

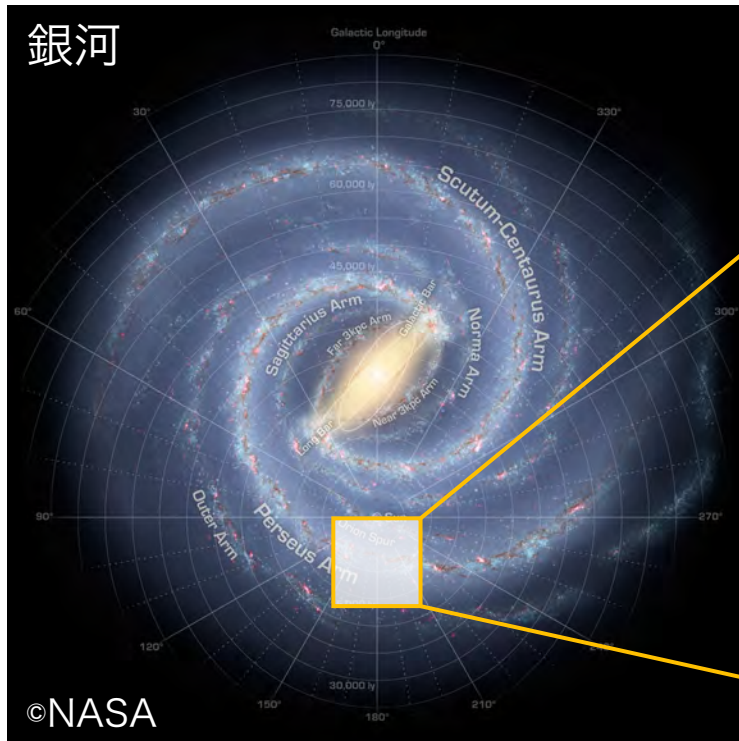
円盤銀河シミュレーションで探る ガスクランプの星形成 Star forming gas clumps in simulated disk galaxies



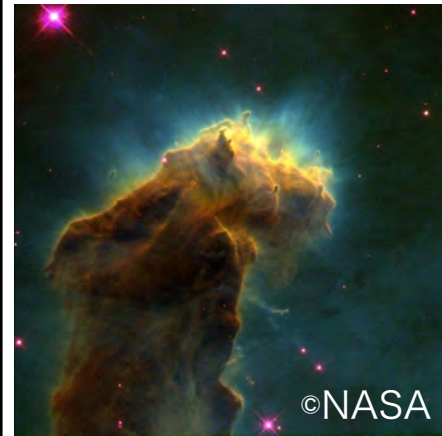
堀江秀（宇宙理論）
共同研究者：矢島秀伸（筑波大学）



銀河における星形成



ガス (クランプ)



形成

星



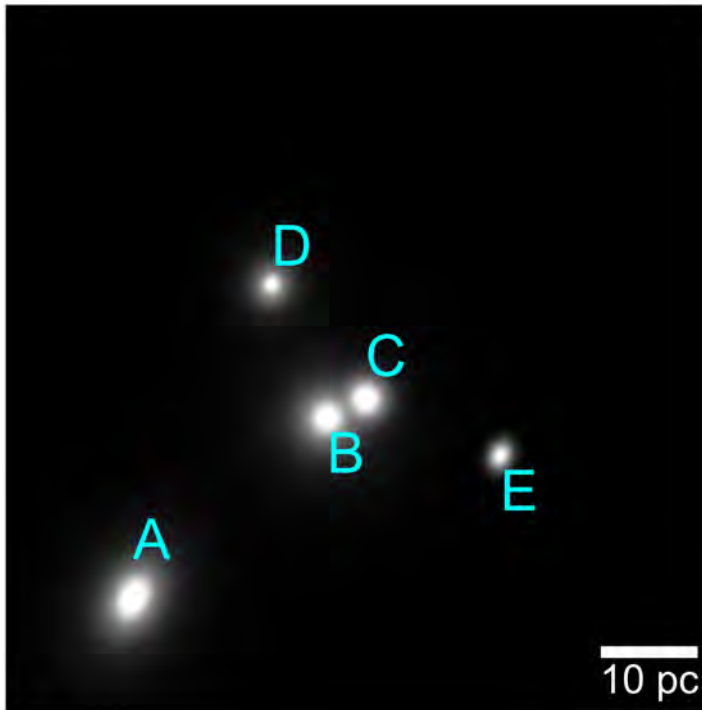
エネルギー
金属

- ✓ 星は銀河の重要な構成要素の一つ
 - 星形成は銀河進化において重要なプロセスの一つ
 - ガスの消費、エネルギーや金属のガスへの注入

遠方銀河での星団形成

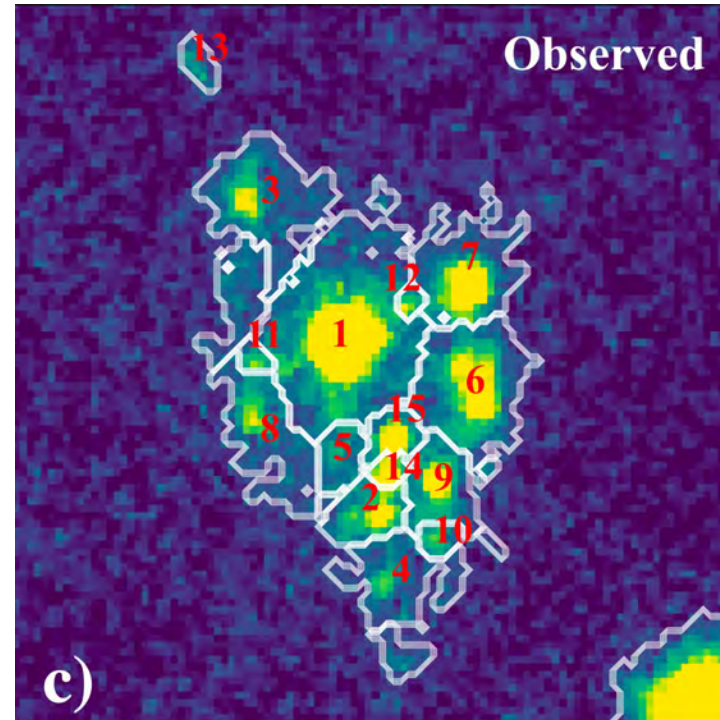
- ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）による観測

$z = 10.2$ (宇宙年齢 ≈ 460 Myr)

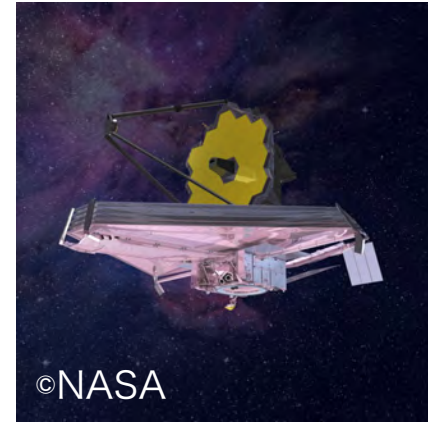


Adamo et al. (2024)

$z = 6.072$ (宇宙年齢 ≈ 1 Gyr)



Fujimoto et al. (2025)



