

コンパクトでクランピーな 超遠方銀河の形成

矢島 秀伸

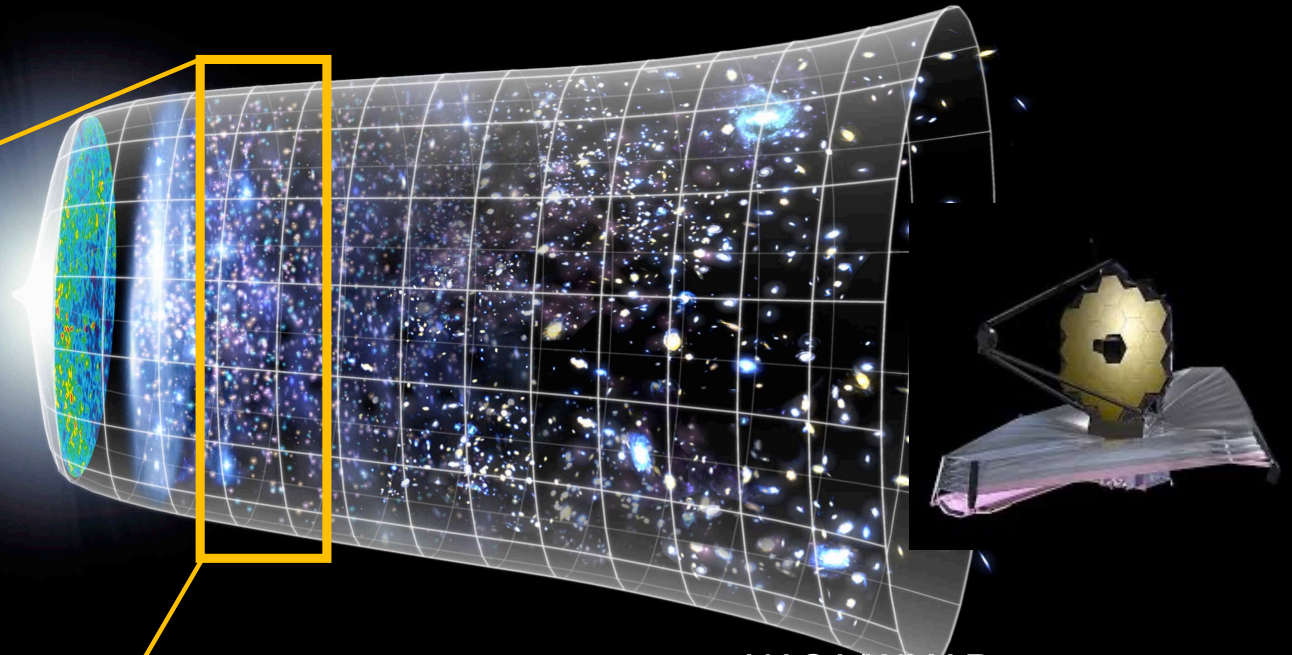
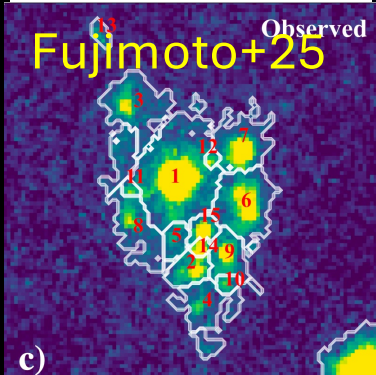
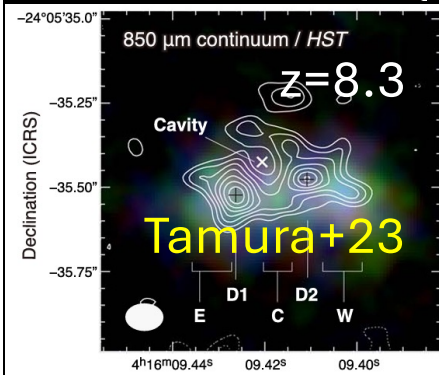
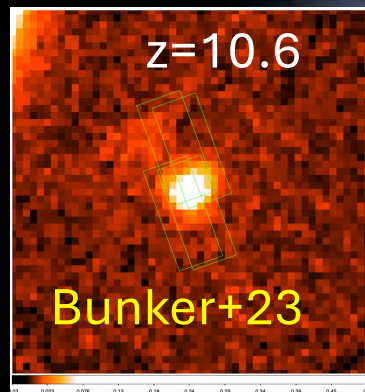
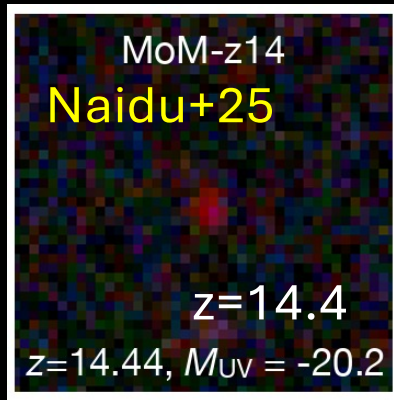
(筑波大学計算科学研究センター)

1. 初代銀河の形成 (with Pop III)
2. 初代銀河の星団形成

銀河形成の人が知りたいこと

- スターバースト
- BHとの共進化
- 形態
- 重元素と多波長特性
- 合体や環境効果

JWSTによる超遠方宇宙探査時代



NASA/WMAP team
最遠方銀河の発見
たくさんのMassive BHs
 $z=10$ でもライマンアルファ輝線
窒素過剰
低金属星団 (球状星団)

超遠方の銀河形成

初代星

Neutral Universe

First stars

Epoch of reionisation

ミニハロー: $10^{5-6} M_{\text{sun}}$
ビリアル温度: $\sim 3000 \text{ K}$
水素分子冷却
1 - a few stars

Sugimura+20, 23

$n_{\text{H}} [\text{cm}^{-3}]$
 10^{10}
 10^9
 10^8

Massive star formation
First metal enrichment
Intense UV radiation

超遠方の銀河形成

初代銀河

Neutral Universe

First stars

Epoch of reionisation

Greif+2008

$z = 10$

Abe, HY+2021

原始冷却ハロー: $>10^{7-8} \text{ Msun}$

ビリアル温度: $\sim 10^4 \text{ K}$

H/He 輝線冷却

星団形成

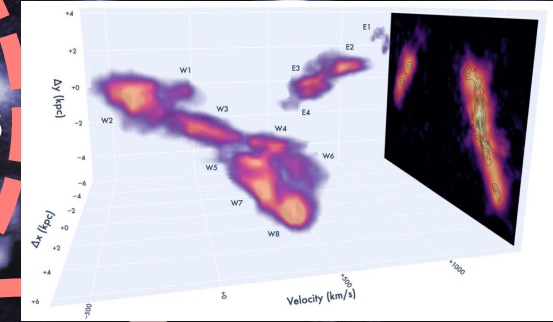
Multiple supernovae
Forming UV background
Environmental effects

超遠方の銀河形成

Dusty galaxies

UV bright
galaxies

QSOs



Neutral Universe

First stars

Epoch of reionisation

大質量ハロー: $> \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$

ビリアル温度: $> 10^5 \text{ K}$

金属冷却

スターバースト

SMBH

観測が可能

With JWST, ALMA, Subaru, Keck, VLT

質量スケール

$10^{13} M_{\text{sun}}$

$10^{12} M_{\text{sun}}$

$10^{10} M_{\text{sun}}$

$10^6 M_{\text{sun}}$

球状星団

初代銀河

Dusty Starburst
銀河

原始銀河団

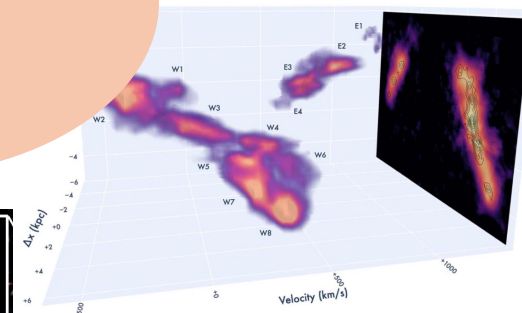
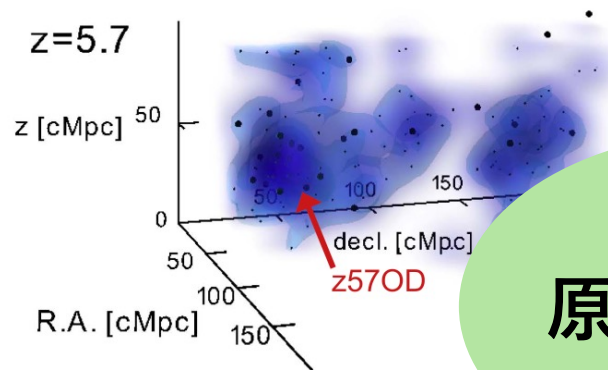
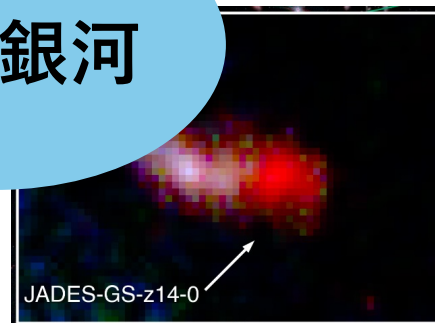
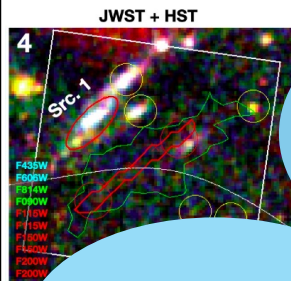
1 pc

1 kpc

100 kpc

1 Mpc

空間スケール



質量スケール

$10^{13} M_{\text{sun}}$

$10^{12} M_{\text{sun}}$

$10^{10} M_{\text{sun}}$

$10^6 M_{\text{sun}}$

JWST

初代銀河

球状星団

SPT/ALMA

Dusty Starburst
銀河

すばるHSC

原始銀河団

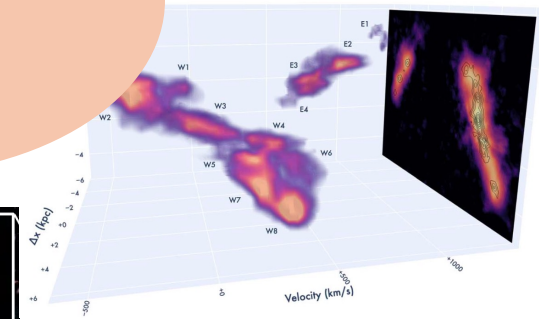
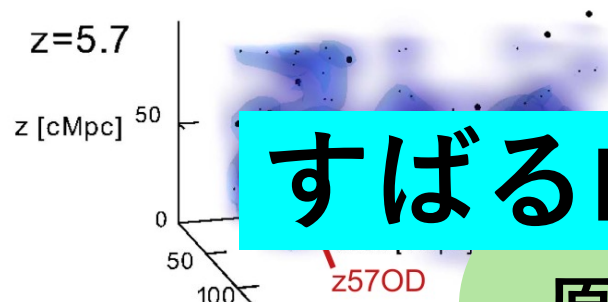
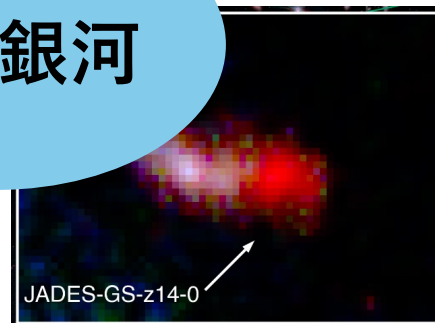
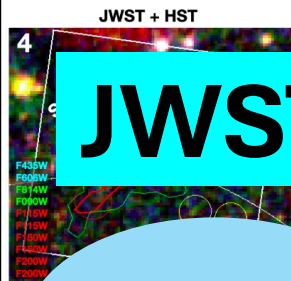
1 pc

