

# 宇宙論的シミュレーションにおける ミニハローの多様性と 初代星フィードバックの関係

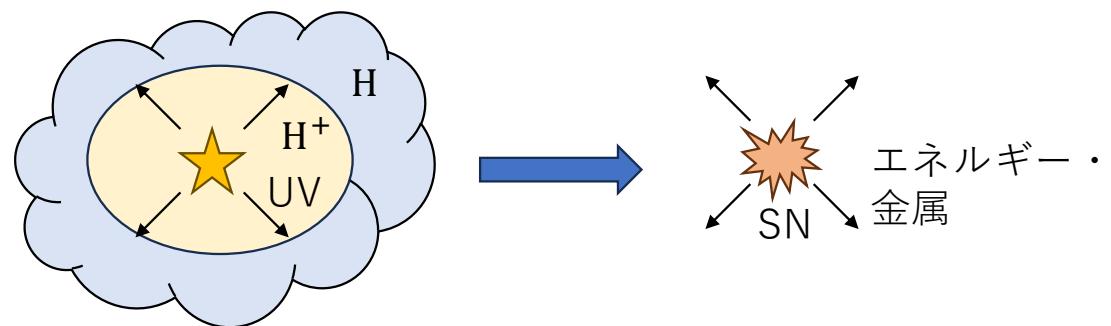
北海道大学理学院 宇宙物理学専攻 修士2年

松田 凌

# Introduction

## - 初代星研究の重要性 -

- 初代星による影響 (フィードバック)
  - UV光子の放射
  - 超新星爆発によるエネルギー・金属供給  
⇒ 宇宙の熱的・化学的な性質が変化
- 初代星による周囲へのフィードバックは、初代銀河やその後の宇宙の進化に大きな影響を及ぼしたはず  
⇒ 初代星フィードバックの効果を理解することは重要

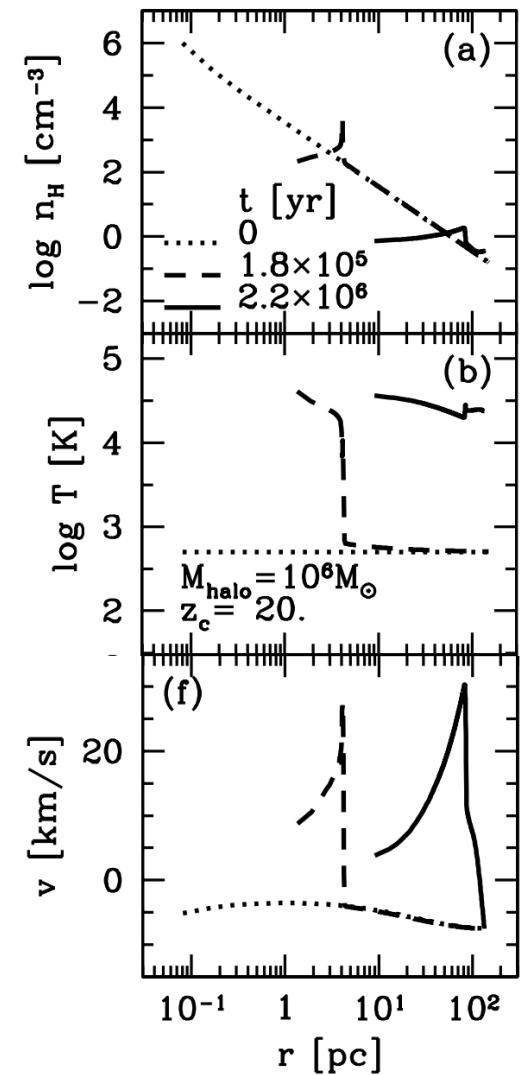
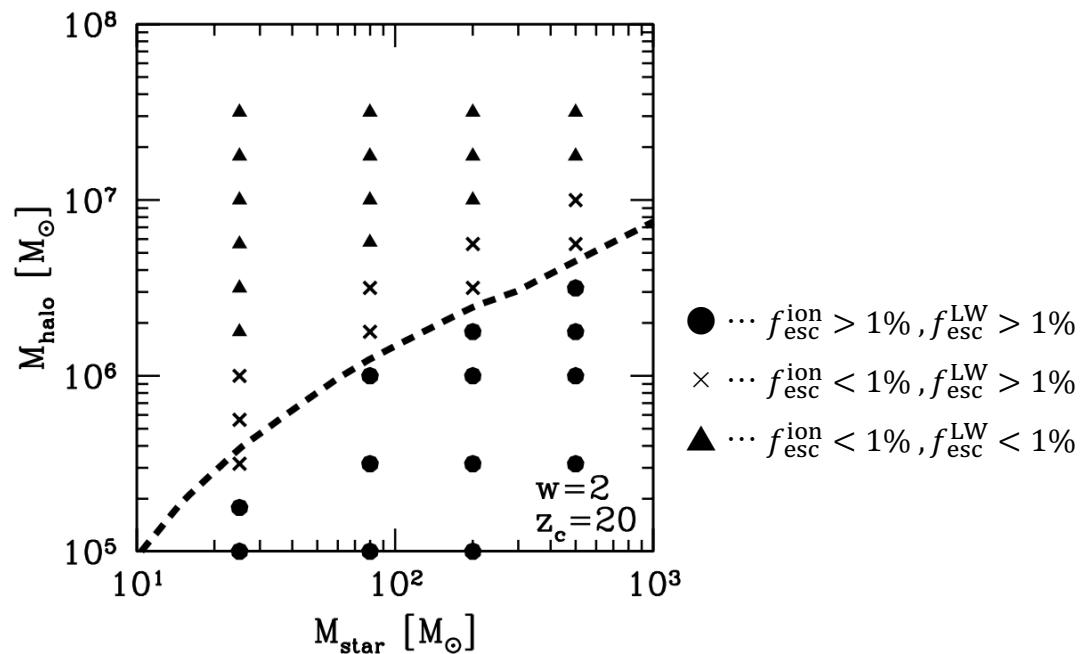


# Introduction

## - 初代星フィードバックの先行研究1 -

- Kitayama et al. (2004)

