

中国科学院国家天文台天体物理丛书

观测宇宙学

何香涛 著



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学院国家天文台天体物理丛书

观测宇宙学

何香涛 著

科学出版社

2002

内 容 简 介

天文学是建立在观测基础上的一门科学,近代宇宙学的各项研究成果也都和观测有密切联系.本书讨论了宇宙的基本模型和演化过程,与此相关的是描述宇宙的各种基本物理参量,包括哈勃常数、物质密度、减速因子等.活动星系核是近代天体物理学的热点研究课题之一,本书从观测角度出发作了详细的讨论.本书的内容还包括星系的形成和演化,宇宙空间的大尺度结构等.书中讨论的所有内容都与观测验证相联系.

本书适合天文工作者、理论物理工作者阅读,也可以作为相关专业研究生和大学高年级学生的教材.

图书在版编目(CIP)数据

观测宇宙学/何香涛著. —北京:科学出版社,2002
(中国科学院国家天文台天体物理丛书/王绶琯主编)
ISBN 7-03-009517-0

I. 观… II. 何… III. 观测-宇宙学 IV. P159.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 037789 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年4月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2002年4月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—1 000 字数:412 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

《中国科学院国家天文台天体物理丛书》序

我国组织出版系列的天体物理丛书,滥觞于二十几年前戴文赛先生的倡导.当时改革开放伊始,为了适应研究生制度的恢复,他策划了一个天体物理各个分支学科配套的丛书撰写方案.这在当时以及接下来的一段时间里,为我国天文学的重整旗鼓起了重要的作用.随后的这许多年中,学科高速发展,包括研究生教材在内的国际上的天文佳作源源引进,加上我国科学图书出版的种种变数,使我国天体物理书籍的出版不断自我调整以立足于新的背景,同时各自不断寻求可供依托的机遇.其间逐步淡化了系列化、突出了个性化.这是必然的,也可说是一种进步.但也增加了课题领域的随机性质、少了整体布局.

现在,在新的格局下,国家天文台着手组织一系列天文学丛书.我们接受委托编纂天体物理部分.为了和前面的衔接,这部丛书侧重于专著形式.首先邀请为我国天体物理各个不同分支的研究打下基础的主要科学家们,把他们的长期积累整理成有自己特色的专著.我们相信,这些著作,对于目前站在这些基础上工作和培养新生力量的学者们,将是有益的参考.同时它们也将表征着一个时期我国天体物理著述成果的收结.

总结同时又是开端的准备.我们期待着在若干年后的新版和新辑里,将看到又一个新的开始.

王绶琯

2002年1月于北京

前 言

天文学是一门观测科学. 亘古至今, 天文学家们的首要任务就是“观天象, 测天时”. 到了近代, 尤其是进入 20 世纪 60 年代, 天文观测进入了一个新的阶段. 一批重要的发现, 诸如类星体、脉冲星、宇宙微波背景辐射、星际分子等, 大都获得了诺贝尔奖金, 这一切极大地推动了近代天体物理学的发展.

回顾近代天体物理学的发展过程, 会发现有两个重要的促进因素: 一是先进的大型观测设备, 包括地面的和空间的, 不断研制成功并投入观测. 二是所探讨的天体物理课题都表现出很深的物理内涵. 所有这些促使近代天体物理学成为当代基础自然科学中最活跃的研究领域之一. 其中的宇宙学分支, 涉及的物理内容广泛, 探索性强, 更是倍受关注的前沿.

观测宇宙学的概念形成于 20 世纪 80 年代. 1986 年国际天文学会 (IAU) 以“观测宇宙学”为题在北京召开了第 124 次专题学术讨论会, 开创了观测宇宙学的新领域. 宇宙学领域里的问题, 往往新而广, 许多问题仍处在争论阶段, 必须通过观测来回答或验证. 由于问题的复杂性, 观测工作需要不断地深入和积累. 经过近 20 年的努力, 终于形成了一门新的学科——观测宇宙学.

到目前为止, 国内外还没有出版过观测宇宙学的专著. 作者多年来从事了较多的天文观测工作, 在教学和科研中深感需要这方面的一本书, 因此才不遗余力, 予以尝试. 本书是在多次为研究生开设课程的基础上完成的. 在写作方式上, 力求观测和理论相结合. 不仅能够给读者以知识, 还尽量开拓读者的思路.

