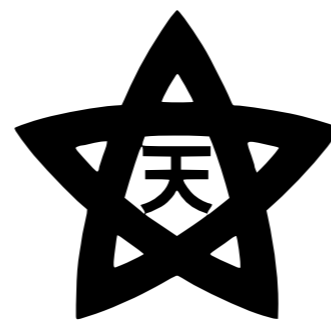


宇宙初期環境における HIガス衝突による大質量星団形成



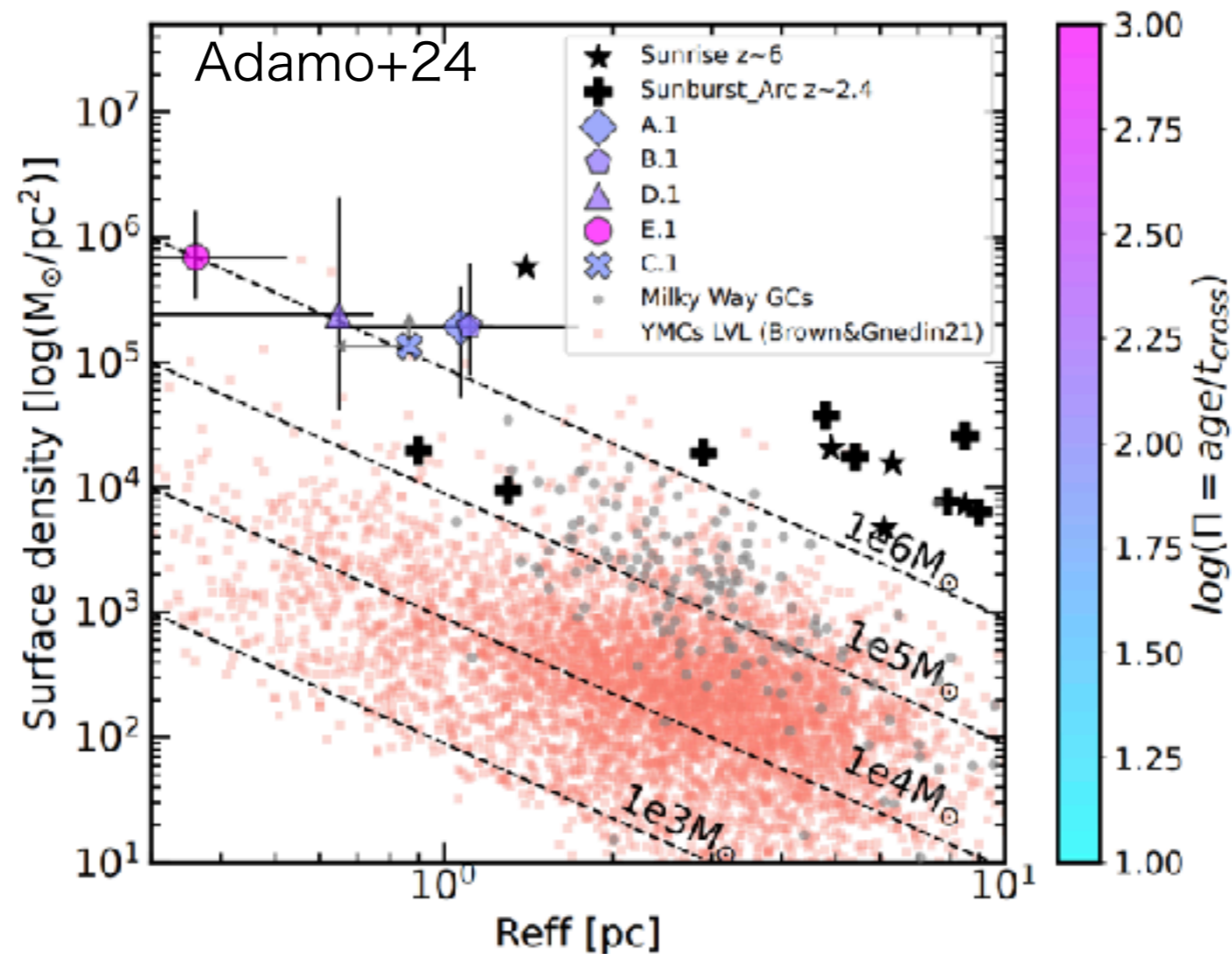
Theoretical Astrophysics
Tohoku University

東北大学

前田 龍之介

共同研究者 大向一行 (東北大学), 井上剛志 (甲南大学)

JWSTで観測された宇宙初期の大質量星団



✓ JWSTで観測された星団 e.g., Vanzella+22, 23a, 23b, Adamo+24

JWSTによる重力レンズされた銀河の観測

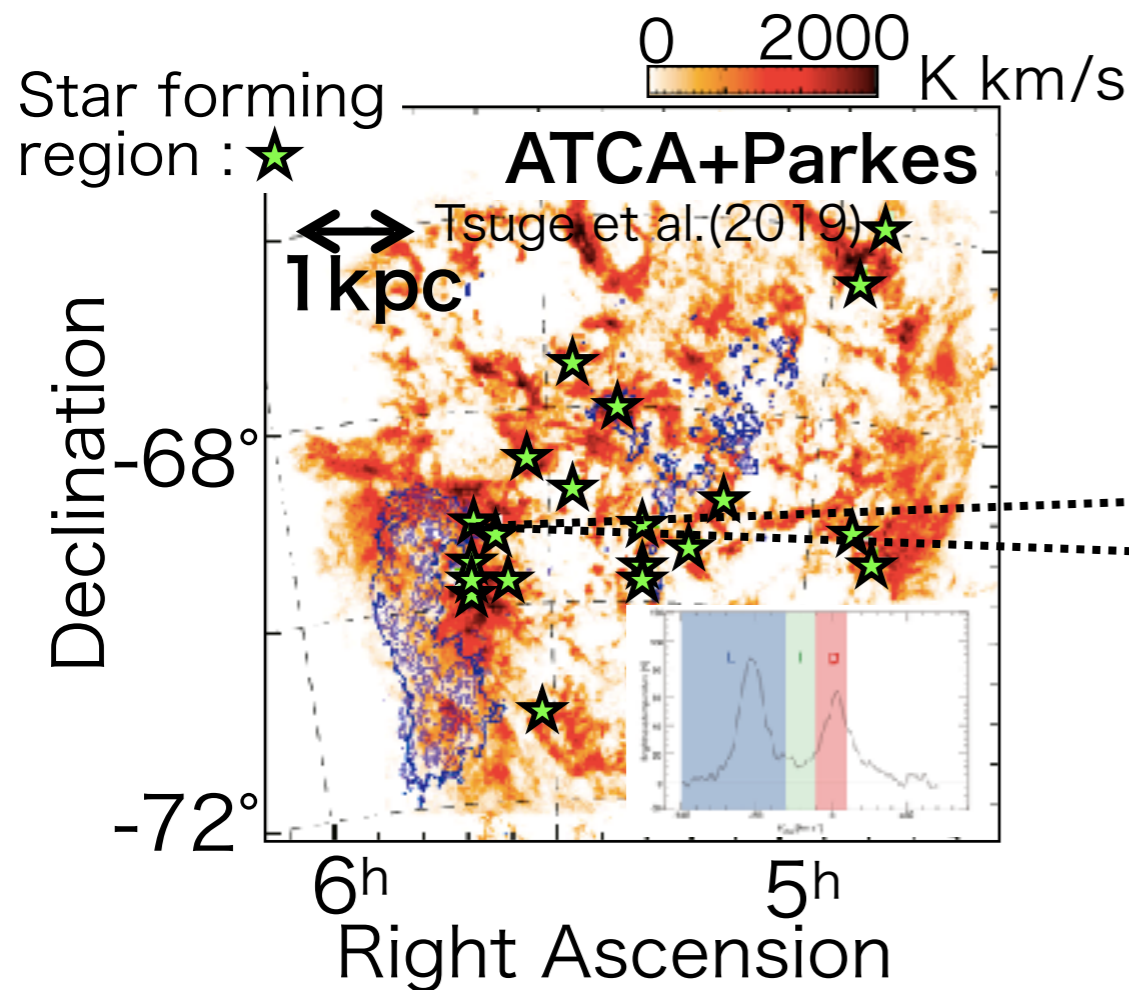
$M \sim 10^6 M_{\odot}$ の星団が $z \sim 4 - 10$ で発見されてきている

