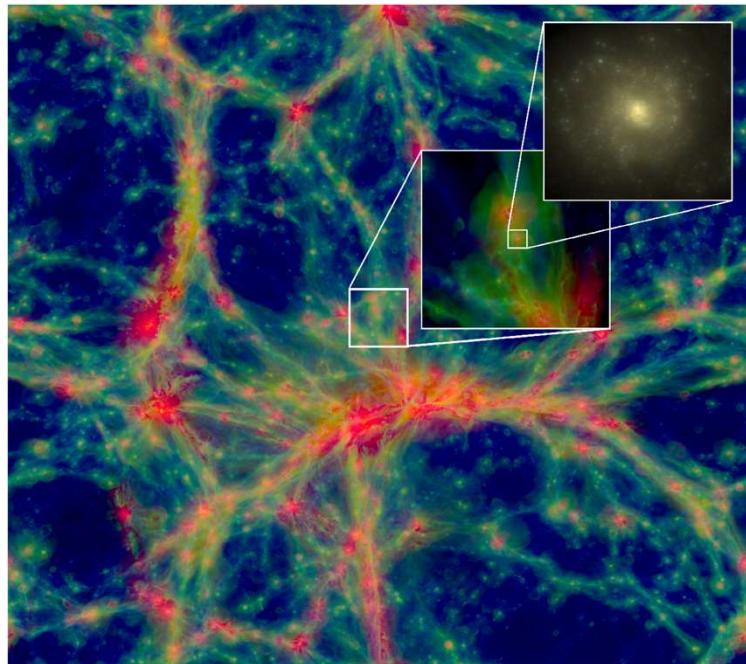


ダークマターサブハローの衝突過程と 銀河進化の解析

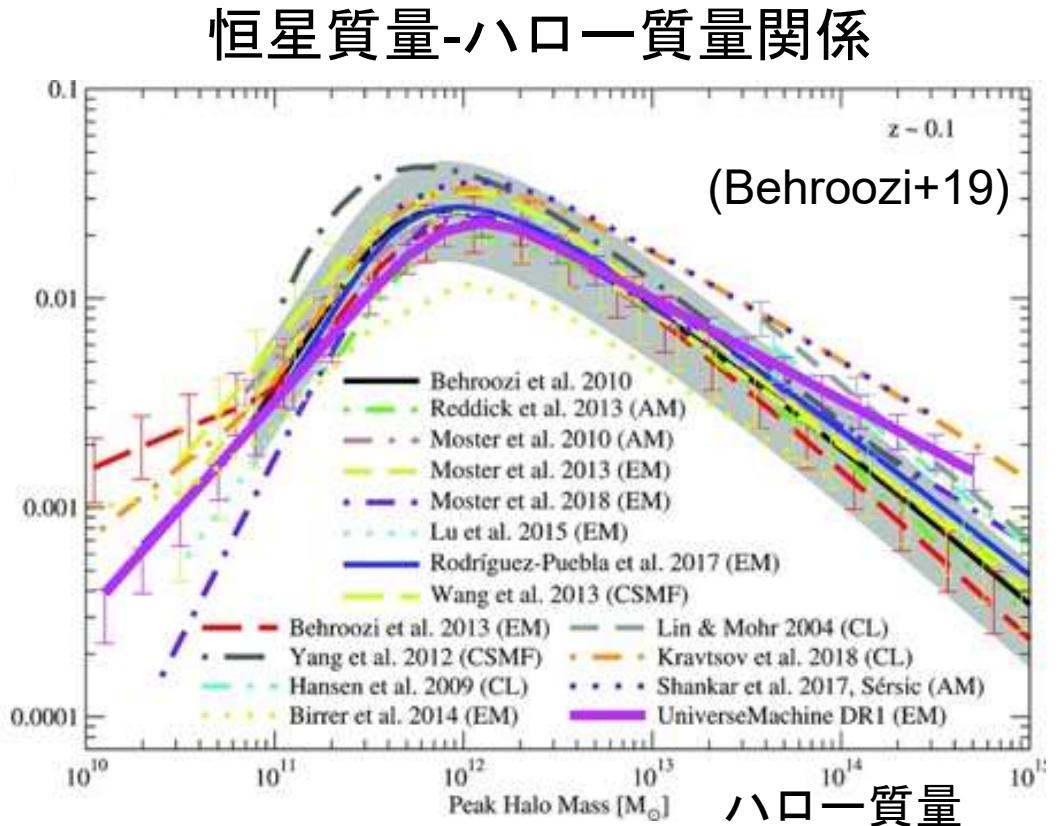
筑波大学 D1：大滝恒輝
共同研究者：森正夫

天体形成研究会
2021/10/22

CDMによる階層的構造形成



恒星質量/ハロー一質量



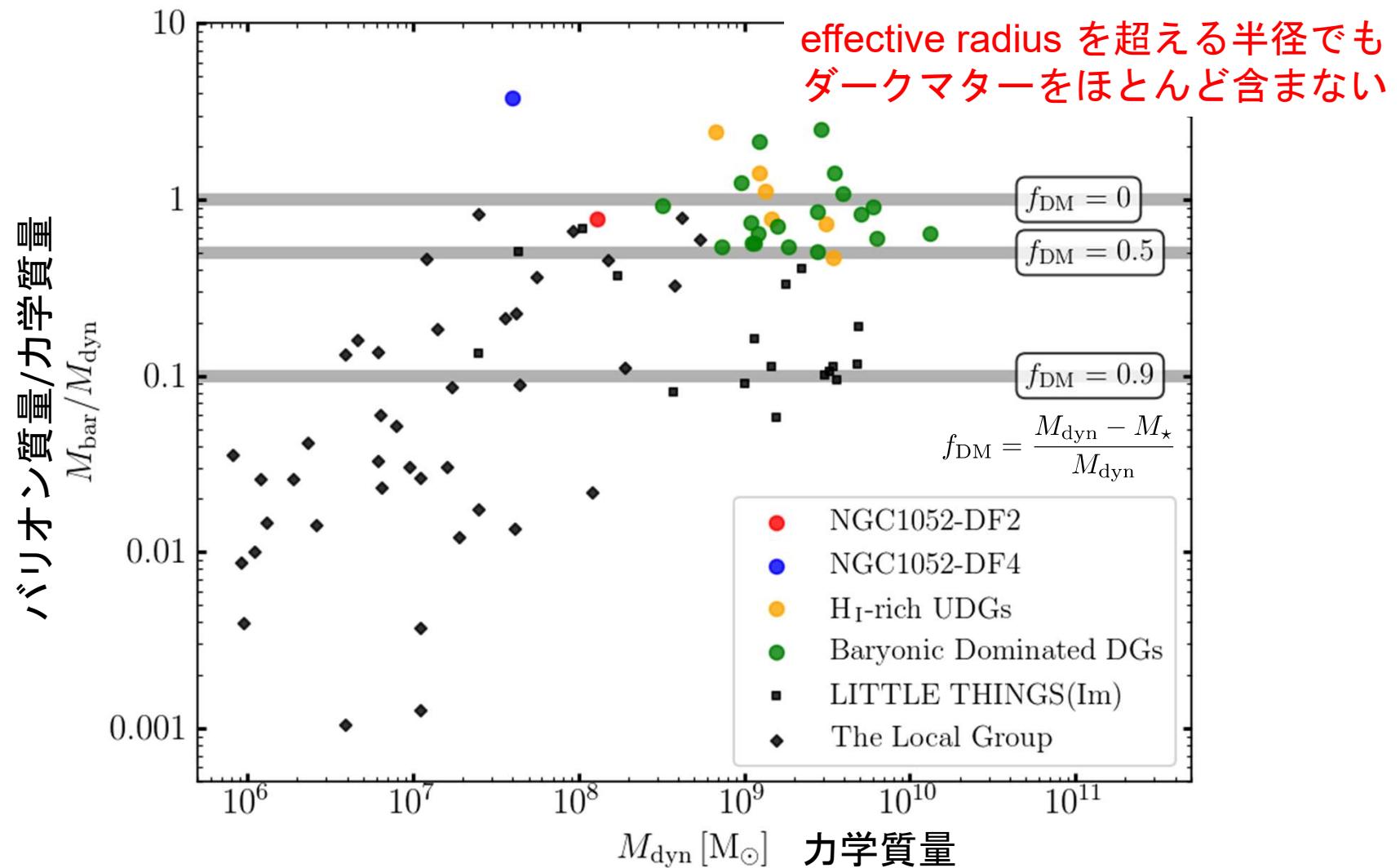
大質量銀河 : $M_{\star} \sim 10^{10} M_{\odot}$, $M_{\text{DM}} \sim 10^{12} M_{\odot}$

矮小銀河 : $M_{\star} \sim 10^8 M_{\odot}$, $M_{\text{DM}} \sim 5 \times 10^{10} M_{\odot}$