本书在写作过程中获得多方面的支持和帮助, 研究工作得到了国家自然科学基金和国家攀登计划的支持. 华夏英才基金和中国科学院科学出版基金, 以及国家天文台的支持保证了本书顺利出版. 作者在写作过程中曾得到王绶琯、曲钦岳、李启斌、武向平、陆琰、尤峻汉、邹振隆、黄克谅、朱慈璠、赵刚、吴时敏、赵峥、朱宗宏、杨志良、陈阳, 以及 Impey (美国亚里桑那大学天文系教授) 和 Green (美国基特峰天文台台长) 等人的帮助和支持, 或者进行过有益的讨论. 宋丽敏和程岭梅用了很多时间帮助打印. 还有许多朋友和同学都给予了帮助和支持. 这里一并表示衷心的感谢. 国外的作者在出书时往往感谢夫人和家人, 我在这里也深有同感, 家人的支持是无形的巨大动力. 本书是作者多年的耕耘成果, 一朝完成, 如释重负. 在新的科学领域里, 有人指出书中的错误和缺点, 将不胜感谢.

何香涛

2000 年于北京师范大学

• iii •

目 录

第一章 可观测的宇宙	(1)
§ 1.1 人类对宇宙的认识和深化	(1)
§ 1.2 由奥伯斯佯谬引发的思考	(7)
§ 1.3 从马赫原理到宇宙学原理	(9)
§ 1.4 现代观测宇宙学的诞生	(11)
第二章 宇宙的距离尺度和哈勃定律	(15)
§ 2.1 膨胀的宇宙和哈勃定律	(15)
§ 2.2 河内天体的距离测定	(18)
§ 2.3 河外天体距离的测定	(22)
§ 2.4 哈勃常数	(27)
§ 2.5 哈勃定律的验证和哈勃流	(31)
第三章 宇宙模型和宇宙的演化	(34)
§ 3.1 标准宇宙模型	(34)
§ 3.2 膨胀的宇宙	(37)
§ 3.3 标准宇宙模型下的基本物理量	(41)
§ 3.4 膨胀宇宙的各种模式	(48)
§ 3.5 宇宙的热大爆炸起源	(52)
§ 3.6 宇宙的热历史	(56)
§ 3.7 宇宙的年龄	(60)
§ 3.8 有待进一步回答的问题	(65)
§ 3.9 其他的宇宙模型	(69)
第四章 宇宙中的物质	(76)
§ 4.1 宇宙中的物质	(76)
§ 4.2 原初宇宙的元素合成和丰度	(79)
§ 4.3 元素丰度的观测试验	(82)
§ 4.4 Gunn-Peterson 检验	(85)
§ 4.5 暗物质	(87)
§ 4.6 星际介质	(89)
§ 4.7 Ω_0 的测定和 Ω_A	(93)
第五章 减速因子 q_0 及其测定	(98)

§ 5.1 空间曲率和减速因子·····	(98)
§ 5.2 用红移-视星等关系测定 q_0 ·····	(99)
§ 5.3 用星系计数测定 q_0 ·····	(101)
§ 5.4 通过角大小测定 q_0 ·····	(104)
§ 5.5 q_0 值能为负吗? ·····	(107)
第六章 宇宙的背景辐射 ·····	(110)
§ 6.1 微波背景辐射的理论预言和发现 ·····	(110)
§ 6.2 辐射性质的测定和 COBE ·····	(111)
§ 6.3 宇宙背景辐射的涨落和 Sachs-Wolfe 效应 ·····	(115)
§ 6.4 Sunyaev-Zeldovich 效应·····	(119)
§ 6.5 宇宙背景天体及其辐射 ·····	(123)
第七章 星系的形成和演化 ·····	(126)
§ 7.1 星系的一般物理特性 ·····	(126)
§ 7.2 从均匀到不均匀——金斯不稳定性 ·····	(129)
§ 7.3 星系的形成过程 ·····	(133)
§ 7.4 星系质量的测定 ·····	(136)
第八章 活动星系核 ·····	(141)
§ 8.1 活动星系核的发现 ·····	(141)
§ 8.2 活动星系核的观测特征和分类·····	(143)
§ 8.3 类星体的观测方法 ·····	(146)
§ 8.4 类星体的光谱·····	(149)
§ 8.5 类星体的光度函数 ·····	(156)
§ 8.6 赛弗特(Seyfert)星系 ·····	(159)
§ 8.7 其他类型的活动星系核 ·····	(164)
§ 8.8 喷流和视超光速现象 ·····	(168)
§ 8.9 Ly α 线丛·····	(172)
§ 8.10 引力透镜现象 ·····	(175)
§ 8.11 活动星系核的统一物理模型 ·····	(180)
§ 8.12 活动星系核的形成和演化 ·····	(183)
§ 8.13 最大红移的类星体 ·····	(186)
§ 8.14 红移的本质及其争论·····	(191)
第九章 宇宙空间的大尺度结构 ·····	(195)
§ 9.1 星系的巡天观测和光度函数 ·····	(195)
§ 9.2 星系的大尺度空间分布 ·····	(198)