大質量星団の総質量はその銀河の星質量の $> 30\%$ に相当

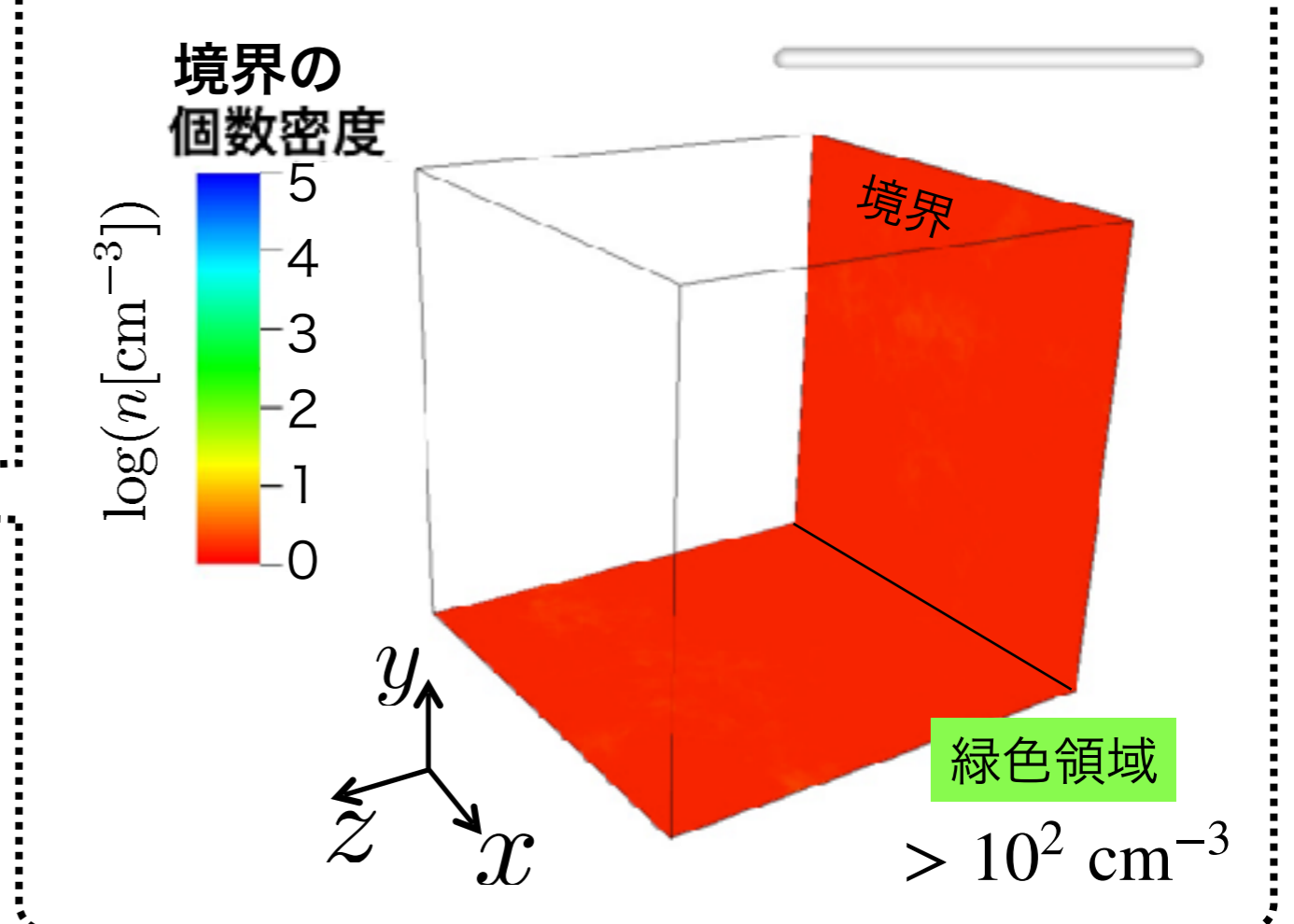
宇宙初期環境での大質量星団形成の理解したい

現在の宇宙における大質量星団形成

✓ HIガス観測 @LMC



✓ シミュレーション Maeda+21,24

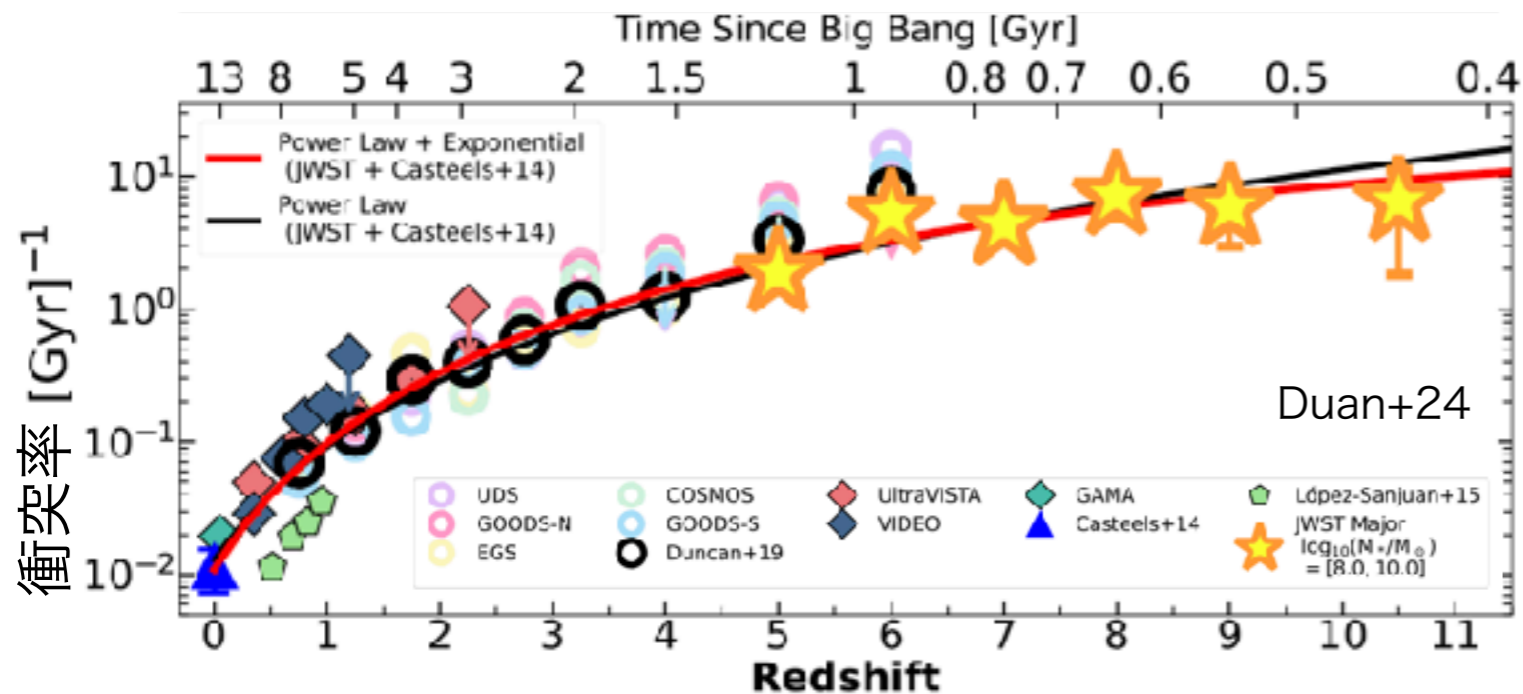


- ≫ 大マゼラン雲(LMC)では**高速ガス衝突領域で大質量星団が形成** Fukui+17,Tsuge+19,21
- ≫ LMCの高速ガス流は過去の小マゼラン雲との近接遭遇に由来 e.g., Bekki & Chiba 07
- ≫ シミュレーションでも**高速ガス衝突で大質量星団形成を再現** Maeda+21, 24

