

引 言

宇宙指的是物质世界的一切。它是人类所面对的最巨大的客体。正是这一特点使它历来吸引着各种人的兴趣。诗人对它抒发情怀，哲人借它阐发哲理。可是近代的宇宙学家却是把它当作一个普通的物理对象来研究的。我们图的是对它有一个具体而真实的了解。

初一想，地球上的物质已十分纷杂，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细微末节。为研究宇宙，须放眼于地球之外。抬头看天，见到的是满天星斗，人们都叫它们为星星。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。这些肉眼能见的和望远镜中才能见的，还有连用望远镜也不能见的天体，才是宇宙物质。

宇宙学的目标不是研究这些天体本身，这是它与天文学或天体物理学的区别。宇宙学是借助各种天体带来的信息，以研究宇宙的整体状况和行为。这目标决定了它的视野十分宽广。宇宙中可能被观测部分的大小超过百亿光年。整个宇宙或许无限，也或许有限。即使它为有限，其大小比百亿光年肯定要大很多很多。空间上的广袤是宇宙的特点之一，也是研究它的困难根源之一。我们不仅必须能观测非常远处的天体，而且还须有能力从观测中析取可靠而定量的信息。人类起步研究宇宙并不晚，大约是在 20 世纪初。它的蓬勃发展却仅是近 30 年的事。后来靠的首先是天文观测上的进步。

宇宙不仅在空间横向地展开它的复杂性，还在时间纵深上展开了复杂性。由于光的传播需要时间，所以对一亿光年远的天体，

看到的是它在约一亿年前的面貌，而不是今天的面貌。这是一个很普通的道理，但也是很深刻的道理。这样看来，宇宙在空间上的复杂性和时间上的复杂性只是同一件事的两个侧面。天文学家越往远处观测，他们所看到的是越年轻的宇宙。

人们从 20 世纪 20 年代起就知道了宇宙不是不变的，而是在膨胀。自然界所有看来像亘古不变的东西实际上都有缓慢的变化。这种变化叫演化。生物物种在演化，恒星和星系在演化，宇宙也不例外地在演化。从前远古的宇宙是什么样子的？它如何一步步地演化成了今天的模样？这是宇宙学想弄清楚的主要内容。

现在知道，我们的宇宙已演化了 150 亿年左右。有趣的是，过去的宇宙完全不是今天宇宙的缩影。它们之间有着质的差别。年轻的宇宙中曾没有恒星，也没有星系。它曾只是一片炽热的气体。更令人惊讶的是，在更年轻的宇宙中没有碳、氢、氧、氮等等。连化学元素这样基本的物质形态也是在宇宙演化中产生的。这些结果其实都非常可信，但又非常难以令人置信。宇宙学的多彩和魅力正在这种地方。

当我们按已知的物理规律推断出一段段遥远的宇宙历史，怎么证明它是真实而可信的？宇宙学必须对此作出回答。实际上这才是要研究的核心。今天的宇宙学是作为物理学的一个分支而发展的。因此回答的办法只有一个，那就是提供直接或间接的事实证据。宇宙演化史感兴趣的至少是十亿年前的事。要找出证据可真谈何容易！所以，今天的宇宙学能理直气壮、振振有词地谈论宇宙最初几万年的事（3K 微波背景辐射）甚至最初 1 小时的事（原初核合成）实在是魅力无穷，令人在心灵上感受到震撼。

在 3K 背景辐射发现以来的 30 余年中，热大爆炸宇宙理论已赢得了无可争议的成功。这是事实，但是成功的事实不要掩盖其弱点。瑕不掩瑜，瑜也不掩瑕。总体说来，宇宙学的发展还处于它的未成年期。尚不能回答的问题远比已有答案的问题多。已能回答的问题中，答案的牢靠程度也各各不同。这才是今天宇宙学的真实面

貌. 因此要把这副面貌客观而全面地描绘出来也不是易事.

