

文章编号: 1000-8349(2005)02-0135-09

星系形成的半解析模型研究进展

康 熙^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 基于目前流行的冷暗物质等级成团理论的星系形成的半解析模型取得了很大进展。在引入一系列合理的关于重子物质物理过程的假设, 如气体冷却、恒星形成率、超新星能量反馈以后, 结合 N 体数值模拟, 星系形成的半解析模型一方面能较成功地预言许多与观测符合的近邻星系的性质, 如光度函数、星系的两点相关函数、Tully-Fisher 关系、星系团中椭圆星系的颜色-星等关系等; 另一方面还能较成功地预言宇宙的恒星形成历史, 以及一部分高红移星系的性质, 如 Lyman-Break 星系的数目随红移的分布。但是最近一些观测表明, 半解析模型在高红移预言的大质量星系较少, 且红星系数目也较观测少。重点讨论半解析模型成功与不足之处, 并指出解决这些问题可能的途径。

关键词: 天体物理学; 半解析模型; 综述; 星系形成; 星系演化; 光度函数

中图分类号: P157.9 **文献标识码:** A

1 引 言

最近由 NASA 发射的威尔金斯微波各向异性探测器 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probes, WMAP^[1]) 给出的结果表明, 宇宙的结构是平坦的, 暗能量 (Ω_Λ) 主导着宇宙的膨胀和演化, 大部分非相对论性物质为冷暗物质 (CDM), 而且重子物质只占很少的一部分, 约为 CDM 的 15%。基于 WMAP 给出的宇宙学模型和初始扰动谱, CDM 模型能成功地解释宇宙中大尺度结构的形成和演化, 如微波背景辐射的分布、高红移星际介质分布、富星系团的数目、2 度视场星系红移巡天 (2dFGRS) 中星系的统计分布。在星系的观测研究方面, 低红移巡天如 2dFGRS、SDSS、2MASS 等计划提供了大量有关近邻星系的光度、形态、尺寸、颜色和位置等信息, 同时地面和空间望远镜观测技术进步也给出了大量高红移星系样本, 如 The Great Observatories Origins Deep Survey (GOODS)、Gemini Deep Deep Survey (GDDS)、K20 红移巡天。这些丰富的星系样本为定量研究 CDM 框架下星系形成与演化提供了有力的证据。

在 CDM 主导的宇宙中, 结构形成是一个等级成团的过程。宇宙早期的微小量子扰动在

收稿日期: 2004-11-30; **修回日期:** 2005-01-27; **特约稿**

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10125314、10373012、10203004)

宇宙暴胀过程中被放大, 并随后由于引力的不稳定性而引起增长。在 CDM 主导的情况下, 小的结构先进入非线性增长阶段并率先坍缩, 形成所谓的暗晕。更大尺度的暗晕随后由这些小暗晕相互并合而形成。目前流行的星系形成理论认为, 星系就是由在这些暗晕内的热气体经冷却后坍缩为恒星而形成的^[2]。结合 CDM 理论或者 N 体数值模拟, 并考虑更为细致的气体冷却、恒星形成和超新星能量反馈、星族合成过程的星系形成的半解析模型 (SAM) 在过去十几年里取得了非常大的进步^[3~7], 其预言的星系性质能在很大范围内与观测相符合。最近 Springel 等人^[8]、Kang 等人^[9]发现, 结合高精度的数值模拟, 在能分辨暗晕中次结构的情况下, SAM 预言的光度函数具有与观测较一致的形状, 并且星系团中央星系的光度、形态密度关系等也与观测更为接近。

然而 SAM 中对星系形成中重子过程的假设过于简化, 其一系列物理参数也不确定。如它不能解释所有观测性质, 不能同时符合光度函数和 Tully-Fisher 关系, 不能完全重现 SDSS 星系的颜色-星等双峰分布等。最近的一些高红移观测如 GOODS、GDDS、K20 发现, SAM 预言的亮星系和亚毫米波源在高红移处较少, 同时亮星系的颜色不够红^[10]。当然根据这些观测还不能肯定是 CDM 模型的不足, 因为人们对星系形成的物理过程还不够了解, 如高红移宇宙的预加热对气体冷却的影响^[11]、恒星形成率随红移的演化、恒星初始质量函数 (IMF) 随红移和环境的变化、超新星和活动星系核的能量反馈对星系中气体分布的影响。要解决这些问题还需要在理解观测的基础上不断完善星系形成模型。

