

# 初代星星団の星質量分布

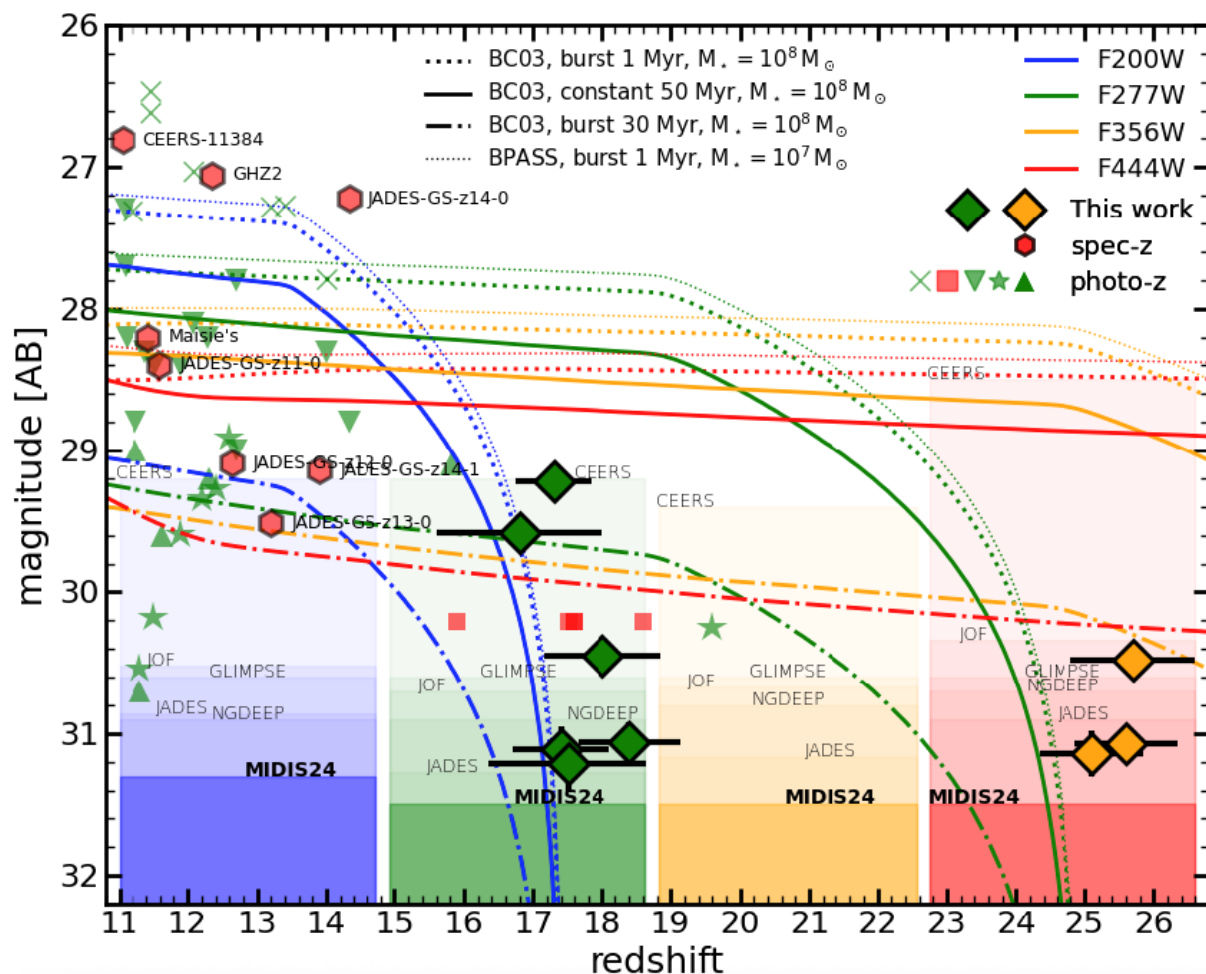
初代星IMFは普遍的か？

平野 信吾 (神奈川大学)

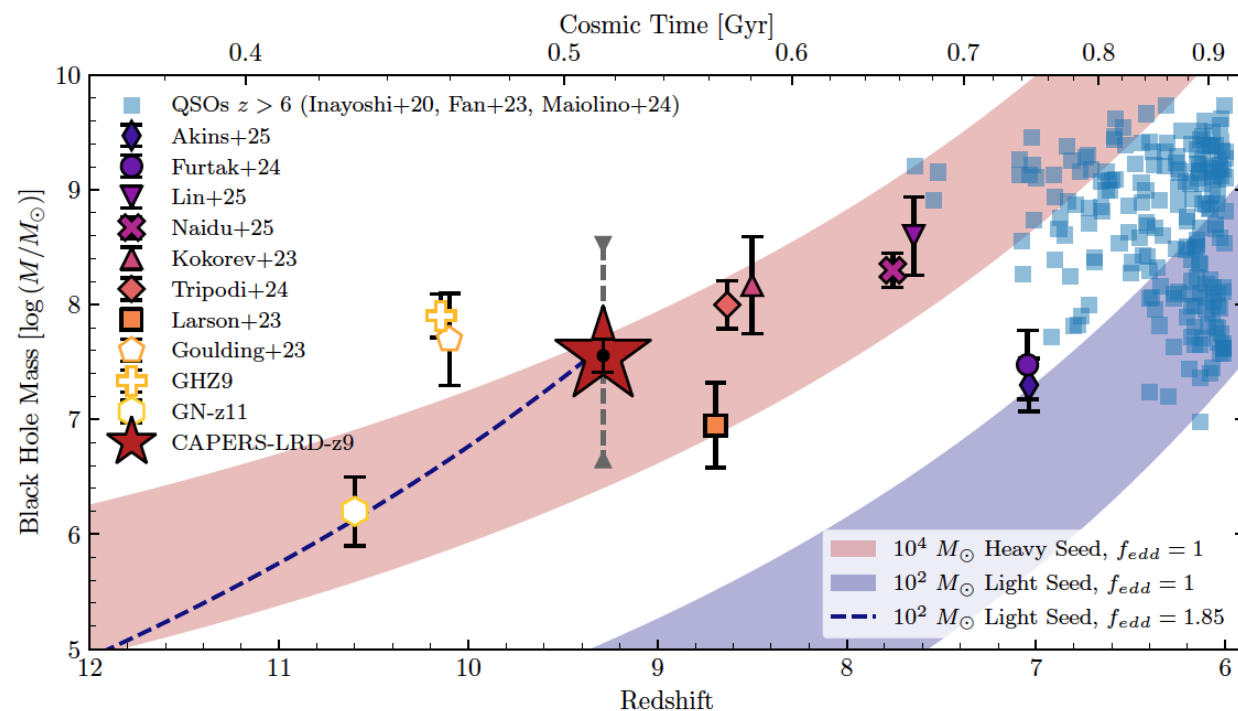
酒井 勇輔, 梅田 秀之 (東京大学)

