

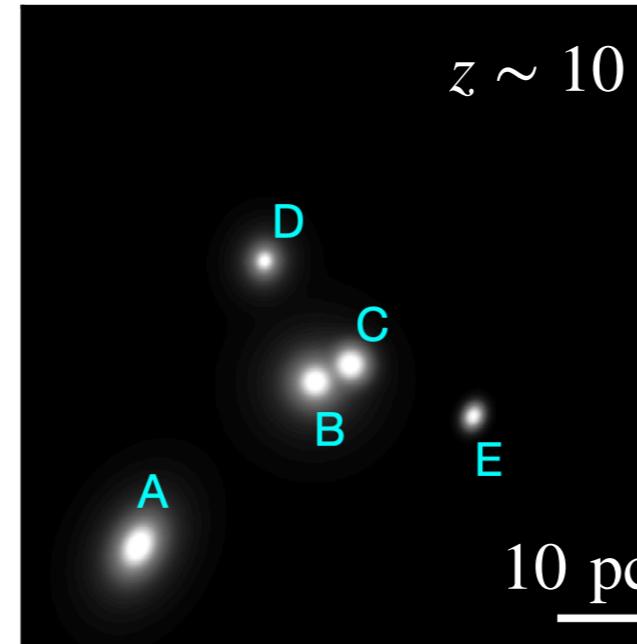
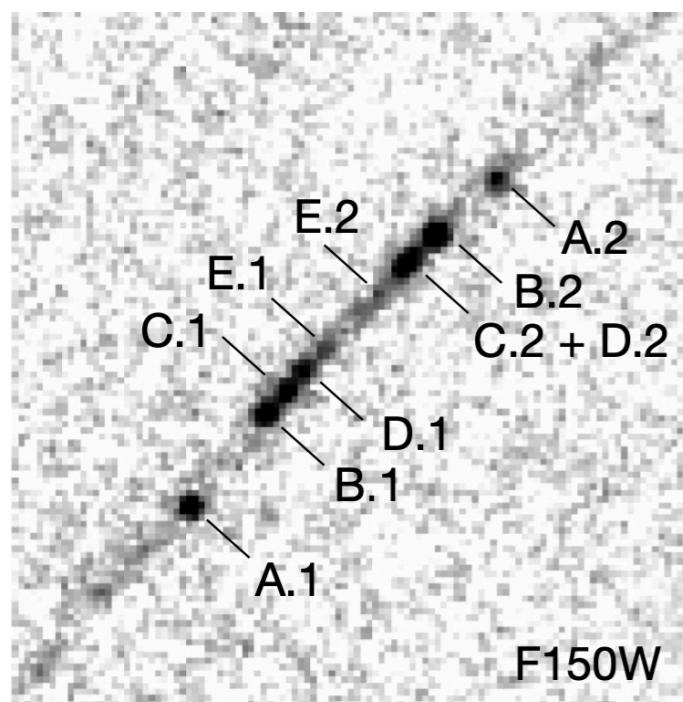
低金属量星団の合体により形成された初代銀河の 形態学的特徴

筑波大学 宇宙物理理論研究室
石田 恵士(D1)

共同研究者 矢島秀伸(筑波大学)、安倍牧人(吳高専)、大向一行(東北大學)

高赤方偏移銀河の特異な性質

✓ JWSTによる重力レンズを用いた観測

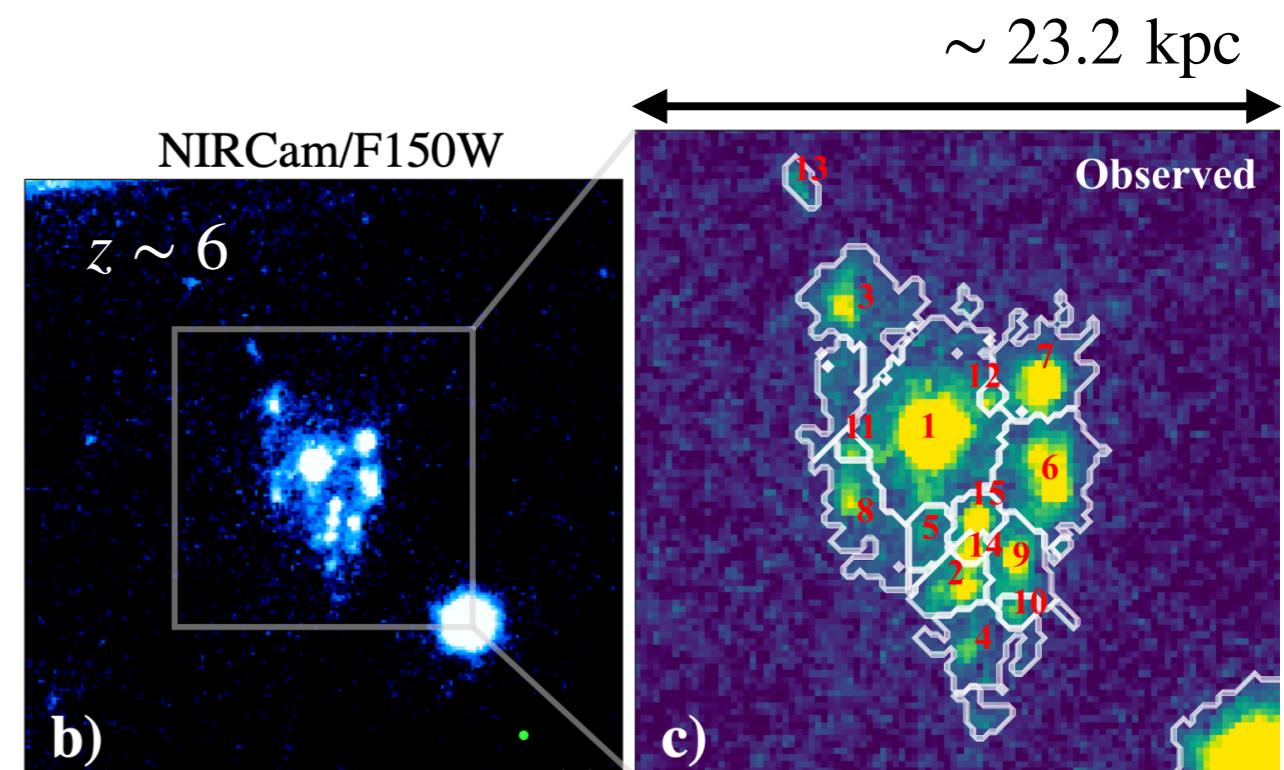


The Cosmic Gems arc (Adamo+24, Messa+25)

- ・ クランピーな構造
- ・ 半径 $R \sim 1 - 10$ pc, 質量 $M_* \sim 10^4 - 10^7 M_\odot$
(Vanzella+23, Adamo+24, Fujimoto+25)
- ・ 高い面密度
 $\Sigma_{\text{gas}} \simeq 10^{3-5} [\text{M}_\odot/\text{pc}^2]$
- ・ $\Sigma_* \sim 10^5 [\text{M}_\odot/\text{pc}^2]$
- ・ 球状星団らしき天体を複数宿す

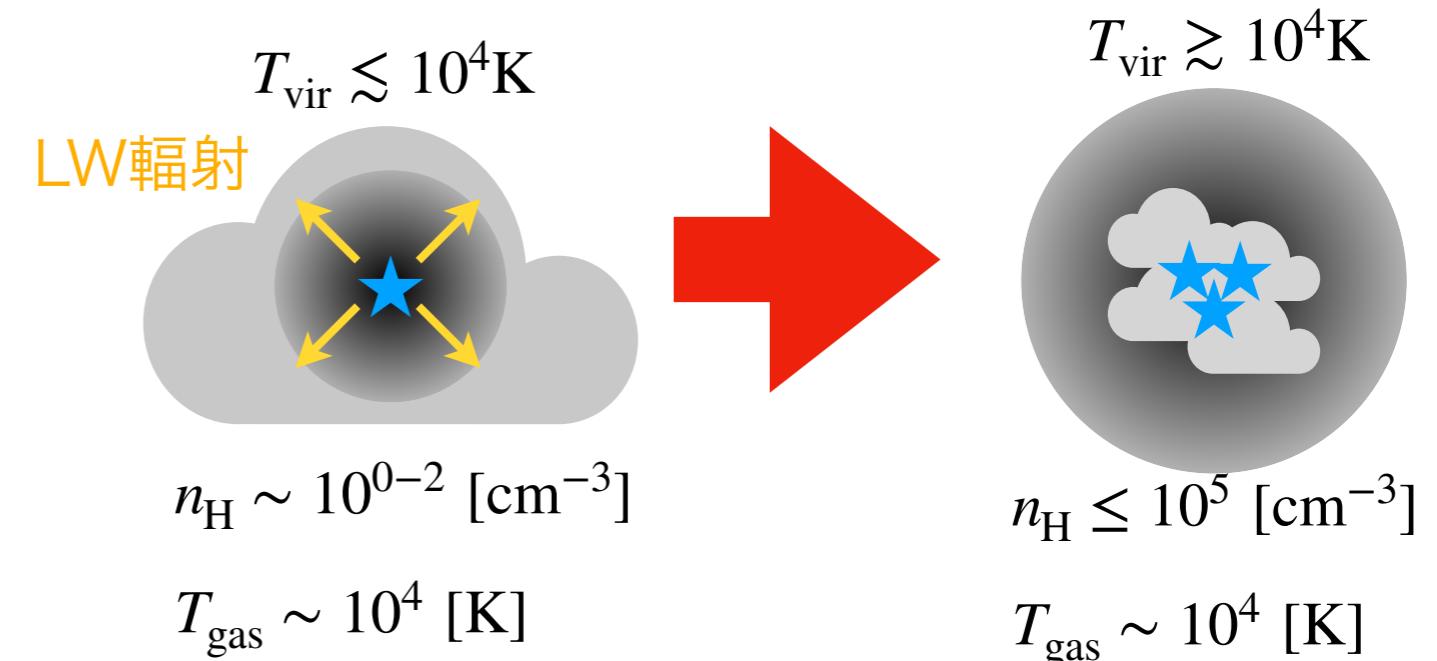
観測された特徴を説明可能な
銀河形成理論の構築が必要

これらの形成過程を調べるには
最低でも 1 pc の分解能が必要



The Cosmic Grapes (Fujimoto+25)

