



新世纪高等学校规划教材·天文学系列

观测宇宙学

何香涛◎著

GUANCE
YUZHOUXUE



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

雅外借



新世纪高等学校规划教材·天文学系列

观测宇宙学

何香涛◎著

GUANCE
YUZHOUXUE



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

观测宇宙学 / 何香涛著. — 3 版 — 北京: 北京师范大学出版社, 2017.4

新世纪高等学校规划教材·天文学系列

ISBN 978-7-303-22127-1

I. ①观… II. ①何… III. ①观测—宇宙学—高等学校—教材 IV. ①P159.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 028247 号

营销中心电话	010-62978190 62979006
北师大出版社科技与经管分社	www.jswsbook.com
电子邮箱	jswsbook@163.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印刷: 三河市东兴印刷有限公司
经销: 全国新华书店
开本: 730 mm × 980 mm 1/16
印张: 19.5
字数: 318 千字
版次: 2017 年 4 月第 3 版
印次: 2017 年 4 月第 1 次印刷
定价: 48.00 元

策划编辑: 王安琳 刘凤娟 责任编辑: 王安琳 刘凤娟
美术编辑: 刘超 装帧设计: 刘超
责任校对: 李茵 责任印制: 赵非非

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-62978190

北京读者服务部电话: 010-62979006-8021

外埠邮购电话: 010-62978190

本书如有印装质量问题, 请与出版部联系调换。

印制管理部电话: 010-62979006-8006

前 言

自然科学中的每一个学科，在其自身的发展过程中，往往有快有慢，快慢交替一段时间，会出现一次飞跃。近代天文学起始于 20 世纪 60 年代，历经半个世纪，天文学家们不断的观测，不停地积累，终于迎来了今天——天文学的又一次飞跃。十多年来，新的发现和新的概念层出不穷，不仅令天文学家们感到吃惊，也令许多物理学家们为之操劳。

观测宇宙学被认为是天文学的前言，虽然其自身正名才只有 40 年左右，但习惯上，大家都把大宇宙有关的成就全部归在它的账下。因此，观测宇宙学也许成为这一次天文学飞跃发展的领衔学科。

本书出版于 2002 年，2005 年被教育部推荐为全国研究生教学用书。此次再版改正了原书中的错误，增加了新的内容，挑选了新的彩图。相信读者会感到耳目一新。在此感谢北京师范大学出版社的大力支持。

在修订过程中，北师大天文系的孙艳春、陈阳、张燕平、朱宗宏和付建宁诸位老师，以及研究生白宇等都给了很多帮助，在此一并致谢。

编 者

第一版前言

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，这一切极大的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，更是备受关注的前沿。

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，观测工作需要不断的深入和积累。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，在教学和研究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、陆埏、尤峻汉、邹振隆、黄克谅、朱慈盛、赵刚、吴时敏、赵峥、朱宗宏、杨志良、陈阳，以及 Impey(美国亚利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，或者进行过有意的讨论。宋丽敏和程岭梅用了很长时间帮助打印。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

再 版 前 言

自然科学中的每一个学科，在其自身的发展过程中，往往有快有慢，快慢交替一段时间，会出现一次飞跃。近代天文学起始于 20 世纪 60 年代，历经半个世纪，天文学家们不断地观测，不停地积累，终于迎来了今天——天文学的又一次飞跃。十多年来，新的发现和新的概念层出不穷，不仅令天文学家们感到吃惊，也令许多物理学家们为之操劳。

