

# サブハロー衝突による誘発的 矮小銀河形成シミュレーション

大滝恒輝

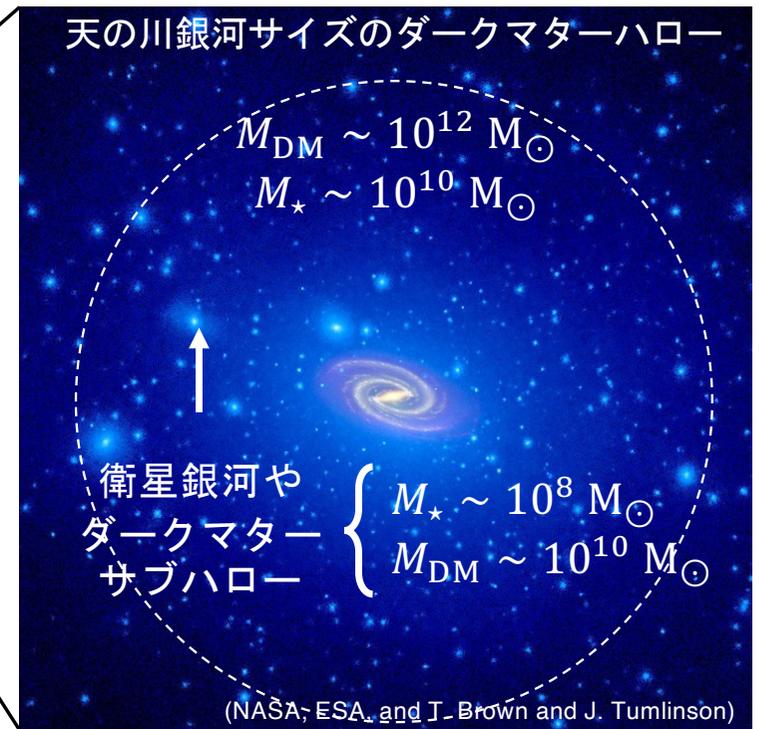
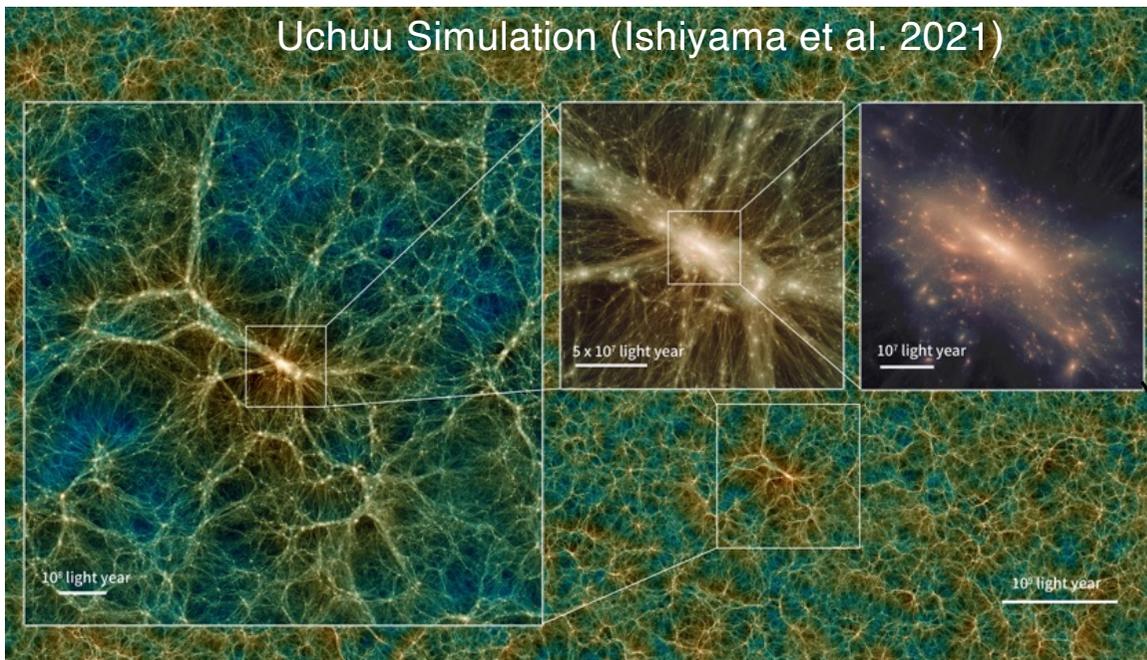
共同研究者：森正夫、高橋大介  
(筑波大学)

[1] Otaki & Mori 2023 MNRAS

[2] Otaki, Kazuno & Mori in prep.

# 銀河形成の標準モデル

- Cold Dark Matter による階層的構造形成論
- 小さな銀河が衝突・合体を繰り返して大きな銀河を形成
- 銀河には恒星質量の約100倍以上のダークマターが含まれている



# ダークマター欠乏銀河の発見

(van Dokkum et al. 2018)

- 楕円銀河 NGC1052 に付随する矮小銀河 NGC10520-DF2

Effective radius

$$r_e = 2.7 \text{ kpc}$$

Dynamical mass

$$M_{\text{dyn}} = 1.3 \times 10^8 M_{\odot}$$

Stellar mass

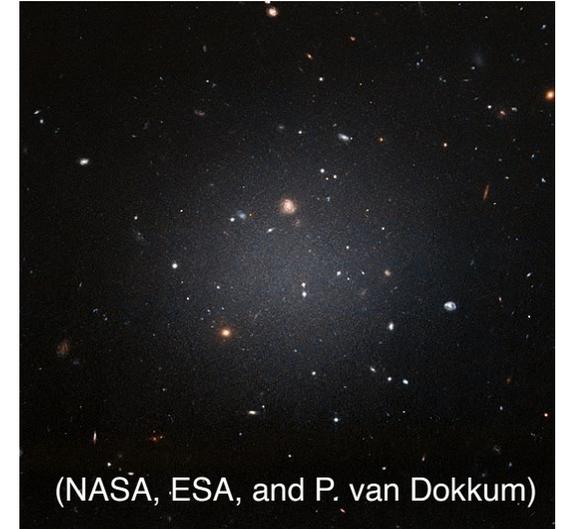
$$M_{\star} = 1.0 \times 10^8 M_{\odot} \quad (\text{Danieli et al. 2019})$$

Gas mass

$$M_{\text{HI}} < 5.5 \times 10^5 M_{\odot} \quad (\text{Sardone et al. 2019})$$

力学質量（～総質量）と恒星質量が同程度。

- 近くには、同様な性質を持つ NGC1052-DF4 も発見 (van Dokkum et al. 2019)
- 他にも、 $\text{H}_I$ -rich Ultra Diffuse Galaxy  $r_e > 1.5 \text{ kpc}$  や他の近傍宇宙の矮小銀河など、合計27 (+ $\alpha$ ) 個のダークマター欠乏銀河が観測された。 (Mancera Piña et al 2019, Guo et al. 2020)



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？

# 矮小銀河衝突の観測

(Poulain et al. 2022)

