

星系形成和冷暗物质模型

(II) 有偏袒的冷暗物质模型

马 驊 俞允强 陈 时

(中国科学院北京天文台)(北京大学物理系)(中国科学院理论物理研究所)

提 要

这是文章的第二部分,介绍了冷暗物质模型和星系有偏袒形成的概念,详细介绍了 N 体模拟的结果和与观测的比较,并简单介绍了有关重子物质与暗物质分离过程的初步研究进展。

宇宙中普遍存在大量非重子暗物质的事实为星系形成的研究开拓了新局面,重子为主宇宙中扰动增长速度的严重困难可望克服。可是,以有质量中微子为代表的热暗物质为主的模型仍有严重困难。八十年代初,冷暗物质为主的模型开始受到更多的关注。

对冷暗物质中扰动演化的早期研究 [1-3] 给出的结果是令人乐观的。数值计算表明, $\Omega = 0.2$ 的模型在星系的质量范围和它们的两点关联等小尺度结构方面,给出了与观测相符的结果, $\Omega = 1$ 的模型却很难与观测相洽。

1984年Kaiser[4]为解释星系团之间的关联,引入了星系有偏袒地形成的概念,认为星系分布不是大尺度质量分布的好的代表。此后对星系有偏袒地形成的观测结果[5],[6]和产生机制[7],[8]有过不少讨论。

1985年Davis等人[9]用高分辨率的 N 体模拟研究了冷暗物质宇宙内中等尺度(1—10 Mpc)结构的演化。在与多方面的观测事实作了比较后,他们指出,若星系是质量分布的好的代表,那么 $\Omega = 1$ 的模型就很难接受, $\Omega = 0.2$ 的模型好些,但仍不能完全与观测相洽,可是,星系有偏袒地形成的模型即使在取 $\Omega = 1$ 的情况下也能很好地与观测相符。

由于冷暗物质模型下的初始扰动谱是一个形状确定的连续谱,用中等尺度结构把模型中少数几个自由参量确定后,对更大尺度的研究就不需要再引入新的参量。1987年他们用同一模型,取 $\Omega = 1$,引入星系偏态形成,研究了10Mpc以上的结构演化[10]。考虑到在这种尺度上的观测数据还不够系统和丰富,他们的结果还是可以令人满意的。

这样,近年来的研究显示,冷暗物质为主的宇宙中星系有偏袒地形成的模型,能与从星系到超团的很大尺度范围内的大量观测事实相洽。这无疑是宇宙结构形成理论的一个值得注意的进展。下面我们较详细地介绍它的内容和它的成功与困难。

一、冷暗物质模型中星系的有偏袒形成

1. 冷暗物质模型的基本图象

在冷暗物质模型中,宇宙介质由无质量中微子、光子、重子和冷暗物质组成。一个Zeldovich-Harrison进视界扰动谱,会由于中微子的自由流动和光子的扩散阻尼的影响而变得平缓。恰好在辐射为主转为冷暗物质为主时进视界的扰动质量为 $M_{eq} = 2 \times 10^{16} (\Omega h^2)^{-1} M_{\odot}$ 。质量小于 M_{eq} 的扰动是在辐射为主时进视界的,而且当时光子尚未退耦,上述影响使宇宙介质的主要组份中扰动不能增长,这使冷暗物质的扰动增长速度被显著压低。质量大于 M_{eq} 的扰动是在冷暗物质为主之后进视界的,一进视界就能随时间以幂律增长。这样扰动谱的小尺度部份变平缓了。如用密度扰动的幂律形式 $\delta_k^2 \propto k^n$ 描述,则在大尺度部份保持 $n = 1$,而小尺度部份 $n = -3$ 。

对任一尺度的扰动,当 $\delta\rho/\rho$ 发展到接近于 1,非线性效应开始变得重要。这部份质量将从宇宙的整体膨胀中分离出来,它自身胀大到膨胀速度为零,而后开始坍缩。冷暗物质的坍缩是无耗散的,当半径缩小到约为最大半径一半时,坍缩将停止。引力的剧变弛豫机制把相当一部份位能转化为无规动能,从而使系统维里化。因此无耗散坍缩形成的维里系统仅使密度增大 8 倍左右。在各种尺度的扰动中,较小尺度的扰动先发展到非线性以及维里化。然后是逐级成团,构成越来越大的束缚系统。

