

ブラックホールの巣としての 初代星形成領域

平野 信吾

神奈川大学, 東京大学

shingo-hirano@kanagawa-u.ac.jp

ブラックホール大研究会 @ 御殿場 (2024/2/28-3/2)

Supported by



Calculated by

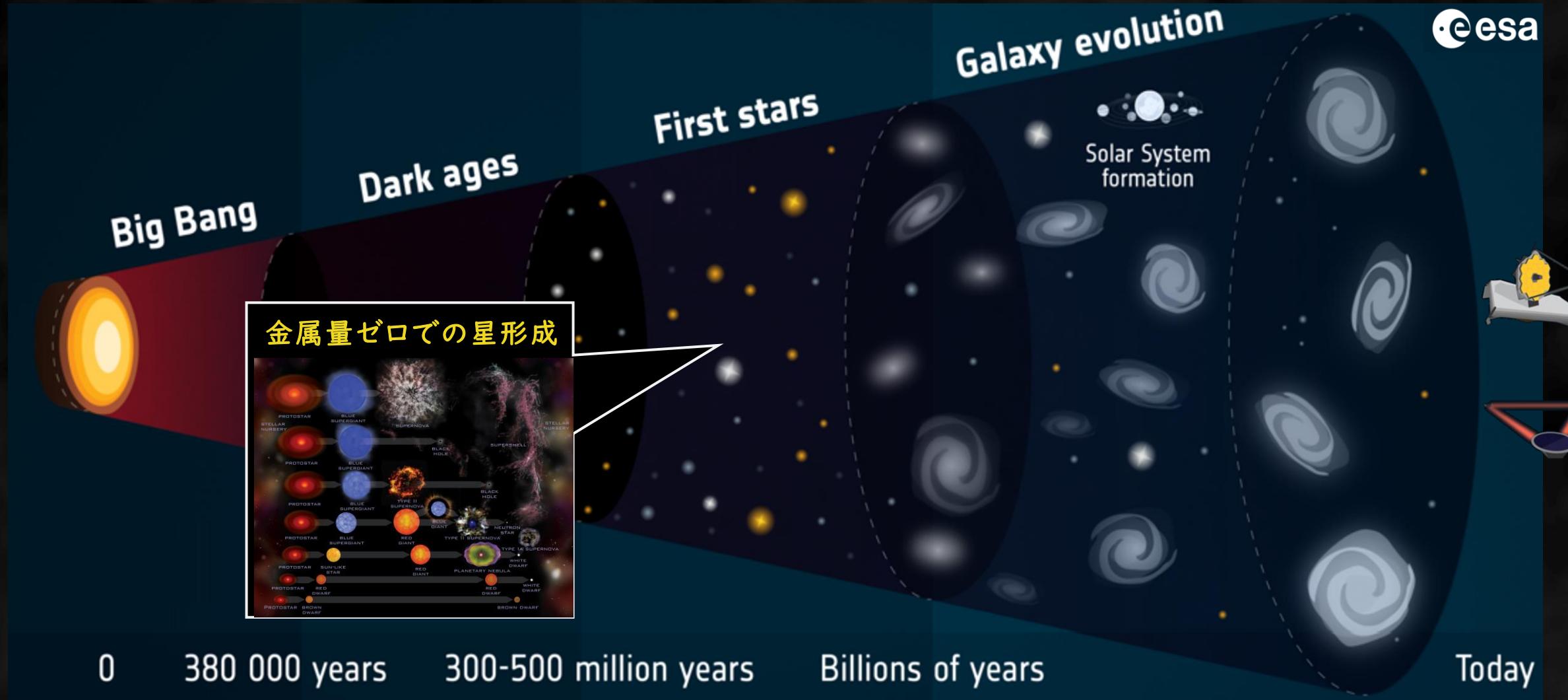


初代星

(First Stars; Population III stars)

References

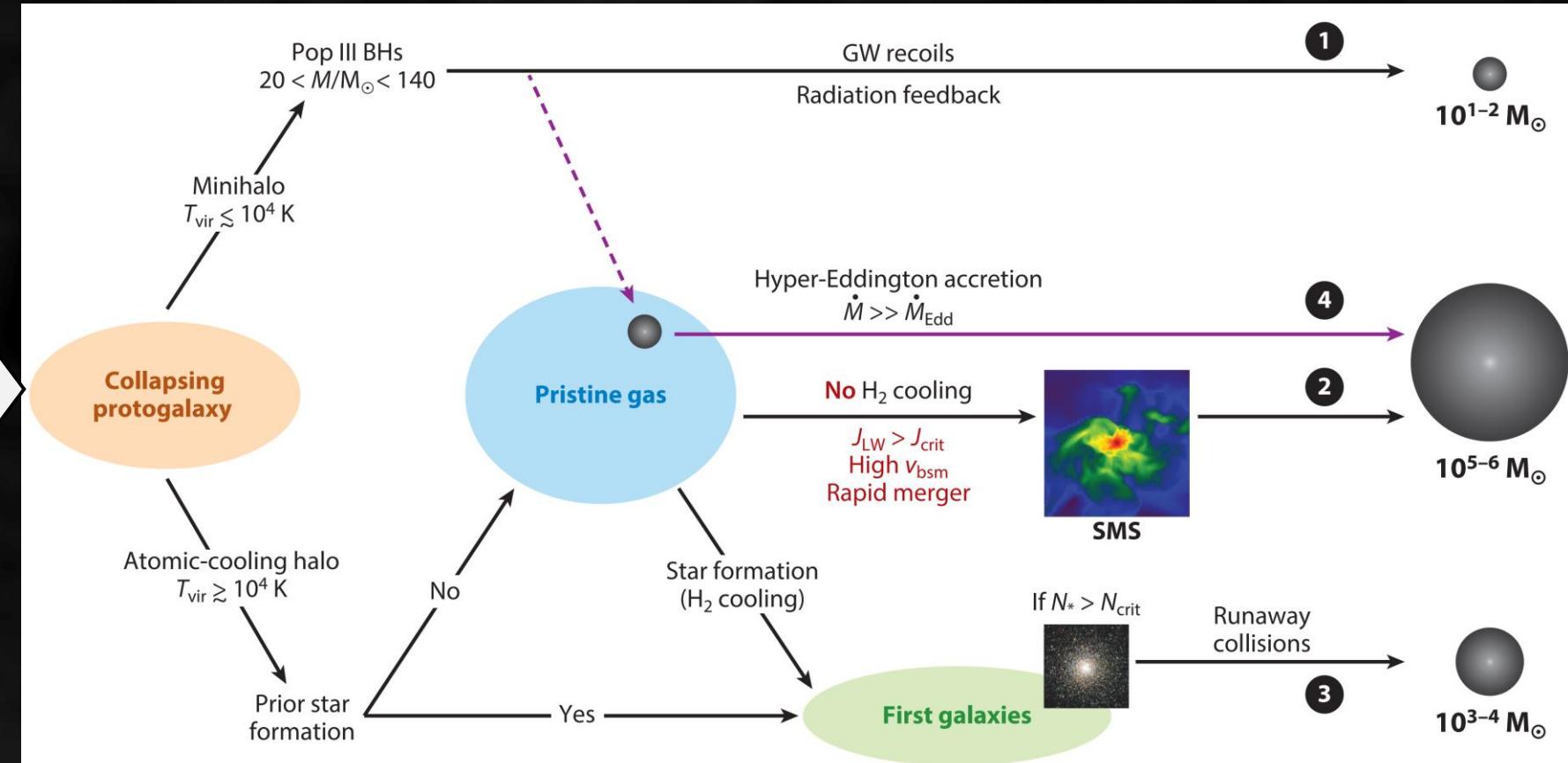
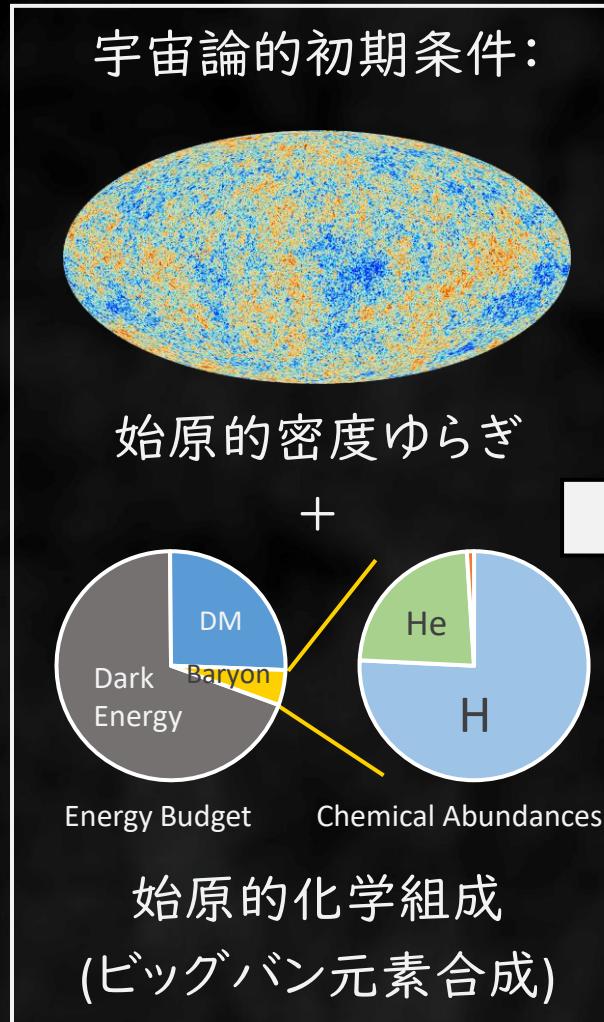
Klessen & Glover (2023; review)



初代星がのこすブラックホール

References

Inayoshi et al. (2020; review)