観測技術の向上により、矮小銀河同士の合体の痕跡が発見。

H<sub>I</sub>輝線が観測された145個の矮小銀河の形態を調査

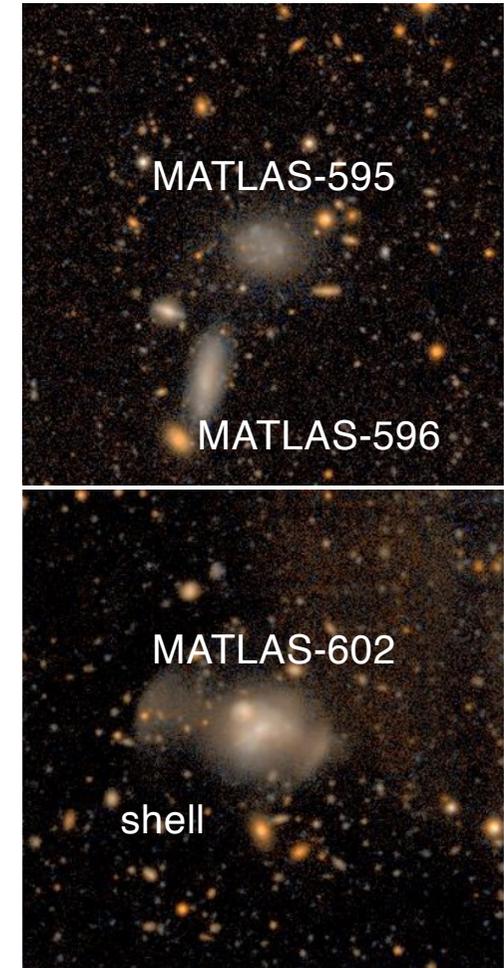
- MATLAS, ATLAS<sup>3D</sup>, ALFALFA catalogs
- Dwarf elliptical: 42
- Dwarf Irregular: 133
- 大質量楕円銀河の衛星銀河: 79%

14個の矮小銀河に相互作用の痕跡 (10%)

矮小銀河同士の衝突過程は、銀河形成・進化において重要な物理過程の一つ。



本研究では、大質量銀河内を運動するダークマターサブハロー同士の衝突によって形成する矮小銀河の形成・進化過程を調査



# サブハロー衝突頻度の解析的な見積もり

力学平衡状態のホストハロー内を運動するサブハロー同士の衝突確率分布を導出

仮定：

- サブハロー相対速度  $v_{\text{rel}}$  分布は、ホストハローのNFW分布  $\rho_{\text{NFW}}(r)$  に基づいて導出された確率分布関数  $P_{r,\text{rel}}(v_{\text{rel}})$  に従う
- $N$  個のサブハローの個数分布:  $r \times \rho_{\text{NFW}}(r)$

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

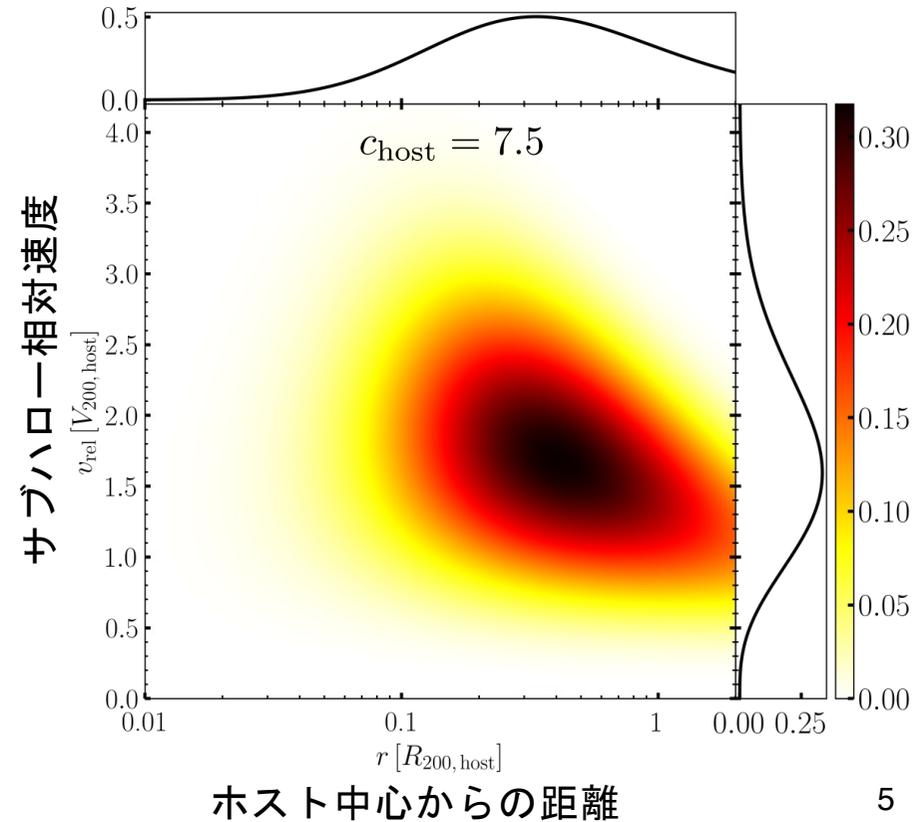
サブハロー衝突断面積  $\sigma = \pi r_{\text{scale,sub}}^2$  における衝突回数

$$dk = \frac{\sigma dv_{r,\text{rel}} dt}{2} \cdot n^2 \cdot 4\pi r^2 dr$$

$M_{\text{host}} = 10^{12} M_{\odot}$  ホストハロー内を運動する  $M_{\text{sub}} = 10^9 M_{\odot}$  のサブハロー同士の衝突頻度：

$$\frac{dk}{dt} = 5.98 \left(\frac{\eta}{0.1}\right)^2 \left(\frac{N}{500}\right)^2 \text{Gyr}^{-1}, \quad \eta = \left(\frac{M_{\text{sub}}}{M_{\text{host}}}\right)^{1/3}$$

$$\frac{c_{\text{sub}}^2}{N^2 \eta^2} \frac{dk}{dt d \log r dv_{\text{rel}}}$$



# サブハロー衝突回数測定*N*体シミュレーション 1

- 宇宙論的シミュレーションからMilky Way-likeホストハローを選択

Ishiyama et al. (2021)

Name	Box length	# of particles	particle mass
Phi-4096	16 Mpc/ <i>h</i>	4096 <sup>3</sup>	5.13×10 <sup>3</sup> M <sub>⊙</sub> / <i>h</i>

- ホストハロー質量

$$5 \times 10^{11} M_{\odot} < M_{\text{vir, host}} < 3 \times 10^{12} M_{\odot}$$

- サブハロー質量

$$10^6 M_{\odot} < M_{\text{vir, sub}}$$

- 本研究では、time-symmetric Hermite Integration scheme P(EC)<sup>n</sup> (Kokubo, Yoshiyana & Makino 1998) のGPUコードを開発し、 $z = 0$  のサブハローの分布からそれらを質点として 3 Gyr 過去に軌道積分