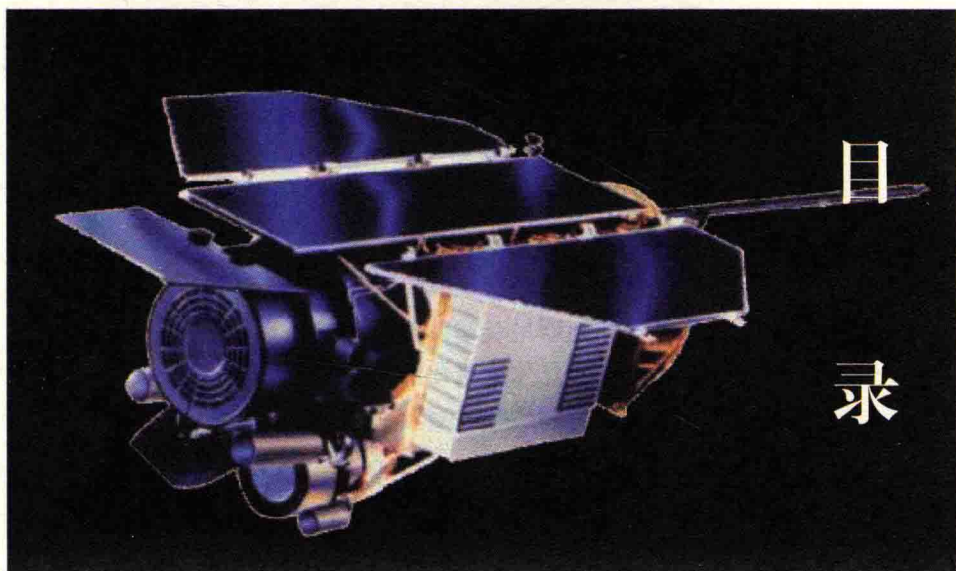
观测宇宙学被认为是天文学的前沿，虽然其自身正名才只有 30 年左右，但习惯上，大家都把大宇宙有关的成就全部归在它的账下。因此，观测宇宙学也许成了这一次天文学飞跃发展的领衔学科。

本书出版于 2002 年，2005 年被教育部推荐为全国研究生教学用书，建议修订再版。经过协商，原出版者科学出版社同意转让版权，改由北京师范大学出版社出版。由于是母校出版社，不惜工本，全部彩版，完全可以和洋书媲美。为了珍惜这次再版机会，审核了原书中的错误，增加了新的内容和章节，补充了新的文献，尤其是挑选了一批新的彩图。相信读者会感到耳目一新。在此特别感谢北京师范大学出版社和本书的责编王安琳编审。

在修订过程中，北师大天文系的孙艳春、陈阳、张燕平、朱宗宏和付建宁诸位老师，以及研究生白宇等都给了很多帮助，在此一并致谢。

何香涛

2007 年于北京师范大学



第一章 可观测的宇宙 1

- § 1. 1 人类对宇宙的认识和深化 1
 - 一、中国古代的宇宙观 1
 - 二、古希腊的天文学和托勒密体系 3
 - 三、哥白尼日心说的建立 5
 - 四、万有引力和太阳系模型 7
 - 五、建立在观测基础上的银河系模型 8
- § 1. 2 由奥伯斯佯谬引发的思考 9
- § 1. 3 从马赫原理到宇宙学原理 11
- § 1. 4 现代观测宇宙学的诞生 14

第二章 宇宙的距离尺度和哈勃定律 17

- § 2. 1 膨胀的宇宙和哈勃定律 17
- § 2. 2 河内天体的距离测定 21
 - 一、三角视差 21
 - 二、分光视差 23
 - 三、星团视差 23

- 四、造父视差 24
- § 2. 3 河外天体距离的测定 25
 - 一、造父变星 25
 - 二、行星状星云 27
 - 三、红超巨星 28
 - 四、H II 区 28
 - 五、球状星团 28
 - 六、新星和超新星 28
 - 七、土利—费什尔方法 29
 - 八、星系团中的最亮星系 30
 - 九、直接测量方法 30
- § 2. 4 哈勃常数 31
- § 2. 5 哈勃定律的验证和哈勃流 35
 - 一、近距离范围内的验证 35
 - 二、星系的验证 35
 - 三、高红移情况下的验证 36
 - 四、哈勃流和本动速度 37

第三章 宇宙模型和宇宙的演化 38

- § 3. 1 标准宇宙模型 38
 - 一、弯曲空间下的长度、面积和体积 38
 - 二、标准宇宙模型 40
- § 3. 2 膨胀的宇宙 42
- § 3. 3 标准宇宙模型下的基本物理量 46
 - 一、红移 46
 - 二、天体的距离 47
 - 三、哈勃常数和减速因子 49
 - 四、物质密度和密度参数 50
 - 五、宇宙学时间和回顾时间 51
 - 六、宇宙因子 53
 - 七、压力 53
- § 3. 4 膨胀宇宙的各种模式 54

