

初代星・初代銀河研究会2023 @ 北海道大学

星団形成における星風の影響

福島 肇

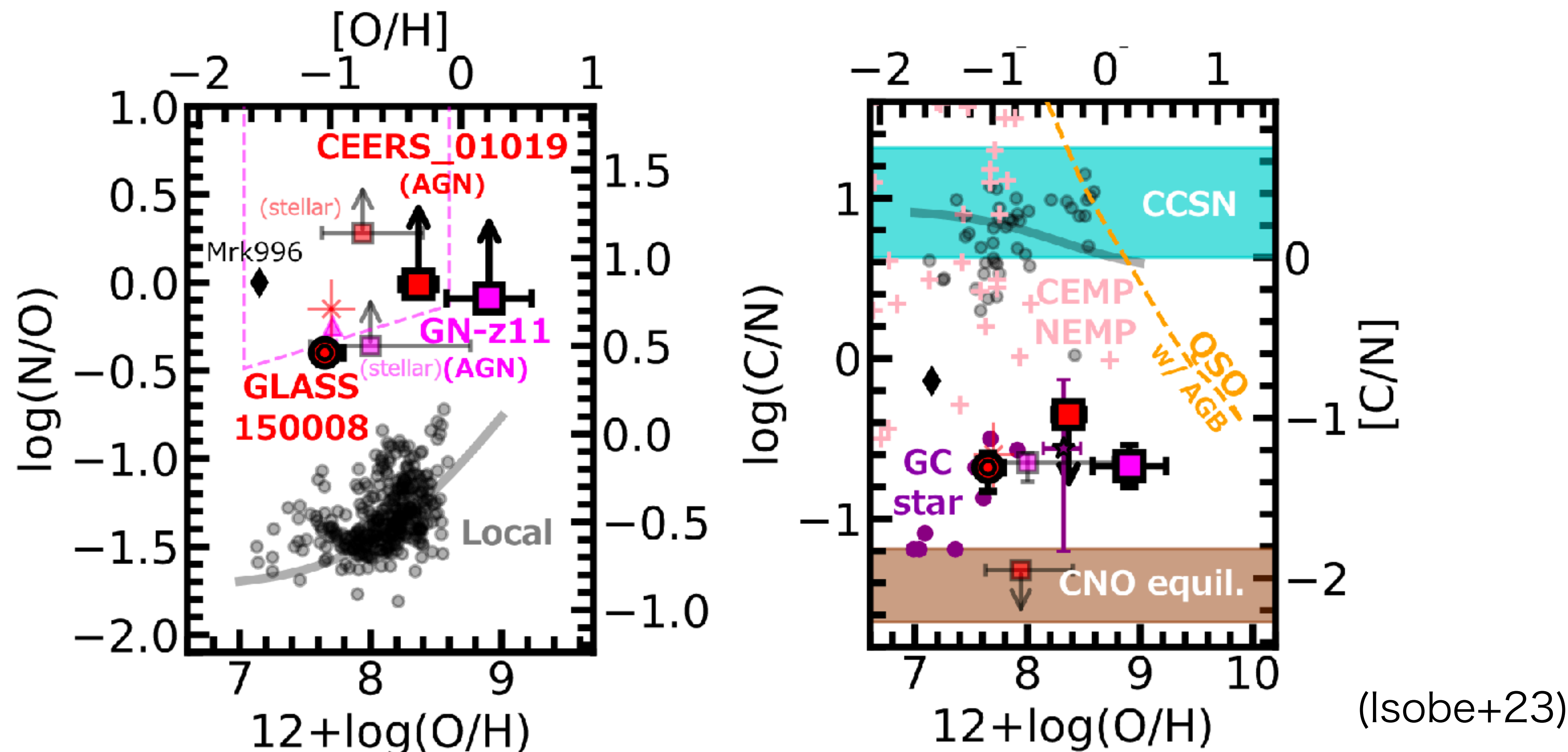
(筑波大学 計算科学研究センター)



筑波大学
計算科学研究センター
Center for Computational Sciences



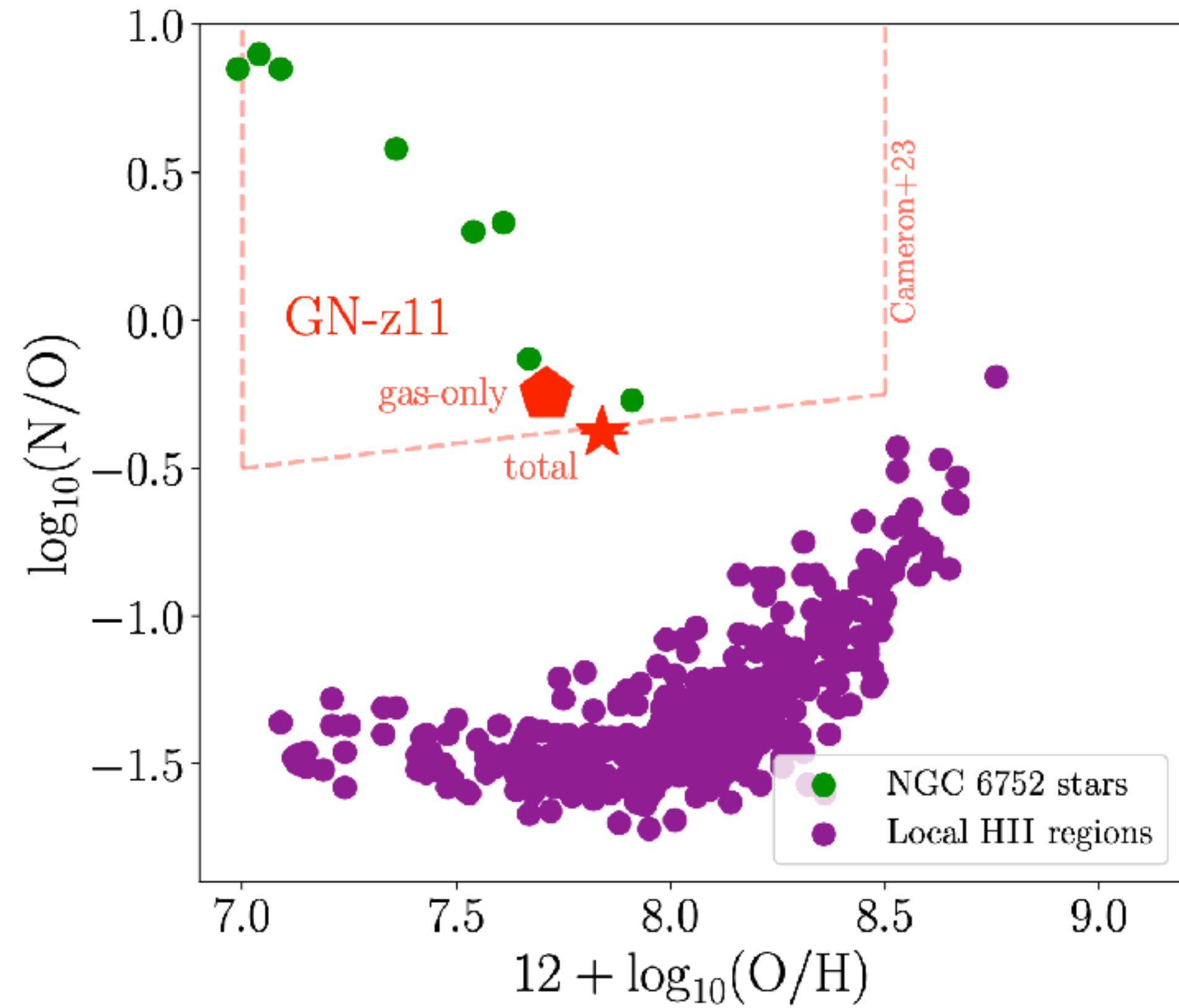
窒素が豊富な銀河の発見 (Harikaneさんのレビュー)



窒素が豊富なhigh-z 銀河が見つかりつつある

(e.g., Bunker+23, Cameron+23, Senchyna+23)

球状星団との関連



(Senchyna+23)

大質量 ($\geq 10^5 M_{\odot}$)

古い星団 (≥ 10 Gyr)

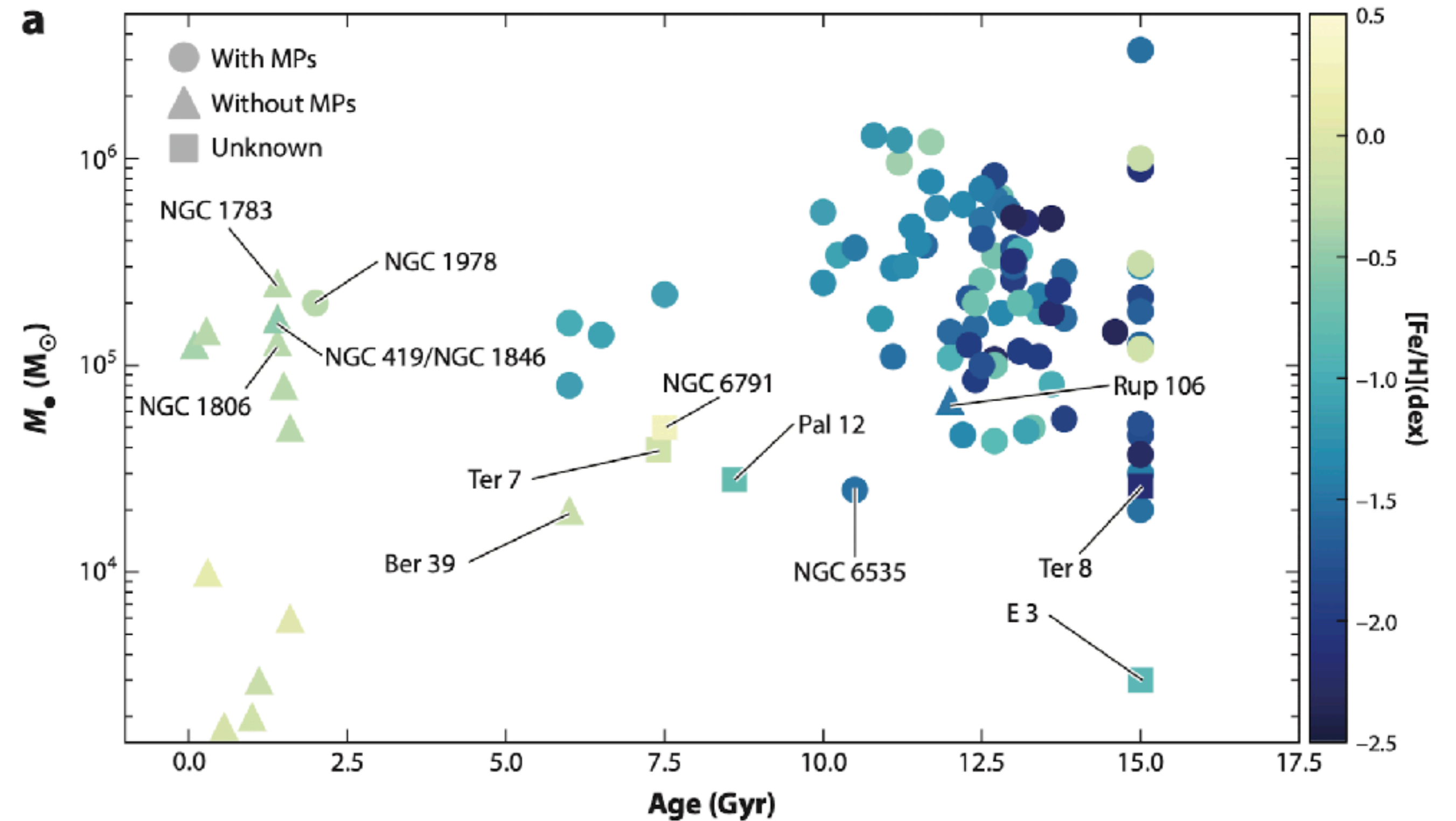
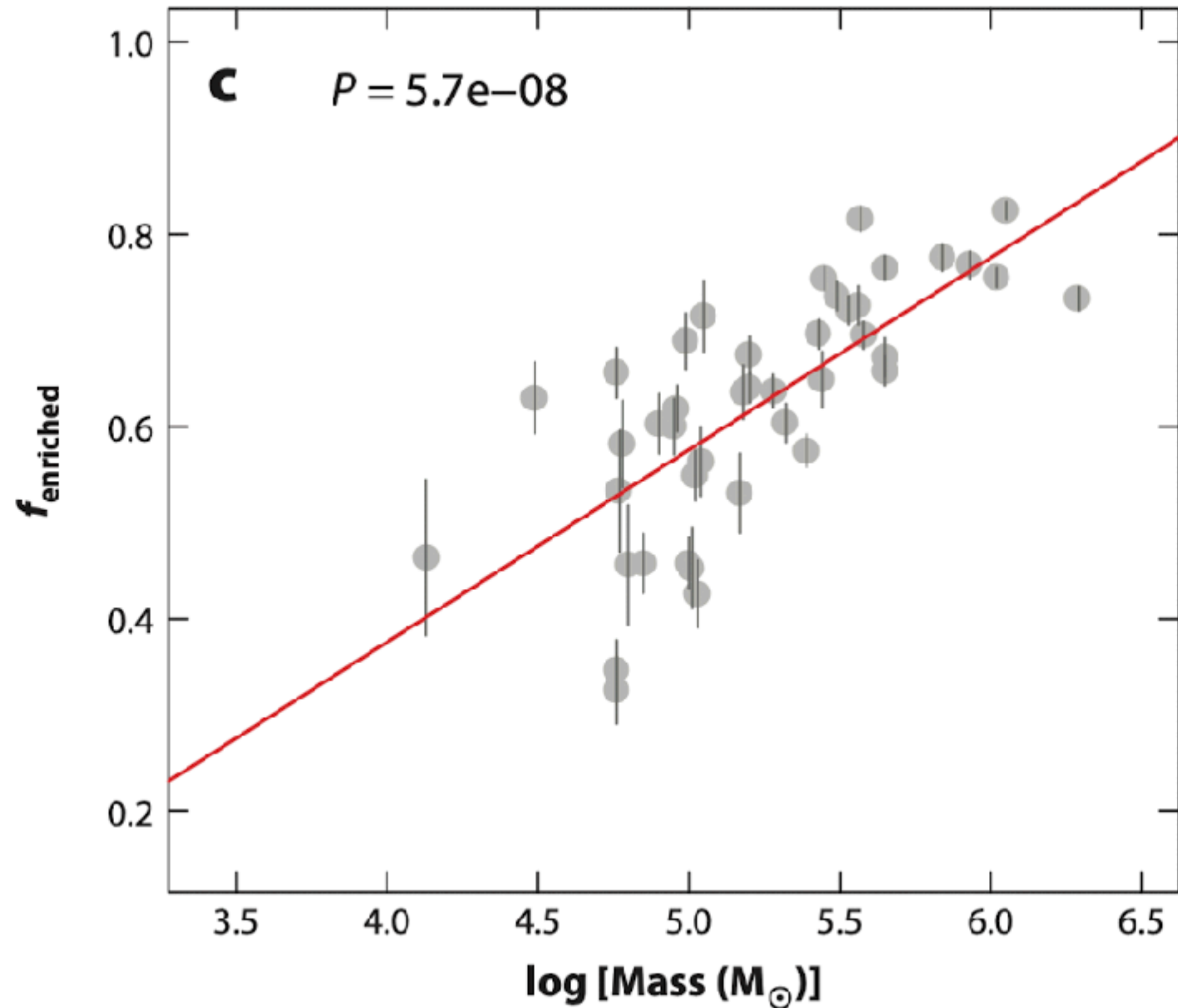
高密度 ($\geq 10^3 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$)

形成シナリオはまだ確立していない

[N/O]は球状星団に類似していることから球状星団の形成現場である可能性がある？

球状星団との関連

星質量と化学分布の異なる星質量の割合



(Bastian & Lardo 18)