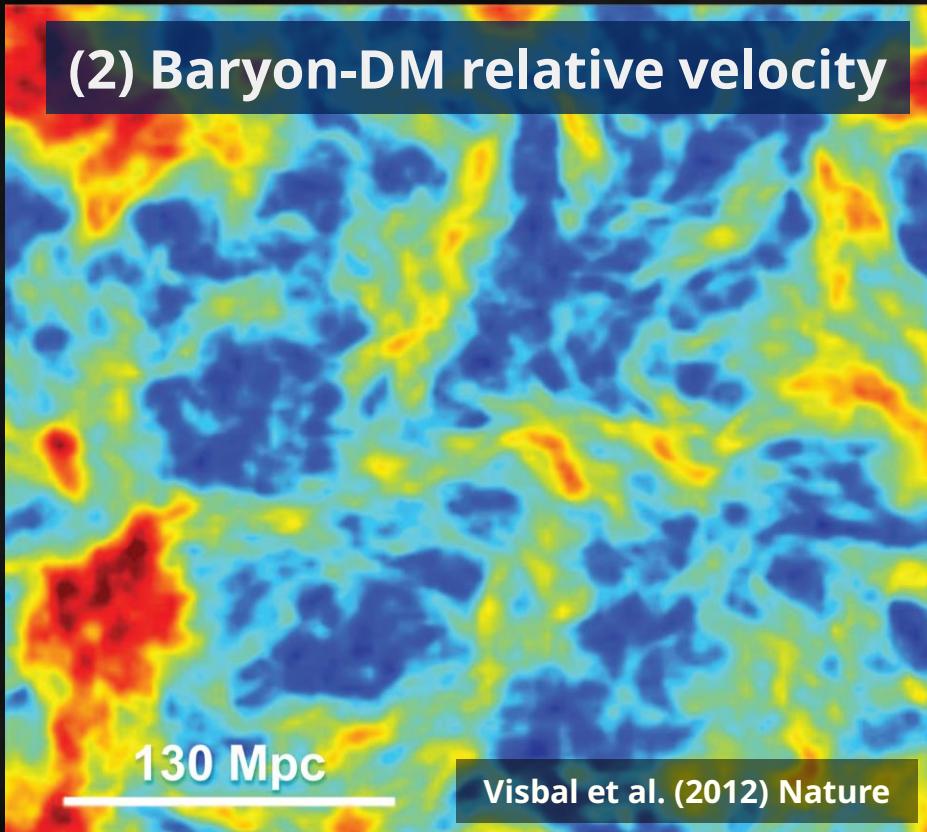
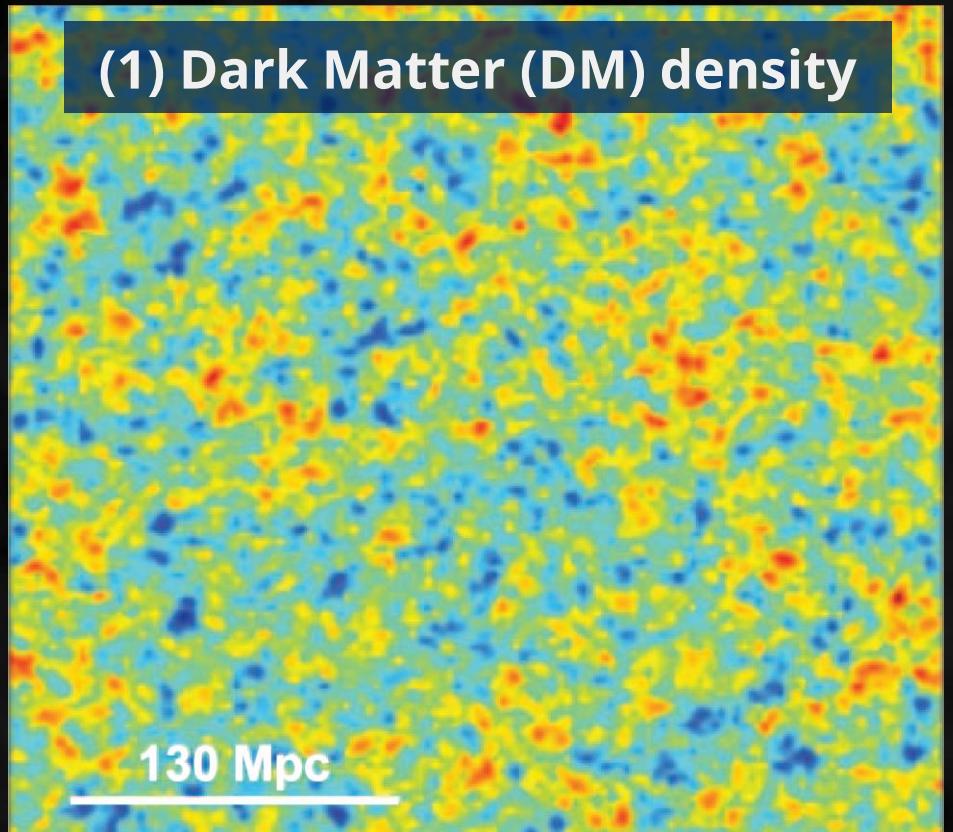


Streaming Velocity (SV): Baryon-Dark Matter relative velocity field

References

Tseliakhovich & Hirata (2010)

Tseliakhovich et al. (2011)



The **higher** the local density,
the **earlier** the structure formation.

The **higher** the relative velocity,
the **later** the structure formation.

RMS value:

$$\sigma_{\text{SV}} = 30 \text{ [km/s]}$$

at the cosmic recombination
($z = 1090$)

最頻値:

$$v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{SV}} \sim 0.8$$

MWの推測値:

(Uysal & Hartwig 2023)

$$v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{SV}} = 1.75$$

SVの影響

構造形成はまずダークマターが主となって進み、その重力に引かれてバリオンが集まることで、天体形成ははじまる。

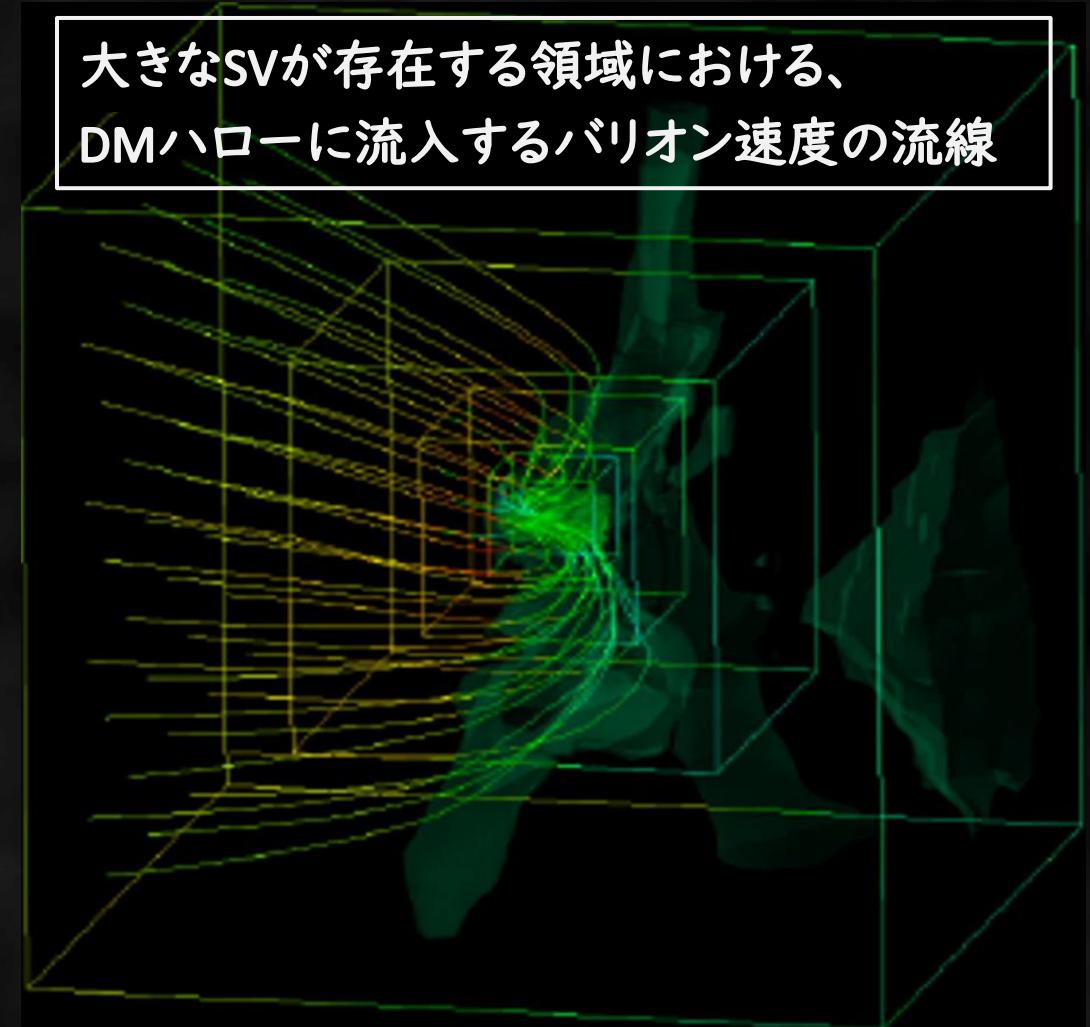
Baryon-DMの間に相対速度が存在すると、DMハローへのバリオン集積が妨げられる。①相対速度が小さくなるか、②構造形成が進みDMの重力が強くなるまで、天体形成は遅延する。

相対速度は時間経過と共に小さくなるため、

$$v_{\text{SV}} \propto (1 + z)$$

SVの影響は初期宇宙 ($z > 10$) で顕著。

大きなSVが存在する領域における、
DMハローに流入するバリオン速度の流線



SVの影響: 初期宇宙の構造・天体形成

References

Fialkov et al. (2014; review)

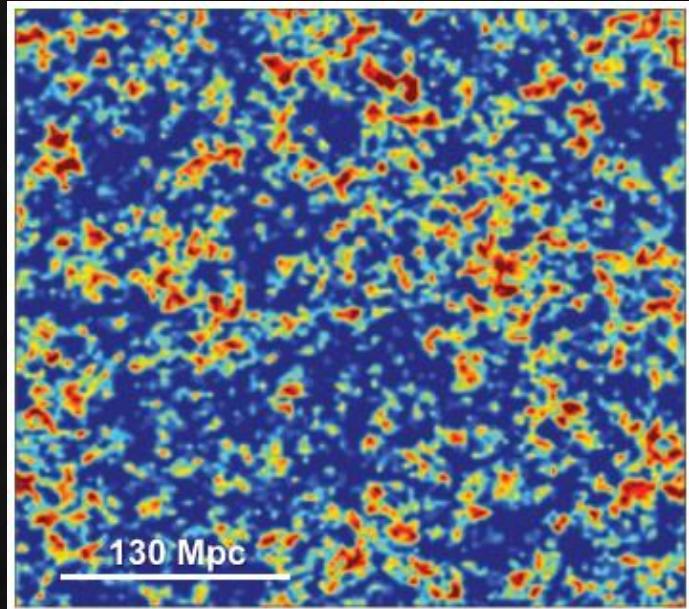
(1) Small-scale phenomena

- Abundance of DM halo
- Baryon fraction
- Subsequent star formation
- Stellar/galactic feedback

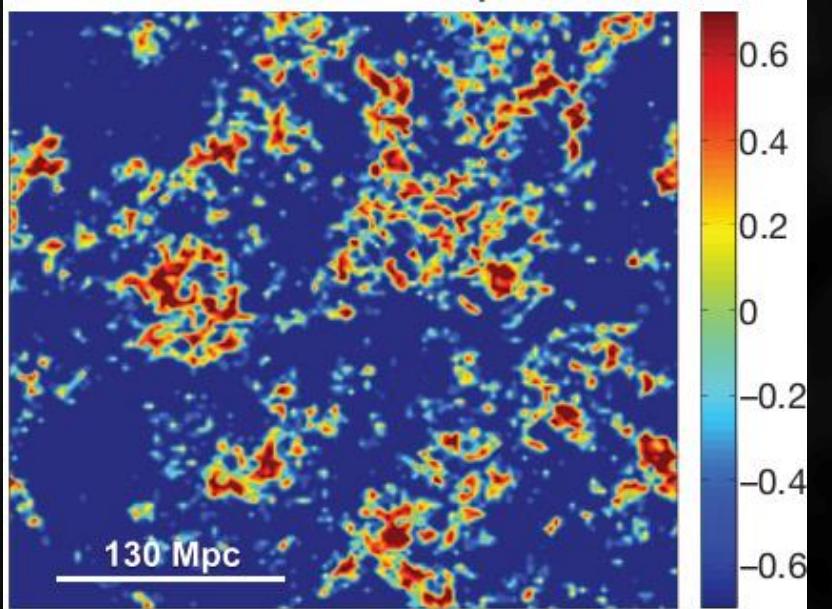
(2) Large-scale phenomena

- Cosmic reionization
- 21-cm intensity distribution
- B-mode polarization of CMB
- Missing satellite problem