介质中重子组份的扰动须在原子复合后才能增长。复合时重子物质的 Jeans 质量是 $10^6 M_{\odot}$,但质量小于 Silk 质量 M_s 的扰动已被光子扩散所阻尼了。由于重子物质是嵌在冷暗物质之中的,而冷暗物质的扰动已率先增长,它造成的势阱将加速重子扰动的发展。Peebles^[1]曾指出,质量大于 Jeans 质量的扰动都会迅速增长,并赶上冷暗物质扰动的增长步伐,即达到 $(\delta\rho/\rho)_B = (\delta\rho/\rho)_{DM}$ 。

重子扰动要发展成今天看到的致密天体,必须经历有耗散坍缩,即必须有适当的机制使它能在坍缩的动力学时标内把能量耗散出去。分析表明,质量在 $10^8 - 10^{12} M_{\odot}$ 的重子扰动能在冷暗物质晕中迅速冷却,发生耗散坍缩而形成今天看到的星系。更大尺度的扰动则将形成星系团等结构。

2. 星系的有偏袒形成

前已提到,为要解释大、中尺度的结构现象,人们引入了星系有偏袒地形成的观念。认为重子物质与暗物质的分布基本上是均匀的,而星系却不是物质分布的好的代表,在物质密度偏高的区域形成过多,在物质密度偏低的区域形成过少或根本不形成。

这种星系有偏袒地形成的观念有助于了解各种尺度上总质量、发光物质质量及总光度的分布状况。表 1^[3]列出了从单个星系到富星系团的质光比 M/L 及总质量和发光物质质量比 M/M_{Lum} 的观测值。 M/M_{Lum} 的值在各种尺度上是十分接近的,它反映了暗物质与重子物质分布的大体均匀性。与此同时, M/L 的随尺度增大而增大则反映着星系形成的偏袒性。由于偏袒性,在越大的结构层次上,同样的发光物质密度相应的星系数密度越小,从而光度密度也愈小。

表 1 不同质量尺度上的 M/L 和 M/M_{Lum}

	M	M/L	M_{gas}/M_{Lum}	M/M_{Lum}
富星系团	$10^{15}M_{\odot}$	316 ± 40	$0.84_{-0.1}^{+0.0}$	$8.4_{-1.0}^{+7.0}$
椭圆星系为主的小星系群	$5 \times 10^{13}M_{\odot}$	83_{-10}^{+80}	$0.61_{-0.1}^{+0.1}$	$5.4_{-2.0}^{+10.0}$
旋涡星系为主的小星系群	$2 \times 10^{13}M_{\odot}$	40_{-10}^{+50}	0(?)	14.2_{-6}^{+36}
银河系	$10^{12}M_{\odot}$	50	0(?)	14

利用宇宙的平均光度密度,可以把某一尺度的质光比 M/L 外推,得出宇宙总密度 Ω 的估计值。质光比越大,外推出的 Ω 值越大。但即使用富星系团的质光比,也只能推得 $\Omega \lesssim 0.6$ 。若接受偏袒性的观念,认为在几乎没有星系的空洞内也有几乎同样的暗物质和重子物质密度,那么,宇宙密度会高达 $\Omega = 1$ 就是可以理解的了。

White 等^{[10],[11]}指出,如果假定冷暗物质中扰动分布的随机性,星系形成的偏袒性可能是自然的。

扰动的随机性意味着初始扰动谱给出的相对振幅只是高斯分布的可几值。同一尺度的扰动在不同地点可以有很不相同的振幅,同样,同一地点不同尺度扰动的振幅也可以各不相同。

注意到,大尺度扰动的坍缩会抹掉叠加在它上面的小尺度扰动。这是不同尺度扰动之间的一种非线性相互作用。由于这种作用,在小尺度扰动中,只有那些扰动量较大、相应地坍缩较早的才能形成星系。或者说,星系只能在扰动量大于某阈值的地方形成,而这阈值会是可几值的若干倍。考虑到这个因素,星系形成的偏袒性就是自然的了:空间大尺度范围密度偏高的地区内,小尺度扰动量易于超过阈值,从而星系形成的几率大。密度偏低的地区内,难以出现扰动量超过阈值的小尺度扰动,从而星系就难以形成。