最近の初代銀河シミュレーション



✓ < 1 pcスケールのシミュレーション

- Sugimura+24,
Cosmological RHD simulation
 $z \sim 9$ で $M_{\text{DM}} \sim 10^8 M_{\odot}$ 、 $\sim 0.1 \text{pc}$ 分解能

LW 輻射による H_2 解離によってジーンズスケールが増加

密度の高いガスクランプの形成とその崩壊により Pop II スターバーストをもたらす。

- Garcia+25
 $z \sim 8$ まで計算を進める
星形成雲の密度・質量・金属量に応じて星形成効率を変化
NSCの形成過程を調べた。

目的

質量の大きいハローを計算するにはコストがかかる。

観測と比較可能な質量 ($\sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$) のハローに対し、
高解像度 ($\sim 1 \text{pc}$) 宇宙論的流体シミュレーションを行い、
観測された形態学的特徴が再現可能かを検証する。

宇宙論的zoom-inシミュレーション

Code : GADGET-3 (Springel et al. 2001; Springel 2005)

- SPH法+N体 (DMと星粒子) 計算
- 始原ガスの非平衡化学反応 (e^- , H, H^+ , He, He^{++} , H_2 , H_2^+ , H^- , D, D^+ , HD, HeH^+) (Maio et al. 2007)

Zoom-in 計算

- 計算時間 : redshift $100 \rightarrow 9$ (~ 0.5 Gyr)
- ハロ一質量 (redshift = 9) : $\sim 5 \times 10^8 M_\odot$, $\sim 10^9 M_\odot$, $\sim 2 \times 10^9 M_\odot$, $\sim 5 \times 10^9 M_\odot$
- SPH粒子質量 $\sim 130 M_\odot$ (平滑化長 $h_{\min} \sim 1 \left(\frac{10}{1+z} \right)$ pc)、ソフトニング長 $\epsilon = 9.83 \left(\frac{10}{1+z} \right)$ pc

星形成のパラメータ

- 星形成率 : $\frac{d\rho_*}{dt} = c_* \frac{\rho_{\text{gas}}}{t_{\text{ff}}} \quad (c_* = 0.05)$ (e.g. Federrath & Klessen 2012)
- 星形成の条件 : $10^2 \text{ cm}^{-3} < n_{\text{H}} < 10^5 \text{ cm}^{-3}$ かつ $T < 2000 \text{ K}$
- Pop III \rightarrow Pop II 遷移の金属量閾値 : $Z > 1.5 \times 10^{-4} Z_\odot$ (Omukai et al. 2005)

星からのフィードバック

- 星質量あたりのSNエネルギー : $\epsilon_{\text{SN,PopIII}} = 0.13 \times 10^{51} \text{ erg}/M_\odot$, $\epsilon_{\text{SN,PopII}} = 0.012 \times 10^{51} \text{ erg}/M_\odot$
- 星質量あたりのイールド : $y_{\text{SN,PopIII}} = 0.021$, $y_{\text{SN,PopII}} = 0.0051$ (Dalla Vecchia & Schaye 2021)

(例えばこれは星の初期質量関数をPop IIIでは $[10M_\odot < M < 500M_\odot]$ の範囲でlog-flat、(Hirano et al. 2014)

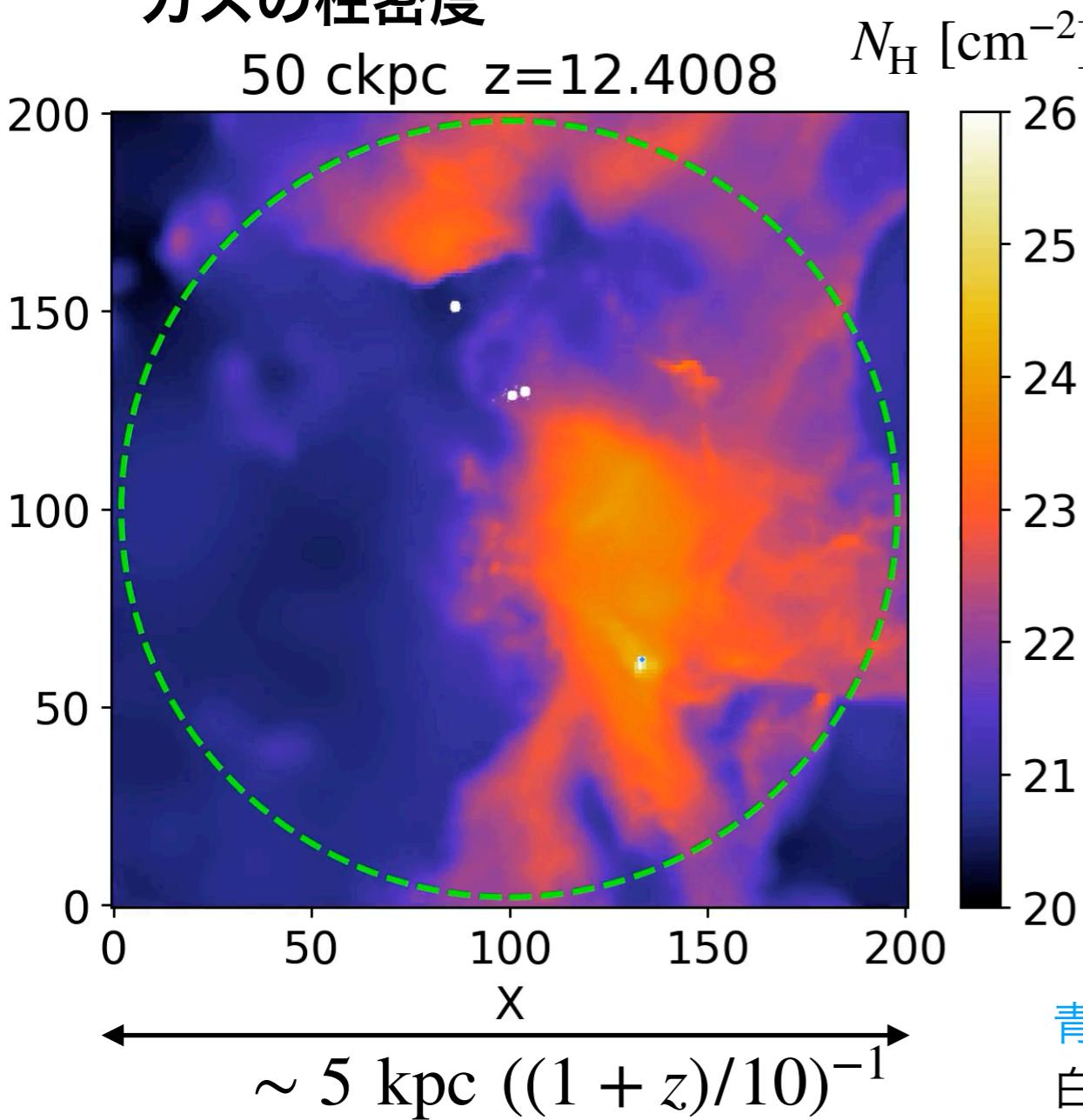
Pop IIでは $[0.1M_\odot < M < 100M_\odot]$ の範囲でChabrierを仮定したことに対応)

- 大質量星の平均寿命 : $t_{\text{fb}} = 14 \text{ Myr}$ • 電離光子・ H_2 光解離・ H^- 光解離 (Abe et al. 2021)

