

初期宇宙における低金属量環境 下での超大質量星形成



鄭昇明,
大向一行 (Tohoku University)

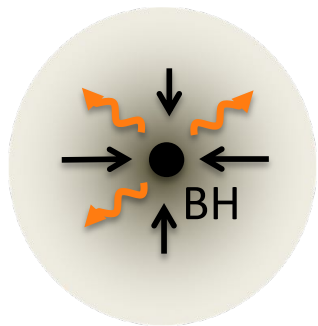


Motivation:

Super Massive Black Holes at high z

2

- SMBH with $10^9 M_{\odot}$ at $z \sim 7$ (宇宙年齢 ~ 8 億年)
- 種BHへのEddington降着を考えると...



$$G \frac{M_{\text{BH}} m_{\text{p}}}{R^2} = \frac{\sigma L}{4\pi c R^2}$$

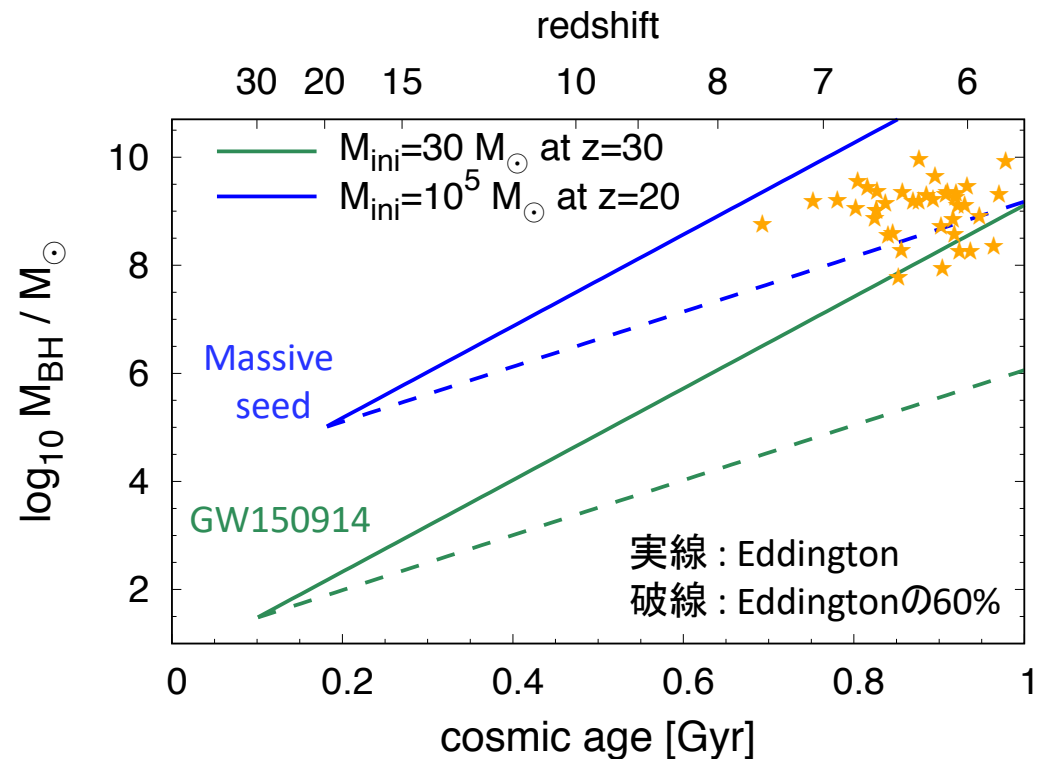
$$L = \epsilon \dot{M} c^2$$