2 半解析模型中的物理过程

星系形成中涉及的物理过程很多, 一般认为下列物理过程主导着星系的性质和演化: 暗晕的形成历史、气体经辐射冷却、恒星形成、超新星和活动星系核的能量反馈、恒星光度演化、金属丰度演化、尘埃的散射。

2.1 暗晕的形成历史

由于目前的宇宙学模型参数测量得比较准确, 暗晕在这些宇宙学框架下的形成研究相对来说比较简单。纯暗物质的数值模拟在过去很多年里取得了很大的进展, 其质量和力的分辨率都被大大提高^[12], 因此可以很容易得到暗晕的形成历史。从数值模拟中找出暗晕一般用所谓的找邻居方法 (Friend-Of-Friend), 这种方法可以将那些距离很近的粒子划分到同一个暗晕里面。研究表明, 这样找出来的暗晕质量函数与 CDM 理论预言符合得很好。根据数值模拟中关于暗晕成员的信息可以得到暗晕在任何相邻两步输出之间的并合情况, 从而得到暗晕的形成历史。早期的一些数值模拟, 由于分辨率较低, 暗晕并合后形成的结构比较平滑 (即由于数值效应使得小质量的暗晕进入大质量的暗晕后很快被潮汐力瓦解了), 这实际上与在星系团中观测到的星系数目众多不相符合, 即所谓的过度并合问题。后来的数值模拟发现, 在足够高的质量分辨率情况下, 小质量暗晕可以在大质量暗晕里存活较长时间, 并合后的暗晕并不是光滑的, 而是有不少次结构^[13,14,8]。Springel 等人^[8]给出了一个较好的寻找暗晕内次结构的方法, 他们发现次结构的总质量一般为整个暗晕质量的 10%。同时他们还发现在能分辨星系团次结构的情况下, SAM 给出的团星系中央星系光度大大降低, 与观测接近, 且团星系光度函数具有与观测一致的形状。最近 Kang 等人^[9]还发现分辨次结构还能给出很好的场星系光

度函数。

2.2 气体冷却与恒星形成和反馈

对一个位力化的暗晕, 其气体的温度大致为暗晕的位力温度, 即 $T = 35.9(V_{\text{vir}}/\text{km} \cdot \text{s}^{-1})^2$, 其中 V_{vir} 为暗晕的位力速度。在半径 r 处, 气体的冷却时标为

$$t_{\text{cool}}(r) = \frac{3}{2} \frac{kT\rho_g(r)}{\bar{\mu}m_p n_e^2(r) A(T, Z)}, \quad (1)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, $\rho_g(r)$ 为半径 r 处气体质量密度, $\bar{\mu}m_p$ 为平均粒子质量, $n_e(r)$ 为电子的数密度, $A(T, Z)$ 为气体的冷却函数^[15], 它依赖于气体的温度和金属丰度。气体的冷却半径定义为在该半径处气体的冷却时标等于当时宇宙学年龄。对于小质量暗晕, 由于其冷却半径大于位力半径, 气体冷却很快。以前的半解析模型如文献 [16,17] 认为, 这些小质量暗晕的冷却时标为暗晕的动力学时标。Kang 等人^[9] 发现, 对小质量暗晕, 用宇宙学年龄作为其冷却时标更合理, 这样给出的暗星系数目较少, 与观测更符合。

半解析模型中一般将恒星形成率表示为 $\psi = \alpha m_{\text{cold}}/t_*$, 其中 α 为模型参数, m_{cold} 为冷气体含量, t_* 为恒星形成时标。在 SAM 关于恒星形成的描述中 t_* 较不确定。不同的作者采用的 t_* 也不相同。Somerville 和 Primack^[6] 1999 年指出, 一个常数的 t_* 给出的恒星形成率在高红移太低, 不能解释 Lyman-break 星系的数目随红移的演化。Kauffmann 等人^[16]、Somerville 和 Primack^[6] 认为, t_* 为星系的动力学时标给出的高红移结果与观测更符合。de Lucia 等人^[17] 和 Kang 等人^[9] 最近发现, 如果进一步考虑到 t_* 与星系旋转速度的关系, 就能给出与观测符合的冷气体含量 - 光度关系。