本书显然想把宇宙学中闪光的一面展示出来. 它不仅指那些已找到了证据的重要结果, 而且还包括着许多尚未找到证据的非常杰出的新思想. 例如真空有能量的思想, 非重子是宇宙主体的思想等. 这些新思想很可能反映宇宙学的将来, 也可能是诱使物理学发展的生长点. 其重要性不亚于那些已有答案的问题. 但是对此必须非常小心. 在找到可靠证据前, 再杰出的思想也仅是待证实的猜想. 不能把它与事实混同. 总而言之, 把宇宙学现状中的成功和不足两面都展示出来, 才是本书的全部目的.

第一章 宇宙的面貌

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：在宇观尺度上，今天整个宇宙可看成一大片膨胀着的均匀介质，而我们的银河系只是这介质中的一颗“分子”。

一、宇宙级距离的测量

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，而地球只是其中一颗普通的行星。太阳系广延达 10^{13} m。而今天的观测宇宙的广延是 10^{26} m。在尺度上相差 13 个量级！太阳系与观测宇宙相比，大致相当与把一粒尘埃与太阳相比。太阳系在宇宙中是非常微不足道的。因此，为了认识宇宙的面貌，还需要大大地扩展我们的视野。

太阳系之外，天穹上还有满天的星斗。这是自然界中最壮观，也最为人熟悉的景象之一。可是，我们不能直觉地感受不同星斗的

远近,因而这表观景象仅是二维的.它不能体现宇宙的立体面貌.为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,人们很长时间来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 1.1(a)).18 世纪中叶,开始有人用这方法测量了月地间的距离.很明显,用三角形法测量的距离越大,需要引用的基线也越长.为测量恒星间的距离,用整个地球直径做基线都嫌太短.于是人们想到用地球绕太阳转动的轨道直径做基线.这确是一个很聪明的办法.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 1.1(b)).这样,测出这恒星对地球轨道半径的张角 α 就能用已知的日地距(即轨道半径)来推出该恒星的距离了.当 $\alpha=1''$,算出相应的距离是 3.1×10^{16} m.天文上常把这个量当作距离单位,称 1 秒差距 记作 1 pc.它与光年的关系为 1 pc=3.3 光年.如测到某恒星的张角 $\alpha=0.1''$ 则它距太阳 10 pc 即 33 光年.

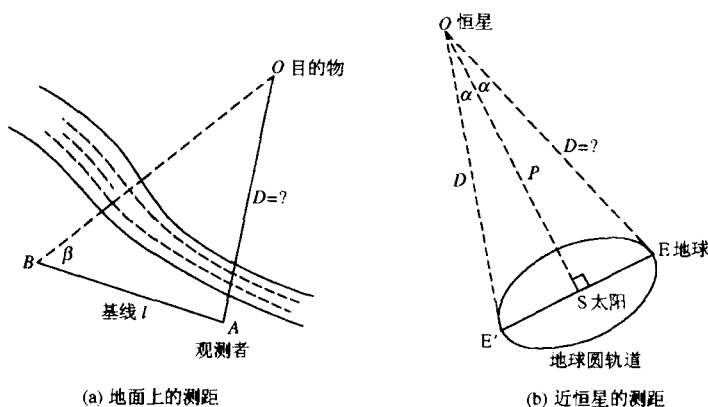


图 1.1 三角形测距法

有了这方法，人们才知道，离太阳最近的恒星是半人马座的 α 星，其距离为 1.3 pc. 全天穹表观最明亮的天狼星距我们 2.67 pc，是第七个最近的恒星。对太远的恒星，会因其张角 α 太小而测不出距离。三角测距法在天文上的有效范围约是 10^2 pc. 这使人类的视野从太阳系的尺度拓宽了 5 个量级。但是在浩瀚的宇宙中，我们看清了的仍只是沧海一粟。具体讲，在这尺度范围内看到的是稀疏地分布着几千颗恒星，它只是我们银河系中很小的一部分，而还远不是宇宙整体面貌的一个典型代表。因此，要认识宇宙，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光能用光度 L 描述，而把肉眼或仪器感受到的亮暗程度，即单位时间在单位面积上接受到的光能叫视亮度 B ，那么视亮度不仅取决于光源的光度，还取决于距离（图 1.2）即

