

ダークマターとバリオン間の相対速度による超音速駆動ガス天体形成

仲里佑利奈 (東京大学)・千秋元 (東北大学)・

P113b

吉田直紀(東京大学)

yurina.nakazato@phys.s.u-tokyo.ac.jp

Abstract

宇宙の再結合時にバリオンとダークマター(DM)の間に相対速度(stream velocity; SV)が生じ、これが宇宙初期のハロー、初代星形成に影響を与えることが知られている。近年、SVによってDMハローにホストされずに自己重力で収縮するガス天体(Supersonically Induced Gas Objects; SIGO)の形成が確認された。本研究では、先行研究で含まれていなかったH₂生成反応をシミュレーションに導入、より現実的な条件下でSIGOの生成およびその進化を追った。H₂冷却によって、SIGOが効率良く収縮でき、DMハローのビリアル半径外で崩壊するSIGOの存在が確認された。

Simulation setup

- 計算コード: 3次元流体シミュレーション AREPO (Springel 2010)
- 化学反応ライブラリ: GRACKLE (Smith et al. 2016, Chiaki & Wise 2019)
- SVあり/無し, H₂冷却あり/無しの4条件を実行(表1)

名前	相対速度 (SV)	H ₂ 冷却
0vH2	0	あり
0vH	0	無し
2vH2	2σ	あり
2vH	2σ	無し

表1: 計算の4ケース

Definition of SIGO

Popa et al. 2016, Chiou et al. 2021の定義に基づく。以下の2条件を満たすものをSIGOと見なした。

- ① ガス塊がDMハローのビリアル半径の外に存在
- ② ガス塊のビリアル半径程度の領域内でのガスの質量比が60%以上 ($f_{\text{gas}} > 0.6$)
$$\left(f_{\text{gas}} = \frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{gas}} + M_{\text{DM}}} \right)$$

Result1 (SVによるガス密度分布への変化)

