

大爆炸宇宙学

俞允强 著



高等教育出版社

P159/1

02

大爆炸宇宙学

俞允强 著

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书是为具有大学低年级数理基础知识的读者撰写的宇宙学入门书。作者俞允强教授是近年来国内在宇宙学研究领域中颇有成就的天体物理学家。全书不光介绍了宇宙学的基本知识,讨论了近年来已深入研究的各方面宇宙学问题,而且重点阐述了以大爆炸理论为基本框架的现代宇宙学中的研究热点。使读者不仅了解当代宇宙学研究面临的难题,而且了解为解决这些疑难正在进行的一系列探索。全书内容力图避免复杂的数理推导,尽量以通俗、自然的语言、细致透彻的分析向读者展示一幅幅生动、清晰的宇宙演化图象,具有较强的可读性。

本书责任编辑 杨祥

大爆炸宇宙学

俞允强 著

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

通县觅子店印刷厂印装

开本787×1092 1/32 印张5 字数110 000

1995年10月第1版 1995年10月第1次印刷

印数0001— 1 635

ISBN7-04-004289-4/O·1220

定价 4.55 元

引 言

宇宙，指的是自然界一切物质的总体。宇宙学所研究的，则是这总体的物理状况与变化过程。初步一想，地球上的物质种类已十分纷杂，这包罗一切的巨大对象如何研究？

我们自然知道，地球上的一切在宇宙中只是极微小的细节。为研究宇宙，须放眼于地球之外。抬头看天，能见到的是满天光点，人们都叫它星星。实际上只有那些离我们较近的光点才是恒星。远的光点不是恒星，而是很大的恒星集团，叫星系。这些肉眼能见到的和望远镜中才能见到的天体，还有连望远镜也看不见的天体才是宇宙物质的基本单元。

宇宙学的目标不是研究这些天体本身，这是它与天文学和天体物理学的区别。但宇宙学须借助这些天体带来的讯息，以研究宇宙的整体行为。它的研究对象决定它的视野十分宽广，这是宇宙学研究的一大特点。同时这也是研究它的困难之一。我们可以把宇宙看成是由极大量星系组成的气体。这些气体的密度分布是重要的宇宙学信息，它须借助对星系的测量来获得。由于远距离测量的困难，今天我们对几亿光年尺度上的星系分布尚且了解得不够清楚。而可供观测的宇宙的总尺度却达几百亿光年。至于整个宇宙，它的尺度可能是无限的。因而宇宙的空间结构是一个尚在研究中的重要问题。

宇宙不仅在空间尺度上横向展开了它的复杂性，它还有间上纵深展开的复杂性。人们从20年代起才知道宇宙不是变的，它在膨胀。自然界所有看来象亘古不变的东西实际

上都有缓慢的变化。生物物种有变化，叫生物演化。恒星与星系有变化，叫天体演化。最后到宇宙，它也在演化。宇宙是如何演化的？这自然是宇宙学研究的主体内容。

现在知道，宇宙已演化了100至200亿年，且过去的宇宙绝不是今天宇宙的缩影，它们有极大的质的差别。过去的宇宙中曾没有恒星，也没有星系。它只是一片炽热的气体。更令人惊讶的是，过去没有碳氢氧氮，连一切化学元素也都是宇宙演化的产物。如果我们接受已确立的物理规律，这都是不可避免的推论，但它却又是那样的难以置信。宇宙学的丰富多采和诱人的魅力正在这里，而它易遭非难的原因也在这里。

当我们推断出一段段遥远过去的宇宙历史，怎么证明它是真实而可信的？现代宇宙学作为一个物理理论而不是哲理理论，它必须具体地回答这个问题。且回答的办法同其他自然科学问题一样，只能是提供直接或间接的事实证据。这对研究100多亿年前的历史的宇宙学，可不是一件容易的事。然而宇宙学终于给出了解答。这实在不能不说是人类智慧的骄傲。

从60年代以来，大爆炸宇宙学预言的光子背景场已被确切测定，从而证实我们对宇宙年龄为 10^4 年时的历史的了解是正确的。大爆炸宇宙学预言的原子核合成过程更从多方面得到了实践的证实，这又把可信的宇宙演化史前推到宇宙年龄仅为1秒。基于这些成功人们才相信，一个可靠的宇宙演化理论框架已经确立了。