銀河間相互作用による大質量星団形成は宇宙初期でも起きるか？

初期宇宙環境のガス衝突計算

✓ 初期宇宙での銀河衝突率の観測

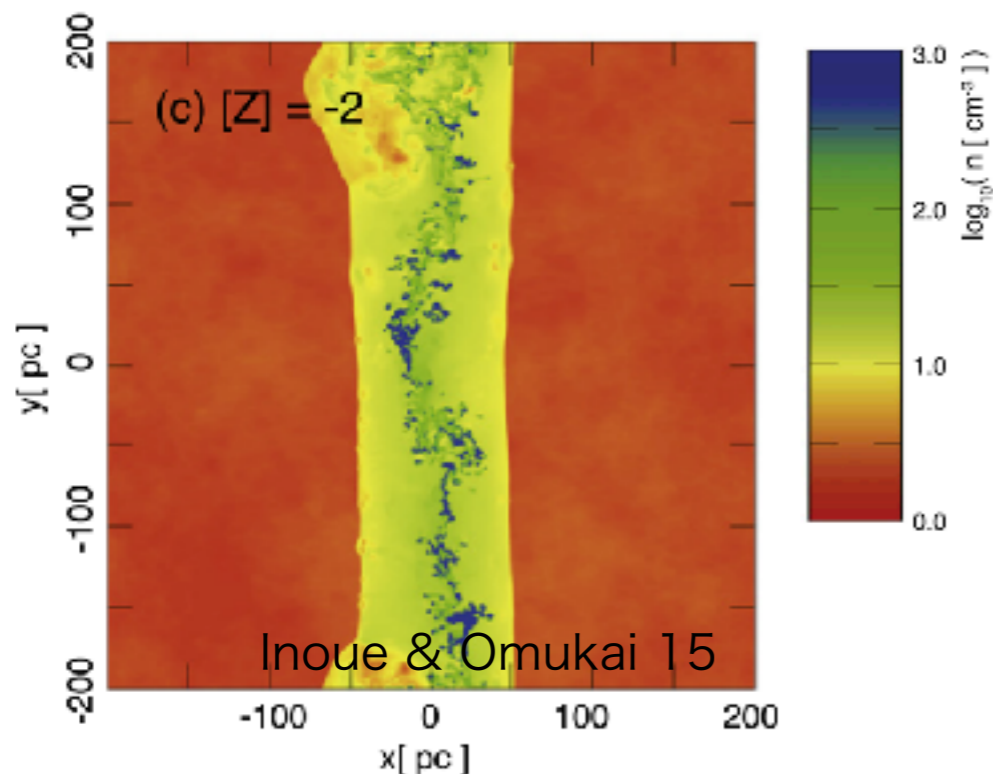


≫ JWSTによる観測

≫ 銀河衝突率が増加

≫ ガス衝突領域で同様に星団形成がおきるか？

✓ 宇宙初期環境のガス衝突計算

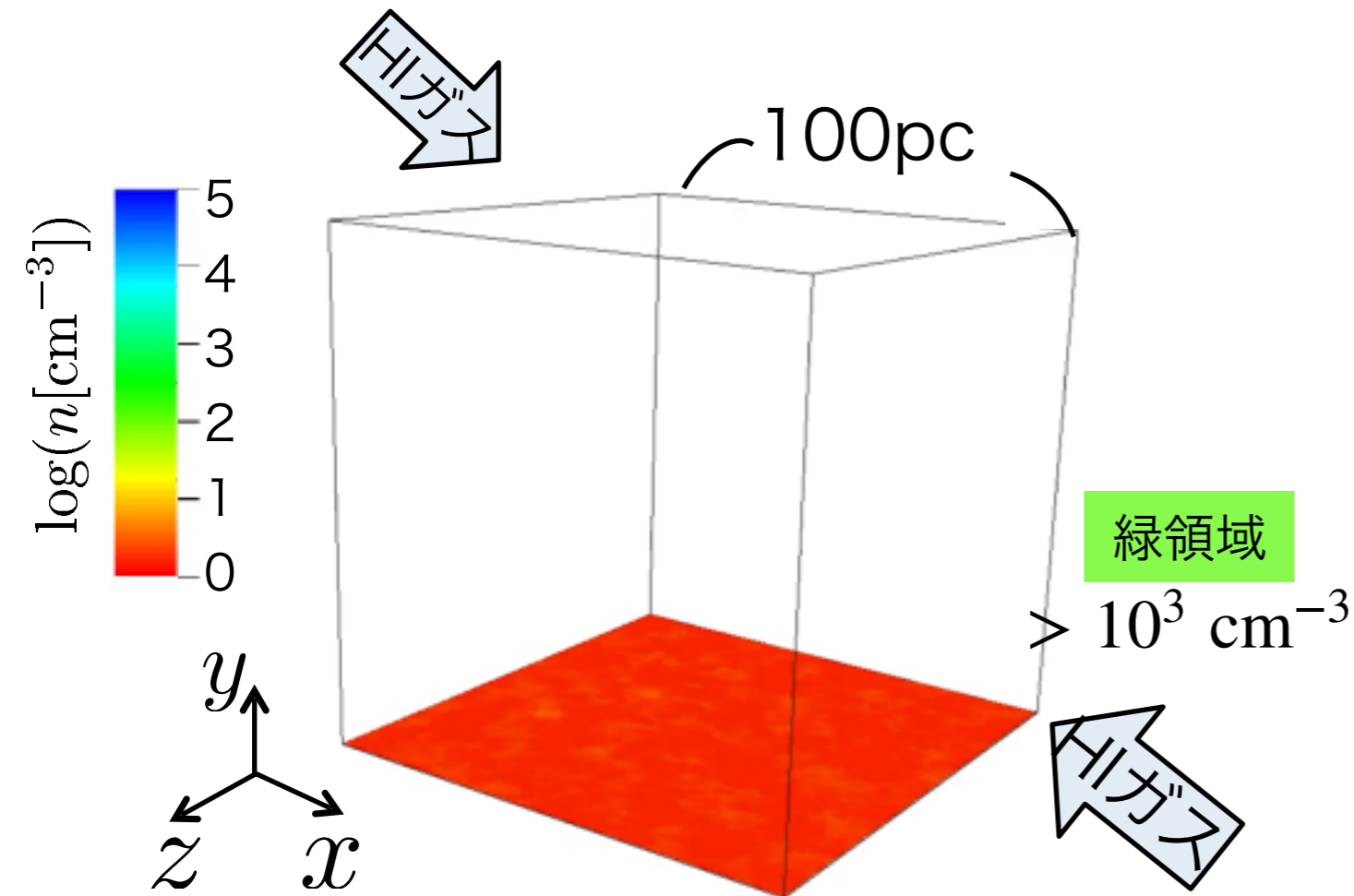


≫ 金属量の小さいガス計算では熱不安定性の最大成長波長が大きくなり大きなクラウドが形成

≫ $Z < 0.04 Z_{\odot}$ で熱不安定で形成した雲のスケールがジーンズ長を超える→大質量星団形成？

≫ 自己重力と磁場がある場合はどうなるのか？

本研究の目的



✓ 太陽金属量の場合 Maeda+21, 24

衝撃波後面で熱不安定性で
クラウド形成

形成したクラウドが重力で集積

$M \sim 10^5 M_{\odot}$, $L \sim 6 \text{ pc}$ となる
大質量ガスクラウドが形成

▶ 宇宙初期の低金属環境ではどうか？

➤ 熱不安定性の成長はガスの金属量に依存

Field長： $l_F \sim 0.13 \text{ pc} (Z/10^{-2} Z_{\odot})^{-1/2}$

成長時間： $t_{\text{cool}} \simeq 30 \text{ Myr} \left(\frac{Z}{10^{-2} Z_{\odot}} \right)^{-1}$

