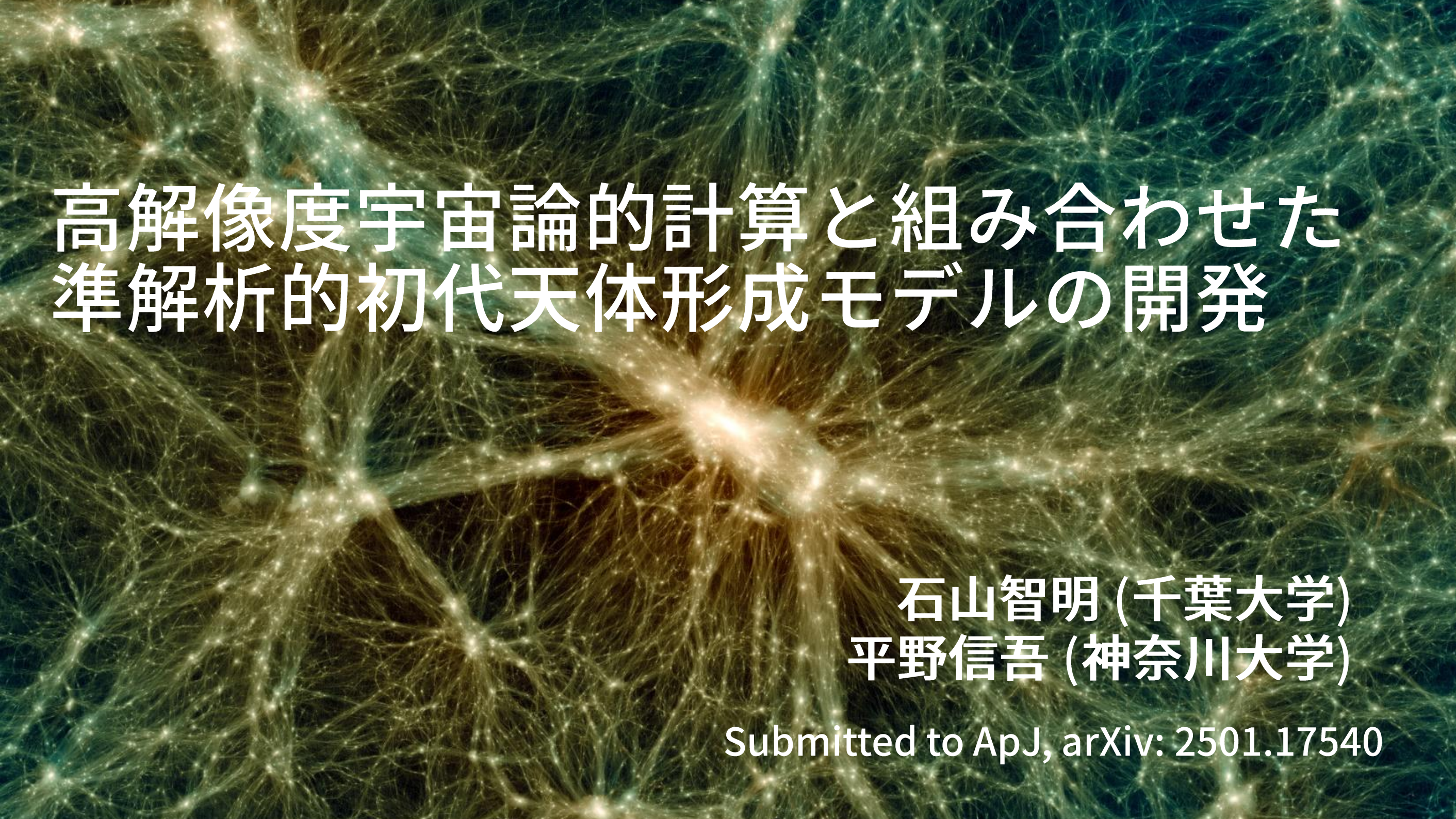


A visualization of the cosmic web, showing a dense network of filaments and nodes of matter in the universe. The filaments are depicted as thin, glowing lines in shades of green and yellow, connecting various clusters of galaxies. The background is a deep blue, and the overall structure is complex and interconnected, representing the large-scale structure of the universe.