$$\dot{M}_{\text{BH}} = (1 - \epsilon) \dot{M}$$

$$\dot{M}_{\text{BH}} \propto M_{\text{BH}}$$

$$\rightarrow M_{\text{BH}} = M_{\text{ini}} \exp(t/t_{\text{E}})$$

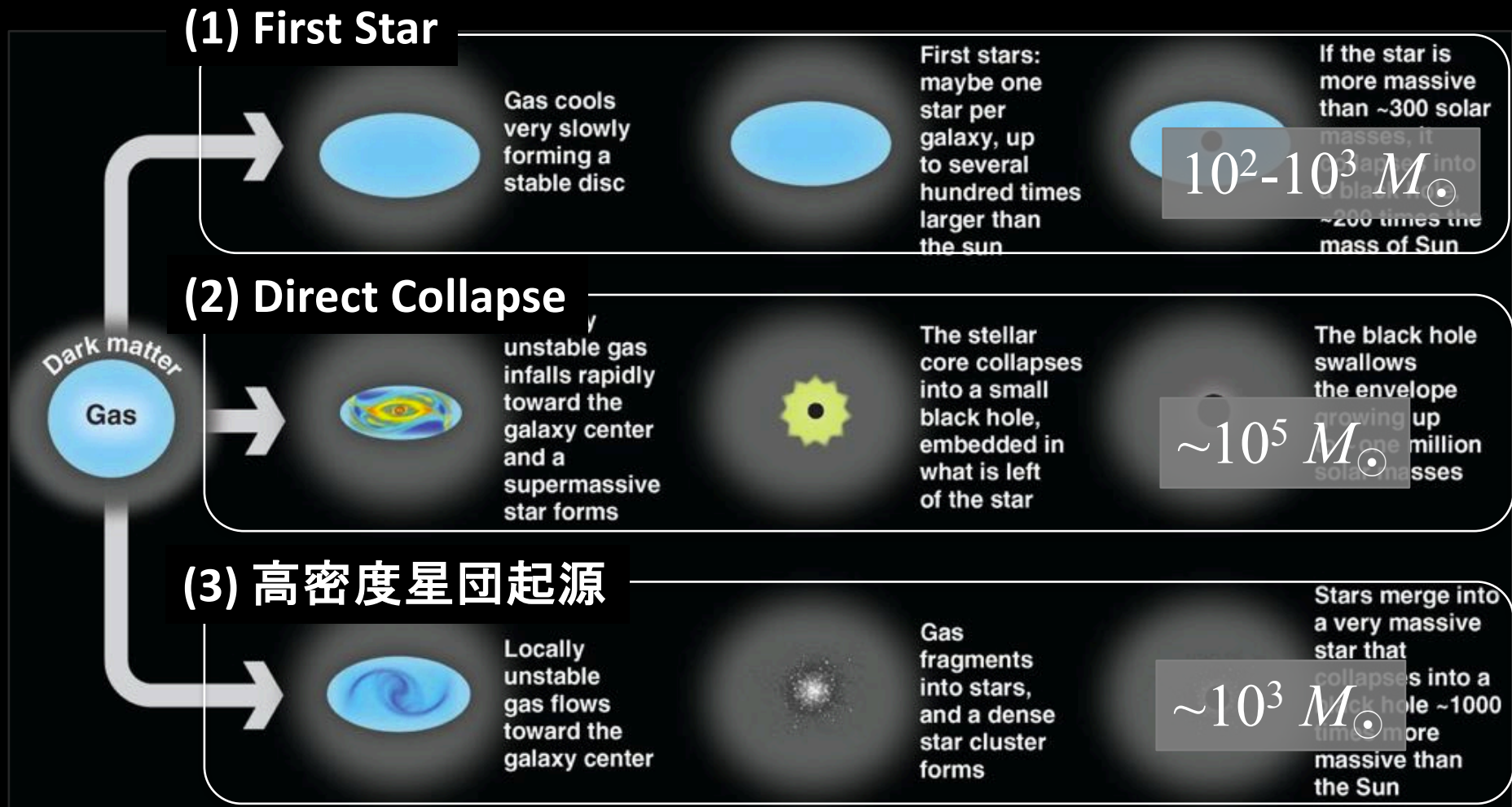
