

宇宙論的シミュレーションにおける 初代星フィードバックの 初代星質量およびハロー質量依存性

北海道大学理学院宇宙理学専攻 修士1年

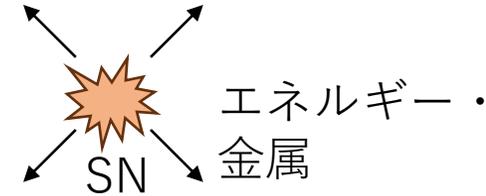
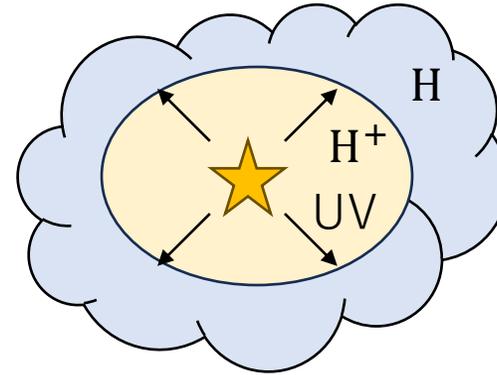
松田 凌

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や金属供給
- ⇒ 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

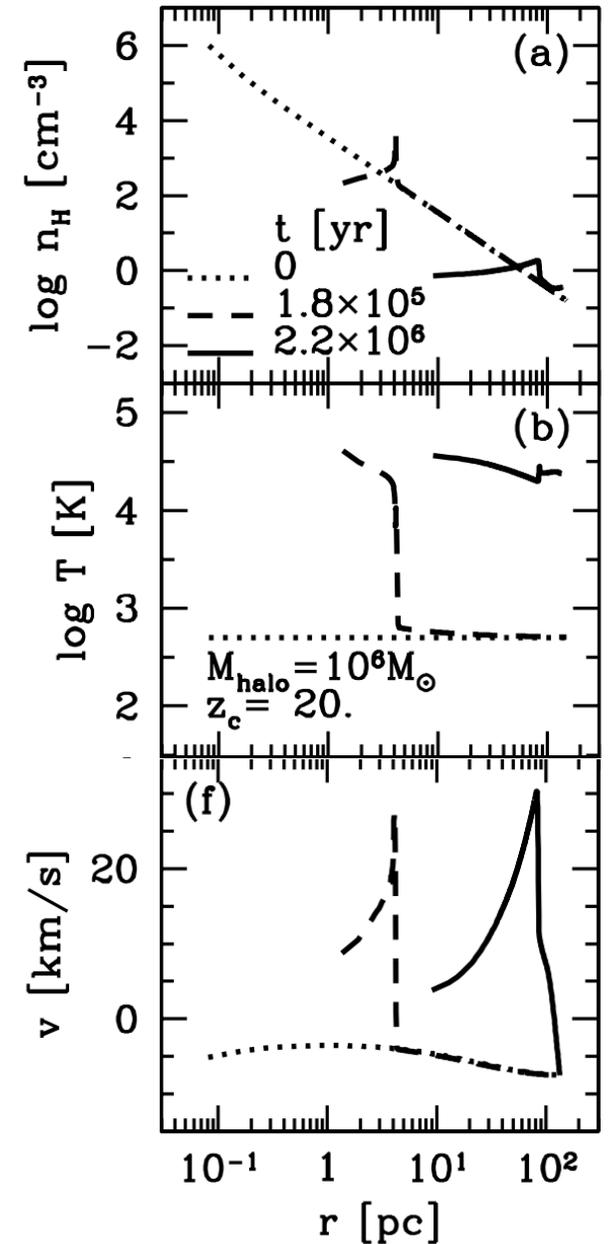
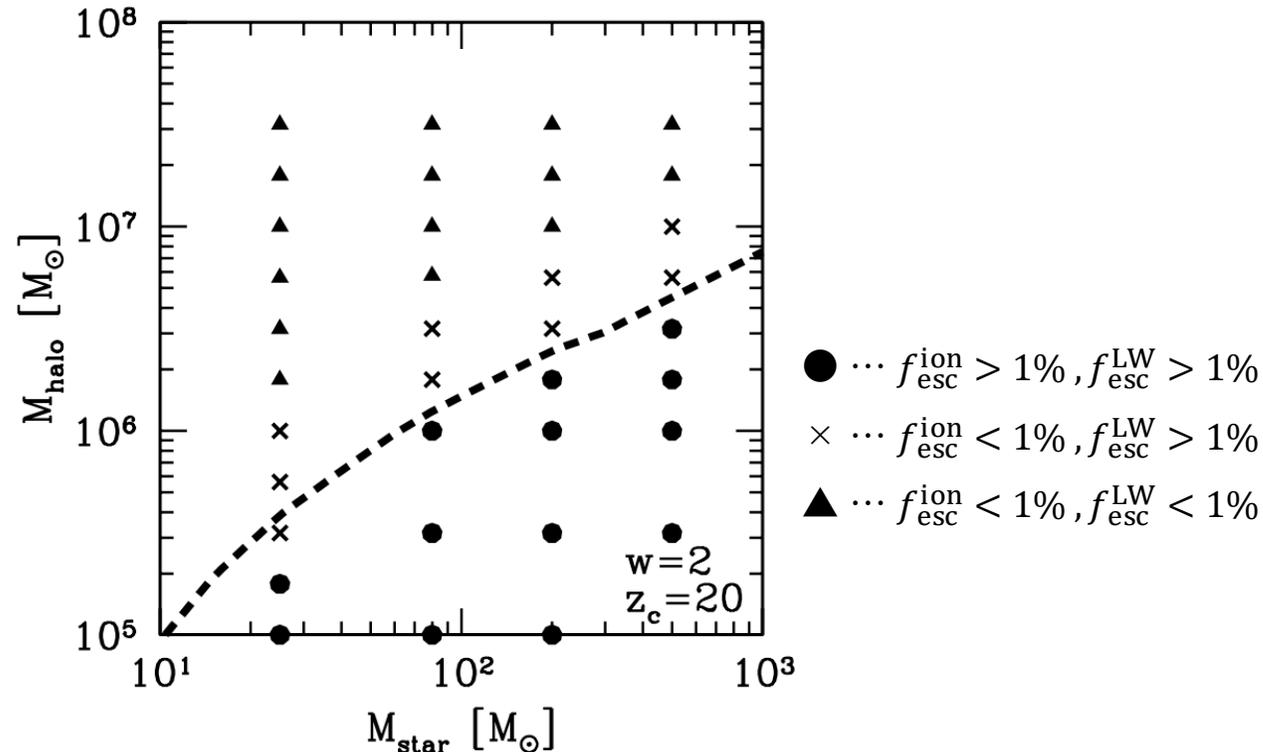
⇒ 初代星フィードバックの効果を理解することは重要

