第 18 卷 第 1 期
2000 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol.18, No.1
Mar., 2000

研究简讯

星系形成与演化半解析理论研究的新进展

赵 东 海
(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

发展了的星系形成和演化的半解析理论，可以很好地再现不同红移时宇宙恒星形成率密度 (SFR) 和中性气体共动密度的最新观测结果。对该理论各个不确定性因素对结果的影响作了详尽的讨论，并指出在中等红移星系间的相互作用可能是主宰恒星形成的决定性因素。根据宇宙学模型对观测和半解析理论的影响，对宇宙学参数作出限制。

关 键 词 星系：形成 — 星系：演化 — 恒星：形成

分 类 号： P157.9

目前一再被提及的一大主题，实际上也是星系形成和演化研究中的一个相当重要的问题，就是现存的星系形成和演化的理论框架能否很好地再现观测到的宇宙恒星形成历史。最近几年，综合哈勃空间望远镜的深场成像、大型地面望远镜 (如 Keck) 的光谱分析、亚毫米波的 SCUBA 观测以及载于 COBE 上的 DIRBE 和 FIRAS 所进行的远红外 / 亚毫米波探测使得对高红移星系进行大样本巡天成为可能。Madau 等人 [1] 基于哈勃深场观测由 UV 光度密度导得红移 z 约为 $3 \sim 4$ 的宇宙整体恒星形成率密度，再结合中低红移的结果 [2,3]，得到宇宙恒星的形成历史：宇宙的恒星形成率密度随着红移从 $z=0$ 到 1.5(因宇宙学模型而异) 单调上升，达到峰值之后快速回落，暗示宇宙的黑暗年代到 $z \approx 4$ 时结束。Somerville[4] 则给出了相应的理论结果 (参见图 1)。但是哈勃空间望远镜的视场非常小，其星系计数具有很大的不确定性，有可能导致低估了具有较高成团性 [5~7] 的 Lyman break 星系的数密度。根据对高红移亮星系的地面观测 (视场约为哈勃望远镜的 160 倍) 以及哈勃深场观测，Steidel 等人 [8] 最近认为在中高红移 ($z > 1.5$) 时宇宙恒星形成率密度应远高于文献 [1] 的结果，也就是说，其值随着红移从 $z=0$ 到 1.5 单调上升，而后直至 $z \approx 5$ 还是基本上保持恒定而不减少。人们力求从理论上再现这个最新的观测结果，并据此对星系形成和演化的理论以及宇宙学模型作出限制。

虽然关于结构形成的纯解析理论取得了很大进展，但因为理论仅适用于暗物质而观测却侧重于重子成分 (恒星与气体)，其与观测的联系是十分薄弱的，另一方面，N 体数值模拟在再现星系观测特征方面仍存在着困难 [4]。很明显，为了在冷暗物质框架下很好地拟合真实的星系，肯定还需引入一些物理过程，其中很多过程 (如气体冷却、恒星形成、超新星反馈和星系 - 星系相互作用等) 可能形成了一个复杂的反应链 / 环。要在大尺度数值模拟要求的动力学范围内纳入这些物理过程，计算上是很

1999-10-14 收到

难的，况且我们现在对这些过程的细节还不甚了解。

White 和 Frenk[9] 、Somerville[4] 提出并发展了星系形成与演化的半解析理论。该理论假设了类冷暗物质初始密度扰动谱并认为扰动由于引力不稳定性将会增长、坍缩，提出了对气体冷却、恒星形成、超新星反馈和星系并合简单而又符合物理本质的一整套处理方法。它可以较好地再现各个红移时期星系的恒星形成率密度、星系光度函数、以及星系光度、旋转速度、金属丰度和形态的相互关系，其运算无需花费太多的机时。因此，半解析方法是探测恒星形成、超新星反馈、初始质量函数、化学增丰和尘埃消光等过程的巨大参数空间的有效途径。这不仅仅是一个计算效率问题：半解析方法给出的宏观图像将我们的理解提高到一个新水准，而这是 N 体数值模拟或平滑质点流体力学模拟可能永远无法达到的 —— 即使我们有无穷大无穷快的计算机。