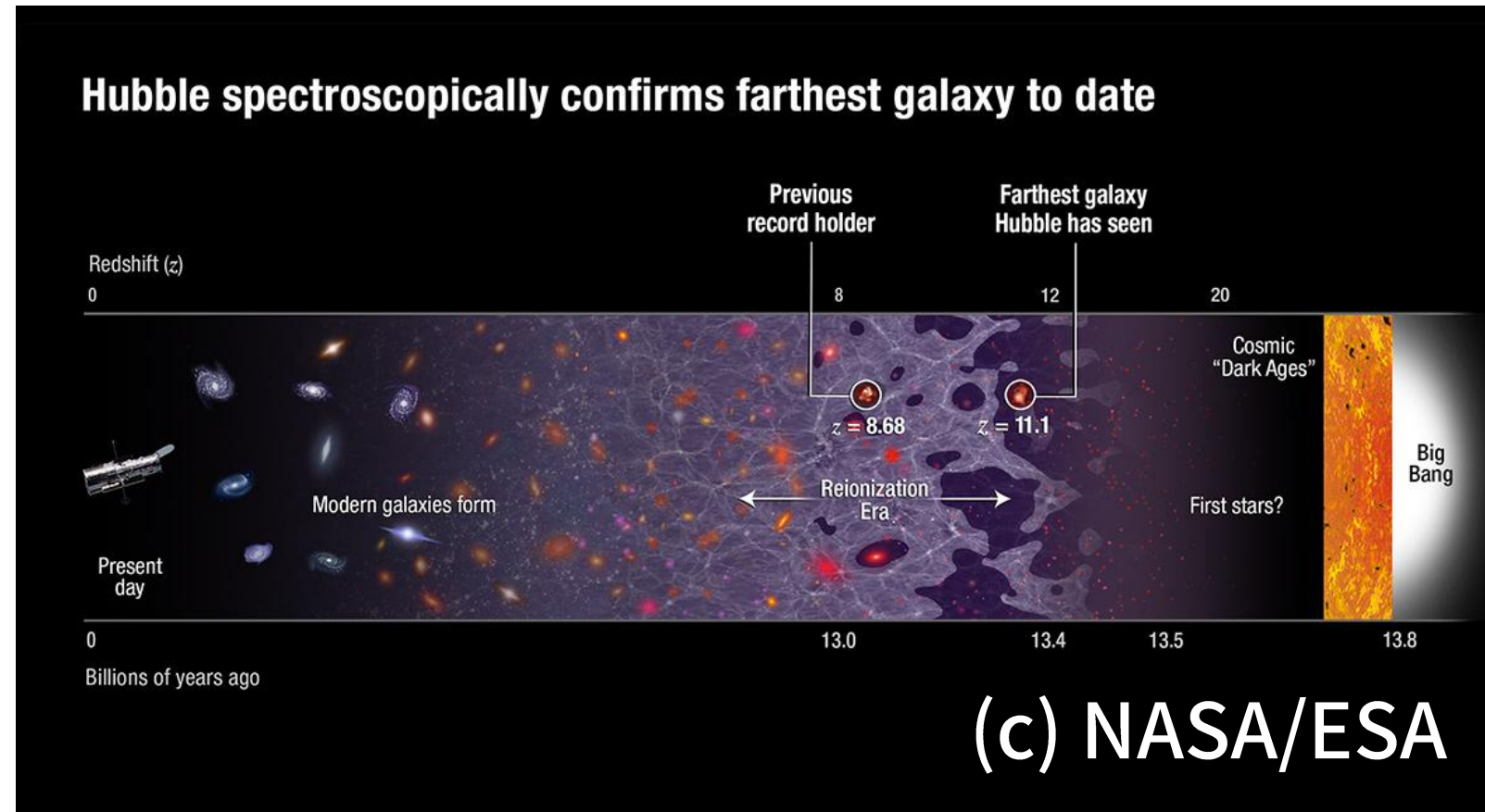
高解像度宇宙論的計算と組み合わせた 準解析的初代天体形成モデルの開発

石山智明 (千葉大学)
平野信吾 (神奈川大学)

Submitted to ApJ, arXiv: 2501.17540

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
- 将来、より大きい体積のシミュレーション ($\sim 100 \text{ Mpc}/h$) 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	$L (h^{-1} \text{Mpc})$	$\varepsilon (h^{-1} \text{pc})$	$m_p (h^{-1} \text{M}_\odot)$	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

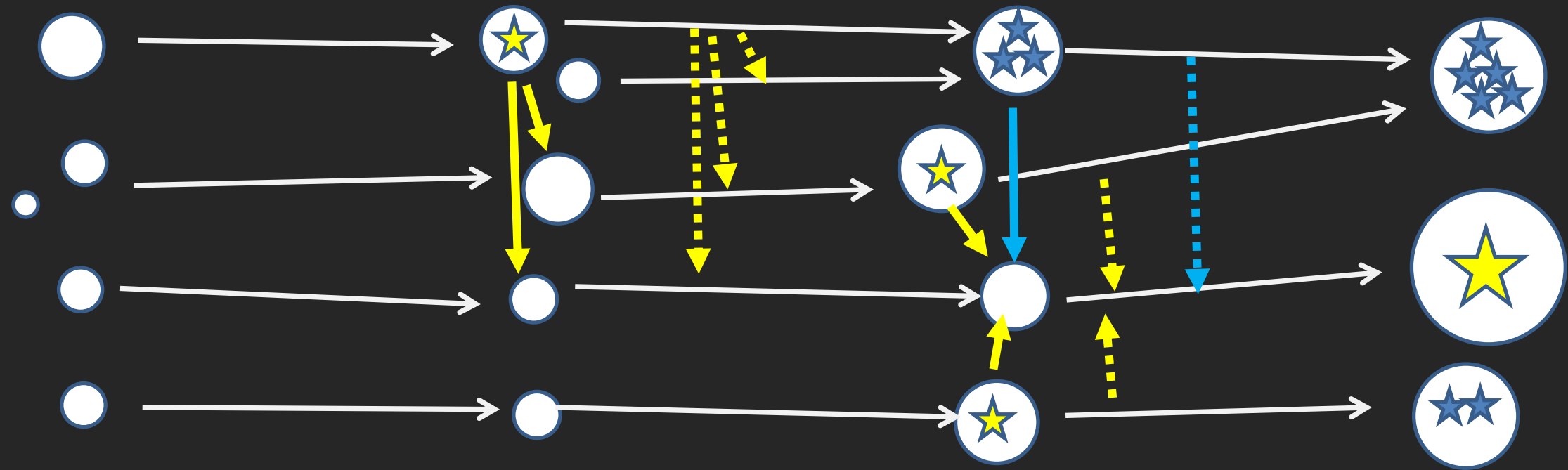
Rockstar halo/subhalo finder (Behroozi+2013)
consistent merger trees code (Behroozi+ 2013b)