しかし、ダークマター欠乏銀河 $M_{\text{baryon}} \gtrsim M_{\text{DM}}$ が発見

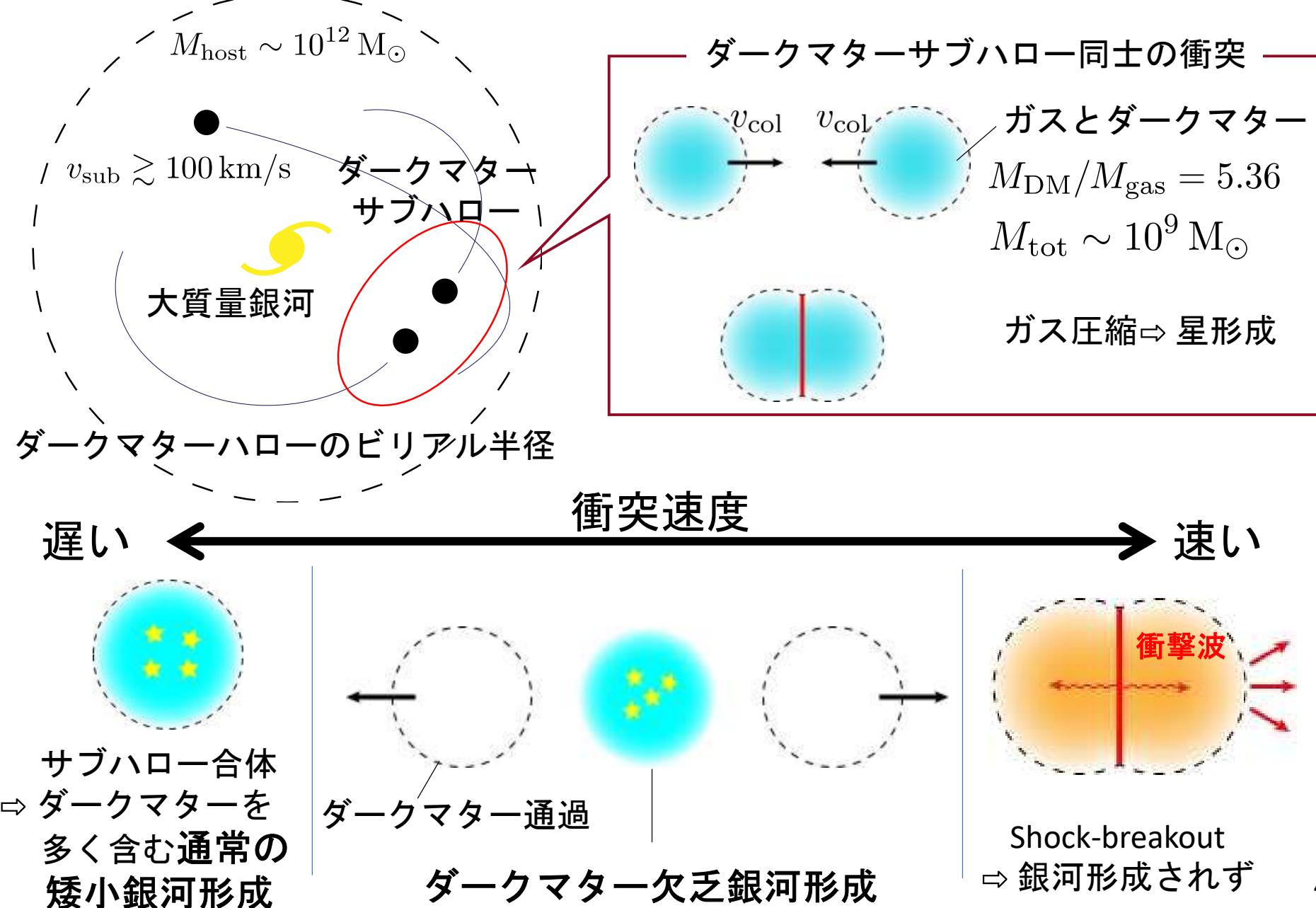
背景：ダークマター欠乏銀河の観測

(van Dokkum+18,19, Mancera Piña+19, Guo+20)



ダークマターが支配的な宇宙の中で、どうやって形成されたのか?
ダークマターサブハロー衝突による銀河形成の物理過程を調査

ダークマター欠乏銀河形成モデル



1. Merger condition

重力ポテンシャルエネルギーに束縛される速度を導出

$$\frac{1}{2}v_{\text{merger}}^2 + 2\Phi_{\text{NFW}} = 0$$

$$\Rightarrow v_{\text{merger}} \sim 34 \left(\frac{M}{10^9 M_\odot} \right)^{0.34} \text{ km/s}$$

v_{merger}	: merger 条件速度
Φ_{NFW}	: NFW ポテンシャル
M	: 質量
$\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/8\pi G$	
G	: 重力定数
$H_0 = 67.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	
$R_{200} = (3M/4\pi\rho_{200})^{1/3}$	
$r_s = R_{200}/c_{200}$	(Prada+12)

衝突速度 $v_{\text{col}} \lesssim v_{\text{merger}}$ でダークマターが支配的な通常の矮小銀河形成

2. Shock-breakout condition

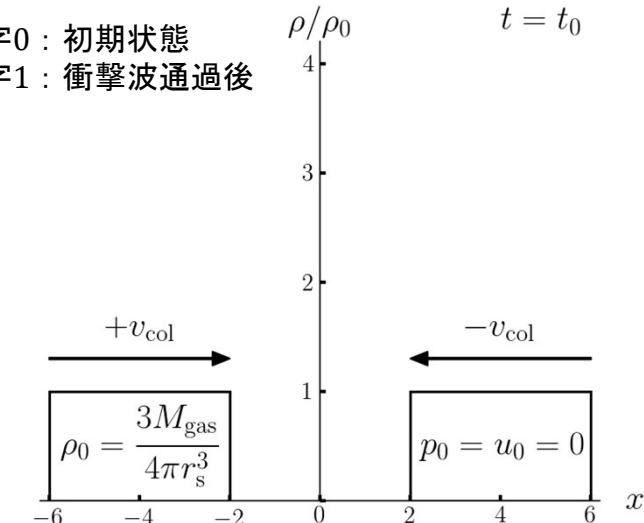
スケール半径 r_s 内に密度一様なガス球の衝突で運動エネルギーが内部エネルギーへ変換し、強い断熱衝撃波が発生

ρ	: 質量密度	γ	: 比熱比 = 5/3
p	: 壓力	k_B	: Boltzmann 定数
u	: 比内部エネルギー	T	: 温度
v_{col}	: 衝突速度	n	: 数密度
v_{shock}	: 衝撃波速度	Λ	: 冷却率

衝撃波通過時間 $t_{\text{cross}} = \frac{2r_s}{v_{\text{col}} + v_{\text{shock}}}$

ガス放射冷却時間 $t_{\text{cool}} = \frac{k_B T_1}{(\gamma - 1) n_1 \Lambda(T_1)}$

$t_{\text{cool}} < t_{\text{cross}}$: ガスの冷却が効き、爆発せずに収縮
 $t_{\text{cool}} > t_{\text{cross}}$: 衝撃波がガス球の表面まで到達



1. Merger condition

重力ポテンシャルエネルギーに束縛される速度を導出

$$\frac{1}{2}v_{\text{merger}}^2 + 2\Phi_{\text{NFW}} = 0$$

$$\Rightarrow v_{\text{merger}} \sim 34 \left(\frac{M}{10^9 M_\odot} \right)^{0.34} \text{ km/s}$$

v_{merger} : merger 条件速度
Φ_{NFW} : NFW ポテンシャル
M : 質量
$\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/8\pi G$
G : 重力定数
$H_0 = 67.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
$R_{200} = (3M/4\pi\rho_{200})^{1/3}$
$r_s = R_{200}/c_{200}$ (Prada+12)

衝突速度 $v_{\text{col}} \lesssim v_{\text{merger}}$ でダークマターが支配的な通常の矮小銀河形成

2. Shock-breakout condition

スケール半径 r_s 内に密度一様なガス球の衝突で運動エネルギーが内部エネルギーへ変換し、強い断熱衝撃波が発生

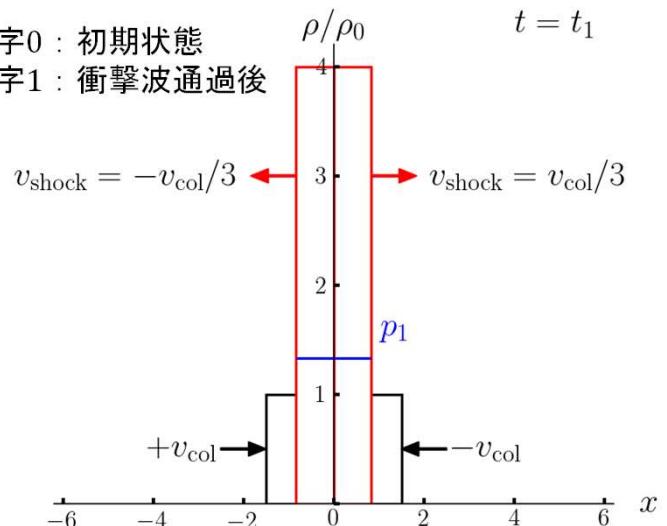
衝撃波通過時間 $t_{\text{cross}} = \frac{2r_s}{v_{\text{col}} + v_{\text{shock}}}$

ガス放射冷却時間 $t_{\text{cool}} = \frac{k_B T_1}{(\gamma - 1)n_1 \Lambda(T_1)}$

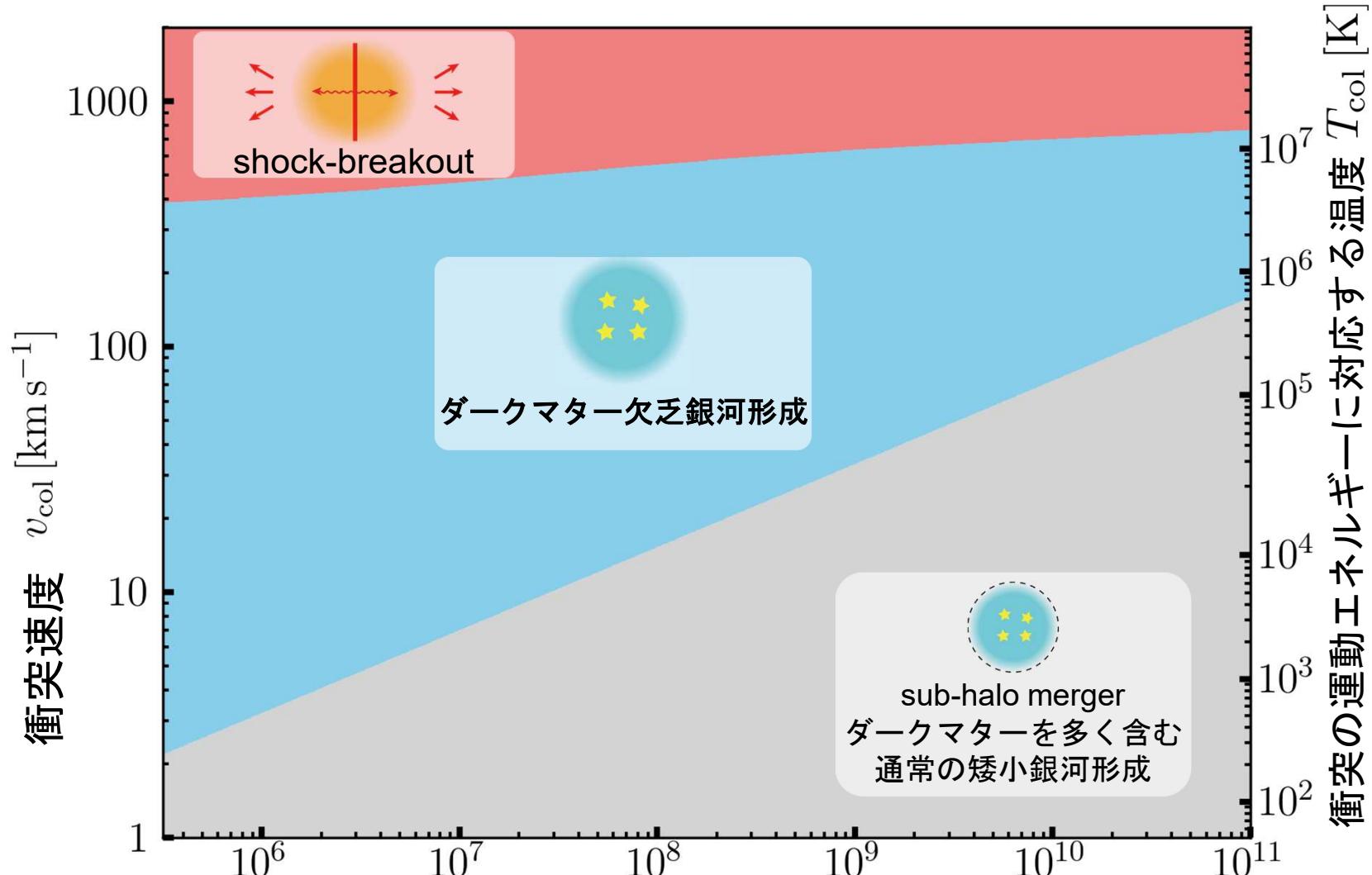
$t_{\text{cool}} < t_{\text{cross}}$: ガスの冷却が効き、爆発せずに収縮