©NASA

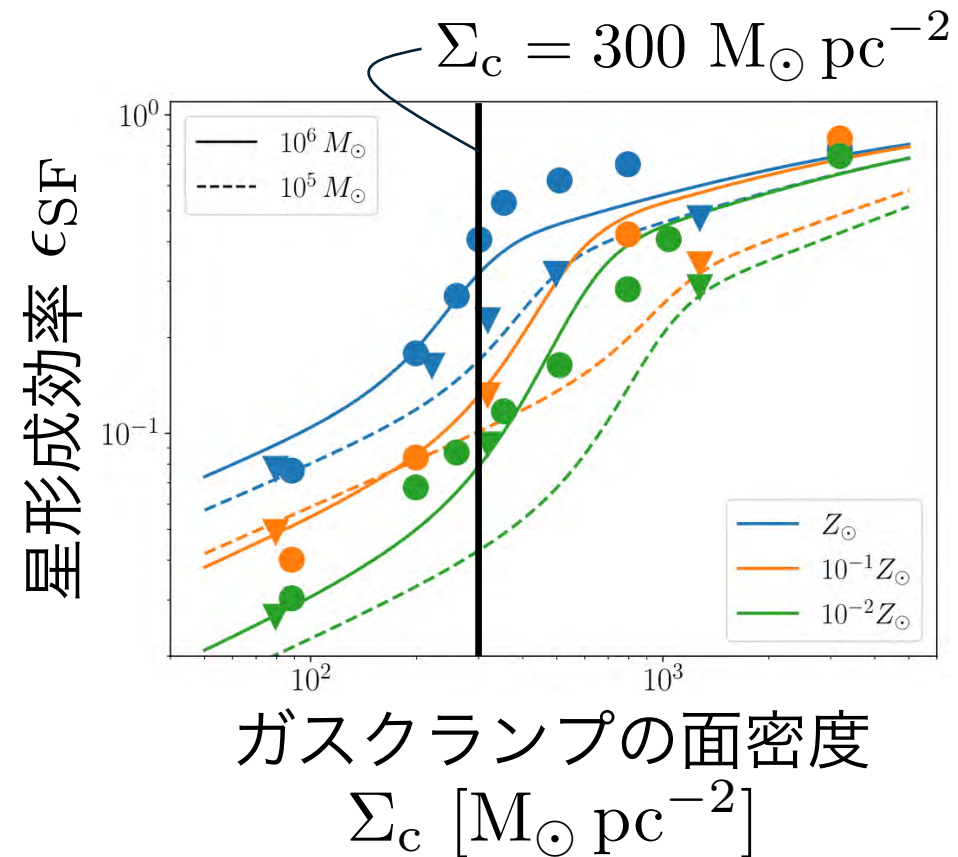
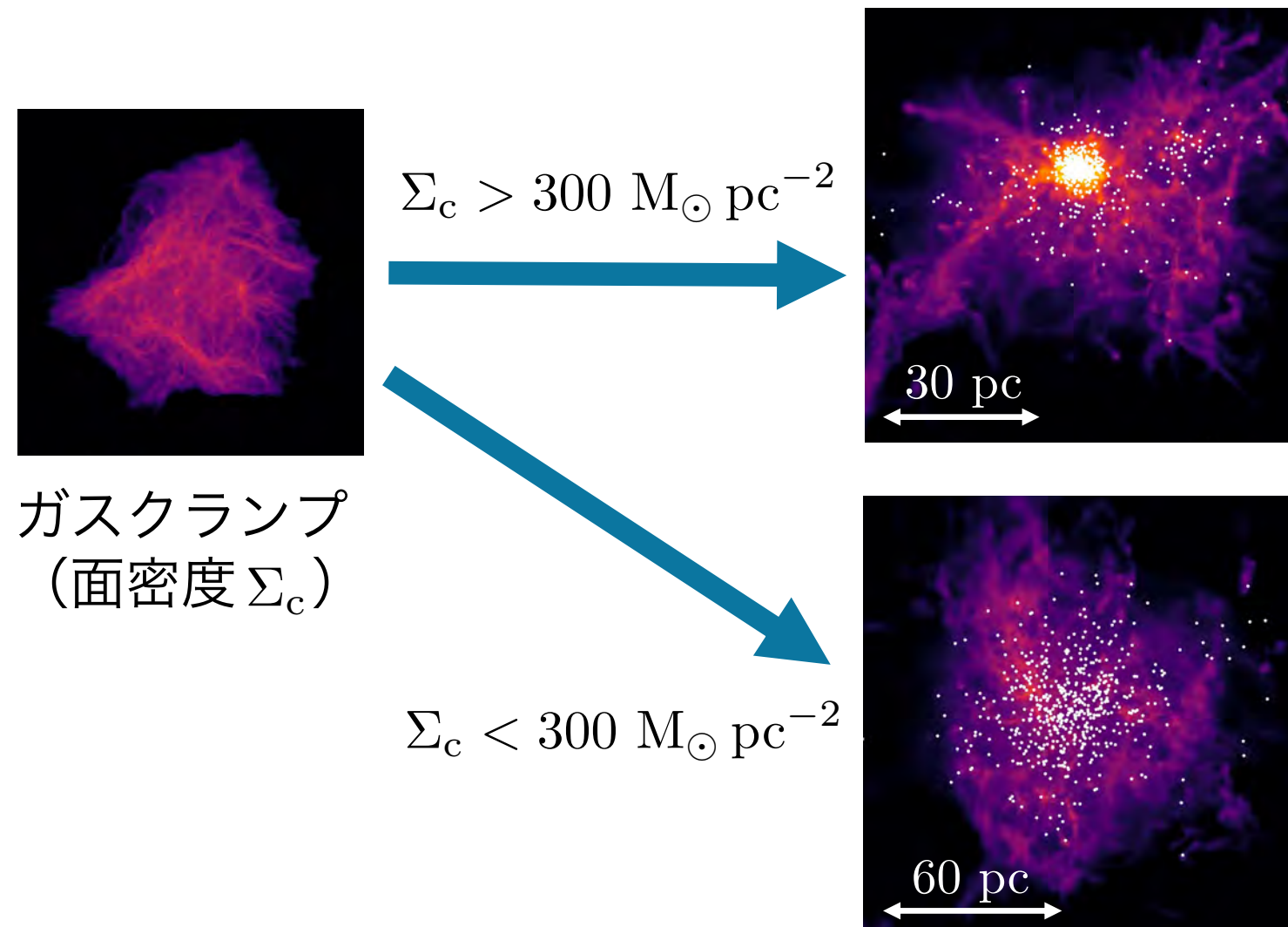
JWST

コンパクトな星団が多数存在

➤ このような星団の形成過程はよく分かっていない

星団形成シミュレーション

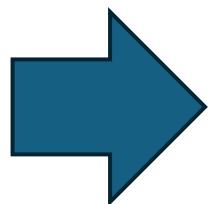
- Fukushima & Yajima (2021)