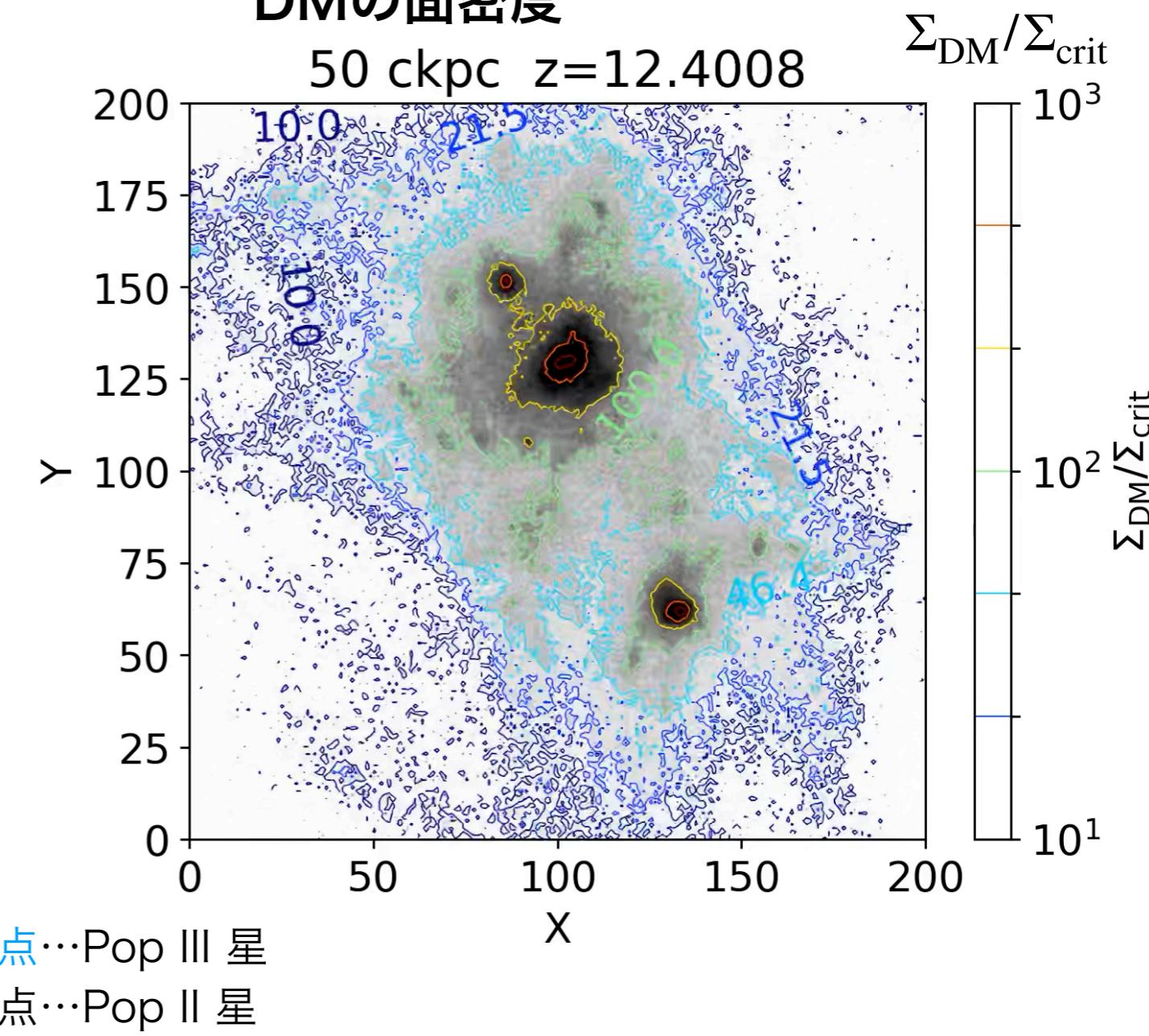
コンパクト星団の合体による初代銀河の形成

✓ $M_h \sim 2 \times 10^9 M_\odot$ model

ガスの柱密度



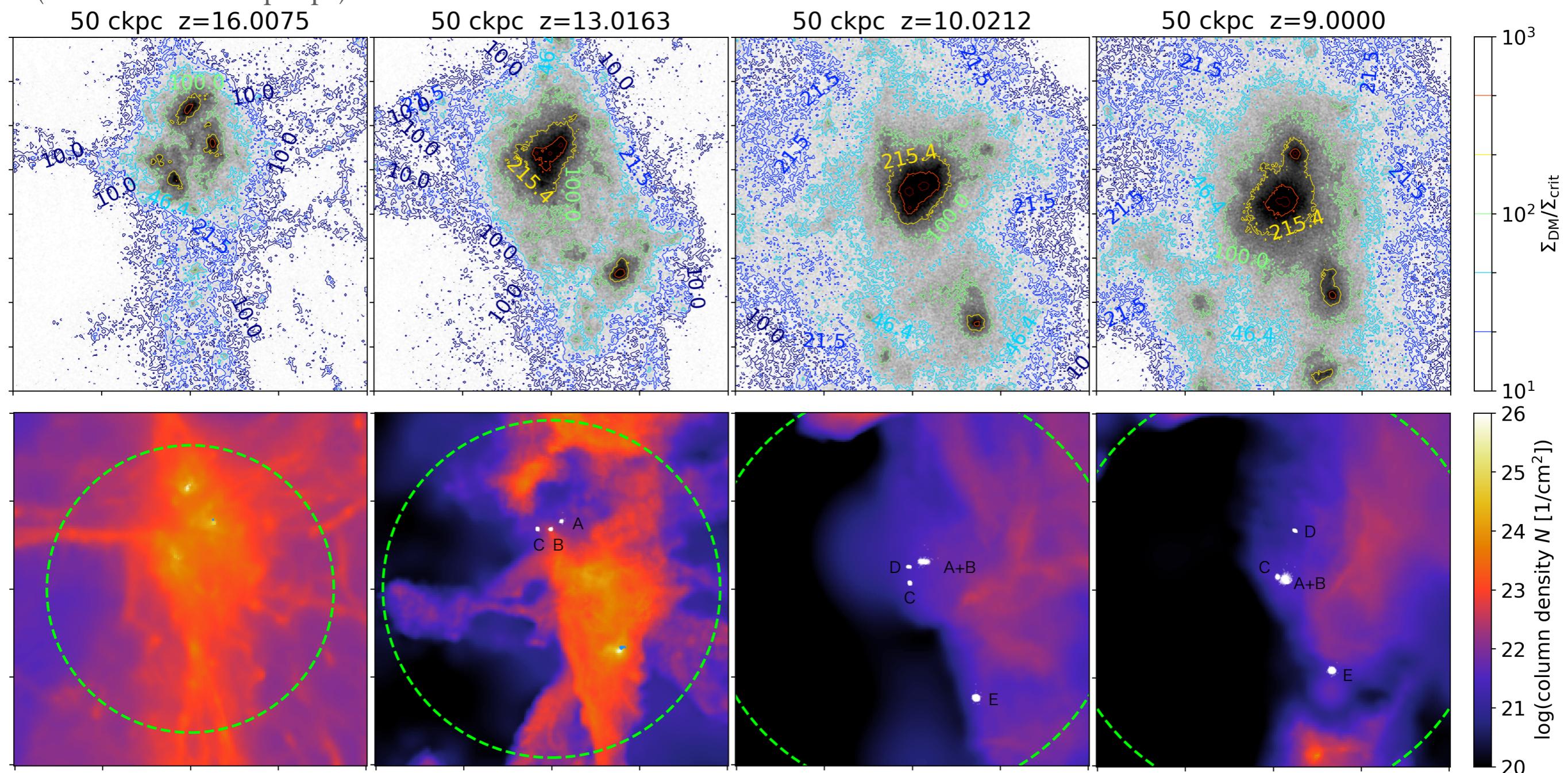
DMの面密度



- 3つのハローの中心でそれぞれコンパクトなガスクランプからコンパクト星団が形成
- 三体相互作用が起き、うち2つの星団が“星団バイナリー”的なものを形成
- 質量の大きい初代銀河は複数のGC-likeな星団の合体で形成することがわかった。

質量の大きい初代銀河の形成・進化過程

(Ishida et al. in prep.)



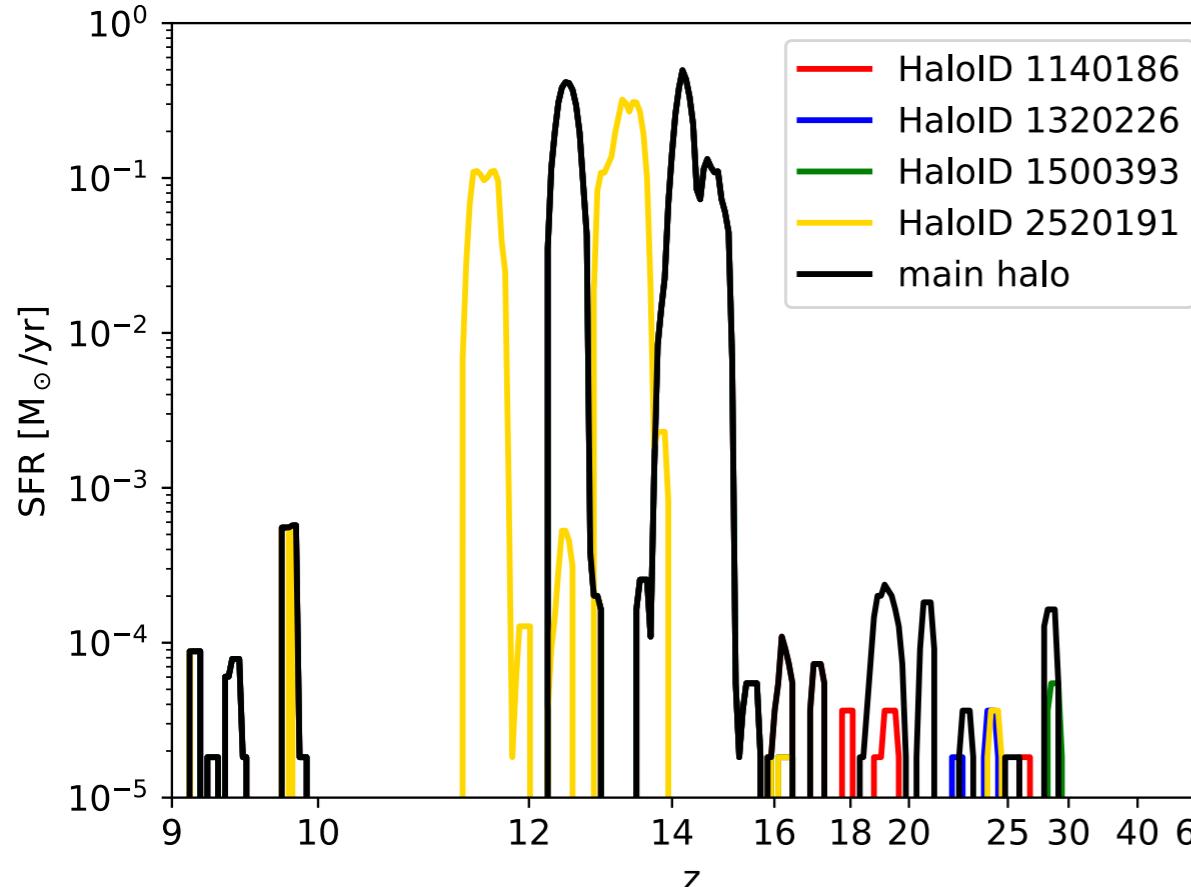
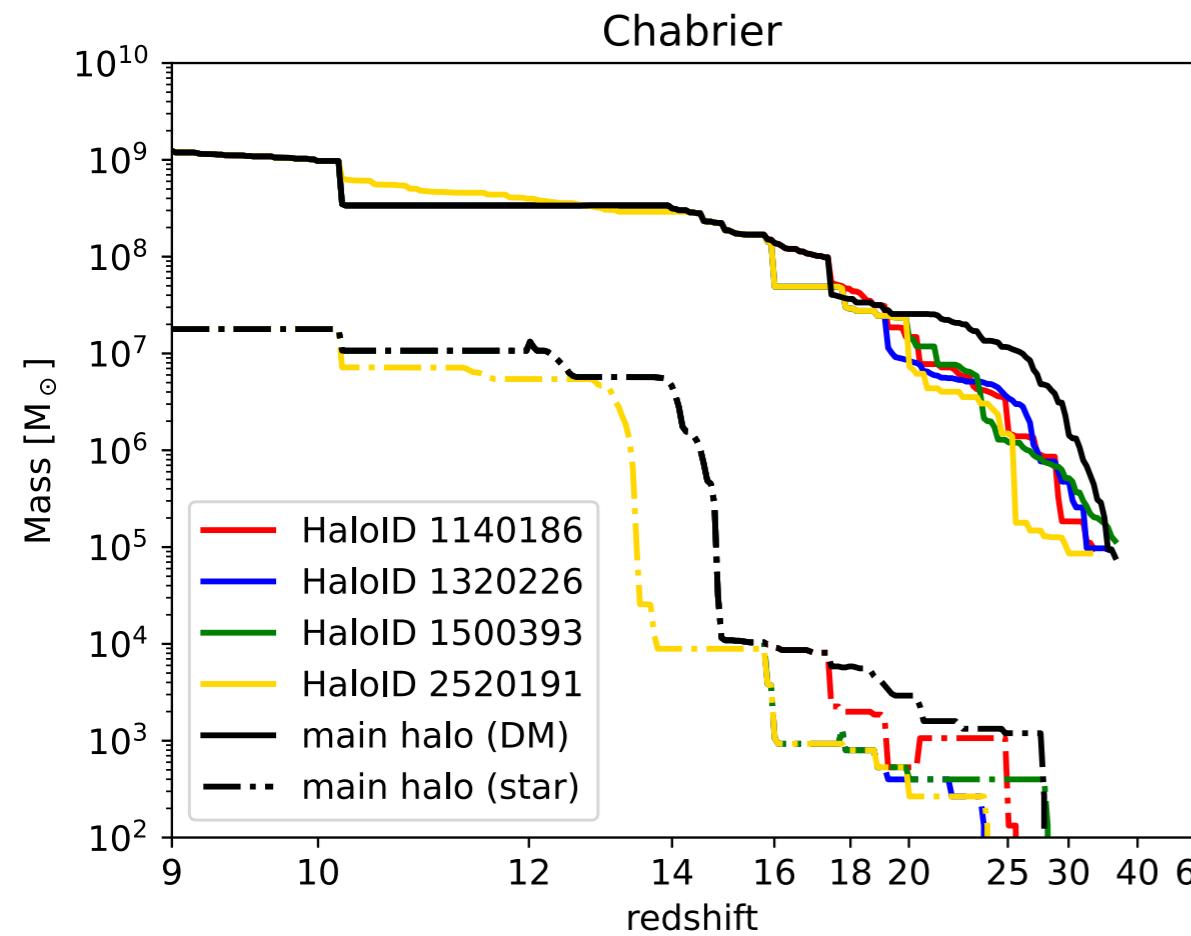
3つのコンパクトな
ガスクランプ $\xrightarrow{\hspace{1cm}}$ 3つのコンパクト
星団が誕生

