

星系形成与宇宙大尺度结构

宋 国 玄

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

宇宙大尺度结构的形成与星系形成密切相关。前者的研究把星系基本上视为一质点,而星系形成研究涉及到其内部结构。宇宙大尺度结构形成有两种模式,由小到大与由大到小。这两种模式被交替使用(当然不是简单的重复)很重要的一个原因是星系形成研究的推动。

关键词 星系:形成 — 宇宙学:宇宙大尺度结构 — 宇宙学:暗物质

分类号: P159

1 引 言

宇宙结构在大于几十 Mpc 尺度上看来是均匀的,且在作哈勃膨胀。但在小尺度上,宇宙却有各种不同尺度的结构:星系、星系群和团、超星系团。对这些结构的形成可以有不同的解释,如引力形成、爆炸形成及宇宙弦等。一般广泛接受的宇宙结构的演化是由于引力的相互作用。

宇宙大尺度结构主要研究星系在空间的分布情况。在这一研究中一般不涉及星系的内部结构,也即原则上把星系视作一质点。宇宙大尺度结构形成一般有两种模式,由小到大与由大到小。这两种模式的被交替使用很重要的一个原因是星系形成研究的推动。最初接受的宇宙大尺度结构模式是由小到大的结构逐渐形成。由于椭圆星系的无自转或自转很小,使人们倾向于由大到小的结构演化模式。当采用热暗物质作为宇宙主要组成时,由这样理论所导得的星系形成时间太晚,与观测结果相左。由此又接受了由小到大的冷暗物质宇宙演化模式。但却在与几乎覆盖全天区的具有红移的星系样本结果比较时产生不一致的地方。宇宙大尺度结构理论模式的每一次改变都把人们的认识推进了一步。而许多观测结果可以作为对宇宙大尺度结构演化理论的约束。本文主要从星系的形成(包括形态、红移、相关系数等)来讨论它与宇宙大尺度结构演化理论的关系。

2 重子的等曲率扰动 — 宇宙结构形成由小到大

宇宙大尺度结构的研究主要讨论星系在空间的分布情形,这一研究随着对星系的观测技

术的提高而不断进步。

最初人们对星系的了解主要从其形态着手，将其大致分为三类：椭圆星系，盘状星系及不规则星系。由于当时观测到的星系有限，且距离也比较近，发现其空间的分布有一定的成团性。因此在讨论星系形成的过程中，主要讨论重子这一宇宙物质的演化，且初始扰动谱为纯等曲率扰动^[1]。由这样的初始扰动，宇宙大尺度结构的形成是由星团、星系、星系团这样一种由小到大的模式。星系在形成过程中，由于潮汐作用获得了角动量^[2]。而且最后形成的星系也是以团状的形式聚集在一起。

盘状星系的厚度与半径之比约为 0.01 左右。其形成主要是由于原星系在塌缩过程中具有强烈的耗散过程而使下落物质都聚集在一薄盘上^[3]。

对椭圆星系的观测发现，在天球投影时，椭圆星系的短半轴与长半轴之比不会小于 0.3。对椭圆星系的扁率最自然的解释是它由自转所决定。也即椭圆星系转动得越快，其扁率越小。但为什么没有扁率小于 0.3 的椭圆星系呢？利用马克劳林椭球体，即均匀不可压缩流体所组成的旋转椭球体模型可以定量地把椭球体的自转速度与其扁率的关系求出。发现这一旋转椭球体有一临界速度，当其自转速度超过这一临界速度时，就不再能维持其平衡状态^[4]。由此看来，椭圆星系形状的维持能得到合理的解释。

从盘状星系与椭圆星系的形成来看，宇宙大尺度结构的重子等曲率模式也被人们很好地接受。

3 椭圆星系疑难 — 宇宙结构形成由大到小

由马克劳林椭球体模型所导出的椭圆星系扁率与自转速度的理论关系长期未能用观测结果来检验，原因在于椭圆星系的自转速度当时尚不能从观测结果中得到。1975 年，Bertola 和 Capaccioli^[5]第一次由观测得到了椭圆星系的自转速度。自此以后，很快观测到了许多椭圆星系的自转速度。但是却发现在给定扁率的椭圆星系中由观测所得的自转速度要比由理论关系应具有自转速度要小得多^[6]。这样，就对椭圆星系的扁率是由自转所支持的理论提出了挑战。