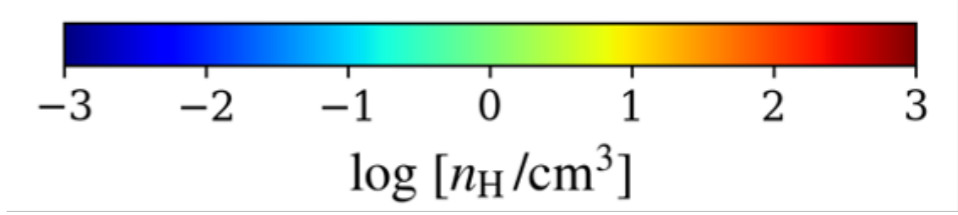
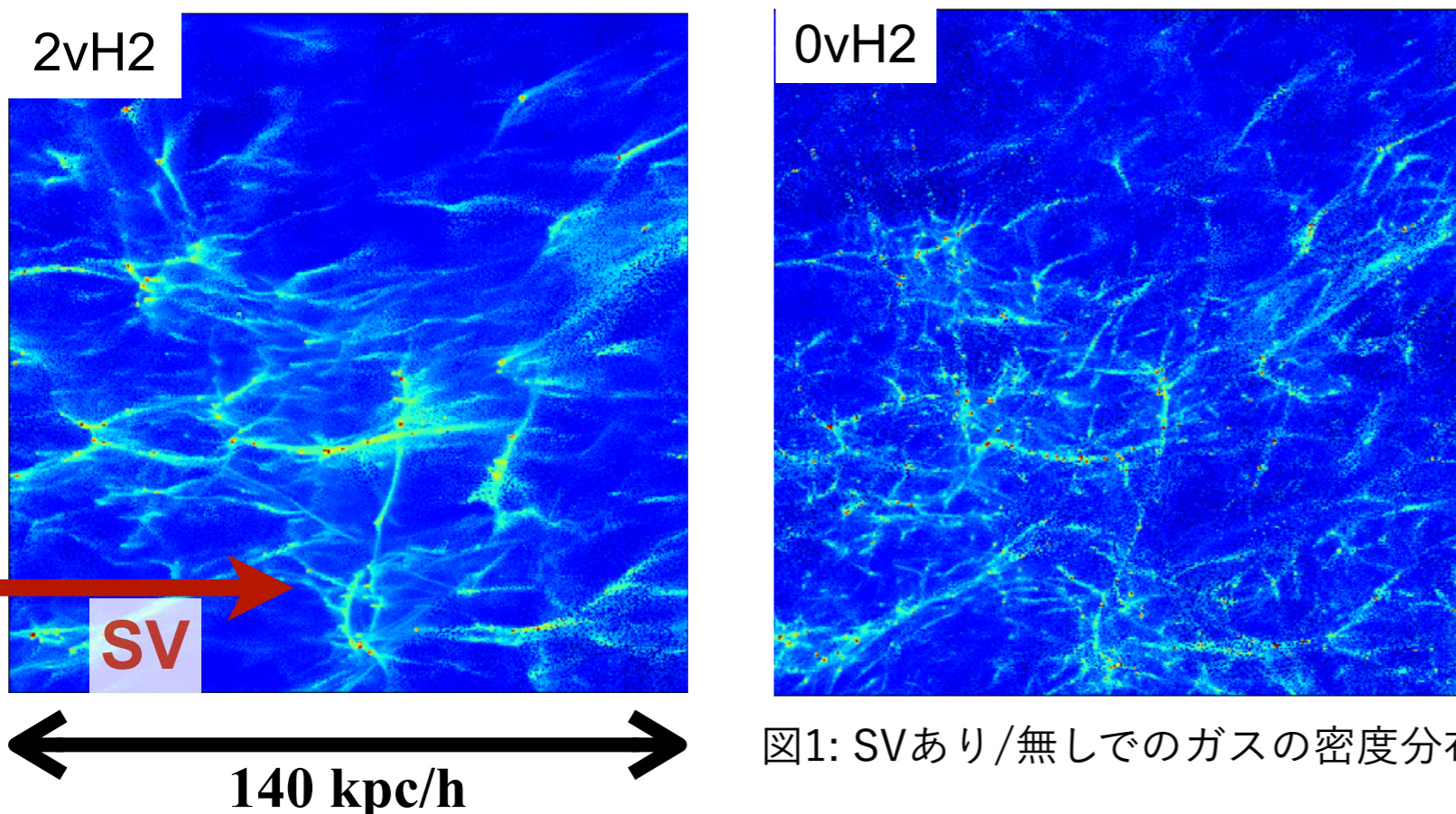
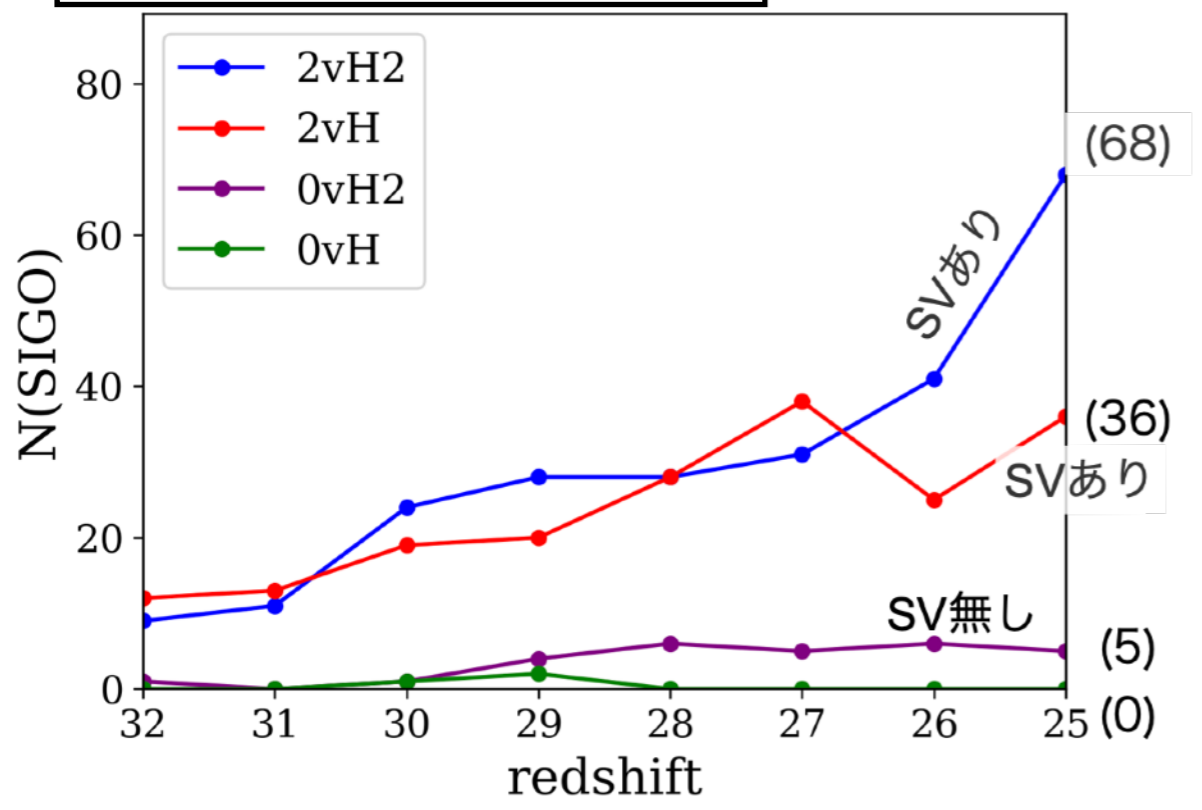