§ 9.3 河外天体空间分布的 $\langle V/V_m \rangle$ 检验	(201)
§ 9.4 星系团的形态分类	(205)
§ 9.5 星系团的物理特性	(207)
§ 9.6 从本星系群到超星系团	(215)
参考文献	(220)
附表一 常用物理常数表	(226)
附表二 常用天文常数表	(227)
附表三 天文中常见的光谱线	(228)
附表四 类星体光谱中的主要发射线	(230)
附表五 一年中恒星赤经上中天时刻	(231)
附表六 有趣的时间、距离、质量和密度表	(232)

封面说明

哈勃空间望远镜拍摄的巨蛇座鹰状星云 M16 的中心区域, M16 距离我们 7000 光年. 柱状星云中的凝聚区可能是恒星的诞生地. 该照片被评为 20 世纪最精美的十大天文图片之一.

第一章 可观测的宇宙

§ 1.1 人类对宇宙的认识和深化

人类在其发展的漫长历史过程中,永远依存着自然环境.人不能脱离自然,自然哺育着人类发展.人的思维也是首先来自自然,在人类思维的发展过程中,存在着一个永恒的科学主题,这便是宇宙.远在战国时期,尸佼便给宇宙下过一个定义,“四方上下曰宇,古往今来曰宙”.表明宇宙在空间上包罗万象,在时间上永无止境.随着人类社会的发展,文明程度的提高,对宇宙观念的认识也在不断地发展和深化.

一、中国古代的宇宙观

中国是世界上古老文明的发源地之一,在天文学方面有着灿烂的历史,在天象记载、天文仪器制作和宇宙理论方面都为我们留下了珍贵的记录.中国古代有三种比较系统的宇宙学说,《晋书·天文志》中写道“古言天者有三家,一曰盖天,二曰宣夜,三曰浑天”.

盖天说 盖天说可以追溯到殷周时代.到了约公元前 100 年的《周髀算经》中,对盖天说做了记载,故又称周髀说.盖天说主张“天圆如张盖,地方如棋局”的天圆地方说.它认为大地是一个正方形,天如一个圆盖罩着大地,但圆盖型的天与方形大地无法衔接,于是又设想有 8 根大柱支撑着.共工怒触不周山和女娲氏炼石补天的神话便是从盖天说的图像编造的.天圆地方的主张存在着不能自圆其说的地方,对此,春秋时代孔夫子的弟子曾参就持怀疑态度.有人问他:“天圆而地方,诚有之乎?”他回答:“如诚天圆而地方,则是四角之不掩.”战国时期的著名诗人屈原在其长诗《天问》中也对天圆地方说提出过质疑.

后来,盖天说又进一步发展,出现第二次盖天说.新的盖天说不仅认为天是拱形的,而且地也是拱形的.天地如同心球穹,两个球穹的间距是八万里,日月星辰的出没是由于远近所致.太阳则绕一个所谓“七衡六间图”运行,七衡指七个同心圆,春夏秋冬太阳在不同的衡上运动.冬至在最外的一个圆“外衡”上运动,夏至则在最内的一个圆“内衡”上运动,其他季节则在“中衡”上运动.

浑天说 浑天说主张天如球形,地球位于其中心.浑天说大约始于战国时期.到了汉代,浑天说亦颇具影响,西汉末的杨熊曾深入研究过浑天说,指出浑天说优于盖天说.据说当时的落下闳便根据浑天说的概念制造了浑仪,并用以测量天体.