where $t_{\text{E}} \sim 50$ Myr



重たい種BHを作ることはできないか？

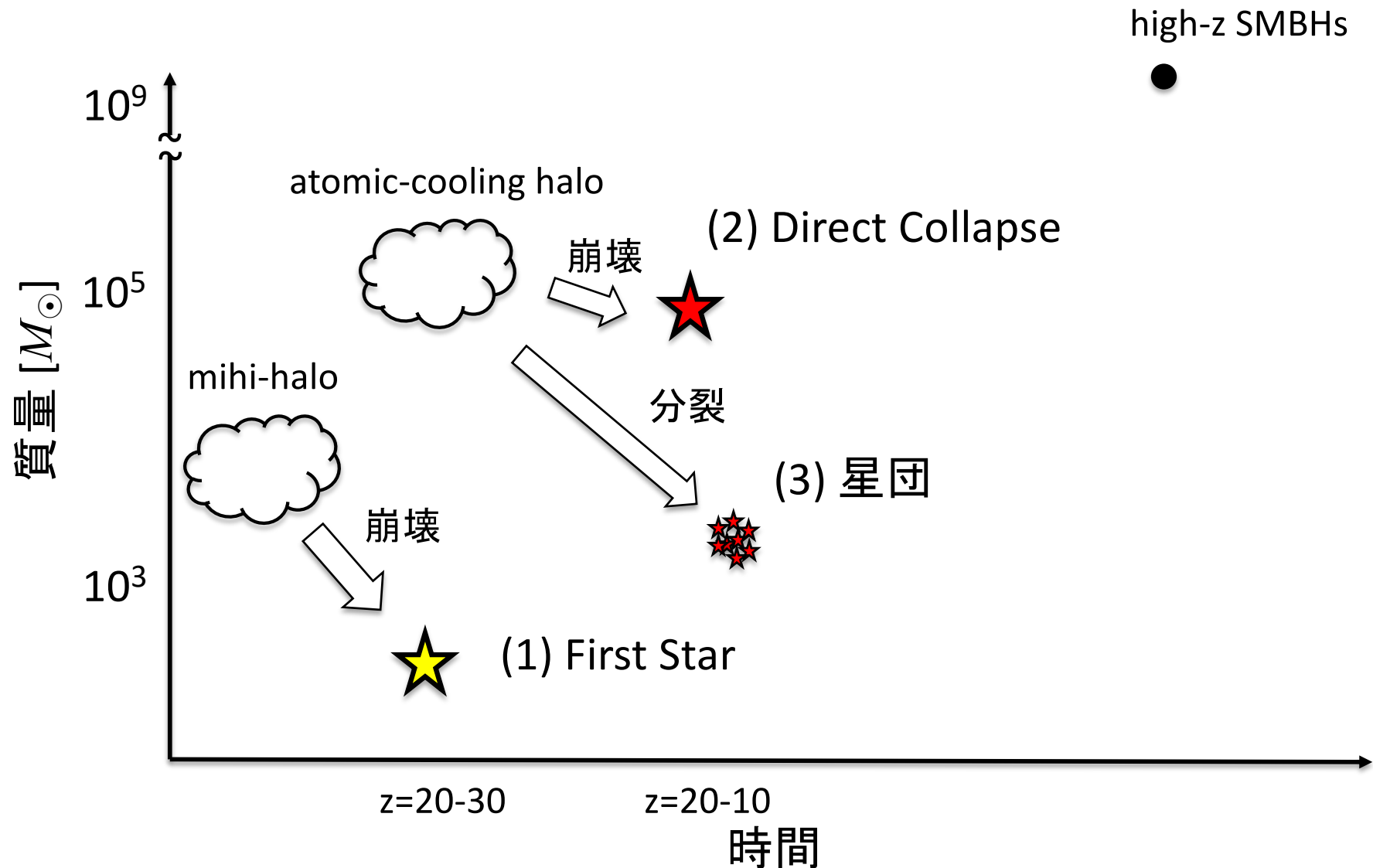
3

Massive Seed Formation

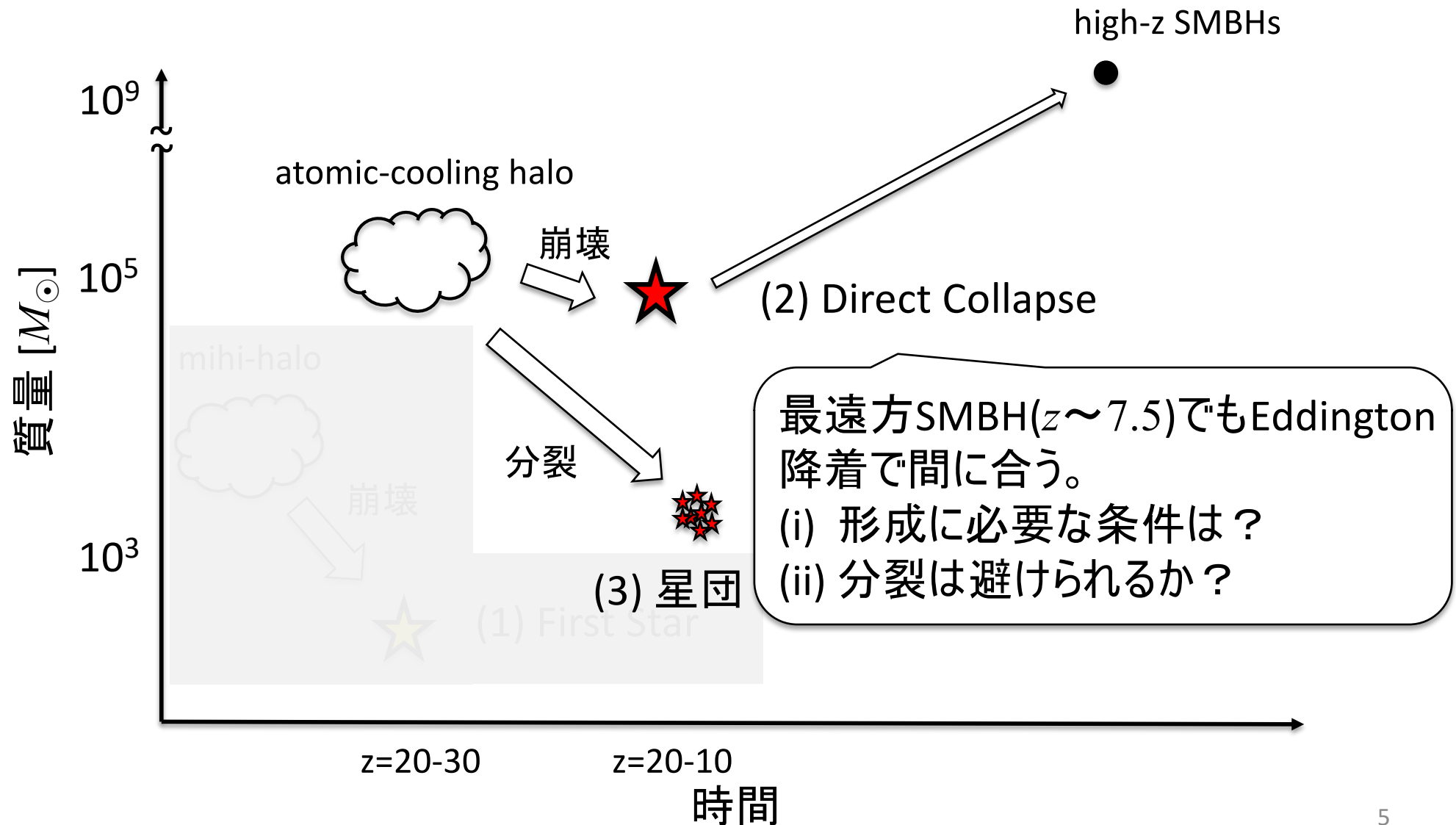


(Volonteri, 2012)