図1: 同じ座標における $z = 25$ でのガスの密度分布図。

- ・ SVによってガスの密度ピークが平らになる → ハロー形成が遅れる (先行研究: Greif et al., 2011, Hirano et al., 2018と一致)

図1: SVあり/無しでのガスの密度分布の比較

Result2 (SIGOの数進化)



- ・ SVによってSIGO形成が誘発される
 - ・ $z = 25$ において, H_2 冷却あり (2vH2)の方が H_2 冷却無し (2vH)よりSIGOの数が多い
- **H_2 冷却はSIGO形成を促進**

※0vH2で同定されたSIGOに関しては, FOFアルゴリズムによるエラーであることが判明した(Appendix参照)

図2:4ケースでのSIGOの数進化

Result3 (SV/ H₂冷却ありで形成されたSIGOの時間進化)

黒 : DM 粒子
 色つき: ガス粒子
 × : z = 25でのSIGOの位置

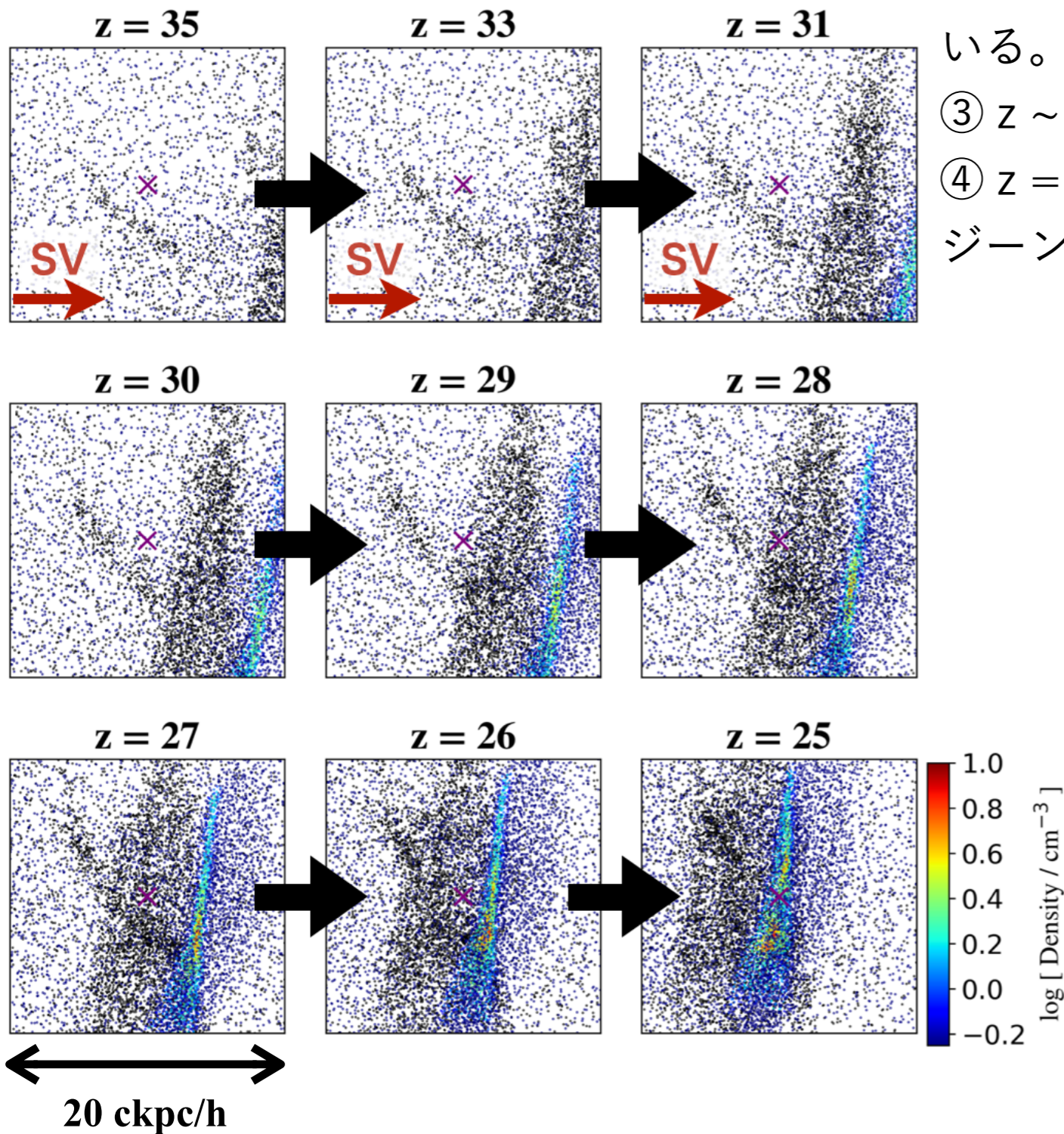


図3: SIGOの形成進化