Gas fraction in star-forming halos at $z = 40$ (Visbal et al. 2012)



Stars **without SV**



Stars **with SV**

SV ... 宇宙論的初期条件に自然に現れる。
出現確率は理論的に求められている。

SVの影響: 初代星形成

[References](#)

Hirano+(2017; 2018)

先行研究は、初代星の
形成条件 (DMハロー)
への影響を調べていた。

- Critical Halo Mass, $M_{\text{crit}}(z, v_{\text{SV}})$:
初代星形成条件として銀河形
成シミュレーションや準解析的
モデルにおけるパラメータとなる。

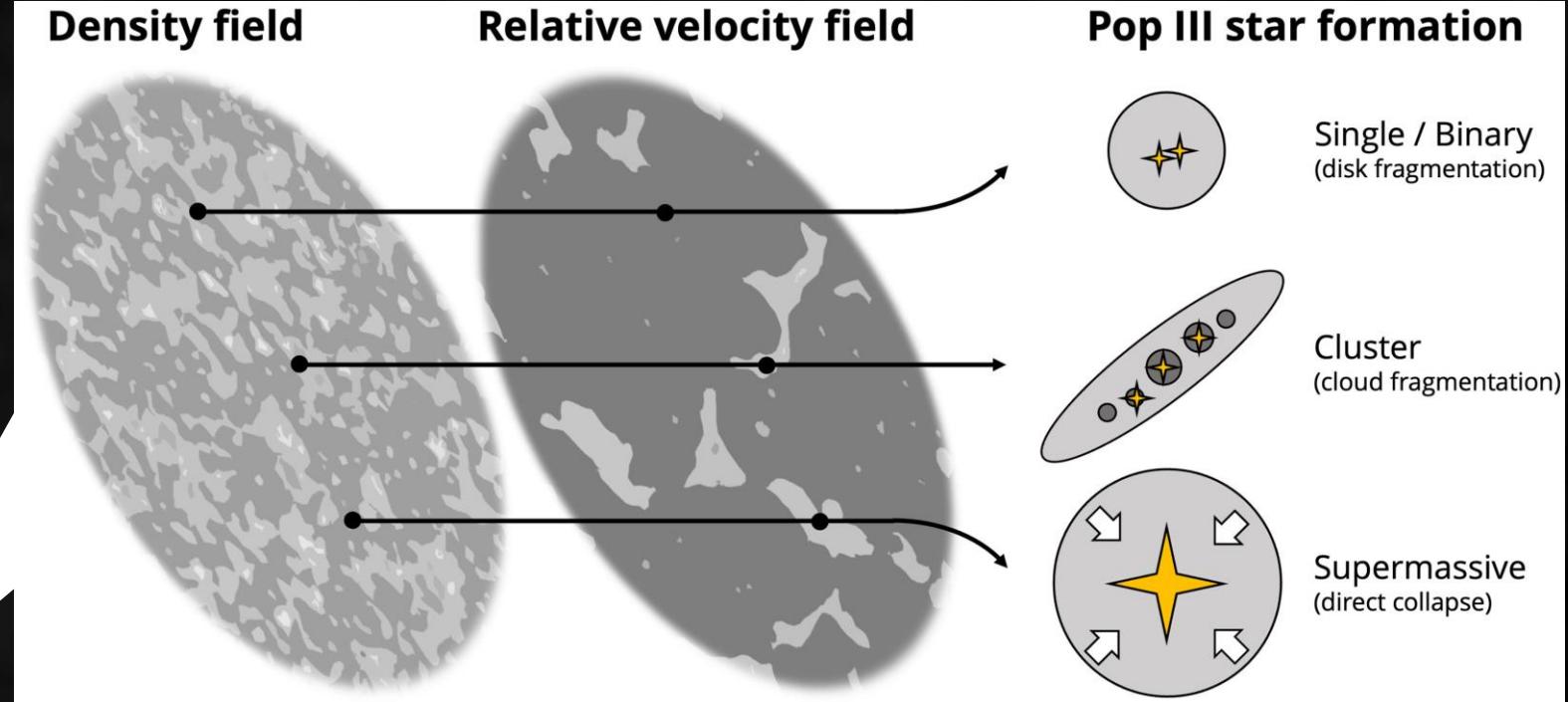
我々は、初代星の
形成過程 (星質量分布)

への影響を調べている。

- 初代星星団 ($10^{2-3} [M_{\odot}] \times n$ 個)
- 大質量初代星 ($10^{4-5} [M_{\odot}]$)



“ブラックホールの巣” ... 連星BH, 中間質量BH, 超大質量BH



Q. 様々な初代星BHの形成条件

[References](#)
Hirano+(2023)

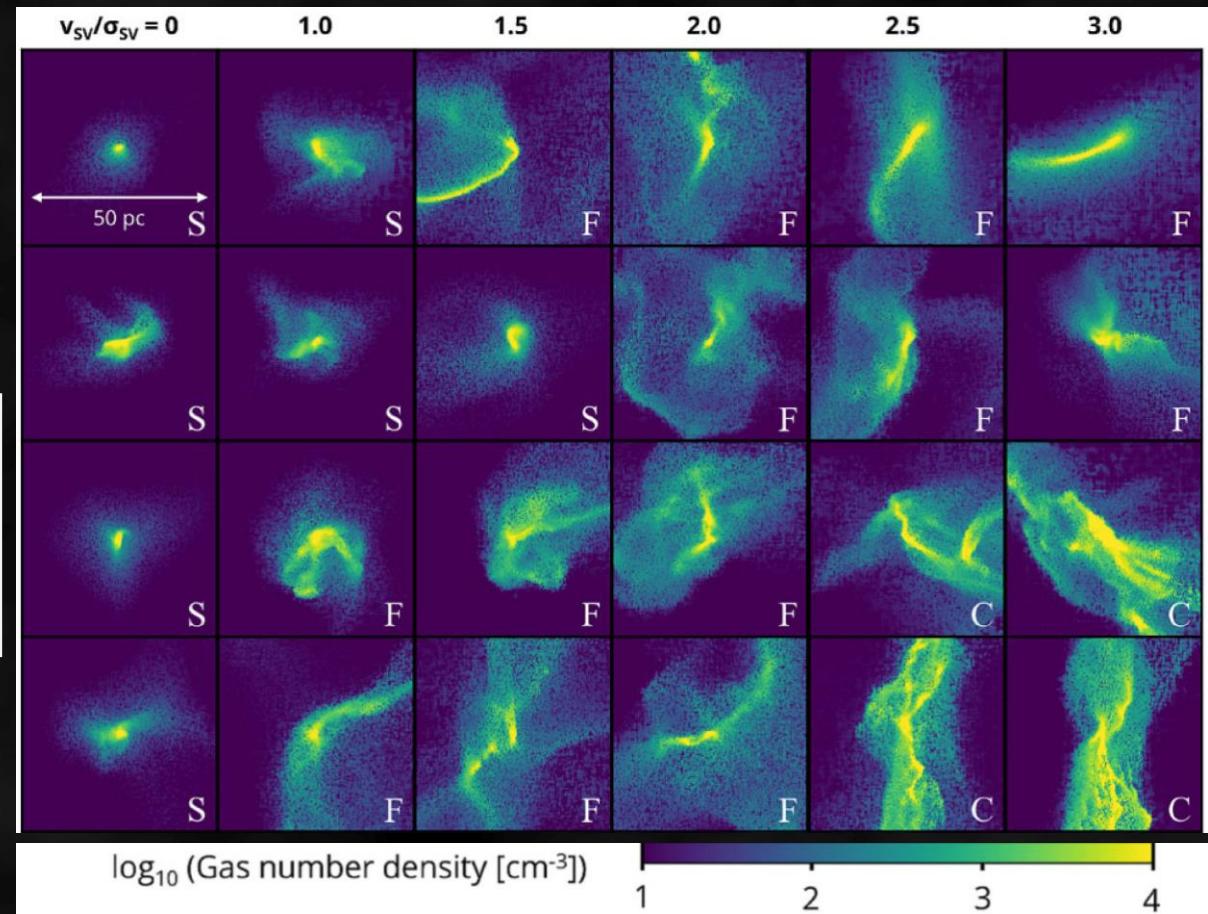
SVが、ハロー形成に加えて、初代星形成を左右することを確認した (e.g., Hirano+2017; 2018)。

一方、各初代星形成過程の条件は未検証であり、BH remnantの形成率は求めていなかった。

宇宙論的初期条件における初代星形成領域20例に、6つの異なるSV速度を与えた → 120通りの数値シミュレーションから、初代星形成の条件を探る。

Questions:

- Critical halo mass: $M_{\text{crit}}(z) \rightarrow M_{\text{crit}}(z, v_{\text{sv}})$
- Initial Mass Function: $dN(z, v_{\text{sv}})/dM$



Methods

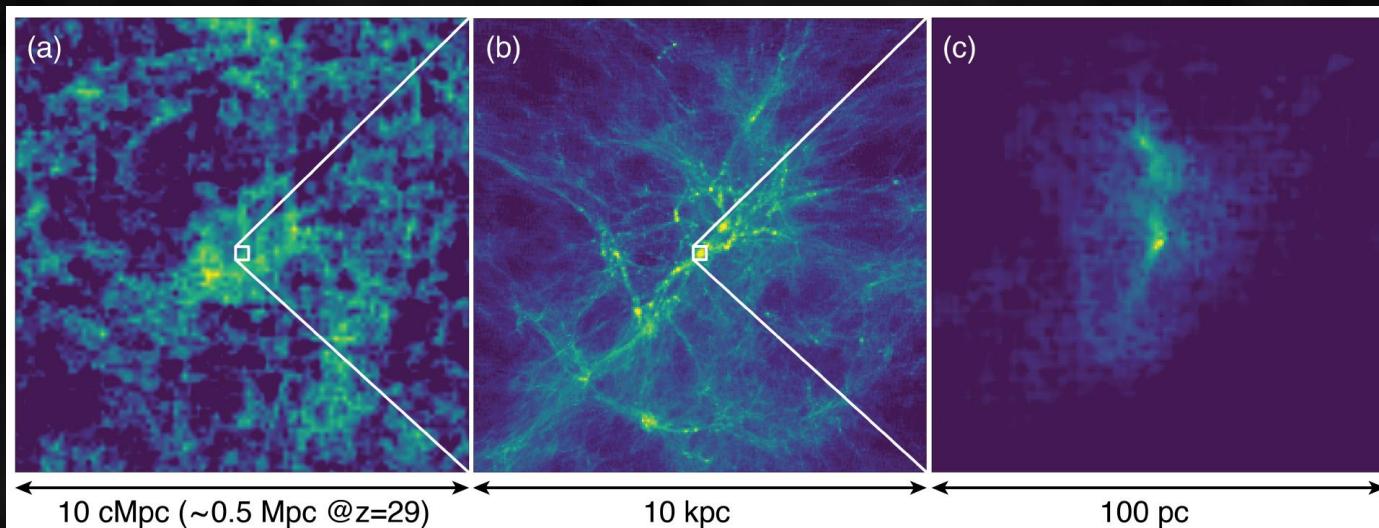
Cosmological Simulations with SV

Cosmological initial conditions : MUSIC (Hahn & Abel 2011)

