

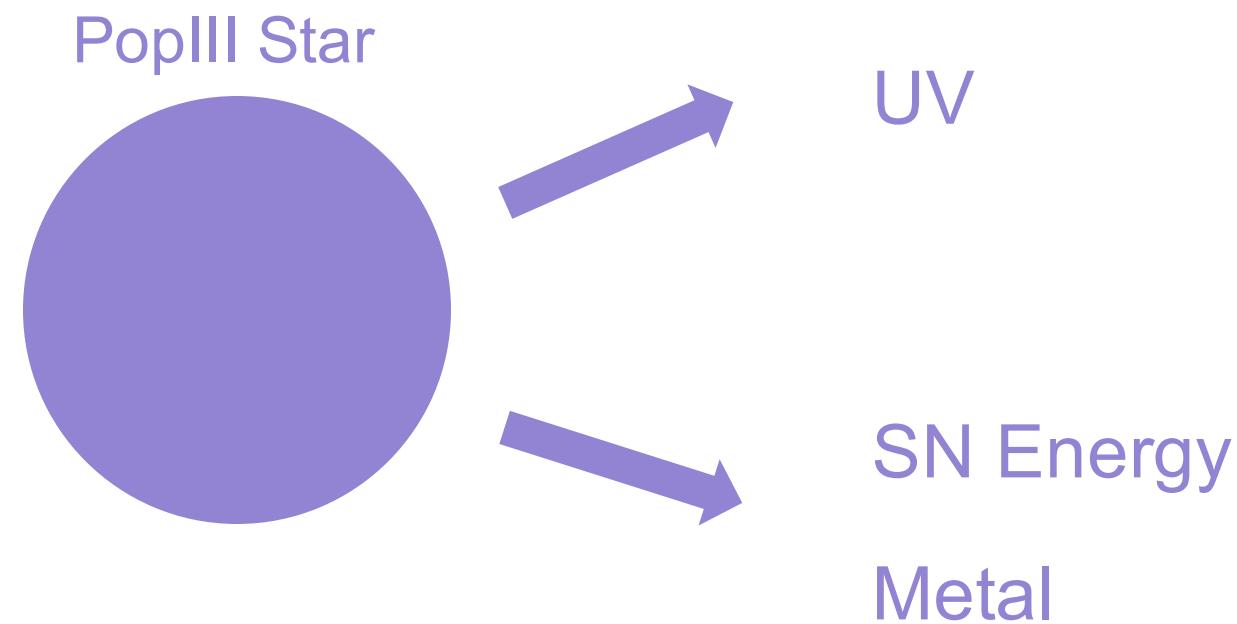
# 環境依存PopIII形成モデルを用いた 初代銀河形成シミュレーション

北海道大学理学院 理論宇宙物理学研究室 M1 知久真斗

# Introduction

# 初代星 (PopIII)

初代星 (PopIII) の性質はその後の天体形成や銀河進化に大きな影響を与えるため、初代星の初期質量を正しく見積もることが重要



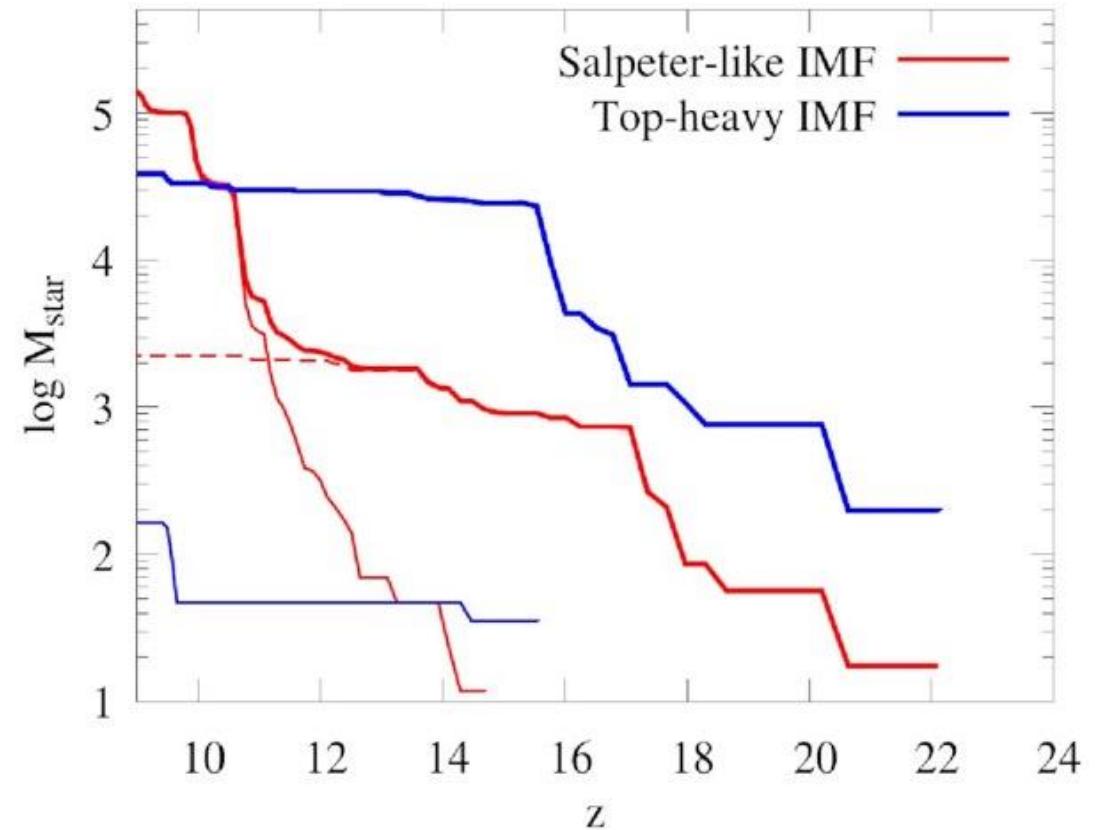
# PopIII の初期質量が星形成史に与える影響

Abe et al. 2021

PopIIIの初期質量関数（IMF）の違いが、  
星形成史に大きな影響を与えることを確認

IMFを仮定したシミュレーションでは、  
星質量は確率的に決められている

→ 環境に依存しない星形成



Abe et al. 2021 fig 9

実際の環境に依存したPopIII形成モデルの構築が必要

# 星形成環境とPopIII初期質量の関係

Hirano et al. 2014, 2015

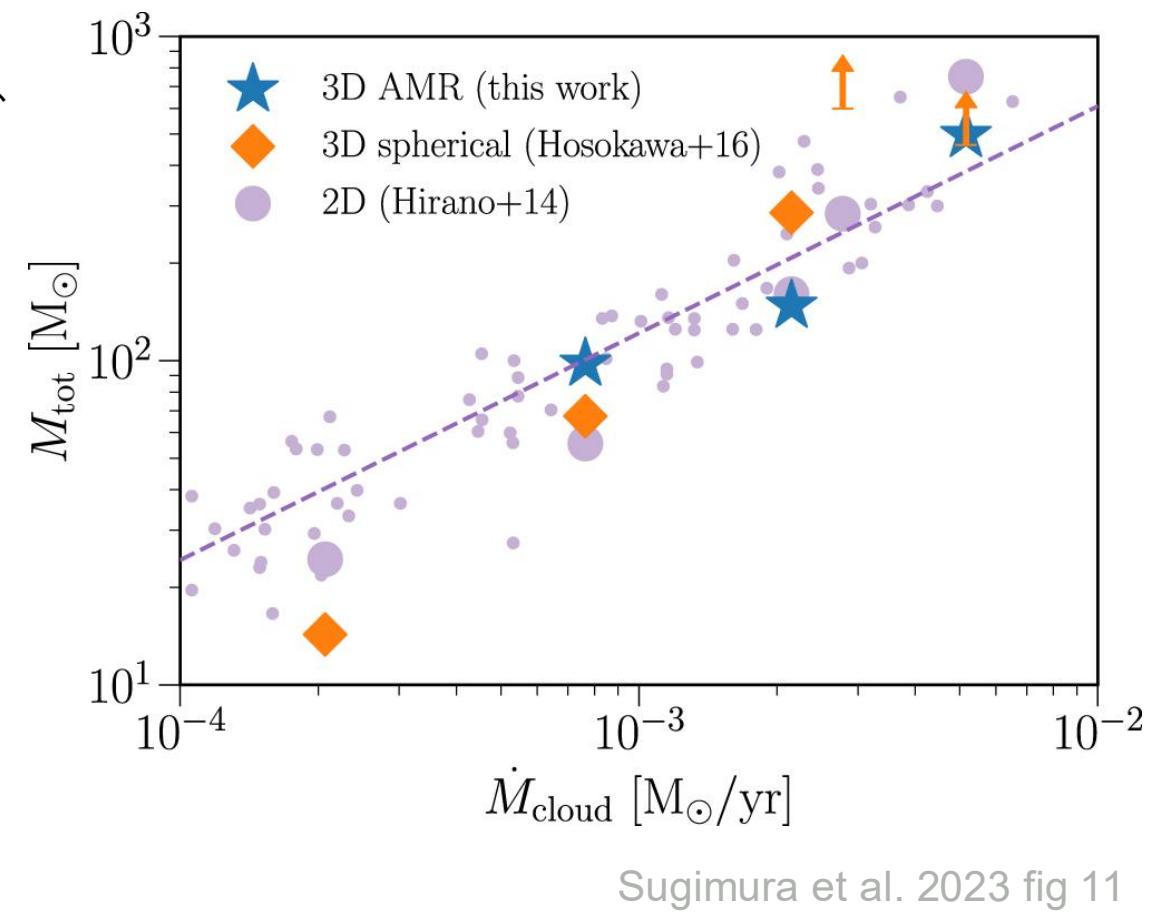
宇宙論的シミュレーションから得られた100個以上のガス雲について、2D高解像度計算でその後の進化を計算し、PopIII質量がガス雲へのガス降着率と相關することを発見

$$M_{\text{PopIII}} = 250 M_{\odot} \left( \frac{\dot{M}_{\text{cloud}}}{2.8 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right)^{0.7}$$

$$\dot{M}_{\text{cloud}} \equiv 4\pi R_{\text{cloud}}^2 \rho(R_{\text{cloud}}) v(R_{\text{cloud}})$$

