

ファーストスターとN体シミュレーション

(ダークマター密度計算)

平野 信吾

東京大学・天文・藤井研でポスドク→牧野研セミナーに参加

UNIVERSE THROUGH TIME

Recombination occurs

380,000 years after the big bang

FIRST STARS form 200–400 million years after the big bang

DARK AGES

Universe forms roughly 13.8 billion years ago

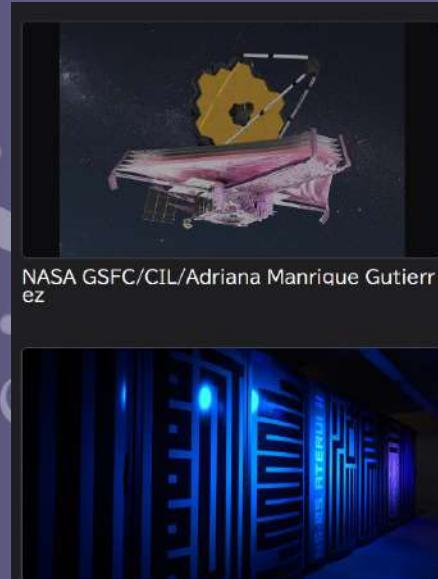
FIRST GALAXIES

Reionization

begins when the first stars start to shine

complete within 1 billion years after the big bang

SUN forms more than 9 billion years after the big bang



コズミック フロント

初期宇宙を切り開け! ジェイムズウェップ1年目の成果

初回放送日: 2023年7月20日

「ジェイムズウェップ宇宙望遠鏡」が観測を始めて1年。初期宇宙の謎の解明に迫る新発見が相次いでいる。天文学に革命を起こすと言われる望遠鏡の最新成果をお届けする。

コズミック フロント

天文シミュレーションがコンピューターの世界を変えた!?

初回放送日: 2023年7月13日

観測、理論につぐ第3の天文学として今、急速な発展を遂げているシミュレーション天文学。コンピューターを使い、望遠鏡で観測できない宇宙の謎を解き明かす。

Credit: JWST



DM density

First star formation

References

Klessen&Glover(2023) for a recent review

N-body

Primordial chemistry

Large-scale structure of the cosmos

HD

Minihalo

10^3 pc

(M)HD

Protostar

0.01 pc

RHD

Stellar Mass

0.1 pc

Abel et al. (2002), Bromm et al. (2002)
Yoshida et al. (2003; 2006)
Hirano et al. (2015)

10^6 pc

Yoshida et al. (2008)
Clark et al. (2011), Greif et al. (2011)
Sur et al. (2010), Turk et al. (2012)
Machida&Doi (2013), Sharda et al. (2020)

Hosokawa et al. (2011; 2013; 2016)
Hirano et al. (2014), Susa et al. (2014)
Sugimura et al. (2020)

First star formation

References

Klessen&Glover(2023) for a recent review

N-body

Primordial

Structure of the cosmos

PISN

LAMOST J1010+2358 (Xing+2023)
SDSS J00182-0939 (Aoki+2014)

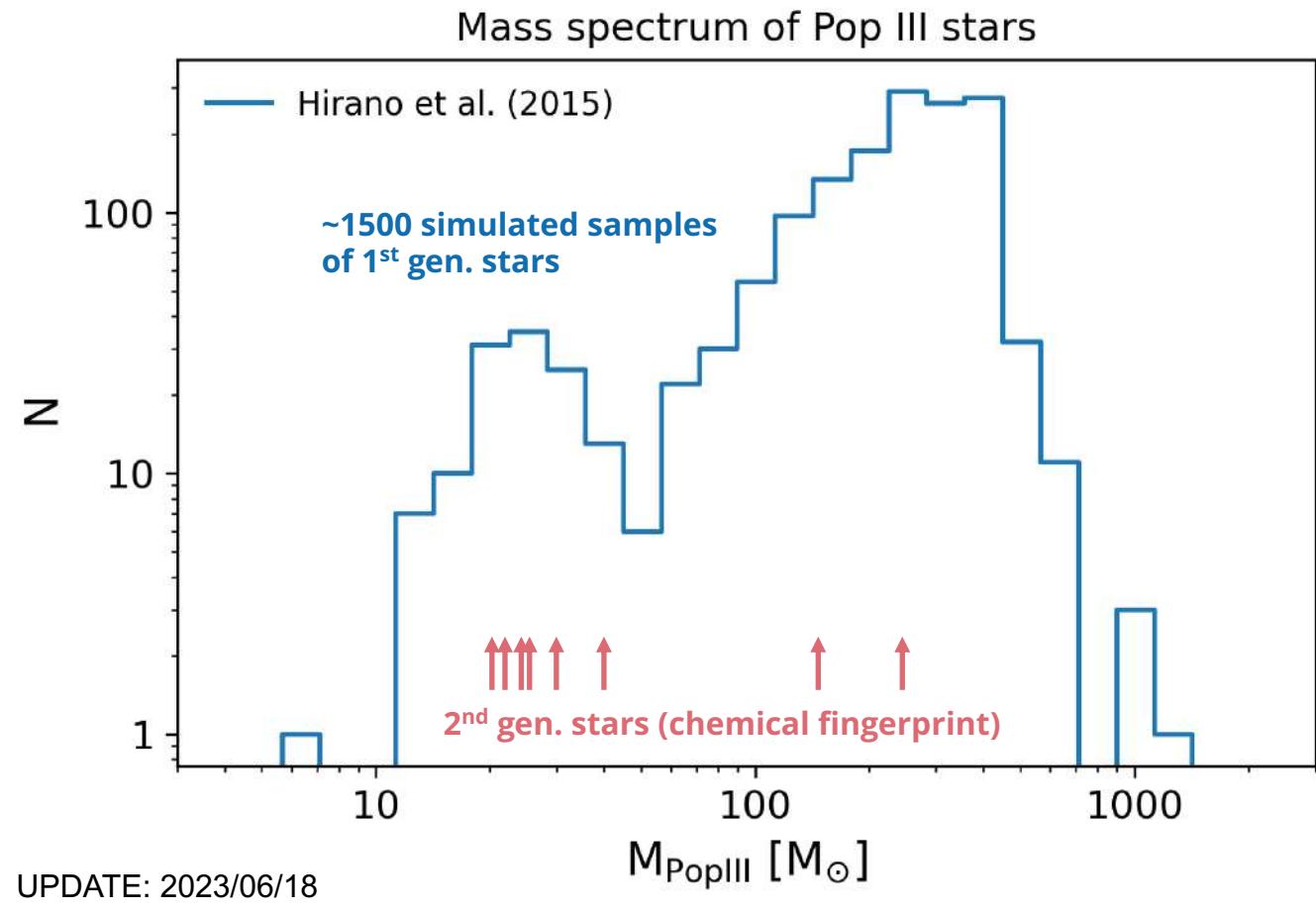
Hypernova

AS0039 (Skuladottir+2021)
SPLUS J2104-0049 (Placco+2021)

CCSN

LAMOST J2217+2104 (Aoki+2018)
HE 0020–1741 (Placco+2018)
SMSS 0313-6708 (Keller+2014; Bessel+2015)
SDSS J102915+172927 (Caffau+2011; Schneider+2012)