- $z_{\text{ini}} = 499$, $L_{\text{box}} = 10$ [comoving Mpc/h], Cosmological params (Planck Collaboration et al. 2014)
- Hierarchical zoom-in → $m_{\text{N-body}} = 16.4$ [M_{\odot}] (dark matter), $m_{\text{SPH}} = 3.0$ [M_{\odot}] (baryon)

Cosmological simulations : N-body / SPH code GADGET (Springel 2005) suitably modified for first star formation (e.g., Hirano et al. 2018)

- Gravity, hydrodynamics, primordial chemistry (reaction, cooling, and heating)
- Particle splitting technique to follow the cloud collapse with $L_{\text{Jeans}}/L_{\text{HSML}} > 15$ until $n_{\text{th}} = 10^6$ [cm^{-3}]
→ $m_{\text{N-body,min}} = 0.14$ [M_{\odot}] (dark matter), $m_{\text{SPH,min}} = 0.026$ [M_{\odot}] (baryon)



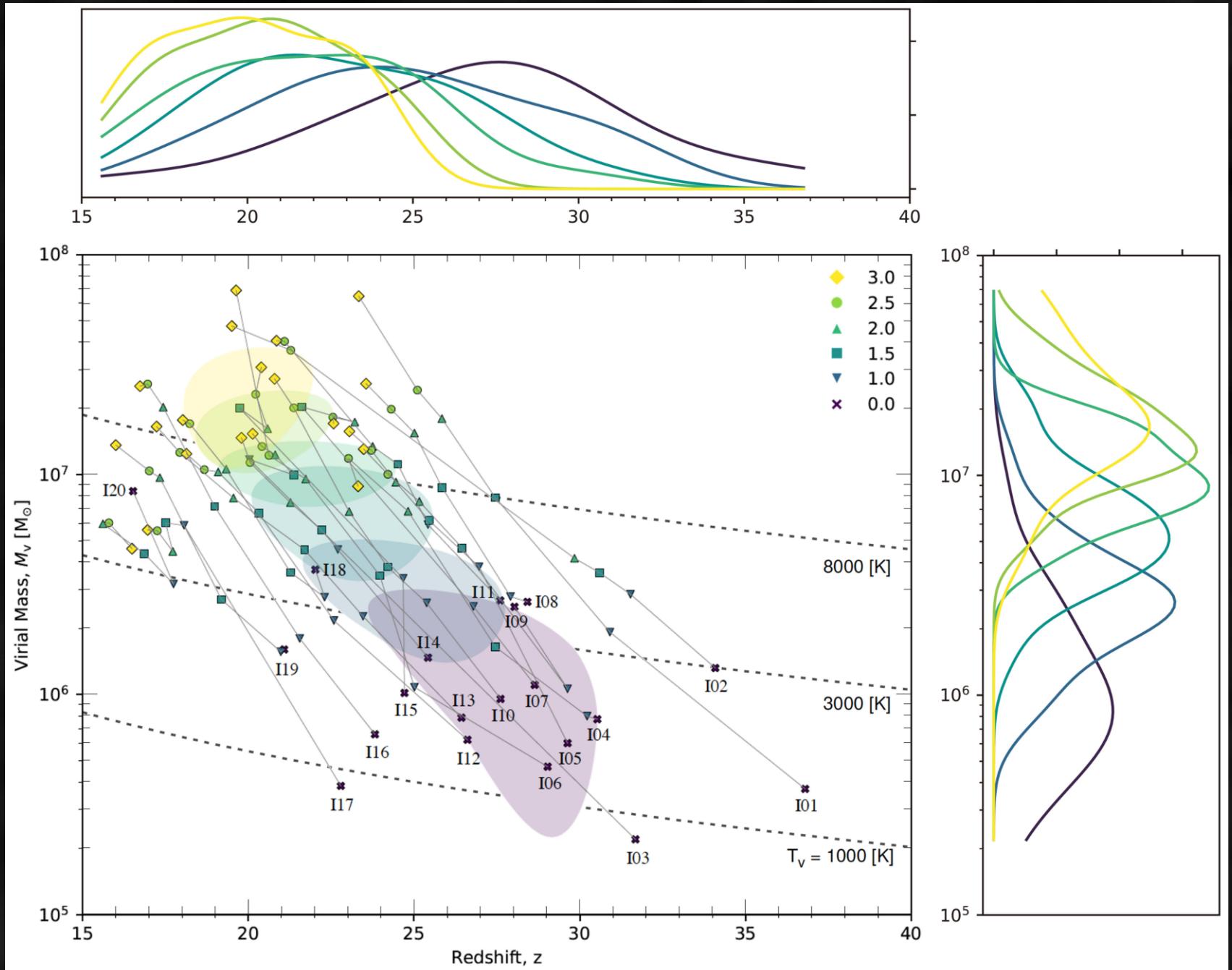
計算上の制約:

- ① 数値分解能: ガスの最大数密度 10^6 [cm^{-3}], それ以上の密度上昇はstiff-EOS法で止める。Stellar feedbackは考慮しない。
- ② 計算時間: 計算領域内のガス密度が初めて 10^6 [cm^{-3}] を上回ってから 200 万年。

