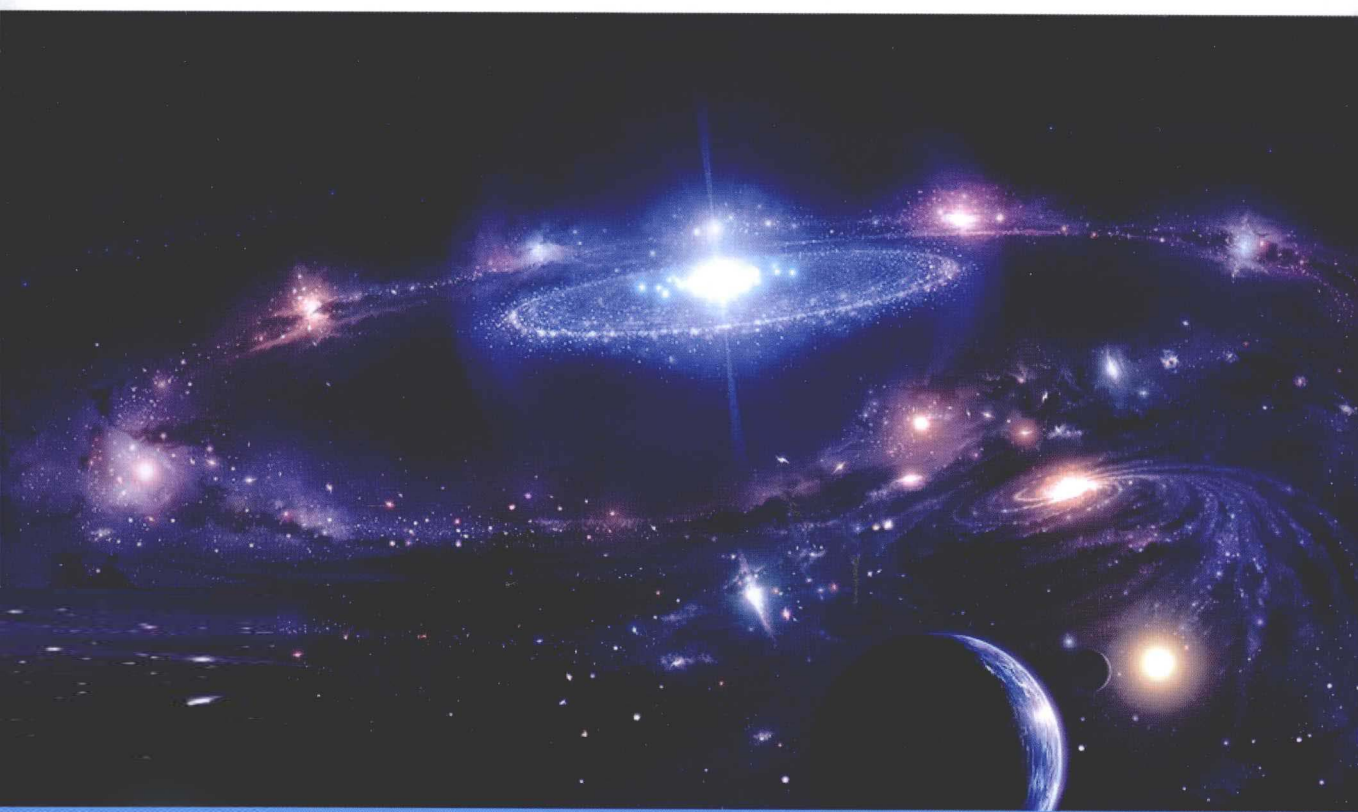


高等学校教材

现代宇宙学

吴大江 著



清华大学出版社

现代宇宙学

吴大江 著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了宇宙学中一些最基本的知识、一些著名宇宙学家的创新思维和突出贡献,以及自然科学的一些研究方法。其主要内容包括神秘的宇宙、漫话地心说、漫话日心说、经典力学的建立和牛顿经典宇宙学、时空观的革命、膨胀的宇宙、宇宙大爆炸理论、恒星的演化及暗物质和暗能量之谜。