浑天说最全面的表述是东汉的张衡,他在其《浑天仪图注》中写道“浑天如鸡子,天体圆如弹丸,地如鸡子中黄,孤居于内,天大而地小.天表里有水,天之包地,犹壳之裹黄.天地各乘气而立,载水而浮.周天三百六十五度又四分之一,又中分之,则半一百八十二度八分之五覆地上,半绕地下,故二十八宿半见半隐.其两端谓之南北极.北极乃天之中也,在正北,出地上三十六度.然则北极上规经七十二度,常见不隐.南极乃地之中也,在正南,入地三十六度,南归七十二度常伏不见.两极相去一百八十二度强半.天转如车毂之运也,周旋无端,其形浑浑,故曰浑天也”.浑天说认为天是一个球形,比之盖天说的半球形是进了一步.而且,浑天说对天球的运转给出了一个定量的描述,它与近代天球概念的视运动相当接近.

最早的浑天说认为地球浮在水中,后来又发展为浮在气中.日月都是附在天球上运动.因此,浑天说不仅是一种宇宙理论,而且在实际测量天体的运行方面也具有实用价值.

浑天说产生之后,在相当长的一段历史时期内,形成浑天说和盖天说并存的局面.且两种学说常常相互驳斥.后来,浑天说在解释天体运动方面渐渐占了优势.根据浑天说制造的浑仪可以演示日、月、星辰的视运动.因此,浑天说逐渐占据了主导地位.

宣夜说 宣夜说是中国古代的另一种颇具哲理的宇宙学说.据《晋书·天文志》记载“宣夜之书亡.惟汉郗秘书郎萌记先师相传云:天了无质,仰二瞻之,高远无极,眼瞽精绝,故苍苍然也.……日月众星,自然浮生虚空之中,其行其止皆须气焉.是以七曜或逝或住,或顺或逆,伏见无常,进退不同,由于无所根系,故各异也”.可以看出,宣夜说认为天是没有形质的,不存在固体的“天穹”,而只是无边无际的气体.日月星辰漂浮在无限的气体之中,游来游去.这是一种朴素的无限宇宙论的观念.它否认了神的存在,认为宇宙的一切都是自然的.在古代所有的宇宙论中能提倡无限宇宙和无神思想是难能可贵的.英国当代研究中国科学史专家李约瑟在其《中国科学技术史》一书中写到:“这种宇宙观的开明进步,同希腊的任何说法相比,的确毫不逊色.”

宣夜说产生之后,有人提出不少质疑,“杞人忧天”的故事便是其一.《列子·天瑞篇》中记述“杞国有人忧天地崩坠,身无所寄……,晓之者曰:日月星宿亦积气中之有光耀者.只使坠,亦不能有所中伤”.回答者的解释更进一步认为天体也是由气组成的,只不过是发光的气而已.后代的一些学者,曾不断地对宣夜说的观点加以阐述和发挥.如三国时代的杨泉,在其《物理论》中进一步发挥道“夫天,之气也,皓然而已,无他物焉”.他并且认为,银河也是运动着的气体,恒星就是从这些气体中诞生的.

宣夜说作为一种宇宙学说,的确具有许多先进的思想,但对于测视天体的运动却离不开浑天说.因此,宣夜说的推广和发展受到了一定的限制.

除去上述比较完整的三种宇宙学说以外,中国古代对于天体的起源、地球的运动和宇宙的无限性诸方面都有过许多先进的思想.但是,中国古代的宇宙观也有不足之处,局限于哲学性思辩的成分很浓,往往缺少从科学角度的解释和论述.

二、古希腊的天文学和托勒玫体系

希腊是欧洲的文明古国.大约从公元前 8 世纪开始,希腊形成城邦式的国家.文化和科学得到了蓬勃的发展.一般将古希腊天文学分为四大学派:爱奥尼亚学派、毕达哥拉斯学派、柏拉图学派和亚历山大学派.

以小亚细亚米利都市为中心的爱奥尼亚学派,其代表人物是哲学家兼几何学家的泰勒斯.相传他曾预言了公元前 585 年的一次日食.泰勒斯的继承人阿那克西曼德认为天空是围绕着北极星旋转的.万物都从无限中产生,消灭后又回到无限,整个宇宙是一个球形的.

毕达哥拉斯学派的创始人是著名的几何学家毕达哥拉斯.据说他也曾是泰勒斯的门徒.该学派提出了很多重要的观点.他们主张地球是球形的,因为从美学的观点,球形是最完美和和谐的.在地球的周围是空气和云.再往外便是日月星辰以匀速圆周运动围绕地球转动.该学派的菲洛芳斯提出地球并不是宇宙的中心,而是在天空中运行的.他更进一步认为宇宙的中心是炽热的火焰.