- 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

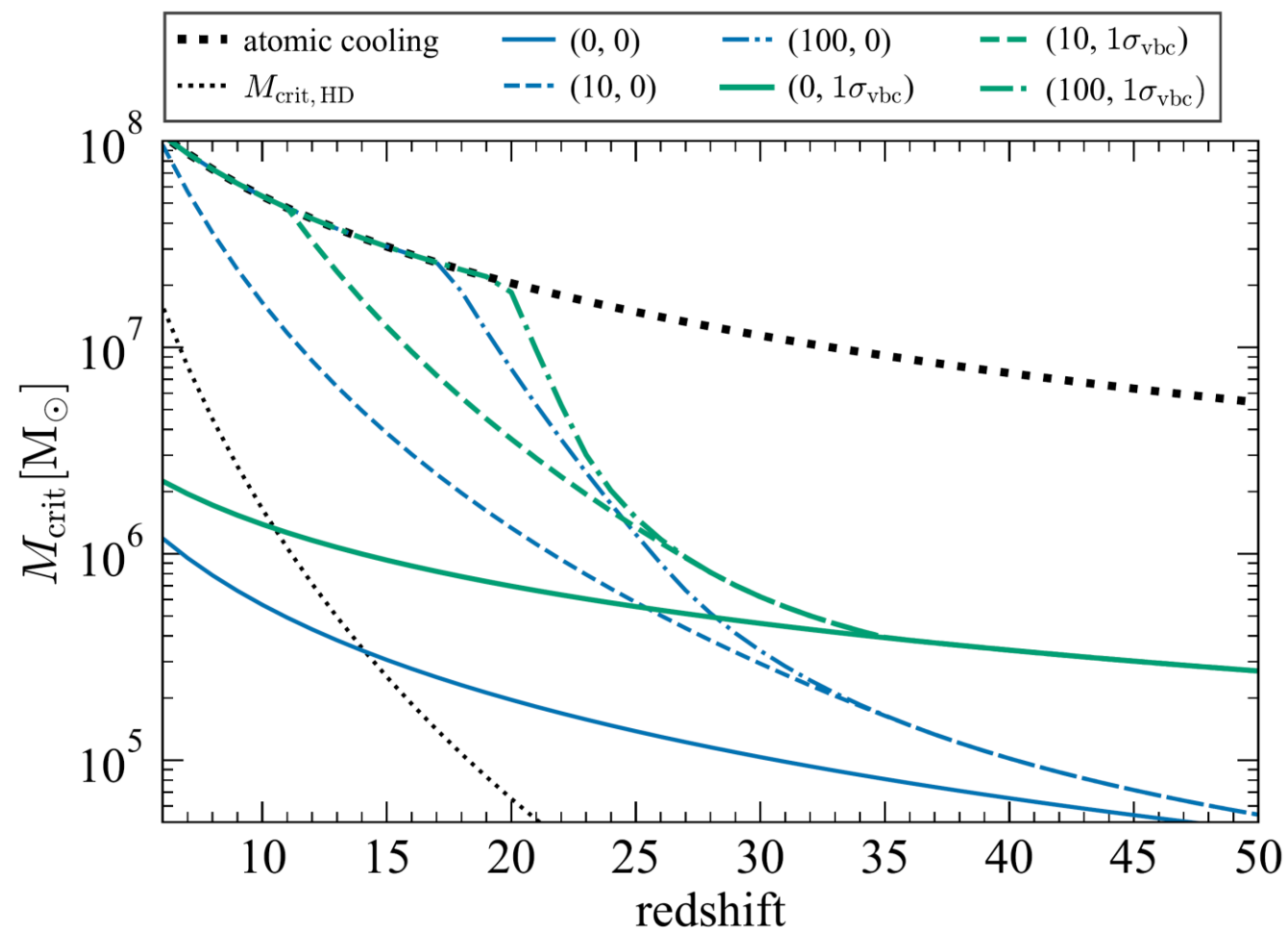


● Pristine ★ Pop III ★ Pop II → LW ⇢ LW substep

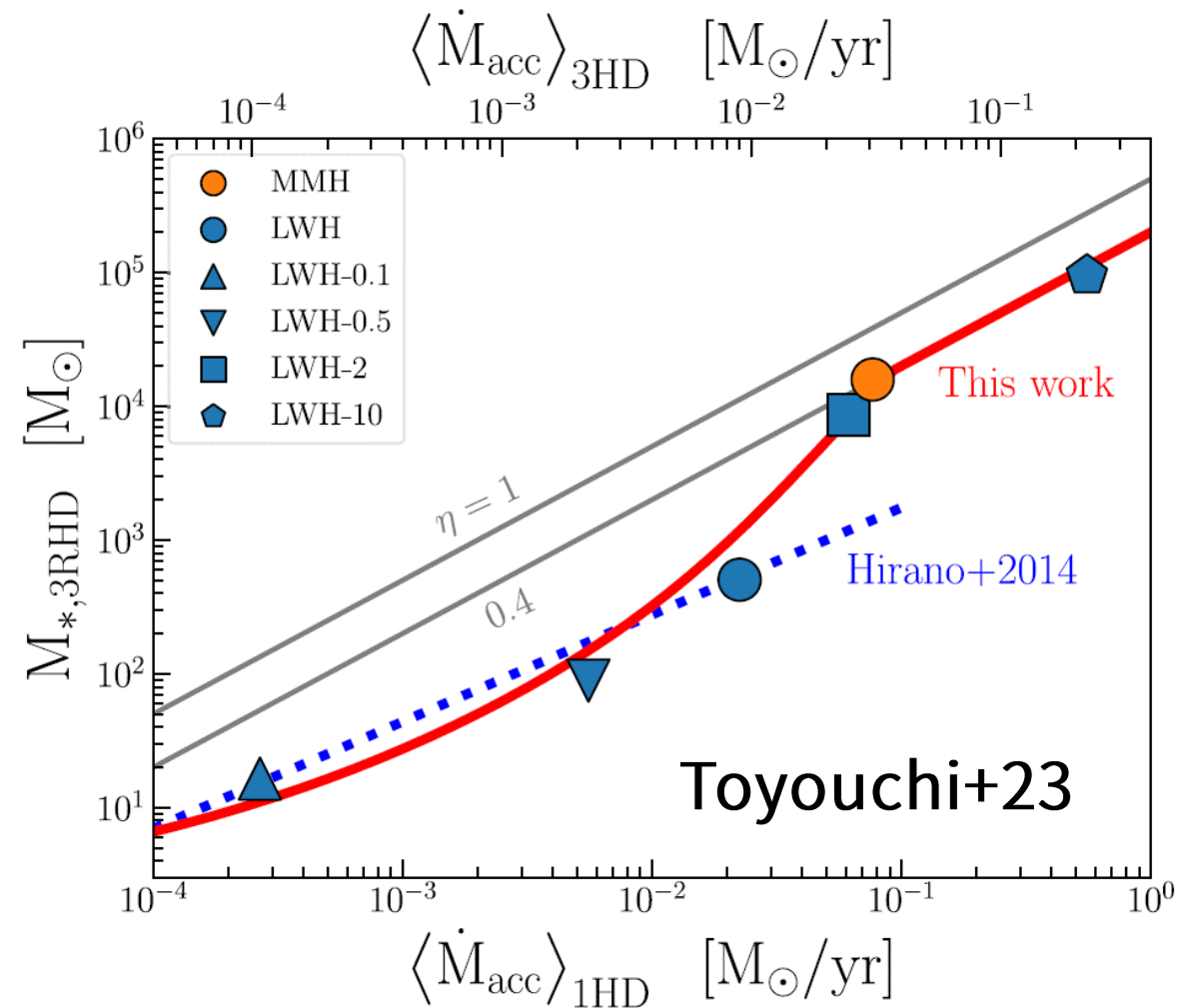
準解析的モデル

- 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 $m_{\text{th}}=10^7 \text{ Msun}$
- 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)