$t_{\text{cool}} > t_{\text{cross}}$: 衝撃波がガス球の表面まで到達

ρ : 質量密度	γ : 比熱比 = 5/3
p : 壓力	k_B : Boltzmann 定数
u : 比内部エネルギー	T : 温度
v_{col} : 衝突速度	n : 数密度
v_{shock} : 衝撃波速度	Λ : 冷却率

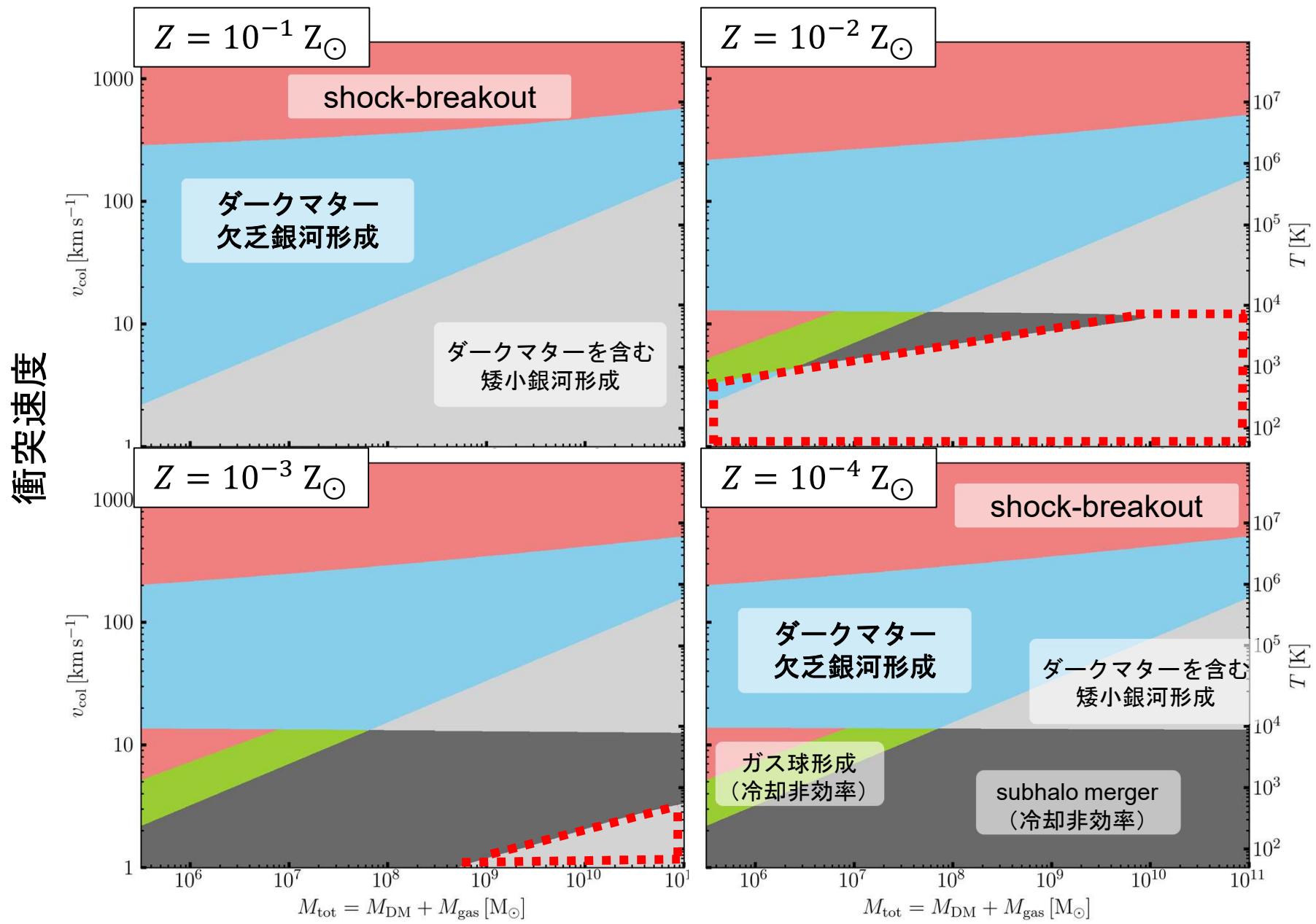


ダークマター欠乏銀河形成条件の解析



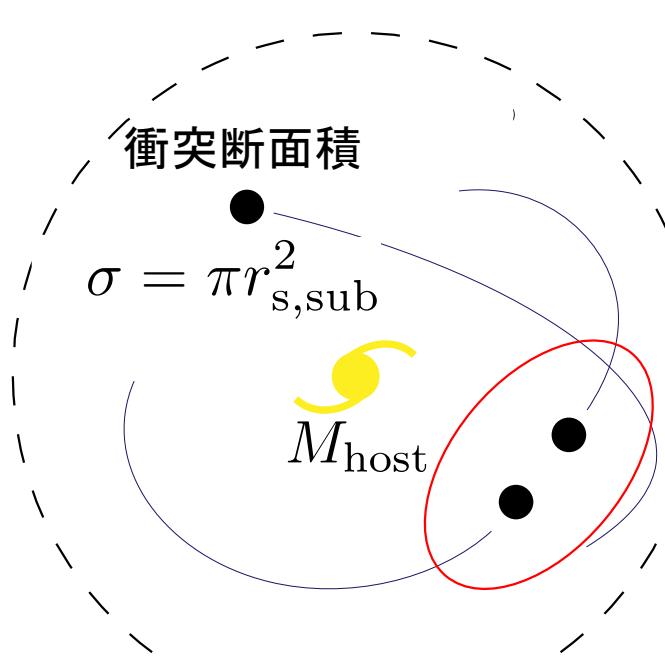
衝突電離平衡における太陽組成比ガスの放射冷却関数を仮定

解析モデルの金属量 Z 依存性



衝突回数の推定

力学平衡である質量 M_{host} のホストハローのビリアル半径内を運動するダークマターサブハロー同士の衝突回数を求める。NFWプロファイルの位相分布関数から求めたホストハローの速度分布関数に従って、サブハローが運動すると仮定。



- ビリアル半径内 N 個のサブハローがあり、NFWプロファイルの個数分布を仮定。

$$n(r) = \frac{N\rho_0}{M_{\text{host}}x(1+x)^2}, \quad x = \frac{r}{r_{\text{s,host}}}$$

- NFWプロファイルの位相分布関数から得られる速度分布関数に二体問題を適用し、相対速度 v_{rel} の確率分布 $P_{r,\text{rel}}(v_{\text{rel}})$ を計算。

