低金属星間媒質における熱的不安定性

Inoue & Omukai 2015, ApJ submitted (arXiv:1412.5699)

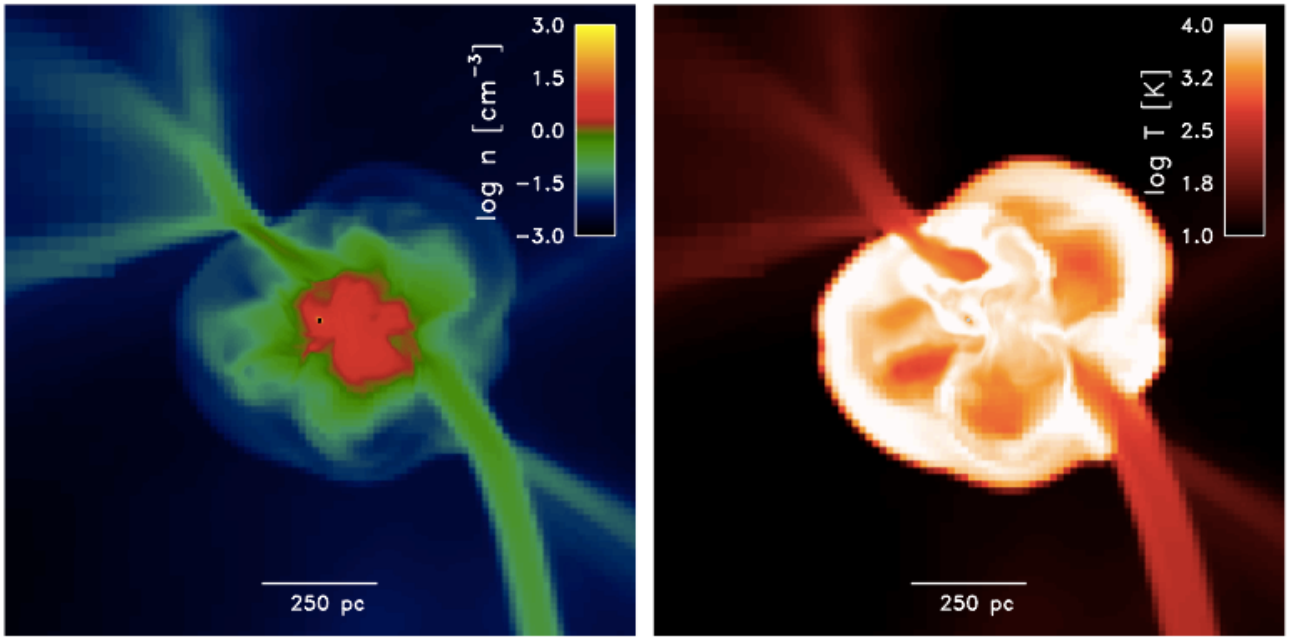
井上 剛志 (NAOJ)

共同研究者：大向一行

- 今年度得られたその他の成果
  - 原始惑星系円盤でのダスト表面に存在する化学種の衝撃波による蒸発について
    Aota, Inoue & Aikawa 2015, ApJ accepted (arXiv:1412.1178)
  - 現実的非一様 ISM を伝搬する超新星残骸からの Hα放射について
    Shimoda, Inoue et al. 2015, ApJ submitted (arXiv:1412.2874)

Introduction

- 初代銀河の形成過程（ほとんど不明、review by Bromm & Yoshida 11）
  - Stellar feedback で霧散しない程度のハローから形成 ($T_{vir} > 10^4$ K, M_{halo}~10^8Ms, z~20)
  - 初代星のような水素分子冷却ではなく、金属冷却で冷えていく天体
  - 金属量は不明（初代星による汚染が決める）
- 宇宙論的シミュレーション(L_{box}=1Mpc^3)で得られた初代銀河ハロー



Previous Work

- Safranek-Shrader+13:
  - 初代銀河ハローの1つを初期条件として切り出したシミュレーション(Flashコード)
  - 金属量は一様に手で与える($Z/Z_{sun} = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$ の3パターン)
  - 金属冷却で等圧的に収縮して