$$B = L / (4\pi d^2) \quad , \quad (1.1)$$

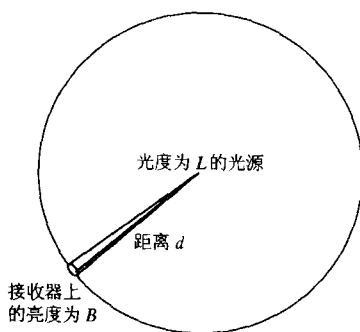


图 1.2 视亮度与光度的关系

其中 d 是光源与观测者的距离。天体的视亮度 B 较容易直接测量。这样，若已测定某恒星的距离，就能推知其光度。以几千个已测定距离的恒星为基础，人们就知道了一批恒星的光度。由此发现，不同恒星的光度差别很大，而太阳是一颗中等偏暗的恒星。关系式

(1.1)也反过来给我们以启示：若可能事先知道某天体的光度，那么通过测量它的视亮度，就能推知其距离。这正是用天体物理（指非几何）方法测距的基本思想。问题在于：如何在测定其距离之前能先知道它的光度？在 20 世纪头十几年里，人们就发明了两种方法。

图 1.3 中以恒星的表面温度（或光谱型）为横轴，光度为纵轴。对于这两个量都已测定的恒星就在坐标面上有一个代表点。在对大量恒星作统计研究时发现，90%以上的恒星的代表点落在一条带上（见图 1.3）。这条带被称为恒星的主序列，相应的恒星叫主序星。这经验规律告诉我们，主序星的光度与其表面温度有确定的关联。恒星的表面温度比较容易测定。按这经验规律，在测到它的表面温度后，就可以推知其光度。那么再进一步结合它的视亮度，这颗恒星的距离就确定了。用这方法，银河系中大多数恒星的距离都能确定下来。

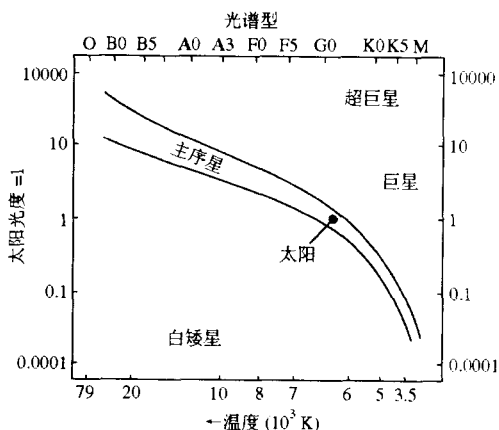


图 1.3 赫兹勃龙-罗素图

主序星是以内部氢聚变为能源的恒星，它是恒星演化的第一

阶段. 在演化的晚期, 大量恒星的星体会发生周期性的膨胀和收缩, 其光度和亮度也相应地有周期变化 (图 1.4(a)). 这种星叫周期变星. 1912 年, Leavitt 在研究麦哲伦云 (银河系最邻近的星系) 中的造父变星 (周期变星中的一类) 时发现, 不同变星的光变周期与其光度有确定的关联, 如图 1.4(b) 所示. 变星的光变周期较容易测定, 这样, 用光变周期推断其光度, 再由光度来推断距离, 就又构成了一种测距方法.

