A visualization of the cosmic web, showing a dense network of filaments and nodes of matter. The central region is a bright, glowing yellow-orange cluster, while the surrounding filaments are a mix of green and blue, with smaller clusters of stars and galaxies. The overall structure is complex and interconnected, representing the large-scale structure of the universe.

初代星が形成する ダークマターハローの合体形成史

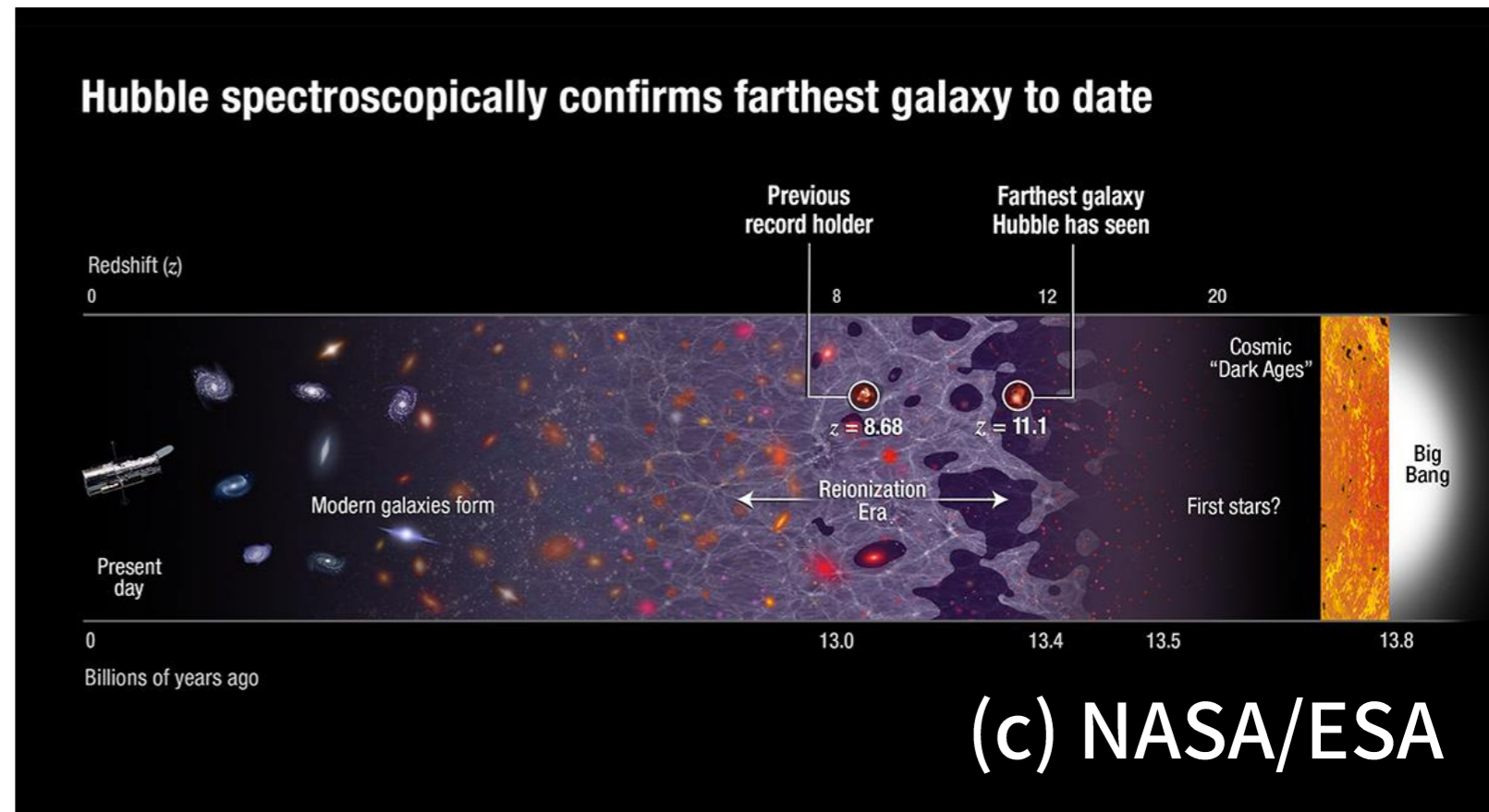
石山智明 (千葉大学)

Introduction

- 過去約20年以上に渡り、Pop III 形成の物理は非常によく研究されてきた
- 多くは zoom-in 輻射流体シミュレーションによる個々の Pop III 形成に着目
- グローバルな描像はどうなっているのか?
 - 初代銀河、超遠方銀河、再電離、21cm線、AGN、重力波 などとの関係

• 近傍における空間分布は?

