

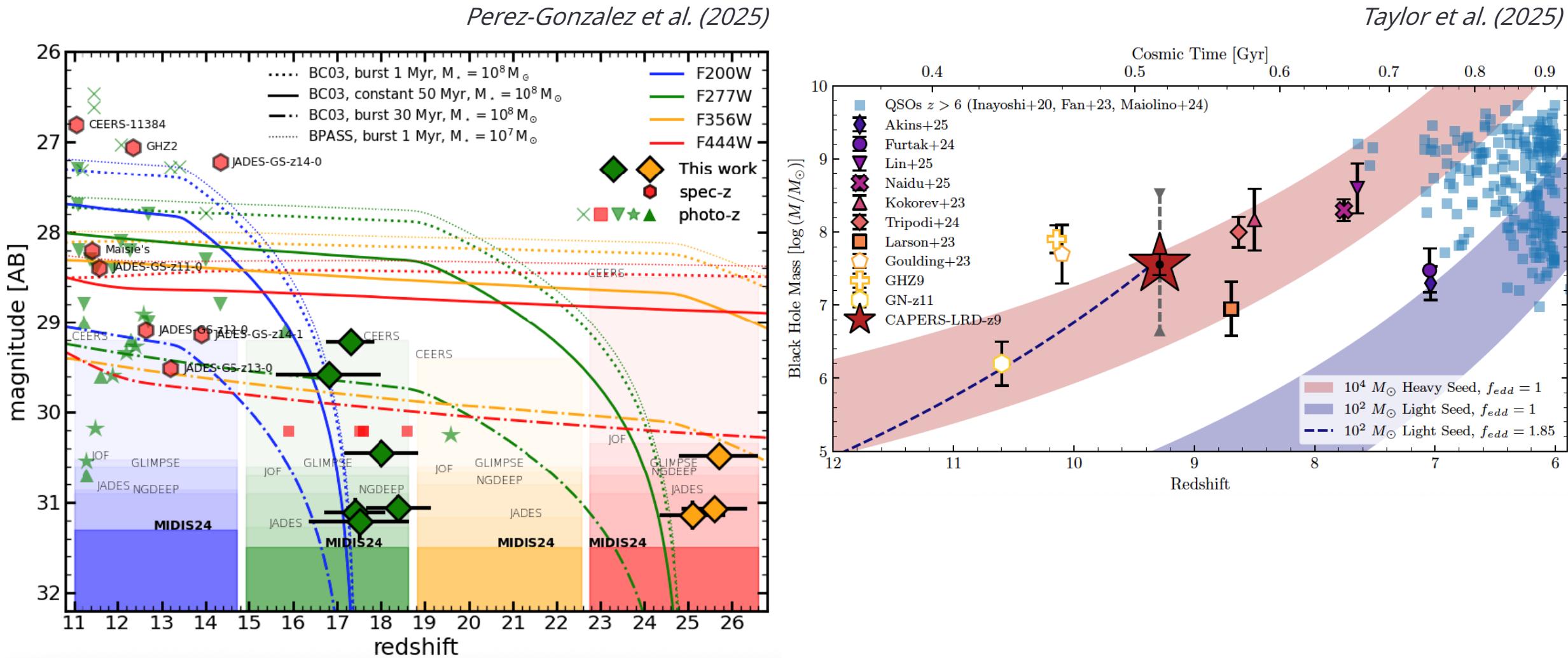
初代星星団の星質量分布

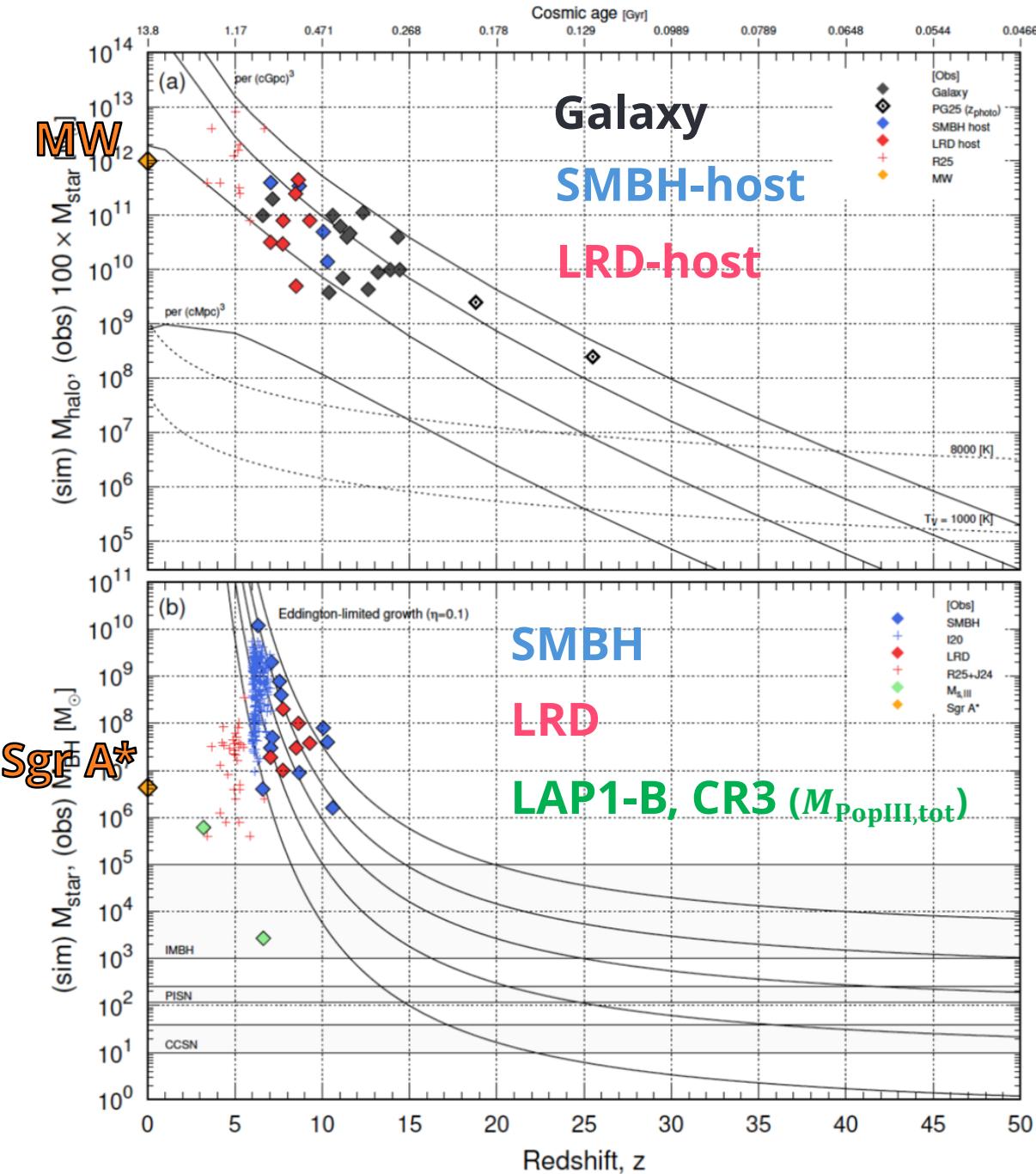
初代星IMFは普遍的か？

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)