基本理论框架的确立，无疑对宇宙学家是很大的鼓舞在最近十几年里，宇宙学研究的发展非常迅速。老问题得了深入，新思想和新问题层出不穷。人们对宇宙的认识正

变得更丰富、更细致和更系统。

本书作为为非专业性读者提供的宇宙学读物，首先的目的是使读者对人类至今已掌握的宇宙面貌和演化史有一全貌的了解。为此，我们先在前四章中介绍宇宙学的基本知识，接着在后七章逐章讨论近年来被深入地研究过的各方面宇宙学问题。非专业性的特点当然限制了讨论的深度，但我们将力图对每一个讨论的问题阐明其物理基础和实践基础。纯粹描绘性的叙述会使宇宙学象一个优美动听的故事，而实际上宇宙学是作为一门严谨的学科发展着。使非专业研究者对此获得正确印象，这也是本书的目的。为此我们须假定读者有初步的物理知识(例如大学普通物理的知识)，这是必须具备的基础。

以大爆炸为基础的现代宇宙学既是一门年轻的学科，又是一门初步成熟的学科。它已获得的成就无疑令人赞叹和惊讶，同时它也显然包含着大量有待澄清的疑问。把这两方面同等地展示在读者面前，这才是本书的全部目的。

目 录

引 言

第一章 认识宇宙	1
一、宇宙距离的探测	1
二、层次性结构	5
三、宇宙学原理	8
四、宇宙的膨胀	10
五、热大爆炸的观念	13
第二章 膨胀的动力学	15
一、牛顿框架下的宇宙	15
二、引力与时空弯曲	18
三、均匀和各向同性的时空	20
四、膨胀的动力学	22
五、物质为主的宇宙	24
六、宇宙的年龄	26
第三章 宇宙的有限或无限	29
一、关于有限性的悖论	29
二、以密度为判据	30
三、以减速参量为判据	33
四、以宇宙年龄为判据	35
第四章 早期宇宙的概貌	38
一、辐射为主的早期宇宙	38
二、热平衡的高温气体	41
三、早期的膨胀	43
四、粒子的退耦	44
五、宇宙的视界	47

第五章 原初的核合成	50
一、原子核的合成过程	50
二、核合成的产物	52
三、氦、氘和锂的产额	54
四、原初丰度的推算	57
五、理论与实测的比较	59
六、中微子的种数	61
第六章 背景光子	64
一、光子的退耦	64
二、背景光子的发现与实测	66
三、检验宇宙学原理	67
四、找寻原初扰动	70
第七章 物质与反物质的不对称	72
一、有没有反物质天体	72
二、重子不对称疑难	74
三、重子数严格守恒吗?	75
四、粒子与反粒子对称吗?	78
五、产生重子不对称的可能机制	80
六、问题的现状	84
第八章 甚早期的爆胀	86
一、对称性的自发破缺	86
二、真空相变	89
三、宇宙甚早期的爆胀	91
四、视界疑难	93
五、星系形成疑难	95
六、平坦性疑难	96
七、爆胀理论可信吗?	98
第九章 宇宙常数	100
一、爱因斯坦的错误	100

二、真空能与引力	101
三、真空能与宇宙常数	103
四、等效宇宙常数的实测上限	104
五、理论上的真空能	107
六、物理学危机	109
第十章 暗物质	112
一、星系的质光比与暗晕	112
二、星系团的质量	115
三、重子暗物质	117
四、 $\Omega = 1$ 的初步证据	118
五、非重子暗物质观念的来由	120
六、粒子暗物质	122
第十一章 结构的形成	125
一、引力不稳定性	125
二、膨胀宇宙中扰动的增长	128
三、重子宇宙中结团的困难	132
四、初始扰动谱	136
五、热暗物质为主的宇宙	138
六、冷暗物质为主的宇宙	140
七、新的挑战	141
附录一 宇宙学的自然单位制	144
附录二 有关的粒子物理量、天文学量和宇宙学量	147

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆

第一章 认识宇宙

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆

宇宙是自然界广袤最大、历史最久的客体。要研究它的发展过程，只能先从认识它的面貌入手。越来越深入的天文观测，使人们看到宇宙的结构很复杂。但在深入理解了其复杂性后，人们又察觉了它背后的简单性：在宇宙学尺度上，它可看成是一大片膨胀着的均匀介质。

一、宇宙距离的探测

我们生活在地球上。这是一个小小的，在空中飞行的固体球。我们对它本身比较熟悉。地球之外的整个世界是什么样子？这是上千年来人类智慧总想冲击的一个难题。

经哥白尼、伽里略和牛顿等一批先驱者的努力，人们至17世纪才弄清：地球周围有一个太阳系，供给地球以光明的太阳是它的中心，地球只是其中一颗普通的行星。太阳系的广延达 10^{10} km。而今天的观测宇宙的广延是 10^{23} km。在尺度上相差13个量级！太阳系与观测宇宙相比，大致相当于一粒尘埃与整个太阳相比。太阳系在宇宙中是非常微不足道的。为了认识宇宙的面貌，必须大大地扩大我们的视野。