• 比較的広めの領域を zoom-in した研究もあるが、一辺約 4 Mpc/h 程度 (e.g., Renaissance Simulations: O'Shea et al. 2015; Xu et al. 2016 など)



本研究

- 初代星が形成するミニハローを分解できる高解像度宇宙論的N体シミュレーションと、準解析的初代星形成モデルを組み合わせてグローバルな描像を調べる
- 比較的大きめの空間体積を追い、LW feedback を self-consistent に計算する
- 空間全体にわたる IMF や SFRD (Star formation rate density) を調べるとともに、streaming velocity の大きさにどう依存するか調べる
- 初代星が形成したハローはどのような進化をたどるか?
- 近傍銀河でその痕跡はどのように分布しているのか?
- 将来、より大きい体積のシミュレーション (~ 100 Mpc/h) が実現したときのための準備としても位置付けられる

Simulation suite

Name	N	$L (h^{-1} \text{Mpc})$	$\varepsilon (h^{-1} \text{pc})$	$m_p (h^{-1} M_{\odot})$	z_{fin}
Phi-4096	4096^3	16.0	60	5.13×10^3	0.0
M8	2048^3	8.0	60	5.13×10^3	7.5
H3	1536^3	3.0	30	6.41×10^2	7.5
M3	768^3	3.0	60	5.13×10^3	7.5
L3	512^3	3.0	90	1.73×10^4	7.5

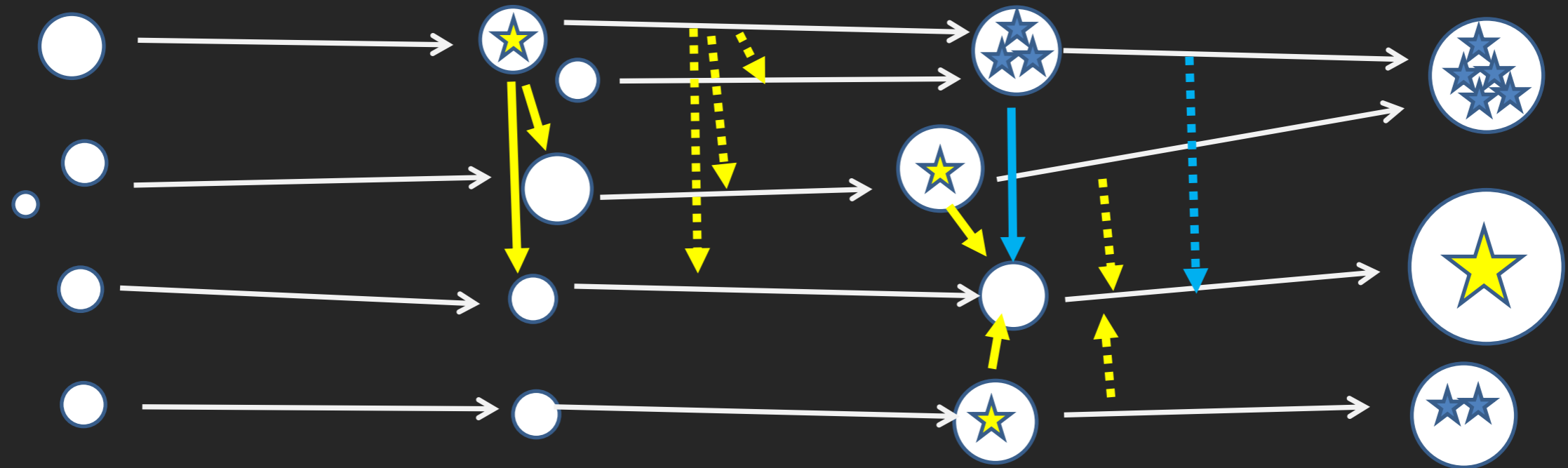
Rockstar halo/subhalo finder (Behroozi+2013)
consistent merger trees code (Behroozi+ 2013b)

- Advantage over previous works

- Cover full box (Only MW halos in Griffen+18 and Magg+18)
- High mass resolution (L3 resolution in Griffen+18 and Magg+18)
- Larger volume (2~3.4 Mpc/h in Agarwal+12 and Visbal+18,20)
- Down to $z=0$ (terminated at very high- z in Agarwal+12 and Visbal+18,20)



