

ブラックホール大研究会

高密度星団形成シミュレーション

福島 肇

(筑波大学 計算科学研究センター)

共同研究者: 矢島秀伸 (筑波大学)

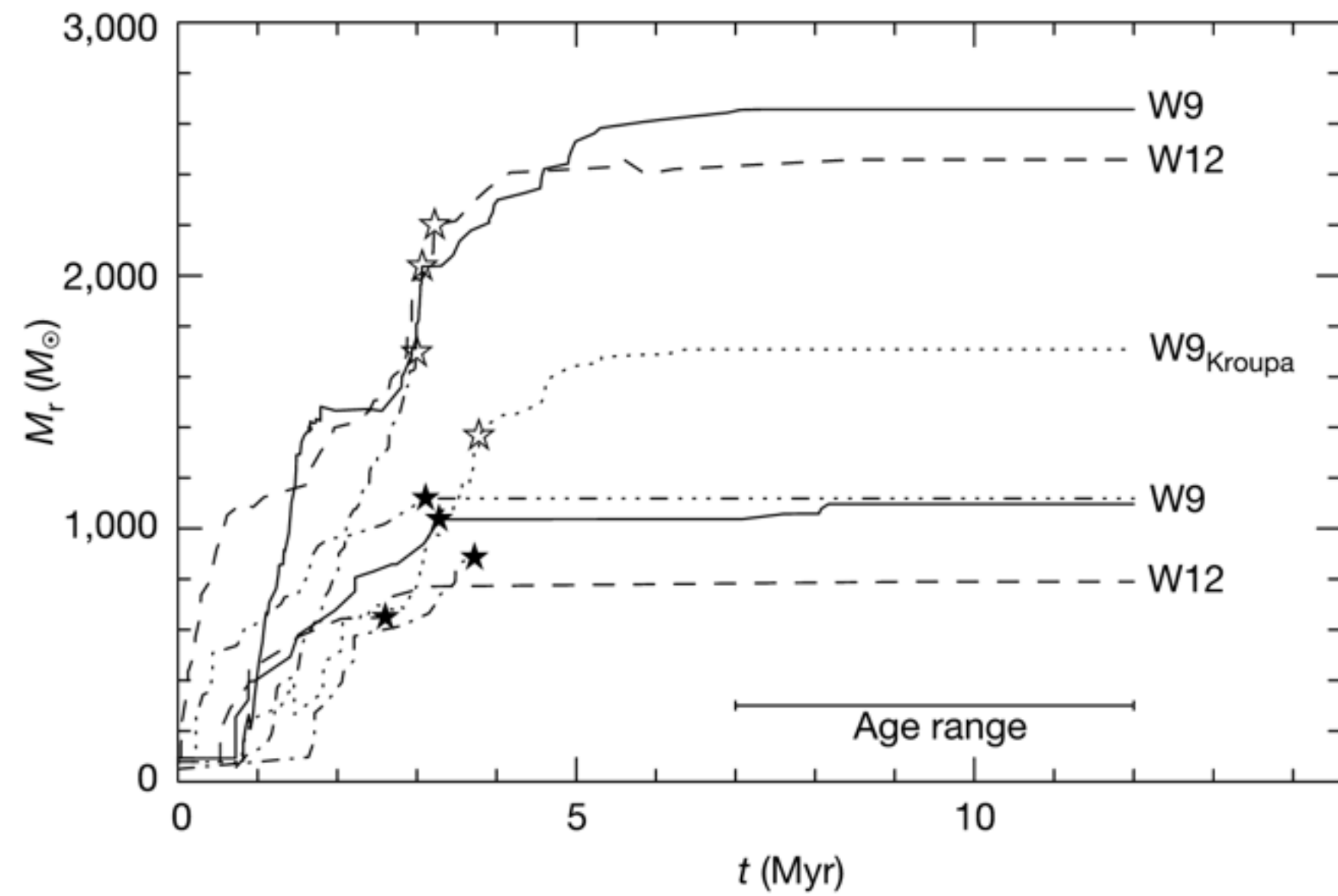


筑波大学
計算科学研究センター
Center for Computational Sciences

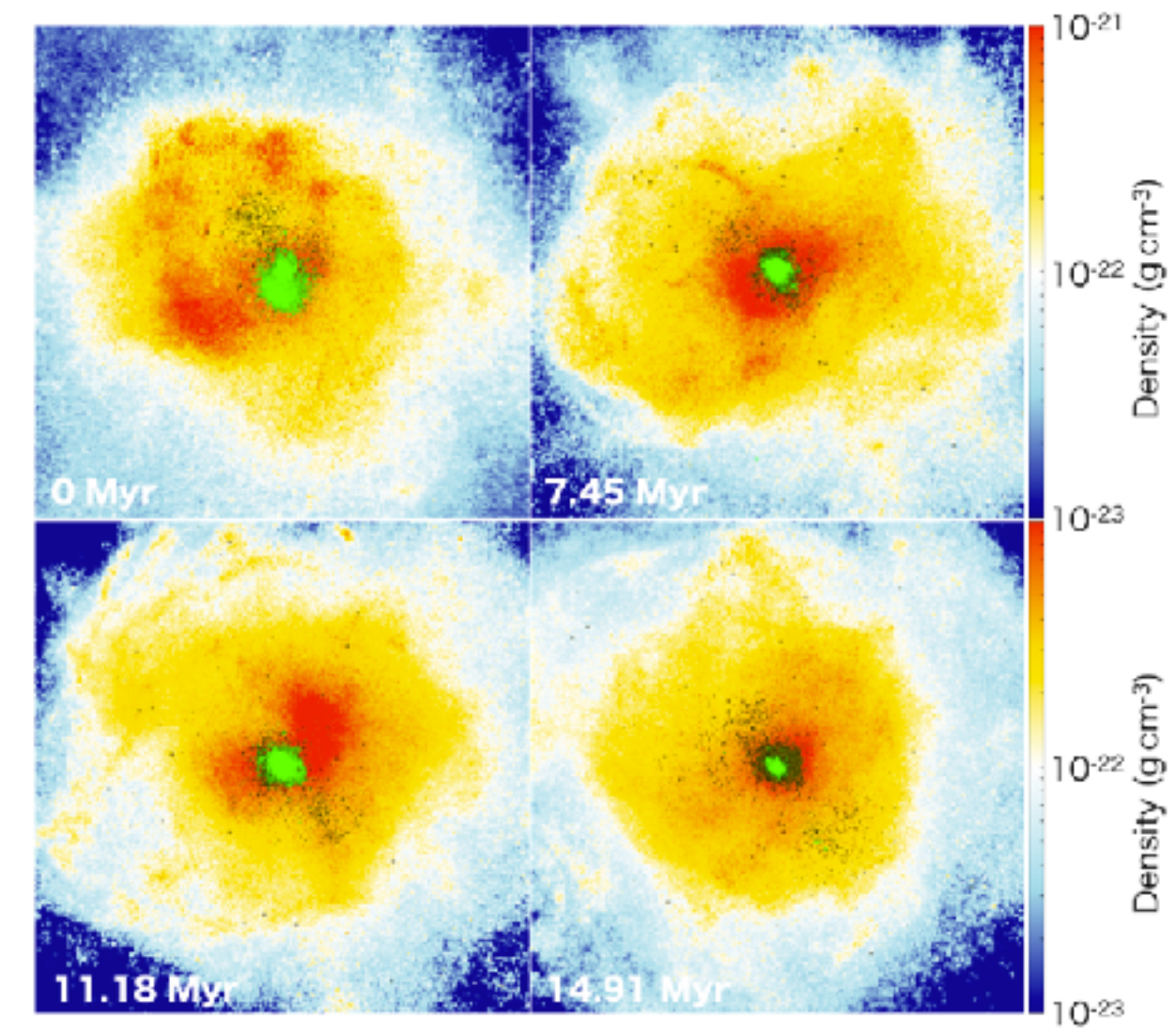


高密度星団における中間質量BH形成

星衝突に伴う大質量星 & BH形成

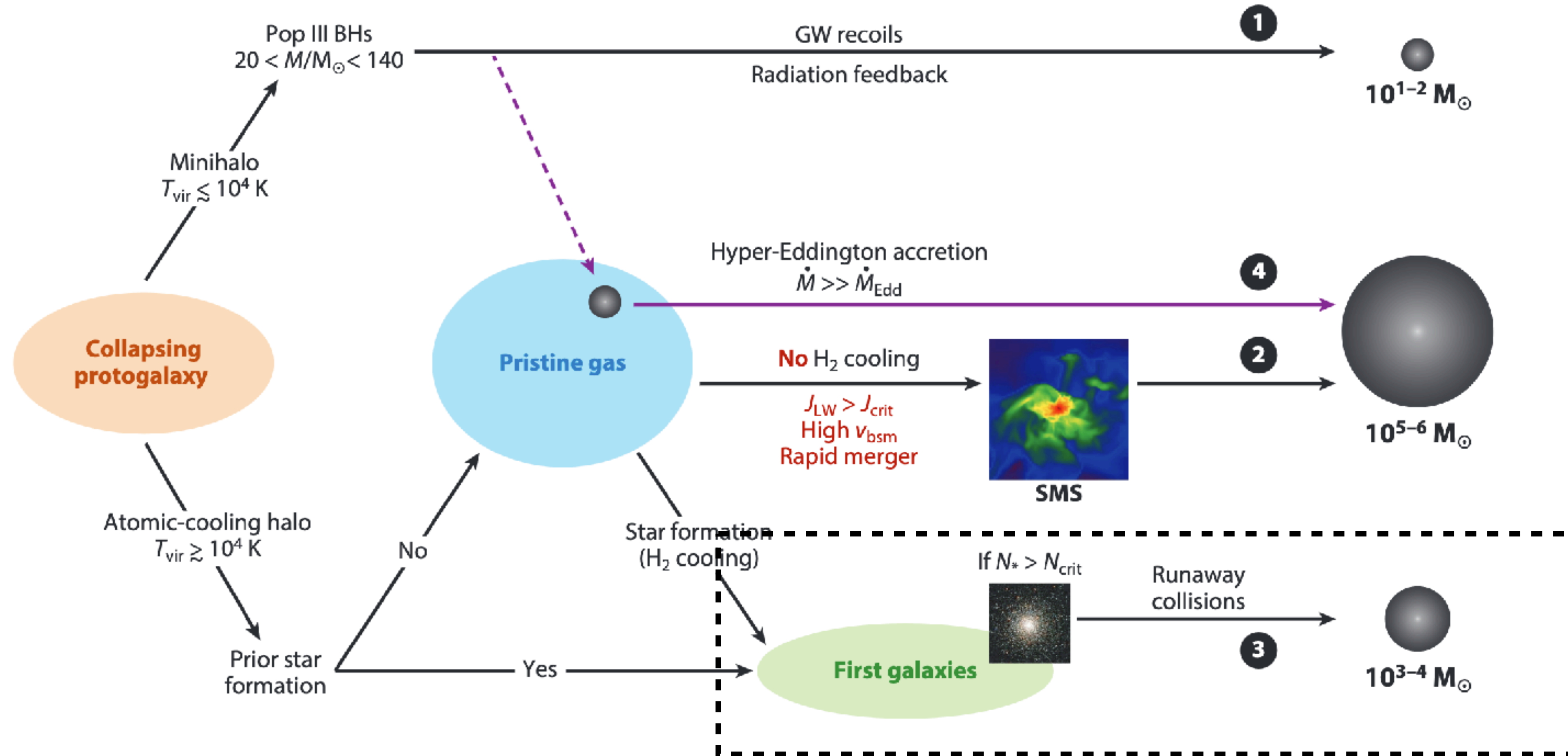


(Portegies Zwart+2004)