本书还配备了多媒体课件、电子教案、题库和视频等教学资料,供授课教师使用。

本书可作为高等院校各专业学生的科学素养教育通识教材,也可以供有兴趣的读者参考使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代宇宙学/吴大江著. —北京:清华大学出版社,2013.2

ISBN 978-7-302-30932-1

I. ①现… II. ①吴… III. ①宇宙学 IV. ①P159

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 291818 号

责任编辑:张龙卿

封面设计:徐日强

责任校对:袁芳

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795764

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:14.5

插 页:4

字 数:340 千字

版 次:2013 年 2 月第 1 版

印 次:2013 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:050477-01



前言

我们生活在一个奇妙无比的宇宙中,只有凭借非凡的想象力才能鉴赏其年龄、尺度、狂暴甚至美丽。在这个极其广袤的宇宙中,我们人类所处的地位似乎微不足道。绚丽的宇宙总是带给人们无穷无尽的遐想。美丽的流星雨、罕见的日全食、举世瞩目的彗星与木星相撞、神秘的外星生命、宇宙大爆炸与黑洞等,一次又一次将我们的注意力引向头顶上的天空,探索茫茫宇宙的奥秘已成为许多人一生的梦想。查理德·费恩曼说过:“我们有幸生活于仍在进行发现的年代。这正如发现美洲一样——你只能发现一回。我们生活的年代正是我们发现自然基本定律的年代。”今天,我们正前所未有地接近理解宇宙的本性。

宇宙学(cosmology),就是从整体的角度来研究宇宙的结构和演化的学科。自古宇宙的结构就是人们关注的对象,历史上曾出现过各种各样的宇宙学说。中国的如浑天说、盖天说和宣夜说。其他的如古希腊阿利斯塔克的日心说、《圣经》的创世说、统治中世纪欧洲一千多年的地心说、16世纪波兰哥白尼的日心说等。中国历史上的思想家非常重视对自然规律的观察、研究。古代的哲人、先贤们是凭借简单的观察和直觉,对自然进行猜想和思辨,并确认宇宙万物有共同的本源。

古人曾努力尝试理解宇宙,但是他们没有发展出我们所知道的数学和科学。牛顿力学创立以后,建立了经典宇宙学。从此,宇宙学从哲学和神学中解放出来,21世纪的今天,我们拥有强有力的工具:诸如数学和科学方法的智力工具,以及计算机和望远镜、太空望远镜等先进的高科技产品。科学家借助这些工具,在大量天文观测资料、大型计算机的信息处理和现代物理学(相对论和量子力学)的基础上,创建了现代宇宙学。

关于宇宙,我们究竟知道什么?并且我们如何可以得到这些知识呢?宇宙从何处来?它又向何处去?宇宙有一个开端吗?如果有的话,在此之前发现了什么?时间的本质是什么?它会到达一个终点吗?我们能在时间中返回到过去吗?物理学中最新的突破,使我们有可能为其中一些悬而未决的问题提供答案,而新技术是实现这些突破的部分原因。对我们而言,这些答案有朝一日会变得像地球绕太阳公转那么平常。

现代宇宙学是当代物理学的前沿和物理文化灿烂辉煌的壮丽诗篇。宇宙是包罗万象的,对这么一个最大的研究对象,完全用物理学的规律、用物理学的知识来研究,能够达到什么程度?事实上现在已经达到相当可观的程度了,并得到了一些相当精确的结果。物理学作为当今科学技术发展中的一门基础学科,一系列重大发现或发明都是人文文化和科学文化两种文化融合所创造出的成果,它充分体现了物理学的真、善、美。物理学是充满生机的,富有创新意识、创新精神和创新能力的科学,可以说物理学史就是一部创新史。物理学的萌芽、产生与不断发展无不依赖于创新。从古代的亚里士多德、阿基米得,到经典物理学