Cosmological N-body simulations + semi-analytic model

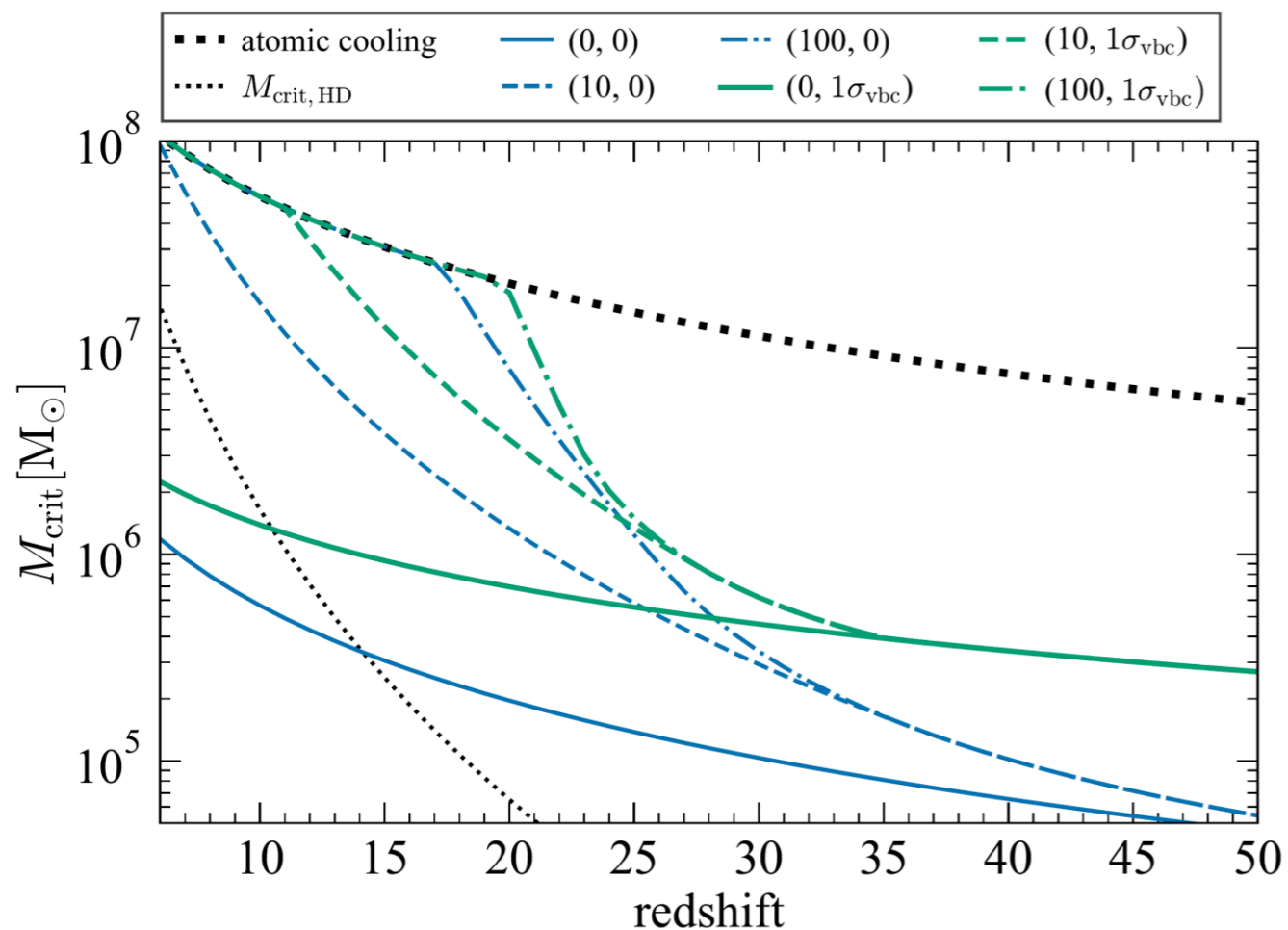


● Pristine ★ Pop III ★ Pop II → LW ⇢ LW substep

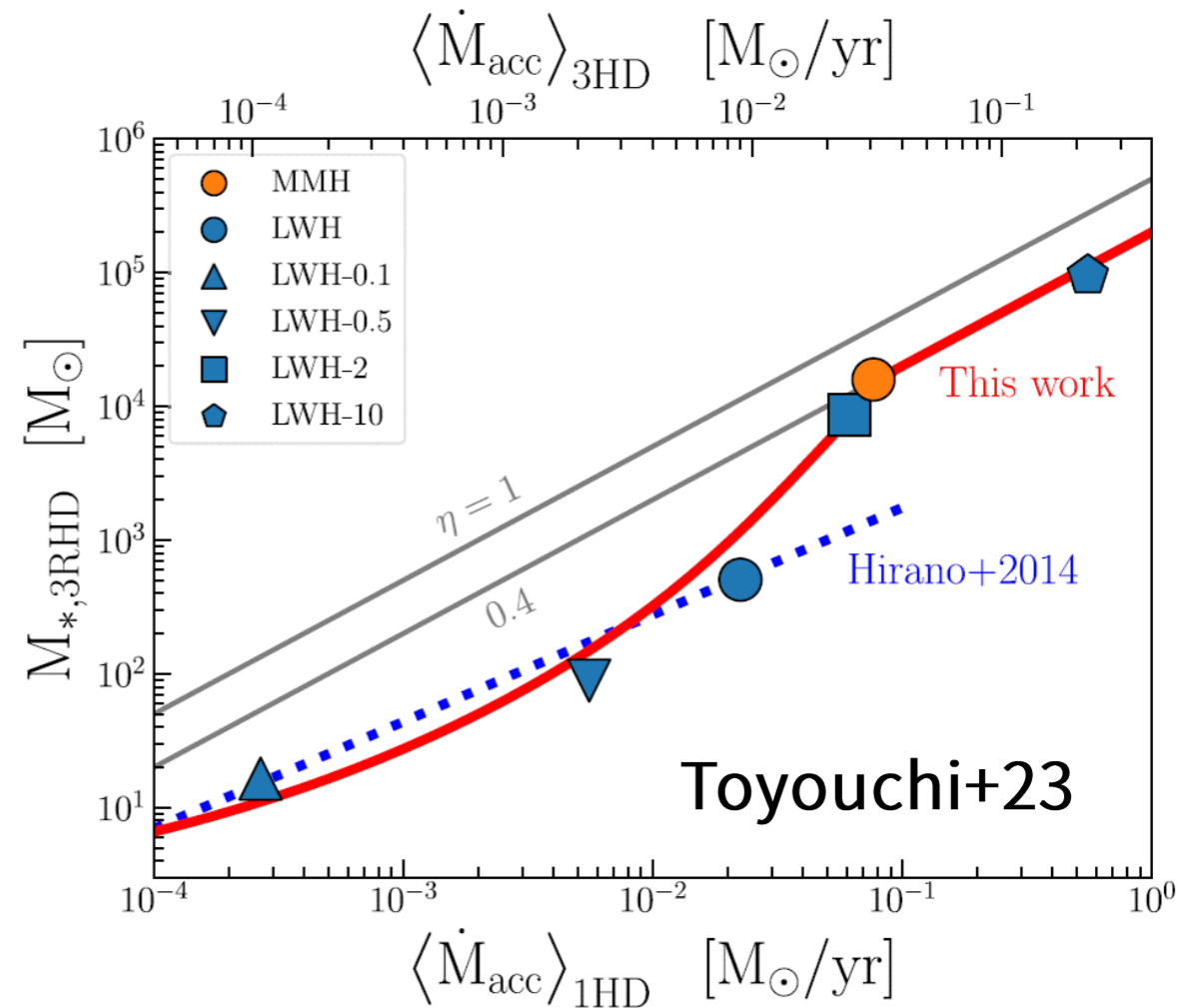
準解析的モデル

- Pop III 形成条件
 - Kulkarni+21 のフィッティングと (z, LW intensity, streaming velocity 依存) + atomic cooling mode (Fernandez+14)
- Pop III mass
 - Hirano+15 (H₂ and HD modes) + Toyouchi+23 (SMS)
- Pop II model
 - Three components model by Agarwal+12 (hot gas, cold gas, star)
 - Pop II formation starts in enriched halos (at least a progenitor is Pop III forming minihalo)
 - Halo mass threshold $m_{\text{th}}=10^7$ Msun
- LW feedback from Pop III and Pop II
 - Self-consistent model (spatial and time dependent)
 - 近傍は直接計算、遠方はFFT (重力計算における P³M や TreePM のようなもの)
 - Radiation continues during the lifetime of Pop III (Schaerer 2002) and that massive Pop II stars (10 Myr fixed)