HD



RHD

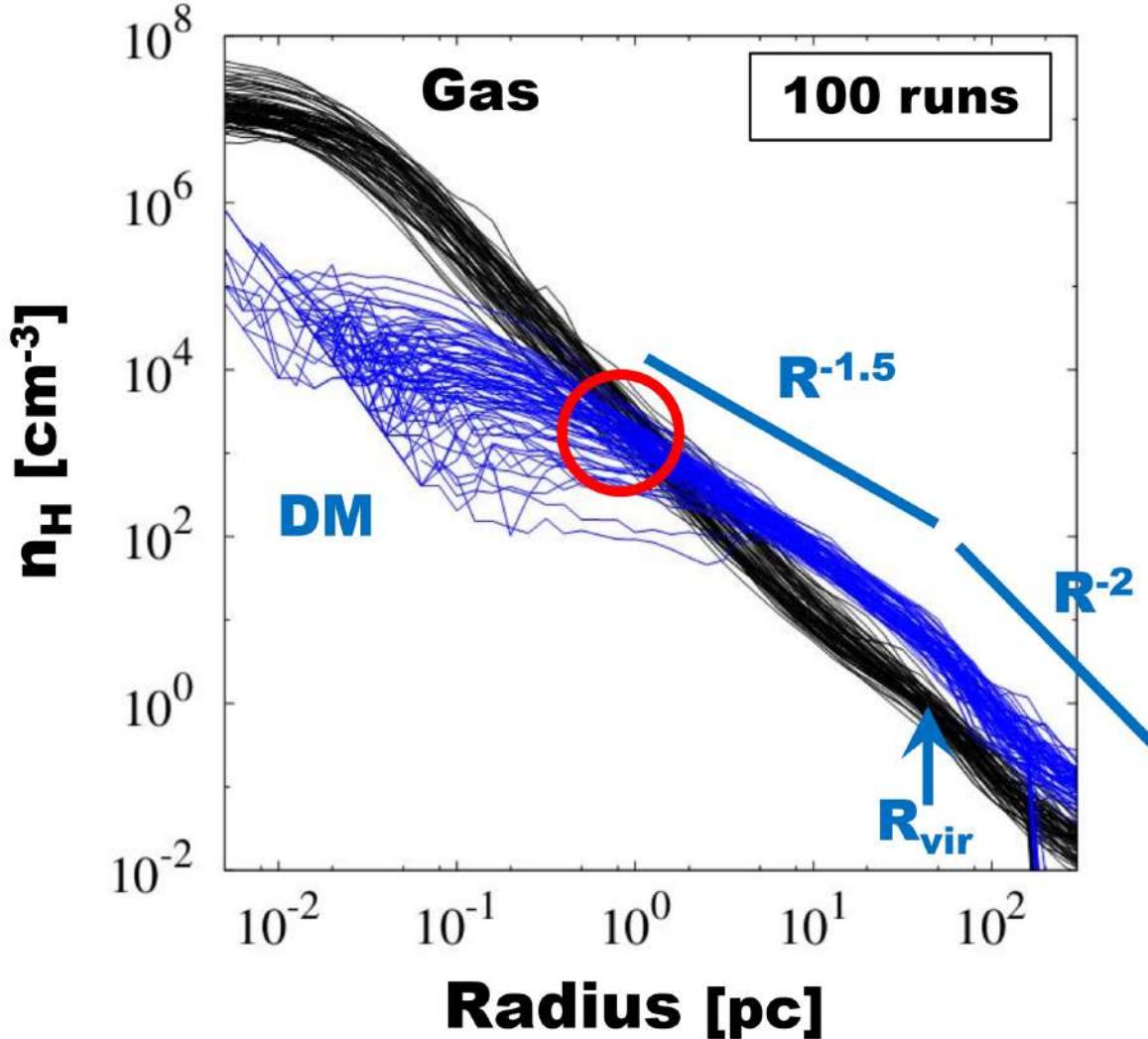
Stellar Mass

0.1 pc

osokawa et al. (2011; 2013; 2016)
hirano et al. (2014), Susa et al. (2014)
ugimura et al. (2020)

DM vs baryon (gas) densities

References
Hirano+(2014)

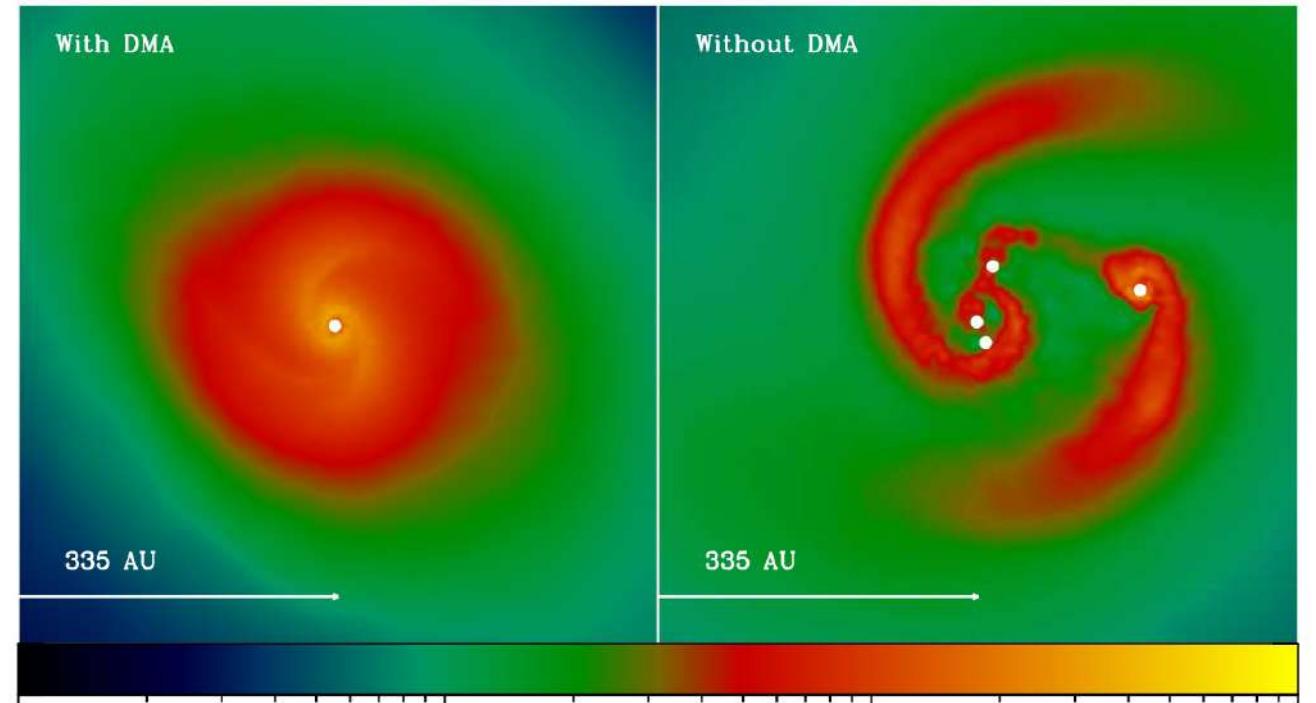
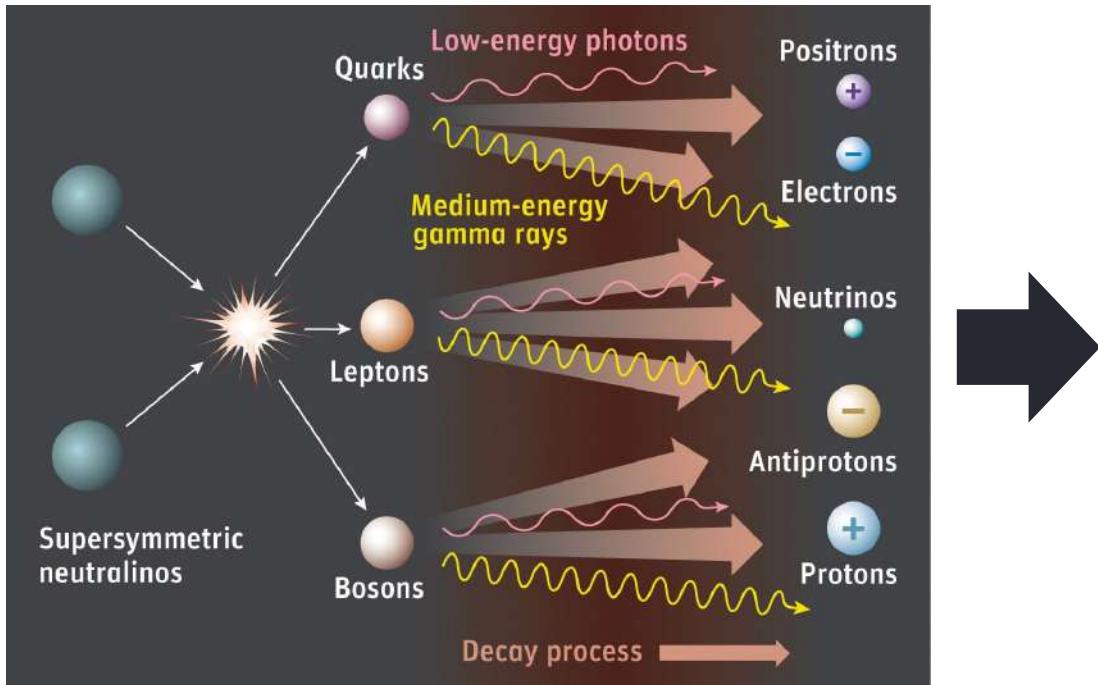