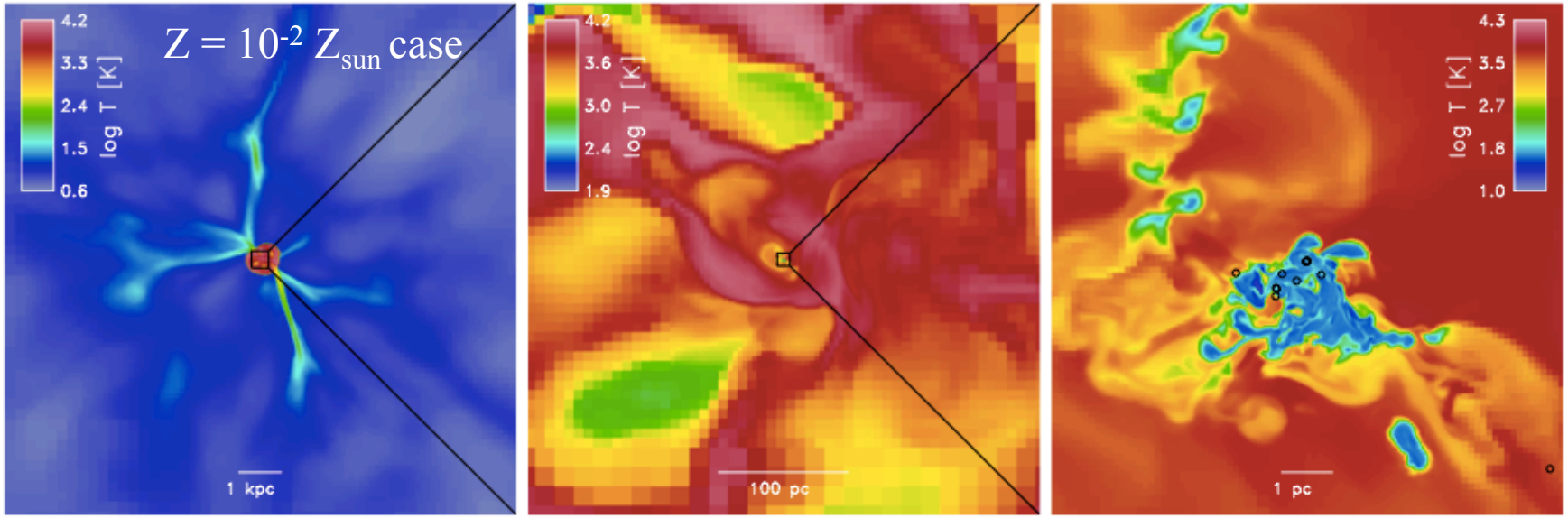
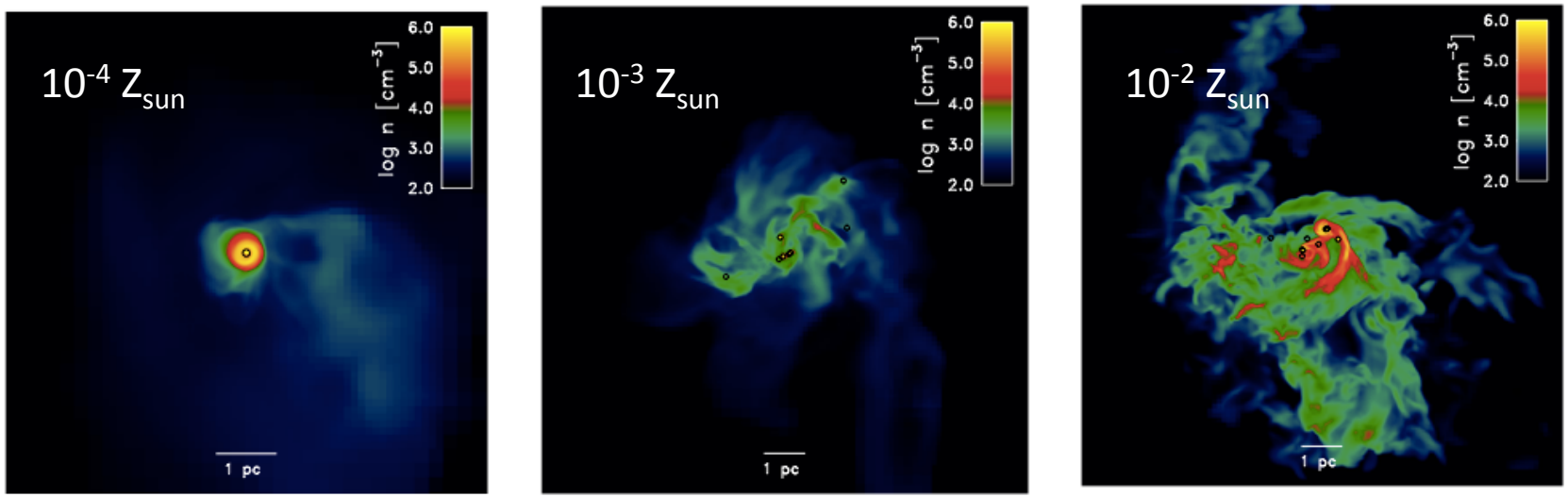


Figure 5. Slices of gas temperature from the last checkpoint of the $10^{-2}\ Z_{\odot}$ run showing progressively smaller spatial scales. The left panel shows the local cosmological environment around the atomic cooling halo. A virial shock is clearly visible along with cold filaments of the cosmic web feeding into the halo. The middle panel reveals the compact size, relative to the virial radius of the halo, of the region in which gas has begun to cool by metal line emission. The right panel demonstrates the morphology of the cold, dense gas and the spatial distribution of sink particles (black circles), projected onto the slice.

Previous Work

□ 初代銀河ハローはどう進化するか？

- 金属冷却が効くと $t_{cool} > t_{sound}$ であり、ハローはまず等圧的に冷却収縮
- T_{CMB}に達するとそこでガスは固くなり重力不安定で分裂（$t_{comp}>t_{ff}$）



- $Z \sim 10^{-3.5}$ Z_{sun}が分裂/非分裂の境目？
  - ✓ 典型的分裂編の質量: Jenas mass @T_{CMB} ~ 100 Msun

    → First galaxy 中の典型的クラスター質量？

Thermal Instability

- ISM with $Z=Z_{sun}$ では金属冷却は熱的不安定性(Field 65)を引き起こす
  → 冷却中に激しく分裂（HD: Koyama & Inutsuka 02, MHD: Inoue & Inutuska 08）
  ＊先行研究では重力のダイナミクスが追える最小限の分解能で計算
- 熱不安定の条件

$$T\frac{Ds}{Dt} = -L$$

s: specific entropy, L: cooling rate per unit mass

s_0 を非摂動状態として摂動 $s = s_0+\delta s$ を考える

（非摂動状態は熱平衡でもよいし冷却により時間発展する状態でも良い）

摂動が従う線形方程式: $\frac{d\,\delta s}{dt} = -\left[\frac{\partial(\mathcal{L}/T)}{\partial s}\right]_A \delta s$ *A*: 変分する際の不変量