一、 $\Omega_0=1$ 或 $q_0=1/2$	55
二、 $\Omega_0>1$ 或 $q_0>1/2$	56
三、 $\Omega_0<1$ 或 $q_0<1/2$	57
§ 3. 5 宇宙的热大爆炸起源	59
§ 3. 6 宇宙的热历史	63
§ 3. 7 宇宙的年龄	68
一、哈勃年龄	70
二、放射性元素的年龄	70
三、球状星团的赫罗图	72
§ 3. 8 有待进一步回答的问题	73
一、物质和反物质	74
二、大统一理论和基本粒子	75
三、真空相变和宇宙的暴涨	76
四、宇宙的开端或“奇点”	77
§ 3. 9 其他的宇宙模型	78
一、米尔恩 (Milne) 模型	78
二、乔丹 (Jordan) 模型	79
三、狄拉克 (Dirac) 模型	79
四、布朗斯—迪克 (Brans-Dicke) 模型	81
五、稳恒态模型	82

第四章 宇宙中的物质 87

§ 4. 1 宇宙中的物质	87
一、天体和天体之间的介质	87
二、可视物质和不可视物质	89
三、重子物质和非重子物质	89
§ 4. 2 原初宇宙的元素合成和丰度	90
§ 4. 3 元素丰度的观测验证	94
§ 4. 4 Gunn-Peterson 检测	96
§ 4. 5 暗物质	98
§ 4. 6 星际介质	101
§ 4. 7 Ω_m 的测定和 Ω_A	105

一、星系和星系团的光度质量 105

二、星系团的位力质量 107

三、暗物质 107

四、核合成理论 108

五、其他的测定方法 108

六、 Λ 的影响 Ω_Λ 108

§ 4. 8 暗能量 111

第五章 减速因子 q_0 及其测定 115

§ 5. 1 空间曲率和减速因子 115

§ 5. 2 用红移—视星等关系测定 q_0 116

§ 5. 3 用星系计数测定 q_0 118

§ 5. 4 通过角大小测定 q_0 122

§ 5. 5 q_0 值能为负吗 125

第六章 宇宙的背景辐射 127

§ 6. 1 微波背景辐射的理论预言和发现 127

§ 6. 2 辐射性质的测定和 COBE 129

§ 6. 3 宇宙背景辐射的涨落和 Sachs-Wolfe 效应 133

§ 6. 4 Sunyaev-Zeldovich 效应 138

§ 6. 5 宇宙背景天体及其辐射 141

一、射电背景 141

二、红外背景 142

三、远紫外背景 142

§ 6. 6 WMAP 与宇宙背景辐射的新探测 144

第七章 星系的形成和演化 151

§ 7. 1 星系的一般物理特性 151

一、星系的分类 151

二、星系的光度分布 152

三、星系的质量和质光比 153

四、星系的自转 153

- § 7. 2 从均匀到不均匀——金斯不稳定性 155
- § 7. 3 星系的形成过程 159
 - 一、等温微扰理论 159
 - 二、绝热微扰理论 161
- § 7. 4 星系质量的测定 164
 - 一、自转质量 164
 - 二、双重星系的质量 165
 - 三、星系的位力质量 166

第八章 活动星系核 169

- § 8. 1 活动星系核的发现 169
- § 8. 2 活动星系核的观测特征和分类 172
 - 一、高光度 172
 - 二、小尺度 172
 - 三、物质高度密集 173
 - 四、非热辐射谱 173
 - 五、光变现象 174
 - 六、喷流现象 174
- § 8. 3 类星体的观测方法 175
- § 8. 4 类星体的光谱 180
 - 一、类星体的连续谱 181
 - 二、类星体的发射线 183
 - 三、类星体的吸收线 185
- § 8. 5 类星体的光度函数 188
- § 8. 6 赛弗特 (Seyfert) 星系 192
 - 一、观测特征与分类 192
 - 二、Seyfert 星系的发射线 193
 - 三、Seyfert 星系的红外辐射和 X 射线辐射 195
 - 四、Seyfert 星系与其他星系的演化联系 196
- § 8. 7 其他类型的活动星系核 197
 - 一、BL Lac 天体 197
 - 二、N 星系 200