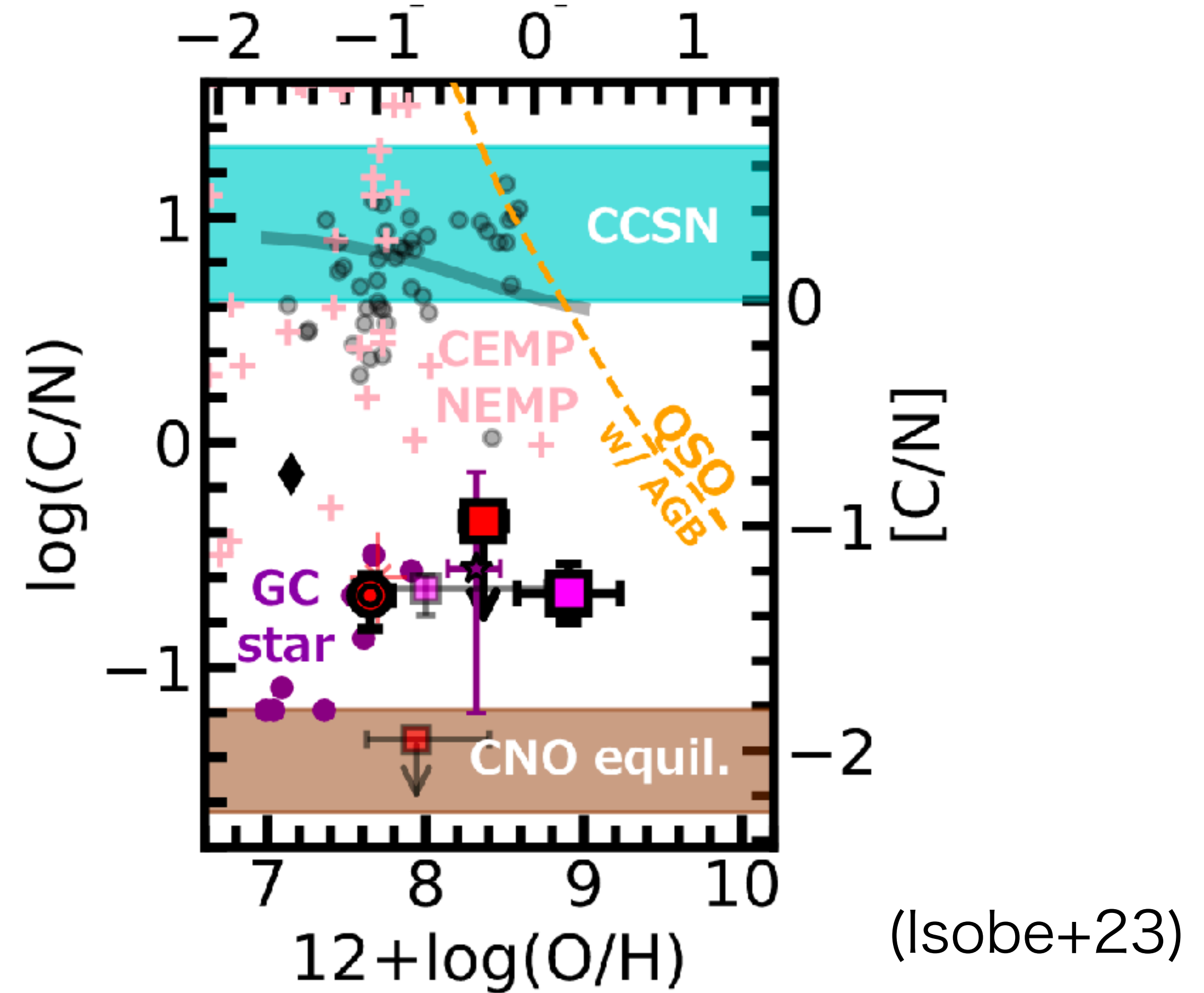
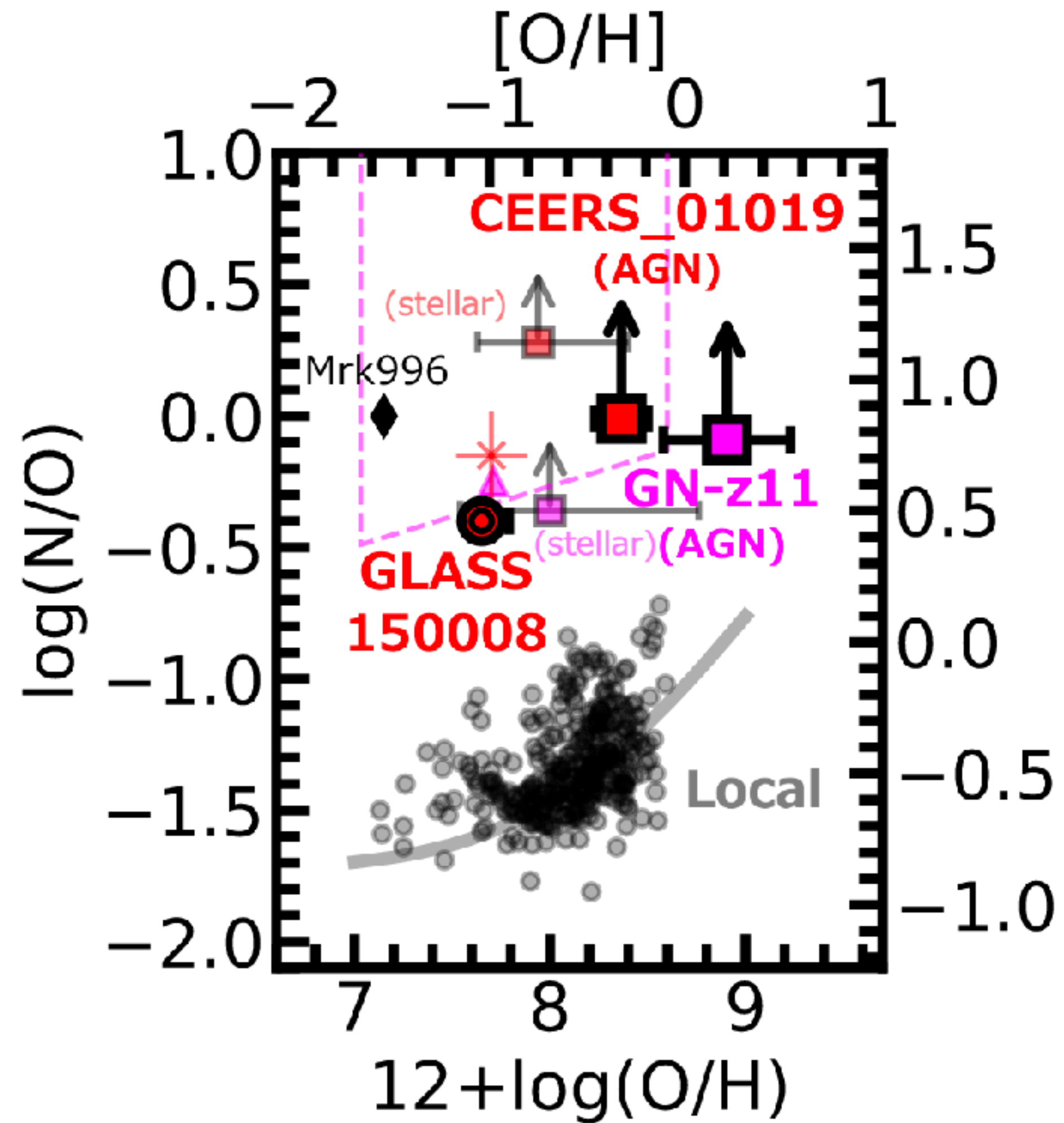
(Sakurai+2019)