二、星系形成的 N 体模拟

要跟踪非线性演化过程,目前唯一的途径是通过数值模拟,也就是 N 体模拟。虽则,由于冷暗物质模型有一个形状确定的连续的初始扰动谱,只有少数几个自由参量需要确定,质点间的相互作用也只需要考虑引力作用,这使模拟较易进行。可是,有两个因素使得在对模拟结果作出解释时要特别小心。其一是,目前的 N 体模拟只能计算 $O(10^5)$ 个质点的系统,不可能直接模拟整个宇宙,只能在加上适当的边条件后模拟有限的尺度范围,也正由于这个限制,星系和星系团的形成需要分段模拟;其二是,观测得到的是星系的分布,而数值模拟给出的是冷暗物质演化的结果,是我们设想的存在于星系外面的晕的分布,星系在晕中处于什么位置,它将如何演化,这牵涉到目前还相当不清楚的重子物质与暗物质的分离过程。

1. 小尺度结构的演化

Davis 等人^[9]首先研究了共动尺度为 $10h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 范围内的演化,每个质点代表 ~

$10^6 M_{\odot}$ 的质量, 质点的初始分布以初始扰动谱为依据, 解牛顿方程采用 P³M 方法, 即用 Fourier 变换方法计算与远距离质点的相互作用, 而直接用牛顿引力计算与临近质点的相互作用。

由于初条件的设置, 模拟过程开始时质量分布图上存在着某种图案。随着红移变小, 逐渐在某些区域出现非线性密度扰动区, 它们在自引力作用下开始坍缩。以后, 结构逐渐增多, 引力坍缩和维里化的团块逐渐出现。一些小的团块还会互相合并而形成大的团块。适当调整初始扰动幅度, 可以使相应于星系的团块在适当的时候形成。

与观测相比较, 必须选择适当的方式。

设想一个星系盘处于冷暗物质晕中。它的旋转速度随半径的分布, 即旋转曲线的形状和幅度将由冷暗物质晕的势阱所决定。因此, 如果从模拟得到的、一些与星系相应的团块中质点的分布状况, 推算出该团块的势阱, 并画出它所决定的旋转曲线, 就可能与观测星系的旋转曲线相比较。

由十个最大团块得到的模拟曲线, 其尺度范围可由 $\sim 200 \text{kpc}$ 延伸到 20kpc , 更小的尺度无法计算。可是观测曲线的尺度范围却只有 2kpc 至 20kpc 。因此, 虽然模拟曲线大都是由 20kpc 平直地延伸至 $\sim 200 \text{kpc}$, 与观测曲线在 20kpc 处保持平直没有下降趋势的事实不相矛盾, 但是它们并没有重叠区, 实际上不能直接比较。目前只能说, 两者的幅度是相当的, 旋转速度都是每秒约为二、三百公里。

与此相关地, 还可以比较旋转速度大于某个 V_c 值的星系数密度 $N(>V_c)$ 。通过观测, 可以得到星系的光度函数, 即光度大于某个 L 值的星系数密度 $N(>L)$ 。由于星系的光度和星系的旋转速度之间又存在着确定的统计相关, 这样, 从观测得到的 $N(>L)$ 可以推出 $N(>V_c)$ 。对于椭圆星系和旋涡星系所得结果是不同的。现在可以计算由模拟得到的 10 Mpc 范围内旋转速度大于某个 V_c 值的团块数目 $N'(>V_c)$ 。比较 $N(>V_c)$ 与 $N'(>V_c)$, 模拟结果大致处于椭圆星系和旋涡星系的观测结果之间, 因而可以认为大致与观测相符。

2. 星系偏袒形成的高峰模型

第一节中指出, 冷暗物质中大小尺度扰动间的非线性相互作用可以自然地导致星系的有偏袒形成。这就是说, 如果能把模拟尺度和质点数都相应增加若干量级, 我们或许能自然地模拟图上看到星系分布的偏袒性。可惜, 这在目前的技术上是做不到的。因此在作更大尺度的星系形成和分布的模拟时, 人们必须输入星系偏袒地形成的讯息。