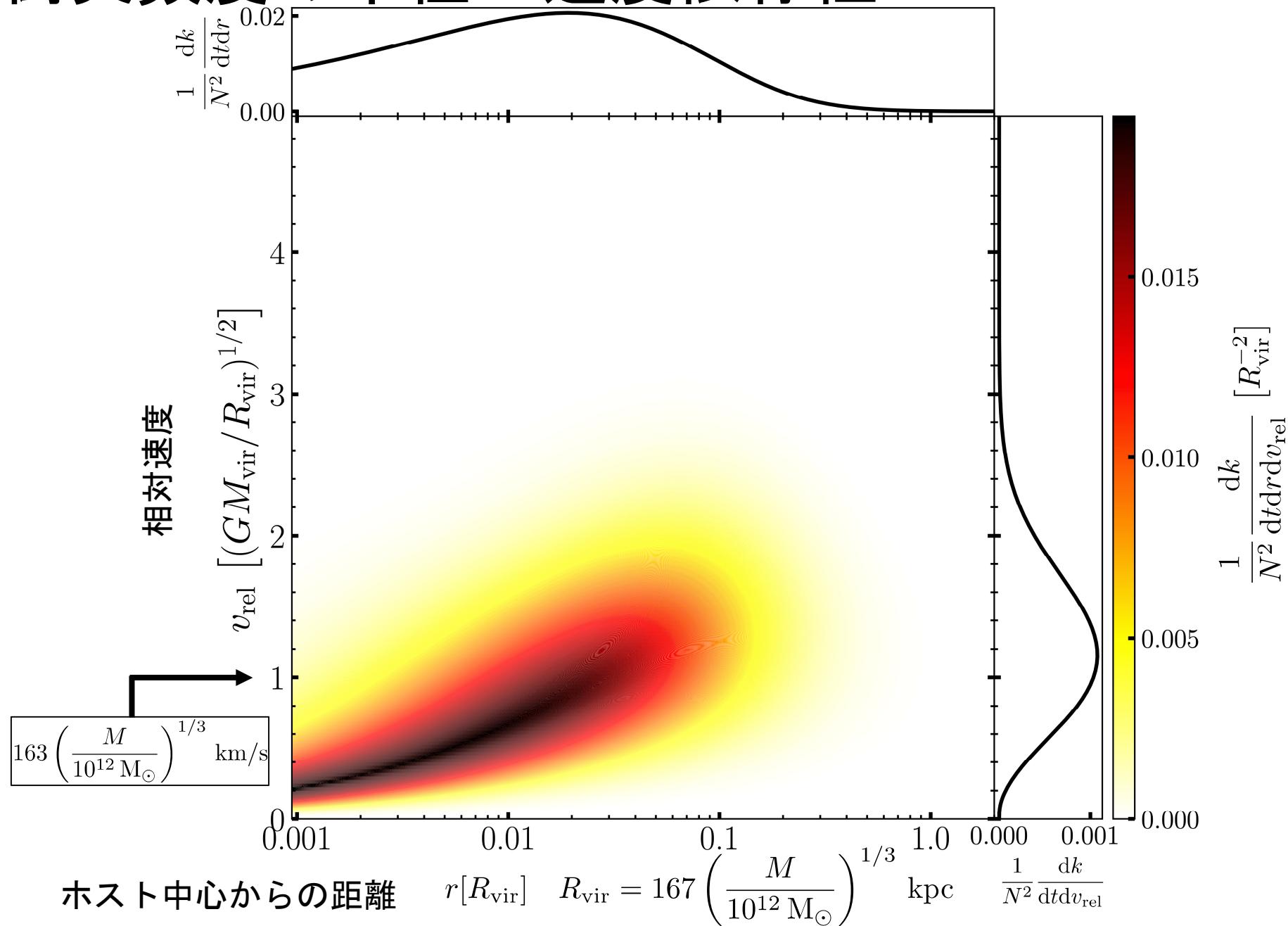


単位時間・個数当たりの衝突回数

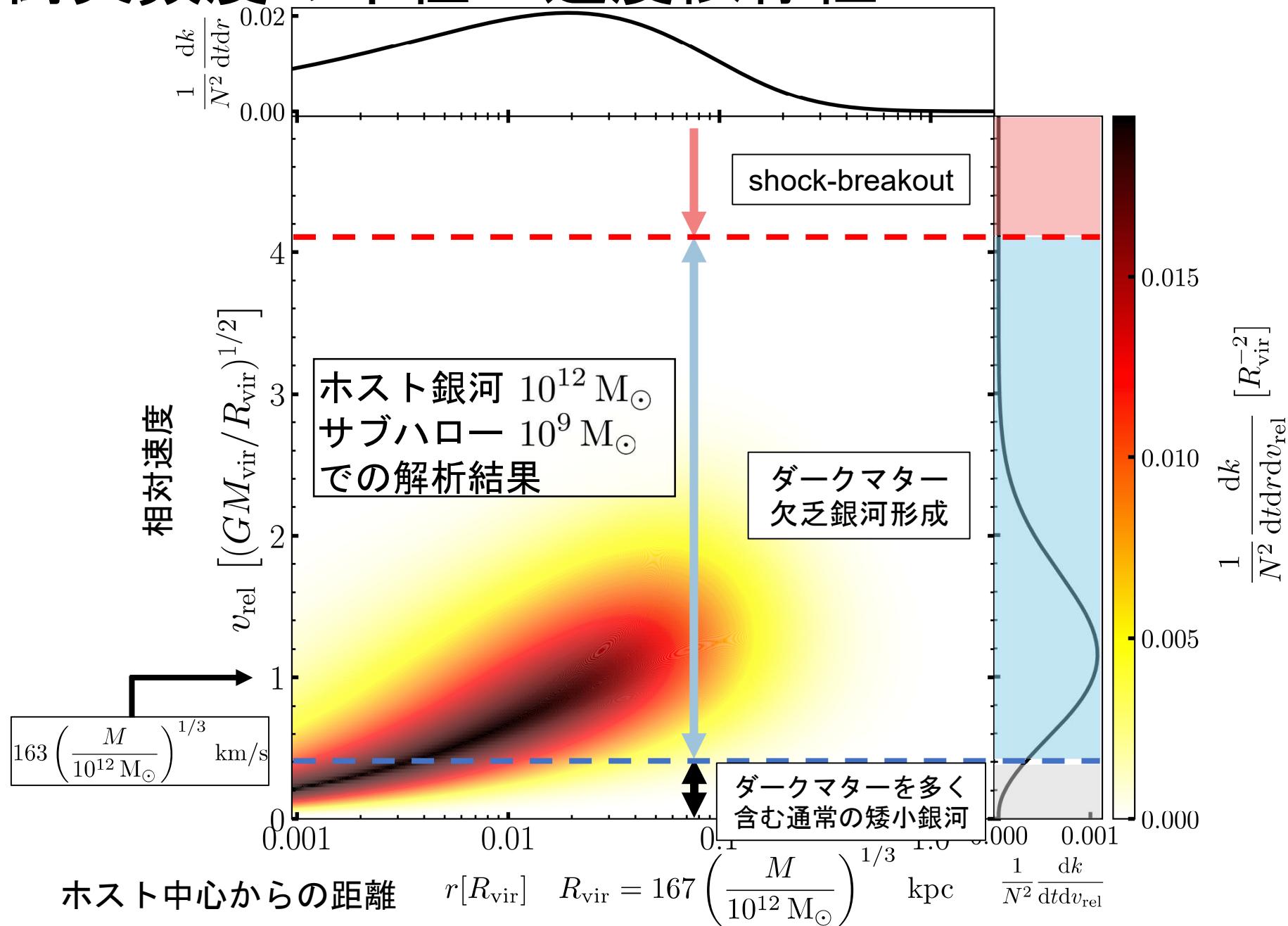
$$\frac{1}{N^2} \frac{dk}{dt} = \int \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot v_{\text{rel}} P_{r,\text{rel}}(v_{\text{rel}}) dv_{\text{rel}} \cdot \left[\frac{n(r)}{N} \right]^2 4\pi r^2 dr$$

サブハローのスケール半径内の衝突

衝突頻度の半径・速度依存性



衝突頻度の半径・速度依存性



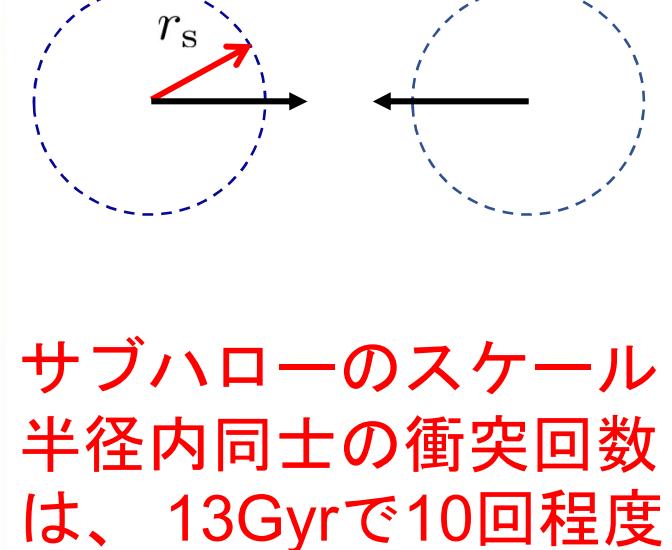
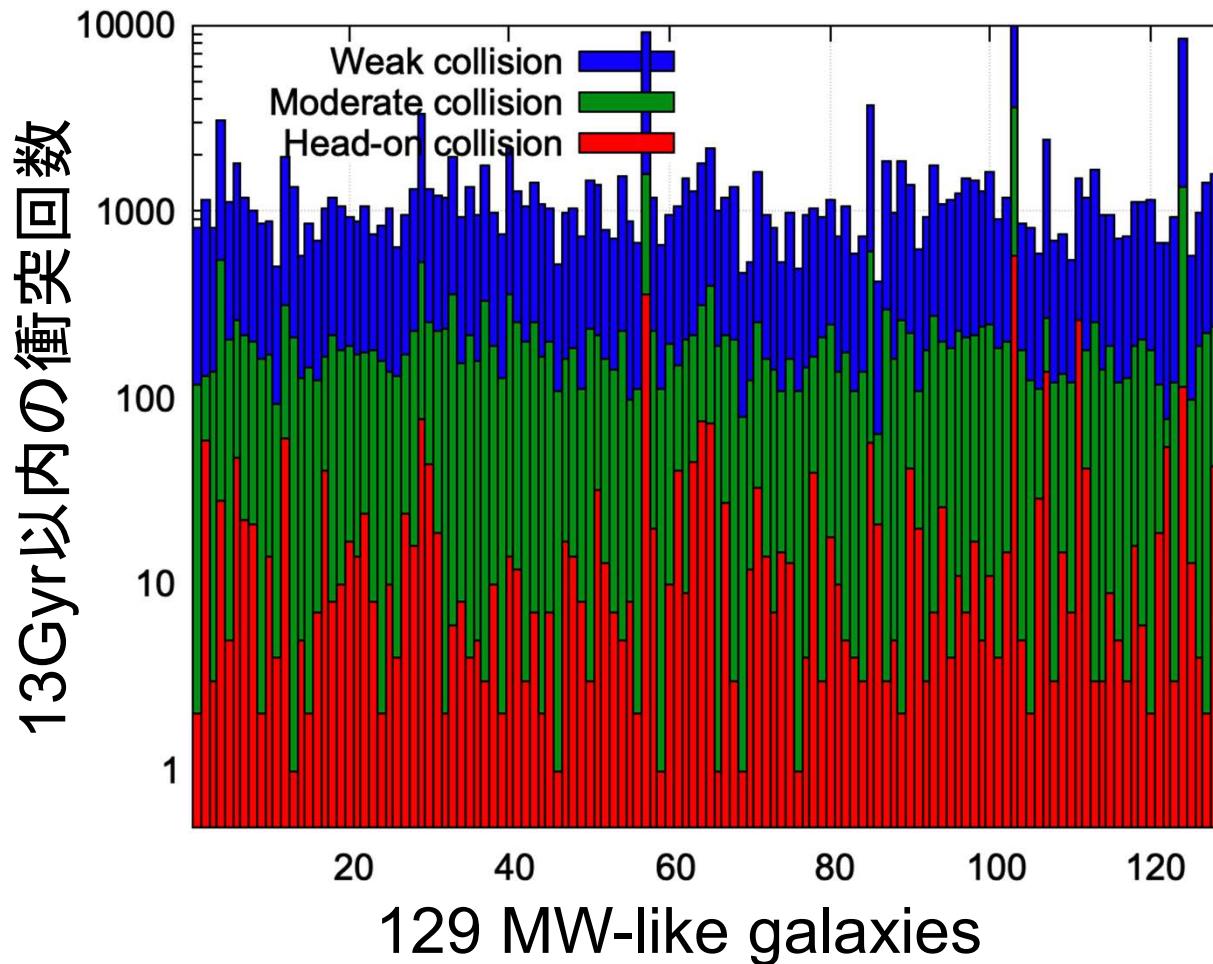
MW-like銀河内のサブハロー衝突回数

