

宇宙的大尺度结构

——形成和演化

邓祖滢

周又元

(中国科学技术大学研究生院) (中国科学技术大学天体物理研究室)

近代宇宙学的研究开始于本世纪初,其理论的基础是爱因斯坦的广义相对论。爱因斯坦本人最早将广义相对论应用于宇宙学问题的研究,他在“宇宙中物质均匀分布”的假定下试图寻求场方程的静态解,但是发现场方程并不存在静态的解。他为了维护静态宇宙的观念,在广义相对论场方程中引入了所谓宇宙项。但是,后来的研究证明,引入宇宙项后所得的静态解是不稳定的。

作为现代宇宙模型基础的弗里德曼解是在1922年得到的。弗里德曼仍然假定物质在宇宙中均匀分布,并在此条件下得出了描写膨胀宇宙的场方程的解^[1]。

弗里德曼模型在宇宙学上提出了两方面的问题:(1)物质是不是均匀分布的?这一点涉及到弗里德曼在解场方程时所引入的基本假定是否合理。(2)宇宙是否真是膨胀的?这一点和弗里德曼解是否与真实的宇宙相一致有关。如果宇宙真是膨胀的,那么无疑将彻底改变人们长期以来认为宇宙静止不变观念。

这两个问题都必须从对宇宙的观测上来回答。对这两方面都作出重要贡献的观测宇宙学家是哈勃。

哈勃(E. P. Hubble)在本世纪二十年代分别对星系谱线的移动和星系到地球的距离进行测量,发现除极少数非常邻近的星系外,所有星系的谱线都向长波方向移动,即红移。这表明这些星系都是向着远离我们的方向运动的。哈勃还进一步发现,星系离开我们退行的速度与它们距我们的距离成正比。愈远的星系以愈大的速度离开我们运动(称哈勃定律)。比例常

数称为哈勃常数,目前得到公认的哈勃常数的数值为 $H_0 = 45-120 \frac{\text{公里/秒}^1)}{\text{兆秒差距}}$ 。哈勃定律的

重要意义就在于它向人们描绘出一幅宇宙膨胀的情景。在一个均匀膨胀的宇宙中,我们应该看到的与宇宙一道膨胀的星系运动,正是相互退行,而且距离愈远退行速度愈快^[1]。

膨胀的宇宙以一幅演化的图象取代了静止不变的宇宙图象。宇宙学也就成为研究宇宙演化的科学了。既然宇宙是在膨胀,那么在过去宇宙中的密度和温度当然会比今天的高,早期的宇宙一定是处于高温、高密的状态,或者说,今天的宇宙是由早期的极高温、极高密度状态的宇宙膨胀形成的。这就是今天流行的大爆炸宇宙学或标准宇宙模型给出的粗略的图象。

哈勃的另一重要贡献是,他根据星系的计数第一次研究了星系在宇宙中分布的均匀性问题。由于我们观测到的星系的亮度是与星系到我们的距离的平方成反比的,因此对于一定内禀光度的星系,如果观测到的亮度大于 f ,则它们离我们的距离必须小于某一距离 $r(r \propto f^{-\frac{1}{2}})$ 。如果星系均匀分布于空间,则在 r 以内的这些星系的数目将与 $r^3(r^3 \propto f^{-\frac{3}{2}})$ 成比例。这一关系对任一内禀光度的星系均成立,因此对各种不同内禀光度的星系求和时,这一比例关系仍然是正确的,即

$$N(< m) \propto f^{-\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

其中 $N(< m)$ 表示视星等亮于 m 的全部观测到的星系总数。哈勃对不同视星等的星系进行计数,发现星系的分布是均匀的。后来的观测

1) 1秒差距=3.26光年。

也证实了哈勃的结论^[2]。

一、宇宙早期物质分布的均匀性^[1,3]