1 kpc

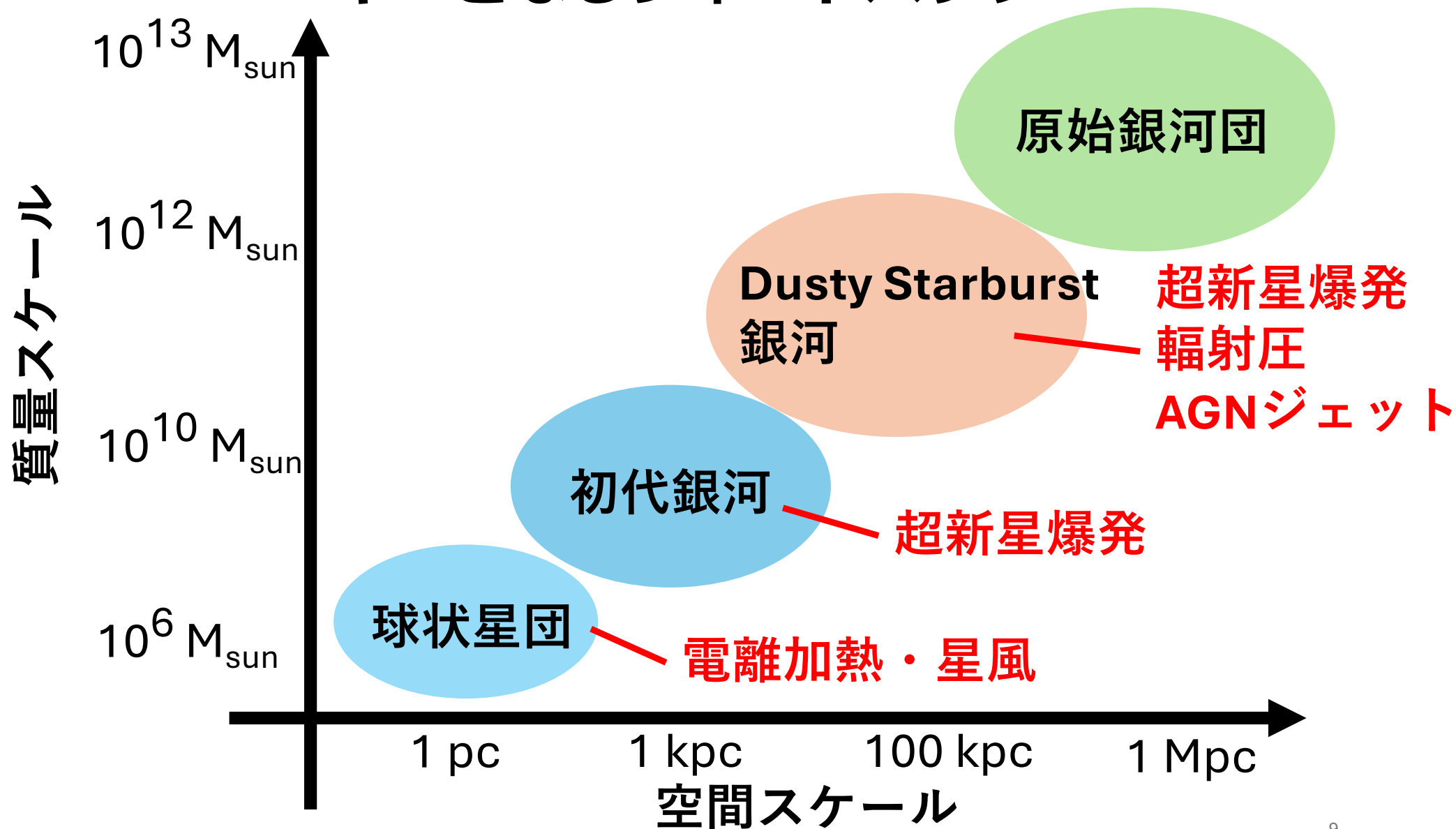
100 kpc

1 Mpc

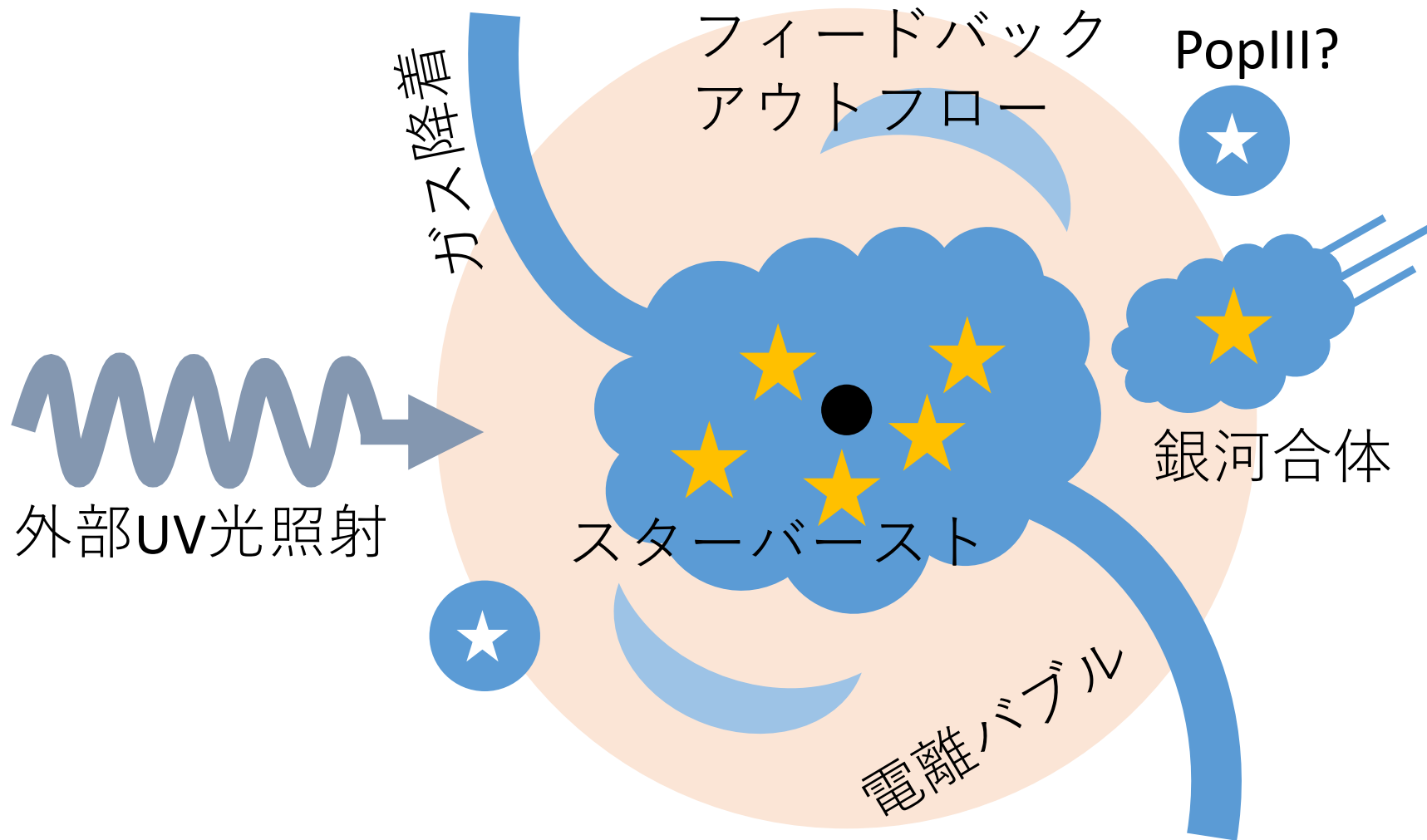
空間スケール



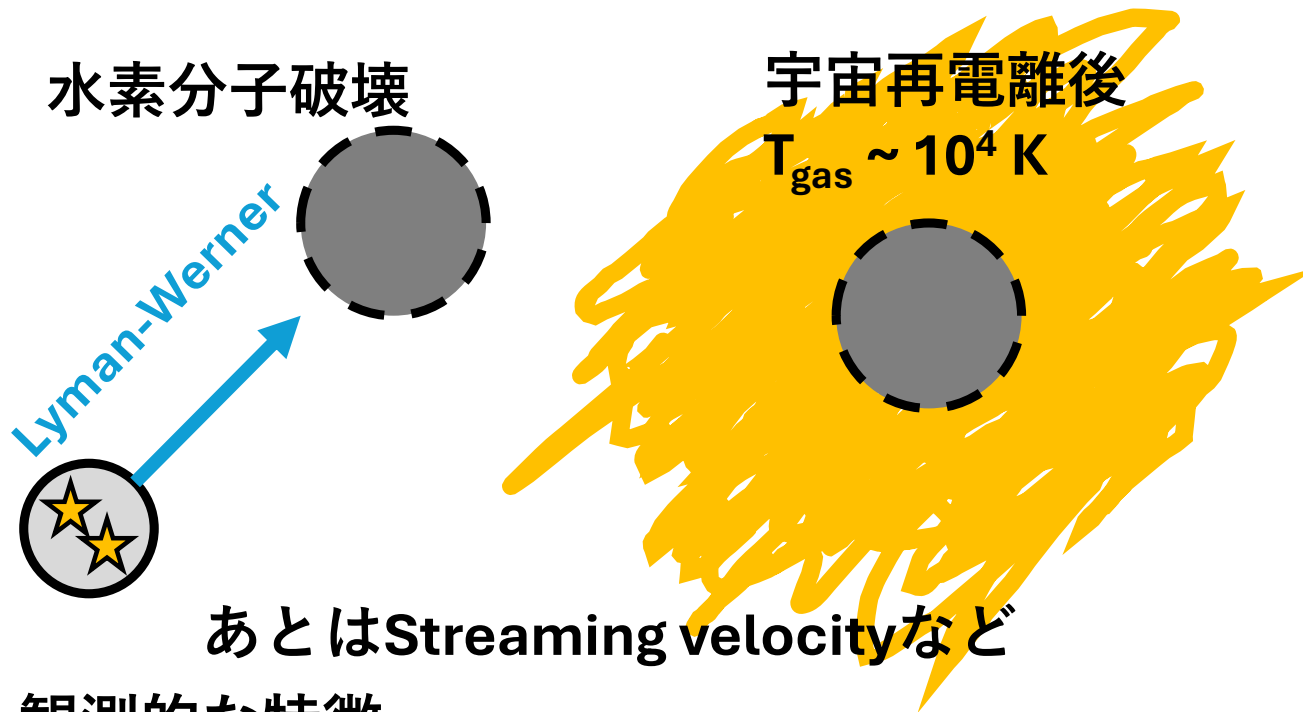
キーとなるフィードバック



超遠方銀河形成過程



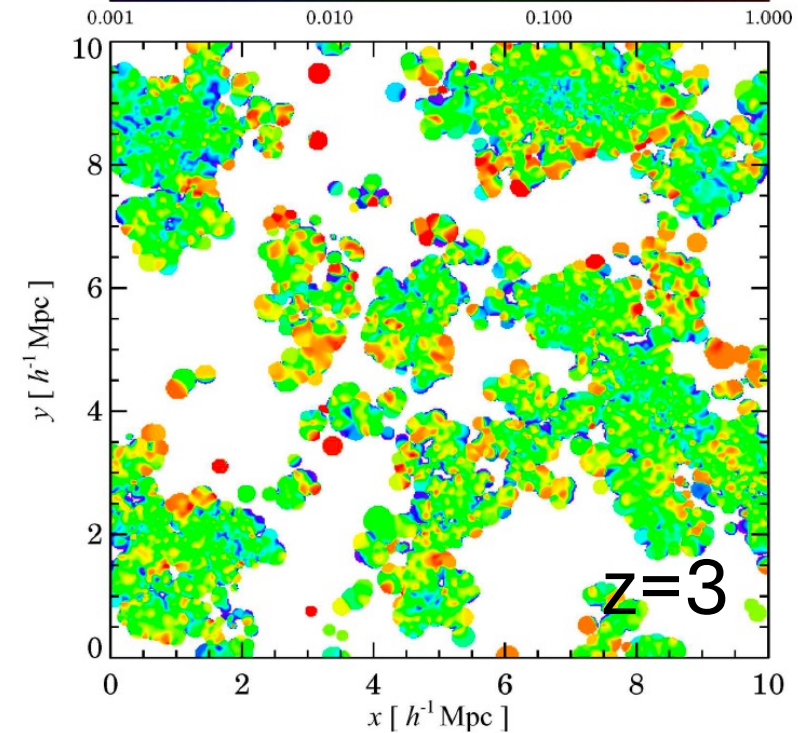
PopIII銀河の形成



観測的な特徴

ライマンアルファなどの輝線の等価幅が大きい
UV連続波が青い
HeII輝線がある
重元素輝線が無い

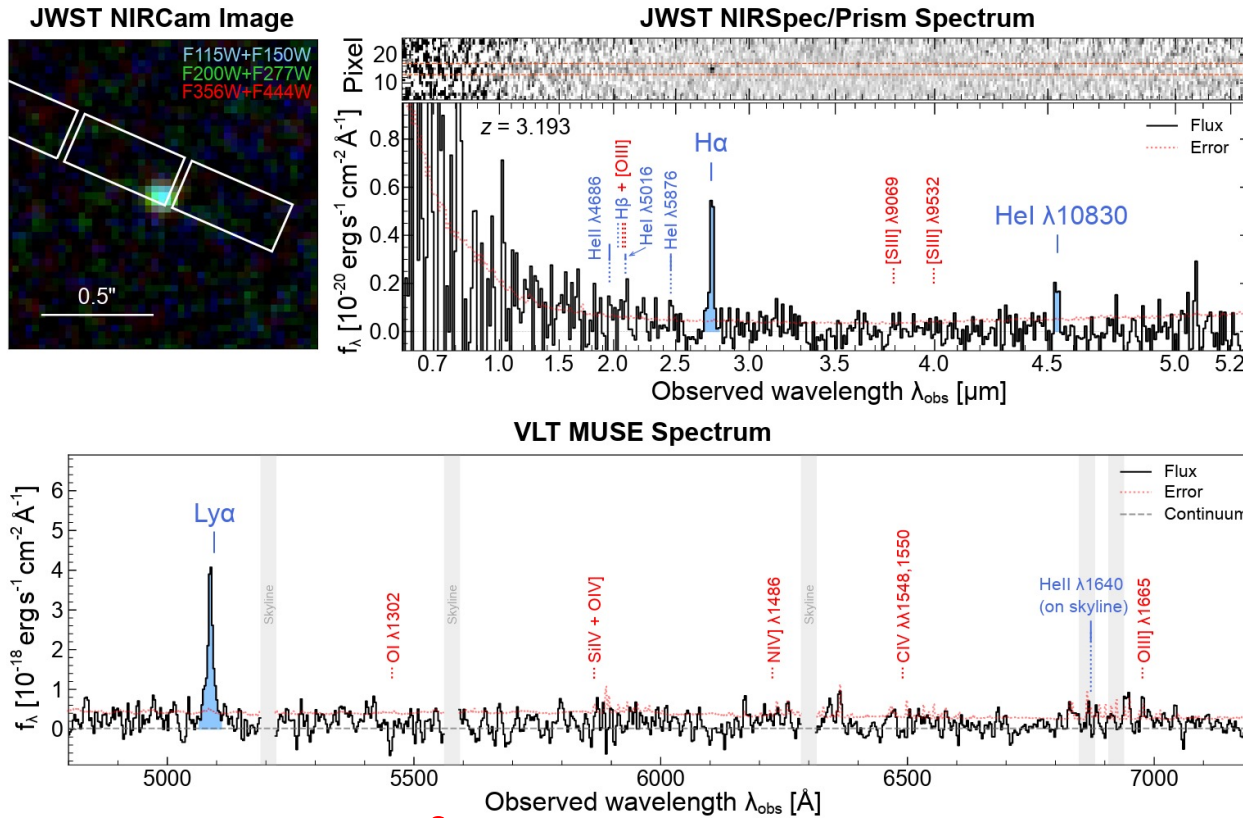
Tornatore & Ferrara (2007)