星団同士の合体

力学的に緩和した系

Far-UV triggered
Pop II starburst (Sugimura+24)

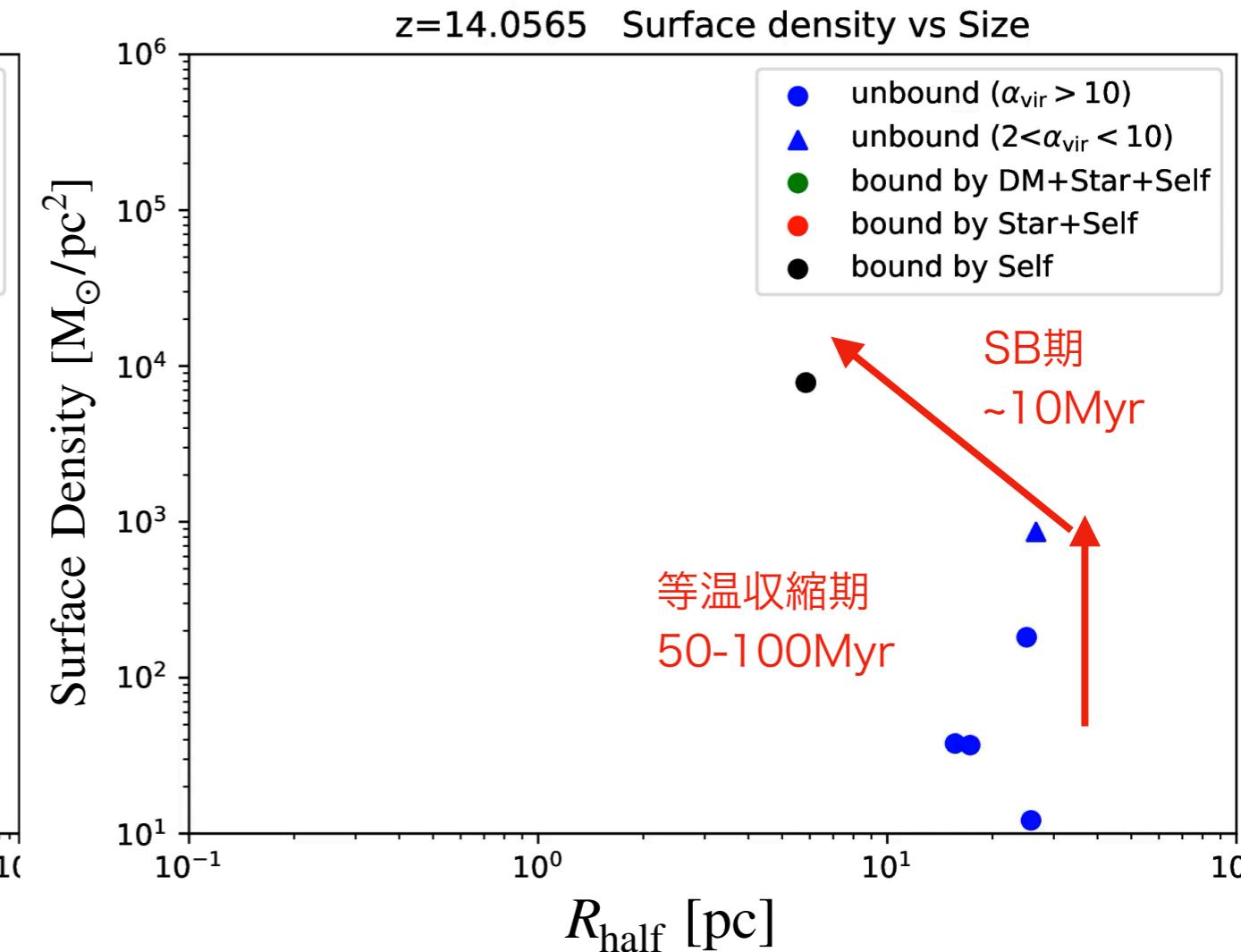
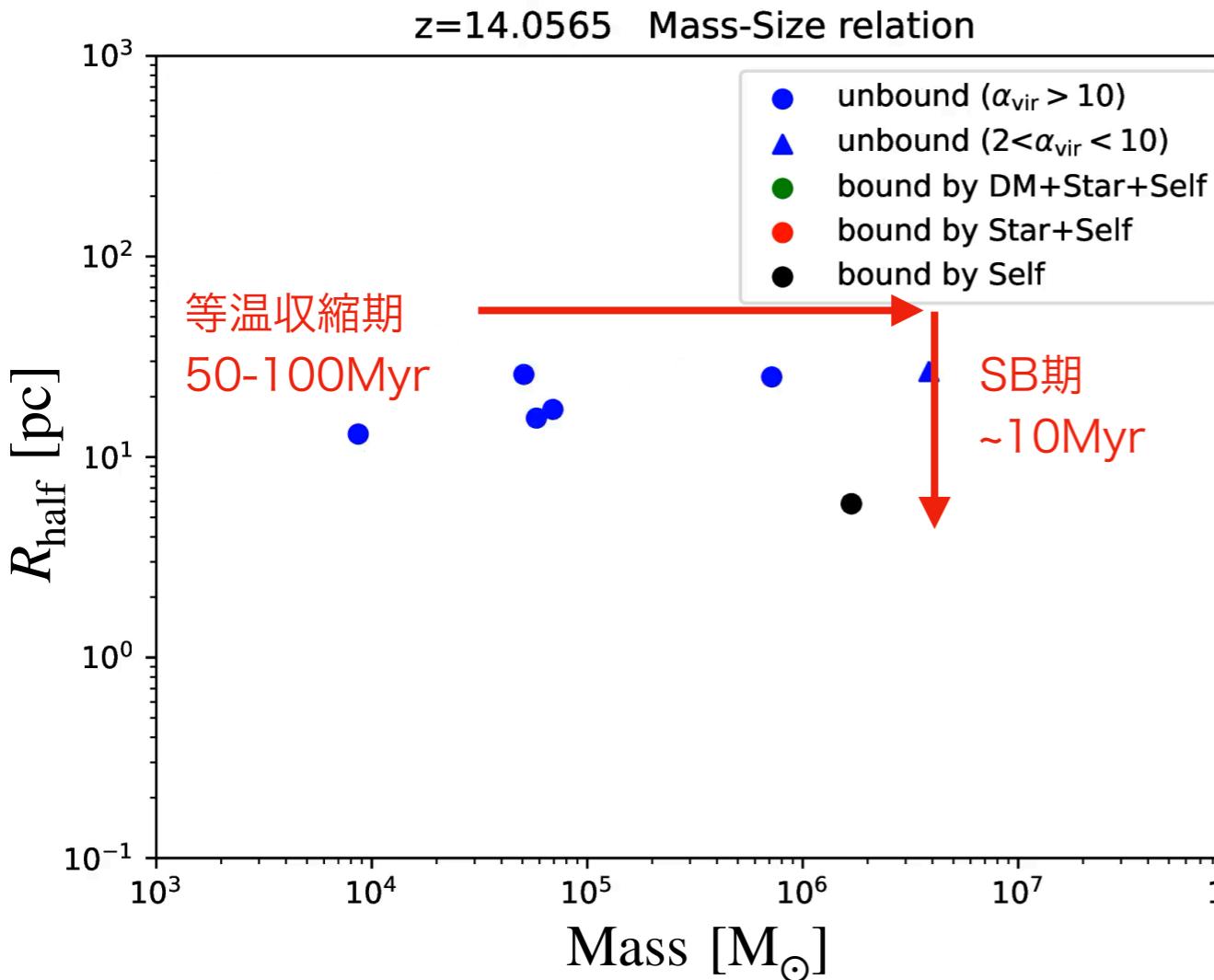
主要なハローの星形成史