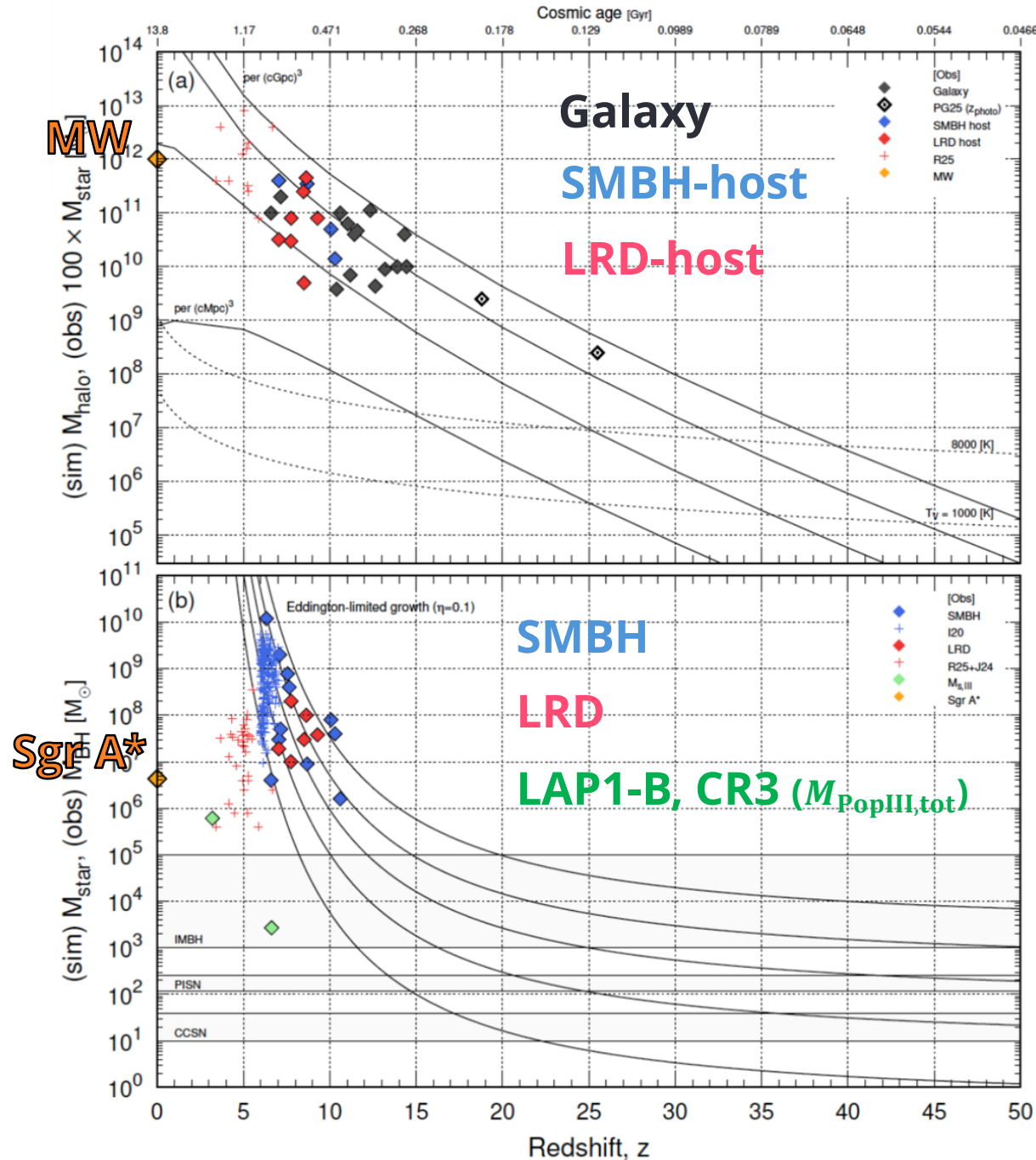
# JWST時代の高赤方偏移観測 (銀河, SMBH/LRD)

*Perez-Gonzalez et al. (2025)*



*Taylor et al. (2025)*





## Estimated halo mass

$$M_{\text{halo,est}} = 100 M_{\text{star,obs}}$$

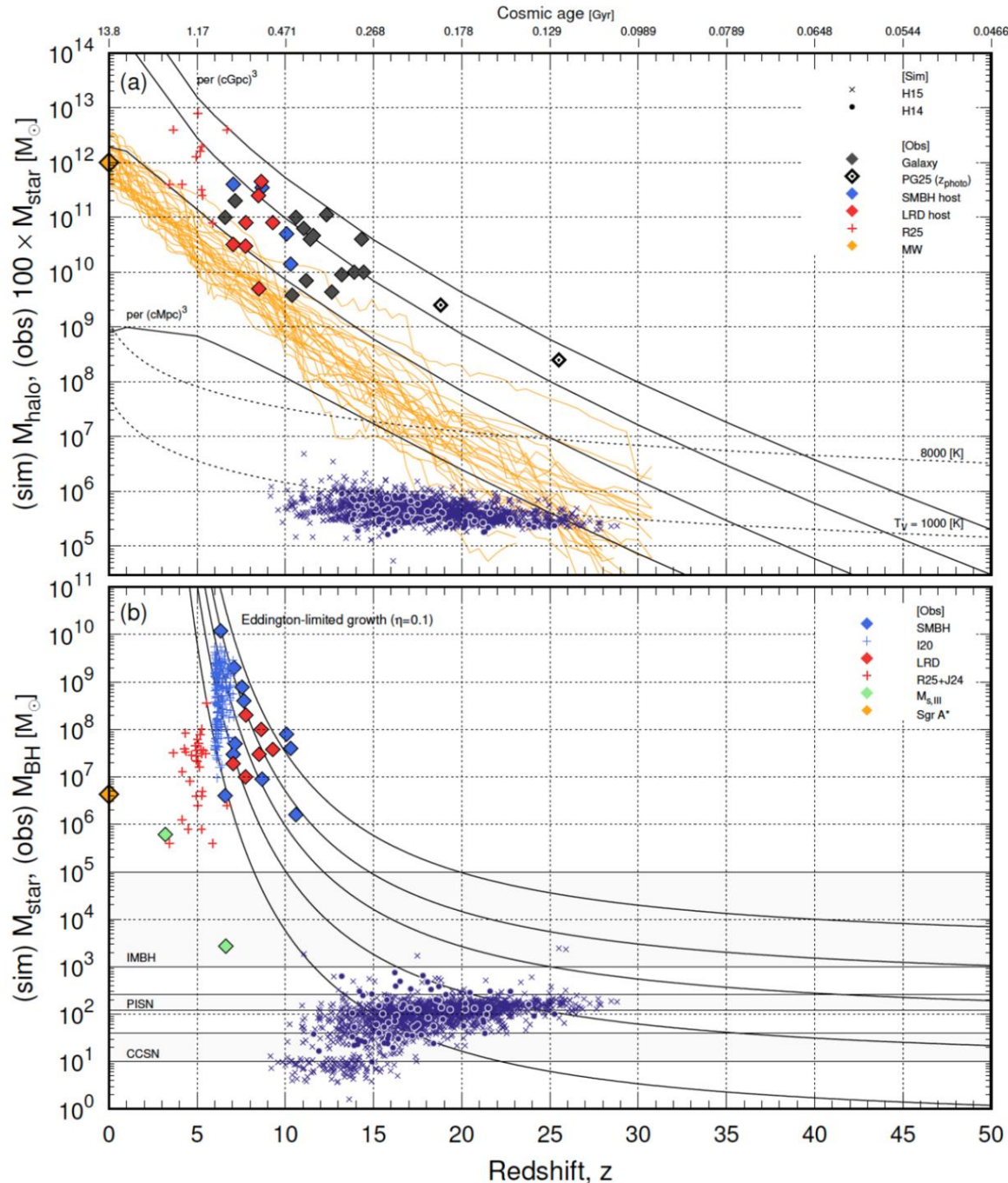
(solid curves)  $n_{\text{halo}}(z, M_{\text{halo}}) =$   
 $(1 \text{ cMpc})^{-3}, (10 \text{ cMpc})^{-3}, (100 \text{ cMpc})^{-3}, (1 \text{ cGpc})^{-3}$

(dashed curves)  $\frac{T_{\text{virial}}}{K} = 1000$  (H<sub>2</sub>-cooling),  
 8000 (H-cooling halo)

## BH mass

(solid curves) Eddington-limited growth tracks

- with radiative efficiency  $\epsilon = 0.1$
- pass through  $(z, M_{\text{BH}}/M_{\text{sun}}) = (40, 10^4), (30, 10^{3.5}), (25, 10^3), (20, 10^{2.5}), (15, 10^2)$



シミュレーションと比較すると...