Estimated halo mass

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

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

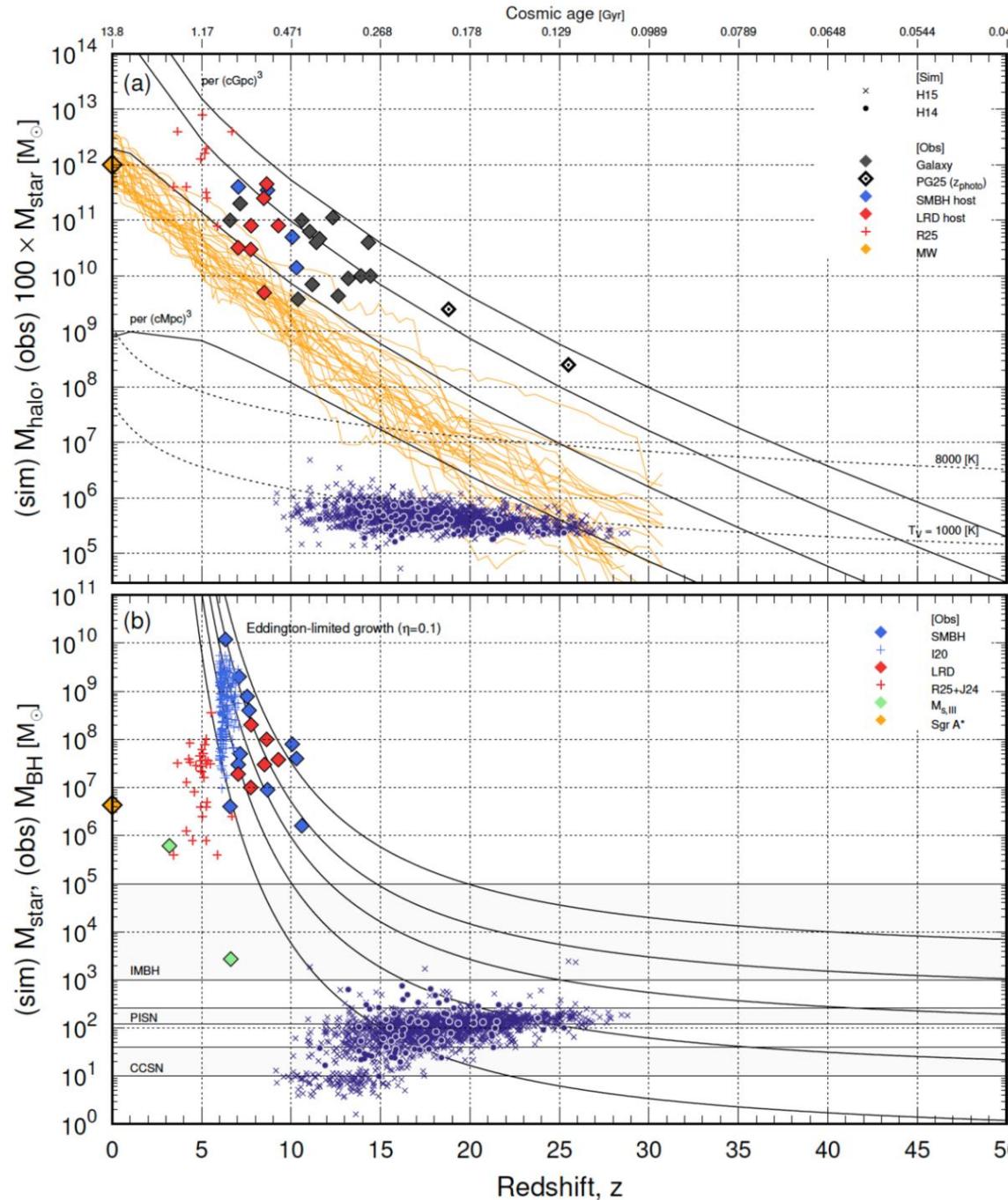
(dashed curves) $\frac{T_{\text{virial}}}{K} = 1000$ (H_2 -cooling),
 8000 (H -cooling halo)

BH mass

(solid curves) Eddington-limited growth tracks

- with radiative efficiency $\epsilon = 0.1$
- pass through $(z, M_{\text{BH}}/M_{\odot})$

$$= (40, 10^4), (30, 10^{3.5}), (25, 10^3), (20, 10^{2.5}), (15, 10^2)$$



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_{halo}) に大質量銀河が観測され(ようと)している。

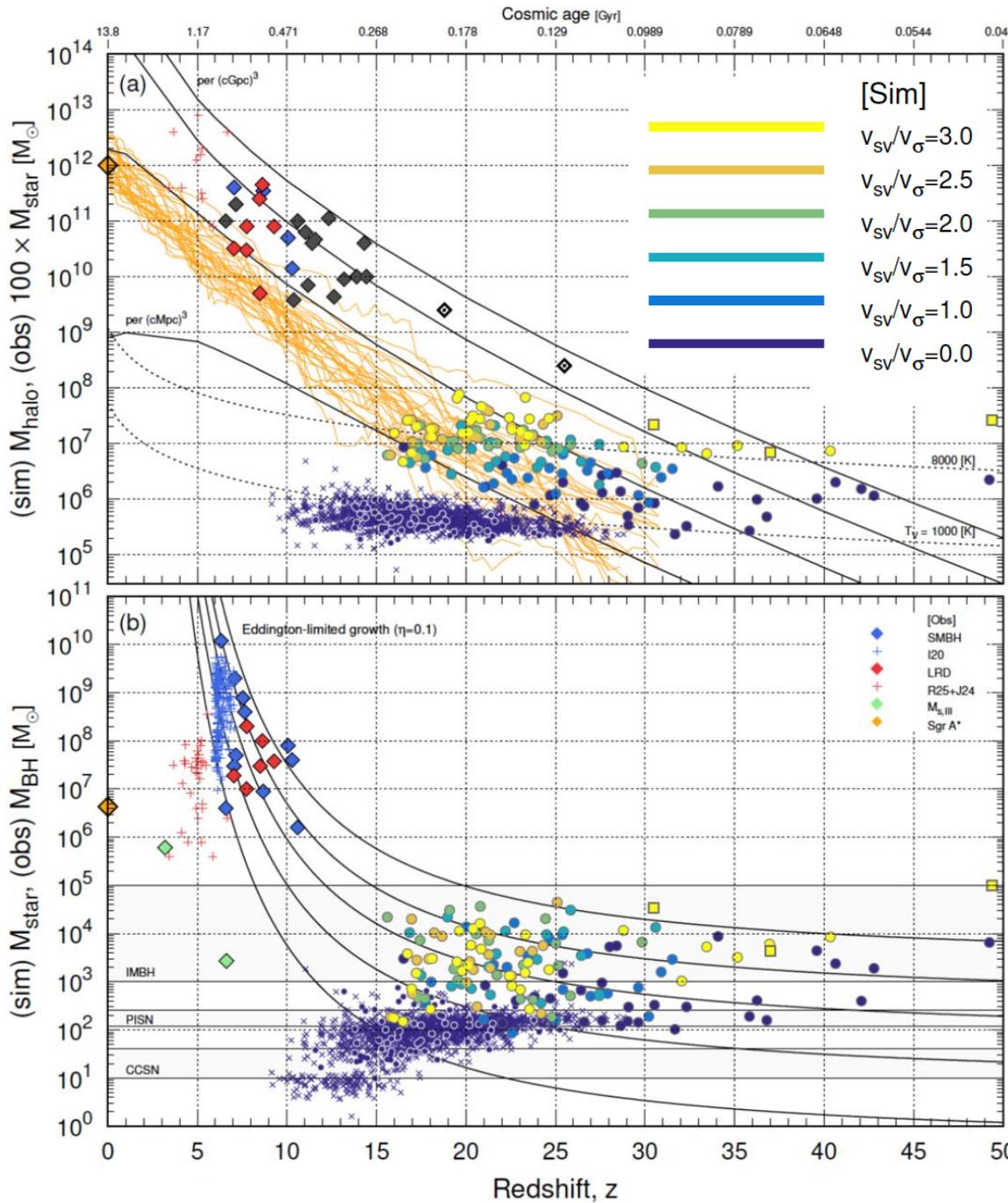
(orange lines) MW-like halo ($M_{\text{halo}} \sim 10^{12} M_{\odot}$ at $z = 0$)