➤ 太陽金属量と同じように星団形成が起きるのか？

低金属環境のガス衝突による星団形成？

シミュレーションセットアップ

✓ 基礎方程式

MHD c.f. Inoue & Inutsuka 12
+ 加熱冷却 Inoue & Inutsuka 12
+ 化学反応 Inoue & Omukai 15
+ 自己重力 Maeda+24a
+ フィードバック Maeda+24b

冷却はMaeda+24bに加えて
高温側の冷却関数を導入 Kim+23

Free-Free Draine+11
再結合線 (H) Draine+11
CIE Gnat & Ferland 12

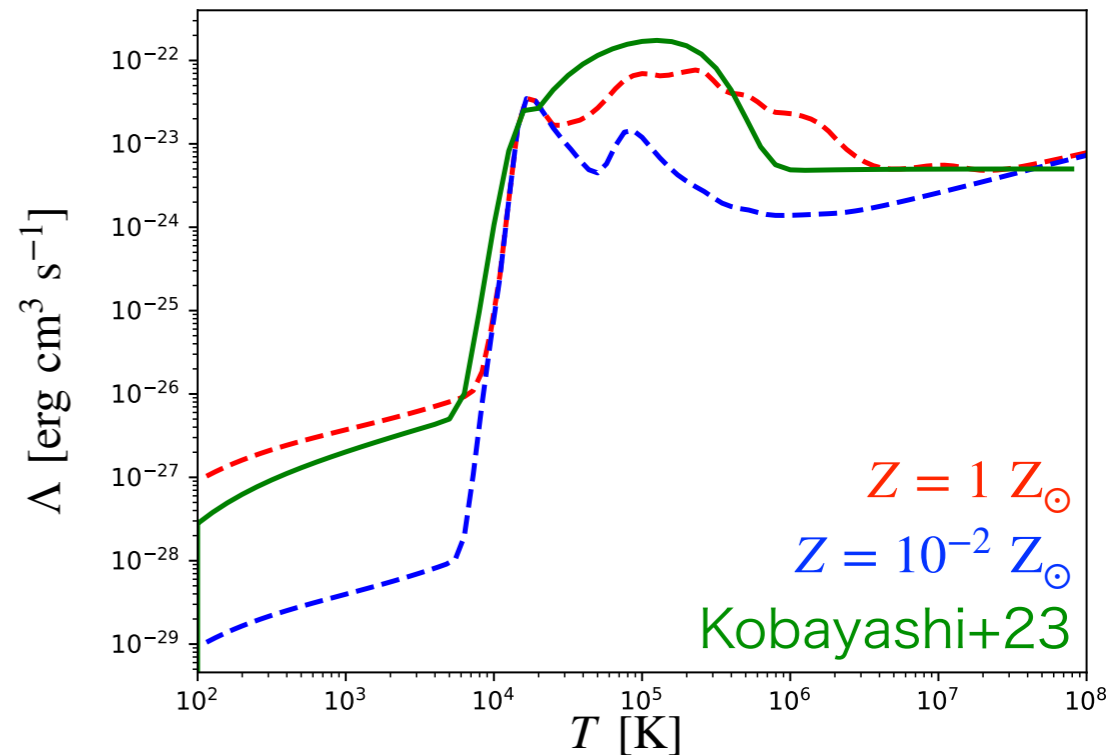
✓ 境界条件

yz 面 ガス流入
 xy, zx 面 周期境界

✓ 初期条件

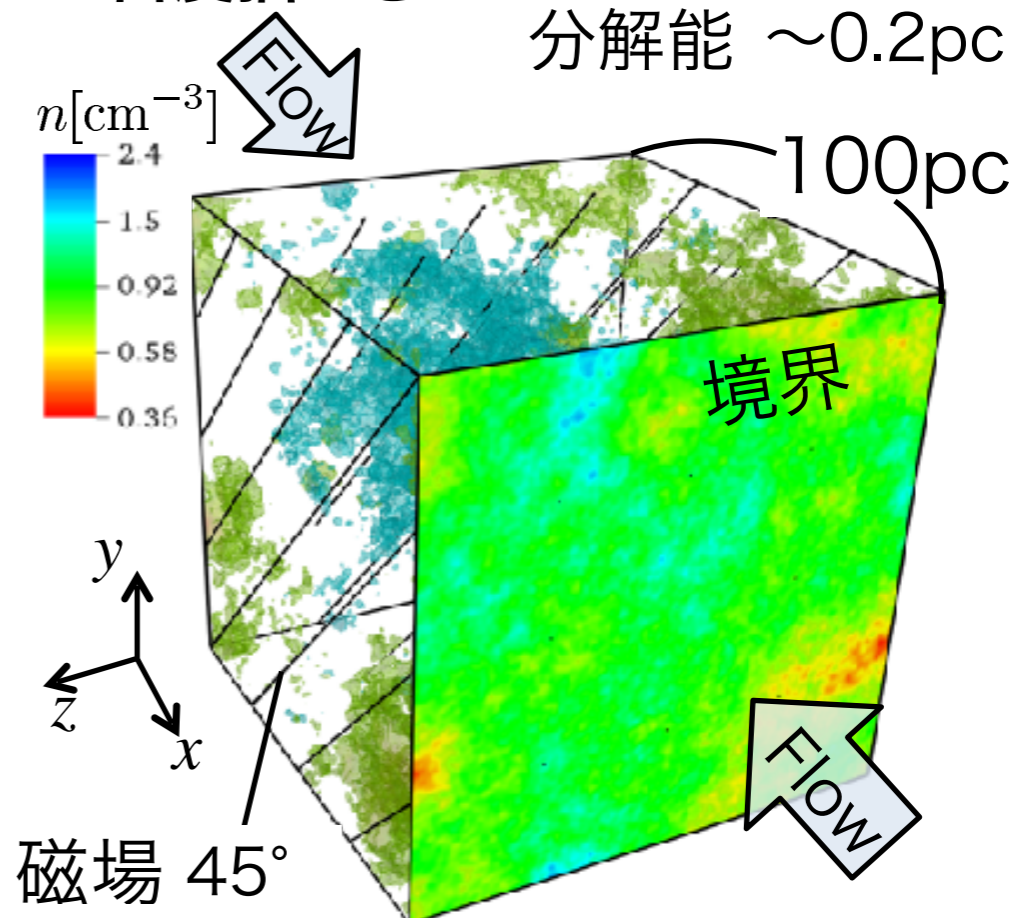
$v_{\text{rel}} = 100 \text{ km/s}$: 相対速度
 $n_0 \sim 1 \text{ cm}^{-3}$: 初期密度
 $B_0 = 1 \mu\text{G}$: 初期磁場強度
 $Z = 10^{-2}, 10^{-4} Z_{\odot}$: 金属量

