

@銀河進化研究会2017



# 初代銀河の衝突で誘起される大質量ガス雲の形成

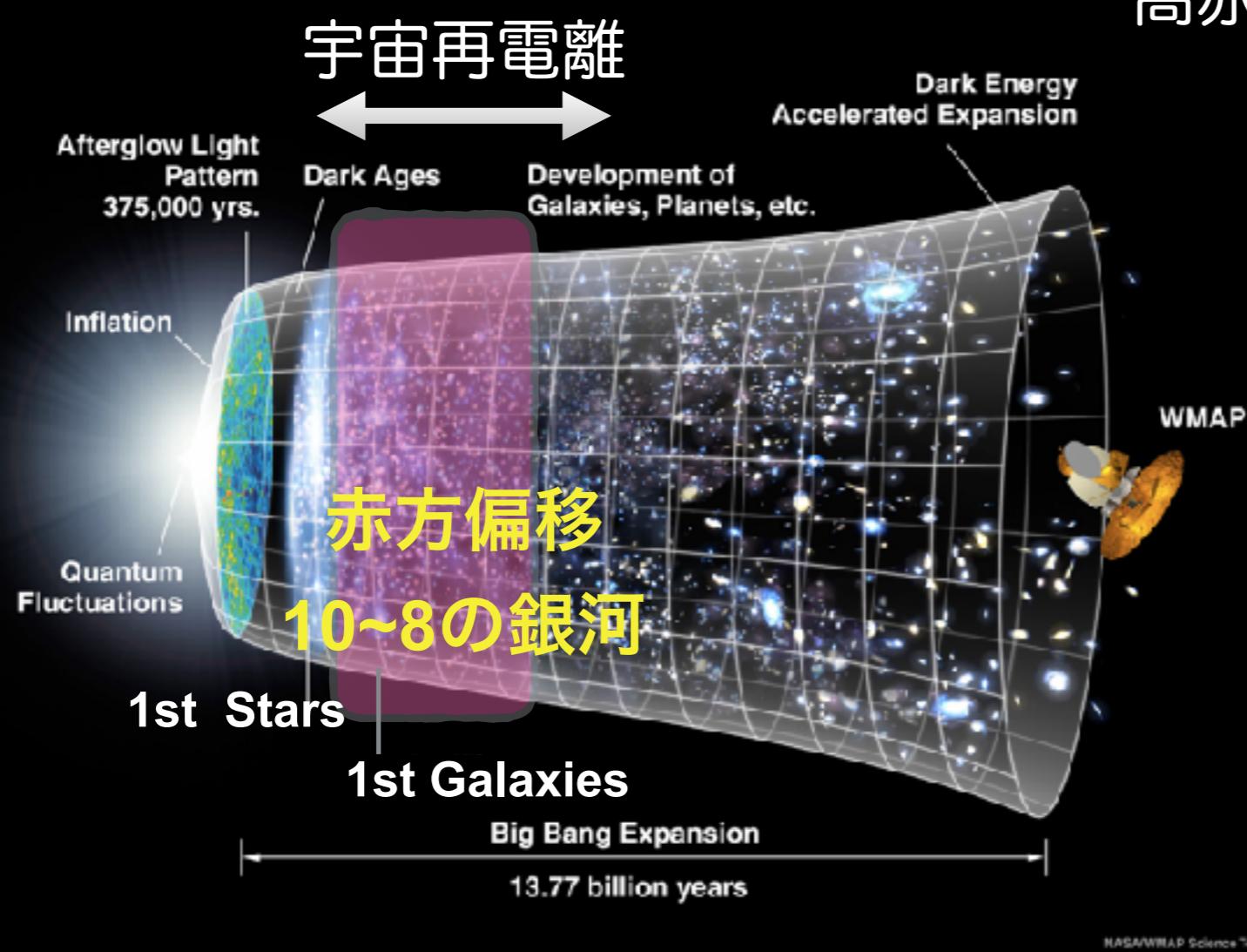
荒田 翔平 (大阪大)

共同研究者

矢島秀伸 (東北大), 長峯健太郎 (大阪大)

# introduction

# 宇宙初期の天体形成の理解に向けて

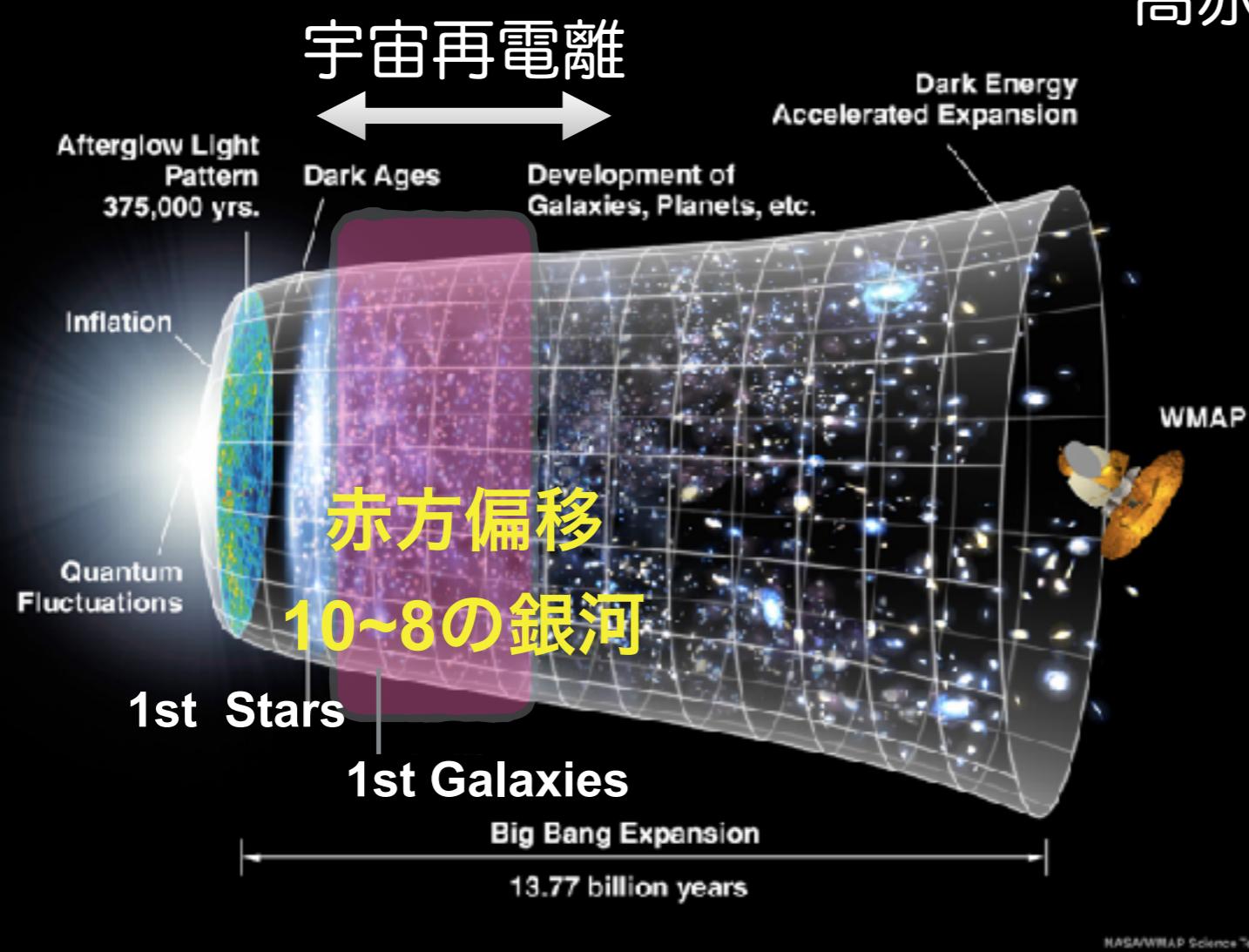


高赤方偏移天体に迫る次世代の観測機



- ✓ 初代銀河における星形成？球状星団形成？
- ✓ 星間媒質の物理状態が現在の銀河とは異なる  
(密度・金属量・紫外線強度)

# 宇宙初期の天体形成の理解に向けて



高赤方偏移天体に迫る次世代の観測機



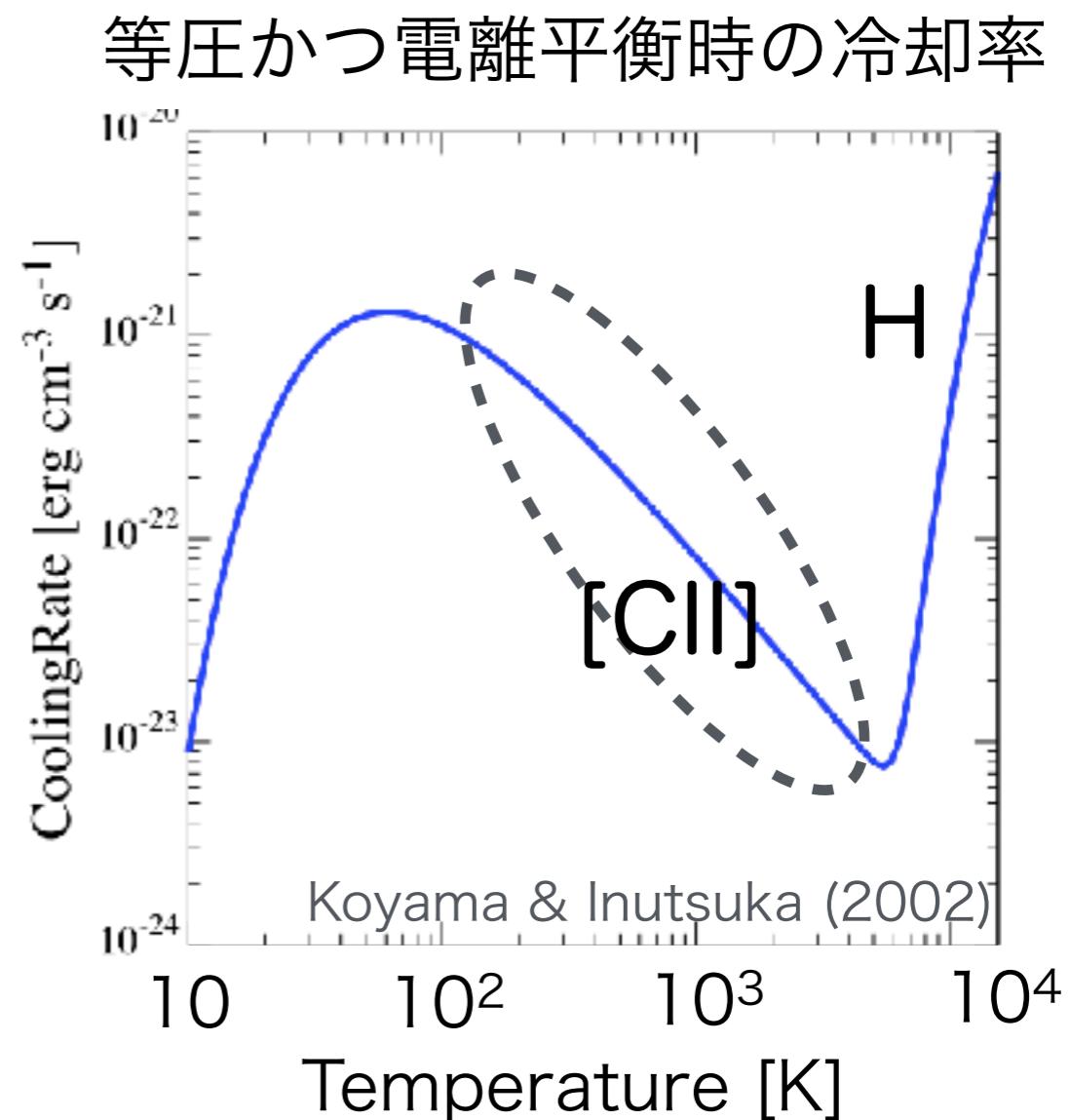
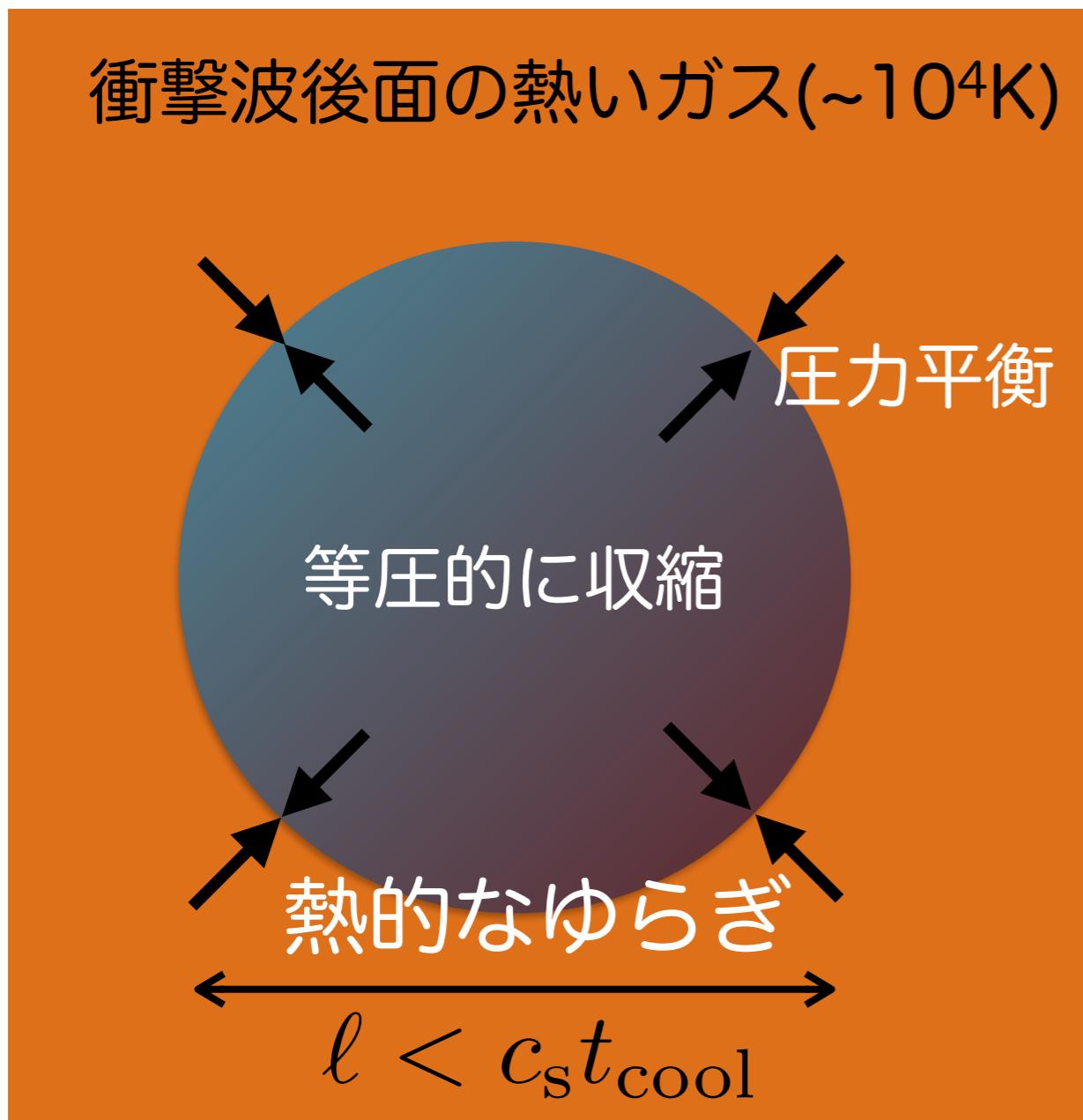
©<https://jwst.nasa.gov/>