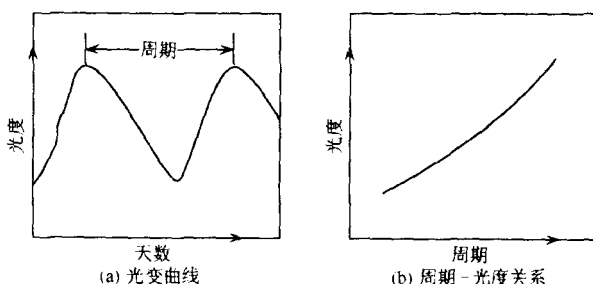


图 1.4 用造父变星测距

用周期变星测距有两个好处. 若在远处的星系中找到了周期变星, 就能用它的光变周期来测定其距离. 由于星系的大小比这距离小很多, 因此所定出的实际上就是该星系和我们的距离. 在这意义上, 人们把这种变星叫星系的距离指示器. 这是一个好处. 另一好处是造父变星的光度通常很大, 约比太阳亮 5 个量级. 因此能用它来测量较远的星系的距离. 在今天的技术下, 能测量的距离达到了 10 Mpc 的范围. 与几何测距法相比, 它把我们的测距能力又提高了 5 个量级.

当然, 10 Mpc 的范围与宇宙相比还是太小. 为此, 后来的人们又进一步发明了许多其他方法. 我们不一一讨论了. 总的精神仍然一样. 在已能测定距离的范围内寻找天体光度和其他较容易观测的量之间的联系的经验规律. 然后把这经验规律用于更远的星系.

先间接地确定它的光度，再进一步推断它和我们的距离。随着测距能力的逐步提高，今天人们对整个观测宇宙的面貌已有较清楚的了解。这里也值得指出，至今用天体物理方法测距的精确程度尚难以很高。现在对远处星系的距离的测定大约有一倍的误差。后面将看到，这是造成宇宙学信息不确定性的一个重要原因。

二、层次性的结构

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物质的分布有了立体的观念。这里第一个重要进展是认识了银河系。它包含着两重含义：一是了解了银河系的形状，即银河系内的物质分布；二是认识了银河之外还有星系存在。

银河系是太阳所属的一个庞大的恒星集团。它大约包含有 10^{11} 颗恒星。现在把这样的恒星集团统称为星系。银河系的概貌如图 1.5 所示。它的大部分恒星集中在一个扁平的区域内，被称为银盘。盘的直径为 25 kpc，厚度约为 2 kpc。盘的中心有一球状隆起，被称为核球。若鸟瞰这银盘，它是由从核球向外延伸的几条旋臂所组成。太阳位于一条旋臂上，距银河系中心约有 8 kpc。银盘上下有球状的晕区，叫银晕。其中的恒星较稀疏。晕区的直径为 30 kpc，晕内物质的质量约只占银河系总质量的 10%。除了恒星外，星际稀薄气体也是银河系的重要组分。这就是我们所在的星系的概貌。太阳作为我们的恒星，其质量、光度或位置都没有太大的特殊性，而只是银河系内的普通一员。这正是哥白尼思想在星系尺度上的体现。

在认识了银河系之后，重要的问题是：是否天穹上一切光点都是银河系的一部分？这问题在历史上有过很多哲理的争论，但是实际上它只有用观测才能回答。要通过观测来给出回答并不容易。设想有一个类似于银河系的恒星集团处于 500 kpc 的距离上（记得银河系自身大小仅为 30 kpc）其表观亮度与 2 kpc 处一个类似

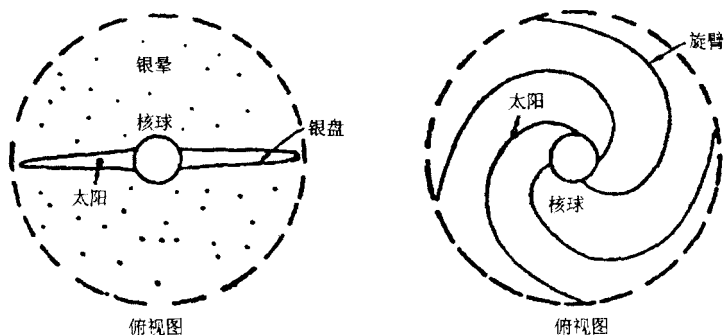


图 1.5 银河系的结构

太阳的恒星是一样的，因此，为判断天穹上的某个光点是银河系内的恒星，或银河外的恒星集团，必须要测量它的距离。在当时除了属于银河系的恒星外，已经知道还有不少云块状的天体，它们被笼统地称为星云。经过很多年的争论后，有人在某些星云中找到了造父变星。用变星方法测定其距离，才知道这些被叫做星云的天体其实不是恒星际的云块，而是远在银河系之外的很庞大的恒星集团。这发现第一次使人们知道：银河系仅是宇宙的一部分，而不是全部。这无疑是人们认识宇宙的一大进步。这样的恒星集团很快被发现了，人们才建立了星系的概念。星系的普遍存在，表明它是宇宙结构中比恒星更大的一个新的层次。