星団質量増で、第二世代の星質量割合も増

2Gyr以下の若いものでは第二世代は発見されていない

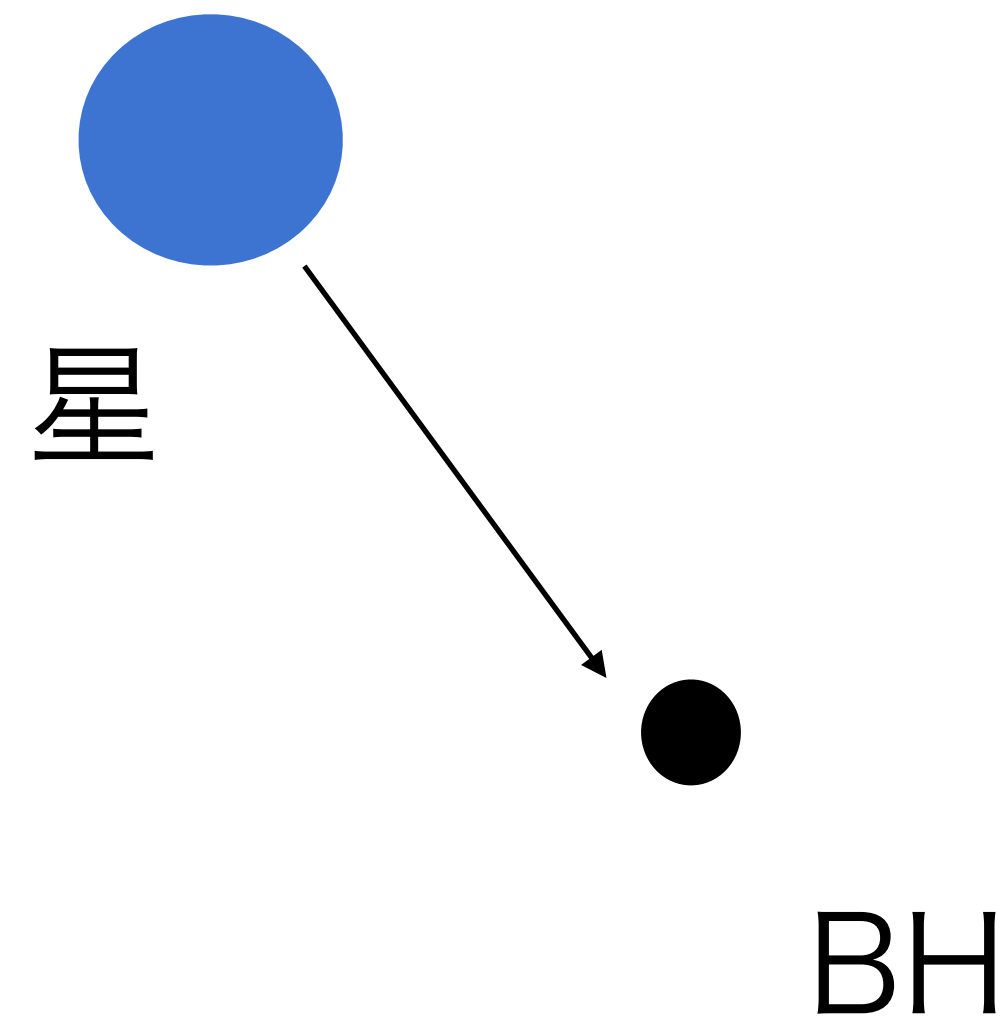
窒素の起源 (Isobe+23)

3つのシナリオ

① Wolf-Rayet星

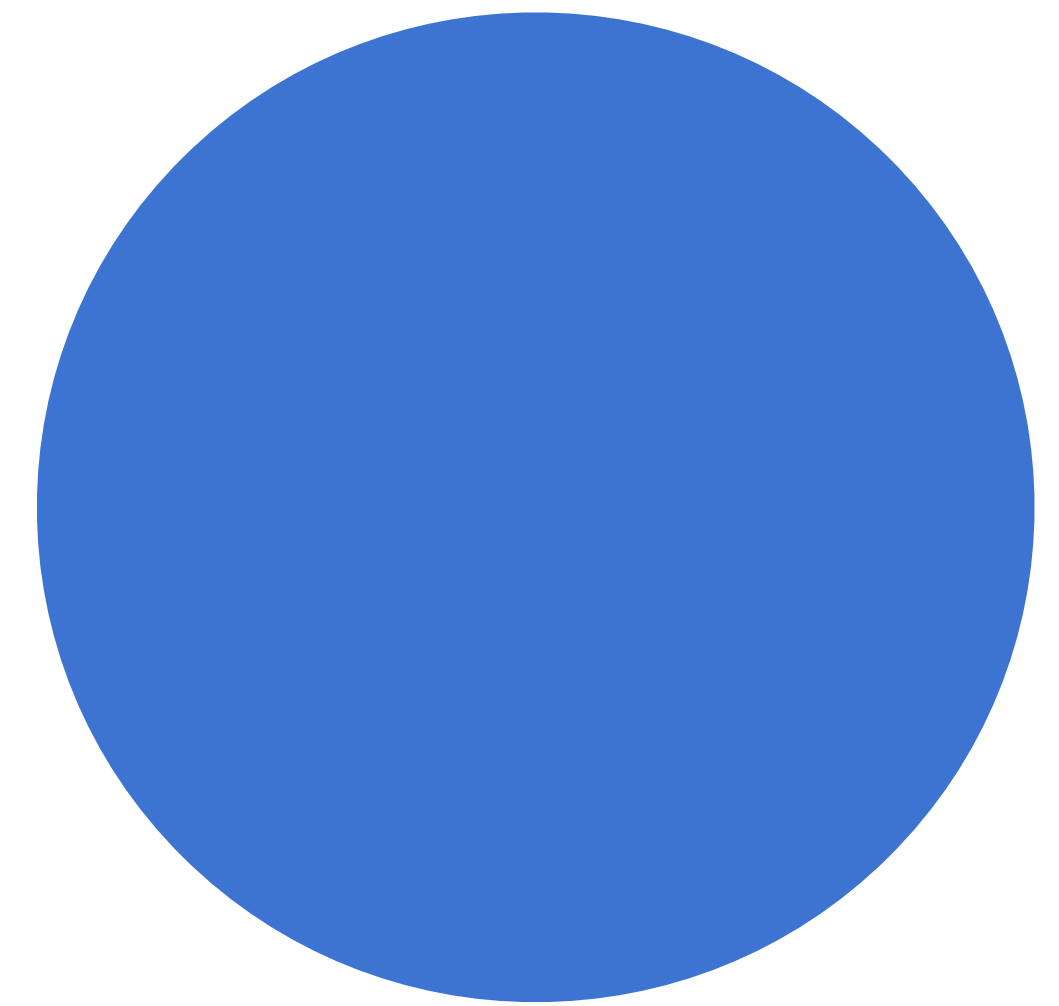


② Tidal disruption event



(Cameron+23, Watanabe+23)

③ 超大質量星



$$M_* > 1000 M_{\odot}$$

(Charbonnel+23)

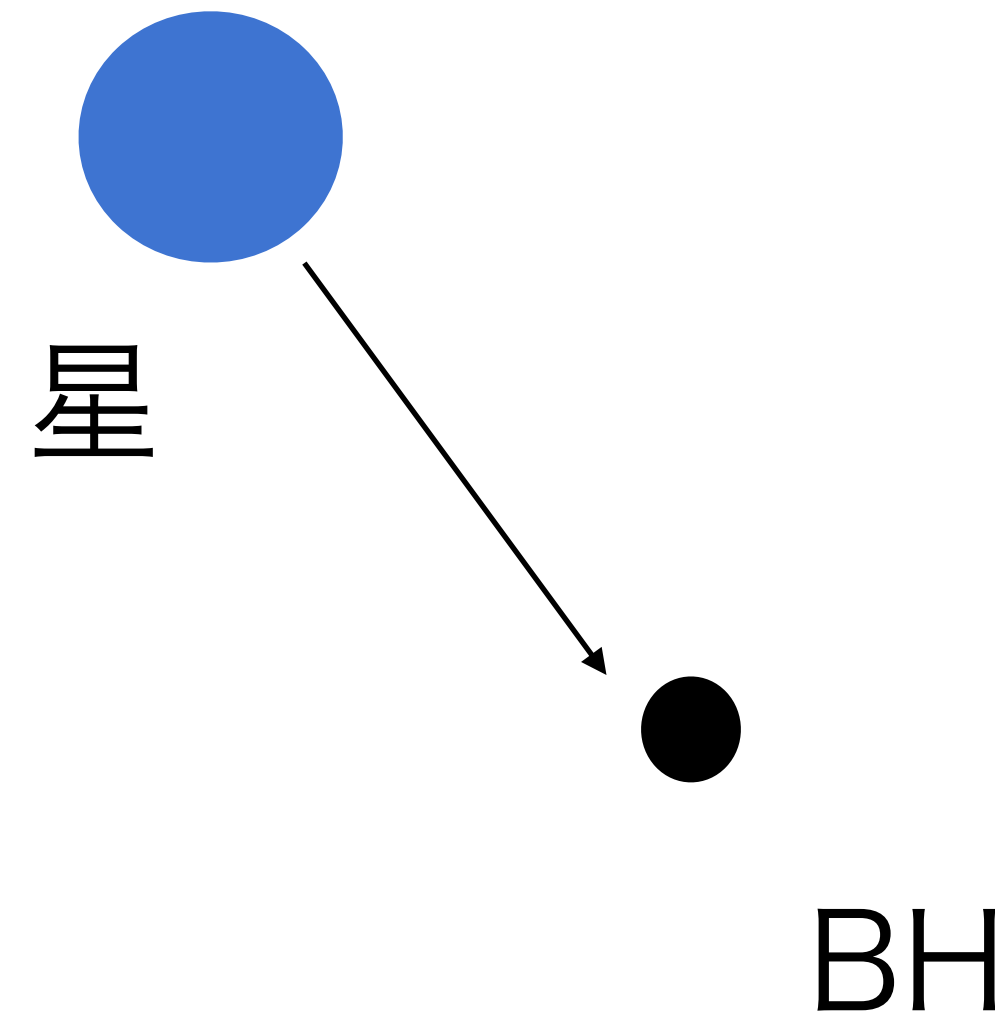
窒素の起源 (Isobe+23)

3つのシナリオ

① Wolf-Rayet星

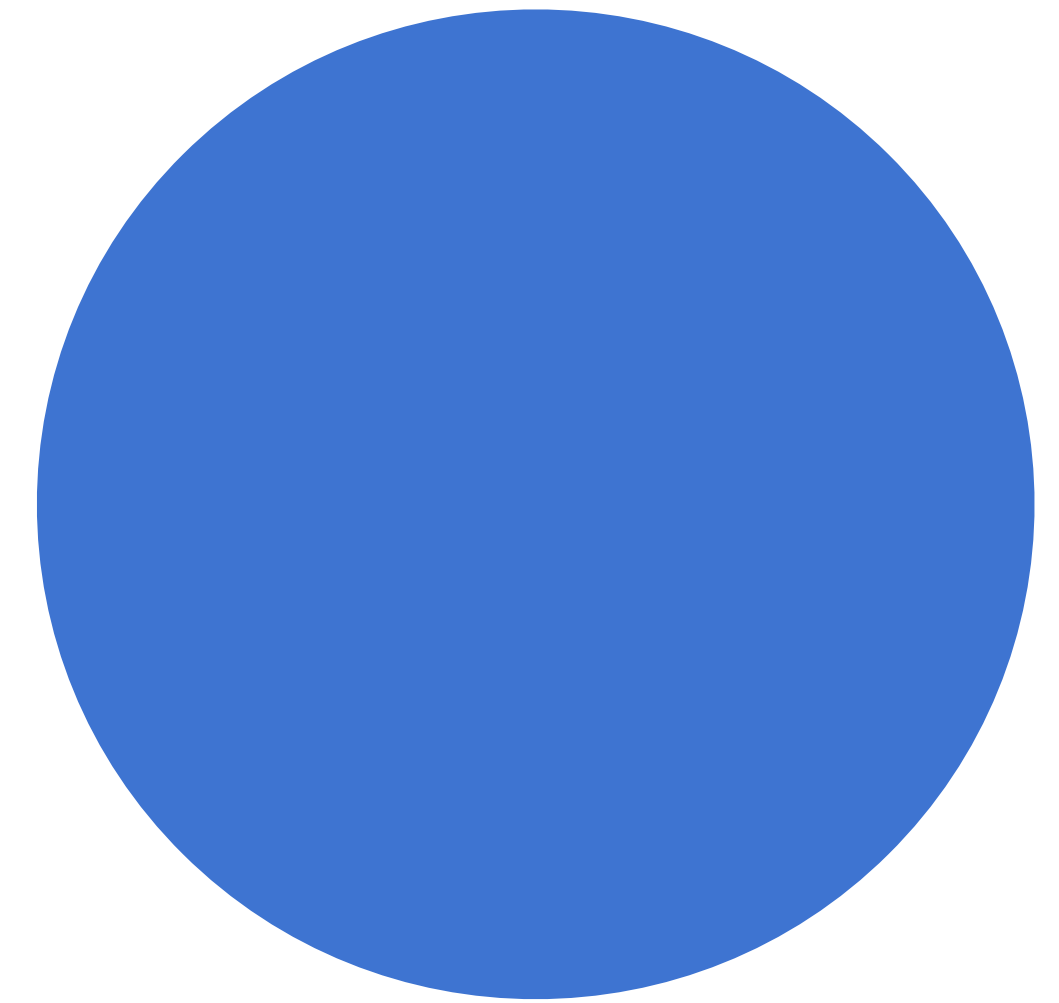


② Tidal disruption event



(Cameron+23, Watanabe+23)

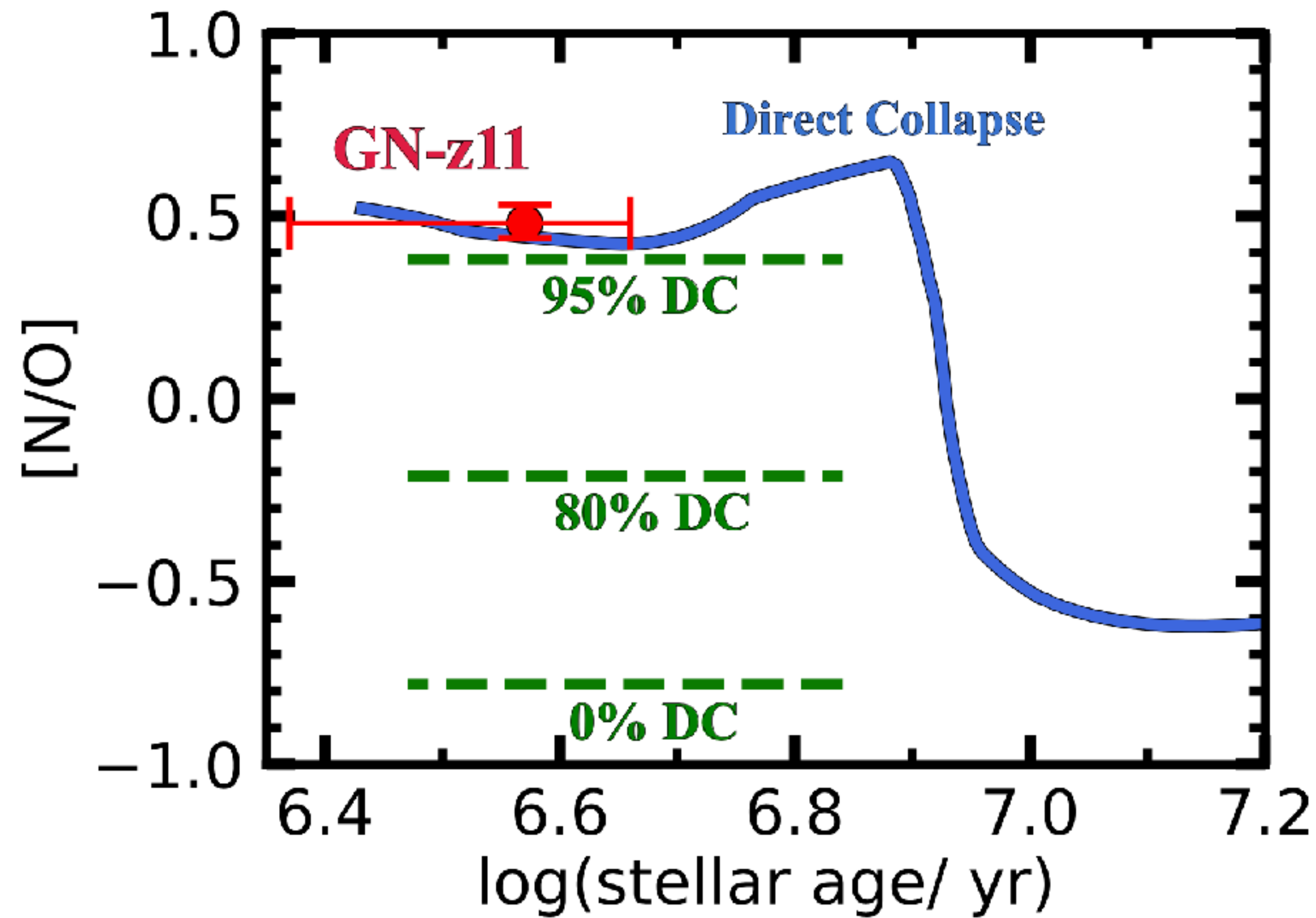
③ 超大質量星



$M_* > 1000 M_{\odot}$
(Charbonnel+23)

Wolf-Rayet星からの星風による効果を考慮する。

窒素の起源 Walf-Rayet モデル



(Watanabe+23)