- 宇宙論的シミュレーション with Λ -Cold Dark Matter (Λ CDM) cosmology
- 自己重力不安定ガス雲が形成した時点の DM と baryon (gas) の密度プロファイル
- 密度 $n \sim 10^3 \text{ [cm}^{-3}]$ at $R \sim 1 \text{ [pc]}$ までは、DM 密度の方が高い。
- 宇宙論的スケール (e.g., $> 1 \text{ [Mpc]}$) を計算領域しながら、密度が逆転するスケール ($< 1 \text{ [pc]}$) まで数値分解する必要がある。
- 階層的ズームイン計算

DM density inside the cloud

WIMPs (Weakly interacting massive particles)

Smith et al. (2012)



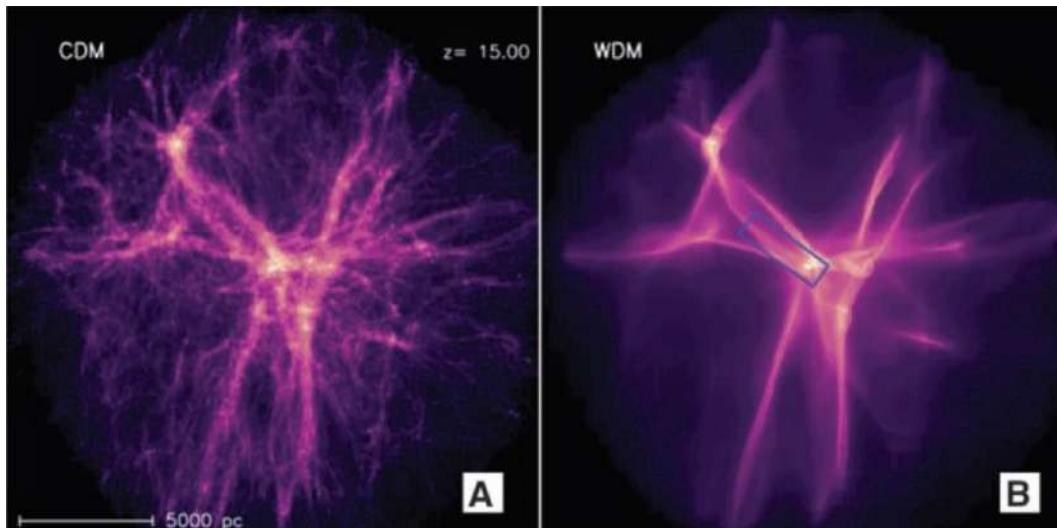
WIMPs DMの対消滅から発生する二次粒子がガス雲にエネルギーを与える(加熱する)と、星形成に影響する
→ 対消滅エネルギーはDM密度の二乗に比例

$$Q_{\text{DM}} = \frac{\langle \sigma v \rangle \rho_{\chi}^2}{m_{\chi}} \text{ GeV cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Small-scale structure formation

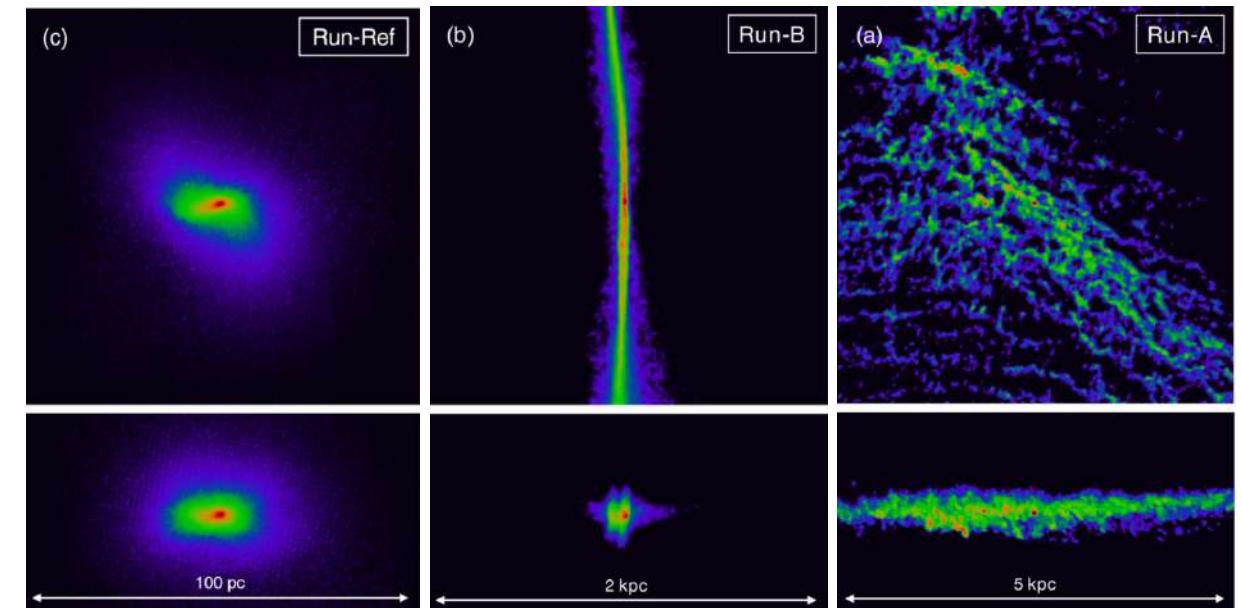
Cold DM vs Warm DM

Gao & Theuns (2007) Science



Cold DM vs Fuzzy DM

Hirano et al. (2018)