Massive Seed Formation



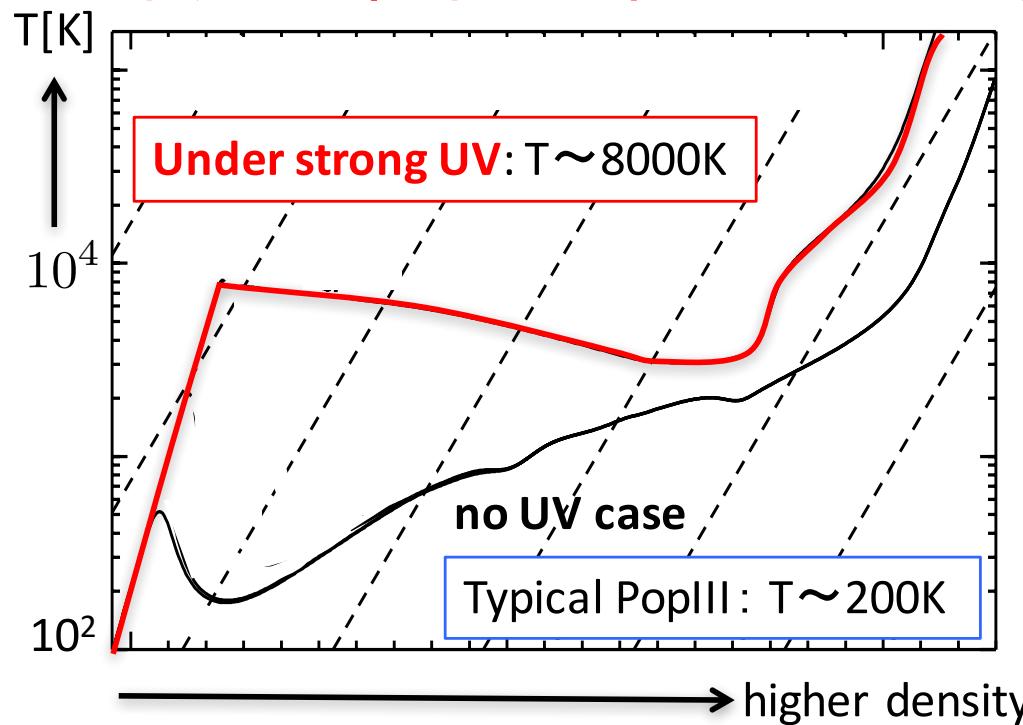
Massive Seed Formation



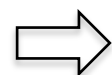
Direct Collapse

初期宇宙での超大質量星形成の可能性は？

⇒ **始原的かつ水素分子冷却が阻害**されている環境下では可能



$$\dot{M} \sim M_{\text{J}}/t_{\text{ff}} \sim c_{\text{s}}^3/G \propto T^{\frac{3}{2}} \\ \sim 0.1 - 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

