



TOHOKU
UNIVERSITY

1/15



Theoretical Astrophysics
Tohoku University

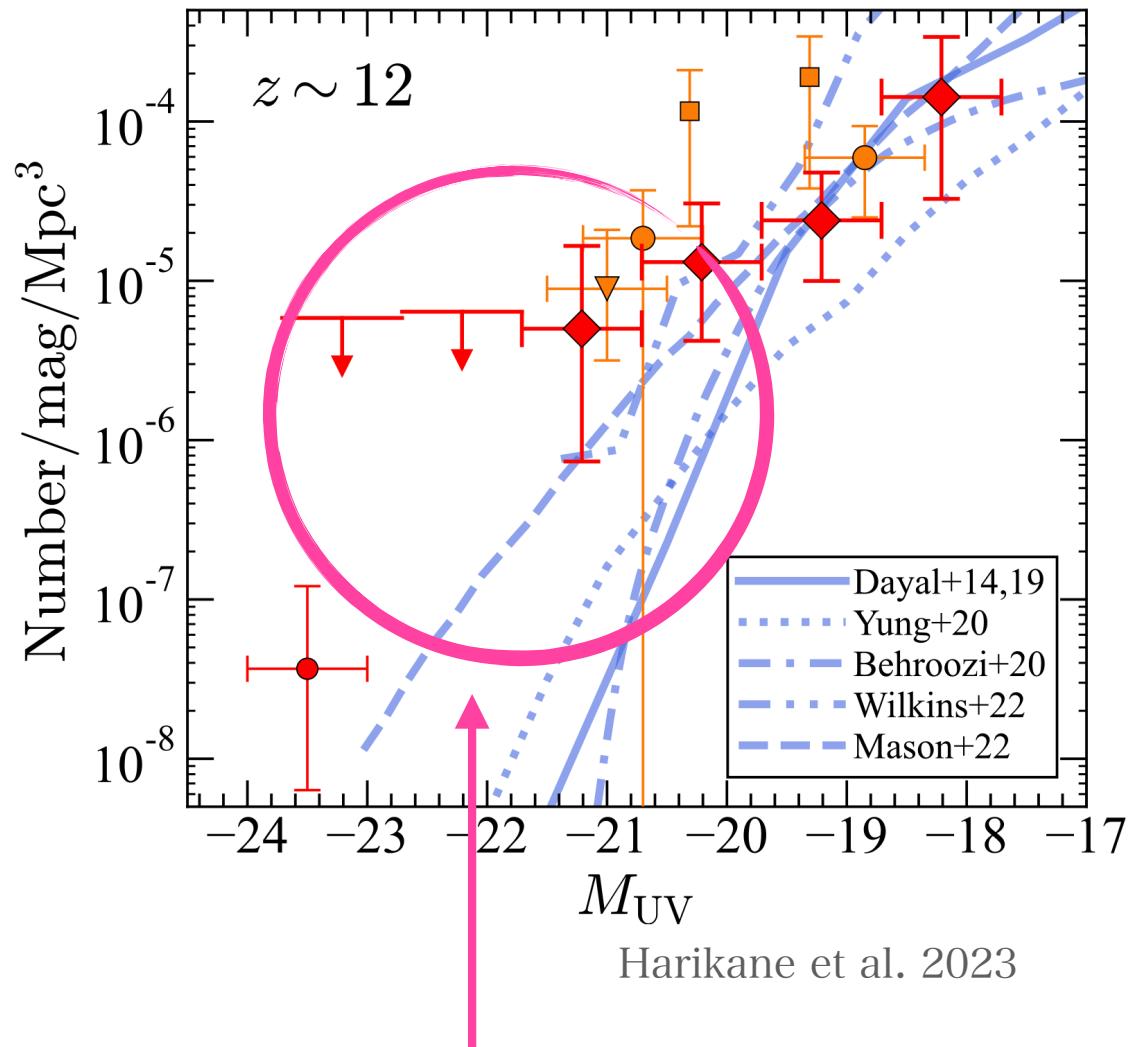
初代銀河の形成過程における 種族II星の初期質量関数とその影響

東北大学 天体力論グループ

石田 恵士(M2)

共同研究者 安倍牧人(吳高専)、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

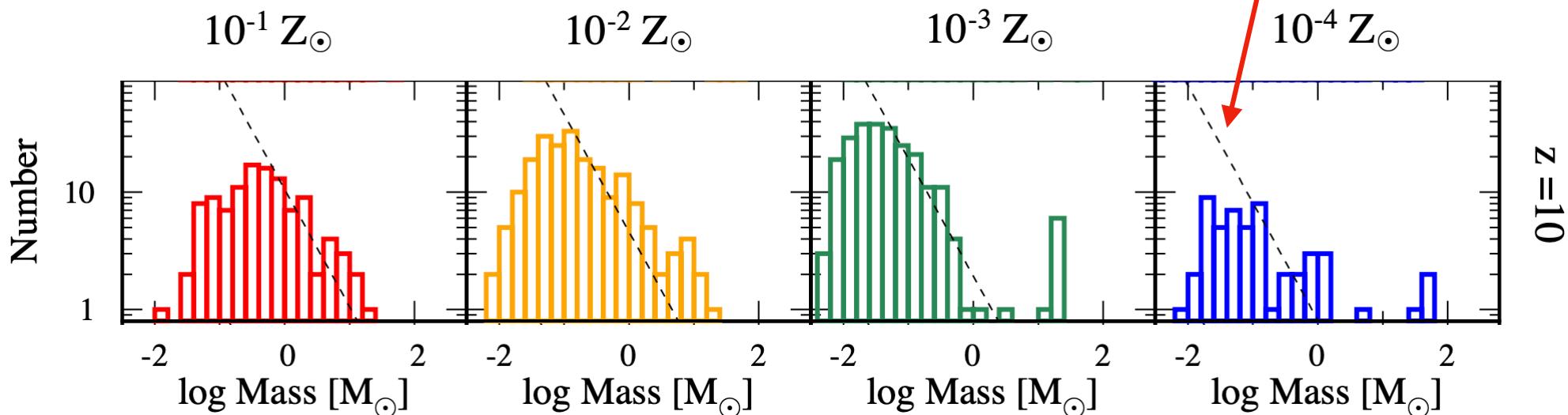
- トップヘビー IMF
- 星形成効率の変化
(Dekel et al. 2023)
- Dusty outflow
(Ferrara 2024 , fiore et al. 2023)
- Burstiness
- AGNの寄与
- 宇宙論モデルの修正