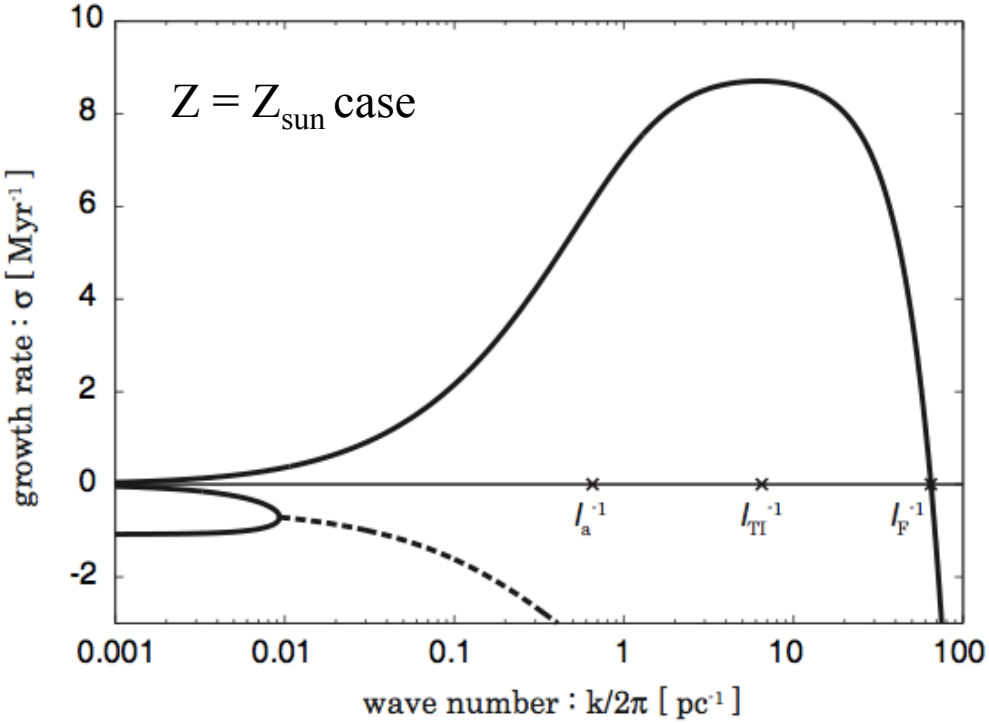
$\left[\frac{\partial(\mathcal{L}/T)}{\partial s}\right]_A < 0$ なら不安定（Balbus 95）

ISMでは等圧摂動に対してのみ不安定: $\left[\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\mathcal{L}}{T}\right)\right]_p < 0$ になる場合がある(Field+69)

(具体的には 6,000 K > T > 300 K では CII & OI coolingで不安定)

Scales of Thermal Instability

熱不安定の分散関係（Field 65）



$l_{ac} := c_s\, t_{cool}$ 冷却長

$l_F := (\kappa T/\rho L)^{1/2}$ Field length

$l_{max} := (l_a l_F)^{1/2}$ 最不安定長

- $l_{ac} \gtrsim l \gtrsim l_F$ の揺らぎは冷却時間で成長する

  → 広い空間スケールが不安定によって暴走的に凝縮

- 低金属の場合、熱不安定の物理はどう変わる？初代銀河形成に影響？

線形不安定スケールの計算

□ 非摂動状態：等圧下で冷却によって収縮するガスの性質を金属量を変えて調べる

- 基礎方程式

$$\frac{dn_i}{dt} = f_i(n_j, T, G_0) + \frac{\gamma - 1}{\gamma}\frac{n_i}{p}L, \quad (1)$$

$$L = \sum_k l_k(n_j, T, G_0) - h_k(n_j, T, G_0), \quad (2)$$

$$\rho = \sum_i m_i n_i, \quad (3)$$

$$T = p/(\sum_i n_i k_B), \quad (4)$$

where l_k (h_k) is the cooling (heating) rate per unit volume (subscript k identifies each process), the subscript i in the number density n denotes the chemical species p, H, H^-, H_2, He, He^+, C, C^+, and CO, f_i is the chemical reaction rate per unit volume for species i (that ensures mass conservation $\sum_i m_i f_i = 0$), γ is the adiabatic index that varies with chemical composition of the gas, and G_0 is the parameter that characterizes the strength of the external radi-