柏拉图学派是由雅典哲学家柏拉图(公元前 427~347 年)创立的.柏拉图学派的主要学说是“同心球”宇宙模型.宇宙是以地球为中心的一个个同心球,这些球壳从内向外依次分布着月球、太阳、水星、金星、火星、木星、土星和恒星.同心球理论在解释天体的运动,尤其是行星的运动时,必然会遇到困难,因为行星的运动不像恒星那样规则.柏拉图的门生们于是提出了更复杂的同心球结构,使球的个数达到几十个.即使如此,同心球仍无法解释为什么像金星和火星的亮度会有变化,为什么日食会有全食和环食,这些现象都表明它们同地球的距离不应该是固定不变的.

到了亚历山大学派,地心体系的学说便得到充分的发展,形成了统治西方达 1500 年之久的地心说.亚历山大学派源于古埃及首都亚历山大城,是亚历山大大帝征服埃及后于公元前 3 世纪建造的.在这里,聚集着一批出色的学者,他们不仅从理论上阐述宇宙的结构,更主要的是从事了大量的实测工作,使理论建立在和实测相一致的基础上.喜帕恰斯编制了欧洲历史上第一个星表,载有 1000 多颗恒星的位置.他还计算出一年的长度是 $365 + 1/4$ 日减去 $1/300$,并通过观测给出黄道和赤道交点西移的数值,每年西移 $36'$.在他的影响下,出现了两位举世闻名的天文学家依巴谷和托勒玫.依巴谷的工作主要在实测方面,托勒玫的工作则是全面地建立了地心说.

托勒玫注意到同心球理论的缺陷,在其洋洋 13 卷《大综合论》中,吸收了前人

提出过的本轮和均轮的概念,包括依巴谷的偏心圆的概念,形成了自己的地心学说.托勒玫认为:第一,日月行星虽然也都以圆轨道绕地球运动,但地球并不位于球心,而是偏离中心一点.这些偏心圆称为均轮.第二,五大行星本身都绕着自己的本轮圆运动,本轮圆的中心再绕均轮运动.第三,最外一层第八层是恒星天,所有的恒星都嵌在恒星天上.在当时的天文观测精度下,托勒玫的地心宇宙体系能够给出充分的解释.

三、哥白尼日心说的建立

在托勒玫时代之后,欧洲逐步进入了宗教统治的黑暗时代.地心说的观点和宗教思想是一致的,因此受到维护和推崇.到了15世纪以后,欧洲生产力的发展引发了文艺复兴和自然科学的革命.当哥伦布发现新大陆,麦哲伦绕行地球一周以后,自然地证实了我们是居住在一个悬在宇宙空间的球体上.随着天文观测精度的不断提高,托勒玫的地心体系再也无法圆满地解释行星的运动,只好在本轮上再套本轮,使本轮的数目达到几十个.这一切预示着建立符合实际的宇宙体系日心说已是不可避免的.

哥白尼于1473年2月19日生于波兰西部的拖伦城,幼年丧父,由舅父抚养成人.18岁入波兰当时的最高学府克拉科夫大学学习数学和天文,曾两次留学意大利,深受文艺复兴思想的影响.哥白尼是一位知识渊博、多才多艺的学者,他对法律、医学、数学、文学和绘画等都有很深的造诣,但他毕生最感兴趣的是天文学.他曾在他任职的弗洛恩堡大教堂的箭楼上装置了一个小天文台,仪器多是自己设计和制造的.哥白尼在这里兢兢业业地从事天文观测达30年之久,后人将这里称为“哥白尼塔”.

哥白尼的成就全部凝聚在他的巨著《天体运行论》中.由于宗教势力的压制,该书被长期压在那里不能出版.他甚至曾说道:“我生怕我的学说新颖而不合时宜,会引起别人的轻蔑,因而几乎放弃了我的计划”.但追求科学真理的强烈欲望仍然使哥白尼鼓起了勇气,在他晚年时同意出版.当印刷好的书放在他面前时,他已经处于临终的昏迷状态,只能抚摸着书与世长辞了.哥白尼逝世于1543年7月26日.