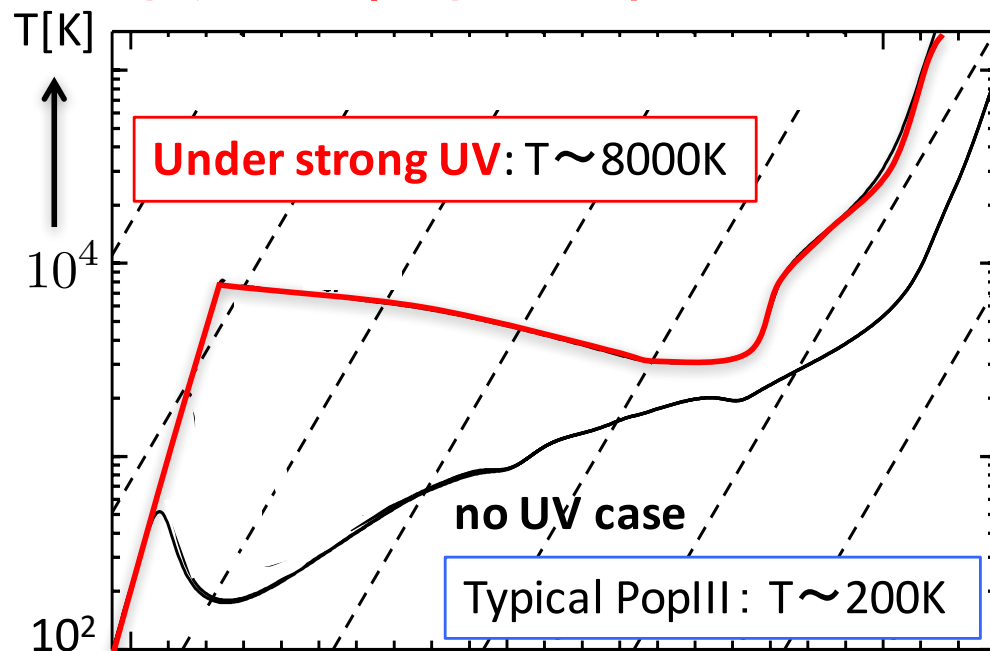


星の最終質量 $\sim 10^5 M_{\odot}$

Direct Collapse

初期宇宙での超大質量星形成の可能性は？

⇒ **始原的かつ水素分子冷却が阻害**されている環境下では可能



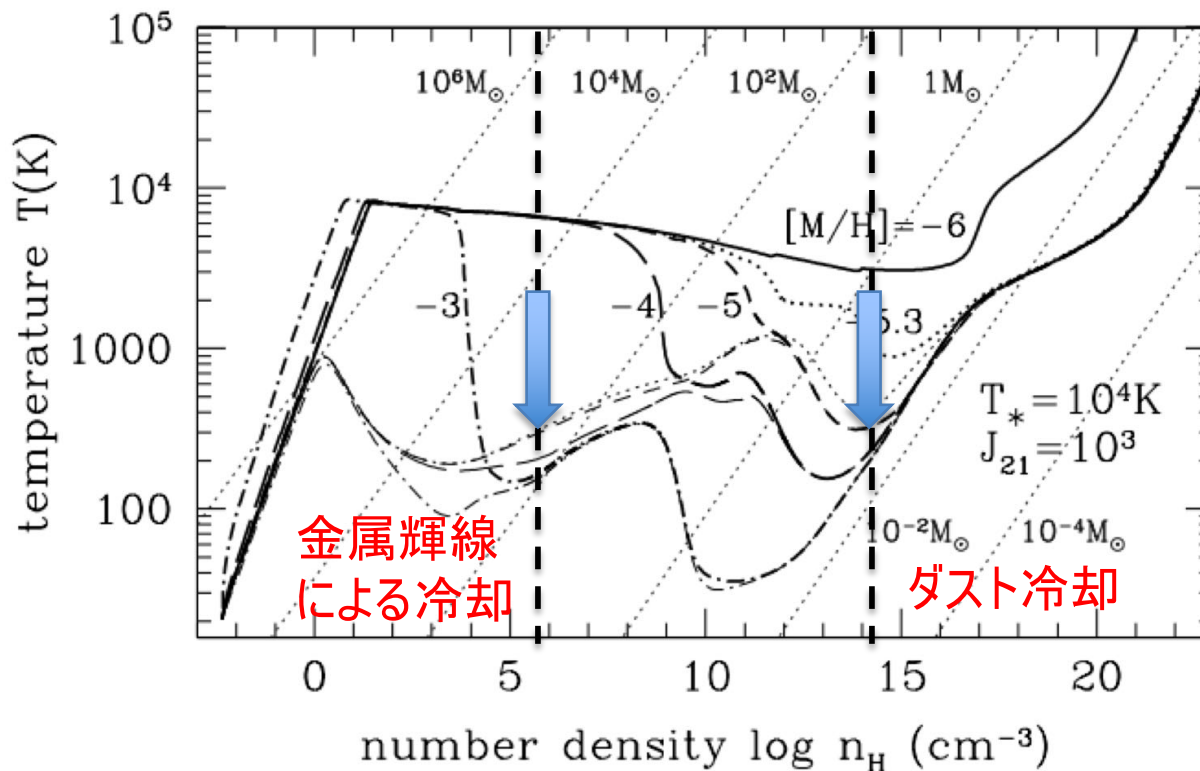
→ higher density

(Omukai 01)

高赤方偏移のSMBH(1-10/ Gpc³)は説明可 (Dijkstra+2014)
より一般的なSMBH(0.01-0.1/Mpc³)を説明するには数が足りない