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

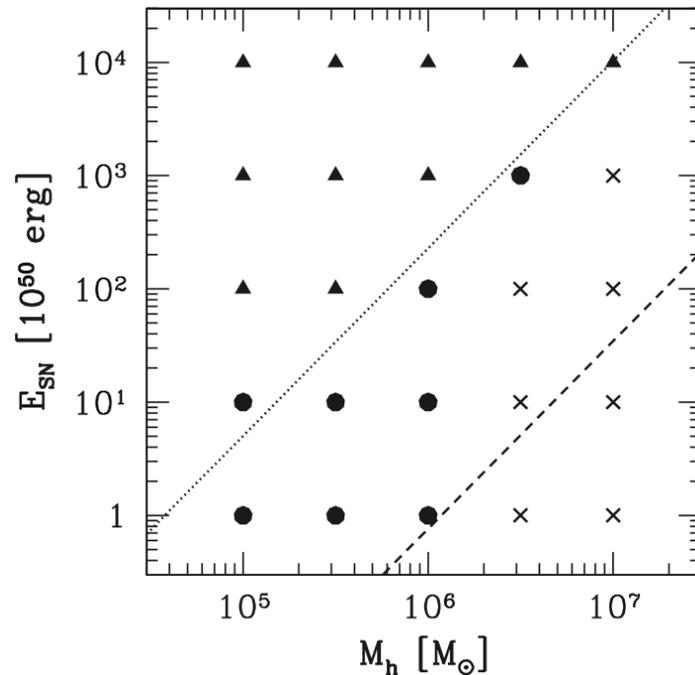


Introduction

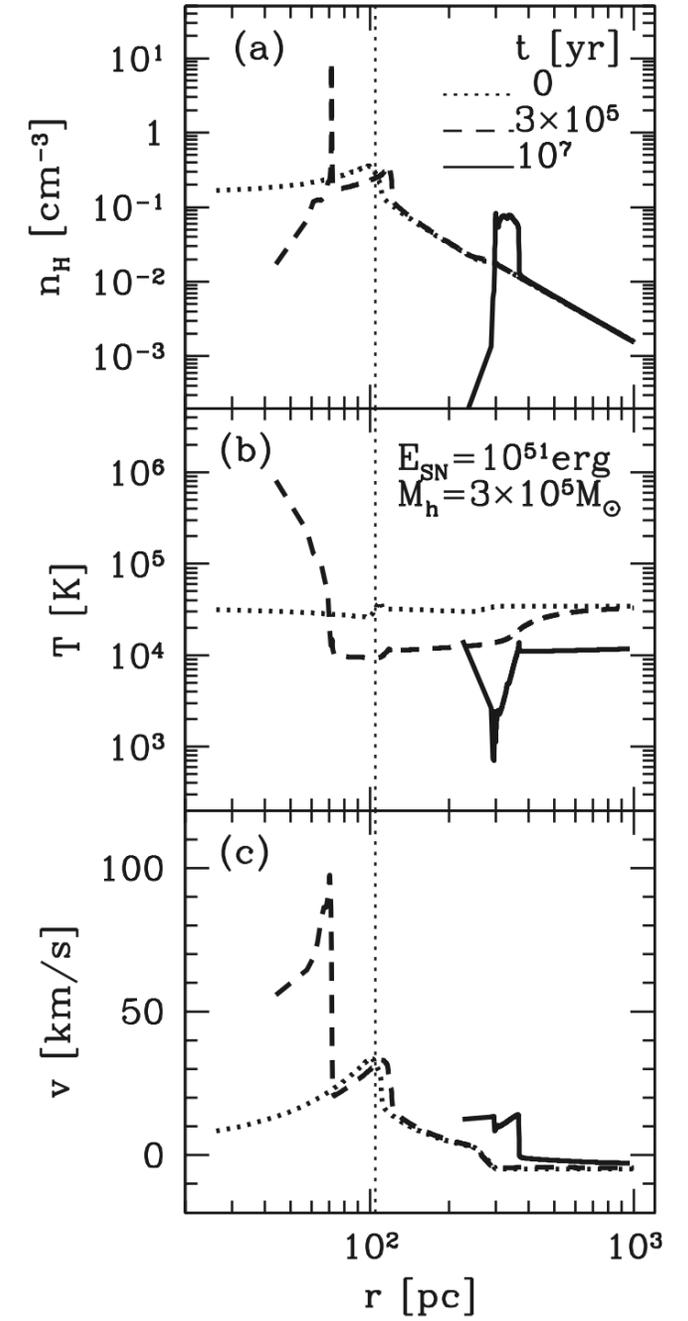
- 初代星フィードバックの先行研究2 -

- 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ない



- ▲ ... 電離バブルが広がって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

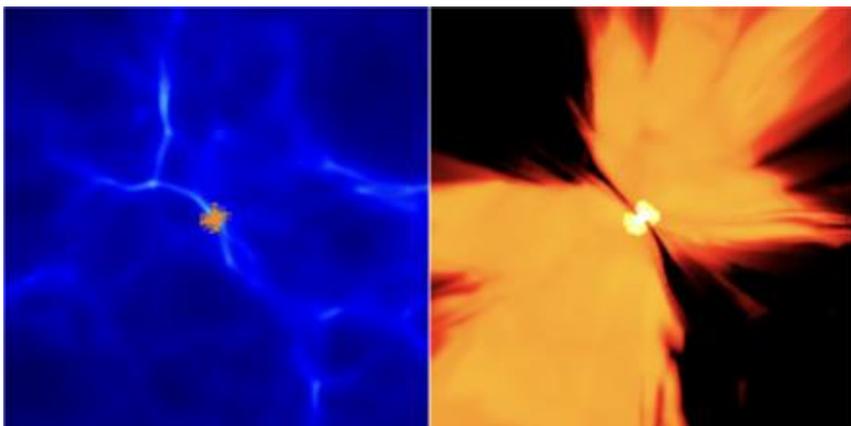


Introduction

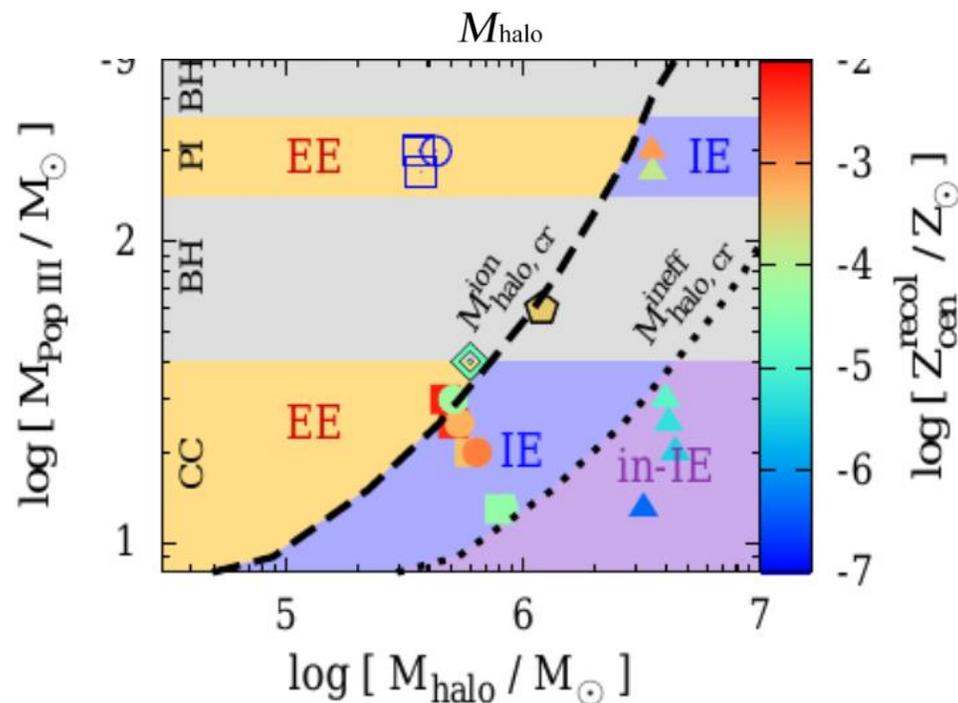
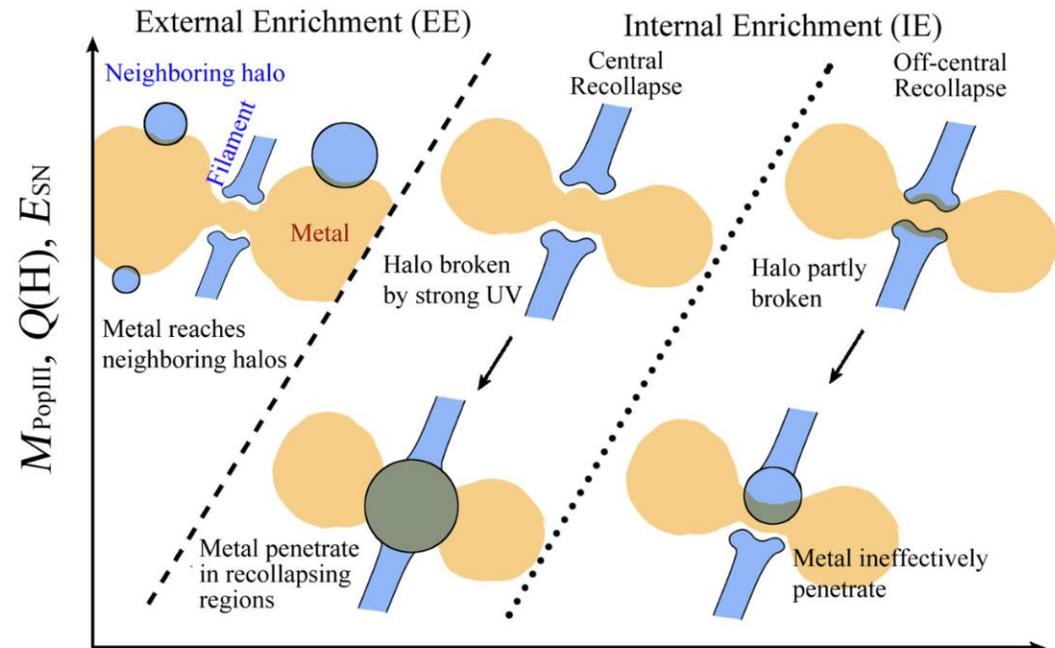
- 初代星フィードバックの先行研究3 -