➤ 冷却関数

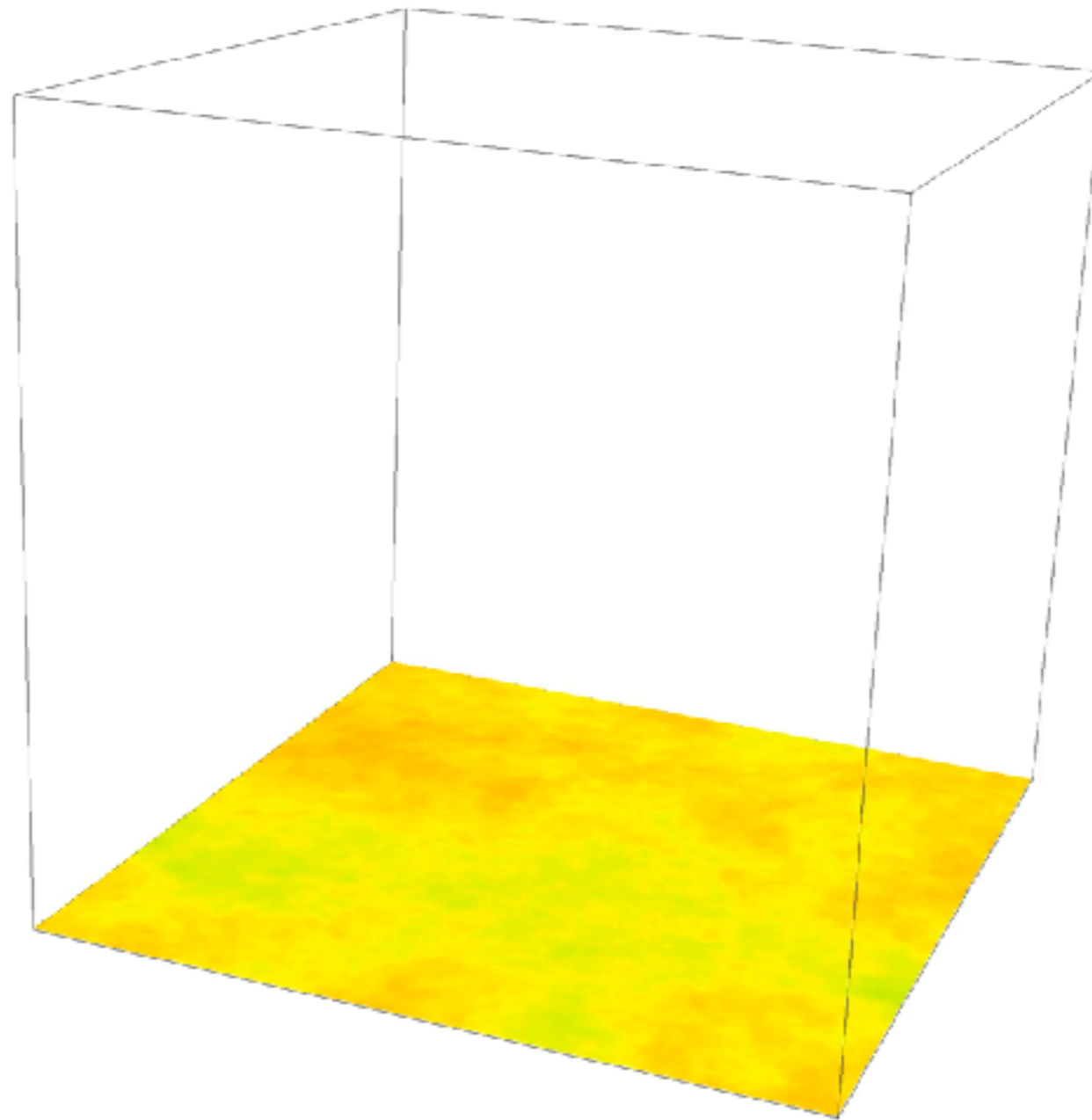
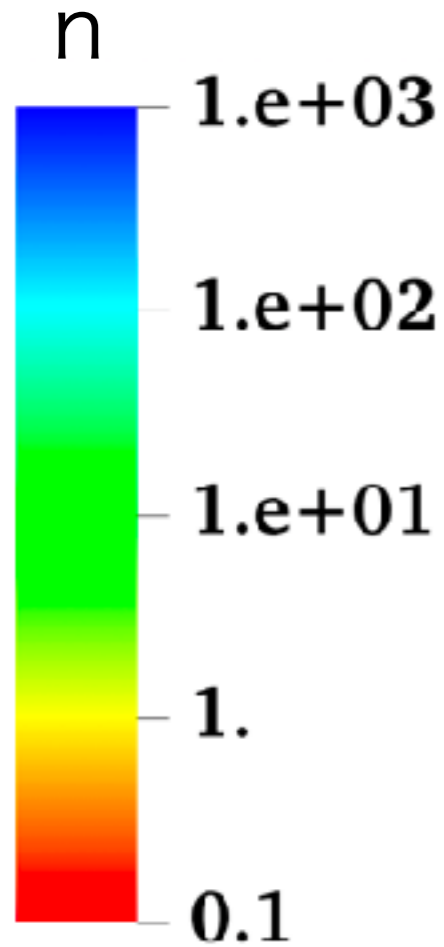


➤ 密度揺らぎ

分解能 $\sim 0.2 \text{ pc}$



低金属ガス衝突シミュレーション ($10^{-4} Z_{\odot}$)



青領域

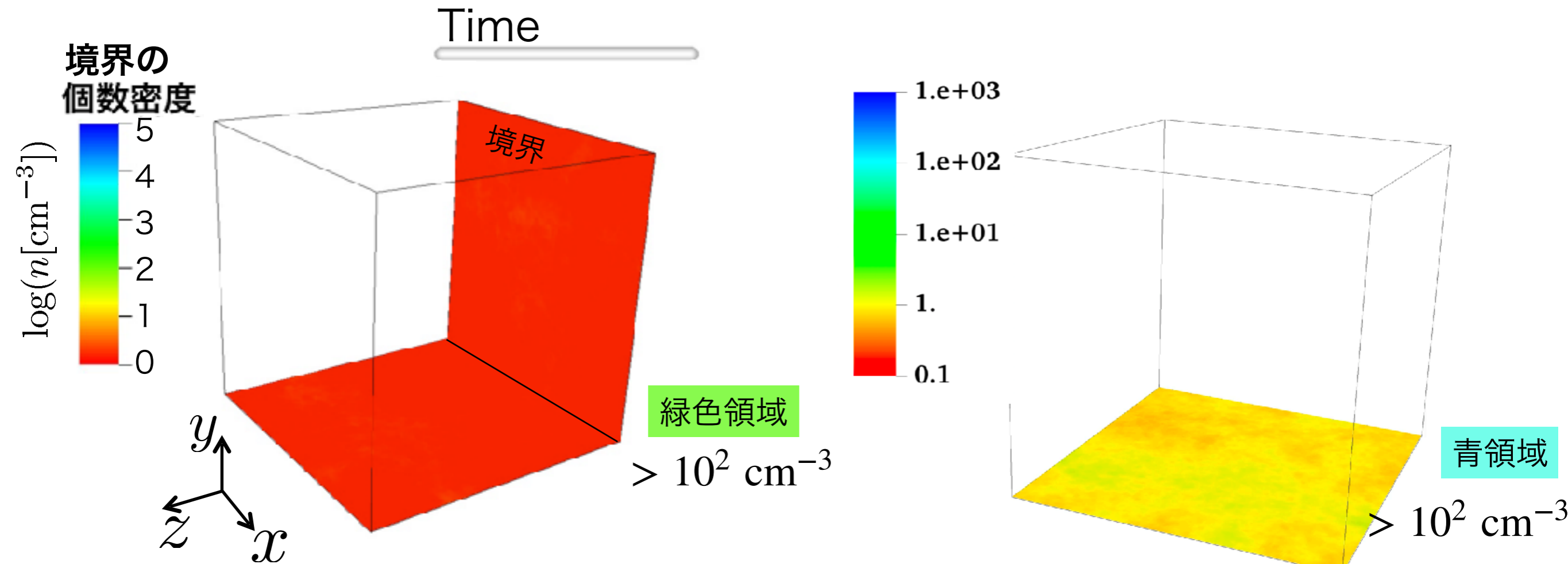
$> 10^2 \text{ cm}^{-3}$

- ≫ 計算初期はほとんど高密度領域は形成しない
- ≫ 時間が経過すると $100/\text{cc}$ 以上の領域が形成

Solar Metal との比較

✓ 太陽金属

✓ 低金属環境 (宇宙初期)