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)

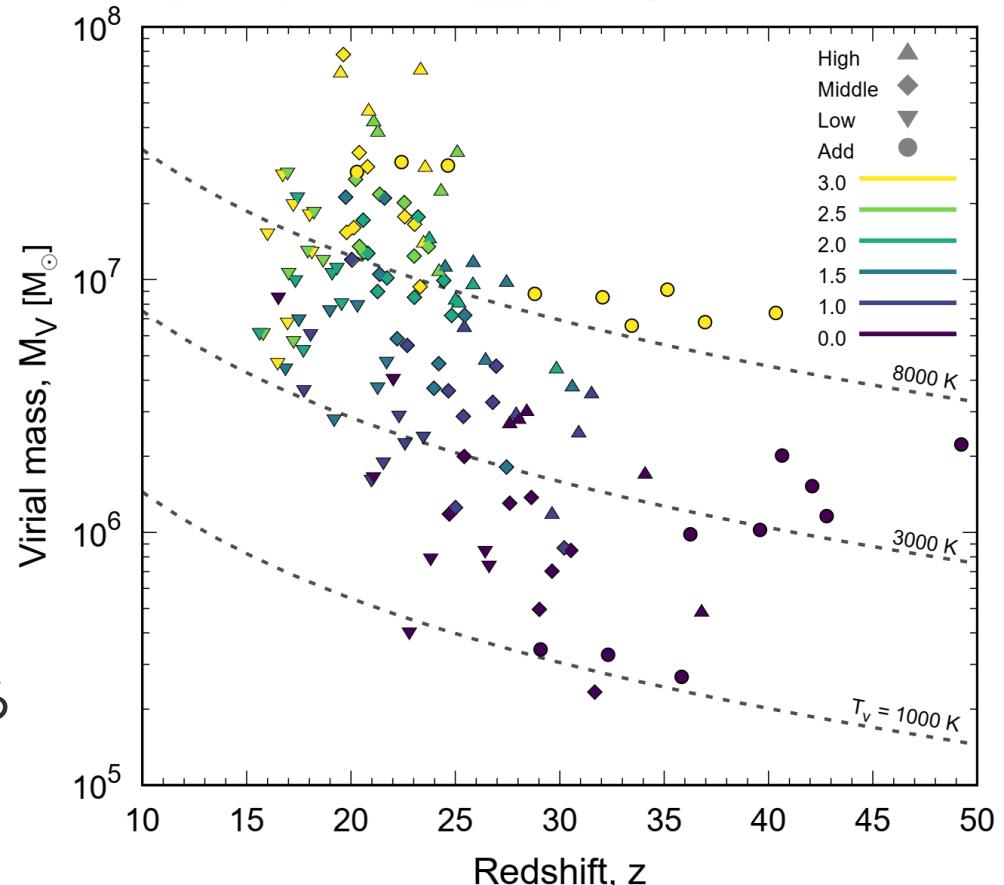
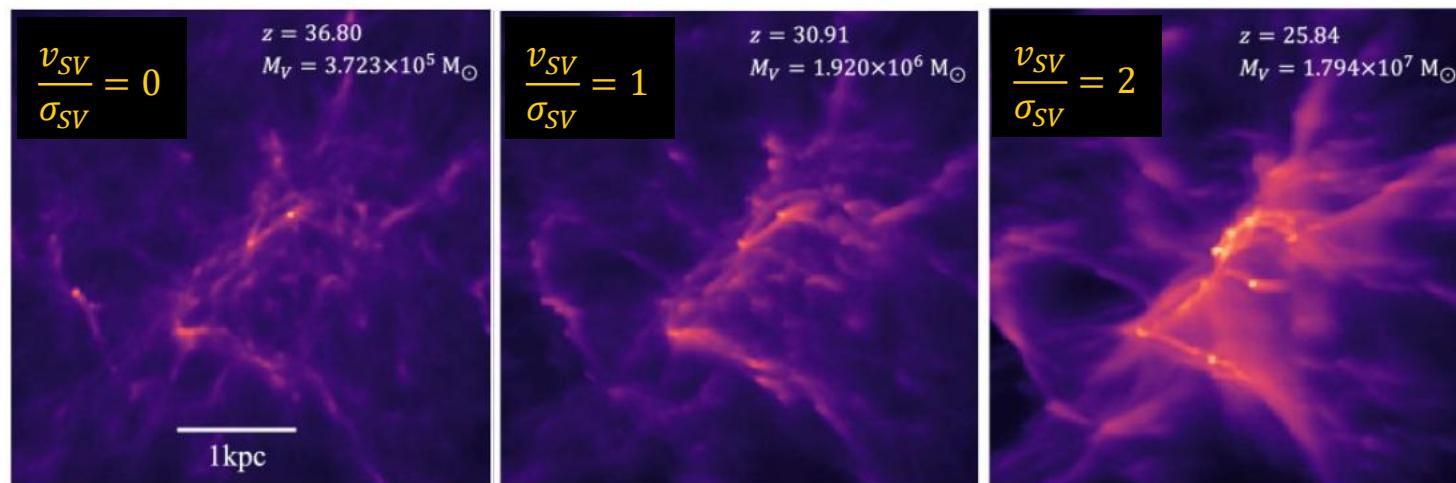
宇宙論的初期条件