输入偏袒的原理如下。取定星系有偏袒地形成的阈值 ν , 即星系只在 $\frac{\delta\rho}{\rho} \geq \nu\sigma$ 的峰值处

形成, 其中 σ 是随机扰动场的可几振幅。设置一个宽度为 ω 的低通滤波器, 让它把 ω 内低于阈值的小尺度扰动平滑掉。如果取 ω 为富星系团的尺度, 那么 ω 尺度上正密度扰动区域中星系尺度的扰动幅度易于超过 $\nu\sigma$, 从而形成较多的星系而构成星系团。在 ω 尺度上的负密度扰动区中星系将难以形成。这就是星系偏袒地形成的高峰模型。

3. 星系的大尺度分布

White 等人^[10]采用 10 Mpc 尺度上与观测能相符的参数, 研究了大于 10 Mpc 尺度上星系分布的特征。他们侧重研究了富星系团的丰度和性质, 以及星系大尺度分布的拓扑结构。

数值模拟取了两个共动尺度, 即 280 Mpc 和 360 Mpc 。对较小尺度用 32768 个质点, 作

25次模拟,以期望取得星系团相关性质的较好的统计结果,对较大尺度用 216000 个质点,作了一次模拟。取较多的质点是为了有足够高的取样频率,以获得一个好的限制星等的模拟星系表。这样可以与观测的星系表作一系列的比较。为与10Mpc尺度的模拟相衔接,他们用了Bandeem等人[6]关于高斯随机场的峰点(即超过阈值 $\nu\sigma$ 的高峰)数目的统计结果来估算星系的数目。模拟结果与下述观测结果相符:

- (1)丰度为 0 级以上的Abell星系团的密度;
- (2)星系团的质光比;
- (3)超星系团的尺度;
- (4)空洞的大小;

(5)模拟星系表在二维劈形图上的投影,在天球上二维投影均与观测星系表相当。能同样看到长的弯曲蜿蜒的纤维状结构。

在星系团之间的相关尺度上,模拟结果明显显出小于Abell星系团的统计结果。

冷暗物质模型在星系的大尺度分布上得到好的模拟结果并不偶然。如本文第一部份第五节所述,冷暗物质与热暗物质模型在大尺度上的初始扰动谱的谱指数都是 $n=1$, 但冷暗物质模型却没有热暗物质模型的困难。

在热暗物质模型中为了得到与观测相符的相关函数,必须令薄饼在 $Z < 2$ 时形成,从而造成了较小尺度形成过晚的困难。在冷暗物质模型中星系和星系团的形成早于超团,这不但避免了热模型中的时间困难,而且使超团坍塌时耗散较少,其厚度会大于热模型的结果,结构也会更有变化。因此,冷模型或许比热模型更与观测接近。

早期研究曾断言,对大尺度分布的渗透分析表明有利于热暗物质模型。近来把这方法用于CfA星系巡天资料,发现结果对样品的深度非常敏感[12]。而且,在正确处理小尺度与大尺度的引力作用后,模拟结果表明,冷暗物质模型与热暗物质模型具有相同的渗透性质[13]。

看来,冷暗物质模型在大尺度上是较成功的。星系团的关联长度过小是一个值得关注的问题,但目前这方面的观测样品太少,统计可靠性不足。

4. 星系的合并

White[11]近来指出,冷暗物质模型目前有两大难题。一是模拟不能产生星系团。模拟中发生的是小的团块通过合并而形成非常大的团块,它从来不能形成一个星系的群或团。二是关于星系晕的尺度。前已提到,星系外的冷暗物质晕一直延伸至 200kpc。这样巨大的晕易于合并,这是一个令人担心的问题。恰当地分析处理这两个问题可能是进一步研究中较为重要的方面。

这两个模拟结果难以直接与观测相比,因为暗物质的合并并不就是观测现象中的星系合并。后者是处于暗物质晕中的重子物质的合并。所以,在弄清重子物质与暗物质的分离和相互影响前,很难讲这种暗物质晕的合并是否能与观测相洽。

事实上,自从Toomre和Toomre[14]的早期研究发表以来,星系间因相互作用而合并的问题一直引起人们很大的关注。仅从银河系附近亮星系的观测中,已能找到很多星系互相靠近而产生强烈影响的事例。人们看到了各种尾、桥和环等奇异的形态。Toomre和Too-

me的理论研究用星系间的相互作用来说明这些形态产生的原因。这些形态的寿命是短暂的,所以它的频繁出现表明星系演化过程中碰撞的发生是频繁的。现在在邻近星系中也发现了一些刚刚合并的星系的样例。