Pop III 形成条件

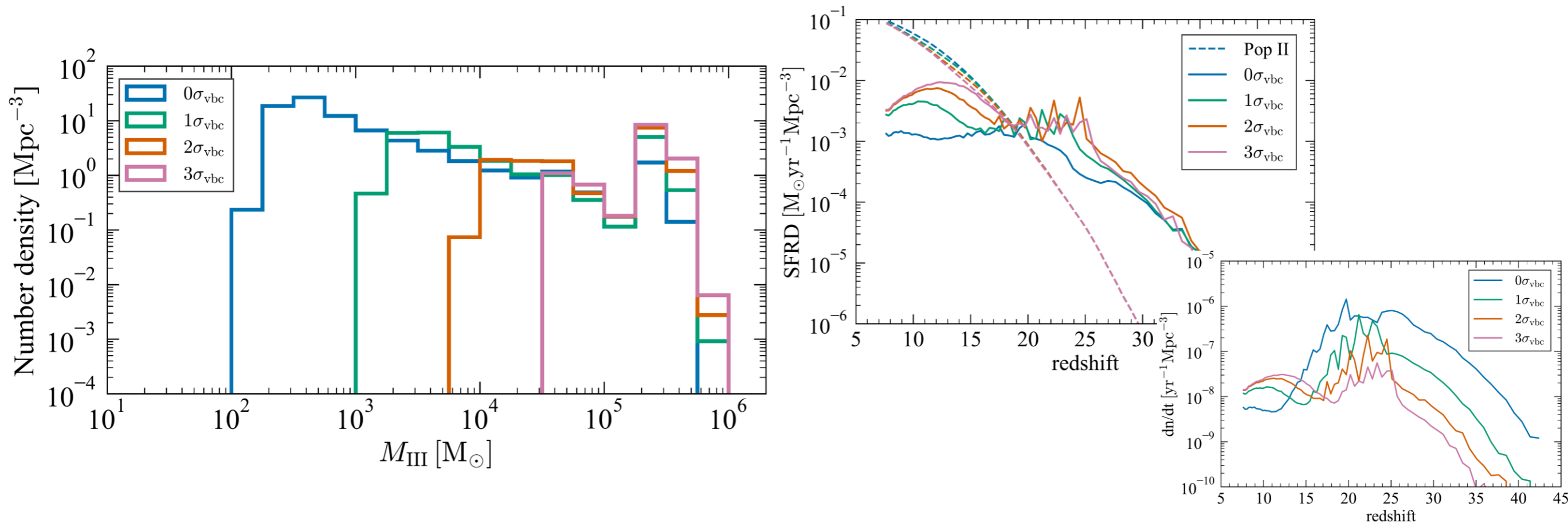


Pop III IMF



- Streaming velocity が 0, 1, 2, 3 σ ($\sigma = 30\text{km/s}$) の4モデルを比較
- ボックス内でハローがはじめて形成する $z=43$ から、ボックス全体の merger tree が作れる $z=7.5$ まで計算

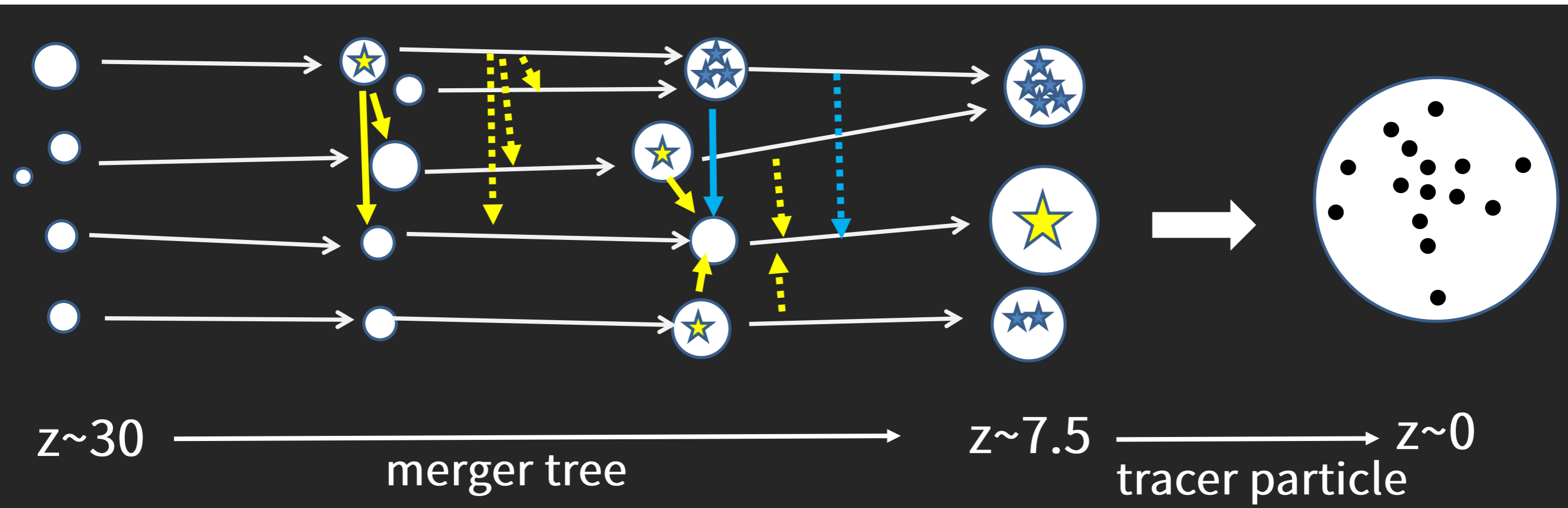
Pop III IMF, star formation rate density