(blue symbols) 初代星サンプル (Hirano+2014; 2015)

の  $(z, M_{\text{halo}}, M_{\text{star}})$

→ 近い  $(z, M_{\text{halo}})$  に大質量銀河が観測され(ようと)している。

(orange lines) MW-like halo ( $M_{\text{halo}} \sim 10^{12} M_{\text{sun}}$  at  $z = 0$ )

の merger-tree (Ishiyama&Hirano 2025)

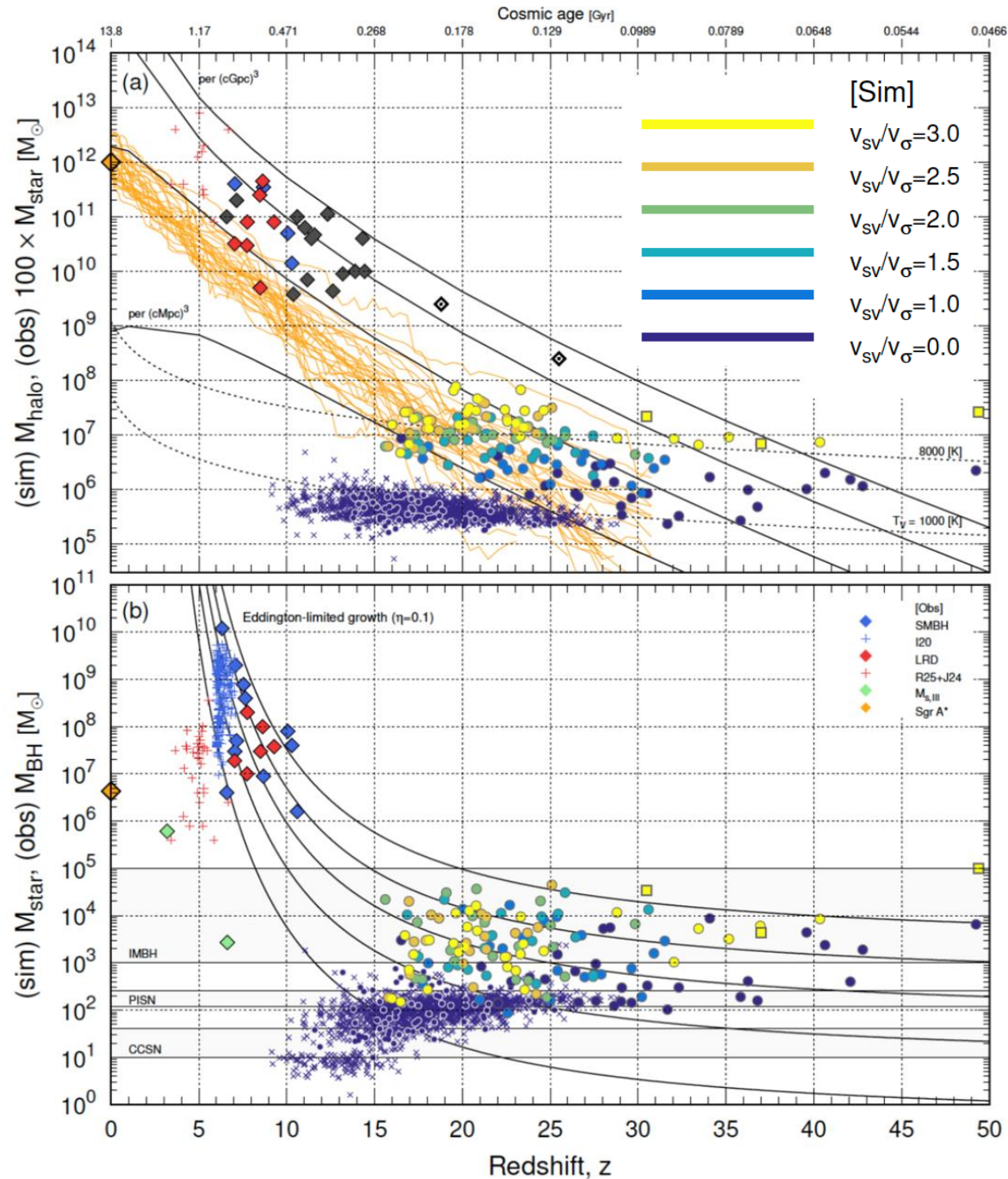
→ MWの祖先ハローは、既存の初代星サンプルの高赤方偏移側に相当する。

→ 高赤方偏移銀河の祖先ハローはさらにhigh- $z$

● 高赤方偏移 かつ 大質量ハロー での初代星

●  $z=10-50$  において、初代星IMFは同じか





# 本研究

## 初代星形成ハローの宇宙論的シミュレーション

- 120例 (Hirano 2025) + 追加 18例  
→  $z \sim 40-15$ , minihaloからH-cooling haloまでをカバー
- ハロー内での分子雲の形成・合体を Merger Tree解析し、各分子雲で誕生する初代星質量を決定  
→ ハロー毎の初代星質量分布

# Simulation (Hirano 2025)

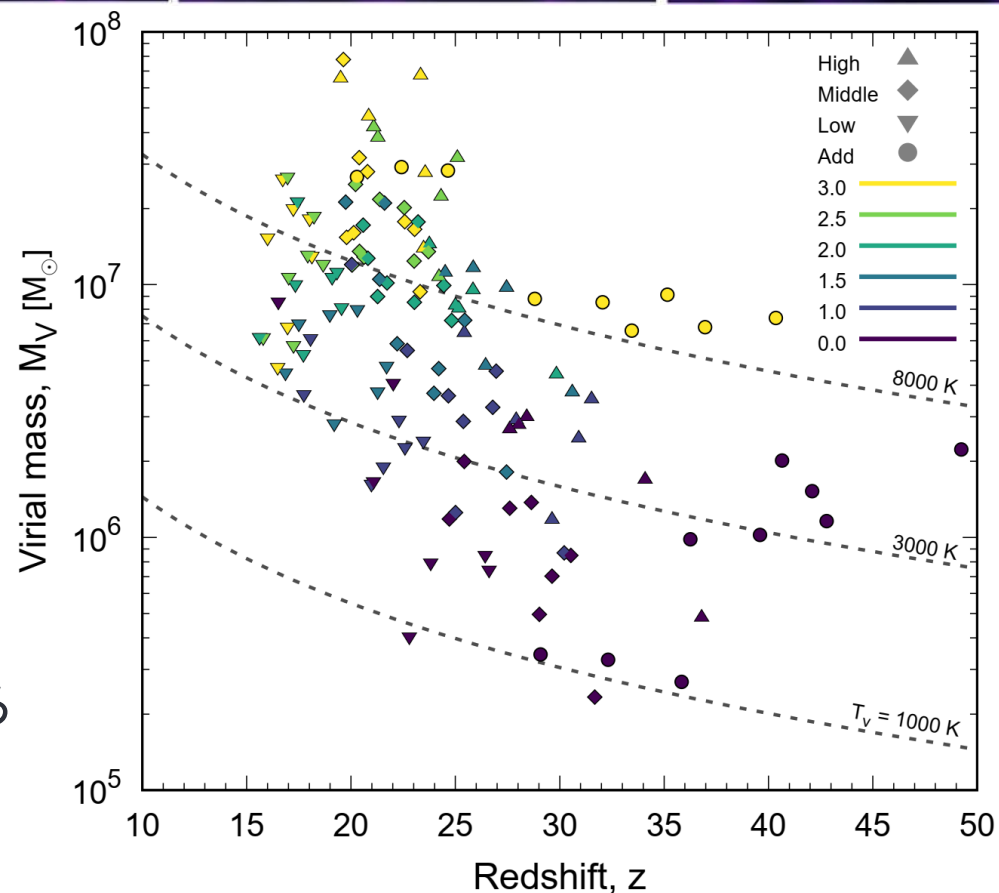
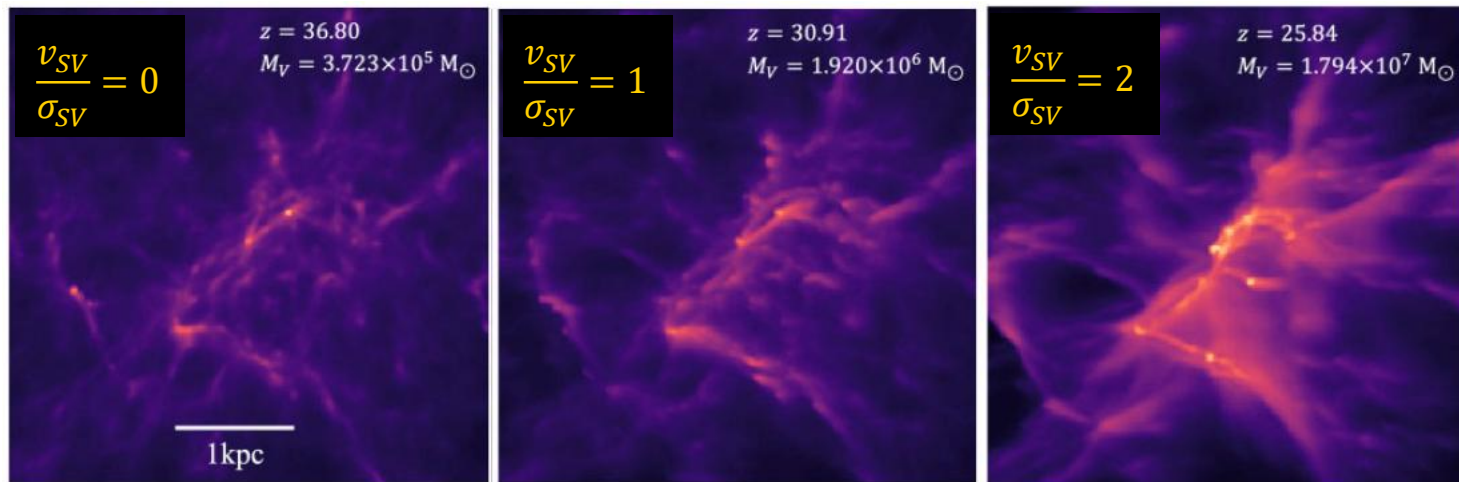
## 宇宙論の初期条件

