

中国科学院国家天文台 天文学系列

# 宇宙大尺度结构的形成

向守平 冯珑珑 编著



第2版



中国科学技术出版社  
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

阅 览

P 159.5  
20141.2



中国科学院国家天文台·天文学系列

# 宇宙大尺度结构的形成

## (第2版)

向守平 冯珑珑 编著

中国科学技术出版社

·北京·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

宇宙大尺度结构的形成/向守平, 冯珑珑编著.—2 版.  
—北京: 中国科学技术出版社, 2012. 7  
(中国科学院国家天文台·天文学系列)  
ISBN 978 - 7 - 5046 - 6123 - 4

I. ①字… II. ①向…②冯… III. 宇宙 - 大尺度 -  
结构 IV. P159.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 140828 号

---

责任编辑 赵 晖 夏凤金  
封面设计 付小鹏  
责任印制 张建农

---

出 版 中国科学技术出版社  
发 行 科学普及出版社发行部  
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号  
邮 编 100081  
发行电话 010 - 62173865  
传 真 010 - 62179148  
投稿电话 010 - 62103182  
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

---

开 本 787mm×1092mm 1/16  
字 数 350 千字  
印 张 18  
版 次 2012 年 7 月第 2 版  
印 次 2012 年 7 月第 1 次印刷  
印 刷 北京金信诺印刷有限公司

---

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6123 - 4/P · 158  
定 价 52.00 元

---

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)  
本社图书贴有防伪标志, 未贴为盗版

中国科学院国家天文台·天文学系列

《中国科学院国家天文台天体物理丛书》编委会

主 编 王绶琯

副主编 赵 刚 邹振隆 李宗伟

## 内 容 简 介

本书在概括介绍现代宇宙学的主要观测事实以及标准宇宙学模型理论框架的基础上，系统讨论了宇宙大尺度结构形成的基本理论。我们今天观测到的宇宙结构，是由极早期的物质密度扰动逐步发展、演化而形成的。在很长的时期内，密度扰动的发展是线性的，这一时期留下了宇宙微波背景辐射（CMB）的遗迹，并形成了密度扰动的线性转移函数与相应的扰动功率谱。本书对线性扰动理论作了较为系统的介绍。对于在线性扰动基础上进一步发展的非线性扰动，本书重点介绍了广泛采用的球对称坍缩模型以及 Press-Schechter 质量函数，并概要介绍了“薄饼”模型、N 体数值模拟原理以及 Gauss 随机场及其主要统计性质。围绕宇宙第一代天体的形成，本书重点讨论了暗物质晕中重子气体的冷却和坍缩过程、第一代恒星的形成以及星系的化学演化等内容，并介绍了类星体的 Gunn-Peterson 检验、星系际介质的再电离、引力透镜等高红移宇宙中发生的一些重要的天体物理过程。

本书适合天体物理专业的研究生及高年级本科生作为相应课程的教材，也可供天体物理及理论物理工作者阅读参考。

## 《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。



2002年1月于北京

## 前 言

今天，大爆炸宇宙模型已经被人们普遍接受，成为研究宇宙结构形成和演化的基本模型。按照这一模型，宇宙起源于一百多亿年前的一次大爆炸，随之时空形成并不断膨胀。在此后的时间里，宇宙曾经历了暴胀（inflation）阶段，其大小在极短的时间内膨胀了几十个数量级；之后，随着温度的不断降低，宇宙依次经历了强子时期、轻子时期、早期核合成、复合时期等重要演化阶段，最终形成了我们今天观测到的宇宙结构。我们把星系及星系以上尺度的结构称之为宇宙大尺度结构，它的形成和演化与宇宙学的整体模型密切相关，即与宇宙的拓扑结构（如曲率）和基本宇宙学参数（如哈勃常数  $H_0$ 、宇宙学常数  $\Lambda$ 、各种宇宙物质成分的密度参数等）密切相关；同时，宇宙大尺度结构的基本组元是由巨量恒星构成的星系，而星系的形成是内容极其丰富多样的天体物理过程，其中包括气体冷却、坍缩、加热、再电离等过程，还要考虑周围环境的能量反馈、磁场、角动量交换等一系列复杂因素。因而，宇宙大尺度结构的形成和演化长期以来就是宇宙学极具吸引力的研究领域。近年来，随着科学技术的巨大进步，从地面到太空，从射电、红外、光学直到 X 射线和  $\gamma$  射线，多个波段的观测已经延伸到宇宙越来越大的纵深，为理论研究提供了海量的观测数据；大容量、高速度的计算机也已成为理论分析极其强有力的辅助工具，人们用它可以对宇宙结构的形成进行大规模的数值模拟。许多人认为，今天的宇宙学研究已经步入精确研究阶段，人们已经能够在相当高的精度上确定宇宙学基本参数的取值范围，并把观察的目光从十几亿、几十亿光年扩展到近百亿光年的宇宙深处，接近了宇宙诞生的时刻。理论和观测研究至今所取得的巨大成功，使我们对于建立在爱因斯坦广义相对论理论基础上的宇宙学模型充满信心；但另一方面，我们仍然面对着诸多的难题甚至挑战，例如多年来一直困扰宇宙学研究者的暗物质问题，以及近年来由于宇宙加速膨胀的发现而提出的暗能量问题等。这些问题不仅受到宇宙学研究者的强烈关注，而且受到理论物理及粒子物理研究者的强烈关注。即使是星系及星系团形成这个看来发生时间较晚、观测资料也非常丰富的过程，也还有许多难点问