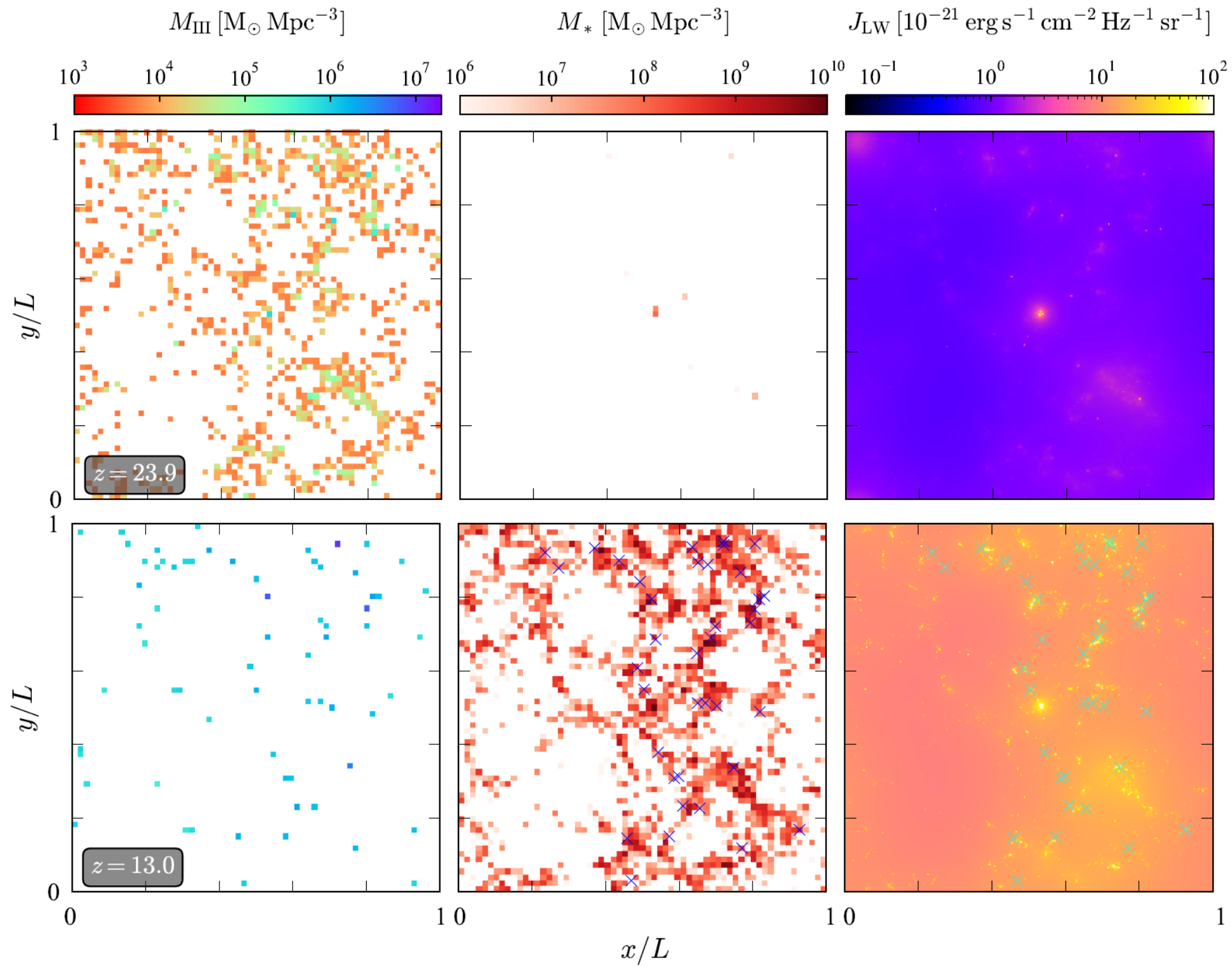
Pop III 形成条件