- MUSIC with  $\Lambda$ -CDM (Planck 2020)
- $L_{base} = 10 \text{ cMpc}/h$ ,  $L_{zoom} = 0.3 \text{ cMpc}/h$
- (param) DM-baryon relative velocity at  $z_{rec} \sim 1089$

$$\frac{v_{SV}}{\sigma_{SV}} = 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 \quad (\text{ref. cosmic mean} \sim 0.8)$$

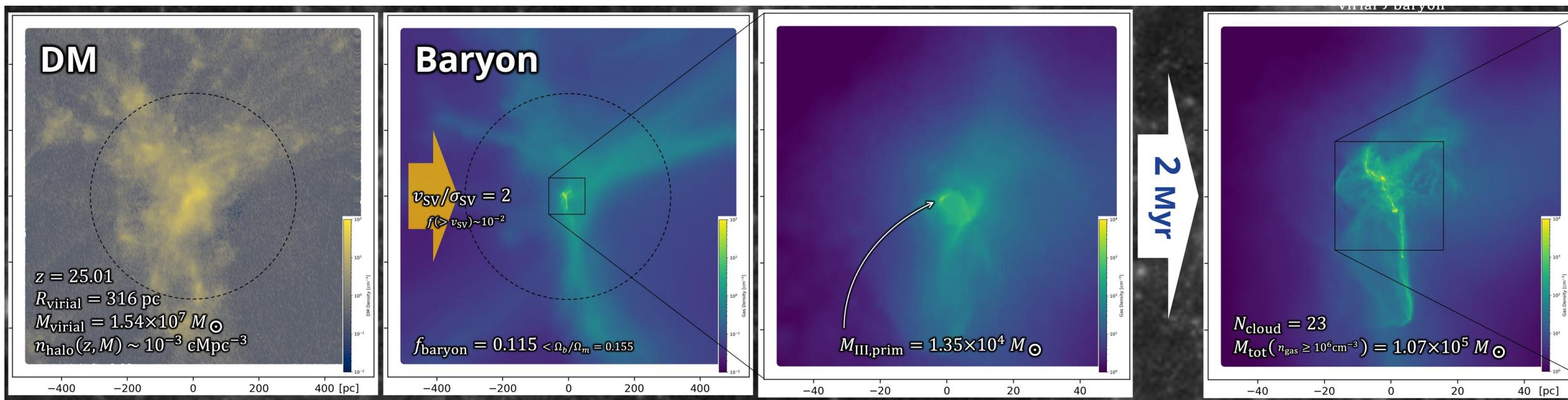
## 宇宙論的シミュレーション

- Gadget-3 + primordial chemistry
- 粒子分割:  $m_{DM,min} = 0.144 M_{sun}$   
 $m_{gas,min} = 0.0264 M_{sun}$
- $z_{ini} = 499 \rightarrow$  ガス密度が  $n = 10^6 \text{ cm}^{-3}$  に到達してから  
2 Myr (平均的な初代星の寿命) 経過するまで計算継続



# Merger-tree analysis → 星形成ガス雲の特定

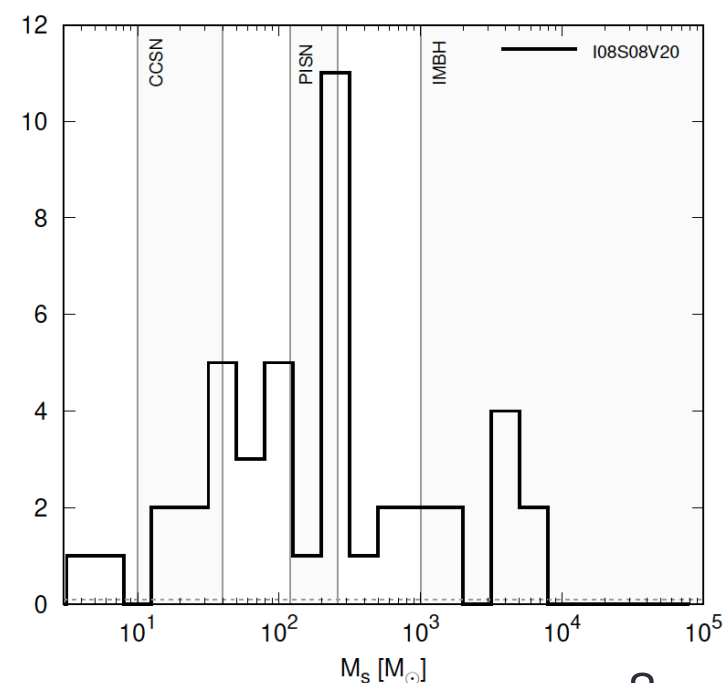
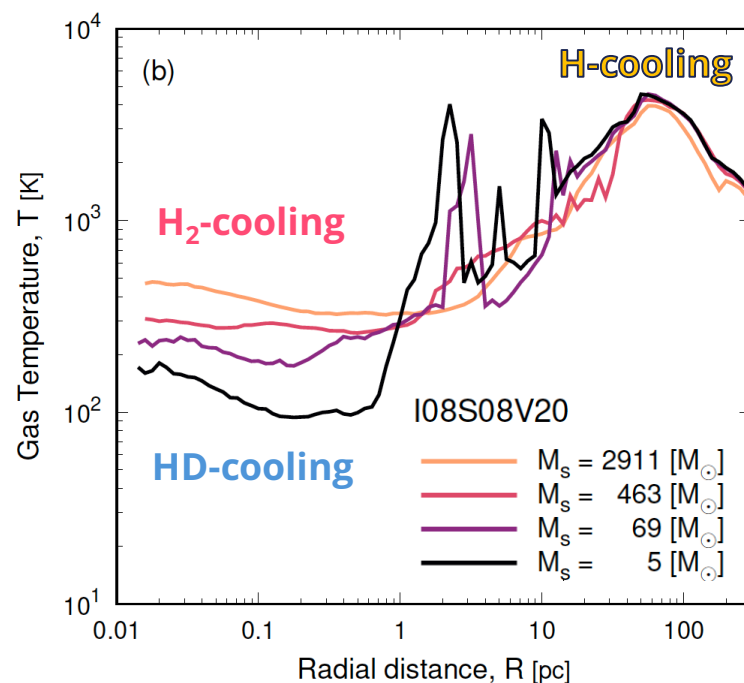
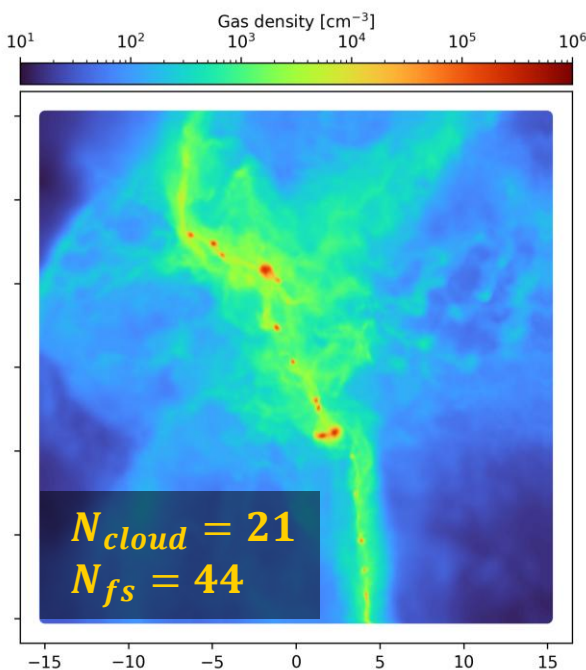
- 2 Myr 計算中に 0.01 Myr毎にデータ出力 (200 snapshots)
- 密度  $n > 10^6 \text{ cm}^{-3}$  のガス (SPH) 粒子に対してmerger-treeを構築
  - 典型的なジーンズ長 ( $L_{\text{Jeans}} = 0.25 \text{ pc}$ ) 以下のSPH粒子をクラスタリング (ノード構築)
  - 質量  $< 25 M_{\text{sun}}$  ( $< 1,000$  SPH粒子) のノードは解析から除外
  - snapshot間で、ノードを構成するSPH粒子の50%以上が共通であれば同一ノードと判定