题有待解决，例如第一代天体形成的时间、复合之后宇宙再电离的时间和范围、星系团中弥漫 X 射线背景的产生等。在研究方法上，线性扰动理论被广泛应用于宇宙大尺度结构形成的早期阶段，并在与宇宙背景辐射（CMB）的观测结果相比较时获得了很好的一致；但当宇宙结构的形成进入非线性阶段后，理论处理就不得不采用许多人为的近似，有些近似明显看来是不尽合理的。计算机数值模拟在处理非线性演化过程中显示了强大的威力，用它甚至可以模拟出两个星系的碰撞、并合过程；但即便如此，不足之处依然时常可见，如在模拟星系团密度轮廓时就出现中心尖点（cusp）和子结构过多的问题，等等。总之，虽然人们已把今天的宇宙学研究称为精确宇宙学，但实际上离真正的“精确”还有很长的路要走。例如，占宇宙总质量（能量）绝大部分的暗物质和暗能量究竟是什么，我们至今仍一无所知。面对形态万千、变幻无穷的宇宙，我们已经了解的和还没有了解的相比，也许仍然是树木和森林、江河与大海的关系。这意味着，浩瀚深邃的宇宙，仍然还有许许多多的奥秘等待我们去努力探索。

现代宇宙学是由爱因斯坦奠基的，它的物理思想和数学结构是基于广义相对论。本书主要讨论的宇宙大尺度结构的形成，其基本理论框架也应当是广义相对论。但由于数学形式的复杂，使得用广义相对论来处理问题时人们通常会感到棘手，甚至望而却步。所幸的是，在研究宇宙大尺度结构的形成问题时，我们并不一定要处处用广义相对论，在许多情况下应用牛顿理论同样可以得到理想的结果。这其中的原因是，由宇宙学原理，宇宙在整体上是均匀各向同性的，这就使我们可以从一个局部来研究宇宙大范围的性质，而局部宇宙的描述除少数情况外（例如黑洞），是完全可以应用牛顿理论的。

宇宙大尺度结构的形成与宇宙早期演化的各个阶段都有着密切的联系。例如，暴胀宇宙产生了早期尺度不变的密度扰动（即 Harrison-Zel'dovich 谱的扰动），它是演化成今天宇宙结构的“种子”；宇宙极早期发生的正反物质极小的对称破缺，造成了今天以正物质为主的宇宙，以及比物质粒子多得多的光子；早期核合成给我们提供了近 3/4 的氢和 1/4 的氦、金属丰度几乎为零的化学环境，宇宙第一代天体就是在此基础上形成的等。由于本书只着重于讨论宇宙大尺度结构形成和演化，故对其他阶段发生的主要物理过程不再作详细叙述，读者可以参考有关教科书或专著。



本书形成于作者在中国科学技术大学讲授相关研究生课程的讲义，定位为研究生学习宇宙大尺度结构形成理论的入门读物。书中把重点放在介绍这一领域的基本概念与基础理论，选材时偏重于内容的基础性、重要性与成熟性。因此，还有许多问题没有深入展开讨论，许多研究前沿的最新进展（包括最新的观测数据）也可能被遗漏。同时，囿于作者的学识，对一些问题的看法不免有落伍甚至错误之处，敬请读者谅解并批评指正！