- $z \sim 14$ では3つのスターバーストが発生
- $z \sim 12$ では離れた場所でスターバーストが発生
- $z \sim 10$ では別のハローとmajor mergerにより星質量が増加
- どのハローでも $T_{\text{vir}} \sim 10000\text{K}$ に達してから $\simeq 50\text{Myr}$ でPop II スターバーストが発生
- 先にDMハローが合体するが中心のガスクランプは合体していない

質量-サイズ-面密度はどう進化するか？①

✓ ガスクランプの進化パス ($>100 \text{ [1/cc]}$)



- ガスクランプのサイズは等温収縮期 10-30pc、スターバースト期 (SB期) では < 10pc
- (ただし、サイズは観測可能な密度閾値に大きく依存)
- ガスは DM の助けを借りながら主に自己重力で収縮
- SB期初期は自己重力で完全に束縛、SB期後期は星団の重力で束縛
- 星団の重力が効くことにより SB期後期ではサイズが小さくなる
- 高赤方偏移で観測されたガスクランプと似た面密度

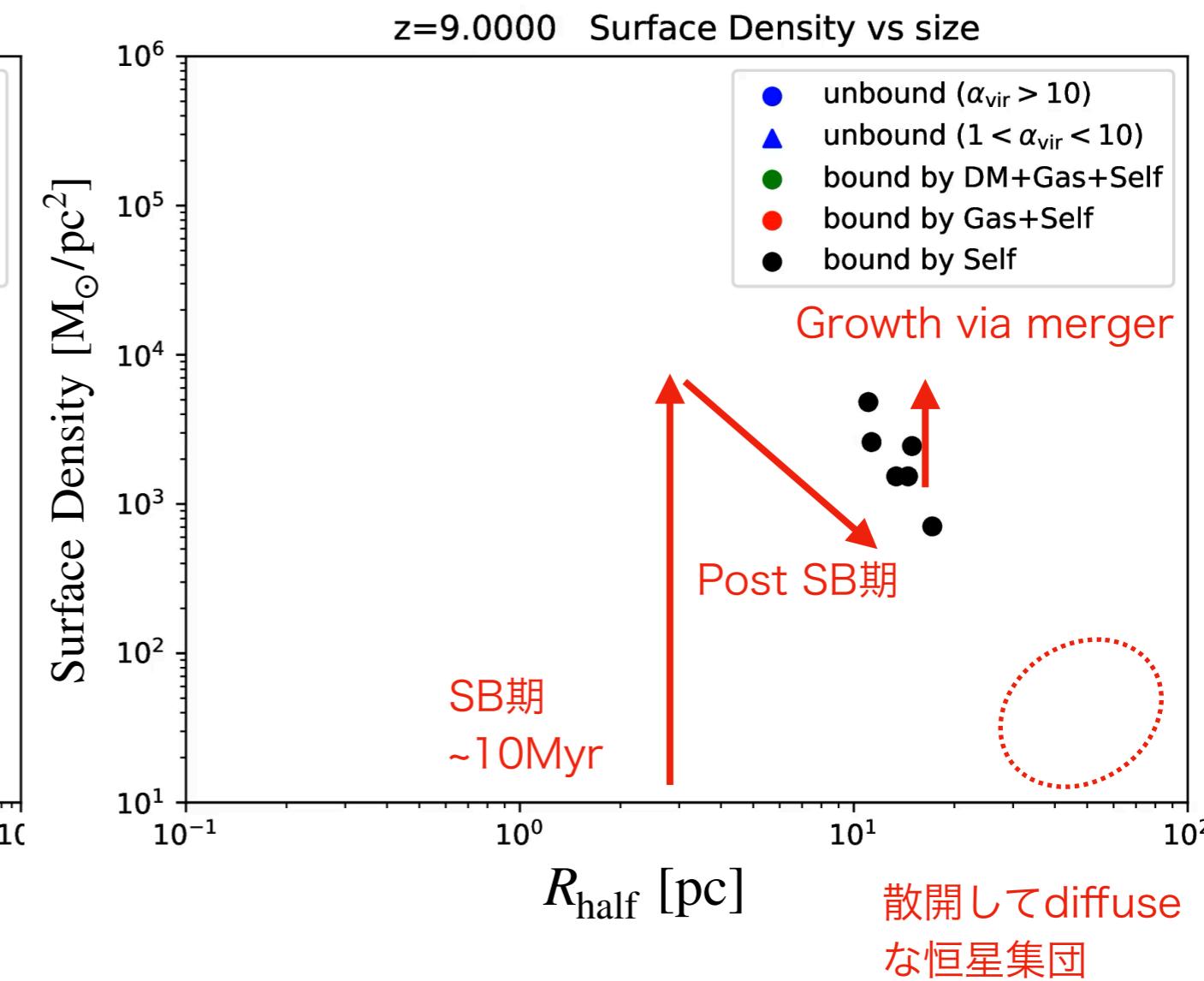
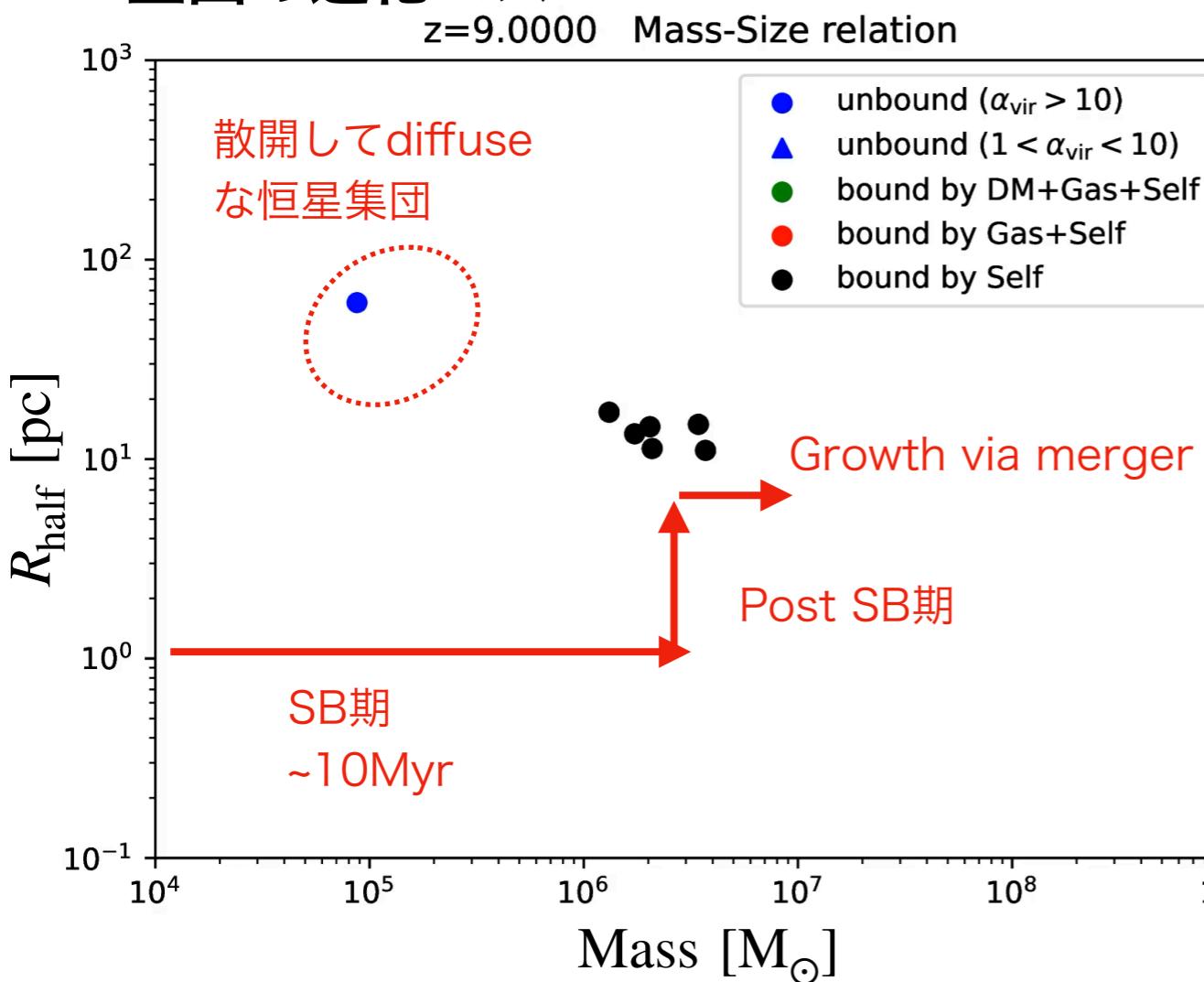
Virial parameter:

$$\alpha_{\text{vir}} = \frac{5\sigma^2 R}{GM}$$

(Bertoldi & McKee 1992)