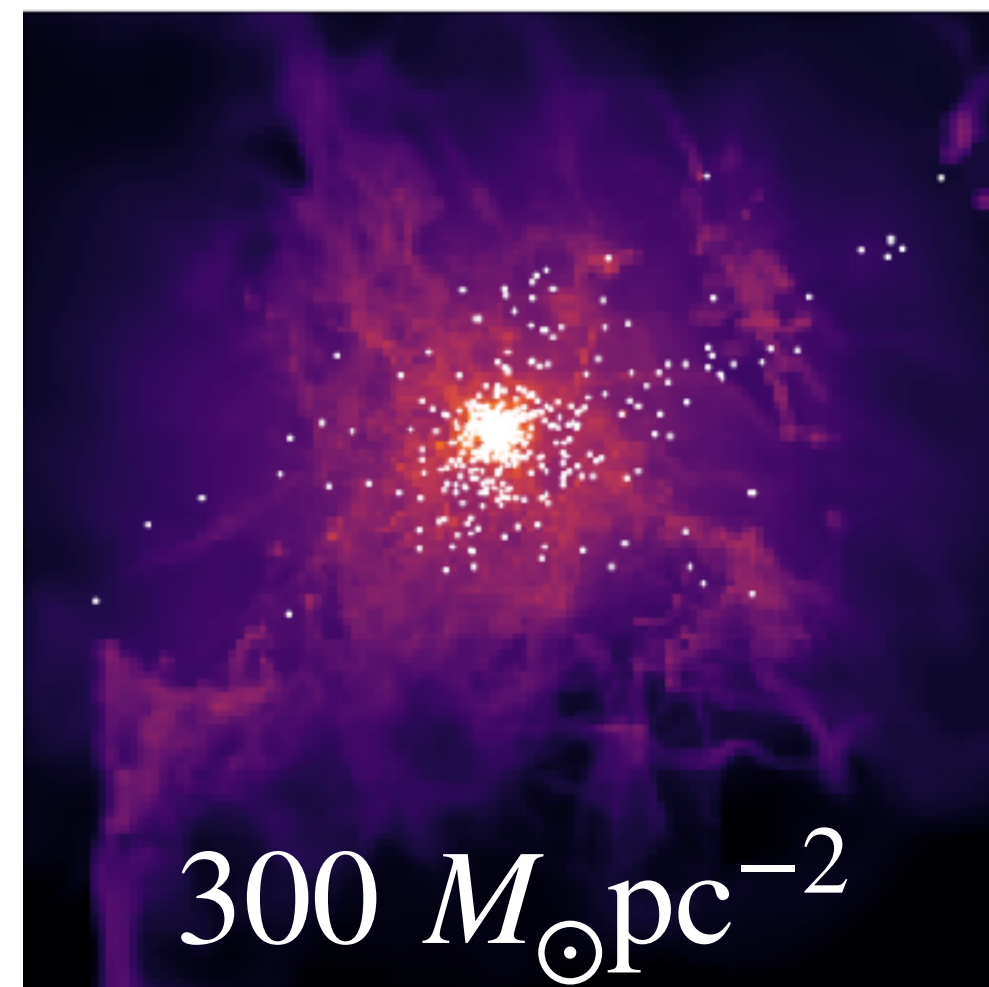
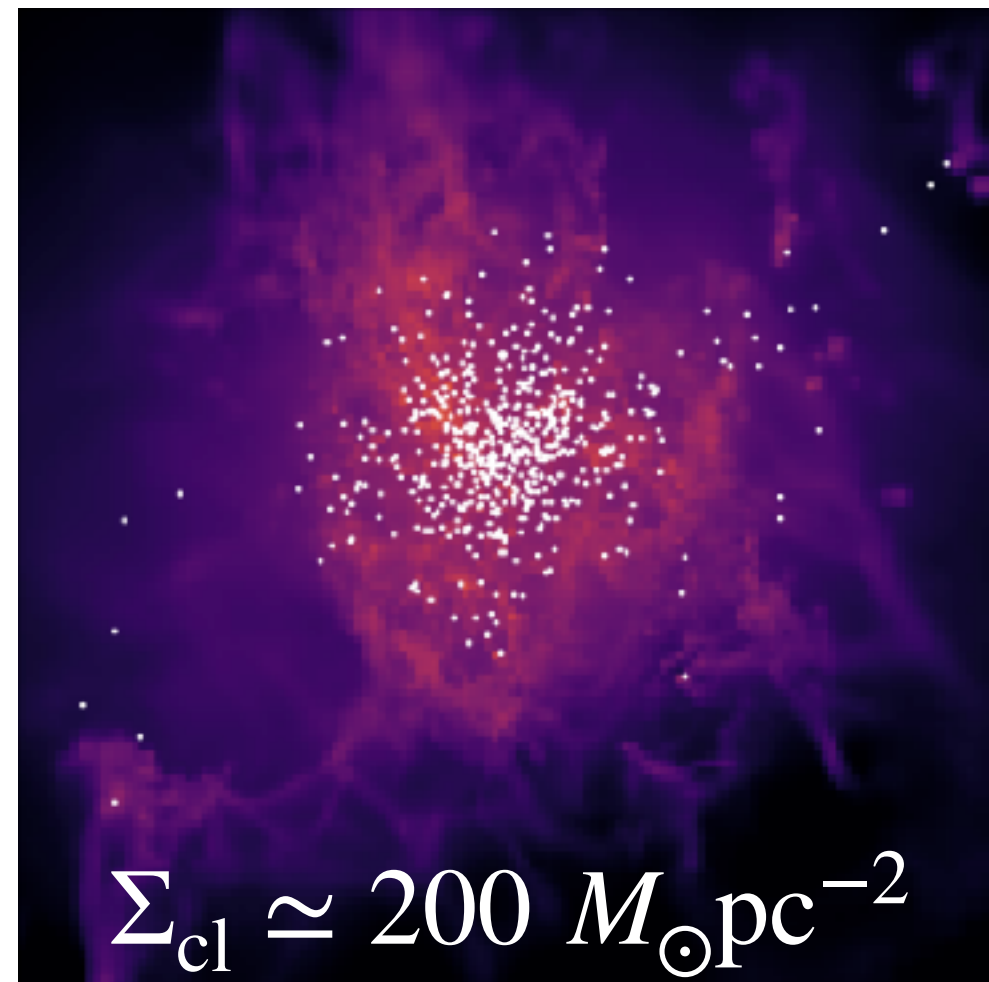
酸素は超新星爆発により主に供給される。

もしある程度大質量な星(図では $> 25 M_{\odot}$)が超新星爆発を起こさない場合、N-richな環境となる可能性がある。

(Limongi & Chieffi 2018)

星団形成における星風による金属供給

条件1: 大質量・高密度星団が誕生する



雲面密度: $\Sigma_{\text{cl}} = (\text{雲質量})/(\pi \text{半径}^2)$

$$\Sigma_{\text{cl}} > \Sigma_{\text{thr}} = 750 M_{\odot} \text{pc}^{-2} \left(\frac{\epsilon_{\text{ff}}}{0.03} \right)^{2/5} \left(\frac{M_{\text{cl}}}{10^6 M_{\odot}} \right)^{-1/5} \\ \times \left(\frac{T_{\text{i}}}{2.5 \times 10^4 \text{ K}} \right)^{28/25} \left(\frac{s_{*}}{1.1 \times 10^{47} M_{\odot}^{-1} \text{s}^{-1}} \right)^{2/5} .$$

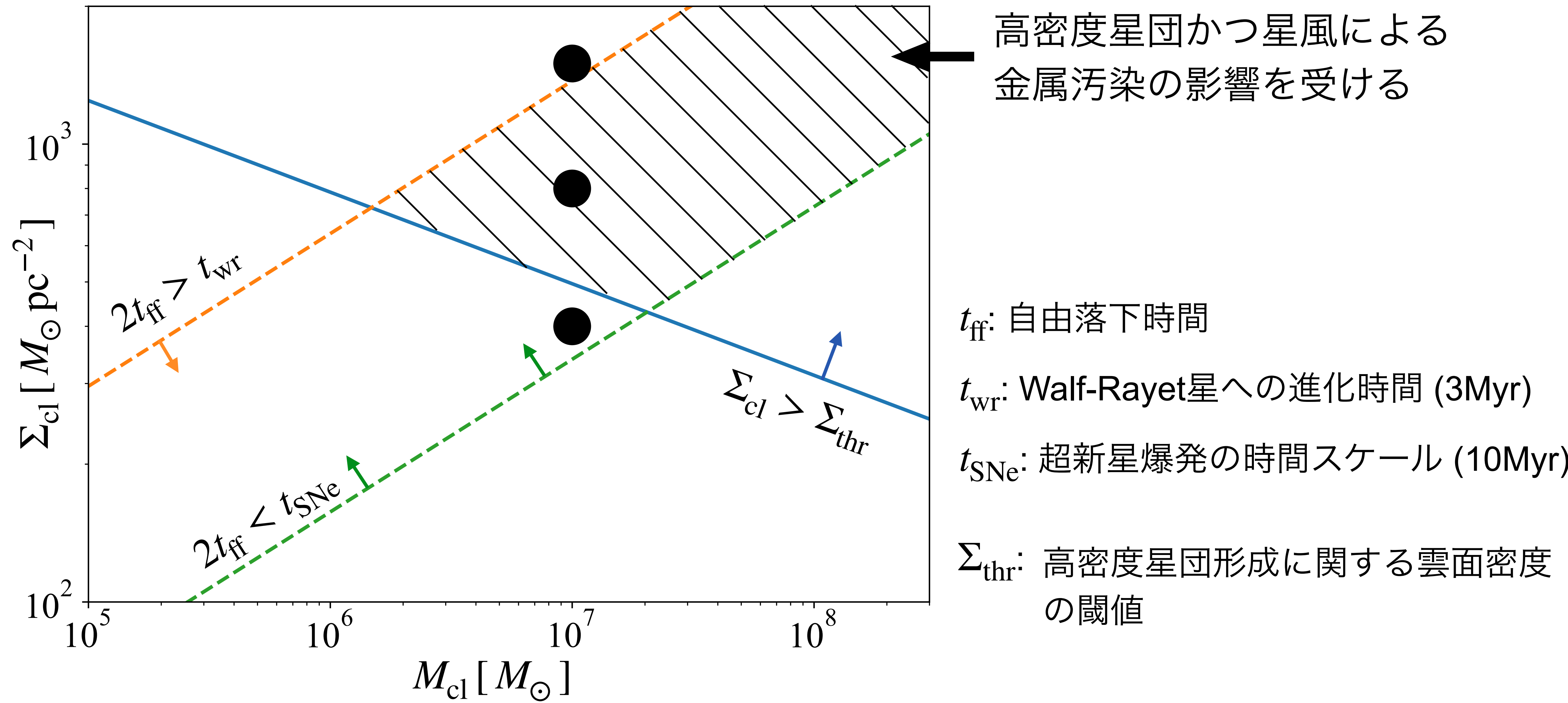
M_{cl} : 雲質量, T_{i} : 電離ガス温度, s_{*} : 電離光子放出率

(HF & Yajima 21, 23)

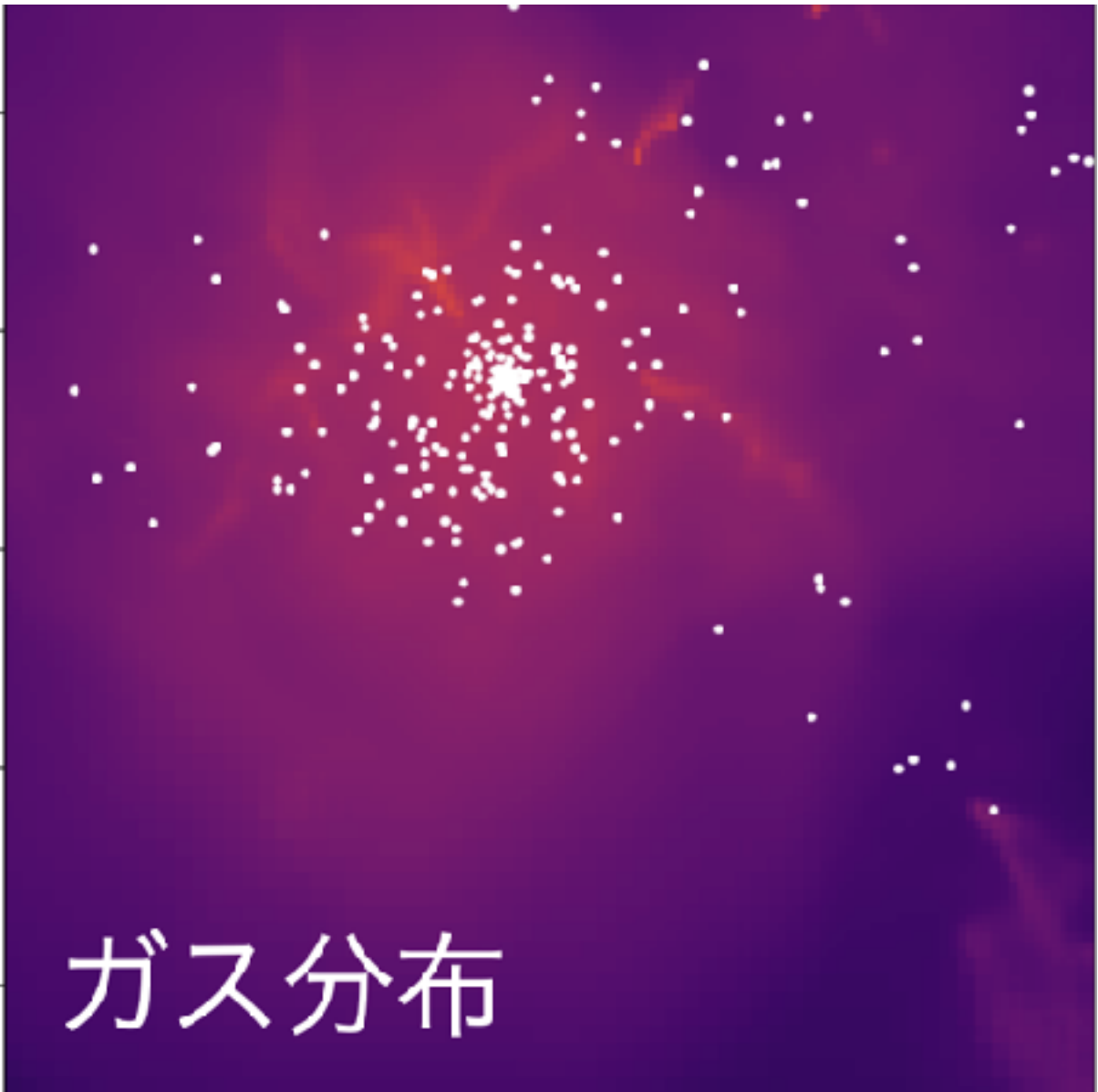
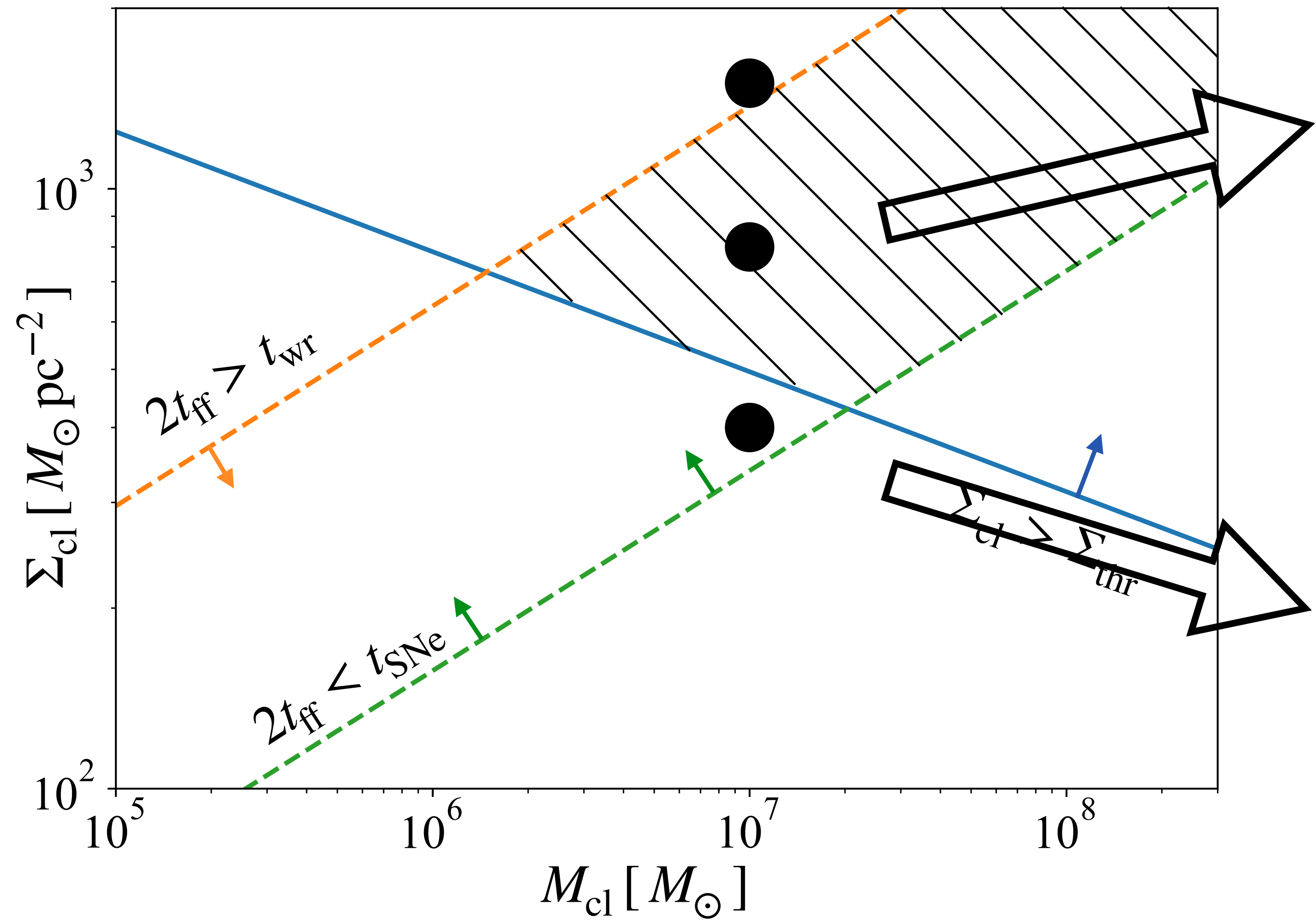
条件2: 星形成継続時間(t_{dur})内にWR星状態となる

条件3: 星形成継続時間(t_{dur})内に超新星爆発が起こらない(?)