- 球対称1次元計算
- 初代星の質量とハローの質量を複数設定して計算
- 電離バブルの進化に着目

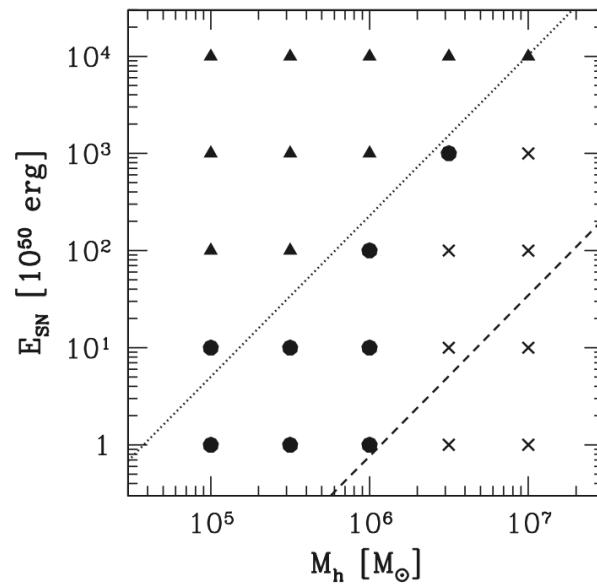


# Introduction

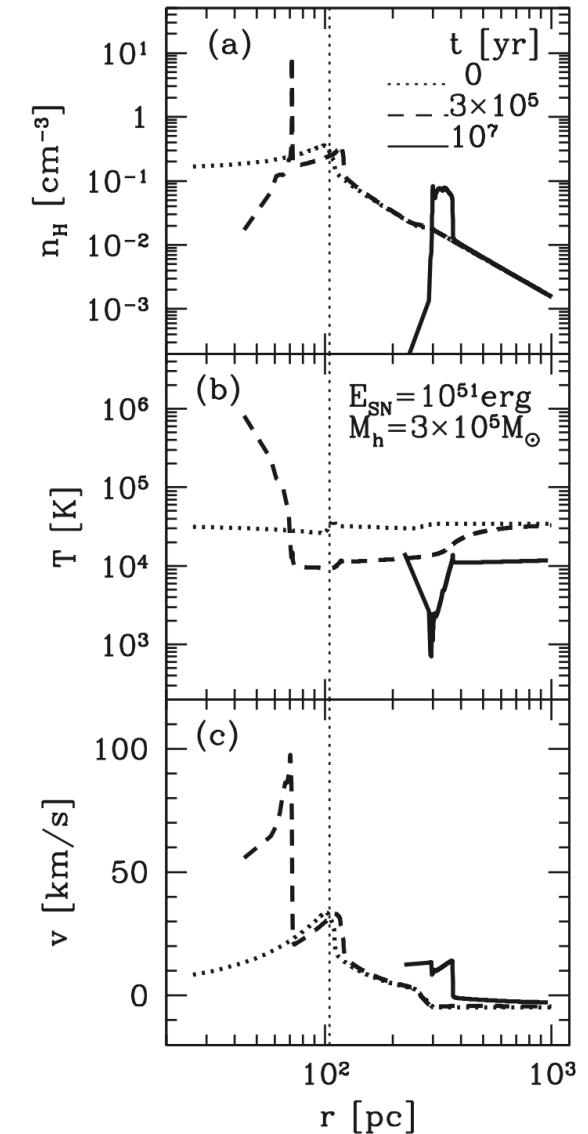
## - 初代星フィードバックの先行研究2 -

- Kitayama & Yoshida (2005)

- 球対称1次元計算
- 超新星爆発エネルギーとハローの質量を複数設定して計算
- 超新星バブルの進化に着目
- 3次元シミュレーションではない



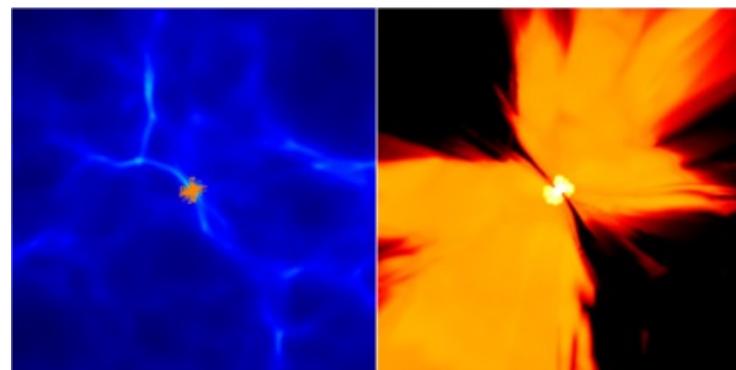
- ▲ … 電離バブルが広がっていなくても超新星バブルが広がる
- … 電離バブルが広がっているときのみ超新星バブルが広がる
- × … 超新星バブルが広がらない