- 微視的過程（optically thin）
  - ✓ 化学反応ネットワークを解く（~30反応）

    p←→H←→H^-←→H2
    He^+←→He
    C^+ ←→ CO

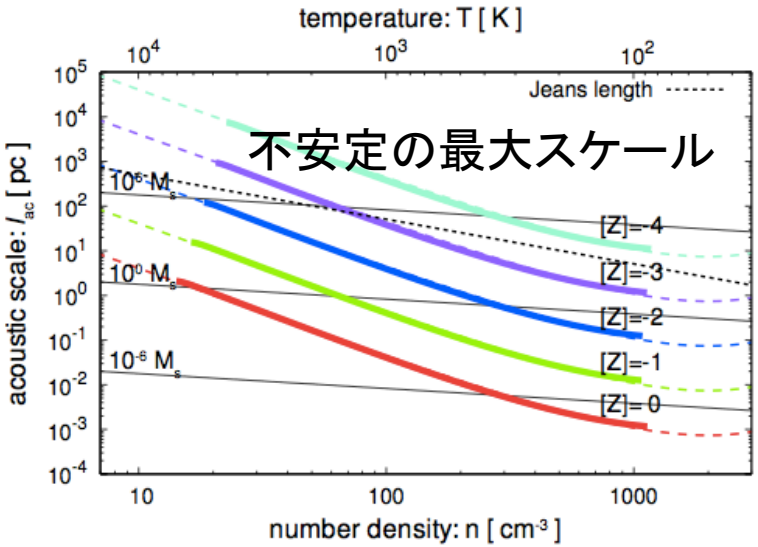
  - ✓ 化学組成に応じた放射冷却(10過程)

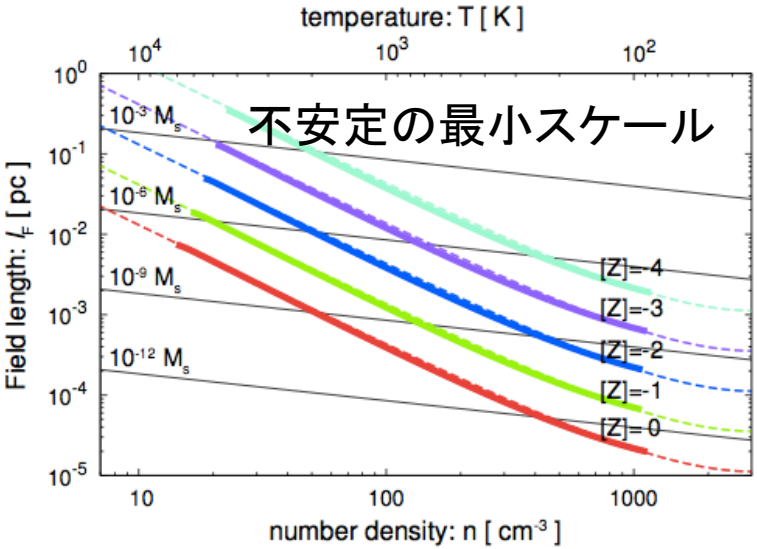
    Ly-α, CII, OI, H_2, CO etc.

- n = 10 cm^{-3}, T=10^4 K を初期条件
- 冷却凝縮中に不安定条件を $\left[\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\mathcal{L}}{T}\right)\right]_p < 0$ 満たすかを計算
- 満たす場合、どういうスケールになるかを計算

結果1

