

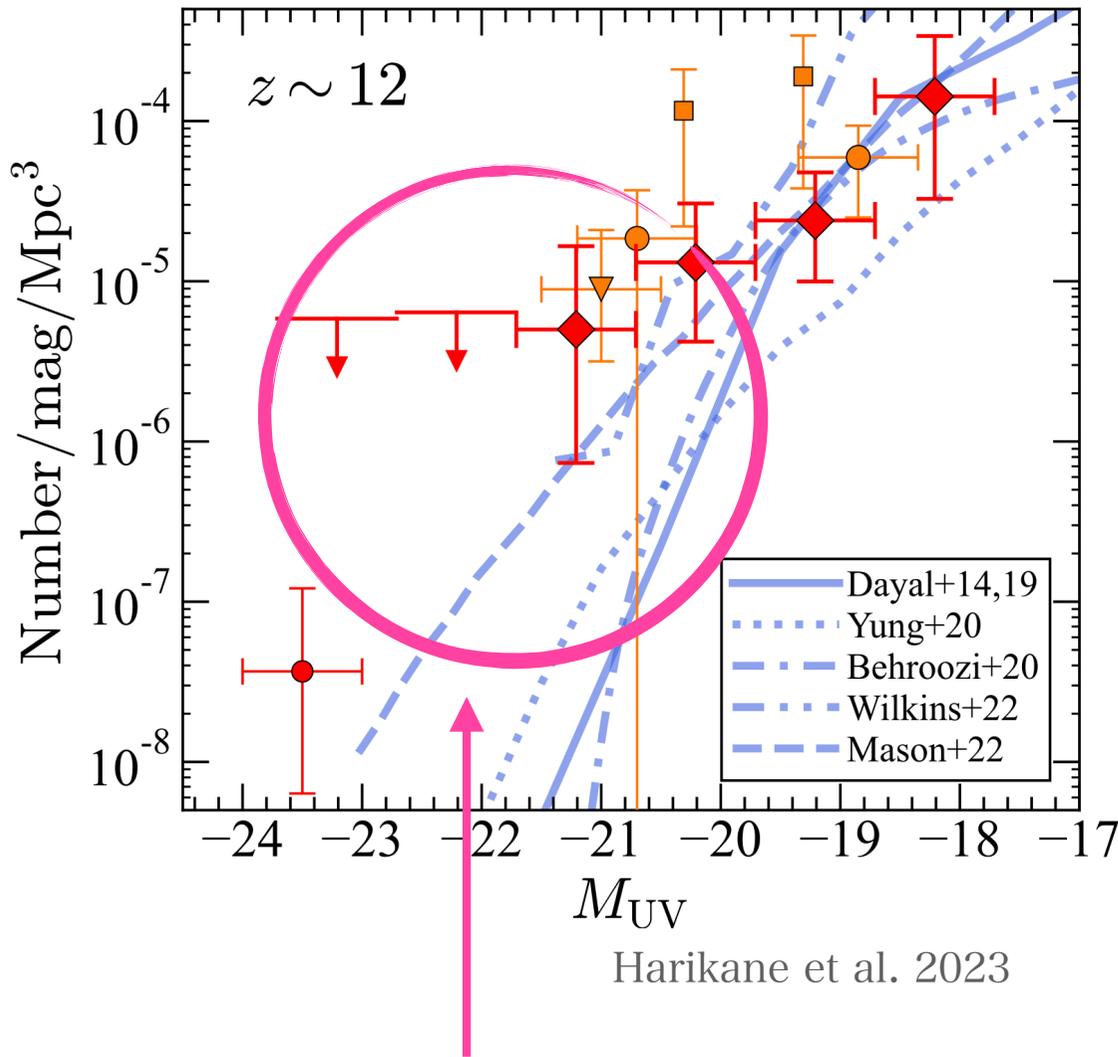
# 初代銀河の形成過程における 種族II星の初期質量関数とその影響

東北大学 天体理論グループ

石田 怜士(M2)

共同研究者 安倍牧人(呉高専)、矢島秀伸(筑波大学)、大向一行(東北大学)

## ✓ JWSTによる高赤方偏移銀河のUV光度関数



理論予想よりも多い

### 様々なシナリオ

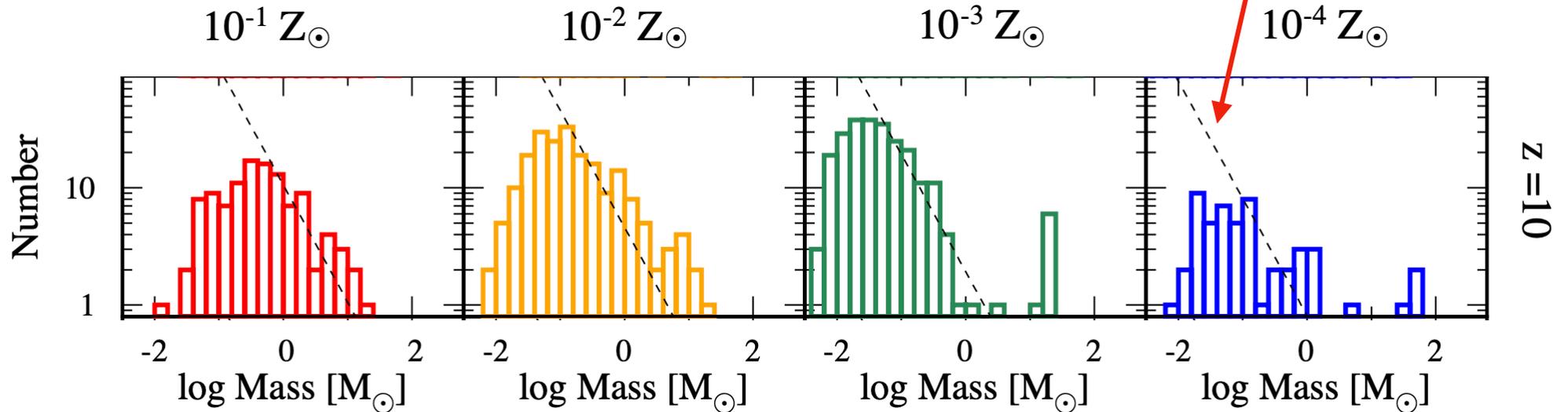
- トップヘビー IMF
- 星形成効率の変化 (Dekel et al. 2023)
- Dusty outflow (Ferrara 2024, fiore et al. 2023)
- Burstiness
- AGNの寄与
- 宇宙論モデルの修正