Sugimura et al. 2023

3D高解像度計算により、連星形成を考慮しても上記が成り立つことを確認



# 研究の目的

---

- Hirano et al. 2015 に基づいた、環境依存PopIIIモデルの構築
  - 初代銀河形成プロセスの詳細な理解につながる
- 形成されたPopIIIの性質による、その後の銀河進化の違いについても議論

# Methods

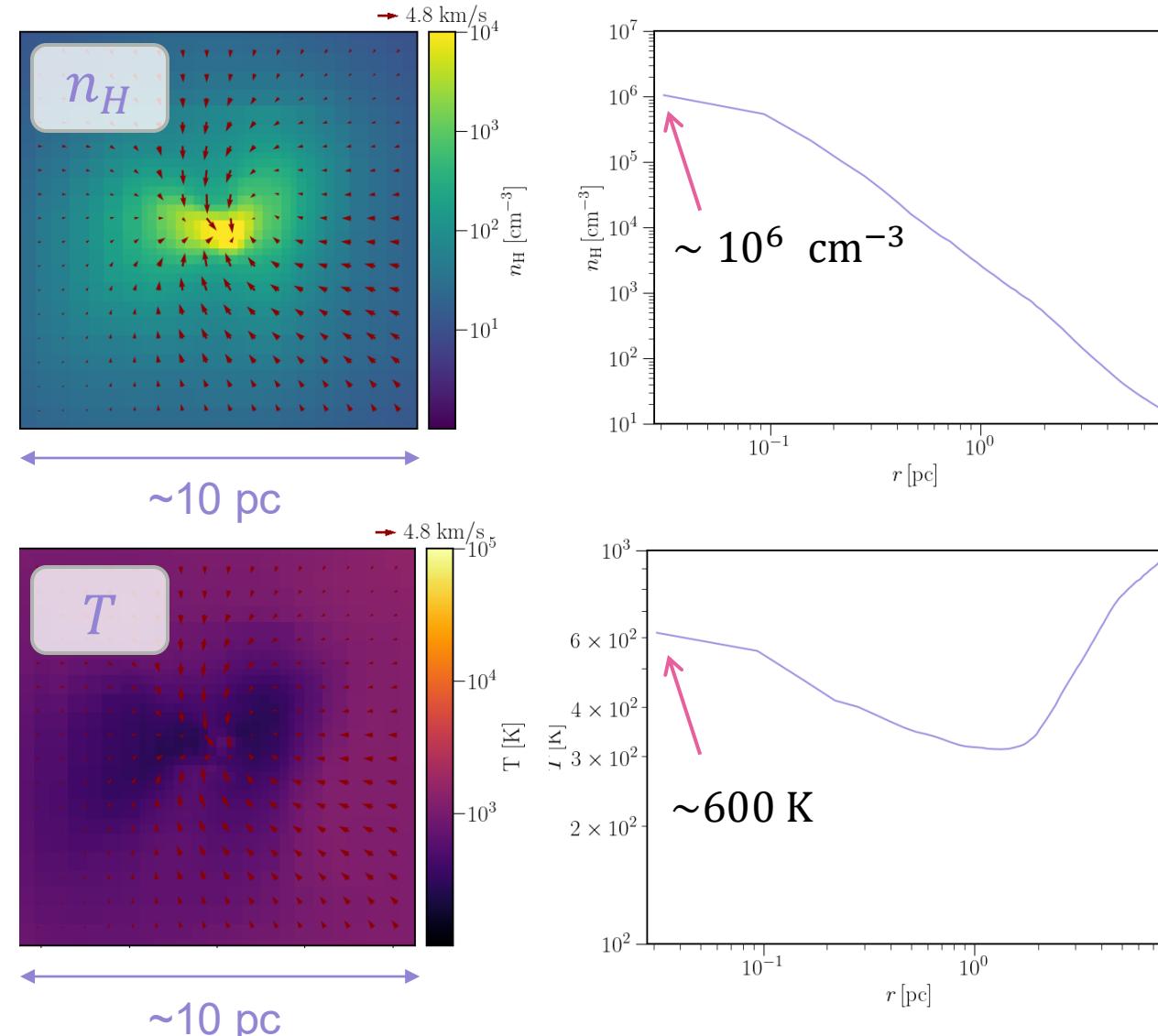
# シミュレーションの概要

---

- RAMSES-RT (Teyssier 2002) を用いた宇宙論的シミュレーション
- 基本的な設定はSugimura et al. 2024 と同じ
- PopIII 形成モデルはHirano et al. 2014, 2015に基づく

# PopIII 形成の手順 [1/2]

星形成条件を満たす低温・高密度のセルが形成されたら、そのセルを中心とした1D profile を作成



# PopIII 形成の手順 [2/2]

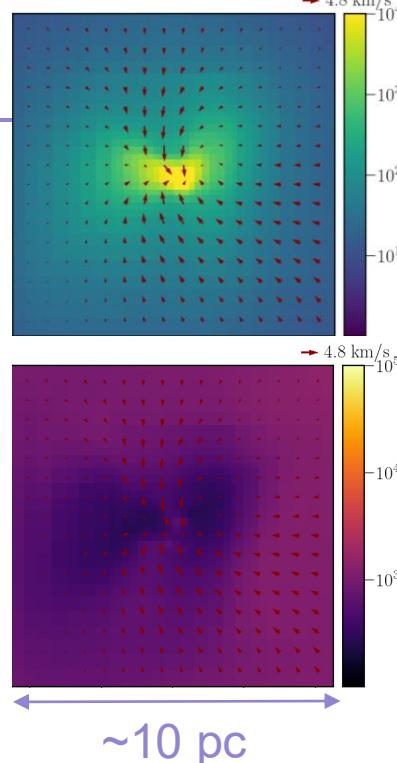
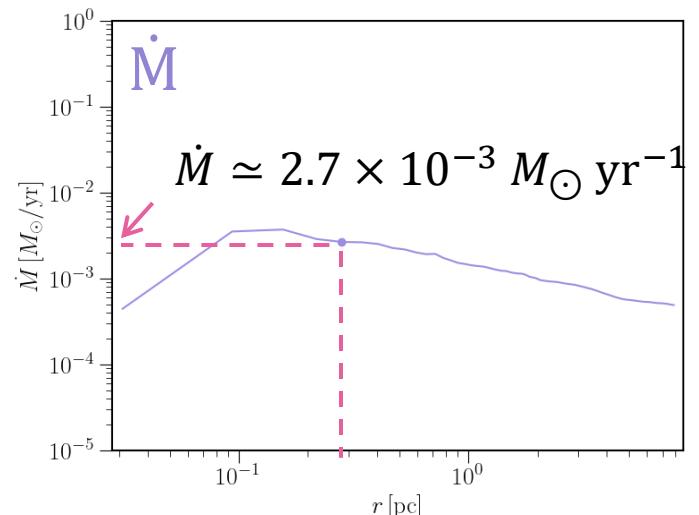
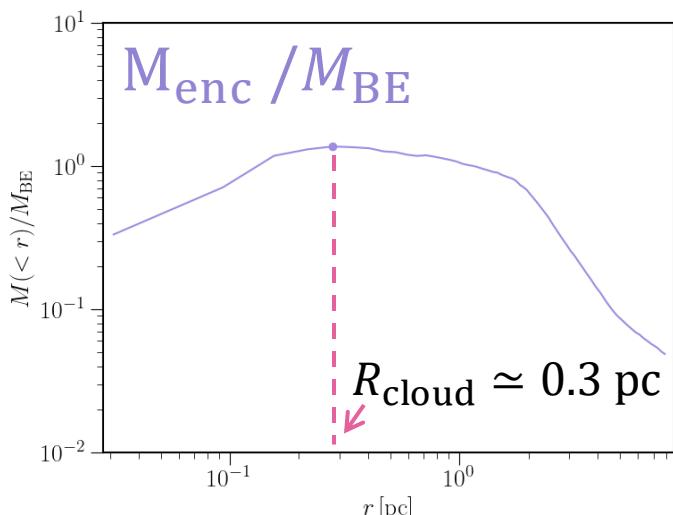
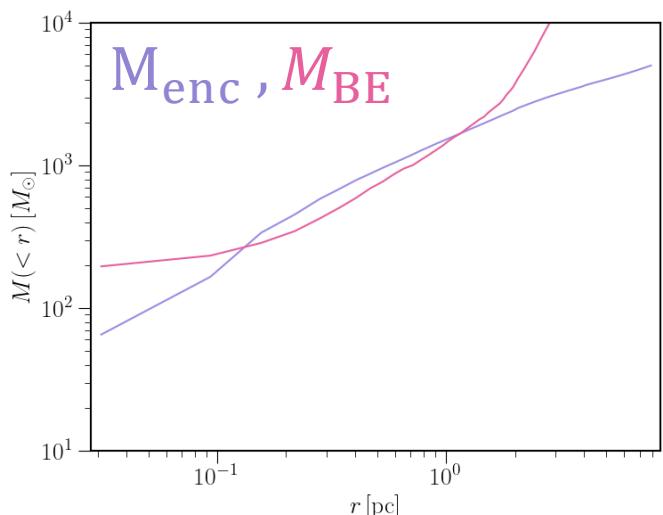
- $M_{\text{enc}}(r)$ ,  $M_{\text{BE}}(r)$ ,  $\dot{M}(r)$  を取得