○ 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
- 超新星爆発エネルギーが星質量と一対一に決められている



Introduction

- 本研究の目的 -

- 先行研究は1次元計算だったり、次の世代の星形成に重点を置いていたりする。
 - ⇒ 性質の異なる初代星やハローによって、電離光子がどのように周囲に放出されたかや超新星バブルがどのように広がったかについて、3次元シミュレーションで系統的に調べられているわけではない。
- 本研究では、以下のシミュレーションを行う。
 - 電離バブルや超新星バブルの広がり方について調べる
 - 3次元宇宙論的シミュレーション
 - 様々な初期条件 (複数の初代星質量、ハロー質量、ハローの個性)

Method

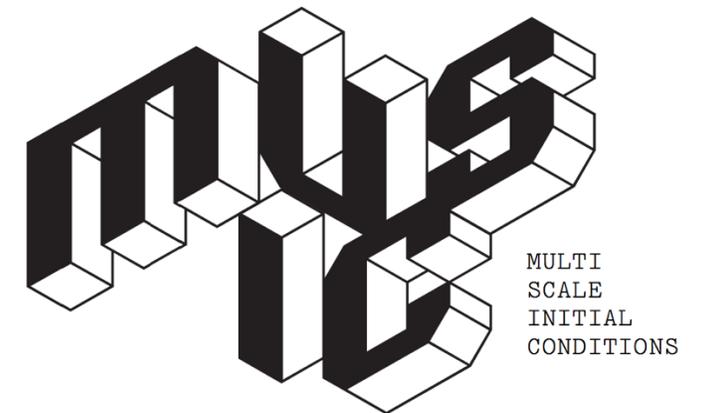
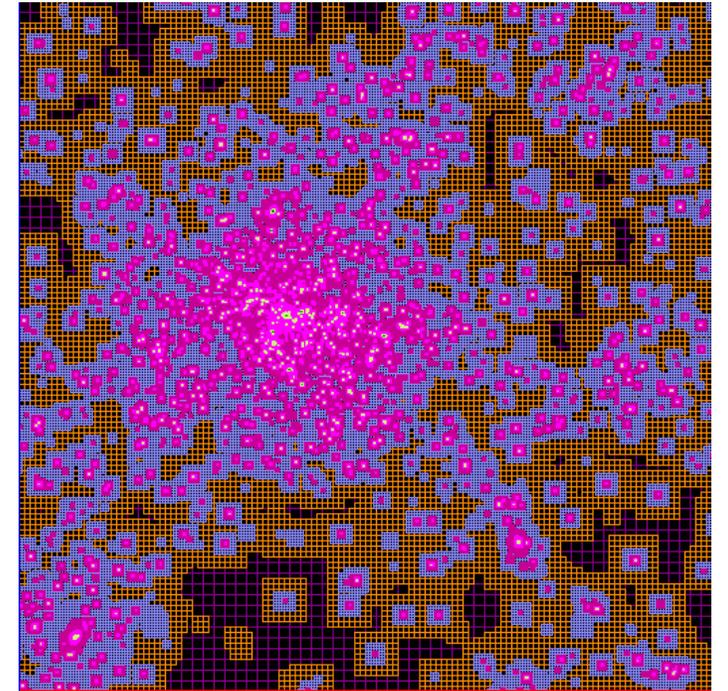
- シミュレーションコード -

- "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になる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

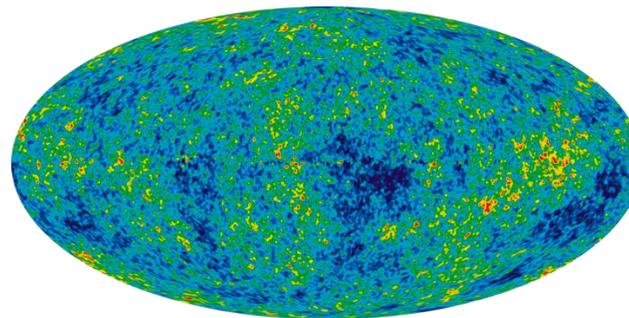


Method

- 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 $\sim 100M_{\odot}$ 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



宇宙の初期密度ゆらぎ

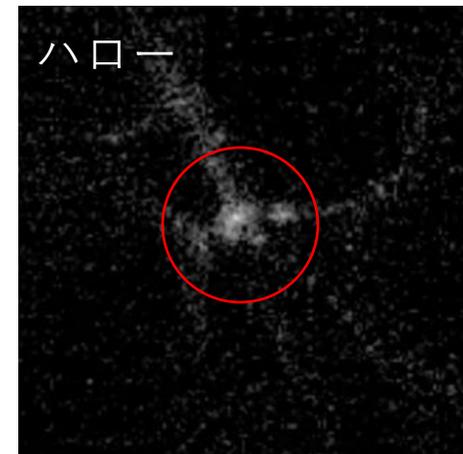


Table 1. 各ハローの性質

No.	z_{collapse}	$M_{\text{halo}} [M_{\odot}]$	$r_{\text{vir}} [\text{pc}]$
0	23.8	1.6×10^6	120
1	22.4	6.7×10^5	120
2	22.7	5.8×10^5	110
3	21.4	7.8×10^5	130
4	22.2	4.7×10^5	110
5	21.0	5.2×10^5	120
6	19.9	6.4×10^5	130

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_H が 10^5cm^{-3} を超え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
- 初代星の質量を複数設定
- 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 (Shaerer 2002)