ガスクラumpの星形成効率
に面密度が強く依存

本研究の目的

- どのような銀河でどのような星団が形成？
 - どのようなガスクランプが形成？



① 銀河シミュレーション

ダークマターハロー



円盤銀河

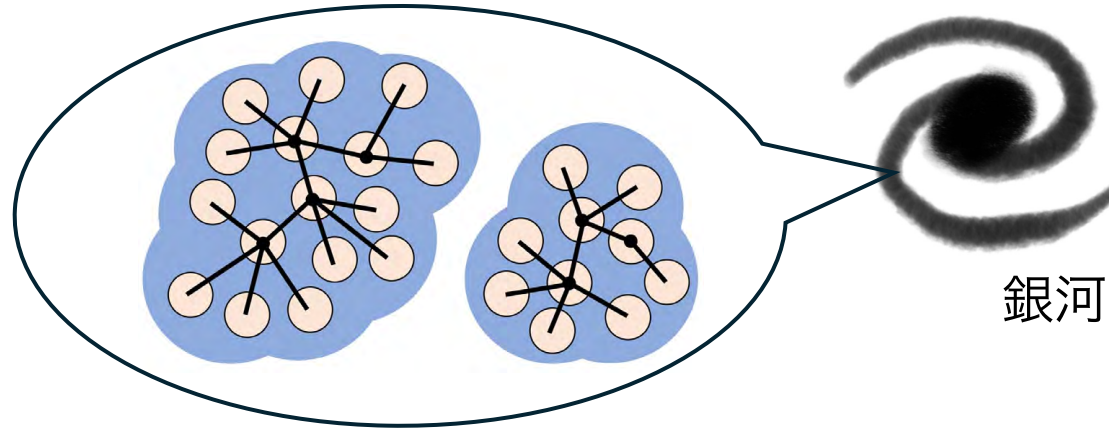
+ 星団形成モデル

- ガスクランプのコンパクト具合に依存

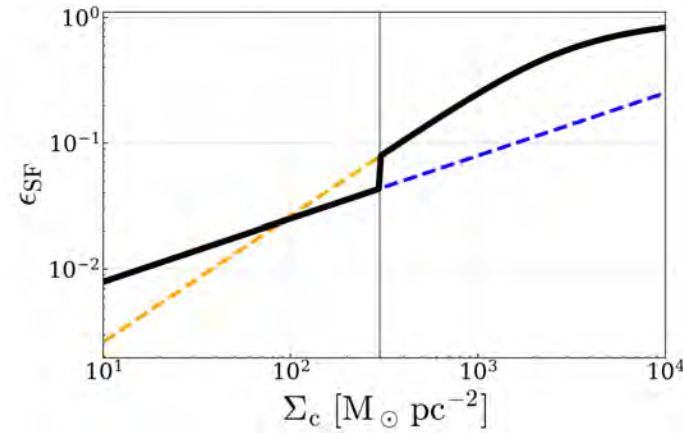
- ## ② 銀河のコンパクト具合とガスクランプのコンパクト具合の関係を調査
- ✓ 赤方偏移の依存性

銀河シミュレーションでの星団形成モデル

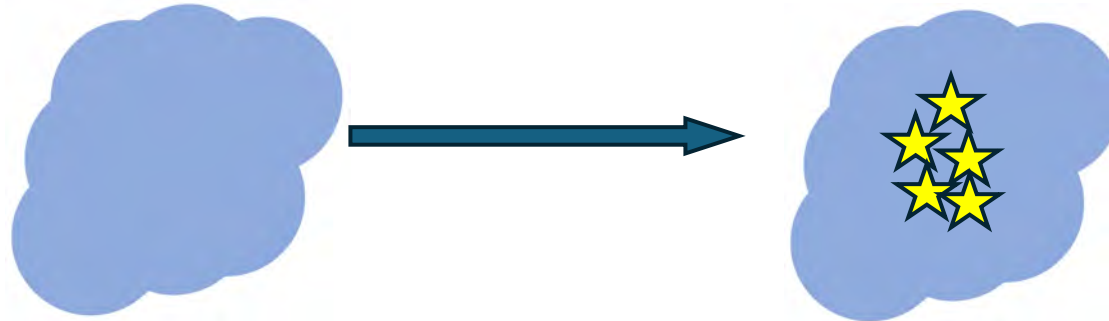
1. ガスクランプ同定



2. ガスクランプの星形成率の計算



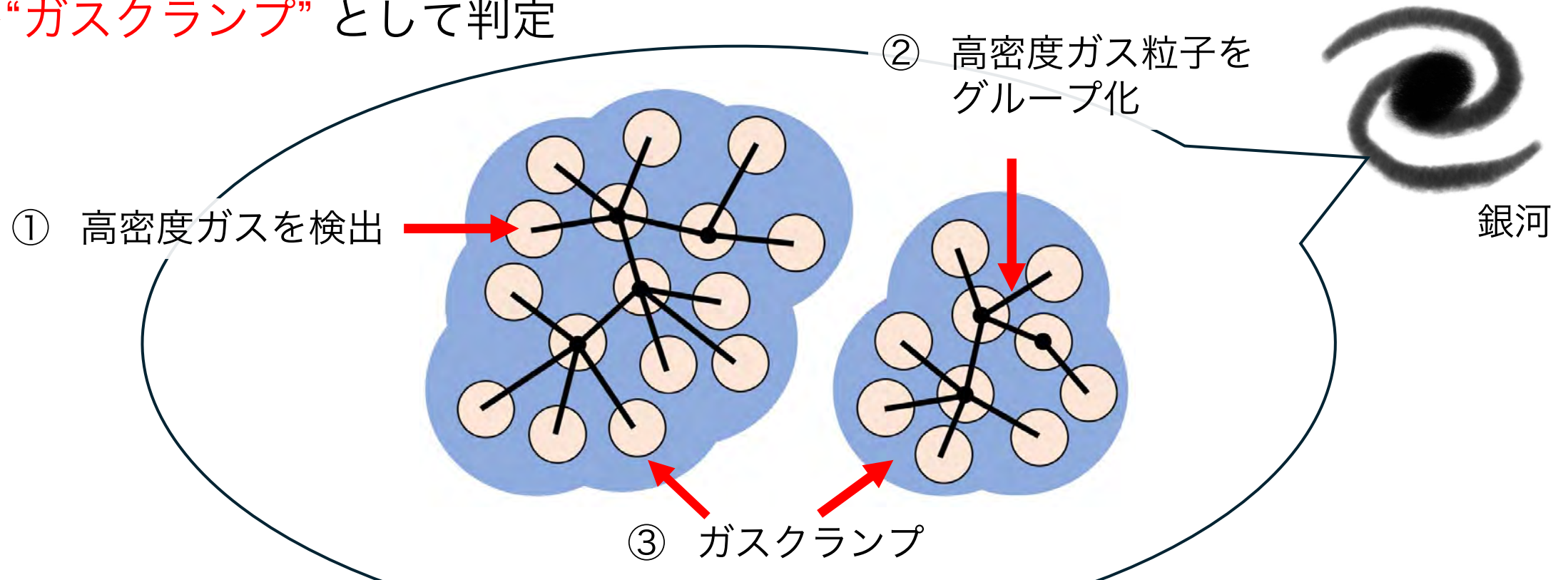
3. ガスの星への変換



銀河シミュレーションでの星団形成モデル

1. ガスクランプ同定

- ① 高密度 ($n_{\text{H}} > 100 \text{ cm}^{-3}$) のガス粒子を検出
- ② 近傍 (10 pc 以内) の高密度ガス粒子を Friends-of-Friends アルゴリズムを用いてグループ化
- ③ グループが 50 個以上のガス粒子で構成
➤ “ガスクランプ” として判定