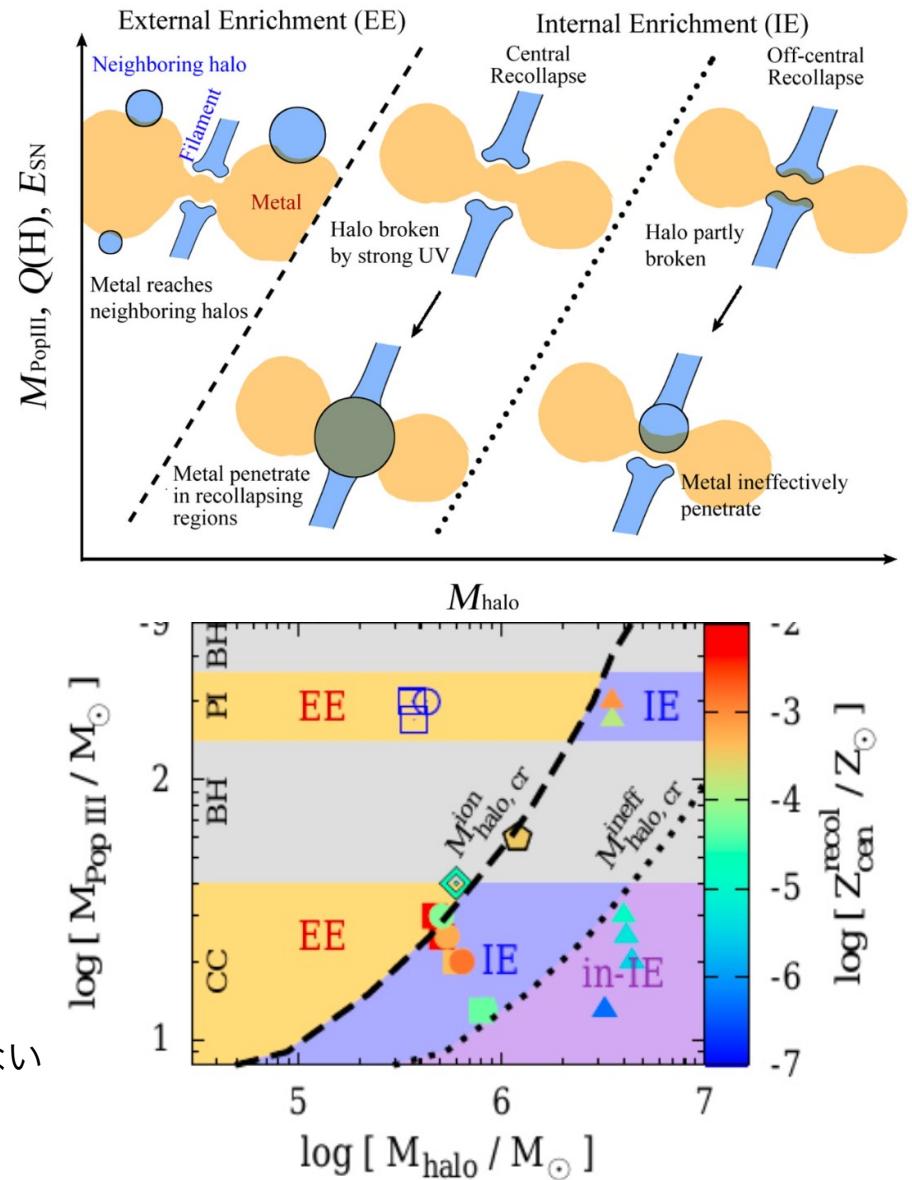
# Introduction

## - 初代星フィードバックの先行研究3 -

- Chiaki et al. (2018)
  - 3次元宇宙論的シミュレーション
  - 次の星形成時の金属度に着目



- 3つのハローでしか調べられていない
- フィードバックがどこまで広がるかについて詳しく調べられていない



# Introduction

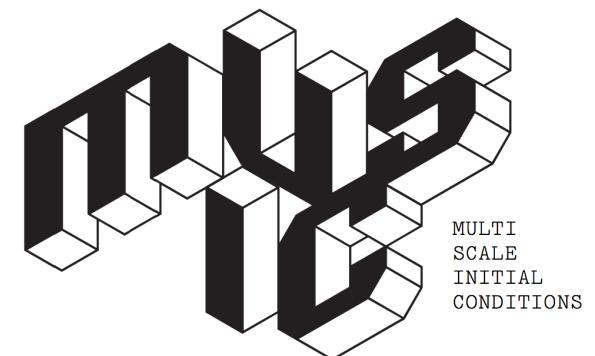
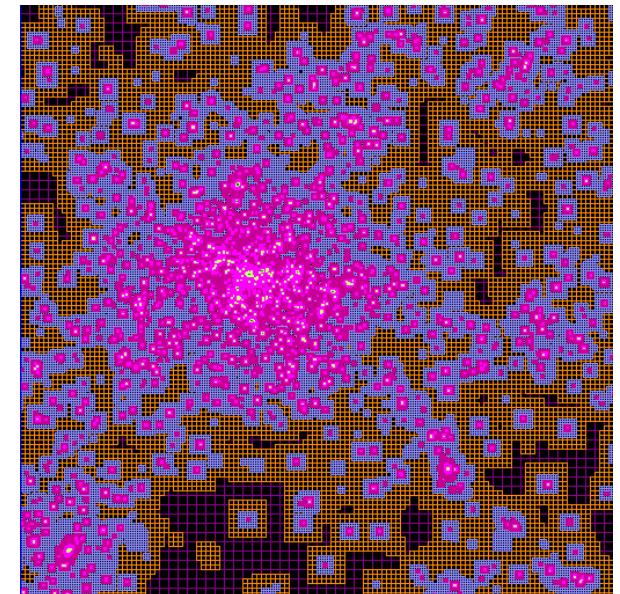
## - 本研究の目的 -

- 過去の自身の研究結果から、初代星フィードバックの広がり方は、必ずしも星質量やハロー質量の値のみから一意に決まるわけではないことが示唆された。
- 初代星が形成されるミニハローの個々の性質が、フィードバックの広がりに影響を与えていると考えている。
- 本研究では、以下のシミュレーションを行う。
  - 性質の異なる様々なミニハローを用意
  - 3次元宇宙論的シミュレーション
  - 電離バブルや超新星バブルの広がり方について調べる

# Method

## - シミュレーションコード -

- "RAMSES-RT" (Rosdahl et al. 2013)
  - 宇宙論的輻射流体コード
  - adaptive mesh refinement 法  
高い解像度が必要な場所のグリッドをより細分化して解像度を上げることができる
  - 初代銀河形成において重要な物理過程のモデルが組み込まれているバージョンを利用 (Sugimura et al. 2024)
  
- "MUSIC" (Hahn, 2011)
  - 宇宙論的初期条件生成コード
  - 宇宙の初期密度ゆらぎと整合的な初期条件から始める



# Method

## - シミュレーションの流れ -

### 1. ハローの形成

- MUSICを用いて、boxサイズ 1Mpc に DM粒子の質量  $\sim 10M_{\odot}$  の解像度で 初期条件を生成
- この初期条件からRAMSES-RT を用いて 3次元シミュレーションを行い、暗黒物質 ハローが形成

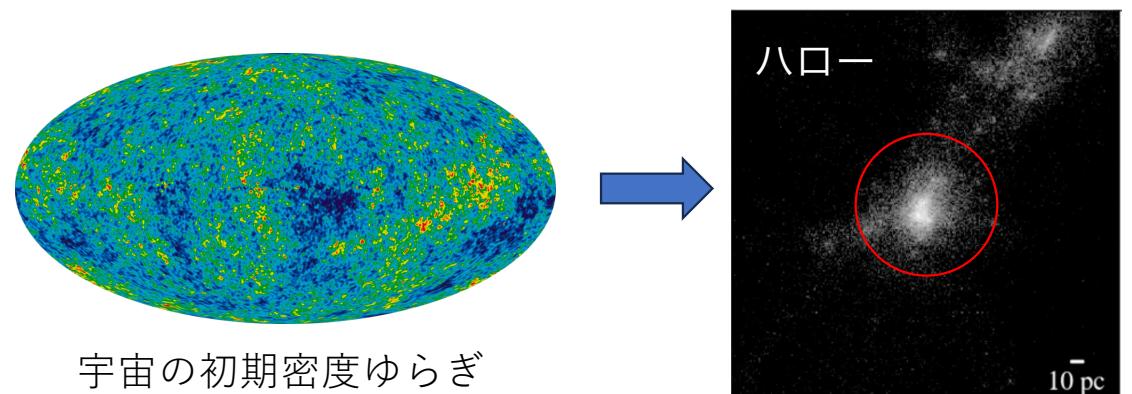
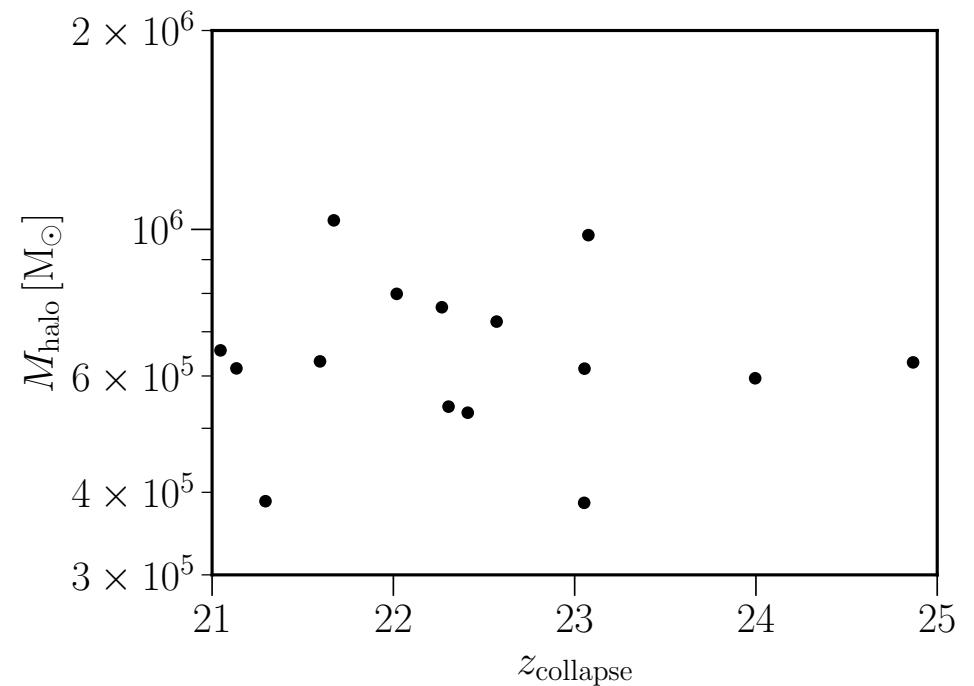


Figure 1. 各ハローの性質



# Method

## - シミュレーションの流れ -

### 2. 初代星の形成

- 最大レベルのセル密度  $n_{\text{H}}$  が  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  を超えたたら  
初代星が形成するように設定
- ハローの中に初代星が誕生し、初代星周りの  
電離バブルや超新星バブルが膨張する  
過程を計算
- 初代星の質量はパラメータとして与える
- 初代星の光子の放出率や超新星爆発エネルギー  
は初代星の質量に従って設定 (Shaefer 2002)