✓ 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



点線は $\frac{dn}{dM} \propto M^{-\alpha}$
において $\alpha = 2$ に相当

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 ($> 13.6 \text{ eV}$) によるHIの電離&加熱

▶ H₂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H₂分子の解離 $\text{H}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{H}$

- ・0.75 eV以上の光子によるH⁻の電離 $\text{H}^- + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{e}^-$

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

✓ 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

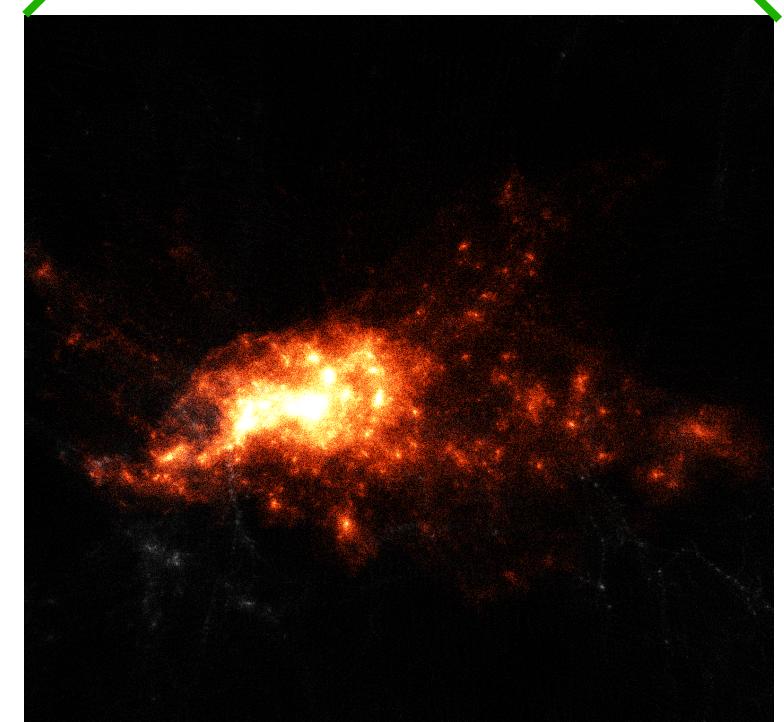
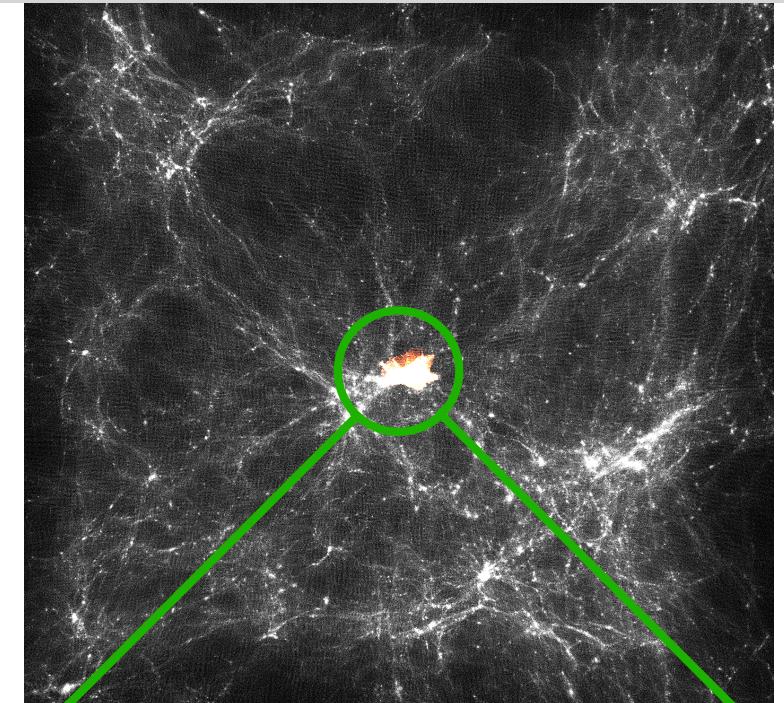
→周囲のガスに重元素を加える (Wiersma et al. 2009)

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 → 9
- 計算領域 : 2 cMpc cubic、
zoom-in 領域 ~ 200 ckpc ($M_h \sim 5 \times 10^8 M_\odot$)
[4 cMpc cubic、
zoom-in 領域 ~ 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 → PopII 遷移の金属量閾値 : $Z > 1.5 \times 10^{-4} [\text{Z}_{\odot}]$ (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)