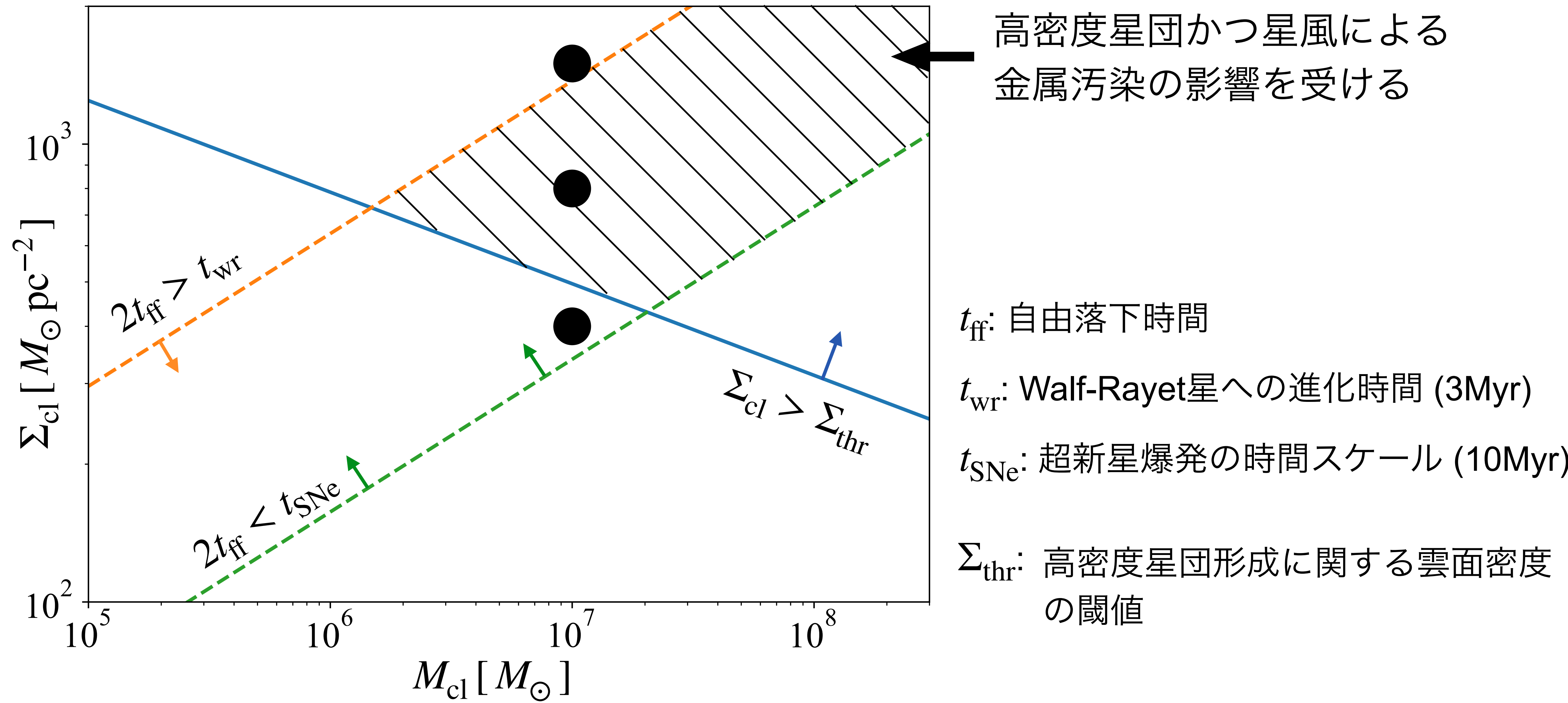
星風による金属汚染と高密度星団形成



星風による金属汚染と高密度星団形成



星風による金属汚染と高密度星団形成



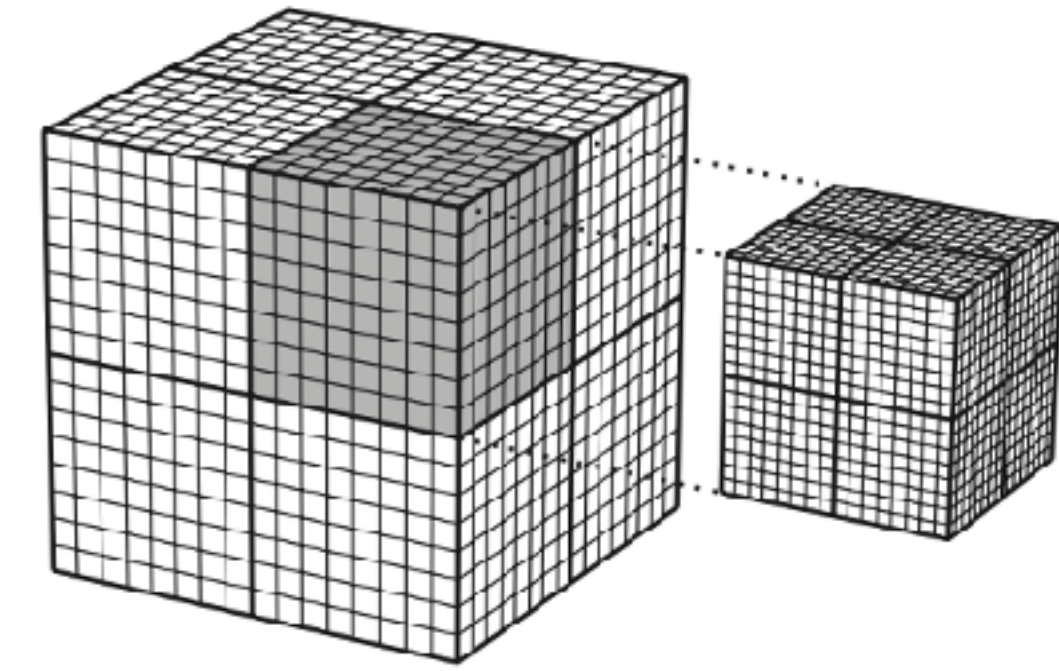
実際にシミュレーションで調べる。

数値計算 (星風+超新星爆発入り)

Self-gravitational AMR (M)HD + Sink particles



(Matsumoto 2007, 2015)



格子構造

Non-Equilibrium chemistry

H, H₂, H⁺, H⁻, H₂⁺, e, CII, OI, OII, OIII, CO

Heating & Cooling

Photoionization & photodissociation heating

Line cooling (CII, CO, OI, OII, OIII), dust cooling

Chemical heating & cooling

(Sugimura et al. 2020, CO network: Nelson & Langer 1997)

Stellar evolution

Metal yield from SNe & stellar wind (He, N, C, O)

Stellar wind & SNe feedback

Direct collapse ($> 25 M_{\odot}$) (Limongi & Chieffi 2018)

星団粒子を使用

Radiation transfer with moment method (M1-closure, reduced speed of light)

EUV photons

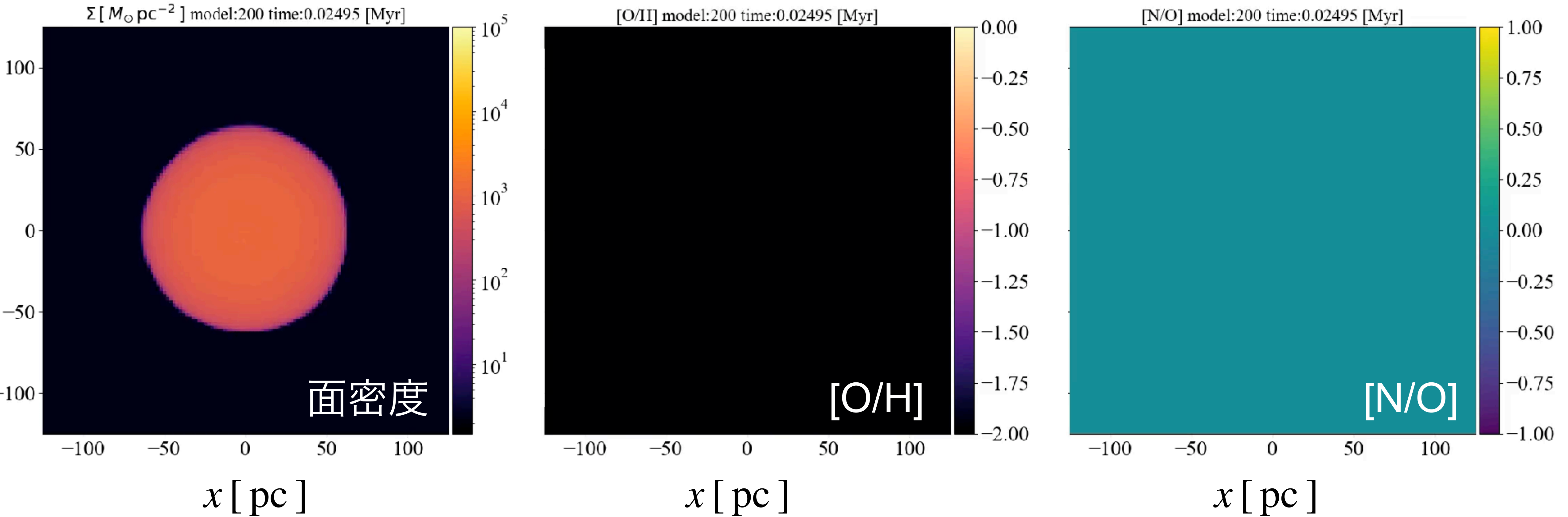
FUV photons (H₂, CO photodissociation)

Dust thermal emission

(Rosdahl+13, HF&Yajima 21)

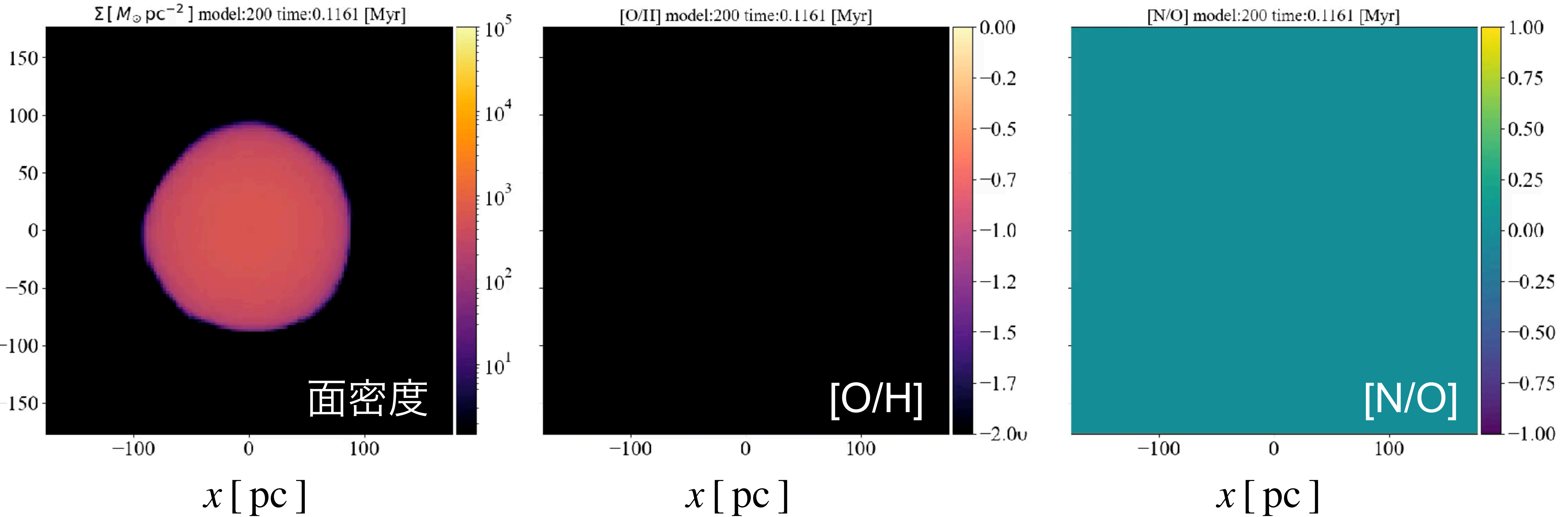
星団モデル(雲質量 $10^7 M_{\odot}$, 金属量 $10^{-2} Z_{\odot}$):

(2) 半径: 63 pc ($800 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$)