$$M_{\text{BE}} = \frac{1.18 c_s^2}{G^{2/3} P^{1/2}}$$

- $M_{\text{enc}}/M_{\text{BE}}$  が最大になる半径を  $R_{\text{cloud}}$ ,  $M_{\text{cloud}} = M_{\text{enc}}(R_{\text{cloud}})$  とする
- $\dot{M}(R_{\text{cloud}})$  を用いて星団（初代星）質量を決定

$$M_{\text{PopIII}} = 250 M_{\odot} \left( \frac{\dot{M}_{\text{cloud}}}{2.8 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right)^{0.7} \quad (\text{Hirano et al. 2015})$$

今回のケースでは  $M_{\text{popIII}} \simeq 235 M_{\odot}$



# 星団モデル：4つのモデルを用意

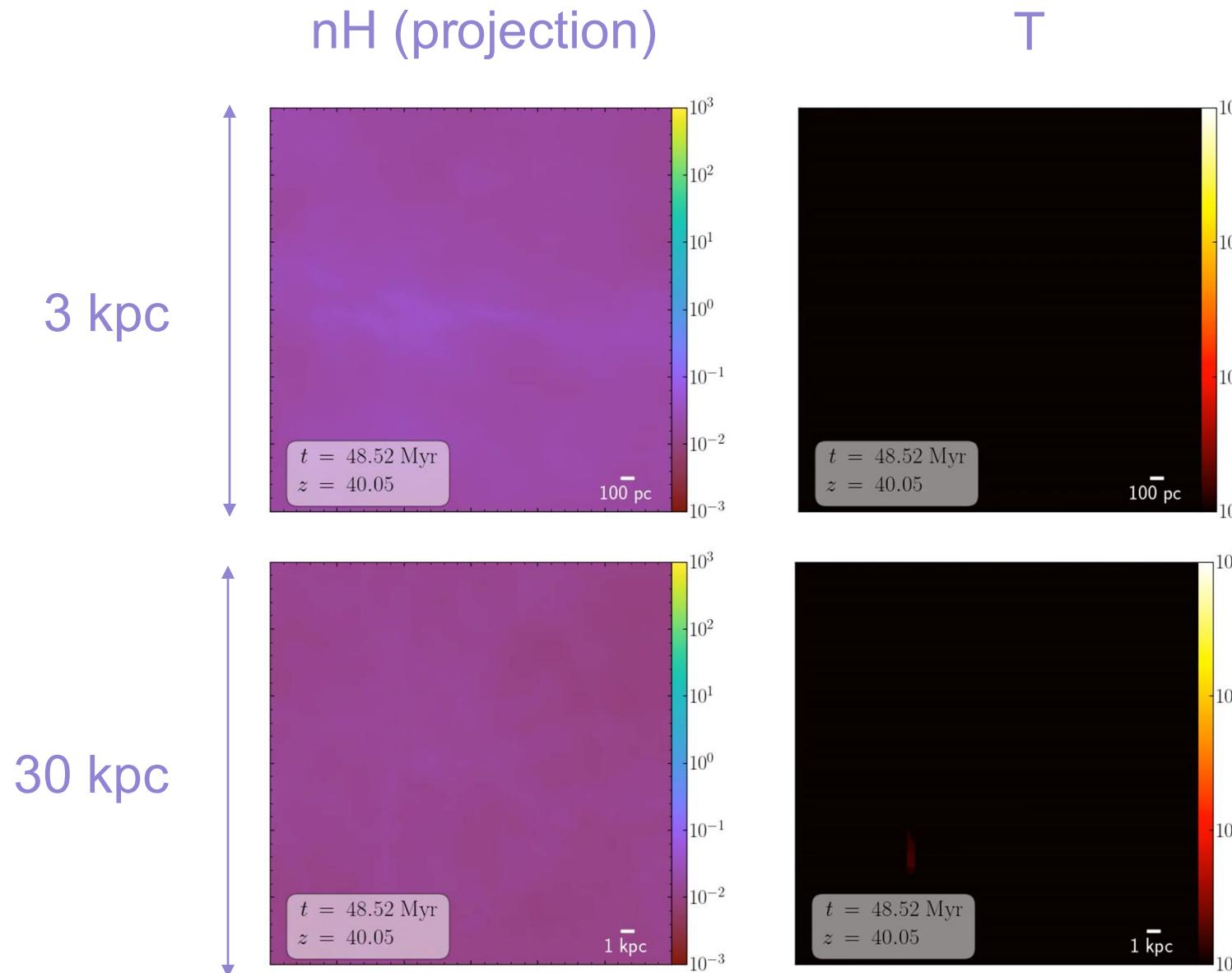
Model Name	
$\dot{M}$ dep Single star	1つの星を作成
$\dot{M}$ dep Binary stars	質量比 2:1 の連星を作成
$\dot{M}$ dep Multiple stars	質量比 $2^{n-1}:2^{n-2}:\dots:2:1$ の星団
Fixed Binary stars	環境に依存せず、 $80M_{\odot} + 40 M_{\odot}$ の連星 (Sugimura et al . 2024)

星団モデルの違いによる、その後の天体形成への影響について議論

# Results

# $\dot{M}$ dep Multiple stars case

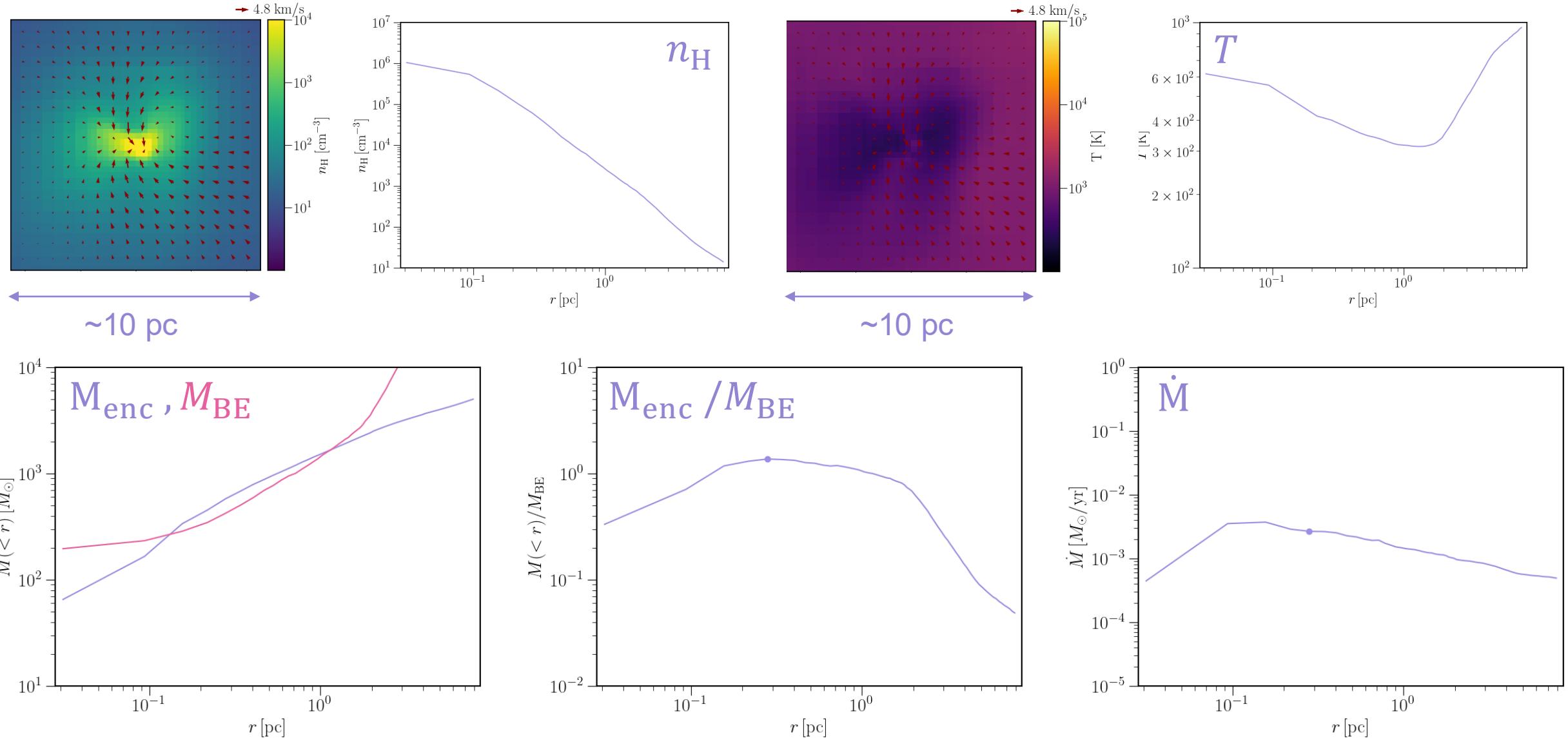
$M_{\text{popIII}} \propto \dot{M}_{\text{cloud}}^{0.7}$  で求めた星団を多重星に分けるモデル



