C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t.$$

这里 C_1 和 C_2 是由初始条件确定的常数。注意,如果 $\omega_d \approx \omega_0$,即使 F_d 是小的,也可产生大幅度、长周期的响应。如果 $\omega_d = \omega_0$,方程(1-1-7)是不正确的。在这种情况下(谐振),解是

$$x = \frac{F_d}{2m\omega_0} t \sin \omega_0 t + C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t. \quad (1-1-8)$$

方程(1-1-8)右边第一项中的 t 导致幅度缓慢的增长。这个线性增长受非线性项的调制。

在太阳系中,轨道谐振的例子很多。如果两个天体的一些轨道参数成比例,就可以发生轨道谐振。最重要的谐振是平均运动谐振,发生在天体的公转周期成比例的情况下。平均运动 $n=2\pi/P$,这里 P 是公转周期。例如,如果一颗行星围绕太阳运转 3 次而另一颗运转 2 次,我们就说这两颗行星是 3:2 谐振,海王星与冥王星就是这种情况。我们有

$$2n(\text{海王星}) - 3n(\text{冥王星}) = 0. \quad (1-1-9)$$

在行星环系统中粒子与卫星谐振的区域存在复杂的机制,可产生密度波。

6. 潮汐

任何天体对另一天体不同部分与其中心的引力差称为“潮汐力”。对一个天体的合力决定

了其质心的加速度,而潮汐力可以使天体变形,也可以产生影响其转动状态的力矩。

考虑一个中心在原点、半径为 R 的接近于球形的天体,受质量为 m 、位于 r_0 的质点引力的影响,假设 $r_0 \gg R$ 。每单位质量的潮汐力为

$$F_T(r) = -\frac{Gm}{|r_0 - r|^3}(r_0 - r) + \frac{Gm}{r_0^3}r_0. \quad (1-1-10)$$

对于沿着连接天体中心和质点连线(取为 x 轴)上的点,方程(1-1-10)简化为

$$F_T(x) = -\frac{Gm}{|x_0 - x|^3} + \frac{Gm}{x_0^3} \approx \frac{2xGm}{x_0^3}. \quad (1-1-11)$$

方程(1-1-11)表示,潮汐力与到天体中心的距离成正比,与到扰动体距离的立方成反比。天体上具有正 x 坐标的部分感受到正 x 方向的力,而在 $-x$ 方向的部分是相反方向的潮汐拉力(见图 1-1-5)。注意,根据方程(1-1-11),偏离 x 轴的物质受到 x 方向的潮汐拉力。

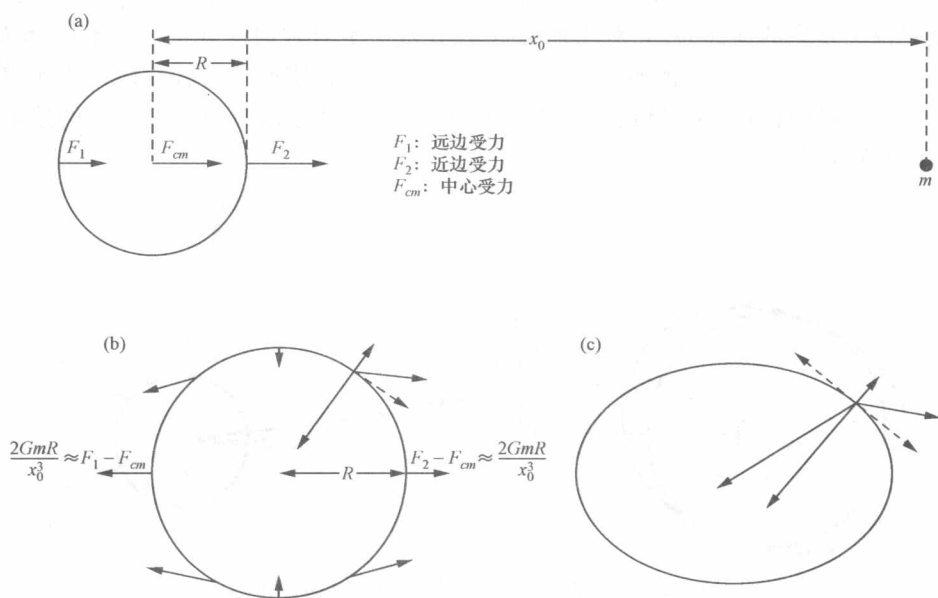


图 1-1-5 月球的潮汐力

(a) 月球对行星不同部分的引力;(b) 月球引力相对于行星质心力的差;(c) 行星构形对月球潮汐作用的响应

如果天体是可变形的,在 x 方向将被拉长。对于完全流体,拉长的程度是必须使天体表面变成等势面,此时,自引力、旋转所需的向心力和潮汐力都包含在计算中。

月球与地球之间的相互吸引力引起了沿二者中心连线方向的潮汐隆起。近边隆起是近边受到较大引力作用的直接结果,而远边受到的引力比中心受到的引力小。不同的离心加速也对潮汐隆起的大小有影响。

月球的自旋周期与围绕地球公转的轨道周期相等,因此月球总是同一面朝向地球,并总是在那个方向上被拉长。地球的自旋周期比地-月轨道周期短,于是,地球的不同部分指向月球,并被潮汐力拉伸。地球上的水比固体地球更容易受潮汐变化的影响,引起在海岸线看到的水平面变化。地球自旋与月球轨道运动效应的组合,使得月球大约每 25 小时通过地球给定地点的上方,每天总有两次潮汐,我们看到的主要潮汐是半日潮汐。太阳也引起地球的半日潮汐,