# Mass estimation → ハローごとの初代星質量分布

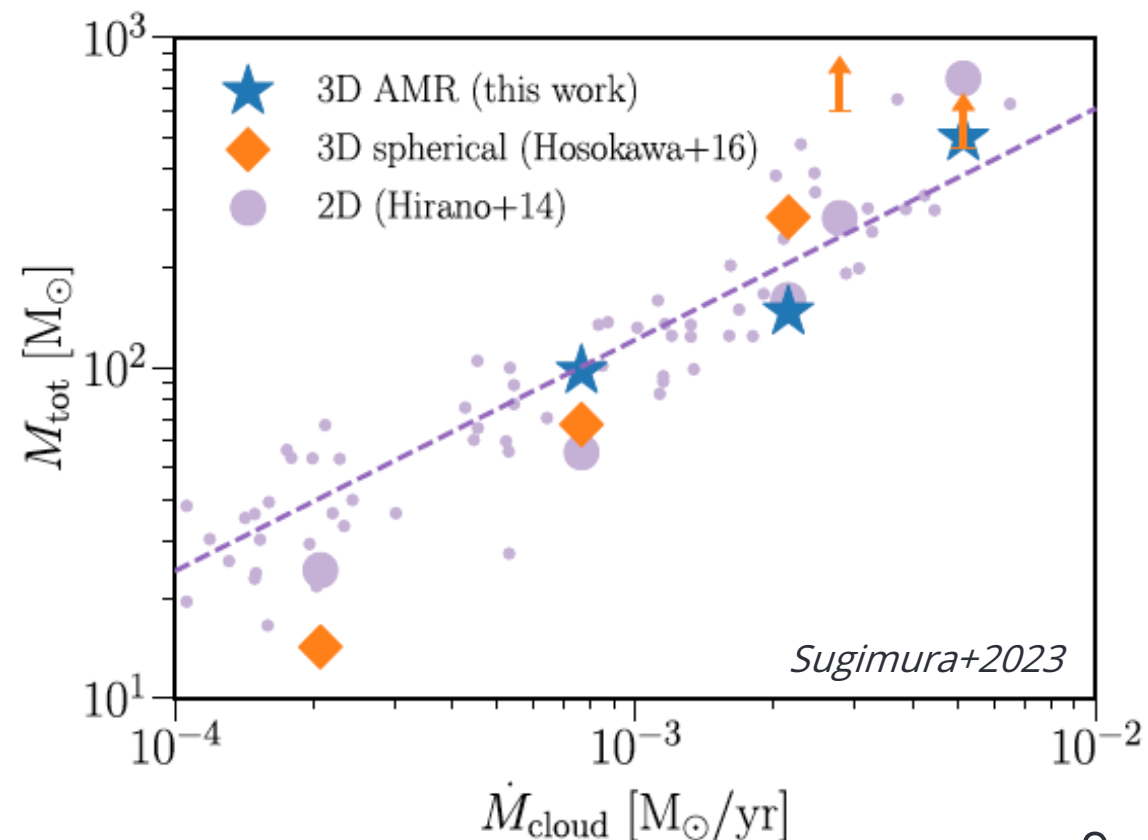
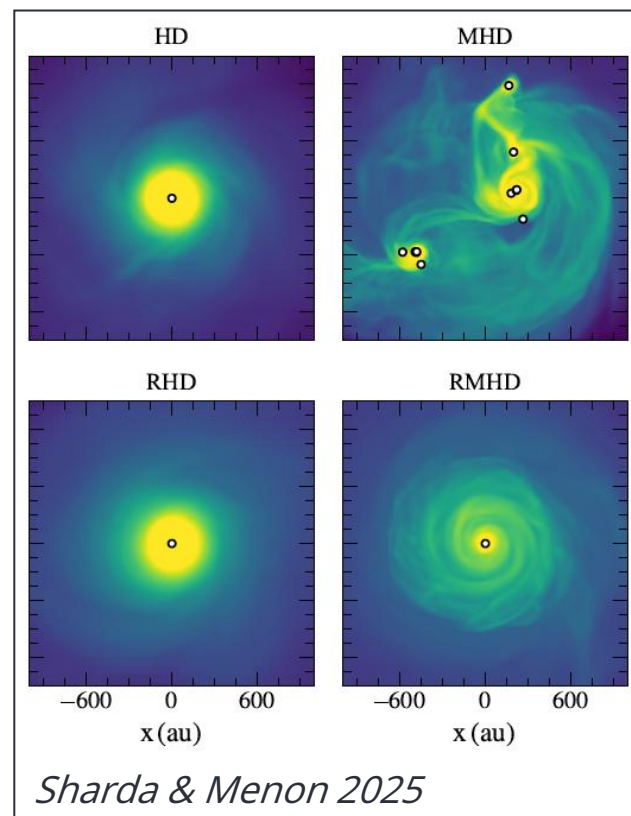
- Merger-treeの時間を進めたとき、まだ初代星を持たないノードに対して初代星質量を決定する
  - ガス雲のジーンズ半径での平均降着率から、初代星質量を求める (Hirano+2014; Toyouchi+2023)
  - (分子雲合体による力学緩和) 計算上限密度 ( $n = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ) の自由落下時間 ( $t_{ff} \sim 0.05 \text{ Myr} \Leftrightarrow 5 \text{ snapshots}$ ) 以内にノード合体が起きている場合は、星質量を与えない。