# 初代星形成モデルの確認

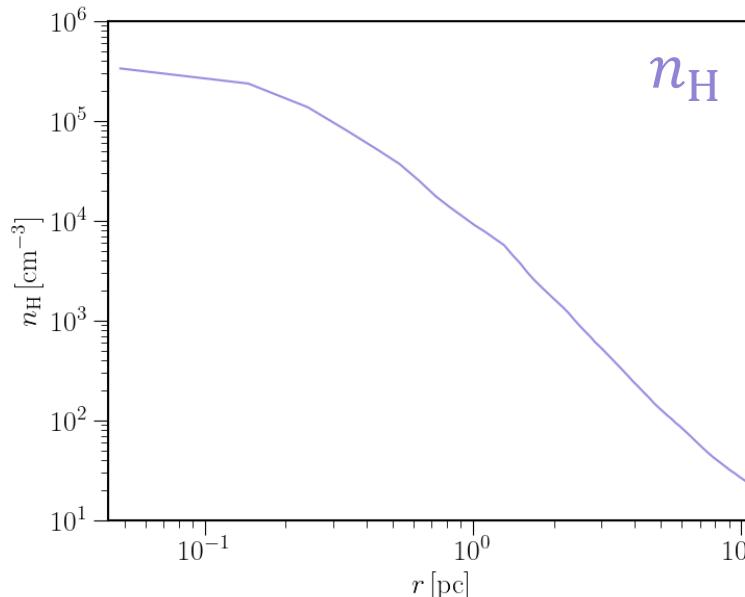
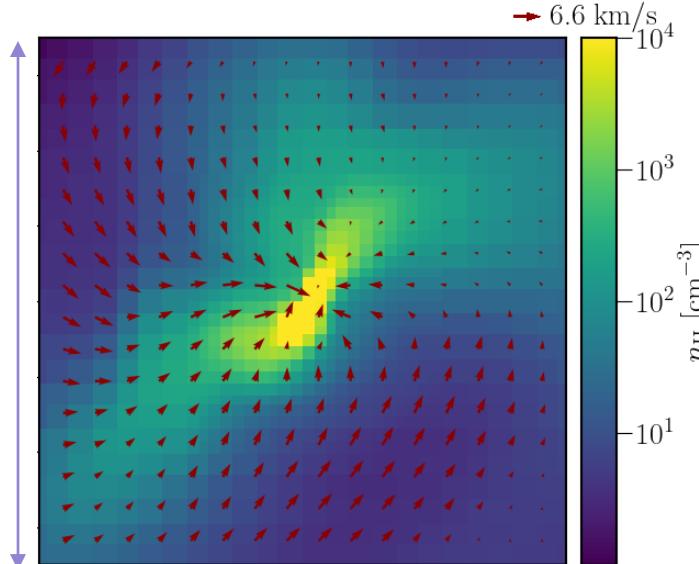
# Star formation region

多くのケースで正しく  $M_{\text{cloud}}$  を求め、星団質量を決定できた



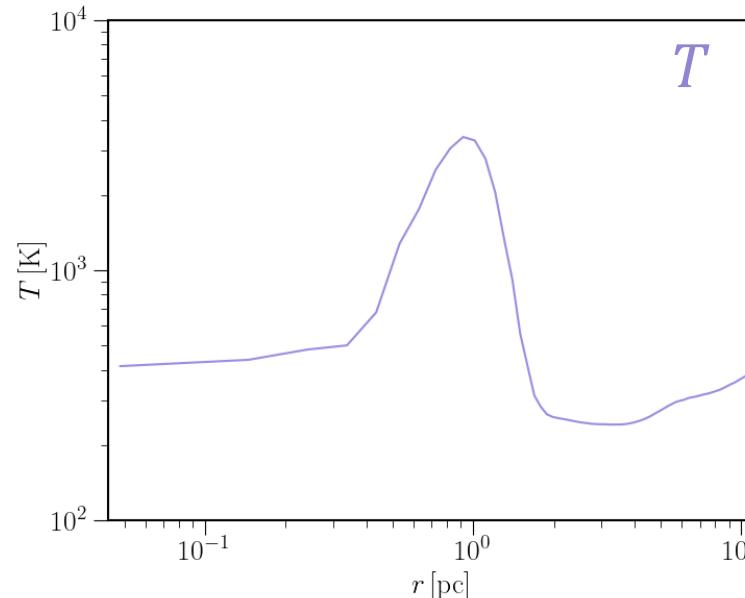
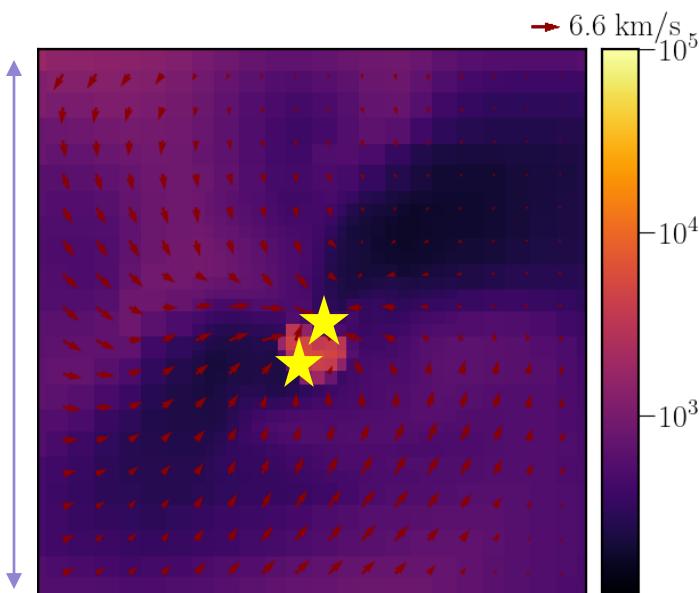
# 近傍での星形成がある場合 [1/2]