## ✓ 高赤方偏移環境

高いCMB温度 + 低い金属量

高赤方偏移環境を模擬した星団形成シミュレーション

Chon et al. 2022



低金属量になるにつれ、大質量星の割合が増加（トップヘビーIMF）

IMFの変化を考慮したシミュレーションが必要 (e.g. Oku et al. 2024)

だがまずは、

宇宙論的流体シミュレーションを行い、IMFを変化させた時の  
初代銀河の性質（UV光度、星質量、平均金属量）を調査する。

## ✓ 輻射フィードバック

### ▶ 電離フィードバック

- ・ 電離光子 ( $> 13.6$  eV) によるHIの電離&加熱

### ▶ H<sub>2</sub>の量に対するフィードバック

- ・ Lyman-Werner光子 (11.2 – 13.6 eV) によるH<sub>2</sub>分子の解離  $H_2 + h\nu \rightarrow 2H$
- ・ 0.75 eV以上の光子によるH<sup>-</sup>の電離  $H^- + h\nu \rightarrow H + e^-$

$$J_{21,\text{II}} \simeq 3000 \left( \frac{r}{100\text{pc}} \right)^{-2} \left( \frac{M_{*,\text{II}}}{10^4 M_\odot} \right) \left( \frac{\eta_{\text{LW}}(\alpha)}{4000} \right) \quad (\text{Johnson et al. 2013})$$

## ✓ 超新星爆発によるフィードバック

### ▶ mechanical フィードバック

- ・  $10^{51}$  [erg]の爆発
- 周囲のガスに熱エネルギーを注入 (Dalla Vecchia & Schaye 2012)

### ▶ chemical フィードバック

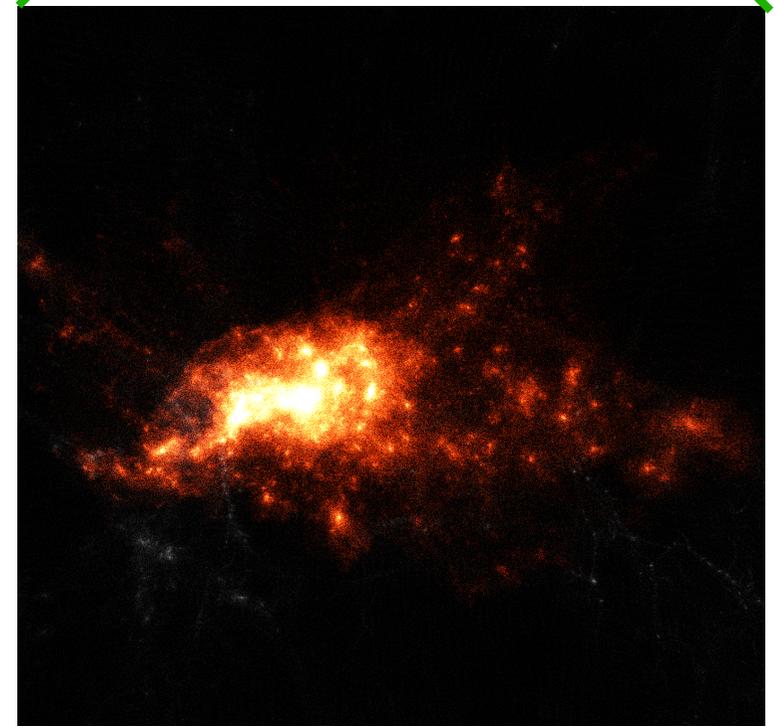
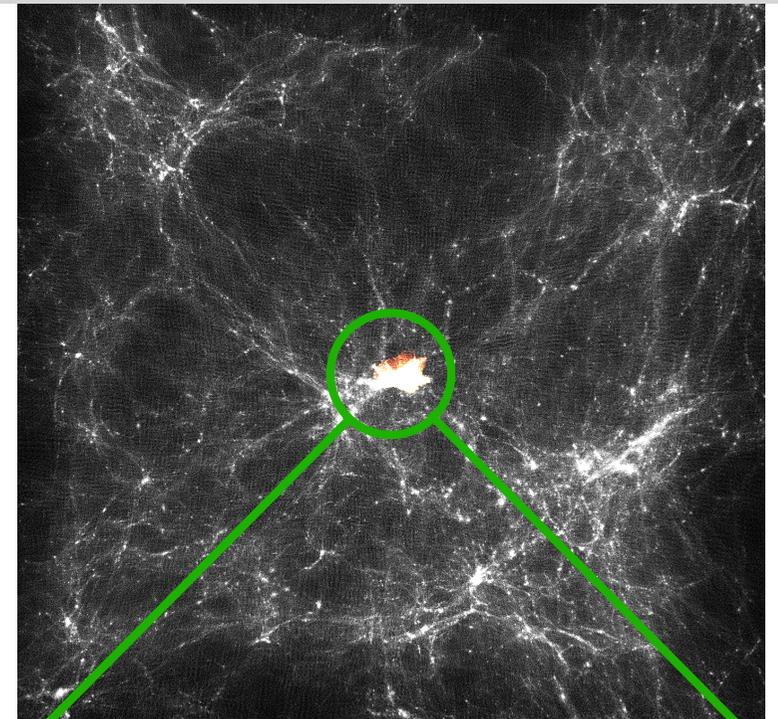
- ・ 星内部で合成された重元素を拡散させ周囲のガスを汚染
- 周囲のガスに重元素を加える (Wiersma et al. 2009)

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

- Smoothed particle hydrodynamical (SPH法)  
+
- N体 (DM及び星団粒子) 計算
- 始原ガスの非平衡化学反応 (Maio et al. 2007)  
( $e^-$ , H, He,  $H_2$ ,  $H^-$ , D, HD,  $HeH^+$ など)

## Zoom-in 計算

- 計算時間 : redshift 100  $\rightarrow$  9
- 計算領域 : 2 cMpc cubic,  
zoom-in 領域  $\sim$  200 ckpc ( $M_h \sim 5 \times 10^8 M_\odot$ )  
[ 4 cMpc cubic,  
zoom-in 領域  $\sim$  400 ckpc ( $M_h \sim 10^9 M_\odot$ ) ]
- ハロ一質量 (  $z=9$  ) :  $\sim 5 \times 10^8 M_\odot$ 、 [  $\sim 10^9 M_\odot$  ]
- 分解能 :  
SPH 粒子質量  $\sim 93 h^{-1} M_\odot$   
ソフトニング長  $\epsilon = 9 \times 10^{-2}$  ckpc