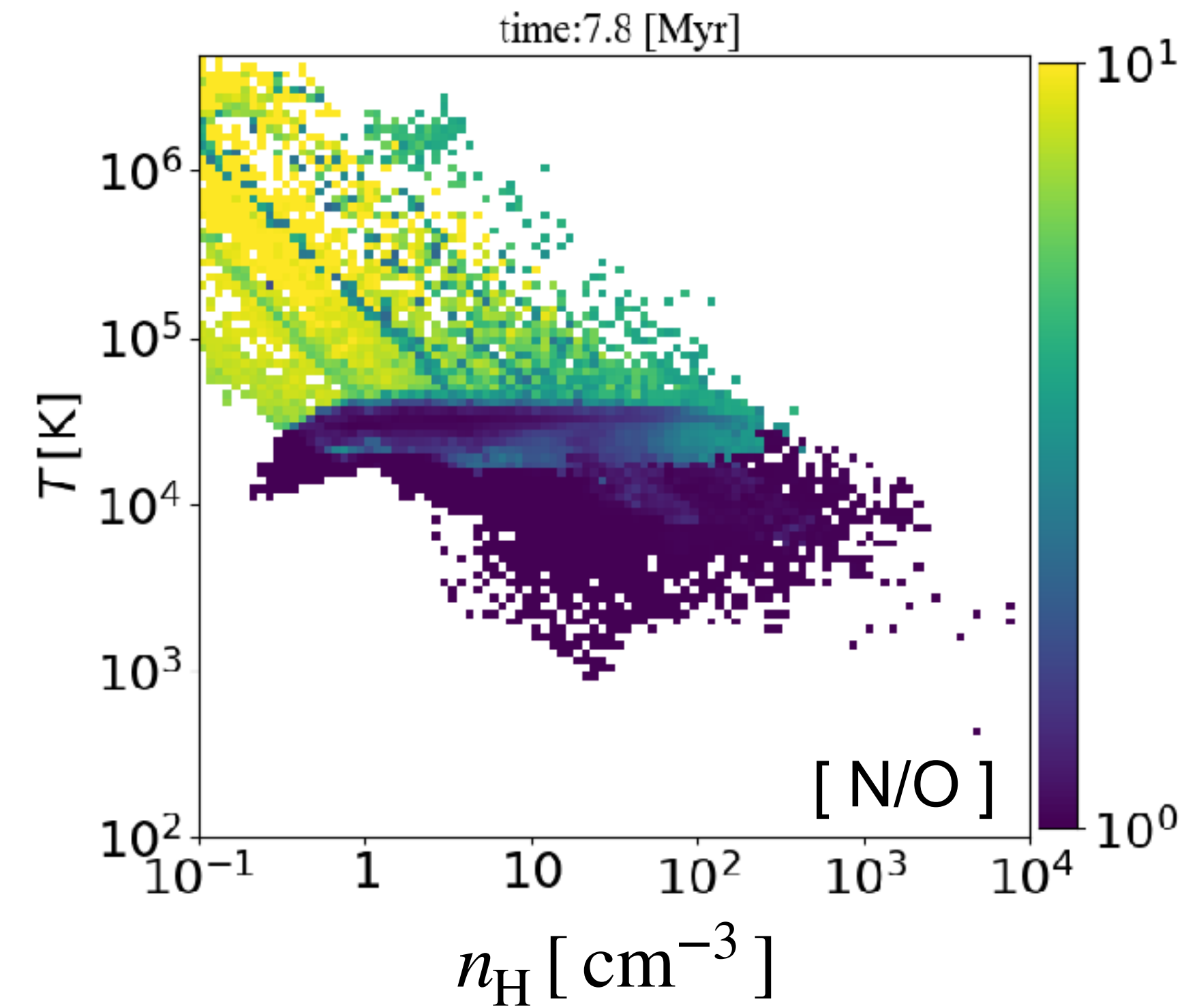
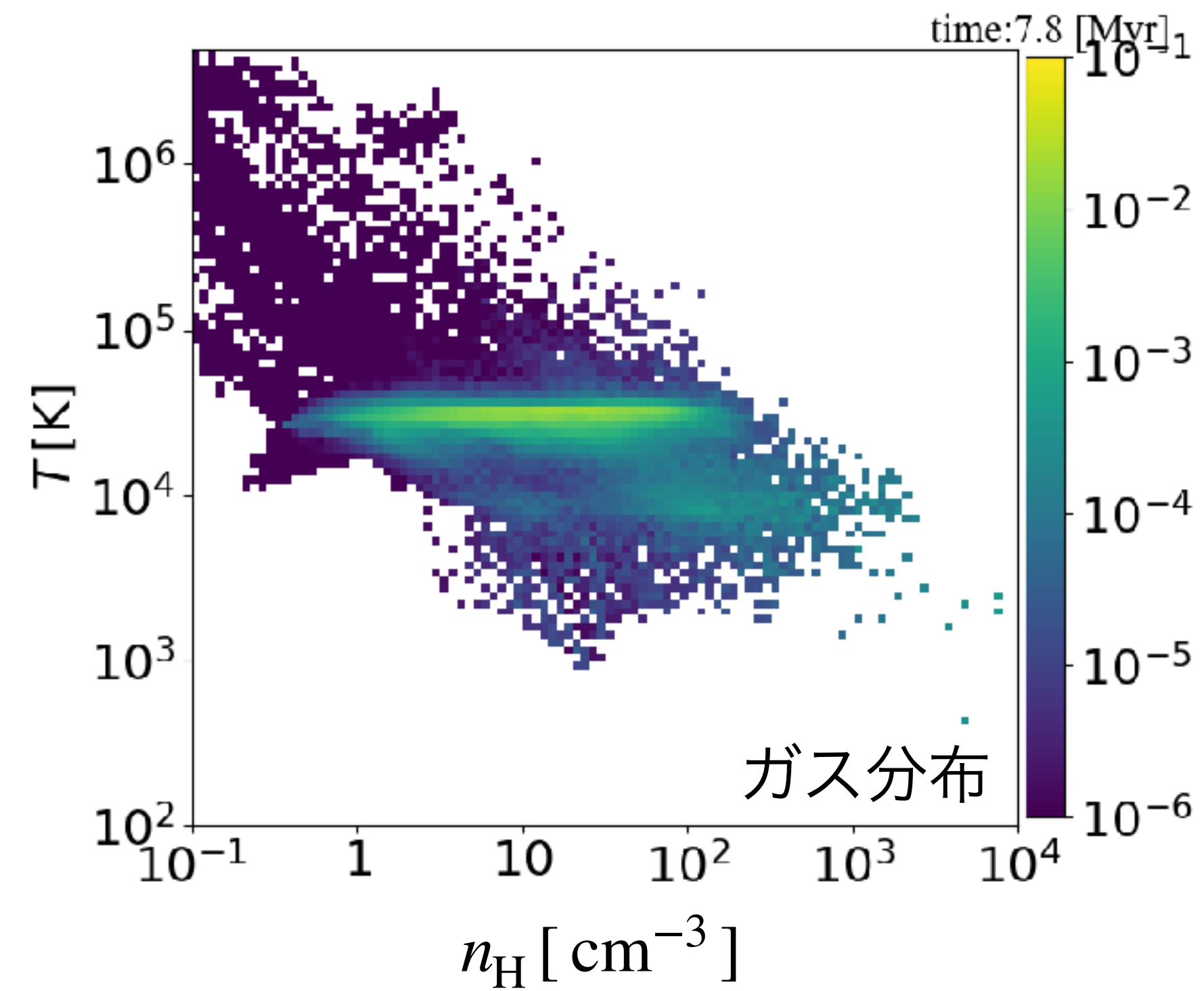
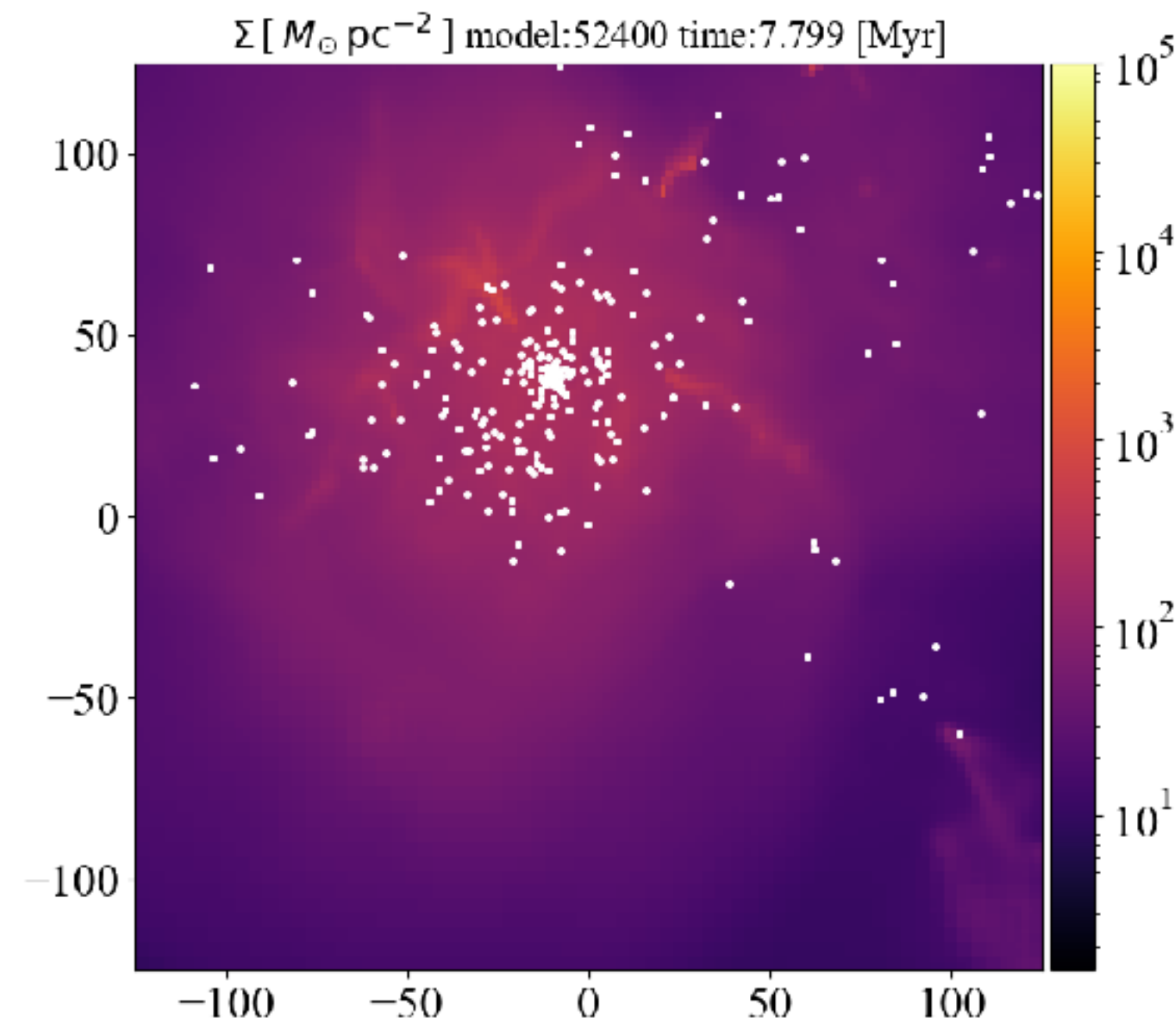
星団モデル(雲質量 $10^7 M_{\odot}$, 金属量 $10^{-2} Z_{\odot}$):

(3) 半径: 89 pc ($400 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$)



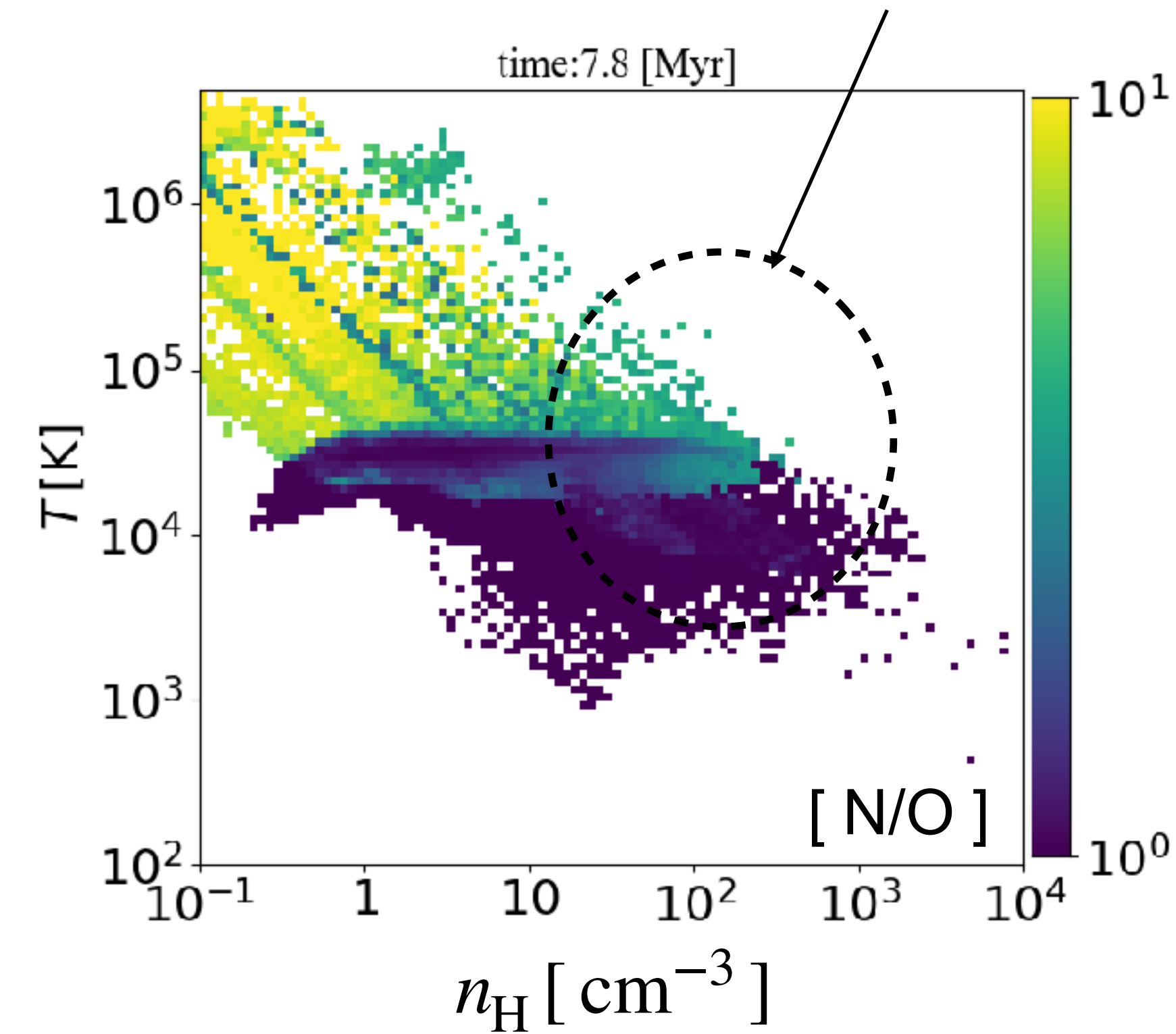
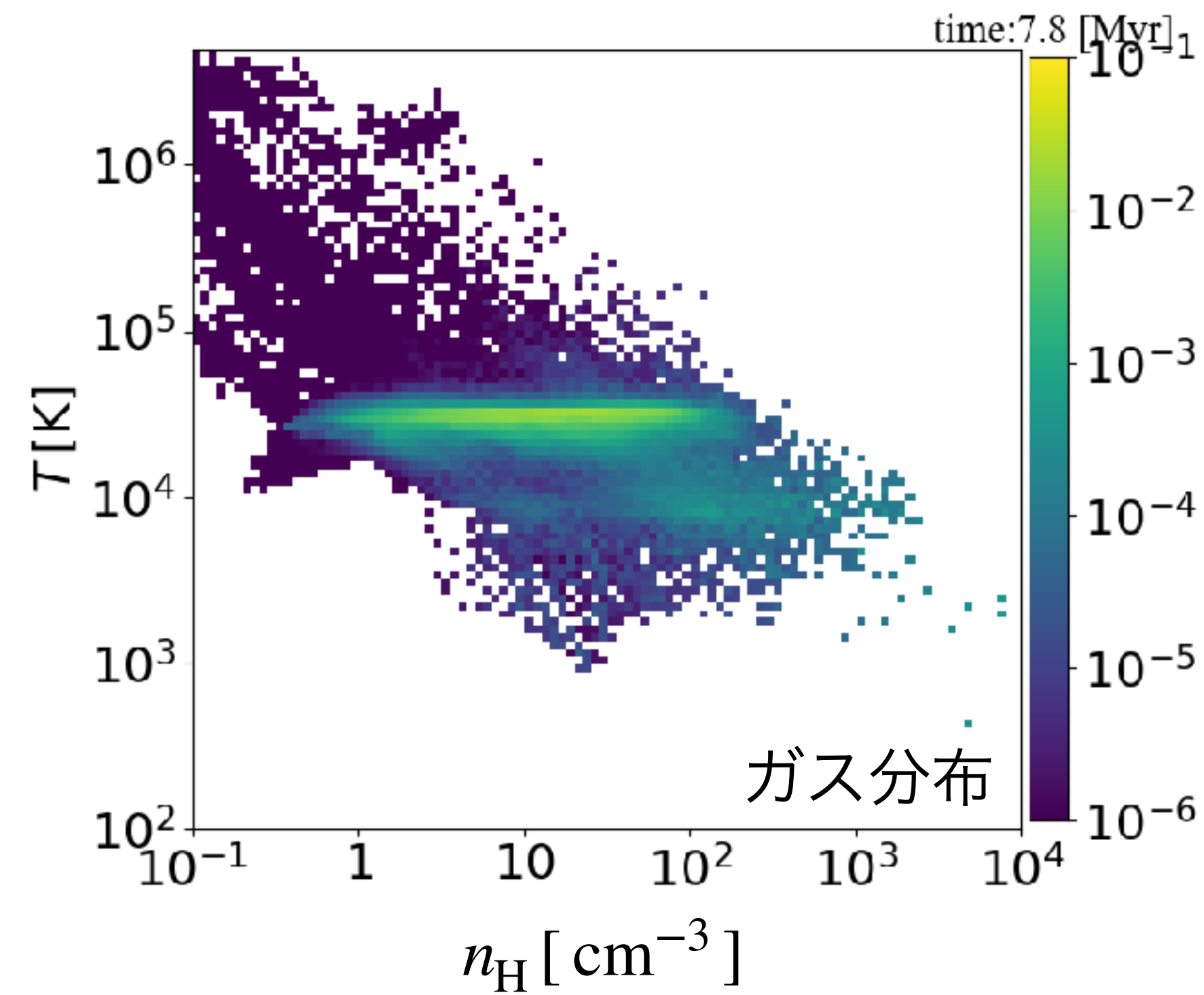
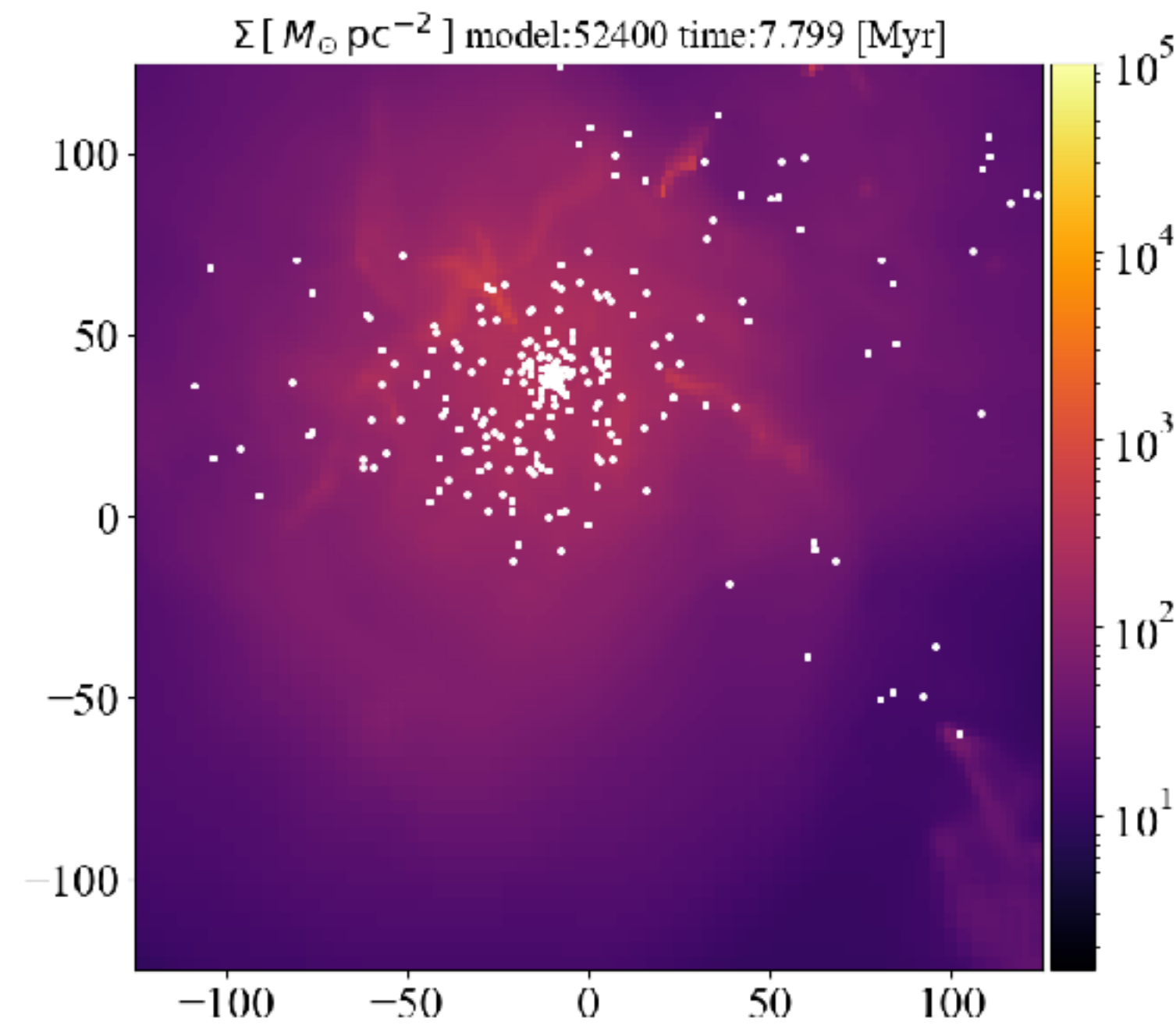
[N/O] 分布など

(2) $\Sigma_{\text{cl}} = 800 \text{ } M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ (半径: 63 pc)