太阳系之外，天穹上还有满天星斗。这是自然界中最壮观也是最为人们熟悉的景象之一。可是这表观景象是二维的。

人们不能由此感受到宇宙的立体面貌。为了知道满天星斗的立体分布，必须先学会测量遥远天体和我们的距离。这可不是一个简单的任务。实际上，很长时间来，人们没能了解宇宙的结构，正是这个难题挡了道。

地面上常用的大距离测距法是三角形法(图1.1a)。18世纪中叶，开始有人用这方法测定了月地距。用三角形法测的距离越大，需要引用的基线也越长。为测量恒星间的距离，用整个地球直径作基线都嫌太短。于是人们想出用地球轨道直径作基线。在地球轨道平面上总能找到一条直径，使太阳与所测恒星的连线正好与它垂直(图1.1b)。这样测出张角 α ，就可由轨道直径推出距离。这确是一个很聪明的办法。当 $\alpha = 1''$ ，算出相应的距离为 $3.09 \times 10^{16} \text{m}$ 。天文上常把这个量作为距离单位，称1秒差距，记1pc。它与光年的关系是 $1 \text{pc} = 3.26$ 光年。如测出某恒星的张角为 $0.1''$ ，则它距太阳10pc。

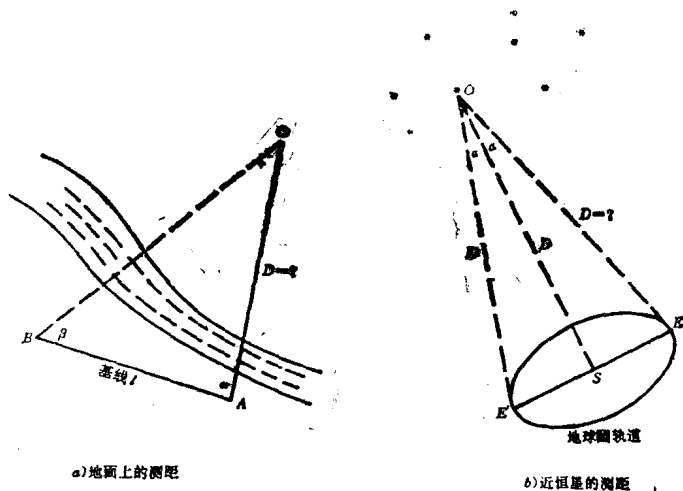


图 1.1 三角测距法

有了这一方法，人们才知道，离太阳最近的恒星是半人马座 α 星，距离为1.3pc。全天穹表观最亮的天狼星距我们2.67pc，它属第七个最近的恒星。对距离较远的恒星，张角 α 太小就测不准了。三角测距法在天文中的有效范围约是 10^3 pc。这使人类的视野从太阳系的尺度拓宽了5个量级。但是在渺瀚的宇宙中，我们看清了的仍只是其中小小的一滴。具体讲，看到的是这尺度范围内稀疏地分布着几千颗恒星。它还远不是宇宙整体面貌的一个局域的代表。因此为了认识宇宙，我们还须去寻找更有力的测距方法。

若把天体在单位时间内辐射的能量用真光度描述，把直接看到的亮暗用视亮度描述，那么视亮度不仅取决于真光度，还取决于距离。视亮度较易测定，因此人们对已知距离的恒星可定出其真光度。以几千个恒星的数据为基础，人们发现不同恒星的真光度差别很大，而太阳是一颗光度中等的恒星。更重要的是，有人发现，恒星的真光度与它的表面温度或光谱类型有直接的关联。揭示这种关联的统计分析图叫H-R图（即赫罗图，见图1.2），它是以发现者赫兹普龙（E. Hertzsprung）和罗素（H. N. Russell）的姓氏命名的。恒星的表面温度也可用光谱来确定。相对说，恒星的光谱易于测量。这样人们就可以用光谱的测量，借助H-R图来确定恒星的真光度。然后把真光度与视亮度比较来推断距离。

从H-R图上看，由表面温度推断其真光度，仅对主序星才可行。主序星是内部处于氢燃烧阶段的恒星。由于氢燃烧阶段远比其他阶段长，所以主序星在观测到的恒星中约占90%。这样它就成了又一种测定天文距离的有效方法。以恒星的视亮度与表面温度能测到为限度。这一方法的可行范围约为 10^3 kpc（千秒差距）。利用这种方法测距，已足以把我