## 星形成のパラメータ

- 星形成率 :  $\frac{d\rho_*}{dt} = c_* \frac{\rho_{\text{gas}}}{t_{\text{ff}}} \quad (c_* = 0.05)$
- 星形成の条件
  - 密度 :  $10^2 < n_{\text{H}} < 10^5 \text{ [cm}^{-3}\text{]}$
  - 温度 :  $T < 5000 \text{ [K]}$
- Pop III  $\rightarrow$  PopII 遷移の金属量閾値 :  $Z > 1.5 \times 10^{-4} [Z_{\odot}]$  (Omukai et al. 2005)
- 星のIMF :

**Pop III** : log-flat (固定)

$$\frac{dn}{dM} \propto M^{-\alpha}, \quad \alpha = 1.0$$

$$[10M_{\odot} < M < 500M_{\odot}]$$

**Pop II** : 5つのモデルを調べた

Chabrier と PowerLaw (4 モデル)

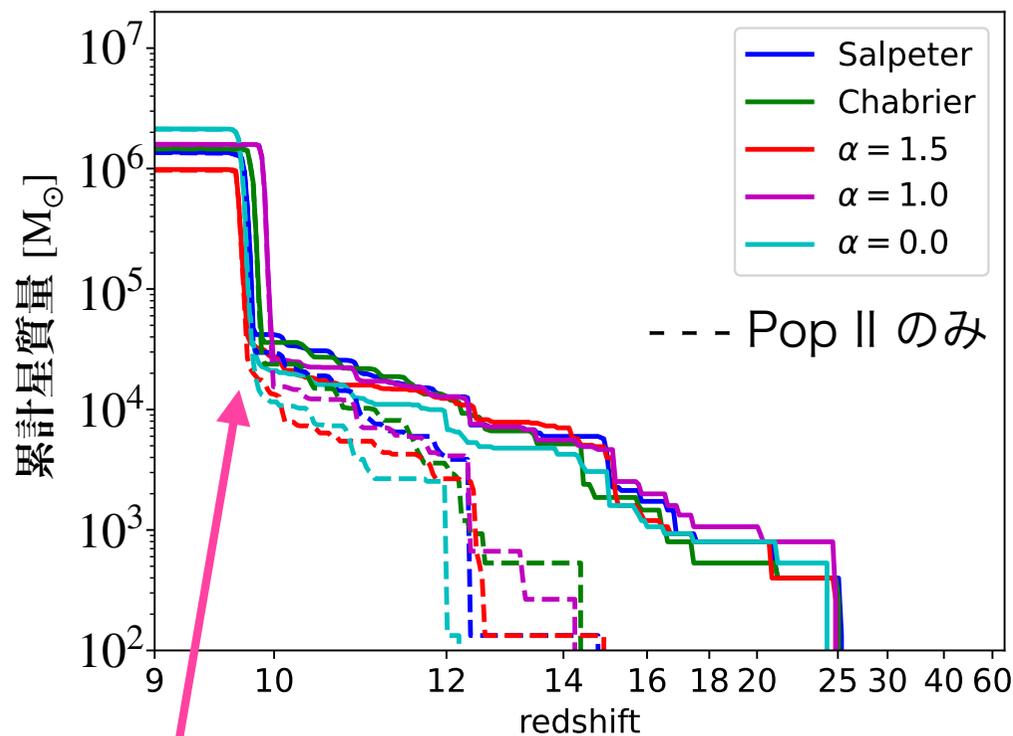
$$\frac{dn}{dM} \propto M^{-\alpha}, \quad \alpha = 2.35, 1.5, 1.0, 0.0$$

$$[0.1M_{\odot} < M < 100M_{\odot}]$$

## 星からのフィードバック

- 大質量星の平均寿命 :  $t_{\text{fb}} = 5 \text{ [Myr]}$
- SN II, 電離・LW光子 (Abe et al. 2013)  
+ IMFのべき依存性