~10 pc



半径 1pc の距離に温度の高い領域

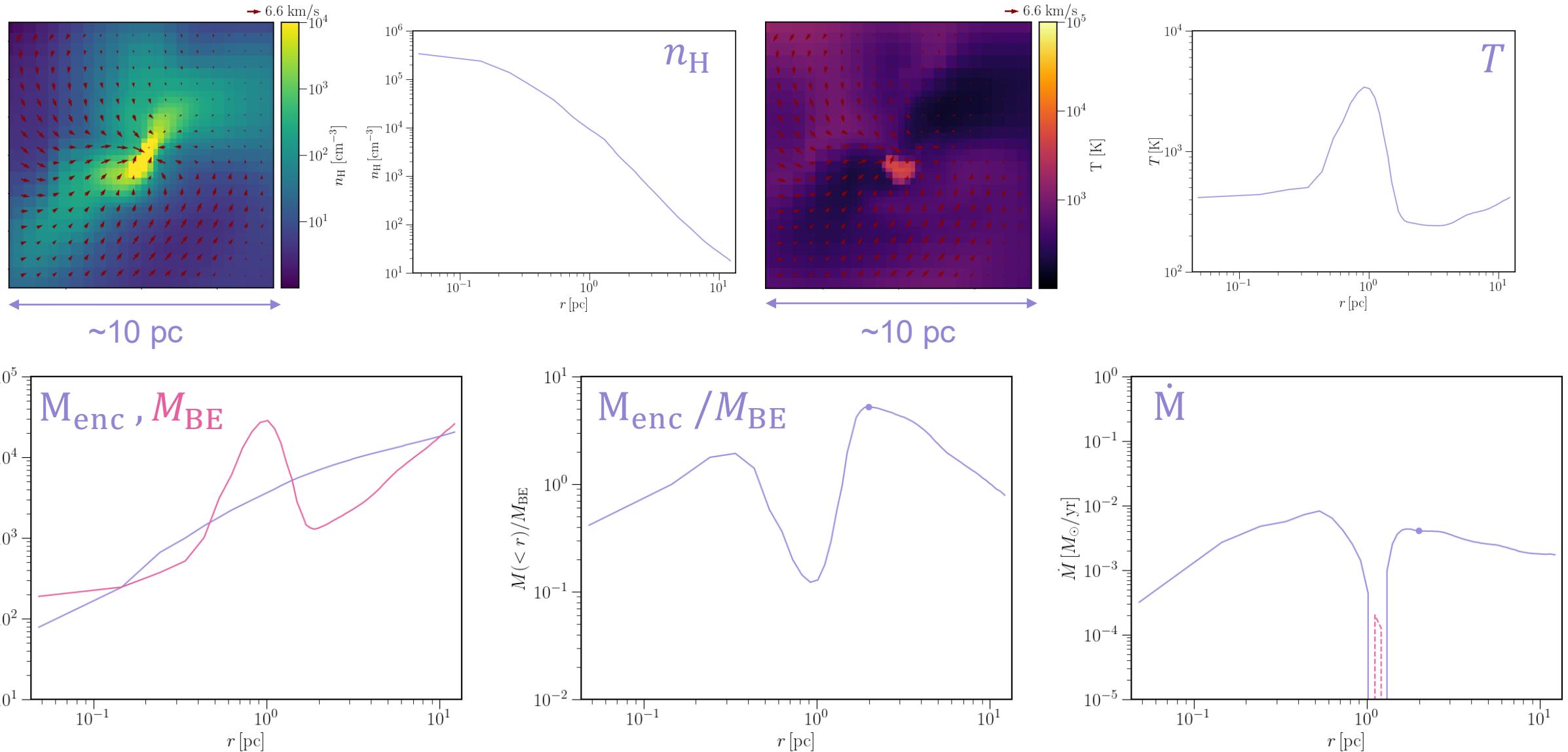
~10 pc



直前のステップで近傍に形成した  
初代星による、放射加熱の影響

# 近傍での星形成がある場合 [2/2]

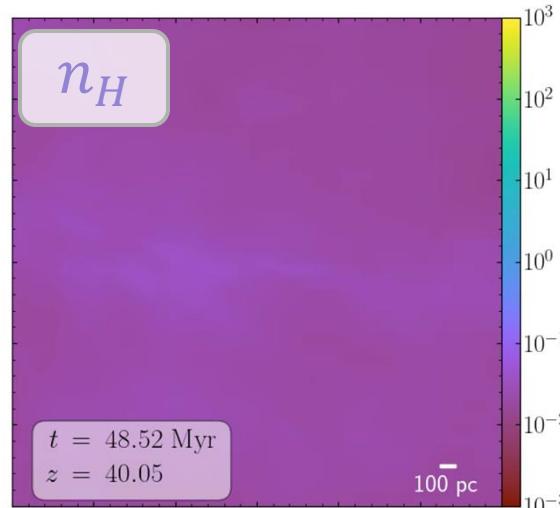
星形成が近くで起こらないような対応が必要



# 星形成史の初代星モデル依存性

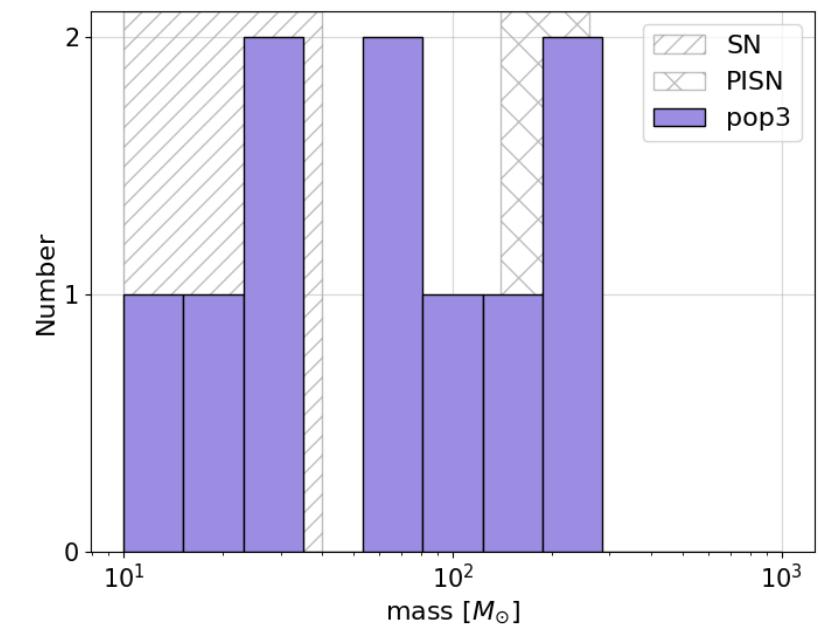
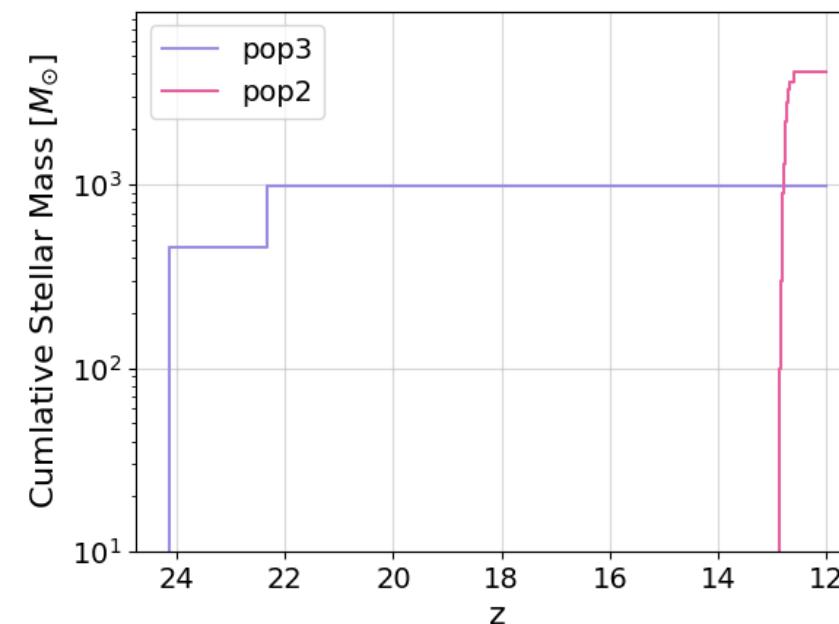
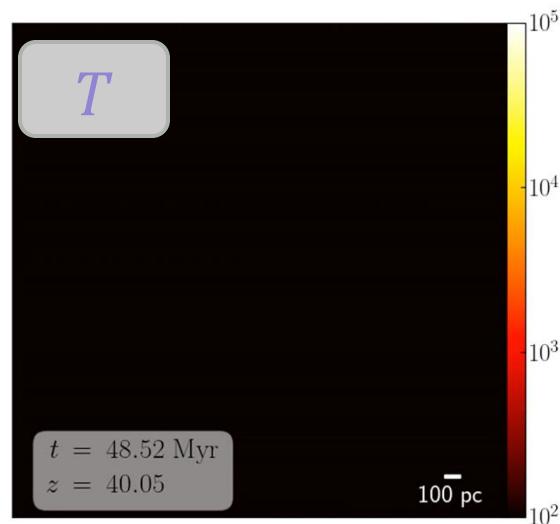
# $\dot{M}$ dep Multiple stars case

$M_{\text{popIII}} \propto \dot{M}_{\text{cloud}}^{0.7}$  で求めた星団を多重星に分けるモデル

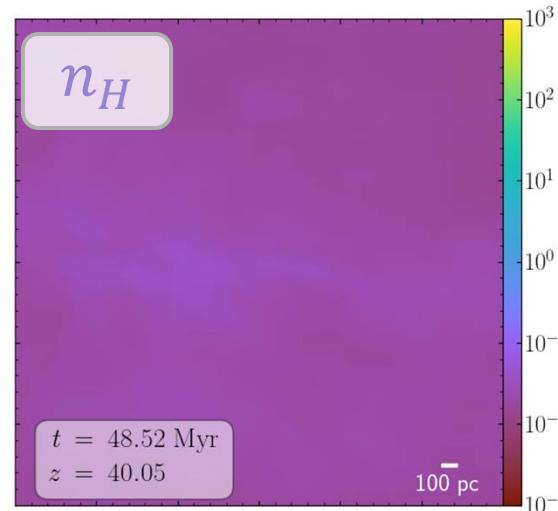


500  $M_{\odot}$  程度のPopIII星団が2回形成し、最終的に合計で $4 \times 10^3 M_{\odot}$  程度のPopIIが形成