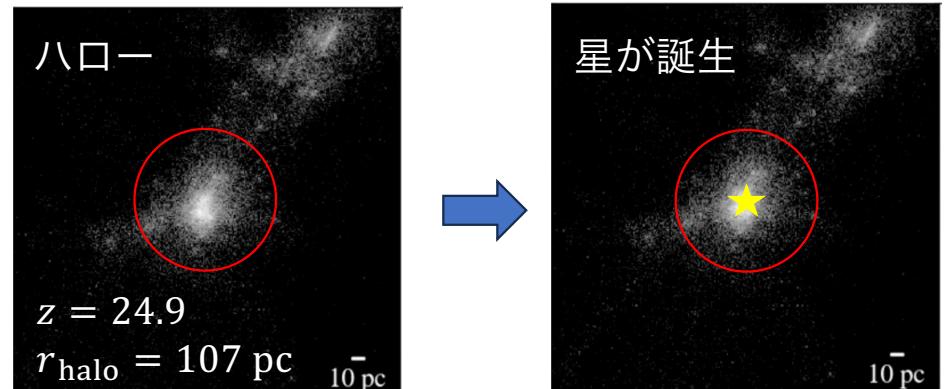


Table 1. 各初代星の性質

$M_{\text{star}} [M_{\odot}]$	$t_{\text{life}} [\text{Myr}]$	$\dot{N}_{\text{ion}} [\text{s}^{-1}]$	$E_{\text{SN}} [\text{erg}]$
11	16.9	$3.7 \times 10^{48}$	$1.0 \times 10^{51}$
20	8.5	$4.4 \times 10^{48}$	$1.0 \times 10^{51}$
40	3.8	$2.9 \times 10^{49}$	$3.0 \times 10^{52}$
200	2.6	$2.3 \times 10^{50}$	$4.9 \times 10^{52}$

# Results

## - 2D ムービー -

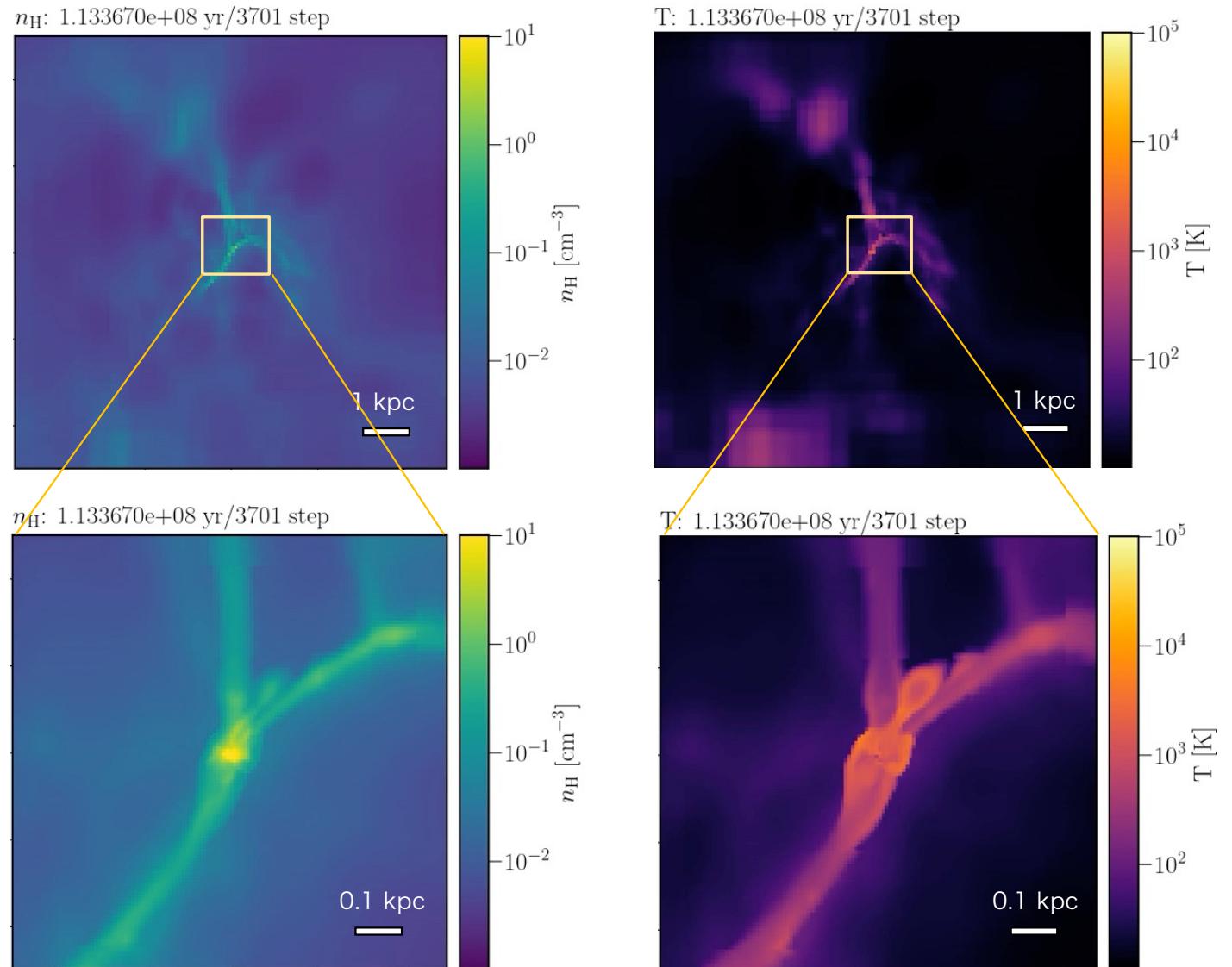
halo1の初代星質量 $40 M_{\odot}$ の  
シミュレーションにおける  
 $n_{\text{H}}$  と  $T$