高密度星団における中間質量BH形成



SMBH形成の主要経路候補の一つ

窒素が豊富な銀河の発見



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

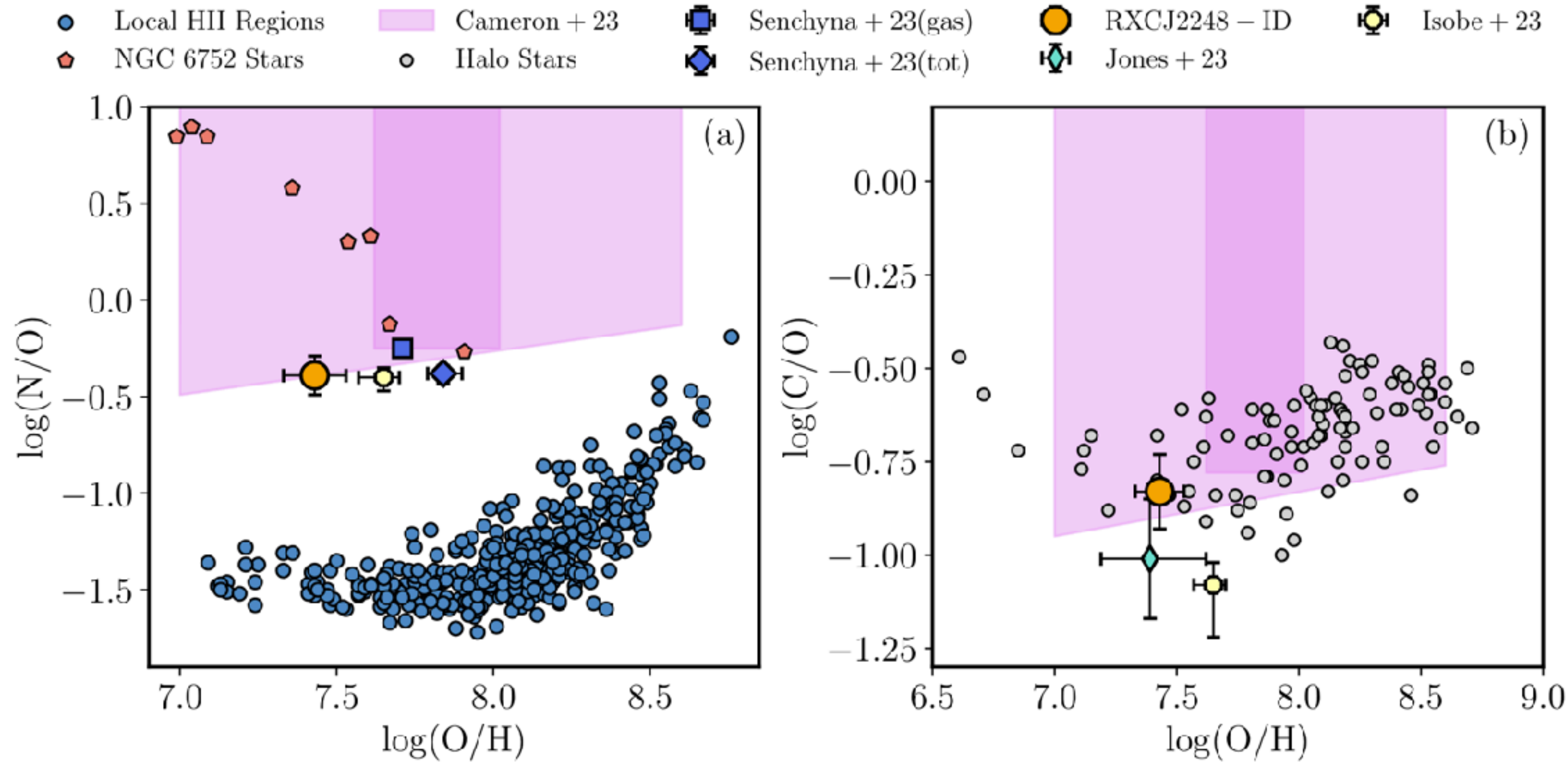
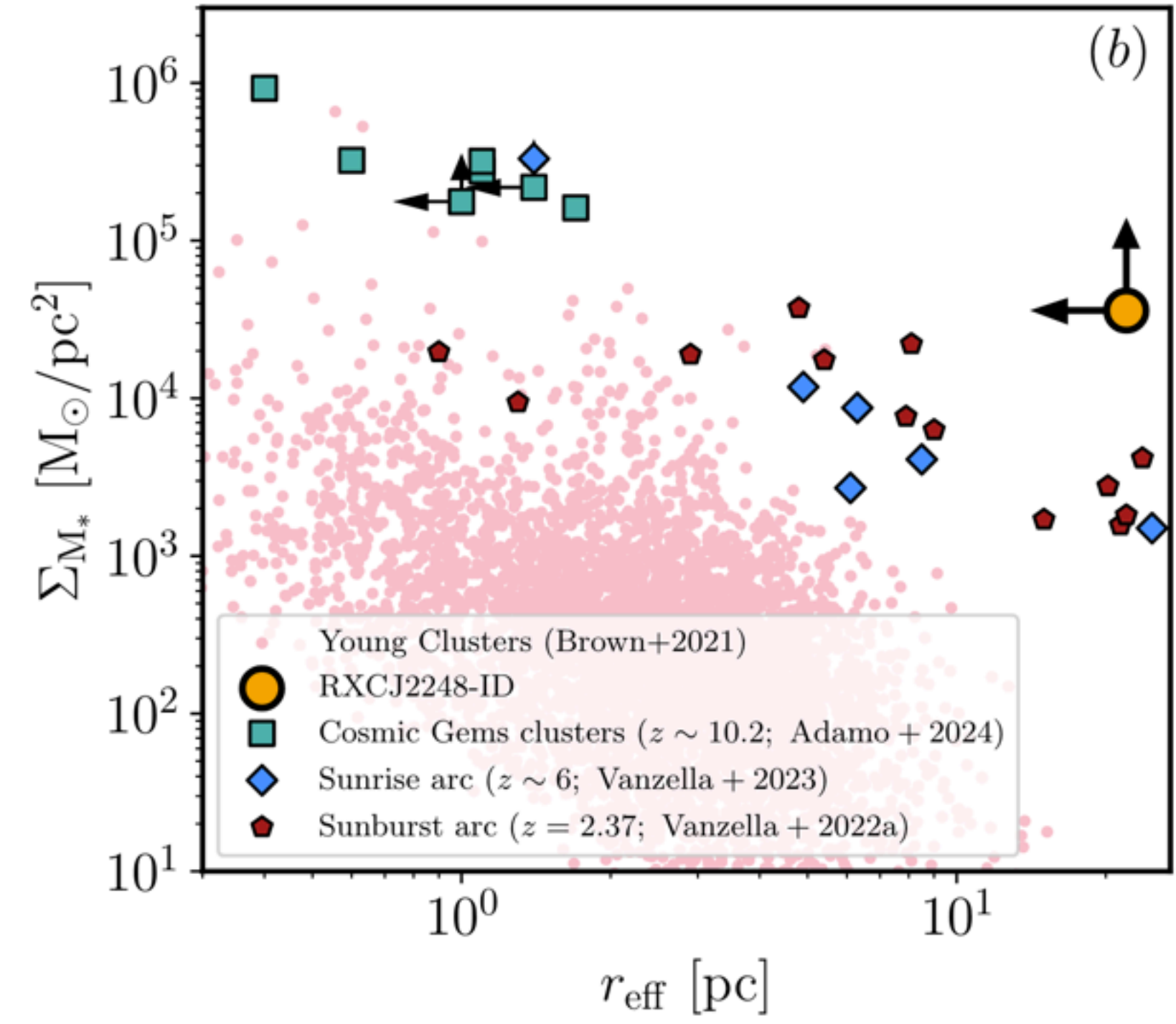


Figure 13. Comparison of abundance patterns of RXCJ2248-ID to other objects in the local Universe and at high redshift. Panel (a) displays the N/O abundance ratio as a function of O/H described in Section 5.2. The values derived for RXCJ2248-ID are displayed as an orange circle. Inferred total (gas-phase) abundances for GN-z11 derived by Senchyna et al. (2023) are displayed as the blue diamond (square). The fiducial (conservative) ranges of N/O and O/H inferred for GN-z11 from Cameron et al. (2023a) is displayed as the light (dark) purple shaded region. Values for GLASS_150008 at $z = 6.23$ derived by Isobe et al. (2023) is shown as the yellow circle. The small blue circles represent abundances from local HII regions from Pilyugin et al. (2012), and the red pentagons are measurements from stars in the globular cluster NGC 6752 (Carretta et al. 2005). RXCJ2248-ID has significantly higher nitrogen abundance at fixed O/H relative to the local sequence of HII regions, and is much more consistent with values probing conditions of globular cluster formation. Panel (b) compares C/O vs. O/H between RXCJ2248-ID and objects from the literature. We additionally compare to the C/O and O/H of GLASS_150008 derived by Jones et al. (2023).

N過剰なコンパクトな
星形成領域も見つかる($z \sim 6$)

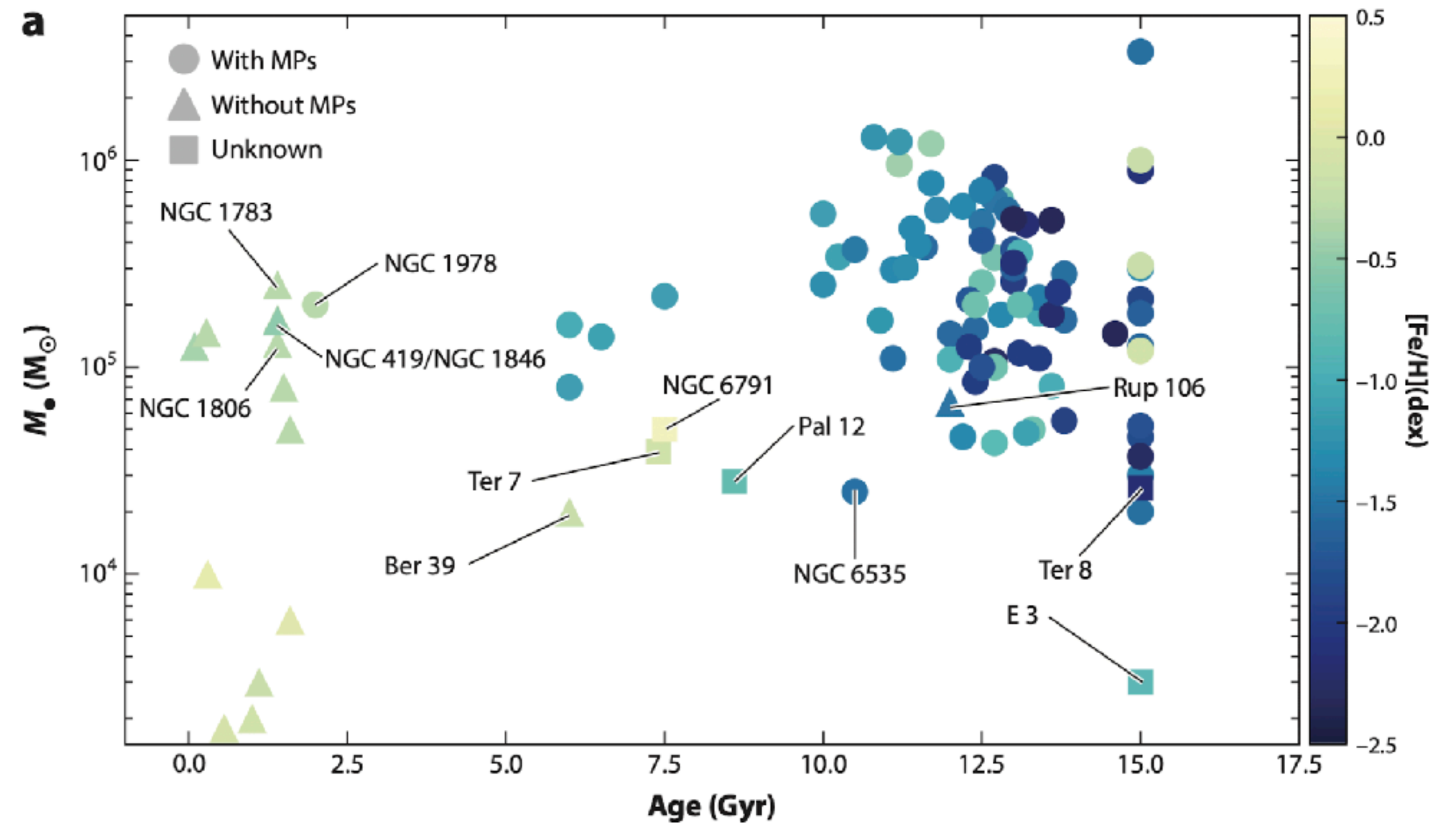
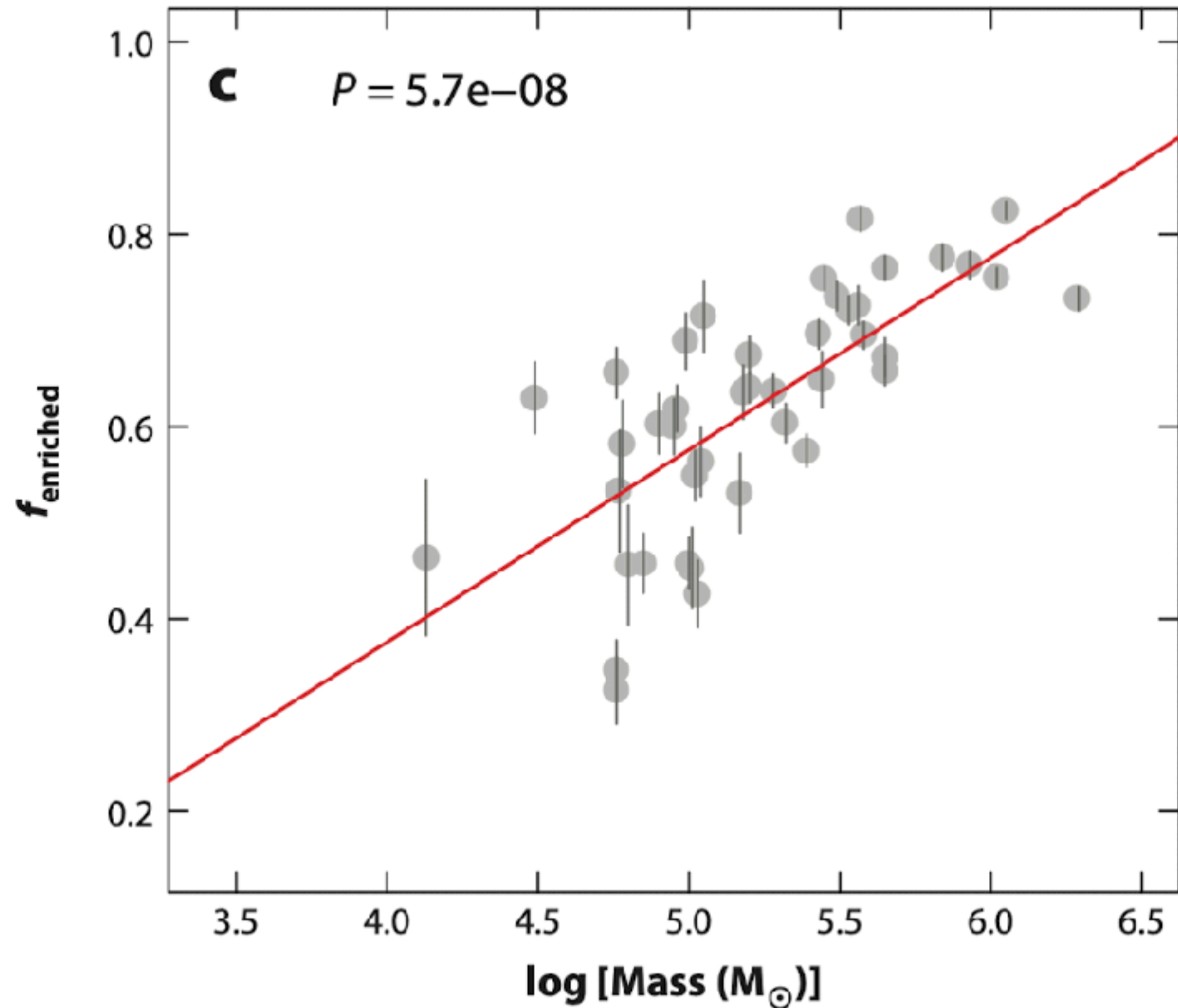