《天体运行论》共分为6卷.第一卷是宇宙概观.中心思想是阐述太阳是宇宙的中心.哥白尼首先用大量的观测事实和物理概念去驳斥“地静说”的概念.他正确地指出,我们所看到的日月星辰每日东升西落的现象,是由于地球本身每日自转一周的反映.他在《天体的顺序》一章中更进一步指出:太阳是宇宙的中心,静止不动.地球和其他行星一样围绕太阳旋转.按距离顺序,水星离太阳最近,依次是金星、地球、火星、木星和土星.恒星则分布在最外层的球面上.哥白尼不仅阐明了日心说的思想,还进一步计算出了每颗星到太阳的距离,其数值甚至和今天的数值相差不

大。

《天体运行论》第二卷是应用球面天文学解释天体的视运动；第三卷叙述太阳的视运动，并讨论了岁差理论；第四卷叙述月球的视运动，并讨论了日食和月食的计算方法；最后两卷讨论行星的运动理论，彻底地批驳了托勒玫的地心体系。

哥白尼的日心宇宙学说具有划时代的意义。一方面，它使人们的思想从宗教的束缚下解脱出来，地球也仅仅是一颗普通的行星，它和其他行星一样围绕着太阳旋转，而被宗教利用的地心说不得不退出历史舞台。另一方面，自然科学包括天文学的发展从此走上了科学的道路。

四、万有引力和太阳系模型

当人们谈到牛顿的万有引力定律时，常常引用苹果落地的故事。这个故事是由他的一位朋友传出来的，也许有夸张的成分。事实上，真正启发牛顿发现万有引力规律的却是天体的运动现象。牛顿时代距哥白尼时代有 150 年。期间，在哥白尼日心说的影响下，对行星运动规律的认识从观测到理论逐步深入，最后导致得出开普勒的行星运动三大定律。开普勒于 1571 年出生于德国，他是哥白尼学说热情支持者。开普勒通过自己的辛勤观测，并继承了他的老师、丹麦天文学家第谷的大量观测资料，经过几十年的潜心研究，总结出了行星运动的三大定律，即：

1. 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；
2. 行星的向径在相同时间内扫过的面积相等；
3. 行星绕太阳运动的公转周期的平方与其轨道半长径的立方成反比。

开普勒本人已经意识到太阳会有力作用在行星上，驱使行星运动，但真正导出万有引力定律的是牛顿。牛顿研究地球对月球的吸引力，同时他发现行星绕太阳的运动是受到同样的来自太阳的吸引力，这种吸引力都是与距离的平方成反比。根据开普勒的行星运动三大定律便可以推出万有引力定律，同样地，由万有引力定律也可以严格地证明三大定律的正确性。

以万有引力定律为基础，完善地解决了太阳系各类天体的运动。牛顿的朋友哈雷预言了一颗彗星的回归，从而被命名为哈雷彗星。英国天文学家亚当斯和法国天文学家勒威耶同时根据牛顿力学从“笔尖上”发现了海王星，成为科学史上的佳话。

当人们揭开了太阳系内所有天体的运动规律之后，便自然地会冲破宗教的束缚，去思索它的起源问题。影响最大的是由德国哲学家康德（1755 年）和法国数学家拉普拉斯（1796 年）分别独立地提出的星云说，认为太阳是由一团原始的星云形成的。星云在万有引力的作用下，先形成质点，再逐渐形成更大的团块，中心体形成太阳，周围的团块形成围绕太阳运动的行星。康德和拉普拉斯的学说虽然存在着许多不够严格的地方，但却开辟了人类对宇宙认识的一个划时代的变革。从此，人类

不再局限于仅仅是观察天体的运动,而是进一步研究他们的起源和演化。

五、建立在观测基础上的银河系模型

哥白尼的日心说把所有的恒星都看作是围绕着太阳的“恒星天”,镶嵌在最外层的球壳上.只是到了18世纪中叶以后,人类才逐步走出了太阳系.在此之前,恒星自行的发现和恒星视差已经使许多天文学家怀疑:恒星会不会就是遥远的太阳?而太阳会不会围绕着更大的恒星体系运动?

著名的观测大师威廉·赫歇尔不仅回答了上述问题,并在大量的恒星观测的基础上建立了第一个银河系的模型.赫歇尔出生于1738年,早年曾从事音乐工作,当过军乐团的团员,后来终生致力于天文观测工作.他自己动手磨制望远镜,曾制造了当时最大的一架口径1.22m,镜筒长达12m的金属反射望远镜.赫歇尔的妹妹卡罗琳·赫歇尔也是一位有献身精神的天文学家,终身未嫁,帮助哥哥从事望远镜制造和天文观测达50年之久.赫歇尔于1781年发现了天王星,使其名声大噪,被授予皇家天文学家.之后,赫歇尔发现了太阳的本动,对双星进行了大量的研究,系统地观测了大量的星云和星团.