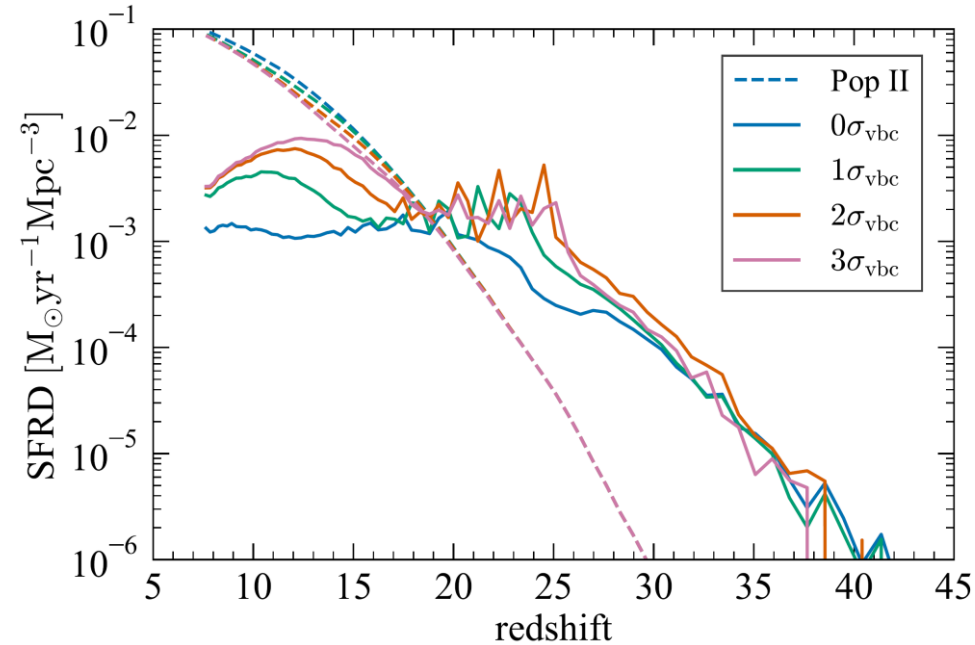
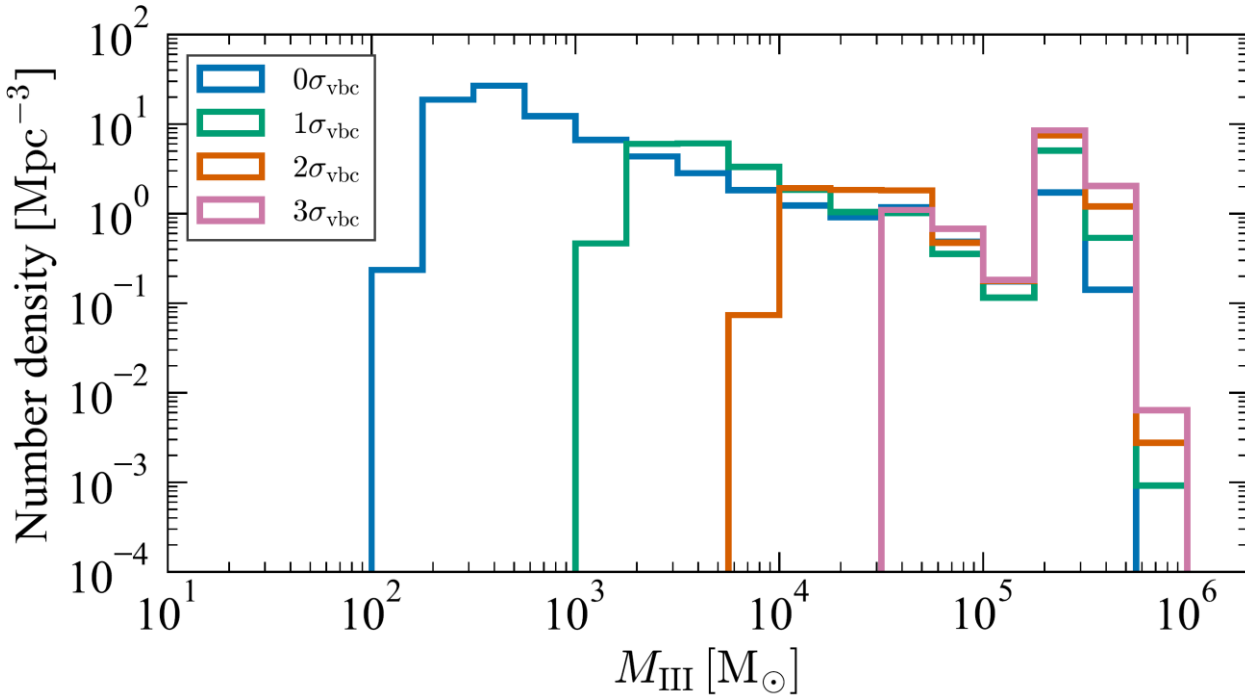
Pop III IMF