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

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

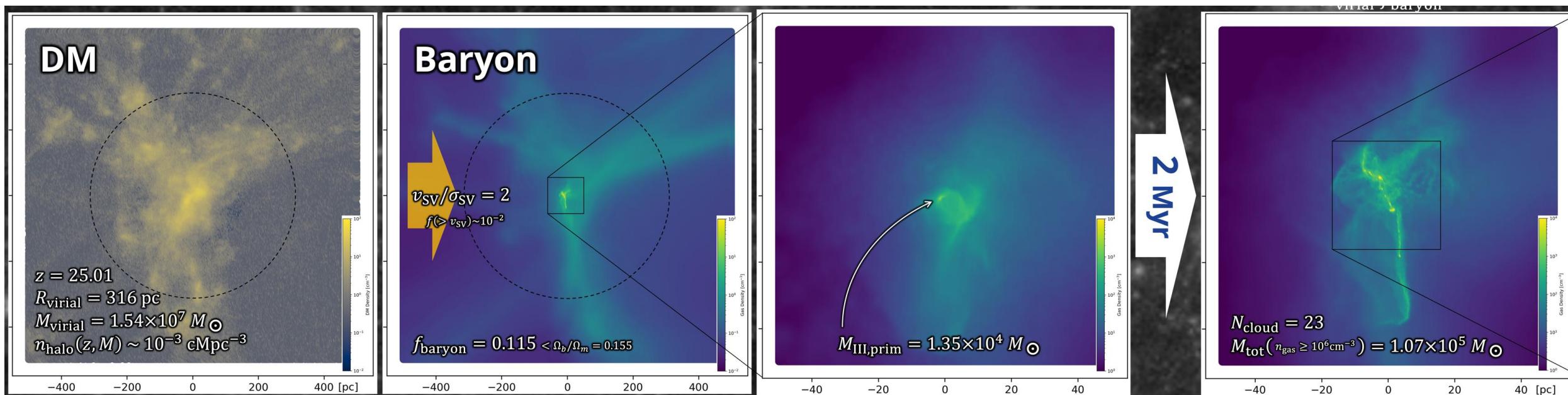
宇宙論的シミュレーション

- Gadget-3 + primordial chemistry
- 粒子分割: $m_{\text{DM},\text{min}} = 0.144 M_{\text{sun}}$
 $m_{\text{gas},\text{min}} = 0.0264 M_{\text{sun}}$
- $z_{ini} = 499 \rightarrow$ 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



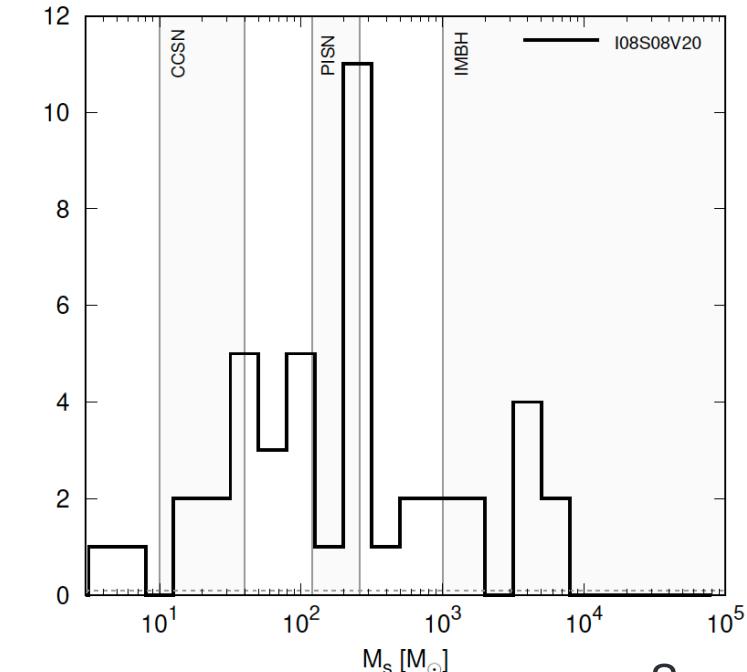
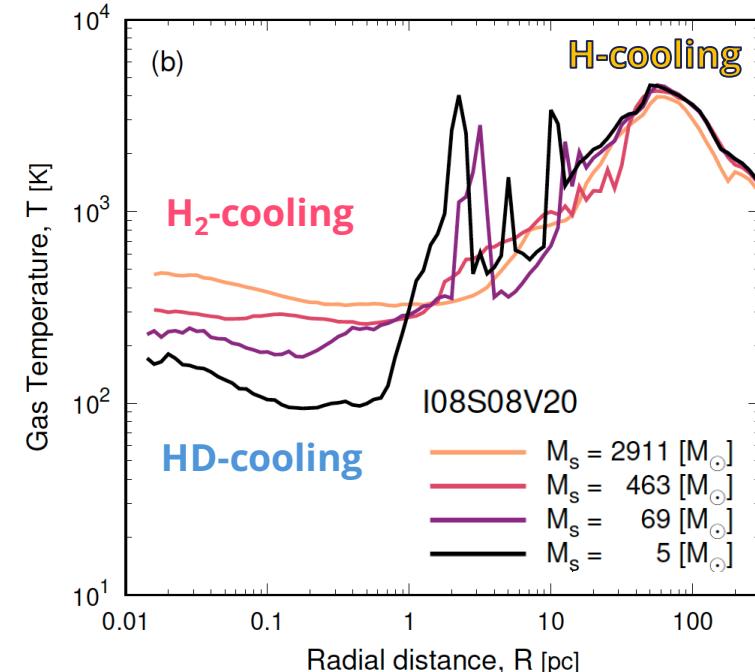
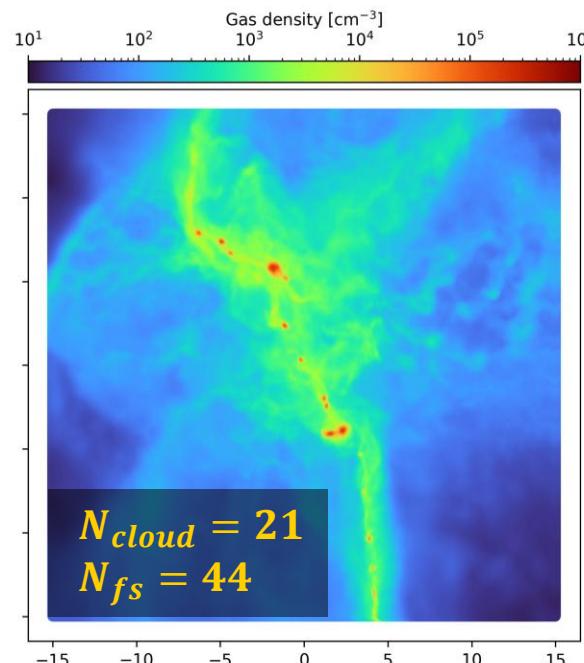
Merger-tree analysis → 星形成ガス雲の特定