CDM
→ $z=28.1$

FDM: 10^{-21} [eV]
→ $z=12.9$

FDM: 10^{-22} [eV]
→ $z=6.5$

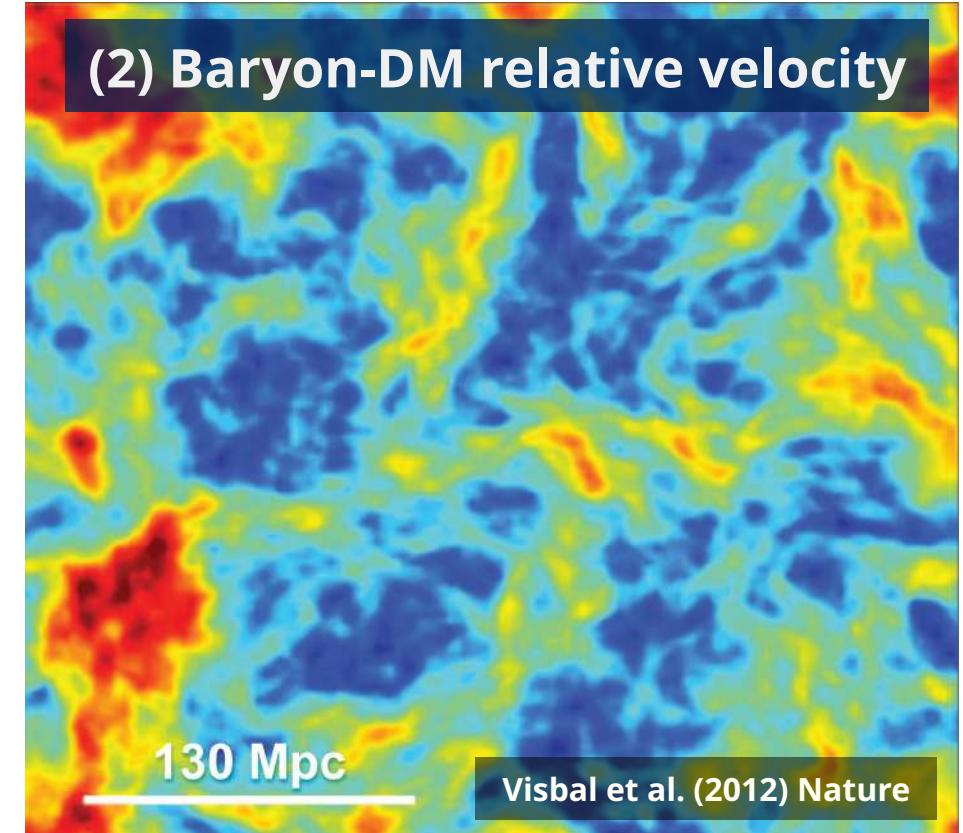
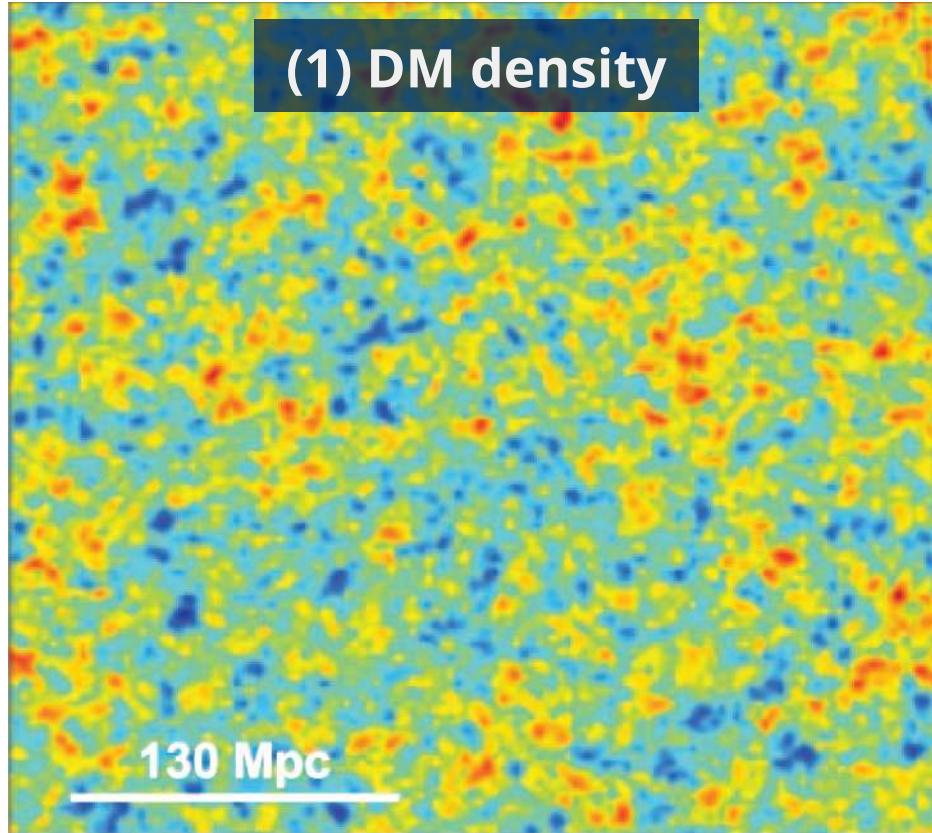
ファーストスター形成をプルーブとした、宇宙論・DMへの制限が可能



Baryon-DM relative velocity

Supersonic streaming motion

References
Tseliakhovich & Hirata (2010)



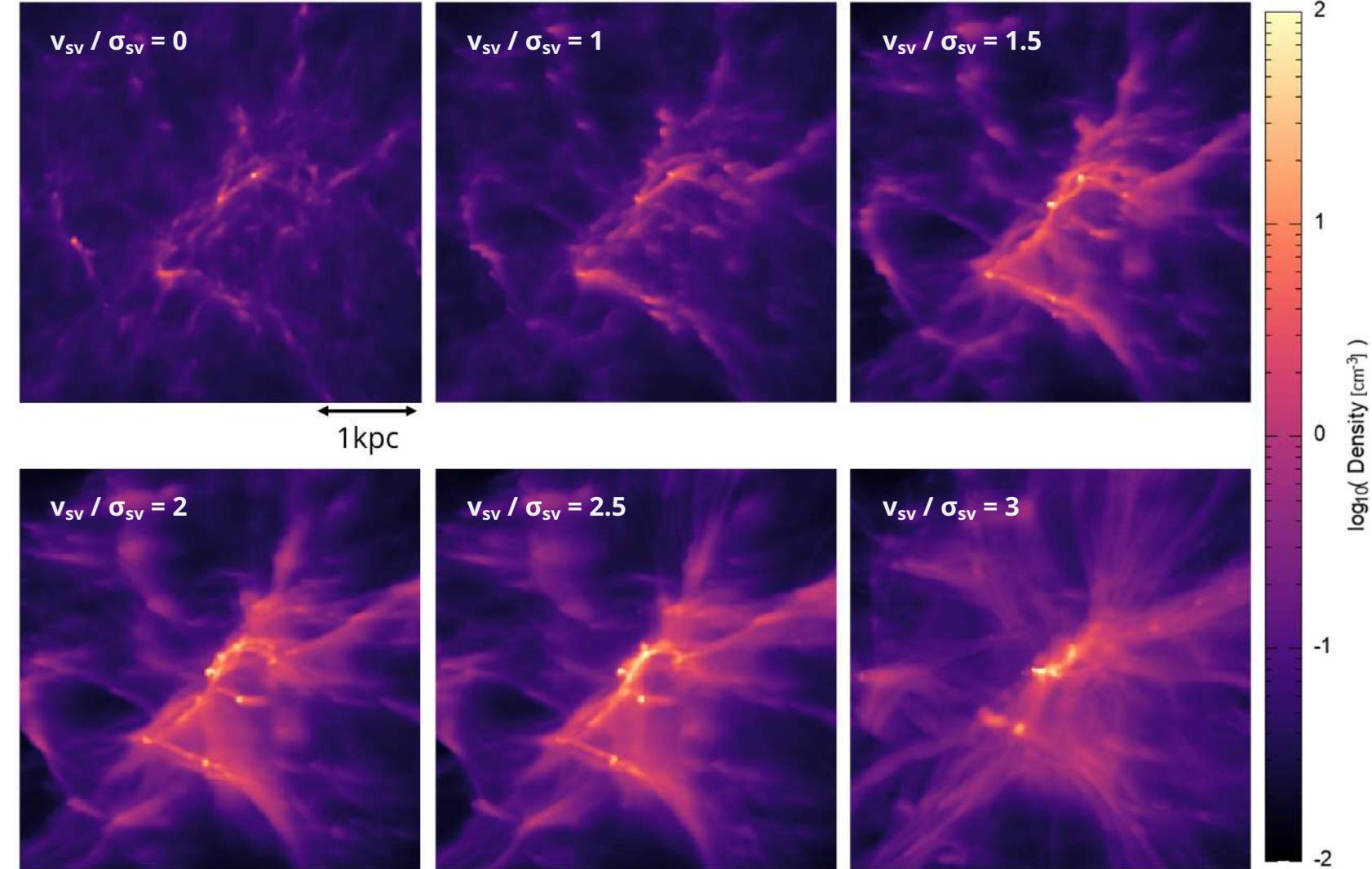
The higher the local density,
the **earlier** the structure formation
in the early universe.