在现有的 SAM 中最不确定的是超星系和活动星系核的能量反馈对星系中气体分布的影响。超新星爆发的能量会将星系中冷气体加热, 使之离开星系盘, 从而减少盘中恒星的形成。目前不清楚的是这些加热气体的命运, 即它们是留在星系所在的暗晕里面还是跑到暗晕外面直到更大的结构形成而重新坍缩。流体数值模拟在这个问题上给出的结果也不太一致, 并且强烈依赖于所假设的恒星形成过程。现在一般认为被加热气体的命运上述两种可能性都有, 或者介于两者之间而依赖于星系的引力势。

2.3 金属演化、星族合成及尘埃的散射

以前的很多半解析模型都没考虑到金属丰度的演化。这是因为一方面人们不太清楚在恒星演化过程中抛出的金属如何与不同相位的气体(星系盘中冷气体和暗晕内的热气体)相混合; 另一方面是为了减少 SAM 模型的自由参数。实际上金属丰度的演化对所形成星系的性质有很大的影响。首先, 热气体的冷却率随金属丰度的提高而快速增加, 从而导致星系盘中冷气体的含量增加, 提高恒星的形成。其次金属丰度越高, 恒星演化越快, 颜色越红。Kauffmann 等人^[16]、de Lucia 等人^[17]、Kang 等人^[9] 发现, 椭圆星系的颜色 - 星等关系也是由金属 - 亮度关系主导的, 既越亮的星系其金属丰度也越高。现在的半解析模型一般认为, 恒星在演化过程中抛出的金属会首先进入星系盘中的冷气体, 随后由超新星爆发将增丰后的冷气体抛入到暗晕的热气体中与其混合; 最后增丰的热气体冷却更快, 金属又随冷气体进入星系盘中形成新的恒星。de Lucia 等人最近发现, 如果假设一个正常的恒星金属产率, 星系团中热气体的金属丰度较观测低。观测发现, 星系团中热气体的金属丰度大约为 $0.2 \sim 0.3 Z_{\odot}$ ($Z_{\odot} \simeq 0.02$ 为太阳金属丰度)。热气体金属亏损可能来源于 SAM 对金属转移过程的简单

假设。如果恒星演化抛出的金属部分直接进入热气体,就不会有上述问题,正如 Cole 等人^[7]采取的模型那样。不过总的来说,金属在不同气体相位之间的演化还不是很清楚。

模型星系在不同波段的光度可由恒星演化理论给出,目前大多采用 Bruzual 和 Charlot^[18] 1993 年给出的星族合成模型。给定恒星的 IMF 和金属丰度,某个时刻 t 星系在波长 λ 处的流量 S_ν 为

$$S_\nu = \int_0^t F_\nu(t-t') \dot{m}_*(t') dt', \quad (2)$$

其中 F_ν 为给定 IMF 和金属丰度、一个太阳质量的恒星在诞生后某一时刻的光谱能量分布, \dot{m}_* 为生成的恒星总质量。值得注意的是,星光会受到恒星际尘埃的散射。Wang 和 Heckman^[19] 给出了一个简单关系来描述尘埃的光深与星系内禀蓝波段光度的关系。利用 Gardelli 等人^[20] 1989 年给出的不同波段尘埃光深的关系,结合 Tully 和 Fouqué^[21] 给出的薄盘模型,可以得到尘埃对不同波长范围星系亮度的影响。最近 SAM 中常常利用一个叫 GRASIL^[22] 的程序来计算更为合理的尘埃散射,它根据辐射转移理论并考虑了尘埃和恒星的分布对辐射转移的影响。