- 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



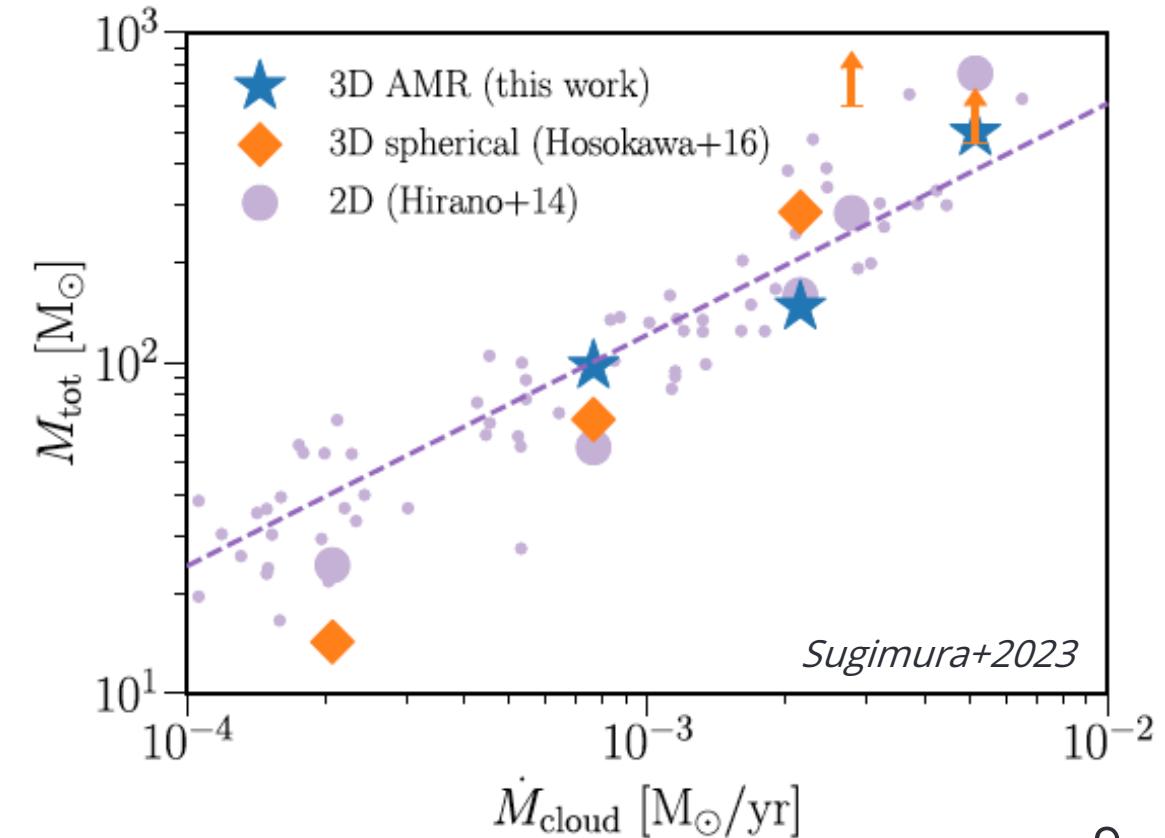
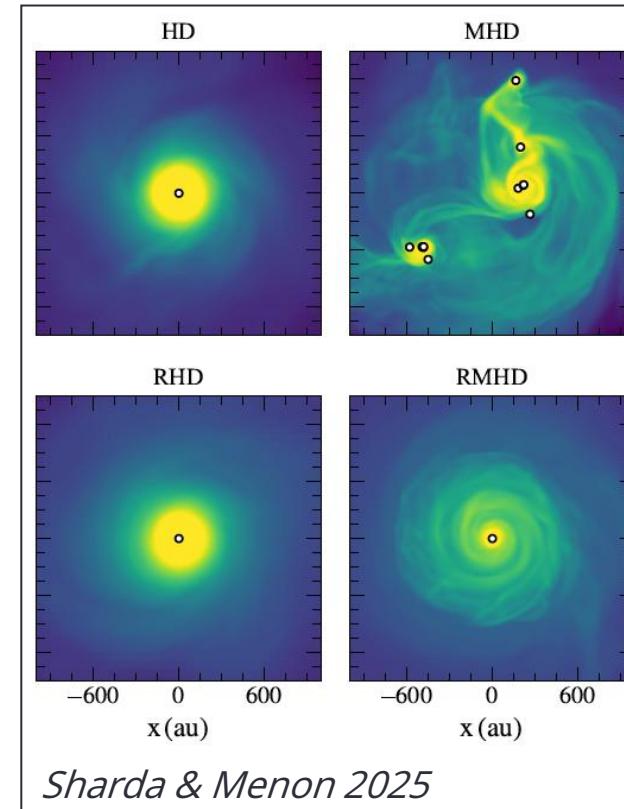
Mass estimation → ハローごとの初代星質量分布