中的伽利略、牛顿,再到近代物理学中的普朗克、爱因斯坦,他们在推动物理学的发展、丰富物理学的内容时,无一不是凭借人类的创新智慧。

中华民族正在东方大地崛起,整个国民素养有待提高。国民科学文化素养的高低,反映了一个国家和民族竞争力的强弱。只有社会公众懂得科学、数学和技术,培养出科学思维的习惯,科学技术在改善生活质量方面的潜力才能发挥出来;如果人们没有科学素养,对一个更美好的世界的期望就会落空。全民科学素养的提高应建立在科学教育的基础上,让青年人了解自然科学在人类文明中的作用,了解人类文明在宇宙演化中的位置,会大大开阔他们的眼界,提高他们学习的兴趣,让他们了解到物理学不断发展、激动人心的内容;在人类文明的宏大背景下,带领他们进入物理学的殿堂,这样能让他们认识到物理学与人类文明之间的依存关系和相互影响。

本书介绍了宇宙学中一些最基本的知识、一些著名宇宙学家的创新思维和突出贡献,以及自然科学的一些研究方法。在了解宇宙学发展史中一些重大发现的内容和意义的基础上,让大家思考哲学思想对科学发展的指导意义,什么是这些著名科学家的成功之路?应该向他们学什么?并思考自然科学中的一些研究方法在科学研究中的价值。同时,要激发和培养人们对科学文化的兴趣,在学习科学文化的同时,还要对科学家有所了解,例如,他们生活的年代、家庭和时代背景,他们不平凡的经历和奇闻趣事,他们是怎样成为科学家的,他们的主要成就、各自的重大科学发现的曲折过程和对科学发展的贡献,他们之间以及同其他科学家的关系,等等。为了增加本书的可读性和趣味性,在保持历史真实性的前提下,书中还穿插了一些小故事和一些自然奇观,并选配了相关的图片。

我撰写这本书的目的是让大家分享探索宇宙奥秘的乐趣。希望广大读者能在轻松、愉快的情况下读完本书并有所收益。也希望有志于自然科学和社会科学的年轻人从书中得到一些启发,增强自己科学研究的能力。青年是科学发现的主力军,“江山代有人才出,各领风骚数百年”,值此中华民族重新崛起之际,青年人不应妄自菲薄,而应无愧于时代,为创建民族更大的辉煌,为人类文明的进步和发展作出自己的一份贡献,“士不可以不弘毅,任重而道远”。

本书的形成过程中,得到北京师范大学珠海分校各级领导和同仁的大力支持。同时,参阅了兄弟院校有关资料,在此表示衷心的感谢。同时,还要特别感谢夫人黄浩琪女士和女儿吴宇梅、吴宇燕的全力支持。

由于作者水平有限,不足、疏漏及错误之处恳请大家批评指正,并深表感激!

吴大江于北京师范大学珠海分校京师家园

2012年8月



目录

第一篇 早期的宇宙学

第1章 神秘的宇宙	3
1.1 古代的宇宙说	8
1.1.1 中国古代宇宙学	8
1.1.2 古印度的宇宙学	14
1.1.3 西方古代宇宙的各种学说	14
1.2 从太阳系到广阔的恒星世界	17
1.3 有限、无限和静态宇宙引发的佯谬	18
1.3.1 有限还是无限	18
1.3.2 无限和静态宇宙引发的佯谬	19
思考题和习题	20
第2章 漫话地心说	21
2.1 夜观星空——天象奇观	22
2.1.1 观察星空(科学认知过程)	22
2.1.2 天象奇观	24
2.2 地理大发现	32
2.3 托勒密的地球中心说	33
思考题和习题	36

第二篇 科学宇宙学的诞生——从哥白尼到牛顿

第3章 漫话日心说	39
3.1 近代天文学的奠基人哥白尼	42
3.2 哥白尼的《天体运行论》	43
3.3 开普勒行星运动定律	47
3.3.1 第谷的精密观测	47
3.3.2 开普勒	48
3.3.3 开普勒行星运动定律	49