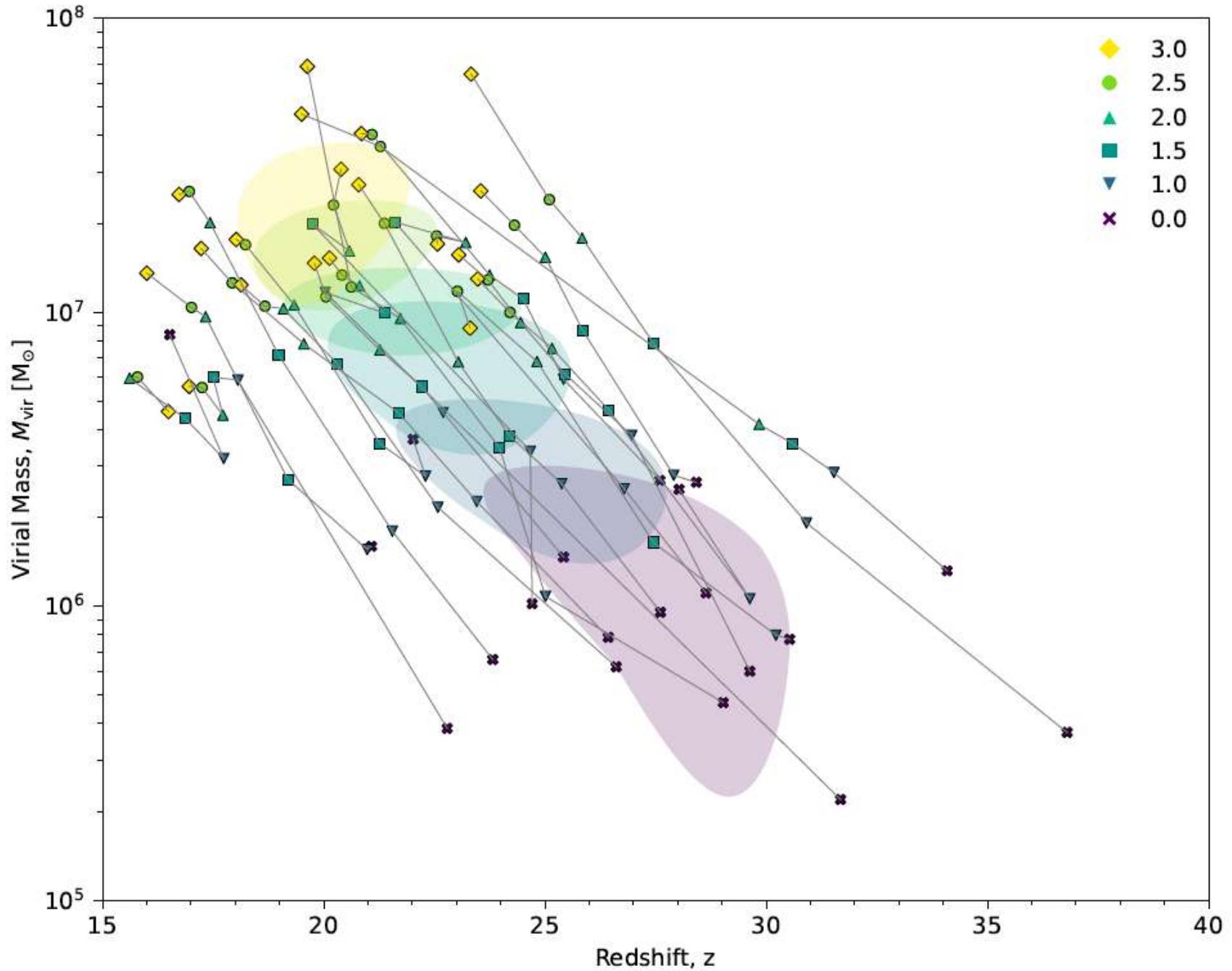
The higher the relative velocity,
the **later** the structure formation
in the early universe.

Delay of structure formation at $z > 10$



Only adding different coherent relative velocities along the x-axis direction on the cosmological initial conditions.



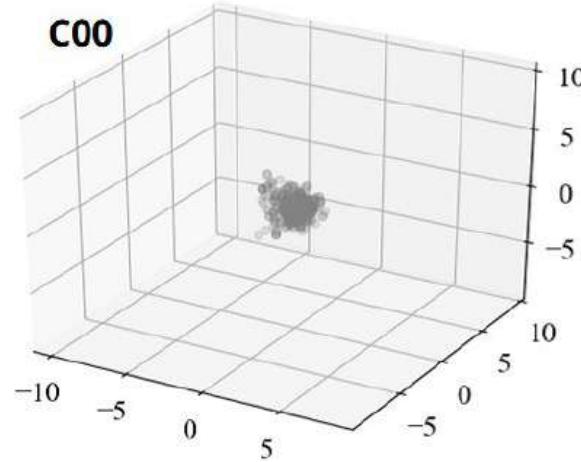


$v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{V}}$	\bar{z}	\bar{M}_{vir} (M_\odot)
0.0	27.073	1.07257×10^6
1.0	24.691	5.83757×10^6
1.5	22.833	5.83757×10^6
2.0	21.778	9.69394×10^6
2.5	20.489	1.50201×10^7
3.0	19.996	1.90816×10^7

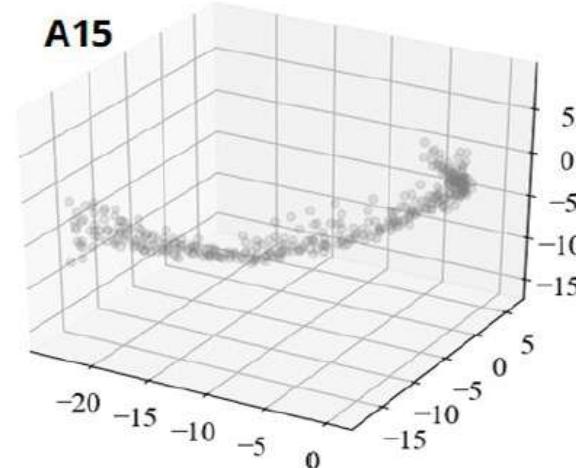
Averaged values
for the same initial
 $v_{\text{SV}}/\sigma_{\text{V}}$

Morphology of dense gas cloud

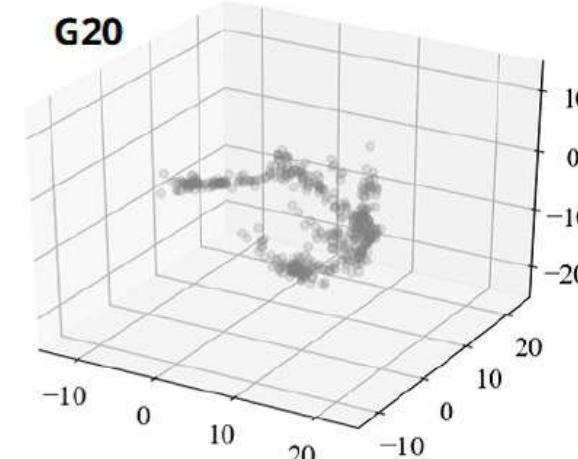
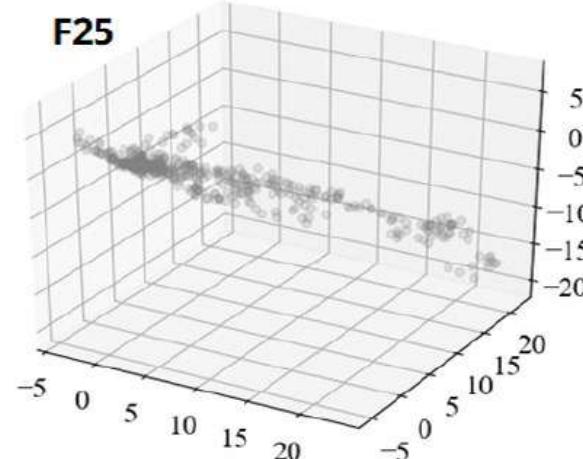
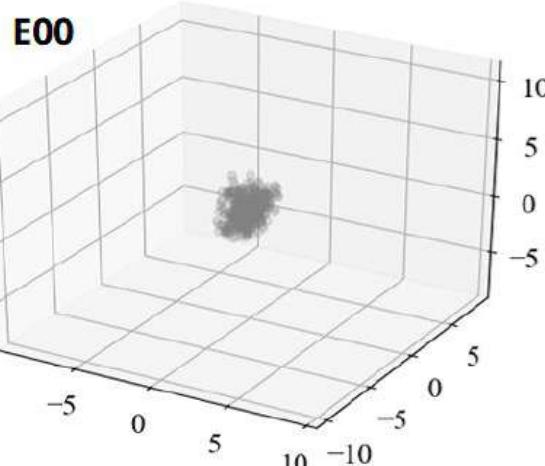
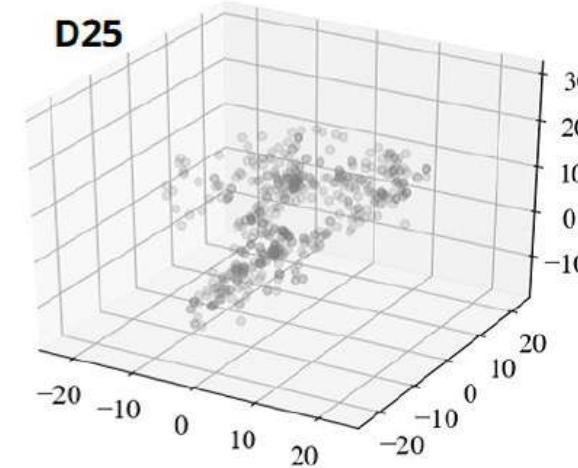
Type S(pherical)