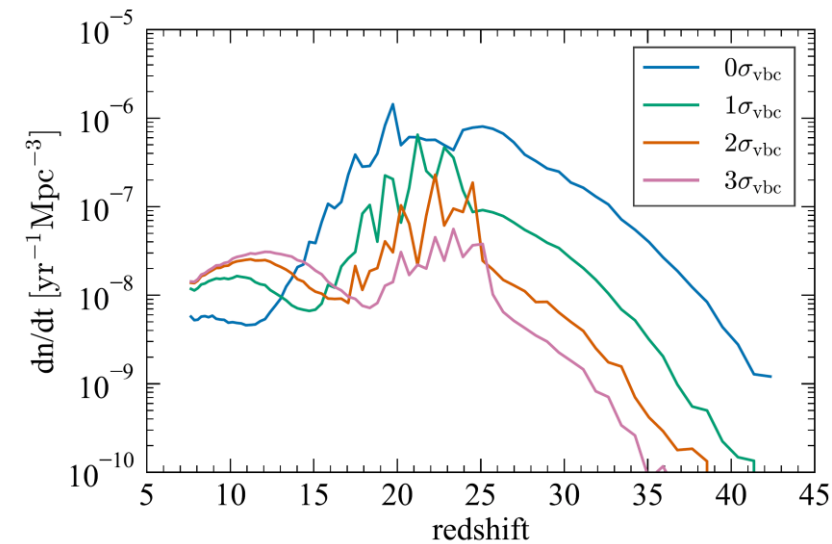
- Streaming velocity が 0, 1, 2, 3 σ ($\sigma = 30\text{km/s}$) の4モデルを比較
- ボックス内でハローがはじめて形成する $z=43$ から、ボックス全体の merger tree が作れる $z=7.5$ まで計算



Pop III IMF, star formation rate density

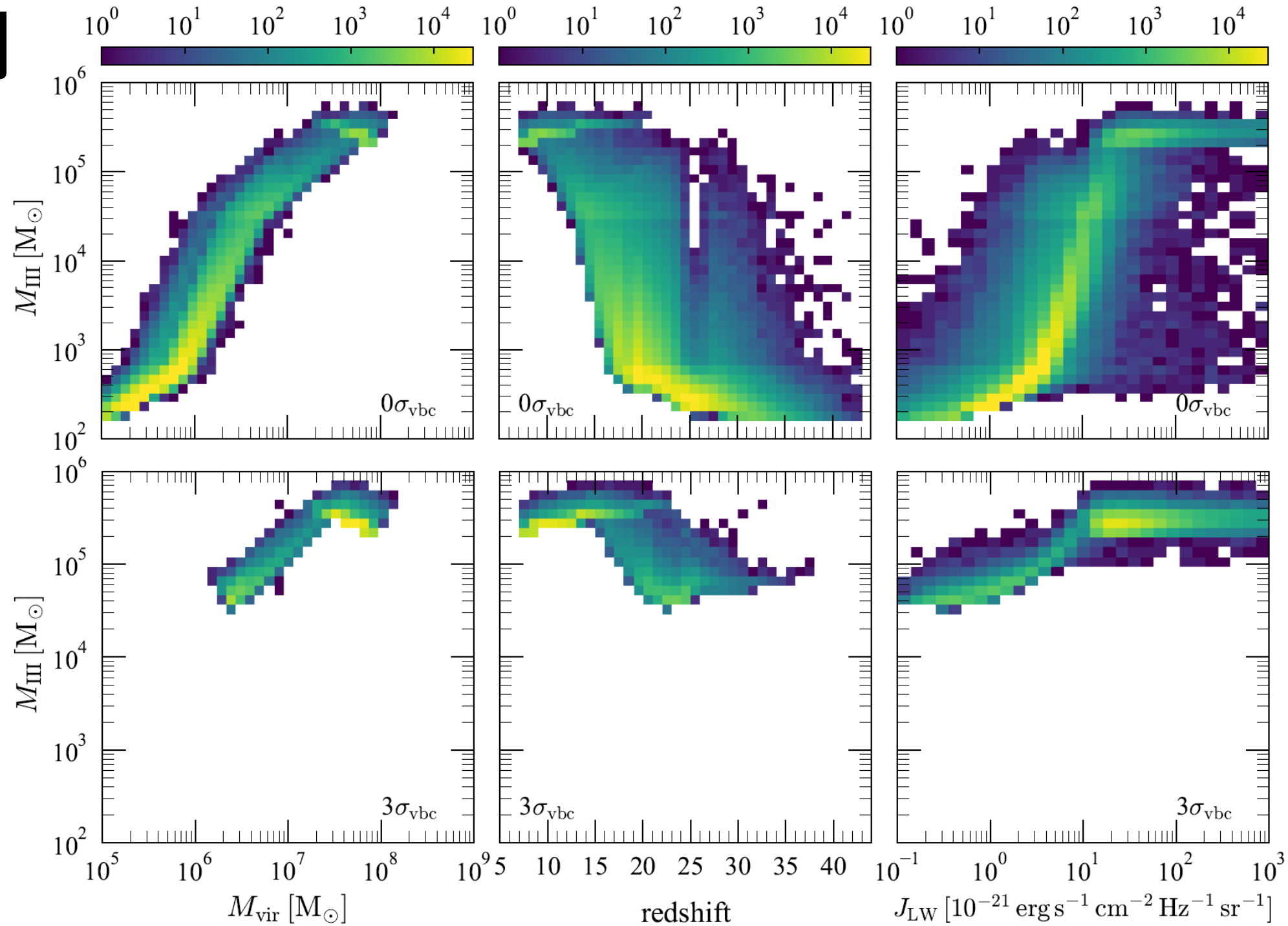


- (左: IMF) 分裂はモデル化されていないため、IMF というよりハローあたりの総Pop III 質量の分布
- (右: SFRD) Pop II は streaming velocity の大きさにほとんど依存しない
- Pop III は velocity が大きいと多少 SFRD は上がる。一方、数自体は少ない
- SFRD は second peak (atomic cooling) の違いが顕著



