

紫外線輻射場内での球状星団形成およびその力学進化

長谷川 賢二 (筑波大)、梅村 雅之(筑波大)、FIRSTプロジェクトチーム

ABSTRACT

我々は、紫外線輻射場内での球状星団形成の可能性を探ることを目的とし、一次元球対称のもとガス、ダークマターダイナミクスを輻射輸送、水素分子を含んだ化学反応と矛盾なく解いた。さらに、この計算では冷えたガスからの星形成とその運動も考慮している。その結果、紫外線輻射場内で形成された天体は、球状星団のような非常に高密度な天体になりうることを示した。さらに、我々は宇宙年齢程度の非常に長い時間わたるの星団力学進化を筑波大学の宇宙シミュレータFIRSTを用いてシミュレーションした。その結果、我々のシミュレーションによって形成された天体は、Fundamental Plane上では観測される球状星団とよく一致することを示した。

Introduction

球状星団の特徴

- Pop II の星で構成されている
- 多くの球状星団は宇宙再電離期以降に形成
- 非常に高密度な天体: $\rho = 10^3 M_{\odot}/pc^3$
- 質量高度比が低い: $M/L \sim 2$ (ほとんど星成分)
- Metal-poor ($[Fe/H] \sim -1.5$) と metal-rich ($[Fe/H] \sim -0.5$) の subpopulation が存在 (それぞれ起源は異なる!? (Forbes & Forte 2001))

球状星団形成は Pop III stars の影響を受けていた!?

球状星団の年齢分布 (Puzia et al. 2005)

WMAP 3 years results $z \sim 10$

球状星団が紫外線輻射場内で形成された可能性を示唆

Effects of UV radiation

自己遮蔽臨界密度 (Tajiri & Umemura (1998))

$$n_{crit} = 3.52 \times 10^{-2} \left(\frac{M}{10^6 M_{sun}} \right)^{-1/5} I_{21}^{3/5}$$

自己遮蔽効果が有効に効く場合 ($n > n_{crit}$)、ガス雲はコラプス可能 (e.g. Kitayama et al. 2001)

星形成の阻害

- 中性水素の電離
- 水素分子の光解離
- 光加熱
- ガス温度 $\sim 10^4 K$

星形成の促進

- 電子の増加
- H2 formation

化学反応:

$$H + e^- \rightarrow H^- + \gamma$$

$$H + H^+ \rightarrow H_2^+ + \gamma$$

$$H_2^+ + H \rightarrow H_3^+ + H$$

自己遮蔽効果によって星団が形成された場合

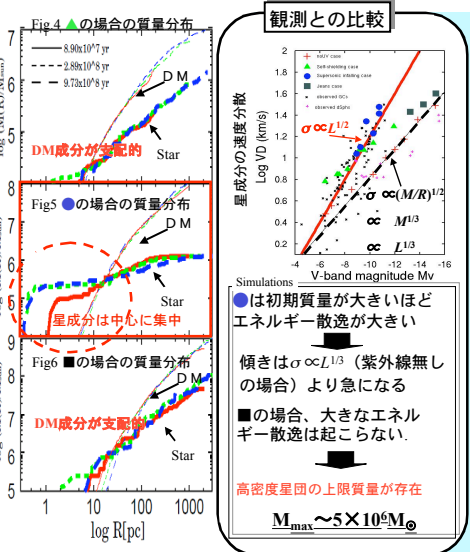
エネルギー散逸が小さい
低密度かつDMが支配的な星団が形成される

超音速落下によって星団が形成された場合

エネルギー散逸が大きい!!
コンパクトな星団が広がったDMハロー中心に形成される。

初期質量がジーンズ質量を超えていた場合

エネルギー散逸が小さい
低密度かつDMが支配的な星団が形成される



球状星団のように低質量かつ高密度な天体が紫外線輻射場内で形成できるか否かをあきらかにすることを目的とした。

Formation process of GCs

Methods

Simulation code (Kitayama et al. (2001))

□ 一次元球対称流体計算 (含 DM)

$$\frac{dm_b}{dt} = 4\pi r_s^2 \rho_s$$

$$\frac{d^2 r_s}{dt^2} = -4\pi r_s^2 \frac{d\rho}{dm_b} - \frac{GM(<r_s)}{r_s^2} + \Lambda_0 H_0^2 r_s^2 + f_{rad}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{P}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dt} + \frac{\Gamma - \Lambda}{\rho_s}$$

$$P = (\gamma - 1) \rho_s u = \frac{k_B \rho_s T}{\mu m_p}$$

◇ Star formation criteria

- $T_g < 2000K$
- $V_r < 0$
- $dp/dt > 0$

□ 紫外線輻射輸送: 加熱率、化学反応係数決定のため

□ 非平衡化学反応: e, H, H^+, H_2, H_2^+ (重元素は含まない)

Dynamical Evolution of GCs

N体計算によって、母銀河の潮汐場内での高密度星団の力学進化をシミュレーション

Algorithm: Block timestep method (Makino 1991)