- (左: IMF) 分裂はモデル化されていないため、IMF というよりハローあたりの総Pop III 質量の分布
- (右: SFRD) Pop II は streaming velocity の大きさにほとんど依存しない
- Pop III は velocity が大きいと多少 SFRD は上がる。一方、数自体は少ない
- SFRD は second peak (atomic cooling) の違いが顕著

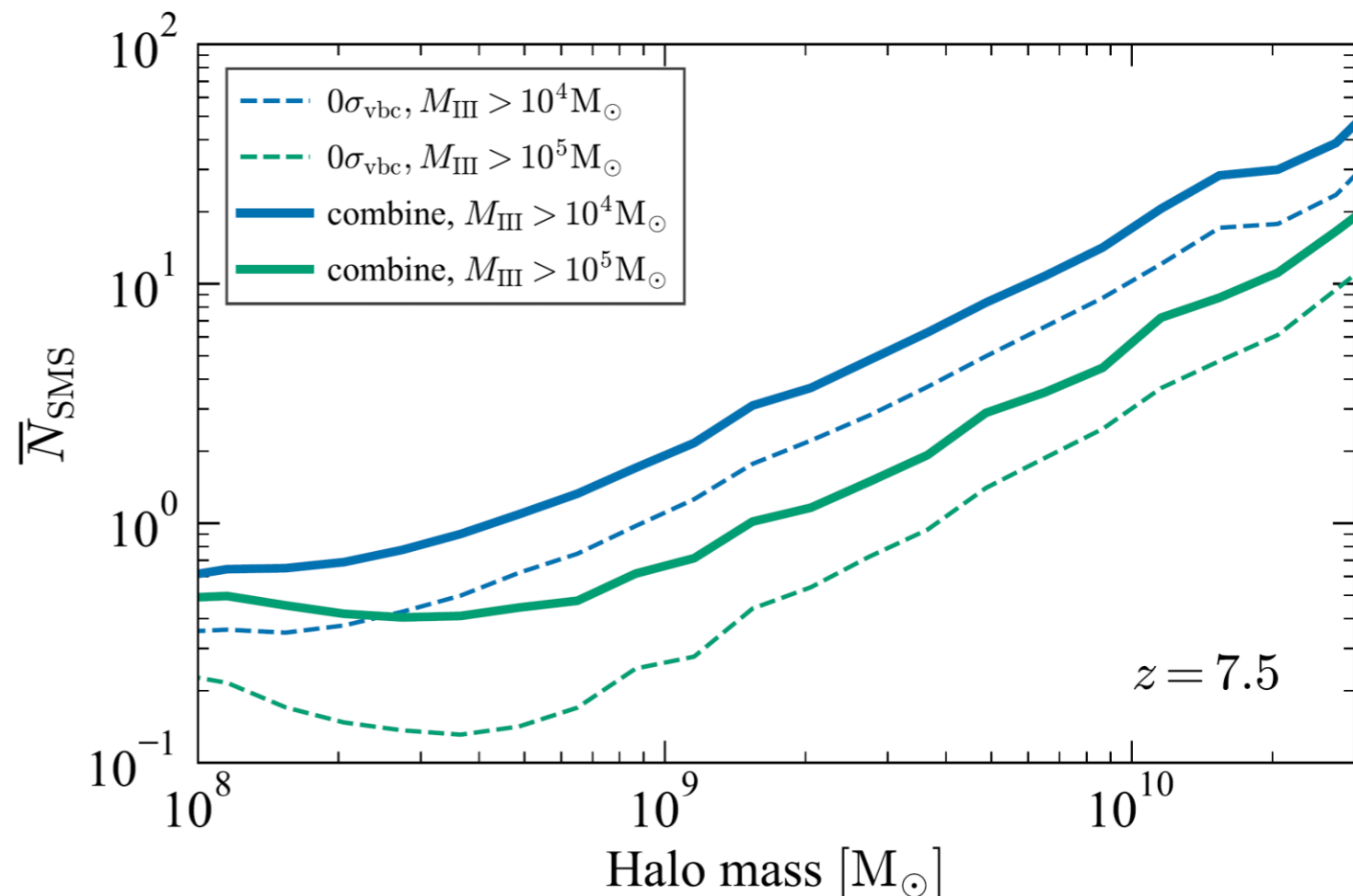
初代星が形成するハローはその後どうなるか？

- 多くは大きいハローに取り込まれ、潮汐破壊されると考えられる
- 破壊されるまでは merger tree 上で追跡できる
- それ以降は most bound particle をトレーサー粒子として追跡する