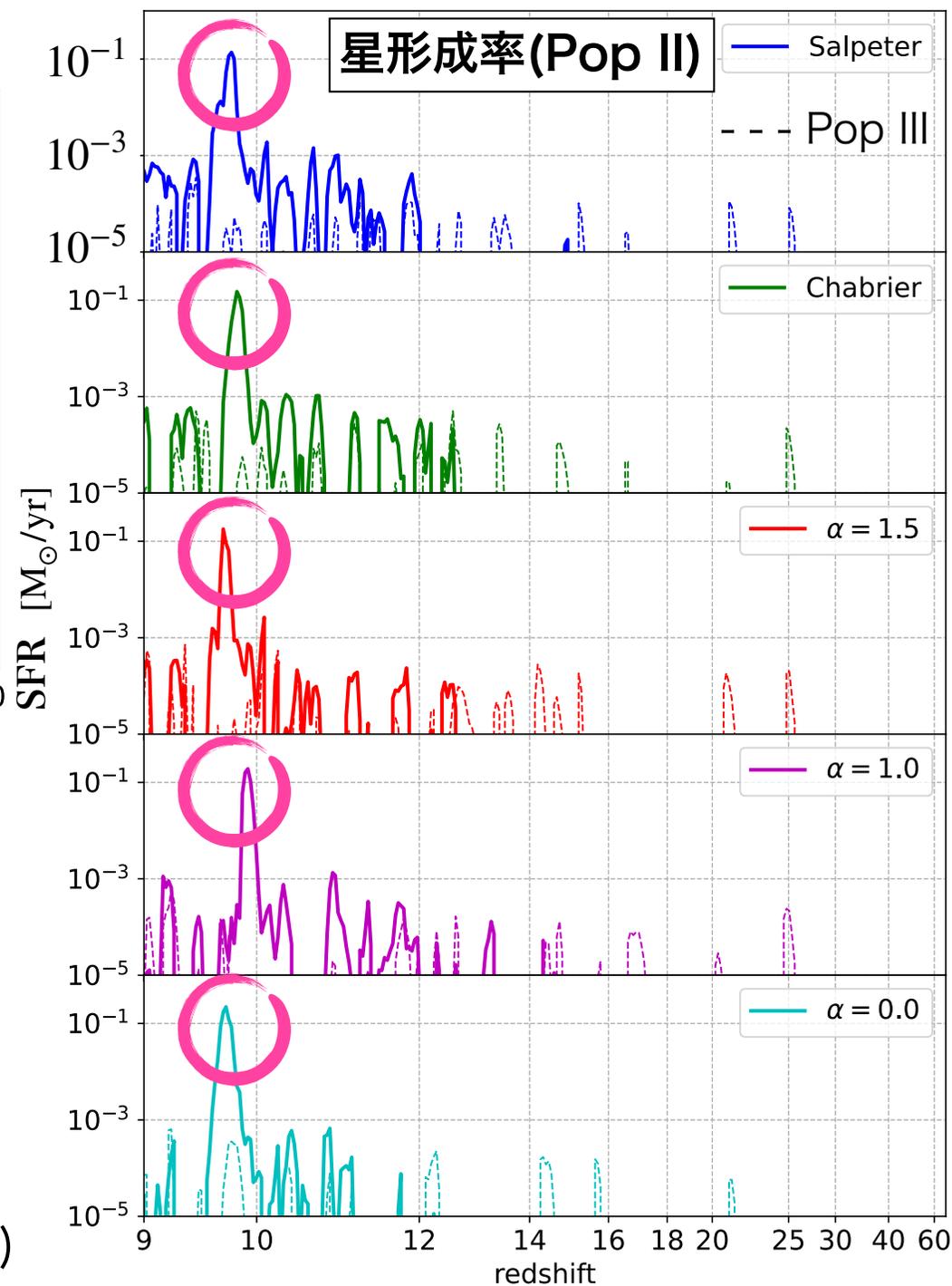
## 星質量の時間進化

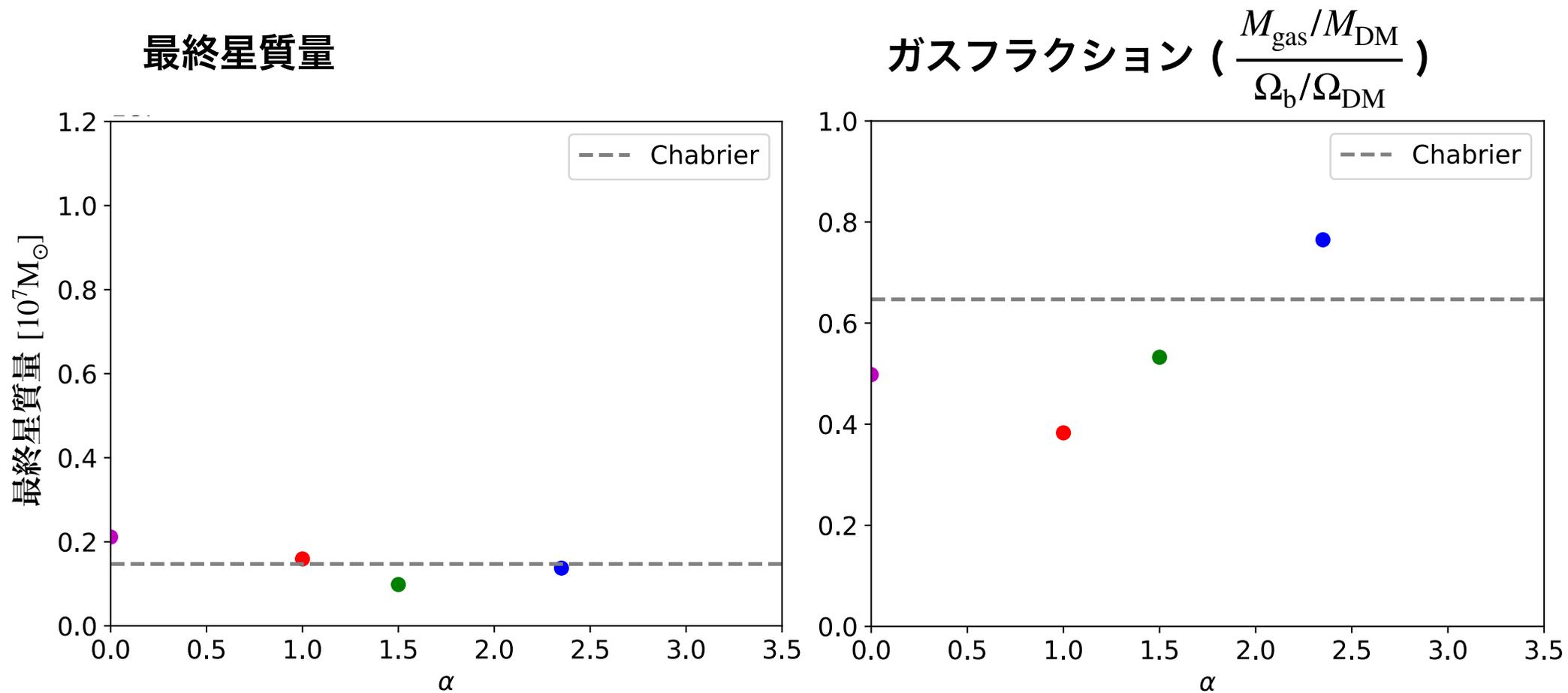


赤方偏移 $\sim 10$ で Pop II 星の  
スターバーストが発生

これが最終的な星質量を決めている

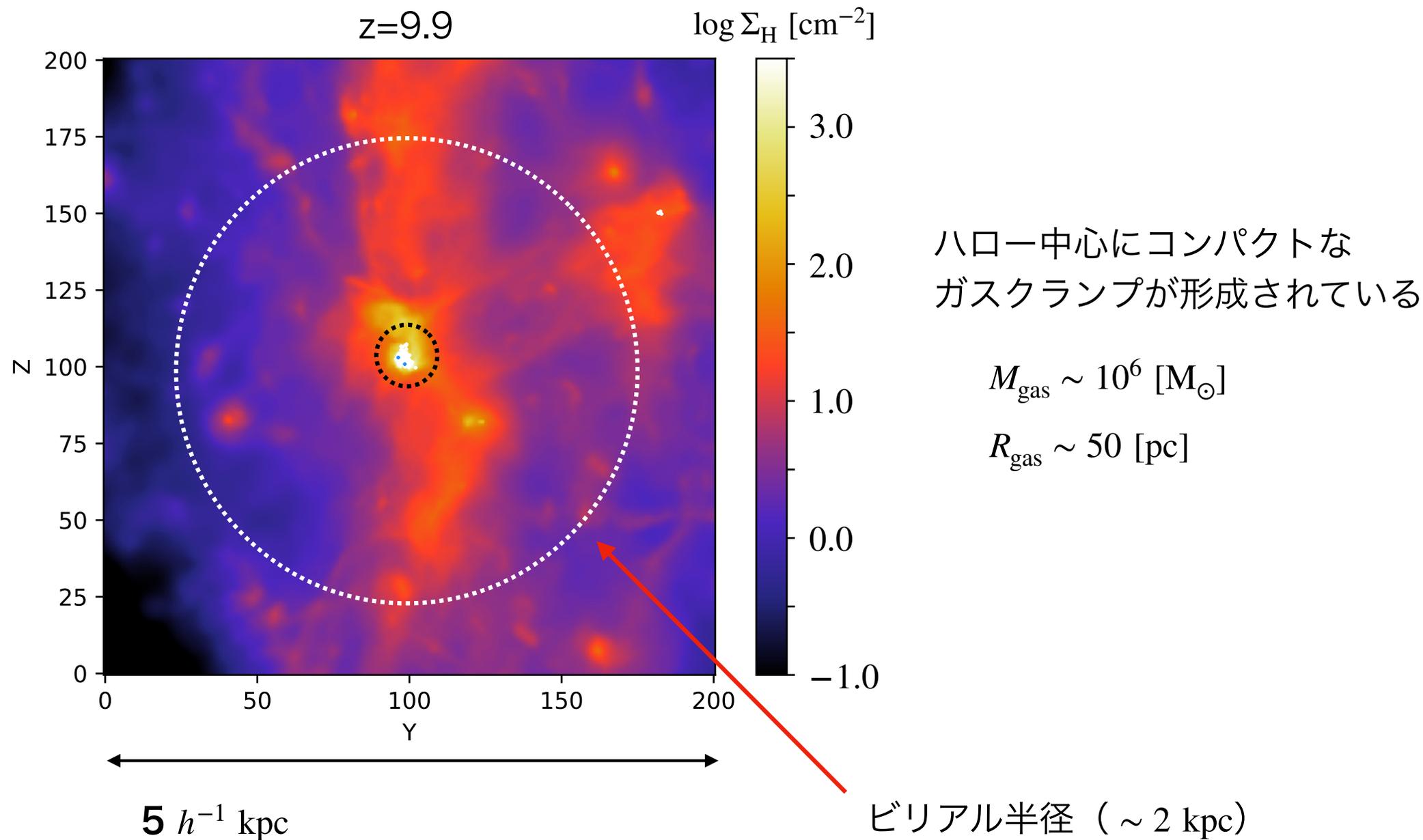
バーストの期間  $< 5$  Myr (feedback時間)