ガス雲の形成から理解する

# 銀河衝突に伴う熱的不安定性

活発な星形成が予想される  
銀河衝突に着目



不安定性の条件を満たし2相化

$$\left( \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right)_p < 0$$

Balbus (1986)

# 初代銀河における熱的不安定性によるガス雲形成

- 初代銀河内の星間媒質の物理状態に従って熱進化

高密度・低金属量・強い紫外線輻射場

Inoue & Omukai (2015)

- 熱的不安定性で形成されるガス雲の最大スケール

$$c_s t_{\text{cool}} \propto n^{-1} Z^{-1}$$

低密度・低金属量ほど大きな揺らぎで成長可能

- 銀河の重力的なダイナミクスが関わる可能性あり

$$t_{\text{dy}} \sim 10 \text{ Myr} \sim t_{\text{cool}}$$

# この研究の目的

初代銀河の衝突に伴うガス雲形成を  
3次元流体シミュレーションで調べる

その際、星間媒質の物理状態を考慮して、  
ガスの現実的な熱進化を追う

method

# シミュレーションセットアップと初期条件

流体コード: GIZMO (Hopkins 2015)

Meshless Finite-Mass法 (Godunov-SPH+空間2次精度)

加熱・冷却: Koyama & Inutsuka (2002) フィッティング関数  $\times (Z/Z_{\odot})$

銀河衝突を金属量 $0.1-0.01 Z_{\text{sun}}$ で計算

銀河モデル: 矮小銀河 at  $z=9$

Springel et al. 2005, Perret et al. 2014

| 成分          | 質量                                     | 密度分布        | 分解能   | 補足                                 |
|-------------|--|-------------|---|------------------------------------|
| Dark Matter | $M_h = 10^8 M_{\text{sun}}$            | NFW         | $\epsilon_{\text{sf}} = 3 \text{pc}$                            | $c = 9, \lambda = 0.04$            |
| Gas         | $M_{\text{gas}} = 10^7 M_{\text{sun}}$ | Exponential | $\epsilon_{\text{sf,min}} = h_{\text{sml,min}} = 0.1 \text{pc}$ | $T_{\text{init}} = 5000 \text{ K}$ |

ガス粒子のみ & 星形成なし 強いUV輻射場下にあることを想定

パラメータ: metallicity, inclination, impact-parameter

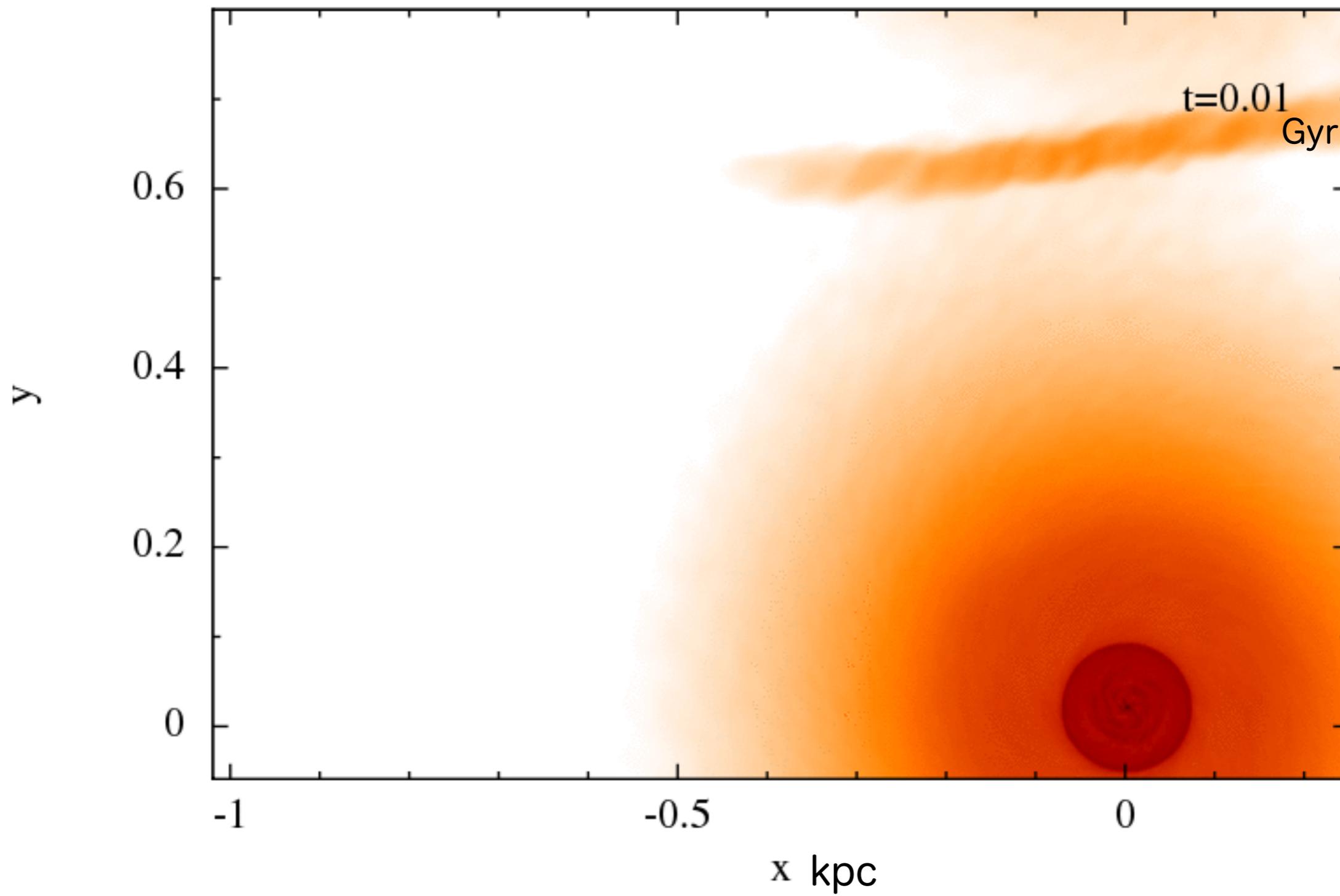
# result

金属量( $0.1Z_{\text{sun}}, 0.01Z_{\text{sun}}$ )によるちがい

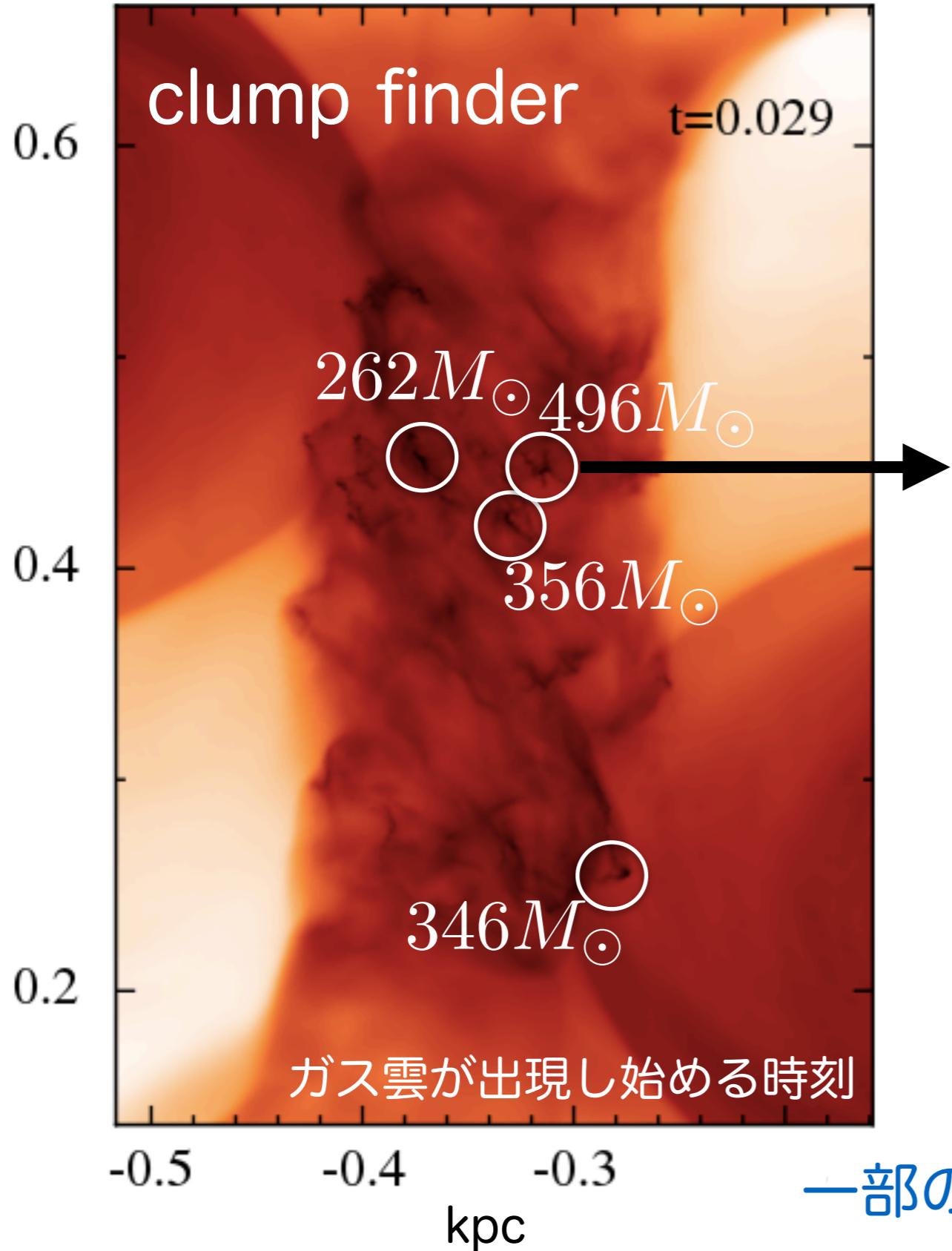
銀河衝突の仕方によるちがい

# 金属量 $0.1 Z_{\text{sun}}$ の銀河衝突

prograde-prograde     $b=0.8 \text{ kpc}$     (fiducial)