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

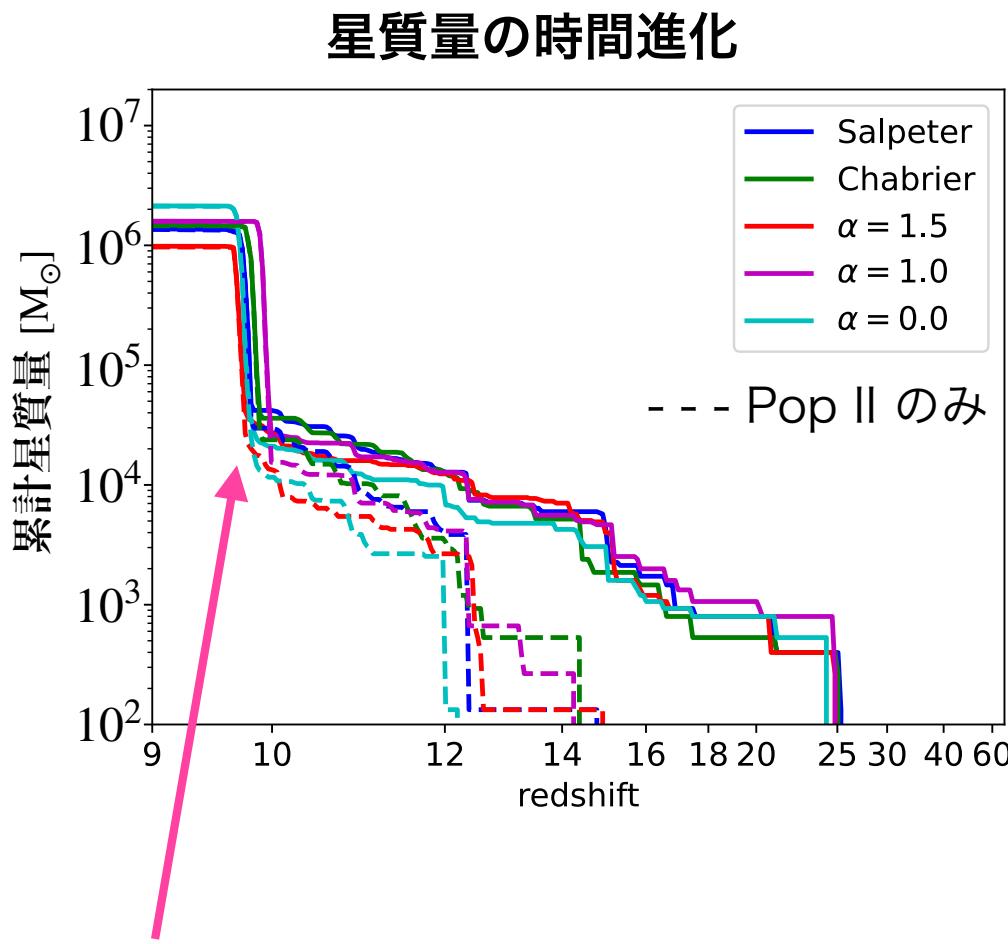
$$[0.1M_{\odot} < M < 100M_{\odot}]$$

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

結果：星質量と星形成率

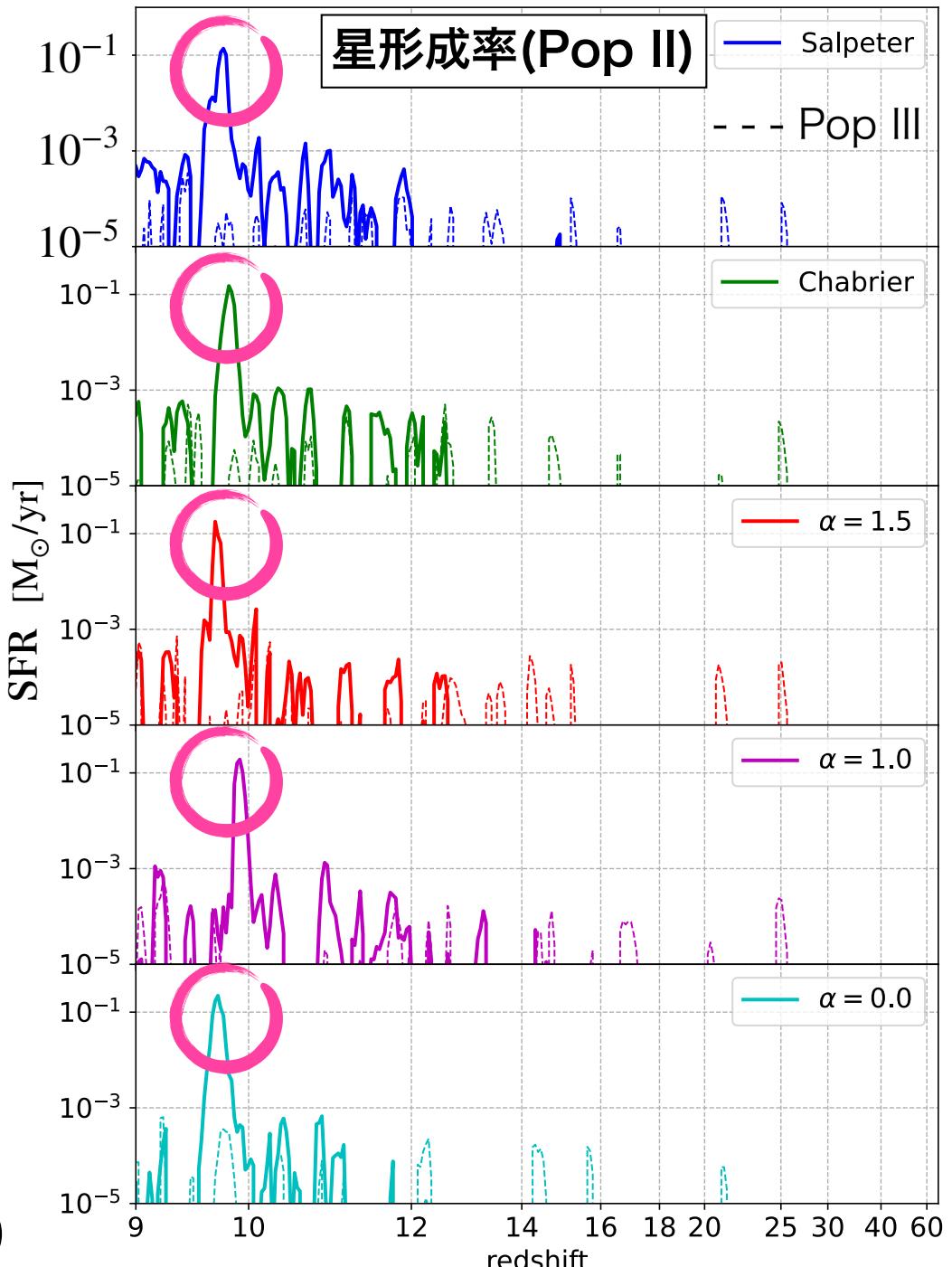
7/15