- ① DMの大規模構造の一部が形成される
- ② DM構造に沿って、ガスが集まる。このとき、SVによってガスが流され、ガスとDMハローは~5ckpc離れている。
- ③ z ~ 30以降、DMハローが成長しガスとDMが近づく
- ④ z = 25の時点で、ガスは十分に冷え切っておらず、ジーンズ不安定に達していない。(図4, 図5)

SIGO 2vH2 (z = 25)

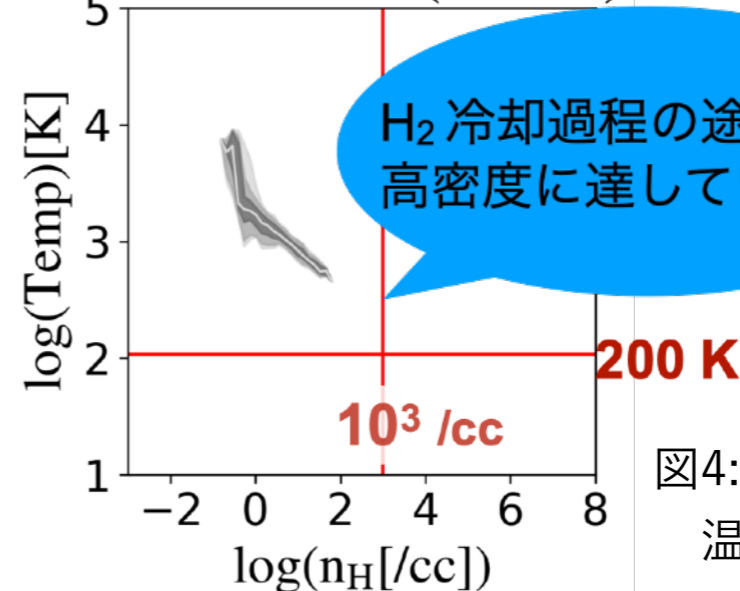


図4: z = 25でのSIGOの温度-密度プロット

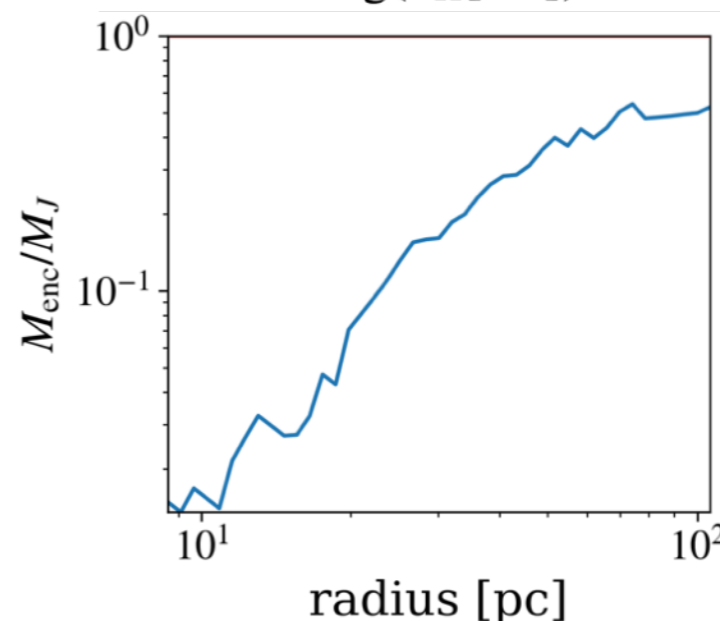


図5: z = 25でのradial profile

Result3 (z = 25以降のSIGOのzoom-in シミュレーション)

- SIGO近傍の領域のみに着目してz = 25からz = 20までSIGOの進化を追った
- z ~ 20でSIGOは高密度に達した。(図6)
- H₂ 冷却によってSIGOは収縮している(図7)
- DMハローのビリアル半径外でJeans不安定に達している(図8)