- 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。

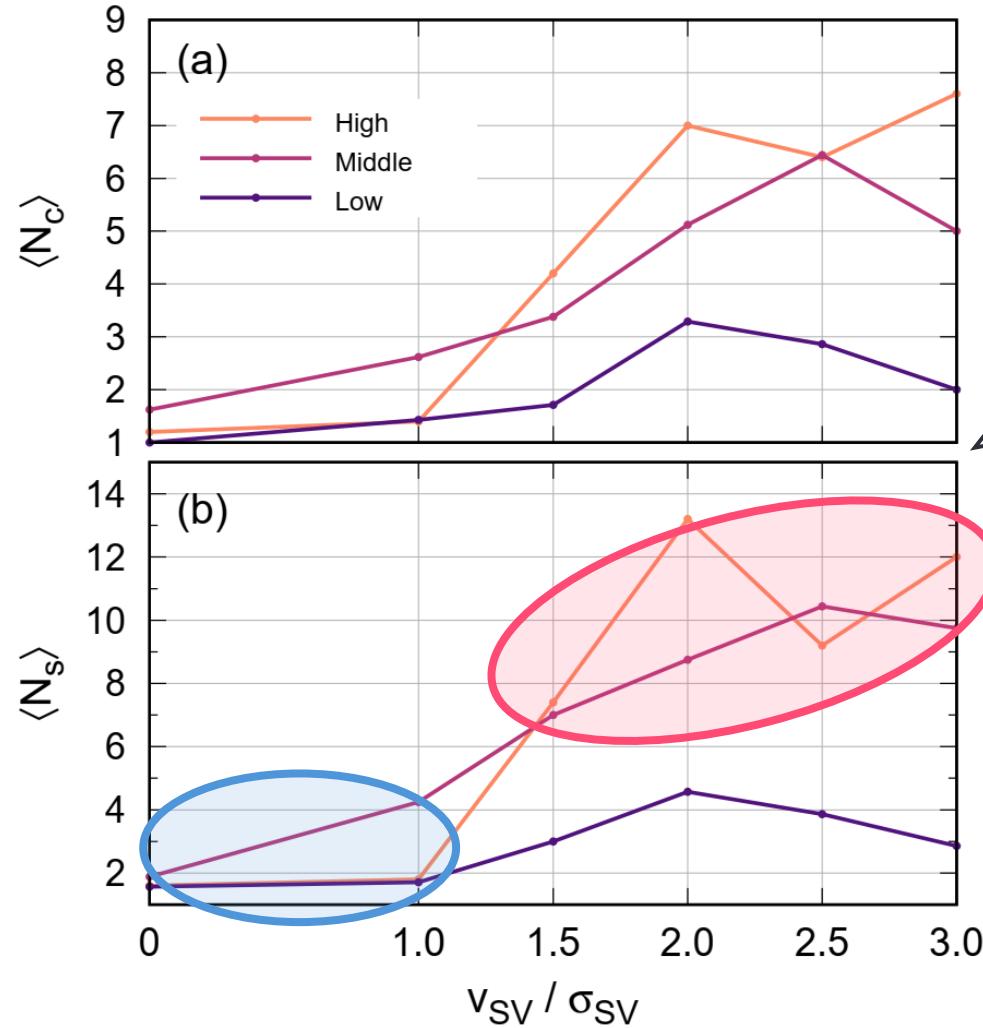


CAVEAT: 分子雲内のmicrophysics

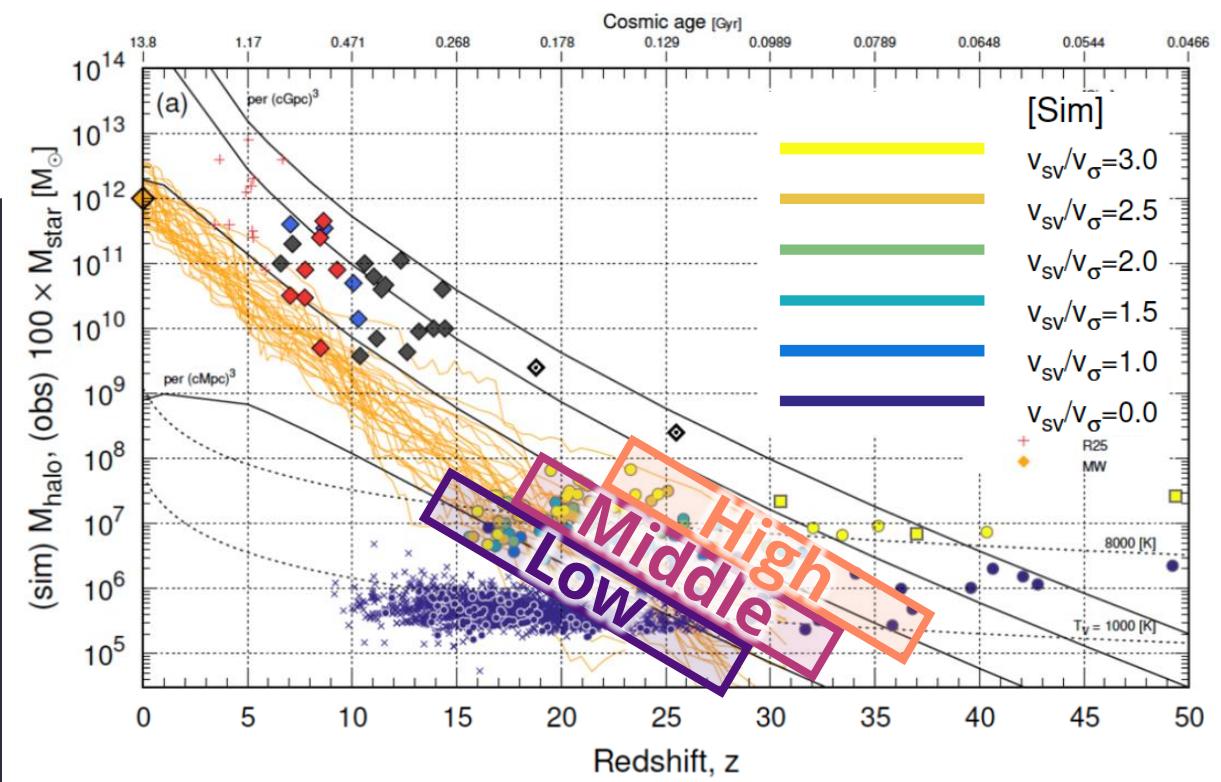
- 分子雲内の現象 (円盤分裂, 輻射フィードバック, 磁気流体効果) は解像していない。
- 今回求めた星質量は「ガス雲あたりの初代星総質量」に相当する。



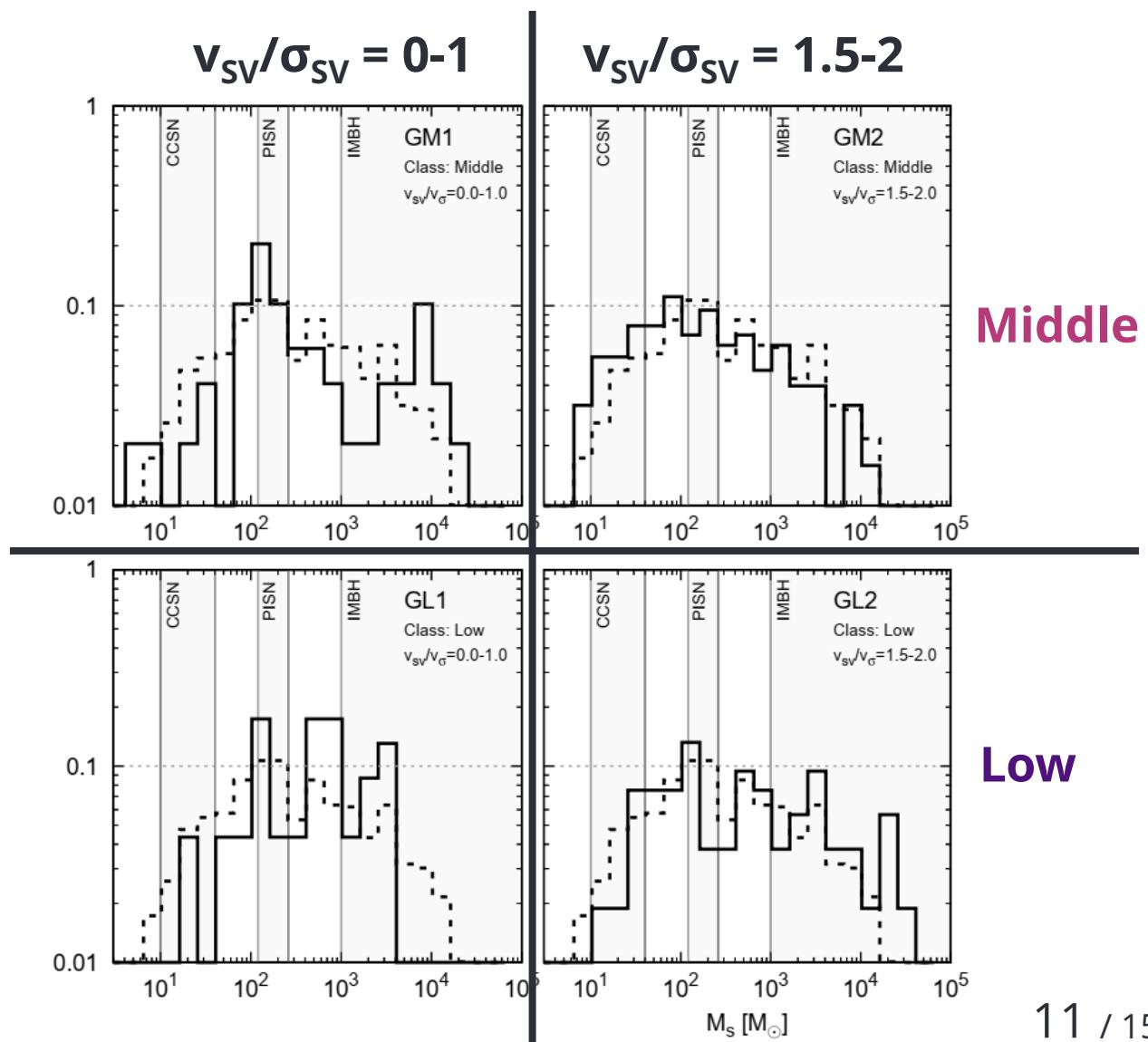
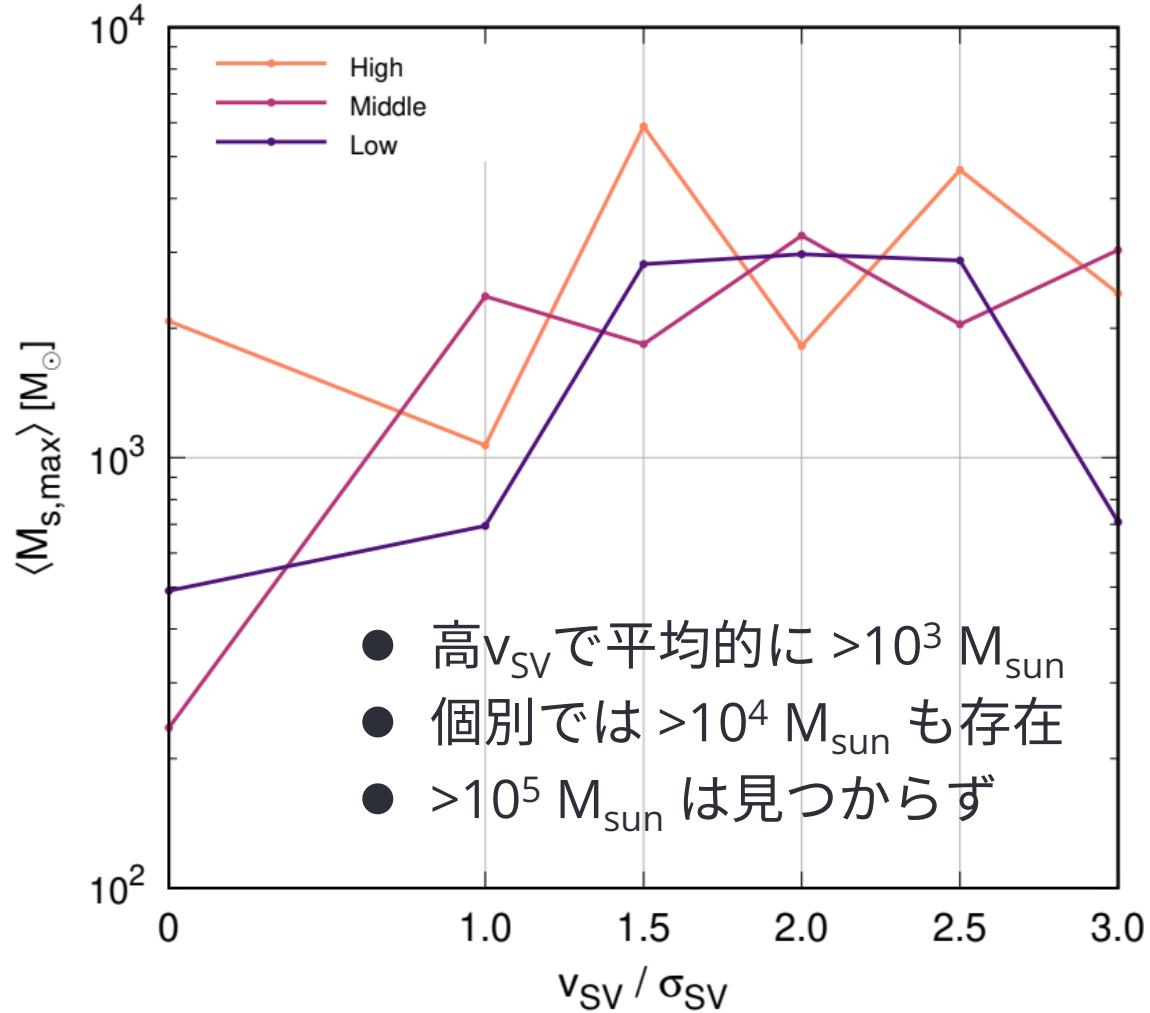
分子雲, 初代星の個数: N_c , N_s