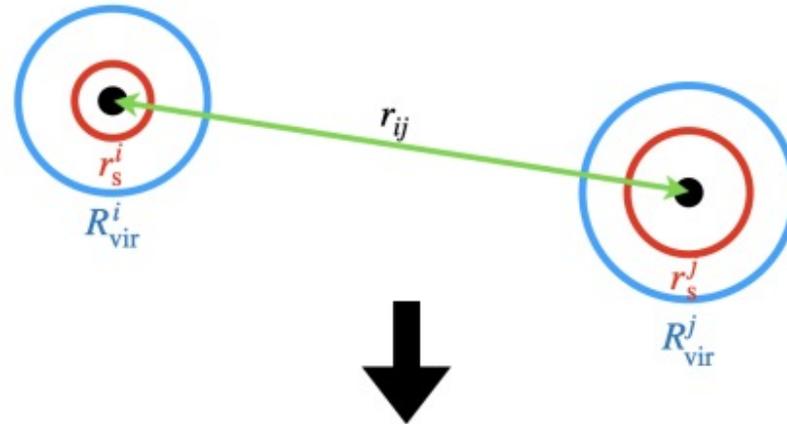


Cygnus (筑波大学)

# サブハロー衝突回数測定N体シミュレーション2

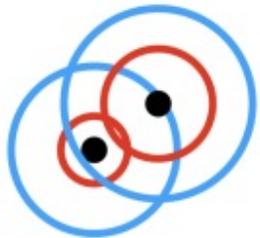
## • サブハロー衝突現象の分類

$R_{\text{vir}}$ : virial radius  
 $r_s$ : scale radius



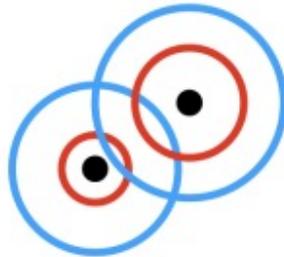
Violent encounter

$$r_{ij} \leq r_s^i + r_s^j$$



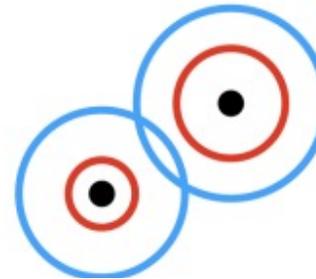
Gentle encounter

$$r_s^i + r_s^j < r_{ij} \leq \min(R_{\text{vir}}^i + r_s^j, R_{\text{vir}}^j + r_s^i)$$



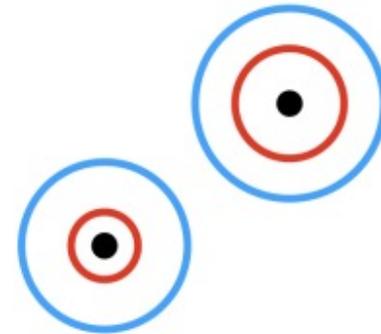
Grazing encounter

$$\min(R_{\text{vir}}^i + r_s^j, R_{\text{vir}}^j + r_s^i) < r_{ij} \leq R_{\text{vir}}^i + R_{\text{vir}}^j$$