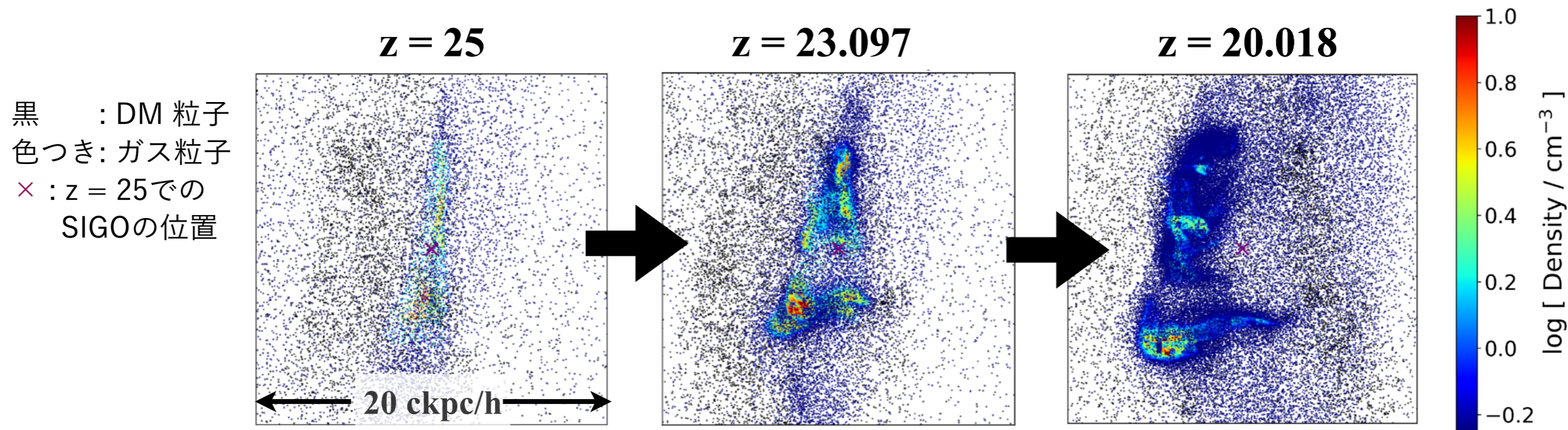


図6: zoom-inシミュレーションによるSIGOの進化

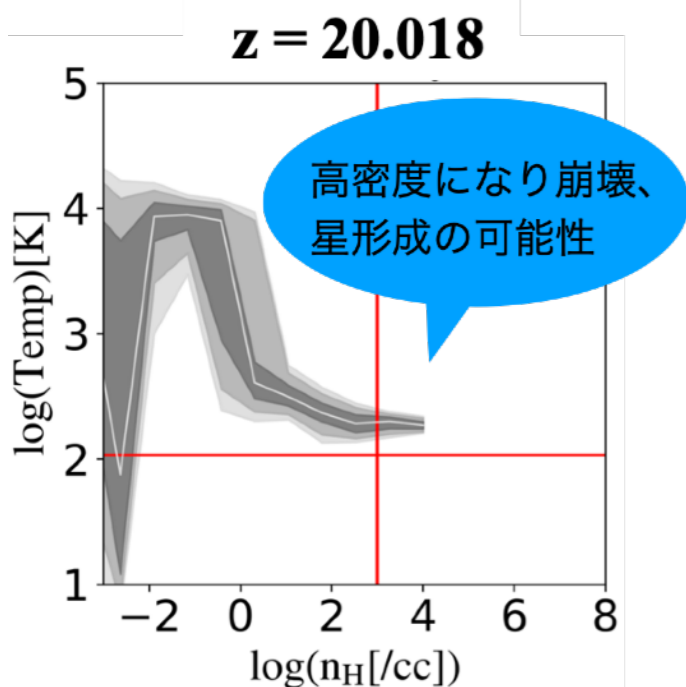


図7: z = 20における温度-密度プロット

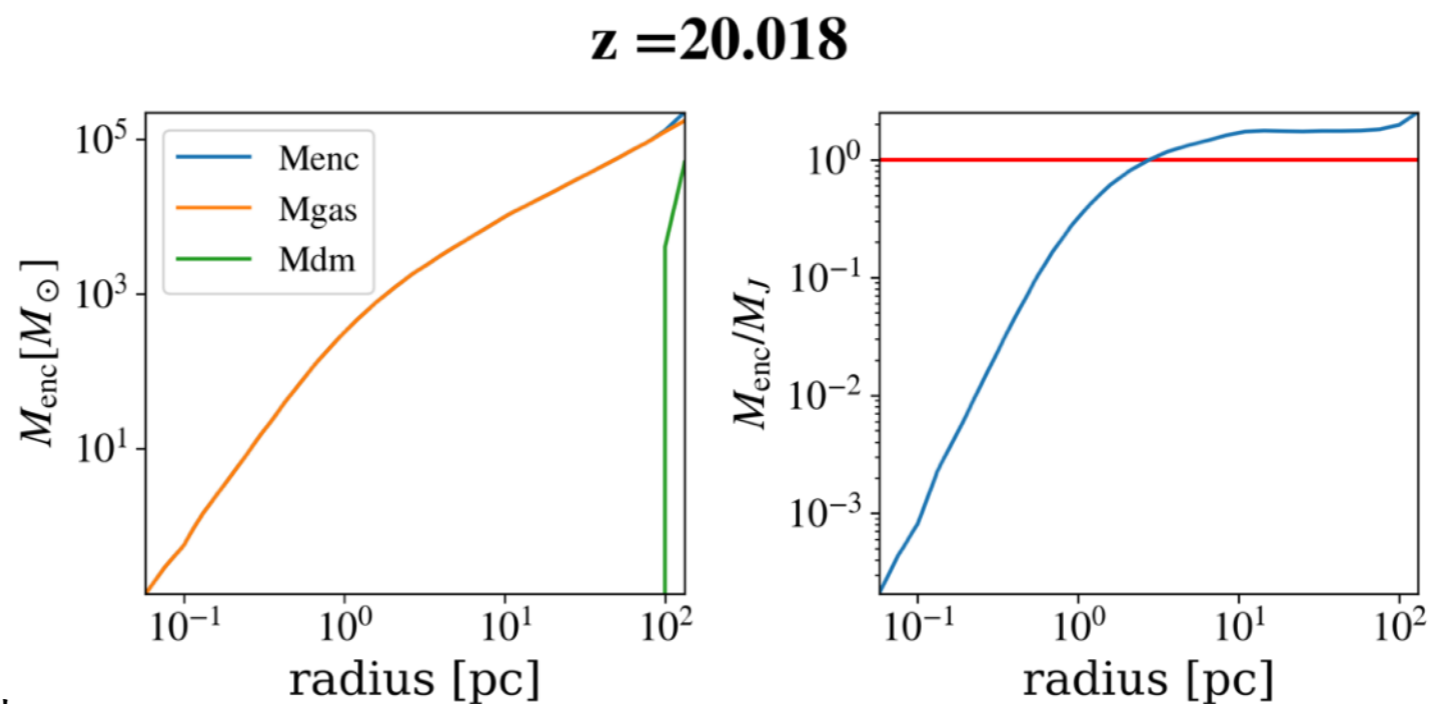


図8: z = 20におけるジーンズ不安定性

まとめ

SV : 初期宇宙でダークマターとガスの間にあった相対速度。

ハロー, 初代星形成に影響を及ぼす。

H₂冷却 : 始原ガス(HとHeのみで構成)で最も効率的な冷却過程。ガスを~200 Kまで冷却する。

- SVとH₂冷却を導入した3次元流体シミュレーションの実行
- SVの存在下でガスが流され, SIGOが形成される
- H₂冷却はSIGO形成を促進する
- Zoom-inシミュレーションにより, 形成されたSIGOの一部はH₂冷却により収縮し, ジーンズ不安定に達する。このとき, DMハローにホストされることなく星形成しうる。

今後の展望

- シミュレーションのSVの初期値の変更 (例: SV = 1 σ (遅い), 3 σ (速い))
- SIGOの定義の修正 (0vH₂でSIGO同定のエラーが出たため)
- 崩壊後のSIGOの進化の計算 (例: sink粒子を導入し, ガスの分裂, 星団までを追う)

より詳細な説明

- 次ページ以降のAppendixおよび, 添付URLの説明ビデオを参照

(https://www.dropbox.com/s/6tr37abkj33cn54/nakazato_detail_presentation.mp4?dl=0)

Appendix

Stream Velocity (SV)

Tseliakhovich & Hirata (2010)

- Before recombination, the pressure of photon-baryon fluid generates the Baryonic Acoustic Oscillations.

→ Relative motion between baryon and DM

Stream velocity (SV)

→ $1\sigma = |v_b - v_{\text{dm}}| \sim 30 \text{ km/s}$ (at $z = 1100$)