三、LINER 201

四、星暴星系 202

§ 8. 8 喷流和视超光速现象 203

一、喷流的形态、对称性和大小 203

二、视超光速现象 206

§ 8. 9 $\text{Ly}\alpha$ 线丛 209

一、 $\text{Ly}\alpha$ 线丛的统计分布 210

二、饱和线和系限 211

三、 $\text{Ly}\alpha$ 云的物理特性 212

§ 8. 10 引力透镜现象 212

§ 8. 11 活动星系核的统一物理模型 218

一、活动区尺度 218

二、黑洞核心 218

三、能源 219

四、统一模型 221

§ 8. 12 活动星系核的形成和演化 222

§ 8. 13 活动星系核的多波段巡天观测 225

一、光学巡天 226

二、X 射线巡天 228

三、红外巡天 232

四、射电巡天 233

§ 8. 14 最大红移类星体 235

§ 8. 15 红移的本质及其争论 243

一、宇宙论性红移 243

二、非宇宙论性红移 244

第九章 宇宙空间的大尺度结构 247

§ 9. 1 星系的巡天观测和光度函数 247

§ 9. 2 星系的大尺度空间分布 250

§ 9. 3 河外天体空间分布的 $\langle V/V_m \rangle$ 检验 254

一、基本方法 255

二、一般性证明 256

三、样品的完备性和演化效应	257
四、 $\langle V/V_m \rangle$ 检验的推广	258
§ 9. 4 星系团的形态分类	258
一、星系团的光学观测特征	261
二、星系团的质量和暗物质	263
三、星系团中的 X 射线辐射	265
§ 9. 5 星系团的物理特性	261
一、星系团的光学观测特征	261
二、星系团的质量和暗物质	263
三、星系团中的 X 射线辐射	265
四、星系团的引力透镜效应	267
§ 9. 6 从本星系群到超星系团	270
参考文献	275
附表	
附表 1 常用物理常数表	283
附表 2 常用天文常数表	284
附表 3 天文中常见的光谱线	285
附表 4 一年中恒星赤经上中天时刻	287
附表 5 有趣的时间、距离、质量和密度表	288

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,但圆盖形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。

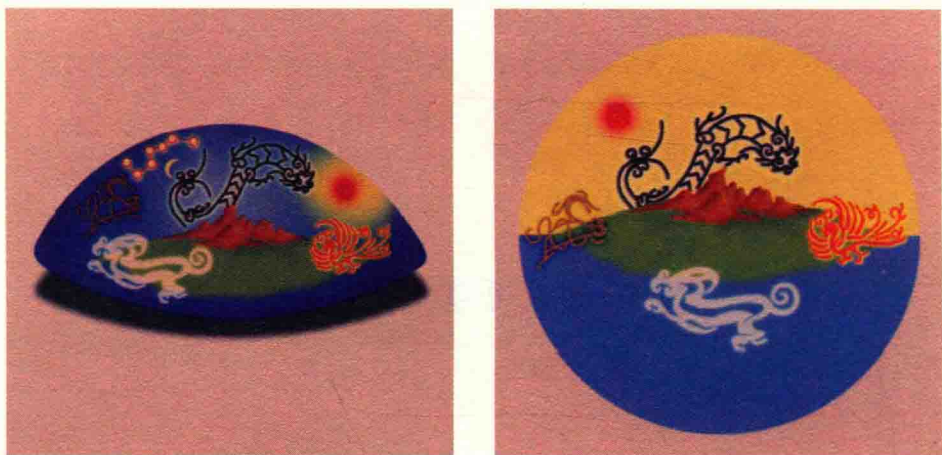


图 1.1 我国古代关于宇宙的两大学说：盖天说(左)和浑天说(右)。后人创造的形象图案生动地展示了其内涵

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 7 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。

对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

地球上运动。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。在古代宇宙论中能提倡无限宇宙和无神思想是难能可贵的。英国研究中国科学史专家李约瑟在其《中国科学技术史》一书中写道:“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。东晋《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涌现过许多先进的思想。但是,中国古代的宇宙观也有不足之处,局限于哲学性思辨的成分很浓,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密体系

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。