No encounter

$$R_{\text{vir}}^i + R_{\text{vir}}^j < r_{ij}$$



# 結果：サブハロー衝突頻度

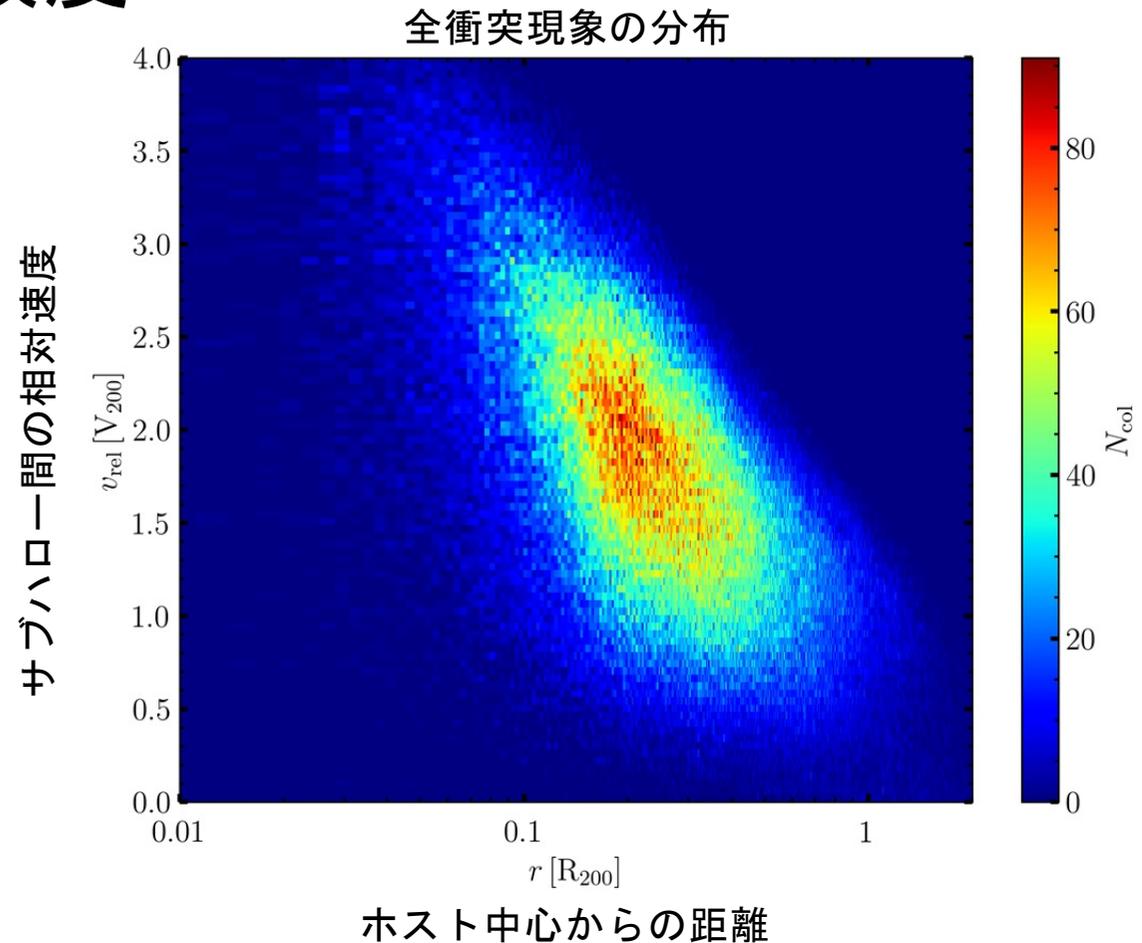
サブハローの個数：28876

3 Gyr 間の衝突回数：

- i. Violent = 20
- ii. Gentle = 742
- iii. Grazing = 497152

ホスト中心に近いほど潮汐力によりサブハローが破壊されている。

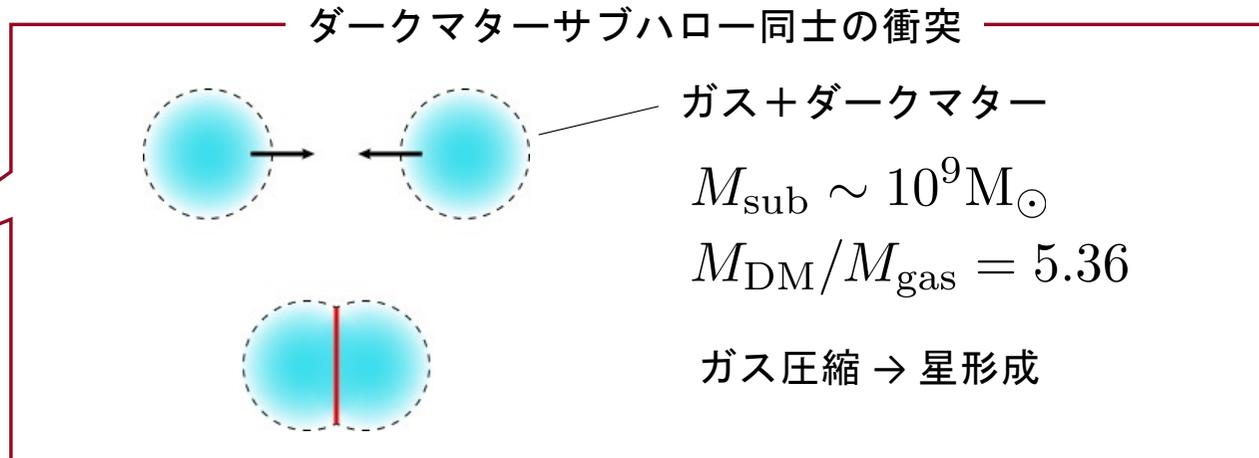
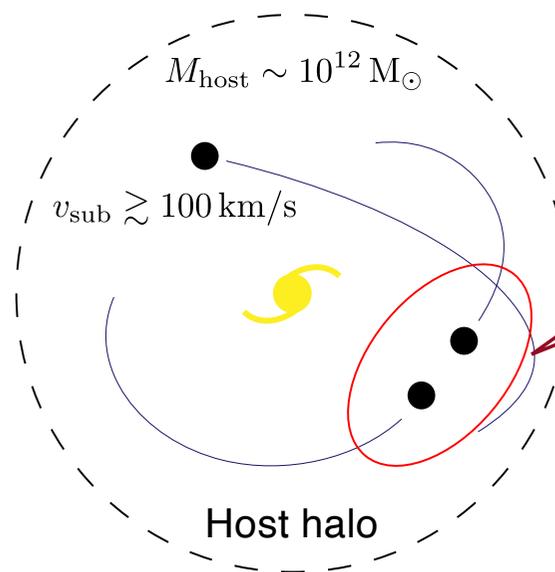
サブハローのスケール半径程度まで近づく violent encounter は約  $7 \text{ Gyr}^{-1}$ 。



⇒ 実際にサブハロー同士が衝突した場合にどのような物理現象が起こるのかを調査。

# ダークマターサブハロー衝突モデル

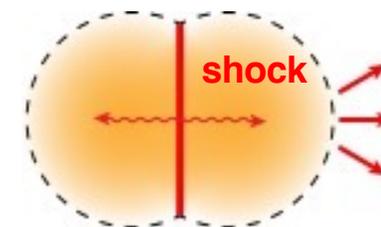
(Silk 2019, Shin et al. 2020, Otaki & Mori 2022, 2023)