赤い所がPopIII銀河

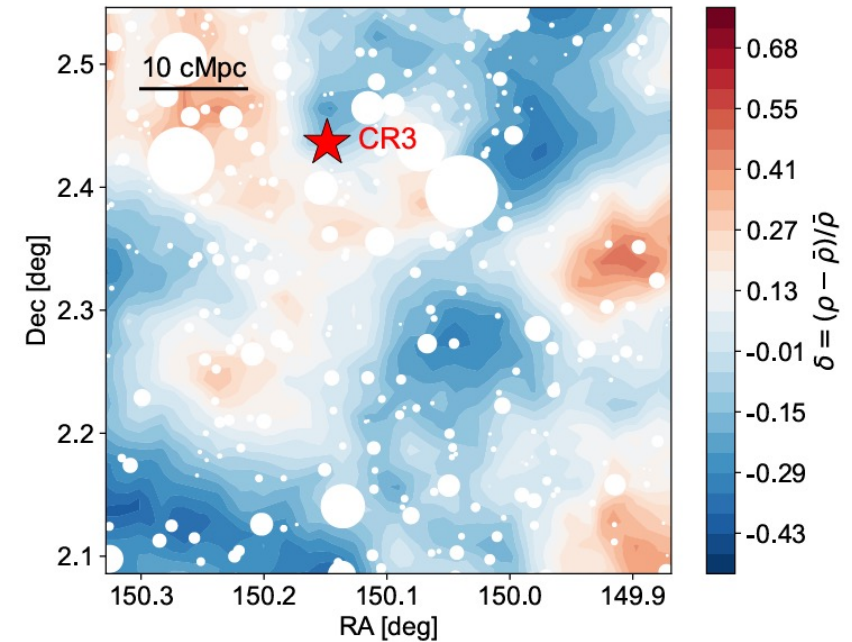
Pop III galaxy at $z=3.19$ (Cai+2025)

$$M_{\text{popIII}} = 6.1 \times 10^5 M_{\text{sun}}, Z < 8 \times 10^{-3} Z_{\text{sun}}$$



$$EW_{\text{Ly}\alpha} = 822 \text{ \AA}$$

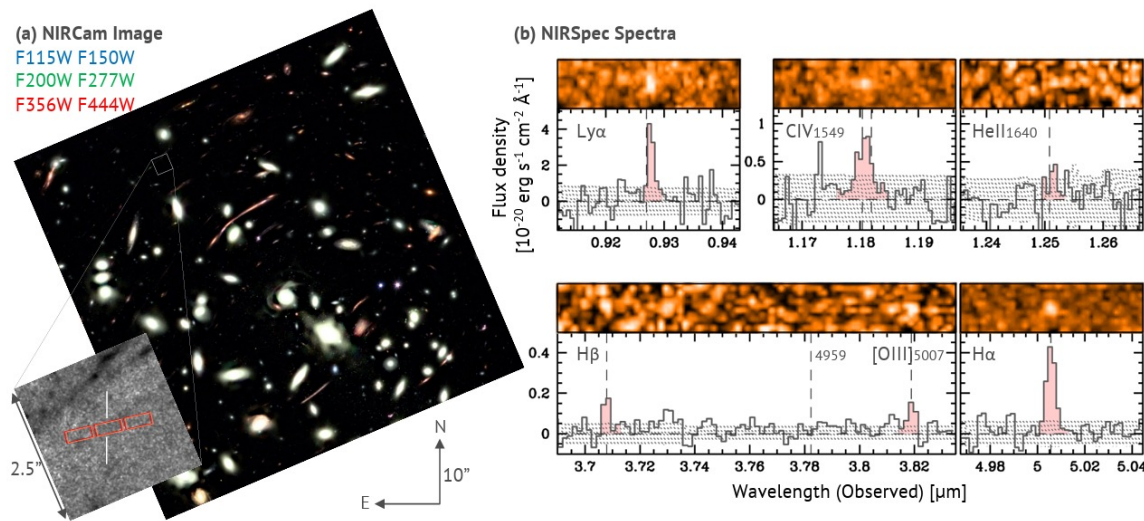
低密度環境?



Pop III星団とmetalの混在？

LAP1-B (z=6.6)

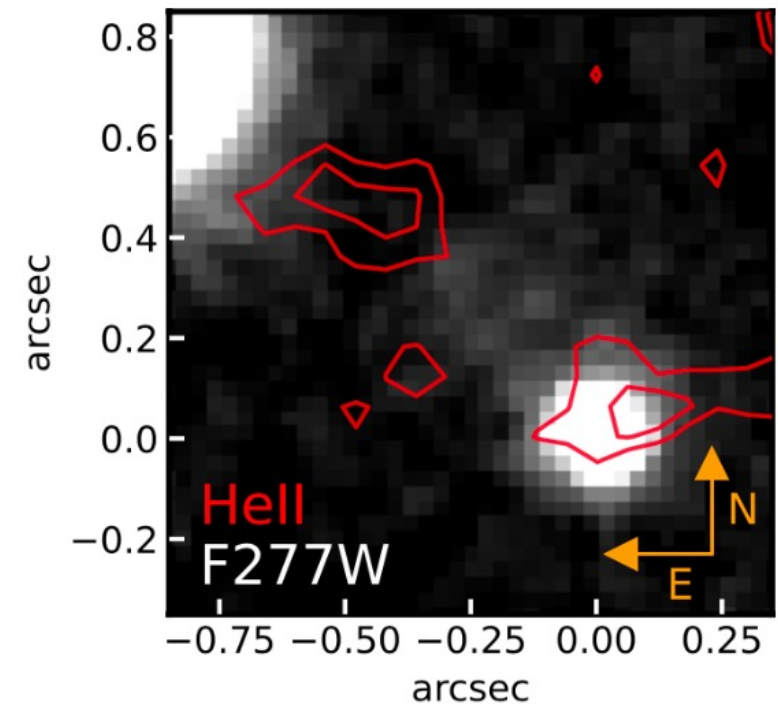
$$M_{\text{star}} < 2700 M_{\text{sun}}, Z = 4.2 \times 10^{-3} Z_{\text{sun}}$$



Nakajima+2025

HeIIは受かっていない

GN-z11 (z=10.6)



Maiolino+(2023)

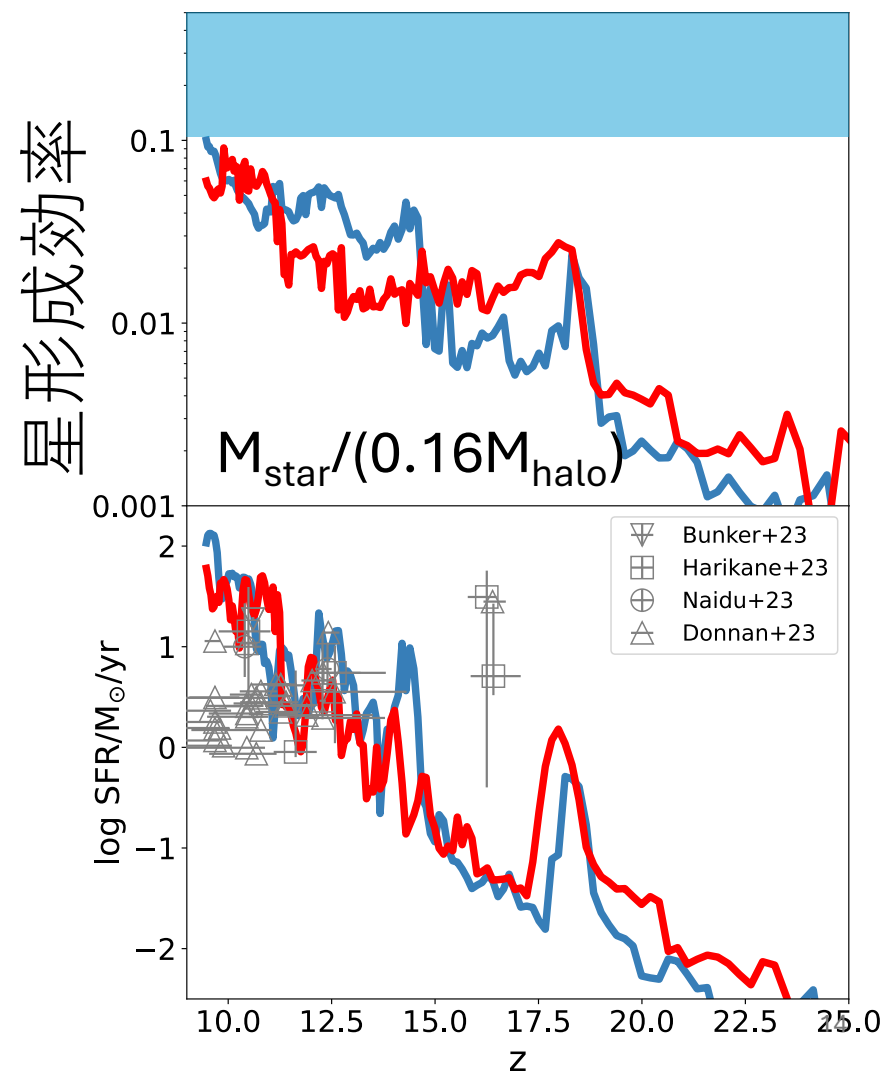
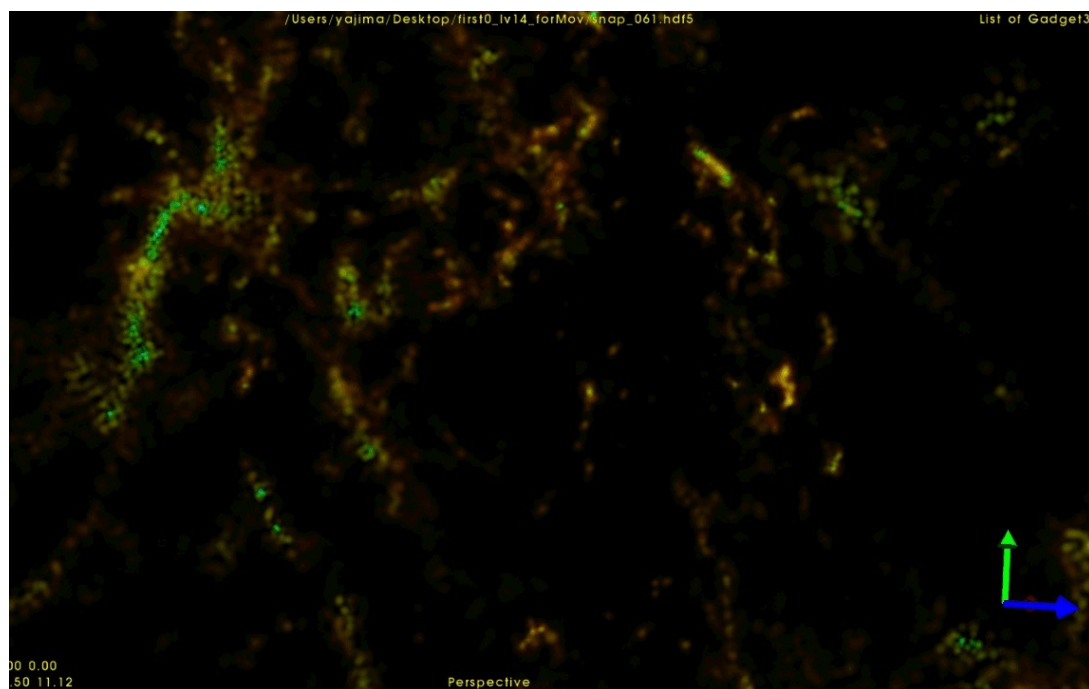
Ly-alphaは受かっていない¹³

原始銀河団

密度超過領域での初代銀河形成

Yajima+(2023)

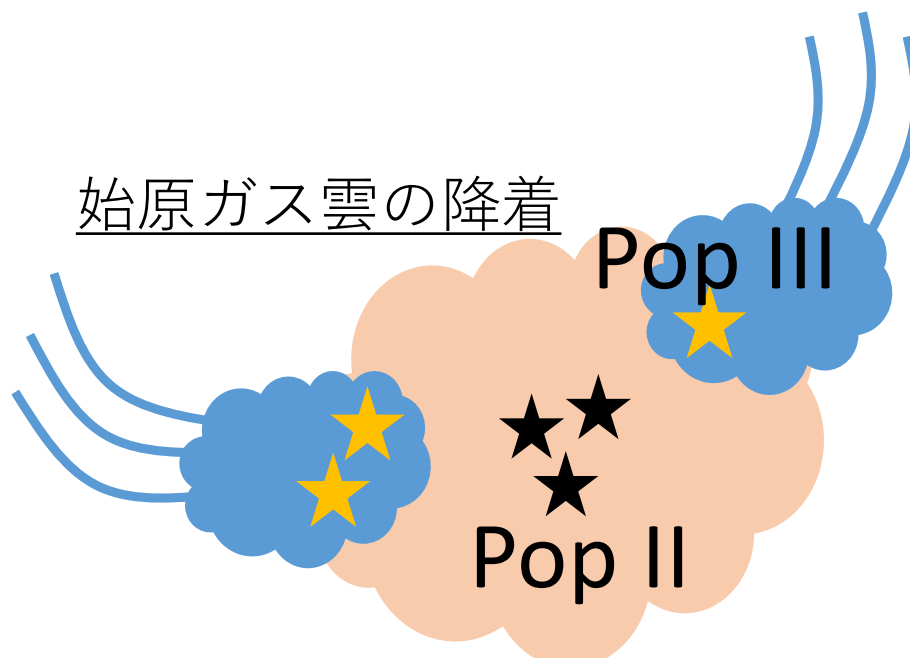
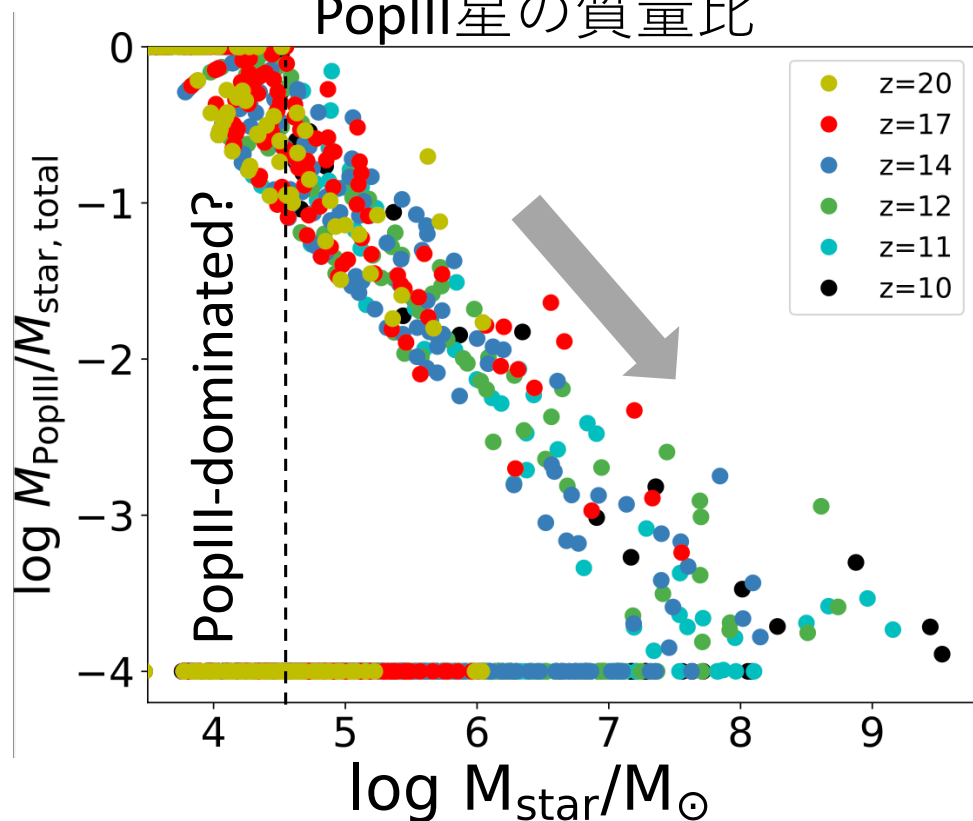
JWST観測の明るい銀河は
再現できているが星形成効率
は大きくない



なめらかなPopIIIからPopIIへの遷移

(Yajima+2023)

