

星系形成的超大型计算机模拟

景 益 鹏

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

扼要地就数值模拟在星系形成研究中的作用、数值模拟与解析模型之间的关系、数值模拟的局限性等几方面的问题作了综述; 然后介绍了马普小组与日本东京大学最近的合作情况, 包括合作得到的模拟样本、研究成果和正在开展的工作。

关键词 宇宙学 — 星系形成 — 数值方法

分类号 P157.9

星系形成的模拟是将宇宙中某一区域分成 N 个流体元, 按照基本物理规律和宇宙模型给定的初始条件和边界条件, 用数值方法跟踪这些流体元的运动和演化, 从而研究宇宙中星系和大尺度结构的起源、形成和演化。数值模拟在星系形成研究中之所以重要, 是因为星系形成所涉及的主要物理过程都是非线性过程。根据目前普遍接受的理论, 宇宙中的大尺度结构是由宇宙早期的微小密度涨落经引力不稳定性放大而形成的, 这些线状和(或)面状的大尺度结构的交叉处存在着维里化的高密度结构, 即暗物质晕。在晕刚形成时, 气体与暗物质在晕内的分布几乎是相同的, 且气体的温度接近于暗物质的维里温度。这些高温气体因为辐射得以冷却并形成盘状星系, 而星系间的相互碰撞和并合则形成星暴星系和椭圆星系等。所有这些过程都是强非线性物理过程, 而计算机模拟最适合于研究这类非线性问题。

星系形成的半解析模型现在用得也很普遍。若仔细看一看半解析模型的主要成分, 不难发现它们不是从观测中提炼的经验规律(如恒星形成率、初始质量函数)就是从数值模拟总结出来的经验结果, 其中从模拟得到的暗物质晕的密度结构、晕的角动量分布和晕的数密度分布(Press-Schechter 理论的广泛应用的原因是因为它得到了数值模拟的验证)已经成为半解析模型的理论基础。当然, 半解析模型的需要也常常成为数值模拟研究的动力, 为数值模拟的研究指示方向, 前几年大量关于暗物质晕的研究正说明了这一点。在今后的几年内, 肯定会有许多模拟研究来探讨星系的并合和转换过程、星系落入大晕内所受到的潮汐力作用和动力学摩擦作用, 因为这些过程对半解析模型有着重要影响但现在仍未研究得十分清楚。另外, 半解析模型常能帮助理解数值模拟的结果。总之, 数值

模拟与半解析模型之间的关系是一种相互补充、相互推动的关系。星系形成的数值模拟是一项极富挑战性的研究，原因是宇宙中存在的结构是多尺度的，星系、星系团和超星系团等结构在质量上跨越了6个量级，要同时较好地分辨星系和超星系团结构就要求一个模拟实验至少有一亿个模拟粒子（若粒子的质量是相同的），这对于目前最先进的算法和最先进的计算机仍然是一个不小的挑战。另外，恒星形成及其反馈作用肯定对星系形成有重要影响，但目前关于这些过程的理解仍相当有限，这自然也给星系形成模拟带来了一些不确定因素。认识这些局限性是重要的，因为只有如此，才能在模拟设计中尽量避开这些局限性或尽量减少这些局限性带来的影响，以突出需要研究的主要物理过程。