低速度

衝突速度

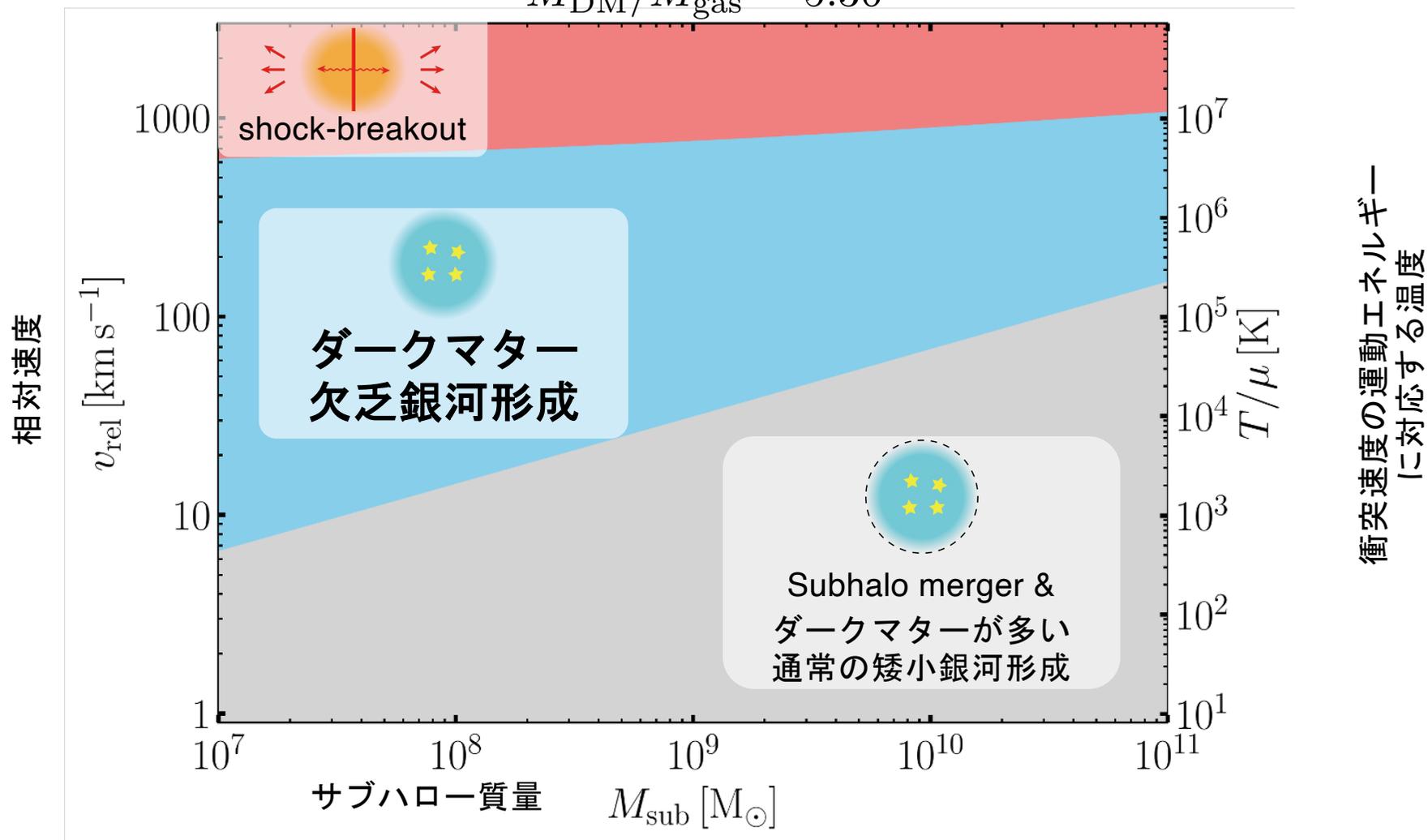
高速度



# 解析モデルの結果

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

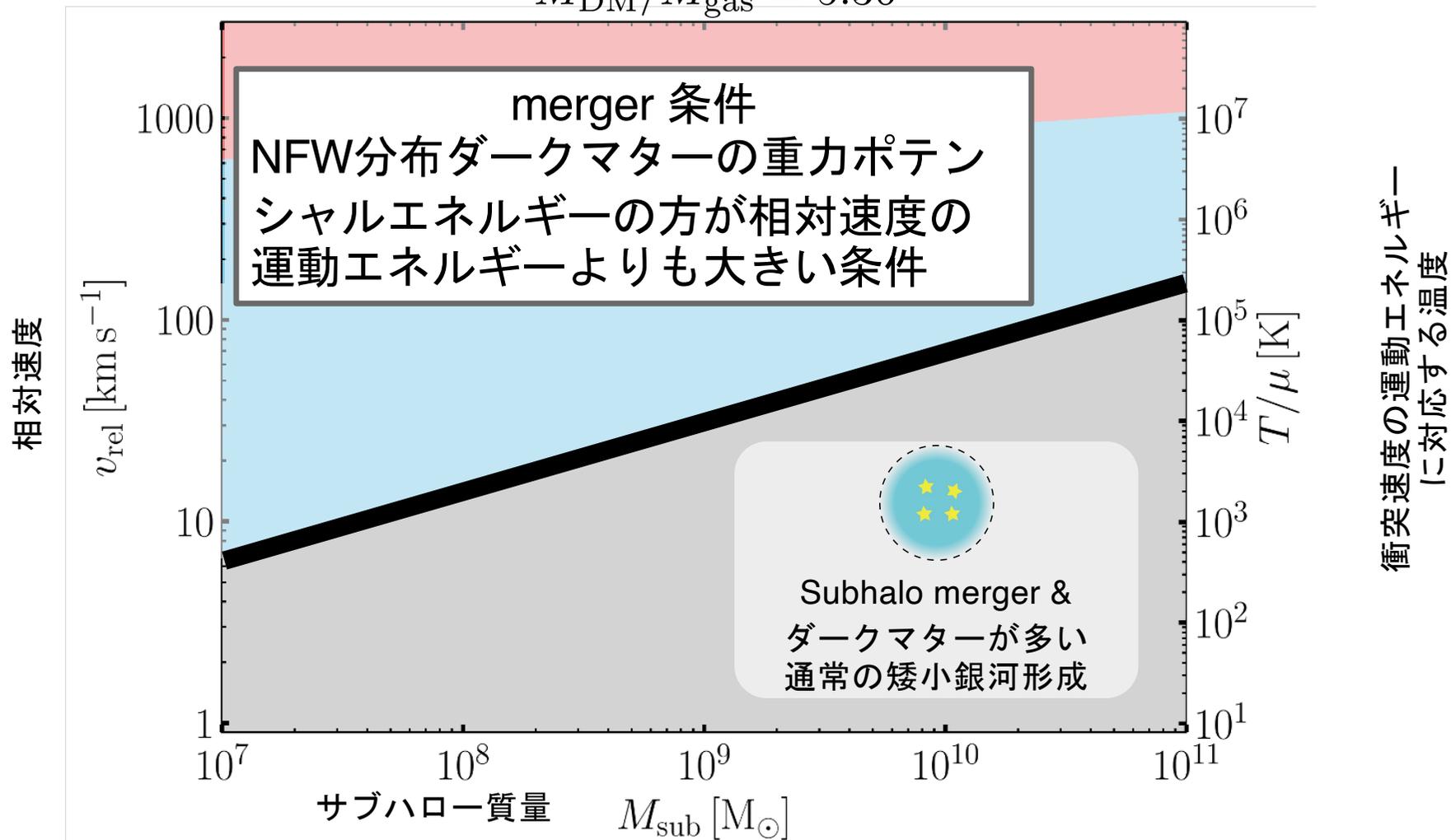
ガス金属量  $Z = 0.1 Z_{\odot}$



# 解析モデルの結果

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

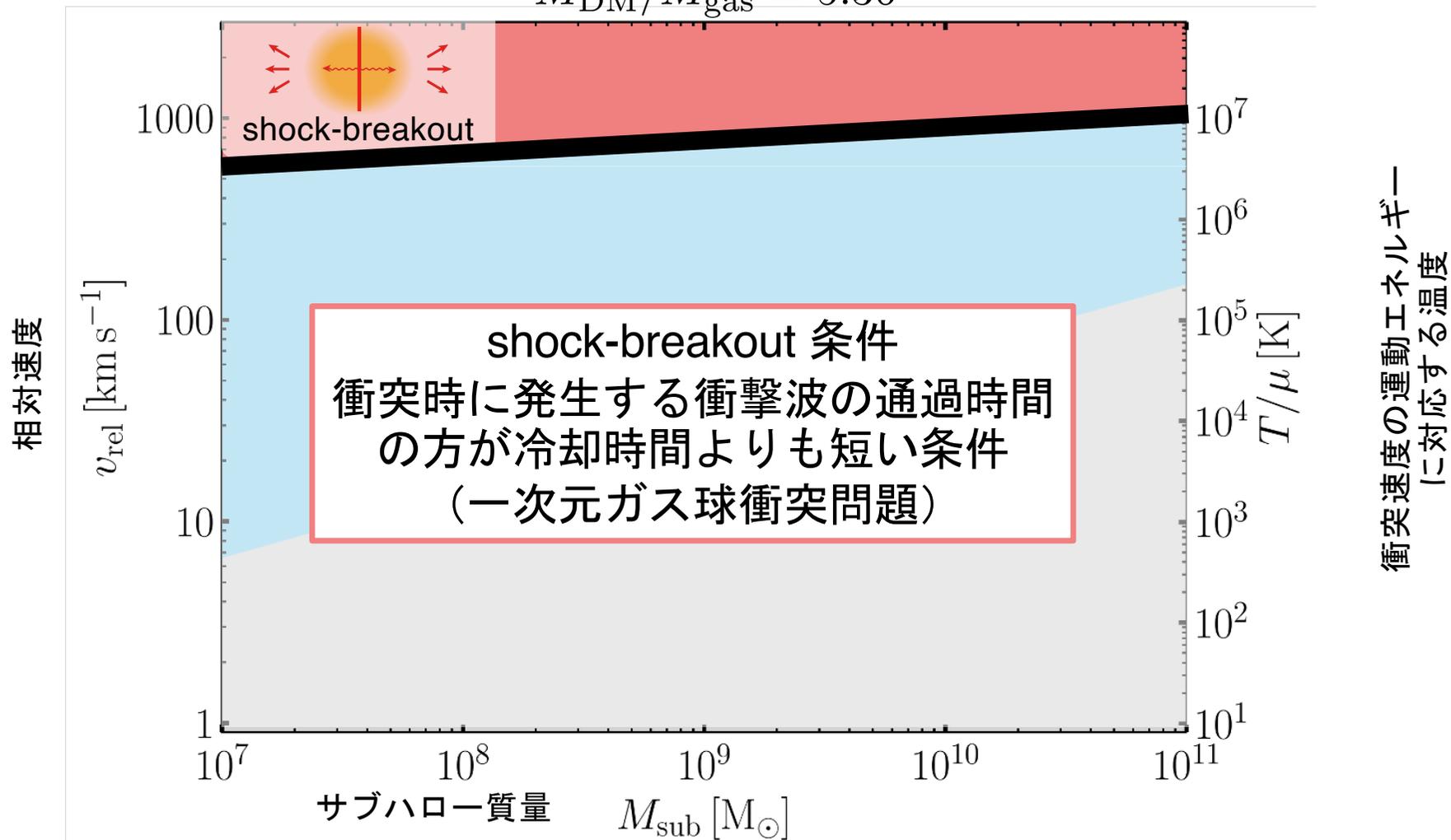
ガス金属量  $Z = 0.1 Z_{\odot}$



# 解析モデルの結果

ガス金属量  $Z = 0.1 Z_{\odot}$

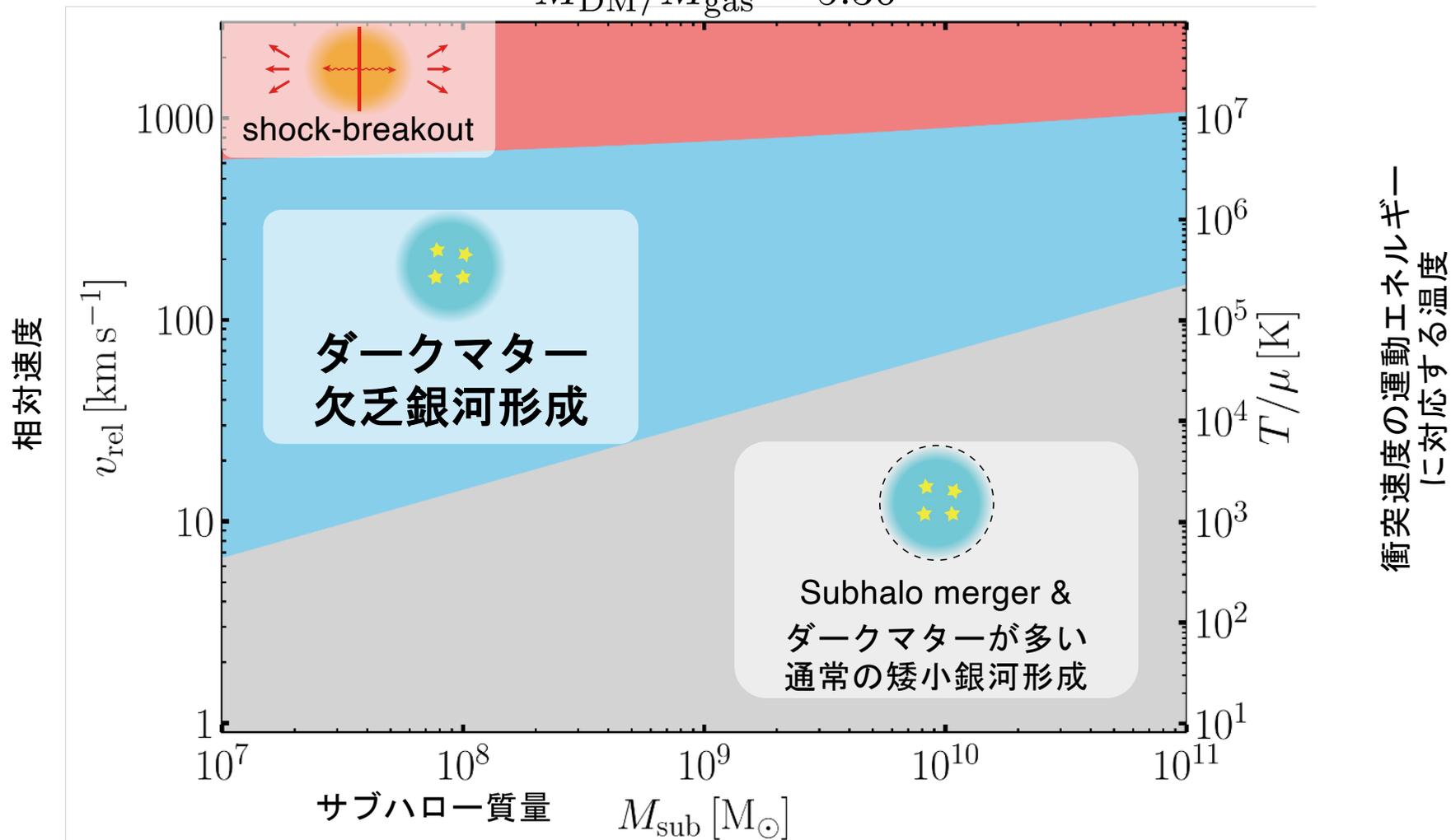