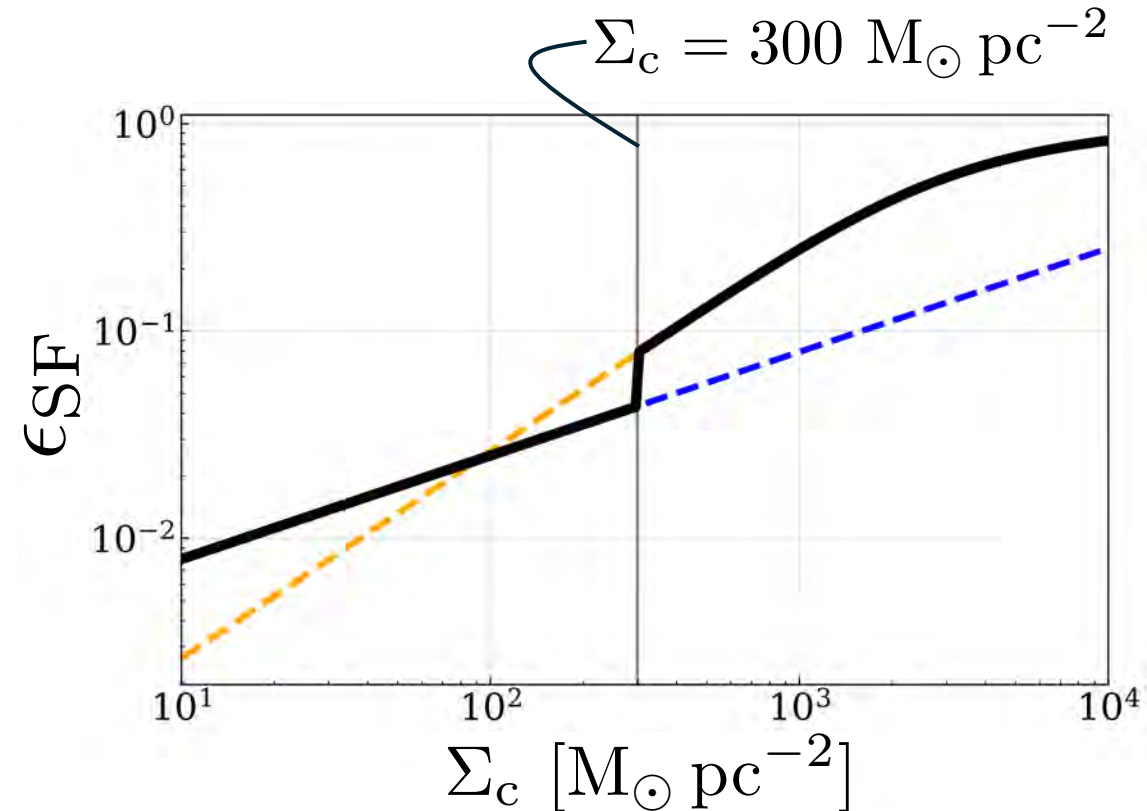


銀河シミュレーションでの星団形成モデル

2. ガスクランプの星形成率の計算

- Fukushima & Yajima (2021) を基に星形成をモデル化 (Yajima 2025)
- 星形成効率 ϵ_{SF} がガスクランプの面密度 Σ_c に依存

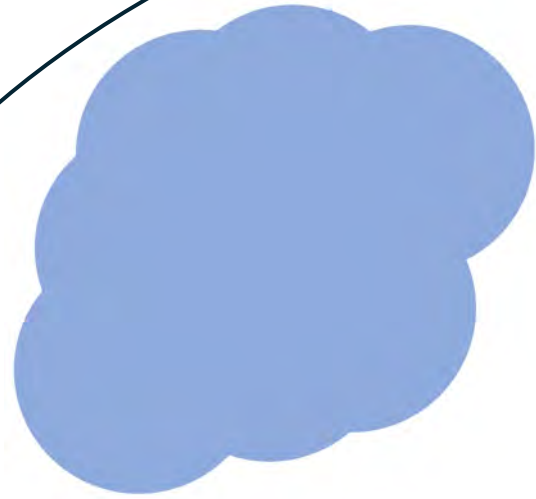
$$\epsilon_{\text{SF}} = \begin{cases} 2.5 \times 10^{-2} \Sigma_{c,100} & \text{for } \Sigma_c < 300 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-2}, \\ 0.5 \left(\sqrt{a^2 \Sigma_{c,100}^2 + 4} - a \Sigma_{c,100}^{-1} \right) & \text{for } \Sigma_c \geq 300 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-2}, \end{cases}$$
$$a = 38.1, \quad \Sigma_{c,100} = \frac{\Sigma_c}{100 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-2}}$$



銀河シミュレーションでの星団形成モデル

3. ガスの星への変換

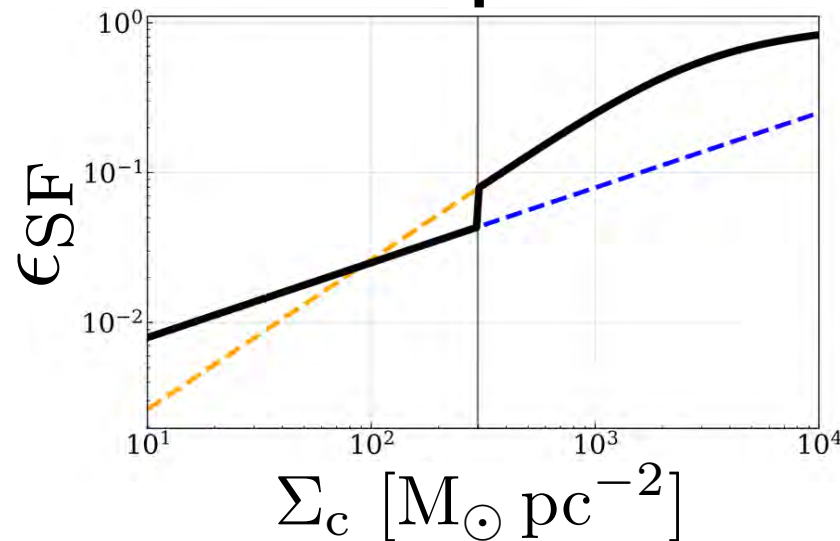
✓ $M_{\star} = \epsilon_{\text{SF}} M_c$ を星に変換