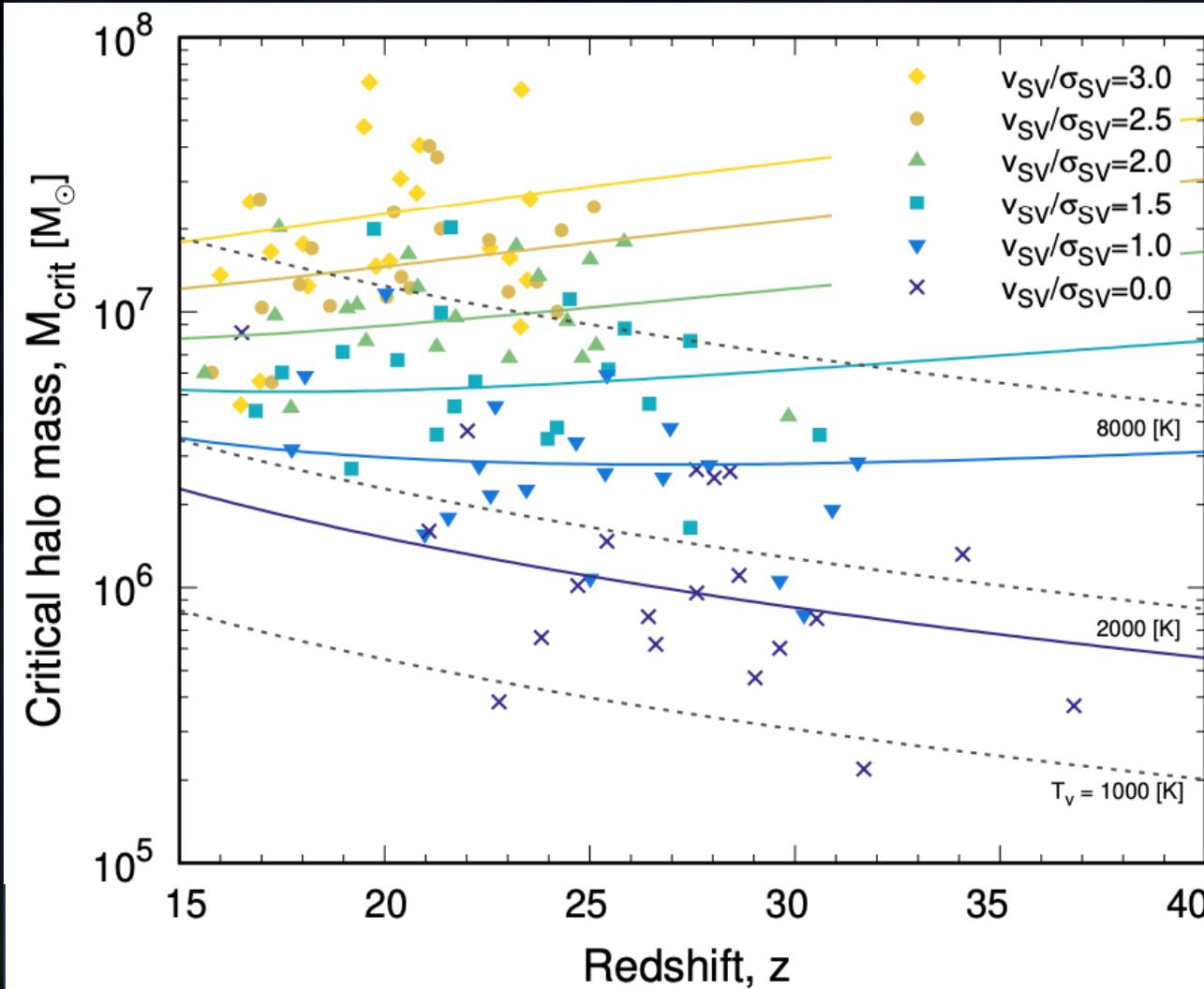
Results

$z - M_{\text{vir}}$

10



Critical Halo Mass: $M_{\text{crit}}(z, v_{\text{SV}})$



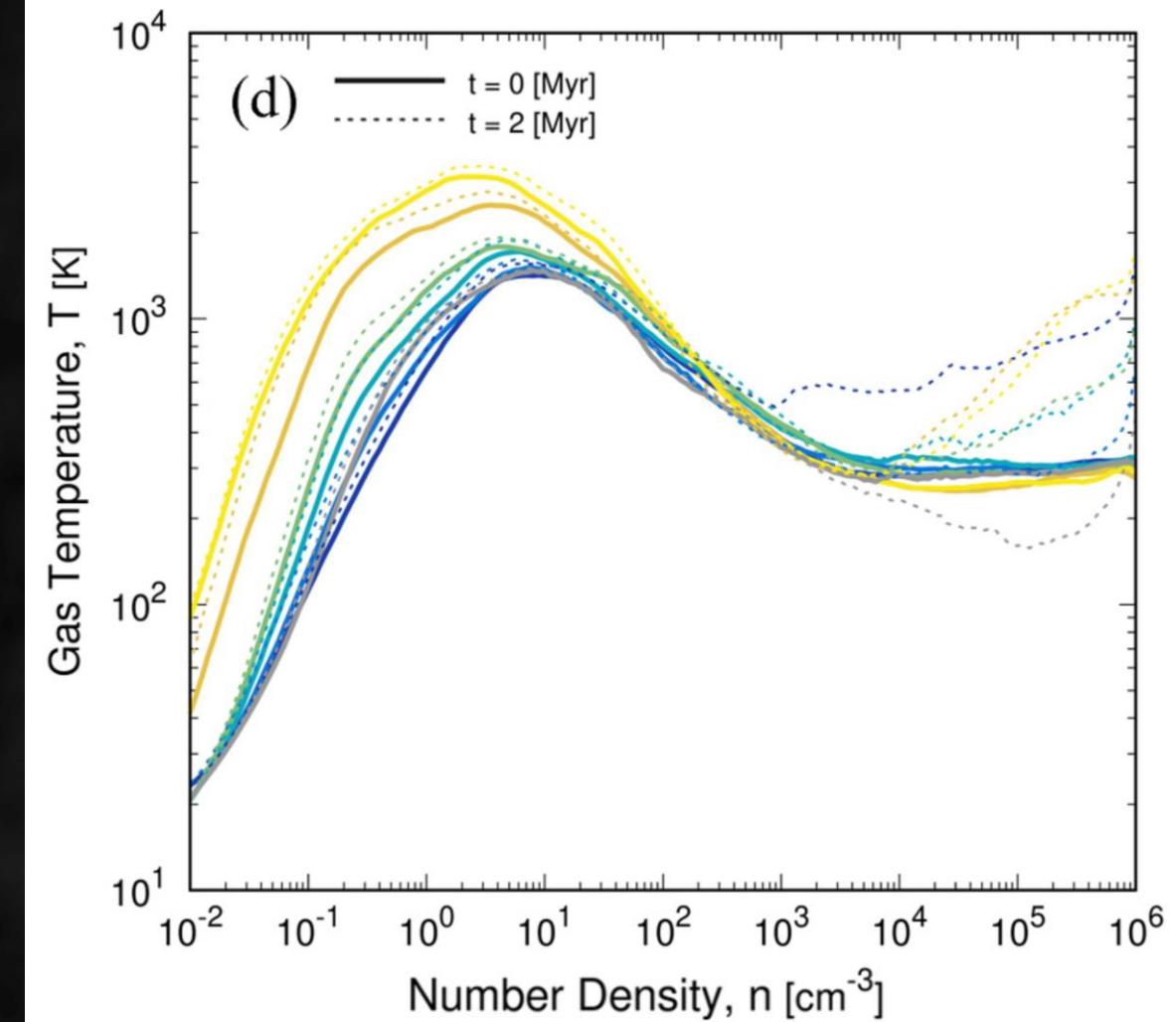
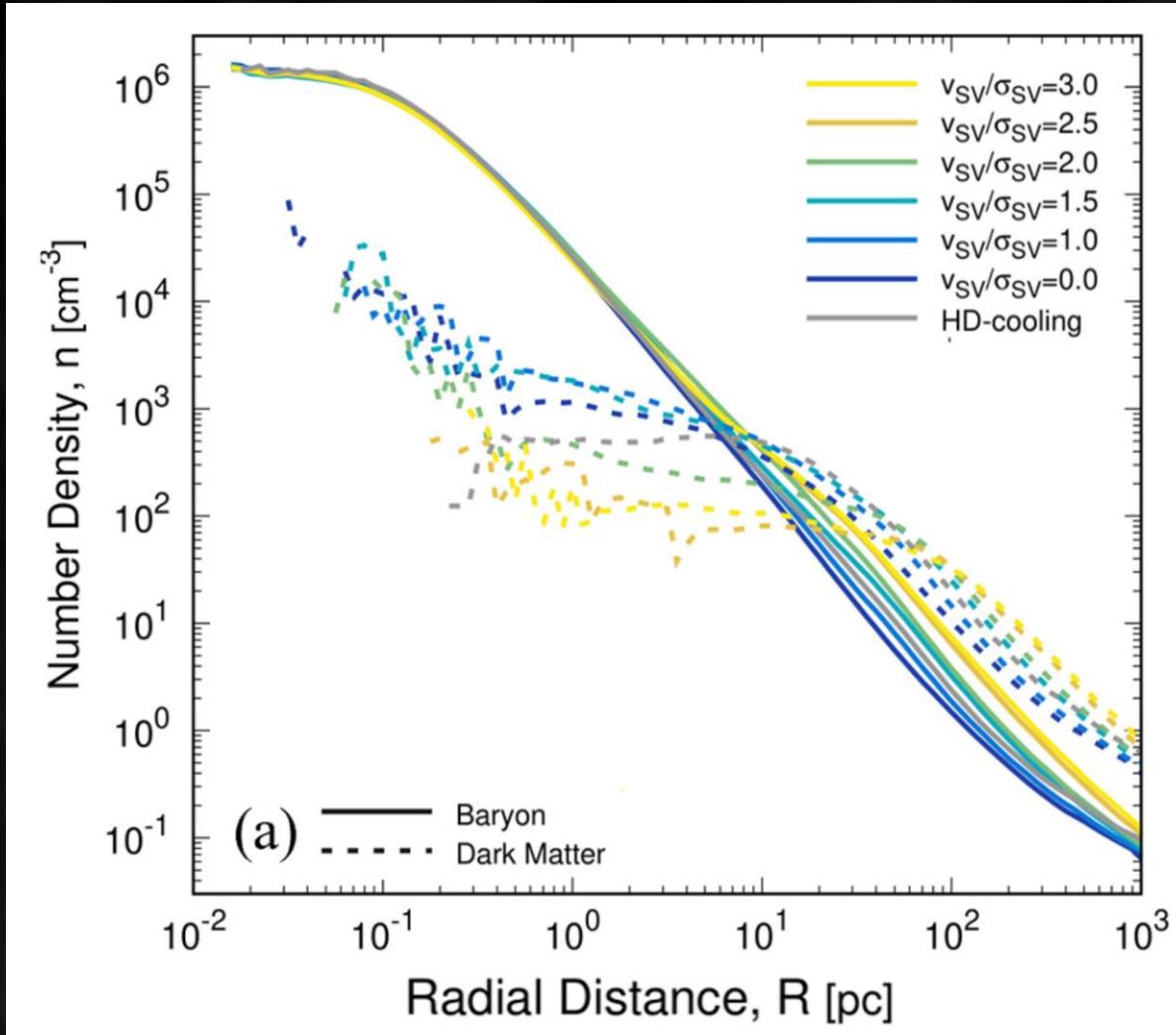
Fitting function

$$M_{\text{cool}} = 1.2 \times 10^6 M_{\odot} \left(\frac{v_{\text{circ}}}{6 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{1+z}{25} \right)^{-\frac{3}{2}}$$

$$v_{\text{circ}} = \sqrt{v_{\text{circ},0}^2 + [\alpha v_{\text{SV}}(z)]^2}$$

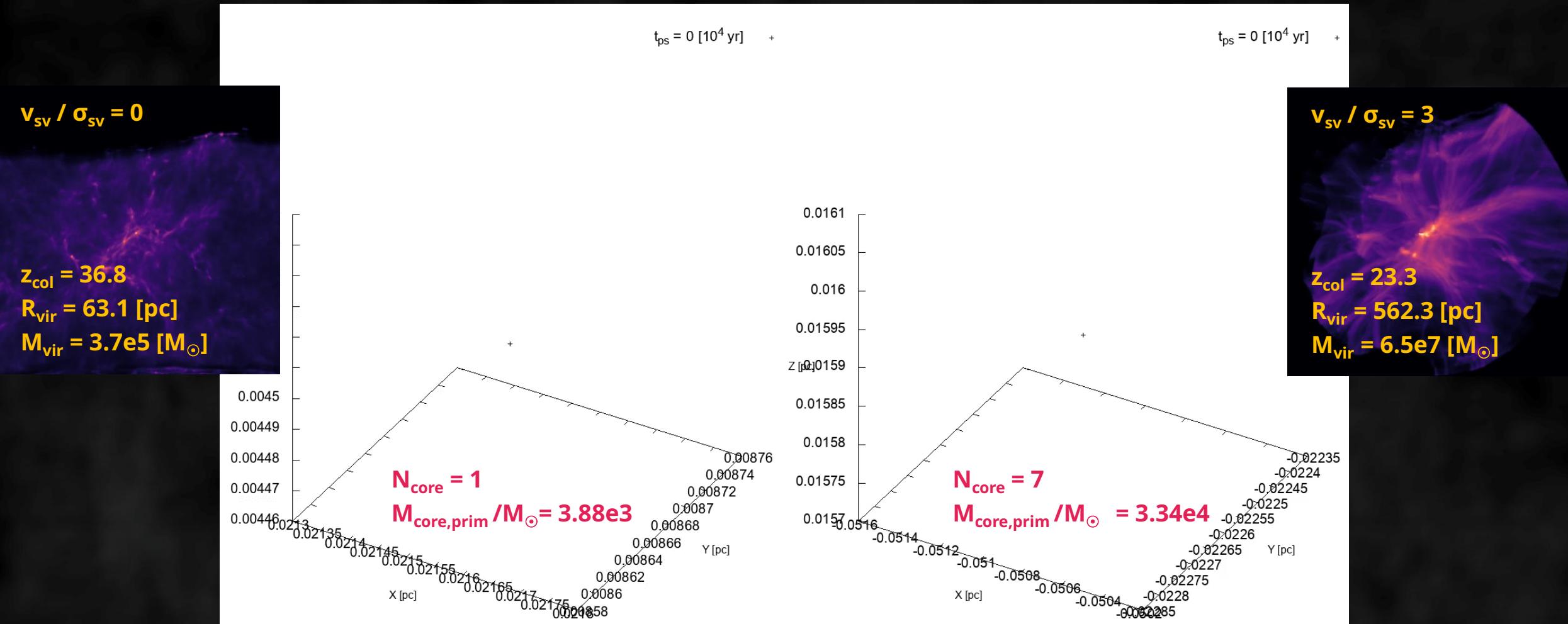
$$v_{\text{circ},0} = 6.0 \text{ km s}^{-1}, \alpha = 7.8$$