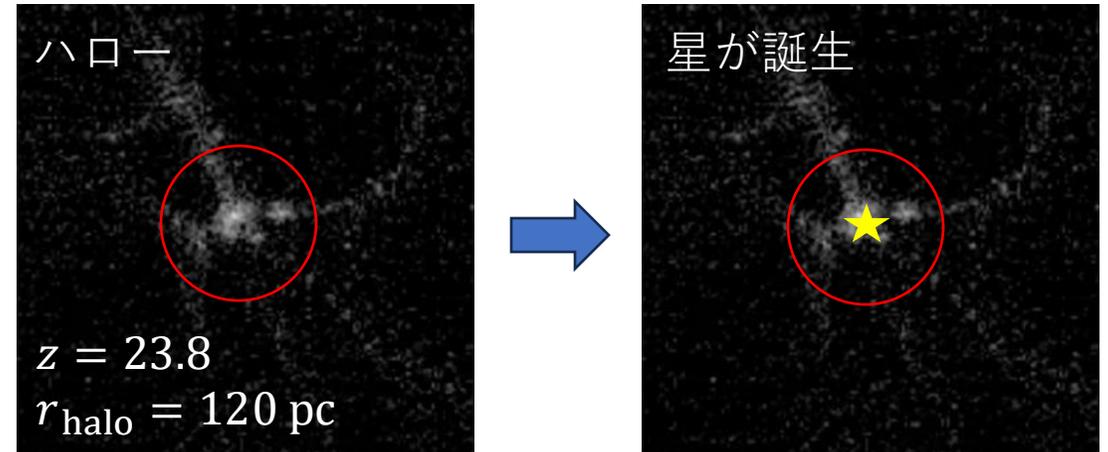


Table 2. 各初代星の性質

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

Results

- 2D ムービー -

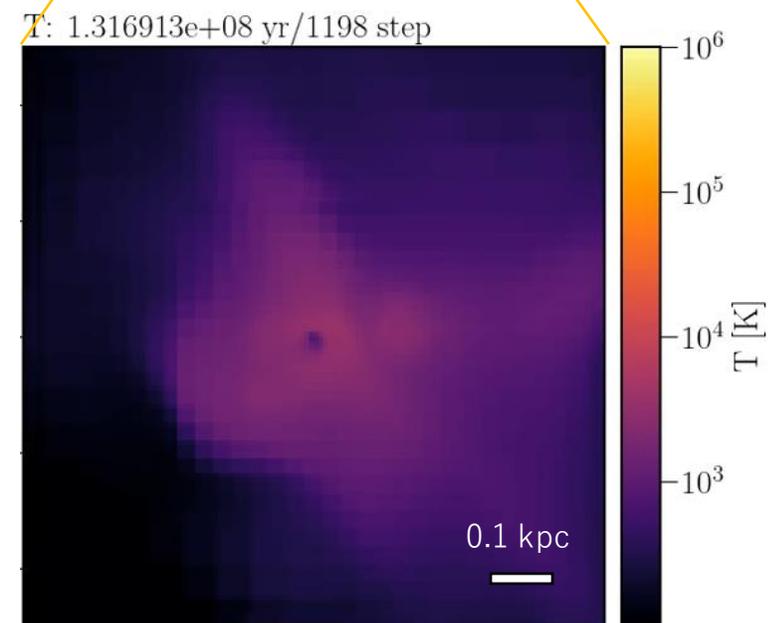
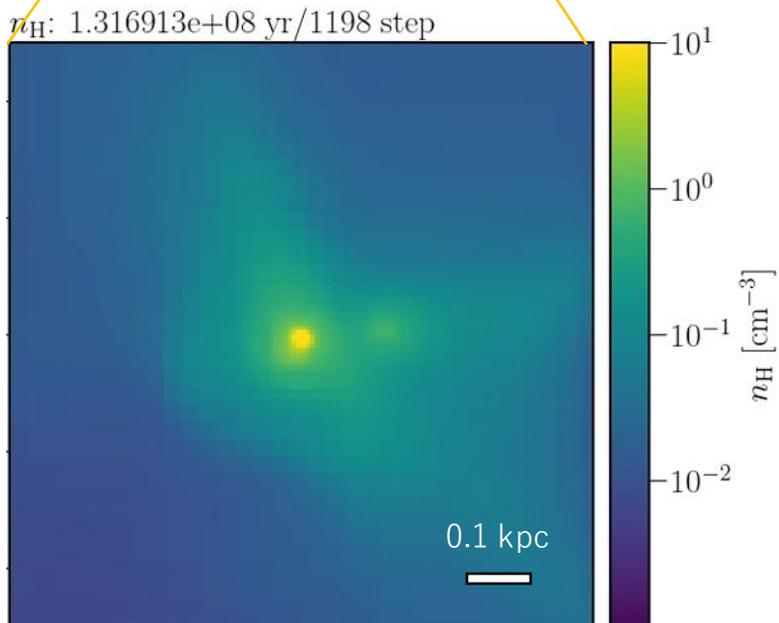
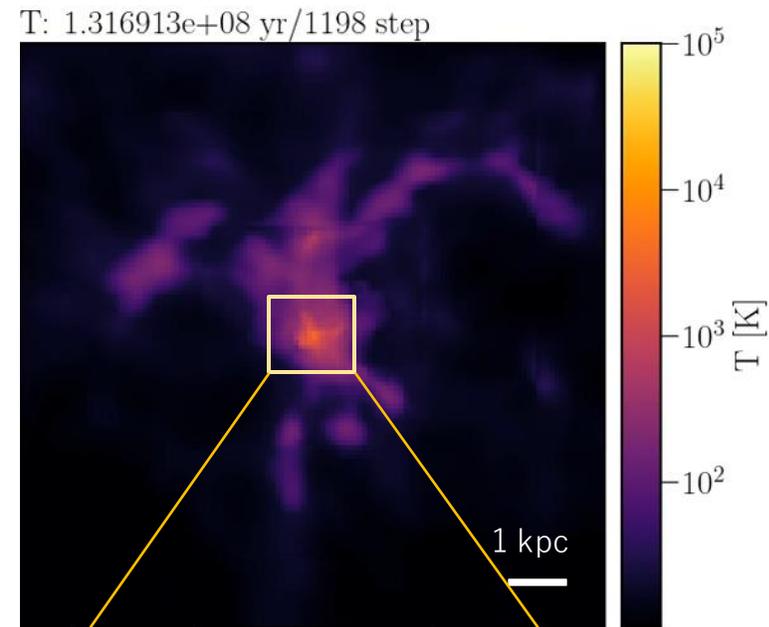
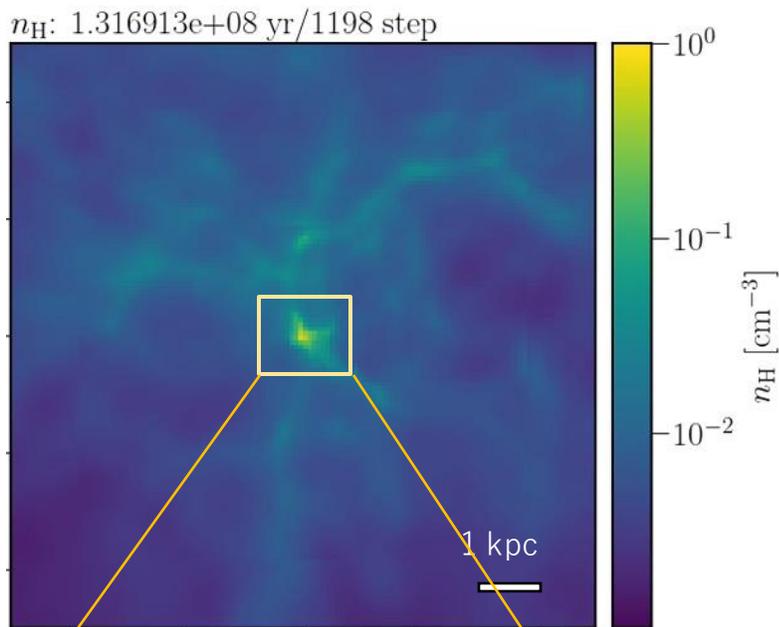
halo0の初代星質量 $40 M_{\odot}$ の
シミュレーションにおける
 n_{H} と T

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 -

- m40, m200

バブルの最小半径がハローの半径を超える

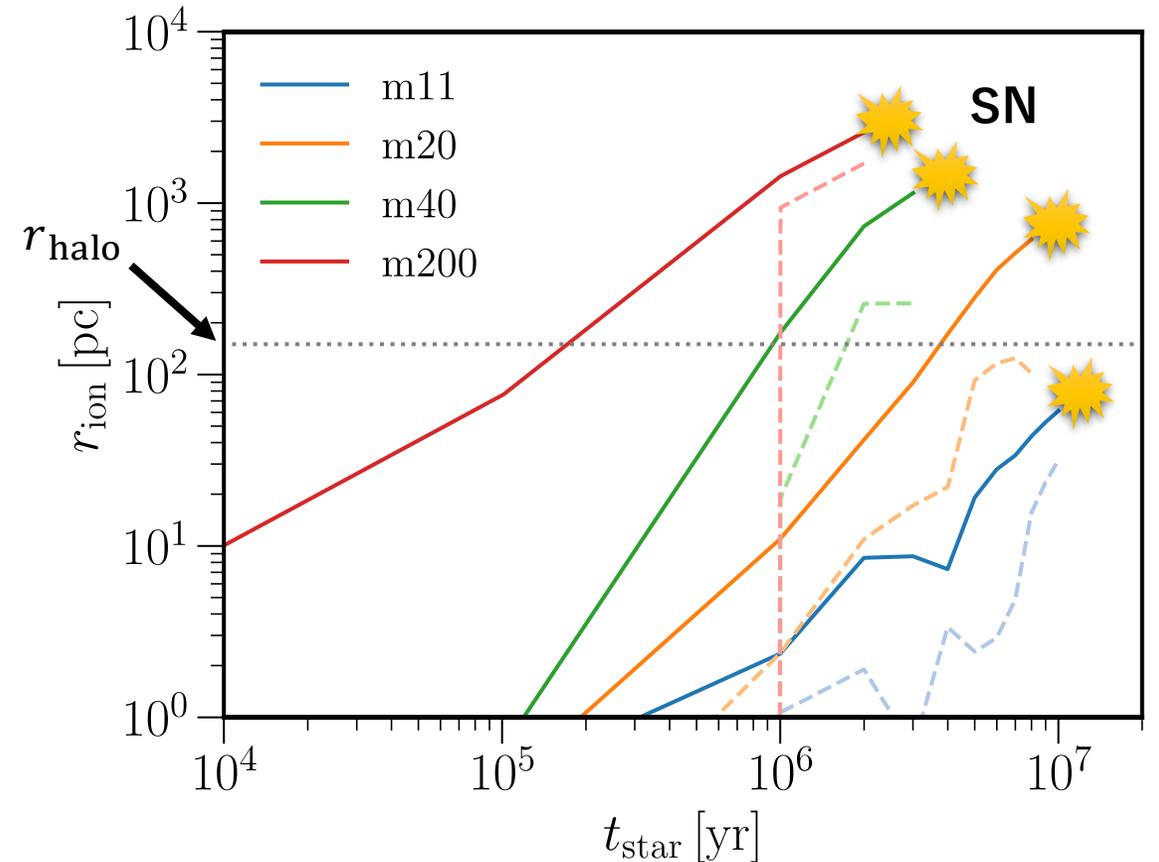
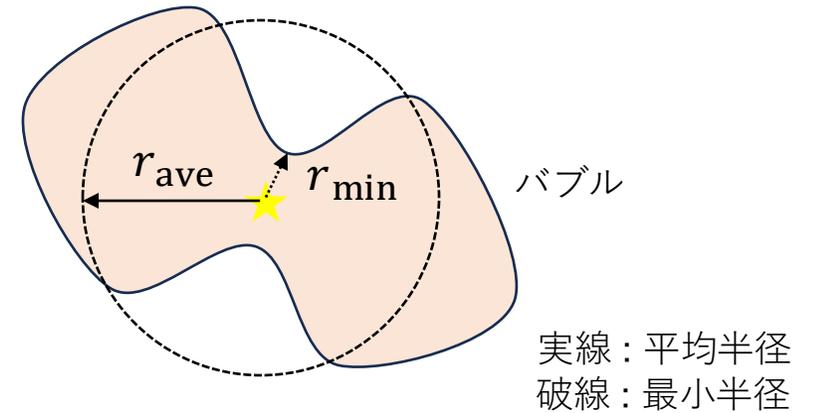
- m11