[N/O] 分布など

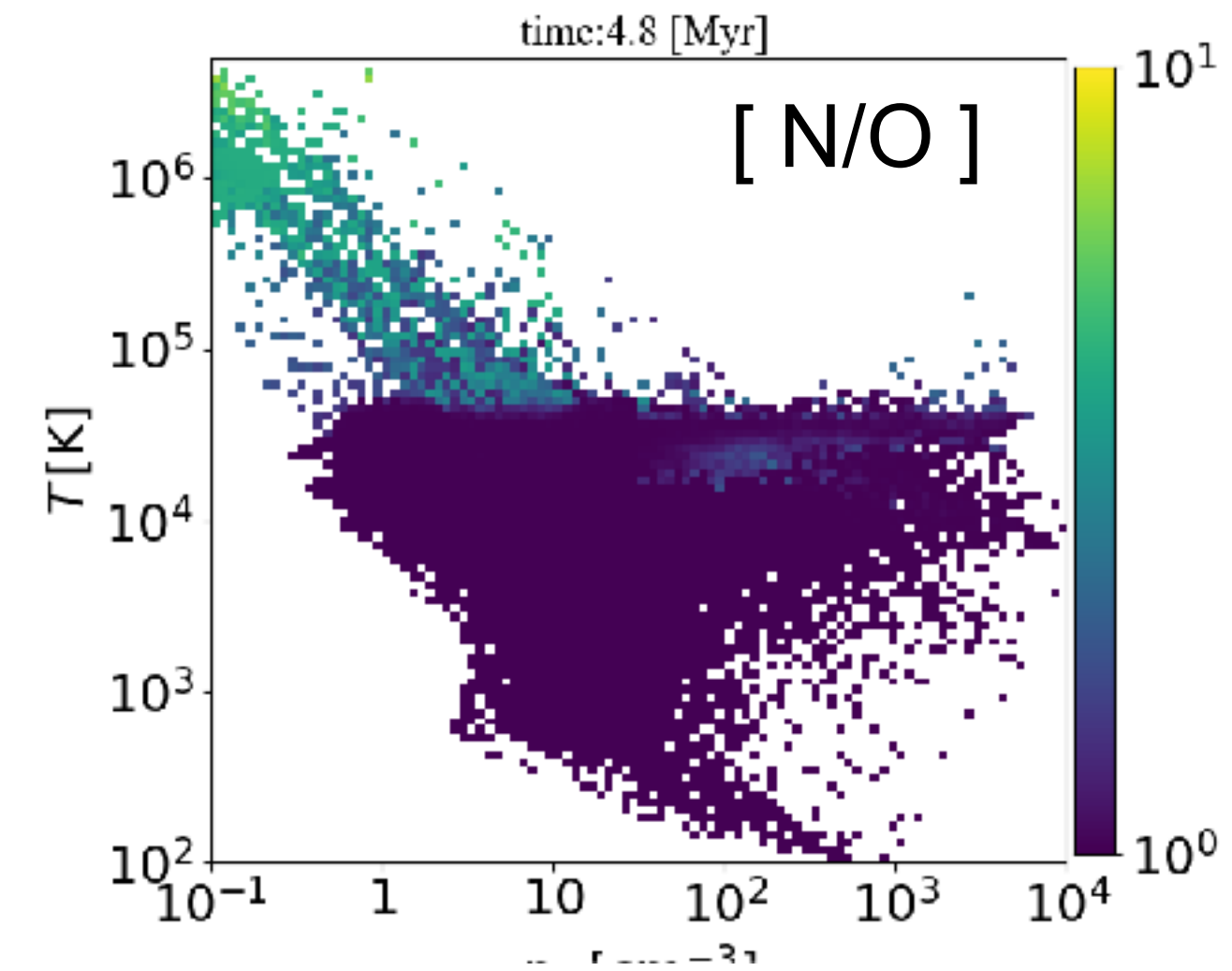
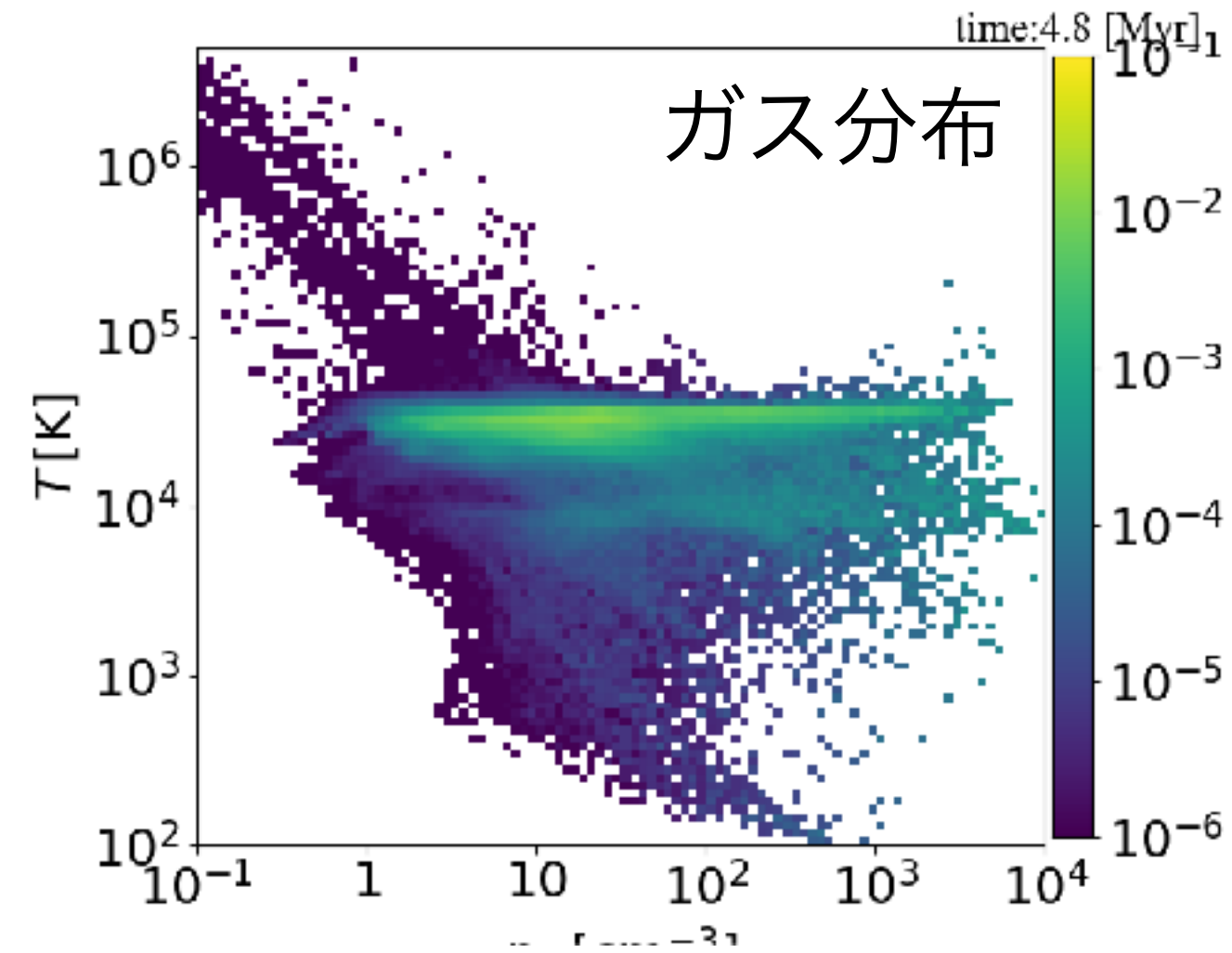
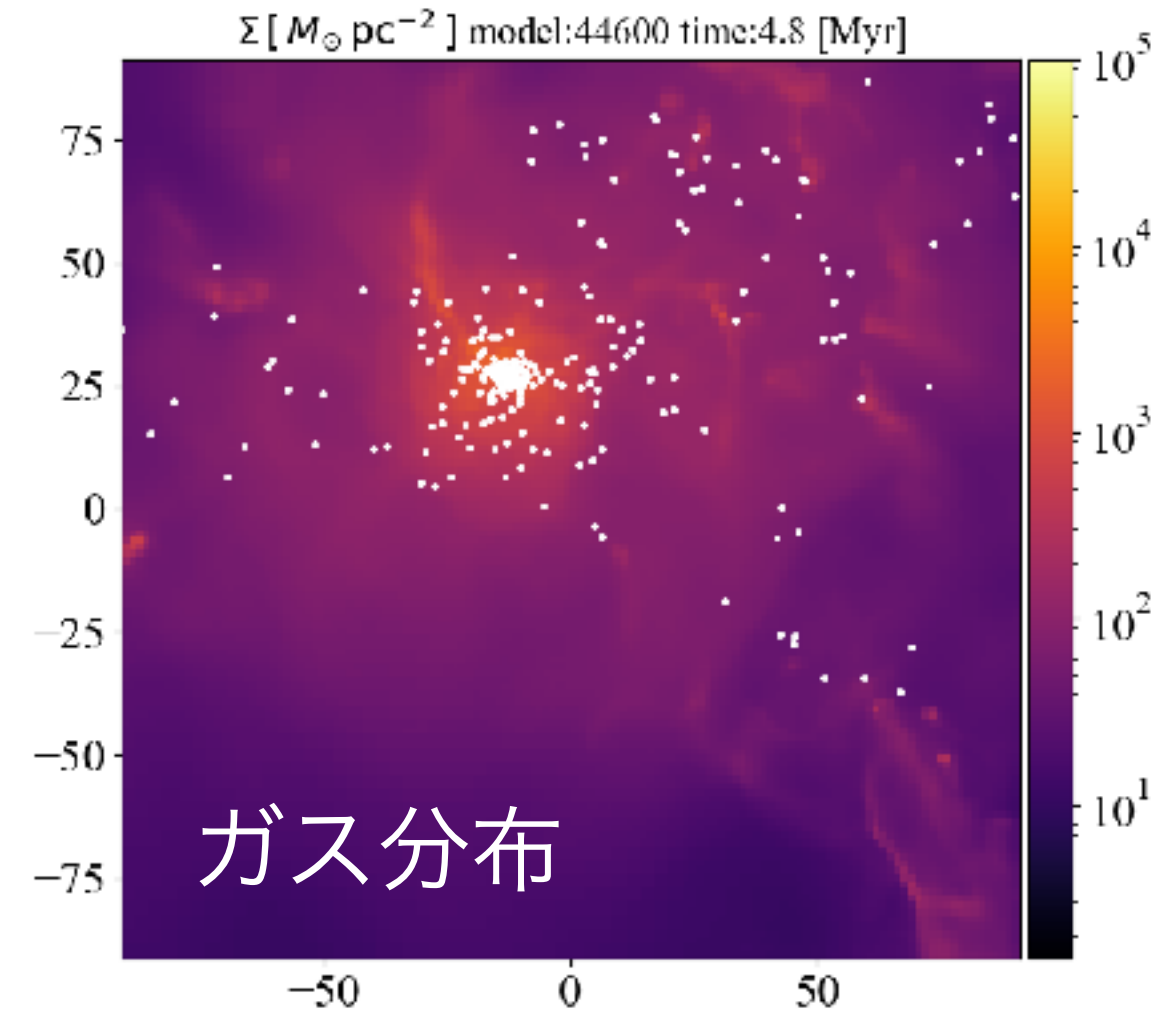
(2) $\Sigma_{\text{cl}} = 800 \text{ } M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ (半径: 63 pc)



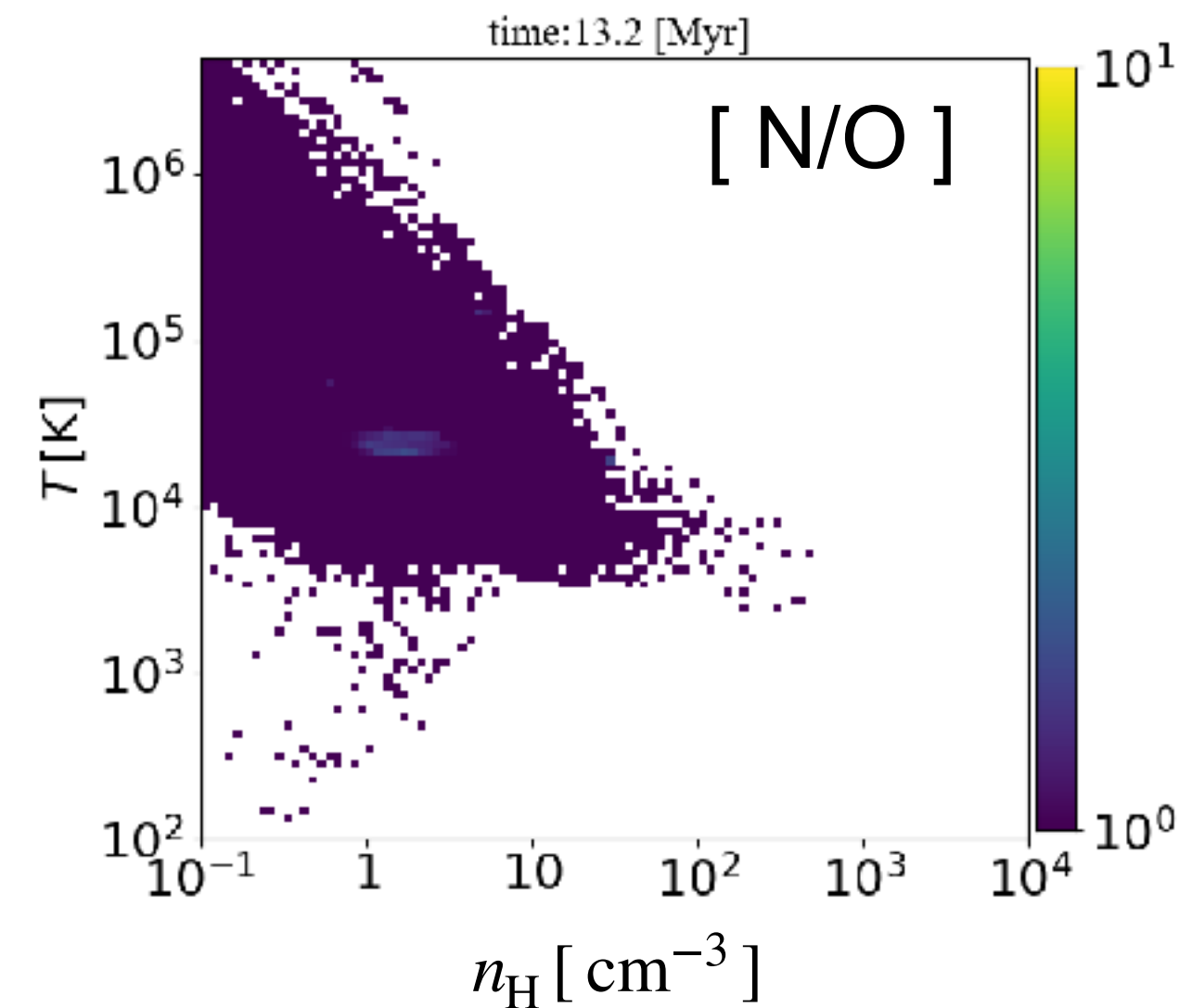
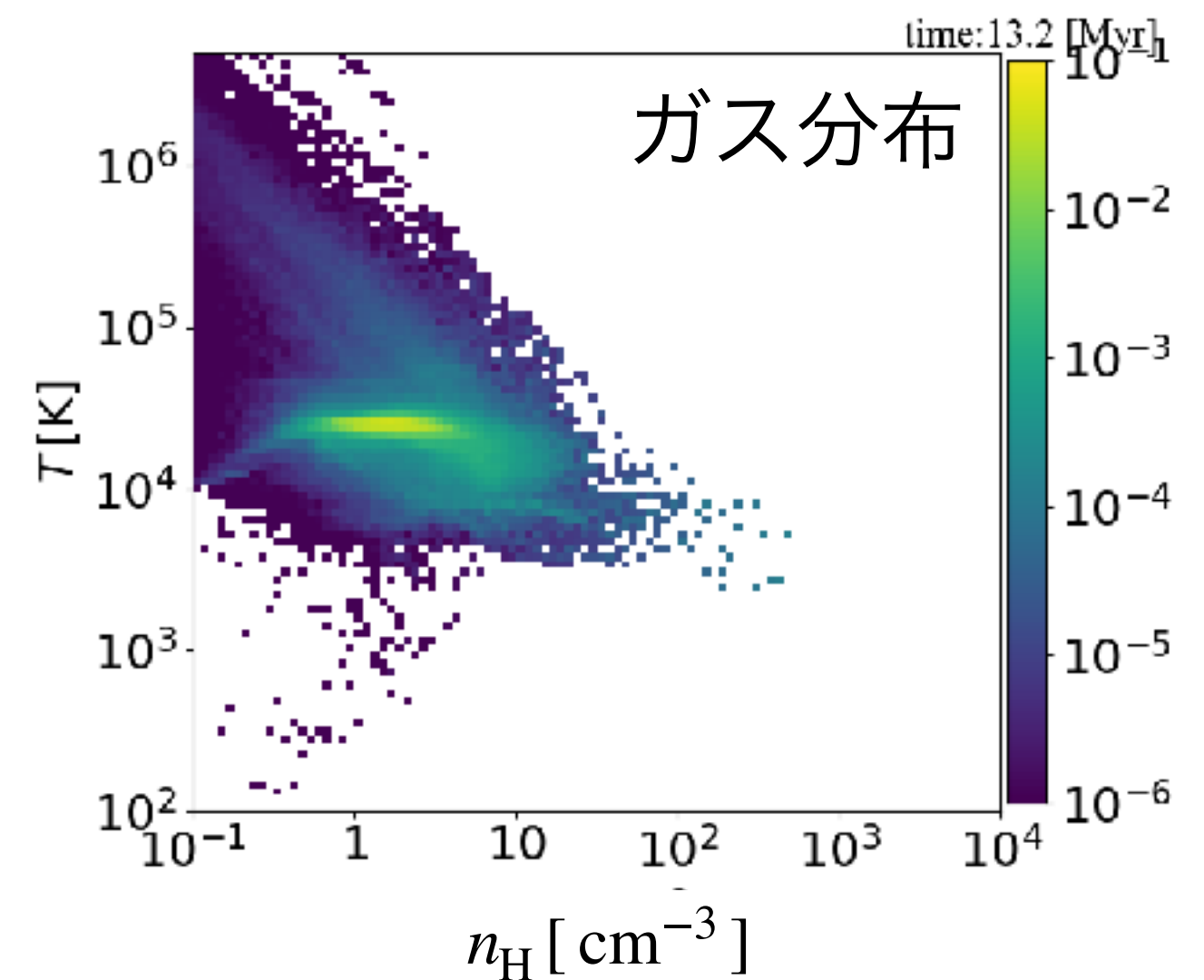
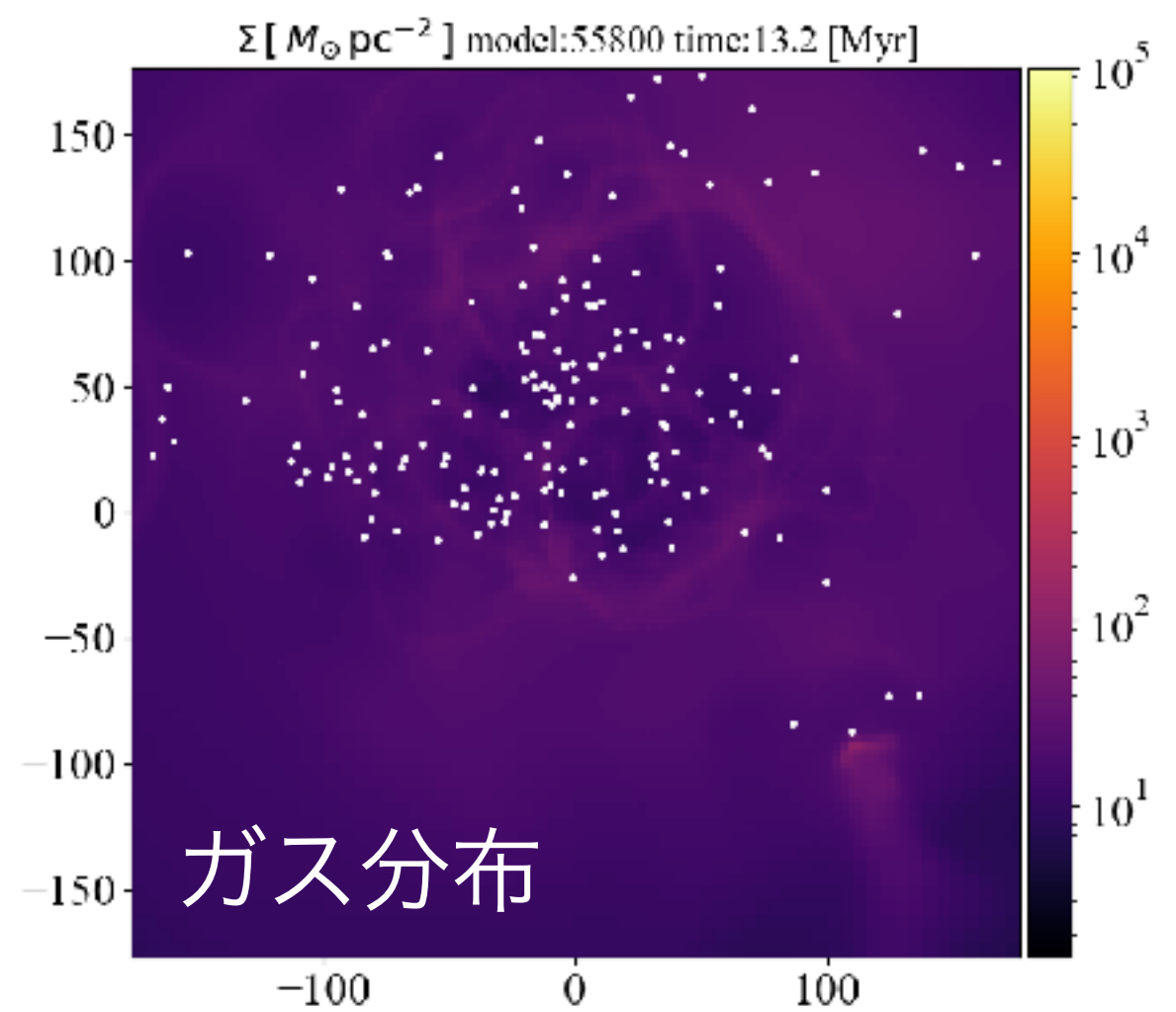
[N/O] ~ 0.5 程度の
N が豊富なガス