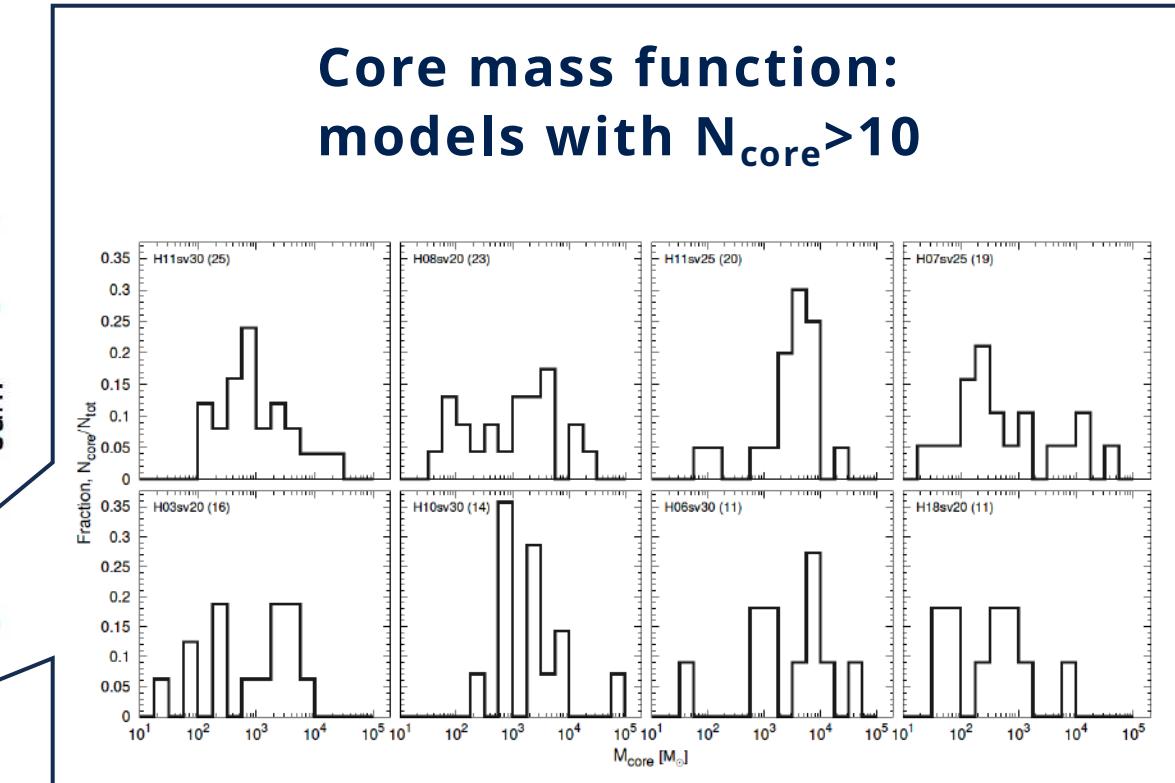
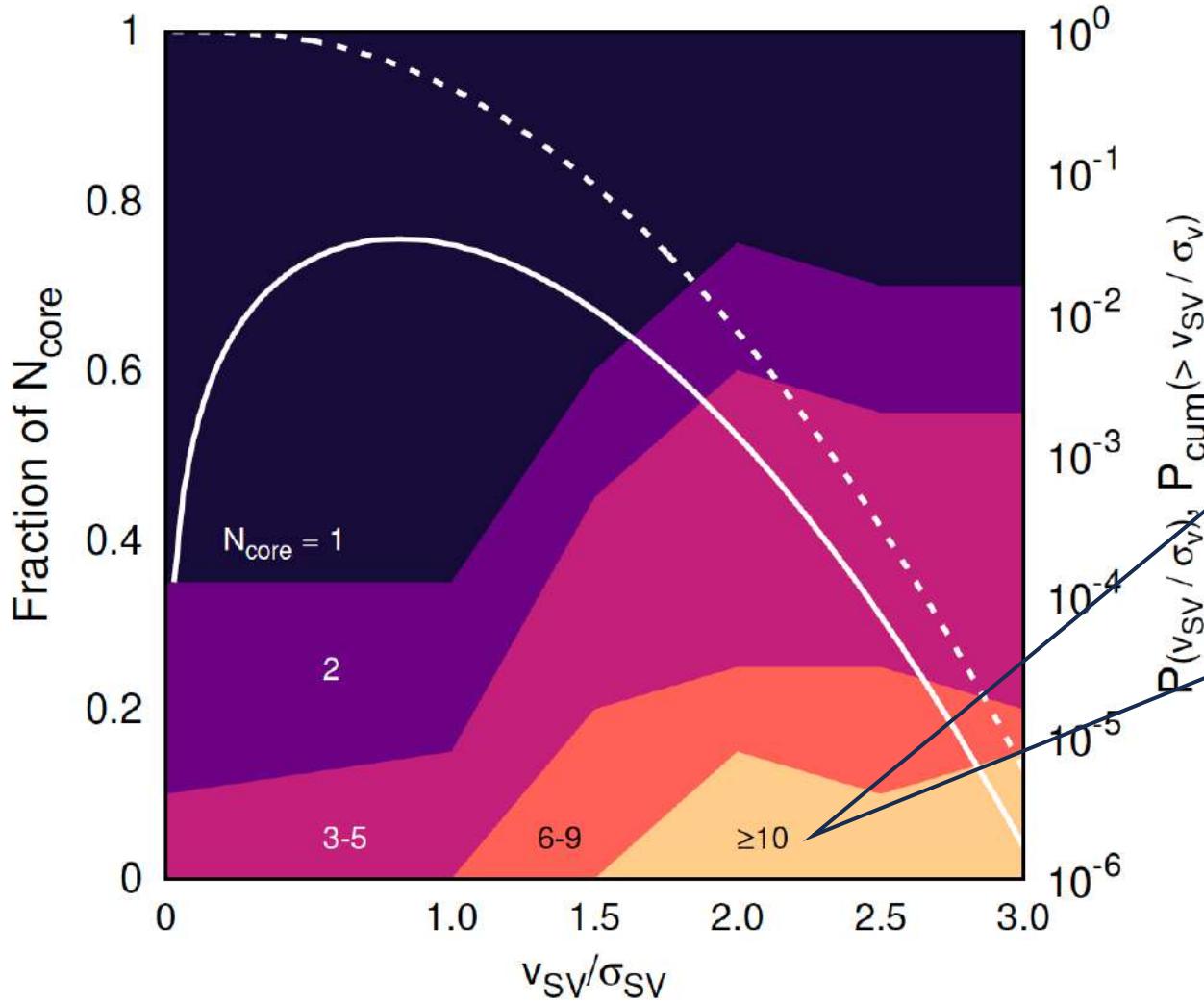
Type F(ilamentary)