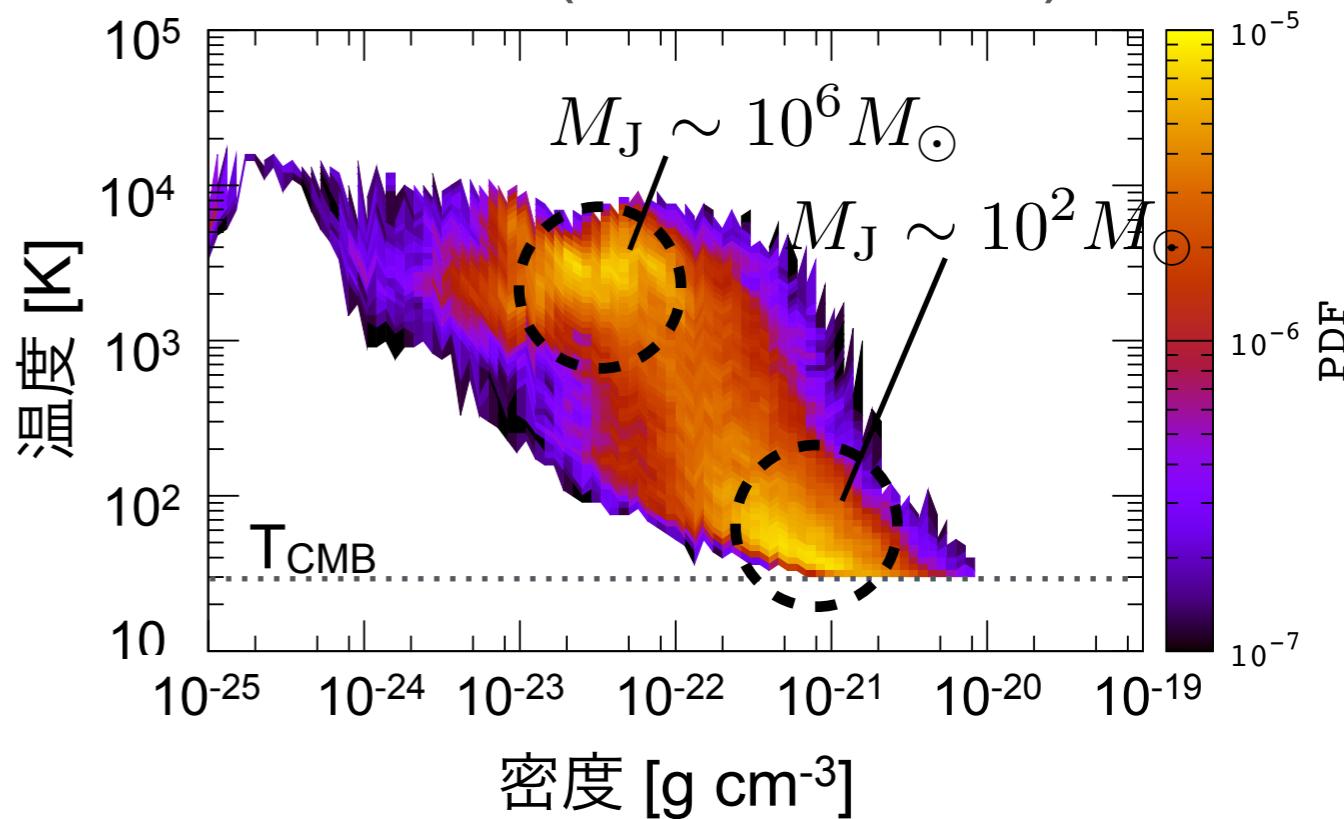


# ガス雲の解析 ( $0.1 Z_{\text{sun}}$ )



0.1 pcスケールまで分解して  
熱的不安定性によるガス雲形成  
を確認

密度-温度分布 (ガス雲と周辺)

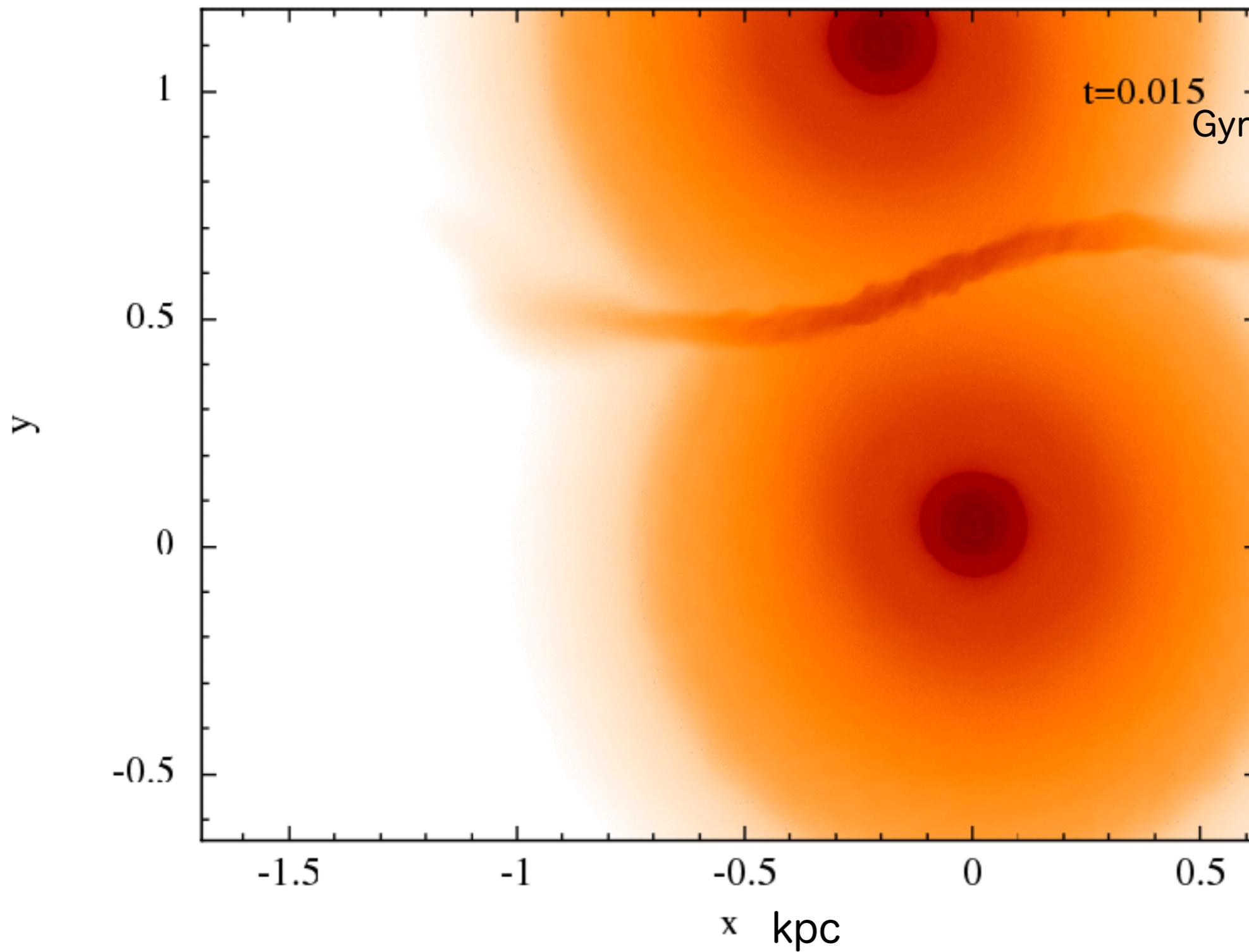


2相化+初期に重力不安定でない

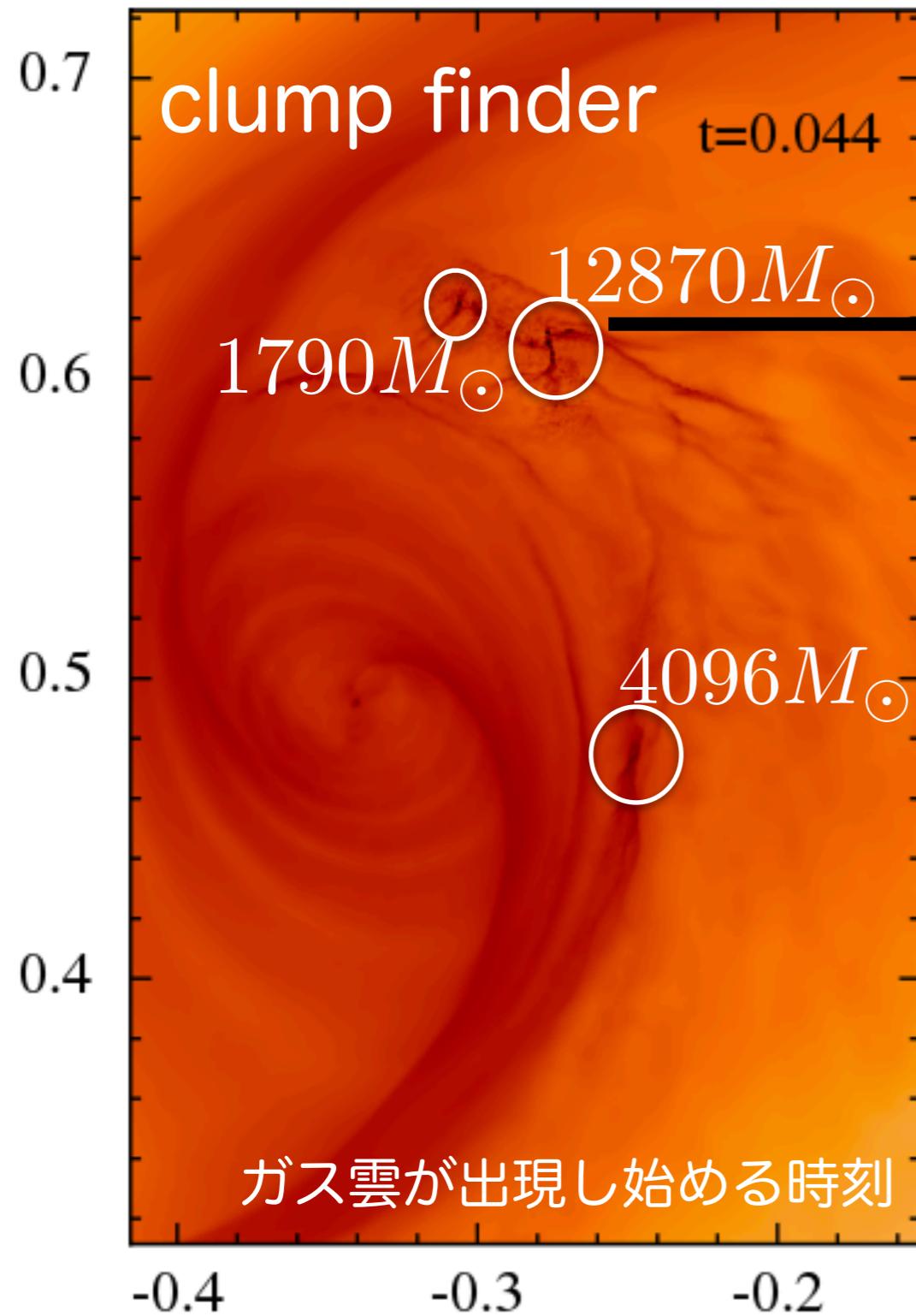
一部の冷たいガス雲は重力不安定 → 星形成へ

# 金属量 $0.01Z_{\text{sun}}$ の銀河衝突

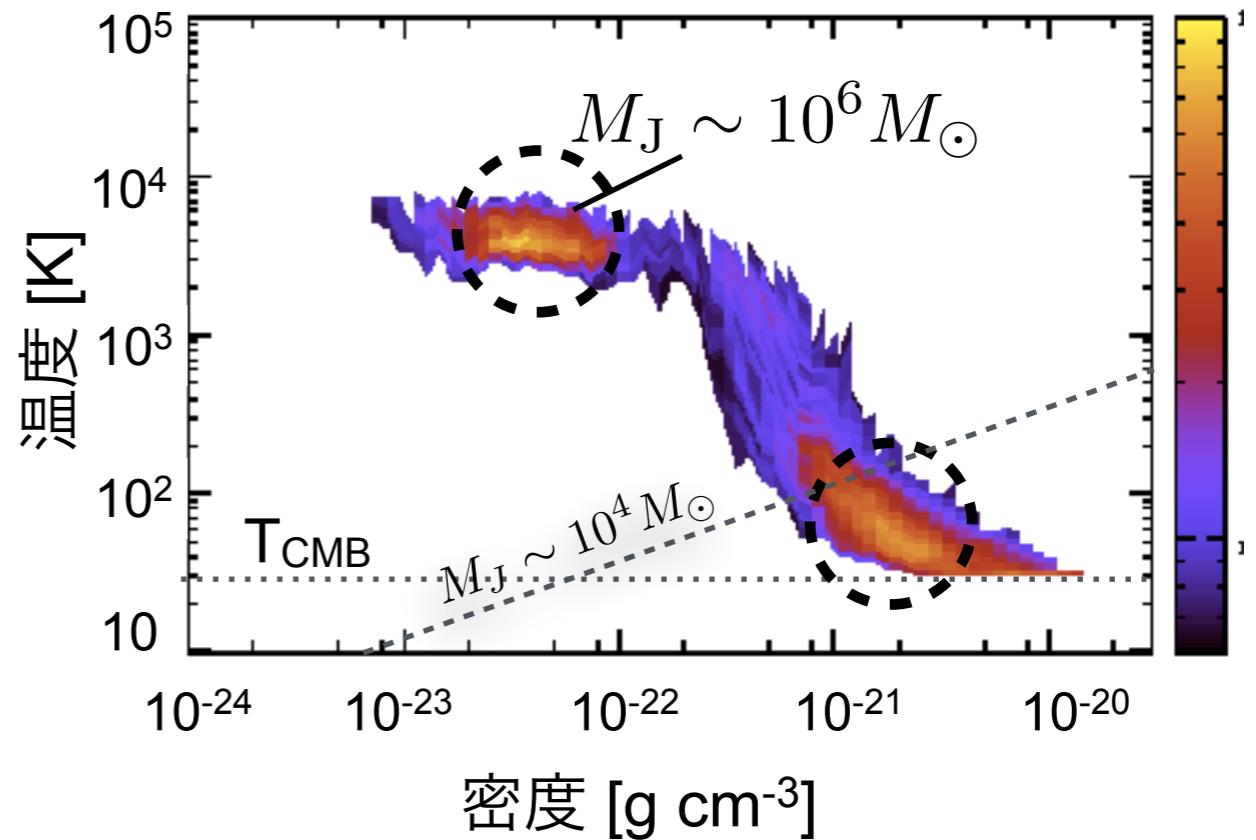
prograde-prograde     $b=0.8 \text{ kpc}$



# ガス雲の解析 ( $0.01 Z_{\text{sun}}$ )



密度-温度分布 (ガス雲と周辺)