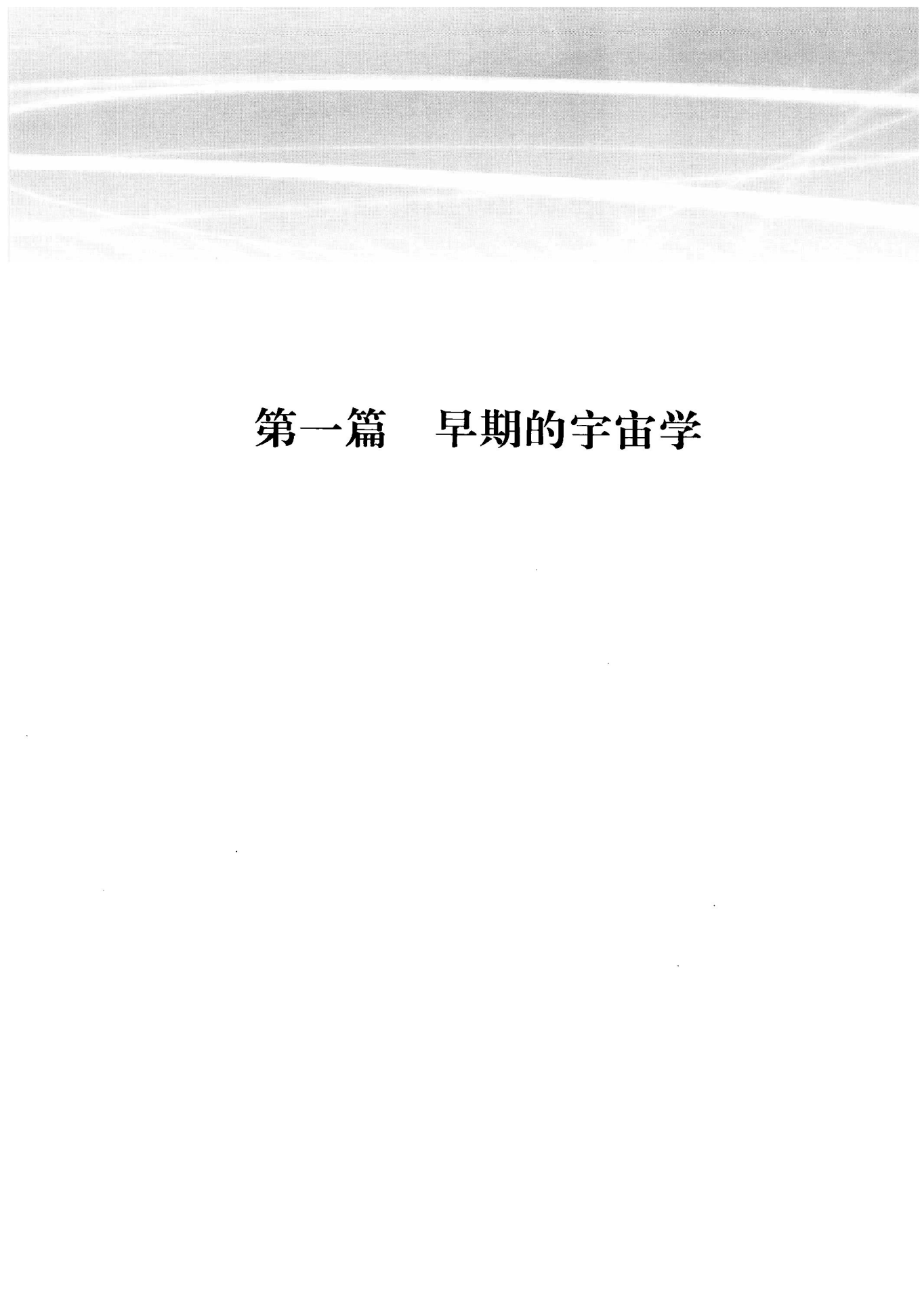
3.3.4 开普勒定律的意义	52
思考题和习题	53
第4章 经典力学的建立和牛顿经典宇宙学	54
4.1 伽利略和近代力学的诞生	57
4.1.1 “近代科学之父”伽利略	57
4.1.2 自由落体定律	59
4.1.3 惯性定律	60
4.1.4 相对性原理	61
4.2 伟大的科学家、经典物理学理论体系的创立者牛顿	63
4.2.1 经典物理学理论体系的创立者	64
4.2.2 经典物理学的“圣经”	65
4.2.3 牛顿与苹果落地的故事	66
4.2.4 伏尔泰与思想启蒙	67
4.3 经典力学的建立	68
4.3.1 牛顿运动定律	68
4.3.2 万有引力公式的建立	69
4.3.3 理论预言的实践检验——哈雷彗星的预言和海王星的发现	71
4.3.4 这片空间会荒废吗	73
4.3.5 走下神坛的牛顿	75
4.4 牛顿经典宇宙学	76
思考题和习题	79