ガスクラump
質量 M_c



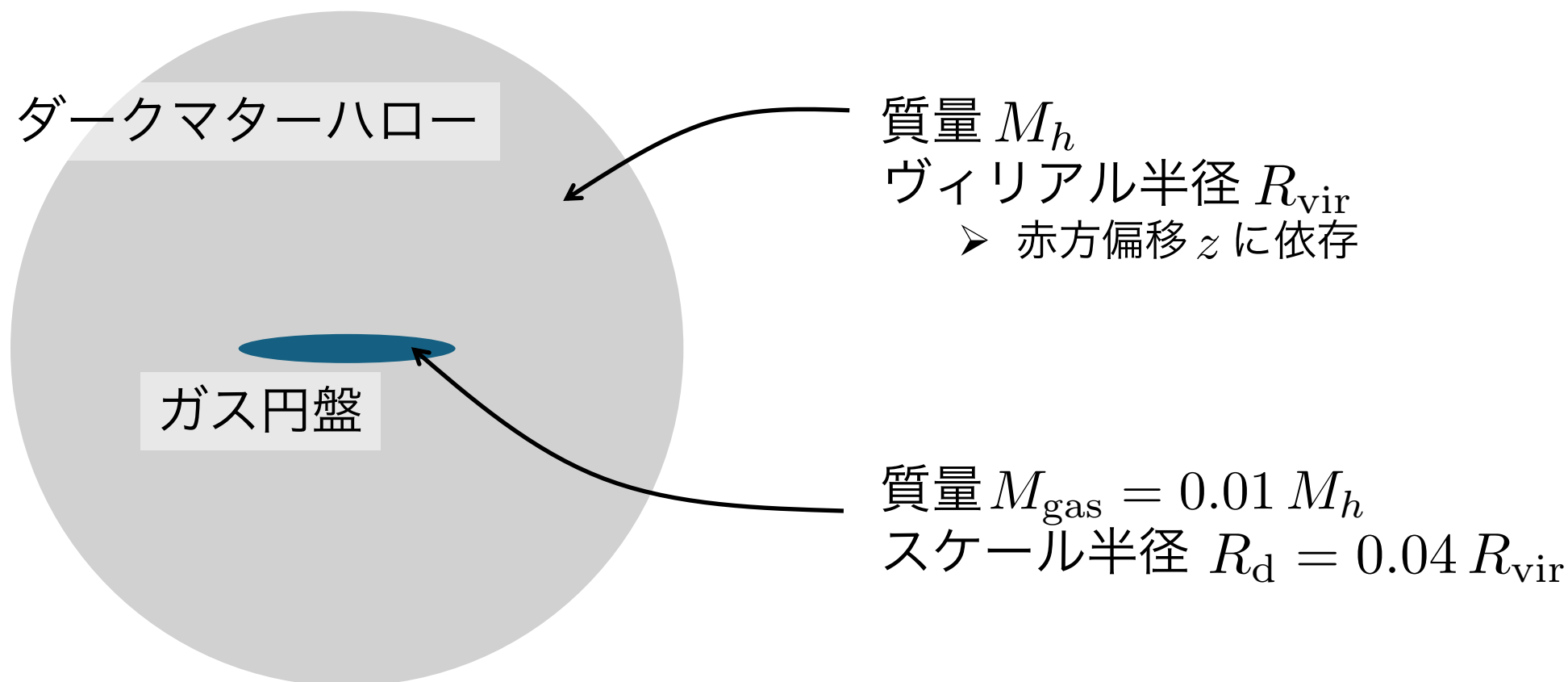
星質量 $M_{\star}$



銀河

円盤銀河シミュレーション

- コード : Gadget3 (Springel 2005)
 - ✓ 重力 + 流体 (SPH) + サブグリッド (星形成、stellar feedback、ガス冷却)
- 銀河モデル



円盤銀河シミュレーション

• 銀河モデル

$$M_h = 10^9 M_\odot$$
$$M_{\text{gas}} = 10^7 M_\odot$$

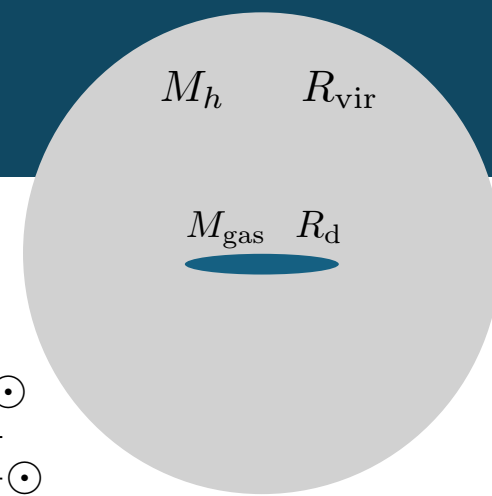
z	R_{vir} [kpc]	R_d [kpc]
0	21.2	0.847
2	10.1	0.404
4	6.18	0.247
6	4.43	0.177
8	3.45	0.138
10	2.83	0.113

$$M_h = 10^{10} M_\odot$$
$$M_{\text{gas}} = 10^8 M_\odot$$

z	R_{vir} [kpc]	R_d [kpc]
0	45.6	1.825
2	21.8	0.870
4	13.3	0.533
6	9.55	0.382
8	7.44	0.297
10	6.09	0.243

$$M_h = 10^{11} M_\odot$$
$$M_{\text{gas}} = 10^9 M_\odot$$

z	R_{vir} [kpc]	R_d [kpc]
0	98.3	3.931
2	46.9	1.875
4	28.7	1.148
6	20.6	0.823
8	16.0	0.641
10	13.1	0.525