PopIIIの質量分布も広い範囲に分散している

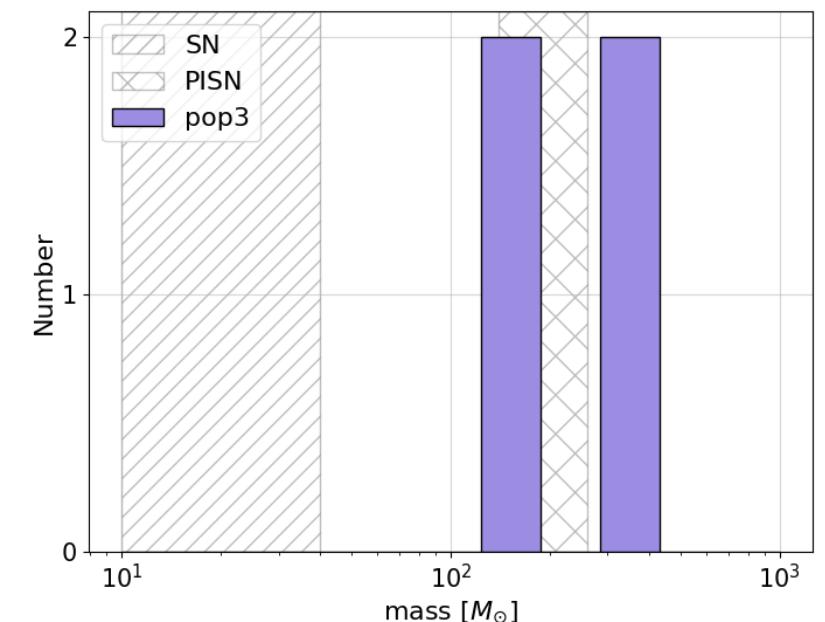
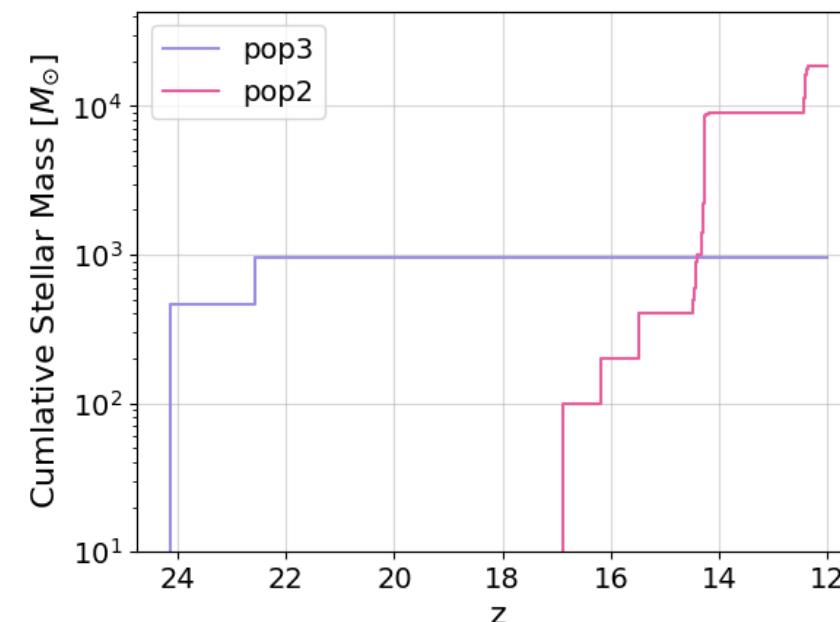
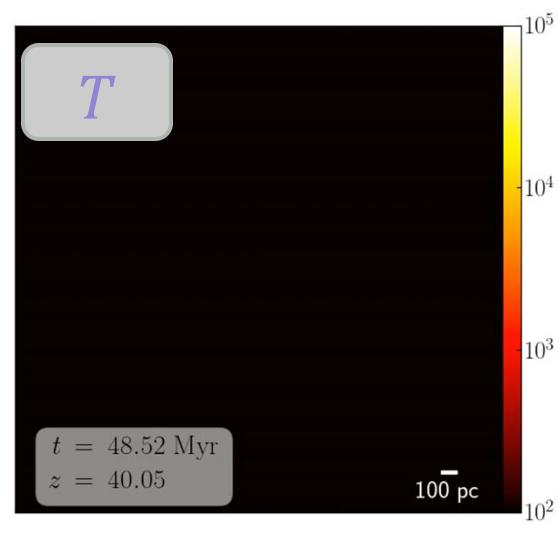


# $\dot{M}$ dep Binary stars case [1/2] $M_{\text{popIII}} \propto \dot{M}_{\text{cloud}}^{0.7}$ で求めた星団を連星に分けるモデル

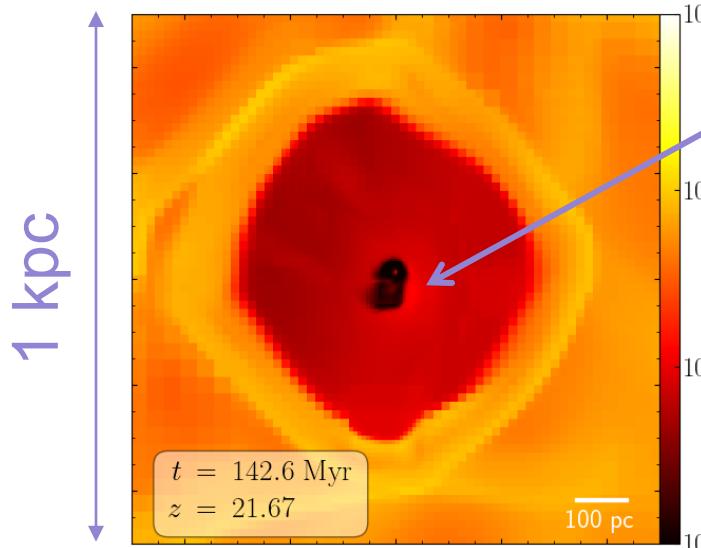


PopIII形成量は同程度も、PopII形成量が増加

BinaryにすることでPISN領域を超える星が増え、  
SNによるエネルギーが減少したため？



# $\dot{M}$ dep Binary stars case [2/2]

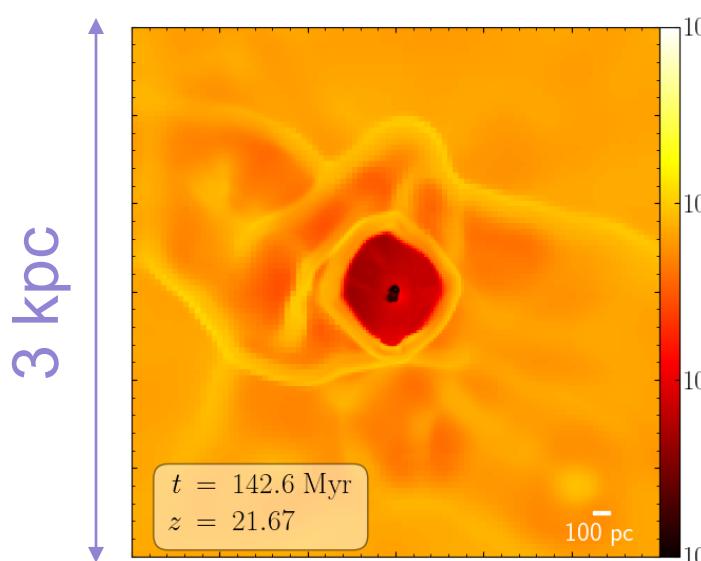


SNバブルの中心温度が意図せず下がっており、エネルギーが損失してしまっている可能性がある  
(SNバブルは本来は  $> \sim 10^5 \text{ K}$ )

現在は放出する質量を1セルに一気に注入する方法を取っているが、

$$\text{冷却率 } \Lambda \propto \rho^2, \quad \rightarrow \quad \text{冷却時間 } t_{\text{cool}} = \frac{E_{\text{thermal}}}{\Lambda} \propto \rho,$$

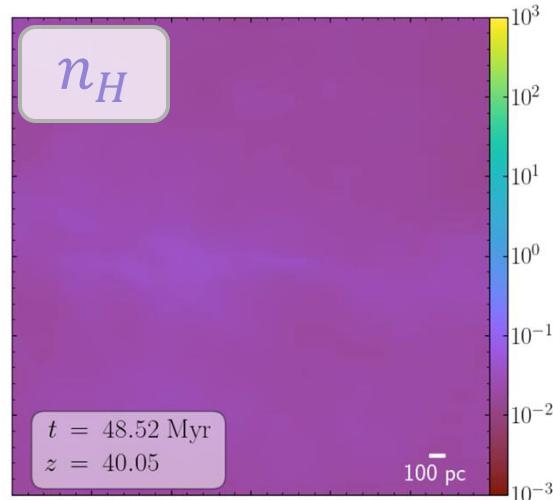
であり、一気に大きな質量が注入され密度が上昇したセルでは、エネルギーが急速に損失してしまう可能性がある