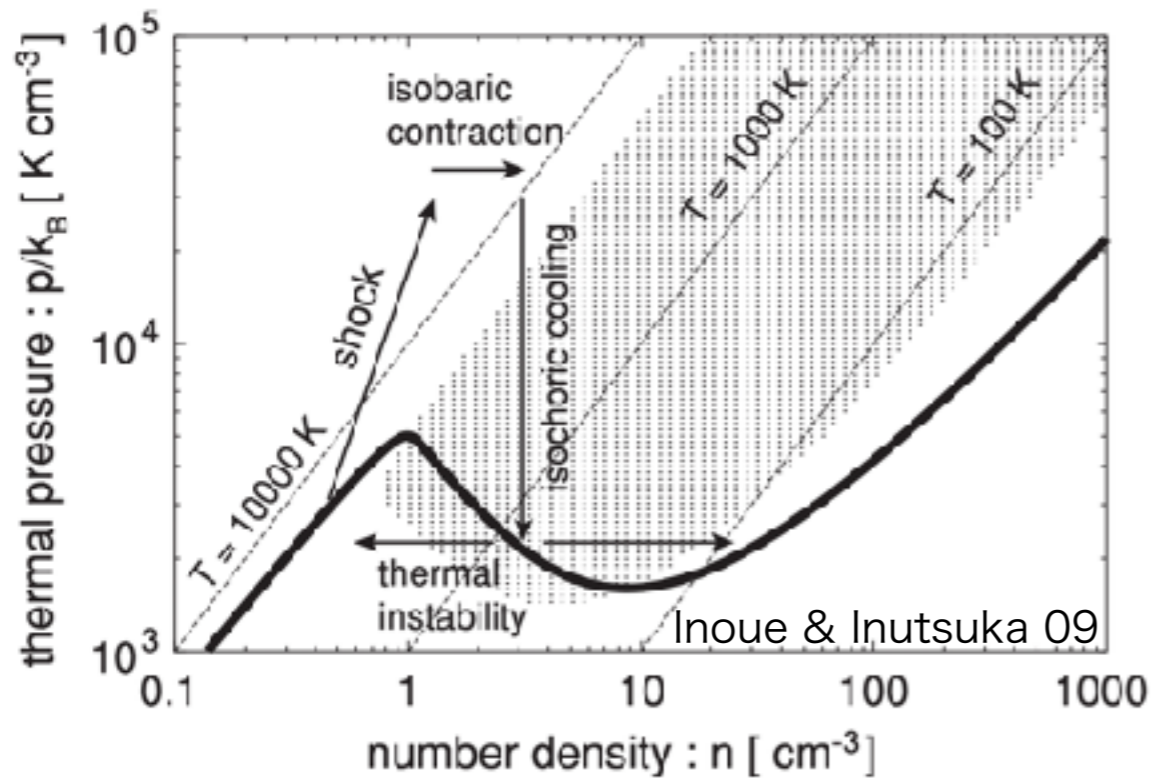


- 太陽金属環境では小さいCNMが合体し大質量なクラウドを形成
- 低金属環境では小さいクラウドを形成してない

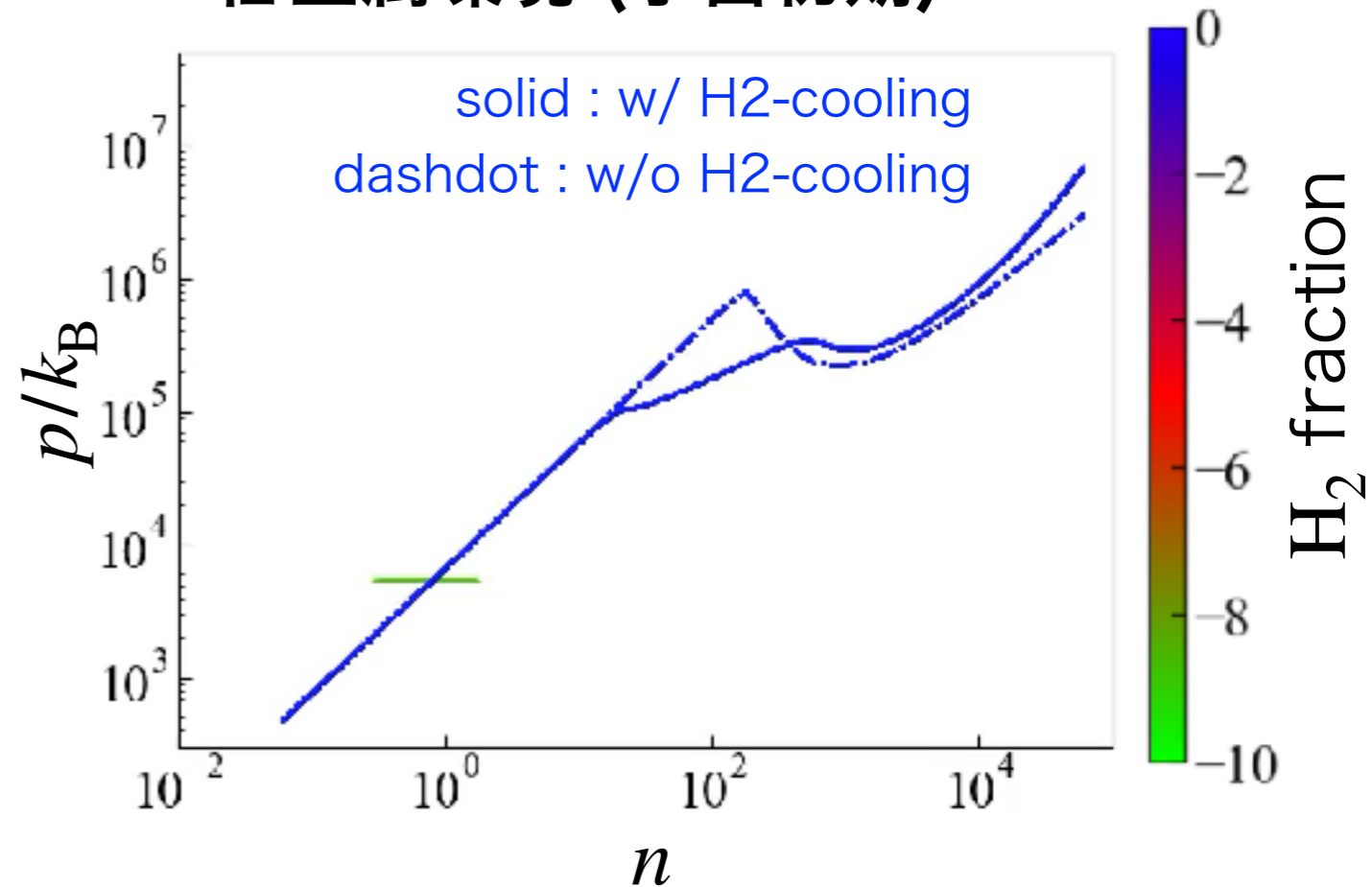
クラウド形成の違いの要因は？

低金属環境における高密度ガス雲形成

✓ 太陽金属のガスの進化



✓ 低金属環境 (宇宙初期)