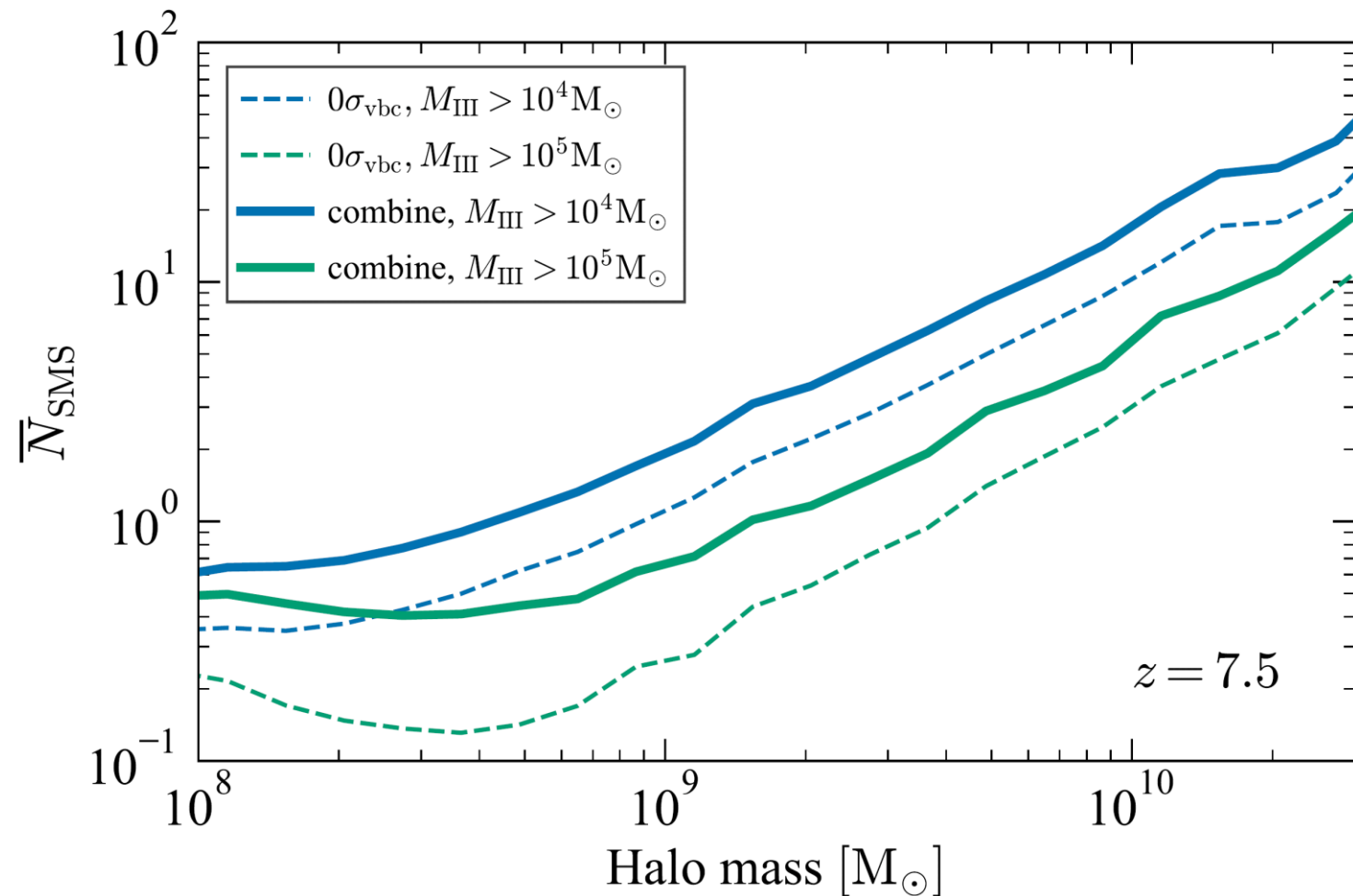
いろいろな相関

- streaming velocity:
上が0、下が 3σ
- 2つのピーク: H_2
cooling と atomic
cooling に対応
- Velocity が大きいと
Pop III 形成が遅れる
ため、second peak
がより顕著に