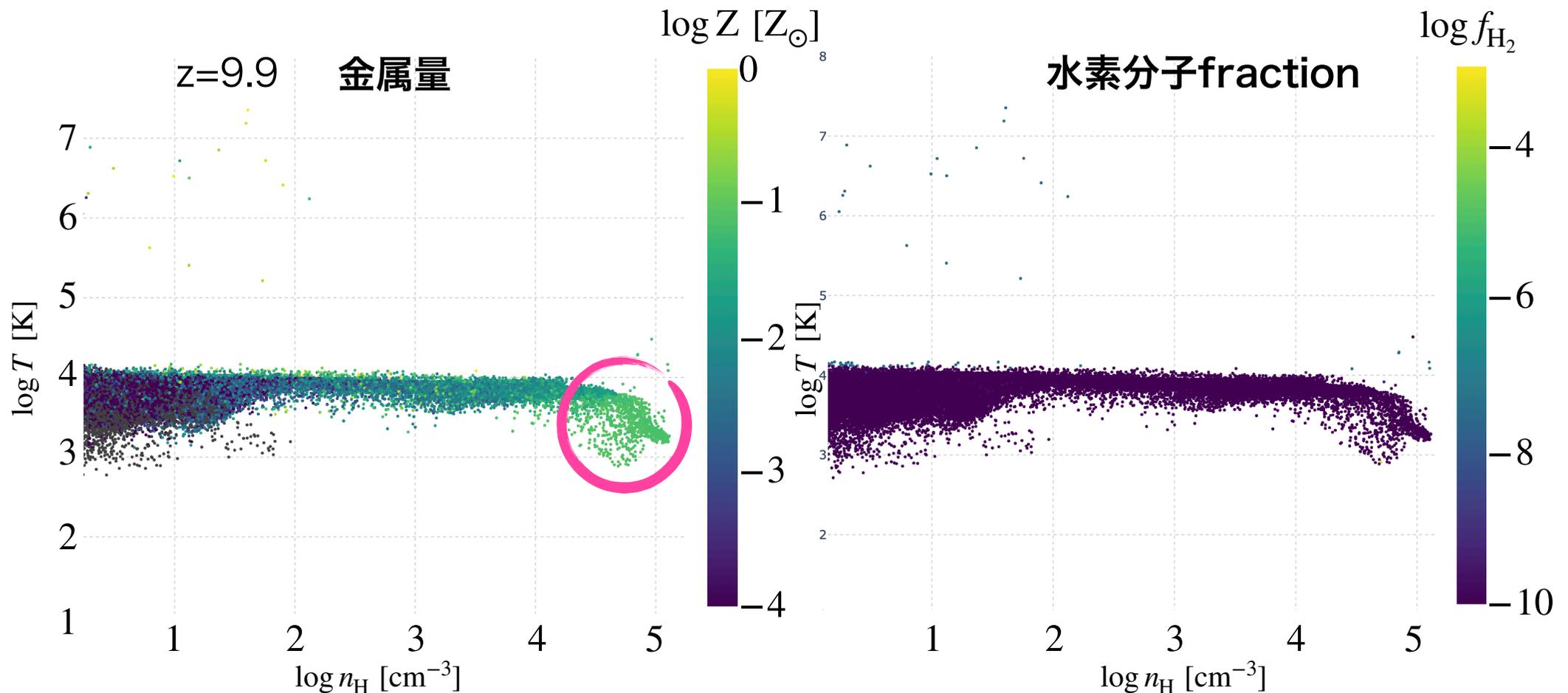




星質量はIMFのべきによらず同程度

熱フィードバックが強いほどハロー内のガスの量が減っている

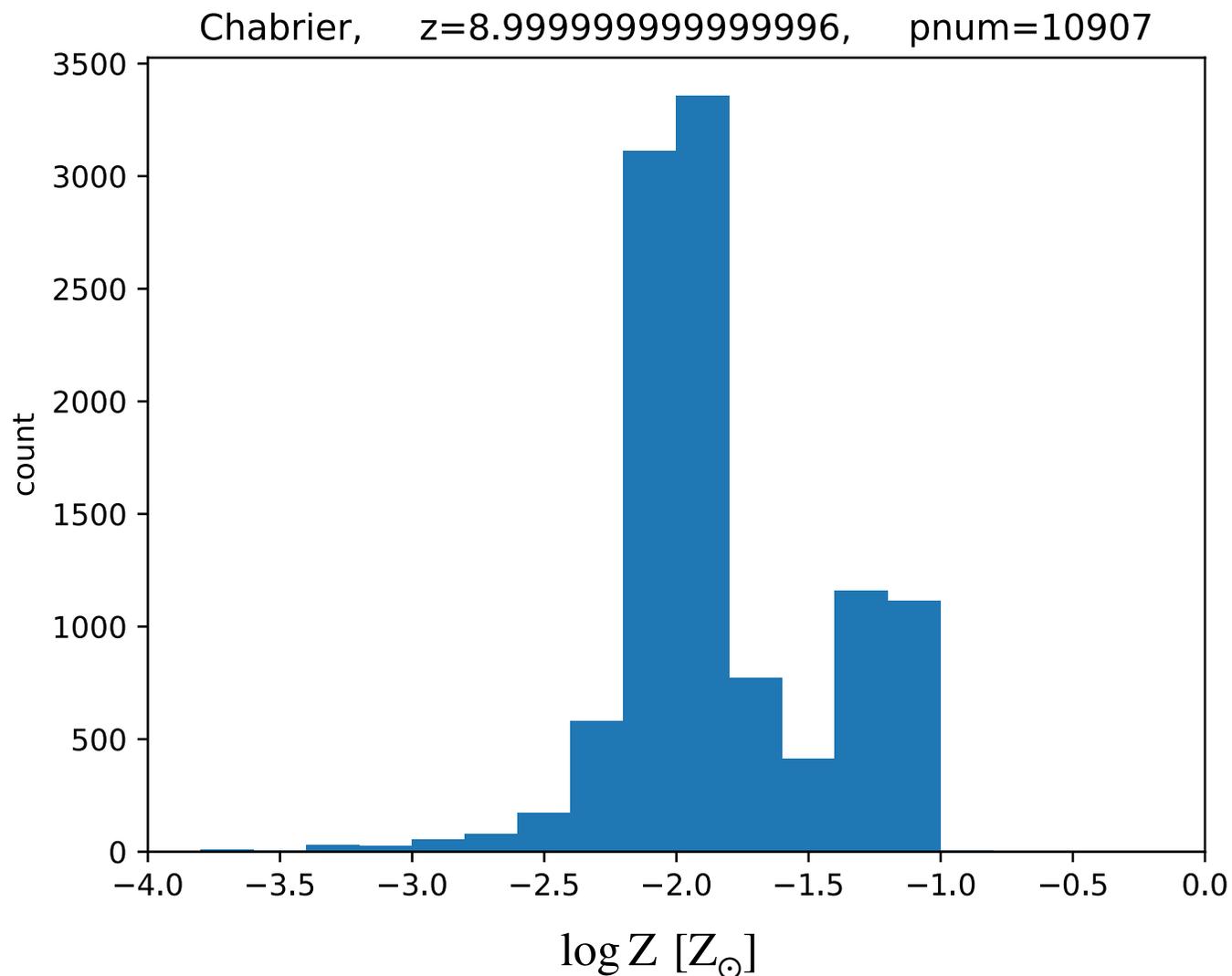




ガスクラump内の金属量は比較的高い ( $Z \sim 10^{-2}Z_{\odot}$ )

ガスクラump内の水素分子は強いLW輻射によりほとんど解離 ( $f_{H_2} < 10^{-10}$ )