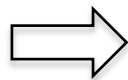
Direct Collapse

初期宇宙での超大質量星形成の可能性は？



Omukai+2008

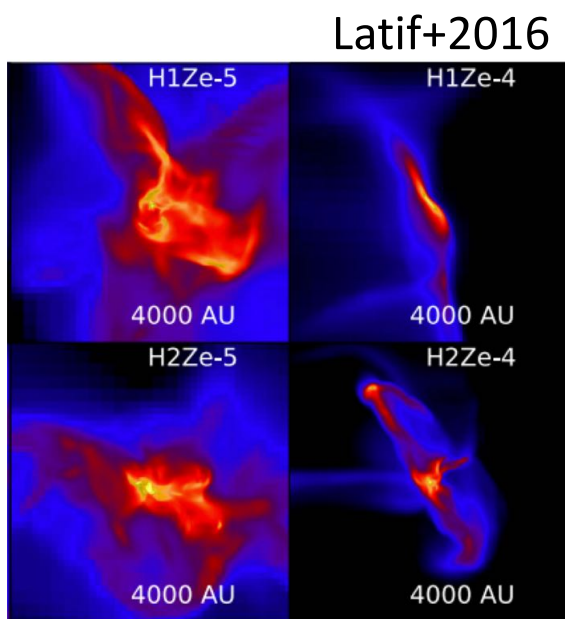
ダスト・重元素の存在により、ガス雲の温度が低下
冷却による分裂、高密度星団形成？