赤方偏移～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

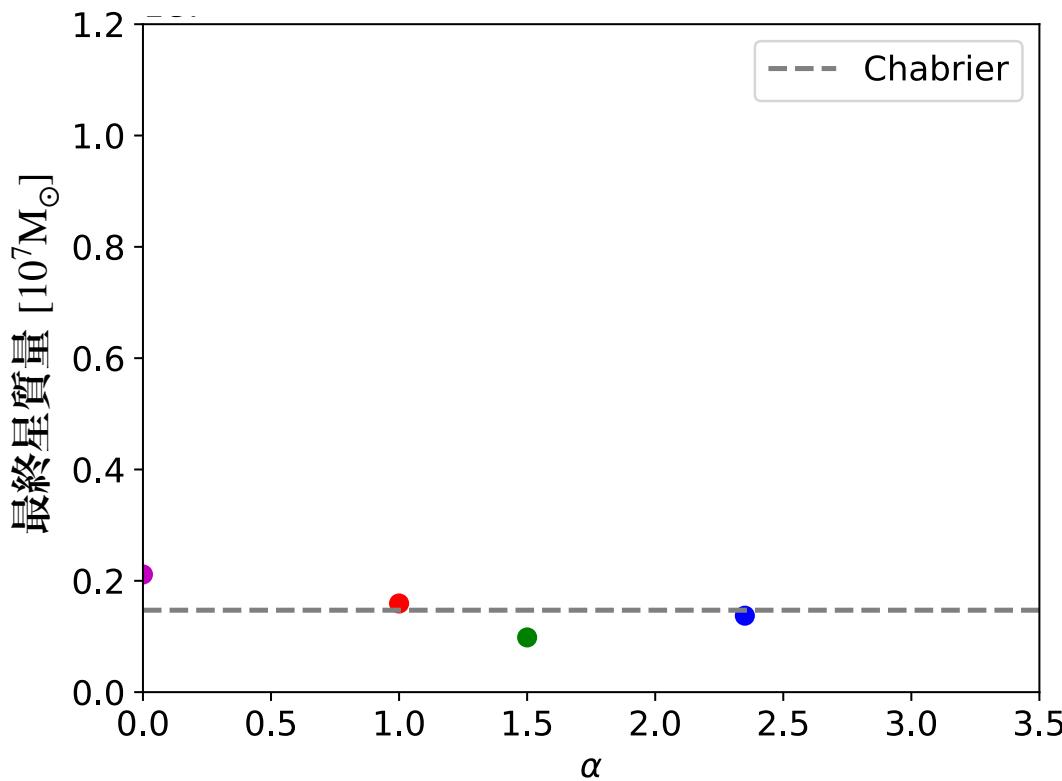
バーストの期間 < 5 Myr (feedback時間)



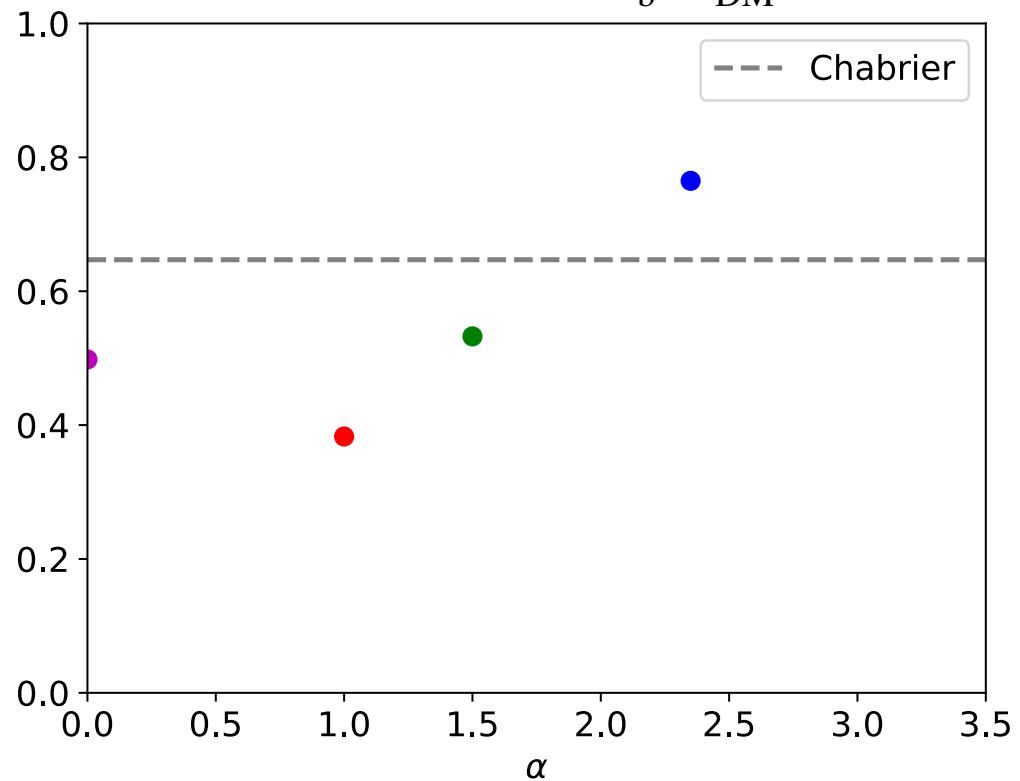
結果：星質量とガスの割合のIMF依存性

8/15

最終星質量



ガスフラクション ($\frac{M_{\text{gas}}/M_{\text{DM}}}{\Omega_b/\Omega_{\text{DM}}}$)