在本书的编写和出版过程中，作者得到了中国科学技术大学研究生院、中国科学院国家天文台的大力支持和资助，在此表示衷心的感谢！同时，两位作者还想利用本书出版的机会，向我们就读研究生时期的导师——美国亚利桑那大学 L.Z. Fang 教授表示最诚挚的敬意与谢意！L.Z. Fang 教授是现代宇宙学在中国的最早传播者和拓荒者，他曾用极大的热情和努力，在这片古老的热土上普及广义相对论和现代宇宙学知识，培养了一批至今仍活跃在科研第一线的中青年科学工作者。他在学术研究中展现出来的热情、敏锐、严谨以及孜孜不倦的治学精神，使本书作者以及每个曾受过他教诲的人终生受益。

作者

2009年4月

# 目 录

第 1 章 现代宇宙学的诞生与观测基础	(1)
1.1 从远古人类的宇宙观到现代宇宙学	(1)
1.2 现代宇宙学的观测基础	(6)
1.2.1 星系的大尺度空间分布	(7)
1.2.2 星系距离与红移的关系	(9)
1.2.3 宇宙微波背景辐射	(13)
1.2.4 宇宙中的元素丰度	(17)
1.2.5 宇宙的年龄	(19)
1.2.6 宇宙中的物质组成	(25)
1.2.7 两个重要的数量比——重子/光子与反物质/物质	(30)
第 2 章 Friedmann 宇宙模型	(33)
2.1 宇宙学原理与 Robertson-Walker 度规	(33)
2.2 Friedmann 方程	(36)
2.2.1 基本形式的 Friedmann 方程	(37)
2.2.2 包括真空能量的 Friedmann 方程	(39)
2.2.3 减速参数 $q_0$	(42)
2.3 宇宙学红移与视界	(43)
2.4 宇宙的年龄	(47)
2.5 宇宙学距离	(49)
第 3 章 宇宙热历史概述	(53)
3.1 从辐射为主到物质为主	(53)
3.2 宇宙的创生——普朗克时期	(57)
3.3 宇宙暴胀	(59)
3.3.1 标准宇宙学模型的两大疑难	(59)
3.3.2 宇宙暴胀机制简介	(62)
3.4 强子时期和轻子时期	(68)
3.5 轻元素核合成	(70)

3.6	复合时期	(73)
3.6.1	复合过程电离率的演化	(75)
3.6.2	最后散射面与最后散射层	(78)
3.6.3	辐射与重子物质之间的热平衡	(79)
3.7	星系形成	(82)
3.8	关于宇宙暗能量的一个讨论	(83)
<b>第4章</b>	<b>密度扰动的线性演化</b>	<b>(86)</b>
4.1	Jeans 引力不稳定性理论	(87)
4.2	密度扰动的演化——尘埃宇宙	(90)
4.3	密度扰动的演化——辐射为主的宇宙	(94)
4.4	密度扰动的演化——一般形式的物态方程	(96)
4.5	物质与辐射混合流体中的 Jeans 质量	(97)
4.6	视界质量与阻尼质量	(99)
4.7	广义相对论的密度扰动演化方程	(102)
4.8	辐射扰动的光子碰撞方程 (Boltzmann 方程)	(112)
4.9	重子与辐射耦合的动力学方程——平面波展开	(115)
4.10	线性转移函数与密度扰动功率谱	(119)
4.10.1	线性转移函数	(119)
4.10.2	密度扰动功率谱	(122)
4.10.3	质量涨落方差	(124)
4.10.4	原初扰动的产生和原初功率谱	(125)
4.10.5	关于扰动模式的附注	(127)
<b>第5章</b>	<b>宇宙微波背景辐射的各向异性</b>	<b>(129)</b>
5.1	CMB 温度涨落的统计描述	(129)
5.2	大角尺度上的各向异性: Sachs-Wolfe 效应	(135)
5.3	中等角尺度上的各向异性: Doppler 峰与声峰	(137)
5.4	小角尺度上的各向异性	(140)
5.5	视线方向随时间变化的引力势的影响	(140)
5.6	Sunyaev-Zel'dovich 效应	(141)
5.7	星系际介质再电离对 CMB 的影响	(142)
5.8	CMB 的偏振	(143)
<b>第6章</b>	<b>扰动的非线性演化</b>	<b>(147)</b>
6.1	球对称坍缩模型	(147)