宇宙早期物质均匀分布的最有力的证据来自近代对微波背景辐射的观测。微波背景辐射的存在是大爆炸宇宙学的推论。按照大爆炸宇宙学理论,宇宙早期处于高温高密度的状态。当宇宙温度高到 4000 K 以上时,物质将难以以原子形态存在,而主要由质子、电子和辐射所组成。带电粒子与辐射光子产生剧烈的相互作用,使物质粒子与辐射达到平衡。处于热平衡态的辐射呈黑体谱分布。随着宇宙膨胀,温度会下降。在温度降到 4000 K 左右时,质子和电子结合为中性的氢原子,这一过程称为复合。复合后宇宙中物质以中性原子的形态出现,而中性原子与辐射间的相互作用非常微弱。因此,在复合后宇宙的进一步演化中,物质和辐射将各自演化,不产生相互影响。我们通常说它们“退耦”。退耦之后,由复合时留下的黑体辐射将随着宇宙的膨胀而降低温度,但在这一过程中它仍然保持其黑体谱的形式,并且携带着复合时宇宙中物质分布的信息,即它的不均匀性反映了复合时物质分布的不均匀性。

1965 年彭塞斯 (A. A. Penzias) 和威尔孙 (R. W. Wilson) 首先观测到了这一弥漫于空间的背景辐射。以后对红外、微波和射电波段的观测,证实了这一辐射具有温度为 2.7K 左右的黑体辐射谱的形式。

对各个方向上的微波背景辐射进行观测后发现,这一辐射是高度各向同性的,其各方向上的不均匀性只有 10^{-4} 量级。由于人们自哥白尼以后已普遍认识到地球并不处于宇宙中的特殊位置,这一观测结果意味着宇宙早期物质的分布是高度均匀的,那时密度的起伏最大只有 10^{-4} 量级。

二、星系的成团和大尺度结构^[2,3]

尽管宇宙的早期物质的分布是高度均匀

的,但是我们近处的物质的分布却是很不均匀的,因为物质聚集形成星系,而星系之间物质是非常稀薄的。当我们对星系的分布作更仔细的观测时,就会发现星系形成大大小小的群或团。而且还发现星系团和星系团之间还相互联结形成所谓超团。

宇宙大尺度结构所研究的问题之一,就是星系、星系团以及超团是否存在,是否有一定的尺度,是否有一定的结构上的特征。

早期的研究主要是观察它们在天球上投影的分布。近年来由于系统的红移巡天给出了愈来愈多的包含星系距离的完整样本,对大尺度结构的分析也发展到三维的分析。

近年来对星系大尺度结构的观测和分析表明:

(1) 星系分布是成团的。小的星系群只由几个或十几个星系所组成,而大的富星系团却含有上千个星系。

(2) 对星系分布的分析还表明,星系团并不存在优越的尺度。

(3) 发现星系有链状或片状的分布。星系链联结大的星系团,从而形成网状或蜂窝状的结构。在这一蜂窝状结构中存在着巨大的、星系含量非常低的空区(或称巨洞)。

(4) 在较小的尺度上密度分布的不均匀性强,而随着尺度的增大,不均匀性有逐渐减弱的趋势。

三、星系及大尺度结构的形成和演化

从前面所述的结果,人们自然会问:我们今天所观测到的物质成团分布和复杂的结构是怎样从早期均匀分布状态中产生出来的呢?这是关于宇宙大尺度结构的理论必须回答的问题。

牛顿最早提出了在均匀分布的无限大介质内由于起伏所引起的密度扰动会导致引力不稳定,从而形成天体的概念。琼斯(J. Jeans)在牛顿引力理论的基础上从理论上建立了这一概念的数学表述,并由此给出了引力不稳定性的判

据。栗弗西兹 (И. Лифшиц) 进一步研究了膨胀宇宙中的引力不稳定性的理论。我们在此只对这些理论作定性的介绍, 需要更深入了解的读者可参阅本文所附的参考文献^[1,2]。

早期宇宙中的起伏表示了密度与膨胀宇宙平均密度的微小偏离。在空间任一点都可能存在着大尺度的和小尺度的不规则性。这些不规则性虽然很小, 但是它中间可以包含着大量的物质。