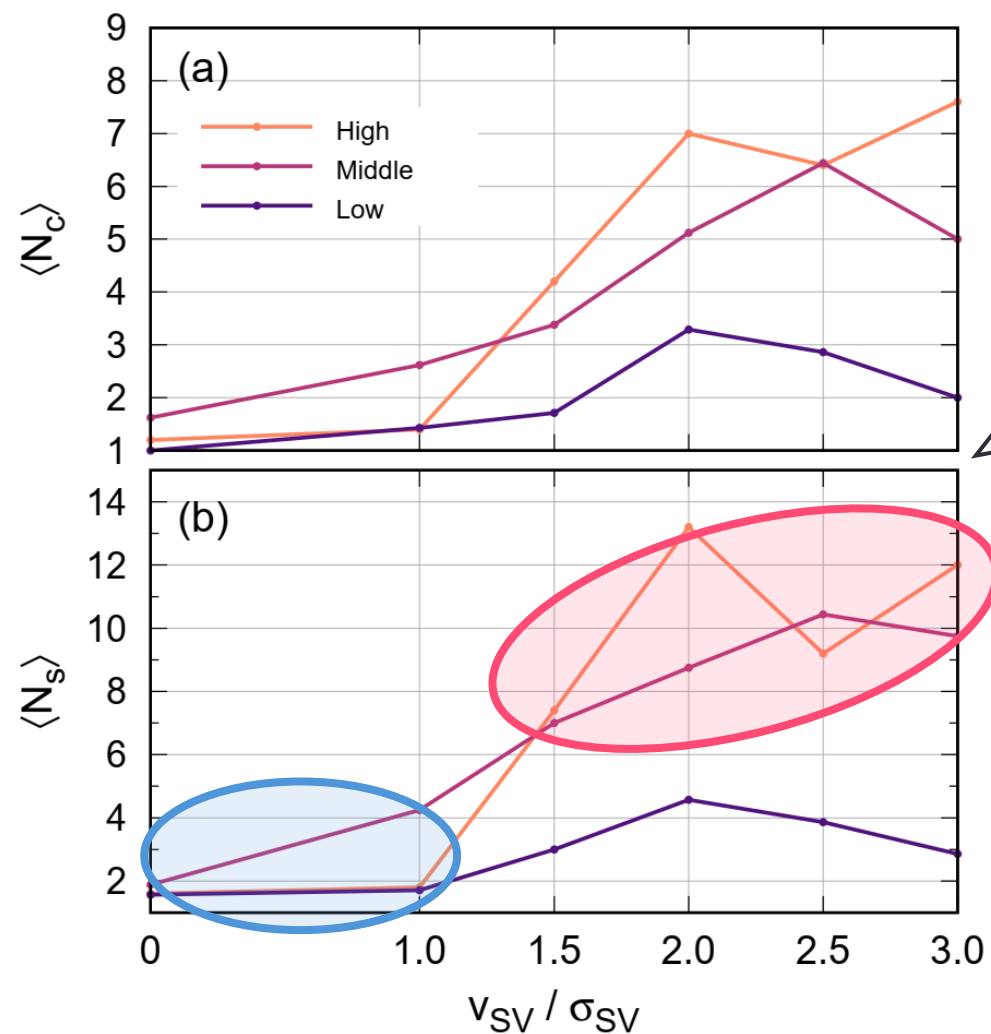


# CAVEAT: 分子雲内のmicrophysics

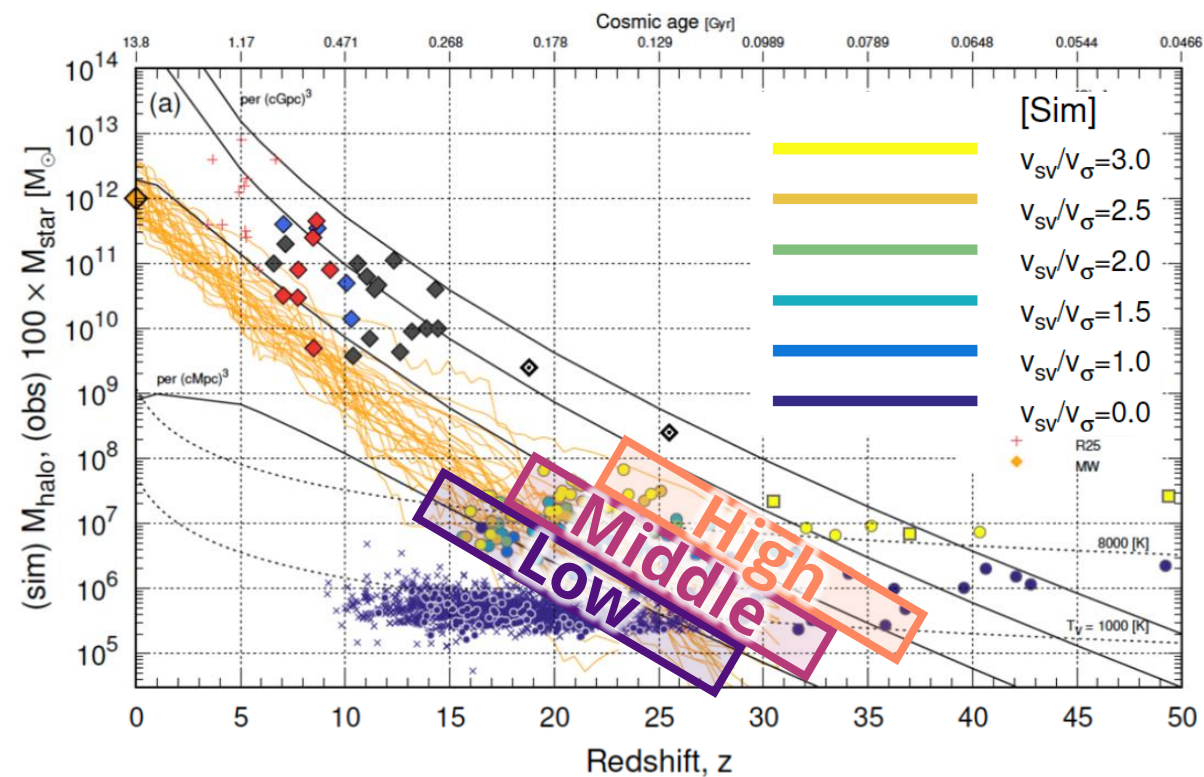
- 分子雲内の現象 (円盤分裂, 輻射フィードバック, 磁気流体効果) は解像していない。
- 今回求めた星質量は「ガス雲あたりの初代星総質量」に相当する。