PopIII星の質量比



種族III星割合は銀河質量とともに
スムーズに減少

$M_{\text{star}} \sim 10^6 M_{\text{sun}}$ のシステムでは1%程度

種族III星の分布

● Pop II

● Pop III

$$z=10$$

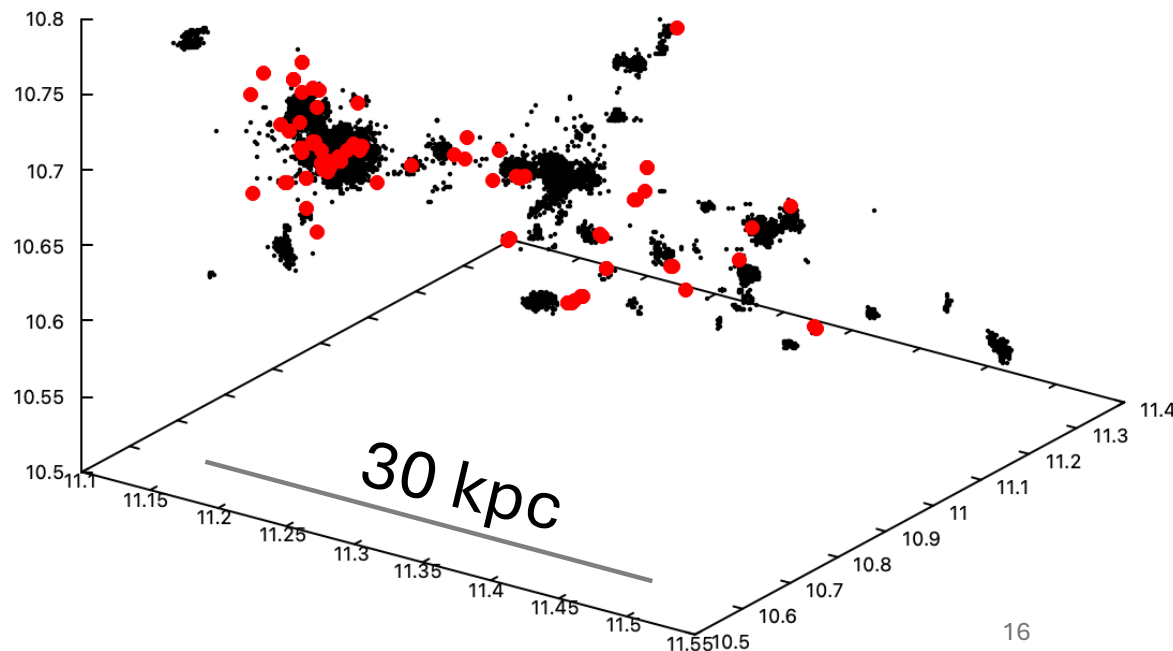
$$f_{\text{popIII}}=0.017\%$$

$$\text{SFR}=41.5 \text{ M}_{\text{sun}}/\text{yr}$$

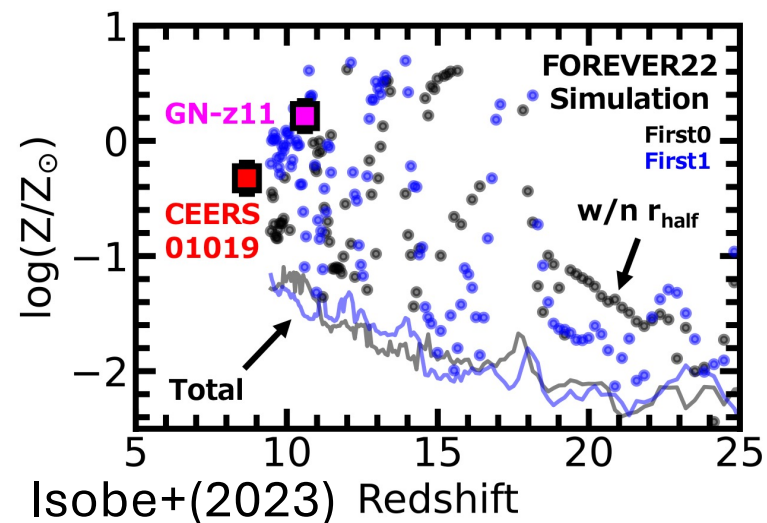
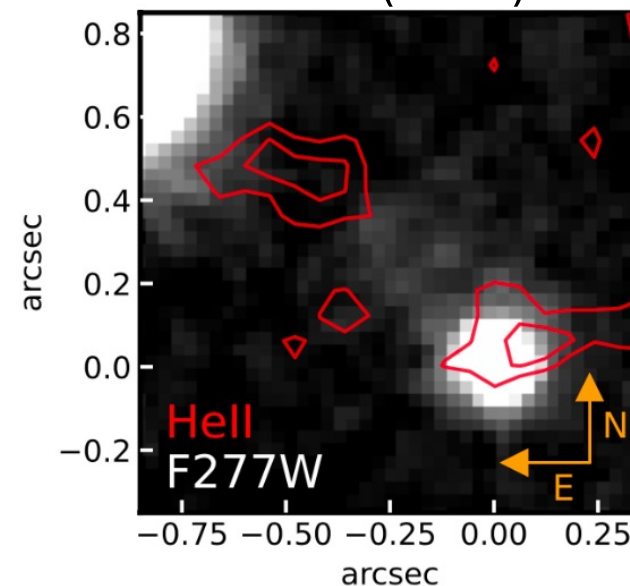
$$M_{\text{star}}=2.8 \times 10^9 \text{ M}_{\text{sun}}$$

$$M_{\text{POPIII}} = 4.8 \times 10^5 \text{ M}_{\text{sun}}$$

$$Z=6.6 \times 10^{-2} Z_{\text{sun}}$$



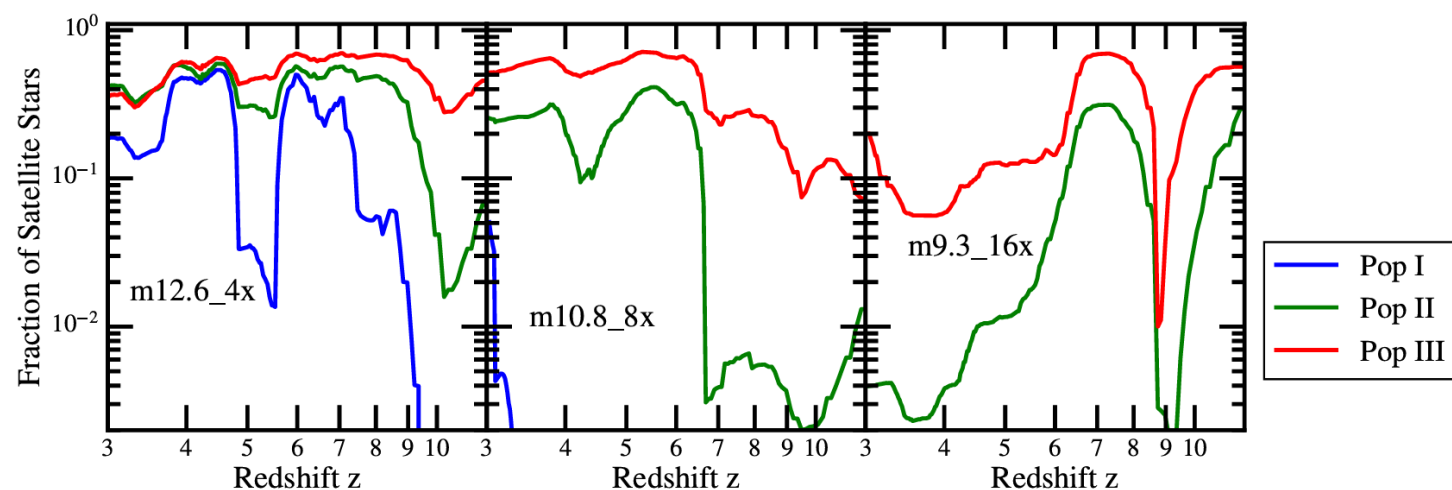
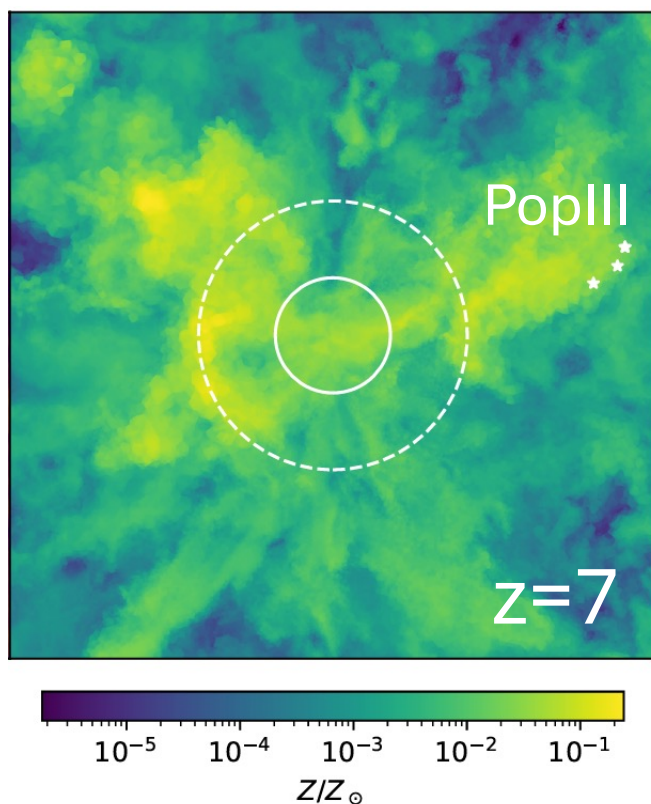
Maiolino+(2023)



Isobe+(2023) Redshift

THESAN-Zoom simulation

Zier+2025

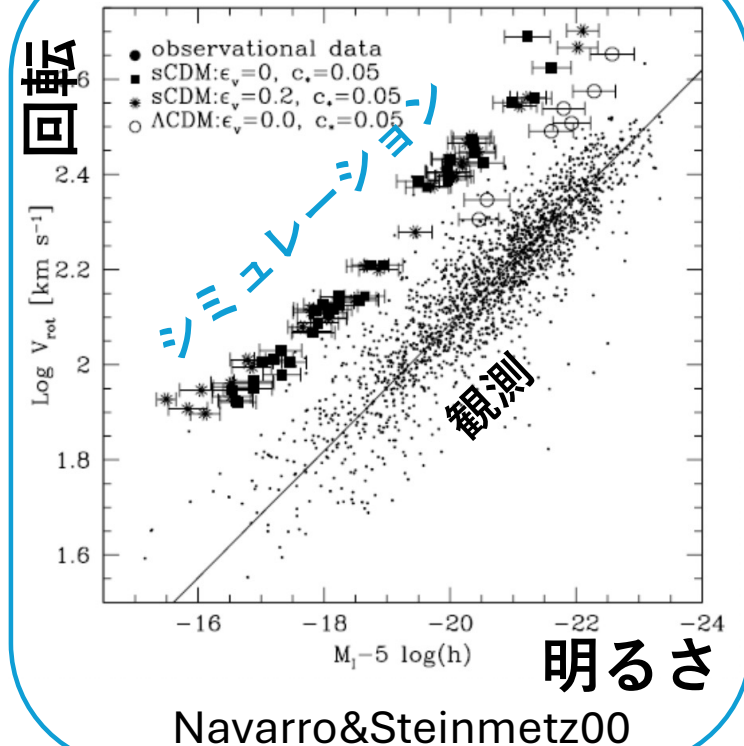
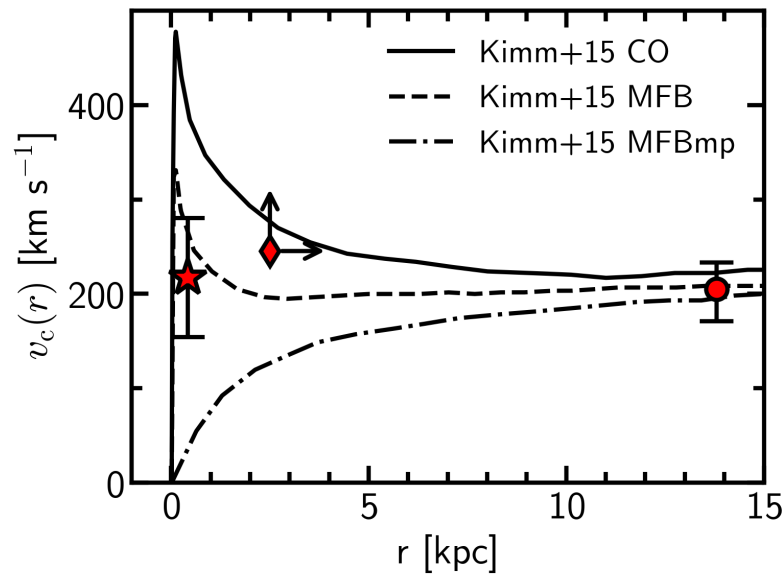
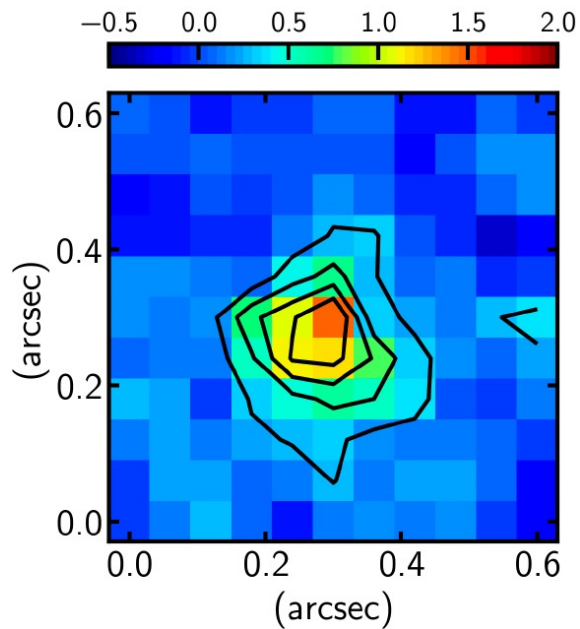