Dynamical and thermal properties of gas clouds



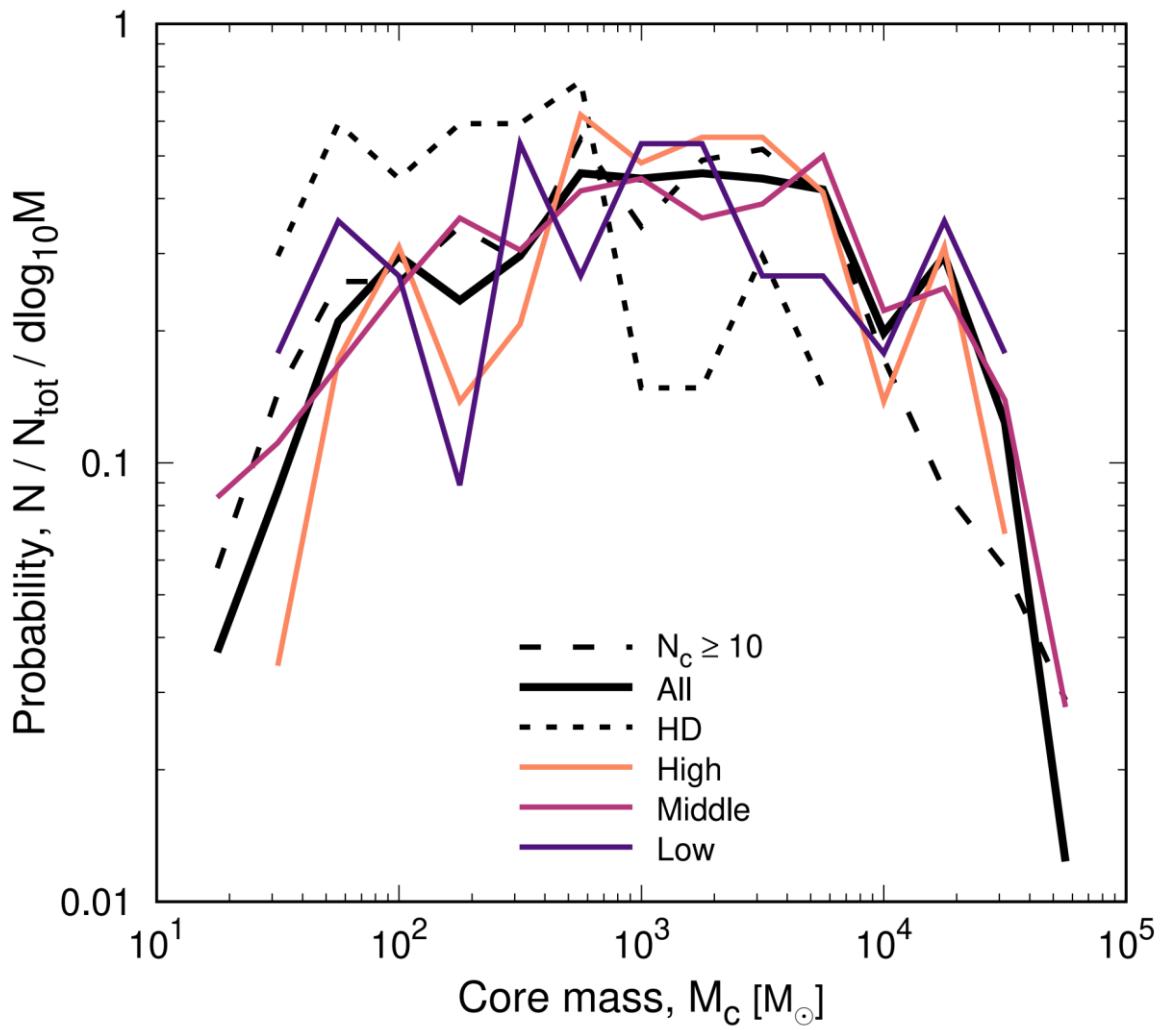
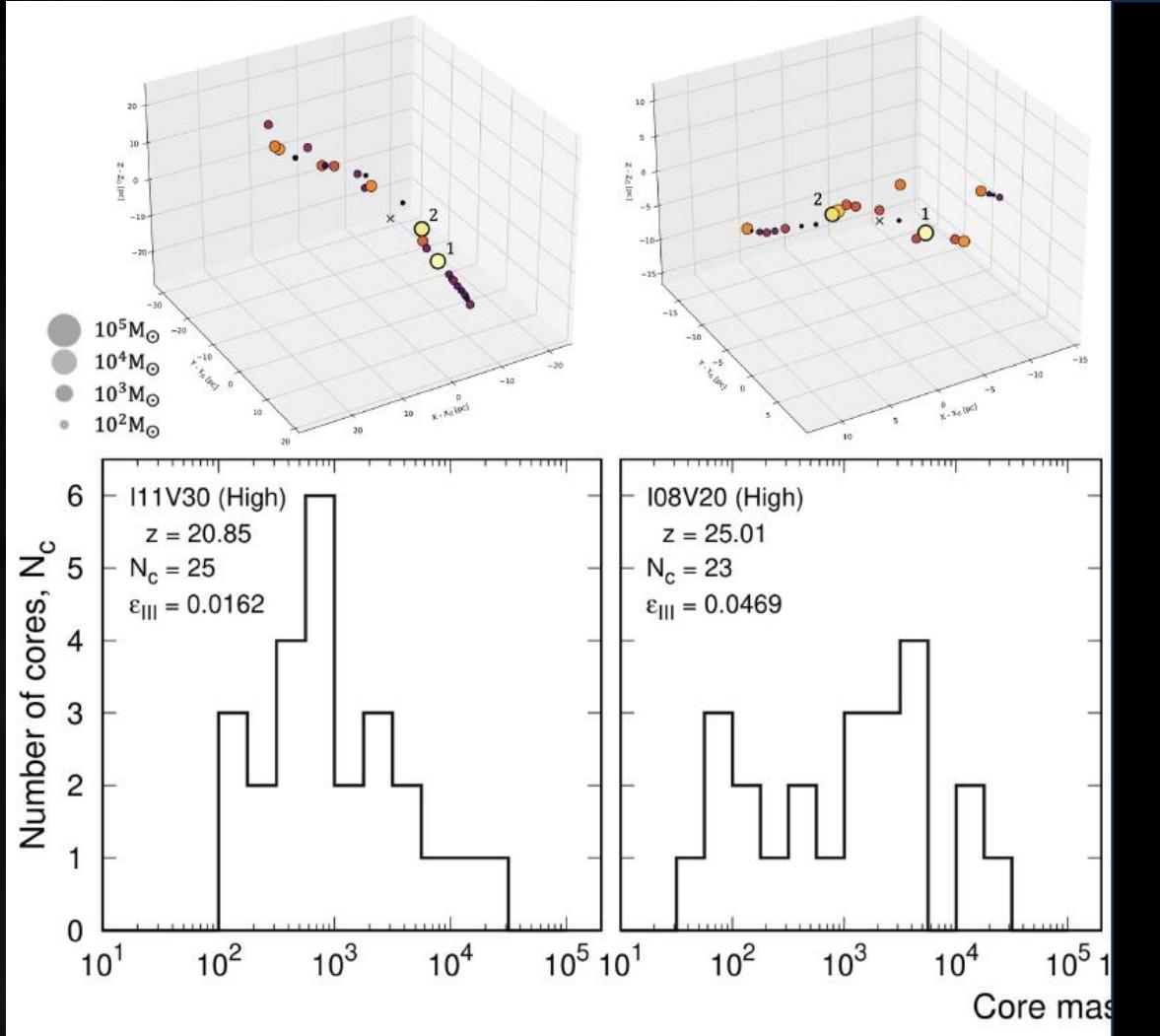
Long-term evolution of massive, filamentary clouds

Core ... dense regions (SPH particles) where $n > n_{th} = 10^6 \text{ [cm}^{-3}\text{]}$



Core Mass Function

Core ... dense regions where $n > 10^6$ [cm $^{-3}$]



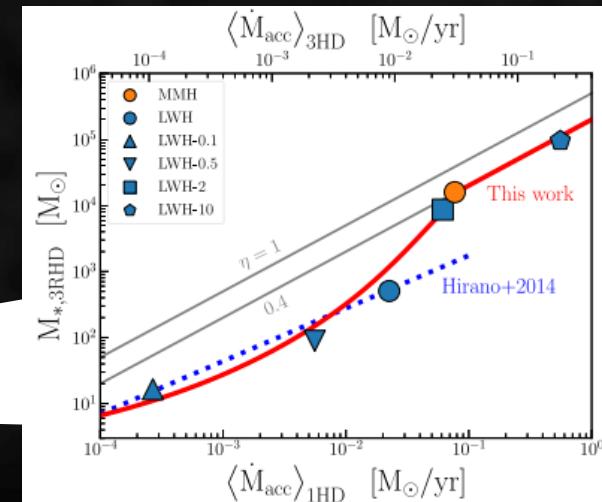
SMBH seed candidate

コアで形成する初代星質量を、ガス降着率から推定する。今回はSMBH seedとなる大質量星を探すため、Toyouchi et al. (2023)の関数を用いる。

$10^4 [M_\odot]$ 以上の初代星が誕生するコアは全モデルに10例確認。

最大の初代星質量 ... $3.90 \times 10^4 [M_\odot]$

複数の大質量初代星 ... $\{2.66 \times 10^4, 1.30 \times 10^4\} [M_\odot]$
 $\{1.78 \times 10^4, 1.10 \times 10^4\} [M_\odot]$