White 和 Frenk[9] 利用 Press-Schechter 理论来确定已坍缩暗晕的共动数密度，并假设星系由气体在暗晕提供的引力势阱中冷却、碎裂而成；考虑到暗晕的密度分布和冷流进而发展了对气体冷却和恒星形成的处理方法；引入超新星反馈和化学增丰过程以描述超新星爆发对暗晕中气体的影响，进而给出了不同红移时的宇宙恒星形成率密度。但是文献 [9] 中的宇宙起源学基础 —— 标准冷暗物质模型现在面临着多方面的危机，最大的挑战来自于大尺度结构的巡天结果，这些观测要求大尺度上的物质密度扰动应更强；另外其在 $8h^{-1}$Mpc 处 ($H_0 = 100h\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{Mpc}^{-1}$) 的物质密度扰动幅度与 COBE 卫星对宇宙微波背景辐射各向异性的观测结果相比整整差了一倍 [4,7] 。文献 [9] 中的最佳拟合所需要的重子物质比早期核合成理论预言的高得多。因此新的观测结果和文献 [9] 的模型的局限性均要求对现有半解析理论作出改进。笔者将 White 和 Frenk[9] 的基础性工作推广到任意宇宙，并根据 Kauffmann[10] 和 Kennicutt[11] 的工作另外引入一个 Toomre 气体盘，进而对宇宙恒星形成率密度和中性气体共动密度进行估算。具体从事了以下的一些研究：

(1) 运用近年来各种观测所倾向的宇宙演化学参数研究了恒星形成率密度。

Press-Schechter 理论认为在冷暗物质 (CDM) 宇宙中，暗物质的演化取决于背景宇宙的参数和初始密度扰动功率谱。通过计算可以发现，各红移时宇宙中自引力束缚体 —— 暗晕的共动密度对这些参数的选取很敏感。我们在研究恒星形成率密度时运用了近年来各种观测所倾向的宇宙演化学参数：物质密度参量 $\Omega_0 = 0.4$ ，真空能密度参量 $\Omega_\Lambda = 0.6$ ， $h = 0.7$ 和重子密度 $\Omega_\mathrm{b} = 0.019h^{-2}$[12] 的 ΛCDM 宇宙学模型，并选取谱指数为 1 ，形状因子 $\Gamma = 0.2$[5,13,14] 和 $8h^{-1}$Mpc 处扰动幅度 $\sigma_8 = (0.53 \pm 0.05)\Omega_0^{-0.53}$ 的物质密度扰动谱。

该工作沿用文献 [9] 对气体内落和冷却的处理方法，认为在暗晕内冷却时标约等于当时宇宙年龄的气体能够冷却并沉降到暗晕中心，暗晕中心冷气体的补给将受到冷却的限制；但如果暗晕边缘的冷却时标还小于当时的宇宙年龄，则暗晕中心冷气体的补给将受到吸积 (内落) 的限制。依旧假设暗晕坍缩时其密度为宇宙当时临界密度 $\rho_\mathrm{c}(z) \equiv 3H^2(z)/[8\pi G]$ 的 200 倍，暗晕具有 $\rho(r) = V_\mathrm{c}^2/[4\pi G r^2]$ 的等温密度分布形式 (这里 V_c 为圆周速度，与半径 r 无关) ，认为圆周速度在 $50 \sim 400\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ 之间的暗晕才具有有效的气体冷却机制。但宇宙学模型的变化会极大地影响宇宙年龄和哈勃常数，进而会影响到暗晕的密度分布以及冷却时标，最终改变暗晕中心气体的补给方式。

文献 [9] 认为由于大质量恒星很快将会死亡产生超新星爆发，其抛出物的巨大动能部分将转变为热能，阻止一部分气体的冷却，因此可冷却的气体并不都能形成恒星，恒星形成与超新星爆发构成了一个自调节的过程，恒星的形成率密度取决于超新星能量被气体吸收的效率 (超新星反馈效率 ε) 。笔者的研究中引用了文献 [4] 得到的更为可靠的超新星反馈效率 ε ，由冷气体的补给率导得暗晕中恒星的形成率密度。

综合考虑各时刻暗晕共动密度与单个暗晕的恒星形成率密度，得到了与最新观测符合得很好的结果 (见图 1 中实线)。其中假设气体金属丰度为 $0.1Z_{\odot}$(Damped Lyα 吸收系统的典型金属丰度)，且未考虑星系并合对整体恒星形成率密度的影响 (参见文献 [10])。