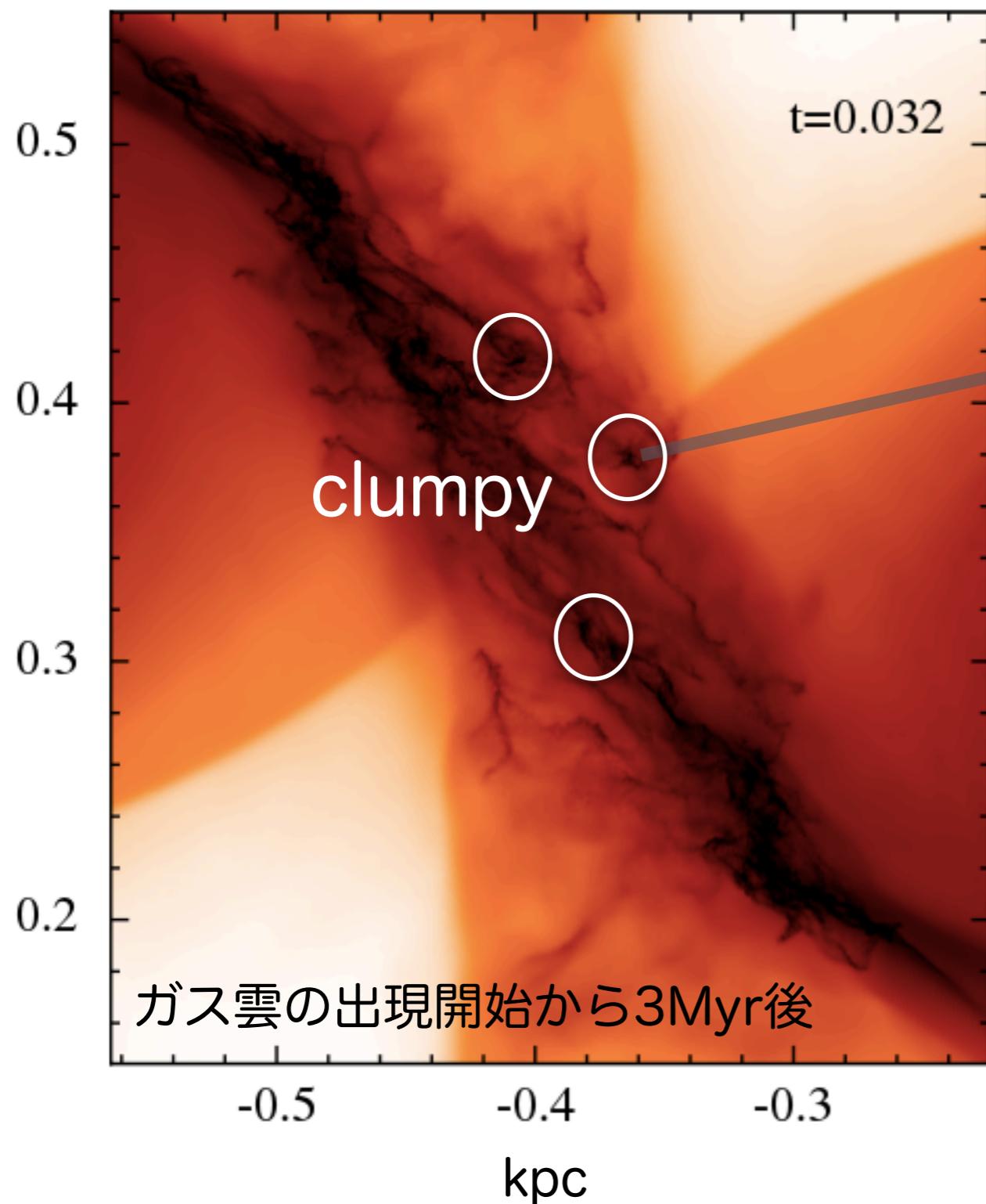
金属量と熱的不安定の最大スケール

$$c_s t_{\text{cool}} \propto n^{-1} Z^{-1}$$

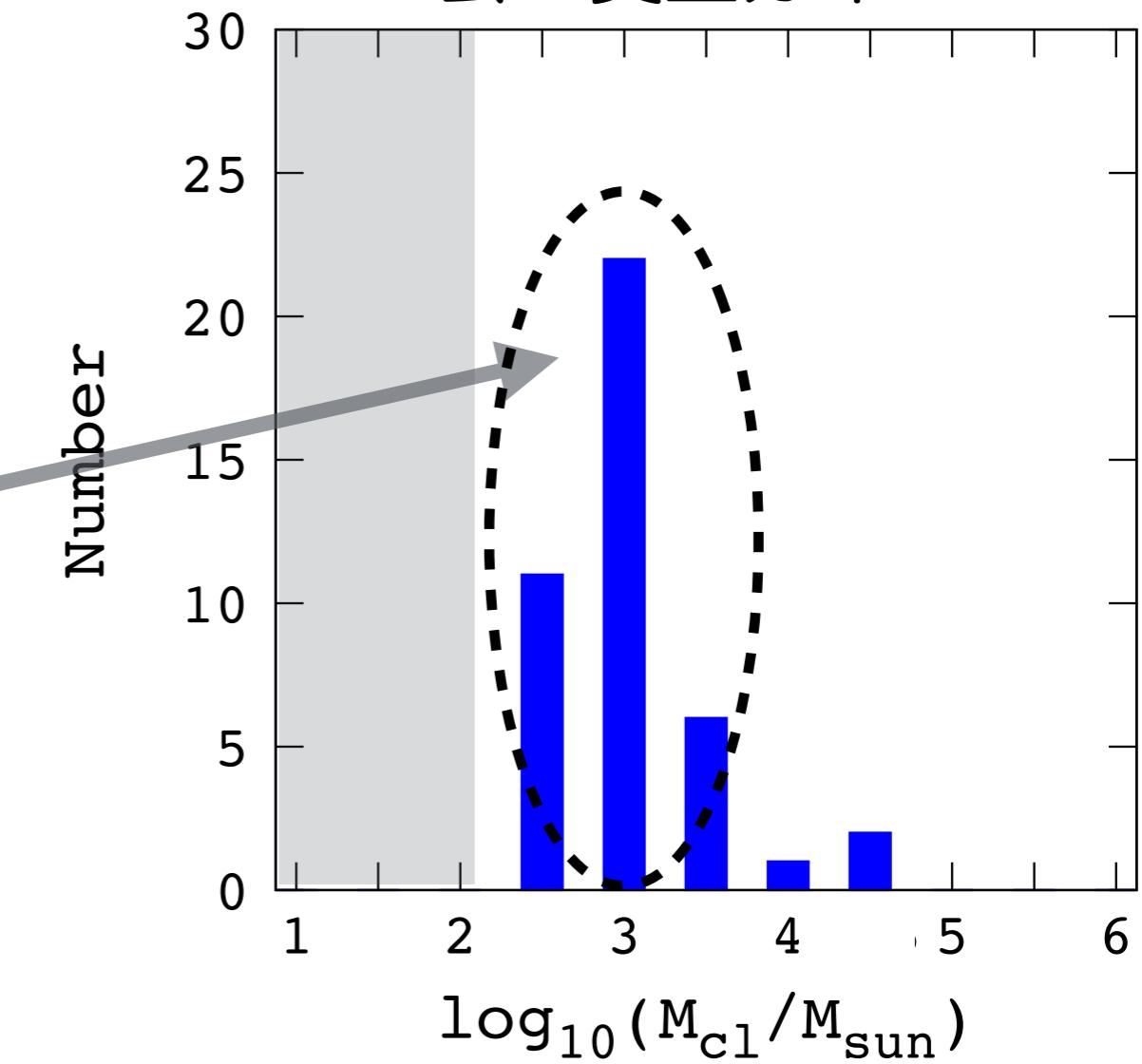
の関係から予想できる通り、低金属量  
ほど大質量のガス雲が形成される

# ガス雲の質量分布 ( $0.1 Z_{\text{sun}}$ )

質量分布の時間発展に着目



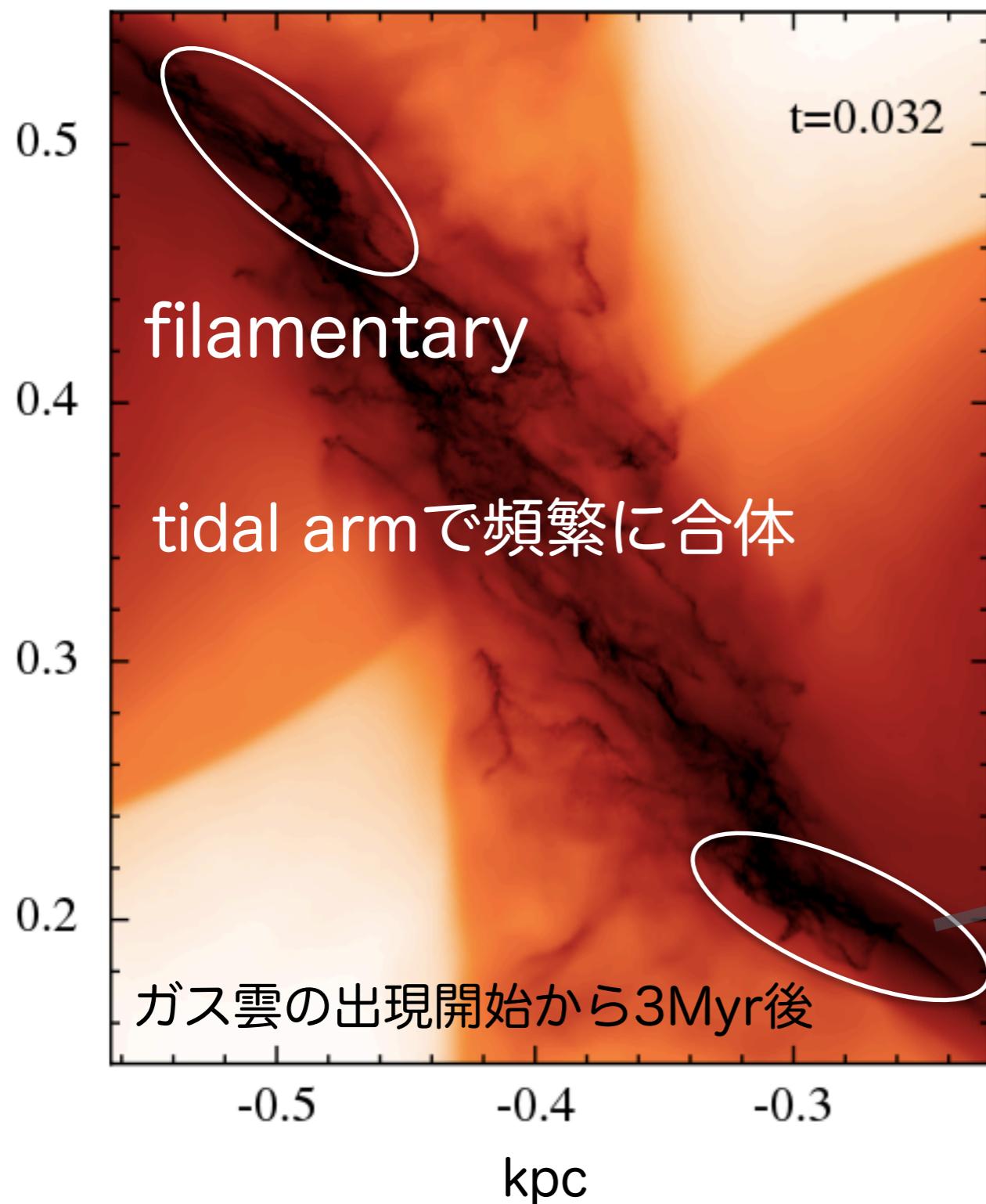
ガス雲の質量分布



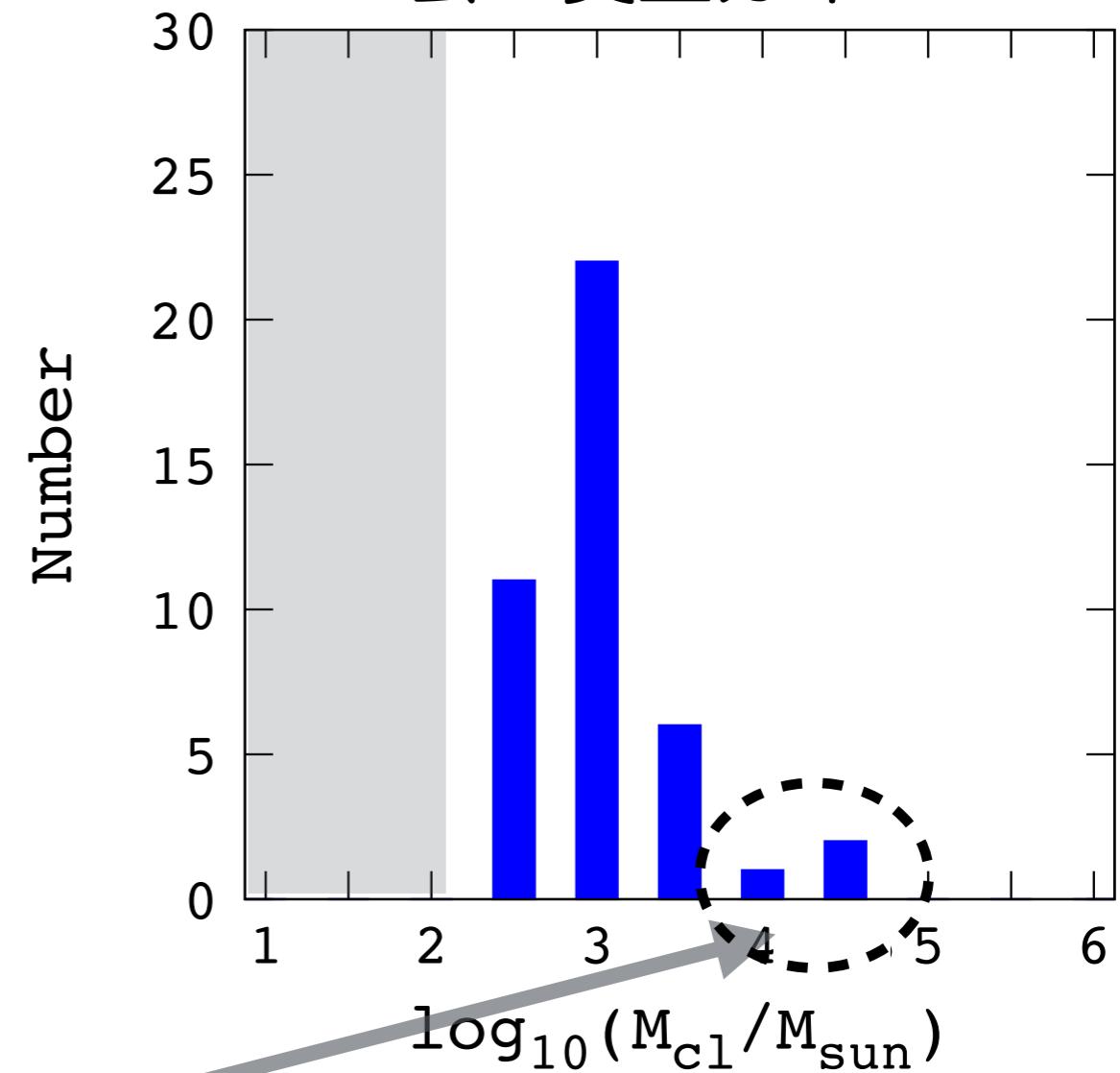
大部分のガス雲は数  $100 \sim 10^3 M_{\text{sun}}$  で形成；熱的不安定性の最大スケールから見積もった質量とコンシスティント