High-z のSMBH形成への示唆

- (右図) $z=7.5$ のハローが取り込んできた超大質量星の数
- およそ 10^9 太陽質量のハローに1つ含まれる
- Streaming velocity があると数倍に増加
- 宇宙論的流体シミュレーション (Bhowmick+ 2022) から示唆される、 $z=6$ のQSOを再現するのに必要な数とコンシステント



See also Chiaki+ 2023

MWハロー内 ($z=0$) での分布

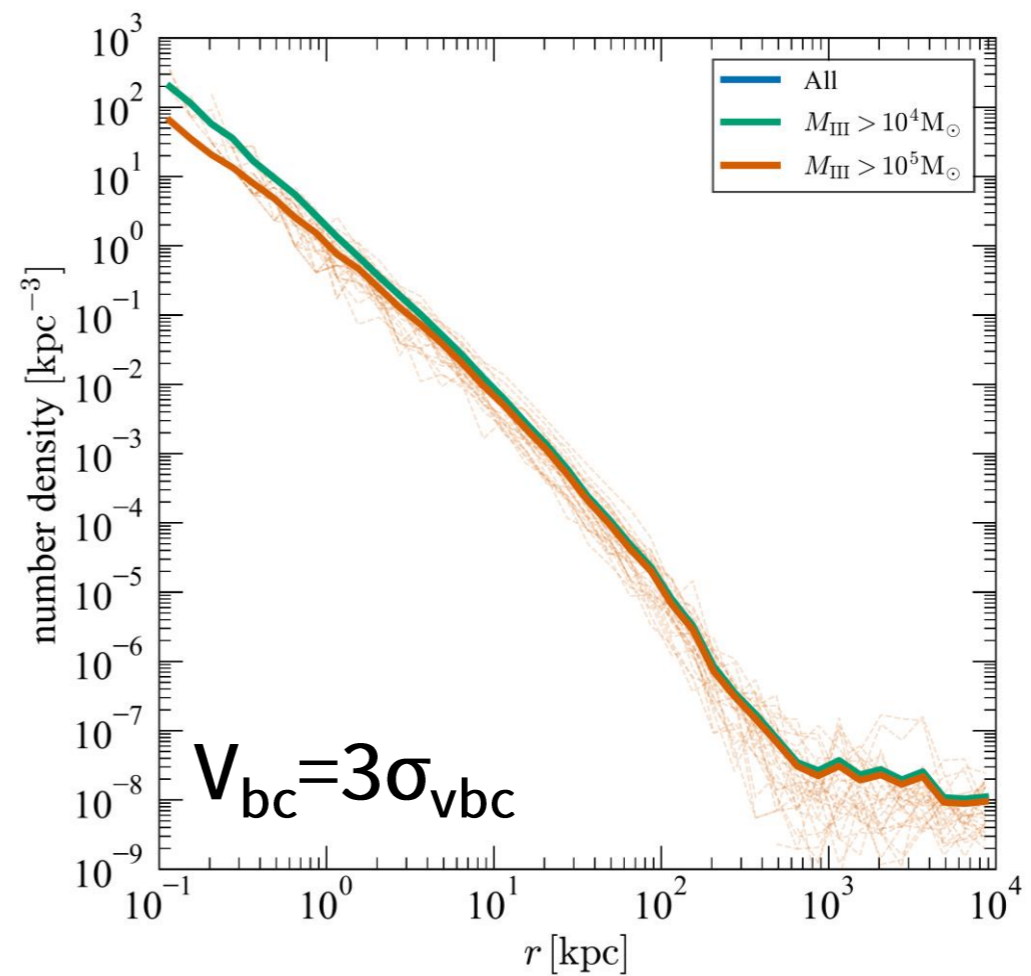
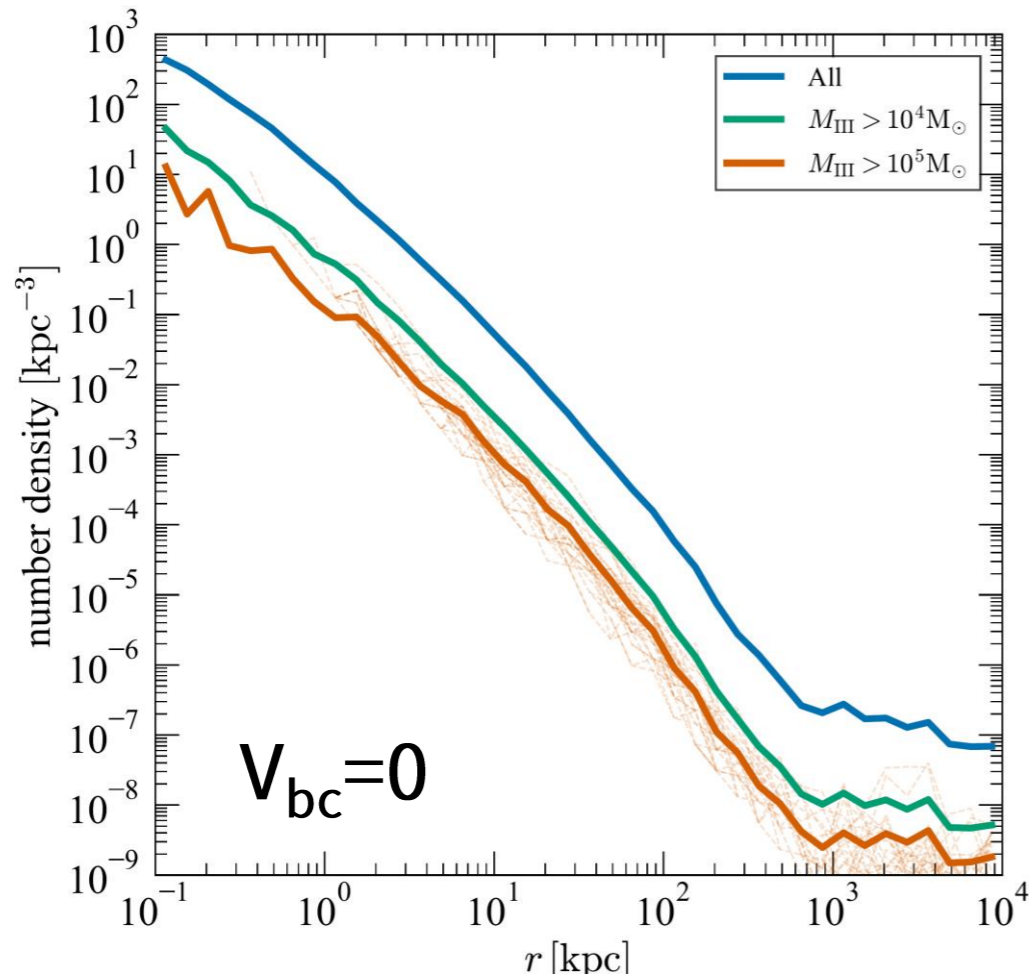
MWハローから 100kpc以内に存在する tracer particle の数 (27ハローの平均)
(それぞれ $V_{bc}=0, 3\sigma_{vbc}$)