- G0=1 の場合（local ISMと同程度のUV）





＊原子冷却によって冷えるので
　不安定状態を経由する

＊金属量依存性は容易に予言できる

$$t_{\rm cool} \simeq 0.4\,{\rm Myr}\,(Z/Z_\odot)^{-1}\,n_1^{-3/2}\,(p/k_{\rm B})_5^{1/2} \times \exp\left[10^{-2}T_{\rm line,2}\,n_1\,(p/k_{\rm B})_5^{-1}\right],$$

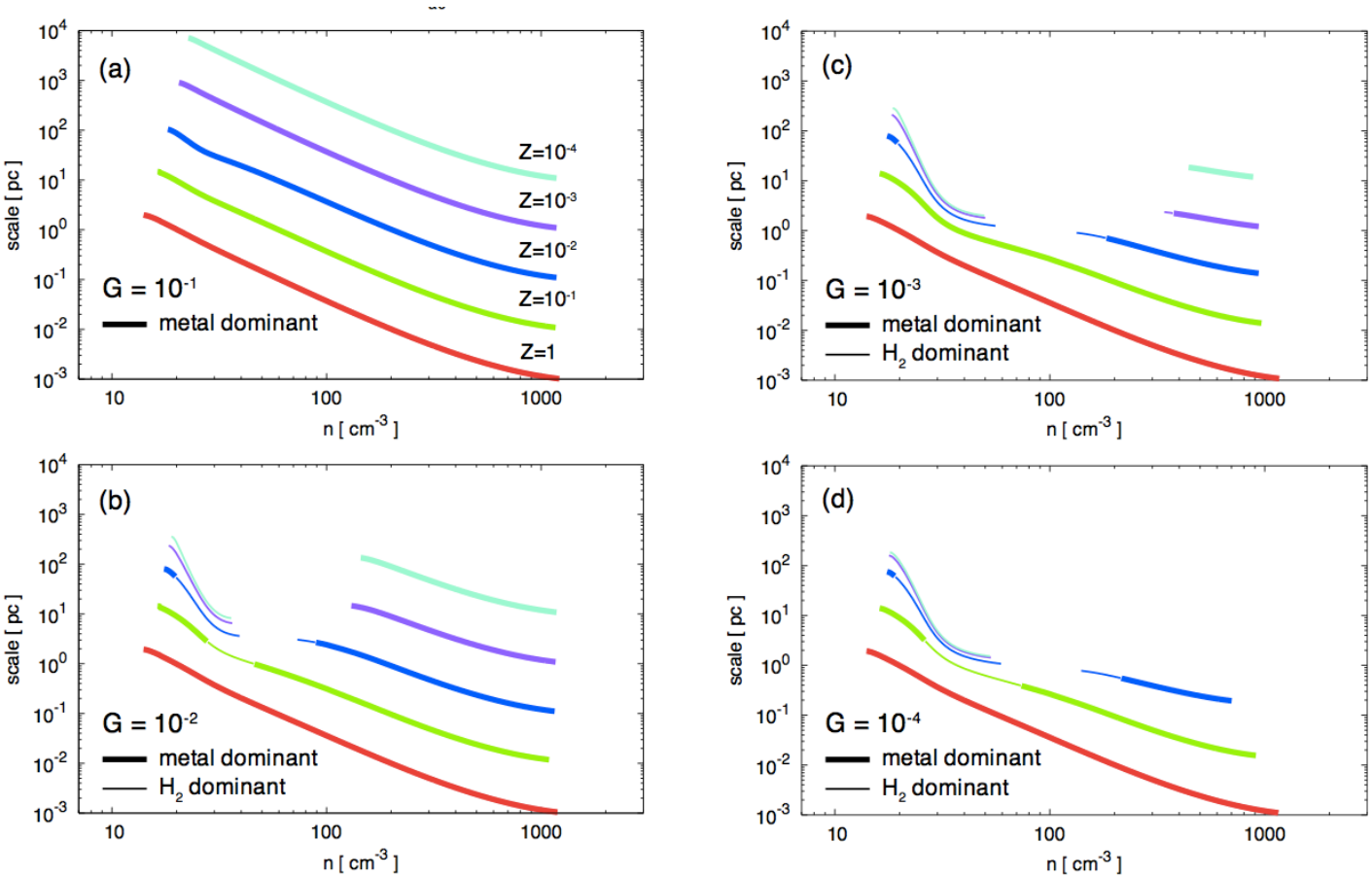
$$l_{\rm ac} \simeq 4\,{\rm pc}\,(Z/Z_\odot)^{-1}\,n_1^{-2}\,(p/k_{\rm B})_5 \times \exp\left[10^{-2}T_{\rm line,2}\,n_1\,(p/k_{\rm B})_5^{-1}\right],$$