3 半解析模型的成功之处

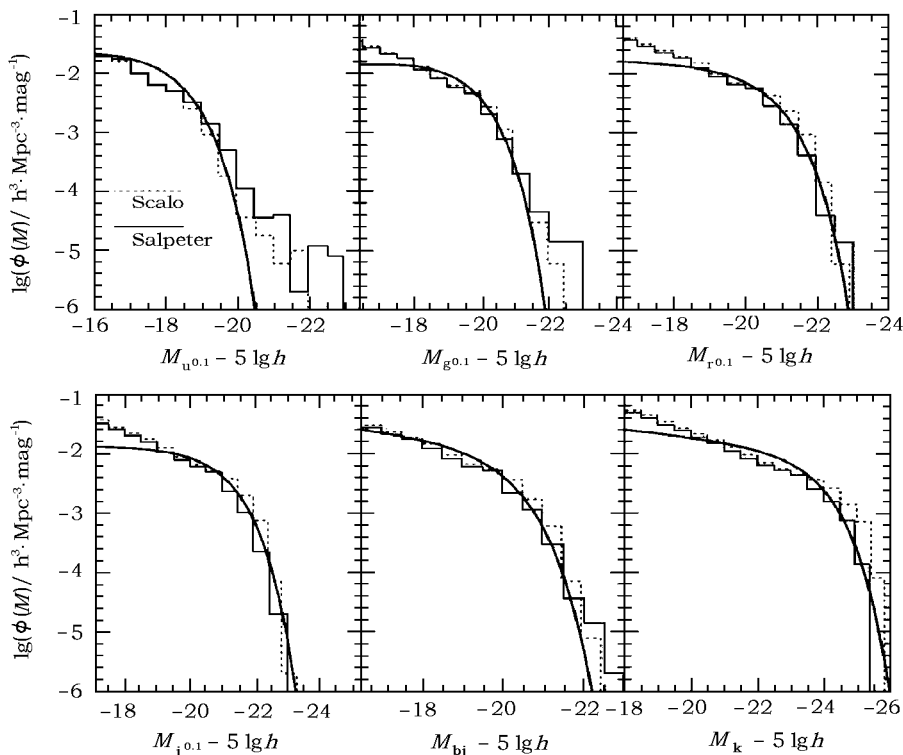
总的来说,建立在 CDM 模型之上的 SAM 能成功地解释许多近邻星系和部分高红移星系的性质,如星系的光度函数、星系的数目随红移的分布、星系的相关函数及其与颜色和光度等的相关关系、颜色-星等关系。这些成功部分来源于 CDM 模型,来源于人们对大尺度结构增长的正确理解。SAM 最重要的成功之处在于其对所涉及的重要物理过程的较合理描述,如气体的辐射冷却、恒星形成率与星系大小的关系、恒星反馈对气体分布的影响、金属的转移与演化、星族合成模型等。下面介绍一些比较有代表性、目前测量得比较准确的重要结果:近邻星系的多波段光度函数、椭圆星系的颜色-星等关系。

3.1 多波段光度函数

正在进行的 SDSS 巡天和已经完成的 2dFGRS 给出了巨大的近邻星系样本,由此可以得到星系许多重要的性质,其中最重要的性质莫过于星系在不同波段的数目随光度分布。图 1 给出了 Kang 等人^[9] 模型预言的多波段光度函数,其中柱状线是模型预言,光滑的实线是不同作者^[23~25] 对观测的最好拟合曲线(一般用 Schechter 函数来描述光度函数 LF)。从图 1 可以看出,除了 LF 的暗端和蓝波段的亮端(如 SDSS 的 u 波段)以外, SAM 模型给出的结果与观测符合得很好。这是因为合理的宇宙学模型和高精度的数值模拟^[12] 给出了合理的暗晕质量函数、暗晕内气体冷却率模型,特别是小质量暗晕内气体的冷却率的降低有助于得到较平的 LF 暗端,详细跟踪次结构在星系群和星系团中的演化给出了合理的 LF 亮端。

3.2 颜色-星等关系

观测上很早就发现,星系团中的椭圆星系有一个非常好的相关关系:颜色-星等关系(CM 关系),即越亮的星系颜色越红。以前的 SAM 很难模拟 CM 关系,这主要是没有考虑金属丰度的演化。Kauffmann 和 Charlot^[26] 发现,CM 关系主要由光度-金属丰度关系主导,即越亮的