(明日、M2数野さんの発表)

1. Shin-Uchuu SimulationからMW-like銀河を抽出

(Ishiyama et al. 2021)

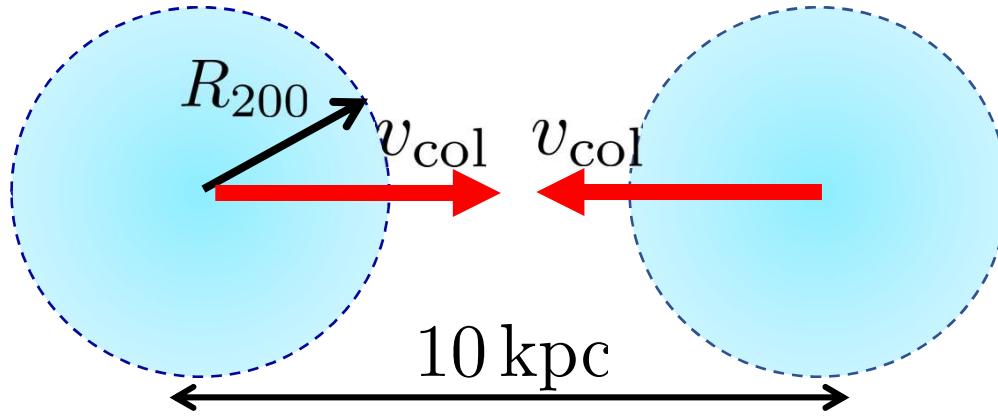
2. MW-like銀河内のサブハロー衝突回数をカウント



サブハローのスケール
半径内同士の衝突回数
は、13Gyrで10回程度

シミュレーション条件 (N体+SPH法)

NFW質量分布のダークマターとそのポテンシャルに静水圧平衡なガス分布



$$\rho_{\text{DM}}(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$
$$\rho_{\text{gas}}(r) = \rho_{\text{gas},0} \exp \left[-\frac{\mu m_p}{k_B T_{\text{gas}}} \Phi_{\text{NFW}}(r) \right]$$
$$T_{\text{gas}} = T_{\text{vir}} = a \frac{GM_{\text{tot}} \mu m_p}{3k_B R_{200}}$$
$$a \equiv \frac{c(c^2 + 2c - 2(1+c) \ln(1+c))}{2[(1+c) \ln(1+c) - c]^2}$$

一つのダークマターサブハローあたり

$$M_{\text{tot}} = 10^8 M_\odot, 10^9 M_\odot$$

$$M_{\text{DM}}/M_{\text{gas}} = 5.36$$

衝突電離平衡ガス冷却率 :

$$Z = 10^{-3} Z_\odot, 1 Z_\odot$$

(MAPPINGS V: Sutherland & Dopita 17)

計算機 : Oakforest-PACS (東大・筑波大)

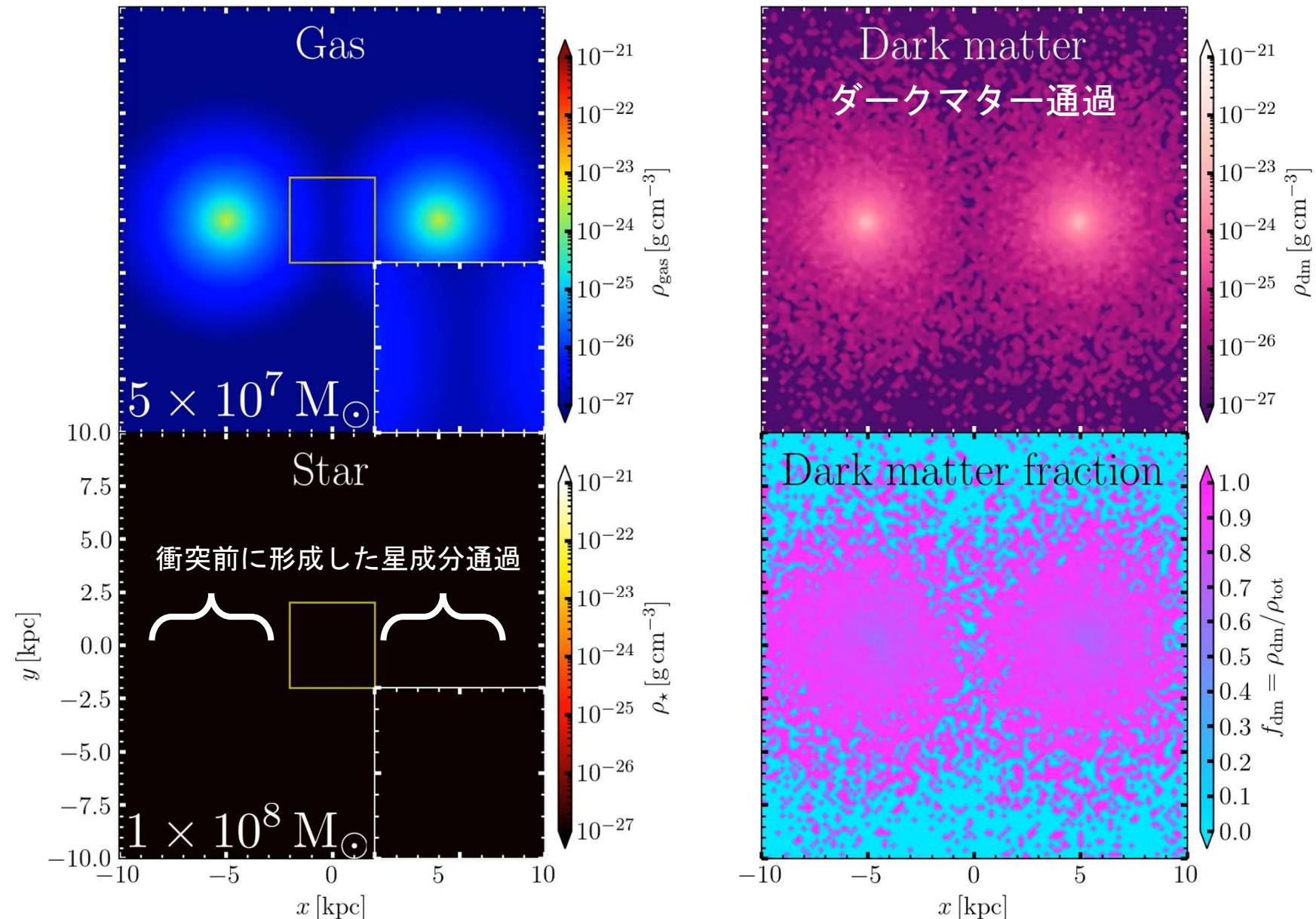
計算コード : オリジナル (Otaki & Mori in prep.)

- 初期条件作成 : MAGI (Miki & Umemura 18)
- 並列化 : FDPS (Iwasawa+16, Namekata+18)
- 冷却計算 : Exact Integration scheme (Townsend 09)
- 星形成モデル (Katz 92)
- 超新星フィードバックモデル (Mori+97)