バブルの平均半径がハローの半径を超えない

- m20

バブルの平均半径はハローの半径を超える一方、バブルの最小半径がハローの半径を超えない

- 初代星の質量によって電離バブルの広がり方が大きく変わる



Results

- 超新星バブルの進化 -

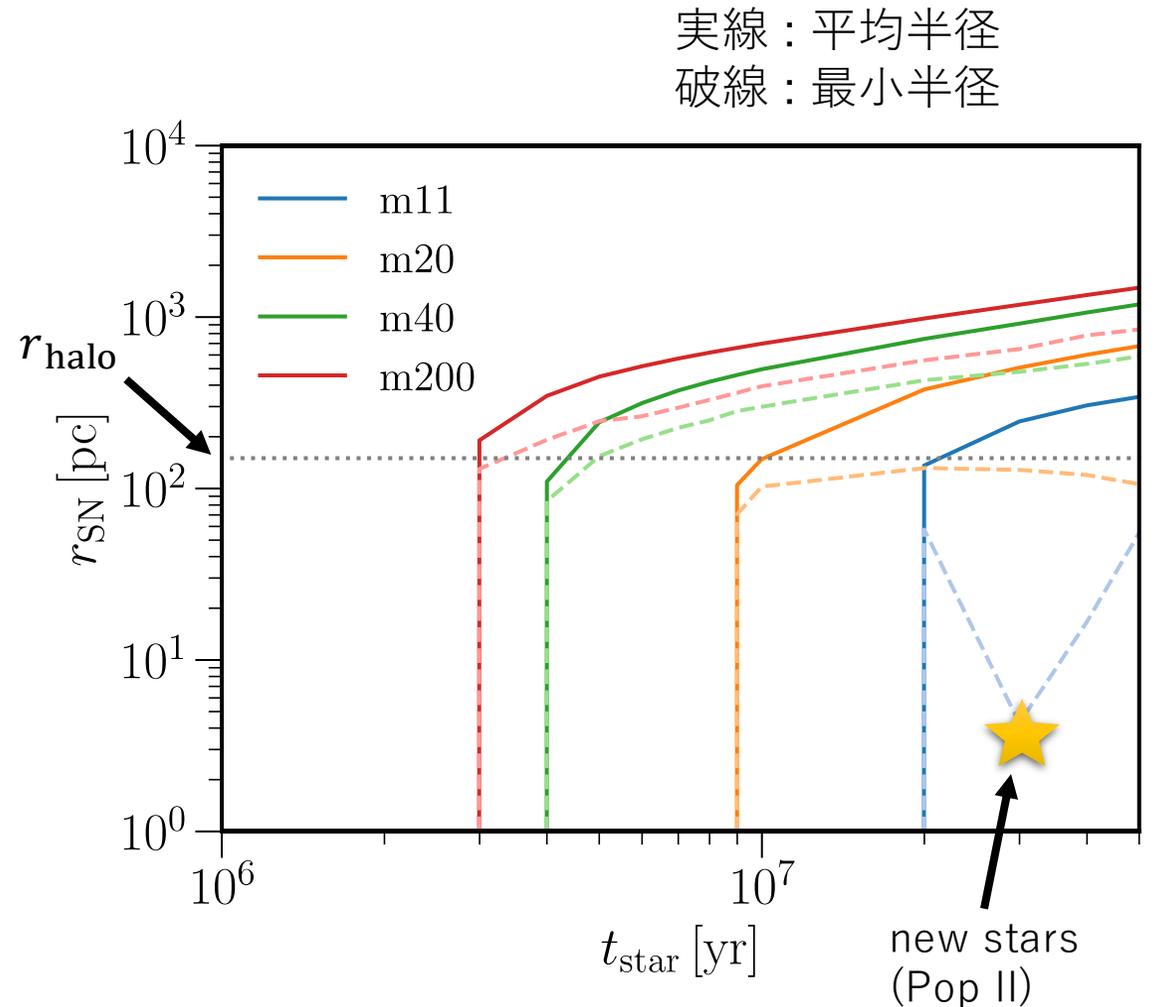
- m40, m200

バブルの最小半径がハローの半径を超える

- m11, m20

バブルの平均半径はハローの半径を超える一方、
バブルの最小半径がハローの半径を超えない

- 初代星の質量によって超新星バブルの広がり方も大きく変わる



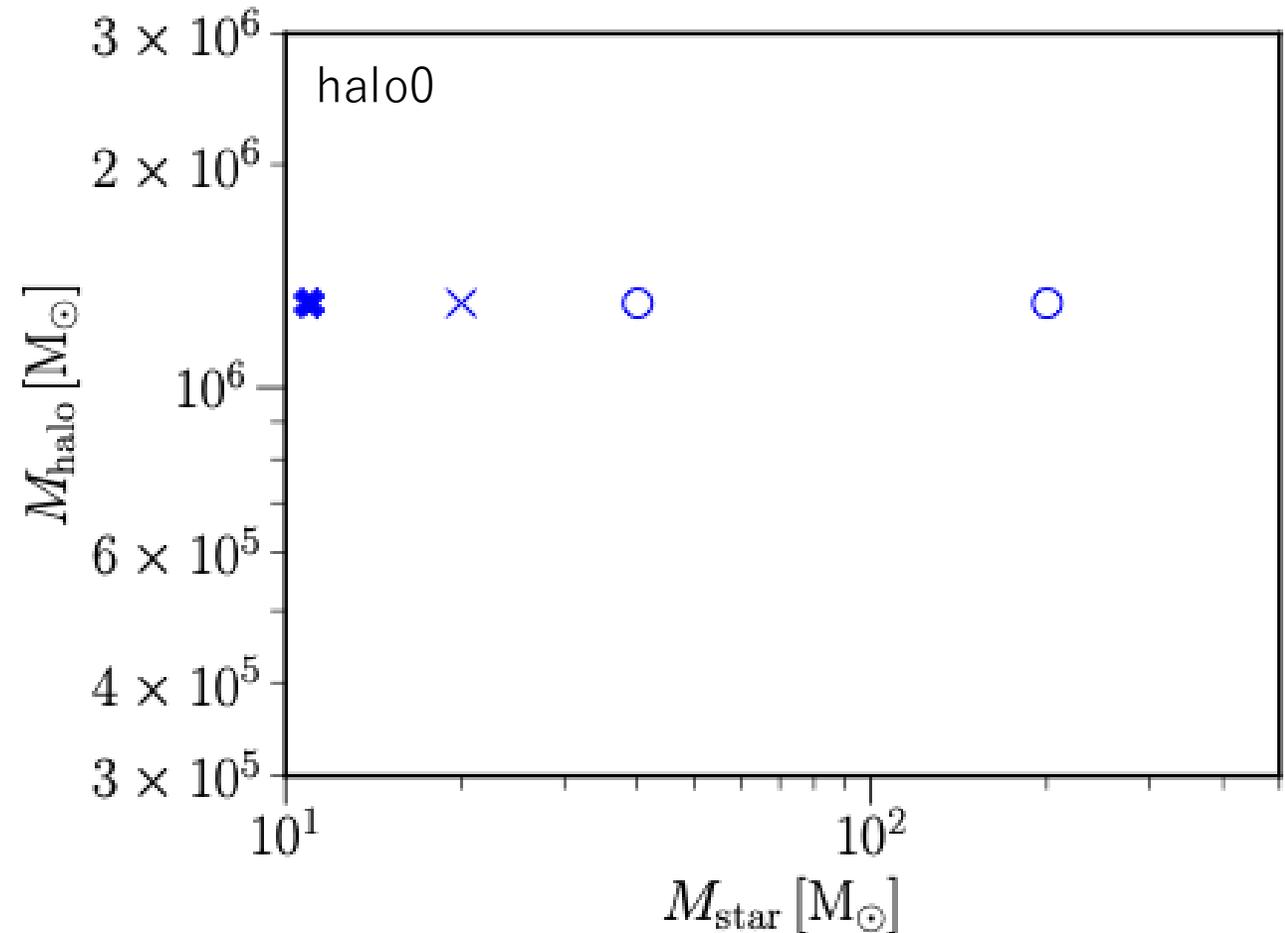
Results

- 電離フィードバックの星質量依存性 -

- 初代星の質量が大きくなるほど、電離バブルは十分にハローを越えて広がる

⇒ 電離フィードバックは星質量が大きくなるほど遠くへ広がる傾向がある