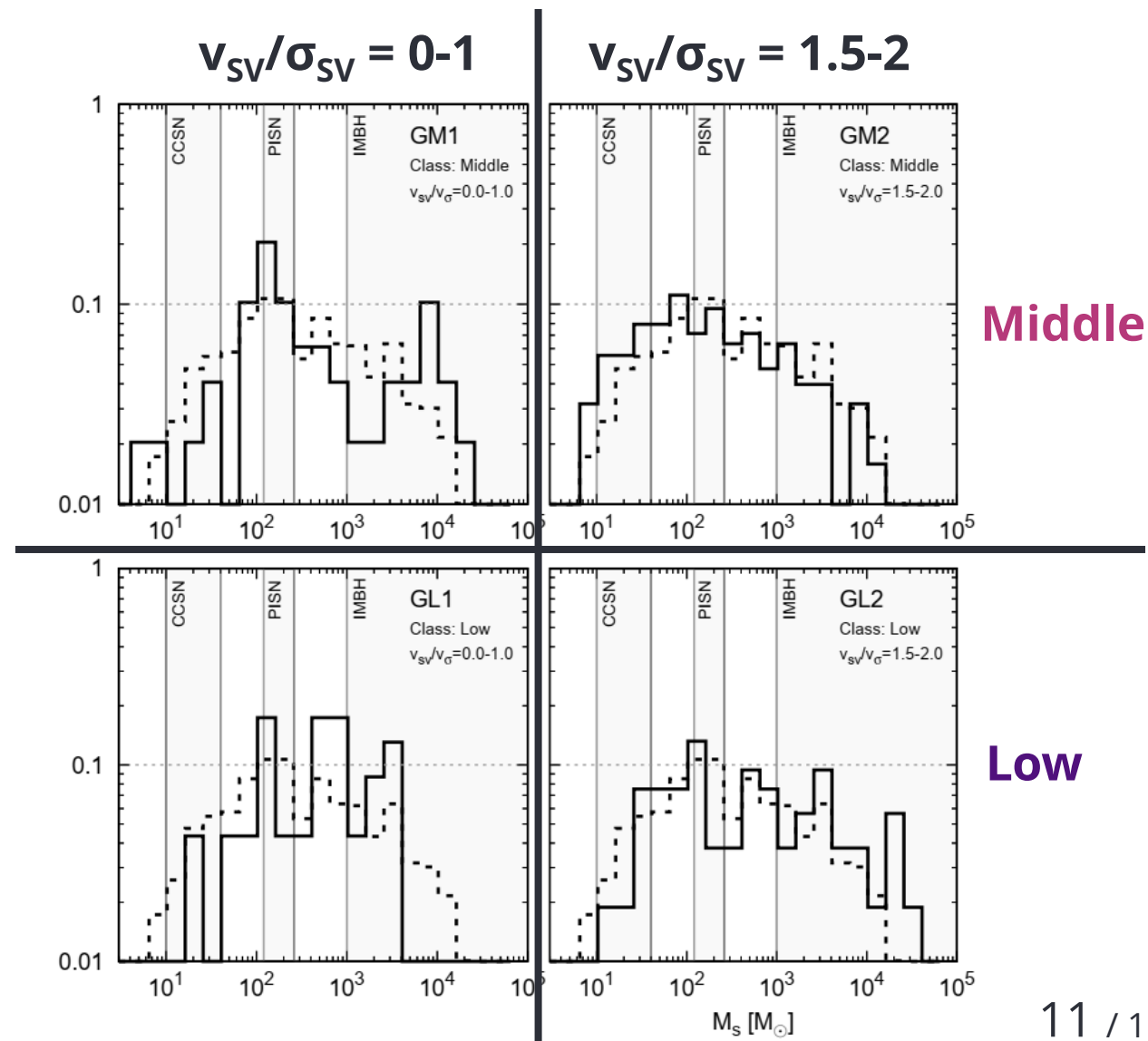
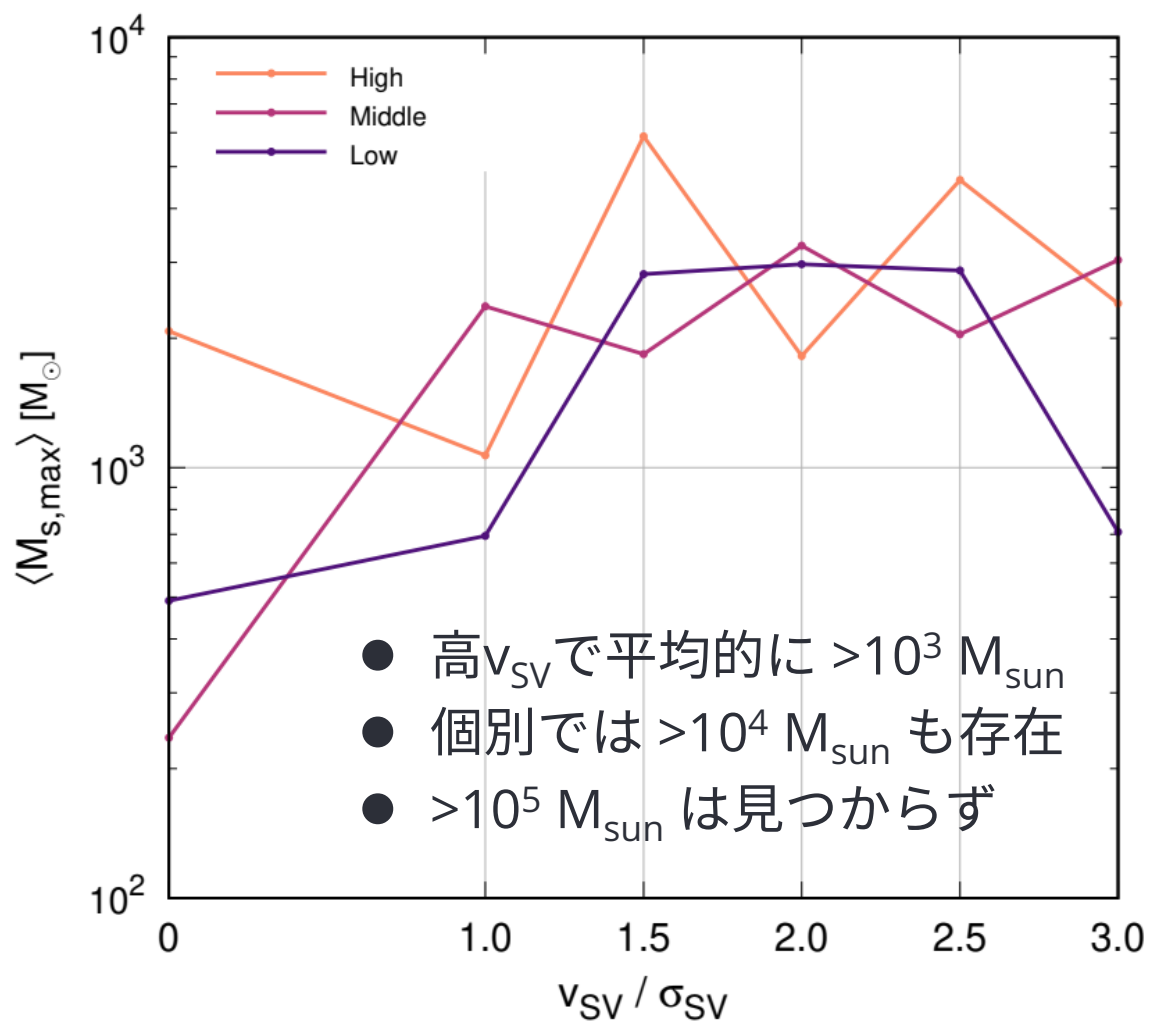
# 分子雲, 初代星の個数: $N_c$ , $N_s$



- {Low, Middle, High}に分類して平均化。
- 初期 streaming velocity 依存性を調べる。



# 初代星質量：平均最大質量, 平均質量分布



# 初代星形成 on $(z, M_{\text{halo}}, v_{\text{SV}})$ - plane

## 【Low-class halo】

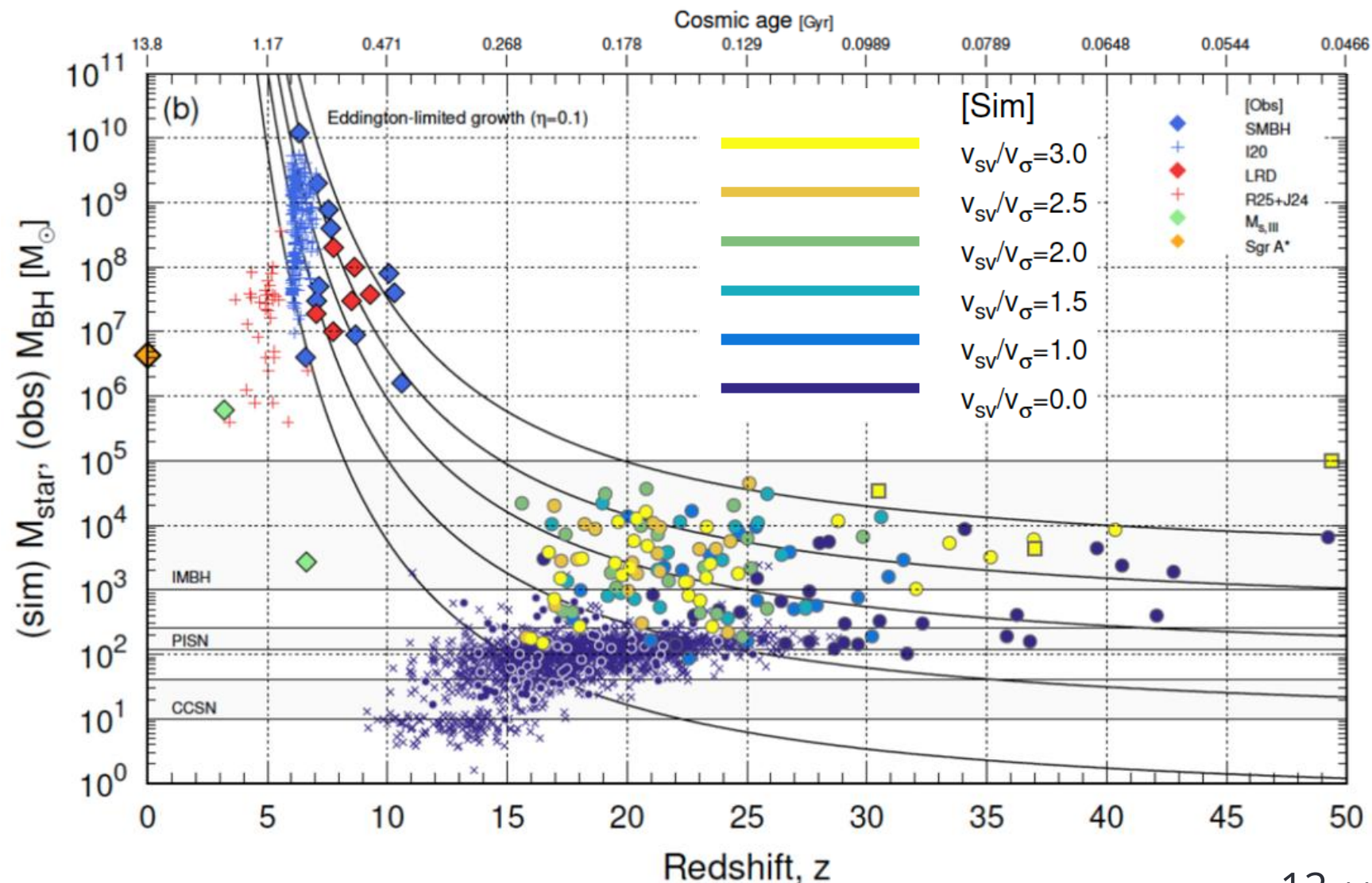
- 初代星の数： $v_{\text{SV}}$ に依らず小
- 最大質量： $v_{\text{SV}}$ と共に増加
- Hirano+(2014; 2015)はこの中でも低  $(z, M_{\text{halo}}, v_{\text{SV}}=0)$  だった