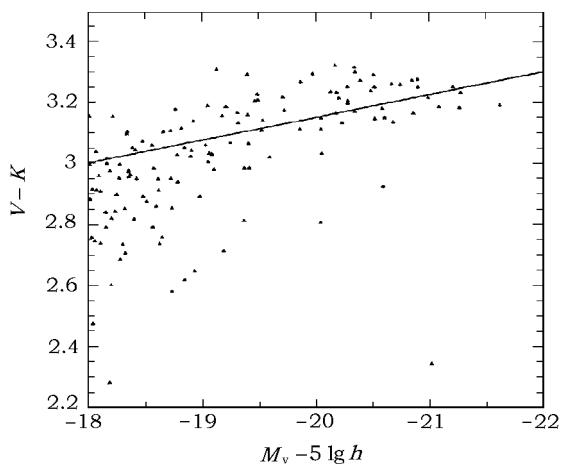
图1 星系的多波段光度函数^[9]

Scalo 和 Salpeter 为模型选取的不同恒星初始质量函数。

星系其金属丰度也越高。de Lucia 等人^[17] 和 Kang 等人^[9] 也证实了这一点。图2是Kang 等人2004年的结果。可以看到, 考虑到金属演化的SAM能给出与观测一致的CM关系。

4 半解析模型面临的问题

星系形成模型要回答的一个关键问题是, 现在观测到的大质量近邻星系到底是什么时候形成的? 对于这个问题, 星系被动演化模型^[27] 认为, 星系形成于早期的一次坍缩, 随后只有光度演化而保持数密度不变。建立在CDM之上的SAM认为, 星系是在逐步坍缩较少。的暗晕中形成的, 大质量星系在高红移因此对亮星系光度、密度随红移演化的观测将直

图2 椭圆星系的颜色 - 星等关系^[9]

实线为 Bower 等人 (1992) 对 Coma 星系团观测结果的最佳线性拟合。

接把这两种不同的形成模型区分开来。尽管 SAM 能成功地解释大部分近邻星系的性质，但是在解释高红移星系观测方面却有些困难，主要表现为在高红移预言的红星系数目太少，并且大质量星系的数密度也太低。

4.1 红星系问题

最近 Somerville [28] 利用 GOODS 在 South field 面积为 160 平方角分的一批 $K_s < 22$ 的星系样本，得到了其颜色 $(R - K)$ 随红移的分布，并与他们的 SAM 进行了比较，如图 3 所示。可以看出，与观测相比，SAM 给出的红星系 ($R - K > 3.65$) 在 $z = 1$ 处较少；在 $z \simeq 1.4$ 处，根本就没有 $R - K > 4.5$ 的红星系；在给定颜色处，如 $R - K = 4.0$ 处，其预言的星系数目也较少。

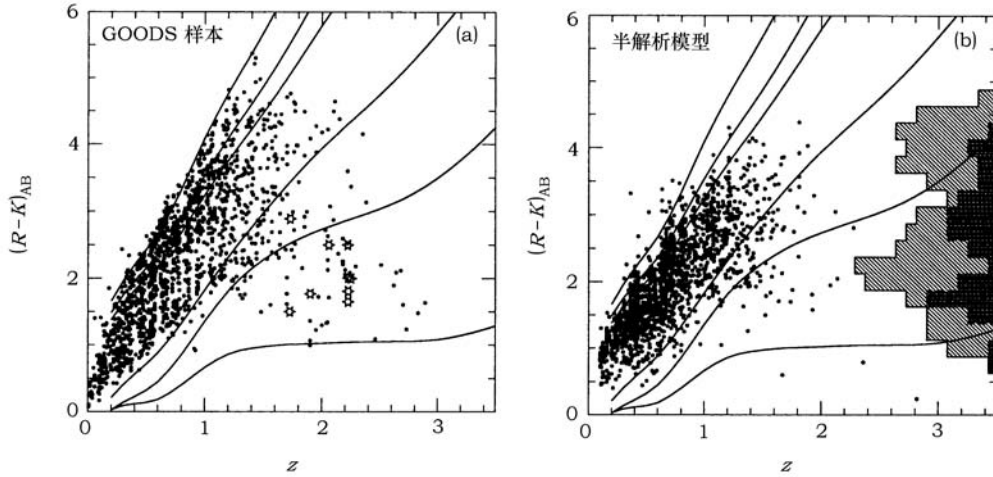


图 3 观测的颜色 $(R - K)$ 随红移的分布 [28]