不同星系的质量差别很大。银河系的质量约为 $10^{11} M_{\odot}$ (太阳质量单位)。在较容易观测到的明亮星系中，这是中等的、典型的大小。随着望远镜的观测能力越来越大，天文学家发现了许多很暗的小星系。它们的质量可高达 $10^6 M_{\odot}$ 。因此银河系实际上属于大型的星系。不同星系的外形也很不相同。有旋涡状（银河系是一例）、椭圆状和不规则状的。通过很大范围的观测巡视，人们认识到，宇宙空间中弥散地分布着无数大小不同和形状不同的星系。因此概括地讲，宇宙介质可以看成是以星系为“分子”所组成的“气体”。

在知道宇宙介质可看成由星系组成的气体后，接着的重要问题是：星系在宇宙空间的分布是随机的、无序的吗？如果答案是肯定的，那么这气体自然是均匀的，但天文观测的回答是不完全如此，星系的分布仍有结团性。其实考虑到万有引力的存在，这在物理上是很可理解的事。观测表明，星系的结团性远比恒星弱。大约只有 10% 的星系从属于由几百、上千个星系结合成的大型集团，叫星系团。大部分星系只结合成含十几、几十或上百个成员的小集团，它们被叫作星系群。还有不少星系只是三三两两地结团。无论如何，由星系结合而成的集团代表了宇宙结构中又一个更大的层次。我们可以笼统地称它为星系团的层次，它的尺度为 Mpc 的量级。

那么还有更大层次的物质结团吗？在尺度为 100 Mpc 的范围内的星系个数达 10^6 。须逐个测定其距离，才能知道它们的立体分布，因此要用观测来澄清这问题是很艰巨的任务。总究在 70 年代后期人们发现了超星系团（简称超团）的存在。在超团中通常只包含几个大型的星系团，而大部分是很小或极小的星系集团，因此超团的总质量仅比大的星系团多一个量级。超团的外形不呈球状，而是扁长形的。到 80 年代末人们又发现了相应尺度的空洞。即在很大（例如几十 Mpc）范围内几乎没有星系存在的区域。现在已观测到最大空洞的直径达 50 Mpc。按目前的认识，超星系团和空洞代表了宇宙物质分布上的最大层次。但是对宇宙在 50 Mpc 以上是否还有新的结构，这问题依然有人在研究。

到这里让我们最后问：整个宇宙总共有多大？这问题看来简单，却不是能简单地回答的。事情的一面是由于宇宙空间的弯曲性，它的总体积可能有限，也可能无限。但事情还有另一面。由于今天的宇宙年龄 t_0 是有限大，光在这时间内能传播的距离（ ct_0 的量级）也有限。因此，不管浩瀚宇宙的总大小为有限或无限，我们能观测的部分却总是有限的。这些问题都将在后面讨论到。这里仅想指

出：可观测宇宙的大小 约是 10^4 Mpc，它比超星系团的尺度仅大三个量级左右。这样看来，上面谈到的认识已大体反映宇宙的全貌了。

总之，从宇宙学的眼光看，我们宜把星系当作宇宙物质的基本单元，而把恒星只看作星系内部的细节。至于太阳系则是更细的细节，完全不属于宇宙学关心的范围了。宇观地看宇宙，它具有层次性的结构。把星系当基本层次，其上还有星系团的层次和超团及空洞的层次。这就是今天对宇宙面貌的基本认识。