$$l_{\rm F} \simeq 0.013\,{\rm pc}\,(Z/Z_\odot)^{-1/2}\,n_1^{-3/2}\,(p/k_{\rm B})_5^{1/2} \times \exp\left[5\times10^{-3}T_{\rm line,2}\,n_1\,(p/k_{\rm B})_5^{-1}\right],$$

＊Jeans length を分解するだけでは不十分！

結果2

- G0（UV強度）を減少させると…

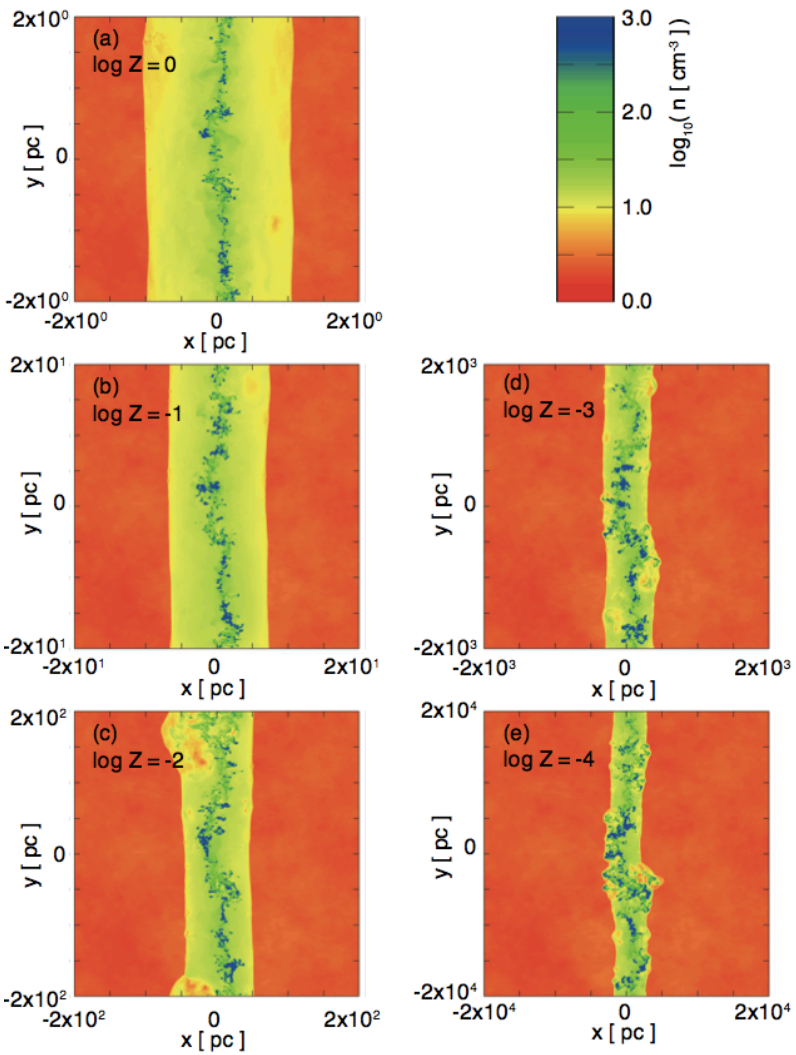


＊G0 低下 → 水素分子の乖離が弱くなる
→ 水素分子が主要冷却剤になると不安定ではなくなっていく

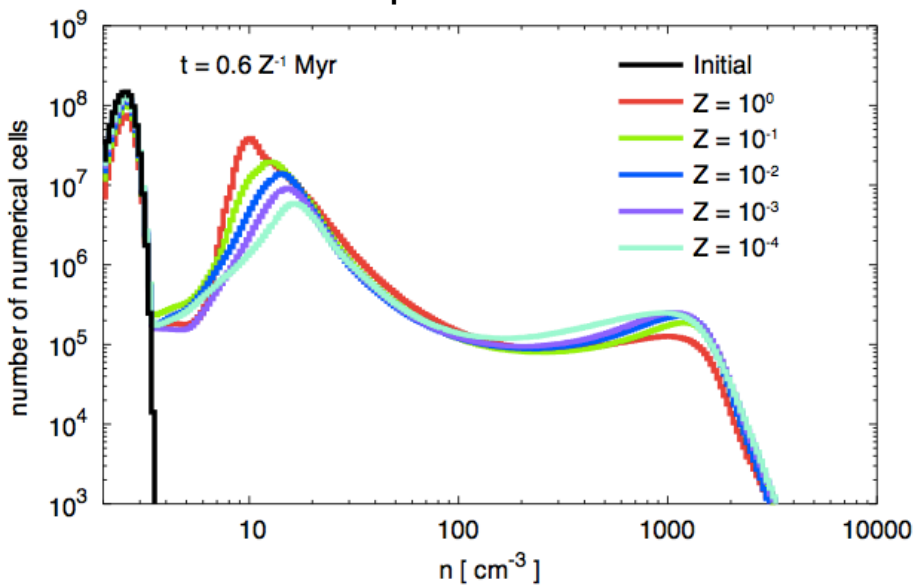
局所3次元シミュレーション

- Converging flow で等圧冷却収縮ガスを生成させて熱不安定の成長を見る(G0 = 1)