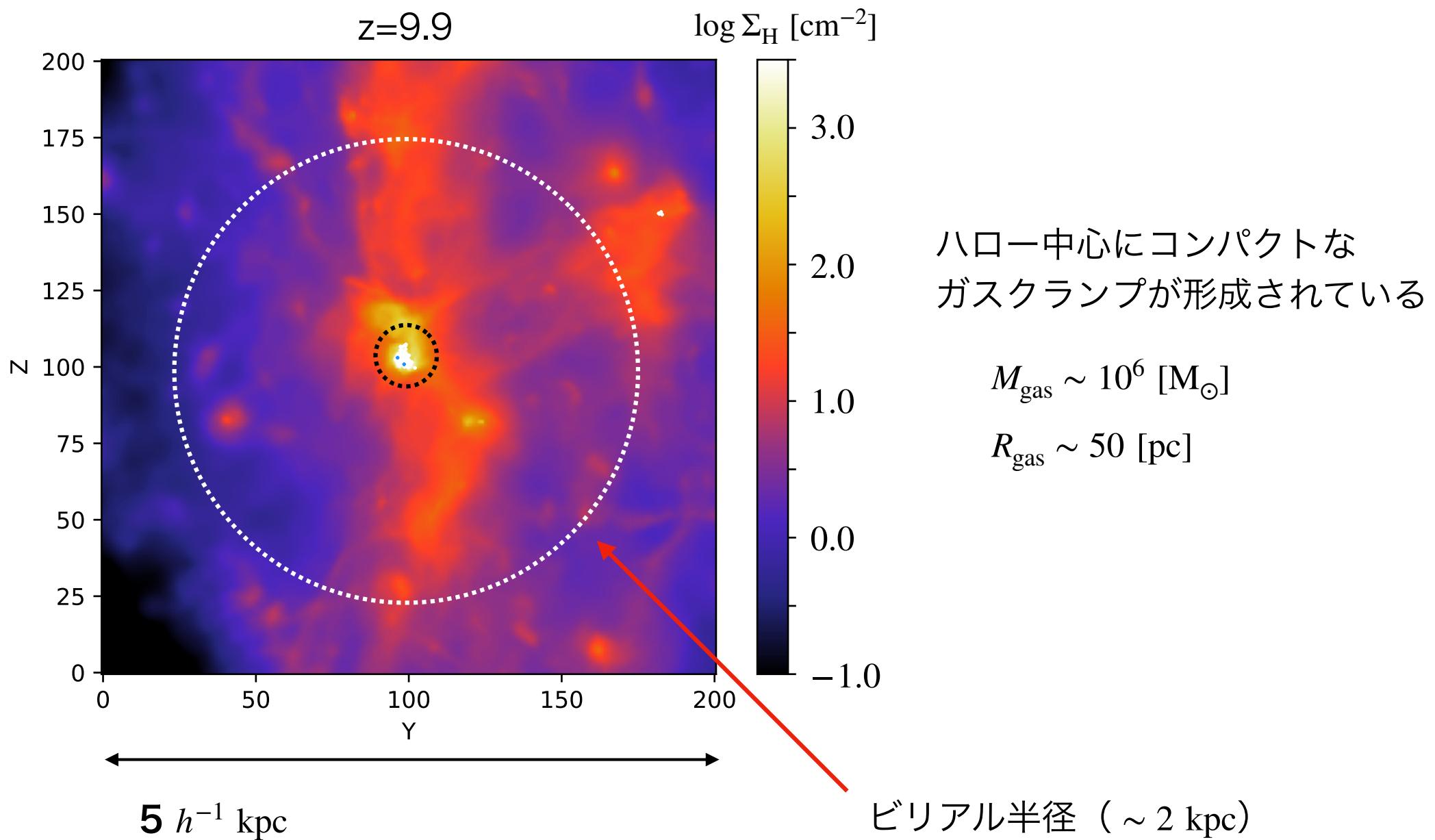


星質量はIMFのべきによらず同程度

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

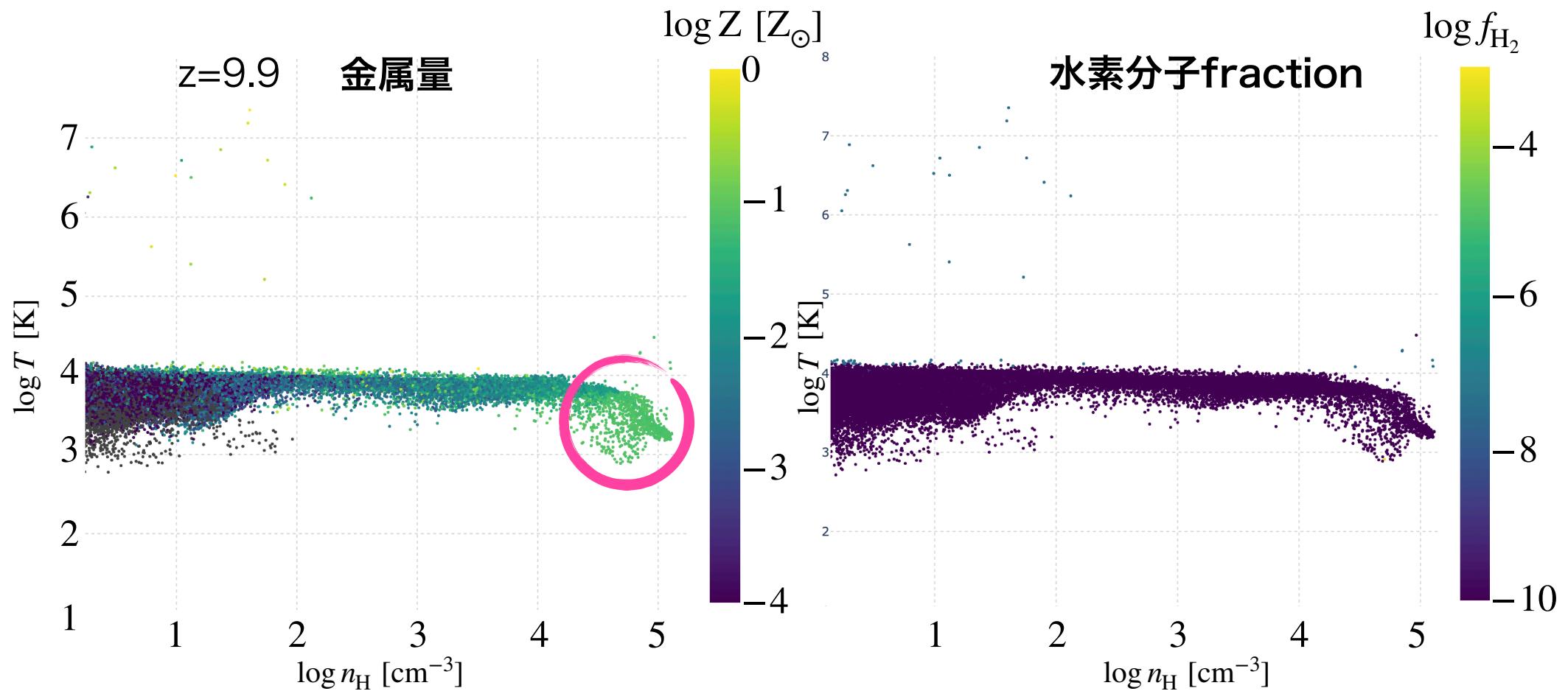
結果：コンパクトなガスクランプの形成