□ 計算機: 宇宙シミュレータ **FIRST**

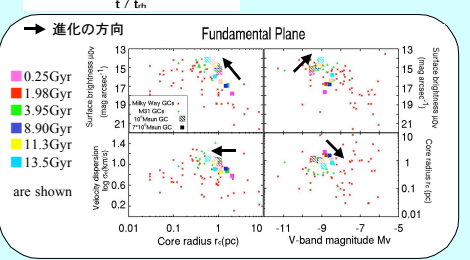
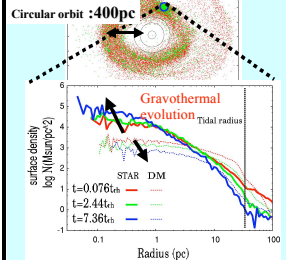
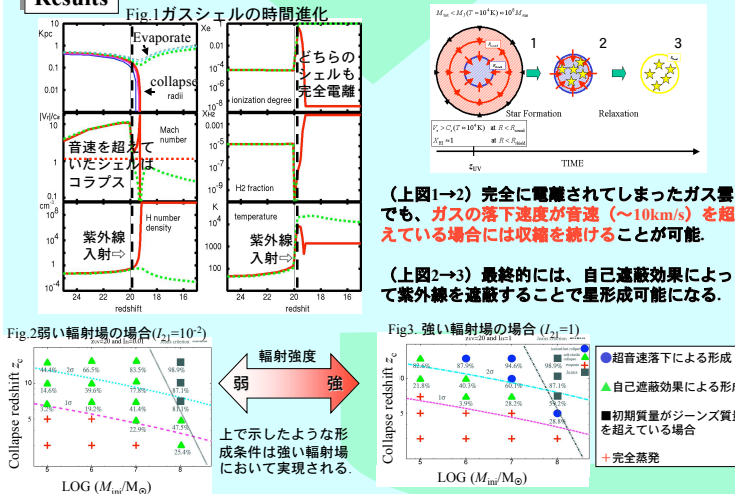
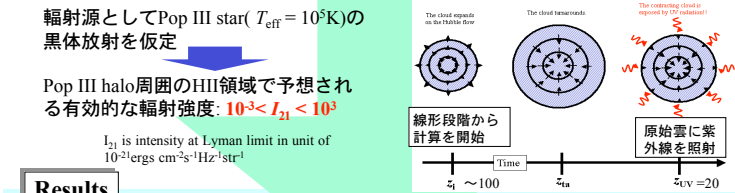
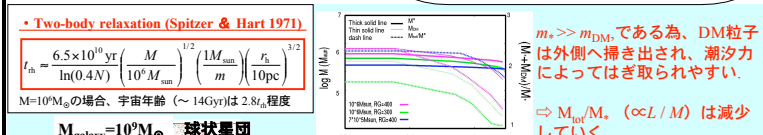
□ 粒子数: $N_* = 2^{14}$ for stars, $N_{DM} = 2^{18}$ for DM

$M_* = 1.3 \times 10^6 M_{\odot} \rightarrow m_* = 79.3 M_{\odot}$

$Ex. M_{DM} = 2.0 \times 10^6 M_{\odot} \rightarrow m_{DM} = 7.63 M_{\odot}$

□ Initial condition:

- 一次元計算から得られた結果 (fig.5) を採用
- 等方的な速度分散を仮定



Summary and Discussions

我々は、紫外線輻射場における球状星団形成シミュレーションを行った。

- 「完全電離してしまったガスでも、落下速度が音速を超えているものは収縮を続け最終的にはガス雲内で星形成可能である」という新たな天体形成条件を発見した (fig.1)
- 形成される天体の特徴は、その形成過程によって異なる。(fig.4~6)
- 超音速落下の場合 → コンパクトな天体を形成 (GC like) (fig.5)
- 自己遮蔽効果が効く場合 → 低密度かつDMが支配的な天体を形成 (dSph-like) (fig.4)

以上の結果と fig.2.3 ⇒ コンパクトな星団を形成する為には、 $I_{21} > 0.1$ 以上の強輻射場が必要

さらに、我々の結果は球状星団が high- σ ピークで形成されたことを示唆する (fig.3.5)

もし楕円銀河が high- σ ピークで形成されたならば (e.g. Sosa & Umemura 2000, Harris 1991 など) で指摘される「楕円銀河は渦巻き銀河よりも単位光度あたりの球状星団数が多い」という観測事実を定性的には説明可能

N体計算によって $> 2.5\sigma$ から形成された天体は銀河ハロー内の metal-poor な球状星団の分布をよく再現できることが指摘されている (e.g. Moore et al. 2006)

Dynamical evolution of GCs

N体計算によって、潮汐場内での星団力学進化シミュレーションを行った。

- DM粒子は外側へ掃き出され、星団はほとんど星だけで構成されるようになる。
- 星団の力学進化のpathは、Fundamental Plane上の観測される球状星団分布とよく一致

References [1] Forbes, D. A., & Forte, J. C. 2001, MNRAS, 322, 257 [2] Harris, W. E. 1991, [3] Kitayama, T., Sosa, H., Umemura, M., & Ikeuchi, S. 2001, MNRAS, 326, 1353, [4] Makino, J. 1991, PASJ, 43, 859, [5] Moore, B., Diemand, J., Madau, P., Zemp, M., & Stadel, J. 2006, MNRAS, 368, 563, [6] Puzia, T. H., Perret, K. M., Bridges, T. J. 2005, A&A, 434, 909, [7] Sosa, H., & Umemura, M. 2000, MNRAS, 316, L17, [8] Tajiri, Y., & Umemura, M. 1998, ApJ, 502, 59.

まとめの一言

我々の提案した形成シナリオは特に metal-poor な球状星団の形成過程として有力な候補であると思われる。