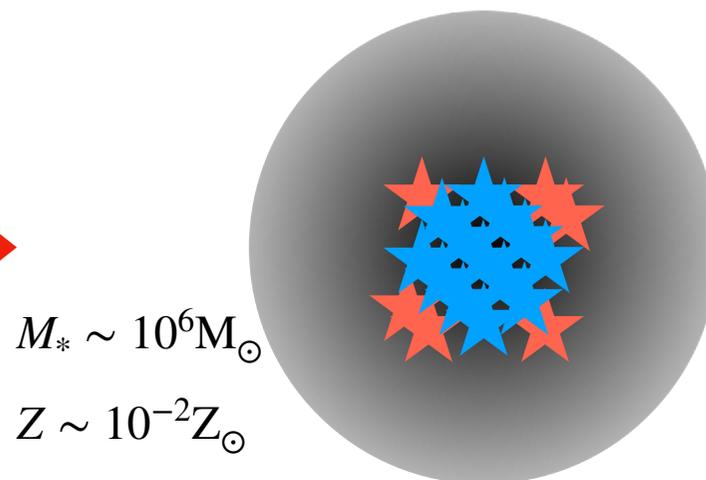
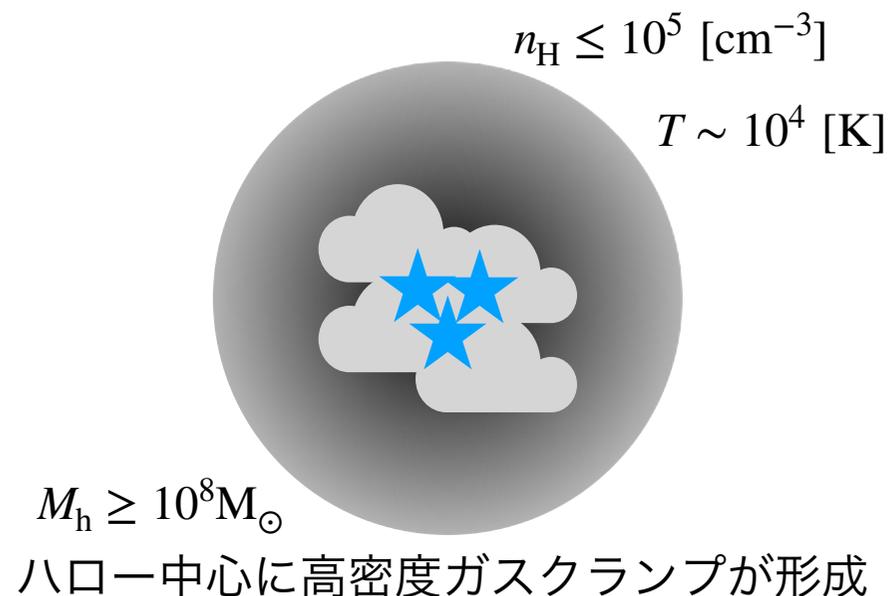
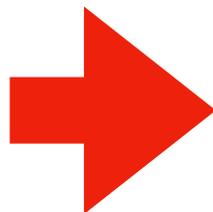
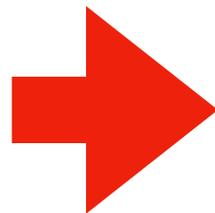
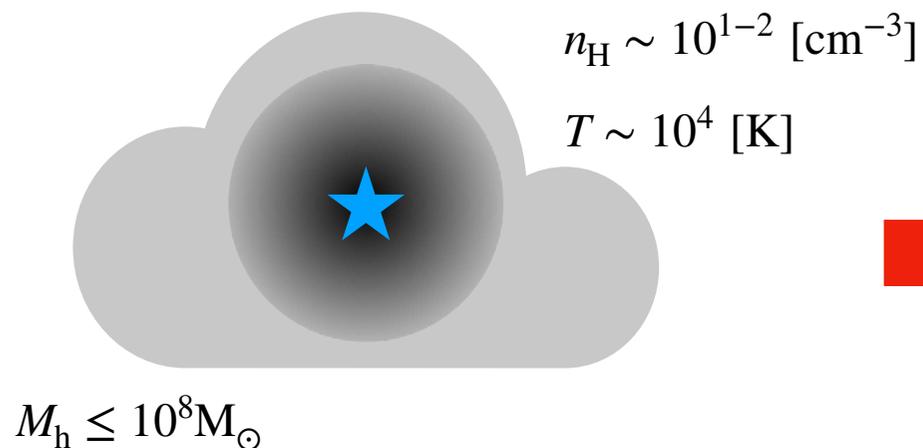
ガスは金属冷却で冷えている