電離バブル

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

超新星バブル

$$T \gtrsim 10^5 [\text{K}]$$



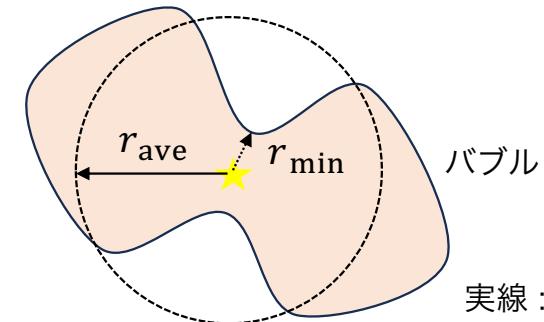
# Results

## - 電離バブルの進化 -

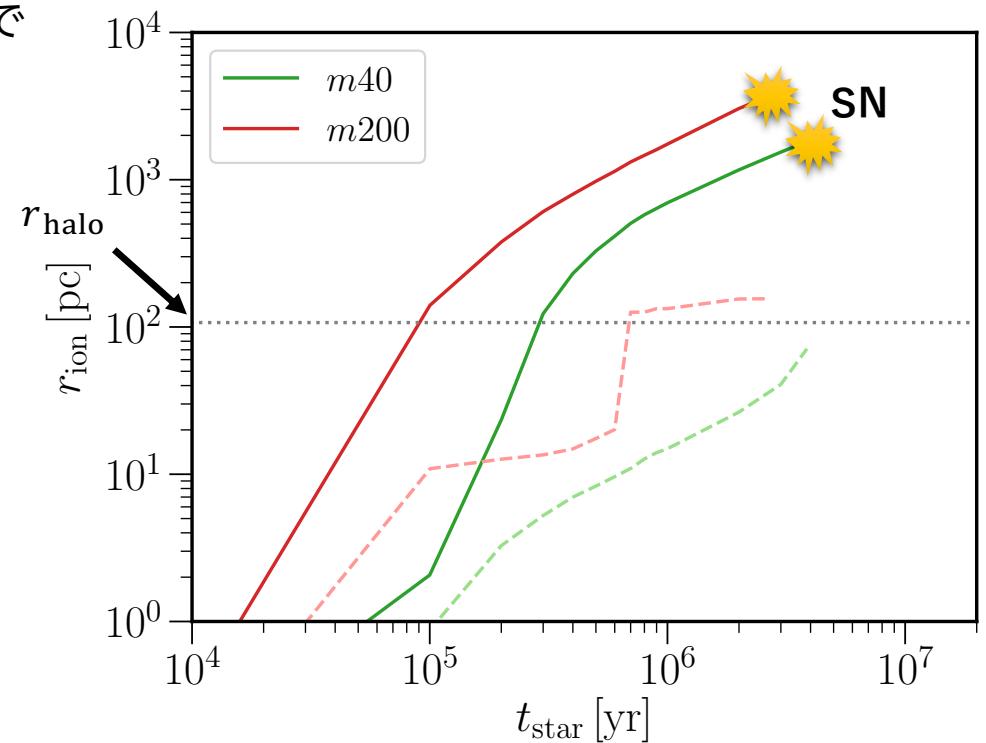
- 電離バブルの平均半径・最小半径がハローのビリアル半径を超えるか超えないかで

- 電離バブルが全ての方向でビリアル半径を超えて広がりきったか
- 電離バブルがビリアル半径を超えて広がりきらない方向があったか

を判断



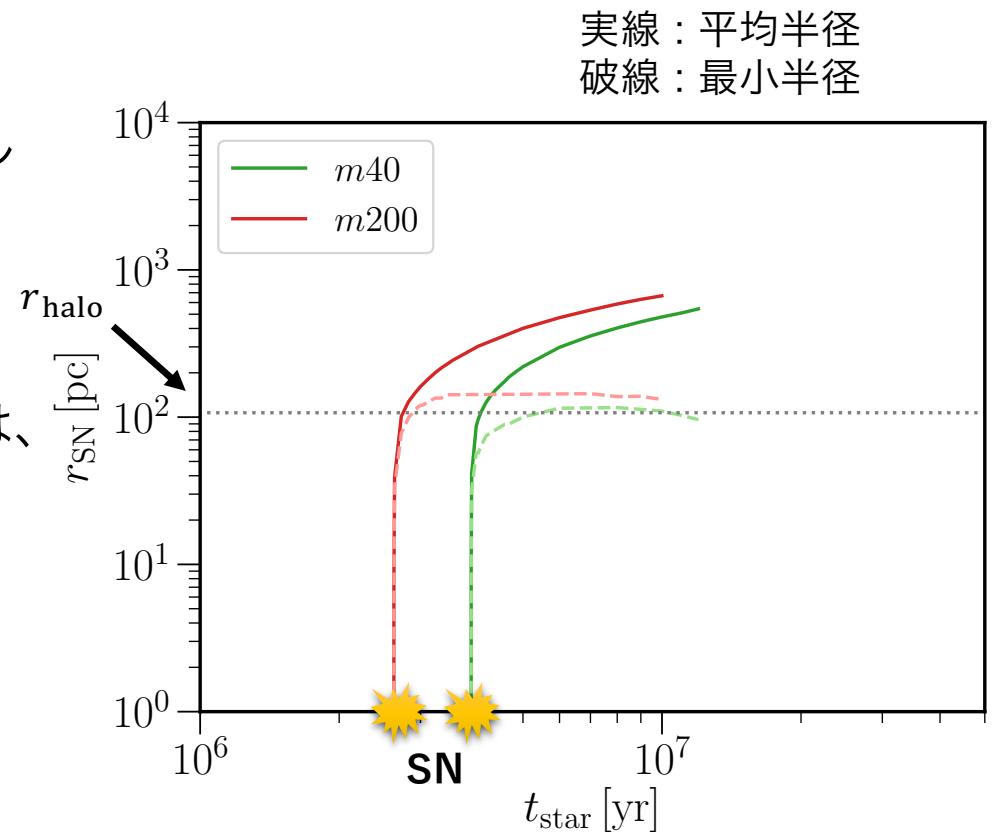
実線：平均半径  
破線：最小半径



# Results

## - 超新星バブルの進化 -

- 超新星バブルも同様に、ハローのビリアル半径を超えて広がりきるかを判断
- 電離バブルが十分に広がらなかったものは、超新星バブルも十分に広がらない傾向にあった  
⇒ 電離フィードバックのかかり方が、超新星バブルのフィードバックに影響を与えている