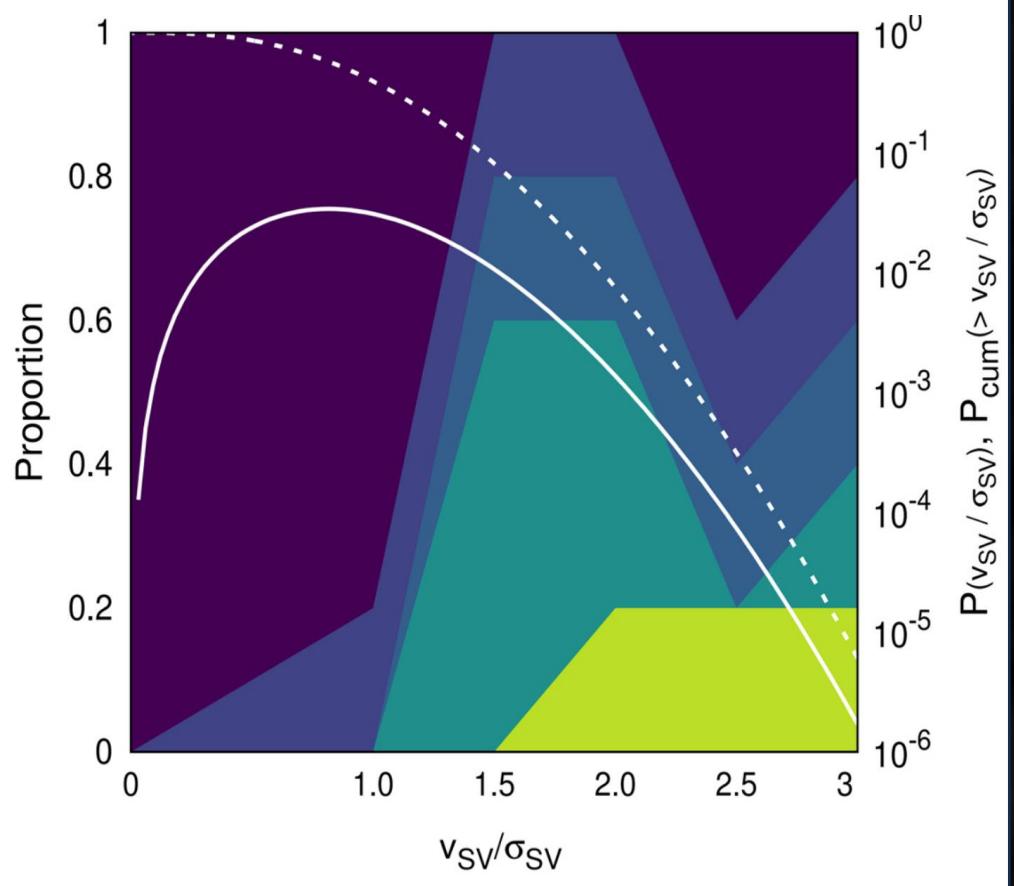
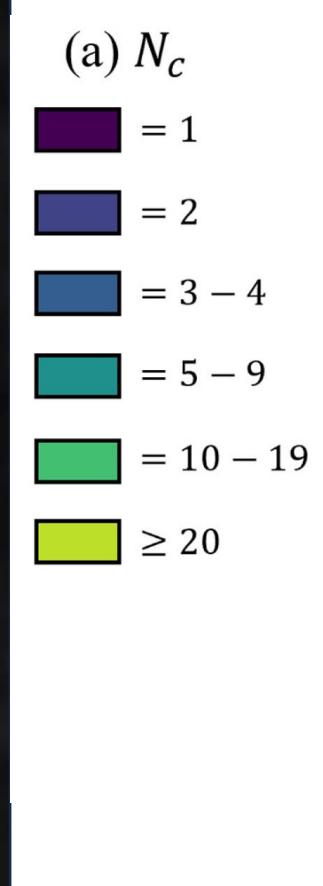
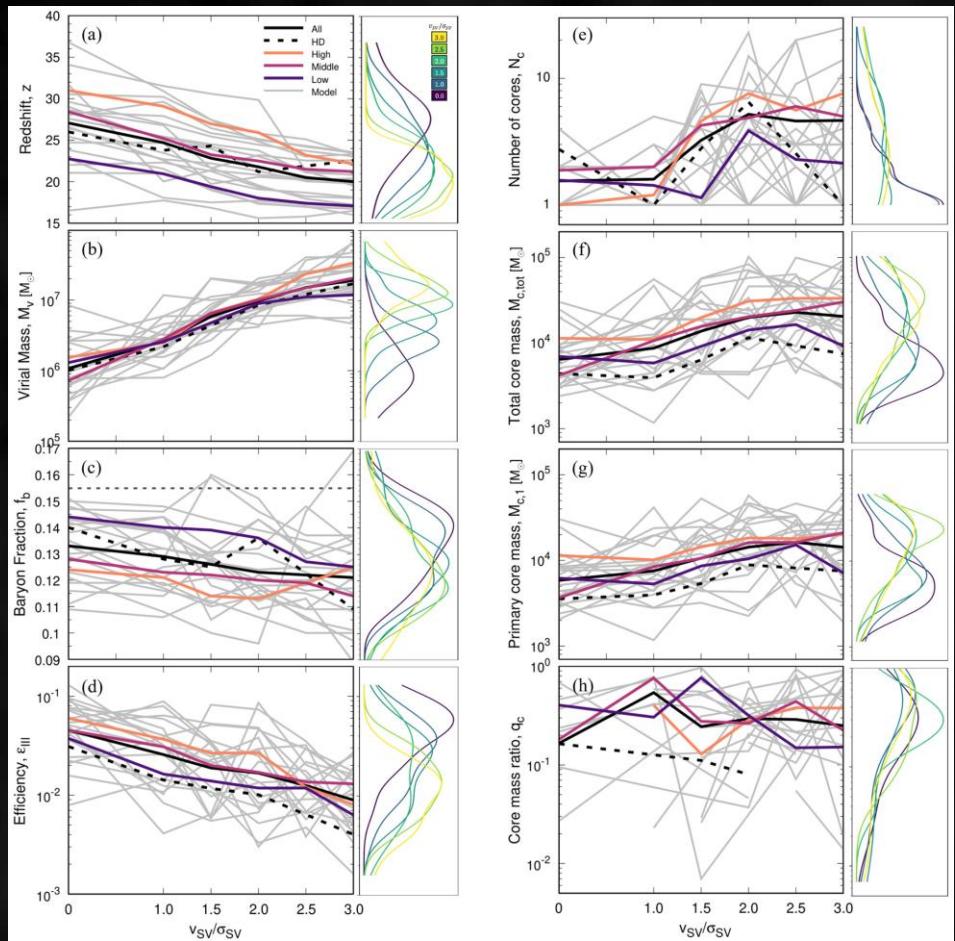
References

Toyouchi et al. (2023)

Model	$\dot{M}_{\text{cloud}} [M_\odot/\text{yr}]$	$M_* [M_\odot]$ by Toyouchi et al. (2022)
10525	0.195	3.90×10^4
10830	0.158	3.16×10^4
10630	0.134	2.68×10^4
10310	0.133	2.66×10^4
11325	0.103	2.07×10^4
11030	0.089	1.78×10^4
10320	0.069	1.38×10^4
10310	0.065	1.30×10^4
11030	0.055	1.10×10^4
11110	0.054	1.08×10^4

サーベイ・シミュレーションの示唆

SV依存性: 初代星形成は $v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{SV}} = 1.5$ 以上で変化



モデルの応用研究

標準的なSV ($v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{SV}} \sim 1.0$) ... 典型的な初代星形成

中間的なSV ($v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{SV}} > 1.5$) ... 初代星星団形成

- 連星, 星団の力学進化 (with Fujii)
- 第二世代星形成への影響 (with Chiaki)

大きなSV ($v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{SV}} > \text{XXX}$) ... 大質量初代星形成

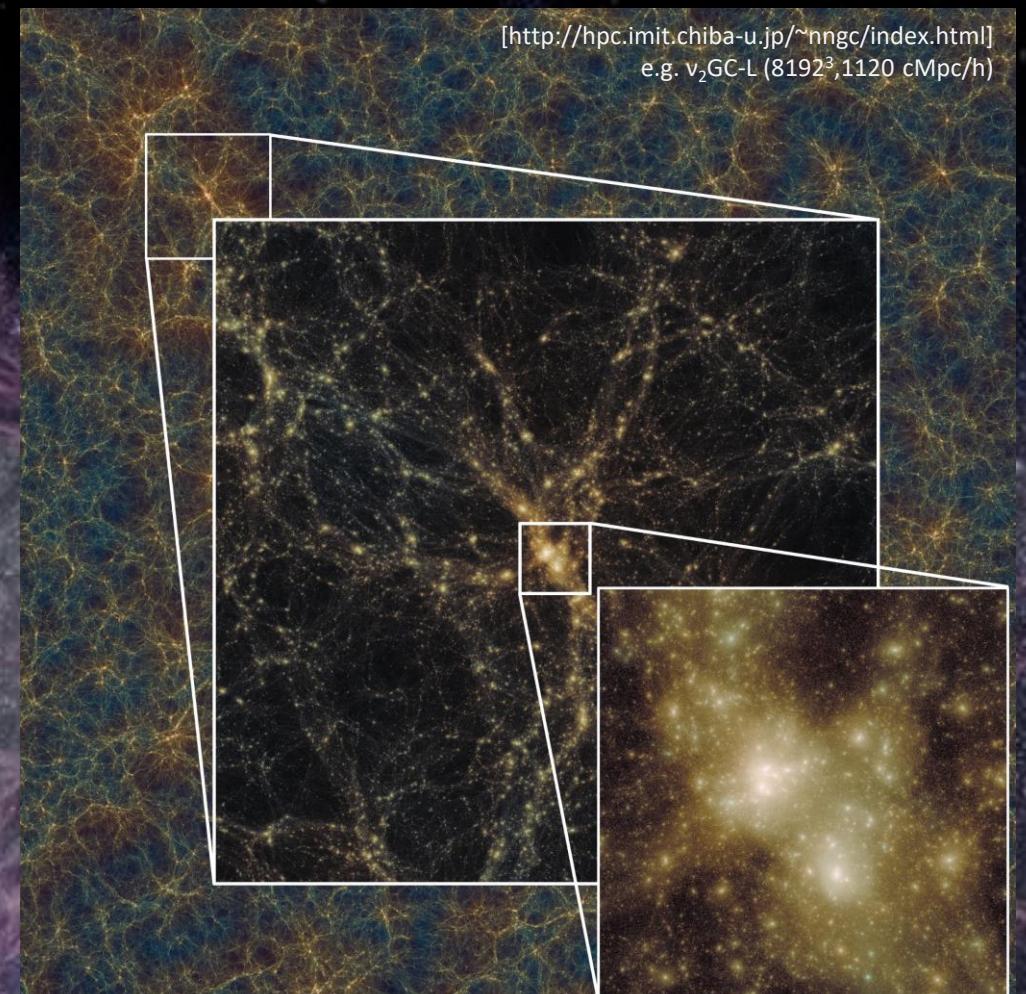
- (R/M)HD計算 (e.g., Sugimura+2023; with Machida)
- 最終BH質量 (GR不安点; with Umeda)

準解析的モデルへの適用

- 16hMpc model (Ishiyama & Hirano in prep)

N-body + semi-analytic model

[<http://hpc.imit.chiba-u.jp/~nngc/index.html>]
e.g. $v_2\text{GC-L}$ ($8192^3, 1120 \text{ cMpc/h}$)