- {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_{halo} , v_{SV})- plane

【Low-class halo】

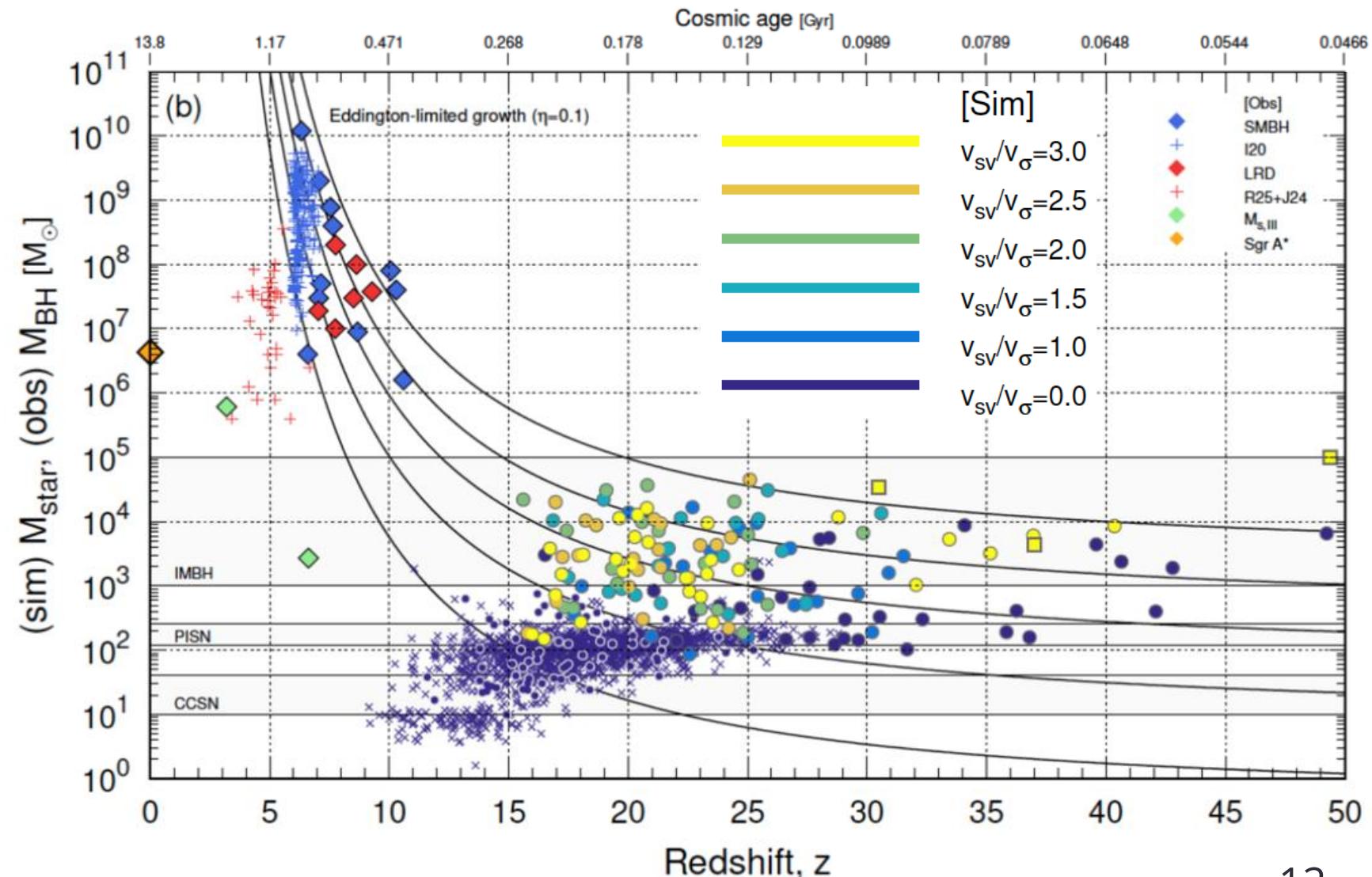
- 初代星の数： v_{SV} に依らず小
- 最大質量： v_{SV} と共に増加
- Hirano+(2014; 2015)はこの中でも低(z , M_{halo} , $v_{\text{SV}}=0$)だった