質量-サイズ-面密度はどう進化するか？②

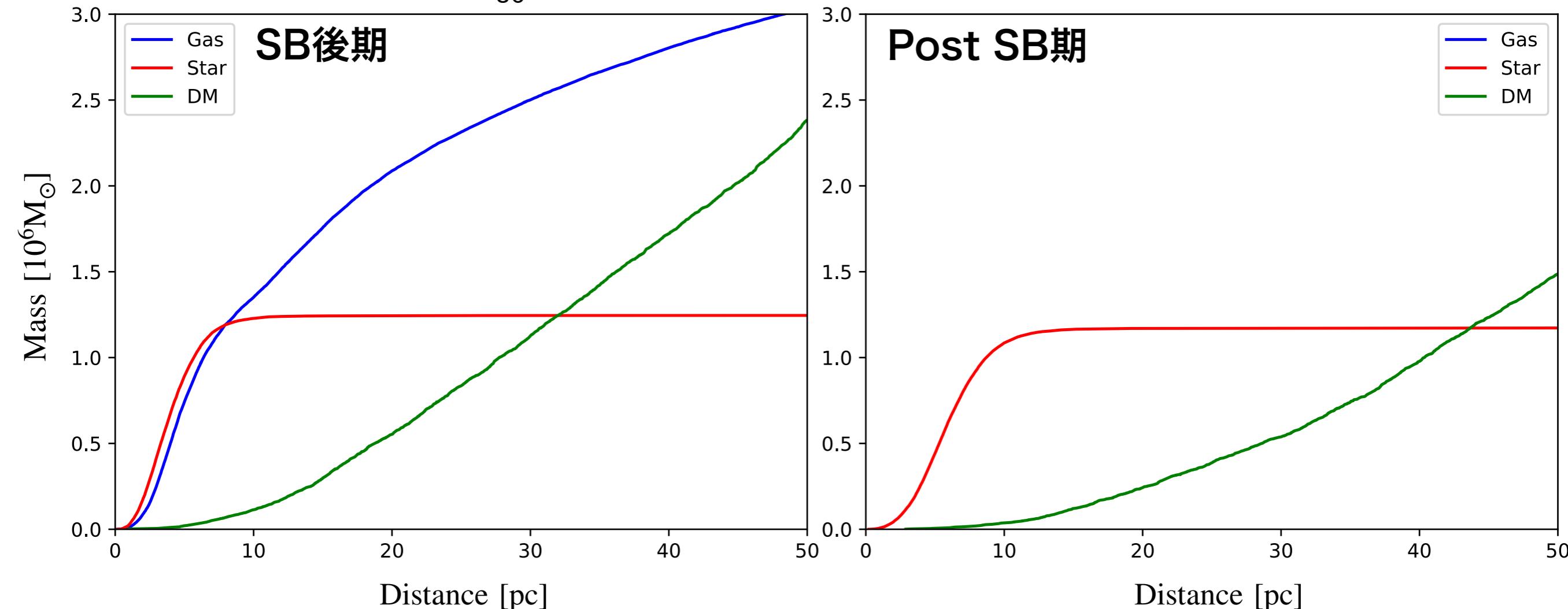
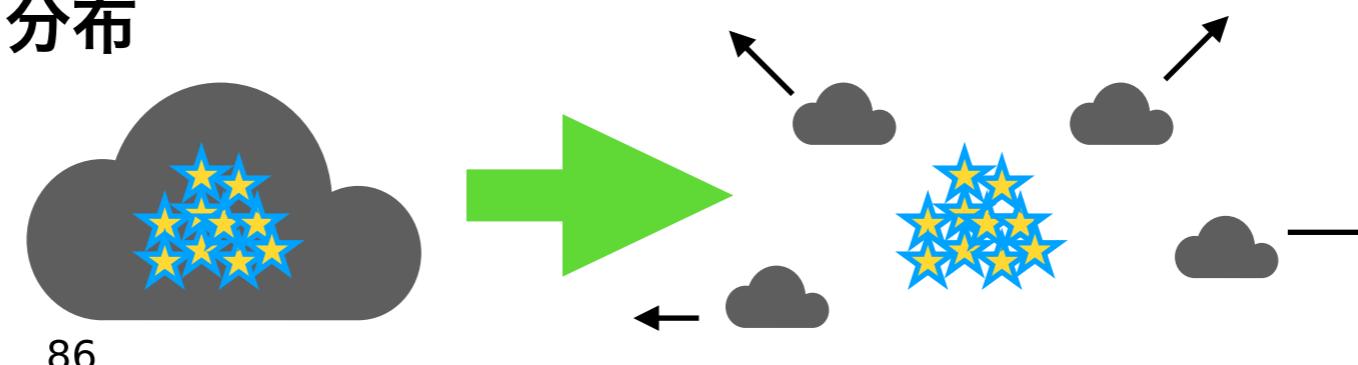
✓ 星団の進化パス



- 星団のサイズはSB期で~3pc、Post SB期では半径は1.5-2倍増加
- SB期初期はガスの重力で束縛され、SB期後期は星団の自己重力で束縛される
- (一時的だが) 高赤方偏移で観測された星団と同程度の面密度

Post SB期で星密度が減少する理由

✓ ガス、星、DMの r 方向分布

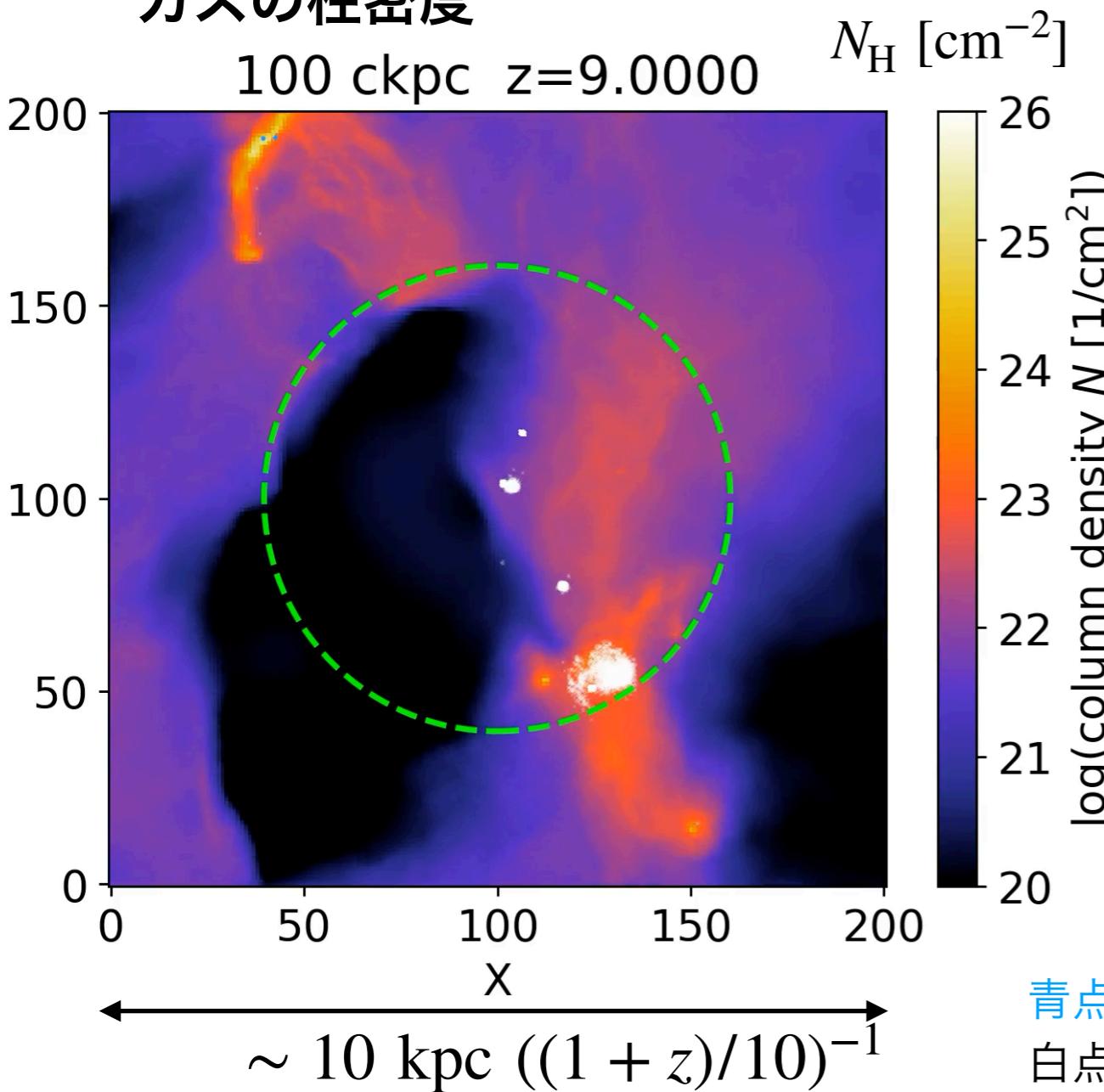


- ・ 星団のサイズはSB期で~3pc、Post SB期では半径は1.5-2倍増加
- ・ 星団は自己重力で束縛されているが、
SB中は星団半径内にほぼ同等の量のガスが存在し重力源として寄与
- ・ Post SB期でガスが一気に吹き飛ばされることで重力がおよそ半減