三、宇宙学原理

当我们对任何客体作物理的理论研究时，总必须先把它简化。实际客体都是综合的、复杂的。它包含许多并非本质的次要属性。若把一切属性都考虑在内，就难以对它作深入的研究了。简化的要领是把客体的次要属性丢掉，但与此同时，必须把客体的主要属性保留下来。这样，人们所研究的虽是客体的简化模型，而模型的主要行为却与真实客体是一致的，或相接近的。若没有把主要属性抓住，模型的基本行为将也不反映客体的实际，那么研究这模型就没有意义了。这是做基本理论研究的一般方法。人们在研究宇宙时也是这样做的。

第一个物理的宇宙模型是爱因斯坦在 1917 年提出的。当时人们对宇宙的整体面貌还完全没有了解，因此他主要凭直觉，作了两个简化假设：（一）宇宙物质在空间上是均匀和各向同性的，今天人们把它叫做宇宙学原理。（二）宇宙物质的分布是不随时间变化的。在这两条假设基础上，他建立了静态的宇宙模型。20 年代初，天文学家初步发现了宇宙在膨胀的迹象，敏感的人很快意识到爱

(1) 这指按广义相对论定义的固有距离，它与测量上得到的（光度）距离是有区别的。

因斯坦的后一条假设错了。Friedmann 在只保留前一假设的基础上建立了膨胀的宇宙模型。它就是今天的标准宇宙模型的雏形。由此，我们必须对宇宙学原理与真实宇宙的关系作出讨论。

如上所述，宇宙学原理原本只是爱因斯坦的猜想，而并没有事实根据。后人沿用了下来，很大程度上是把它当作一个方便的工作假设。因为如果宇宙不是均匀的，那么研究宇宙动力学的条件就更不成熟了。当然，均匀假设到底是否符合事实是根本问题。膨胀的宇宙理论在 60 年代前一直得不到学术界的认可，这基本假设没有证据是重要原因。这方面证据的获得是 60 年代后的事。

一片气体被认为是均匀的，意指不同地方的同大体元内有同样的质量。但是气体有微观结构，即它是由分子所组成。因此若把体元大小取得与分子可比拟，不同处体元内的质量是不会相等的。这道理说明“均匀”是一个宏观概念。现在需要把这概念用到宇宙学中来。我们已经知道，在星系团或超星系团的尺度以下，宇宙物质的分布是结团性的。因此，它的均匀性应是一个宇观概念。

上节中已指出宇宙可看成由星系为“分子”的气体。由于星系间有长程力，即引力作用，它使得星系有结团行为。因此若以星系的平均间距（约 1 Mpc）为体元尺度，不同地方体元内的质量必会有显著的不同。当把体元尺度放大到 10 Mpc 即星系团与超星系团之间的大小，可以预料，体元内的质量仍会有不小的差别。宇宙介质的均匀性应表现为在更大的尺度上偏离均匀的程度很小，且随尺度的加大而越来越小。为了能用实测来证实或否定这概念，我们可把不均匀程度量化。

考虑直径为 λ 的球形区。把宇宙的不均匀性完全抹平后，这球区内的质量为 M 。在不严格均匀的实际宇宙中，这区内的质量记 $M + \delta M$ ， δM 反映它对均匀背景的偏离。显然不同地方有不同的偏离大小。对全宇宙讲 δM 的平均值必定为零。有的地方球内的质量超过平均值，必有别的地方低于平均值。因此我们应把各处的 δM 平方后再作平均，得到 $\langle \delta M^2 \rangle$ ，它表示整个宇宙偏离均匀的程

度.按上面的分析,这样定义的偏离程度与尺度 λ 的大小有关.原则上这 δM^2 值随 λ 的变化可以通过对大范围巡天资料的分析来得到.如果实际情况显示出 δM^2 值随 λ 的增大而减小,这就是宇观地均匀的证据.