大的椭圆星系中心密度很高,旋转很慢。Efstathiou等人^[15]曾指出,假定它们由星系汇合而成,是这一特性的最容易的解释。

富星系团中心往往存在超巨椭圆星系。值得注意的是,各富星系团中星系数目不同,而其中的超巨椭圆星系的亮度却大体相同。这些超巨星系还都具有一些与一般椭圆星系不同的特征,如直径更大,恒星包层更扩展,光度径向分布比 $1/4$ 律慢等。它们使人们相信,超巨椭圆星系是多次星系合并的产物。

星系相互作用以至合并的研究,对了解星系演化的重要意义在于:已有多种迹象表明,星系间的引力作用能以某种方式激发星系核的活动性。已有不少工作提到局域环境对Seyfert星系和低红移类星体的重要性。最近,Heckman等人^[16]通过对大红移射电星系的光学射电观测证明,射电星系中有较大的百分比具有尾、桥、环、扇和尘埃等特殊光学形态。它暗示了远的射电星系可能是星系合并的产物。由于活动星系有明显的宇宙学演化,如果上述断言得到证实,则可能表明,红移较大的地方星系汇合的几率更大。

三、重子物质与暗物质的分离

在重子物质与暗物质分离而形成自引力系统的过程中,各种耗散机制起着非常重要的作用。由于这些耗散过程都比较复杂,人们虽意识到它的重要性,但对它们的研究仍处于初级阶段。

冷暗物质的 N 体模拟所研究的仅是在引力作用下冷暗物质的演化。它不能回答处于冷暗物质晕中的重子物质如何通过耗散过程形成束缚系统的问题。本节我们将就几个与重子物质形成星系过程有关的问题作一简单讨论。

1. 辐射耗散与星系的质量范围

维里温度高于 10^4K 的氢氦气体云处于等离子状态,它的辐射机制主要来自自由-束缚和自由-自由跃迁。辐射冷却率可表为

$$\Lambda = A_{bf}T^{-1/2} + A_{ff}T^{1/2}$$

其中 A_{bf} 和 A_{ff} 分别是与自由-束缚和自由-自由辐射相应的系数。由此算出冷却时标

$$t_c = \frac{3}{2} kT (\Lambda n)^{-1} \propto \begin{cases} T^{3/2} n^{-1} & T < 10^4 \text{K} \\ T^{1/2} n^{-1} & T > 10^4 \text{K} \end{cases}$$

而动力学时标 t_d 正比于 $n^{-1/2}$ 。由 $t_c/t_d < 1$, 得出

$$\frac{R_f}{100 \text{kpc}} < 1 \quad T > 10^4 \text{K}$$

$$\frac{M_f}{10^{12} M_\odot} < 1 \quad T < 10^4 \text{K}$$

其中 R_J 和 M_J 分别是 Jeans 半径和 Jeans 质量。它表明高温云坍缩至 50kpc 以下或低温云质量在 $10^{12}M_\odot$ 以下,其冷却时标都小于动力学时标。

由于原初云是在复合后开始坍缩的,它的起始温度低于 10^4K 。要使 50kpc 的云有高于 10^6K 的温度,云的初始半径须大于 500kpc (绝热坍缩时 $T \propto \rho^{2/3}$)。所以看来 $10^{12}M_\odot$ 的质量上限更有实际意义。星系的质量上限 $10^{12}M_\odot$ 正是反映了必须能及时冷却的要求。而星系的质量下限 10^8M_\odot 则来自自氢必须能电离的要求。

对于 $M_J < M < 10^8M_\odot$ 的低质量云,维里温度不能使氢电离。因此主要冷却机制来自分子。 $t_c/t_d < 1$ 的要求表明

$$M_0 > 4.1 \times 10^6 (\Omega h^2)^{-0.017} \left(\frac{Y_e}{10^{-4}}\right)^{-0.025} \left(\frac{\Omega_B}{0.1\Omega}\right)^{-1.04} \left(\frac{1+Z_m}{10}\right)^{-2.76} M_\odot$$

其中 Z_m 是膨胀到极大时的红移量, Y_e 为自由电子的丰度。由于小质量云的逃逸速度小,坍缩中的超新星爆发等反馈机制,将导致形成低密度、低金属丰度的矮星系系统,而不是形成密集的球状星团[17],[18]。