[N/O]は球状星団に類似している？

(Topping+24)

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

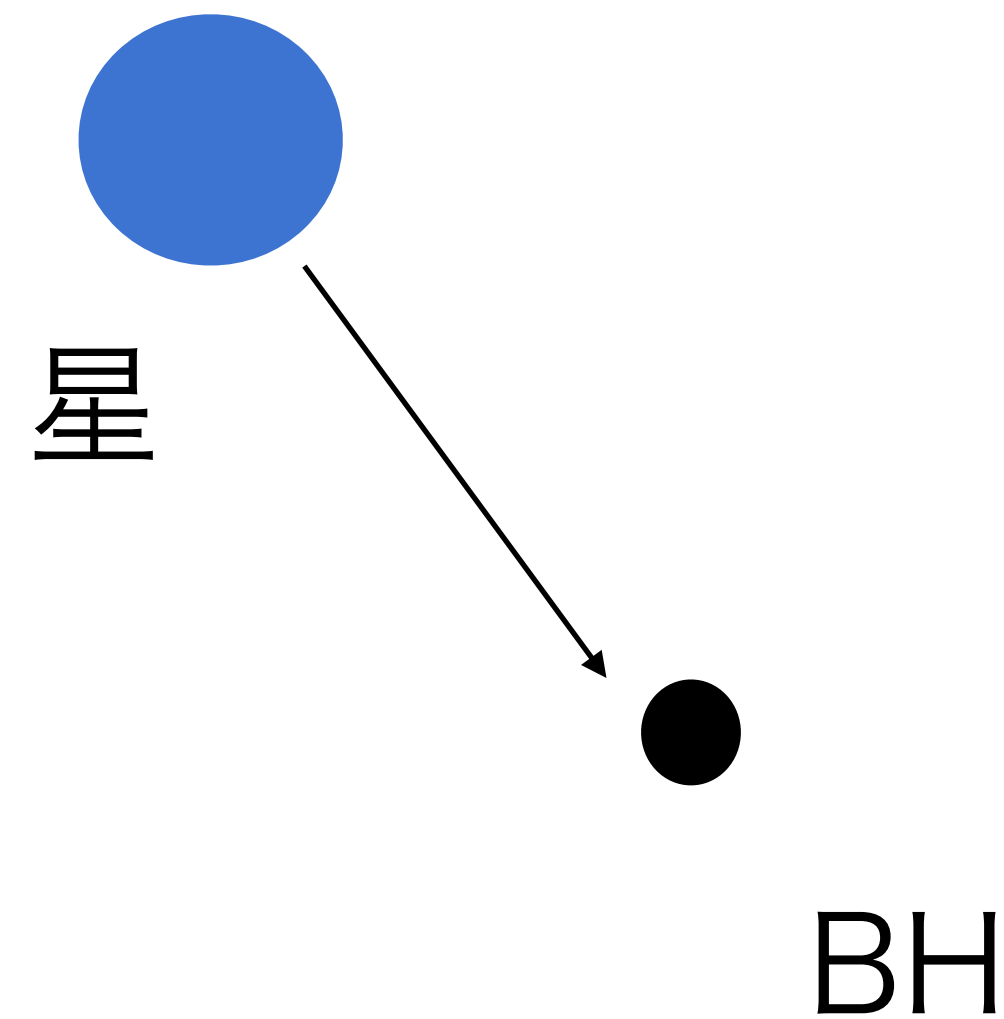
窒素の起源

3つのシナリオ

① Wolf-Rayet星

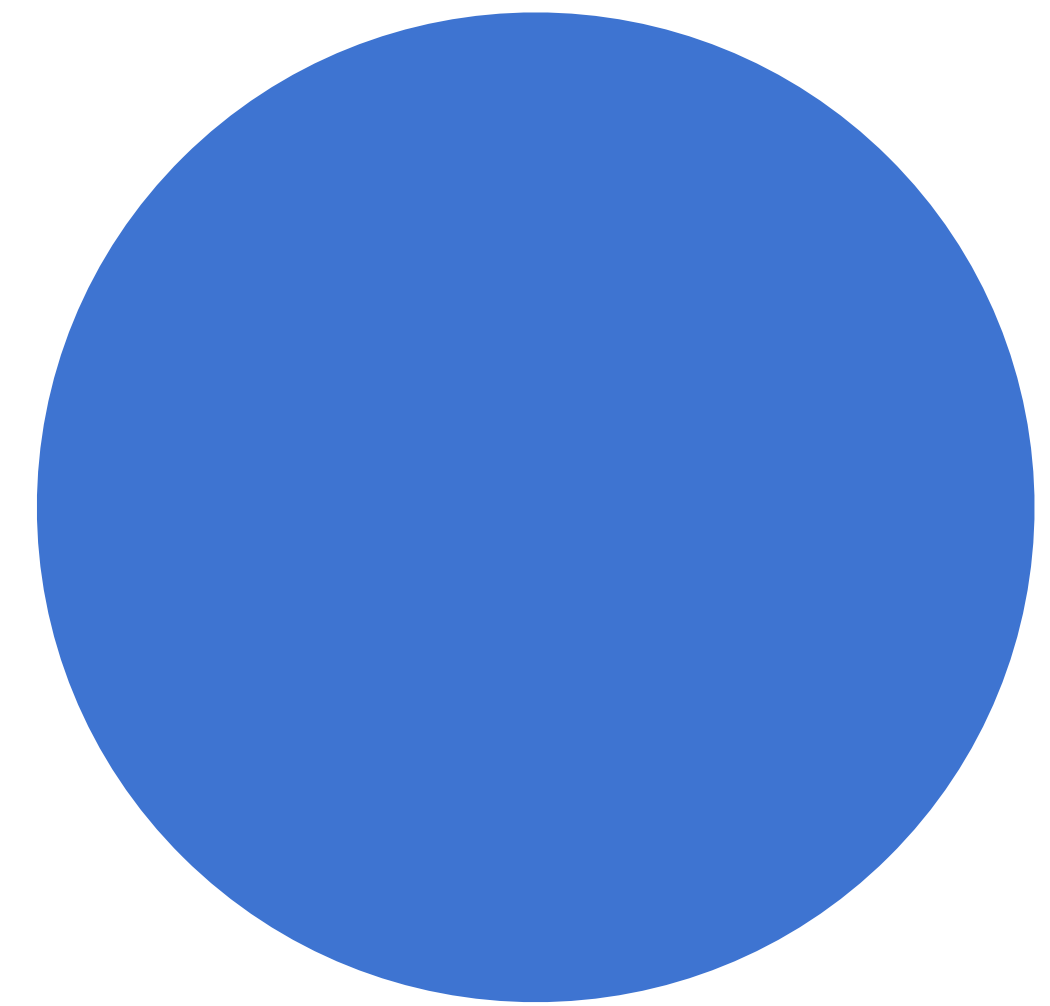


② Tidal disruption event



(Cameron+23, Watanabe+23)

③ 超大質量星



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

(Charbonnel+23)