サテライトでは $z \sim 3$ までPopIII形成が続くらしい

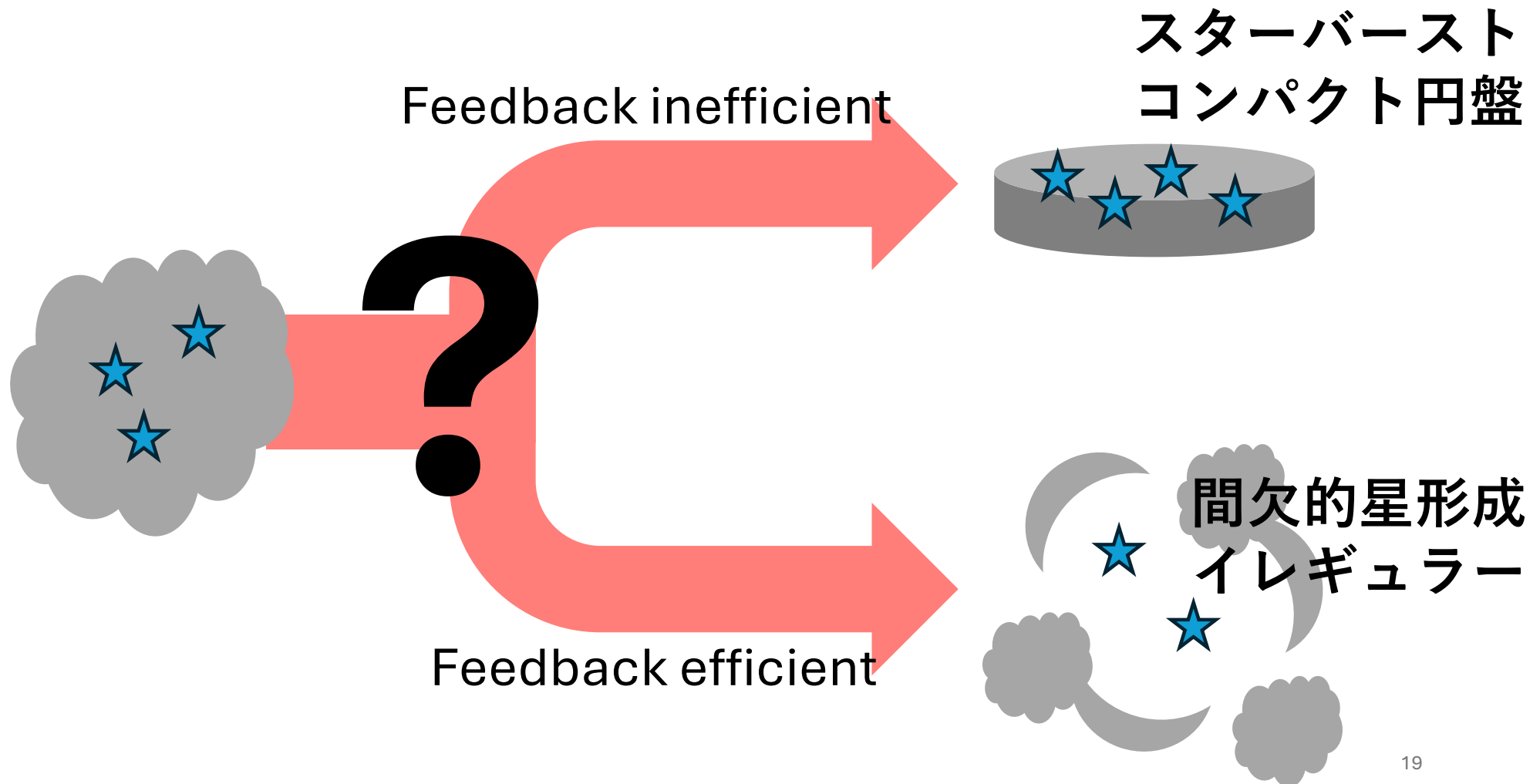
GN-z11は高速回転している？

Xu, Ouchi, Yajima, eta al. (2024)

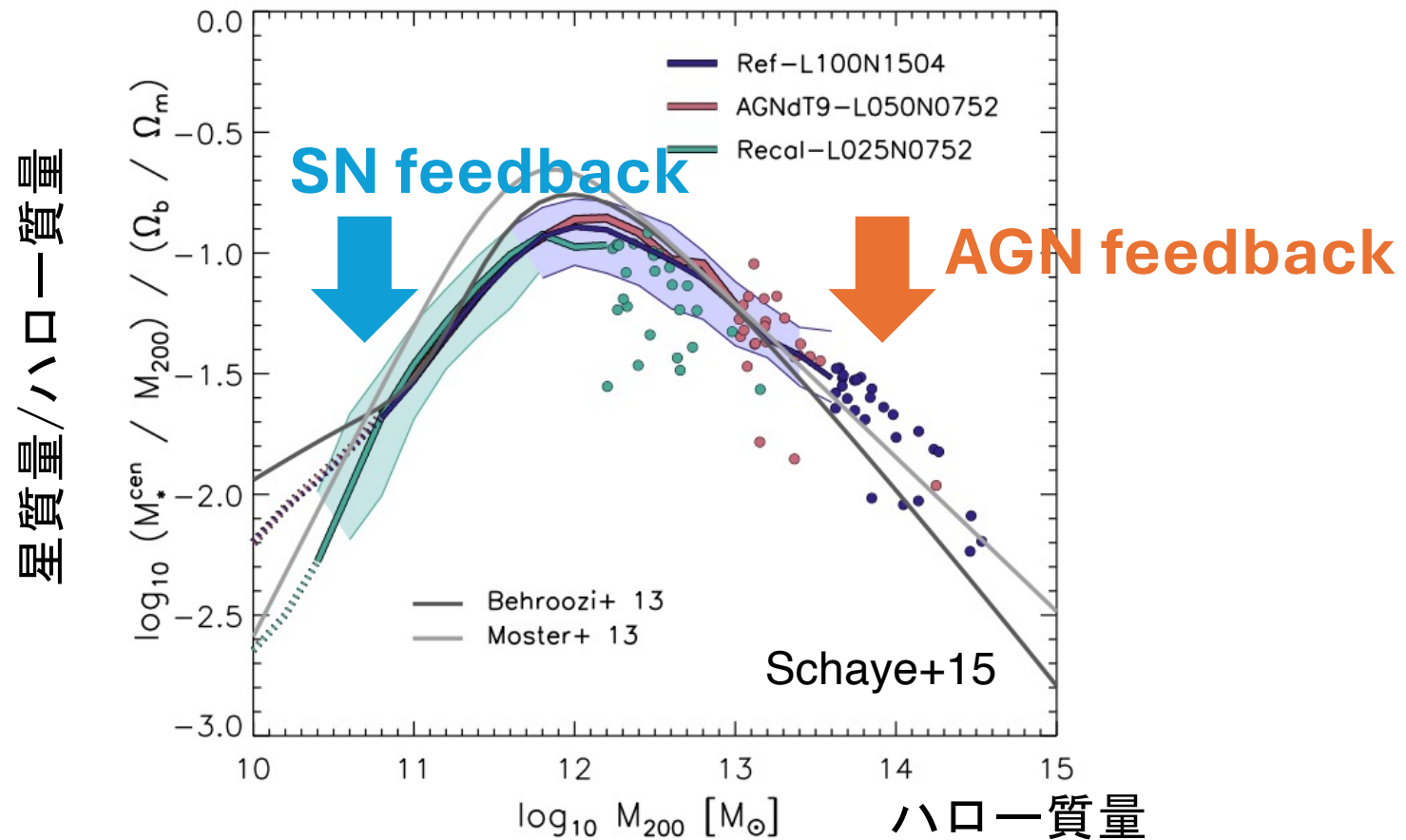
銀河計算の昔の問題



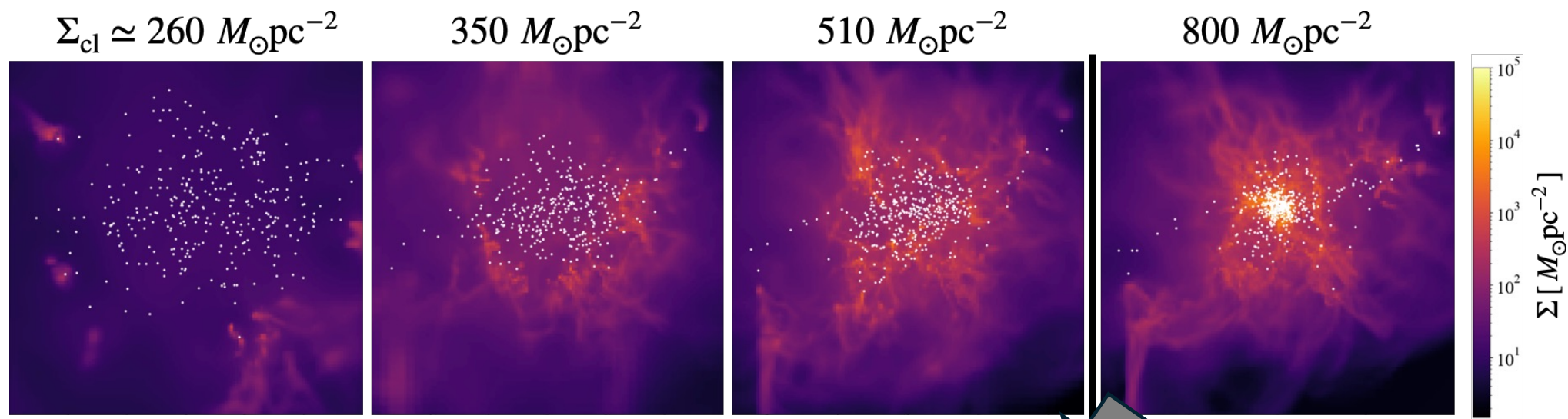
2 modes (or more) in the first galaxy evolution?



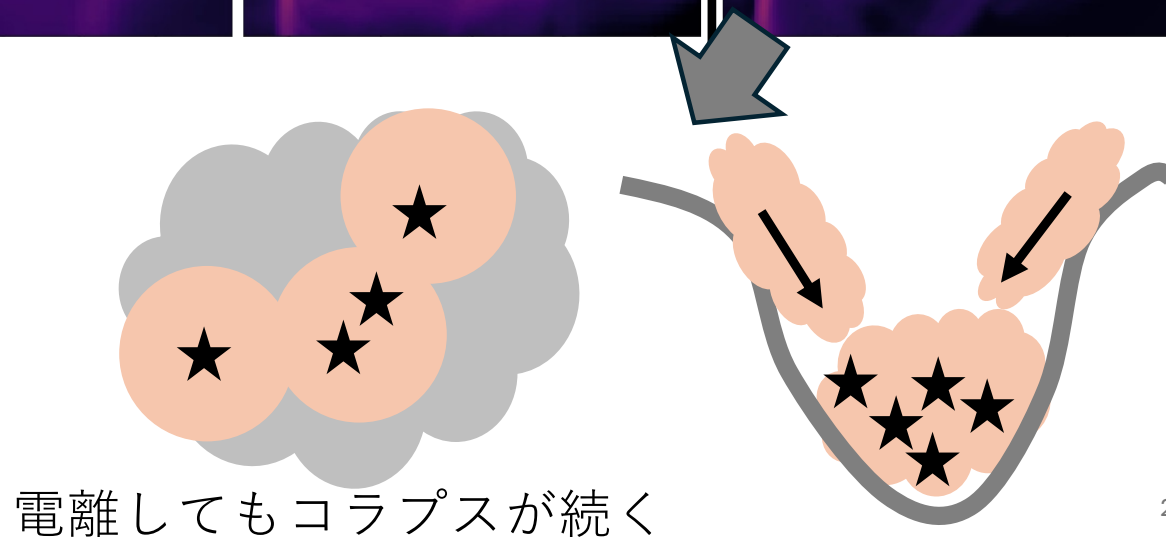
近年の銀河シミュレーションが気にしていたこと



高密度星団の形成

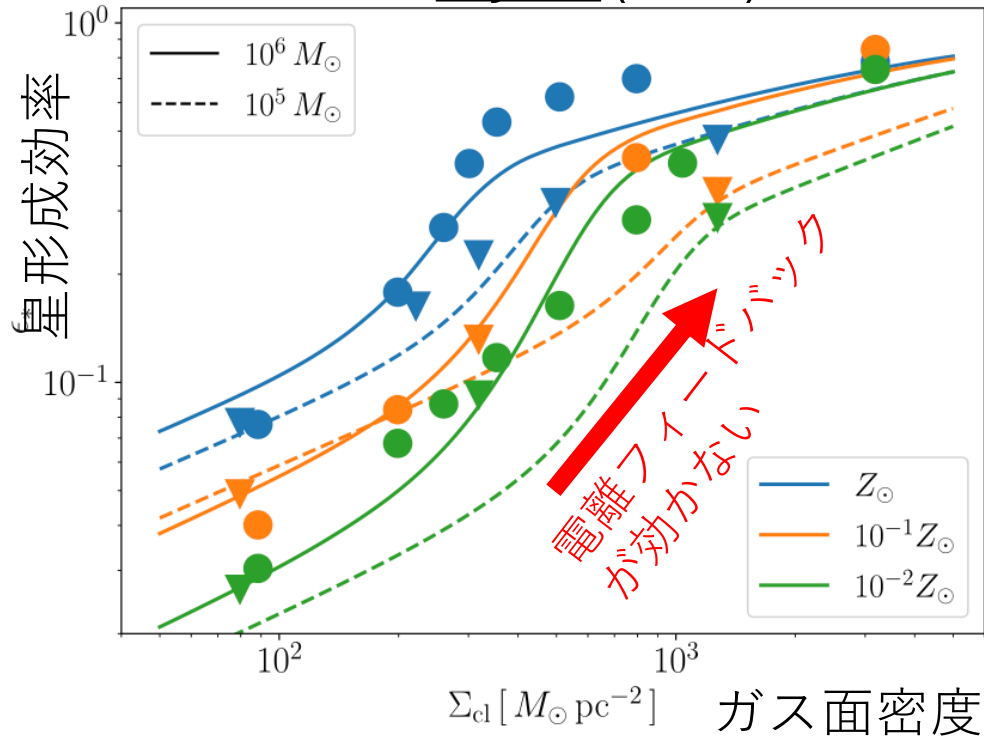


Fukushima&Yajima (2021)



星形成効率と雲密度の関係

Fukushima&Yajima (2021)



電離加熱で飛ばせる場合

電離蒸発まで星形成

$$\frac{d}{dt}(M_{\text{sh}} \dot{r}_{\text{sh}}) = 4\pi r_{\text{sh}}^2 \rho_i c_i^2$$

$$t_{\text{exp}} = 3.9 \text{Myr} \left(\frac{\epsilon_*}{0.1} \right)^{-1/4} \left(\frac{\Sigma_{\text{cl}}}{80 M_{\odot} \text{pc}^{-2}} \right)^{1/4} \left(\frac{T_i}{8000 \text{K}} \right)^{-7/10}$$

$$M_* = \epsilon_* M_{\text{cl}} = \dot{M}_* t_{\text{exp}}$$

飛ばせない場合

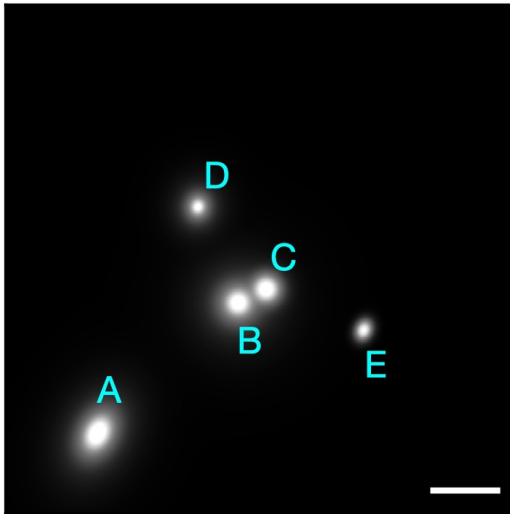
輻射圧=重力まで星形成

$$F_{\text{grav}} = \frac{GM_{\text{sh}}(M_* + M_{\text{sh}}/2)}{R_{\text{cl}}^2} = \frac{GM_{\text{cl}}^2}{2R_{\text{cl}}^2} (1 - \epsilon_*^2)$$