6.2	Press-Schechter 质量函数	(152)
6.3	Zel'dovich 近似: “薄饼”模型	(162)
6.4	$N$ 体数值模拟与数值流体动力学方法简介	(164)
<b>第 7 章</b>	<b>密度扰动场及星系分布的统计性质</b>	<b>(169)</b>
7.1	宇宙密度扰动场的统计分析	(169)
7.1.1	Gauss 随机场及其统计性质	(169)
7.1.2	扰动峰的数密度	(173)
7.1.3	缓变背景场中峰的数密度的变化	(181)
7.1.4	密度峰及星系的相关函数	(182)
7.1.5	星系形成的偏置与偏置参数	(185)
7.1.6	密度峰的轮廓和密度分布	(188)
7.1.7	低维密度场的统计性质	(189)
7.2	星系的本动速度与红移空间的畸变	(193)
7.2.1	星系的本动速度	(193)
7.2.2	星系本动速度引起的红移空间畸变	(197)
<b>第 8 章</b>	<b>高红移宇宙</b>	<b>(199)</b>
8.1	宇宙第一代天体的形成	(199)
8.1.1	暗物质晕的位力平衡	(199)
8.1.2	暗晕中重子气体的冷却和坍缩	(203)
8.1.3	暗晕中恒星的形成	(211)
8.1.4	星族 III 和早期黑洞	(214)
8.1.5	星系的化学演化	(217)
8.1.6	星系的并合	(221)
8.1.7	星系形成中的 downsizing 问题	(222)
8.2	高红移天体与星系际介质	(224)
8.2.1	类星体	(224)
8.2.2	Gunn-Peterson 检验	(227)
8.2.3	宇宙再电离的历史	(232)
8.2.4	第一代天体的反馈作用	(236)
<b>第 9 章</b>	<b>引力透镜</b>	<b>(239)</b>
9.1	引力透镜的几何原理	(240)
9.2	引力透镜的观测	(248)

附录 A 热暗物质（有质量中微子）扰动的演化.....	(256)
A.1 非相对论处理：Vlasov 方程.....	(257)
A.2 严格相对论处理与近似方法.....	(261)
附录 B 密度扰动峰的 $n$ 点相关函数.....	(265)
参考书目.....	(269)
参考文献.....	(270)

# 第1章 现代宇宙学的诞生与观测基础

## 1.1 从远古人类的宇宙观到现代宇宙学

远古时期，人类祖先在观测天象变化的同时，就开始了对宇宙的思考 and 认识。宇宙的壮丽使他们赞叹与折服，而宇宙的神秘又使他们恐惧和崇拜。世界各民族都有自己最初关于宇宙结构的看法，以及关于宇宙开创的神话。在我国，远在战国时期的尸佼，就曾给宇宙下过一个定义：“四方上下曰宇，往古来今为宙”。“四方上下”即空间，“往古来今”即时间，也就是说，宇宙即是时空。相比于西方的“Cosmos”（原意为和谐、秩序）或“Universe”（原意为天地万物），尸佼的这一定义更加科学，也与现代宇宙学相符。因此可以说，我们的祖先对于宇宙的理解，远远走在当时世界的最前列。

关于宇宙的诞生和演化，我国古代文献的论述更是丰富多彩。例如《老子》中说：“天下万物生于有，有生于无。”这 and 现代宇宙学关于宇宙起源于真空的说法不谋而合，至今仍被国际学术界许多学者奉为经典。又如三国时期徐整的《三五历记》中关于盘古的故事：“天地混沌如鸡子，盘古生于其中。万八千岁，天地开辟。阳清为天，阴浊为地，盘古在其中，一日九变。神于天，圣于地。天日高一丈，地日厚一丈，盘古日长一丈。如此万八千岁，天数极高，地数极深，盘古极长，故天去地九万里。”这又立即使我们联想到现代宇宙学中膨胀宇宙的图像。当然，我们祖先的上述这些看法并不是建立在科学实证基础之上的，当时也完全没有科学实证的条件，故只能属于猜测或神话传说。但应当看到，在这些充满智慧和灵感的猜测或神话中，蕴涵了深刻的启示和哲理：宇宙并不是生来如此、万古不变的，它也会经历一个从创生到成长的演化过程，这一点与现代科学宇宙观十分一致。

与古代中国类似，世界上各古代文明发源地都有它们自己的关于宇宙起源的神话。古希腊的哲学家们相信宇宙本身包裹着一个球形外壳，地球居中。例如毕达哥拉斯就认为，一切立体图形中最美好的是球形，一切平面图形中最美好的是圆形，而整个宇宙是一个和谐体系（Cosmos）的代