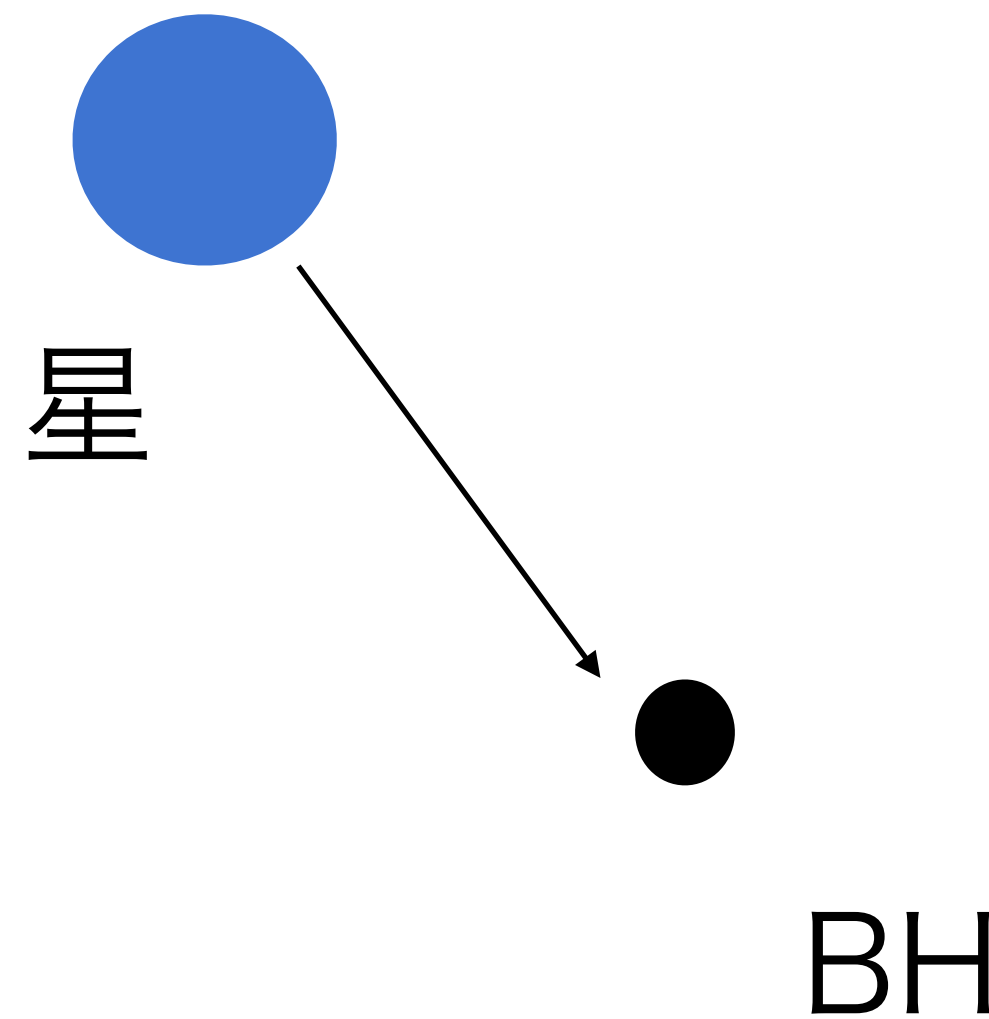
窒素の起源

3つのシナリオ

① Wolf-Rayet星

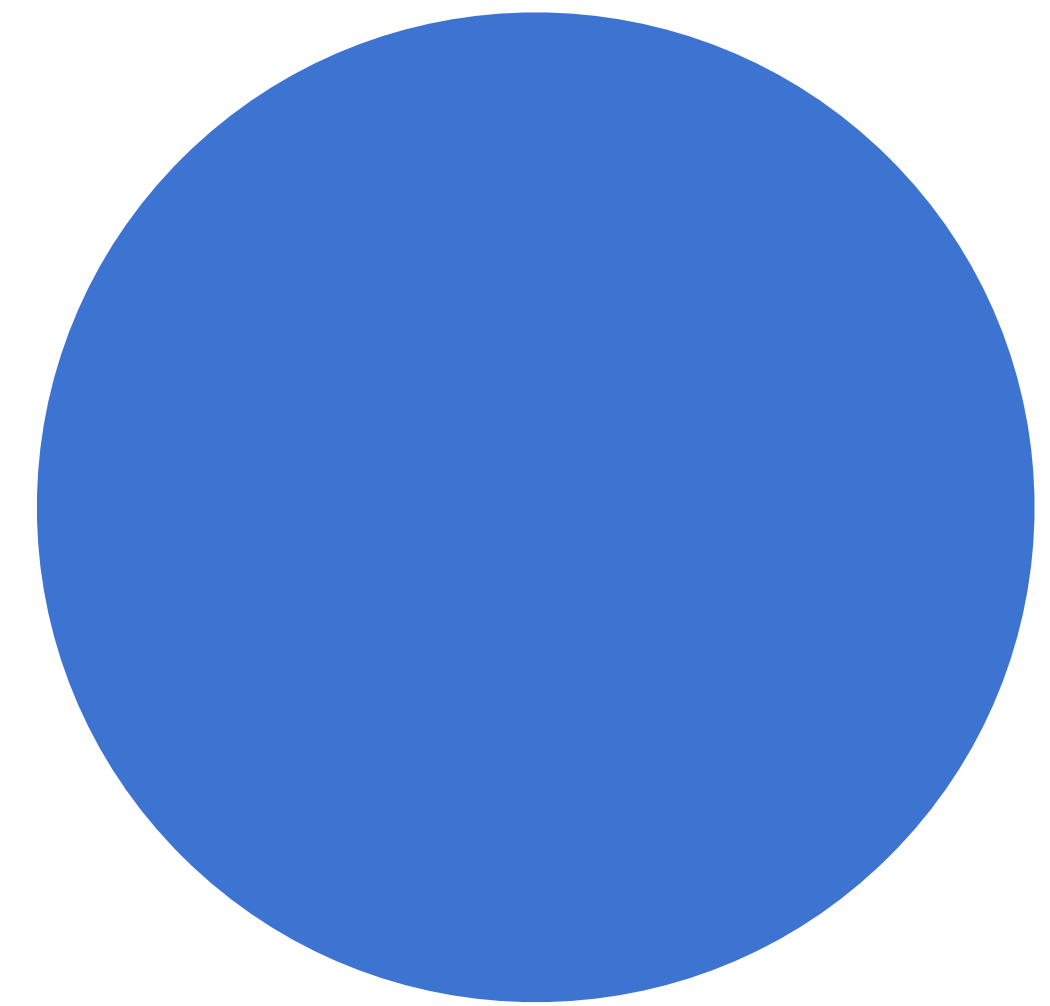


② Tidal disruption event



(Cameron+23)

③ 超大質量星

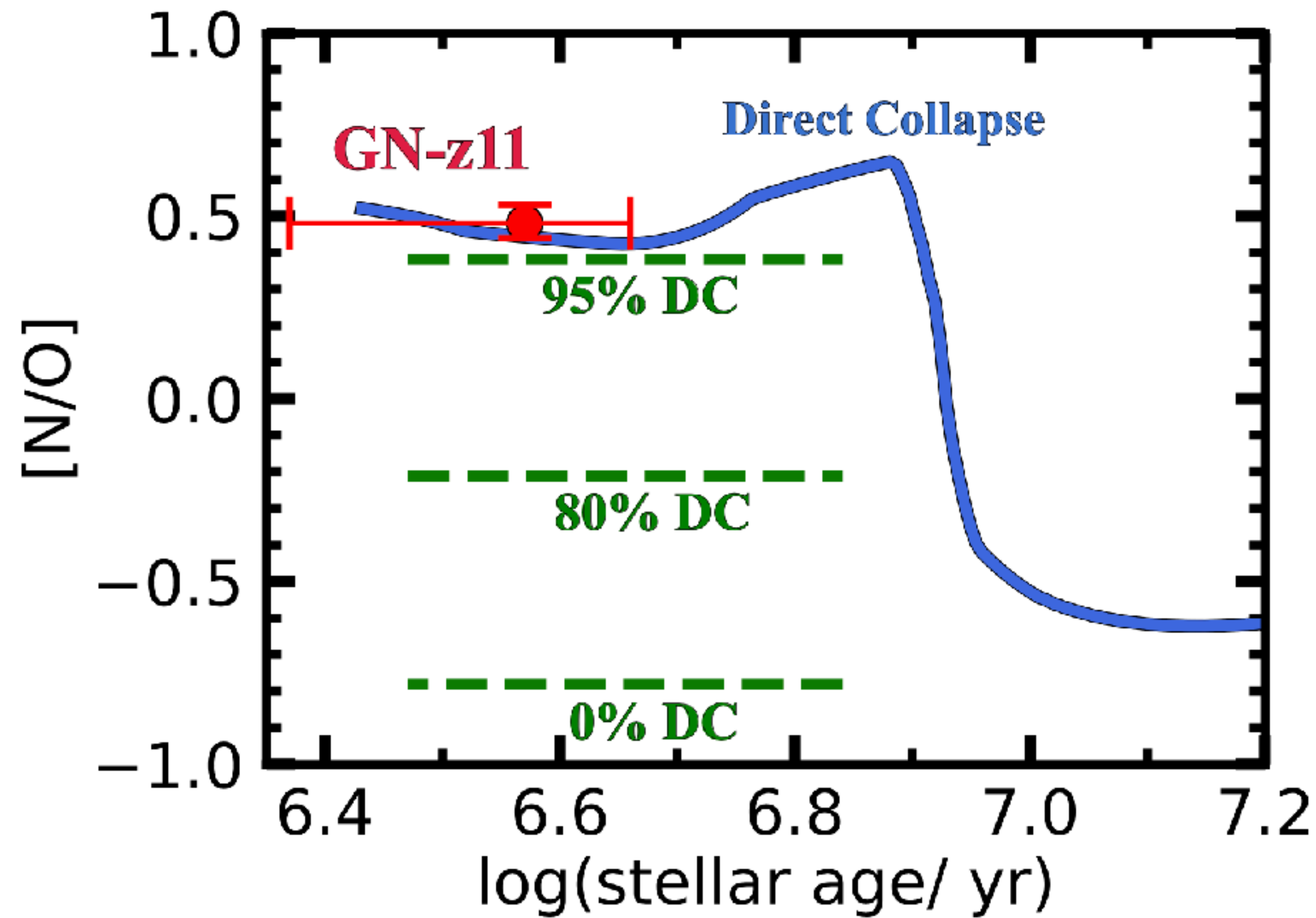


$$M_* > 1000 M_{\odot}$$

(Gieles+18, 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 Wolf-Rayet モデル



(Watanabe+23)

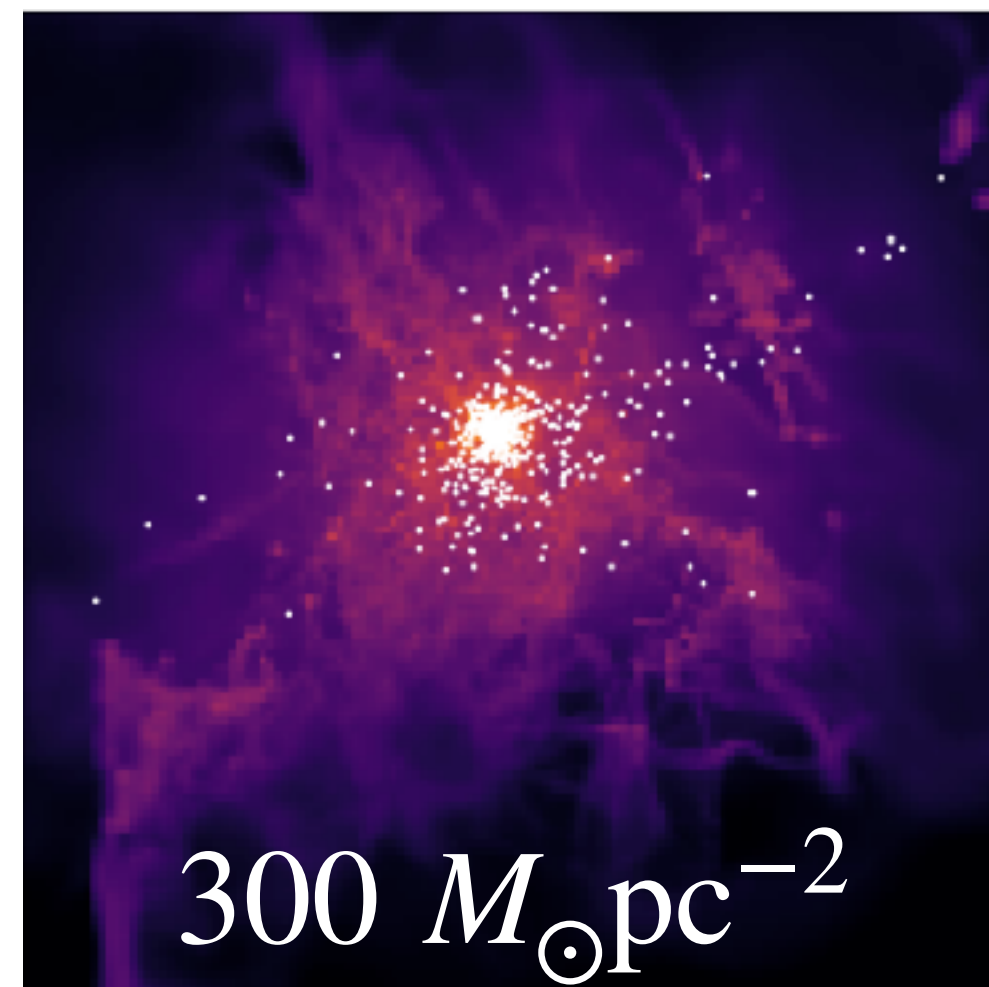
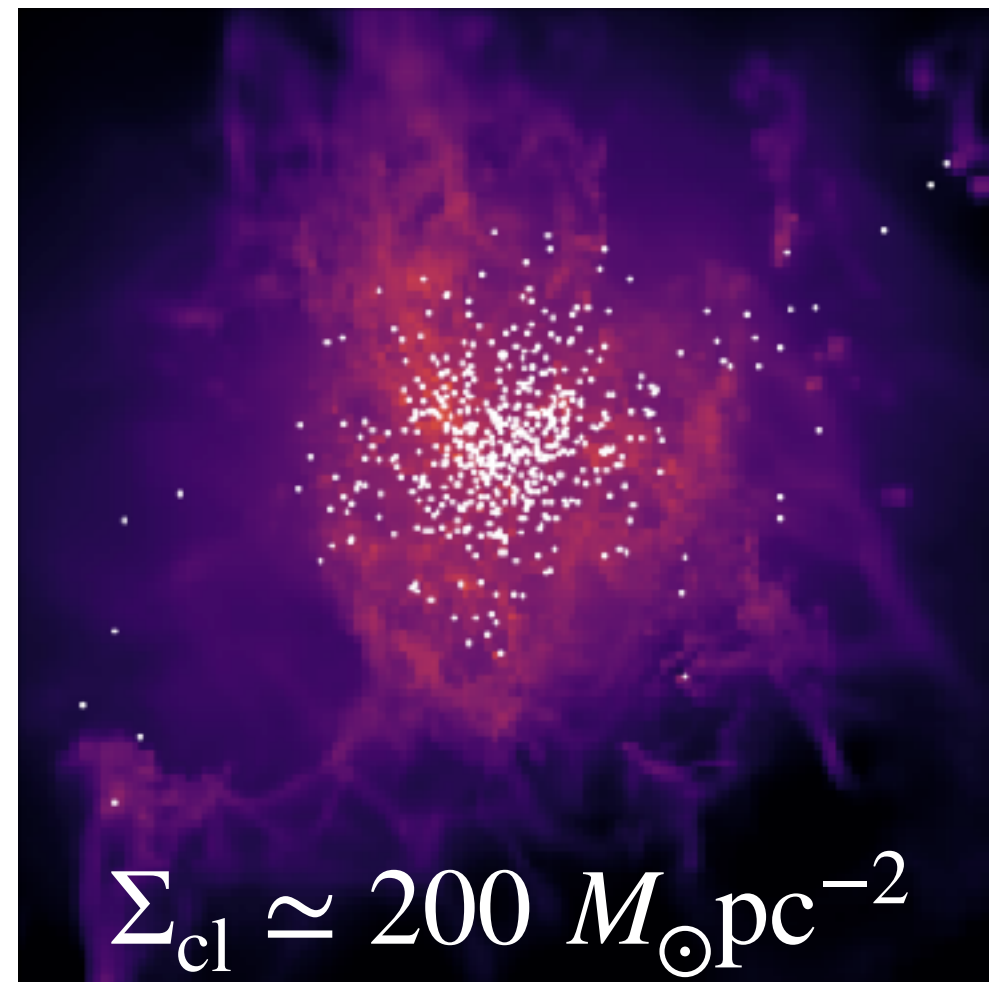
酸素は超新星爆発により主に供給される。