新的椭圆星系形成理论是在 1976 年由 Binney^[7]提出的。这实际上是以以前几年的工作为基础的。由宇宙大尺度结构的形成理论已知，在绝热模式下，其首先形成的结构应该具有 $10^{15} M_{\odot}$ 左右，也即具有星系团的质量。而在 1970 年，Zeldovich^[8]就已指出，这种最先形成的具有星系团质量的结构必然是一个薄煎饼的形状。Binney 的新椭圆星系形成理论的要点是：椭圆星系是由“薄煎饼”碎裂形成的具有星系质量的初始结构，这一碎片更可能是具有三轴形式的椭球体。虽然“薄煎饼”是由原始物质经过塌缩而松弛形成的，它内部的速度弥散度是各向同性的。但这个碎裂的三轴椭球体在进一步松弛过程中，由于形状的三轴性导致速度弥散度的各向异性。正是由于这个各向异性的速度弥散度在松弛的后期支持形成了一个稳定的三轴体。这三轴体基本上没有自转，或只有很小的自转。以后进一步的研究又对椭圆星系的观测结果与椭圆星系形成的理论作了详尽的比较，取得比较一致的结果^[9]。

因为 Binney 的椭圆星系形成理论是建立在宇宙大尺度结构绝热模式基础上的，对宇宙中结构的演化解是：宇宙中第一批形成的结构是具有星系团质量的“薄煎饼”，它的碎裂形成了星系。这是与等温模式由小质量结构到大质量结构演化方式截然不同的另一种方式。

1981年发现的几十 Mpc 空洞^[10]即可解释为几个“薄煎饼”围成的区域,这进一步支持了宇宙大尺度结构的绝热模式。问题在于由于宇宙物质是纯重子,这一星系形成理论,要求有大的原始扰动谱,这又与微波背景辐射的各向异性限制不一致。

质光比随着尺度的增大而增大的观测事实,特别是旋涡星系自转曲线的平坦性,使人们理解到,宇宙中的可见物质只占到整个宇宙质量的极小部分,宇宙中更多的是不可见物质,即暗物质。而宇宙大尺度结构的演化主要应是一个引力过程,既然暗物质占了宇宙的质量的绝大部分,那么宇宙的演化主要是在暗物质的引力下进行的。

有质量的中微子是热暗物质的最好候选者。由有质量中微子物理可知,由于自由流动,它对首先形成的结构质量有一下限,这个下限在适当的中微子质量下正好是星系团的质量^[11]。由此从 80 年代中期起,许多研究者对此进行了数值模拟的工作。对有质量中微子这一类热暗物质,它的二点相关函数的斜率随着时间的增加而增加,因此可以用星系的观测结果来证认演化到现在的时刻。理论结果与当时的一些观测结果有一定程度的符合^[12]。

热暗物质模型存在的问题是:宇宙的演化若主要是热暗物质的演化,在这模型中首先形成的是在热暗物质势阱中的重子“薄煎饼”,而星系是由这“薄煎饼”碎裂所形成,因此星系的分布并不与热暗物质的分布完全一致。但与热暗物质模型结果相比较的是星系分布,这就存在一定的差距。更重要的问题是由哈勃常数的约束可以估计在热暗物质模型下星系形成的红移只能在 2~3 之间,而高红移类星体的发现显然与之相矛盾^[13]。同时 Binney 的椭圆星系形成理论是建立在“薄煎饼”碎裂基础上,在这样由大到小的宇宙大尺度结构演化模型中并未解决旋涡星系的形成问题。由于上面提到的困难,使人们还未充分讨论就必须把热暗物质模型抛弃。

4 冷暗物质模型 — 宇宙结构由小到大的再提出

由 $\Omega = 1$ 的冷暗物质组成的绝热初始扰动谱可以使所有尺度上的扰动都起作用。在此基础上提出的宇宙模型首先形成的是小尺度结构,然后由分级成团理论形成较大尺度的结构。这样又恢复到类似纯重子的等曲率模式的结果^[14,15]。但它们之间又有区别。纯重子的等曲率模式宇宙只能生成各种尺度的团结构,而冷暗物质模型是使结构由小到大生成,但最后的分布还具有像 CfA 星系红移巡天观测所得到的链状结构与空洞结构^[16,17]。

在用冷暗物质模型进行的研究中,当然需将其两点相关函数与星系的两点相关函数比较。结果指出,冷暗物质两点相关太弱,以致与星系分布的特征尺度 $5h^{-1}\text{Mpc}$ 相对应的星系形成时间太早。

线性偏袒系数的引入可以解决这一问题。在对冷暗物质进行的模拟中所得结果是暗物质的分布,而星系作为可见物质,并不是在所有暗物质聚集处所形成的势阱中塌缩形成。只有在暗物质初始扰动谱的振幅超过其方差的若干因子时,才会有星系形成。这一因子即为线性偏袒系数。线性偏袒系数的引入,使模拟结果能导得形成的星系分布。对在偏袒系数为 2.5 的情形下,星系分布的两点相关函数可与星系的观测结果相一致。这个系数的引入也说明星系的形成是与其环境密切相关的^[18,19]。把冷暗物质模型在引入偏袒系数下的结果与 CfA 的样本比较,发现这一宇宙大尺度结构的形成模式是可以接受的。