# Results

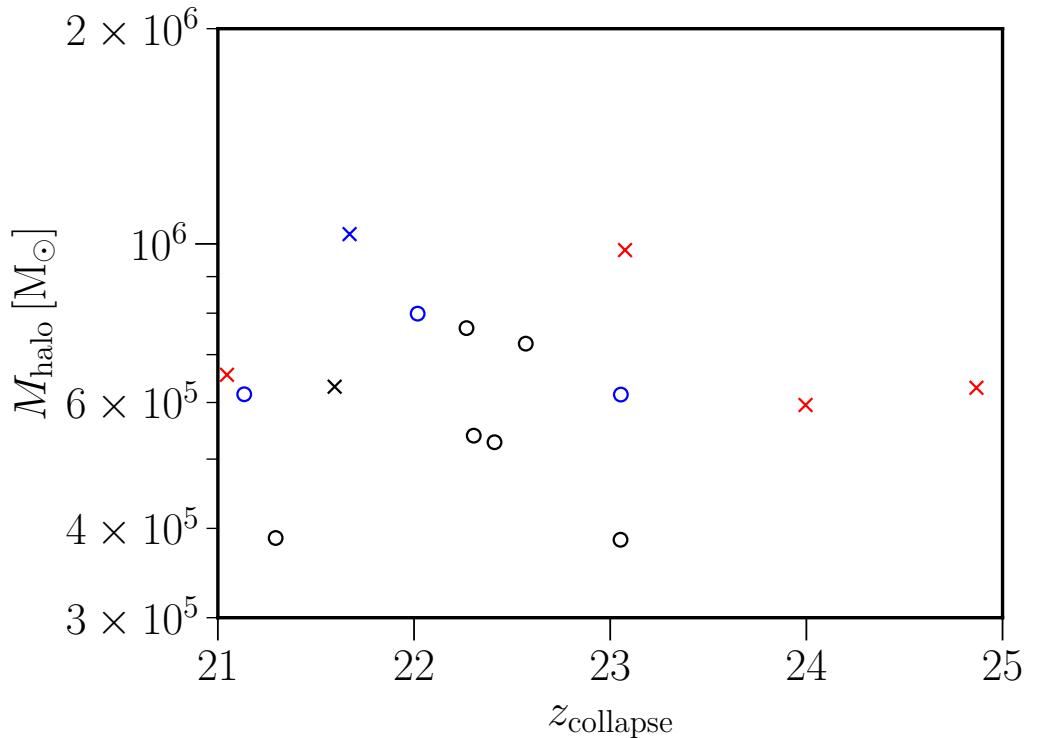
## - 電離バブルの広がり方のハロー依存性 -

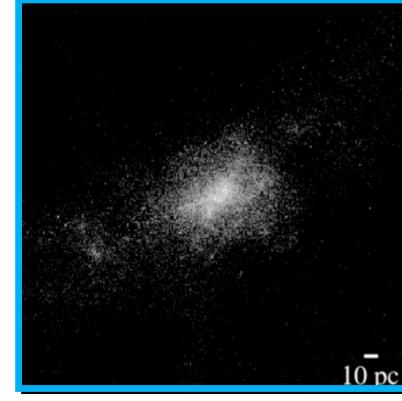
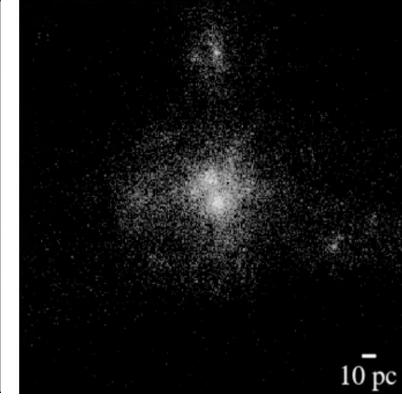
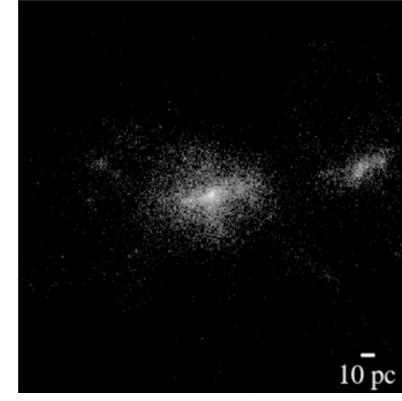
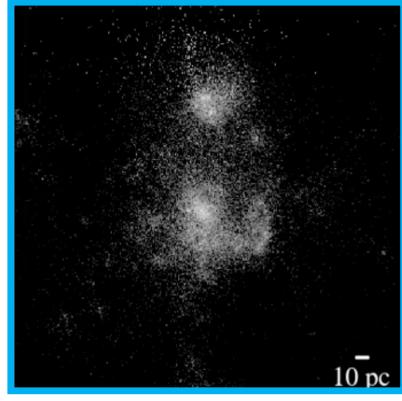
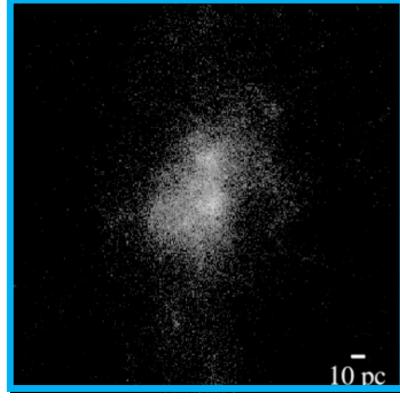
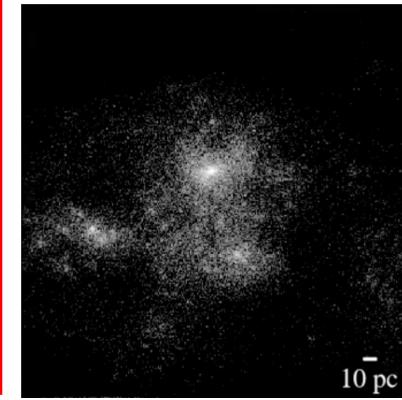
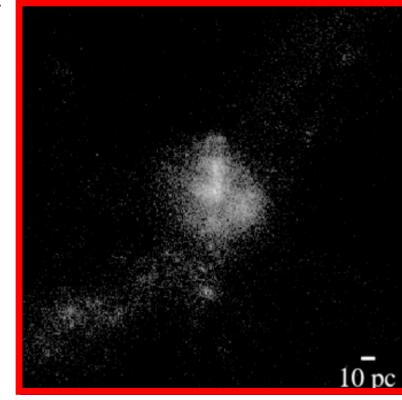
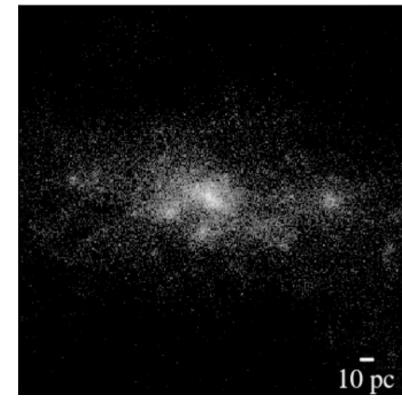
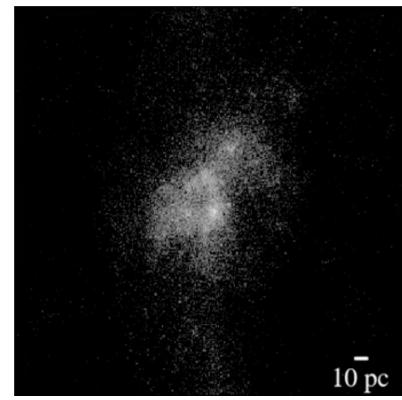
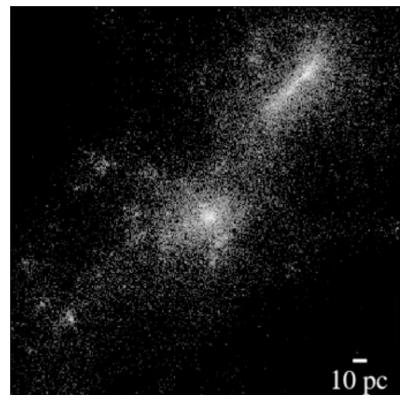
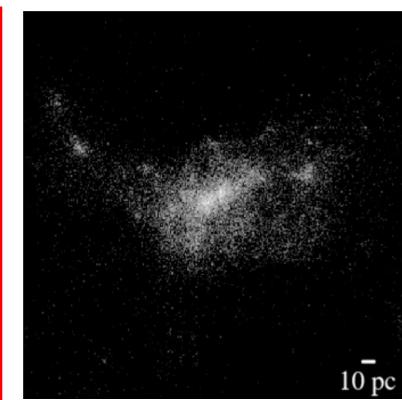
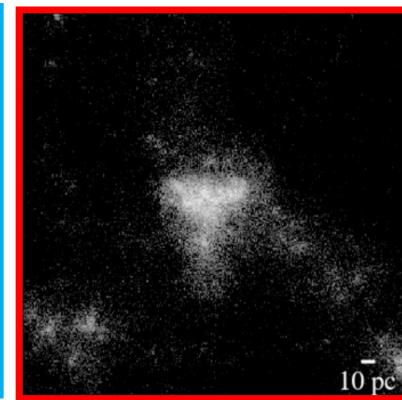
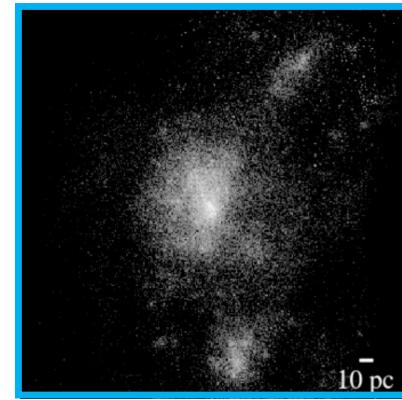
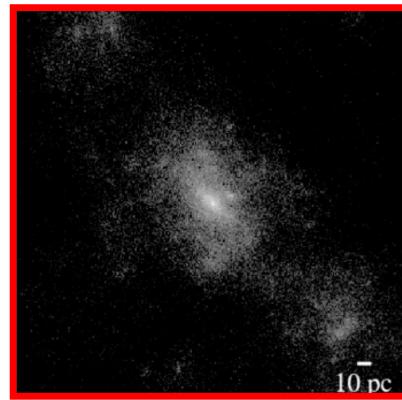
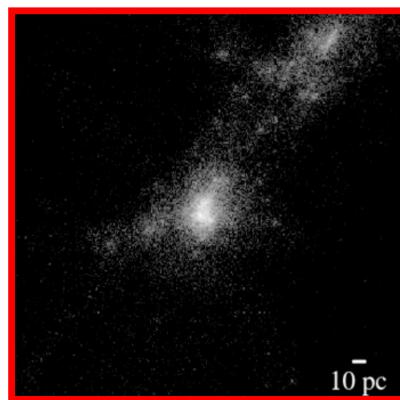
- 全体として、ハローの質量が大きく、崩壊の時期が早いほど、電離バブルが広がらなくなる傾向が見える