赫歇尔一生中最重要的工作是对银河系结构的研究.他的主要方法是按一定的天区一一计数恒星.他计数的恒星数目是惊人的,达117600颗.后来又扩展到南半球,计数了70000颗.为了构造银河系的模型,他不得不做一些基本的假设:

1. 恒星的光度是一样的,恒星的视星等可以作为距离的量度;
2. 星光按距离平方反比减弱;
3. 恒星的分布是均匀的;
4. 他的望远镜可以看到银河系的边界.

在这些假设下,赫歇尔得到了如图1.1的银河系模型.

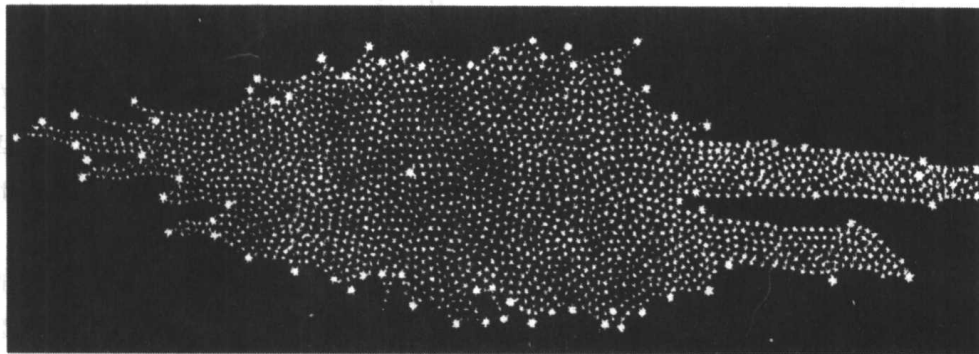


图1.1 赫歇尔绘制的银河系模型,中心亮点是太阳的位置

赫歇尔的银河系结构模型存在着一些不足之处.如图中太阳位于银河系的中心,而图中右边的分叉是由于消光物质造成的.事实上,当我们夜晚用肉眼观测银

河时,会看到在天鹅座十字处银河分叉为两支,这正是赫歇尔模型中的分叉.这些不足是由于赫歇尔的4条假设都是不够完备的,最主要的是忽略了大量的星际物质的影响.赫歇尔的儿子约翰·赫歇尔也是一位出色的天文观测学家.他继承父业,使银河系模型进一步完善.

赫歇尔的工作使人类迈出了太阳系,走进了浩瀚的银河系世界.这是人类对宇宙认识的一个重要的里程碑.不过,赫歇尔本人终生追求的研究“宇宙的结构”,现在看来也仅仅是银河系而已.

§ 1.2 由奥伯斯佯谬引发的思考

在人类认识宇宙的发展史中,有一个重要的命题起到了承前启后的作用,这便是奥伯斯佯谬.奥伯斯佯谬向经典的宇宙概念提出了挑战,要圆满地回答这一问题无论从观测或理论上都必然导致现代宇宙论的诞生.

德国天文学家奥伯斯(H. Olbers)于1826年提出了一个简单的问题:“为什么夜晚的天空是暗的?”若假设:

1. 宇宙是均匀的和无限的;
2. 宇宙空间中均匀地分布着星体,其数密度 $\rho = \text{常数}$;
3. 星体的平均发光本领,即光度 L ,从统计上来看可以认为是不变的;
4. 光在宇宙中的传播规律与地面上一样,也是亮度与距离的平方成反比.

根据上述假设,可以容易地证明,从地球上观测到的夜空应该是同白昼一样的明亮.考虑离地球距离为 r 到 $r + \Delta r$ 的一层球壳,由于恒星的数密度为 ρ ,球壳的体积为 $4\pi r^2 \Delta r$,则壳层内的恒星数目为

$$\Delta N = 4\pi r^2 \Delta r \rho \quad (1.1)$$

每颗恒星的光度为 L ,从地球上接收到一颗恒星发出的光辐射为

$$E' = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (1.2)$$

整个壳层的光辐射应为

$$\Delta E = E' \Delta N \quad (1.3)$$

将式(1.1)和(1.2)代入上式,

$$\Delta E = \rho \Delta r L \quad (1.4)$$

宇宙中所有恒星照射到地球上的辐射应该对上式从0积分到无穷大.考虑到 ρ 和 L 都是常数,则

$$E = \int_0^{\infty} \rho L dr = \rho L \int_0^{\infty} dr \rightarrow \infty \quad (1.5)$$

因此,尽管每一颗恒星对地球的辐射贡献不大,但总加起来,必然造成天空是无限亮的.