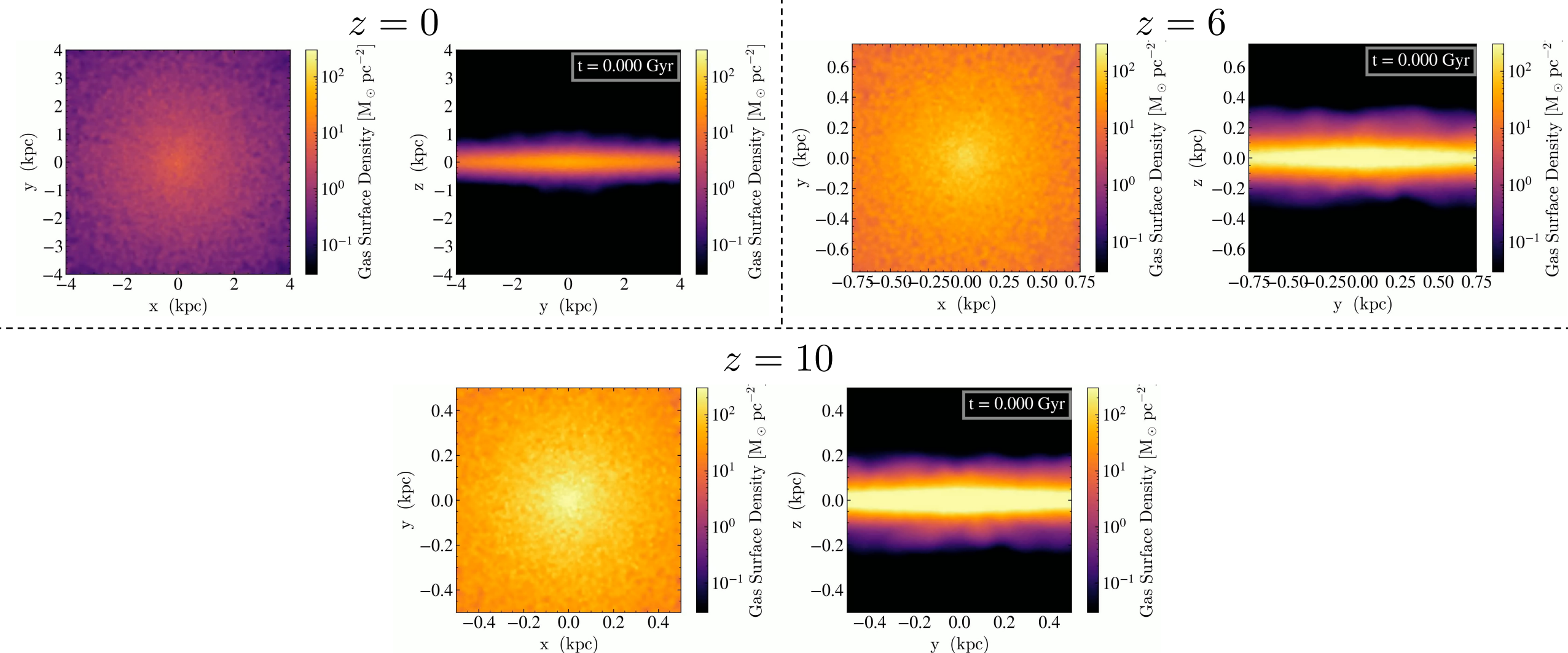


➤ 質量分解能

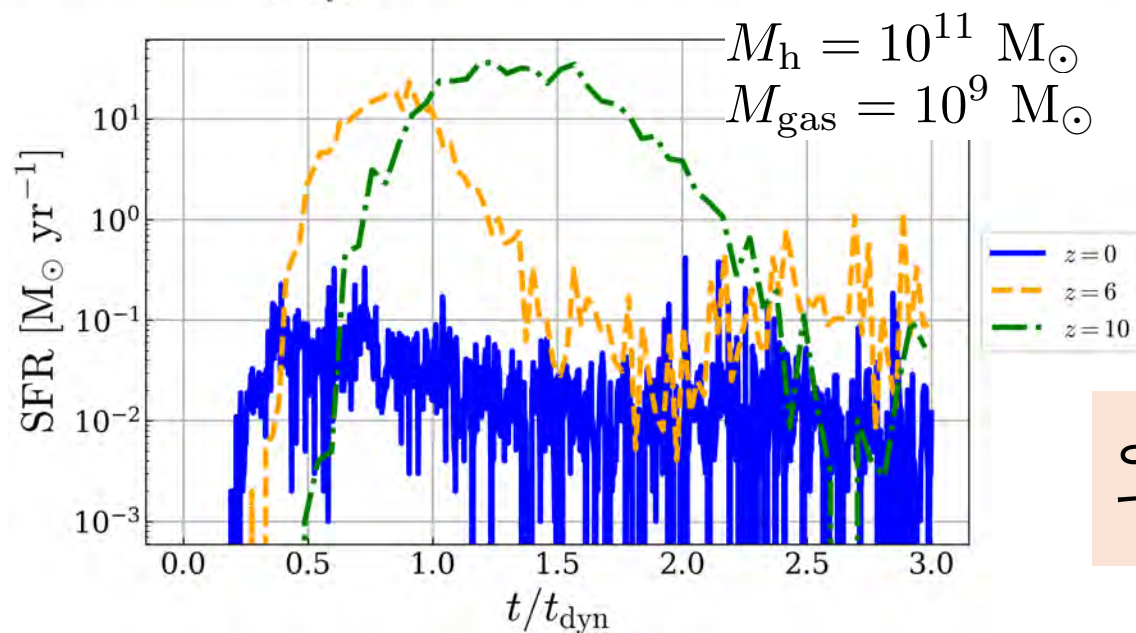
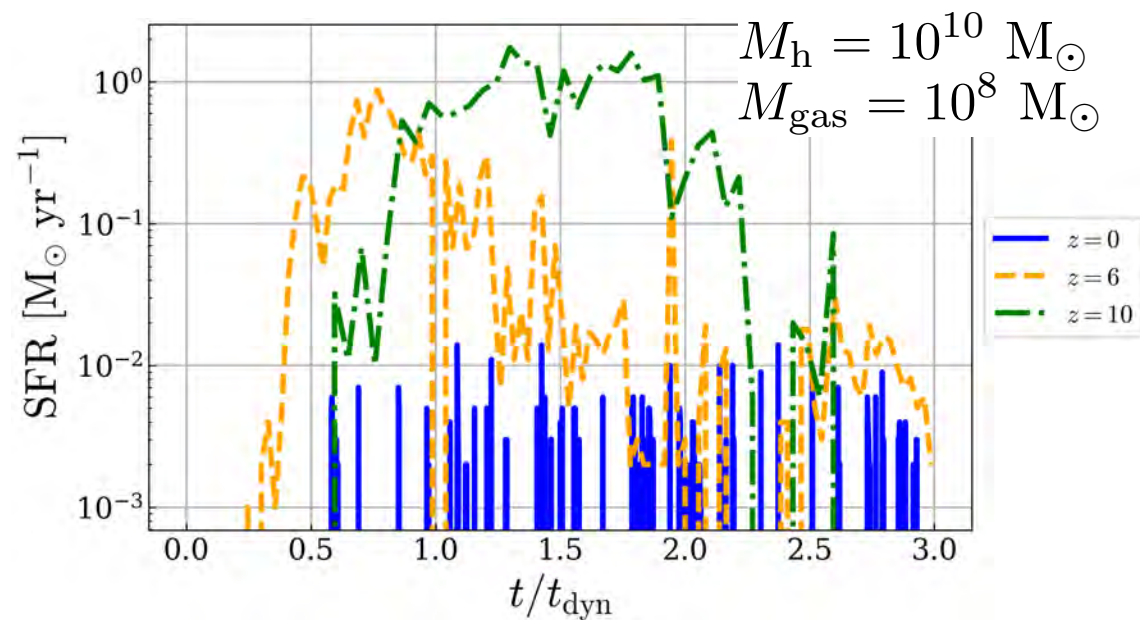
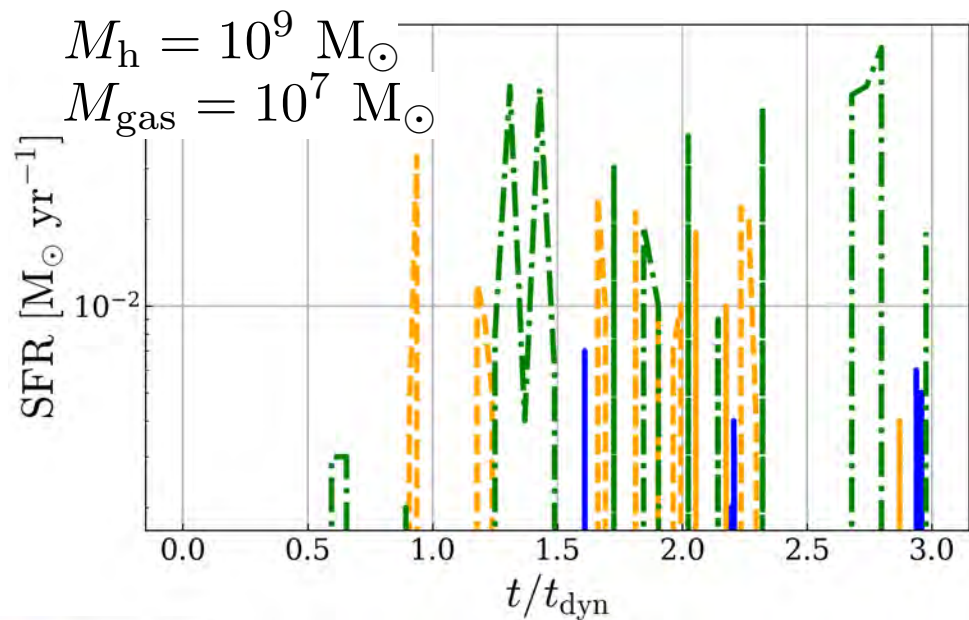
- ✓ ダークマター : $m_{\text{DM}} = 10^5 M_\odot$
- ✓ ガス : $m_{\text{gas}} = 10^3 M_\odot$

