

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: $\rho = 10^3 M_{\odot}/\text{pc}^3$
- 質量高度比が低い: $M/L \sim 2$ (ほとんど星成分)
- Metal-poor ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.5$) と metal-rich ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.5$) 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 $z \sim 10$

Reionized universe!

球状星団が紫外線輻射場内で形成された可能性を示唆

自己遮蔽臨界密度 (Tajiri & Umemura (1998))

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

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

Effects of UV radiation

- 中性水素の電離 → 星形成の阻害
- 水素分子の光解離 → ピリアル質量 $\sim 10^8 M_{\odot}$ 以下の原始雲収縮の阻害
- 光加熱 → ガス温度 $\sim 10^4 \text{K}$
- 電子の増加 → 水素分子形成の促進

H2 formation

$$\text{H} + \text{e}^- \rightarrow \text{H} + \gamma \rightarrow \text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$$

$$\text{H} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2^+ + \gamma \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}^+$$

Star Formation → Relaxation

観測との比較

星成分の速度分散 $\sigma \propto (M/R)^{1/2}$

傾きは $\sigma \propto L^{1/3}$ (紫外線無しの場合) より急になる

傾きは $\sigma \propto L^{1/3}$ (紫外線無しの場合) より急になる

■の場合、大きなエネルギー散逸は起こらない

高密度星団の上限質量が存在 $M_{\text{max}} \sim 5 \times 10^6 M_{\odot}$

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)

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

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

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

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

◇ Star formation criteria

- $T_g < 2000\text{K}$
- $V_r < 0$
- $dp/dt > 0$

□ 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: $\text{e}^-, \text{H}, \text{H}^+, \text{H}_2, \text{H}_2^+$ (重元素は含まない)

輻射源として Pop III star ($T_{\text{eff}} = 10^4 \text{K}$) の黒体放射を仮定

Pop III halo 周囲の HII 領域で予想される有効的な輻射強度: $10^{-2} < I_{21} < 10^3$

I_{21} is intensity at Lyman limit in unit of $10^{-21} \text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}$

線形段階から計算を開始

原始雲に紫外線を照射

Results

Fig.1 ガスシエルの時間進化

collapse radii, ionization degree, Mach number, H2 fraction, temperature, 紫外線入射

どちらのセルも完全電離

(上図1→2) 完全に電離されてしまったガス雲でも、ガスの落下速度が音速 ($\sim 10 \text{km/s}$) を超えている場合には収縮を続けることが可能。

(上図2→3) 最終的には、自己遮蔽効果によって紫外線を遮蔽することで、星形成可能になる。

Fig.2 弱い輻射場の場合 ($I_{21} = 10^{-2}$)

Collapse redshift z_c

弱 → 強

上で示したような形成条件は強い輻射場において実現される。

Fig.3 強い輻射場の場合 ($I_{21} = 1$)

- 超音速落下による形成
- 自己遮蔽効果による形成
- 初期質量がジーンズ質量を超えている場合
- 完全蒸発

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, $N_{\text{DM}} = 2^{18}$ for DM

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

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

□ 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

(i) Select the particles with minimum r_{td}

(ii) Integrate the those particles to new time.

(iii) Using predicted values, determine the new timestep of the integrated particles.

(iv) Go back to (i)

Two-body relaxation (Spitzer & Hart 1971)

$$t_{\text{relax}} = 6.5 \times 10^{10} \text{yr} \left(\frac{M}{10^6 M_{\text{sun}}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\text{sun}}}{m} \right) \left(\frac{r_s}{10 \text{pc}} \right)^{3/2}$$

$M = 10^6 M_{\odot}$ の場合、宇宙年齢 ($\sim 14 \text{Gyr}$) は $2.8 t_{\text{relax}}$ 程度

球状星団

Circular orbit: 400pc

Gravothermal evolution

Surface density $\log (M/\text{pc}^2)$

Radius (pc)

Surface brightness only

Core radius r_c (pc)

V-band magnitude M_v

進化の方向

Fundamental Plane

Surface brightness μ_0 (mag arcsec $^{-2}$)

Core radius r_c (pc)

V-band magnitude M_v

are shown

$m_* \gg m_{\text{DM}}$ である為、DM粒子は外側へ掃き出され、潮汐力によってはぎ取られやすい。

⇒ M_{tot}/M_* ($\propto L/M$) は減少していく。

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. Susa & 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., Susa, 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] Susa, 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。