$Z = Z_{\odot}$

$v_{\text{col}} = 100 \text{ km/s}$ ダークマター欠乏銀河形成

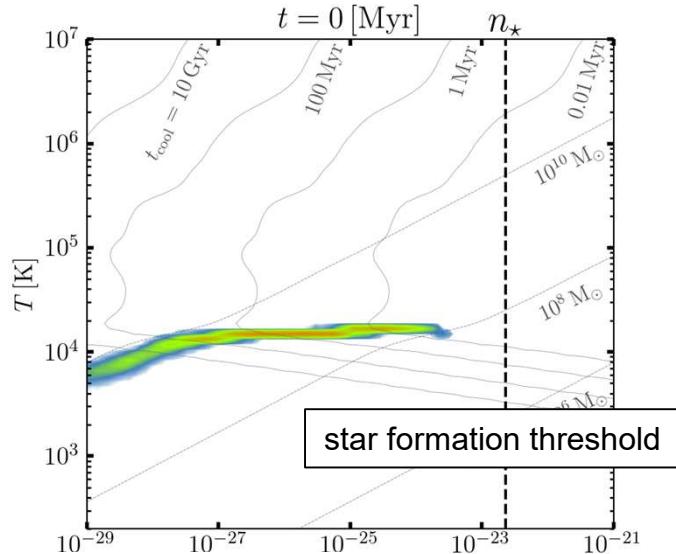
Density: $t = 0 \text{ Myr}$



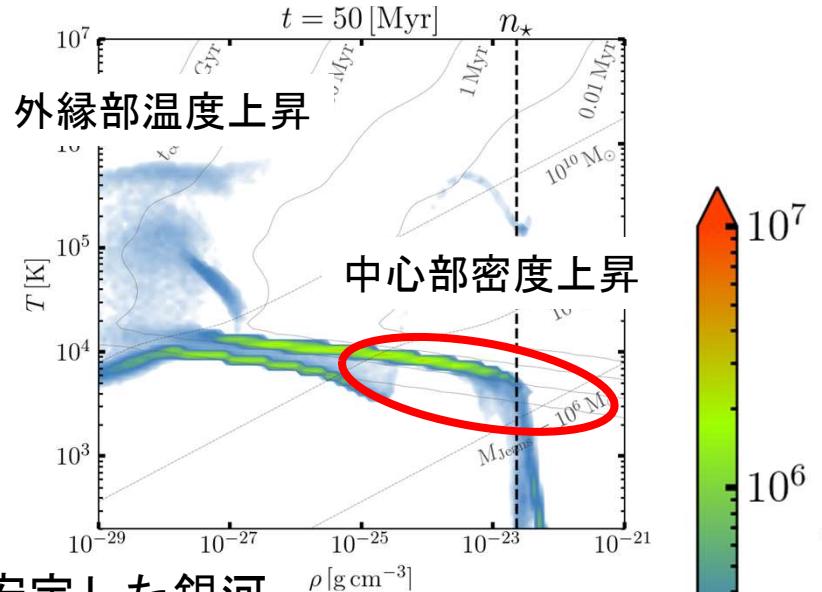
密度-温度の時間進化

$$Z = Z_{\odot}$$

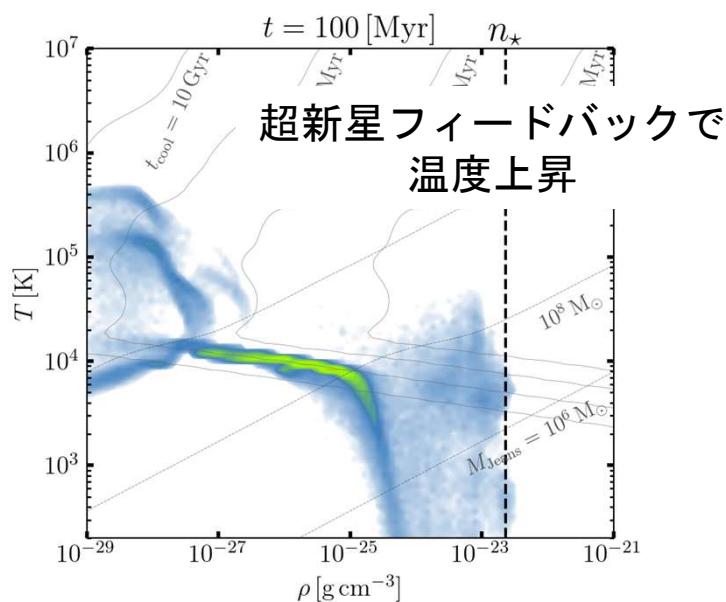
① 初期条件



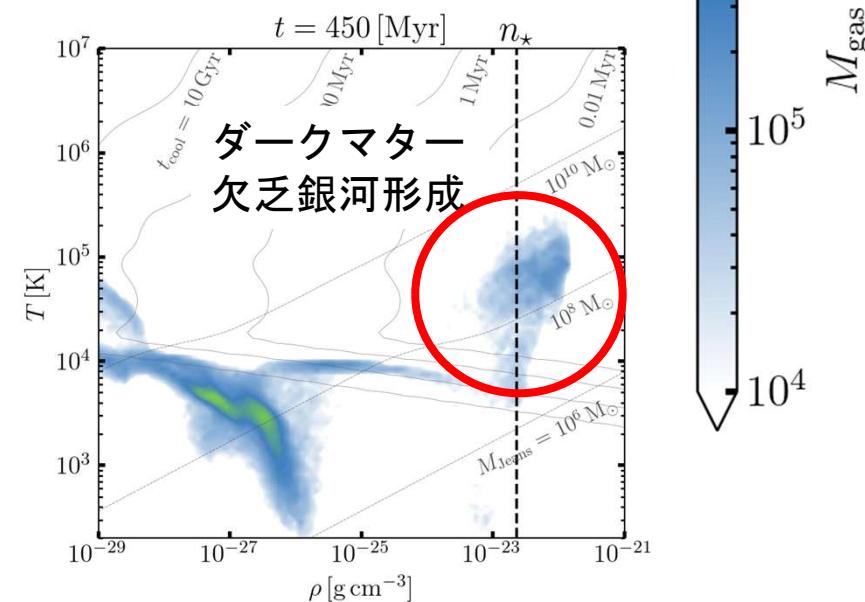
② 中心衝突時：スタークエスト

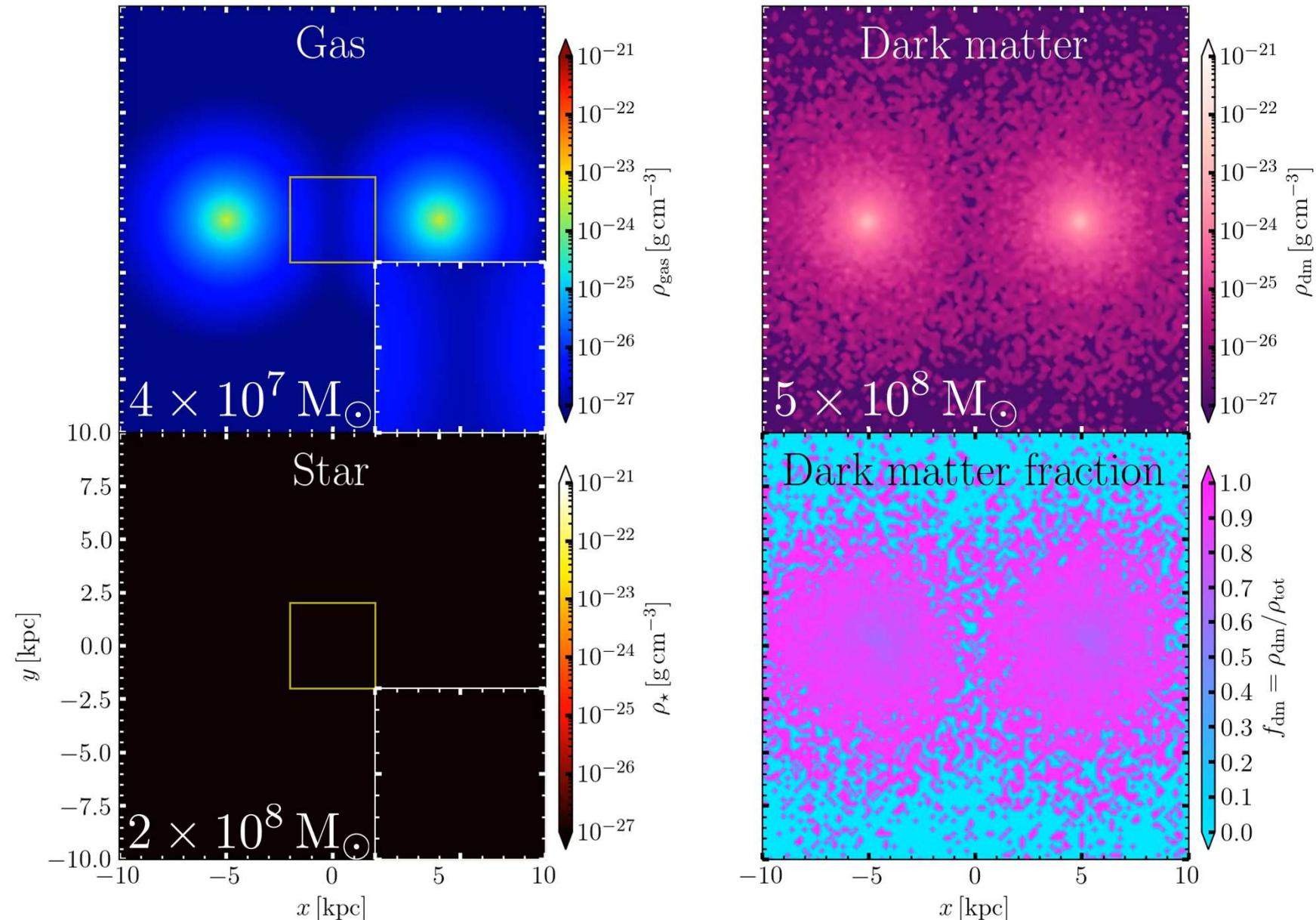


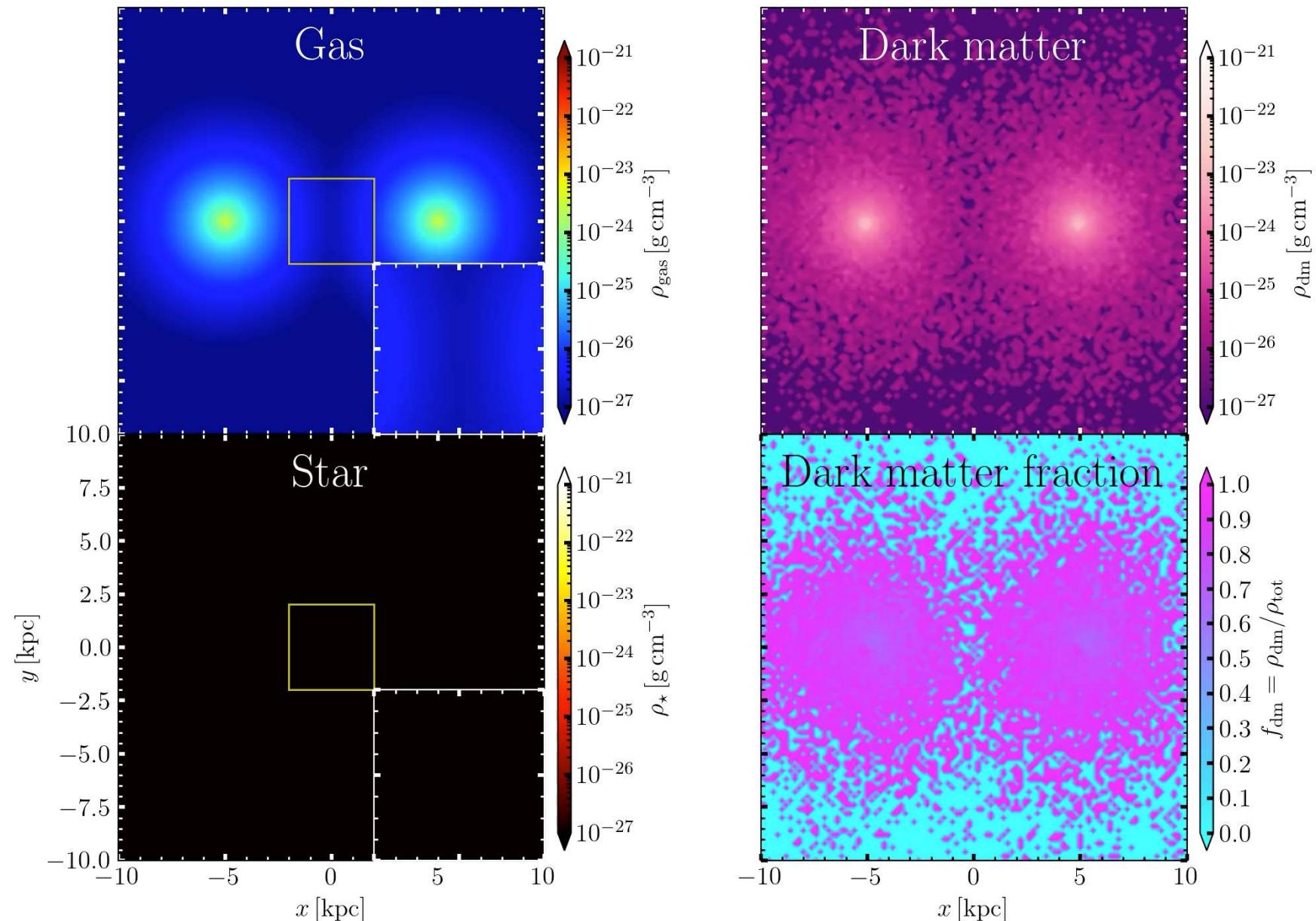
③ ダークマター通過後



④ 安定した銀河

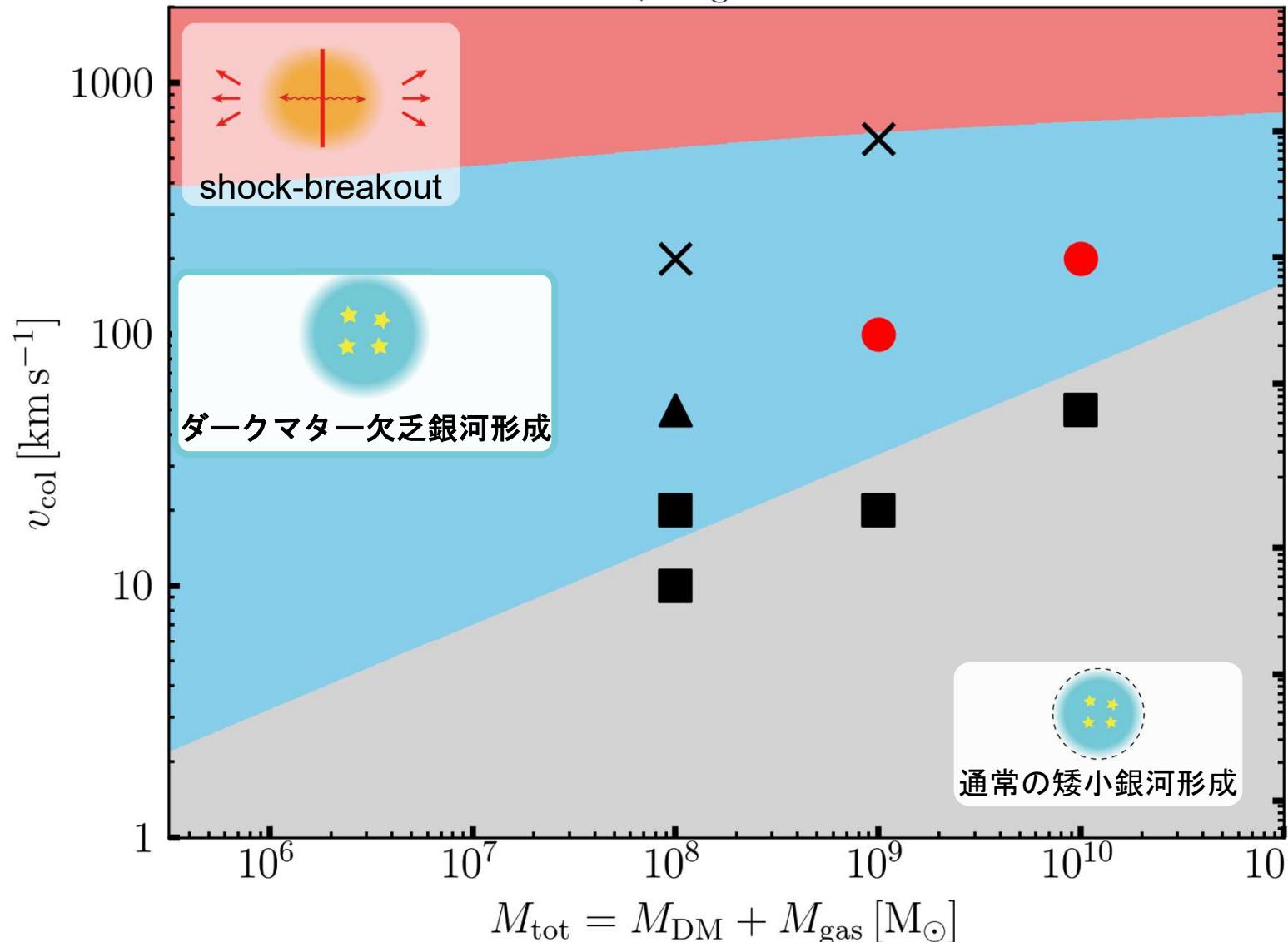