这些微弱的起伏将不会是静态的, 任何密度的微小的增大会使得它产生对周围物质的引力, 此引力将吸引这些物质流向密度稍高的地方, 从而使得其密度进一步增长。如果这一过程不受热压力的阻碍, 那么密度会很快地增长, 最后导致塌缩。但是, 引力的吸引和热压力的排斥总是同时存在并且不断相互竞争。对于充分大尺度的起伏, 由于其包含的质量很大, 所以引力总是占据主导地位, 这种起伏的密度增长将继续下去。对于压力占主导地位的起伏, 其密度不会继续增长下去, 而只能象声波那样呈压力波传播开去。这两种情况的分界便是所谓琼斯尺度 R_J , 是由琼斯第一次由理论上得出的。栗弗西兹在讨论膨胀宇宙中起伏的演化时, 也得到了同样形式的 R_J :

$$R_J = v_s (\pi / G\rho)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中 v_s 是当时宇宙物质中的声速, ρ 为当时宇宙的平均密度, G 为万有引力恒量。起伏的尺度在大于 R_J 时是不稳定的, 起伏将增长; 起伏尺度在小于 R_J 时, 起伏将如压缩波一样振荡。

在膨胀和不膨胀的宇宙中所得到的不稳定性判据 R_J 虽然是同样的, 但是两者存在着重要的区别: 在不膨胀宇宙中, 大于 R_J 尺度的起伏会很快地按指数规律增长, 而在膨胀宇宙中, 尺度大于 R_J 的起伏的增长要慢得多, 它随时间按幂律的形式增长。因此可以看出, 宇宙的膨胀阻止了早期密度起伏的迅速增长。

在琼斯尺度体积内所包含的质量称为琼斯质量 M_J ,

$$M_J = \pi\rho [v_s (\pi / G\rho)^{\frac{1}{2}}]^3. \quad (3)$$

在复合之前, 物质与辐射由于强烈的相互作用

结合在一起, 形成辐射与物质的混合介质。这时宇宙是以辐射为主的。在这样的介质中声速非常大, 接近于光速 ($v_s = c/\sqrt{3}$), 可见这时的 M_J 是相当大的, 超过了最大的星系团的质量。在复合后, 辐射与物质退耦, 而宇宙过渡到以物质为主, 这时介质中的声速就是宇宙中中性原子气体中的声速。在当时的温度和密度下, 声速突然降到约 4×10^5 cm/s。这时的琼斯质量大约只有 10^5 太阳质量, 相当于球状星团的质量。

由此可以看出, 在复合前、后, M_J 发生突然的变化 (图 1)。这表示在复合前存在的许多起伏在复合后将突然成为引力不稳定的, 它们将会增长并塌缩为某种天体。

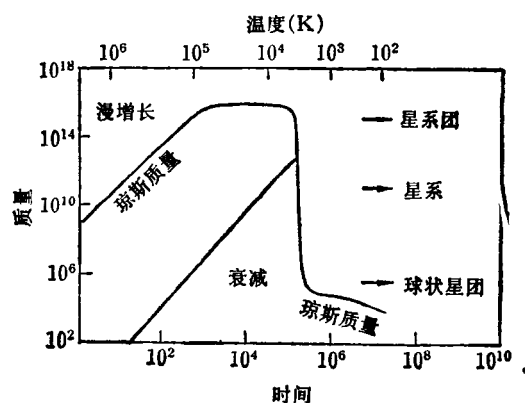


图 1

复合前尺度小于 R_J 的扰动形成压缩波, 这种振荡着的扰动如果保持到复合时, 则它们中的许多就会变得不稳定, 因而增长并塌缩成各种尺度的天体。但是, 实际情况并不是所有的这些扰动都能保持到复合时期, 因为在复合之前, 形成的压力波要经历一耗散过程, 波的能量通过辐射场光子的逃逸会逐渐损失。对于波长长的扰动, 光子传播与起伏尺度相应的距离所需时间长。在这一时间内, 光子将会与带电粒子发生碰撞因而难以逃逸出去, 而对波长较短的扰动, 光子则易于从起伏中散逸出去。因此, 波长愈短的扰动将更快地耗散、衰减并消失, 只有尺度较大的起伏才能不被衰减掉而维持到复合产生的时候。图 1 中绘出了上面讨论