(a) 观测分布；(b) 模型分布。实线为被动演化模型预言的具有太阳金属丰度且年龄分别为 13.5、5.8、3.2、1、0.5、0.1 Gyr 的恒星颜色随红移 (时间) 的演化关系。

4.2 大质量星系问题

高红移大质量星系的密度同样对星系形成模型具有很强的限制。Glazebrook 等人 [29] 于 2004 年利用 GDDS 给出的 150 个 $K < 20.6$ 且 $0.8 < z < 2$ 的星系，得到了其恒星质量。图 4 给出了恒星质量密度与红移的关系，其中带有误差棒的数据点为从观测得到的值，平滑线为 Baugh 等人 [30] 2003 年和 Granato 等人 [31] 2000 年的 SAM 结果。可以看到，SAM 预言的大质量星系 ($\lg M_* > 10.8$) 在 $z > 1$ 处比观测少了约一个量级；较小质量星系 ($\lg M_* > 10.2$) 在 $z < 2$ 处与观测较符合。这说明 SAM 预言的总恒星质量是合理的，即高红移总的恒星形成率并不低，但是大部分恒星形成在较小质量星系里面 ($10.2 < \lg M_* < 10.5$)。

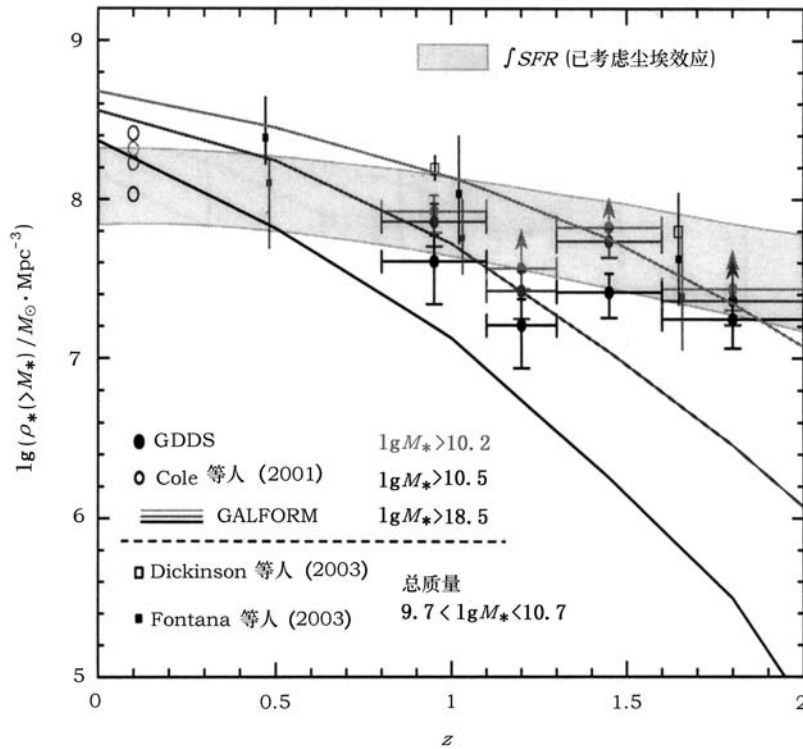


图 4 星系的恒星质量密度随红移的分布^[29]