$$M_{\text{DM}}/M_{\text{gas}} = 5.36$$



# 解析モデルの結果

ガス金属量  $Z = 0.1 Z_{\odot}$

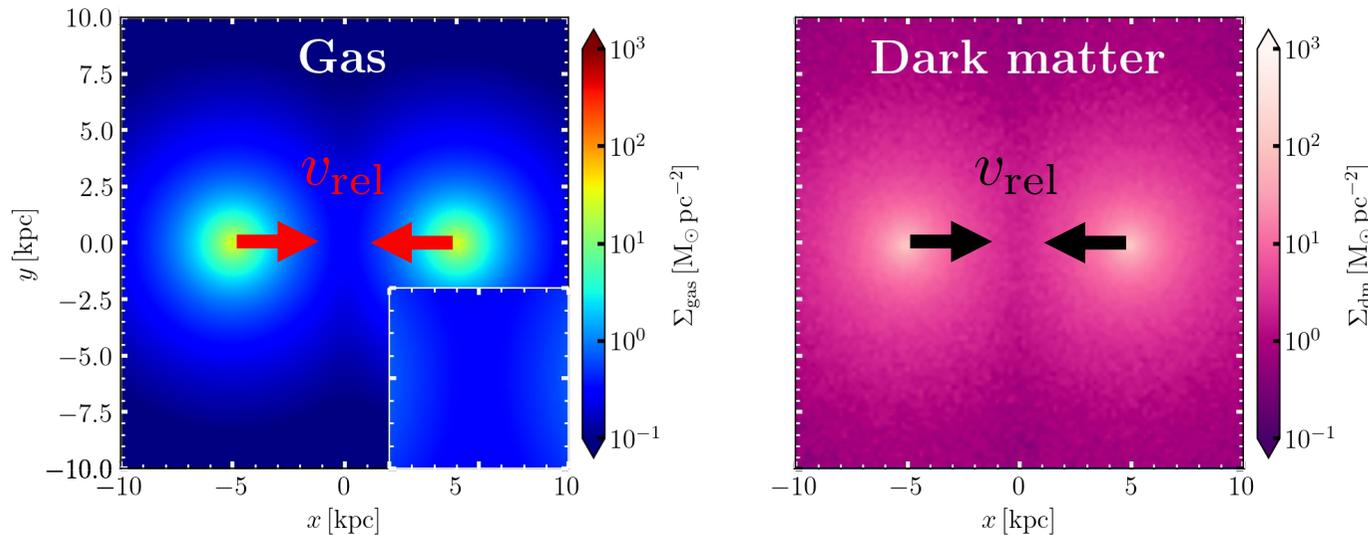
$$M_{\text{DM}}/M_{\text{gas}} = 5.36$$



次に、三次元サブハロー衝突シミュレーションの実行

# 三次元サブハロー衝突シミュレーション

初期条件：NFW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



総質量  $10^9 M_{\odot}$   
 $M_{\text{DM}}/M_{\text{gas}} = 5.36$   
金属量  $0.1 Z_{\odot}$  衝突電離  
平衡ガスの冷却率