所得的结果。图中时间的单位是年，从大爆炸时开始计算，质量单位为太阳质量。由图1可以看到，在复合时，大尺度的起伏如果其中所包含的质量达 10^{15} 太阳质量以上，由于其自引力足以克服压力，因而起伏会继续增长。起伏所包含的质量在 10^{12} 至 10^{15} 太阳质量的范围内时，起伏就能保持到退耦时。然后，出现引力不稳定性。 10^{12} 太阳质量以下的起伏将被耗散而衰减掉。

上面所描述的宇宙中早期起伏的演化是假设了起伏过程中物质与辐射的密度是同时变化的，这种起伏称作绝热起伏。还可能存在着另一种起伏，在这种起伏中只是物质（质子和电子）的密度发生变化，而辐射场不产生扰动，这种起伏称为等温起伏。

在整个以辐射为主的时期内，等温起伏的演化情况与绝热起伏完全不同。例如，有一个电子，电子受到引力而运动，由于辐射并不和物质一道产生起伏，这电子将会遇到一很强的辐射流。由于辐射与电子的相互作用（或散射），辐射有一个很大的拖力或摩擦力作用于电子，又由于静电作用，质子与电子不发生相对分离，因此这个很大粘滞力就作用到整个物质上。只有当电子不动时这一粘滞力才为零。辐射场的这种力的作用，使物质的起伏凝结起来。物质不能运动，因而起伏既不放大也不会衰减掉。这一起伏将一直保持到复合时。

这两种起伏在更早期和在复合后的情况又怎样呢？特别是，最初起伏的“谱”（即起伏的振幅与尺度的关系）究竟是怎样的？这些问题虽然有人试图从极早期宇宙的研究来讨论，但是至今尚未从理论上得到解决。某些天体物理学家采用完全无规和不相关的“白谱”作为初始起伏的谱，然而对星系团的分析表明，似乎初始扰动谱与尺度存在着某种微弱的关系，它按 $M^{-\frac{1}{2}}$ 变化。

两种起伏在复合之后的情景有着明显的区别。等温起伏在整个辐射为主的时期中是被冻结的，到退耦之后，尺度大于退耦后琼斯尺度的起伏将出现引力不稳定性，从而塌缩形成各种

天体。由于冻结，因此起伏的谱也一直保持不变。根据我们对宇宙大尺度结构的分析可以看到，随着尺度的增大，物质分布的不均匀性逐渐减小，从而可以推测，早期起伏的谱也是尺度愈大，其起伏愈弱。从这一假定出发，可以设想最早形成的将是质量较小的天体如球状星团或小的星系。更弱的大的起伏形成一弱的引力场，它吸引这些小质量的天体使它们结合成更大的星系或联合成团，这些星系或团又在更大的更弱的起伏所产生的引力吸引下形成更大的团。如此类推，构成了一幅等级式成团的情景。

绝热起伏给出的复合之后的演化过程又是另一幅图象^[3-5]。如前面所述，只有足够大的起伏在到达复合时不会被衰减掉，因而在复合时只有 M 大于 10^{12} 太阳质量的扰动能保留下来，这种起伏所包含的质量远大于通常星系的质量。当复合发生后，琼斯不稳定性的质量迅速降低，复合后的琼斯质量远小于通常星系的质量。一个初始的大质量的扰动到复合后由于引力不稳定性开始增长，这种增长形成的不稳定性通常不会是理想球对称的。捷尔多维奇(Ya. B. Zel'dovich)等人对非球对称的气云的塌缩进行了研究，研究结果表明，这种气云塌缩时非对称性将迅速扩大，即在尺度较小的方向上的塌缩远比尺度大的方向的更快。结果是：(1) 气云将很快地塌缩成扁平的“薄饼”形；(2) 由于气云形状可能的不规则性，也可能在气云中（特别是对于那些尺度较星系尺度大得多的扰动中），形成许多这种“薄饼”形的塌缩气云。在塌缩过程中，引力比压力大大地占优势，物质塌缩的速度将大大超过声速，从而产生高速的超声流动，这将导致湍动和激波等的出现。这些不规则的运动会使“薄饼”中产生高密区域并最终碎裂为更小的气团。这些气团的塌缩最终形成星系。