# ガス雲の質量分布 ( $0.1 Z_{\text{sun}}$ )

質量分布の時間発展に着目



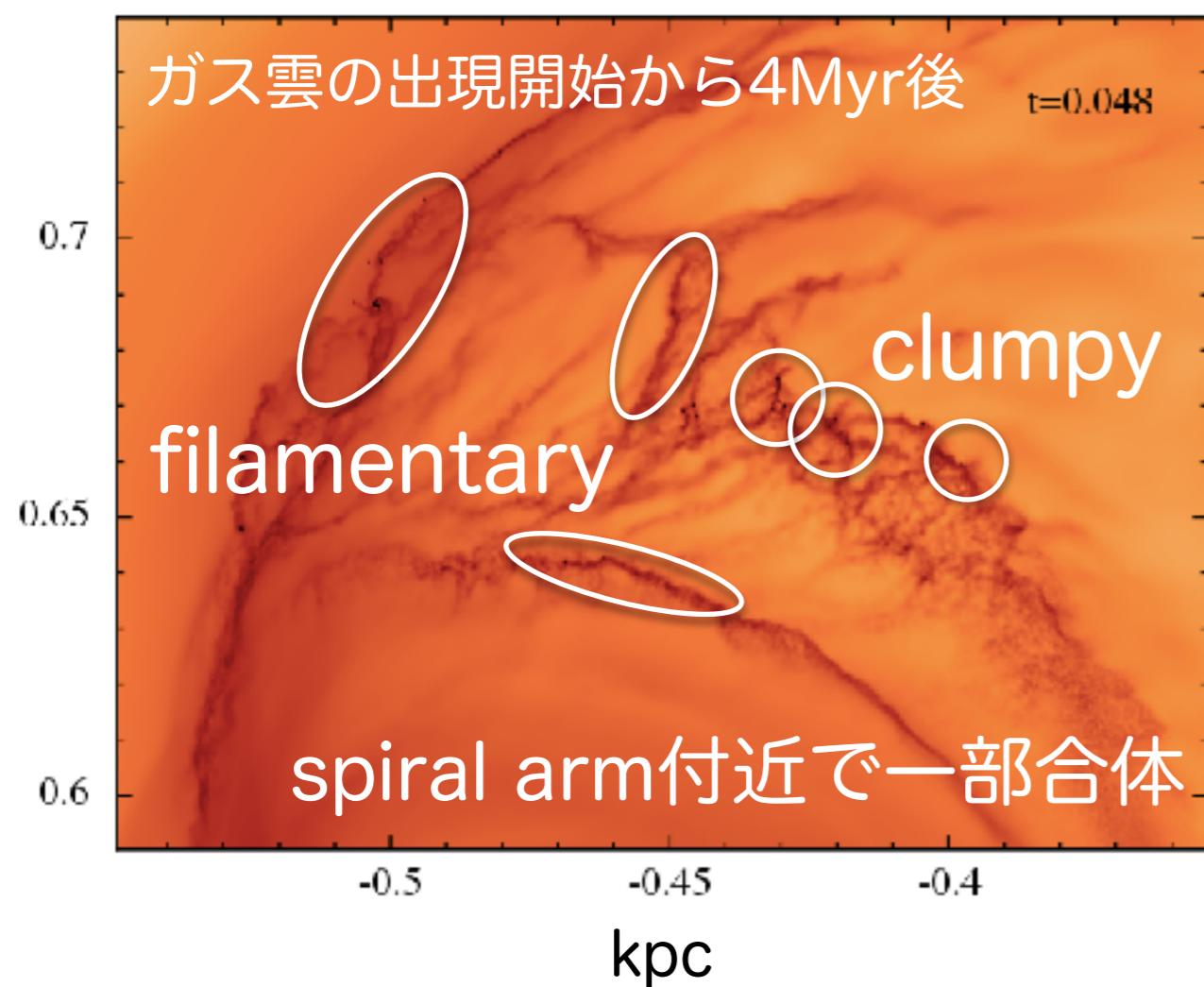
ガス雲の質量分布



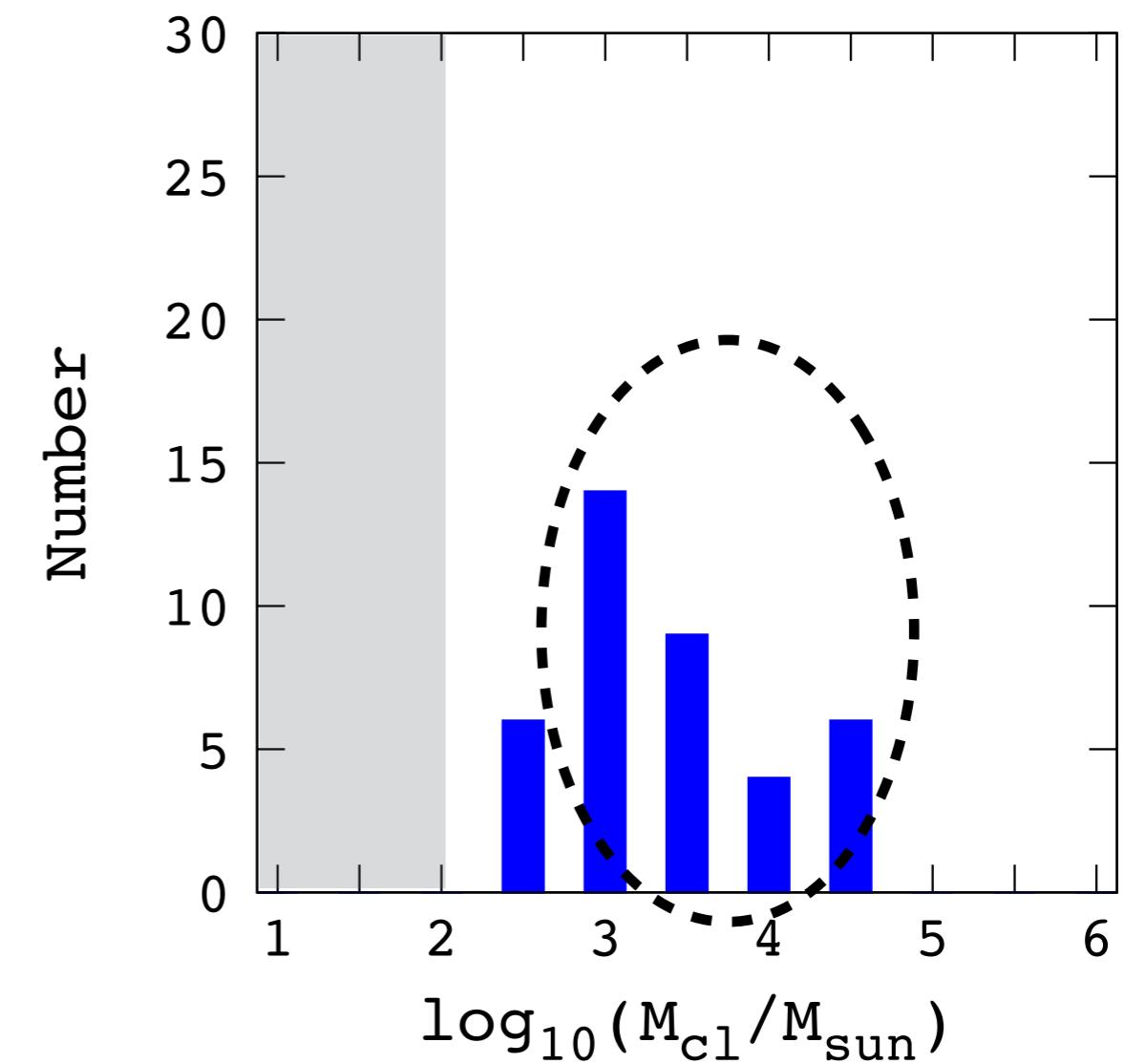
銀河の重力的なダイナミクスの影響で合体して大質量に  
金属量が高くても大質量になるうる？

# ガス雲の質量分布 ( $0.01Z_{\text{sun}}$ )

質量分布の時間発展に着目



ガス雲の質量分布



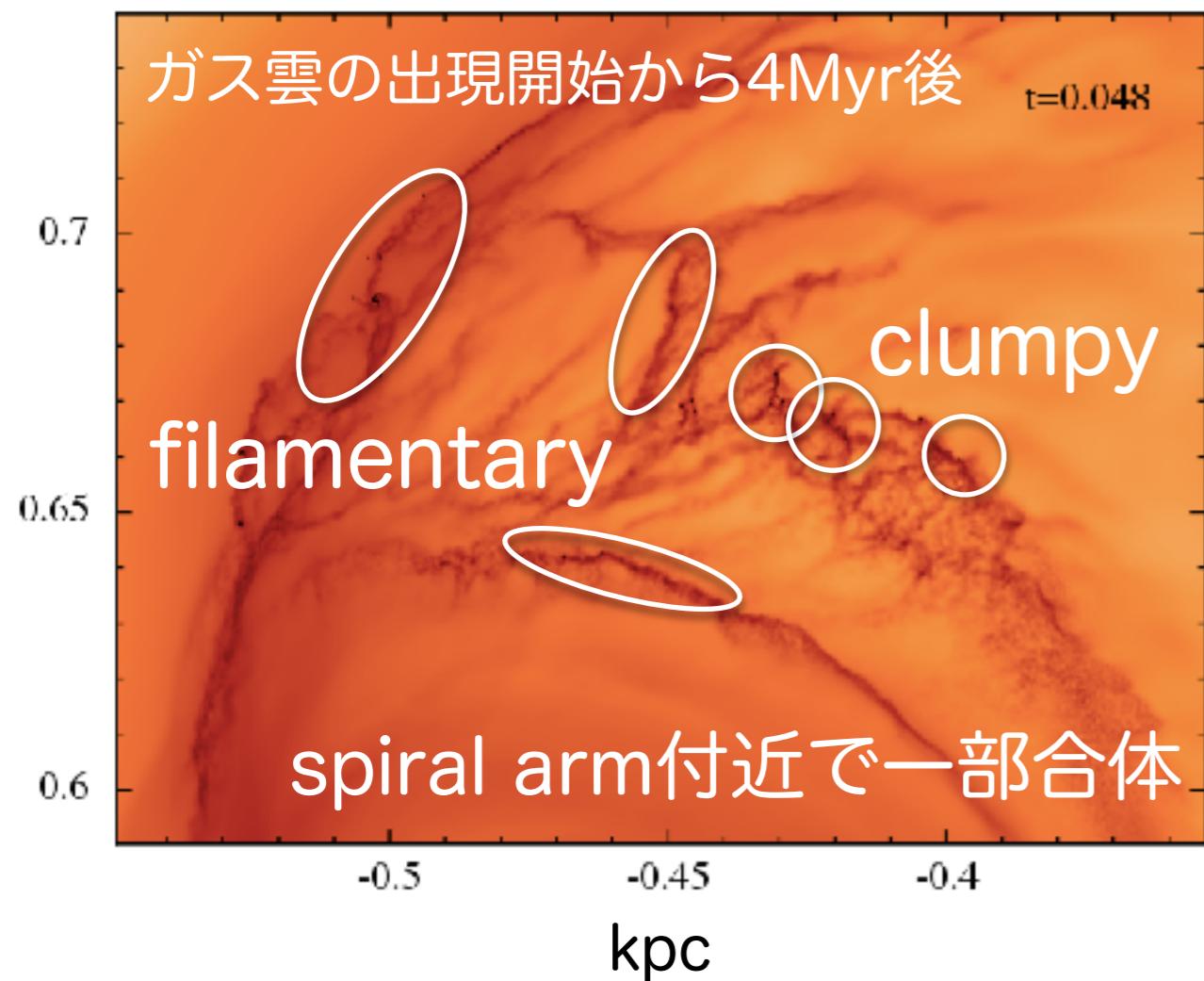
大部分のガス雲は $10^3$ - $10^4 M_{\text{sun}}$ で形成