2. 星系形成中耗散过程的影响

原星云内弥散速度是相当高的,因此云内碎块的运动会在气体中产生激波并加热气体。被加热的物质云能否有效地冷却,取决于云的面密度。有效冷却的临界面密度为

$$\Sigma_{crit} = n v_{sh} t_c(T_{sh})$$

其中 T_{sh} 是激波加热后的气体温度,它由激波速度 v_{sh} 决定; $t_c(T_{sh})$ 表示温度为 T_{sh} 的气体的平均冷却时间,它与气体密度 n 成反比。由此得知临界面密度只与激波速度,即系统的弥散速度 σ 有关。在元素丰度已知的情况下,可算出各种 σ 相应的 Σ_{crit} ,等价地在 $n-T$ 图上画出冷却曲线如图 1 所示[19]。图中同时给出了各类星系、星系群或团在 $n-T$ 图上的观测位置。

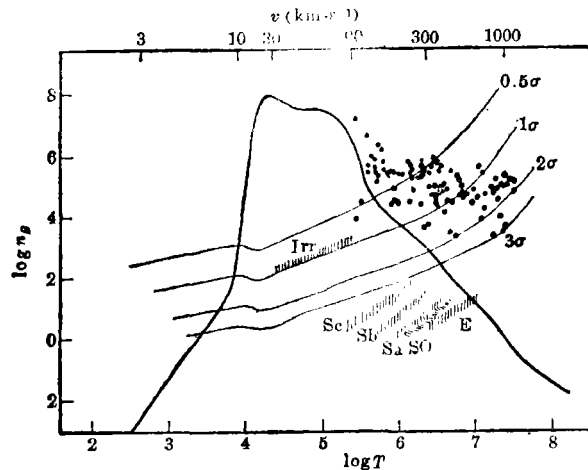


图 1. 物质云的冷却曲线。横轴为维里温度(或维里速度),纵轴为重子物质密度。图中圆点标记了星系群和星系团,小直线标记了各类星系所处的位置。

从图上看,星系形态明显地与它在 $n-T$ 图上的位置有关,且全部处于冷却曲线之下。星系群或团则在冷却曲线之上。这表明了耗散过程在星系演化中起着关键的作用。

图上画出的 $\nu\sigma$ 曲线是由初始扰动谱算出的球对称系统在冷却前的理论位置, ν 为偏袒阈值。各类星系与理论曲线的偏离部份地来自偏袒因子的不同,但可能更主要地来自可见物质坍塌的耗散性。这个因素会使它在图上的位置下移,从而显出耗散坍塌对星系演化的影响。

3. 重子物质分离过程与星系的形态和性质

虽然在重子物质与暗物质分离的过程中,耗散过程起着重要作用,但分离的具体过程可能具有较为复杂的性质。这可能是决定星系形态的关键。

如果由于诸如局域密度等原因,某些重子物质能以较高的效率形成恒星,从而迅速消耗掉重子气体,那么在大量恒星构成的系统的后继演化中,耗散过程将可以忽略。这种球状系统的无耗散坍塌与冷暗物质的维里化过程是一样的。

早期的数值模拟中引入过剧烈弛豫的概念。它成功地说明了所有球状系统会具有类似的 de-Vaucouleurs $s_{1/4}$ 光度分布律

$$I(r) = I_e \exp\left[-7.67 \left(\frac{r}{r_e}\right)^{1/4} - 1\right],$$

其中 r_e 是半光度尺度, I_e 为对应尺度处的辐射强度。

在这种坍塌过程中,邻近系统的潮汐作用会造成系统的缓慢旋转。模拟表明,无耗散坍塌中无量纲角动量参量 $\lambda = J|E|^{1/2}/GM^{5/2}$ 可达到 0.06 左右。这与 $M_B < -20$ 的椭圆星系的旋转特性基本一致。因此早期恒星的快速形成可能是椭圆星系形成过程的主要特征。