第三篇 时间简史——从爱因斯坦、哈勃到霍金

第5章 时空观的革命	83
5.1 想象比知识重要——科学巨匠爱因斯坦	84
5.2 爱因斯坦狭义相对论	87
5.2.1 力学相对性原理	87
5.2.2 狭义相对论基本原理	89
5.3 爱因斯坦狭义相对论时空观	94
5.3.1 同时的相对性	94
5.3.2 物体在运动方向上空间长度缩短——空间长度的相对性	95
5.3.3 物体在运动方向上的时间膨胀(时钟变慢,时间延缓)	96
5.3.4 近代物理实验的证明	97
5.3.5 爱因斯坦狭义相对论质点动力学	98
5.3.6 谁创建了狭义相对论	101
5.4 爱因斯坦广义相对论	108
5.4.1 爱因斯坦广义相对论的基本理论	108

5.4.2 广义相对论的检验	117
5.4.3 引力波与引力透镜	121
思考题和习题	123
第6章 膨胀的宇宙	125
6.1 天体距离的测定	126
6.1.1 月球与地球的距离	128
6.1.2 太阳与行星的距离	128
6.1.3 恒星与地球的距离	128
6.2 多普勒效应	132
6.3 星系天文学之父哈勃及哈勃定律	134
6.3.1 天文学家埃德文·鲍威尔·哈勃	134
6.3.2 发现宇宙膨胀、哈勃定律	142
6.4 膨胀的宇宙	145
思考题和习题	149
第7章 宇宙大爆炸理论	151
7.1 现代宇宙学的诞生	152
7.2 宇宙大爆炸理论	154
7.2.1 宇宙之始	158
7.2.2 宇宙学原理	159
7.2.3 标准宇宙模型	160
7.2.4 极早期宇宙	163
7.2.5 大爆炸核合成过程	164
7.2.6 大尺度结构的形成和演化	165
7.2.7 宇宙的未来	166
7.3 微波背景辐射	167
思考题和习题	168
第8章 恒星的演化	170
8.1 白矮星	172
8.2 中子星	177
8.3 宇宙奇观	181
8.3.1 宇宙空洞及宇宙长城	181
8.3.2 类星体	182
8.3.3 深层空间	182
8.4 黑洞	183
8.4.1 科学家的预言	184

8.4.2 黑洞的各种假设	186
8.4.3 黑洞的类型	190
8.5 白洞、虫洞——时空隧道	199
8.6 反物质星体和星系	205
思考题和习题	207
第9章 暗物质和暗能量之谜	209
9.1 暗物质存在的证据和迷惑	213
9.2 暗物质、暗能量随宇宙的变化而变化	219
9.2.1 三种膨胀情况	219
9.2.2 平坦性与物质密度的关系	219
9.2.3 精确宇宙学	219
9.3 反引力——暗能量之谜的一种新的猜想	221
思考题和习题	222
参考文献	223



第一篇 早期的宇宙学

第 1 章 神秘的宇宙



太阳、月亮、星星、银河、星系……壮丽而遥远,神秘的宇宙总是让我们产生无限的遐想,引起我们一种强烈的探索宇宙奥秘的欲望。自从盘古开天辟地以来,人类就没有停止过探索宇宙奥秘的步伐。人类对宇宙的认识从神话、猜想开始,逐步通过观察星空,提出假设,建立理论,了解季节的来临和气候的变化,指导农耕生产。

中国古代就有超新星 SN1054 的遗迹——蟹状星云的图像相关记录(如图 1-1 所示)。但是,人类理念的进化是极其缓慢和艰苦的。从亚里士多德、托勒密的地心说到哥白尼—伽利略的日心说的演化就花了 2000 年的时间。令人吃惊的是,尽管人们知道世间的一切都在运动,只是到了 20 世纪 20 年代因哈勃发现了红移定律后,宇宙演化的观念才进入人类的意识。