円盤銀河シミュレーション

- ガス面密度分布 ($M_h = 10^{10} M_\odot$, $M_{\text{gas}} = 10^8 M_\odot$)

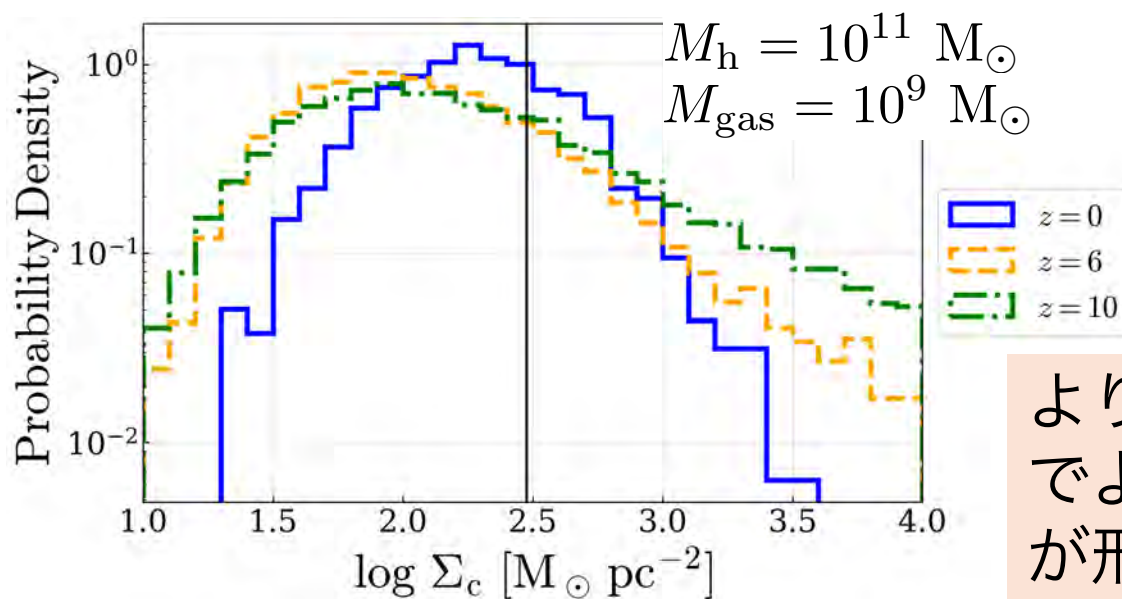
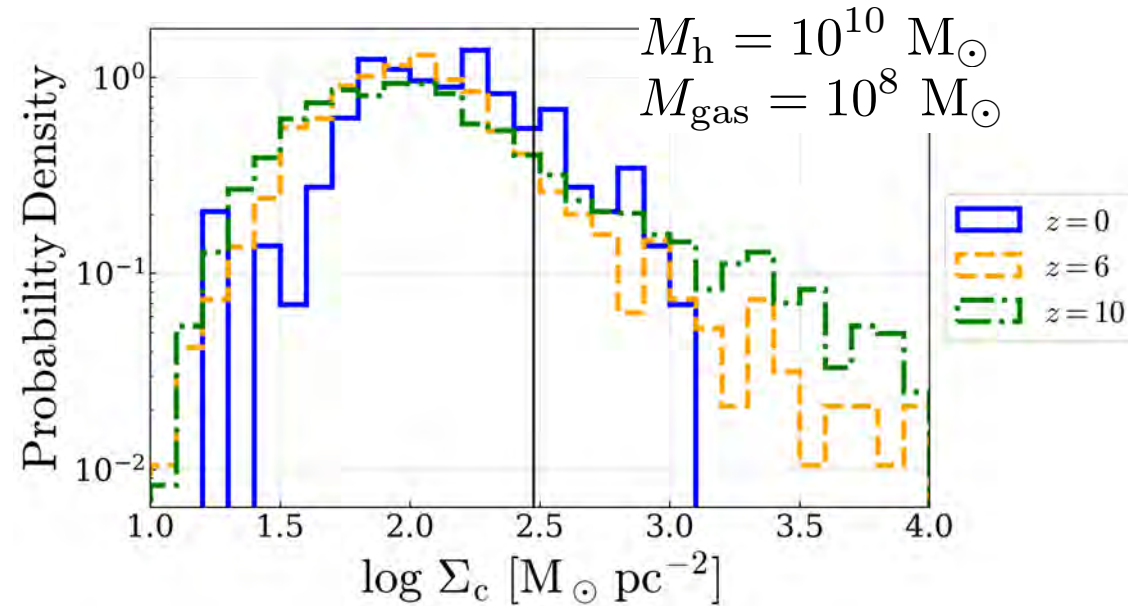
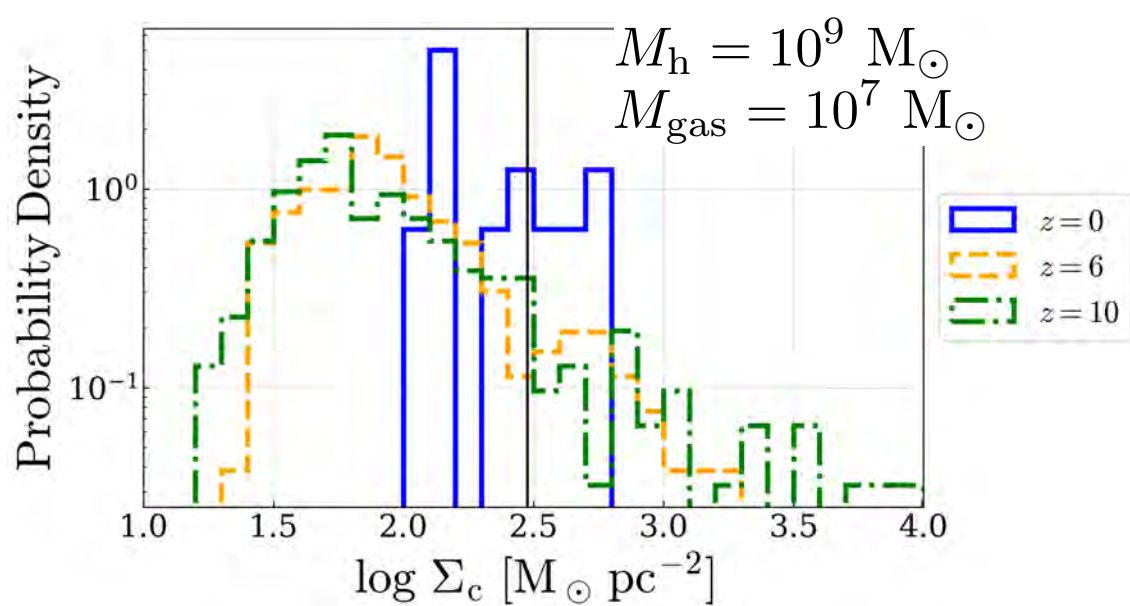