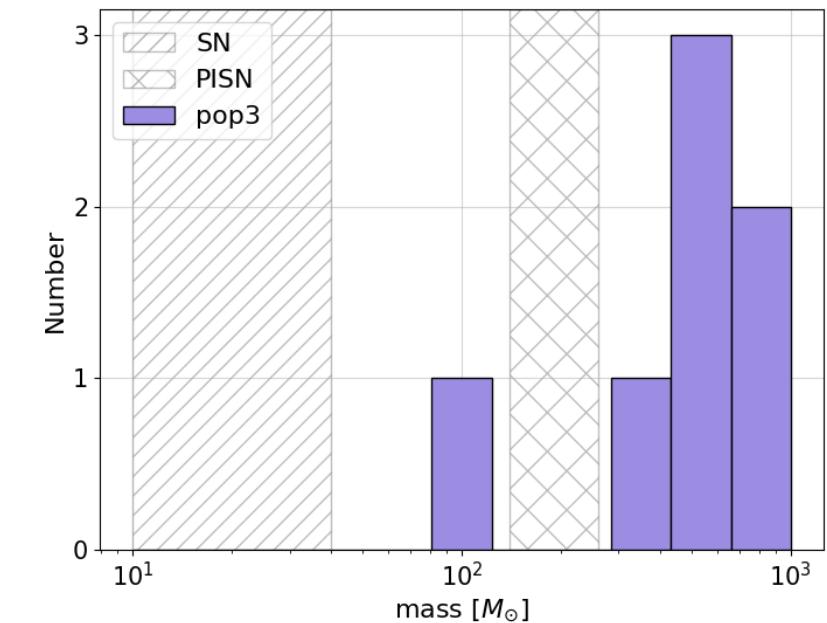
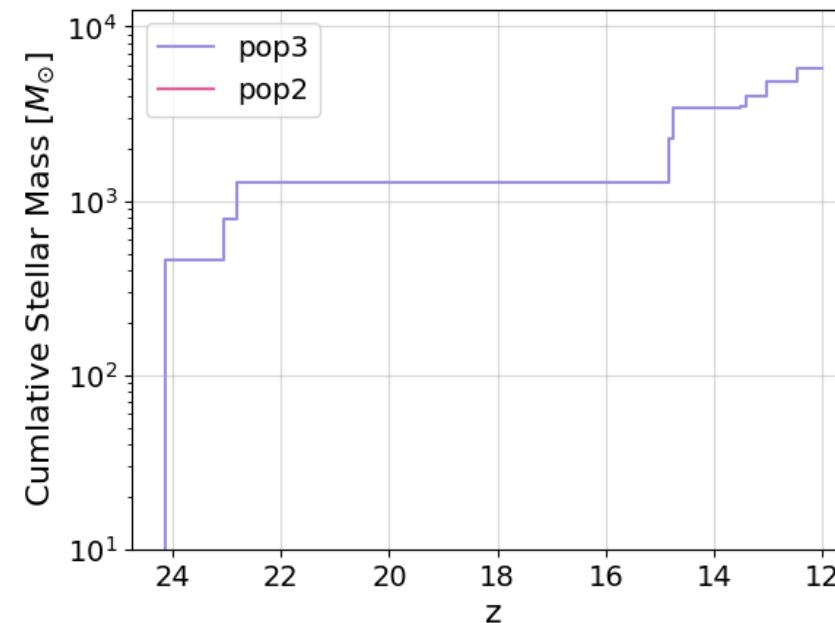
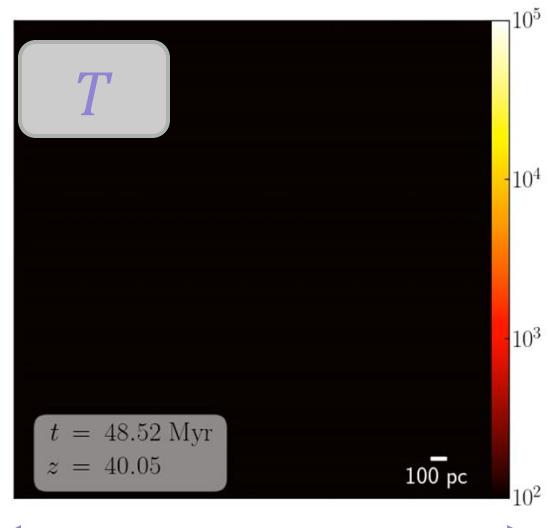
複数セルに質量を注入するなどして、SNによる質量注入の方法を改善する必要性がある

# $\dot{M}$ dep Single star case

$M_{\text{popIII}} \propto \dot{M}_{\text{cloud}}^{0.7}$  で求めた星団を单一の星とするモデル



すべての星が爆発せず、金属汚染が進まないため、  
popII形成が起きず、PopIIIが形成され続けた

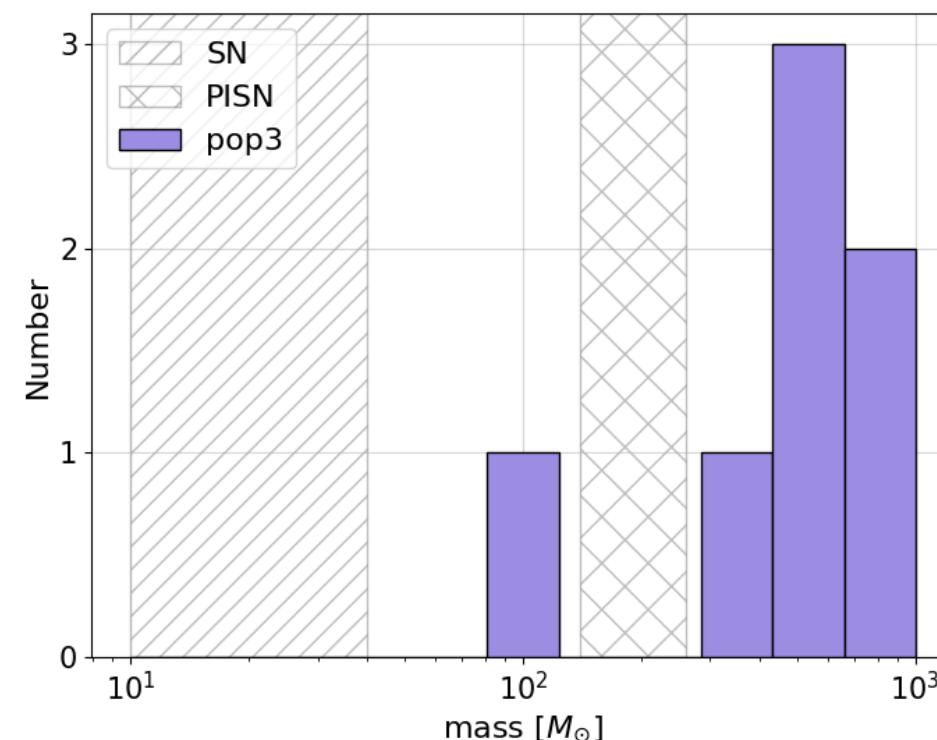
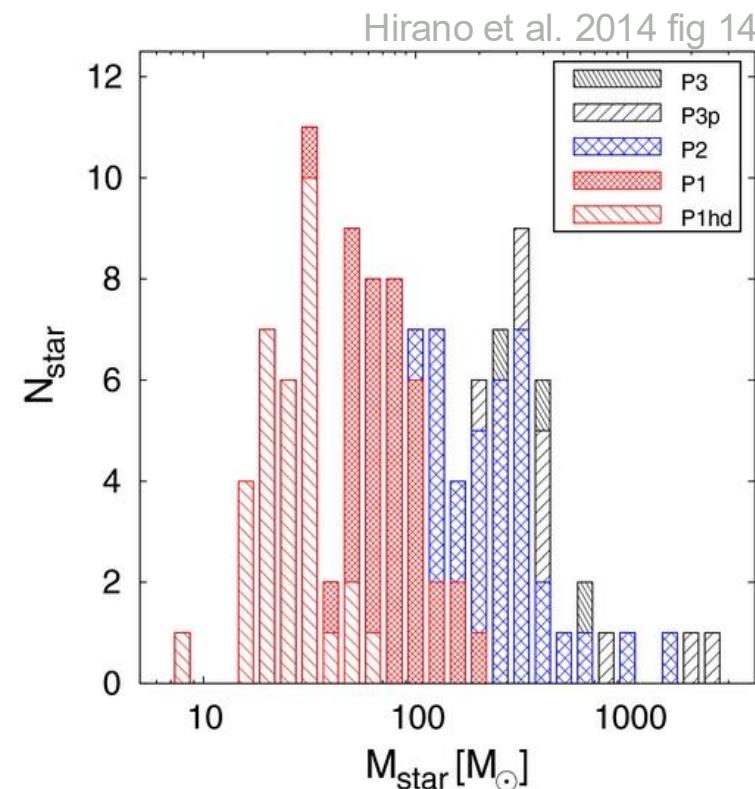


# Hirano et al. 2014との比較

爆発しないほど重たい星形成はHirano et al. 2014でも形成

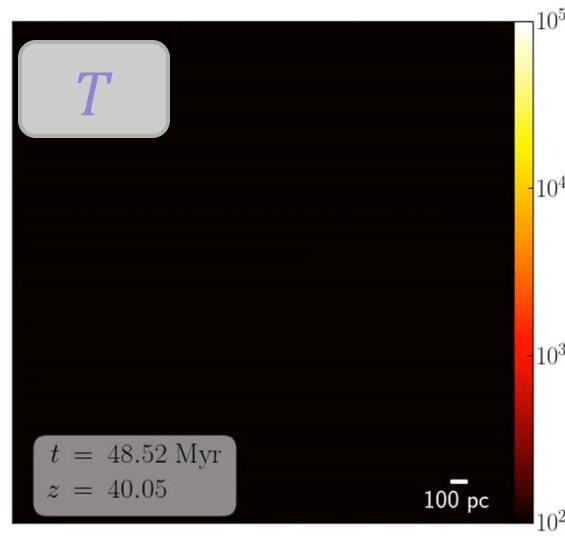
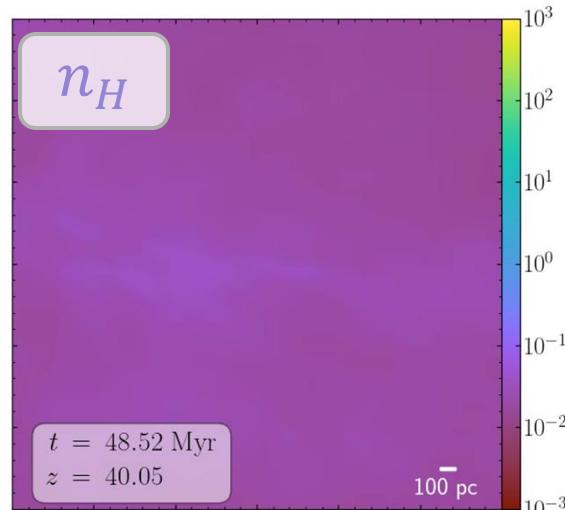
現在計算しているハローはシミュレーションボックスの中で最も重たいハロー  
→ガス降着が多く、重たい星ができやすい