绝热扰动的图象与等温扰动图象有着一些明显不同的地方：(1) 等温扰动是首先形成矮星系或星团，它们在引力作用下再形成更大的星系和星系团等。而绝热扰动是大质量的气云形成“薄饼”然后碎裂而形成星系和星系团；(2)

等温扰动图象中小的系统是在更大尺度扰动的引力场作用下逐级成团的。它形成的大尺度结构应是等级式成团的结构。而绝热扰动图象中星系和星系团是由“薄饼”形的气云碎裂产生，因此星系的分布应当是片状的。对于质量很大的气云可以形成多个“薄饼”，在它们中间会形成高密度的链状结构。因此，绝热扰动所预期的星系的分布应当是链状或片状的结构，在这些链和片状结构之间所围成的区域中很少有星系出现，从而形成巨洞。

等温扰动图象可以给出与观测一致的星系成团的相关函数形式。但是，由于近年来观测到星系分布中的确存在着链状和片状结构，还观测到了巨洞，所以有人试图从等级式的随机成团中构造出观测到的链和巨洞结构。但是，这比观测所得结果要模糊得多了。

四、暗物质的存在及其对大尺度结构的影响

大量的天文观测结果表明，除了能发出各种辐射的天体和宇宙中的气体之外，还可能存在着相当数量的我们尚未能观测到的物质。1933年兹维基(F. Zwicky)已发现要从维里定理解释彗发座富星系团(除近星系)的弥散速度，只考虑彗发团中发光天体的质量是远远不够的。从对天体质量-光度比的分析，也看到了有趣的现象：如果以太阳的质-光比为1，则星系的质-光比约为10，而富星系团的质-光比达100—300。这种随着尺度增加质-光比逐渐降低的规律也暗示，随着天文系统尺度的增加，其中包含的暗物质也越来越多。对星系转动速度的研究表明，在旋涡星系很靠外面的盘星的转动速度并不像一般想象的那样逐渐降低，而是大约保持常数。这说明，星系的质量并不是集中在其中心区域，而是延伸到很远的地方。

所有的这些观测事实都表明，在宇宙中尚存在着一些物质，它们的质量至少与发光天体的质量可以比较，甚至要大得多。

究竟这些暗物质是什么？它们对天体的演

化特别是对宇宙的大尺度结构及其演化会产生什么影响？这一直是天文学中的谜。有人认为，暗物质是塌缩天体——黑洞，或是宇宙在很早期形成的小黑洞，或是非常小质量的星，它们形成星系的晕……。近几年来，由于对中微子质量的讨论，不少人提出这种暗物质是由有质量的中微子形成的。随着对超对称性和大统一理论研究的发展，也提出这些暗物质也许是由这些理论所预言存在但至今尚未发现的某些“微子”如光微子、引力微子等组成。

近些年来研究得较多的是把这种暗物质当作是有质量的中微子^[4,6]。如果中微子有20—30 eV的质量，则由于它们的数目很多，会使得我们的宇宙成为封闭的。由于中微子与所有物质的作用都非常微弱，所以直接探测是很困难的。如果宇宙中确实存在大量有质量的中微子，那么它们对宇宙的演化会产生明显的影响。

在宇宙早期，中微子是相对论性的粒子，它的密度扰动衰减很快。中微子自由的穿行于各种物质扰动的区域。这种自由流动的中微子将破坏所有质量小于 10^{15} — 10^{16} 太阳质量的起伏。因此，有质量的中微子正好可以提供绝热扰动所需的“薄饼”的尺度。这一尺度对应于今天观测到的超团尺度。