图 1.2 著名的奥伯斯佯谬,人站在地球上,看天空,积累的星光应该如同白昼

奥伯斯的论断显然与实际情况不符合,问题出在什么地方呢?上述的推算过程是正确的.因此,问题只能出在奥伯斯的假设上.

广义相对论建立的宇宙模型,打破了长期以来传统的经典时空概念.时空的性质是和空间中物质的分布联系在一起的,物质产生的引力会引起空间弯曲,不再遵守牛顿式的平直空间.这样一来,新的宇宙模型不再满足经典意义下的无限性.换句话说,奥伯斯的第一条假设是有问题的.

宇宙中天体的分布是逐级成团式的,也称为“阶梯式”的宇宙.恒星是第一阶,星团是第二阶,再往后是星系、星系团.这样一来,宇宙空间中恒星的分布不再是均匀的,即 $\rho \neq \text{常数}$.第二条假设也是不成立的.

宇宙中存在着大量的不发光的暗物质,星体发出的光在传播中会被大量地吸收,这是造成所有天体的光减弱的一个重要原因.

历史上,也曾考虑,如果宇宙的年龄足够短,则只有

$$D = Tc \quad (1.6)$$

距离内的星光才能到达观测者,其中 T 为宇宙的年龄, c 为光速.因此,式(1.5)中的积分应该是从 0 到 D ,而不是到无穷大.

但是,所有以上列举的因素从现代观测宇宙学的角度来看也许都不是最根本

的,最根本的原因是由于宇宙在膨胀.当天体以一定的速度远离我们时,我们所接收到的能量会减少,其减少的因子为

$$F = \frac{1}{1+z} \quad (1.7)$$

其中 z 是天体的红移.如果天体远离我们的速度达到光速, z 值为无限大,则完全接收不到天体发来的光.因此,每个天体所发的光对地球的贡献比距离平方反比规律减少得更快.即使把它们都加在一起,也是一个不大的量.奥伯斯佯谬的最根本原因是由于宇宙在膨胀着.

§ 1.3 从马赫原理到宇宙学原理

第一位对天体的运动规律给予解释的是牛顿.在实验室中也许是微不足道的引力相互作用,对于天体的运动变得至关重要.根据天体之间的引力作用,牛顿力学成功地解释了太阳系中各类天体的运动.在当时的观测精度下,不仅能够准确地预言已知的行星的运动位置,而且还在“笔尖上”发现了新的行星.

在牛顿力学中,有两个概念是最重要的,即惯性和力.当物体的运动状态发生变化时,会受到力的作用,这种力和物体本身的性质——惯性有关,因此称为惯性力.此外,物体之间还存在着永恒的作用力——引力.在牛顿的力学体系下,惯性力和引力被“生硬地”联系在一起.牛顿力学的正确性被局限在惯性参考系统下,即体系处于静止或匀速运动的状态下.当人类对外部世界的认识局限在地球或太阳系的范围内时,惯性参考系的条件被认为是满足的.

能用牛顿力学的概念去思维整个宇宙吗?当把地球绕太阳的运动考虑进去以后,就会发现存在着问题.

地球在绕太阳运动过程中存在着一个加速度,因而受到一个离心力

$$F_{\text{离}} = m_{\text{地}} V^2 / R \quad (1.8)$$

式中 V 是地球绕太阳的运动速度, $m_{\text{地}}$ 是地球的质量, R 是日地之间的距离.这个力由地球和太阳之间的引力来平衡.这样一来,在地球上讨论的任何力学运动,便不再是处于惯性参考系中.事实上,在任何一个天体上,都无法实现理想的惯性参考系.

为了克服上述的困难,牛顿提出了绝对时空的概念.所谓绝对时空,牛顿认为是与外界毫无关系的一种绝对的和纯粹的时空.显然,这种绝对时空严格地满足惯性参考系.为了使通常的参考系也能满足惯性参考系,牛顿在参考系中加入一种表现力.在上述地球绕太阳的运动中,表现力即地球运动的离心力.把离心力加进去,地球上便满足惯性参考系的要求了.牛顿将这类表现力统称为惯性力.