熱不安定でガスは分裂



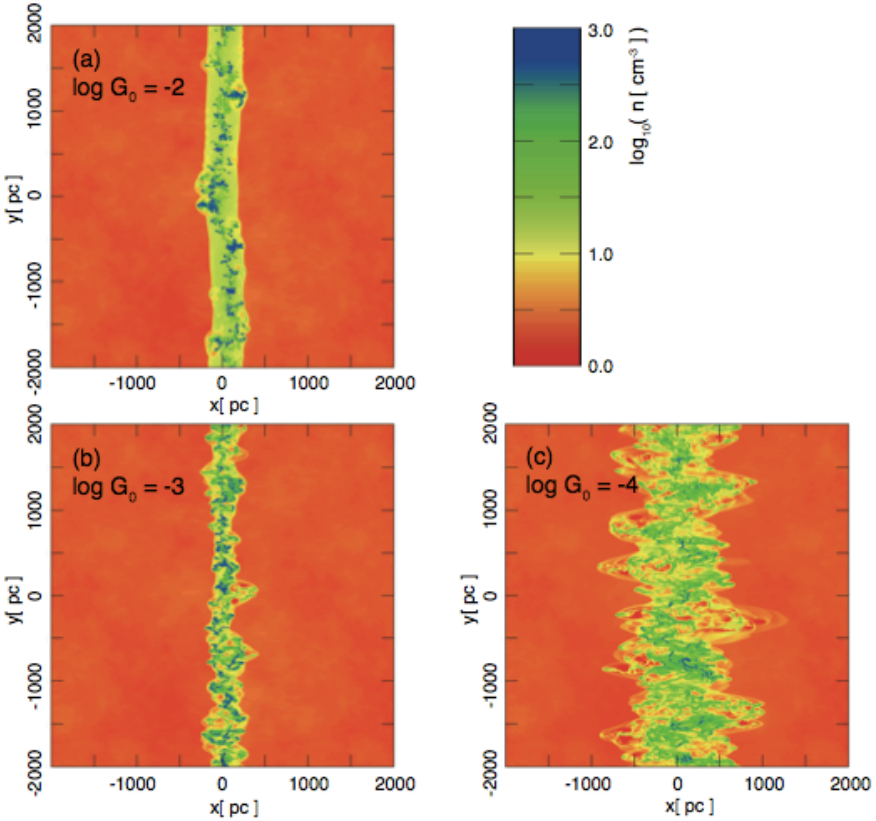
ρ PDF

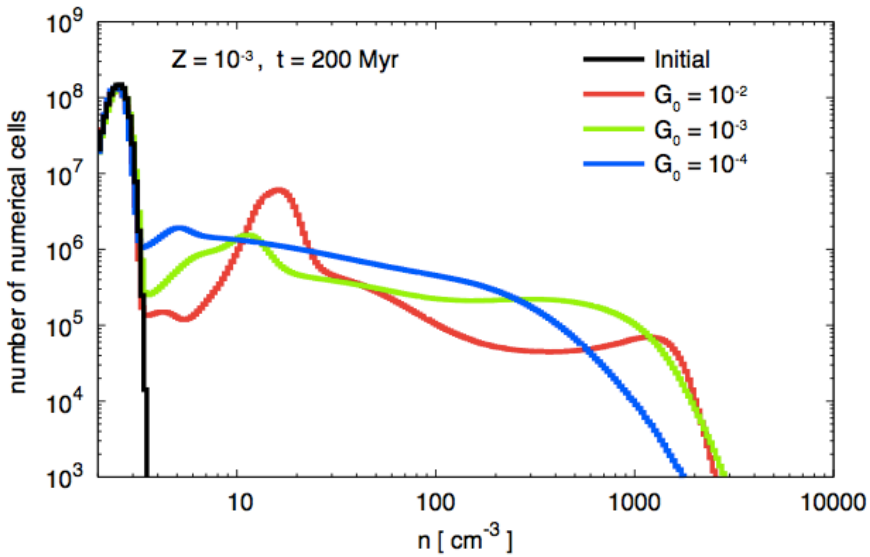


＊熱的不安定の結果 bimodal PDF

UV を減らすと…

- $Z = 10^{-2}$ で固定し、G_0 を減らしていく



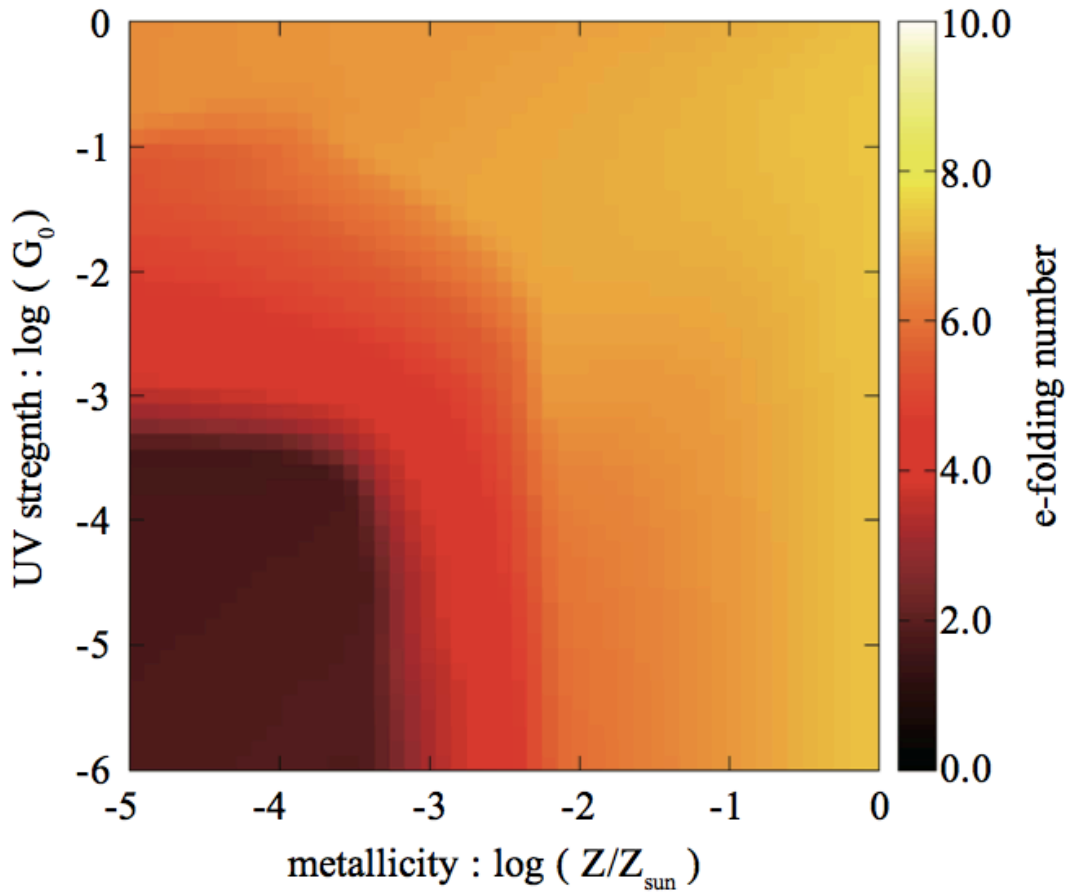


＊熱的に安定になるにつれて biphasic PDF → featureless PDF

成長可能領域 in G_0-Z plane

□ 熱不安定の成長限界環境

- e-folding number: $N_f = \int_{d\Lambda/dt>0} t_{cool}^{-1}\, dt \quad (\delta\rho = \delta\rho_0\, e^{N_f})$