## 【Middle-class halo】

- 初代星の数： $v_{\text{SV}}$ と共に増加
- 最大質量： $v_{\text{SV}}$ と共に増加

## 【High-class halo】

- 初代星の数： $v_{\text{SV}}$ と共に増加
- 最大質量： $v_{\text{SV}}$ に依らず大

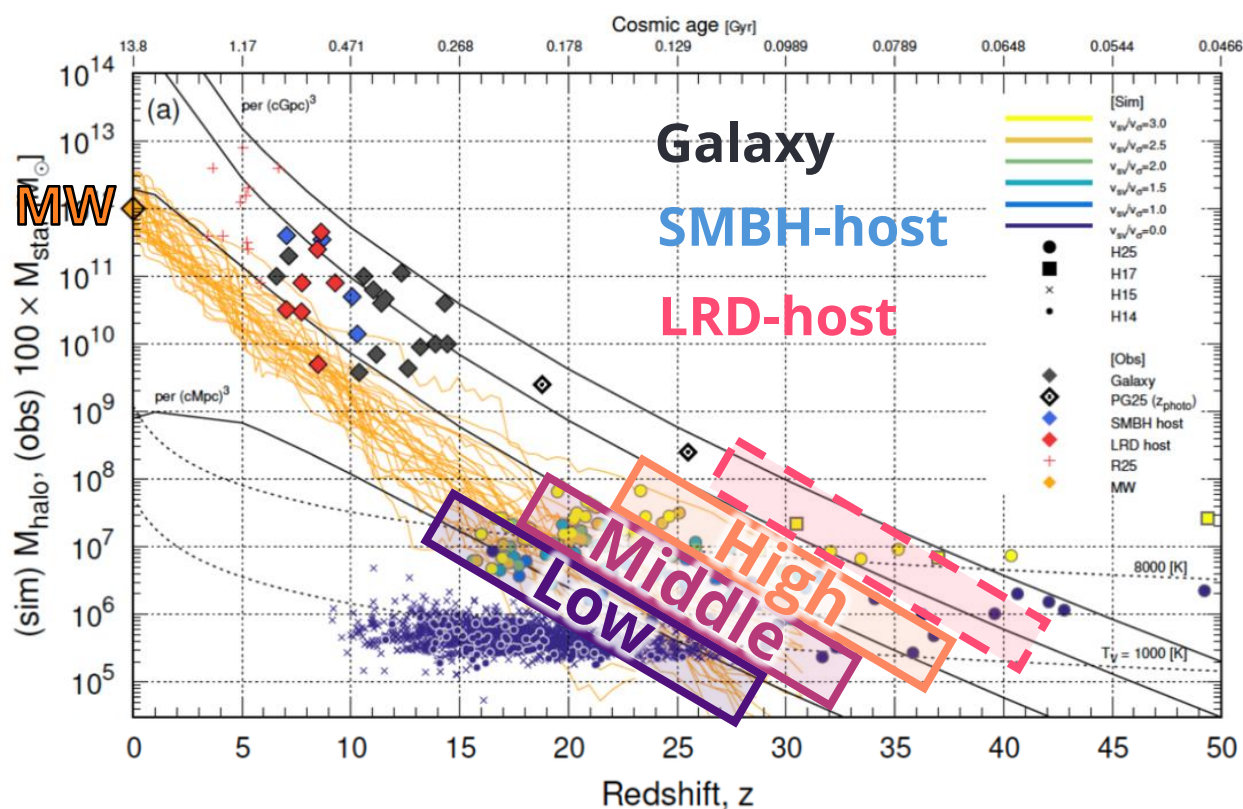




# 観測との接続

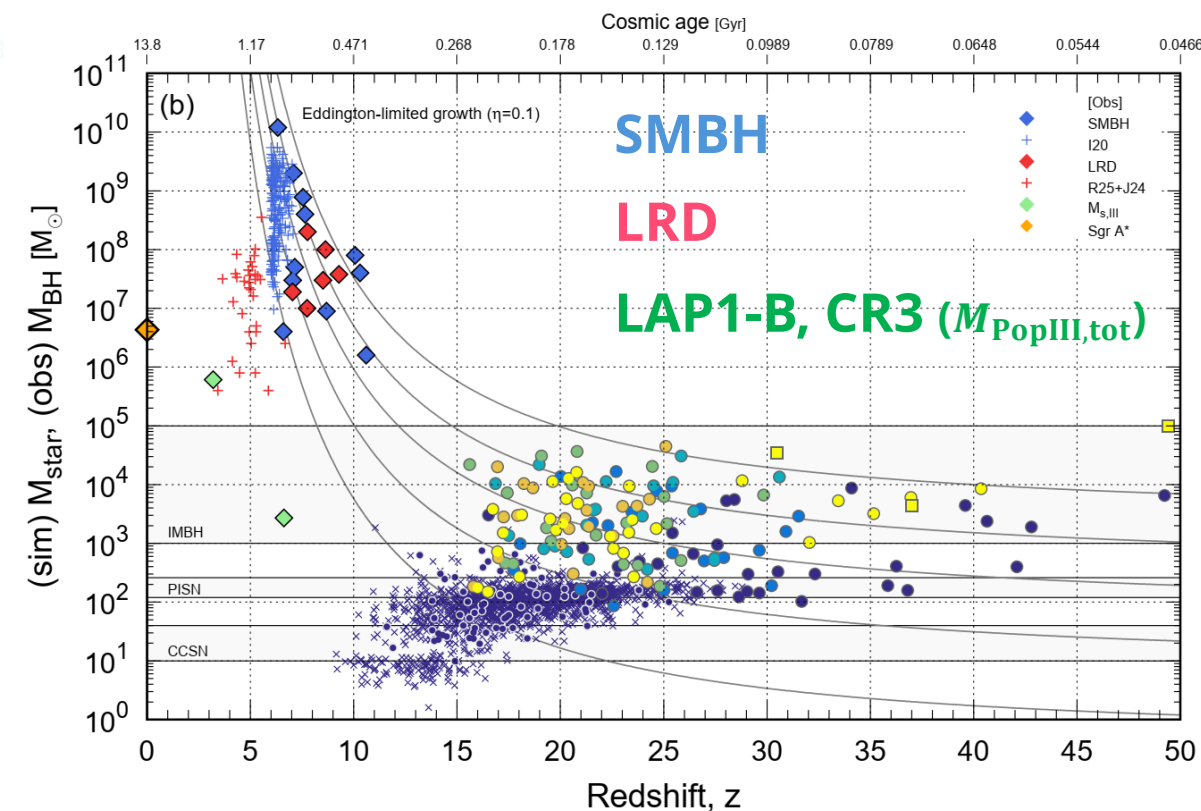
高赤方偏移・大質量銀河 (e.g., Perez-Gonzalez et al. 2025)

→ *High-class*よりも高 ( $z$ ,  $M_{\text{halo}}$ ) が必要



High- $z$  SMBH/LED の seed BHs

→ 高 ( $z$ ,  $M_{\text{halo}}$ ) で  $10^3$ - $10^5 M_{\text{sun}}$  は一般的に出現



# 初代星星団の星質量分布

## 初代星IMFは普遍的か？

- 初代星形成環境 ( $z$ ,  $M_{\text{halo}}$ ,  $v_{\text{SV}}$ ) は初代星形成に影響し、ハロー内の分子雲・初代星の個数と質量を変化させる。
  - (注) 個数は下限・質量は上限であり、ガス雲内の物理過程によって変化する。
- ハローごとの初代星IMFは ( $z$ ,  $M_{\text{halo}}$ ,  $v_{\text{SV}}$ ) に依存
  - 高赤方偏移銀河, 天の川銀河, 近傍初代銀河でそれぞれ異なる。
- 近年の観測は、従来 ( $\sim (0.1\text{-}1\text{Mpc})^3$  box) に比べて極端な状況を調べる必要性を提示。
  - 初代星  $\rightarrow$  Pop II & AGNまで計算