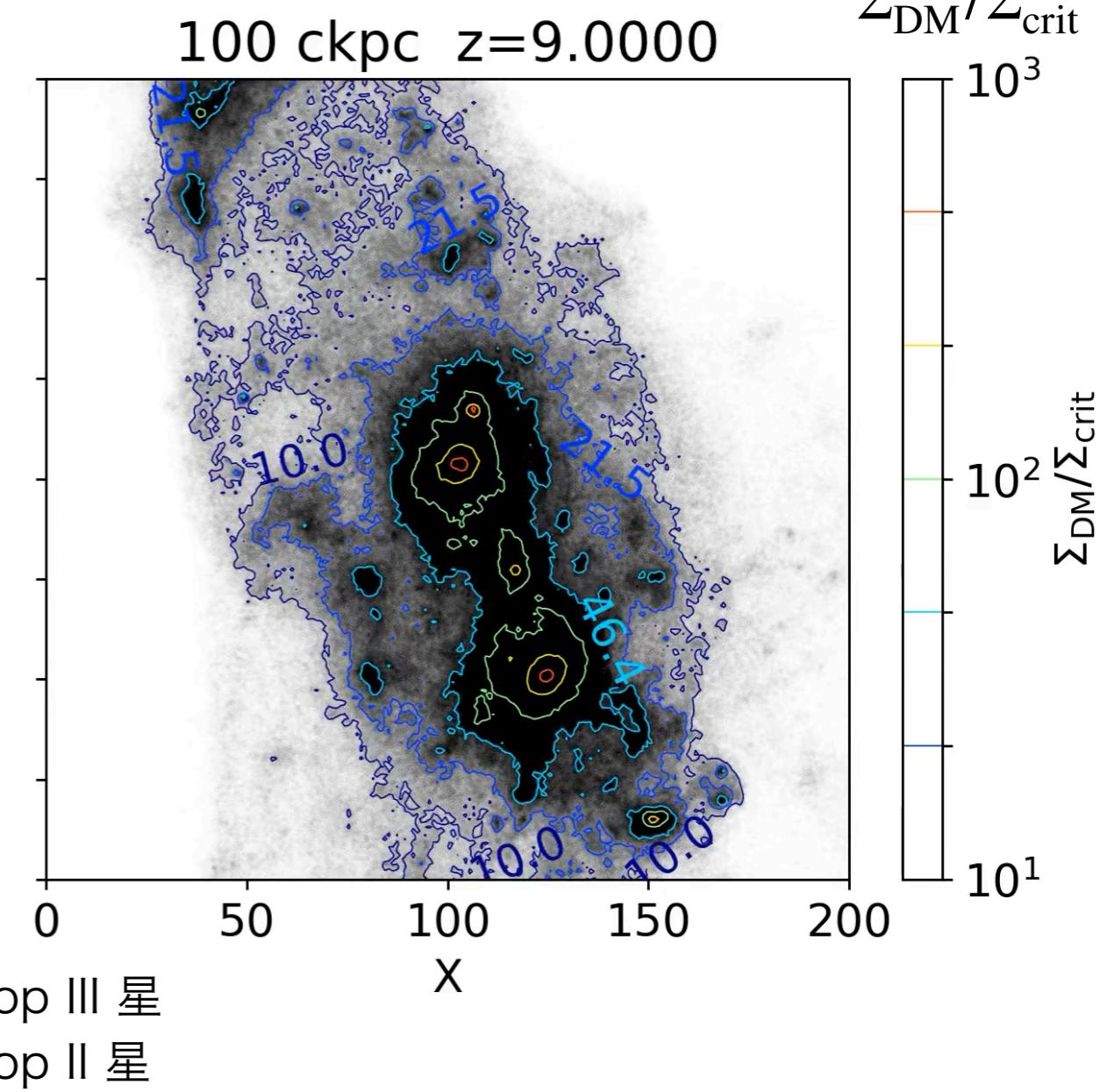
初代銀河の形態の多様性が出現

✓ $M_h \sim 2 \times 10^9 M_\odot$ model

ガスの柱密度



DMの面密度



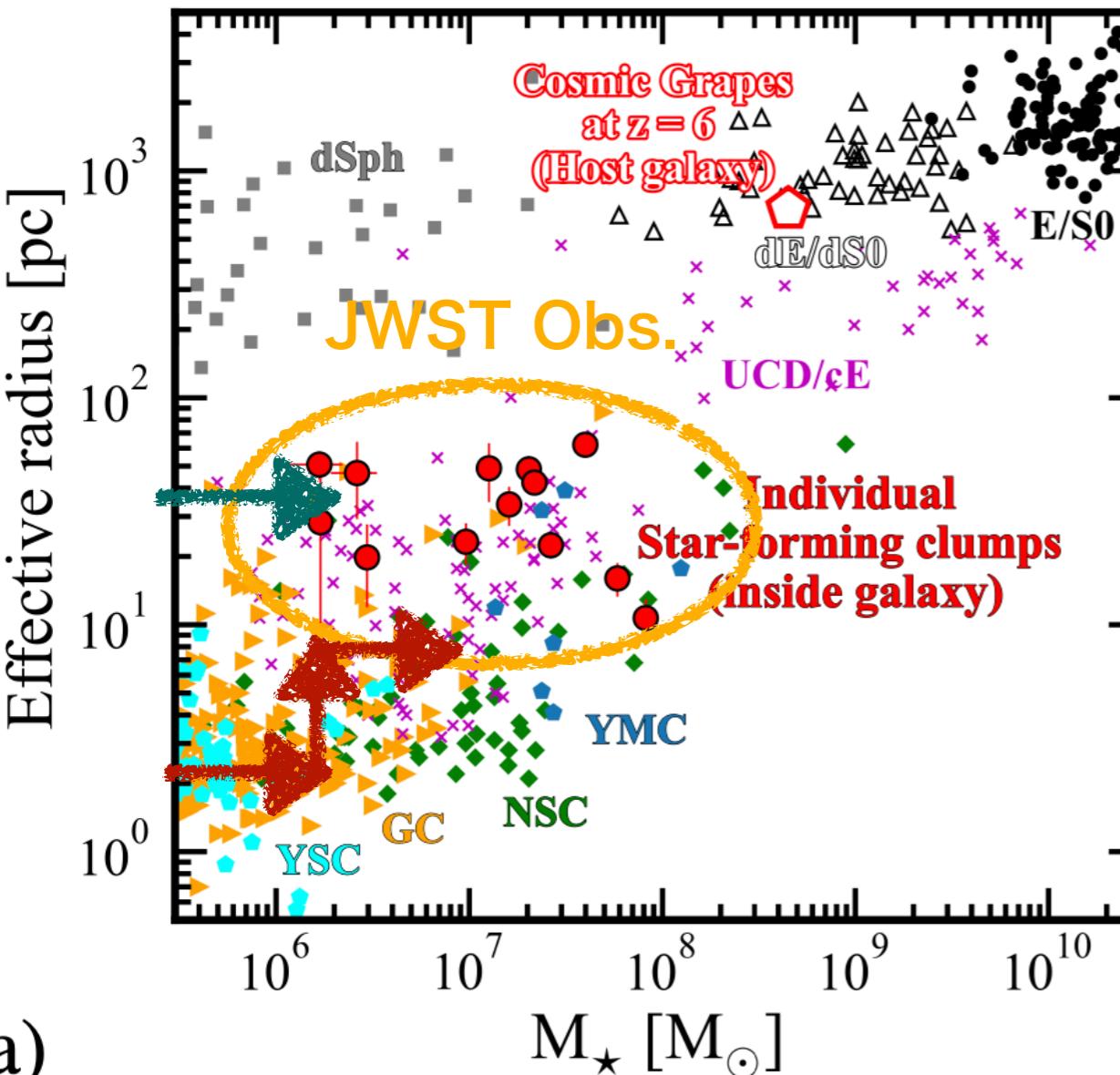
- 一部の星団は自己重力で束縛されずに散開している。
- これは近くのガスクランプがスターバーストを終えたことによる複数の超新星爆発により、重力源であるガスが吹き飛ばされたことに起因する。

議論：観測との比較

Cosmic Grapes

✓ $R_{\text{eff}} - M_{\star}$ 関係

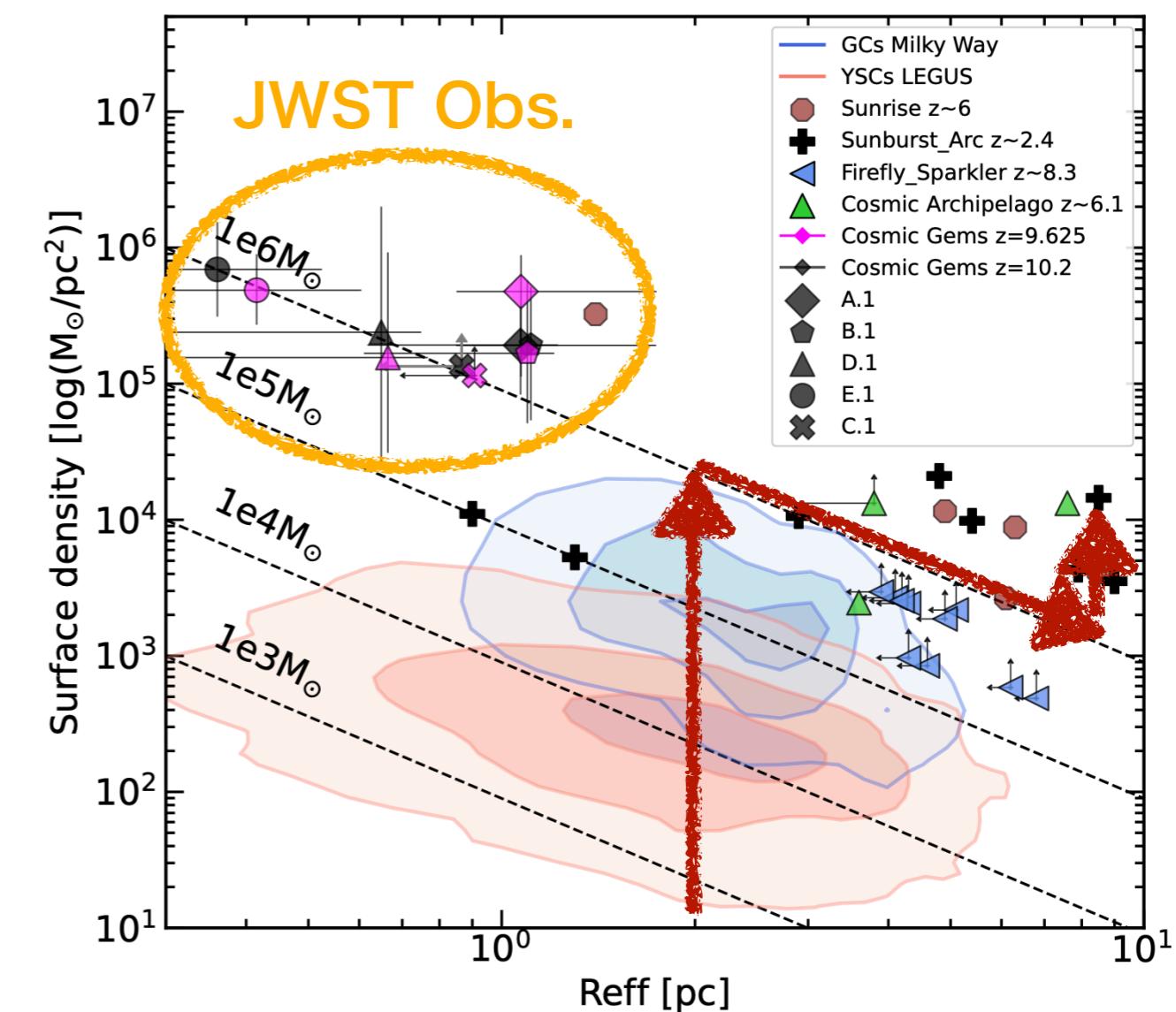
(Fujimoto et al. 2025)