9/15



結果：コンパクトなクランプ形成の理由

10/15



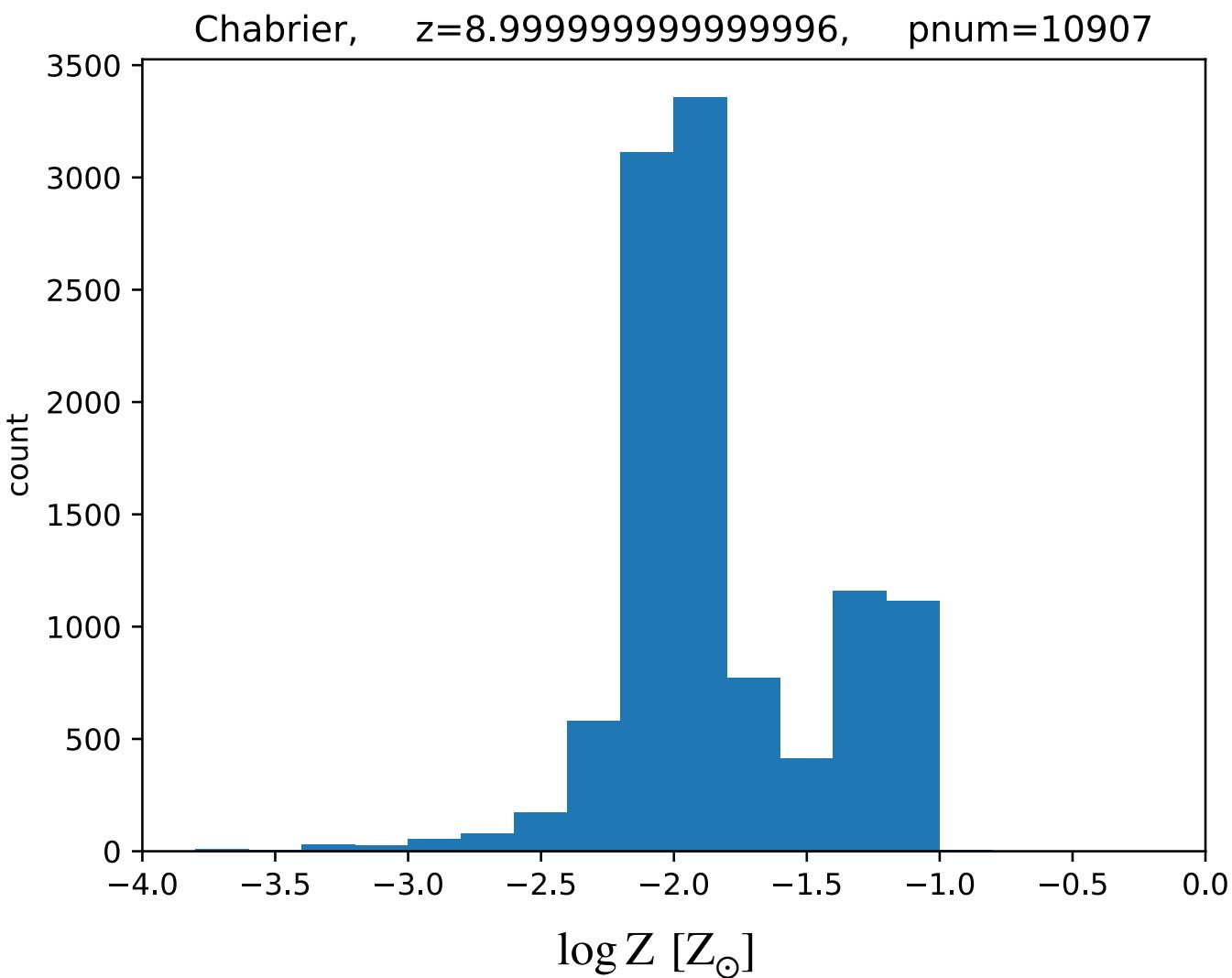
ガスクランプ内の金属量は比較的高い ($Z \sim 10^{-2} Z_{\odot}$)

ガスクランプ内の水素分子は強いLW輻射によりほとんど解離 ($f_{\text{H}_2} < 10^{-10}$)