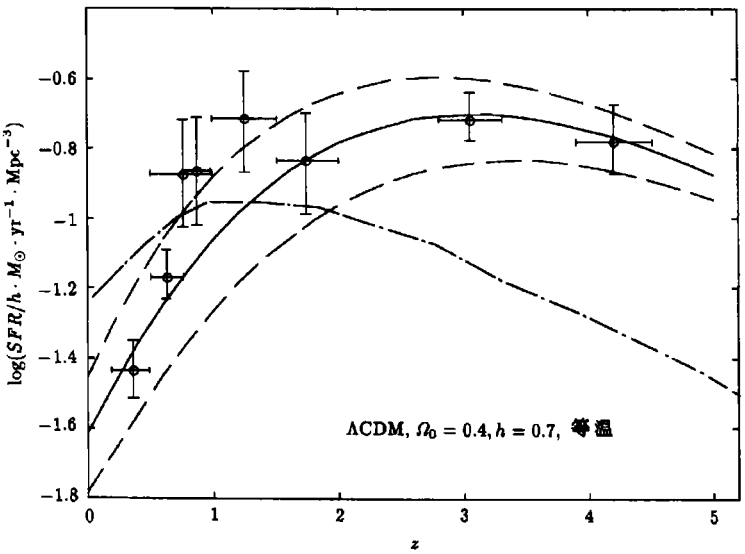

图 1　综合考虑各参数不确定性时 ΛCDM 宇宙的恒星形成历史

$\Omega_0 = 0.4, \Omega_\Lambda = 0.6, h = 0.7, \sigma_8 = 0.86$ 且 $\Gamma = 0.20$，其中具有误差棒的圆圈是引自文献 [8] 的观测值，已考虑到宇宙学效应并作了转换。实线为模型值，上下虚线间的范围代表了其不确定性，而点划线为文献 [4] 的相应结果

(2) 估算不同红移时宇宙冷气体的共动密度。

根据文献 [10] 和 [11] 的工作，能够冷却的气体在暗晕中心将会形成一个旋转支撑的 Toomre 气体盘，出于对气体沉降时角动量守恒的考虑，其半径应满足 $r_{\rm disk}/r_{\rm vir} = 2\lambda_{\rm H}$($\lambda_{\rm H}$ 为暗晕旋转因子)。笔者的研究中进而引入 Toomre 气体盘，并联系暗晕密度丰度，给出了宇宙冷气体的共动密度的演化，这很好地再现了由观测到的 Damped Lyα 系统中性氢柱密度导得的相应结果。

(3) 详细讨论了决定暗晕中星系形成的各个物理过程及其不确定性对结果的影响。

根据对各参数的分析，可知暗晕的圆周速度范围、旋转因子 $\lambda_{\rm H}$ 和气体盘尺度等的不确定性对模型预言的恒星形成历史不会有显著影响。但是，超新星反馈效率 ε、气体金属丰度以及暗晕密度分布 (尤其是在低红移) 的不确定性应该被重点考虑。综合对各参数的分析，可以由目前的星系形成和演化的模型得到宇宙恒星形成历史的可信范围 (见图 1 虚线所示)。可以发现，目前对宇宙恒星形成率密度的最新观测并不构成对半解析星系形成和演化模型的挑战。

在高红移 $z \geq 1.5$ 和低红移 $z \leq 0.5$ 时我们的模型结果能与观测结果很好地符合。但在中等红移 $0.5 < z < 1.5$ 时，模型值低于观测值，这很可能是因为我们的模型没有考虑星系间的相互作用对宇宙恒星形成率密度的贡献，进而暗示了在高红移和低红移时吸积是星系的主要物理过程，而星系间的并合所引起的更剧烈的恒星形成活动则主宰了中等红移的整体恒星形成，这一点也已为观测结果和数值模拟所证实。因为星系并合最重要的产物是早型星系 (E/S0)，我们的结果也暗示了大多数早型星系形成于这些红移，年龄大约为 8Gyr(随宇宙模型而异)，这也为对颜色的分析所支持 [15]。

(4) 尝试对宇宙学参数作出限制。

为了找到模型可以和 SFR 的观测很好符合的 Ω_0 、 h 和 Γ 三维参数空间的范围，通过选取大量不同的参数组合重复运算，发现在 $\Gamma \approx \Omega_0 h$ 时，模型可较好地再现 SFR 的最新观测。但若具体到现在的观测结果 (高红移和低红移的观测均倾向于 $\Gamma \approx 0.2$) ，则模型要求：当 h 由 0.4 变为 0.9 时，ΛCDM 宇宙和 OCDM 宇宙 (开放冷暗物质宇宙) 的 Ω_0 分别由约 0.6 和约 0.7 降为 0.3 和 0.4(见图 2) 。这一点与其它方法得到的结果一致。