$Z = Z_{\odot}$ $v_{\text{col}} = 20 \text{ km/s}$ Density: $t = 0 \text{ Myr}$ ダークマターを多く含む
通常の矮小銀河形成

$Z = Z_{\odot}$ $v_{\text{col}} = 600 \text{ km/s}$ Shock-breakout発生Density: $t = 0 \text{ Myr}$ 

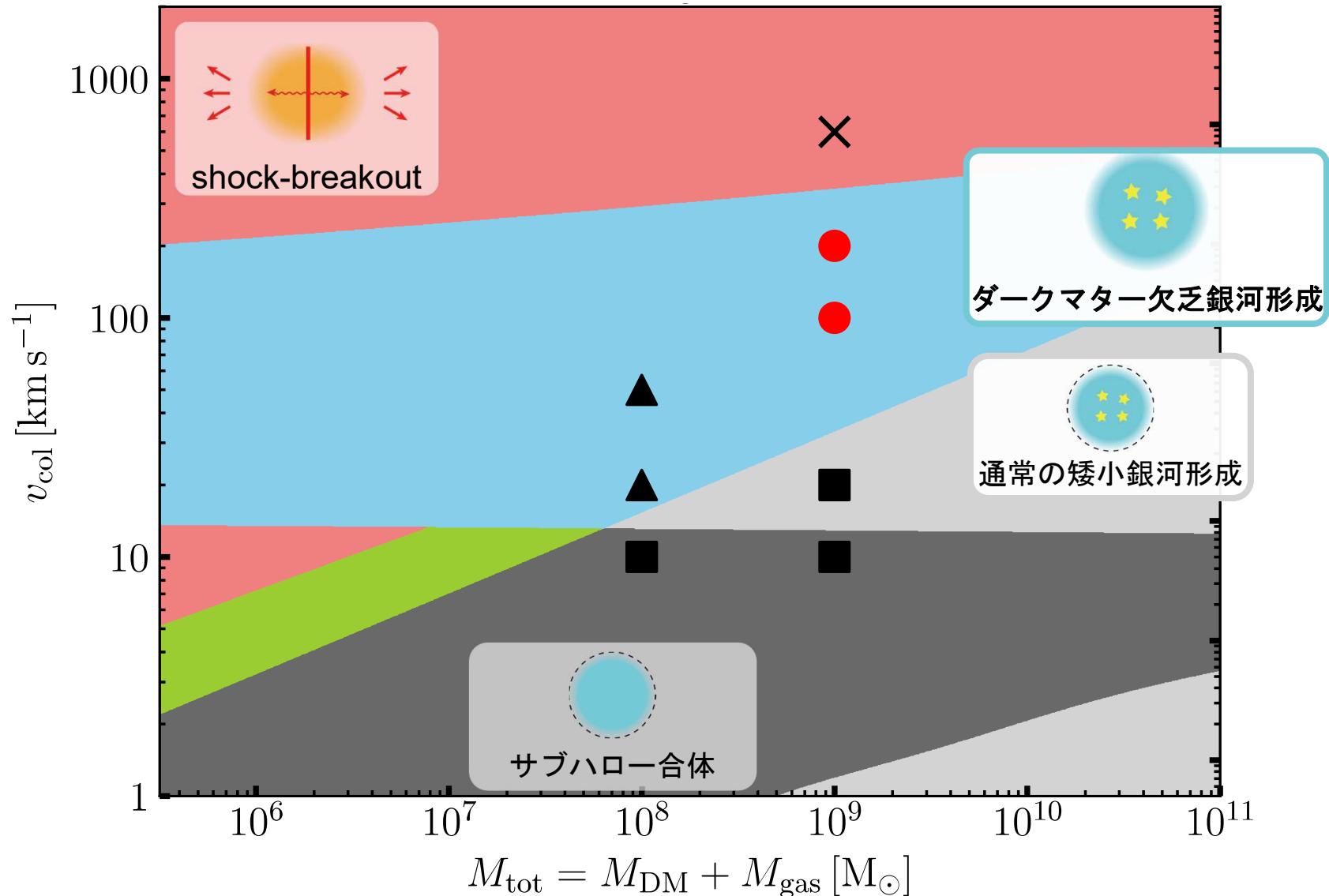
$$Z = Z_{\odot}$$

- : ダークマター欠乏銀河($f_{\text{DM}} < 0.5$)
- : 通常の矮小銀河($f_{\text{DM}} > 0.5$)
- ▲ : $M_{\star}/M_{\text{gas}} \lesssim 1$ の銀河
- × : 形成なし



$$Z = 10^{-3} Z_{\odot}$$

- : ダークマター欠乏銀河($f_{\text{DM}} < 0.5$)
- : 通常の矮小銀河($f_{\text{DM}} > 0.5$)
- ▲ : $M_{\star}/M_{\text{gas}} \lesssim 1$ の銀河
- × : 形成なし