重力ソフトニング長：100 pc  
質量分解能： $10^3 M_{\odot}$

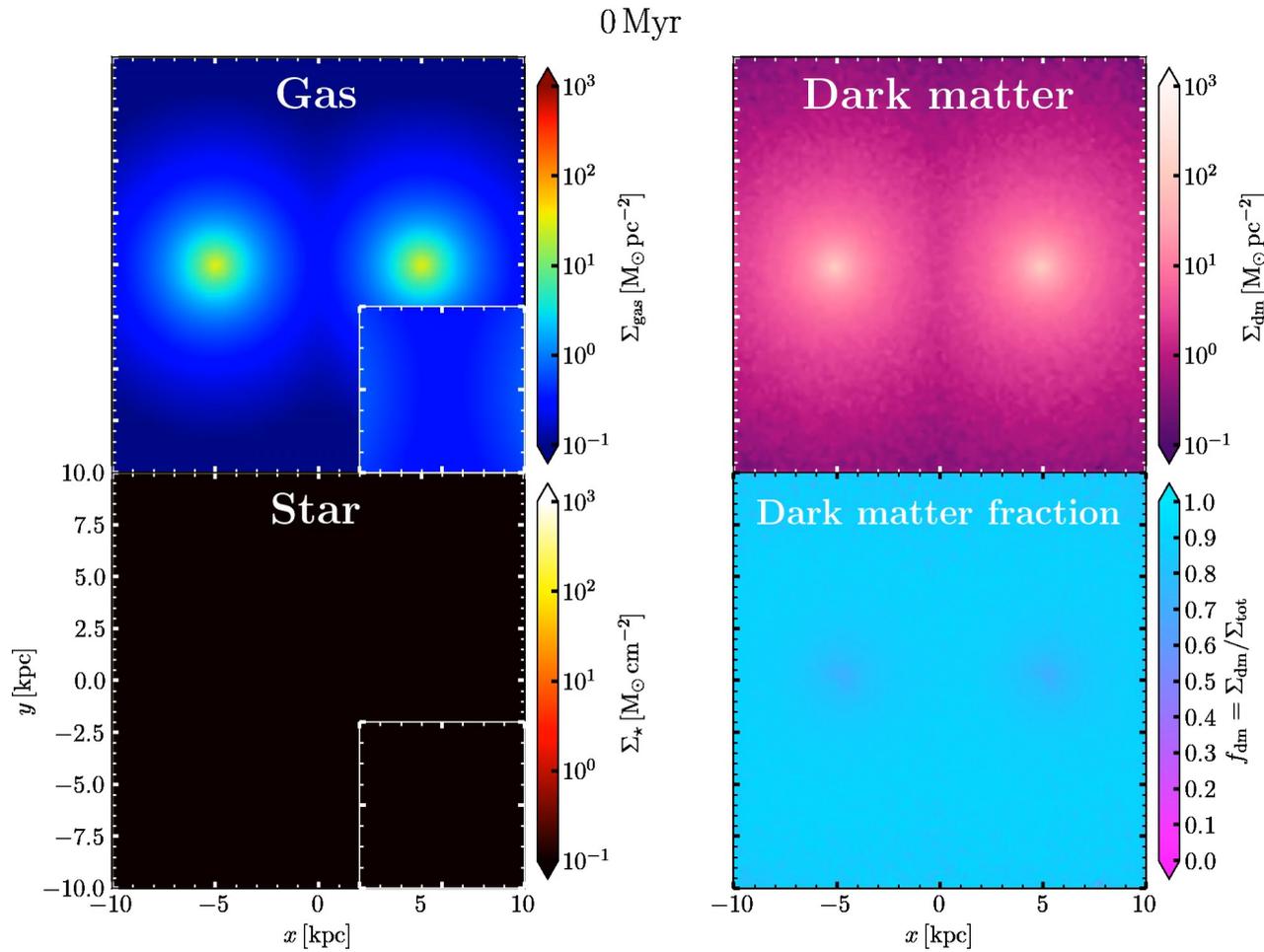
## 重力N体+SPH法の銀河形成シミュレーションコード (Otaki & Mori 22)

- 並列化：Framework for Developing Particle Simulators (Iwasara+16, Namekata+18)
- 初期条件作成：Many-component Galaxy\_INITIALIZER (Miki & Umemura 18)
- 放射冷却計算：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+98)

Wisteria/BDEC-01 (東京大学)