带误差棒的点为观测值, 实线为模型预言。不同的灰度为不同的恒星质量截断, 具体值标在图中。

5 半解析模型可能的解决办法

建立在 CDM 模型上的 SAM 很难同时解释不同时刻星系的性质。在用近邻星系的观测归一化模型参数情况下, 模型预言的高红移大质量星系和红星系的数目都较观测少。不过最近 Kang 等人^[33]发现他们的 SAM 在高红移处能预言颜色非常红的星系, 同时在给定颜色指数处星系的数目也能增加。关于红星系问题, 观测上不但发现某个给定颜色处的星系数目较模型预言多, 而且还发现了一些颜色非常红的星系。Kang 等人认为, 这主要是由于一些 SAM 中存在星系过度并合以及大质量暗晕气体过度冷却造成的。以前 SAM 中用 Navarro 和 White^[32]给出的动力学时标来预言暗晕并合后卫星星系的演化, 但 Springel 等人^[8]发现在高分辨数值模拟中, 大质量卫星星系的存活时间较动力学时标预言的长, 因此过度并合减少了这些大质量星系的数目, 又由于这些大质量星系的颜色较红, 所以在那些没有考虑次结构的模型中, 如 Somerville^[28]等, 模型预言的红星系数目较少。同时过度并合以及气体的过度冷却导致新的年轻恒星形成, 所以这些模型预言的星系颜色都不够红。

由于在近邻星系团中没发现大量的热气体冷却, 同时为了避免星系团中中心星系相比观测太亮, 许多 SAM 引入不同机制来抑制大质量暗晕中恒星的形成。Somerville 和 Primack^[6]、

Cole 等人^[7]通过改变热气体的分布来降低星系团尺度的暗晕中气体的冷却率。Kauffmann 等人^[4,16]采取了一个人为的截断,即对于那些位力速度大于 350 km/s 的暗晕,假设其热气体的冷却率为零,或者气体即使冷却了也不形成新的恒星。不管怎样,这些模型都能预言合理的近邻星系团中心星系的光度及团星系的光度函数。但是有一个问题一直被忽略,就是这些模型同时降低了高红移大质量暗晕内热气体的冷却率及恒星形成,所以导致这些模型预言的高红移大质量星系的数目较观测少。最近 Kang 等人^[33]发现用一个简单的办法就可以增加高红移大质量星系的形成。以前如 Kauffmann 等人^[4,16]和 Kang 等人^[9],他们采取人为抑制大质量暗晕中气体冷却的方法,用暗晕的位力速度为判据,这导致在高红移处许多质量较小的暗晕其气体冷却也被抑制了,因为在给定的位力速度处,星系的质量随宇宙平均密度增加而减小。Kang 等人^[33]最近发现,如果不用位力速度而用质量为判据,则可以增加高红移大质量星系的形成。从物理上讲,任何一种人为抑制热气体冷却的方法都不正确,应该引入某些物理机制,如来自活动星系核的能量反馈、热传导来降低热气体的冷却。但是在目前对这些具体的物理过程还不清楚的情况下,人为抑制气体冷却可以给人们一些启示,即改变气体冷却的物理过程到底应该对哪种尺度的暗晕更明显?当然没有任何理由只选择位力速度而不是质量为判据条件。Kang 等人^[33]发现,如果将质量大于 $2.5 \times 10^{13} M_{\odot}$ 暗晕中的气体冷却停止,模型不但能符合近邻星系的观测结果,同时也能增加高红移大质量星系的密度,从而能较好地解释大质量星系密度随红移的变化以及 GOODS 的星系数目随红移的分布。

6 结 束 语

我们对星系形成的 SAM 进展以及存在的问题作了一个简单的介绍。星系形成所涉及的物理过程非常复杂,人们对其中最关键的气体过程了解并不多,如热气体冷却、恒星形成的描述、超新星或活动星系核的能量反馈对恒星形成的影响。而 SAM 则为人们提供了一个较简单的解决这些问题的途径。在 SAM 的进一步发展中,人们需要不断地引入更合理的物理模型,同时结合当前的多波段观测来限制模型过程及模型参数。观测到的大量高红移星系及大质量星系被认为是目前 SAM 的主要困难,但是随着观测数据的丰富,更加详细、不同波段数据的比较显得尤为重要。准确地说,目前还不清楚到底是什么机制使得高红移的恒星形成如此强烈,而又是什么机制使得随后的恒星形成被抑制,以致今天看到的近邻星系中恒星形成率较低。这均有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Spergel D N, Verde L, Peiris H V *et al.* ApJS, 2003, 148: 175
- [2] White S D M, Rees M J. MNRAS, 1978, 183: 341
- [3] White S D M, Frenk C S. ApJ, 1991, 379: 52
- [4] Kauffmann G, White S D M, Guiderdoni B. MNRAS, 1993, 264: 201
- [5] Cole S, Aragon-Salamanca A, Frenk C S *et al.* MNRAS, 1994, 271: 781
- [6] Somerville R S, Primack J R. MNRAS, 1999, 310: 1087
- [7] Cole S, Lacey C G, Baugh C M *et al.* MNRAS, 2000, 319: 168
- [8] Springel V, White S D M, Tormen G *et al.* MNRAS, 2001, 328: 726
- [9] Kang X, Jing Y P, Mo H J *et al.* 2004, preprint (astro-ph/0408475)