より小さいハローでは軽い星も形成して金属汚染が進む可能性もある



# Fixed Binary stars case

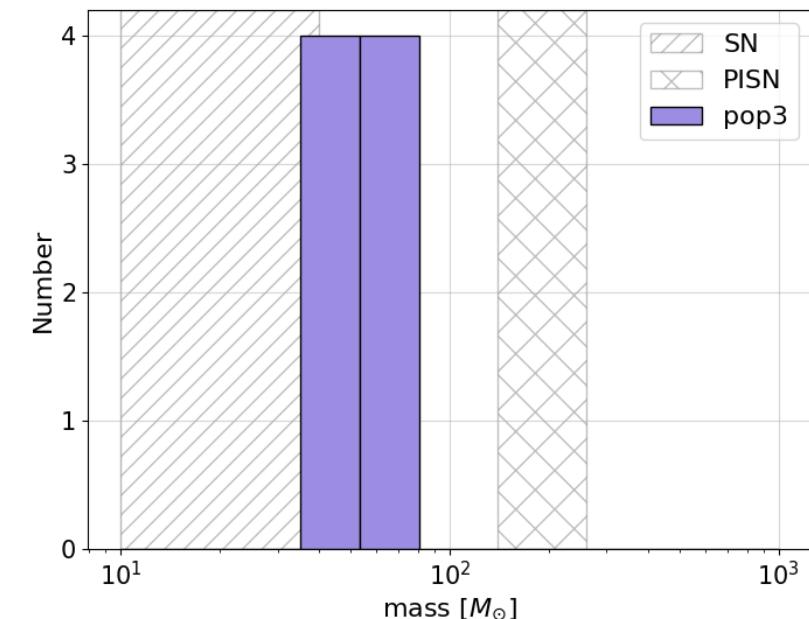
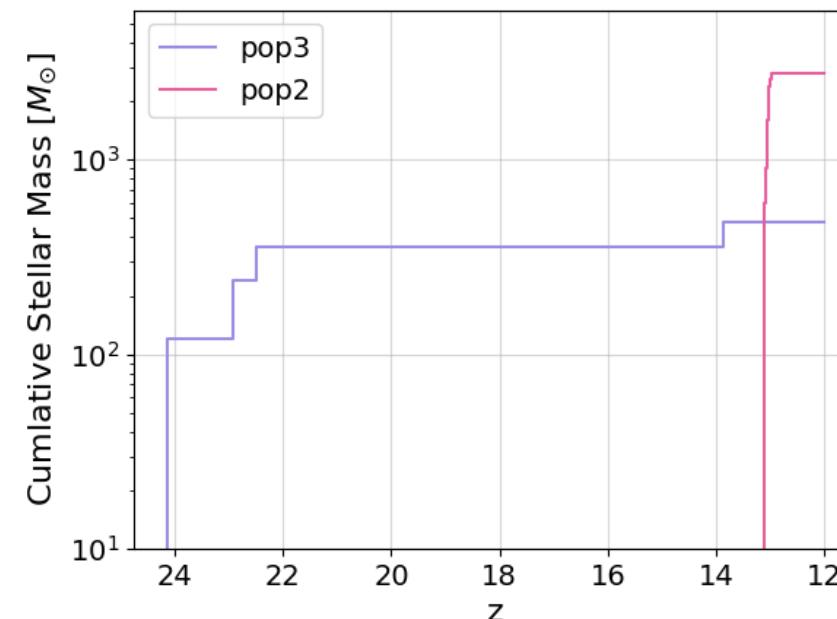
環境に依存せず、固定値 $40M_{\odot} + 80M_{\odot}$ の連星を作るモデル



$\dot{M}$  dep Multiple stars の場合と比較して PopIII 質量がかなり少ない

→ 今回のような大きめのハローでは、 $120M_{\odot}$  の連星という見積もりは過小評価

にもかかわらず、最終的な PopII 総質量はほぼ同じ



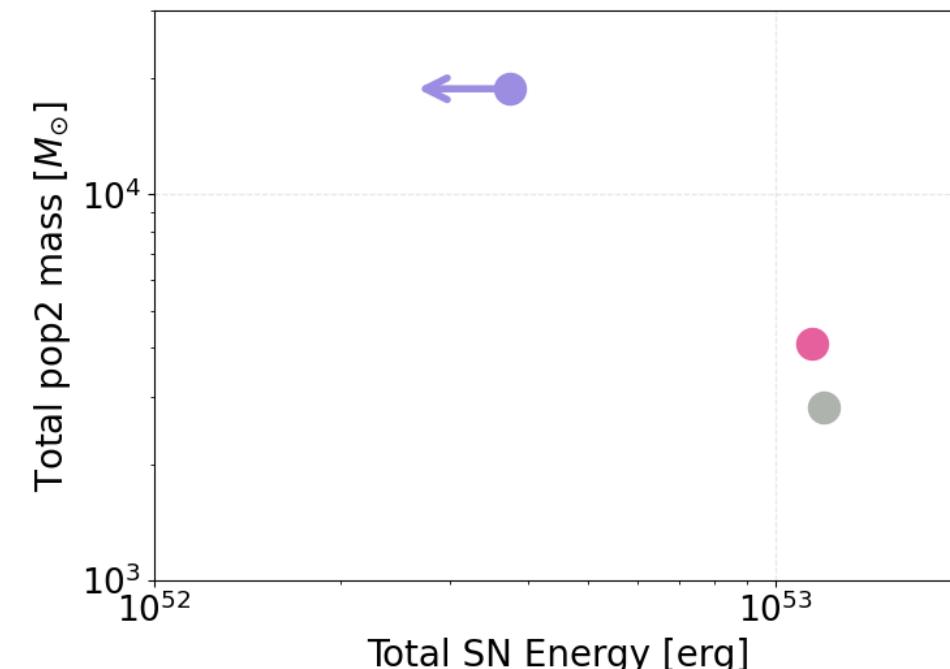
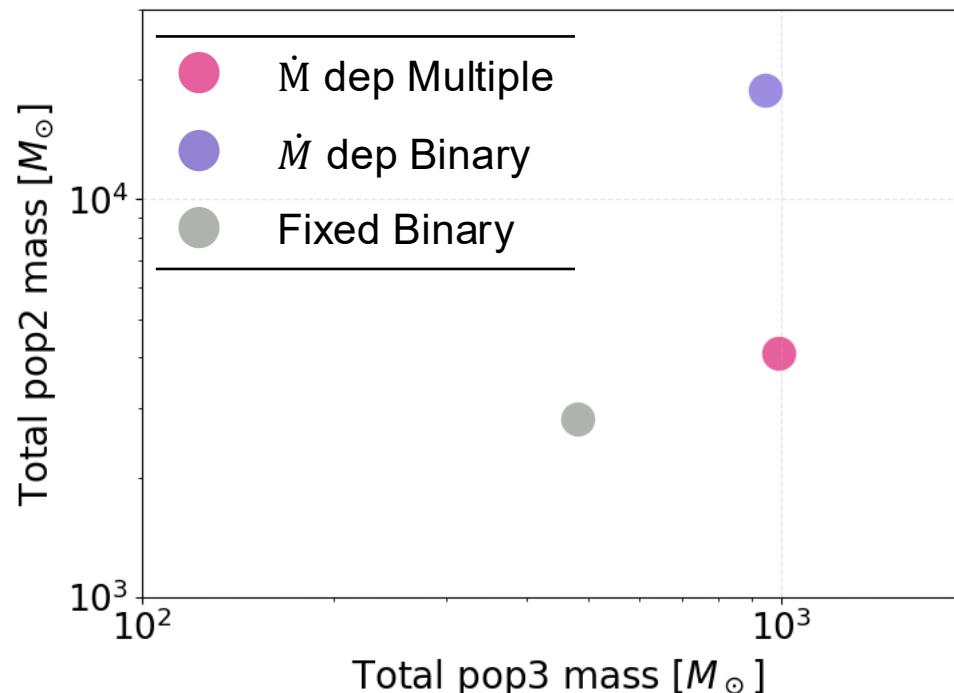
## PopII形成量のモデル依存性

PopII形成量はSNによるエネルギーが大きく寄与している

● (環境依存・連星)は、 ● (環境依存・多重連星) と比較してPopIII 形成量はほぼ同じであるが、 SNによるエネルギーが小さいため、 PopII総質量は増加

● (固定質量・連星)は、 ● (環境依存・多重連星) と比較してPopIII形成量は少ないが、 SNによるエネルギーが同程度のため、 PopII総質量も同程度

フィードバックが大きい方がPopII形成量が減少するというAbe et al. 2021の結果とも矛盾しない



# Summary & Future Work

---

## Summary

- 初期宇宙における天体形成を正しく理解するため、Hirano et al 2014, 2015に基づいた環境依存初代星形成モデルの構築を行った。
- ほとんどの星団ではモデルから正しく質量を決定できたが、近傍で星形成が起こる場合には正しくモデルが適用できない場面があった。
- 最終的に形成されるPopII形成質量は、SNによるエネルギー注入量が寄与していることを確認できた。

## Future Work

- 統計的な理解のためハローのサンプルを増やす
- 今より初代星ができるような大きなハローに対する計算を行う
- シミュレーションにおける意図しない挙動の修正
- Hirano et al. 2014では考慮されていた、HD冷却の追加