图 1-1 蟹状星云

人们甚至从来没有想到过宇宙还会演化。牛顿的万有引力定律表明,宇宙的物质在引力作用下不可能处于稳定的状态。即使在爱因斯坦的广义相对论中,情况也好不到哪儿去,为了得到一个稳定的宇宙模型,爱因斯坦曾将宇宙常数引进理论中。他们都希望在自己的理论中找到稳定的宇宙模型。可见,宇宙演化的观念并不是产生于这些天才的头脑之中。

宇宙是包罗万象的,对这么一个最大的研究对象,完全用物理学的规律、用物理学的知识来研究,能够达到什么程度?事实上,现在已经达到相当可观的程度了,得到了一些相当精确的结果。特别是对宇宙的早期研究已经非常细致,也许会有人问,人类怎么反而会对宇宙的幼年时期研究得如此清楚呢?比如说,我们现在已经知道宇宙的年龄。宇宙是有年龄的,宇宙是有诞生这一过程的,我们对宇宙的年龄还是了解得相当精确的,今天的宇宙是 137.5 亿岁,误差不超过 2%,而宇宙的早期,比如 38 万岁,是非常重要的。因为对宇宙的 38 万岁有深入研究,而诞生了两位诺贝尔奖获得者,其前提一定是有非常重要的观测数据使大家都相信了,才颁发诺贝尔奖。费曼是一个理论物理学家,他说:“物理学家具有这样的习惯,对于任何一类现象研究其中最简单的例子,就叫做物理。”比如说量子力学,我们专门研究氢原子,就可以把整个量子力学弄清楚,至于更复杂的分子的量子现象,就属于其他学科了,叫做量子化学。我们现在研究宇宙,也可以挑最简单的情况来研究。2009 年是国际天文年,它距离伽利略第一次用望远镜来研究天文已经 400 年了。

仰望天空,如果专门选亮的星星,能够看到它们的分布几乎是均匀的,也就是说从各个

方面去看天空,看到亮的星星的密度、数目都差不多(如图 1-2 所示)。星系在宇宙中的分布几乎是均匀的,有些地方稍微密集一点,会形成一个星系团。但是一般来说,从亿星系的角度看,宇宙是均匀的,这是很重要的一点,由此形成宇宙学原理。

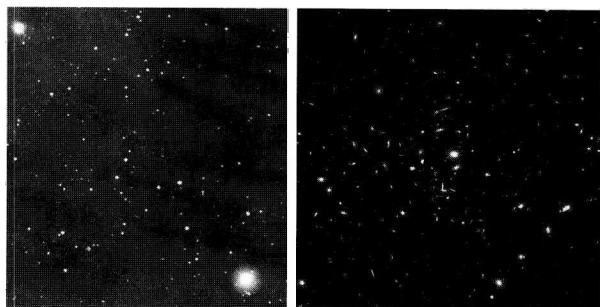


图 1-2 星空亮星分布各向同性



图 1-3 银河系像一条带子的暗星分布

这是一个很重要的事实,亮的星星是均匀分布的,但如果是暗的星星呢?从地球上,暗的星星可不是均匀分布的,你可以看到暗的星星是集中在一条带子上的(如图 1-3 所示),这条带子就是银河系。银河系像饼的形状,长度达 10 万光年,中间高出来一点,厚度为 2 千光年。太阳离银河系中心的距离是 2.5 万光年(如图 1-4 所示)。如果我们看星星,亮的星星因距离较近才显得亮,远的星星是暗的。如果离开地球的距离不超过银河系的厚度,那么四面八方的亮星看起来都是差不多的。但如果看远的星星就不一样了,例如看地球上空的星星,朝一个方向看没有,朝另外一个方向看也没有,但是朝其他方向看又有了。所以我们看远的星,也就是暗的星,看到的就是带子。

银河系会是什么样的呢?本来恒星是个点,但是星系是各种各样形状的,我们可以看到许许多多的类似星系,实际上并不是点,而都是有形状的,如图 1-5 所示。要是看星系,星系各个方向的星星几乎是一样多的,不是集中在一条带子中。