- … 電離バブルが全ての方向で r_{halo} まで広がった
- × … 電離バブルが r_{halo} まで広がりきらない方向があった
- ✕ … 電離バブルの平均半径が r_{halo} まで広がりきらなかった

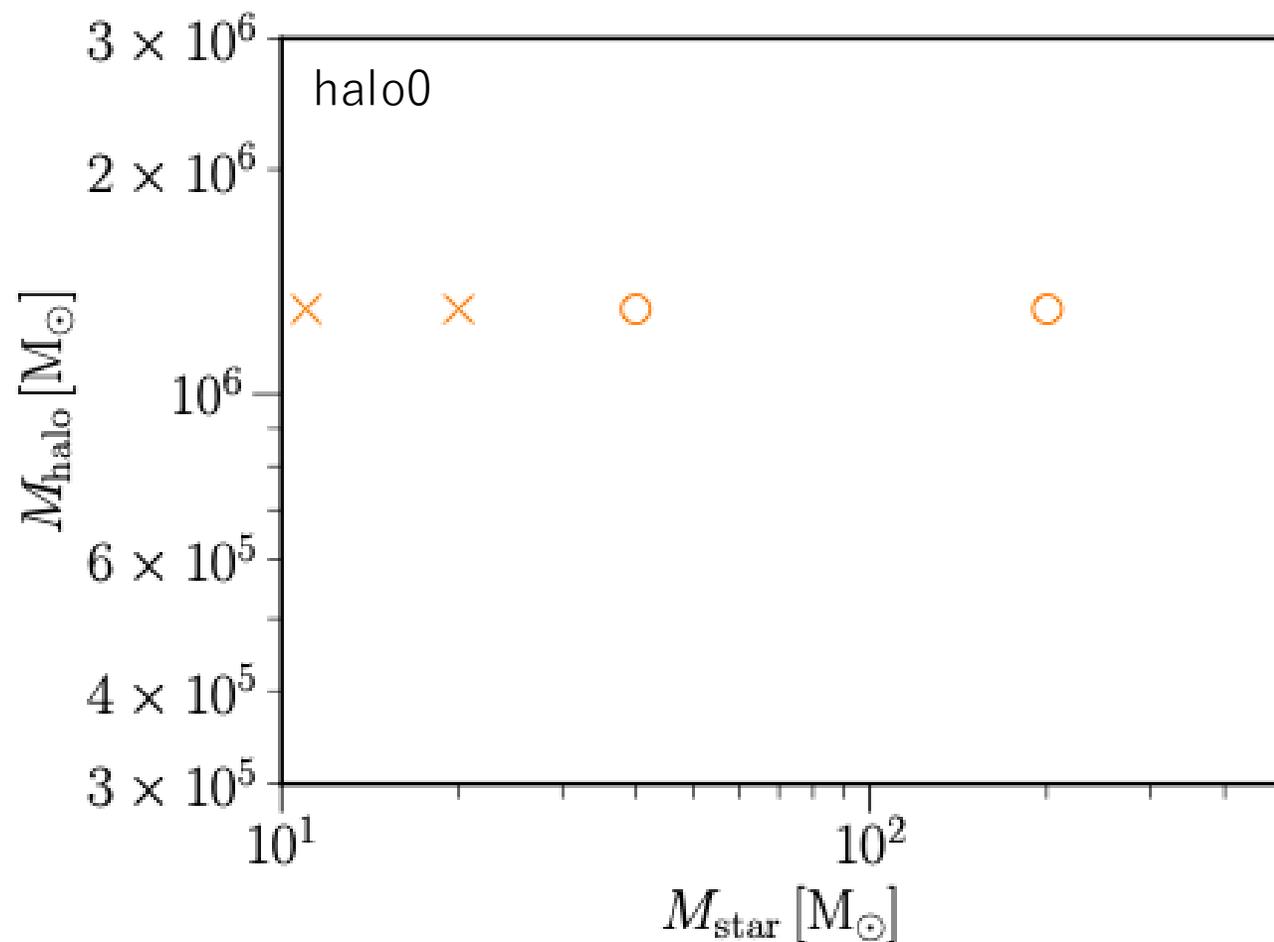


Results

- 超新星フィードバックの星質量依存性 -

- 初代星の質量が大きくなるほど、超新星バブルはよりハローを越えて広がる傾向がある
- 電離バブルが十分に広がらなかったm11, m20では、超新星バブルも十分に広がらなかった
 - ⇒ 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

- ... 超新星バブルが全ての方向で r_{halo} まで広がった
- × ... 超新星バブルが r_{halo} まで広がりきらない方向があった
- ✕ ... 超新星バブルの平均半径が r_{halo} まで広がりきらなかった