当然作这种分析是很艰难的任务,但是初步结果已有了.首先人们发现,使平均相对偏离 $\langle (\delta M/M)^2 \rangle = 1$ 的尺度是 8 Mpc.在更大尺度上,相对偏离是小于 1 的.1990 年有一个研究组用 IRAS 科学卫星得到的巡天资料作分析,得出的结果是: $\langle (\delta M/M)^2$ 在 15 Mpc 的尺度上为 0.18 在 45 Mpc 的尺度上为 0.067.这结果确实告诉我们:尺度取得越大,宇宙气体偏离均匀程度越小.另外还表明在 50 Mpc 以上,平均偏离已小到 25% 以下.虽然这类分析在细节上还颇可争议,但无论如何,它们对宇宙学原理给出了有力的支持.

更强烈的证据来自早期宇宙.按宇宙学理论,今天存在的星系是在宇宙演化中产生的.在一切星系形成前,宇宙介质是高度均匀的普通气体(参看第四章).3K 微波背景辐射产生于一切星系尚远没有形成前.那时不同地方的密度不均匀,将通过热辐射温度的各向异性表现出来,因而它是可以测量的.这问题将在第五章中讨论.这里仅指出:微波背景辐射温度的观测,证实了当时宇宙密度的不均匀程度仅为 10^{-3} .这是对宇宙学原理的更有力的支持.总之,宇宙学原理作为从理论上研究宇宙的出发点,现在已不再是一个猜想性的或图方便的假设.事实已证实,它是实际宇宙的一个合理的近似描写.

四、宇宙的膨胀

要对宇宙作理论研究,总需要以一些基本的观测事实做基础.上面谈到的宇宙均匀性是一方面重要事实.另一方面重要的事实是宇宙在膨胀.

在爱因斯坦解出他的静态宇宙模型时，天文学家 Slipher 正在观测远处旋涡状星云的光谱波长的移动。他发现多数星云发出的光谱在我们看来有红移，仅少数有蓝移。按当时的物理知识，这种波长的变化只能归因于光源运动的多普勒效应。那么，多数星云的光谱有红移，表明它们都在向远离我们的方向退行。这是最早被人们发现的宇宙膨胀的迹象。

Slipher 的发现发表在 1923 年，当时还不知道这些星云是银河系之外的天体。同年，另一位天文学家哈勃可靠地用观测论证了某些旋涡星云是远在银河系之外，而与银河系相类似的恒星集团。若在银河之外的大量星系都在向远离我们的方向运动，那么推而广之，宇宙作为星系组成的气体，它在膨胀的图象就形成了。当时有好几位理论家如 Eddington 和 Friedmann 等都意识到了这一点。有人把这事实和看法告诉了爱因斯坦，他也立即意识到他的静态宇宙假设应当抛弃。

由于哈勃已掌握了一些测量星系距离的方法，他进一步研究了星系的退行红移 z 与距离 R 的关系。当时观测到的红移都很小，按非相对论的多普勒效应公式，退行红移与退行速度成正比，即 $z = v/c$ 其中 c 是光速。他在 1929 年经验地发现，不同星系的退行速度与它的距离成正比。后人把这规律叫哈勃定律，写作

$$v = H_0 R \quad (1.2)$$

其中的比例系数 H_0 被称为哈勃常数。

让我们注意，哈勃常数作为速率与距离之比，它所反映的是宇宙的线膨胀率。容易论证，线膨胀率为常数，表明宇宙中不同地方的密度变率是一样的。图 1.6 中直观地画出了这样的论证。在均匀的宇宙介质中取出四个等距分布的星系 O （我们的位置）、 A_1 、 A_2 和 A_3 。按哈勃定律，从 O 看另三个星系，它们的膨胀速度比为 $v_1 : v_2 : v_3 = 1 : 2 : 3$ 。当 A_1 达到 A'_1 时， A_2 和 A_3 分别达到 A'_2 和 A'_3 。这样易于看出 O 、 A'_1 、 A'_2 和 A'_3 仍是四个等距分布的星系。于是这就说明，原来均匀的气体，在按哈勃定律膨胀后依然是均匀

的. 因此哈勃定律不仅告诉我们宇宙在膨胀, 而且暗示了宇宙在它的演化历史上一一直是均匀的.