Cosmic Gems

✓ $\Sigma_{\star} - R_{\text{eff}}$ 関係

(Messa et al. 2025)



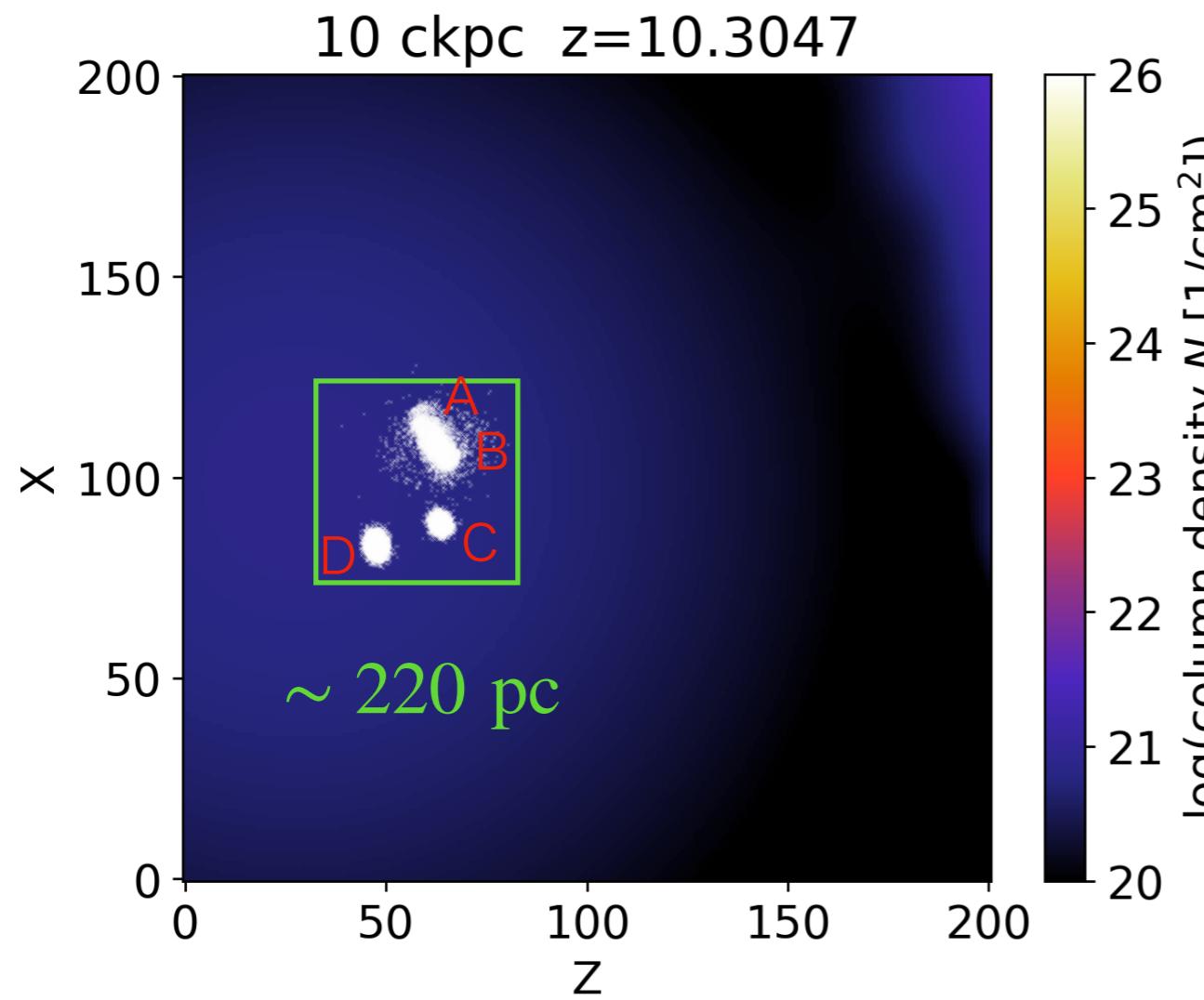
a)

- JWSTで観測された天体と質量は同程度、面密度は1桁足りない。
- 球状星団と同じような領域にも分布
- Sunrise, Sunburst Arc, Firefly Sparklerとコンシスティント
- Cosmic Grapeはeffective radius がガス半径の場合コンシスティント

議論：質量の大きい初代銀河の形態

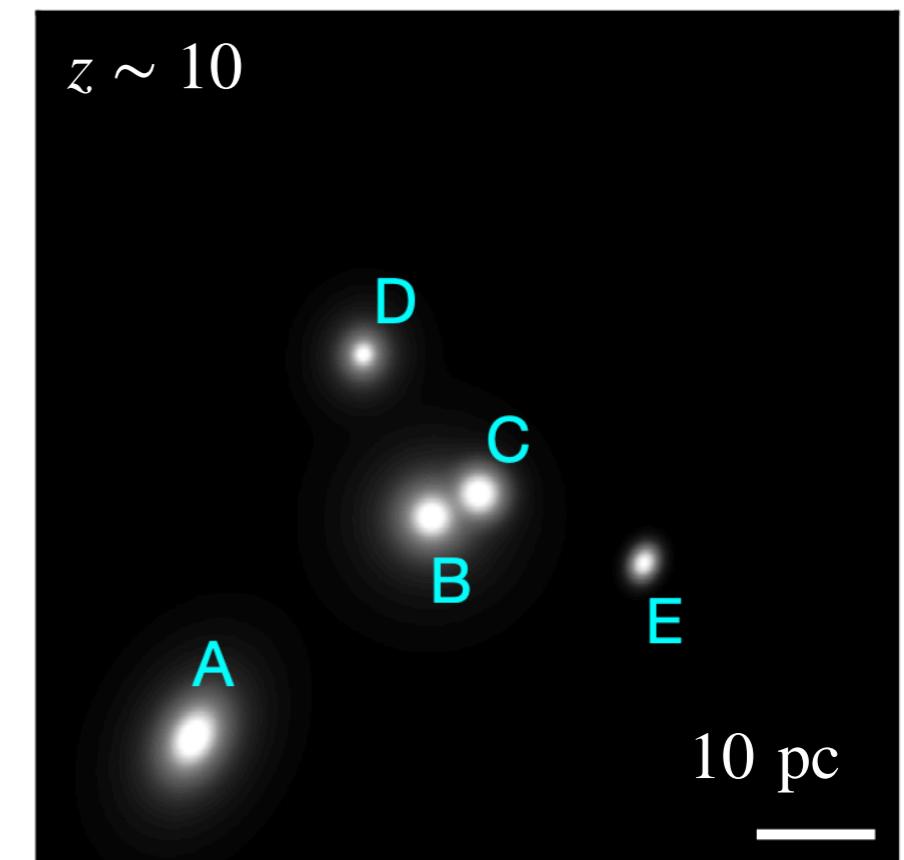
13/14

This work



Cosmic Gems

(Adamo et al. 2024)



- 初代銀河は星団のmergerにより一時的に複数（4-5）の星団を宿す
- これらは力学的に緩和するのに時間がかかるため（~100Myr）、観測可能。
- 観測されたGC-likeな星団を複数宿す系は複数のコンパクト星団の合体で説明可能

まとめ

観測された銀河と同程度の質量を持つ初代銀河について高分解能の宇宙論的流体シミュレーションを行った。

- $\sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$ のハローは $\sim 10^8 M_{\odot}$ のハローが複数合体することで形成。
- Far-UVがトリガーする Pop II スターバースト (Sugimura et al. 2024) によって merger過程においてそれぞれのハローの中心にコンパクトな星団が形成される。
- 質量の大きい初代銀河は個々のコンパクト星団の合体によって形成される
- 同時に2-3個の星団が合体する
- 一時的に星団のバイナリーが形成される
- 星団同士が力学的に緩和するまで時間がかかるため、質量の大きい初代銀河は複数のコンパクト星団を宿す可能性がある
- 観測されたGC-likeな星団を複数宿す系は複数のコンパクト星団の合体で説明可能
- Mass-Size relationとSurface Density-Mass relationの進化パスを明らかにした。
- 星団はスターバースト前期ではガスの重力で、後期では自己重力で束縛される。
- 逆にガスクランプはスターバースト前期では自己重力で、後期では星団の重力で束縛される。
- 一部のハローはスターバースト中にガスを失うことで重力的にunboundな星団が形成される。
- 近くのコンパクト星団のSNeなど外的な要因によって散開星団が形成される可能性がある。