[N/O] 分布

(1) $\Sigma_{\text{cl}} = 1500 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ (半径: 46 pc)

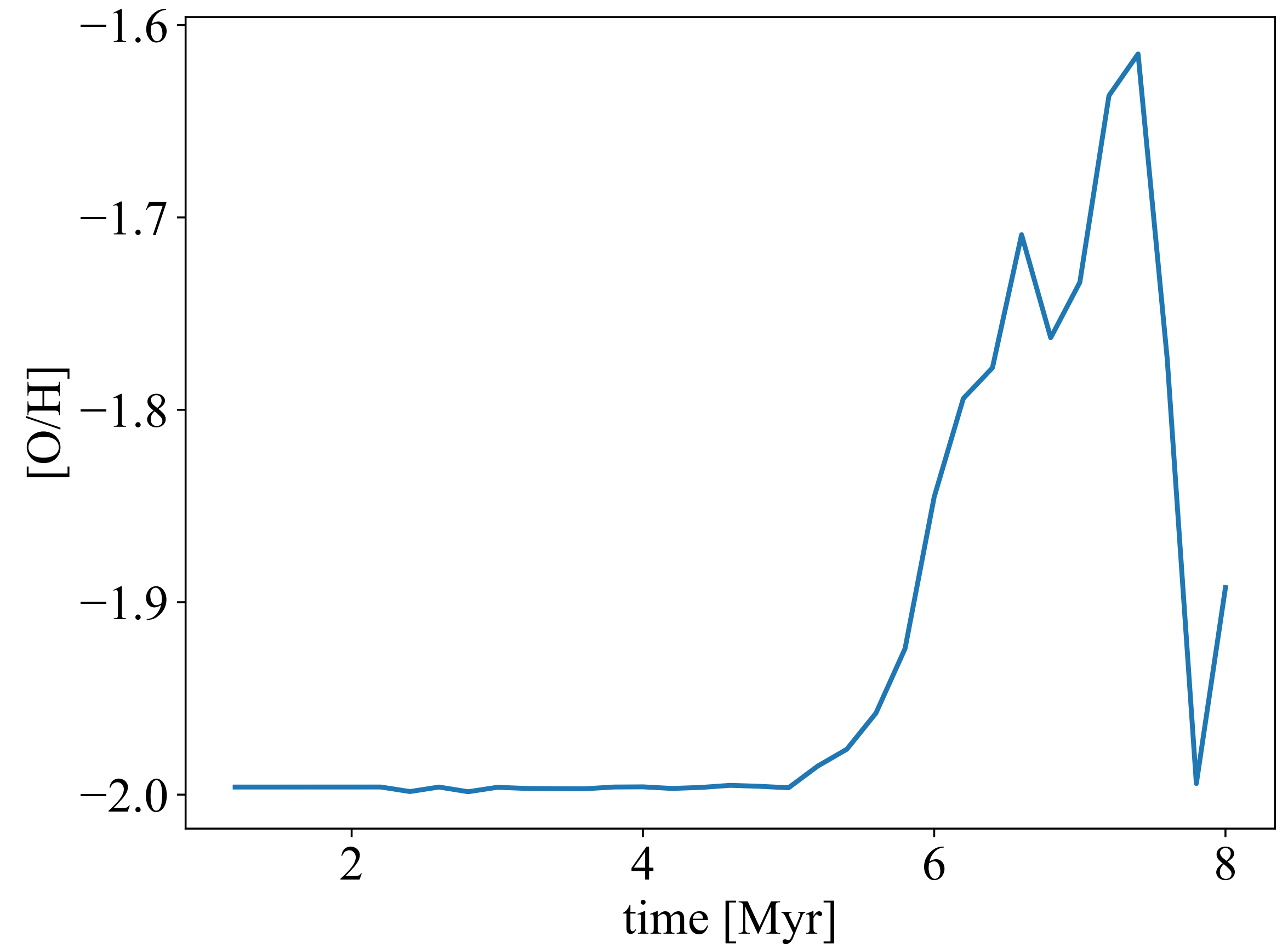
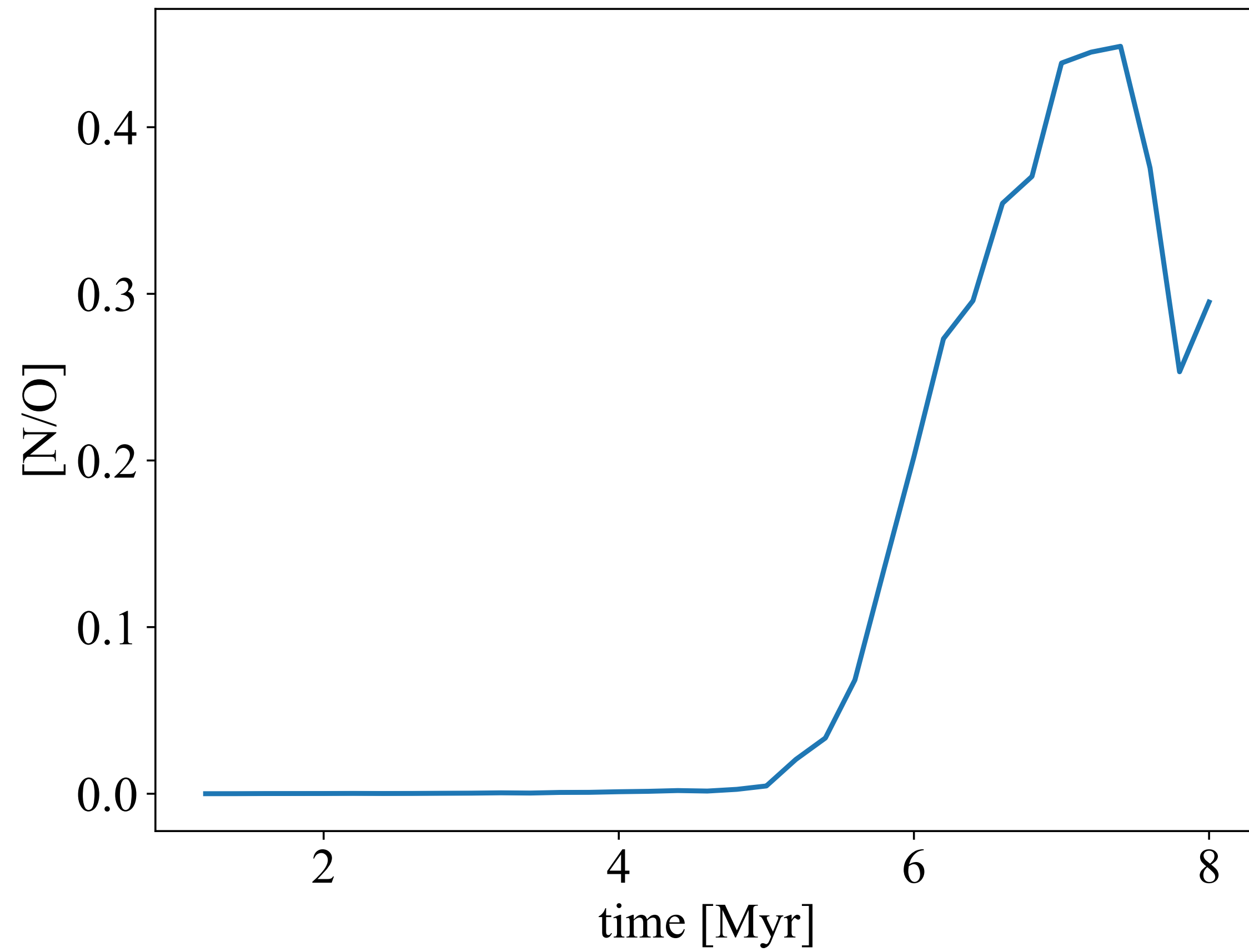


(3) $\Sigma_{\text{cl}} = 400 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ (半径: 89 pc)



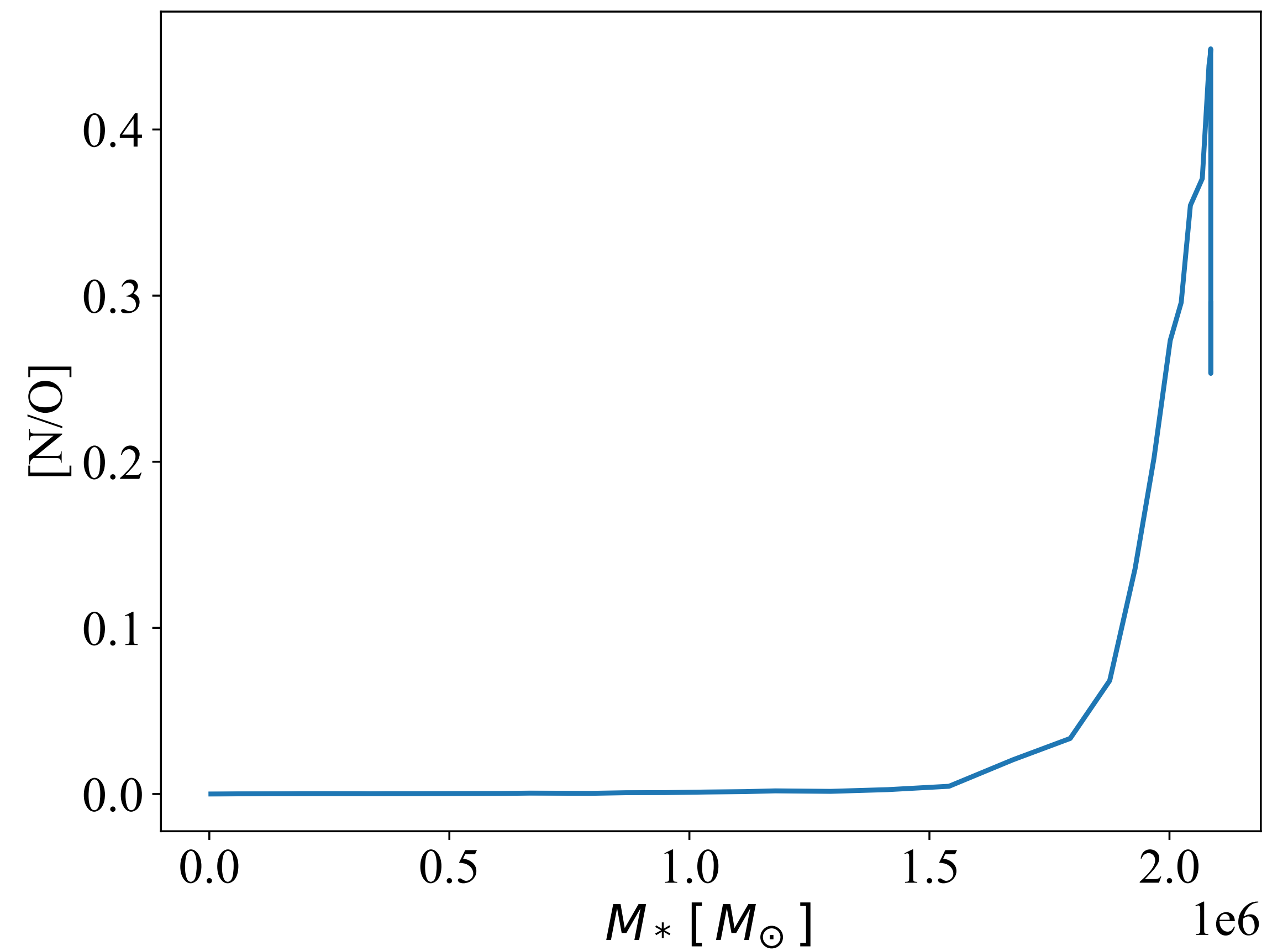
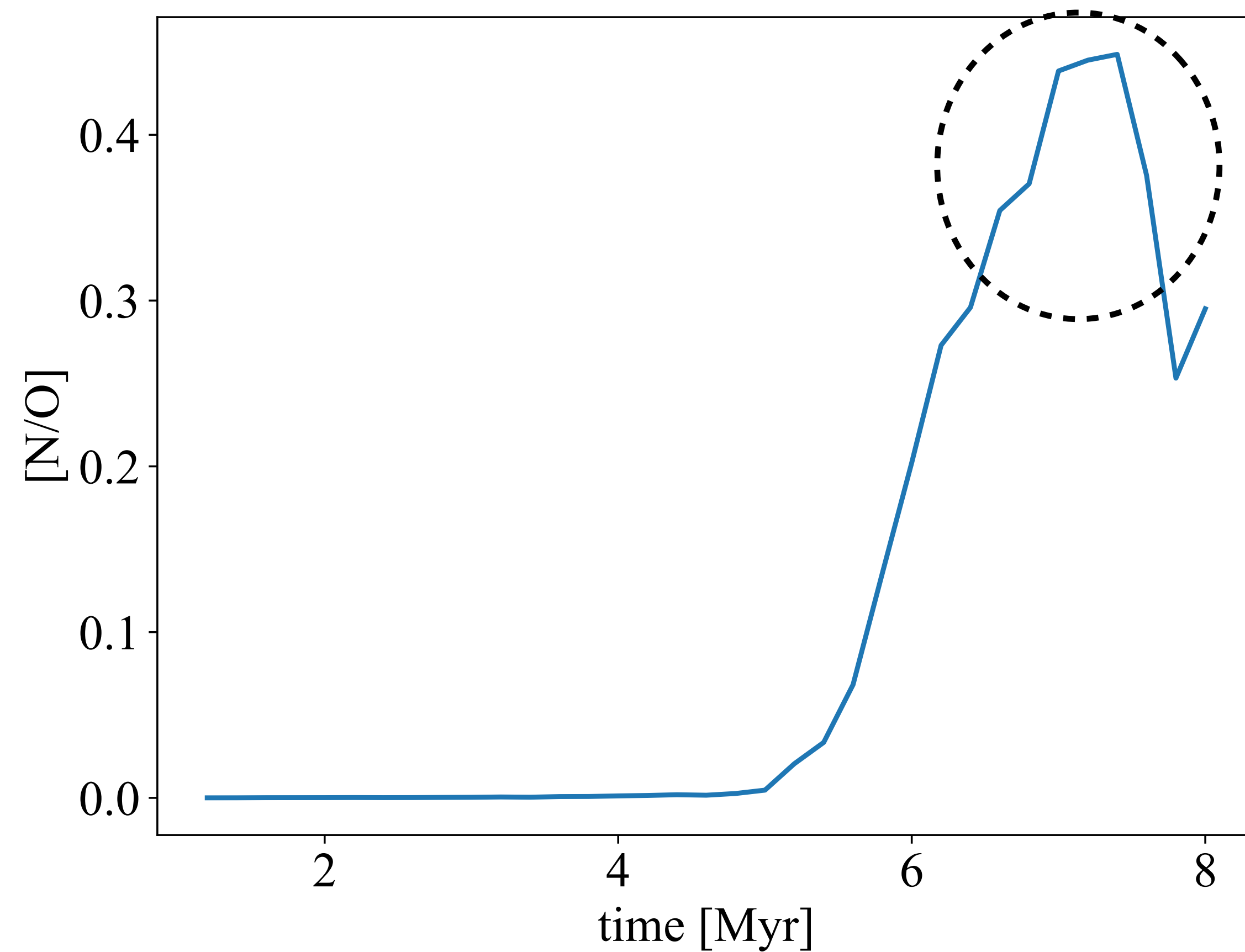
星の化学分布について