熱的不安定性の最大スケールから見積もった質量とコンシスティント

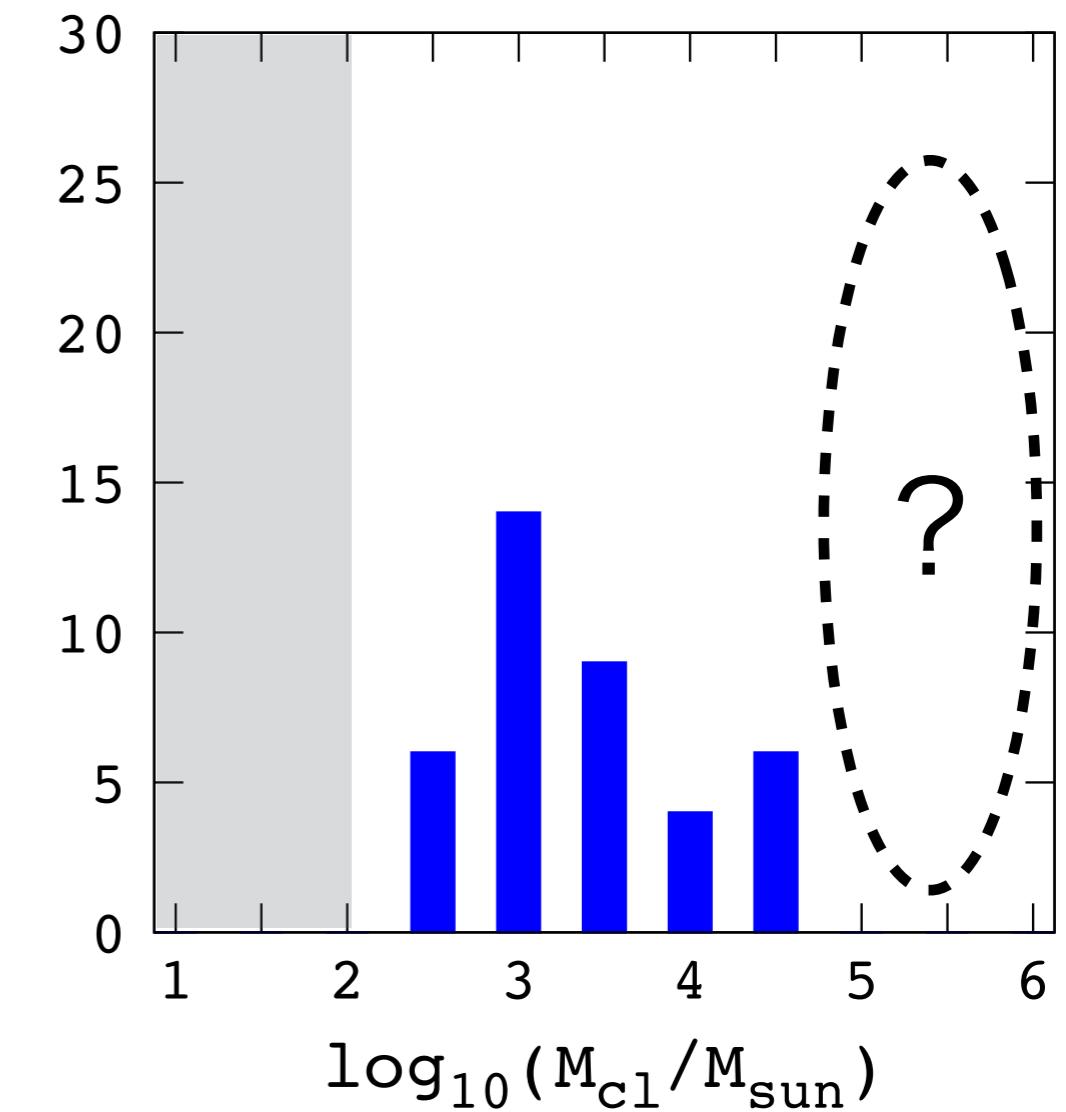
合体による成長は一部のみ

# ガス雲の質量分布 ( $0.01 Z_{\text{sun}}$ )

質量分布の時間発展に着目



ガス雲の質量分布

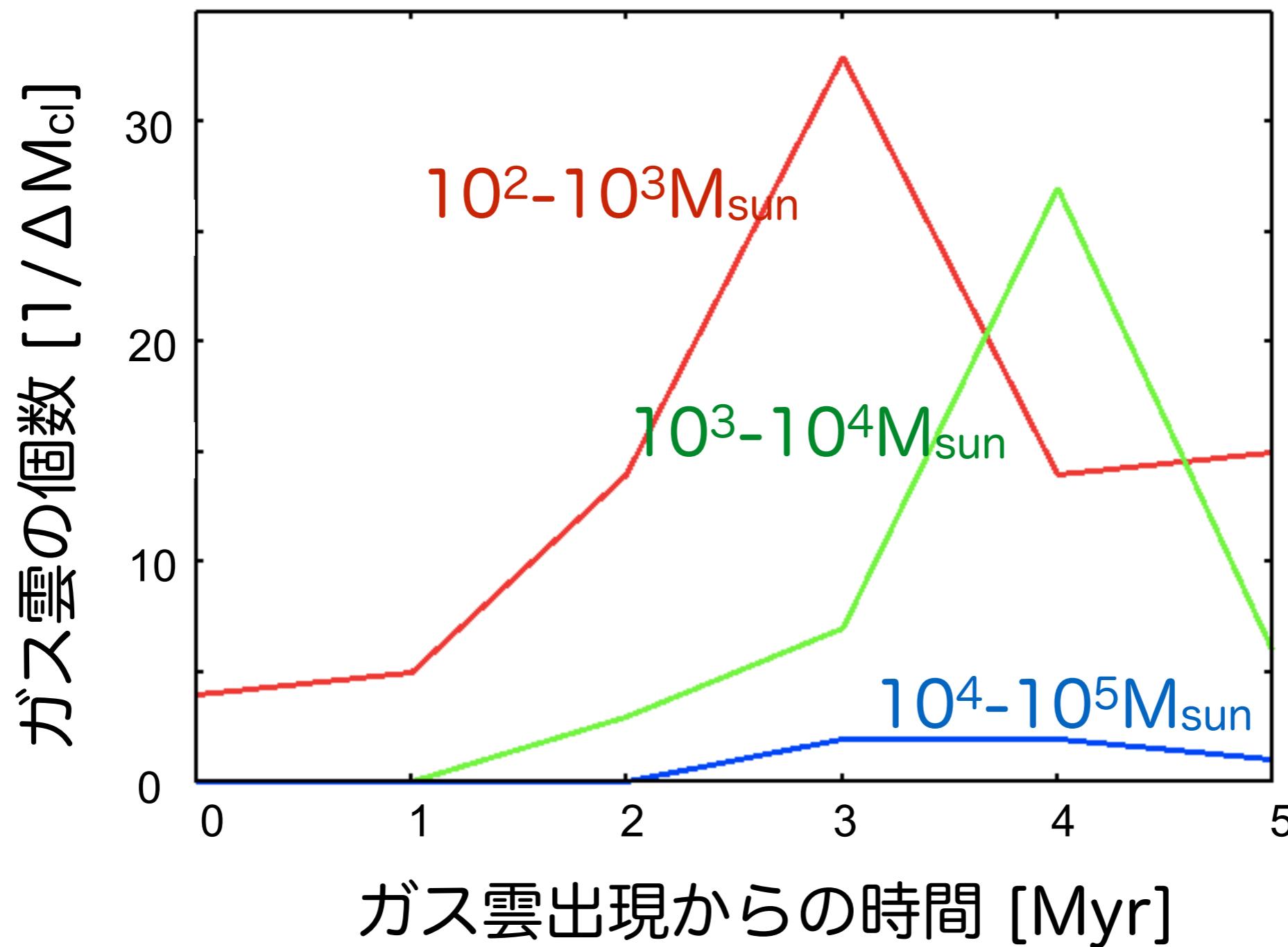


$10^{5-6} M_{\text{sun}}$  のガス雲(球状星団の親雲)を熱的不安定で形成するのは困難?

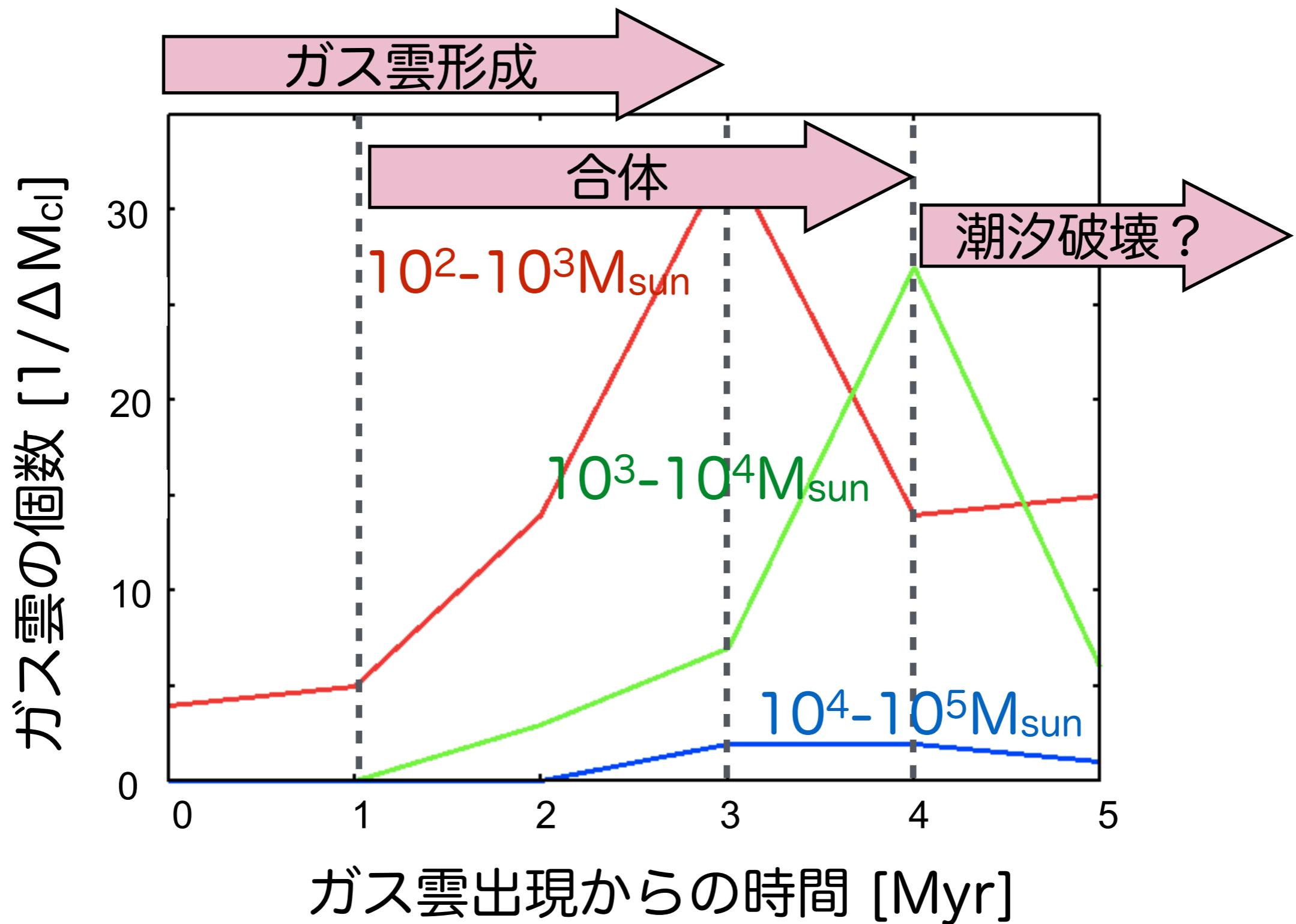
- ・ ガス雲が合体しても届かない
- ・ より低密度では冷却時間が銀河の力学時間より長くて成長できない

# ガス雲の形成率 ( $0.1 Z_{\text{sun}}$ )

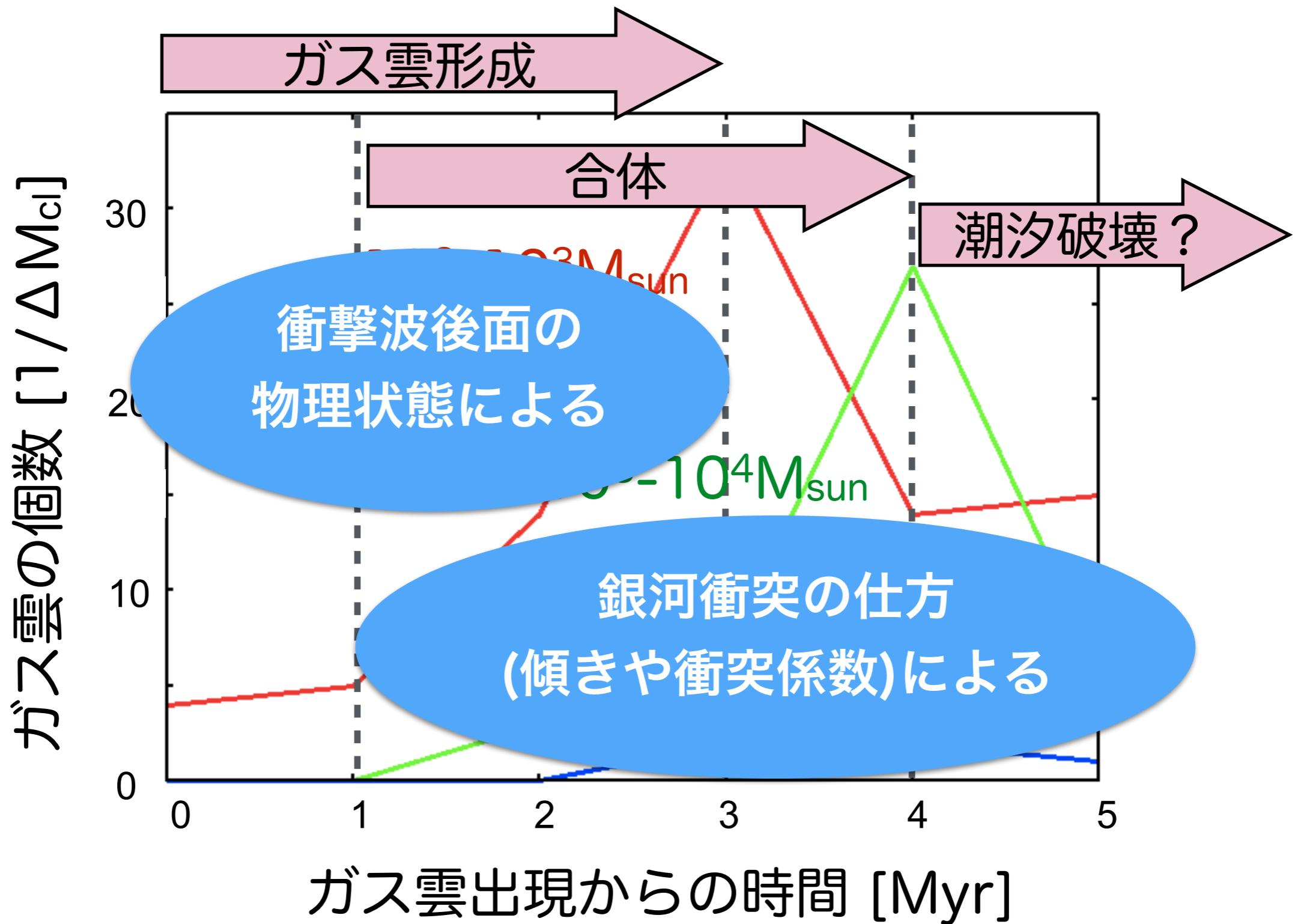
prograde-prograde     $b=0.8 \text{ kpc}$     (fiducial)