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

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

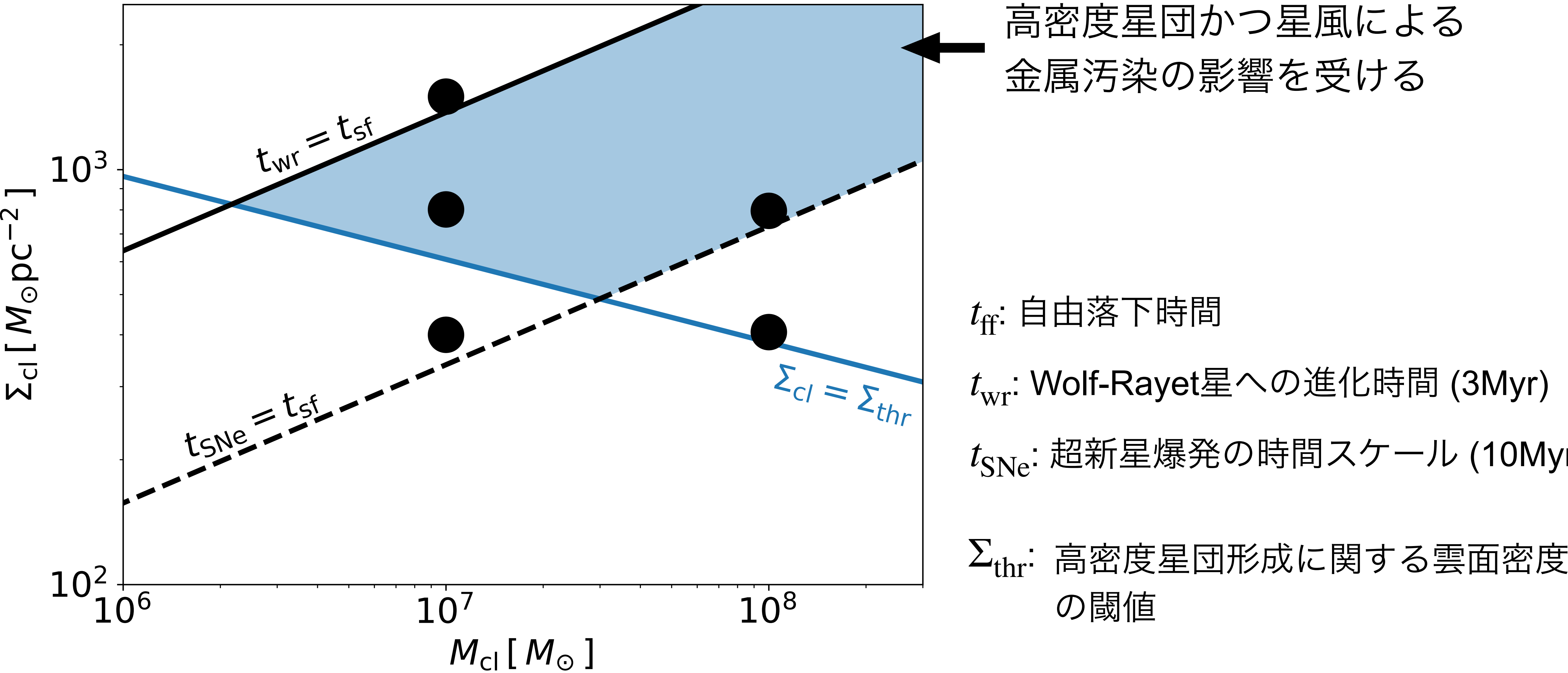
M_{cl} : 雲質量, T_{i} : 電離ガス温度, s_{*} : 電離光子放出率

(HF & Yajima 21, 23)

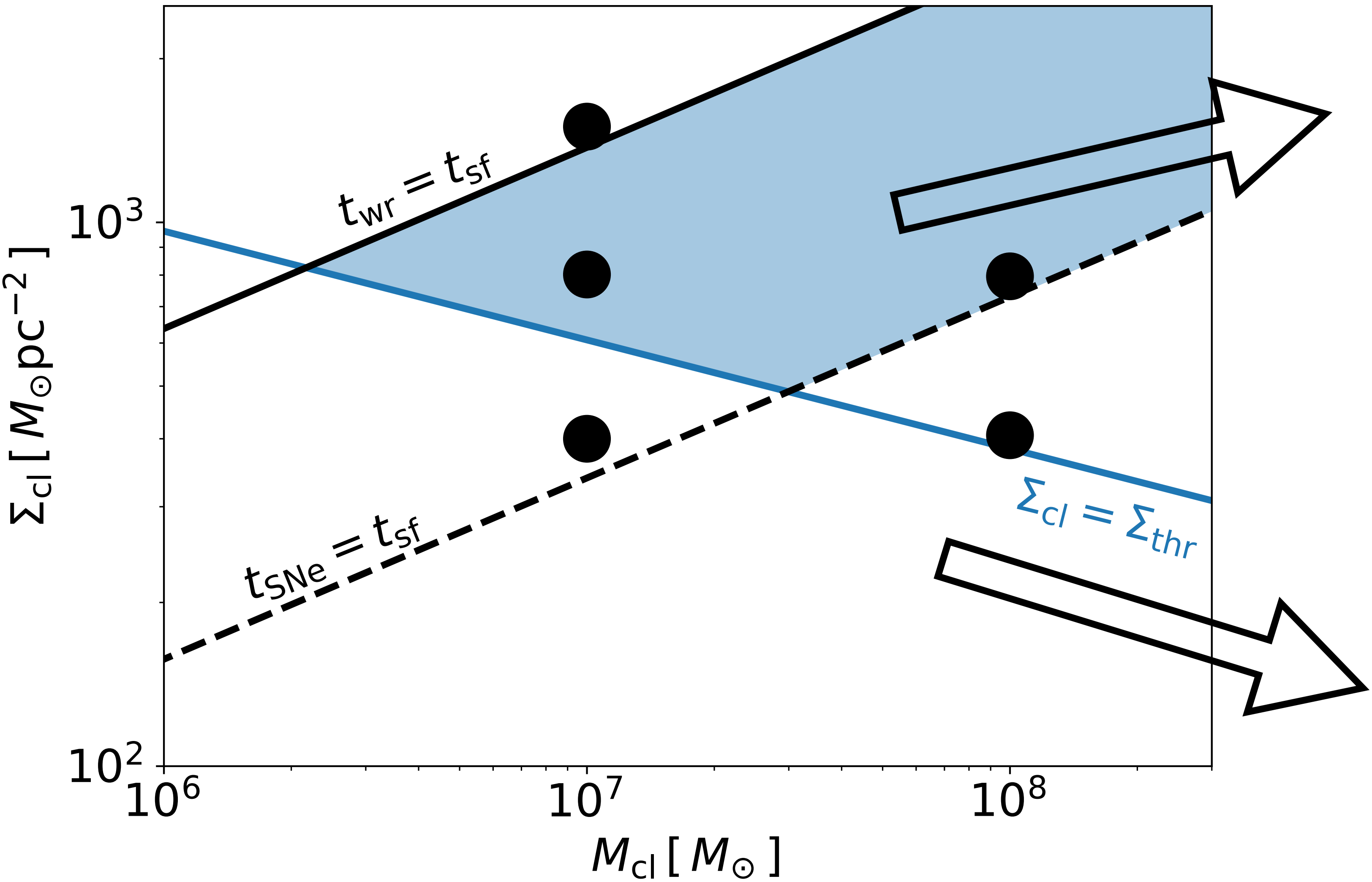
条件2: 星形成継続時間(t_{dur})内にWR星状態となる

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

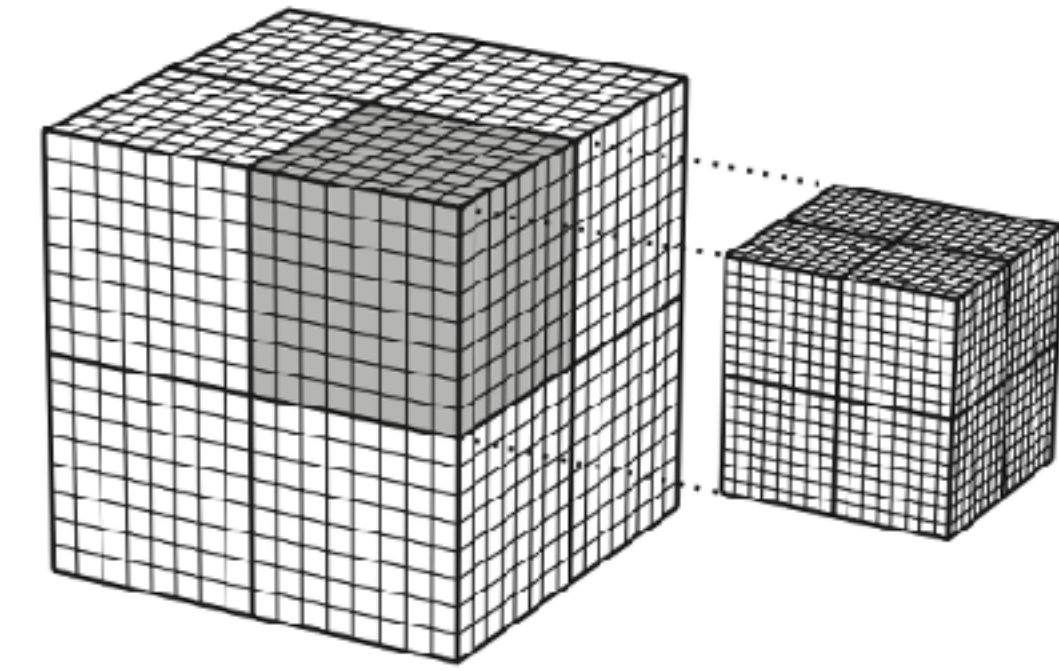


数値計算 (星風+超新星爆発入り)