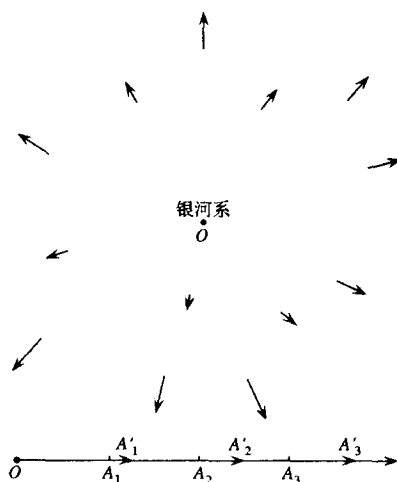


图 1.6 按哈勃定律的膨胀

哈勃定律表明一切星系都以我们为中心向四方散开. 这容易给人以错觉, 好像我们处于宇宙的中心. 在上面论证的基础上, 这错觉就容易澄清了. 对永远均匀的宇宙讲, 空间不同位置是完全平等的, 我们所处的位置不可能有任何特殊性. 如果其他星系中有观测者, 那么他会发现, 宇宙相对他的星系也是按哈勃定律膨胀的. 人们常把这一观念叫宇宙学的哥白尼原理.

确切说来, 哈勃常数所反映的是今天宇宙介质的膨胀速率. 这是一个非常重要的宇宙学参量. 让我们注意一下它的大小.

用 Mpc 作为距离 R 的单位 用 km/s 作为速度的单位, 则 H_0 的单位是 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$. 哈勃本人在 1931 年首次定出的值是

$$H_0 = 500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}, \quad (1.3)$$

即距离为 1 Mpc 的星系的膨胀速率为 500 km/s. 正是这过大的

膨胀率，导致了宇宙年龄过小（2 Ga 以下）的预言（见第二章）它曾使膨胀宇宙理论失去了当时人们的信任。到 50 年代 后一代天文学家才发现哈勃在距离测定上有错误（结果显著偏小），并弄清了 H_0 的实际值要小得多。但是至今用不同方法测量远处星系的距离依然有不小的差别，因此相应定出的哈勃常数仍相当弥散。它是

$$H_0 = 40\text{---}100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}. \quad (1.4)$$

经过几十年的努力，包括发射哈勃空间望远镜到大气外去测量，结果 H_0 到底多大的问题还没有解决。按专家们现在的共识，它的实际值应在 50 到 80 之间。这遗留下来的不确定性给宇宙学研究带来很多不利，后面我们将屡屡看到。

关于哈勃常数，还有一点值得注意的细节，它的倒数具有时间的量纲。若接受 $H_0 = 50\text{---}80 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 利用 $1 \text{ Mpc} = 3.1 \times 10^{19} \text{ km}$ 易于折合成

$$H_0^{-1} = (3.9\text{---}6.2) \times 10^{17} \text{ s} = (1.3\text{---}2.0) \times 10^{10} \text{ a}. \quad (1.5)$$

以后将从理论上论证，它与宇宙年龄 t_0 是同量级的。因此在做简单讨论时，人们常把 H_0^{-1} 当作宇宙年龄。其实更确切些说，它是宇宙年龄的上限。此外按同样道理， $c H_0^{-1}$ 应是观测宇宙大小的量级。相应的值是

$$c H_0^{-1} = 3800\text{---}6000 \text{ Mpc}. \quad (1.6)$$

本节开头时已指出，哈勃定律作为经验规律是在红移 z 很小时得到的。从 (1.2) 式看 并注意到 $z = v/c$ ，红移很小意味着该星系与我们的距离须远小于 $c H_0^{-1}$ （即观测宇宙的大小）对于远的星系，测量表明其光频的红移会超过 1 但这种情况下形式如 (1.2) 的哈勃定律是不适用的。这时红移与距离的关系是什么，那既是实测须回答的问题，也是宇宙学理论应回答的问题。问题的另一面

a 是 anno 的缩写 代表年。1 Ga = 10^9 a.