# ガス雲の形成率 ( $0.1 Z_{\text{sun}}$ )



# ガス雲の形成率 ( $0.1 Z_{\text{sun}}$ )

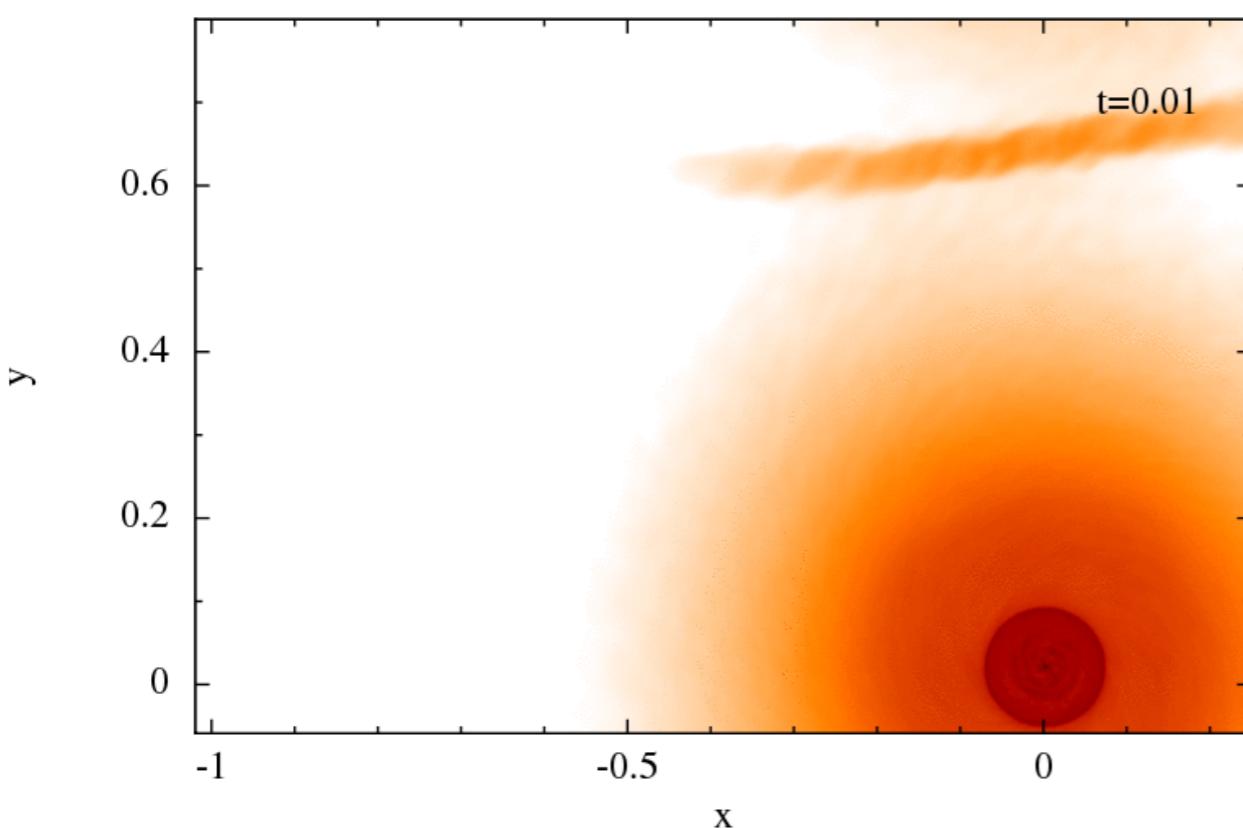


# impact-parameterによるガス雲形成率の違い

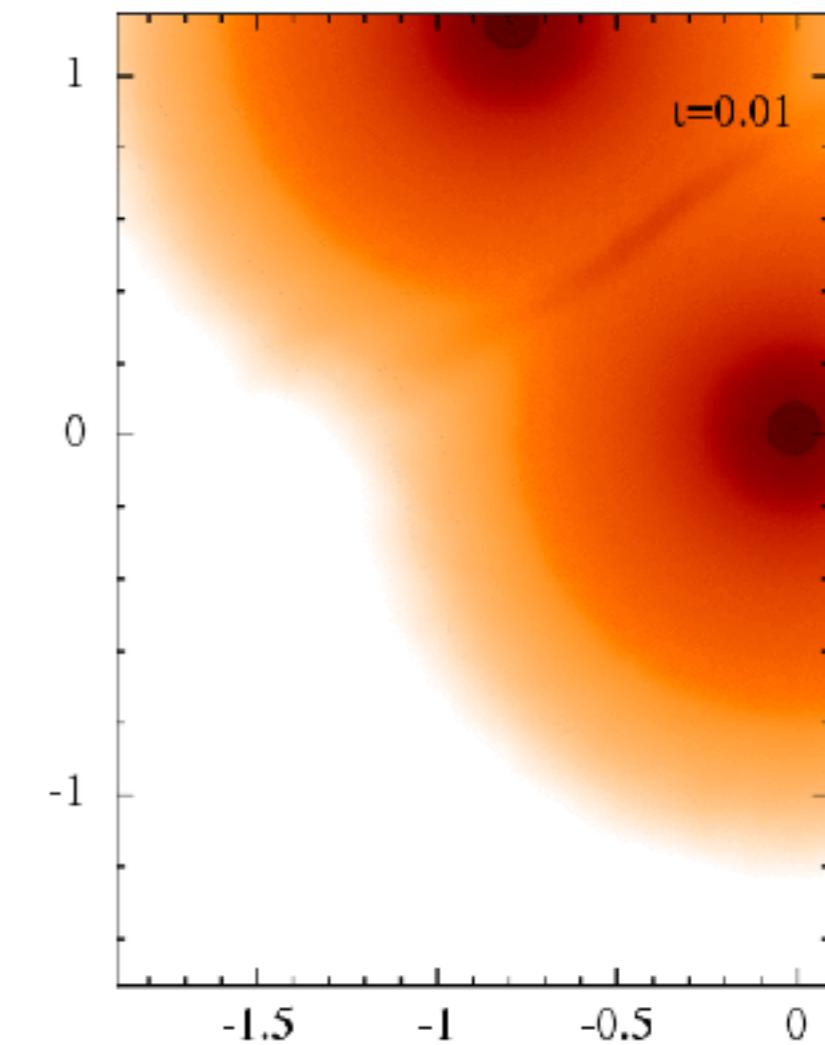
ナイーブには…

impact parameterが大きいと、衝撃波後面の密度が低い  
→ 冷却時間が長い → より大スケールでガス雲を形成？

銀河円盤のスケール長:~0.1 kpc



$b=0.8$  kpc  
(fiducial)