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)

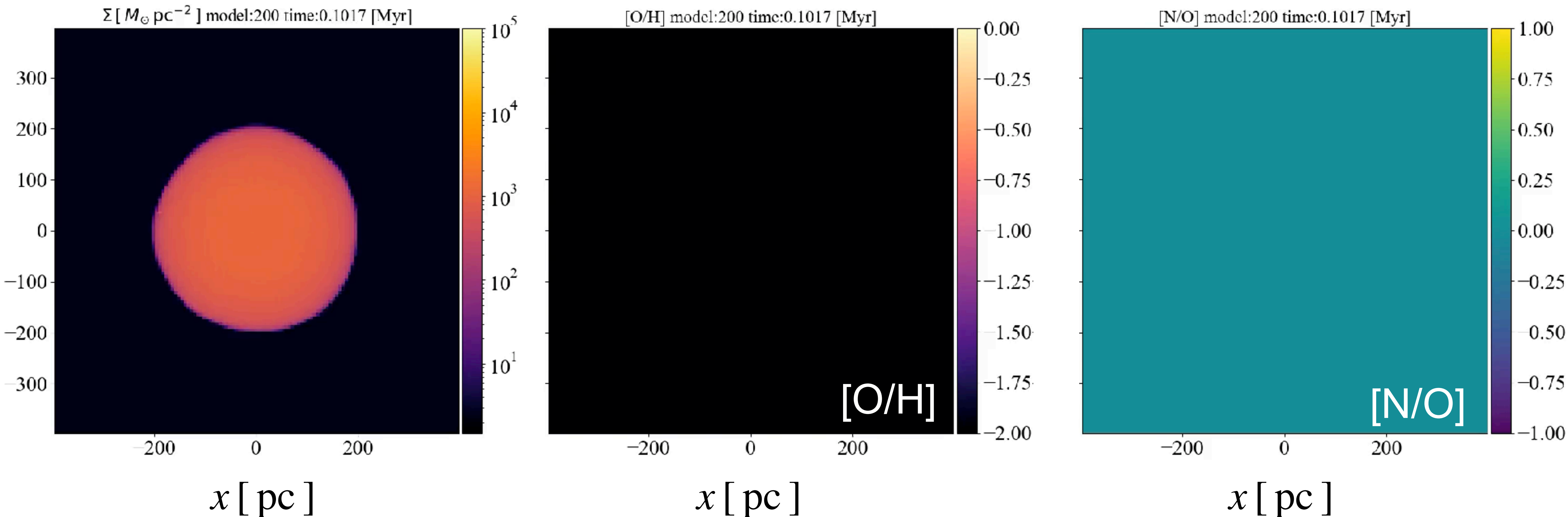
EUV photons

FUV photons (H₂, CO photodissociation)

Dust thermal emission

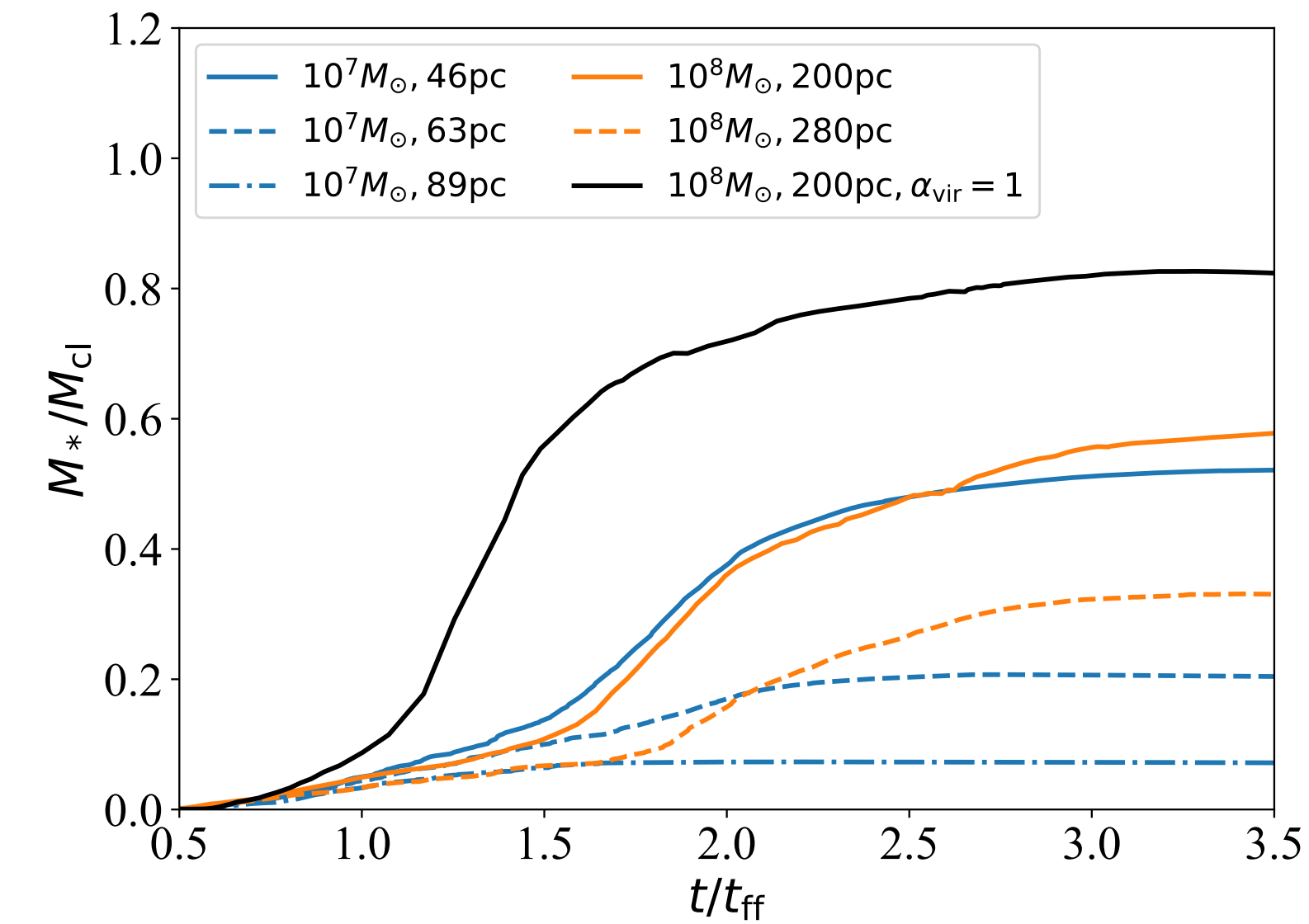
(Rosdahl+13, HF&Yajima 21)

Cloud mass: $10^8 M_\odot$, Radius: 200 pc, Metallicity: $10^{-2} Z_\odot$

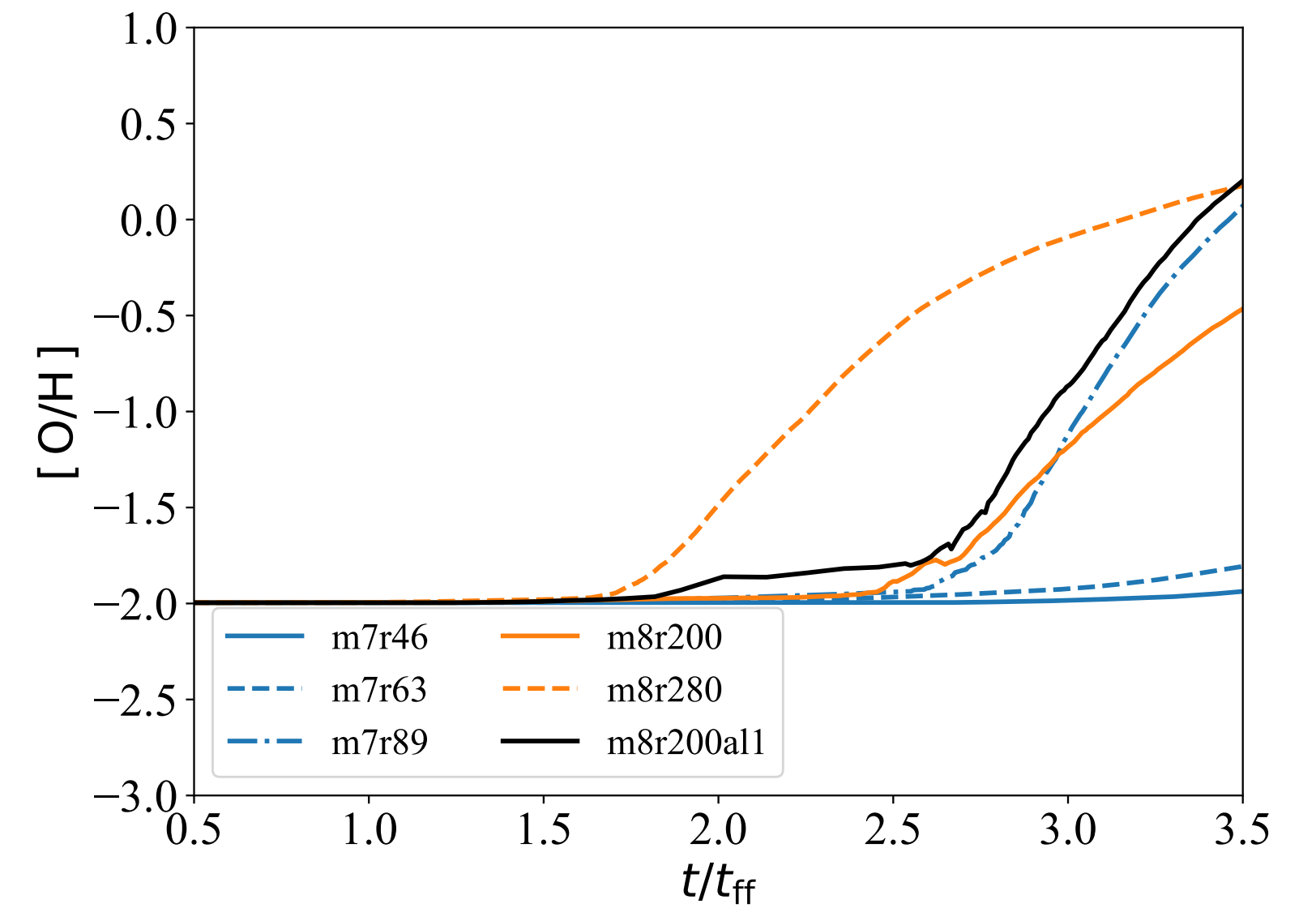
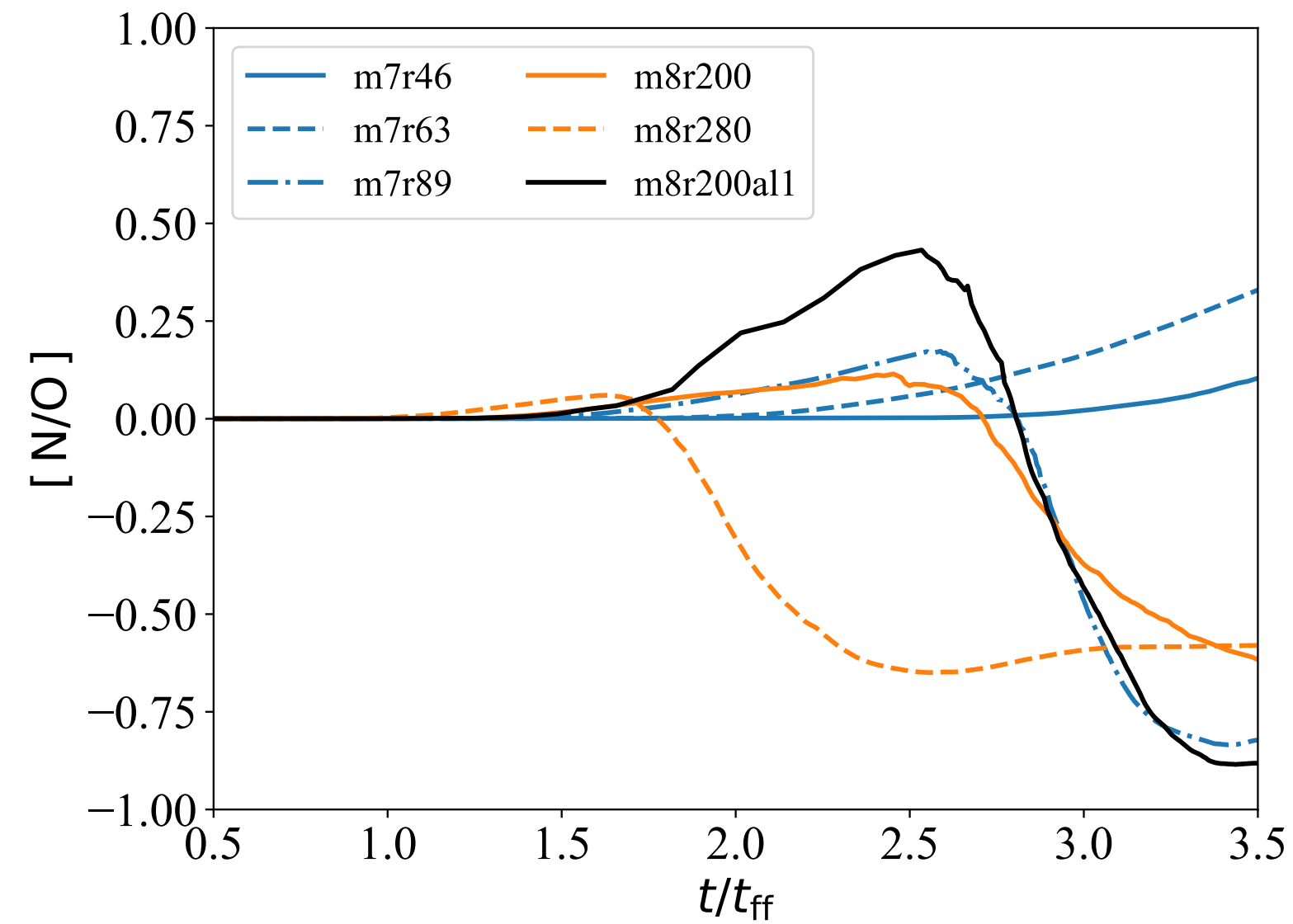