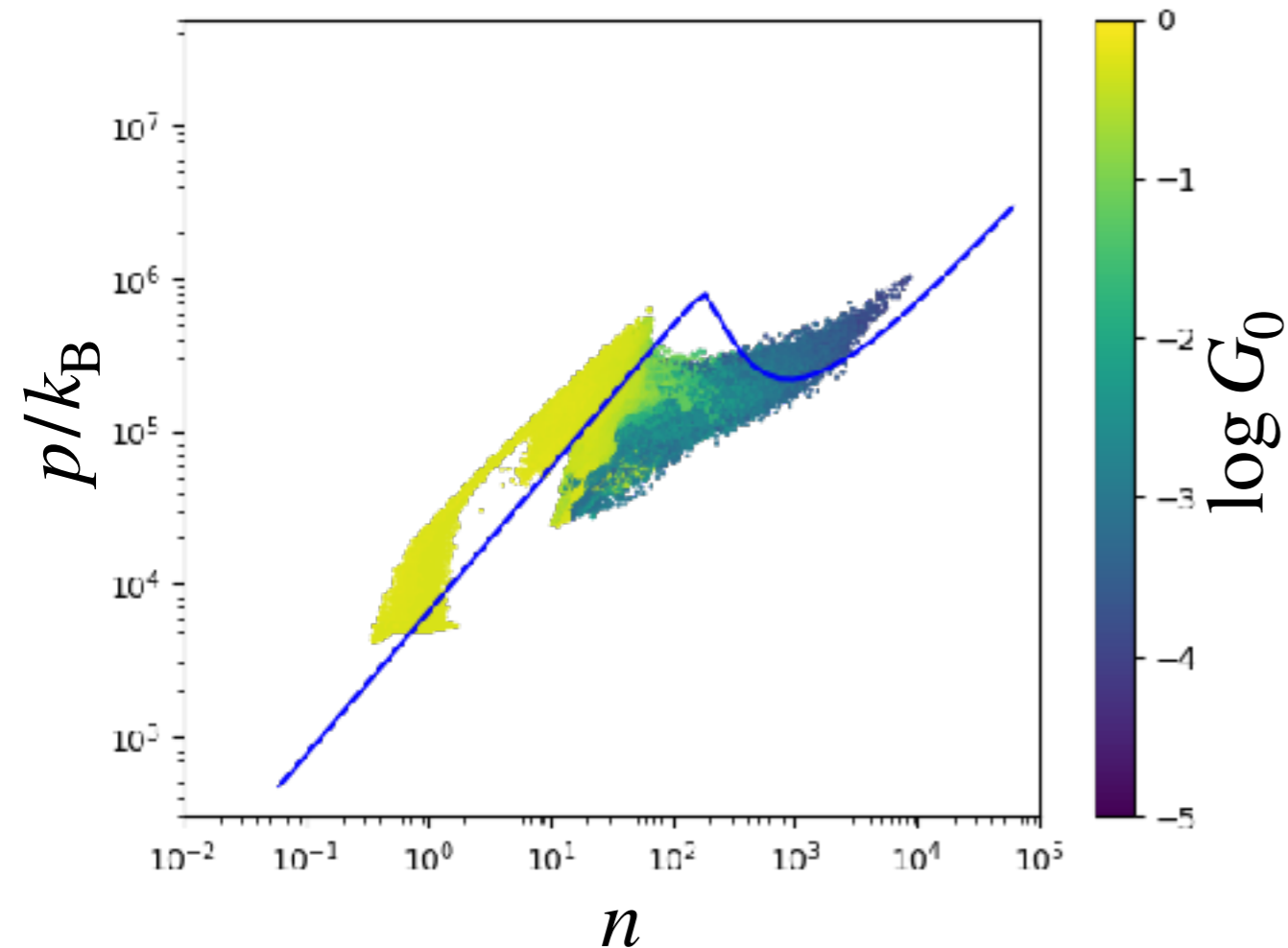


- ≫ 低金属環境では熱平衡曲線の山の位置が変化
- ≫ 衝撃波加熱されたガスは熱平衡曲線の山を超えられない
- ≫ H₂が形成すると冷却が効いて高密度なガスが形成