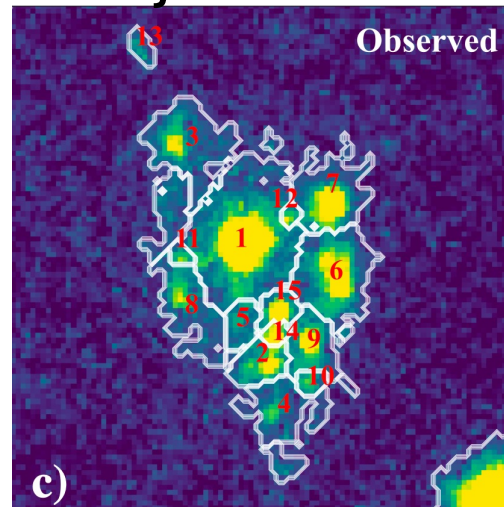
$$F_{\text{rad}} = \frac{L}{c} = \frac{\epsilon_* M_{\text{cl}} l_*}{c}$$

コンパクト大質量星団の発見

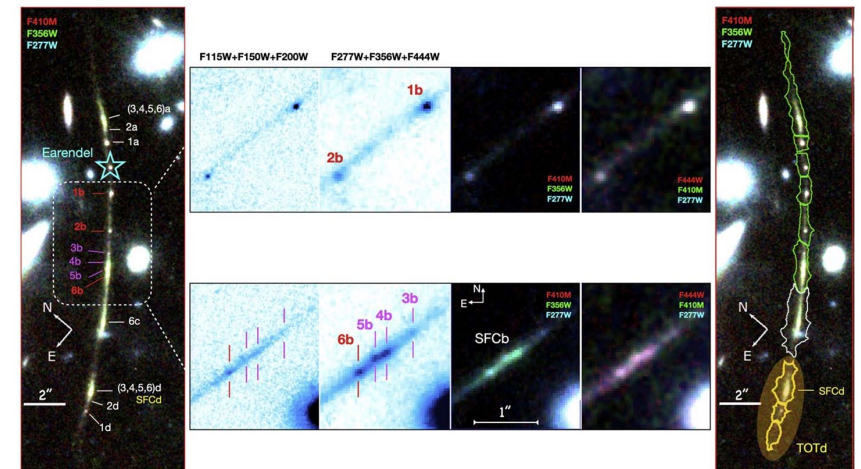
Adamo+24



Fujimoto+25



Vanzella+23



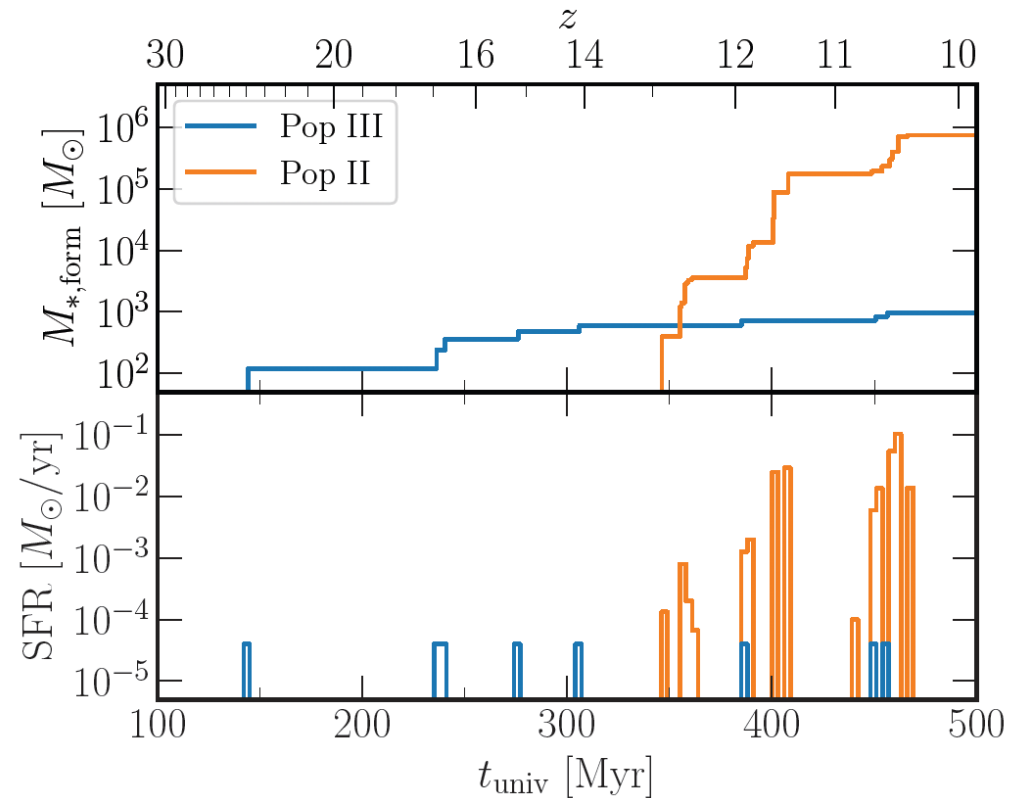
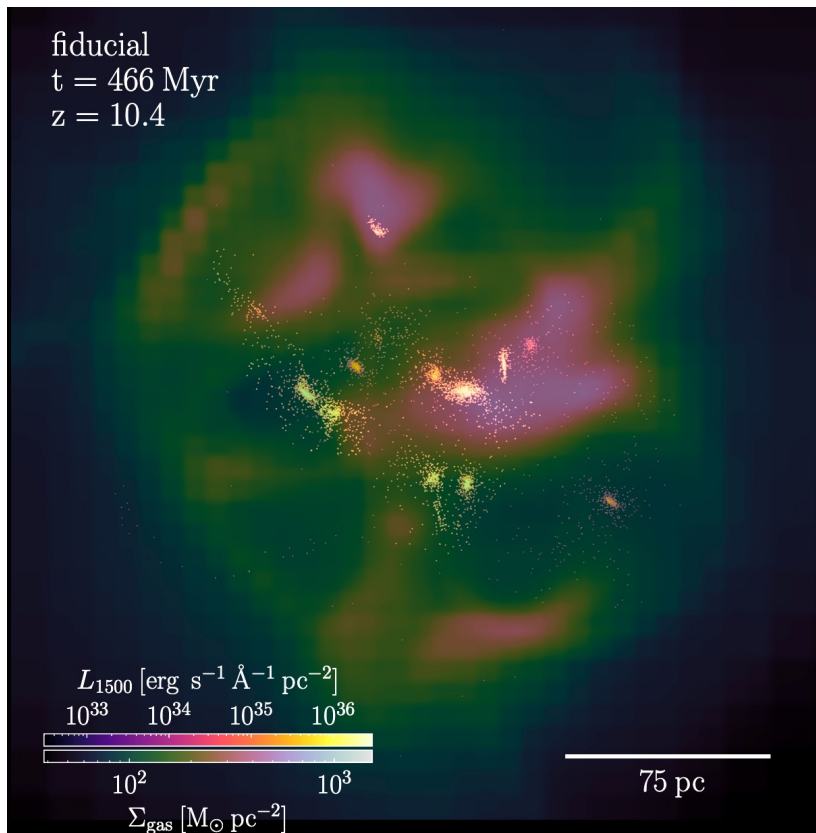
複数の高密度星団が同時に形成？

内部UVフィードバックによる大質量星団形成

Sugimura, Ricotti, Park, Garcia, Yajima (2024)

Cosmological RHD simulation using Ramses-RT (AMR)

Zoom-in IC, a target halo $M_h \sim 10^8 M_{\text{sun}}$ @ $z \sim 10$



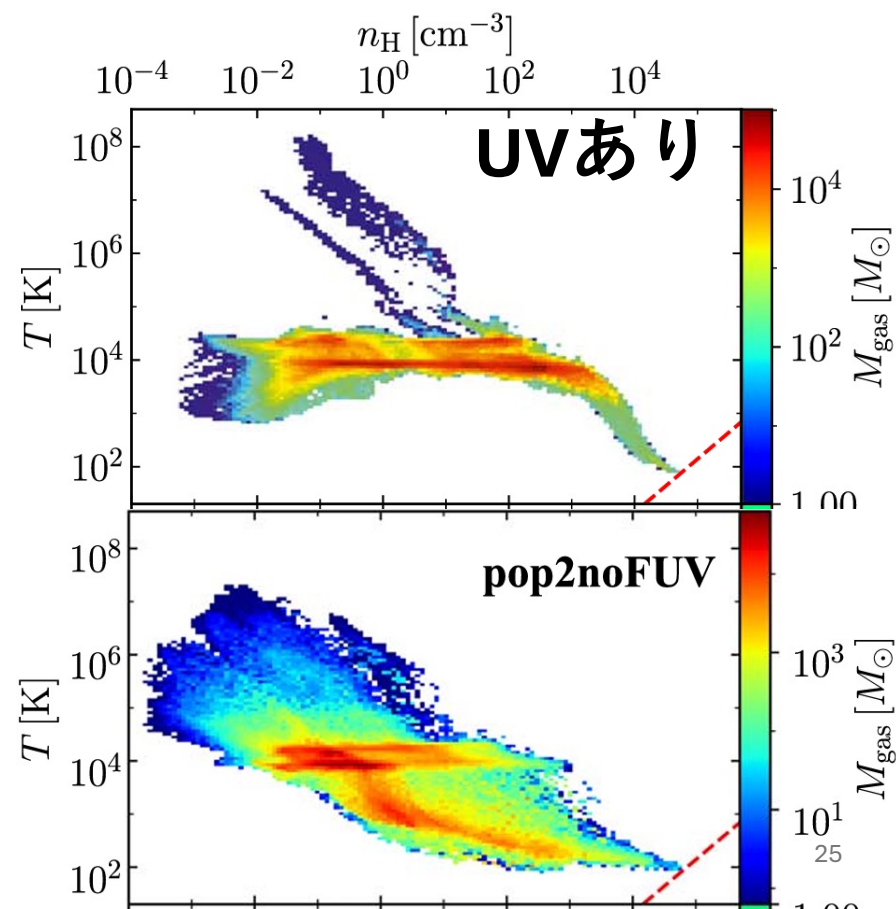
内部UVフィードバックによる大質量星団形成

Sugimura, Ricotti, Park, Garcia, Yajima (2024)