ガスは金属冷却で冷えている

結果：形成された星の金属量分布

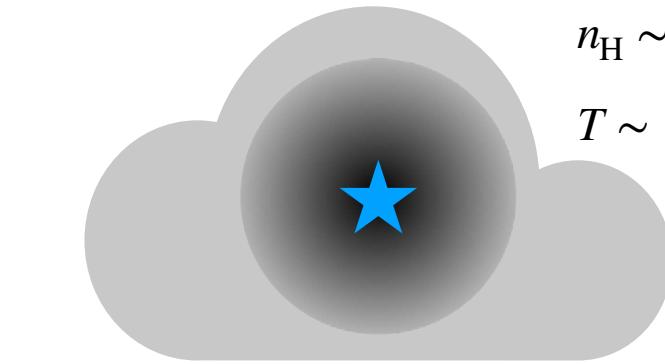
11/15



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

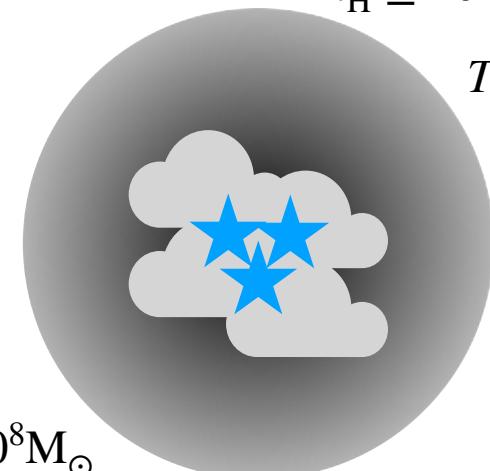
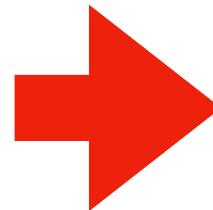
形成された星の金属量は球状星団と同程度。

何がPopIIバーストをトリガーするのか？



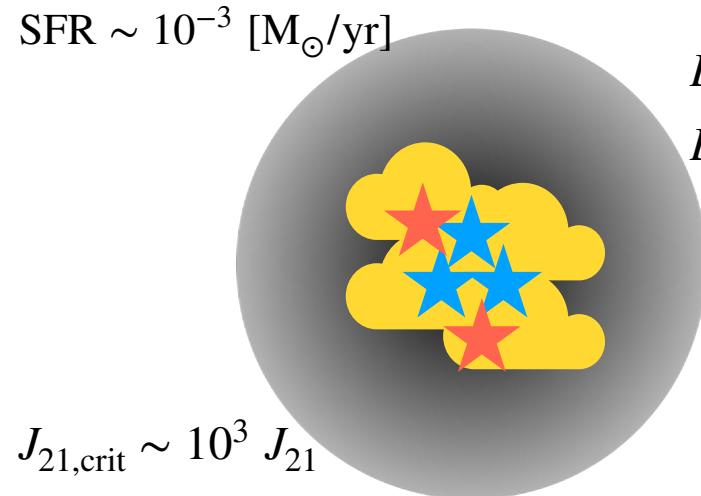
$$n_H \sim 10^{1-2} [\text{cm}^{-3}]$$

$$T \sim 10^4 [\text{K}]$$

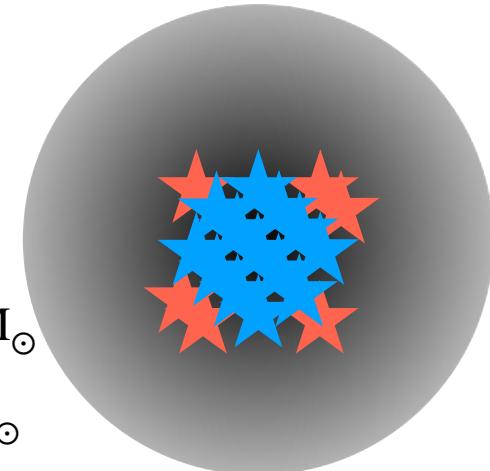


$$M_h \geq 10^8 M_\odot$$

ハロー中心に高密度ガスクランプが形成



$J_{21,\text{crit}} \sim 10^3 J_{21}$
 $E_b > E_{\text{SN}}$ より、
ガスクランプ内で金属汚染のみが進行