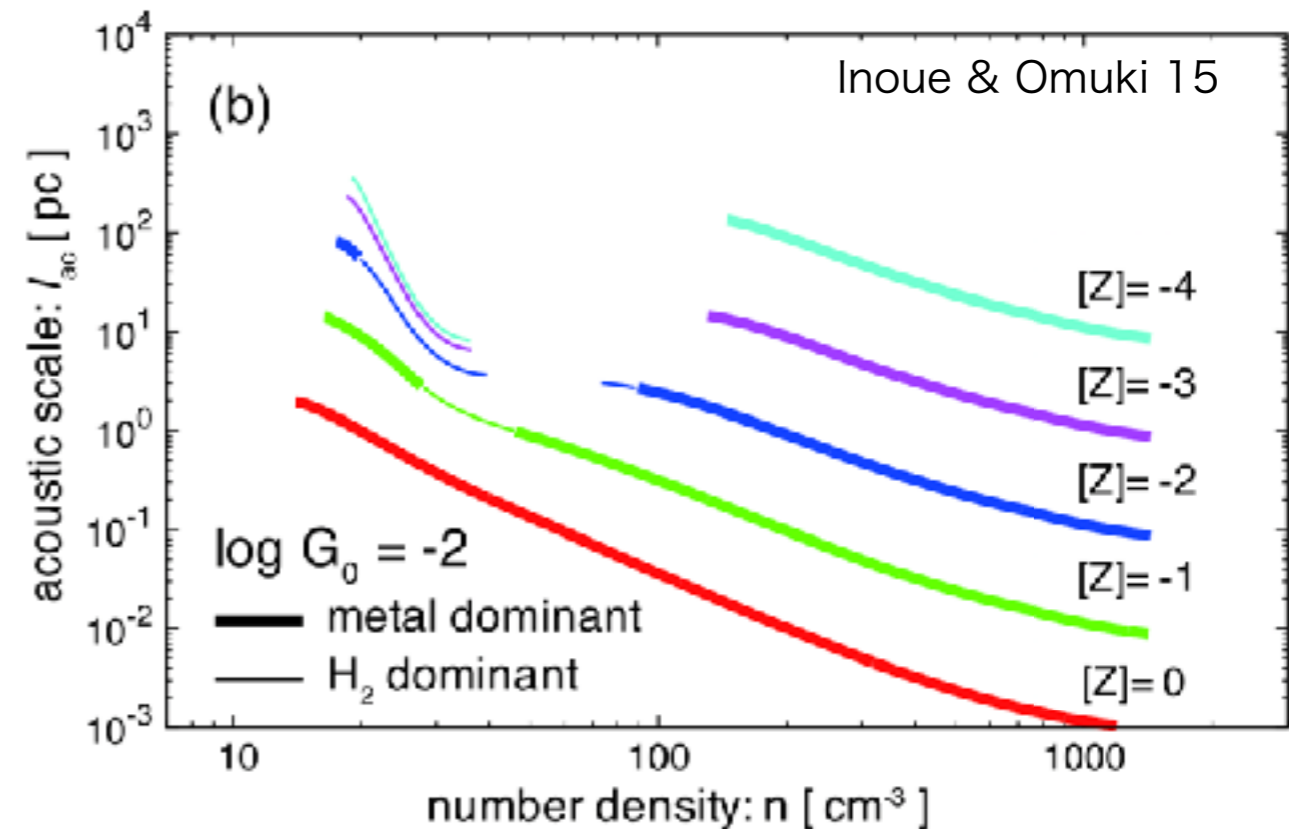
金属冷却ではなくH₂の冷却が高密度ガス雲形成に重要

H2冷却が効く場合のガス雲形成

✓ 高密度領域のFUV強度



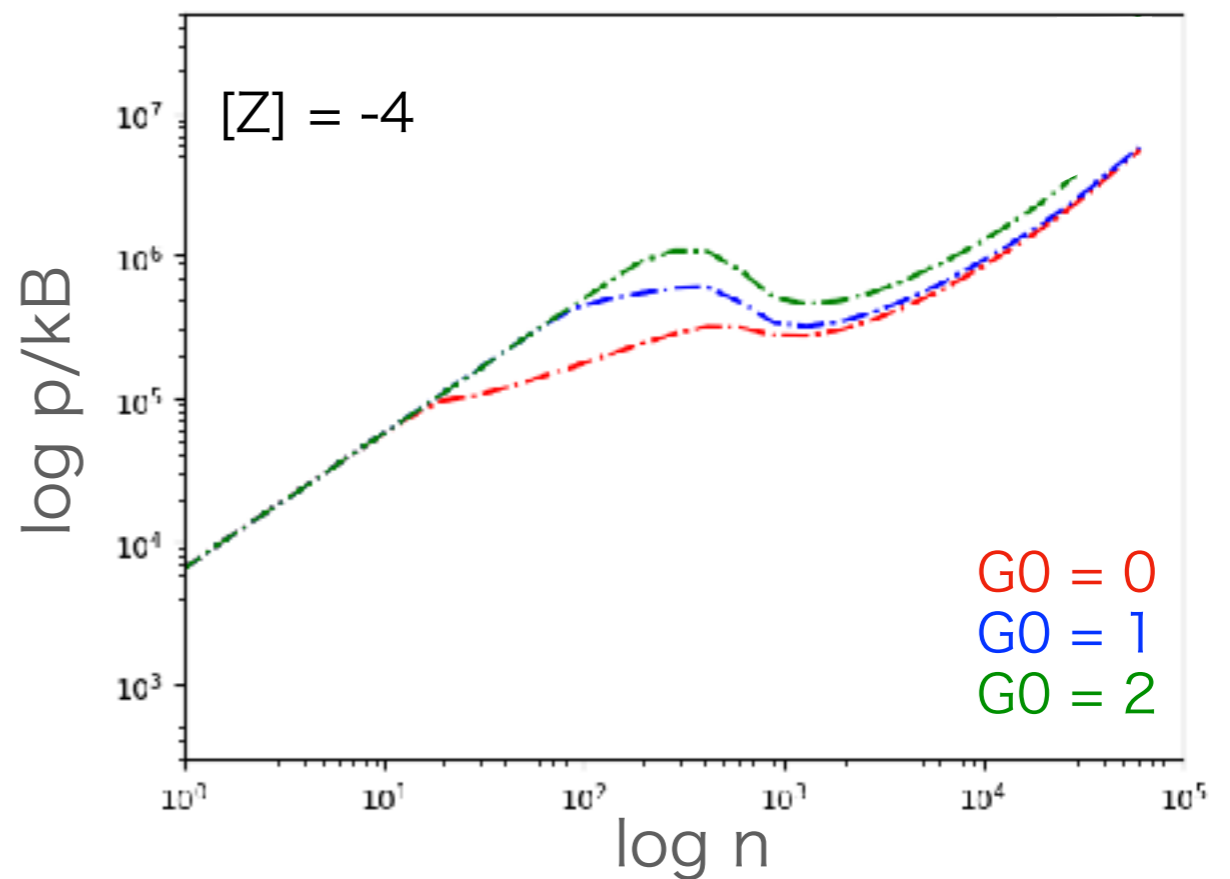
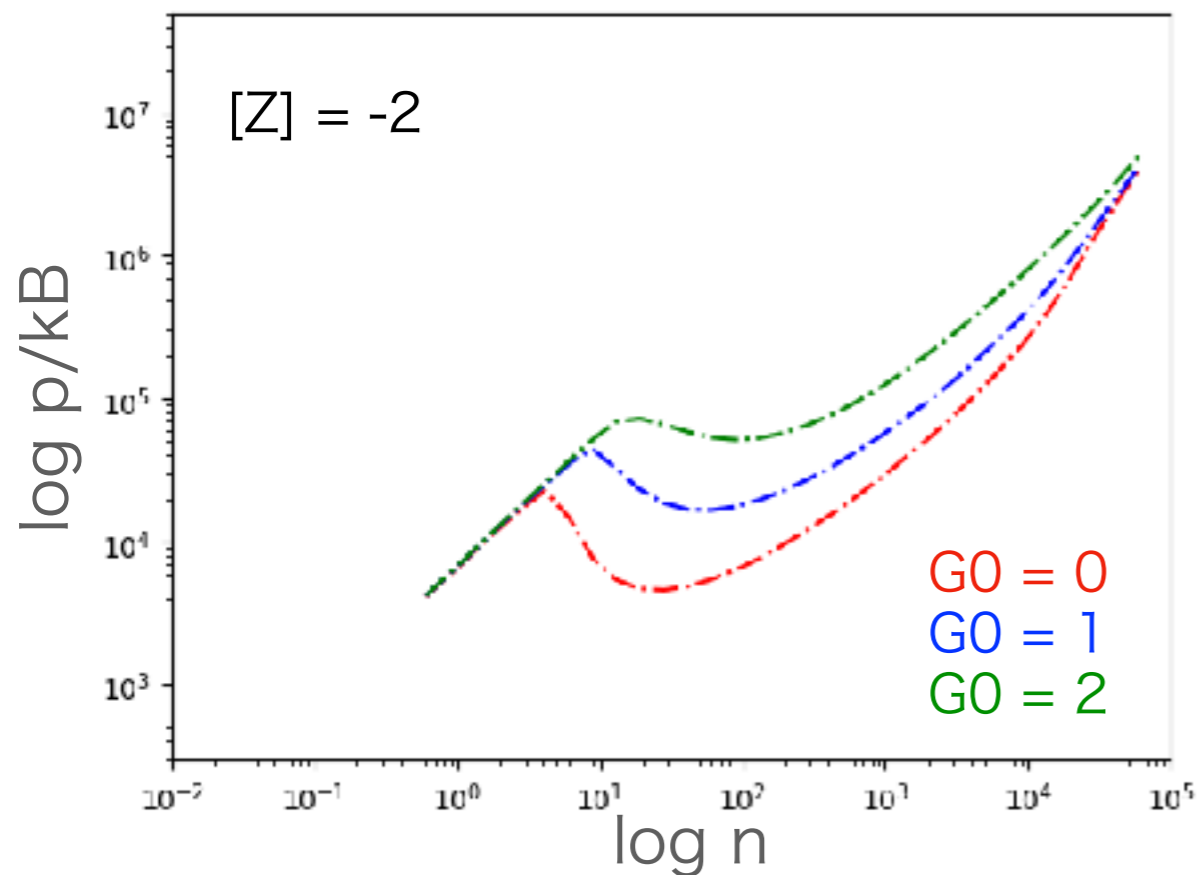
✓ 熱不安定性の金属量依存性 (1 Zone)



- ≫ H2冷却が効く場合は熱不安定性が抑制される
- ≫ 熱不安定性が抑制されると小さいクラウドに分裂せず大質量な星団に進化する可能性がある

低金属環境ではより大質量な星団が形成可能か？
→ 今後 質量依存性を調べていく

議論：熱平衡曲線の性質



» 山の位置

$$n_{\text{cool},Z} = 1.2 \text{ cm}^{-3} \left(\frac{Z}{10^{-2} Z_{\odot}} \right) \left(\frac{\zeta}{3 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}} \right)$$

» 山でH2冷却が勝つか

$$Z_{\text{cool},\text{H}_2} = 8.0 \times 10^{-3} \left(\frac{\zeta_{3.e-17}}{G_0} \right)^{2/3}$$

see Bialy+19

熱平衡曲線は周囲のG0や宇宙線の電離率によっても異なる

まとめと今後

✓まとめ

- 低金属環境におけるHIガス衝突シミュレーションを行った
- 低金属環境では高密度ガス雲の形成にH₂冷却が重要になることがわかった
- H₂冷却では熱不安定性が抑制されるため質量の大きなクラウドが形成される可能性がある

✓今後

- 衝突のパラメータによる進化の違いを調べる
- 形成する星団質量の金属量依存性を明らかにする