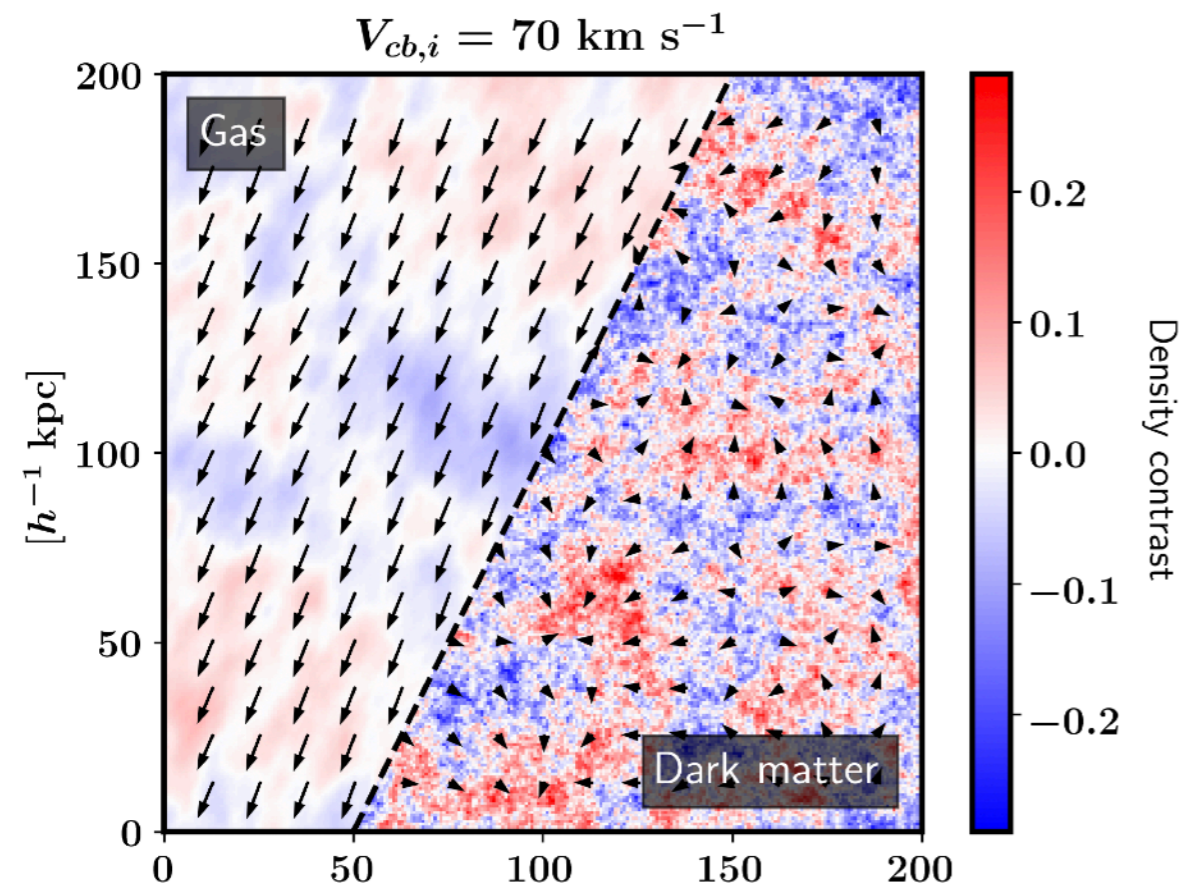
- After the recombination, the gas cooled rapidly and the speed of sound decreased

→ $\mathcal{M} \sim 5$ (→ Supersonic !)

- After the recombination, the gas cooled rapidly and the speed of sound decreased
SV decrease as $(1+z)$

- SV is coherent flow in a few cMpc

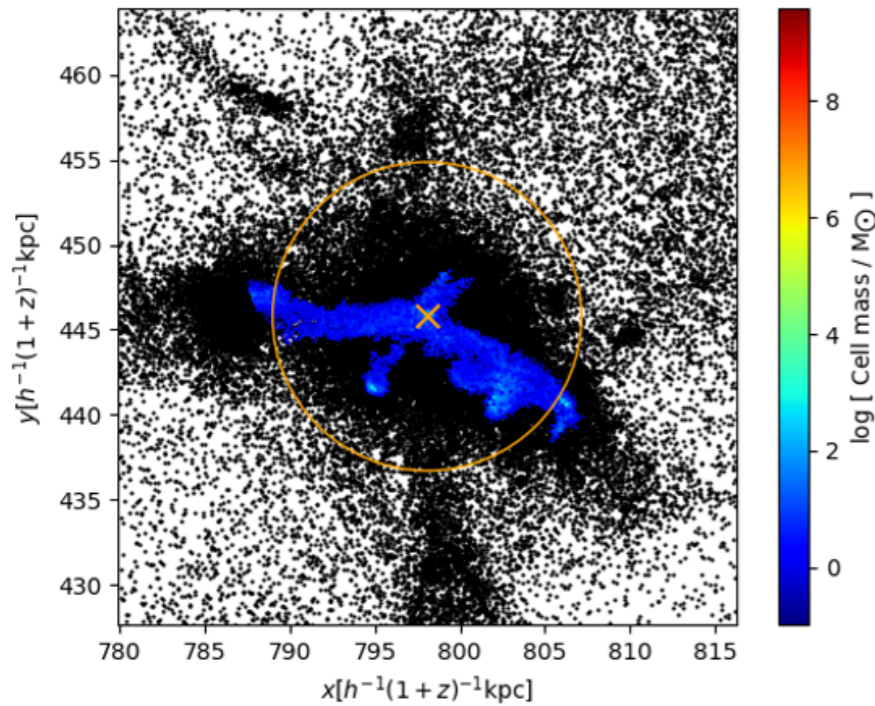
- SV can affect small-scale haloes and star formation by considering second-order perturbation.