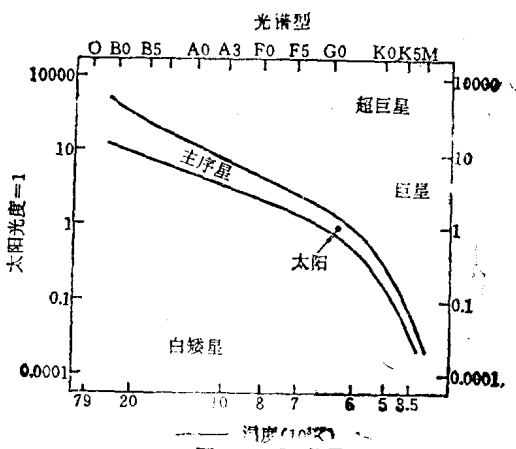


图 1.2 H-R图

们太阳所属的星系——银河系的结构看清楚。但宇宙中已观测到的星系有几万万。为建立星系的概念，并知道星系在空间的分布状况，我们还需要有测量更大距离的方法。

进一步测距的方法是利用变星的真光度与光变周期的关系，即周-光关系。有的大质量恒星在演化后期会出现结构上的不稳定性，从而引起周期性的膨胀和收缩。它的光度相应会有亮暗的变化，这就是变星。造父变星是其典型的一类，其光变曲线如图1.3所示。1908年Leavitt首先发现小麦哲仑

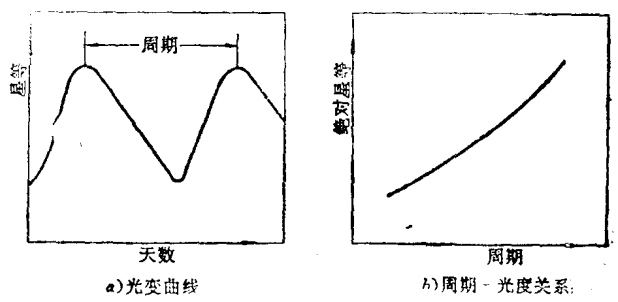


图 1.3 用造父变星测距

云——一个离银河系很近的星系中，许多造父变星的视亮度与光变周期有显著的关系。小麦哲仑云的自身大小比它与我们的距离小很多，因此其中一切恒星可看成与我们等距。这样，Leavitt所揭示的，实际是造父变星真光度与光变周期的关系。这种变星的光变周期一般为2—40天，较易确定。于是造父变星就成了它所属的星团或星系的距离的指示器，有时又称其为“量天尺”。这类变星的真光度的典型值是太阳光度的 10^3 — 10^4 倍，因此这个指示器的有效范围可达4Mpc(兆秒差距)。

为测量更远的天体的距离，我们需要更亮的距离指示器，这就是新星和最亮的恒星。新星是一种灾变性的变星，它的光度会突然上升4至6个量级。在典型的星系中，新星以每年40次的概率出现。此外，每个星系中的恒星有非常确定的最大真光度，因此它也可作为星系距离的指示器。利用这些指示器，可测定的距离延伸到了10Mpc。

在本世纪最初的20年中，人们利用恒星的各个易于测量的物理性质与其真光度的关系，把距离的测定从 10^2 pc扩展到了10Mpc。这对人类认识宇宙的结构起了很大的推动作用。后来借助星系作距离指示器，又把测距能力延伸到 10^4 Mpc。这样我们就有可能来了解整个观测宇宙的立体结构了。

二、层次性结构

随着测距能力的逐步提高，人们逐渐在越来越大的尺度上对宇宙的结构建立了立体的观念。这里第一个重要的进展，是认识了银河。它包含两重含义，一是了解了银河的形状，二是认识了河外天体的存在。

银河是太阳所属的一个庞大的恒星集团，约包括 10^{11} 颗恒星。这种恒星集团叫星系。银河系的概貌如图1.4所示。

其中大部分恒星分布成扁平的盘状。盘的直径为25kpc，厚度约为2kpc。盘的中心有一球状隆起，称为核球。盘的外部由几条旋臂构成。太阳位于其中一条旋臂上，距离银心约10kpc。银盘上下有球状的延伸区，其中恒星分布较稀疏，称为银晕。晕的总质量约占整体的10%，直径约为30kpc。我们的太阳，就其光度，质量和位置讲，都只是银河系中一个极普通的成员。这正是哥白尼思想在星系尺度上的体现。