但有质量中微子的存在也给绝热扰动理论带来了困难。质量为 10^{15} 太阳质量的“薄饼”只能在相当晚的时候才能碎裂，形成星系。

有质量中微子在研究宇宙大尺度结构时产生的难以克服的困难，使得科学家们的注意力转向其它的可能性。近年来粒子物理和宇宙学研究的结合，为探讨暗物质提供了更多的可能性。例如，超对称性理论所预言的光微子和引力微子等，由于它们的质量不同，在宇宙演化的不同时期变为非相对性的粒子，导致引力成团。这一成团出现的时期就给出了一个扰动尺度的下限。每种不同的粒子给出一个不同的初始质量扰动谱，这可以与现在观测到的宇宙大尺度结构相对照。这些粒子在实验室观测是非常困难的，而宇宙的大尺度结构却为检验它们的存

在提供了一个有力的方法。

宇宙大尺度结构的形成和演化在今天仍是一个引人注意的课题。由于物理学的基本研究与宇宙大尺度结构研究日益密切的结合,它对于物理学家来说,也是很有吸引力的。

参 考 文 献

[1] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, John

Wiley and Sons, New York, (1972).

[2] P. J. E. Peebles, *The Large-Scale Structure of the Universe*, Princeton Univ. Press, (1980).

[3] 刘永镇、邓祖淦、曹盛林, *天文学进展*, 2(1984), 365.

[4] Ya. B. Zeldovich, J. Einasto and S. F. Shandarin, *Nature*, 300(1982), 407.

[5] S. F. Shandarin, A. G. Doroshkevich, Ya. B. Zeldovich, *Usp. Fiz. Nauk*, 139(1983), 83.

[6] C. S. Frenk, S. D. M. White, M. Davis, *Astrophys. J.*, 271(1983), 417.

低温低气压等离子体科学技术将会迅速发展

——Herman V. Boenig 教授的评述

Herman V. Boenig 教授现任美国等离子体化学和工艺学协会主席,《低温等离子体化学》(期刊)主编和《等离子体消息报道》主编。

他认为低温等离子体研究和应用的发展比原来预期的更为迅速,这是当前一个十分活跃的领域。低温、低气压等离子体技术正向各个部门渗透,工业界计划应用这种技术的数目成倍增长,尤其是应用于集成电路、集成光学、光电子学、金属离子氮化、表面清洁、表面防护、海水淡化、空气净化、污水处理、太阳能电池、复合材料、纤维和织物处理等。激励这项技术迅速发展的因素有:

(1) 设备造价较低,投资较少。尤其是低能耗,可使生产运行费用减少。

(2) 能制作高质量的淀积膜,这种膜完整、无针孔、抗腐蚀、与基体粘附性好。

(3) 选择单体和控制单体加入量,可方便改变膜的成分。

(4) 可制作半透膜或选择性渗透膜,用于离子交换、海水淡化和生物医学等。

(5) 可通过表面氧化、还原、蚀刻、注入、接枝、交

联,使材料表面改性。

(6) 对纤维和织物进行处理,可提高吸湿性、染色性、粘接性和防缩性。

(7) 将此技术引进到微电子学,可制作成分稳定的薄膜,蚀刻出高分辨的微电路。

(8) 可将这种技术引入到集成光学、波导和透镜等方面应用。

(9) 金属离子注入和沉积坚硬、抗磨损的覆盖层,使防护技术更快发展。

(10) 可提高太阳能转换效率。

(11) 可用于空气净化和污水处理等。

他预料,近几年低温等离子体科学技术的应用将有新的突破,并认为,淀积薄膜和纤维、织物处理技术的进展指日可见。

[1] H. V. Boenig, *Journal of Low-temperature Plasma Chemistry*, 1 (1985), 1.

[2] H. V. Boenig, *Plasma Science and Technology*, Cornell University Press, (1982).

(洪明苑)