(2) $\Sigma_{\text{cl}} = 800 \text{ } M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ (半径: 63 pc) の場合



星の化学分布について

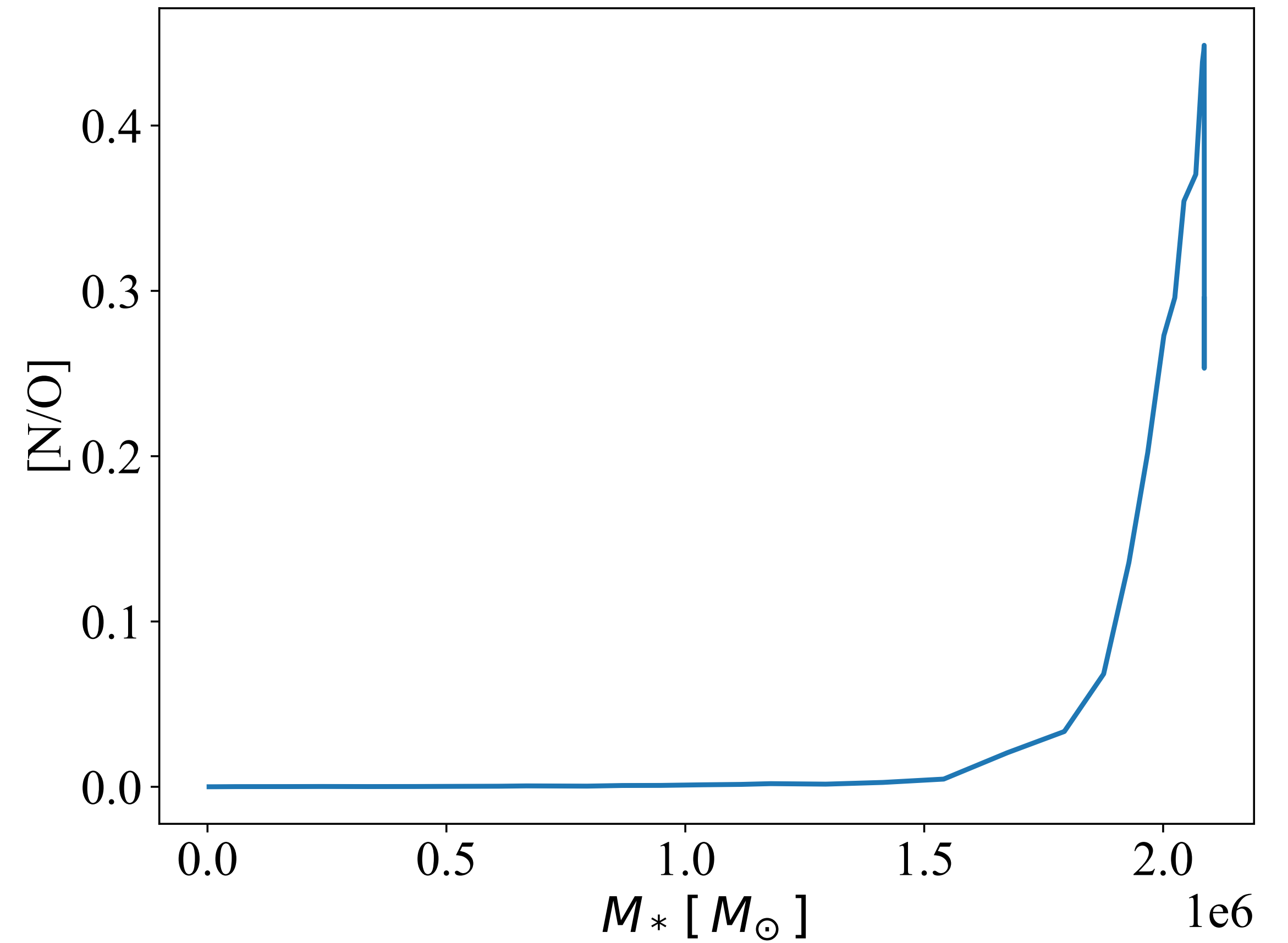
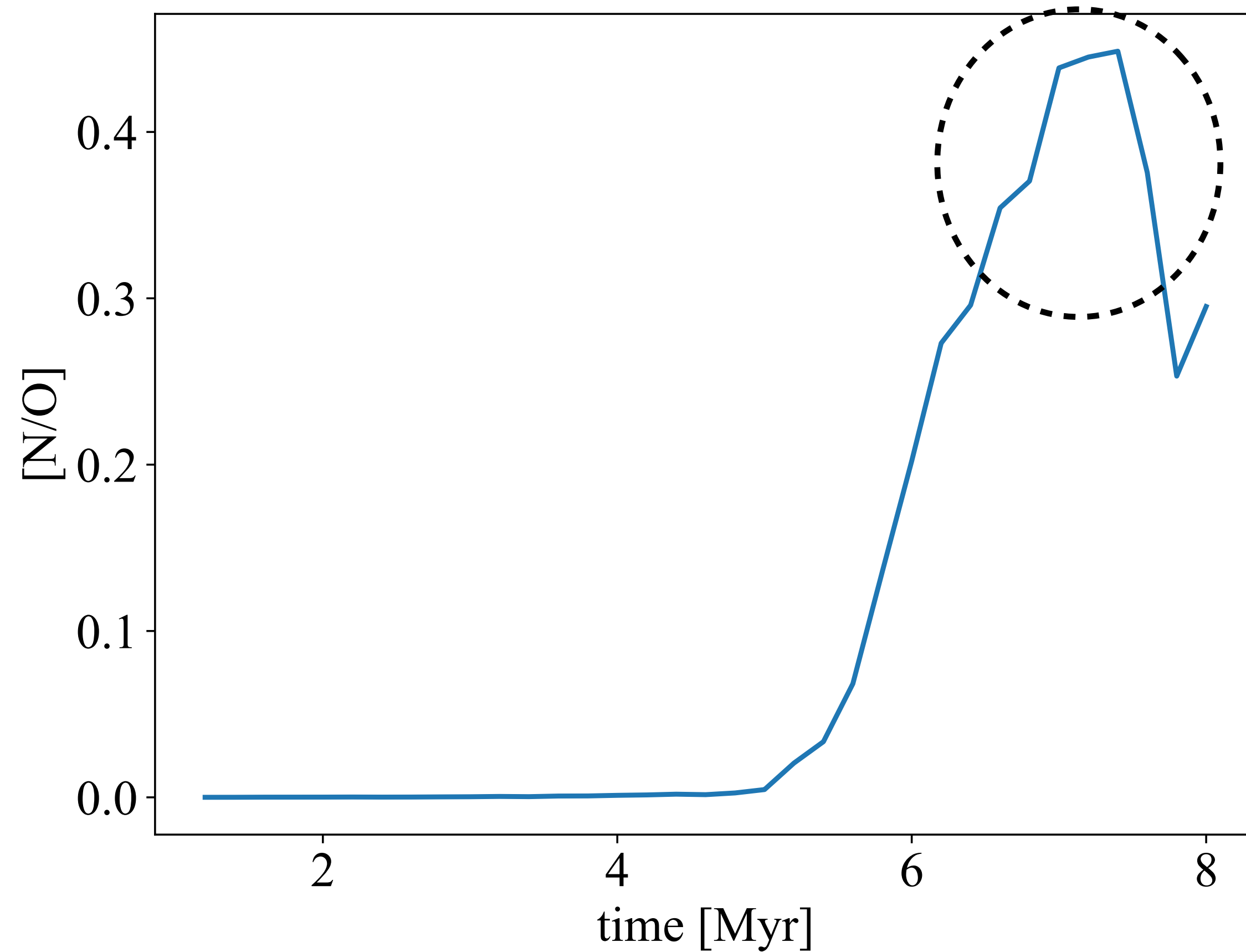
(2) $\Sigma_{\text{cl}} = 800 \text{ } M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ (半径: 63 pc) の場合



$[N/O]$ が高い星も誕生

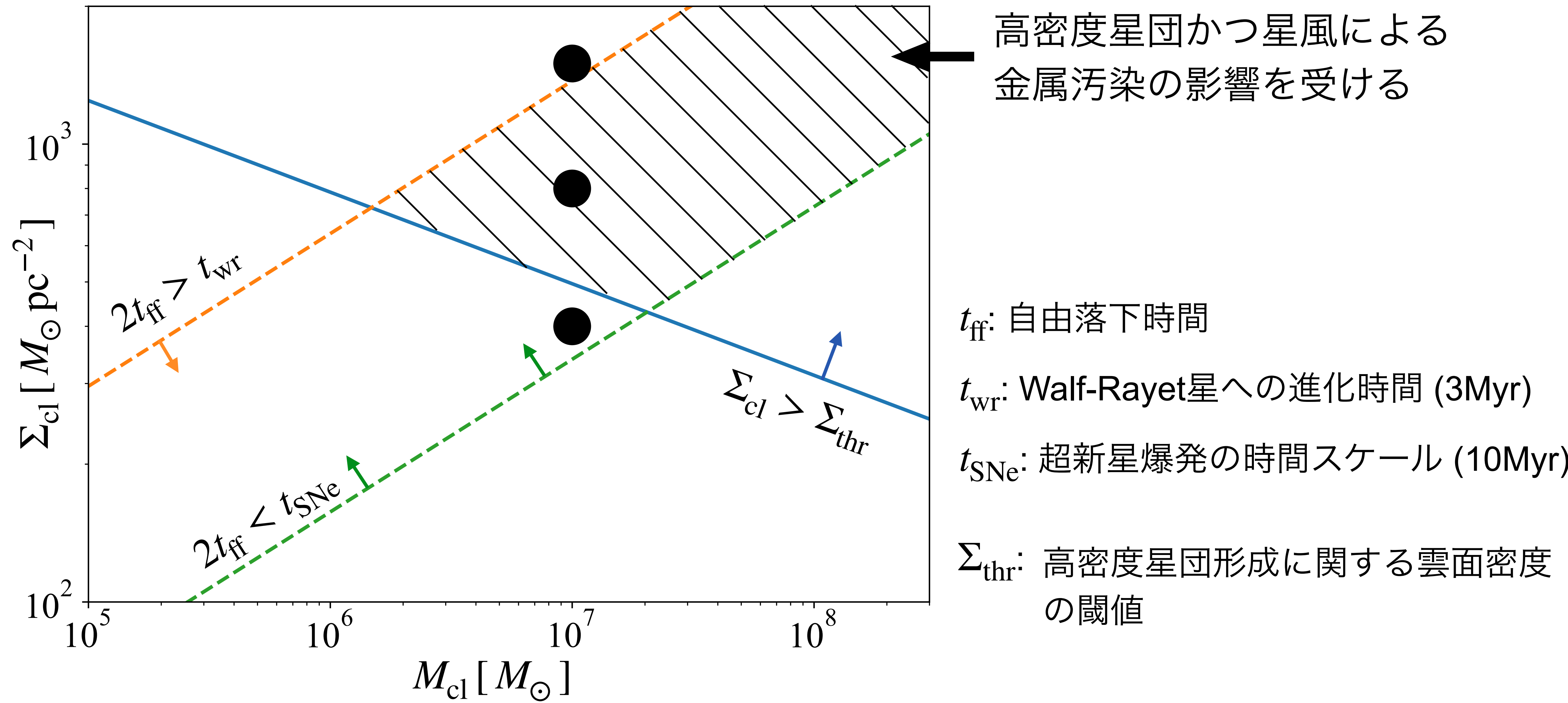
星の化学分布について

(2) $\Sigma_{\text{cl}} = 800 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ (半径: 63 pc) の場合



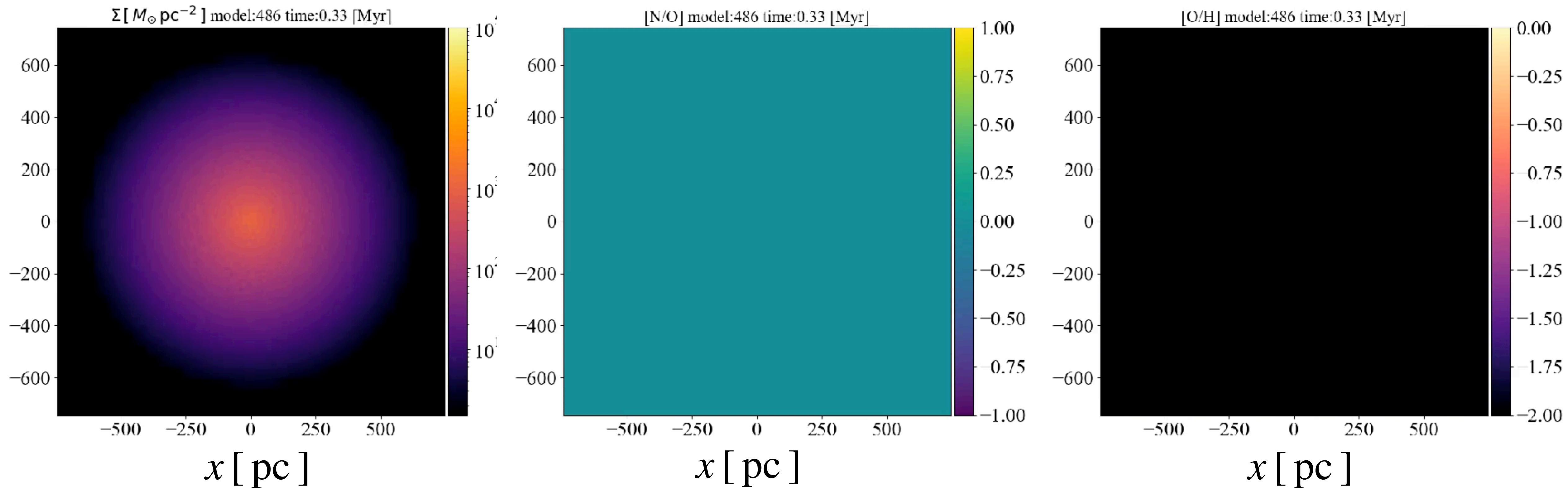
$[N/O]$ が高い星も誕生, ただし質量割合は小さい...

星風による金属汚染と高密度星団形成



銀河円盤シミュレーションも実施中

ハロー質量: $10^9 M_\odot$, 赤方偏移:10, ディスク質量: $7.6 \times 10^7 M_\odot$, 金属量: $10^{-2} Z_\odot$, NFW profileを仮定



まとめ

星風の影響を受ける星団は、 $10^6 M_{\odot}$ 以上の大質量である必要があるそう

ただし、球状星団の第2世代の星と直結するかは不明

今後はよりパラメータを広げた探査と、星団形成以外の外的な要因についても考慮したい

星団モデル(雲質量 $10^7 M_{\odot}$):

(1) 半径: 46 pc ($1500 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$)