バーストで形成された星の平均金属量は  $Z \sim 10^{-2} Z_{\odot}$

形成された星の金属量は球状星団と同程度。

## 何がPopIIバーストをトリガーするのか？



## 何がPopIIバーストを終わらせるのか？

基本的には

SNeで注入された熱エネルギー  $\sim$  重力の束縛エネルギー

$$E_{\text{total,SNII}} \sim \frac{GM_{\text{DM}}M_{\text{gas}}}{R_{\text{vir}}} \\ \sim 10^{54}[\text{erg}]$$

となれば星形成が終了する。

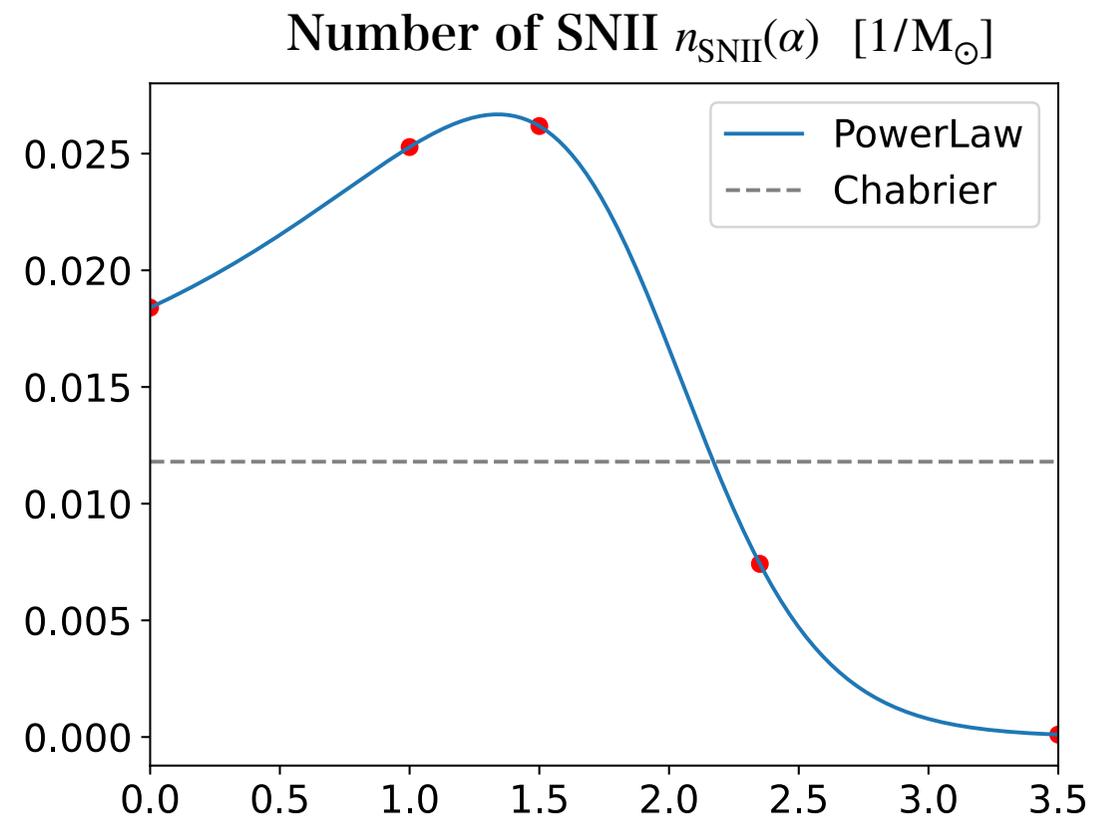
バースト中のSFR  $\sim 0.1 - 0.2[M_{\odot}/\text{yr}]$ 、