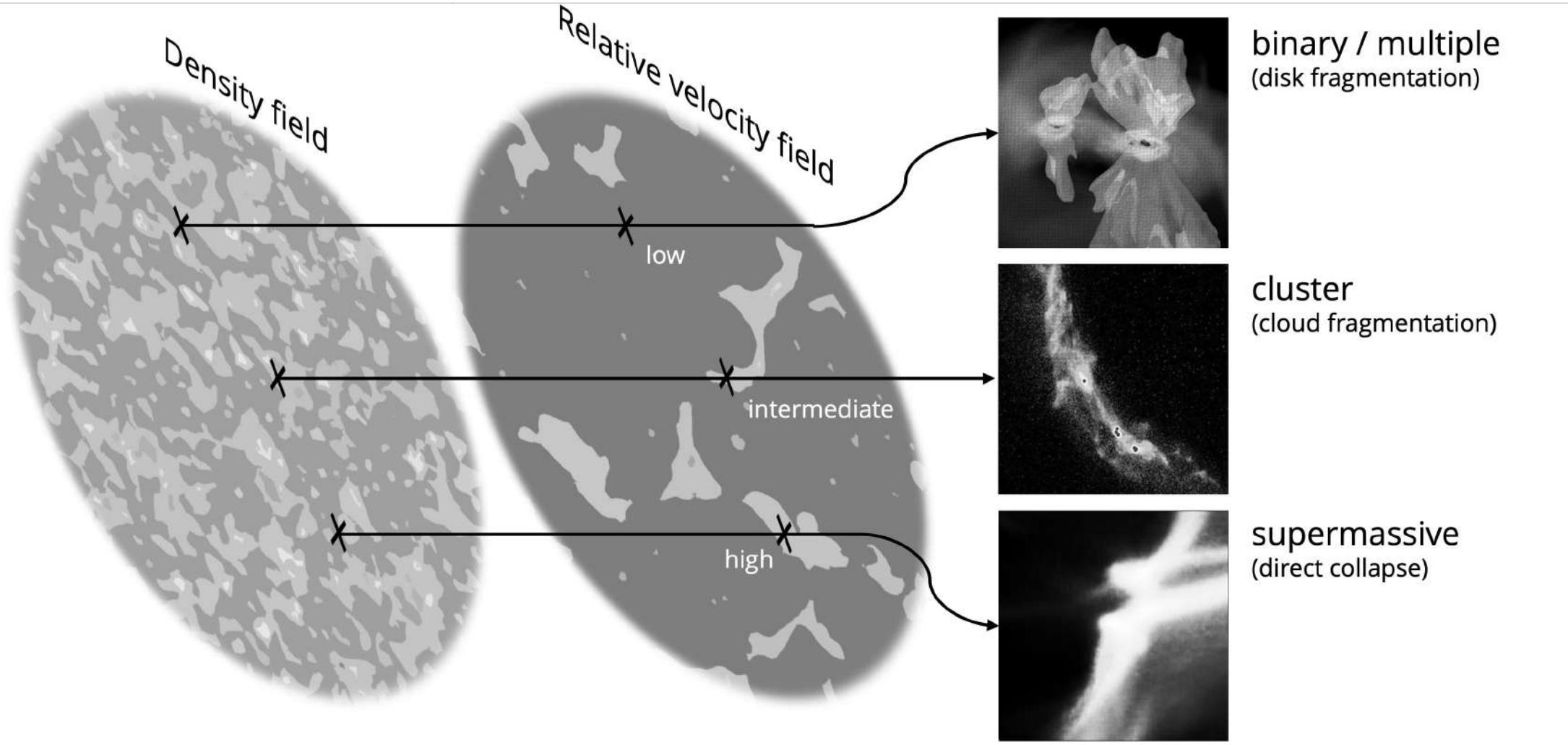
Type C(omplex)



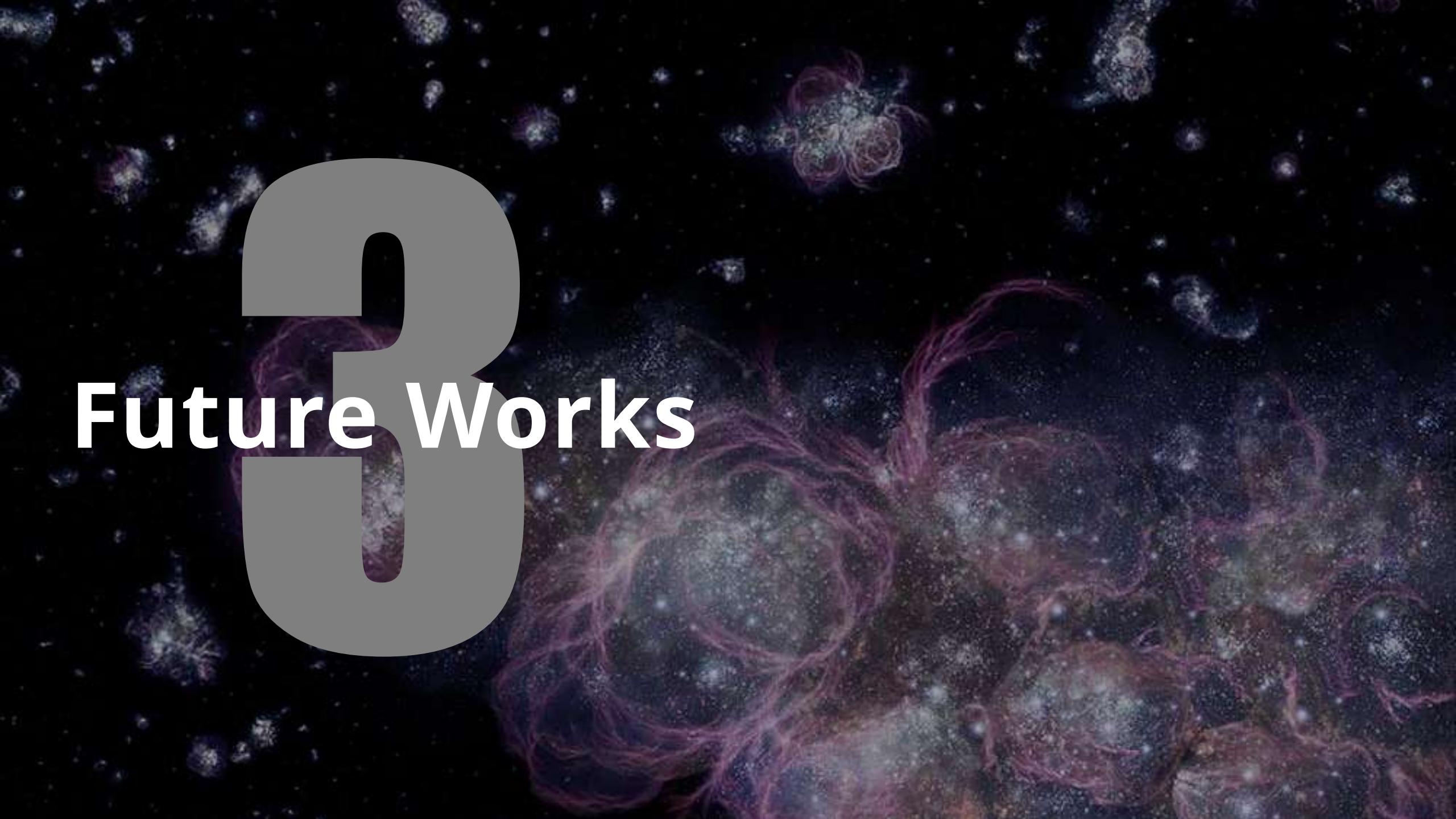
Formation probability of first star cluster