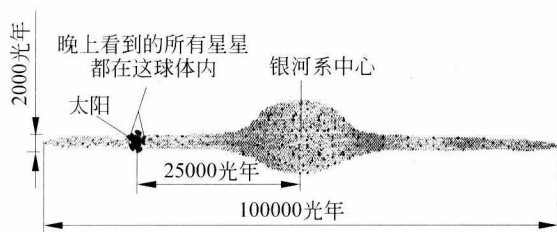


图 1-4 银河系示意图

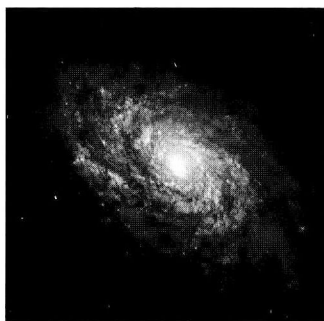


图 1-5 星系

资料：“哈勃”的几大科学发现

哈勃太空望远镜于 1990 年发射,位于距地面 600 千米、环绕地球周期为 95 分钟的轨道上。使用 2.4 米口径镜片,可以在光学、紫外和红外波段进行观测,2002 年 3 月添加 ACS 高级镜头。哈勃太空望远镜的外观如图 1-6 所示。

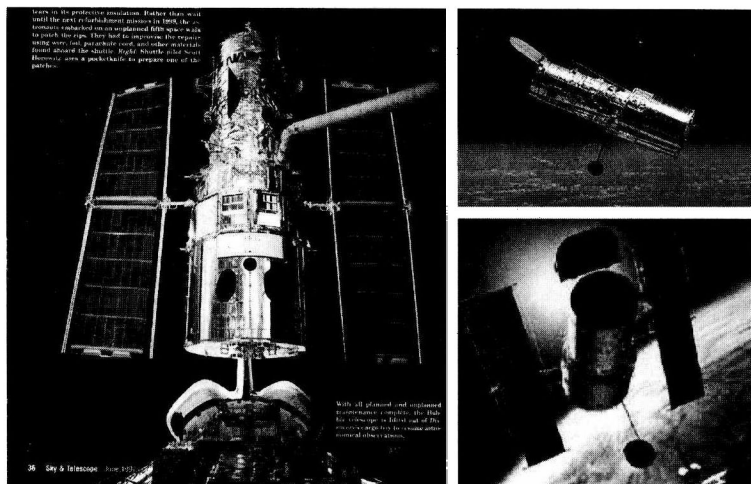


图 1-6 哈勃太空望远镜

(1) 第一大发现：一个处于加速状态的宇宙

通过观测遥远爆炸恒星发出的光线，哈勃太空望远镜帮助天文学家发现了暗能量。这种能量充斥着宇宙各个角落。暗能量是一种神秘的能量形态，能够产生与引力相反的排斥力。此外，这架望远镜还发现了能够证明暗能量数十亿年来一直与引力“拔河”的证据。在暗能量的影响下，星系之间以不断提高的速度彼此远离对方，进而让宇宙不断膨胀并且速度越来越快。

(2) 第二大发现：了解了宇宙的年龄

宇宙的年龄应该在 137.5 亿年左右。

(3) 第三大发现：星系处于不断成长状态

通过研究不同时代的星系，天文学家可以了解星系如何随时间变化。这个过程就好比是一个大相册，里面记录着一个人从孩童到成年的各个成长阶段。哈勃太空望远镜还对星系稠密的中心区域进行了探测，提供了几乎所有超大星系中心地带都含有超大质量黑洞的决定性证据。

(4) 第四大发现：探寻太阳系外行星踪迹

哈勃太空望远镜在一颗木星大小的系外行星的大气中首次探测到有机分子。哈勃太空望远镜在 1990 年发射之前，天文学家尚未在太阳系以外发现一颗行星。哈勃太空望远镜却对系外行星搜寻工作做出了独特的贡献，如今已有 400 多颗系外行星被发现。通过这架功勋望远镜进行研究表明，银河系可能拥有数十亿颗行星。

哈勃于 1995 年 4 月 1 日，在 M16 天鹰座大星云中拍到了如图 1-7 所示的这张鹰星云。像柱子似的结构图像，这是新形成的恒星。这些奇异的暗色柱子似的结构其实是凉爽的星际氢气和尘埃纵队，用于充当新恒星的孵化器。