結果 :  $v_{\text{rel}} = 200 \text{ km/s}$



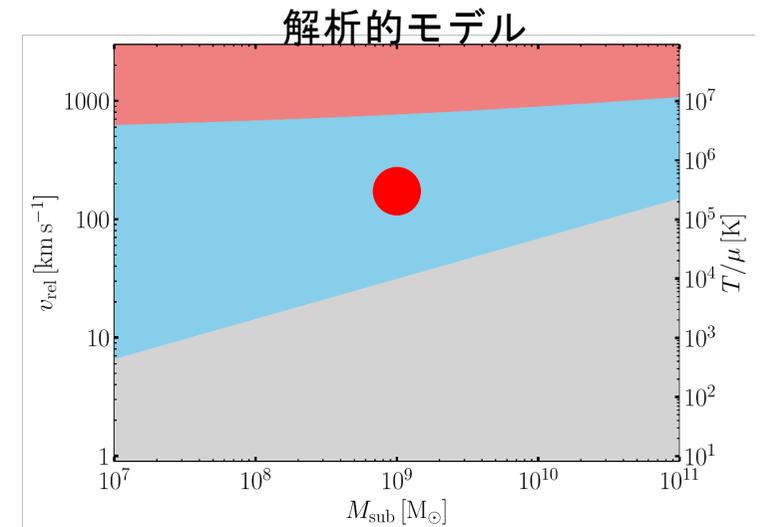
衝突面で爆発的に星形成し、  
重力収縮

ダークマター欠乏銀河を形成

$$M_{\text{DM}} = 0 \text{ M}_{\odot}$$

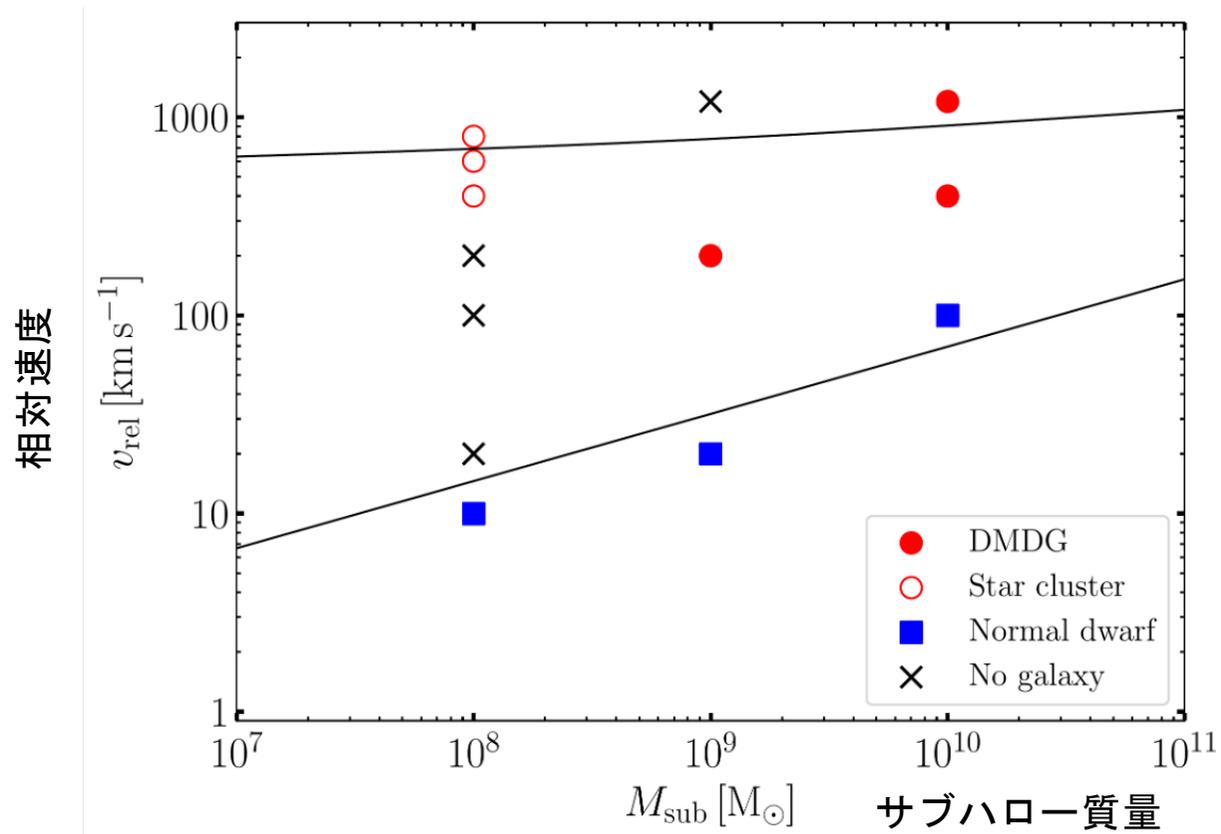
$$M_{\text{gas}} = 1.5 \times 10^4 \text{ M}_{\odot}$$

$$M_{\star} = 1.3 \times 10^7 \text{ M}_{\odot}$$



# シミュレーションのまとめ

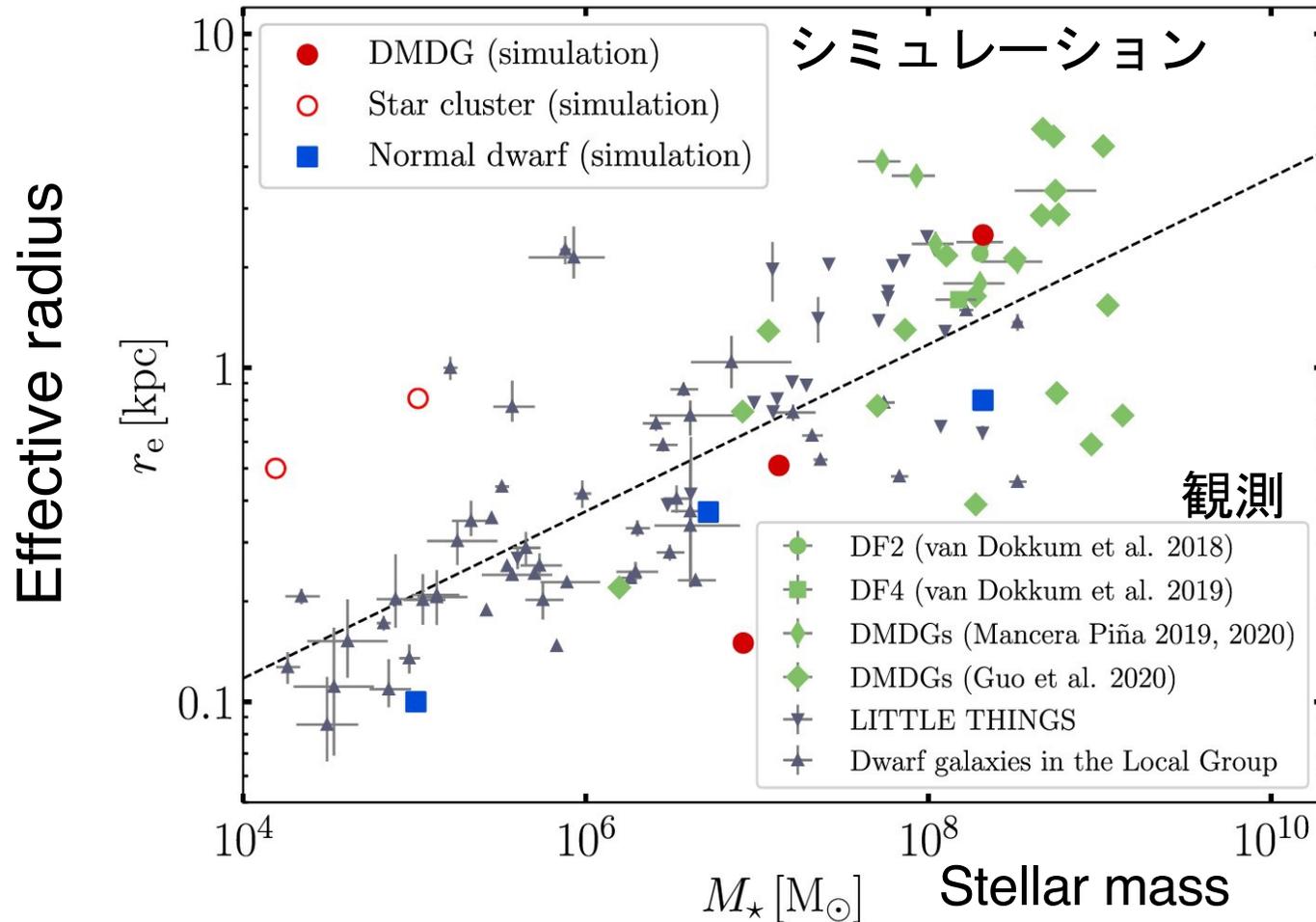
サブハロー質量  $10^8, 10^9, 10^{10} M_{\odot}$ , 衝突速度を様々変えてシミュレーションを実行。



- : ダークマターが多い通常の矮小銀河
- : ダークマター欠乏銀河
- :  $M_{\star} < 10^6 M_{\odot}$  星団
- × : No galaxy

➡ サブハロー衝突現象によりダークマター欠乏銀河が形成

# 観測とシミュレーションの比較



ダークマター欠乏銀河のいくつかは Ultra-Diffuse Galaxy ( $r_e > 1.5$  kpc) であり、広がった恒星分布  $10^{10} M_\odot$  同士  $200$  km/s の衝突シミュレーションの結果、 $r_e = 2.5$  kpc のダークマター欠乏銀河が形成

# サブハロー衝突のまとめ

## サブハロー衝突頻度の推定

- 速度分布関数に基づいた解析的な見積もりと宇宙論的N体シミュレーションによる測定により、およそ1 Gyrあたり数回の頻度でサブハロー衝突することを求めた。

## 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過程を物理的に考察し、ダークマターが多い矮小銀河・ダークマター欠乏銀河が形成可能な速度条件を解析的に求めた。

## 三次元シミュレーション

- さまざまな質量のサブハロー同士の正面衝突シミュレーションをした結果、サブハロー衝突によってダークマター欠乏銀河が形成されることを示した。

## 今後の研究

- 低質量サブハロー同士の衝突による銀河・球状星団形成
- 高精度シミュレーションでの観測結果との比較  
→ シミュレーションコード開発