Dependence on the relative velocity

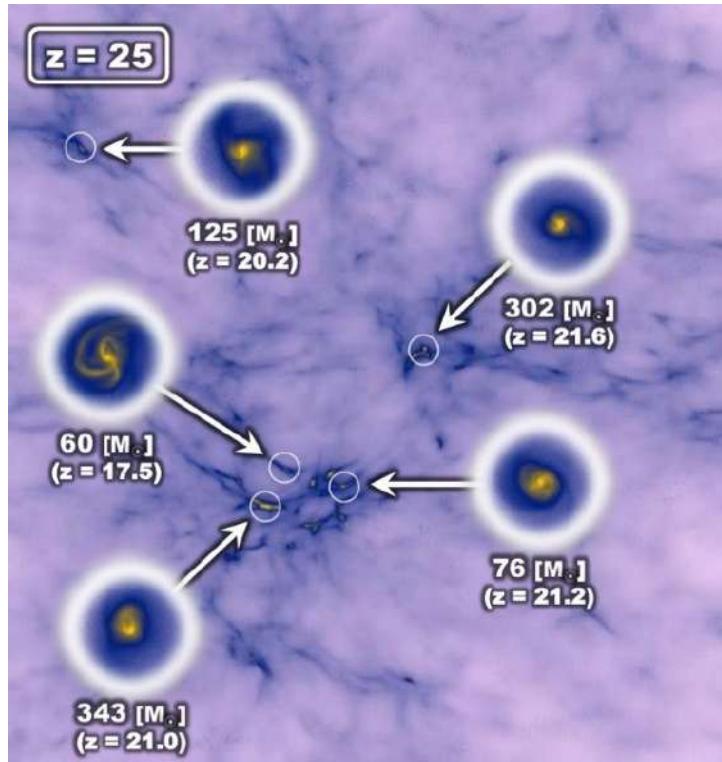


Future Works

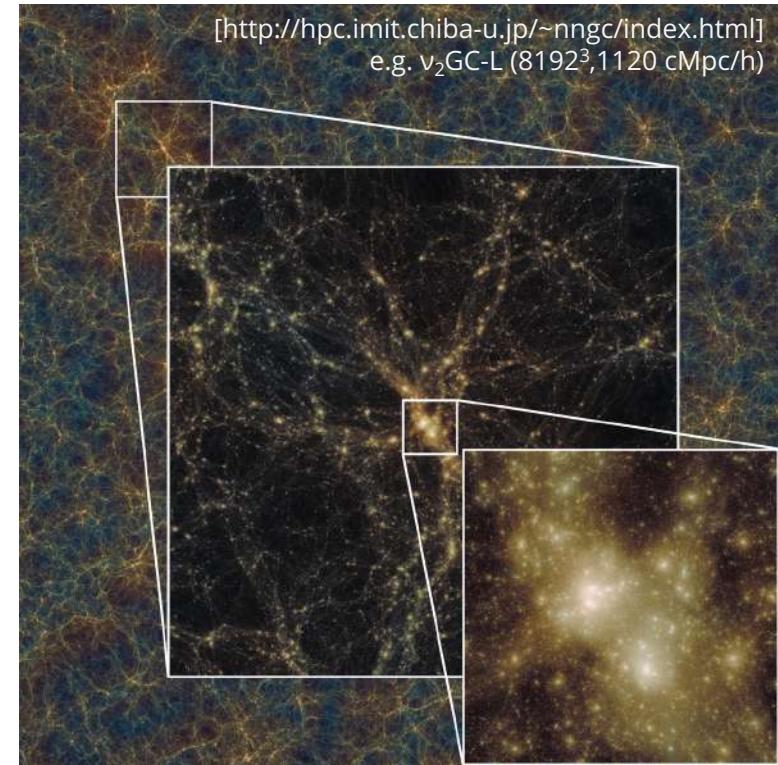


Cosmic star formation history

R(M)HD + stellar evolution



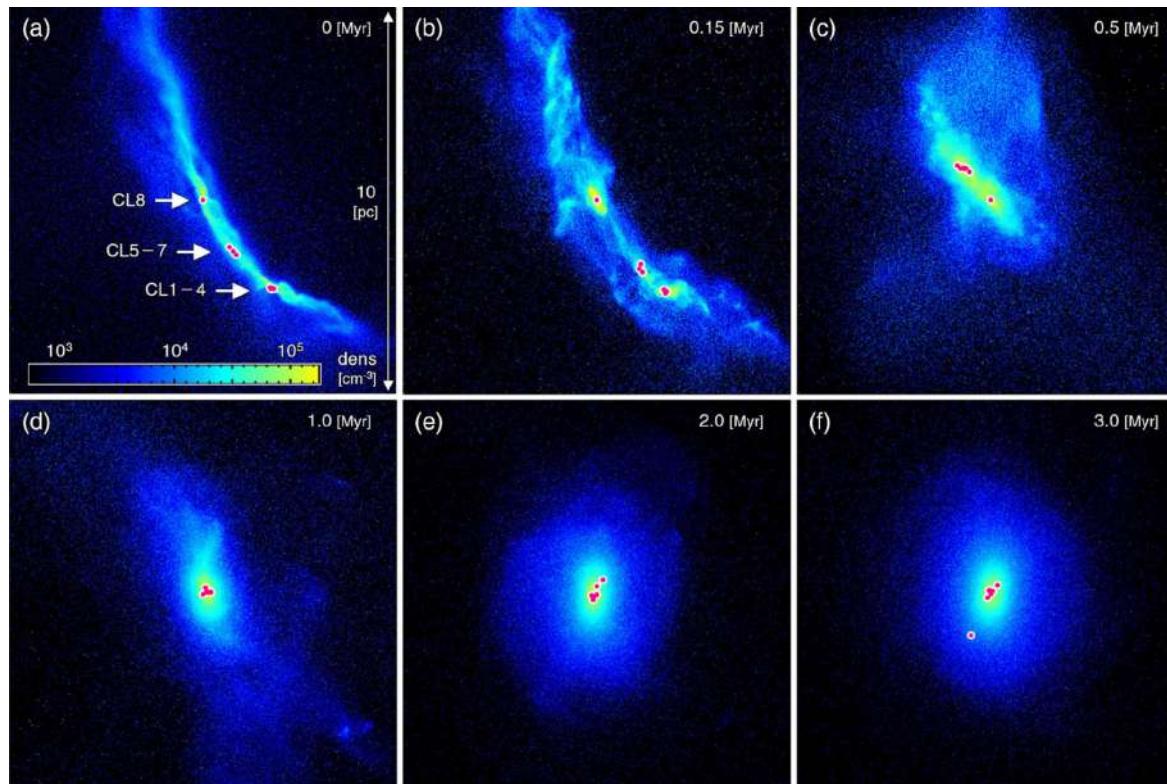
N-body + semi-analytic model



(e.g.) Supermassive first star (seed BH) with $M_{\text{star}} [\text{M}_\odot]$ forms at DM halo with $M_{\text{halo}} [\text{M}_\odot]$ at redshift z under the relative velocity $v_{\text{rel}} [\text{km/s}]$

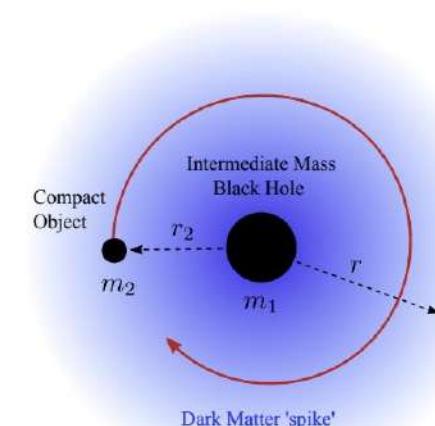
Merger of first star cluster

Binary formation from cluster



Hirano et al. (2018)

IMBH-BH merger inside DM spike

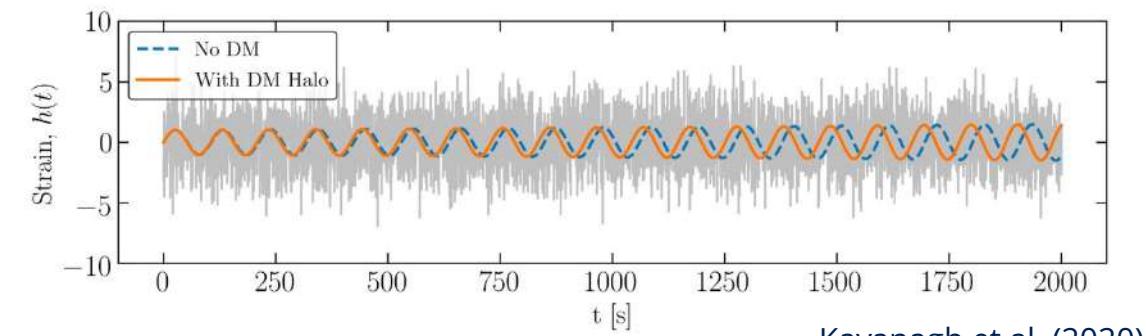


$$\frac{dE_{\text{orb}}}{dt} = - \frac{dE_{\text{GW}}}{dt} - \frac{dE_{\text{DF}}}{dt}$$

$$\frac{dE_{\text{GW}}}{dt} = \frac{32G^4 M(m_1 m_2)^2}{5(c r_2)^5}$$

$$\frac{dE_{\text{DF}}}{dt} = 4\pi(Gm_2)^2 \rho_{\text{DM}}(r_2) \xi(v) v^{-1} \log \Lambda$$

DMとの重力相互作用を通じて
エネルギーを失う (力学的摩擦)



Kavanagh et al. (2020)

ファーストスターとN体シミュレーション

初期宇宙の星形成に、DM分布は直接影響する。高密度領域まで計算するため、大規模なN体シミュレーションが必要。

- 宇宙論モデル (e.g., CDM, WDM, FDM)
- DMモデル (e.g., WIMPs, axion)

宇宙論的シミュレーションにbaryon-DM間相対速度が取り入れられるようになった。相対速度の大きさによって星形成過程が変化。

- 単独ガス雲 \rightarrow (連)星
- 複数ガス雲 \rightarrow 星団
- 大質量ガス雲 \rightarrow 大質量星

ファーストスター形成モデル

- 形成条件 (DMハロー質量) + 星質量分布 (IMI)