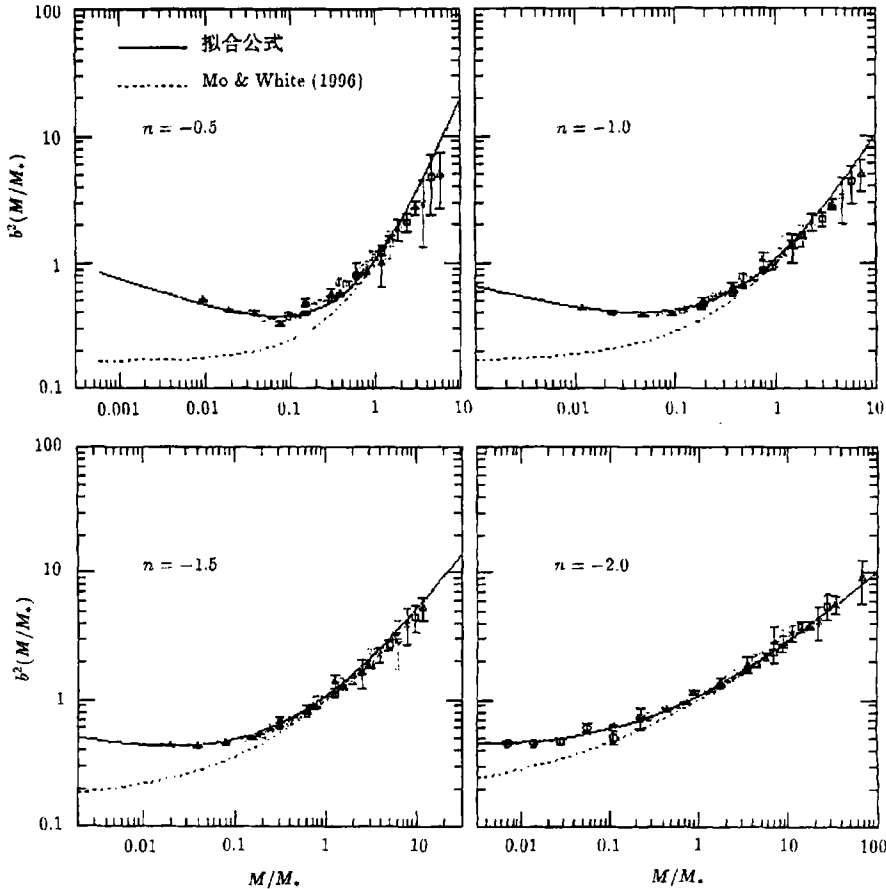


图1 无标度谱模型的偏离因子的平方 $b^2(M/M_*)^{[1]}$

不同符号代表了数值模拟在不同演化阶段的结果。对于小质量晕，Mo和White的解析表达式（虚线）与数值模拟结果不符合，而经验拟合公式（实线）很好地描述了数值模拟结果

在认识到数值模拟的重要性的局限性的前提下，我们在最近几年里计算了一系列用途各异的模拟样本：用一千七百万个粒子和 N -体方法模拟了冷暗物质模型，这组数据非常适合于星系形成和大尺度分布的研究；一组用同样粒子数目的无标度谱 N -体模拟可以用来探讨非线性引力过程；一组百万模拟粒子的暗物质晕的 N -体模拟可以用来精

细地研究暗物质晕的内部结构; 最近得到的包括气体、激波、加热、冷却、恒星形成等过程的四百万个模拟粒子的 N -体 / 流体数值模拟, 可以与前面提到的第一组 N -体模拟相互补充, 研究星系的形成和大尺度结构。这些样本在国际上都是领先的。我们已经利用这些模拟做了一系列工作, 因为篇幅的限制, 只简单地介绍其中的两个工作。

研究暗物质晕的成团性质对于解释星系的成团和构造星系成团的模型有着重要的意义。我们利用一千七百万粒子的无标度谱模型 (谱指数 $n = -0.5, -1.0, -1.5, -2$) 的 N -体模拟, 对暗物质晕的成团性作了系统的分析^[1], 以前所未有的精度证实了晕的成团偏差 (bias) b 在线性成团区域是线性的。与 Mo 和 White^[2] 的暗晕成团的解析模型比较, 我们发现对于质量大于特征非线性质量 M^* 的暗晕, 解析公式与模拟结果符合得很好, 但对于小质量暗晕, 解析公式得到成团性太小。为此, 我们给出偏离值 b 的拟合公式, 这个拟合公式不仅与无标度谱的模型符合得很好 [见图 1], 而且也可精确地描述冷暗物质模型中晕的成团, 因此我们的公式已被广泛用于星系成团的讨论^[3]。有关拟合公式及其应用的详细讨论可参考文献 [1]。