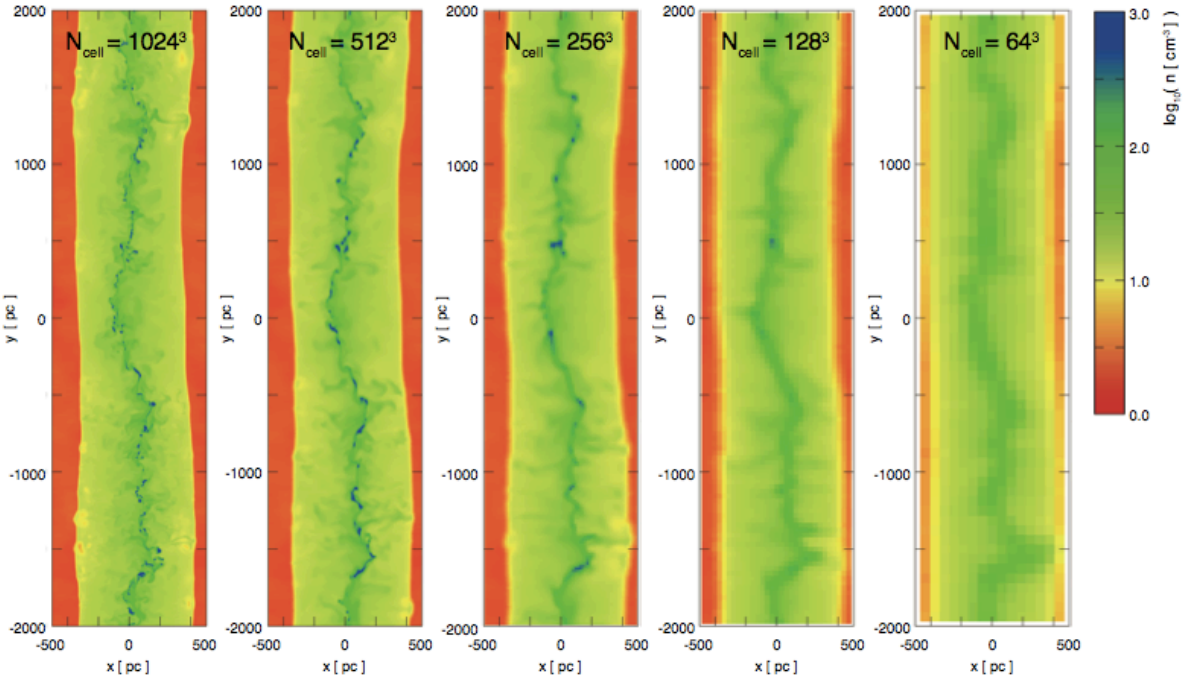
＊明るい色の部分に入っていれば非線形成長

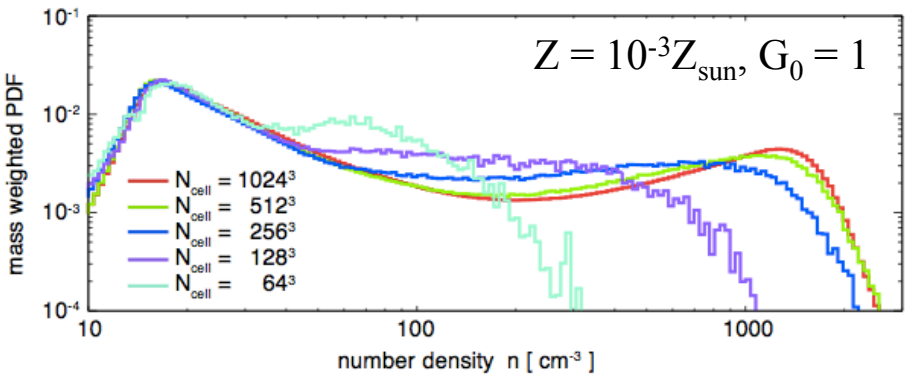
要求分解能

□ 分解能を変えた計算で収束性をチェック → シミュレーションに必要な分解能条件

- N_{cell} >256^3 なら暴走的冷却収縮を追えている

→ 熱不安定の最大長 l_{ac}を 60 mesh 以上で分解することに対応





議論

□ 初代銀河形成過程に熱不安定はどのように影響するか？

● 熱不安定が作るクランプの質量分布関数(Henneblle & Audit 07):

$$N(m)\,dm \propto m^{(\delta-3)/3-2}\,dm,$$ （δ: 密度揺らぎのスペクトル）

$\propto m^{-1.78}\,dm$ (for Kolmogorov index δ=11/3)

→ クランプ質量の50%以上を $m_{TI} > 0.04 \times \frac{4\pi}{3}\rho\left(\frac{l_{ac}}{2}\right)^3$

$$\sim 1.3\times10^4\,M_\odot \left(\frac{Z}{0.01Z_\odot}\right)^{-3}\left(\frac{T}{5000\,\mathrm{K}}\right)^{5}\left(\frac{p/k_B}{10^5\,\mathrm{K\,cm^{-3}}}\right)^{-2}$$

のクランプが持つ

● m_{TI} とジーンズ質量が等しくなる金属量: $Z_{cr} = 0.042 Z_\odot \left(\frac{T}{5000\,\mathrm{K}}\right)^{5/3}\left(\frac{p/k_B}{10^5\,\mathrm{K\,cm^{-3}}}\right)^{-1/2}\left(\frac{1+z}{10}\right)^{-2/3}$

✓ $Z < Z_{cr}$ では収縮する初代銀河ハローはまず熱的不安定で分裂し、
その後に自己重力の影響を受ける
→ 初代銀河中の星団スペクトルは熱不安定が決める: $N_{cluster}(M) \propto M^{-1.78}$

✓ $Z > Z_{cr}$ では収縮する初代銀河ハローは熱的不安定で Jeans質量よりも
小さなスケールに分裂
→ 小さな雲が集積して乱流分子雲を作ってから星形成
→ 現在の星形成と同様に非常に小さな効率(a few %)で星形成

まとめ

- 低金属環境下における熱的不安定性の線形/非線形成長を調べた
  - 不安定性の最大/最小スケールの解析的表現

$$l_{\rm ac} \simeq 4\,{\rm pc}\,\left(Z/Z_\odot\right)^{-1}\,n_1^{-2}\,(p/k_{\rm B})_5$$
$$l_{\rm F} \simeq 0.013\,{\rm pc}\,\left(Z/Z_\odot\right)^{-1/2}\,n_1^{-3/2}\,(p/k_{\rm B})_5^{1/2}$$

  - 最大スケールを 60 mesh 以上で分解することがシミュレーションに必須
  - 熱不安定が非線形成長で 2-phasic ISM を生成する条件を導いた:

$G_0 > 10^{-3}$ or $Z > 10^{-3}\,Z_{sun}$

→ 今後の初代銀河形成研究の物理的基盤を整えた