如果恒星形成较慢,则重子云演化中仍以气体为主。气体的辐射将一直是主要的能耗机制。这种能耗过程将使球形系统坍塌成盘状分布。与此同时,能耗使 $|E|$ 增大,从而导致无量纲角动量 λ 的增大。在冷暗物质晕和重子物质一起具有 $\lambda_i = 0.06$ 的情况下,随后的重子物质的耗散坍塌就能显著地增大它本身的 λ 。这样即使旋涡星系的快速旋转得一合理解释,并可作为冷暗物质存在的一个佐证。因此,早期恒星形成较慢可能是旋涡星系的主要演化特征。

上述讨论当然是对实际情况的一个过于简化的描述。最近 Silk 等人的工作^[20]提供了一个描述实际情况的复杂性的角度,他们说明恒星形成过程会以能动的方式给星系演化以强的反馈,它会自动调节恒星的形成速度,从而使 Hubble 分类中的不同星系在 $n-T$ 图上的分布得到某种解释。

近年来冷暗物质为主的演化模型取得了很大成功,人们用很少几个参量较好地说明了尺度相差很多量级的各种结构现象。与此同时,也还存在着一些或大或小的问题,有待进一步的理论和观测工作来澄清。而冷暗物质究竟是由什么构成的,这个问题也理应受到更多的关注。

虽然按照这个模型,重子物质仅占宇宙总物质的百分之十左右,但它却是观测宇宙学的主体。因而,重子物质与冷暗物质的分离过程和它们间的相互影响,将是重要的研究方面,这在目前还仅处于开始阶段。

总之,近年来的进展令人乐观,我们期待在不远的将来看到更大的进展。

参 考 文 献

- [1] Peebles, P. J. E., *Ap. J. Lett.*, **263** (1982), L1.
- [2] Primack, J. R. and Blumenthal, G. R., *Clusters and Groups of Galaxies*, ed. by Mardirossian et al., Reidel, Dordrecht, (1984).
- [3] Blumenthal, G. B., Faber, S. M., Primack, J. R. and Rees, M. J., *Nature*, **311** (1984), 517.
- [4] Kaiser, N., *Ap. J. Lett.*, **284** (1984), L9.
- [5] Schaeffer, R. and Silk, J., *Ap. J.*, **292** (1985), 319.
- [6] Bardeen, J. M., Bond, J. R., Kaiser, N. and Szalay, A. S., *Ap. J.*, **304** (1986), 15.
- [7] Rees, M. J., *MNRAS*, **213** (1985), 75.
- [8] Silk, J., *Ap. J.*, **297** (1985), 1.
- [9] Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S. and White, S. D. M., *Ap. J.*, **292** (1985), 371.
- [10] White, S. D. M., Frenk, C. S., Davis, M. and Efstathiou, G., *Ap. J.*, **313** (1987), 505.
- [11] White, S. D. M., in the Proceedings of 1987 Yellow Mountain Summer School on Physics and Astrophysics.
- [12] Barrow, J. D. and Bhavsar, S. P., *MNRAS*, **205**(1983), 66.
- [13] Dekel, A., West, M. J. and Aarseth, S. J., *Ap. J.*, **279** (1984), 1.
- [14] Toomre, A. and Toomre, J., *Ap. J.*, **178** (1972), 623.
- [15] Efstathiou, G. and Silk, J., *Fundamentals of Cosmic Physics*, Vol. 9 (1983), §8.
- [16] Heckman, T. M., Smith, E. P., Baum, S. A., van Breugel, W. J. M., Miley, G. K., Illingworth, G. D., Bothun, G. D. and Balick, B., *Ap. J.*, **311** (1986), 526.
- [17] Dekel, A. and Silk, J., *Ap. J.*, **303** (1986), 39.
- [18] 马骥, 俞允强, 陈时, 超新星爆发与原初云的质量流失, 将发表于“中国科学”(1988).
- [19] 此图摘取自文献[3]的图3.
- [20] Silk, J., *Ap. J.*, **297** (1985), 9.

(责任编辑 刘金铭)

Galaxy Formation and Cold Dark Matter Model

(II) Cold Dark Matter Model with Biased Galaxy Formation

Ma Er

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Yu Yunqiang

(Department of Physics, Beijing University)

Chen Shi

(Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica)

Abstract

This is Part II of the context. Firstly, the scenario of biased galaxy formation in cold dark matter model is described. Secondly, the comparison of N body simulation of cold dark matter with observations is discussed in some detail. Finally, some primary results about the separation of baryonic matter from dark matter are briefly reviewed.