【Middle-class halo】

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

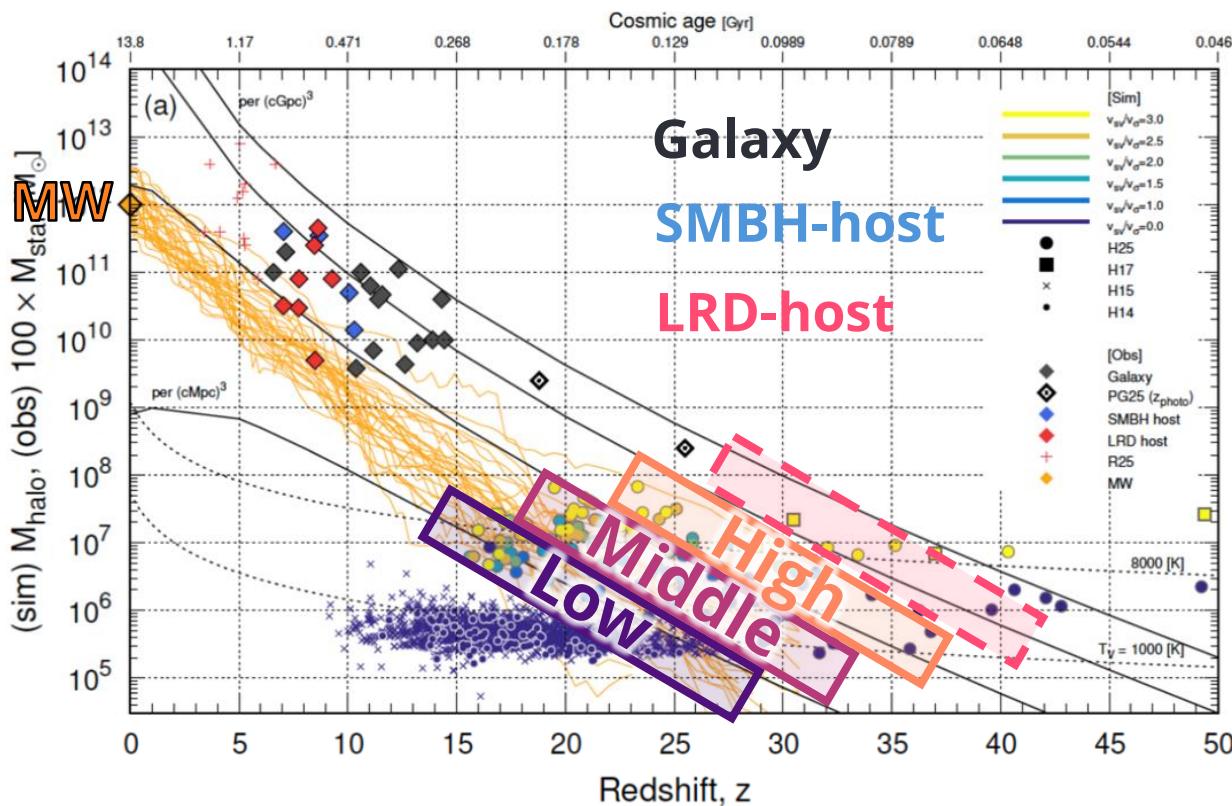
【High-class halo】

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

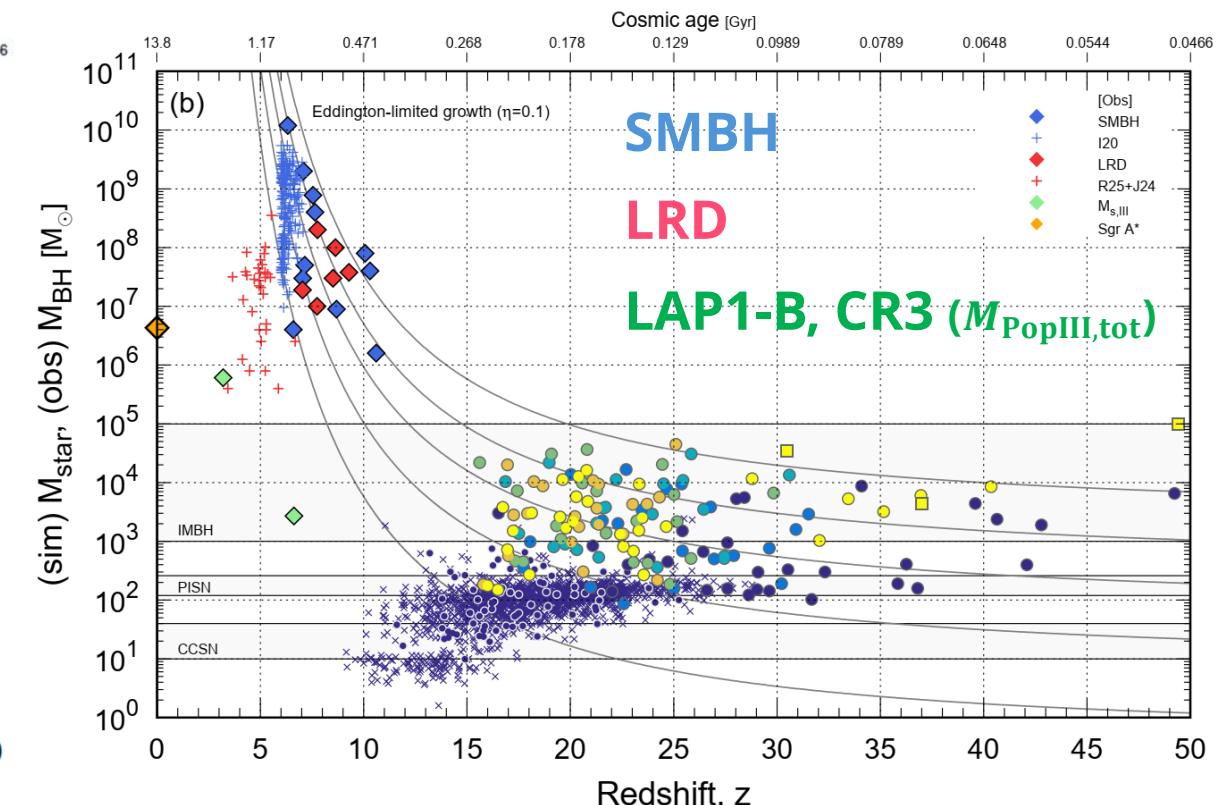


観測との接続

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_{halo}) が必要



High-z SMBH/LED の seed BHs
 → 高 (z, M_{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_{halo} , v_{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しうる。
- ハローごとの初代星IMFは (z , M_{halo} , v_{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 → Pop II & AGNまで計算