議論：衝突時のガス熱力学進化

衝突時のガスの熱力学進化を考察するために、ガスの温度変化を考慮した実効的な冷却時間を定義：

$$t_{\text{cool,eff}}(T_{\text{start}} \rightarrow T_{\text{end}}) = -\frac{m_p k_B}{(\gamma - 1)\rho} \int_{T_{\text{start}}}^{T_{\text{end}}} \frac{\mu(T)}{\Lambda_Z(T)} dT$$

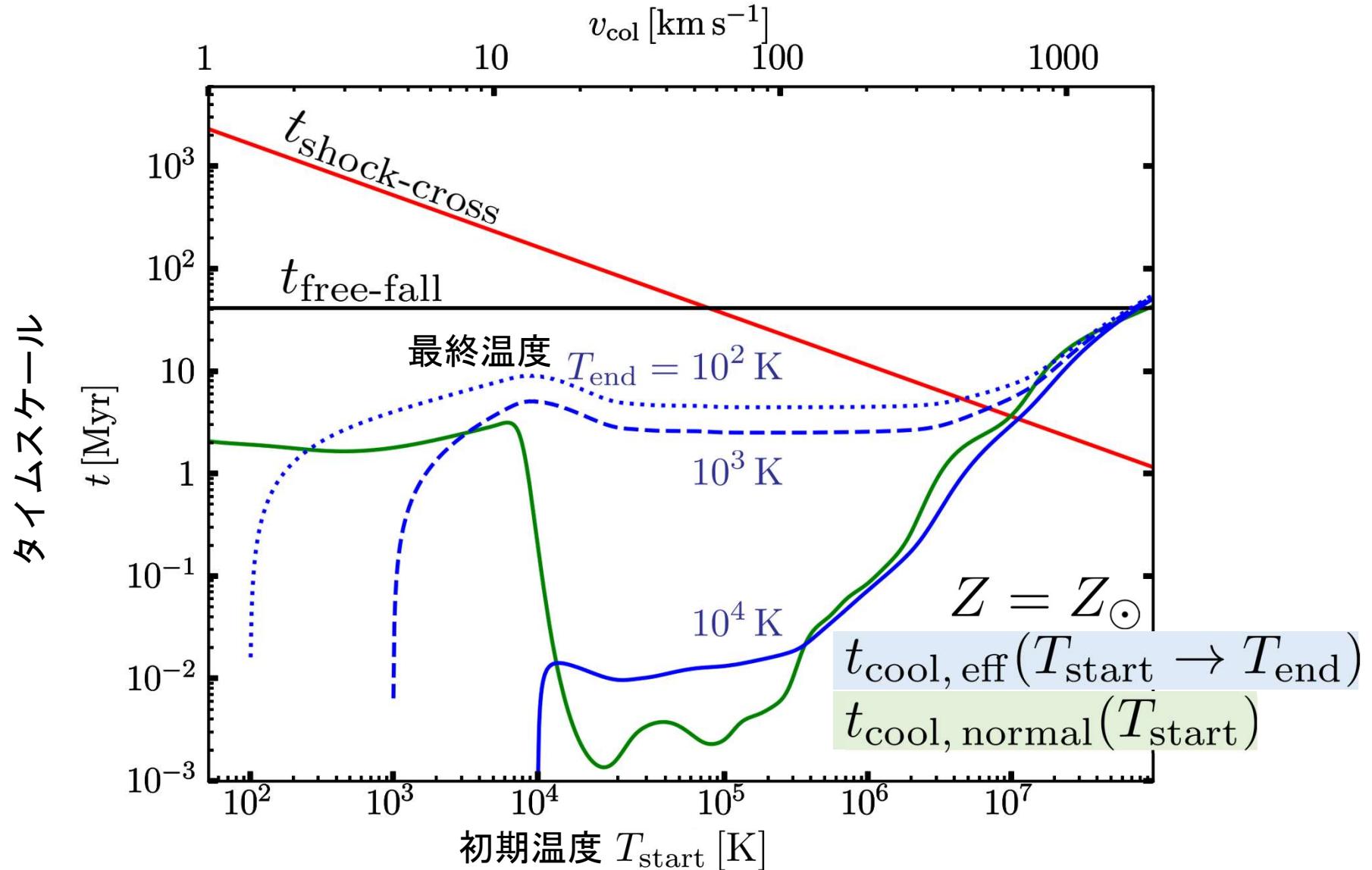
通常用いられる冷却時間：

$$t_{\text{cool,normal}}(T) = \frac{m_p k_B T \mu(T)}{(\gamma - 1)\rho \Lambda_Z(T)}$$

k_B :	Boltzmann 定数
m_p :	陽子質量
γ :	比熱比
ρ :	ガス密度
μ :	平均分子量
Z :	金属量
Λ_Z :	冷却率
T :	温度

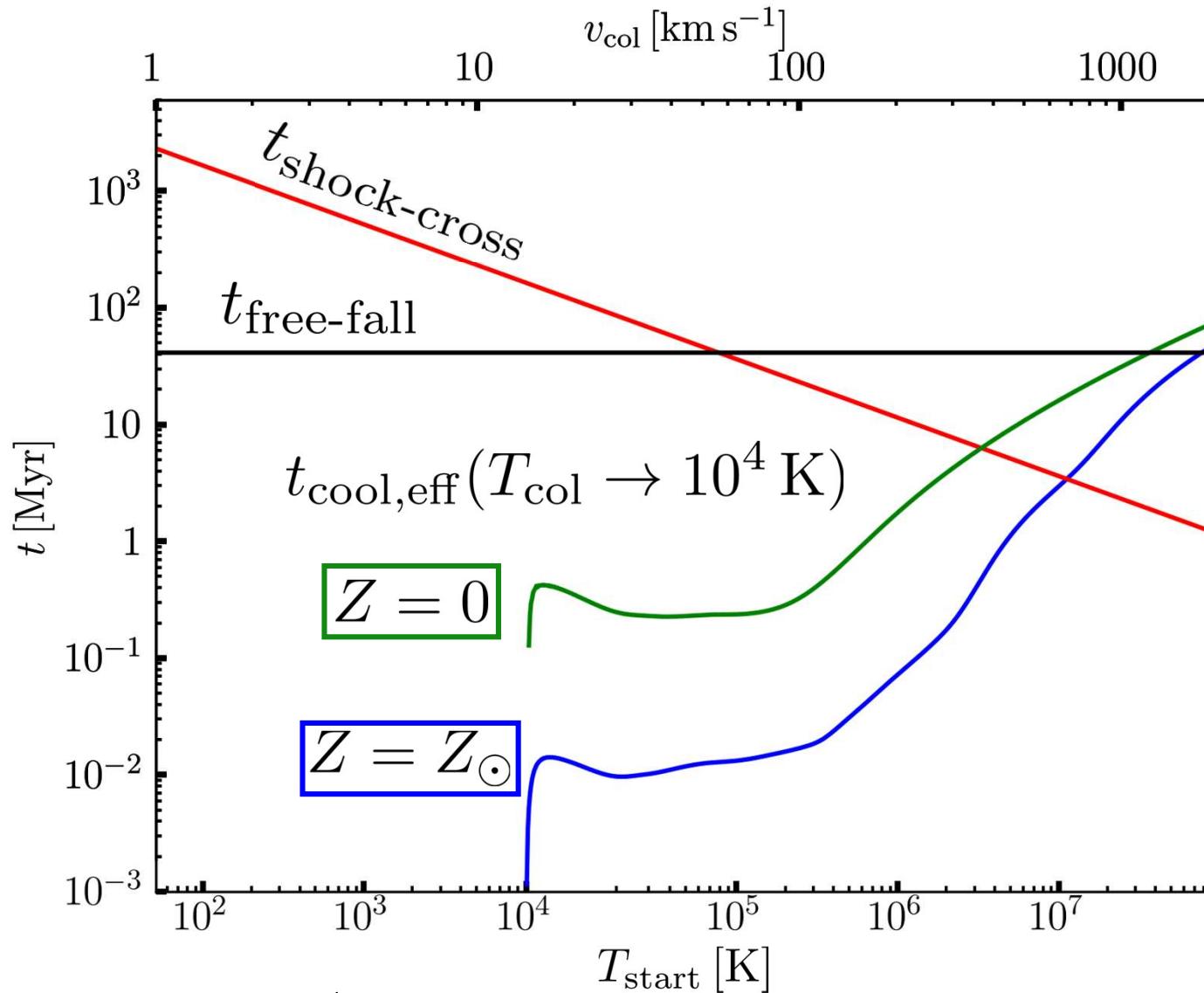
質量 $10^9 M_\odot$ のダークマターサブハローのNFWプロファイ尔のスケール半径内に一様密度のガス球が衝突速度 v_{col} で衝突した後、 $T_{\text{end}} = 10^2, 10^3, 10^4$ Kまで冷える実効的な冷却時間 $t_{\text{cool,eff}}(T_{\text{start}} \rightarrow T_{\text{end}})$ を議論

実効的な冷却時間と通常の冷却時間の比較



実効的な冷却時間は、ガスの力学的なタイムスケールよりも十分に短い

実効的な冷却時間の金属量依存性



衝突後の冷却時間 (10^4 Kまで)は力学的な時間よりも十分に短く、ガス金属量の違いは衝突時のガスの熱力学進化にあまり影響を与えない

まとめ

銀河形成の解析モデル

- 大質量銀河に付随するサブハロー同士の衝突によってダークマター欠乏銀河が形成される可能性をもとに、衝突時の物理的考察によって形成可能な速度条件を解析的に求めた。
- ガスの金属量が増加すると、低温側での冷却率が上昇するため、銀河形成可能な速度条件が広がることがわかった。

三次元シミュレーション

- 同質量のダークマターサブハロー同士の正面衝突実験をした結果、 $10^9 M_{\odot}$ 同士の衝突では解析的な見積もりとおおよそ一致した。
- ガスの熱力学進化を評価する際には、温度変化を考慮した実効的な冷却時間で議論する必要がある。衝突後の冷却時間 (10^4 Kまで) は力学的な時間よりも十分に短く、ガス金属量の違いは衝突時のガスの熱力学進化にあまり影響を与えないことを確認した。

今後の研究

- 低質量サブハロー衝突による銀河形成の調査
- オフセンター衝突での形成過程の調査
- より高精度なシミュレーションを行い、観測結果と比較