低金属ガスでは水素分子が冷却源

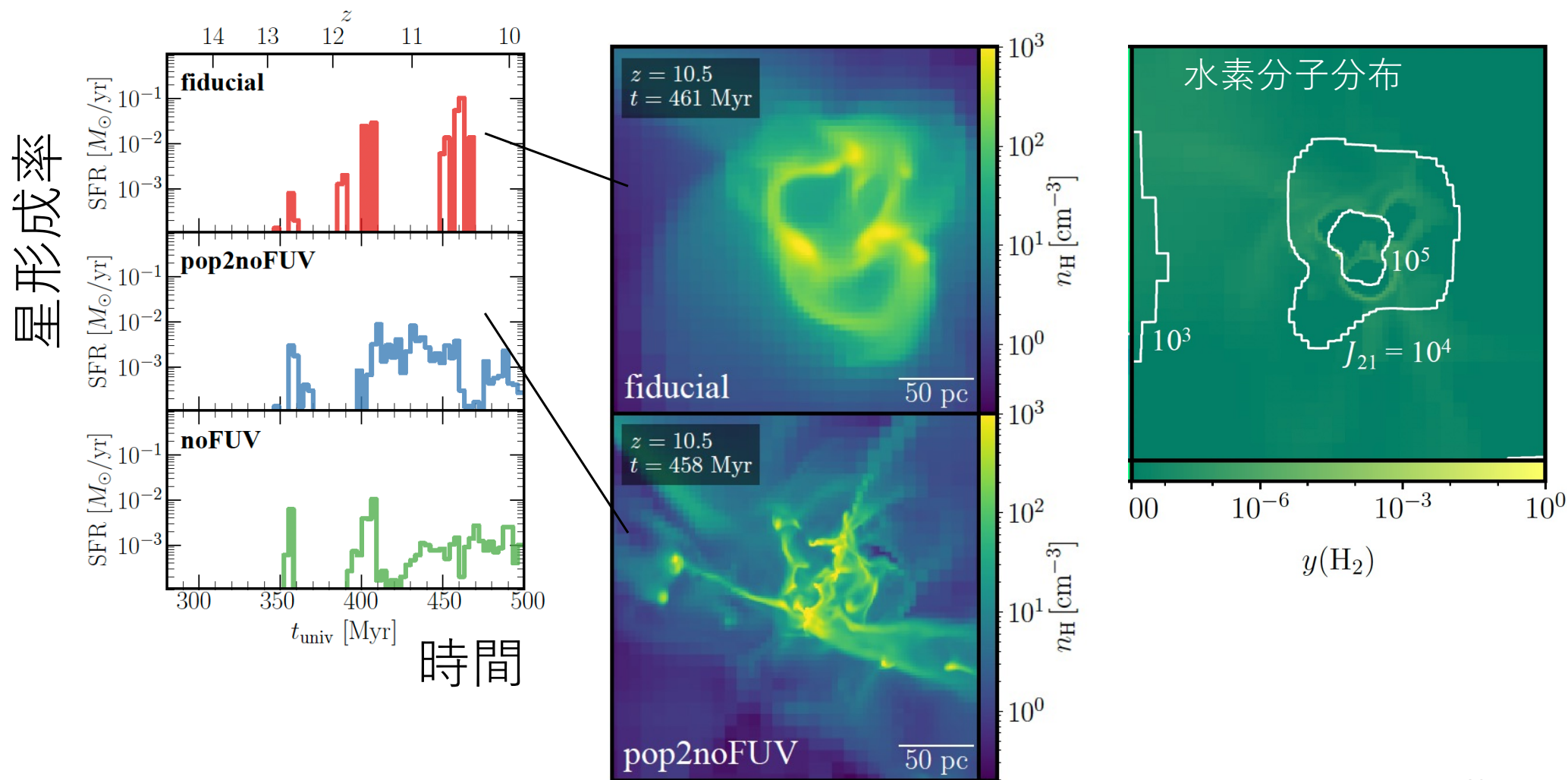
一旦星形成するとUVによって周囲星間ガスの水素分子破壊

ジェーンズ質量が増大=> 大質量星団形成

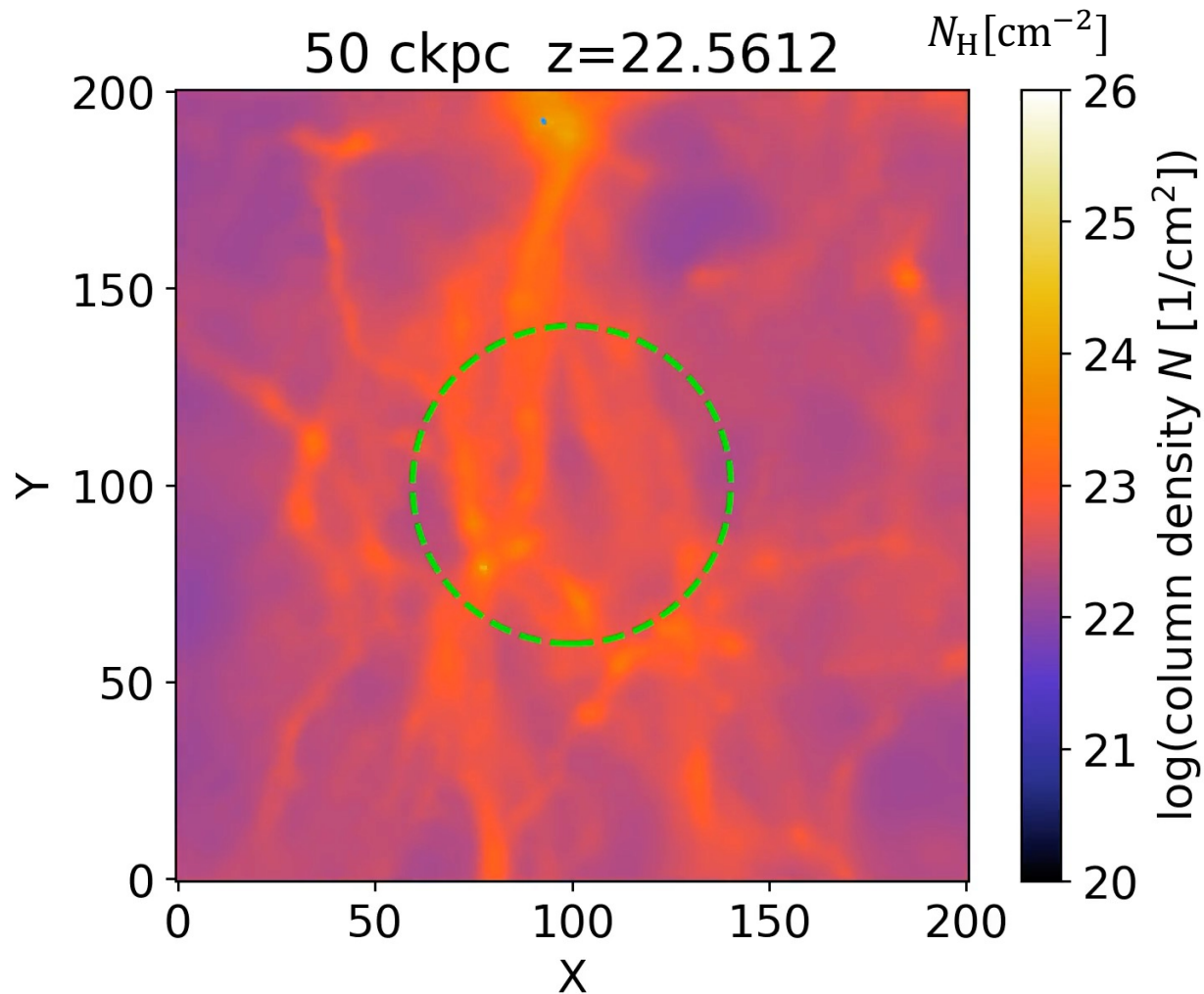


内部UVフィードバックによる大質量星団形成

Sugimura, Ricotti, Park, Garcia, Yajima (2024)



さらに重たい初代銀河形成へ



Ishida, **Yajima**+ in prep.

Cosmological RHD

using Gadget-3

Zoom-in IC

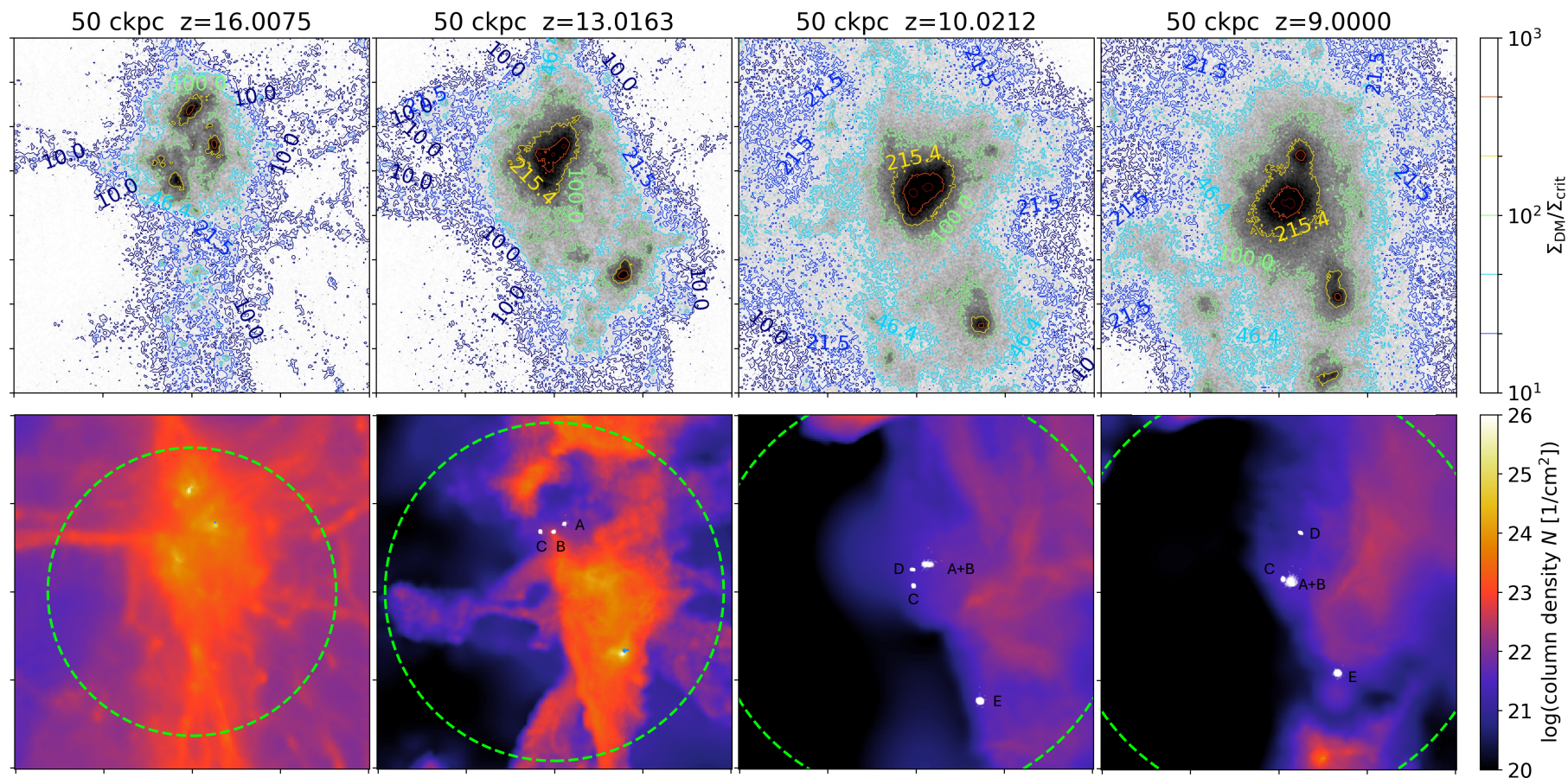
$M_{\text{halo}}: 10^8 \sim 5 \times 10^9 M_{\text{sun}}$

$m_{\text{SPH}}: 10, 100 M_{\text{sun}}$

Blue dots...Pop III stars

White dots...Pop II stars

さらに重たい初代銀河形成へ



3 compact
gas clumps

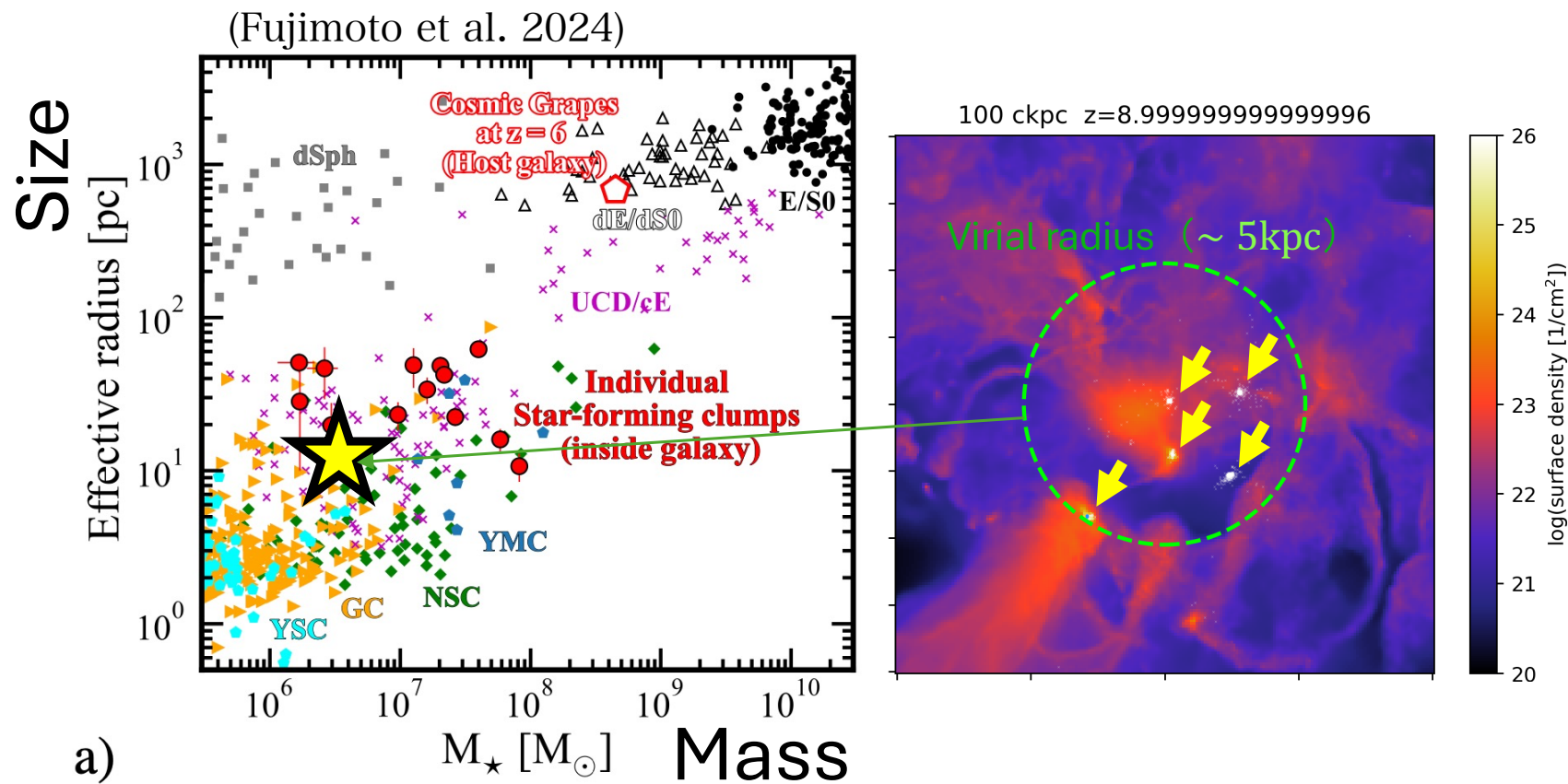


3 compact
Star clusters

Merger occur

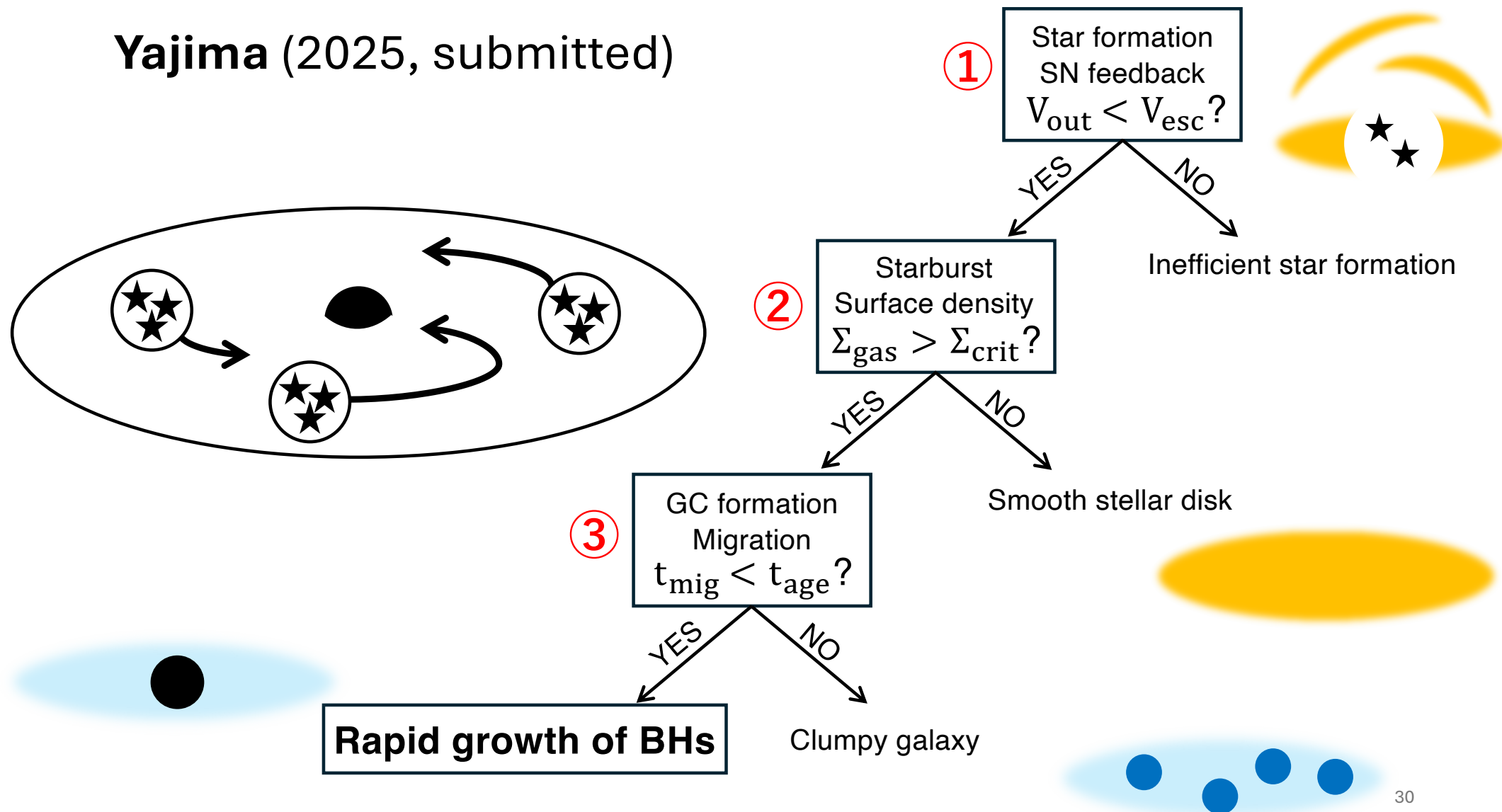
Dynamically
relaxed system

さらに重たい初代銀河形成へ



初代銀河進化ダイアグラム

Yajima (2025, submitted)