在宇宙大尺度结构的冷暗物质模型中,宇宙结构由小逐渐增大,这样形成的星系主要是

旋涡星系。它可由两次形成理论来解释^[20]。第一次是当结构逐渐增大到一定程度时会发生塌缩现象, 形成了盘状星系的晕。然后物质在晕的势阱中再次塌缩而形成盘。问题就在于由小到大的演化模型中椭圆星系如何形成呢? 在这模型中, “薄煎饼”碎裂形成椭圆星系的理论不再可用了。由星系团的观测发现, 在团中心区域主要是椭圆星系, 而旋涡星系主要在团的外部或是场星系。这样就导致了椭圆星系是由两个包括了盘、核球与晕的旋涡星系合并而形成的理论^[21]。模拟结果告诉我们, 从形态上该理论的确能形成三轴椭球体, 且这三轴椭球体在近中心部分自转是很慢的。这是由于两个原旋涡星系盘的角动量在合并过程中被转换到晕中去, 但是还有不少问题有待解决^[22]。首先, 核的作用对合并后形成的椭圆星系的质量分布是很关键的。那么旋涡星系中的核球又是如何形成的呢? 其次, 现在的星系仅包含少量的气体, 但看来更可能在较高的红移时, 它们是富含气体的。那么对在高红移时由合并这种恒星动力学的模拟看来不能可靠地解释其结构。这方面的研究还在继续。这一问题的解决对宇宙大尺度结构演化理论也是很重要的。

5 标准冷暗物质模型的失败

由冷暗物质模型得到的结果与 CfA 样本比较的成功似乎已经在一定程度上解决了宇宙大尺度结构的演化问题。但 CfA 的样本所包含的天区只是一个很小的楔区。若星系的观测样本能覆盖更大的天区, 那结果又会如何呢?

1991 年 Saunders^[23] 等人发表了几乎覆盖除了 $|b| < 10^\circ$ 外全天区的具有红移的星系样本。在以前未被很好巡天的天区内, 他们发现了许多新的超星系团和空洞。而均方根密度变化随平滑尺度的增加要比由冷暗物质模型理论所得到的结果要减少得慢。特别在取平滑尺度为 $20h^{-1}\text{Mpc}$ 时, 观测所得密度场的三阶矩依然存在, 而冷暗物质模型的密度场的三阶矩在这一平滑尺度下更接近于消失, 也即在这样的尺度下高斯密度扰动的假设不再是正确的了。从而宣布了冷暗物质模型的失败。

Frenk 和 Kaiser^[24] 指出, 以前在模拟中使用的冷暗物质模型更确切地说应该是标准冷暗物质模型。标准冷暗物质模型包括了四个要点:

- (1) 暗物质由弱相互作用“冷”的基本粒子所组成。
- (2) 宇宙均匀临界密度为 $\Omega = 1$, 宇宙学常数 $\Lambda = 0$ 。
- (3) 宇宙结构所起源的种子扰动是由早期宇宙暴涨理论所预言的。
- (4) 星系分布与物质分布间的关系由简单的统计模型相关联, 即由“线性偏袒模型”给出。

Saunders 等人^[23] 的结果只能说明, 标准冷暗物质模型在研究宇宙大尺度结构演化上是失败的, 但不能说冷暗物质模型是失败的。尝试修改上面任何一点, 可以导得不同的非标准冷暗物质模型。

当然, 为了能解释有更多的超星系团和空洞存在的观测事实, 在没有新的更好模型之前, 对模型最简单的选择是把热暗物质和冷暗物质都包括进去, 这样既可生成小尺度的结构, 又可生成大尺度的结构。

Jing 及其合作者^[25] 就采用 30% 热暗物质和 70% 冷暗物质的混合模型进行了研究。他的工作由于采用了大容量的计算机, 已经可以模拟旋涡星系的晕的形成。但不管怎样, 有了两

种暗物质就增加了参数，一方面在理论上不漂亮，另一方面又产生了这两种暗物质是如何分别产生的问题。

宇宙学常数 $\Lambda \neq 0$ 的宇宙模型也是对标准冷暗物质模型的改进。Gnedin^[26] 在 $\Lambda \neq 0$ 并包括冷暗物质的宇宙中研究气体的演化。在这一模型中，宇宙物质的密度参数 $\Omega_m = 0.4$ ，其中重子的密度参数 $\Omega_b = 0.036$ ，而由宇宙学参数所引起的密度参数 $\Omega_\Lambda = 0.6$ 。在这样的框架下研究星系如何由气体形成，发现在引力不稳定性时标及冷却时标都比塌缩时标更短的情况下，气体演化的局部几何形状既不是球形的也不是纤维状的，而更可能是薄饼状的。引力不稳定性时标较短时不可能冷却的气体却处于纤维状区域。这样的结果有可能协调椭圆星系和盘状星系的分别诞生及大尺度空洞的形成。