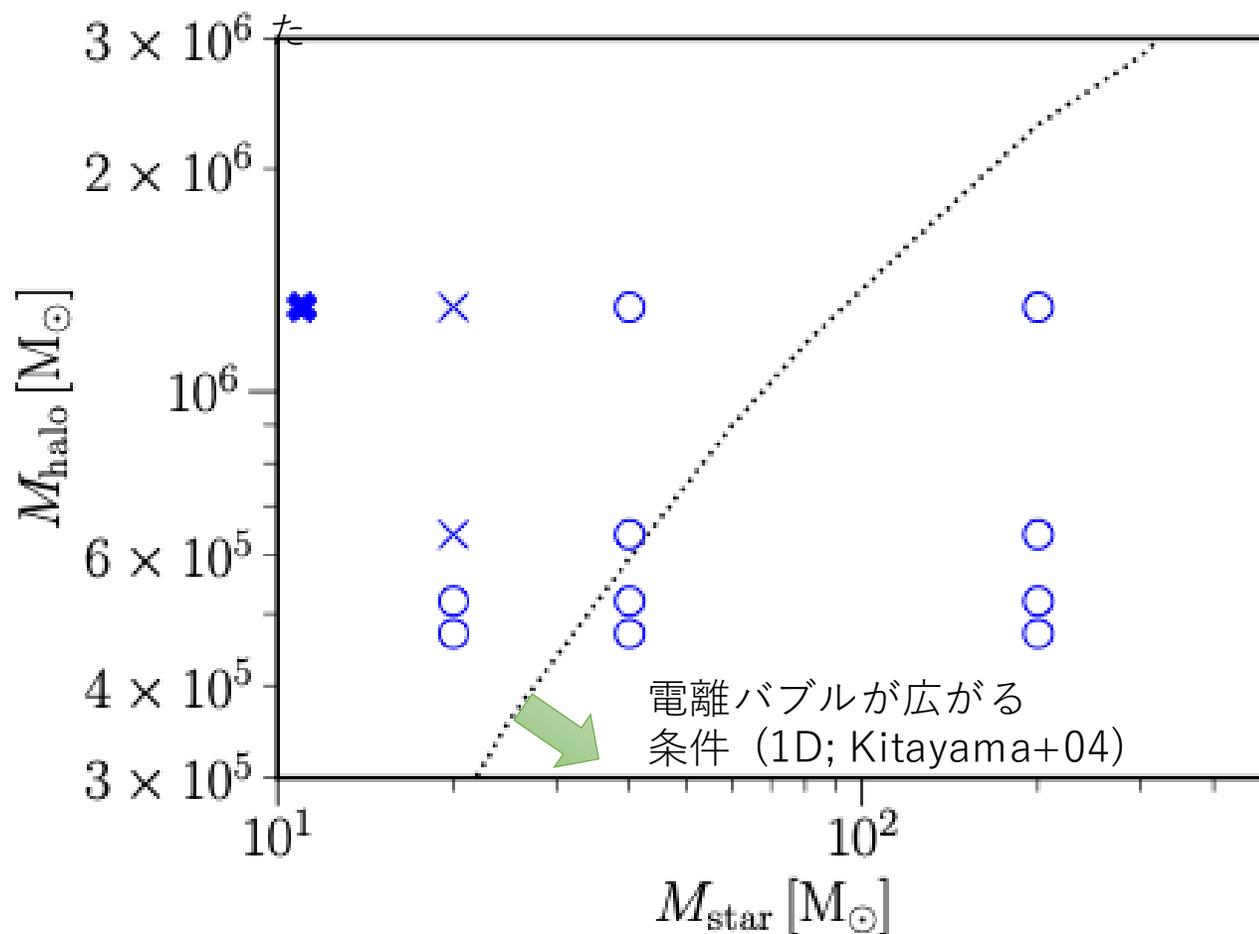


Results

- 初代星フィードバックの臨界質量 -

- 初代星質量が大きいほど電離バブルが広がる
- ハローの質量が大きくなると、小さい質量の星で電離バブルが広がらなくなる
 - ⇒ Kitayama et al. (2004)の1次元計算と一致する傾向
- 1次元計算と比べ、全体的に電離バブルがより広がっている傾向にある
 - 解像度の問題？

- … 電離バブルが全ての方向で r_{halo} まで広がった
- × … 電離バブルが r_{halo} まで広がりきらない方向があった
- ✕ … 電離バブルの平均半径が r_{halo} まで広がりきらなかった

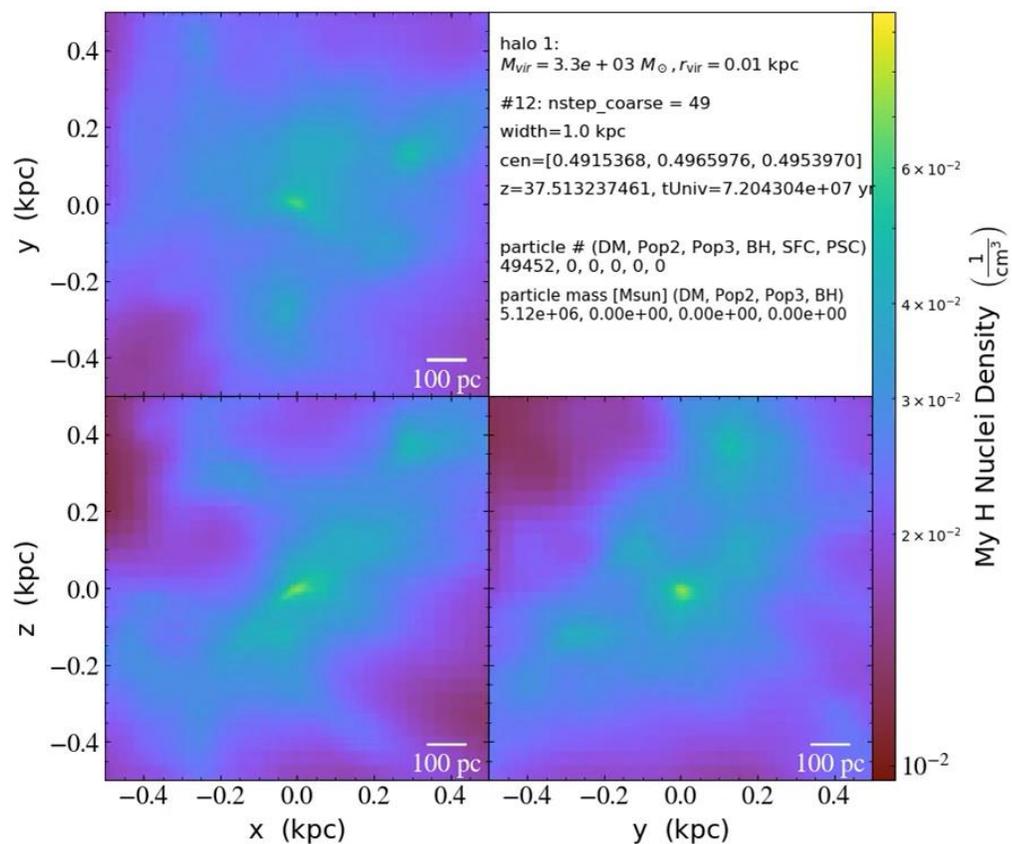


Discussion

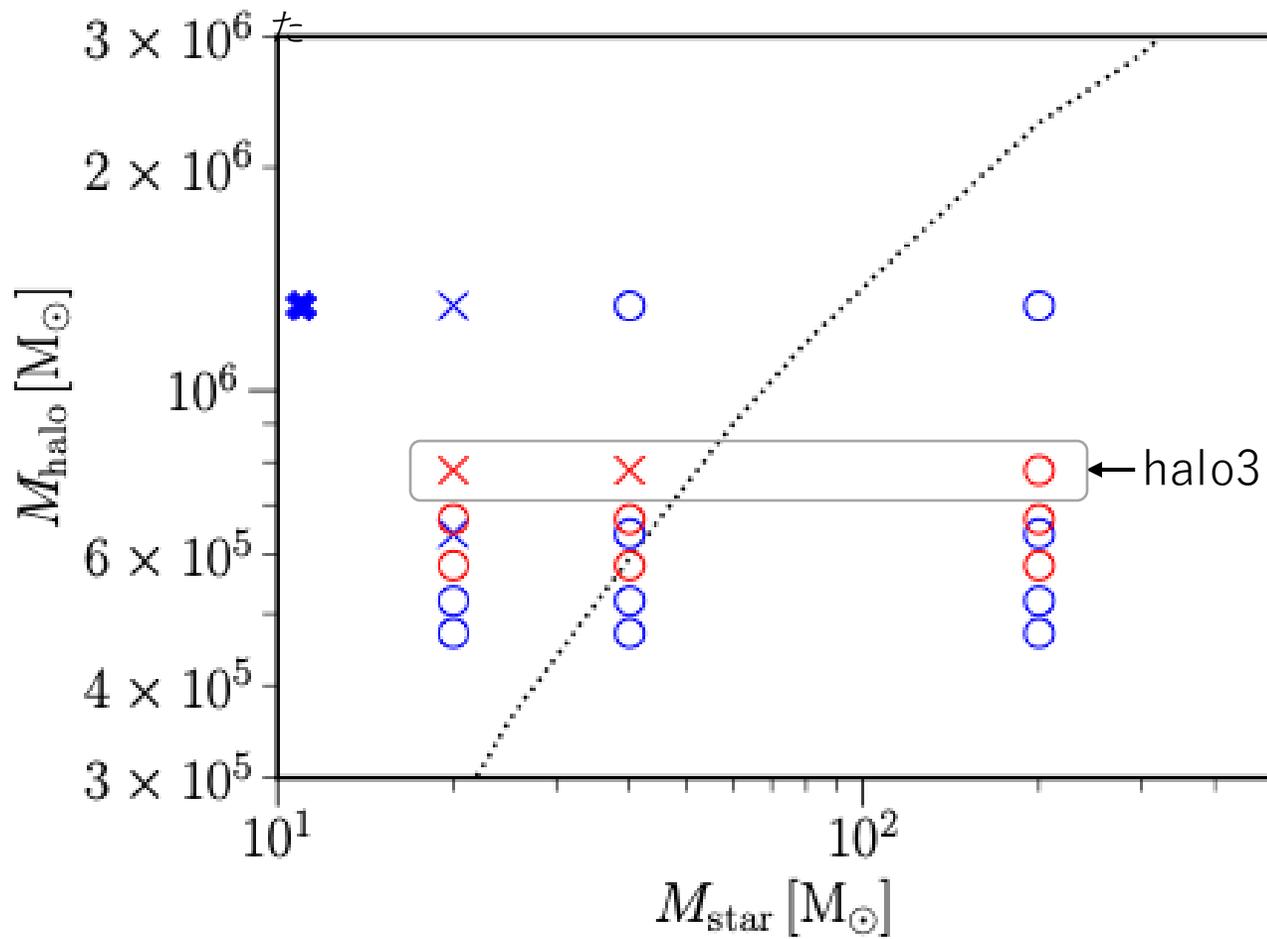
- 例外的なケースの紹介 -

- 1次元計算と傾向が一致しない例も存在

⇒ 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 $\sim 50\text{pc}$ 付近に存在 (halo3)