フィードバックを受けない時間：5Myr

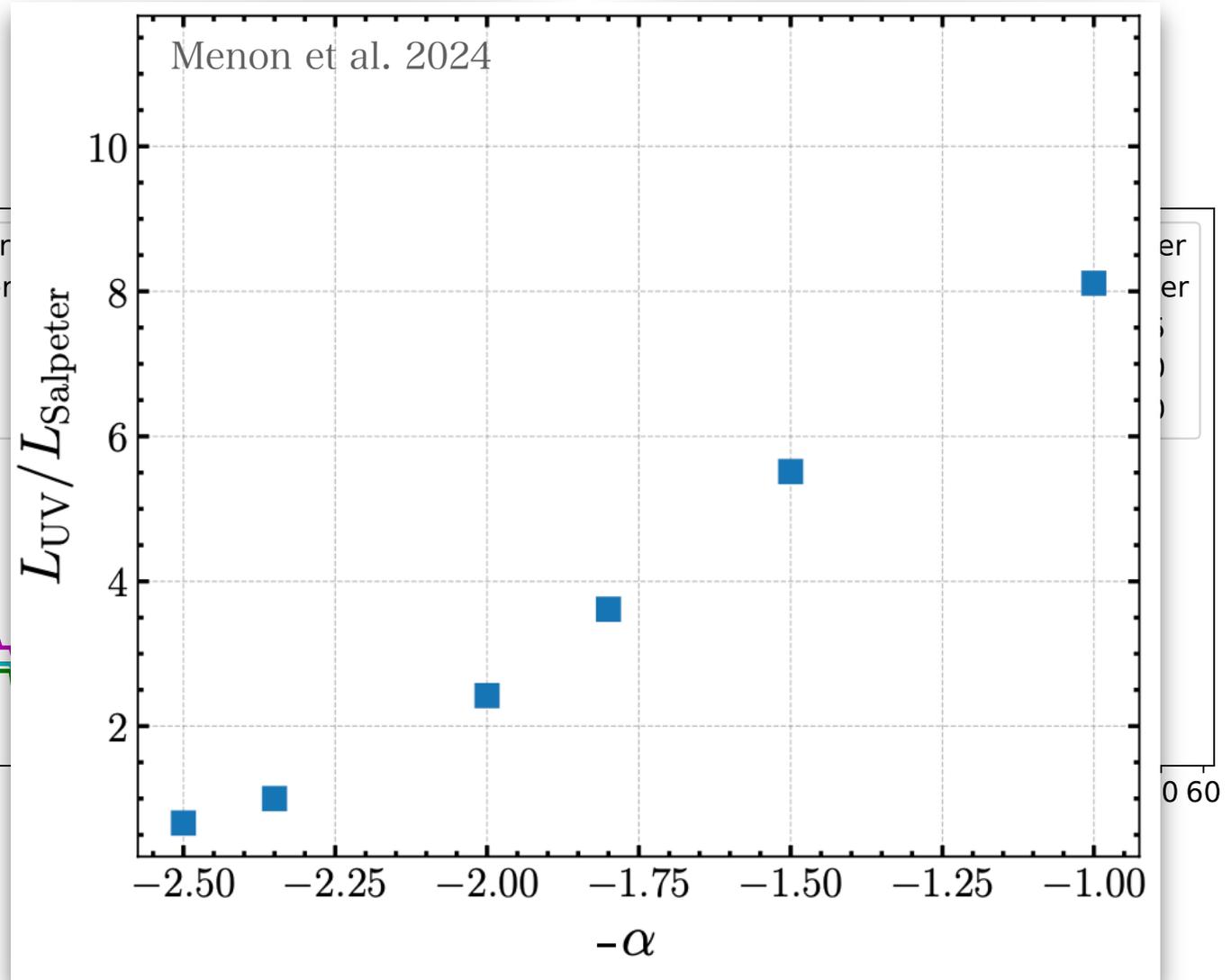
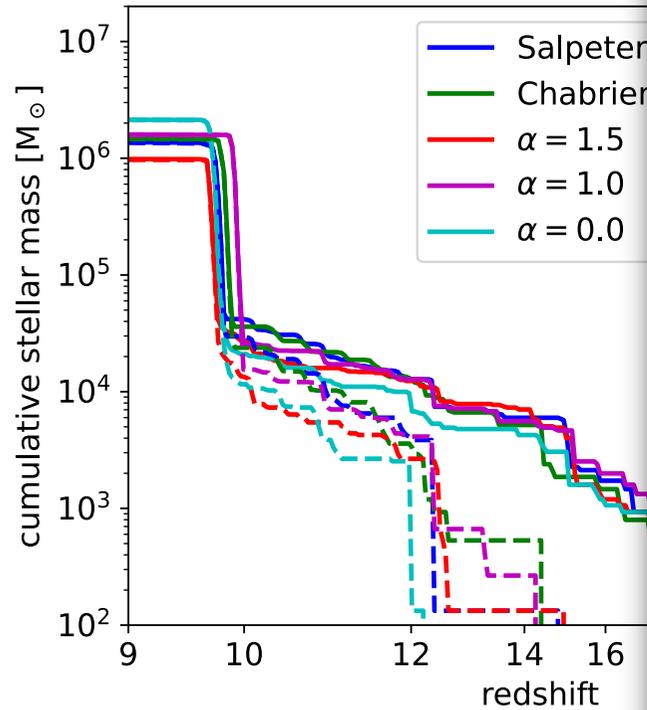
→この時にできる星質量は  $\sim 10^6 M_{\odot}$

→SNeのエネルギーは

$$E_{51}n_{\text{SNII}}(\alpha)M_* \sim 10^{55}[\text{erg}]$$



星質量の時間進化



観測を説明するには~4倍の増光が必要 (Yung et al. 2024)  
 $\alpha < 1.75$  であればJWSTの観測結果を説明可能

初代銀河の星の初期質量関数(IMF)を変化させ、  
宇宙論的zoom-in流体シミュレーションを行った。

- ・ 初代銀河のような低金属量の銀河では内部LW輻射と金属冷却によってPop II 星のバースト的な星形成が発生し、コンパクトな星団 ( $\Sigma_* \sim 10^2 [M_\odot/\text{pc}^2]$ ) が形成される。
- ・ それにより、最終的な星質量はIMFを変えても同程度。
- ・ 形成された星の金属量は球状星団と同程度。
- ・ 星質量は変化しないのに対し、UV光度はIMFのべきによって一桁程度変化しうる。
- ・ 観測されるUV光度はIMFのべき  $\alpha$  に応じて単調に増加し、 $\alpha < 1.75$  であれば JWSTの観測結果を説明可能。

## ✓ 展望

- ・ バーストが起こる間隔の解明。
- ・ 分解能を上げ、Pop II 星のスターバーストが起こるか検証。
- ・ UV光度を実際に計算し、どの程度の期間UVで明るく見えるか定量化する。
- ・ Evolving IMF(Chon et al. 2022)を導入したシミュレーションの実行。
- ・ 宇宙の再電離への影響の評価。