表物。柏拉图认为，各种天体都是神灵，神灵美好的心使得它们作有规律的运动，它们分别在以地球为中心的同心球壳内运转（图 1.1）。亚里士多德在《天论》一书中写道：“亘古以来，最外层的天整个都无变化……必须是球形的。地球不用说是动的，它的地位不在别处，只在宇宙的中心。”托勒密（公元 2 世纪）在古希腊天文学家喜帕恰斯观测结果的基础上，自己又做了大量观测，写出了古代欧洲最详尽、最完整的天文学巨著——《大系统论》。在这本书中，他用一套复杂的本轮—均轮系统来解释日、月、行星的运动，成为古代欧洲的标准宇宙模型。到了中世纪，托勒密的宇宙体系更成为宗教神学的理论支柱，此时的宇宙学已沦入经院神学的深渊。

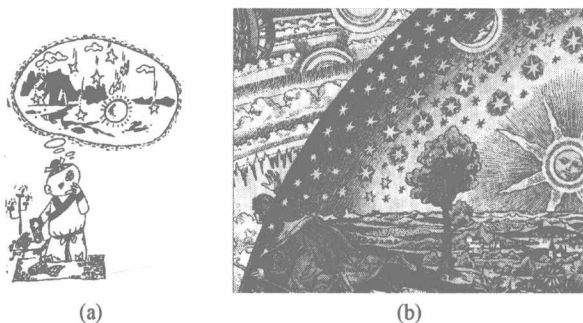


图 1.1 (a) 我国“杞人忧天”的传说，代表了古人对宇宙演化结果的一种思考；  
(b) 欧洲中世纪的宇宙观

直到 1543 年，哥白尼的不朽巨著《天体运行论》书稿在他临终之时得以出版问世，自然科学才开始从神学的束缚中解放出来。紧接着，意大利哲学家布鲁诺提出宇宙是无限的，时间和空间都是无穷尽的。不久，开普勒把他的老师第谷和他自己的大量天文观测记录加以整理、计算，得到了著名的行星运动的开普勒三定律。他发现行星的运动轨道并非圆形，而是椭圆形，太阳位于椭圆的一个焦点上。这样，从柏拉图、亚里士多德以来被认为最完美、最神圣的圆运动，就彻底结束了它的神话。虽然开普勒并不了解支配天体运动的根本原因所在，只是用“宇宙和谐的韵律”来解释观测到的天体运行规律，但他的工作为牛顿引力理论的发现奠定了坚实的观测基础。

伽利略于 1609 年亲手制造了一架折射式望远镜（图 1.2）。他用它发现了月亮上的环形山和“海”（月面上平坦的陆地），木星的四颗卫星以及太阳黑子和金星的盈亏。他还看到了许多肉眼看不到的恒星，并发现银河

是由点点繁星组成的。1668年，牛顿也制造出了第一架反射式望远镜（图1.3）。我们看到，在人类探索自然奥秘的过程中，这两位近代物理学的先驱始终一先一后，不仅都为创立经典力学作出了杰出贡献，而且都通过亲手制作的望远镜，把智慧的目光投向了浩瀚的宇宙。牛顿在开普勒和伽利略的大量观测和实验基础上，开创了经典力学。他的引力理论开辟了以力学方法研究宇宙的途径，从此天文学和宇宙学彻底摆脱了宗教神学的羁绊。自亚里士多德以来，就宇宙物质的运动规律而言，总是以月亮为界分成天界和世俗两个截然不同的世界，现在牛顿的力学体系把这两者完全统一起来了。