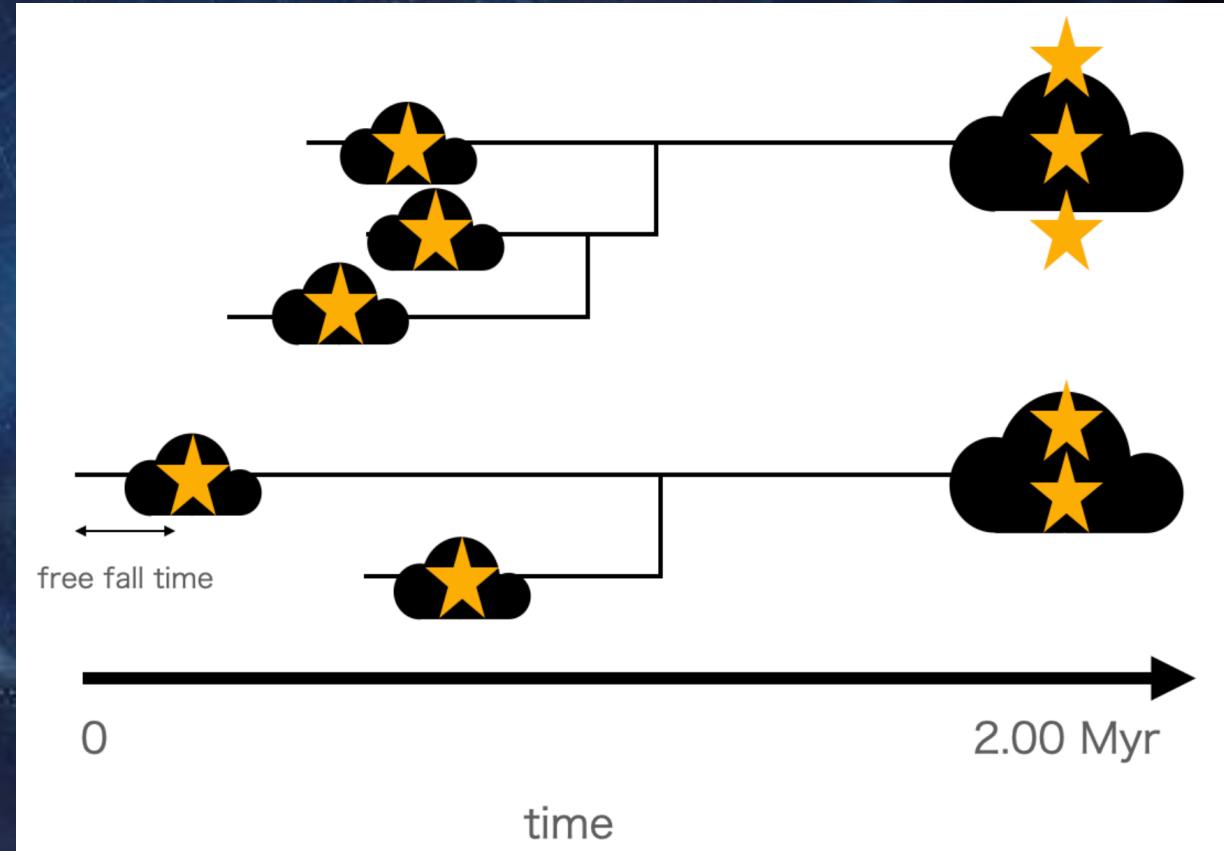
From CMF to IMF: Binary / Cluster

今回解析したのは星形成高密度領域 (“コア”), その質量分布 (Core Mass Function; CMF)

200万年の間にコア内での初代星形成、初代星を持つコアの合体が起きている。

コアのmerger treeを解析し、初代星が形成する時刻を特定する。その時のコアの物理量より初代性質量を推定し、最終的なIMFを構築する。Merger treeより、初代星 (BH) 連星の出現率も計算可能。

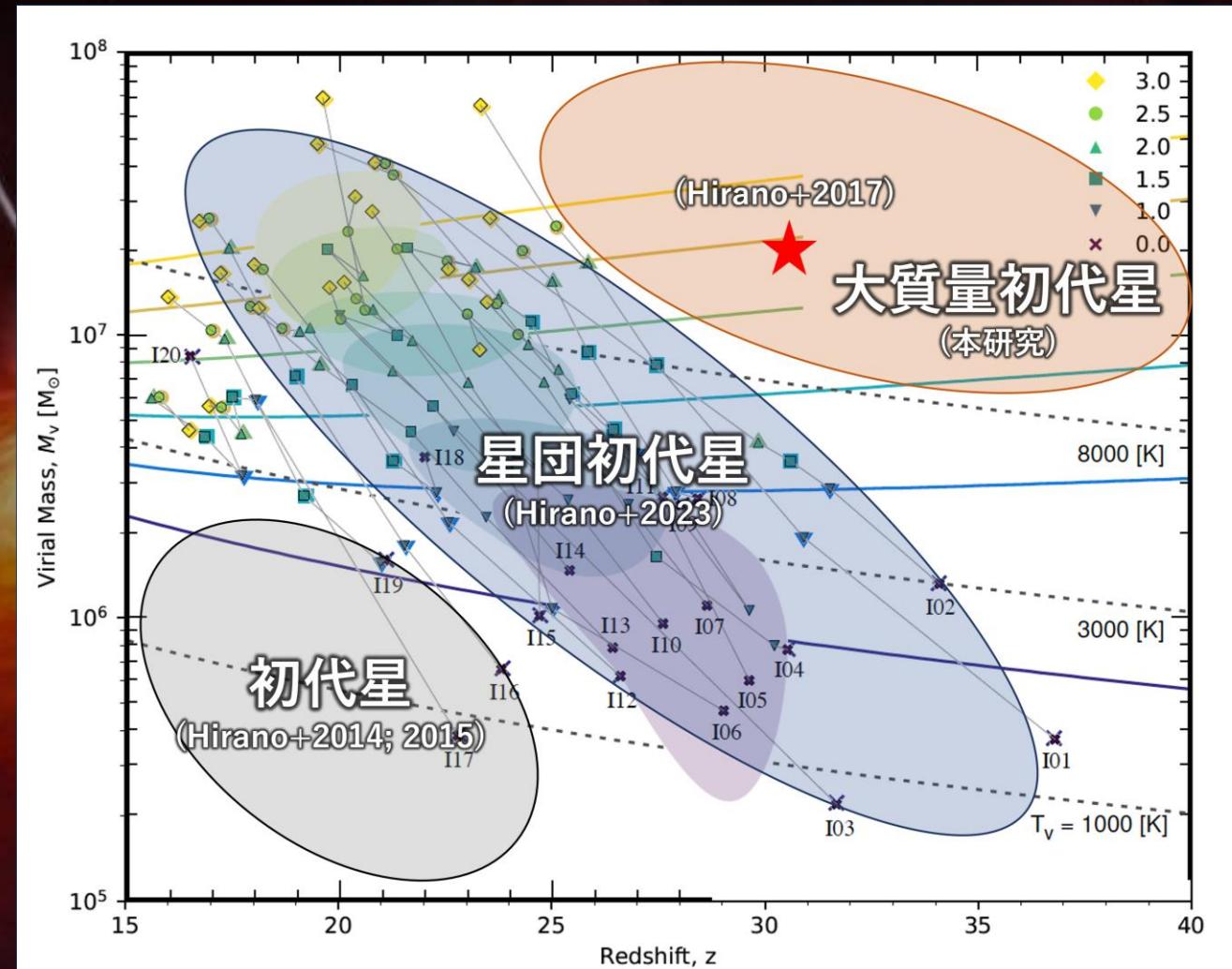
※ コア内の初代星形成において、星周円盤の分裂によってさらなる連星形成の可能性がある
(e.g., Sugimura+2020; 2023)



Formation criterion of SMBH seed

今回調べた $M_{\text{crit}}(z, v_{\text{sv}})$ 範囲は星団初代星に
対応。SMBH seedとなる大質量初代星の形成
条件を探るためには、よりhigh-zかつ high- M_{vir}
を調べる必要がある。

星団・大質量初代星の形成条件 (M_{crit}) を切り
分ける。 M_{crit} を準解析的モデルに適用して
SMBH seedの形成率を求める。観測されてい
る遠方クエーサーの数密度と比較する。



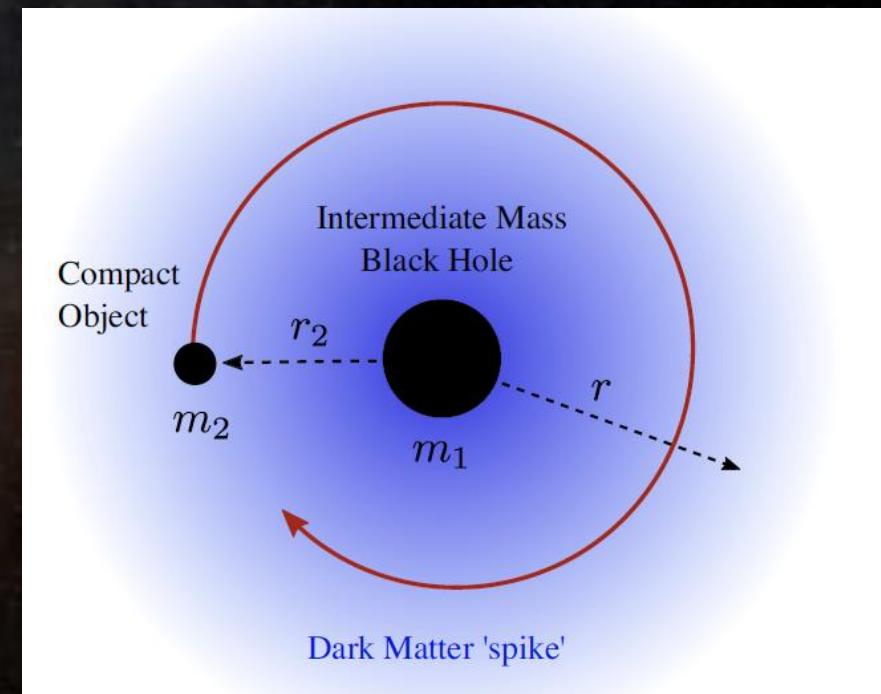
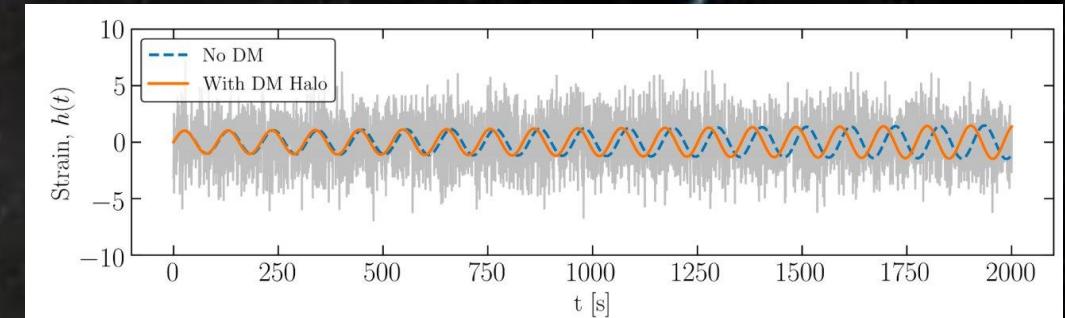
DM spike: 重力波波形への影響

恒星質量BH(SMBH)が中間質量BH(IMBH)に合体する際、IMBHが高密度DMを伴う場合 (“DM spike”)、SMBHとDM spikeとの相互作用のため重力波波形が変化する。

DM spikeの形状はDMの素粒子論的モデルに依存するため、DMの物理的性質を制限可能。

初代星はDM (mini)haloの密度中心で誕生するため、DM spikeを伴うと考えられているが、BH近傍までのDM密度構造を数値分解した数値シミュレーションは行われていない。

- References
- Kavanagh et al. (2020) PhRvD
 - Cole et al. (2023) NatAs
 - Cole et al. (2023) PhRvD



“ブラックホールの巣としての初代星形成領域”

宇宙論的効果 Streaming Velocity の影響に着目した初代星形成領域のパラメータ・サーベイを実施した。

(120モデル = 20領域 × 6 SV速度)

初代星形成ガス雲は $v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{SV}} = 1.5$ 以上で大規模フィラメントが分裂することで複数のコアを形成するようになる(星団形成)。

モデルを利用した応用研究を準備中(初代星IMF構築, 超大質量初代星の形成条件, ...)

更新した初代星形成条件は準解析的モデルに適用して、初代銀河・天の川銀河への寄与を調べる。