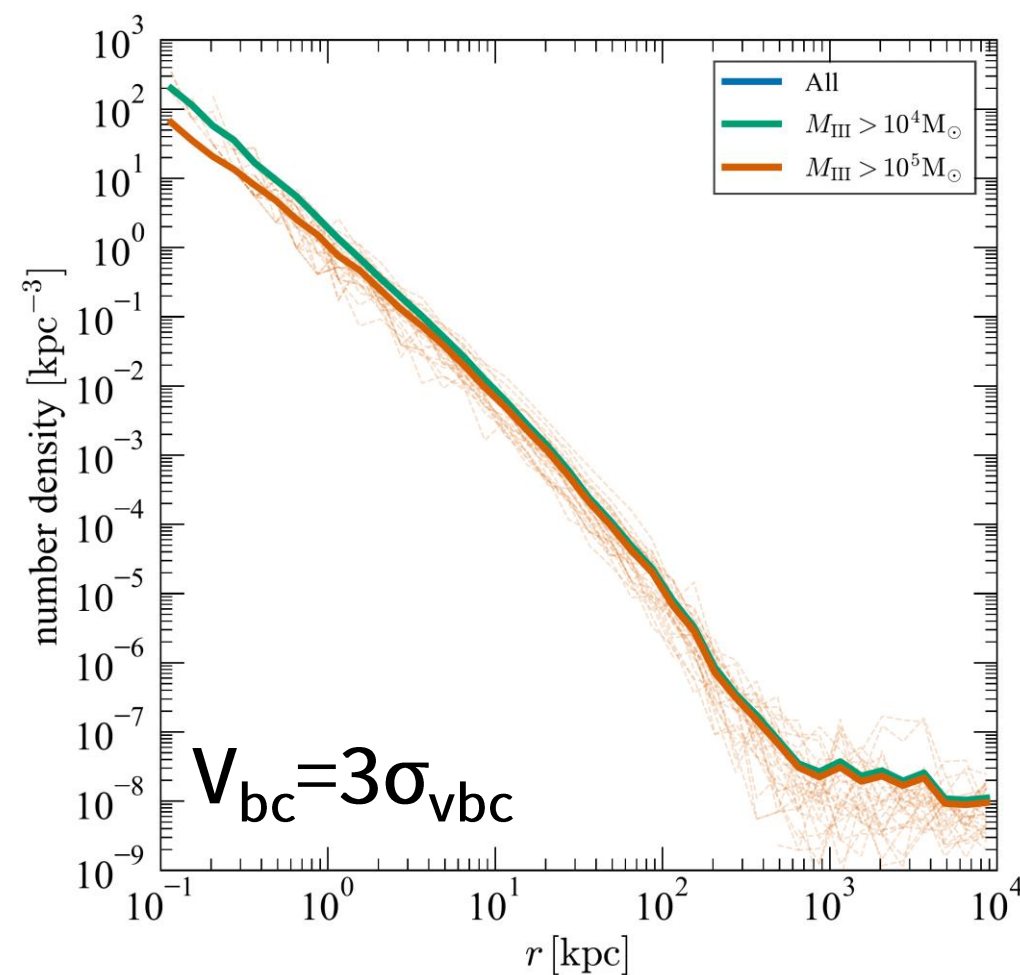
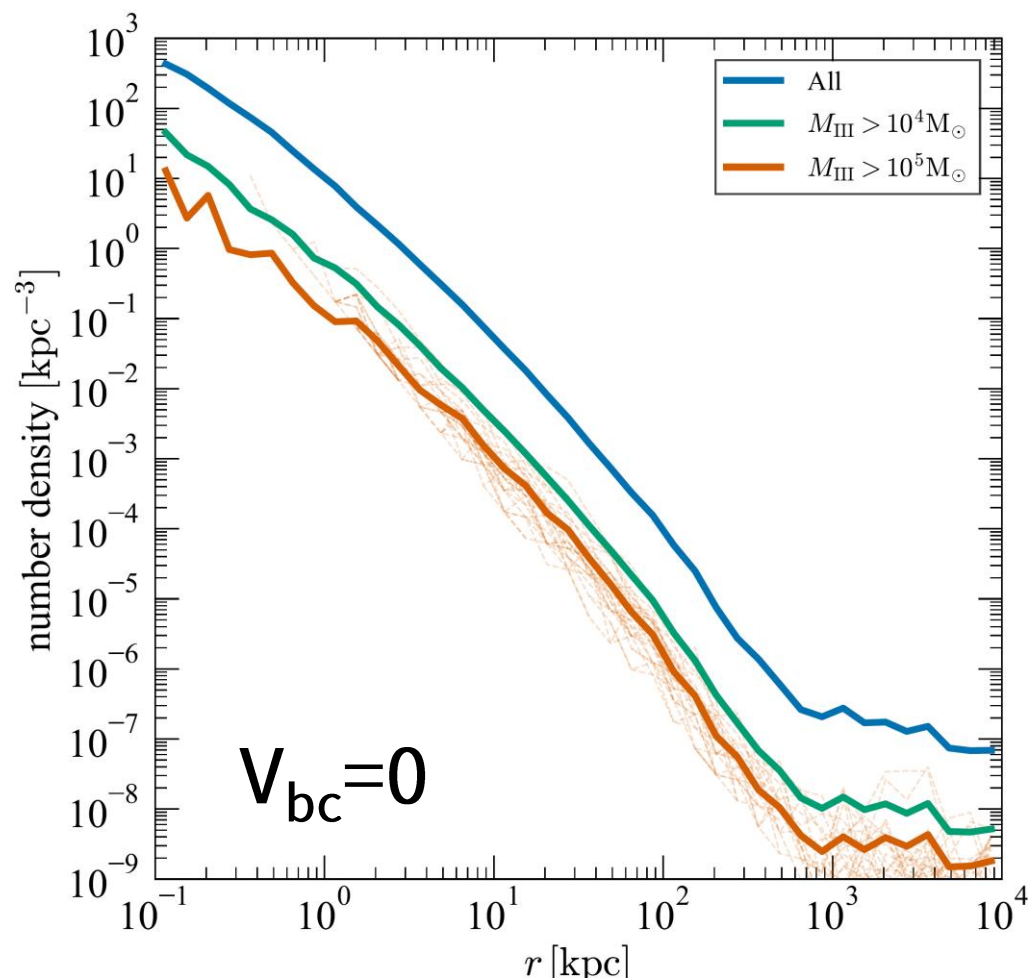
High- z のSMBH形成への示唆

- (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

Number density profile of Pop III at $z=0$ in MW halos



- 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(の子孫)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
- Caveats (future work)
 - External chemical enrichment
 - Photo-ionizing
 - X-rays