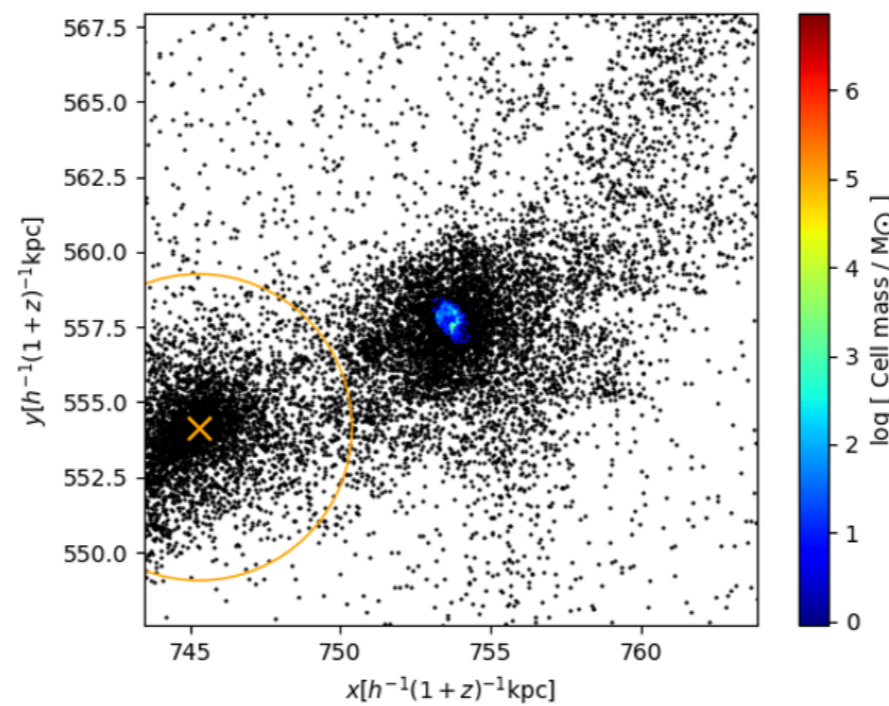
SIGO misidentification in 0vH2

- ・ガスハロー及びDMハローはFOFアルゴリズムで同定する
- ・DMハローが合体途中のとき、FOFで異なるホストDMハローを同定する可能性がある

正しくホストDMハローを同定



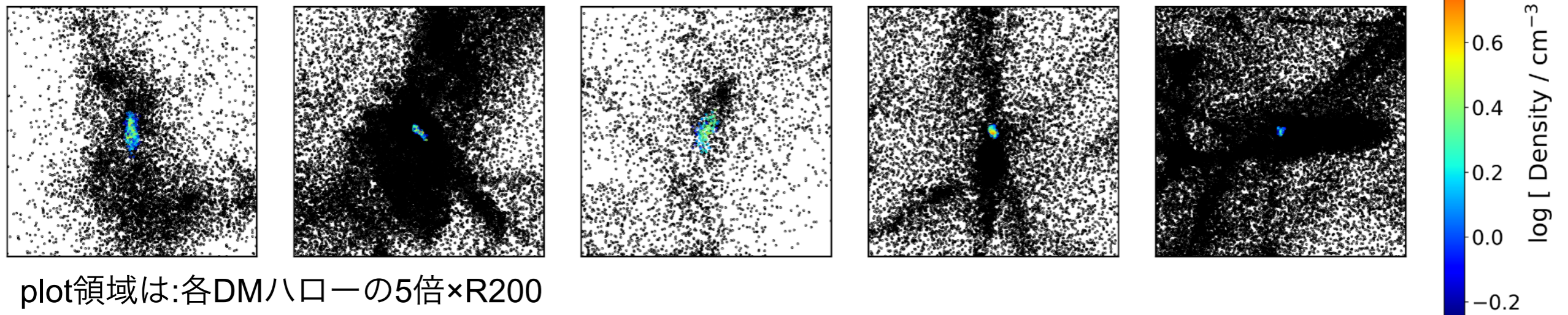
異なるホストDMハローを同定



黒 : DM 粒子
色つき: ガス粒子
× : ホストDMハローの中心
円はDMハローのR₂₀₀

0vH2でSIGOと誤認された5つのガスハロー

- ・大きな領域全体を見るとガスハローはDMハローにホストされている



plot領域は:各DMハローの5倍×R₂₀₀