⇒ Kitayama et al. (2004) の  
1次元計算と一致する傾向

- 今回の結果では、電離バブルが広がるハローと  
広がらないハローが混在して表れている
- ハローごとの個性が、フィードバックの  
広がり方に影響しているためと考えられる

- … 電離バブルが全ての方向で  $r_{\text{halo}}$  まで広がった
- × … 電離バブルが  $r_{\text{halo}}$  まで広がりきらない方向があった

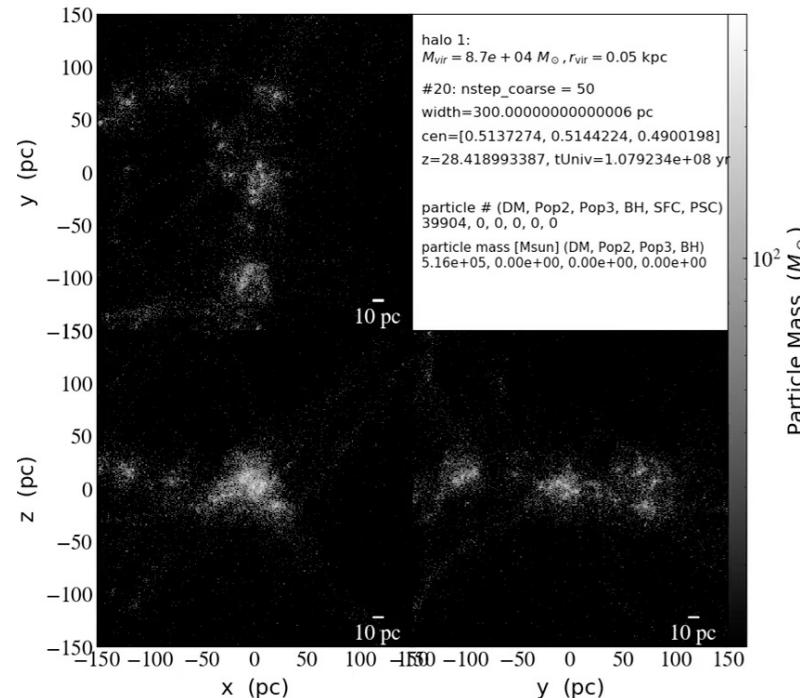




# Discussion

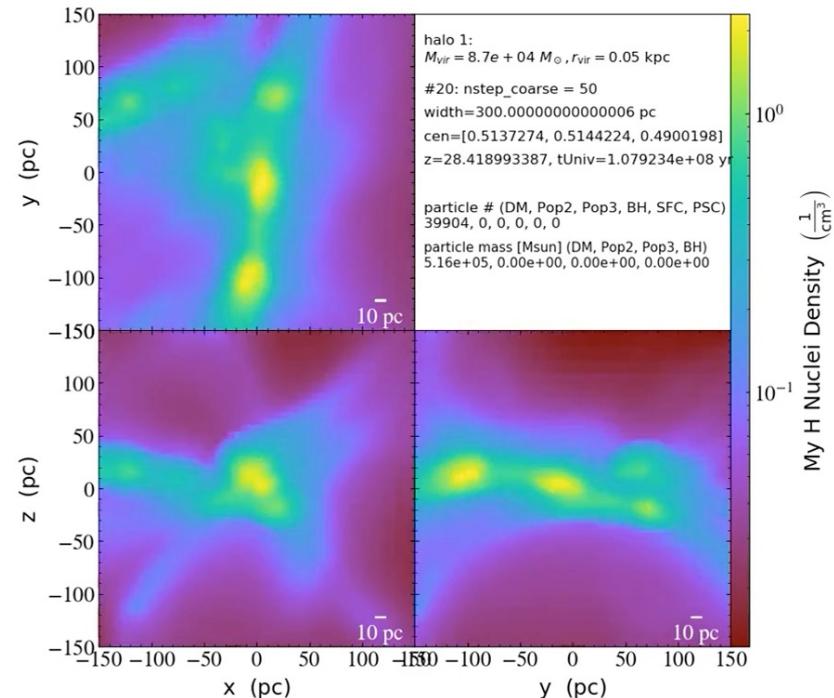
## - ハローの個性が影響している例 -

- DM衝突中に星形成し、電離バブルが広がる間に密度の高い点が～20pc付近に存在



× … 電離バブルが  $r_{\text{halo}}$  まで広がりきらない方向があった

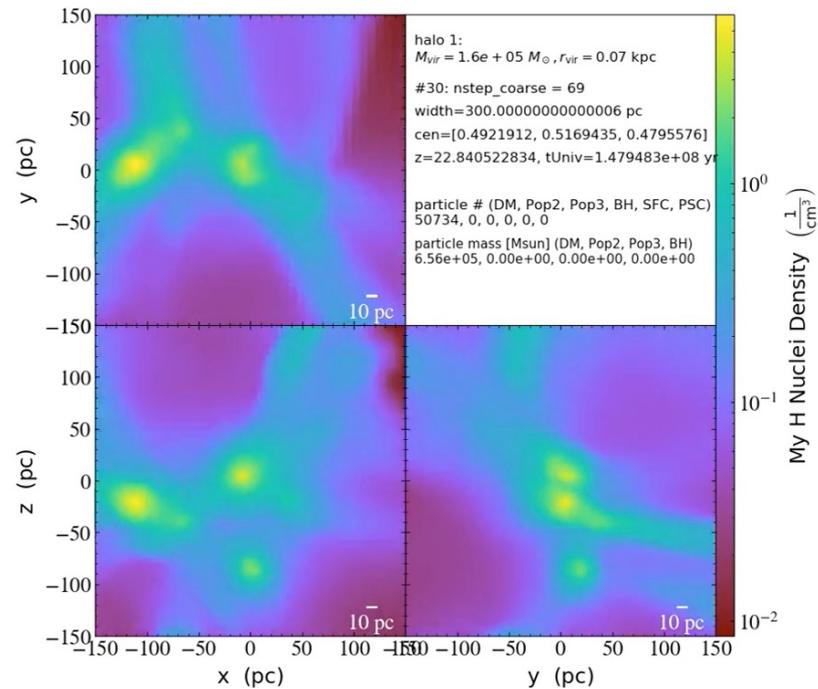
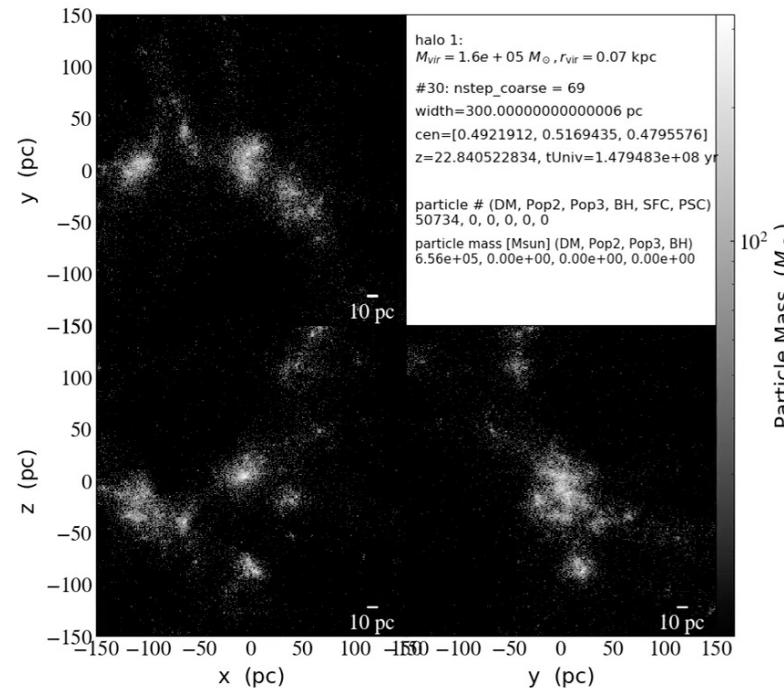
- フィードバックによる圧縮の結果、近傍の高密度領域で新たな Pop III 星形成が起きている。



# Discussion

## - ハローの個性が影響している例 -

- DM衝突中に星形成し、電離バブルが広がる間に密度の高い点が~10pc付近に存在
- フィードバックによって、星形成の起こりそうだったガス雲が消失



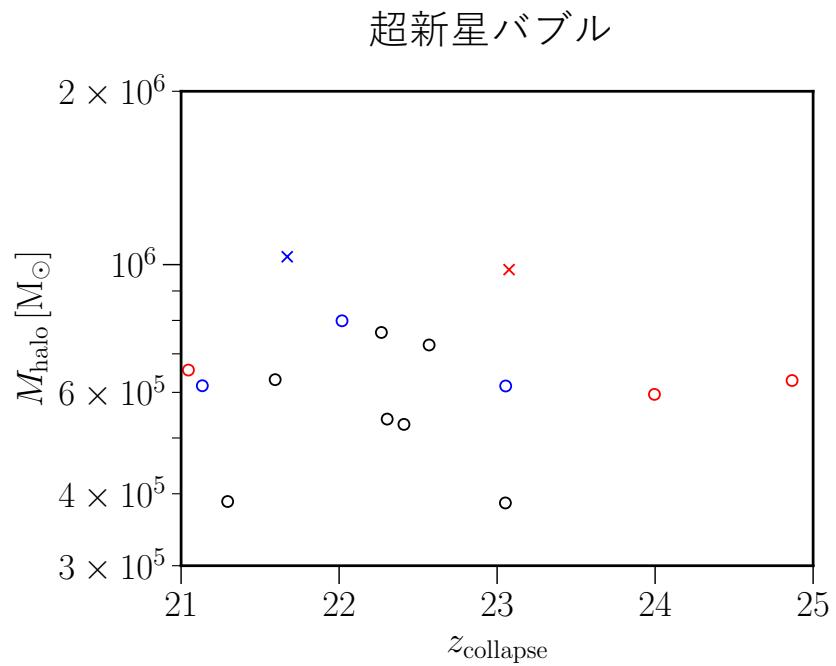