- … 電離バブルが全ての方向で r_{halo} まで広がった
- × … 電離バブルが r_{halo} まで広がりきらない方向があった
- ✕ … 電離バブルの平均半径が r_{halo} まで広がりきらなかった

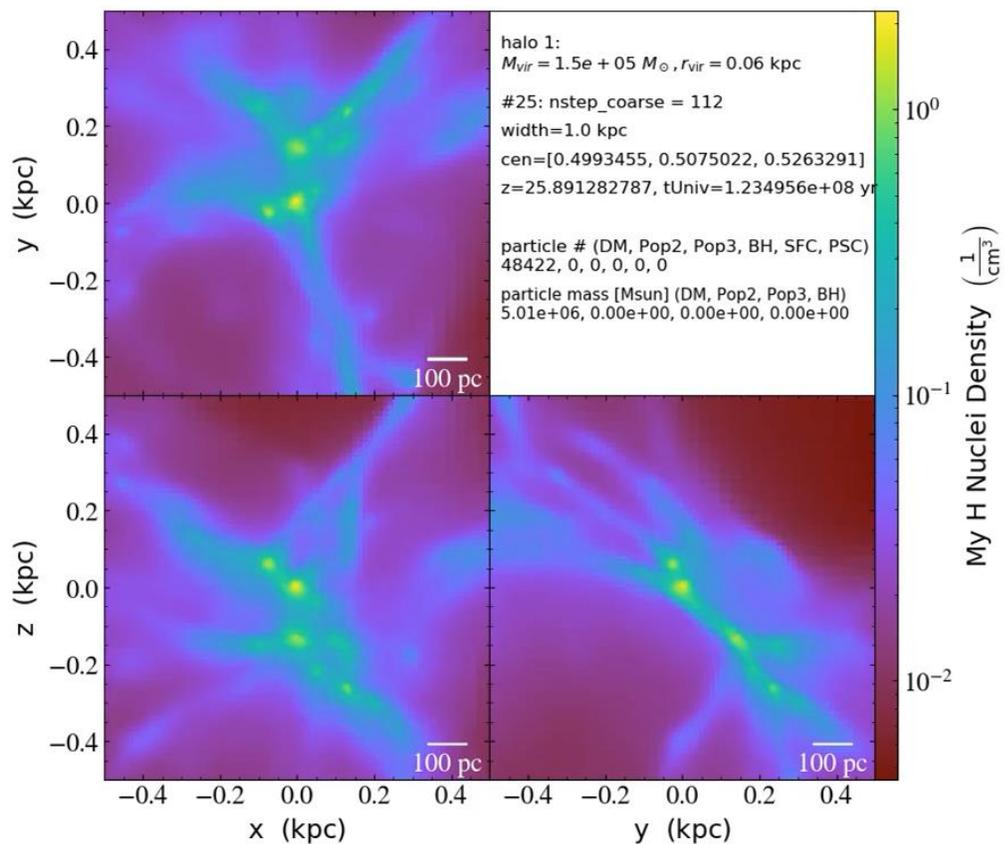


Discussion

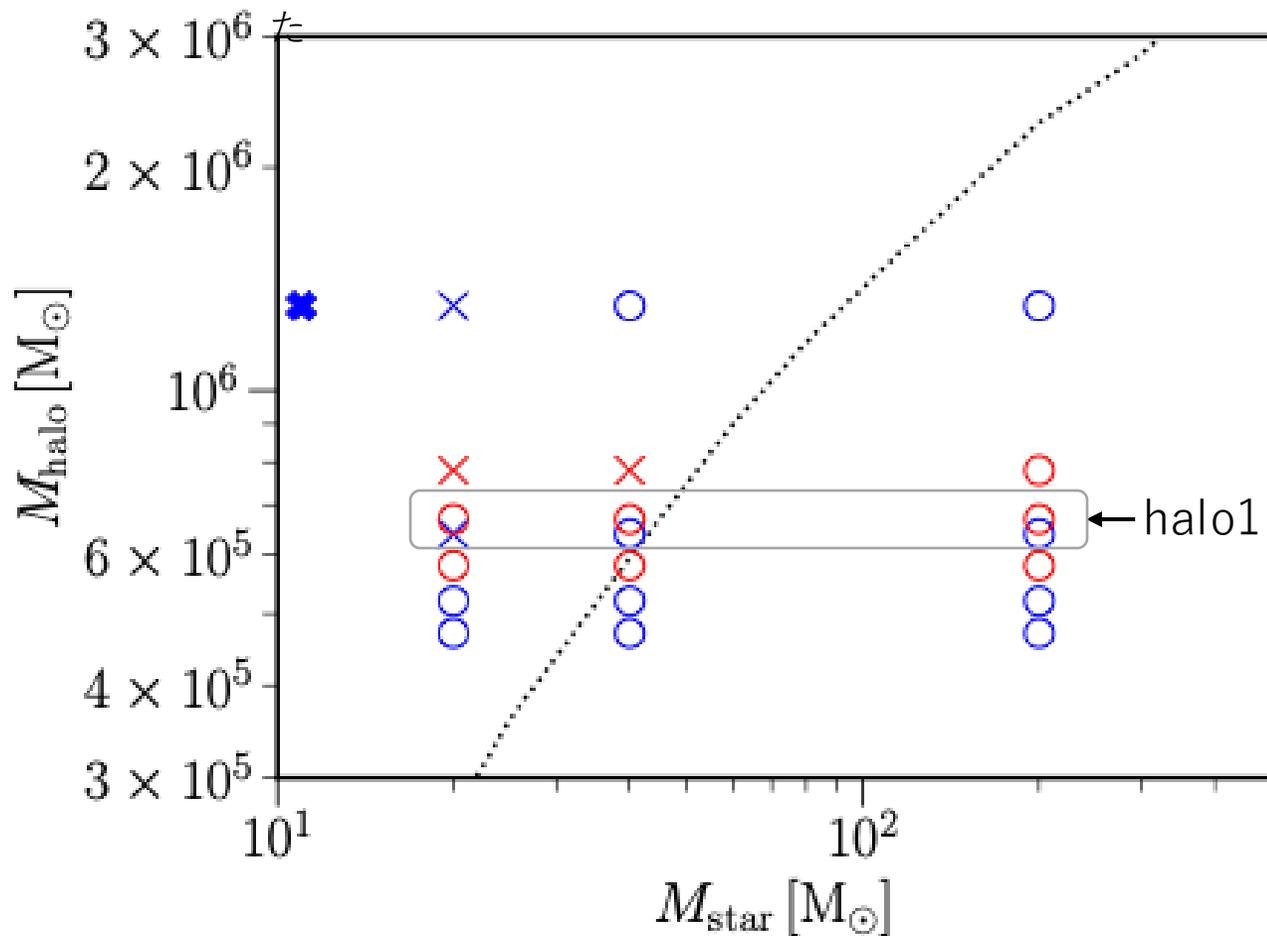
-例外的なケースの紹介-

- 1次元計算と傾向が一致しない例も存在

⇒ 初めにできた星が超新星爆発を起こす前に、
新たな星が ~ 100 pc付近に形成 (halo1)



- ... 電離バブルが全ての方向で r_{halo} まで広がった
- × ... 電離バブルが r_{halo} まで広がりきらない方向があった
- ✕ ... 電離バブルの平均半径が r_{halo} まで広がりきらなかった



Conclusion

- 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。
- 初代星とハローの質量を複数設定し、電離バブルと超新星バブルの半径の時間進化をそれぞれ計算した。
- 全体的に初代星質量が大きく、ハローの質量が小さいほど、電離バブルが広が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。
- 超新星バブルも電離バブルと同じように広がる傾向があり、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ると考えられる。
- 一方で、ハローの個性によって電離バブルや超新星バブルの広がり方に違いが出てくることが明らかになったため、初代星フィードバックを考える上でハローの個性を十分に考慮する必要がある。