- [10] Daddi E, Cimatti A, Renzini A. *A&A*, 2000, 350: 381
- [11] Mo H J, Mao S D. *MNRAS*, 2002, 333: 768
- [12] Jing Y P, Suto Y. *ApJ*, 2002, 574: 538
- [13] Moore B, Ghigna S, Governato F *et al.* *ApJ*, 1999, 524: 19
- [14] Klypin A, Gottlöber S, Kravtsov A V *et al.* *ApJ*, 1999, 516: 530
- [15] Sutherland R S, Dopita M A. *ApJS*, 1993, 88: 253
- [16] Kauffmann G, Colberg J M, Diaferio A *et al.* *MNRAS*, 1999, 303: 188
- [17] de Lucia G, Kauffmann G, White S D M *et al.* *MNRAS*, 2004, 349: 1101
- [18] Bruzual A G, Charlot S. *ApJ*, 1993, 405: 538
- [19] Wang B, Heckman T M. *ApJ*, 1996, 457: 645
- [20] Cardelli J A, Clayton G C, Mathis J S *et al.* *ApJ*, 1989, 345: 245
- [21] Tully R, Fouqué P. *ApJS*, 1985, 58: 67
- [22] Silva L, Granato G L, Bressan A *et al.* *ApJ*, 1998, 509: 103
- [23] Blanton M R, Hogg D W, Bahcall N A *et al.* *ApJ*, 2003, 592: 819
- [24] Madgwick D S, Lahav O, Baldry I K *et al.* *MNRAS*, 2002, 333: 133
- [25] Cole S, Noberg P, Baugh C M *et al.* *MNRAS*, 2001, 326: 255
- [26] Kauffmann G, Charlot S. *MNRAS*, 1998, 294: 705
- [27] Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. *ApJ*, 1962, 136: 748
- [28] Somerville R S. *ApJ*, 2004, 600: 135
- [29] Glazebrook K, Abraham R G, McCarthy P J *et al.* *Nature*, 2004, 430: 181
- [30] Baugh C M, Benson A J, Cole S *et al.* *The Mass of Galaxies at Low and High Redshift*, ESO, 2003: 91~98
- [31] Granato G L, Lacey C G, Silva L *et al.* *ApJ*, 2000, 542: 710
- [32] Navarro J F, White S D M. *MNRAS*, 1994, 267: 401
- [33] Kang X, Jing Y P, Mo H J. 2005, in prepration

Progress on the Semi-Analytical Model of Galaxy Formation

Kang Xi^{1,2}

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Based on the current popular hierarchical clustering model of Cold Dark Matter (CDM), The Semi-Analytical Model (SAM) of galaxy formation have made impressive progress. After introducing the reasonable prescription about the baryonic process, such as the gas cooling, star formation, energy feedback from supernova and AGN, the SAM succeeds in predicting many observations. On one hand, SAM can match the observations of local galaxy population, which include the luminosity function, the two-point correlation function, Tully-Fisher relation, the color-magnitude relation. On the other hand, SAM also match observations of high-redshift universe, such as the cosmic star formation history, and the redshift-distribution of Lyman-Break galaxies. But some recent evidence implies that SAM predicts less massive galaxies at high redshift, and insufficient number of extremely red objects. In this review, we discuss the success and failure of SAM, and give hint on how to improve the SAM.

Key words: Astrophysics; Semi-analytical model; review; galaxy formation; galaxy evolution; luminosity function