如图 1-8 所示，哈勃拍到了 Messier 17 (M17) 的小部分画面，这里是恒星产生的温床。M17 也叫天鹅星云，距离人马星座大约 5500 光年。此波状形气体被来自年轻的特大恒星的紫外线强烈辐射所塑造和照亮。



图 1-7 鹰星云

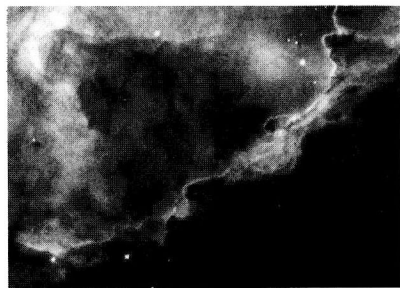


图 1-8 天鹅星云

图 1-9(a)、图 1-9(b)、图 1-9(c)分别是天文学家利用哈勃太空望远镜的观测数据,结合引力透镜技术,通过研究 50 万个遥远的星系的照片,绘制出 35 亿年前、50 亿年前和 65 亿年前暗物质的三维图。



图 1-9 暗物质在宇宙中的三维分布

神秘的宇宙并不神秘。一般认为,爱因斯坦的广义相对论是用于描述宇宙演化的正确的理论。在经典广义相对论的框架里,霍金和彭罗斯已经证明,在很一般的条件下,空间—时间之间一定存在奇点,最著名的奇点即是黑洞里的奇点以及宇宙大爆炸处的奇点。在奇点处,所有定律以及可预见性都失效。奇点可以看成空间—时间的边缘或边界。只有给出了奇点处的边界条件,才能由爱因斯坦方程得到宇宙的演化。由于边界条件只能由宇宙外的造物主所给定,所以宇宙的命运就操纵在造物主的手中。这就是从牛顿时代起一直困扰人类智慧的第一推动问题。

如果空间—时间没有边界,则研究第一推动就只有用量子引力论。霍金认为宇宙的量子态处于一种基态,空间—时间可以看成是一个有限又无界的四维面,正如地球的表面一

样,只不过多了两个维数而已。宇宙中的所有结构都可归结于量子力学的测不准原理所允许的最小起伏。从一些简单的模型计算可以得出和天文观测相一致的推论,如星系、恒星等的成团结构,大尺度的各向同性和均匀性,空间—时间的平直性。即空间—时间基本上是平坦的,因此才使得星系乃至生命的发展成为可能,还有时间的方向箭头等。霍金的量子宇宙论的意义在于它真正使宇宙论成为一门成熟的科学,即在原则上,单凭科学定律我们便可以将宇宙中的一切都预言出来。

1.1 古代的宇宙说

古时候,人们习惯地把自己居住的地表称为地,相对于地面的空间称为天。有人把天地形成的原因解释为:混沌初开的时候,轻气上升为天,浊气下降为地。站在地面上观察,他们认为:天是圆的如斗笠,地是方的如棋盘,这就是古代有名的“天圆地方说”。唐代诗人李白说:“天地者,万物之逆旅;光阴者,百代之过客。”李白把天地比作万物栖身的旅舍,把时间比作匆匆来往的过客。他引出了时间的概念,并把时间和空间巧妙地结合起来,成为一个完整的概念,这就是今天我们所说的宇宙。

宇宙究竟是什么?《淮南子·原道训》注:“四方上下曰宇,古往今来曰宙,以喻天地。”宇宙是天地万物的总称,是无限的空间和时间的统一,“宇”是空间的概念,是无边无际的;“宙”是时间的概念,是无始无终的。茫茫宇宙曾引起古人无尽的遐想,从而产生了许多美丽的传说。比如,盘古开天辟地(如图 1-10 所示)、女娲炼石补天(如图 1-11 所示)、牛郎织女鹊桥相会……这些美丽动人的传说,反映了古人对宇宙的认识。



图 1-10 盘古开天辟地



图 1-11 女娲炼石补天

1.1.1 中国古代宇宙学

中国古代的宇宙学说也可分为宇宙创世学说和宇宙结构学说两部分。中国古代关于宇宙创世学说,与神话传说和哲学思辨混杂在一起,还很难说得上是一种具有数理内容的科学宇宙学说,但这些古代宇宙创世学说无疑也反映了中国古人对于宇宙是怎么来的这个