$$M_* \sim 10^6 M_\odot$$

$$Z \sim 10^{-2} Z_\odot$$

高密度領域 (~ $10^{4-5} [\text{cm}^{-3}]$) で金属冷却が効率的になり、バースト的な星形成が発生

何がPopIIバーストを終わらせるのか？

基本的には

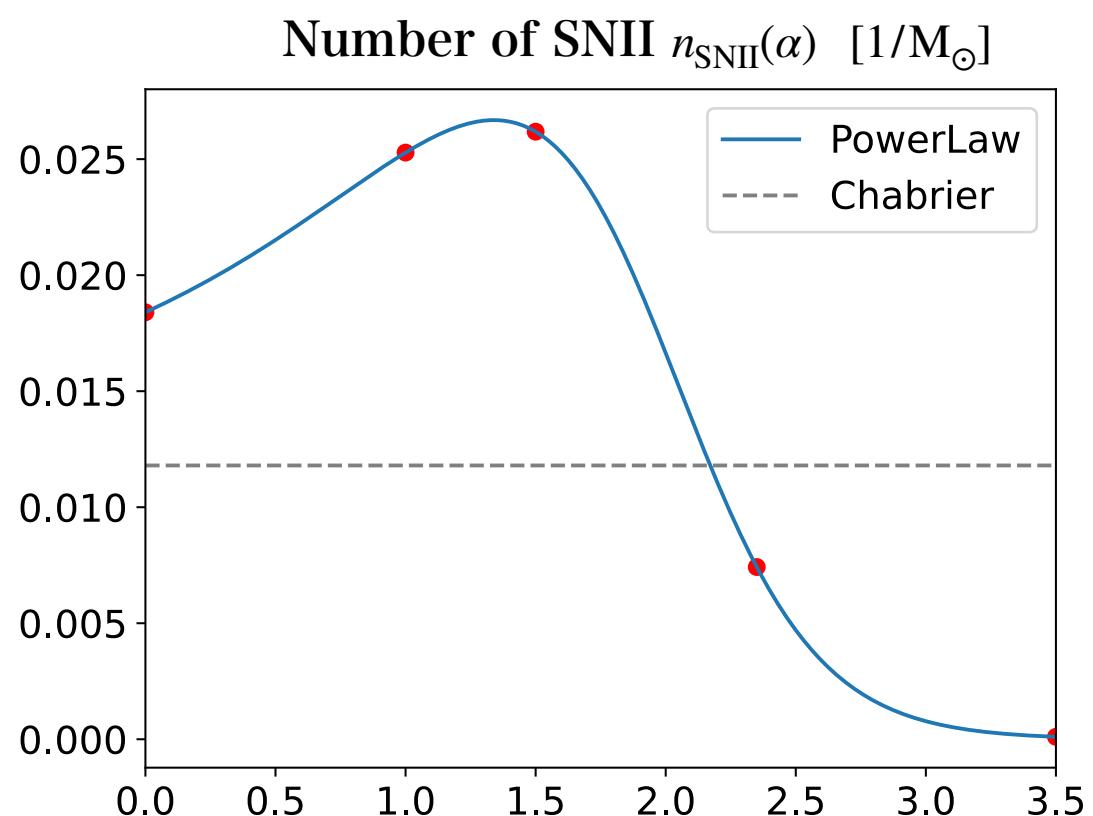
SNeで注入された熱エネルギー ~ 重力の束縛エネルギー

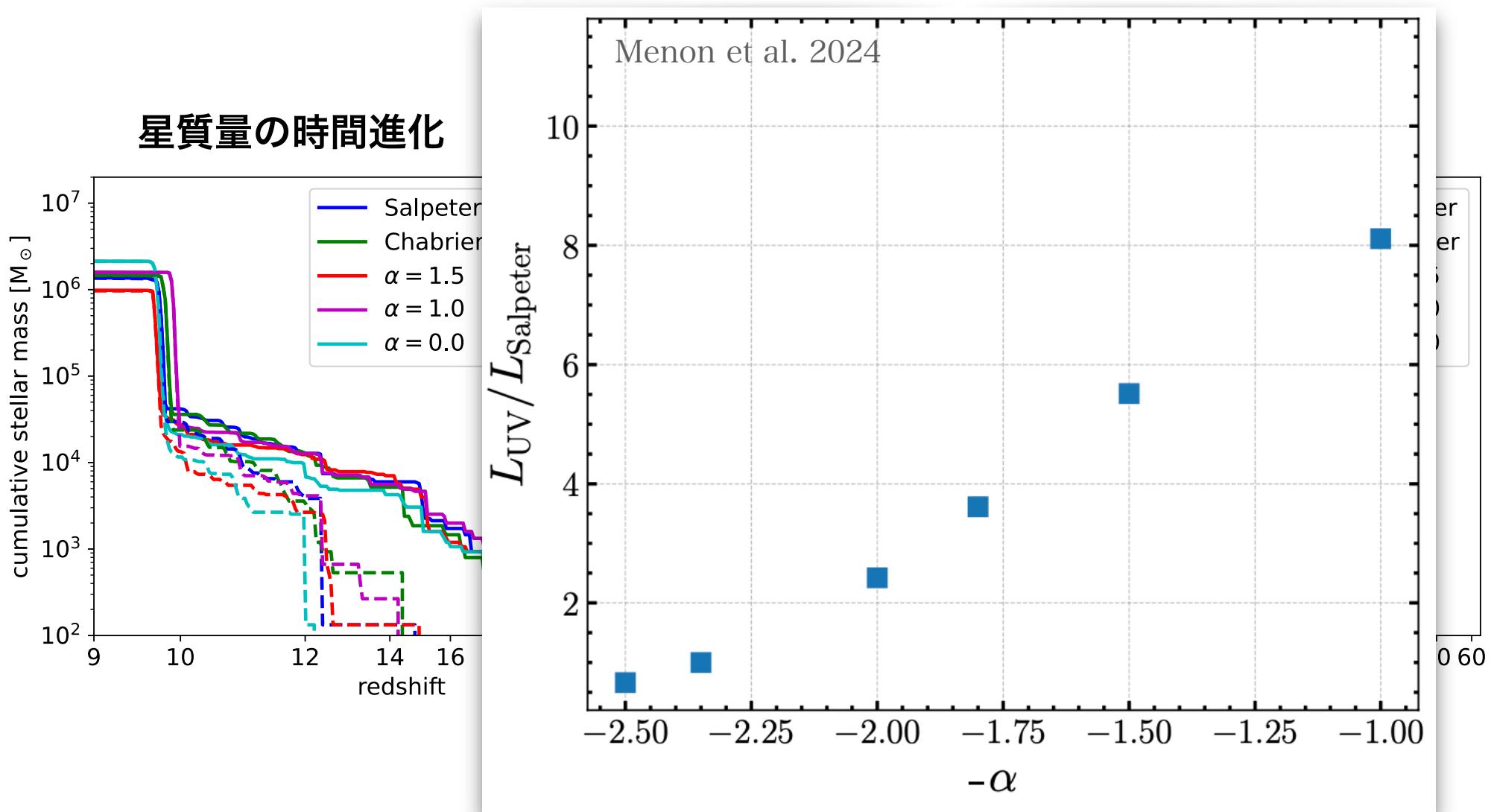
$$E_{\text{total,SNII}} \sim \frac{GM_{\text{DM}}M_{\text{gas}}}{R_{\text{vir}}} \\ \sim 10^{54} [\text{erg}]$$

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

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





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 α 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。