由以上可知，为了使宇宙密度参数 $\Omega = 1$ ，必须引进暗物质或宇宙学常数。而宇宙弦的引入可以放松对 $\Omega = 1$ 的要求。宇宙弦是在电磁-弱相互作用对称破缺尺度附近由相变形成的。Spergel 等人^[27] 指出，在宇宙弦为主的宇宙中，宇宙密度 Ω 为 $0.4 \sim 0.6$ 时，其结果可以与很多大尺度结构的观测结果相吻合，如微波背景辐射的各向异性，密度扰动的功率谱等。他们并且指出了将来的观测可以用来区分宇宙弦为主的宇宙与其它组成宇宙的可能。

其他的出路是从更多的观测结果来研究大尺度结构的分布。如用 IRAS 红外观测结果^[28] 或高红移的星系^[29] 来研究宇宙大尺度结构的分布，或者进行一定的理论研究，构造新的扰动谱^[30]。看来一个好的理论研究必须基于后者的突破。

6 结 语

从上面的分析可知，宇宙大尺度结构演化的确与星系的形成密切相关，它们之间是相辅相成的。因此对星系形成和宇宙大尺度演化的深入理解至关重要，可将我们对宇宙论的有关认识提高到一个新的水平。

参 考 文 献

- 1 Padmanabhan T. Structure Formation in the universe, Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 148
- 2 Barnes J, Efstathiou G. Ap. J., 1987, 319: 575
- 3 Gott R J III, Thuan T X. Ap. J., 1975, 204: 649
- 4 戴文赛. 太阳系演化学 (上册). 上海科学技术出版社, 1979. 81
- 5 Bertola F, Capaccioli M. Ap. J., 1975, 200: 439
- 6 Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics, Princeton: Princeton University Press, 1987. 218
- 7 Binney J. M.N.R.A.S., 1976, 177: 19
- 8 Zeldovich Ya B. Astron. Astrophys., 1970, 5: 84
- 9 Wilkinson A, James R. M.N.R.A.S., 1982, 199: 171
- 10 Kirshner R P, Oemler A Jr, Sheckman S A. Ap. J., 1981, 248: 57
- 11 Bond J R, Efstathiou G, Silk J. Phys. Rev. Lett., 1980, 45: 1980
- 12 Frenk C, White S D M, Davis M. Ap. J., 1983, 271: 417
- 13 White S D M, Frenk C, Davis M. Ap. J., 1983, 274: L1
- 14 Blumontal G R, Primack J R. In Welden H A, Langacko P, Steinhardt P J eds. Fourth Workshop on Grand unification, Philadelphia, 1983, Boston: Birkhause, 1983, 256
- 15 Bond J R, Efstathiou G. Ap. J., 1984, 285: L45
- 16 de Lapparont V et al. Ap. J., 1986, 302: L1

- 17 White S D M, Frenk C, Davis M *et al.* *Ap. J.*, 1987, 313: 505
- 18 Schaffer R, Silk J. *Ap. J.*, 1985, 292: 319
- 19 Davis M, Efstathiou G, Frenk C *et al.* *Ap. J.*, 1985, 292: 371
- 20 White S D M, Rees M J. *M.N.R.A.S.*, 1978, 183: 341
- 21 Hernquist L. *Ap. J.*, 1992, 400: 462
- 22 Hernquist L. *Ap. J.*, 1993, 409: 548
- 23 Saunders W *et al.* *Nature*, 1991, 349: 32
- 24 Frenk C, Kaiser N. *Nature*, 1991, 351: 22
- 25 Jing Y.P, Fang L Z. *Ap. J.*, 1994, 432: 438
- 26 Gnedin N Y. *Ap. J.*, 1996, 456: 1
- 27 Spergel D, Pen Ue-Li. *Ap. J.*, 1997, 491: L67
- 28 Protogeros Z A M, Weinberg D H. *Ap. J.*, 1997, 489: 457
- 29 Steidel *et al.* *Ap. J.*, 1998, 492: 428
- 30 Kashlinsky A. *Ap. J.*, 1997, 492: 1

Formation of Galaxies and Large Scale Structures in the Universe

Song Guoxuan

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

The formation of the large-scale structures in the universe is closely related to that of individual galaxies. Galaxies are essentially assumed to be a point mass in the study of the former part and it is dealt with the internal structure in the latter study. There are two modes for the evolution of the large-scale structures in the universe: small to large and large to small cosmogonies, which would be alternately, but progressively, adopted. Every turn in the cosmogony adopted has been motivated by the study of galaxy formation.

Key words galaxies: formation—cosmogony: large scale structure of universe—cosmology: dark matter