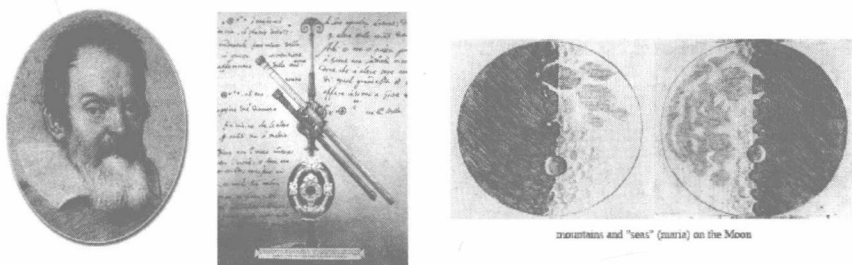


图 1.2 伽利略和他制作的望远镜并绘制的月面图

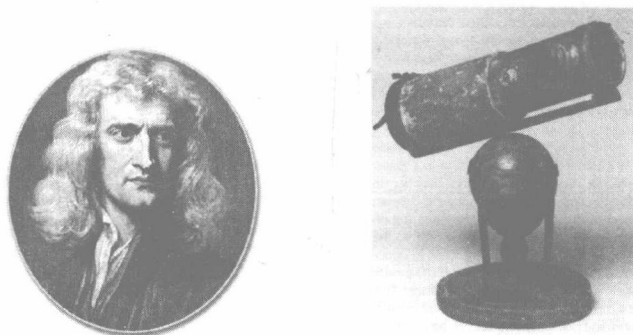
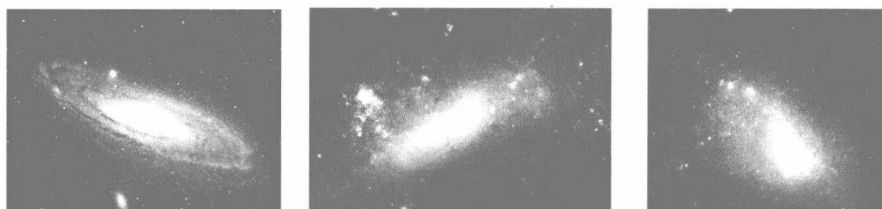


图 1.3 牛顿和他制作的望远镜

自望远镜发明后，人们陆续观测到一些云雾状的天体，称之为星云。其中最引人注目的是仙女座大星云（图1.4a），以及南半球天空上的大、小麦哲伦云（图1.4b, c）。18世纪德国古典哲学大师康德（I. Kant）曾大胆提出猜想，认为这些云状天体是像银河系一样由恒星构成的宇宙岛。但由于距离太远无法分辨，星云的本质到底是什么，自康德之后人们一直在激烈地争论。1786年，著名英国天文学家 W. 赫歇尔（William Herschel）





(a) 仙女座大星云 (M31)

(b) 大麦哲伦云

(c) 小麦哲伦云

图 1.4

观测了 29 个星云，发现其中大多数都可以分解为单个的恒星，于是他宣称这些星云都是河外星系，即宇宙岛。实际上，他所观测的星云绝大部分都是银河系内的球状星团和疏散星团。1790 年，他在金牛座发现了一个行星状星云（参见图 1.5），中间是一颗星，外围呈弥漫的云雾状，看似行星；

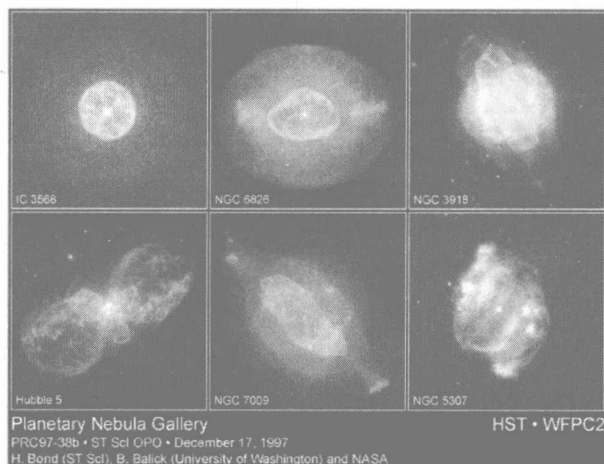


图 1.5 形态各异的行星状星云

后来又发现了一些无法分解为恒星的星云，于是他最终宣布放弃星云是河外星系的主张。1845 年，英国天文学家 W. Parsons 用直径 1.8m 的望远镜分解了许多赫歇尔没能分解的星云，并首次观测到一些星云的旋涡结构，宇宙岛的观点又重新活跃起来。1864 年，W. Huggins 通过分光观测，发现一批星云的光谱是发射线，说明这些星云是发光的气体，因而宇宙岛之说重归黯淡。直到 1924 年，哈勃（E. Hubble）用当时世界上最大的 2.5 米望远镜（图 1.6），在仙女座大星云和三角座星云等星云中发现有造父变星，并利用周光关系定出这几个星云的距离（75 万~150 万光年），才完全肯定它们是河外星系，从而结束了这一场长达 180 年的宇宙岛之争。接