此外重要的是，并非天穹上一切发光体都是银河系的一

部分。设想有一个类似银河的恒星集团，处于500kpc的距离上(银河自身大小为30kpc)。其表观亮度与2pc远处一颗类似太阳的恒星是一样的。因此对天穹上的某个光点，只有测定了它的距离，才能区分它是银河系内的恒星还是银河系外的另一个星系。实际上，天穹上的大多数光点是银河系的恒星，但也有相当大量的发光体是与银河类似的巨大恒星集团。星系的普遍存在，表明它代表宇宙结构中的一个层次。从宇宙演化的角度看，它是比恒星更基本的层次。

星系的质量差别很大。银河系的质量约为 $10^{11} M_{\odot}$ 。(太阳

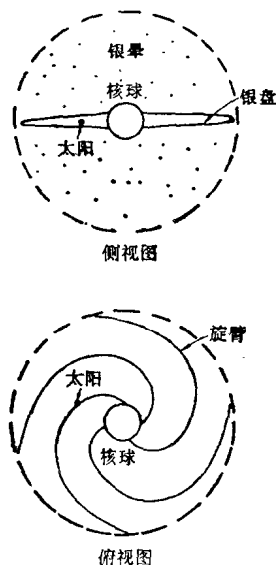


图 1.4 银河系的结构

质量单位)。在明亮的星系中，这是典型的大小。质量很小的星系太暗，不易看到。小星系的质量可低至 $10^6 M_{\odot}$ 。星系的典型尺度为几十千秒差距。若对视星等在23等以内的星系作统计，星系总数在 10^6 以上。

当我们把观测的尺度放大，宇宙可看成大量星系构成的介质，而恒星只是星系内部细致结构的表现。这样，为了解宇宙结构，须关心星系在空间的分布规律。

星系的空间分布不是无规的，它也有结团现象。它的结团性比恒星要弱。上千个以上的星系构成的大集团叫星系团。大约只有10%的星系属于这种大星系团。大部分星系只结成十几、几十或上百个成员的小团。可以肯定的是，星系团代表了宇宙结构中比星系更大的一个新层次。这层次的尺度大小为百万秒差距，平均质量是星系平均质量的100倍。

今天人们把10Mpc以上的尺度上的结构称为宇宙的大尺度结构(观测宇宙的大小是 10^4 Mpc)。至今大尺度上的观测事实远不是十分明确的。有趣的是，有迹象表明，星系在大尺度上的分布是泡沫状的。即有许多看不到星系的“空洞”区，而星系聚集在空洞的壁上，呈纤维状或片状结构。这一层次的结构叫超星系团。它的典型尺度为几十兆秒差距。

从演化理论来考虑，尺度大到一定程度，应不再有结构存在。这是否符合事实，以及这尺度多大，都是十分重要，并需要由大尺度观测来回答的问题。现今对宇宙在50Mpc以上是否还有显著的结构现象存在，正是人们在热烈争论中的焦点。

总之，若把星系看成宇宙物质的基本单元，那么星系的分布状况就是宇宙结构的表现。现在看来，直至50Mpc的尺度为止，星系的分布呈现出有层次的结团。这就是我们对

宇宙面貌的基本认识。

在本节结束之前，让我们顺便讨论两个有关的理论问题。一、观测宇宙为什么是有限的，这是设备能力的有限性造成的吗？根据大爆炸宇宙观念，宇宙有一个有限的年龄 t_0 ，光又有一个有限的传播速度 c 。那么宇宙中可观测到的部分只能有一个有限的大小，它至多是 ct_0 的量级。这一点与设备能力是无关的。我们把望远镜造得再大，也不可能看到比 ct_0 更远的天体，因为它发的光至今还没有来得及到达我们这里。二、如果观测宇宙仅是真实宇宙的一小部分，我们怎么去研究整个宇宙？这的确是一个问题。整个宇宙中的大部分是不可能被观测到的，那能否从理论上认识它？我们有理由相信，在比观测宇宙小的某尺度上，将不会再出现新的结构层次。即以这样的尺度为基本单元，宇宙物质的分布是均匀均匀的。这样，观测宇宙就可看成是整个宇宙中一个有代表性的典型区域。于是从观测宇宙获得的信息，就可以用来作为研究整个宇宙的出发点。这正是我们从理论上研究宇宙时的基本看法。

三、宇宙学原理

当对任何客体作理论研究时，我们总必须为它做模型，也就是把它简化。正确地简化的要领是抓住本质性特征，抹掉其次要的属性。以便使简化过的模型在主要方面与所模拟的客体相似，而不究其细节上的差异。现在我们正需要对宇宙作这种简化。

爱因斯坦做第一个宇宙模型时是1917年。当时人们对宇宙的总面貌还了解得很少。因此他主要凭直觉，作了两个重要的简化假设：一、宇宙在空间上是均匀的和各向同性