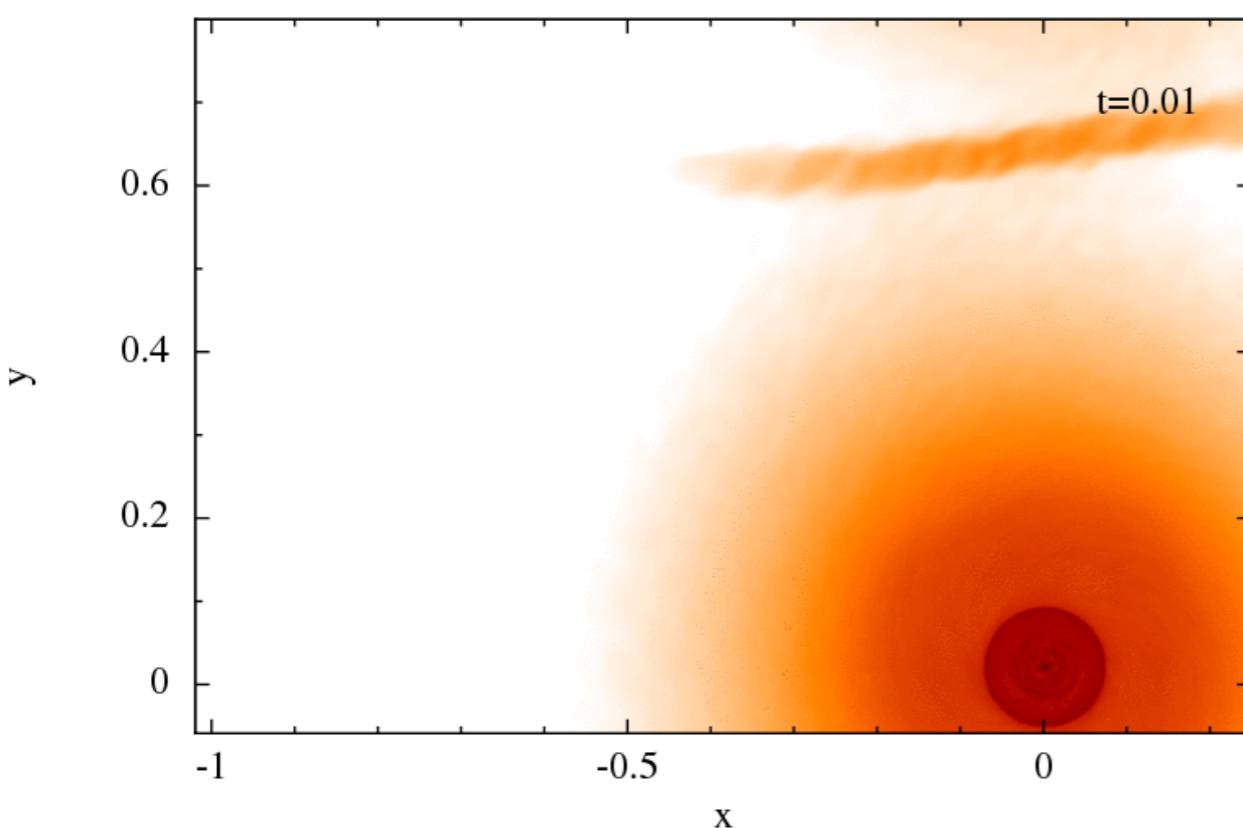
$b=1.0$  kpc

# impact-parameterによるガス雲形成率の違い

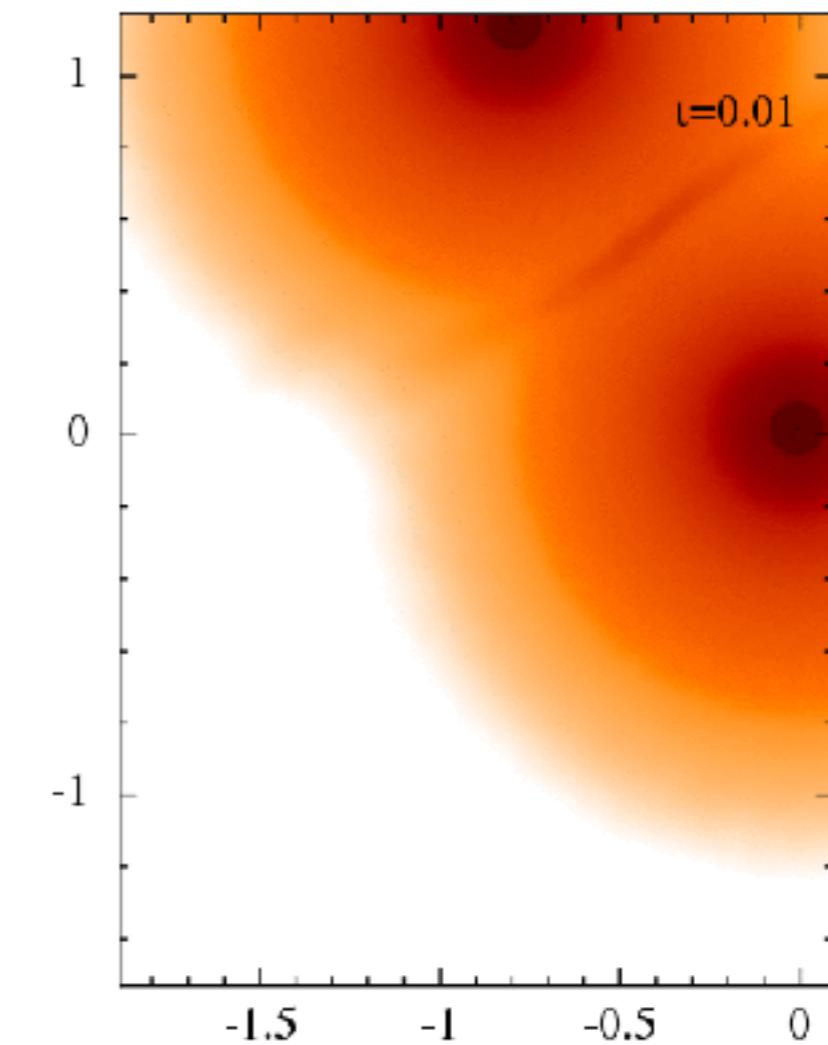
ナイーブには…

impact parameterが大きいと、衝撃波後面の密度が低い  
→ 冷却時間が長い → より大スケールでガス雲を形成？

銀河円盤のスケール長:~0.1 kpc

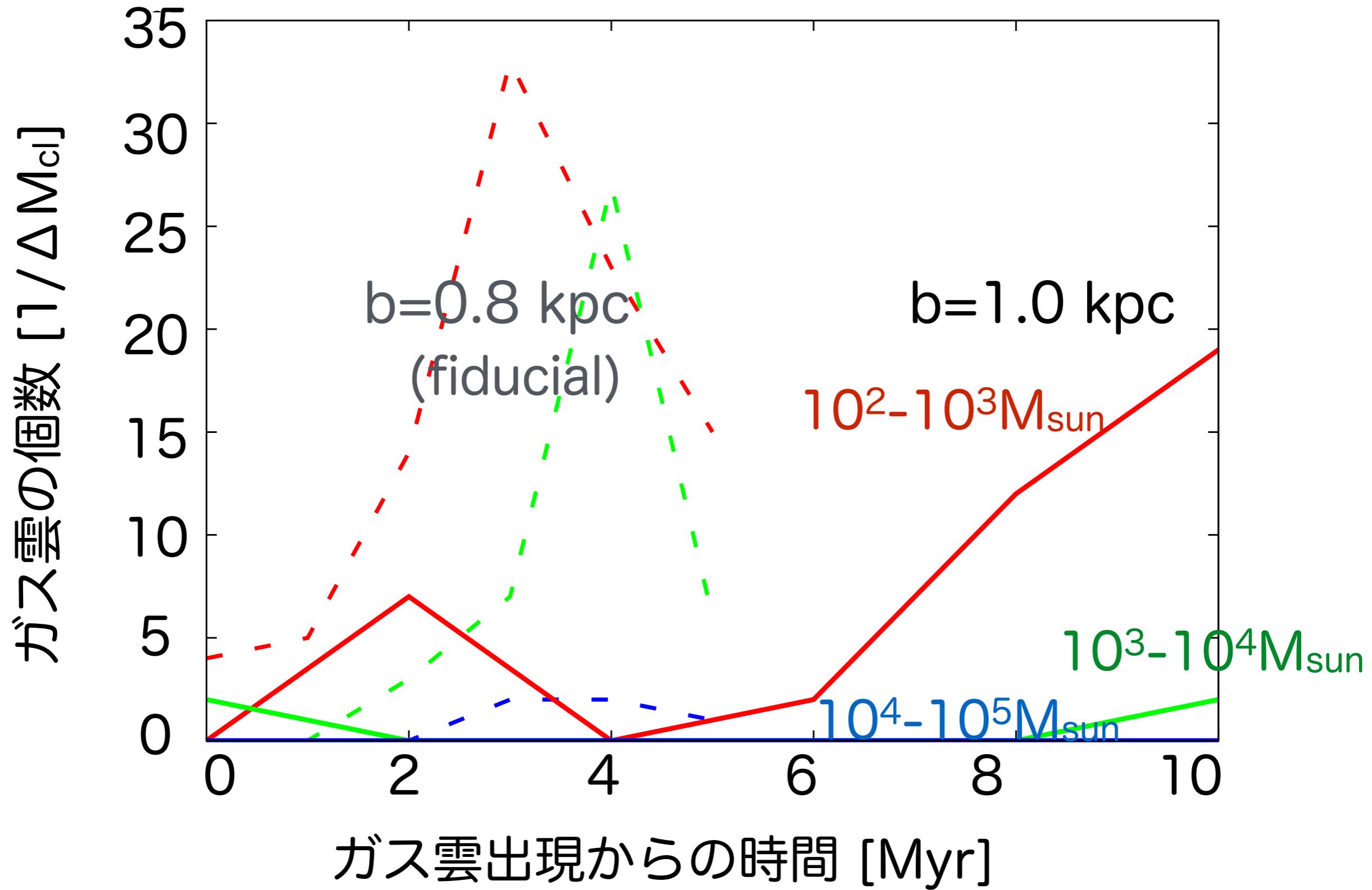


$b=0.8$  kpc  
(fiducial)

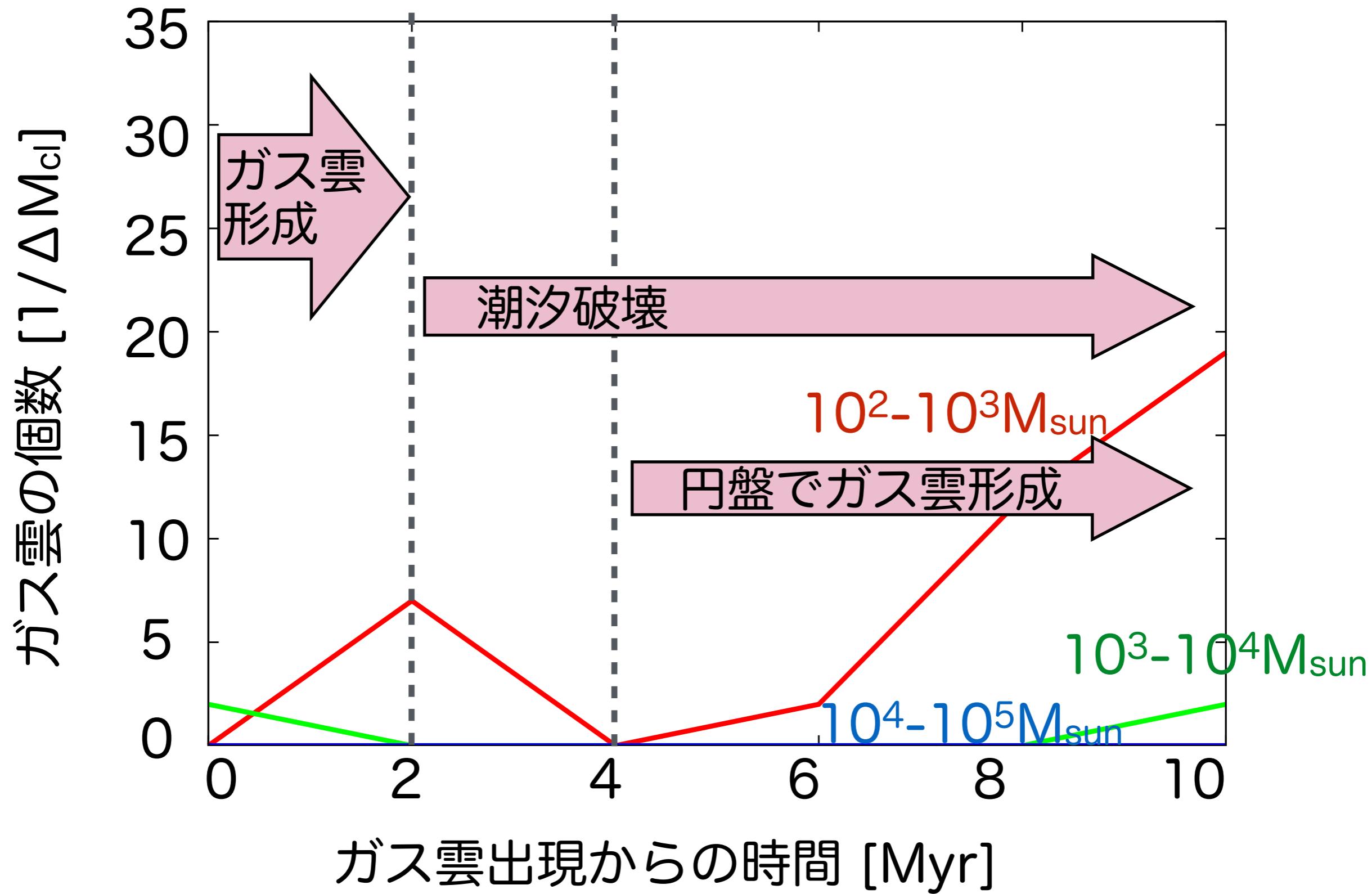


$b=1.0$  kpc

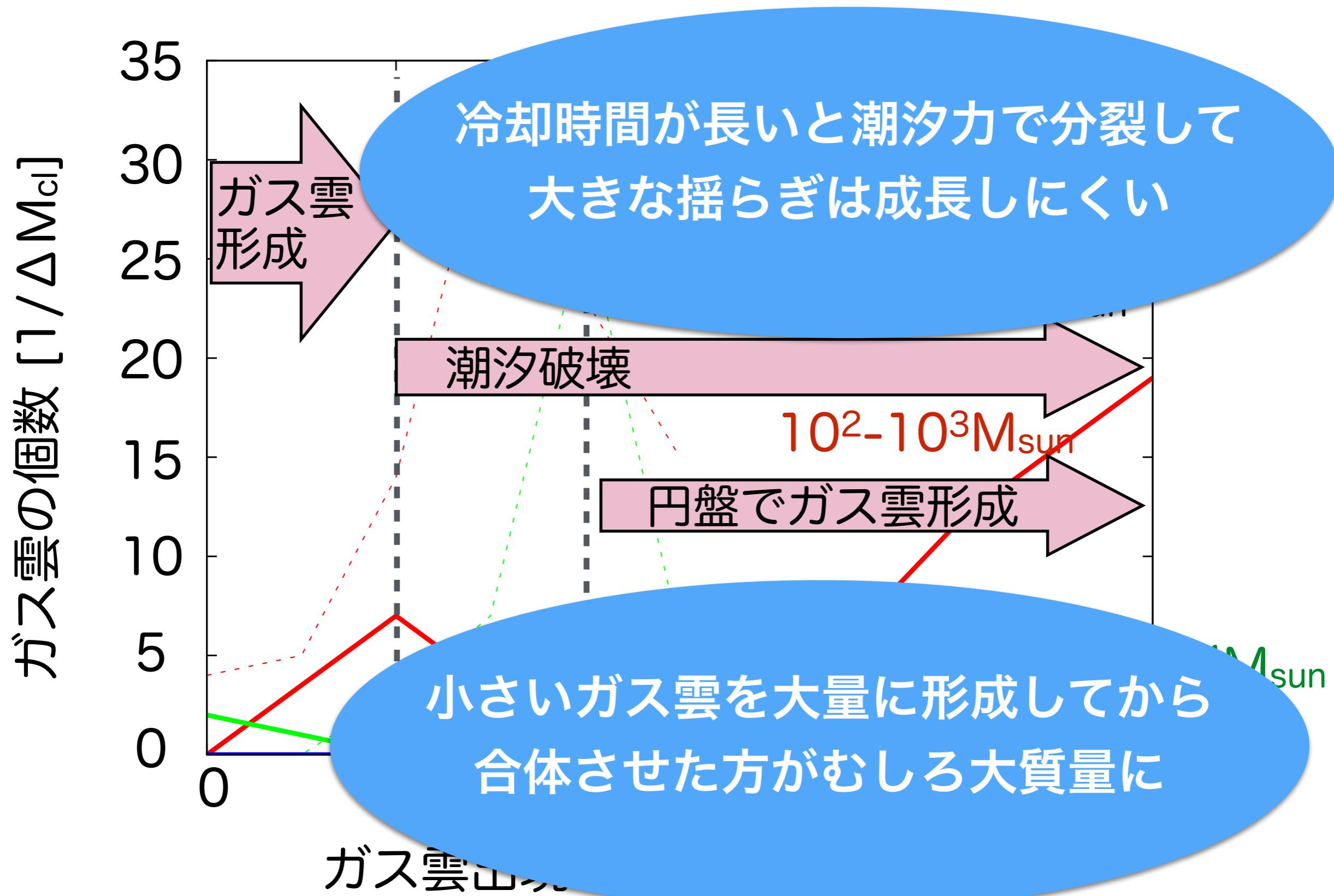
# impact-parameterによるガス雲形成率の違い



# impact-parameterによるガス雲形成率の違い



# impact-parameterによるガス雲形成率の違い



# summary

- ・初代銀河の衝突に伴うガス雲形成を3次元流体計算で調べた。
- ・現実的な初代銀河の環境において熱的不安定性による多数のガス雲形成を確認した。これにより、初代銀河の円盤では多数の星団が作られる可能性が示唆された。
- ・熱的不安定で形成されるガス雲の質量は低金属量ほど大きくなり、 $0.1Z_{\text{sun}}$ では $10^2\text{-}10^3 M_{\text{sun}}$ 、 $0.01Z_{\text{sun}}$ では $10^3\text{-}10^4 M_{\text{sun}}$ のガス雲が多く形成された。
- ・形成されたガス雲は銀河の重力的なダイナミクスに伴って合体成長する。とくに、tidal armやspiral armで頻繁に合体する。
- ・inclinationやimpact-parameterは銀河の重力的なダイナミクスを変え、ガス雲形成に影響することが分かった。