星形成率



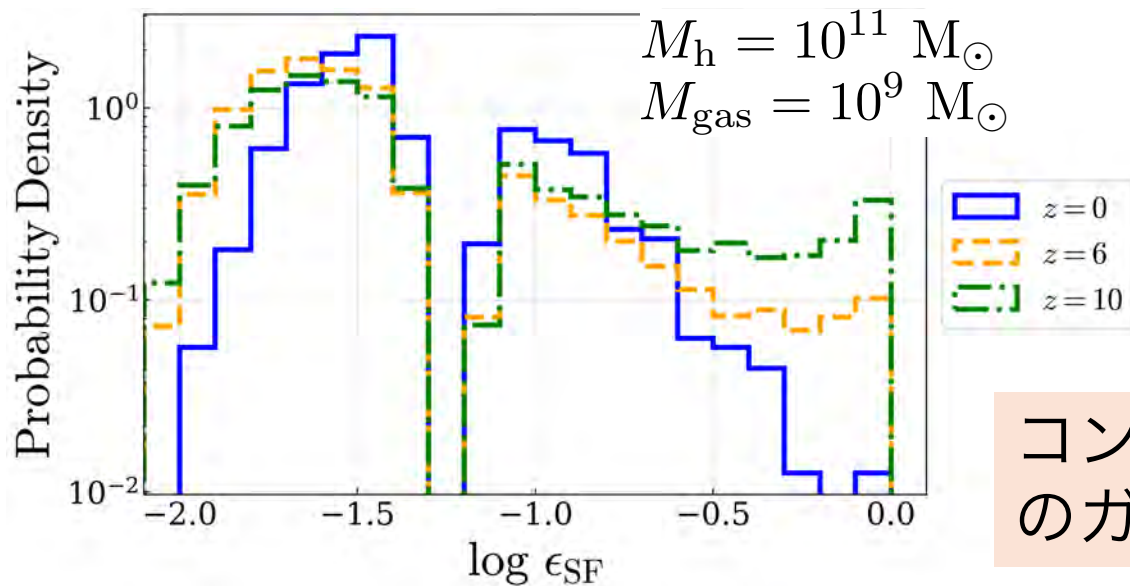
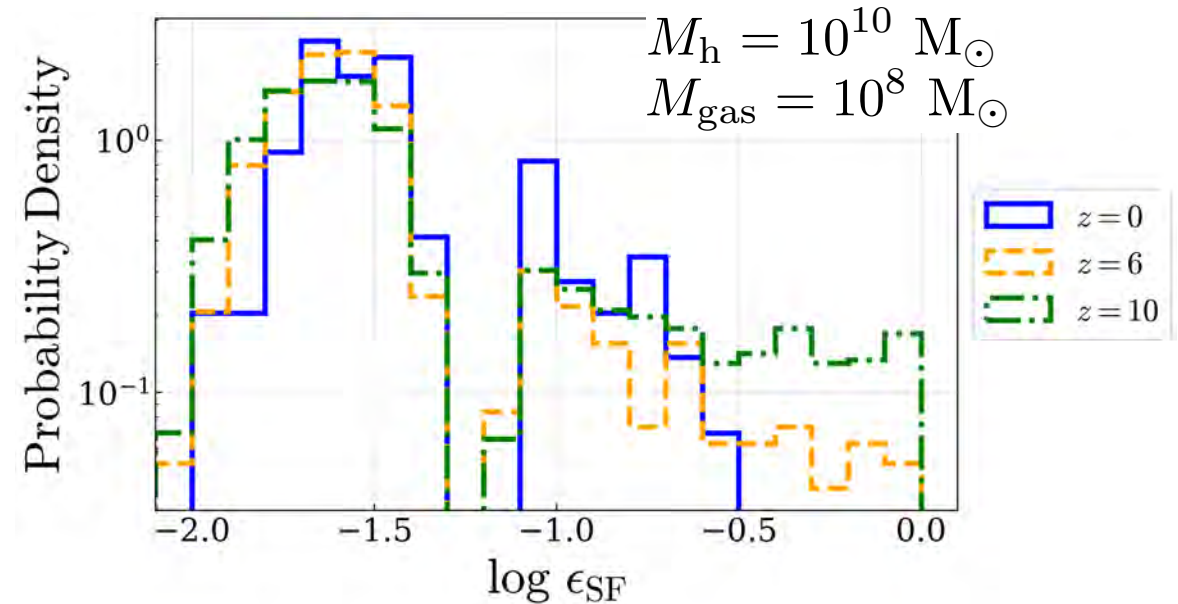
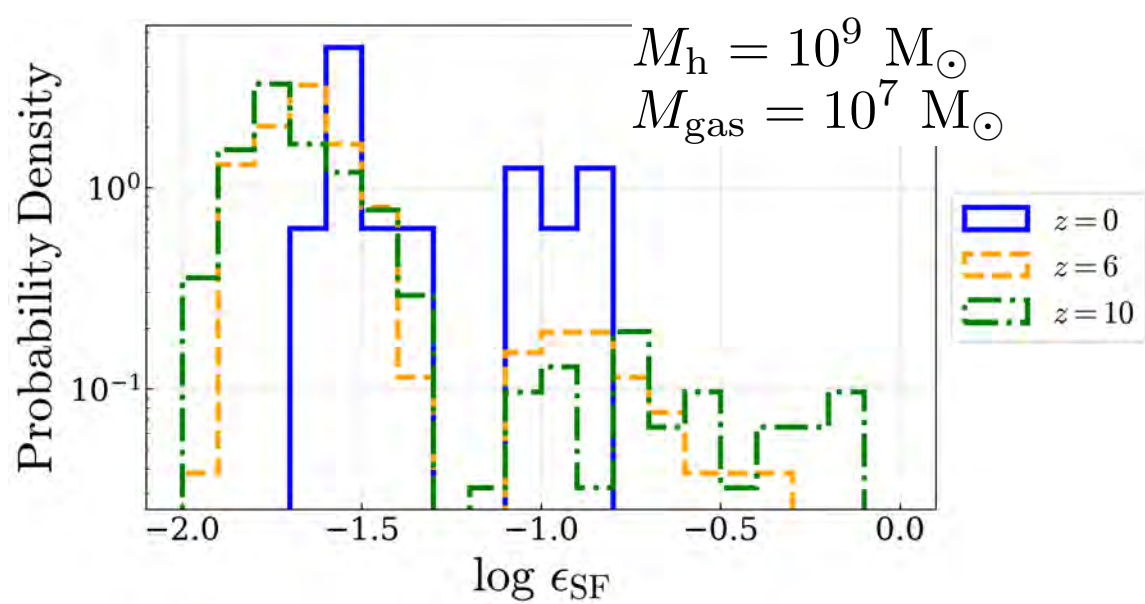
よりコンパクト (= high z) な銀河
でバースト的な星形成

ガスクランプの面密度 Σ_c



よりコンパクト (= high z) な銀河
でより高い面密度のガスクランプ
が形成する傾向

ガスクランプの星形成効率 ϵ_{SF}



コンパクトな銀河で高い星形成効率
のガスクランプが生まれやすい

まとめ

- ガスクランプの面密度に依存した新しい星形成モデルを銀河シミュレーションコードに実装
- この星形成モデルを使って、円盤銀河のシミュレーションを実行
 - ハロー質量： $M_h = 10^9, 10^{10}, 10^{11} M_\odot$ 、ガス円盤質量： $M_{\text{gas}} = 0.01 M_h$
 - 赤方偏移 z に応じて銀河のコンパクトさを変更
 - $z = 0, 2, 4, 6, 8, 10$
- よりコンパクト (= high z) な銀河でバースト的な星形成
- よりコンパクト (= high z) な銀河でより高い面密度のガスクランプが形成する傾向
 - コンパクトな銀河で高い星形成効率のガスクランプが生まれやすい