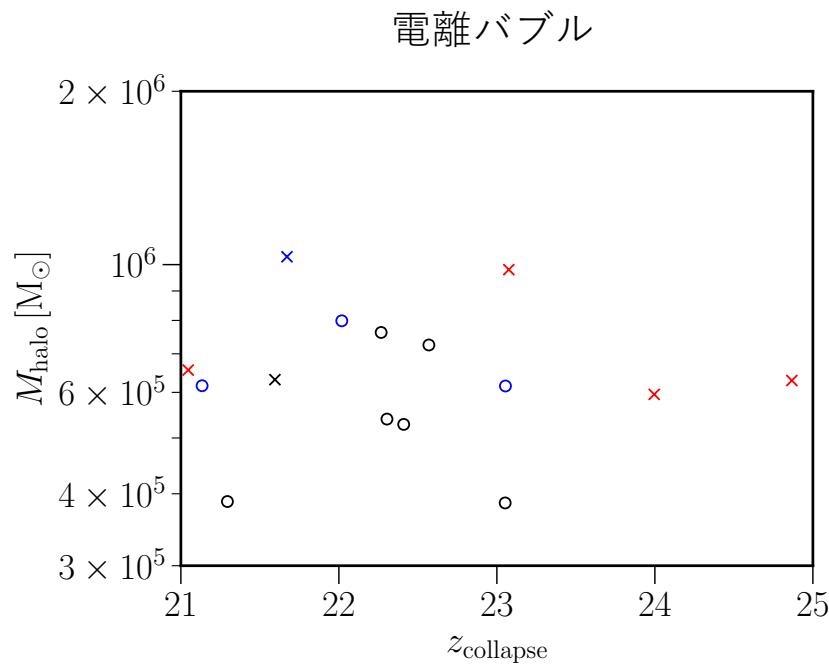
× … 電離バブルが  $r_{\text{halo}}$  まで広がりきらない方向があった

# Discussion

## - 超新星バブルの広がり方のハロー依存性 -

- 電離バブルではビリアル半径まで広がりきらなかったハローでも、質量が比較的小さい場合には、超新星バブルがビリアル半径を超えて拡大した。
- 電離フィードバックで“あと少し届かなかった”領域も、超新星フィードバックによって最終的に吹き飛ばされることが確認された。

○ … バブルが全ての方向で  $r_{\text{halo}}$  まで広がった  
× … バブルが  $r_{\text{halo}}$  まで広がりきらない方向があった



# Conclusion

- 性質の異なる様々なミニハローのもとで、初代星の電離バブルと超新星バブルの広がり方を調べる宇宙論的シミュレーションを行った。
- 全体的にハローの質量が大きく、崩壊の時期が早いほど、電離バブルが広がらなくなる傾向があることが分かり、この傾向は先行研究の1次元計算とも一致した。
- ミニハローの個性がフィードバックの効き方に大きく影響し、電離／超新星バブルの広がり方にはらつきを生じさせていることが分かった。
- 今度は、解析するミニハローの種類を増やして（100 個）、ハローの個性による初代星フィードバックへの影響の、より体系的な傾向を明らかにしたいと考えている。
- また、初代星の質量によってフィードバックの強度が変化するため、初代星の質量を変えた際のフィードバックの変わり方についても調べていく。