Results:

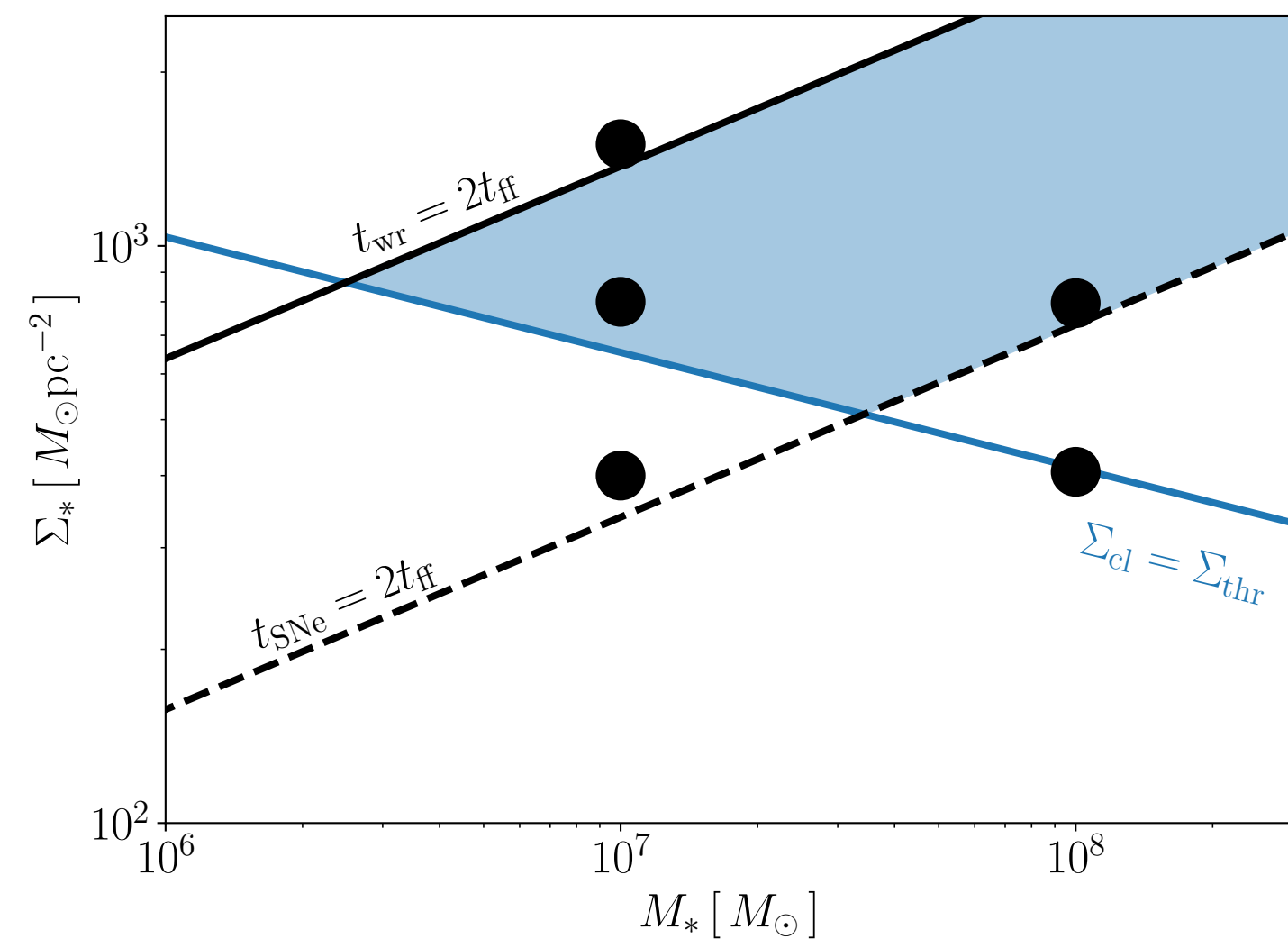
Stellar mass



Gas abundance:



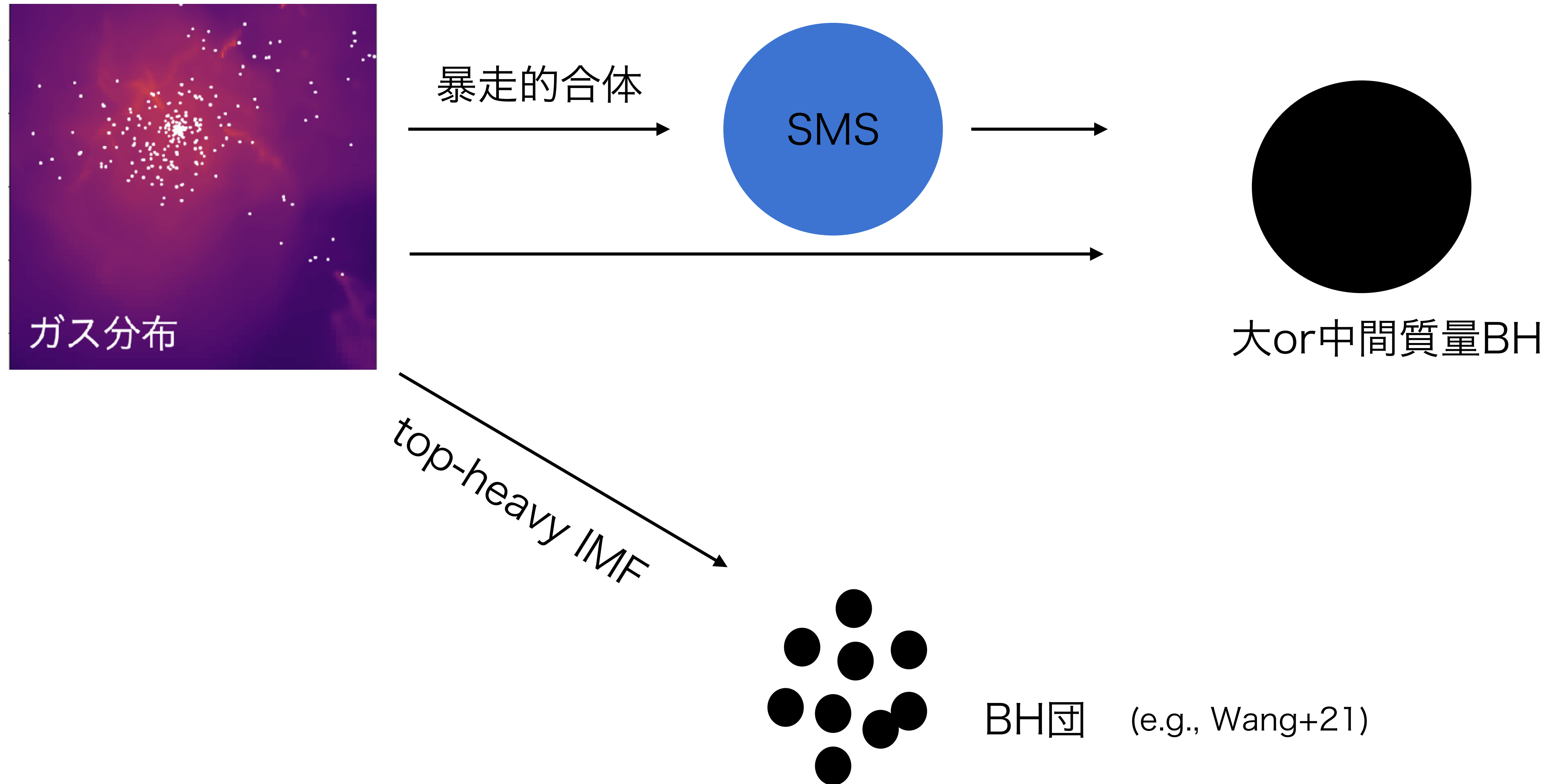
Initial conditions:



星風により窒素が豊富な星団が誕生する。

特に、星質量が $10^7 M_{\odot}$ 以上の星団で窒素が豊富な段階が発現する可能性が高い。

高密度星団とBHの関係:



個々の星降着成長まで分解した計算が必要となるため、今後着手していきたい。

まとめと今後

輻射流体シミュレーションを用いて、高密度星団形成と窒素過剰ガスの形成条件について導出した。

今後は、高密度星団中における星衝突による、中間質量BHや超大質量星形成について考慮したシミュレーションを行うことで、JWSTにより観測された銀河との対応について考えていきたい。