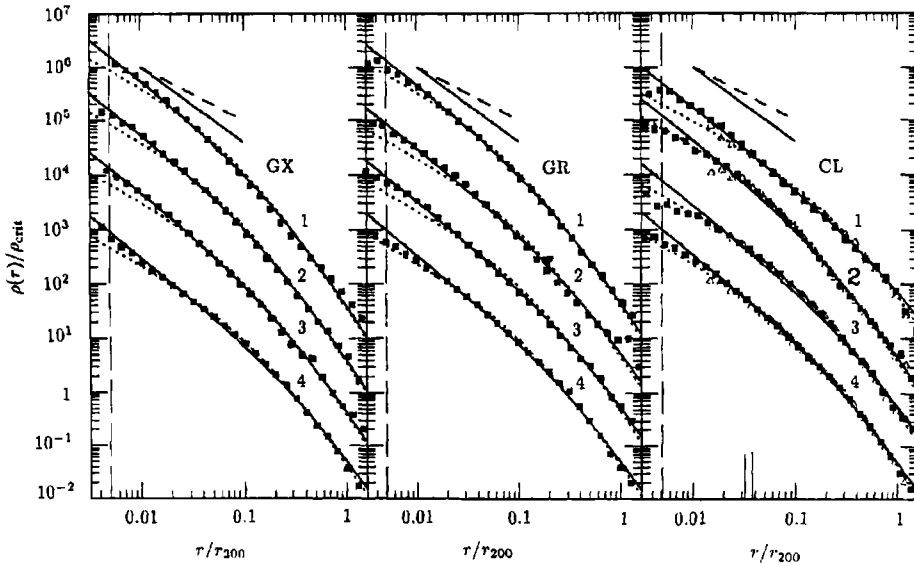


图 2 自左至右分别为星系质量、星系群质量、星系团质量暗物质晕的径向密度分布^[4]

实线和虚线分别是 $\beta = -1.5$ 和 $\beta = -1$ 的拟合曲线

在文献 [4] 中, 我们利用百万粒子暗物质晕的 N -体模拟, 对星系质量、星系群质量和星系团质量的暗晕的径向密度分布做了研究, 发现星系质量晕中心区域的密度分布比 NFW 模型^[5] 给出的分布上升得快, 但星系团质量的晕的密度分布可由 NFW 模型很好地描述, 由此我们得到结论, 晕的径向密度分布不像 NFW 所述的那样是普适的, 星系质量暗晕内部的密度分布必须用 $\beta = -1.5$ (NFW 模型对应的 $\beta = -1$) 的形式来表示。

我们研究小组正继续与日本东京大学合作, 改进程序, 力争获得更高精度的数值模拟。同时, 我们对已有的数值模拟进行分析, 正在展开的具体研究课题有: (a) 暗物质的强成团性质和暗物质晕的系统物理性质; (b) 结合半解析模型研究星系形成和星系成

团性质; (c) 温暗物质模型和自相互作用暗物质模型中的晕的结构和暗物质成团特性。

致谢: 感谢 Yasushi Suto 对本文所述工作的合作和帮助。

参 考 文 献

- 1 Jing Y P. *Ap. J. Lett.*, 1998, 503 : L9
- 2 Mo H J, White S D M. *M.N.R.A.S.*, 1996, 282: 347
- 3 Baugh C M et al. *M.N.R.A.S.*, 1999, 305, L21
- 4 Jing Y P, Suto Y. *Ap. J. Lett.*, 2000, 529: L69
- 5 Navarro J F, Frenk C S, White S D M. *Ap. J.*, 1997, 490: 493

Super-computer Simulation for Galaxy Formation

Jing Yipeng

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

Abstract

Numerical simulations are widely used in the studies of galaxy formation. Here we briefly review their important role in the galaxy formation research, their relations with analytical models, and their limitations as well. Then a progress report is given about our collaboration with a group in the University of Tokyo, including the simulation samples we have obtained, some of the results we have published, and the joint projects which are in progress.

Key words cosmology—galaxies: formation—methods: numerical