- All: 3000, 517
- $M_{III}>10^4$ Msun: 210, 517
- $M_{III}>10^5$ Msun: 60, 408

1kpc 以内では

- All: 113, 27
- $M_{III}>10^4$ Msun: 6.9, 27
- $M_{III}>10^5$ Msun: 1.6, 12.3

Number density profile



- プロファイルの形は初代星の質量にあまり依存しない
- ハローの外での number density はおおむね一定
- $V_{bc}=0$ ではハローによっては中心に $M_{\text{III}} > 10^5$ の大質量星(の残骸)が存在しない

まとめ

- 高解像度宇宙論的シミュレーションに基づいた準解析的初代星形成を構築した
- ボリュームが大きいことで、従来の研究では見られなかった効果がいろいろ見えてきた
- $z = 7.5$ までに形成する初代星の質量分布はトップヘビーであり、水素分子 ($20 \lesssim z \lesssim 25$) と原子冷却 ($z \lesssim 15$) ハローそれぞれに対応する2つのピークが現れた
- 原子冷却ハローでは超大質量星 ($> 10^5$ 太陽質量) が形成され、その割合は相対速度とともに増加する
- $z = 7.5$ でおおよそ 10^9 太陽質量のハローにひとつの超大質量星が存在し、ブラックホールの種として高赤方偏移のクェーサーを再現するのに十分な数である
- $z=0$ でMW haloの中心にも $M_{\text{BH}} > 10^4$ の大質量星(の残骸)が存在する → SMBH?