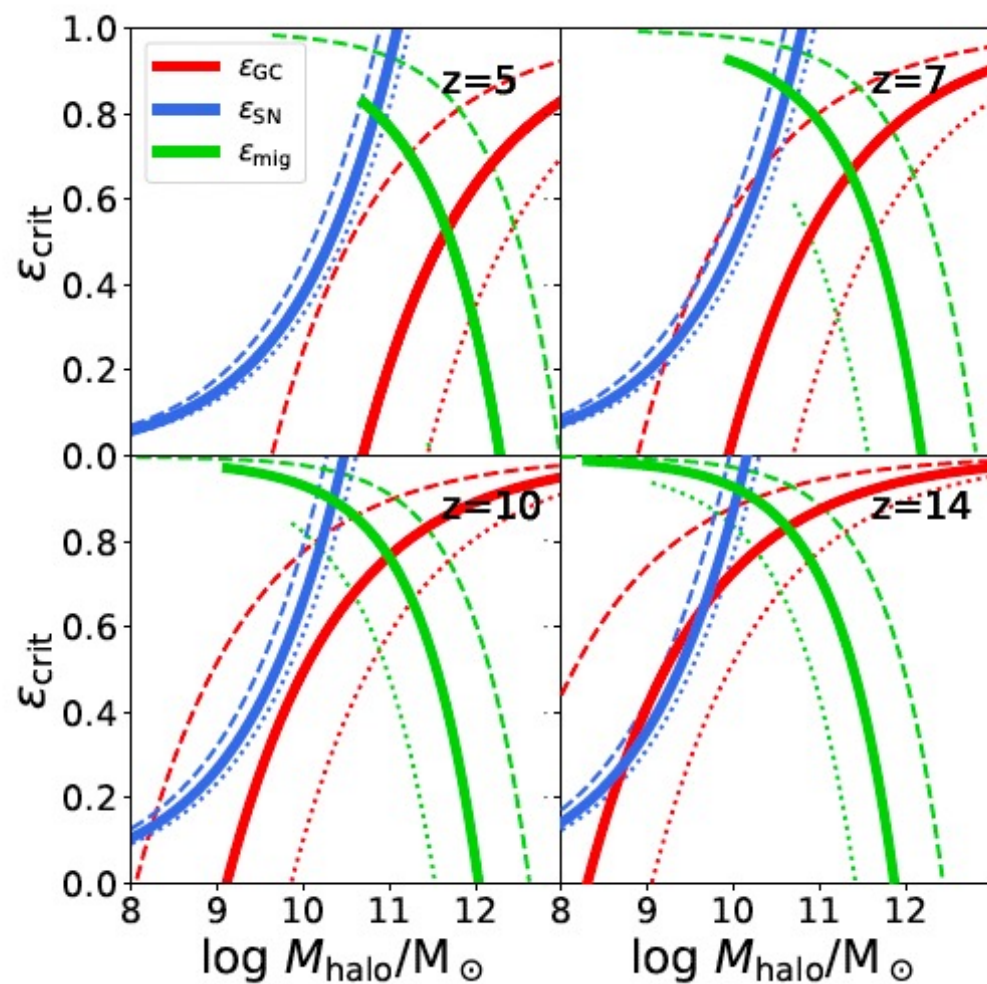
3つの星系成功率条件

$$\varepsilon_{\text{SN}} = \frac{1 - f_{\text{d}}}{f_{\text{d}}} \frac{1}{f_{\text{SN}} P_{\text{SN}} V_{\text{esc}} - 1}$$

$$\varepsilon_{\text{GC}} = 1 - 0.61 \left(\frac{\Sigma_{\text{crit}}}{10^3 \text{ M}_{\odot} \text{ pc}^{-2}} \right) \left(\frac{r_{\text{cl}}}{z_0} \right)^{-1} \left(\frac{f_{\text{d}}}{0.1} \right)^{-1} \\ \times \left(\frac{M_{\text{h}}}{10^{10} \text{ M}_{\odot}} \right)^{-1/3} \left(\frac{\lambda}{0.03} \right)^2 \left(\frac{1+z}{10} \right)^{-2}.$$

$$\varepsilon_{\text{mig}} = 1 - 0.26 \left(\frac{t_{\text{age}}}{500 \text{ Myr}} \right)^{-1} \left(\frac{v}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \\ \times \left(\frac{M_{\text{cl}}}{10^5 \text{ M}_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{n_{\text{H}}}{10^4 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} I(\mathcal{M})^{-1}.$$

臨界星形成効率



球状星団形成
超新星爆発
中心への移動

ダッシュ線: $\lambda=0.02$
実線: $\lambda=0.03$
点線: $\lambda=0.04$

BHと星の最大質量

中心に移動した球状星団は潮汐破壊を伴い一部BHへ降着

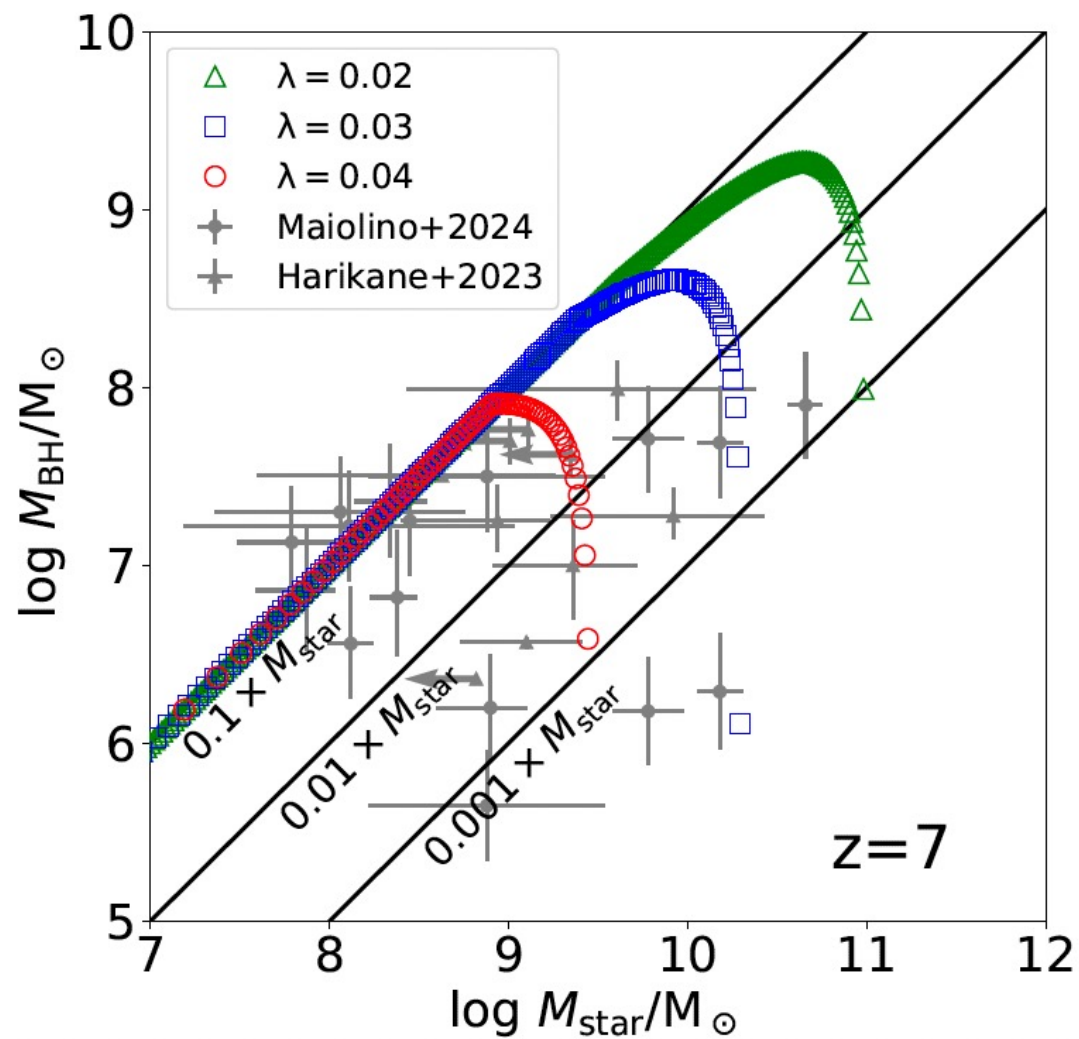
$$M_{\text{BH}} = f_{\text{TDE}} \epsilon_{\min} f_{\text{d}} \frac{\Omega_{\text{b}}}{\Omega_{\text{m}}} M_{\text{h}},$$

$\epsilon_{\min} = \min(\epsilon_{\text{GC}}, \epsilon_{\text{mig}}, \epsilon_{\text{SN}})$

$$\frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{star}}} = \begin{cases} \frac{f_{\text{TDE}}}{1 - f_{\text{TDE}}} & \text{for } \epsilon_{\text{SF},\min} = \epsilon_{\text{SF},\min 2} \\ \frac{\epsilon_{\text{SF},\min} f_{\text{TDE}}}{\epsilon_{\text{SF},\min} (1 - f_{\text{TDE}}) + (\epsilon_{\text{SF},\min 2} - \epsilon_{\text{SF},\min})} & \text{for } \epsilon_{\text{SF},\min} < \epsilon_{\text{SF},\min 2}. \end{cases}$$

$\epsilon_{\text{SF},\min 2} = \min(\epsilon_{\text{GC}}, \epsilon_{\text{SN}})$

BH質量と星質量の関係



Black hole mass functions

今回のモデル

$$M_{BH} = f(M_h, \lambda, z)$$



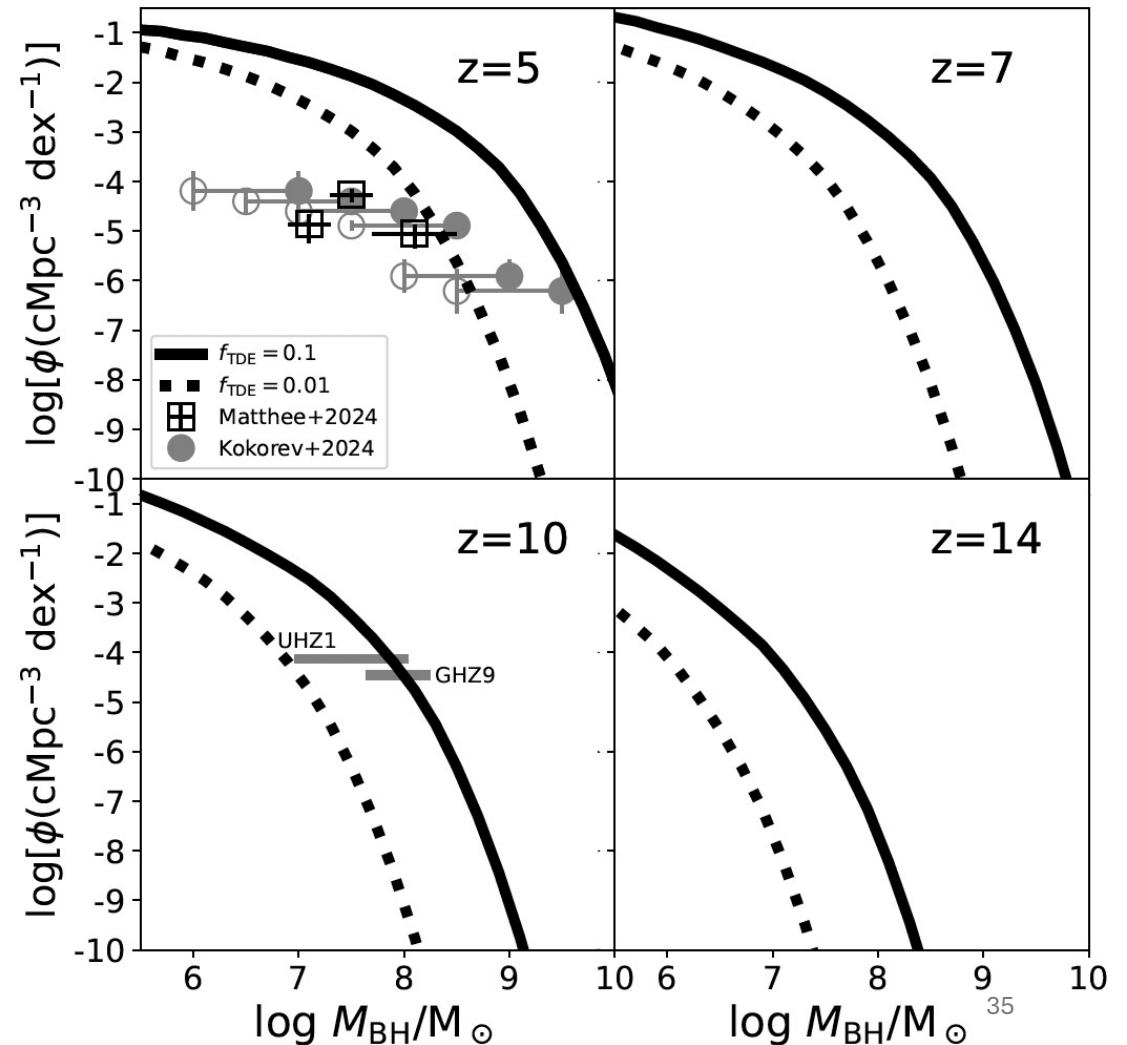
Halo mass function

Sheth&Tormen+99



Spin param distribution

Bullock+01



まとめ

1. 初代銀河の形成 (with Pop III)

2. 初代銀河の星団形成

- JWST観測によって、PopIII星団、出来立ての球状星団
- の候補がいろいろ発見されてきた
- シミュレーションでは、ある程度銀河進化が進んでもサテライト銀河はPopIII星団を保持している
- 紫外線フィードバックの効果で初代銀河内で複数の球状星団が形成されることがわかった
- これら球状星団は中心に移動してBH成長を促進するかも