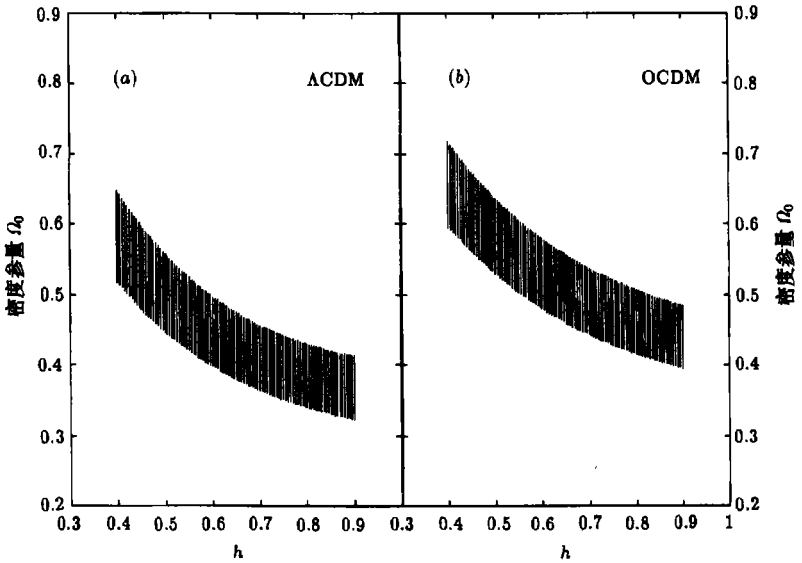

图 2 模型与 SFR 的观测在高红移较好符合时所要求的宇宙参数范围

这里 $\Gamma = 0.2$, 对于 ΛCDM 宇宙， $\sigma_8 = 0.53\Omega_0^{-0.53}$ ，而对于没有宇宙学常数的开放宇宙 (OCDM), $\sigma_8 = 0.53\Omega_0^{-0.45}$ 。观测结果的不确定性一并作了考虑

参 考 文 献

1 Madau P, Pozzetti L, Dickinson M E. Ap. J., 1998, 498: 106
2 Lilly S J, Le Fevre O, Hammer F *et al.* Ap. J., 1996, 460: L1
3 Connolly A J, Szalay A S, Dickinson M *et al.* Ap. J., 1997, 486: L11
4 Somerville R S. Ph.D. thesis, Santa Cruz: University of California , 1997
5 Steidel C C, Adelberger K L, Dickinson M *et al.* Ap. J., 1998, 492: 428
6 Adelberger K L, Steidel C C, Giavalisco M *et al.* Ap. J., 1998, 505: 18
7 Mo H J, Mao S, White S D M. M.N.R.A.S., 1998, 304: 175
8 Steidel C C, Adelberger K L, Giavalisco M *et al.* 1998, astro-ph/9811399
9 White S D M, Frenk C S. Ap. J., 1991, 379: 52
10 Kauffmann G. M.N.R.A.S., 1996, 281: 475
11 Kennicutt R C. Ap. J., 1989, 344: 685
12 Burles S, Tytler D. Ap. J., 1998, 507: 732
13 Efstathiou G, Bond J R, White S D M. M.N.R.A.S., 1992, 258: 1
14 Sutherland W, Tadros H, Efstathiou G *et al.* M.N.R.A.S., 1999, 308: 289
15 Neilson E H, Tsvetanov Jr Z I. 1999, astro-ph/9902164

Investigation in the Semi-Analytic Theory for Galaxy Formation and Evolution

Zhao Donghai

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

Abstract

In this paper the popular semi-analytic models for galaxy formation and evolution under the hierarchical scenario are discussed, based on the most recently observed cosmic star formation history. The standard treatment as well as individual departures are studied. The results can be described as follows. There seems to be no challenge to the present theories of galaxy formation and evolution. Departures of the density profile of halo, SN feedback process and metallicity are important in the modeled calculations; but those of the halo spin parameter, of the adopted range for the circular velocity and of the relation between disk size and its mother halo's virial and/or cooling radius, do not have significant influences. Merger between galaxies should be dominant and responsible to the deviation of the theoretical results from observed ones at intermediate redshift, which implies that most of spherical objects should form between redshift 0.5 and 1.5 with the age of some 8Gyr that is cosmology dependent. Furthermore, the predicted cosmic evolution of the cold gas component is fairly consistent with observations. Finally, the constraint of cosmological parameters are suggested, which is consistent with those obtained from other methods.

key words galaxies: formation—galaxies: evolution—star: formation