or
超大質量星形成？

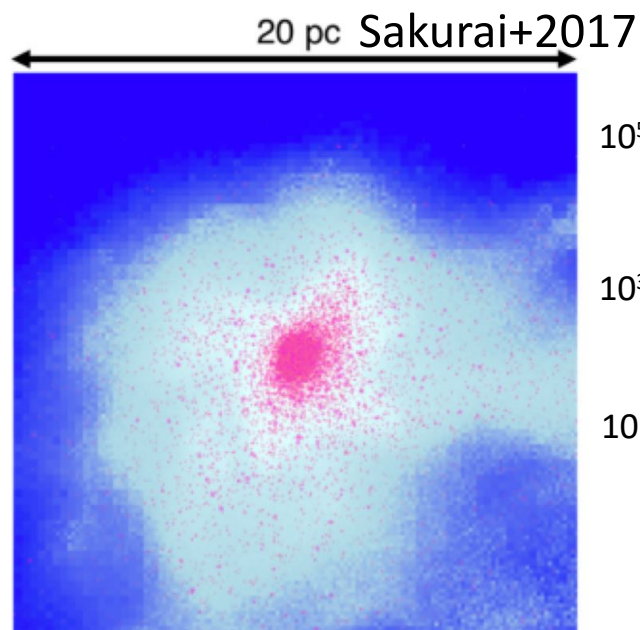
Direct Collapse

・先行研究



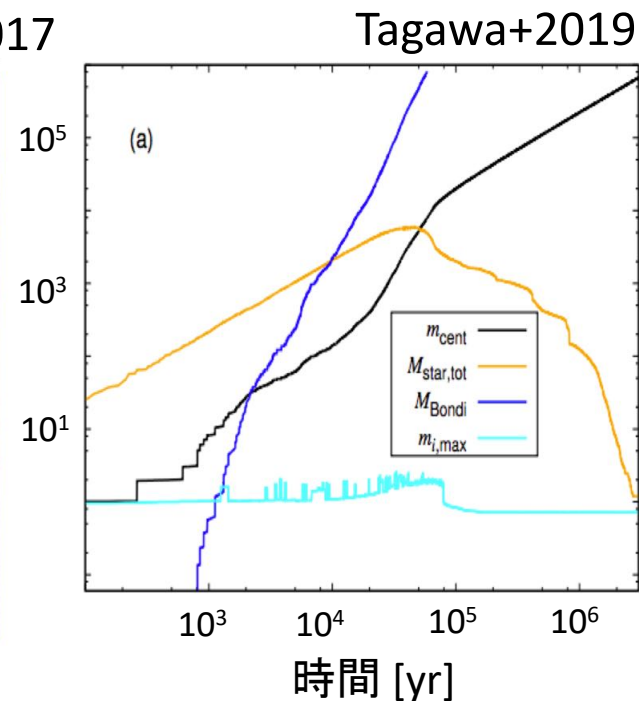
dust冷却を入れて、ガス雲のcollapseを流体計算

⇒ 分裂は見られるが、中心領域への高いガス流入率



ガス雲中心に星団が形成されたと仮定
星団の進化をN体計算

⇒ runaway collision
~ $10^3 M_{\odot}$ の星が形成



1Dで、中心星へのガス降着と星(分裂片)との合体率を計算

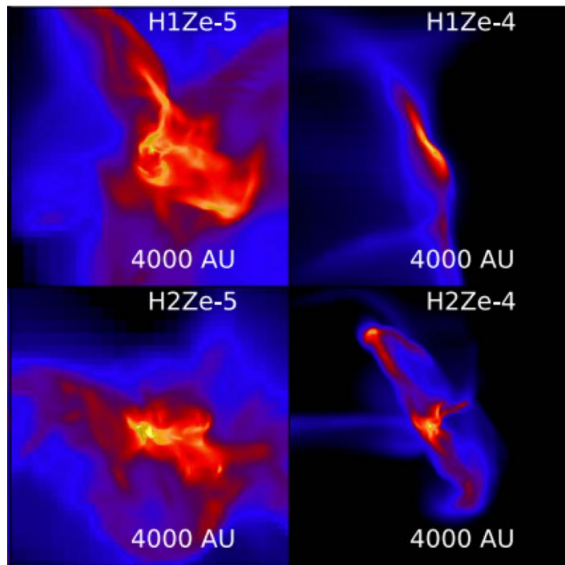
⇒ ~ $10^5 M_{\odot}$ の超大質量星が形成

Direct Collapse

・先行研究

3次元・長時間の流体計算はまだ行われていない

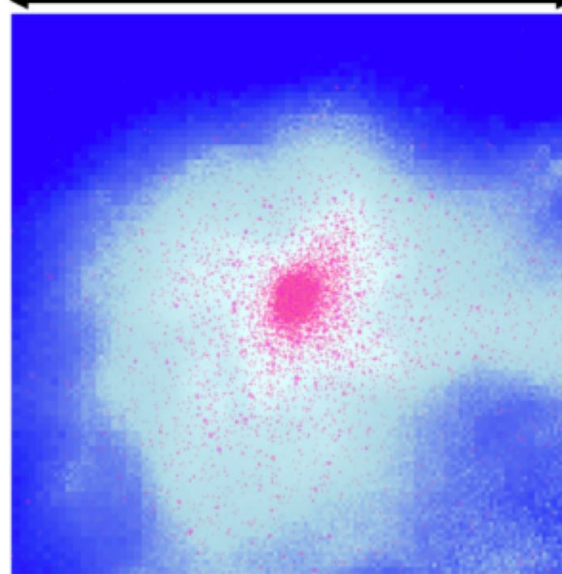
Latif+2016



dust冷却を入れて、ガス雲のcollapseを流体計算

⇒ 長時間の進化は心領計算していない

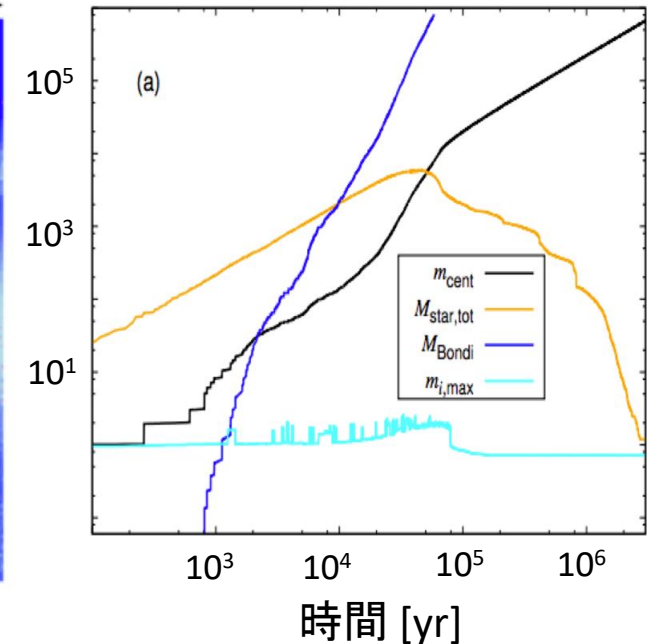
20 pc Sakurai+2017



ガス雲中心に星団が形成されたと仮定
星団の進化をN体計算

⇒ 星団の形成は仮定している

Tagawa+2019

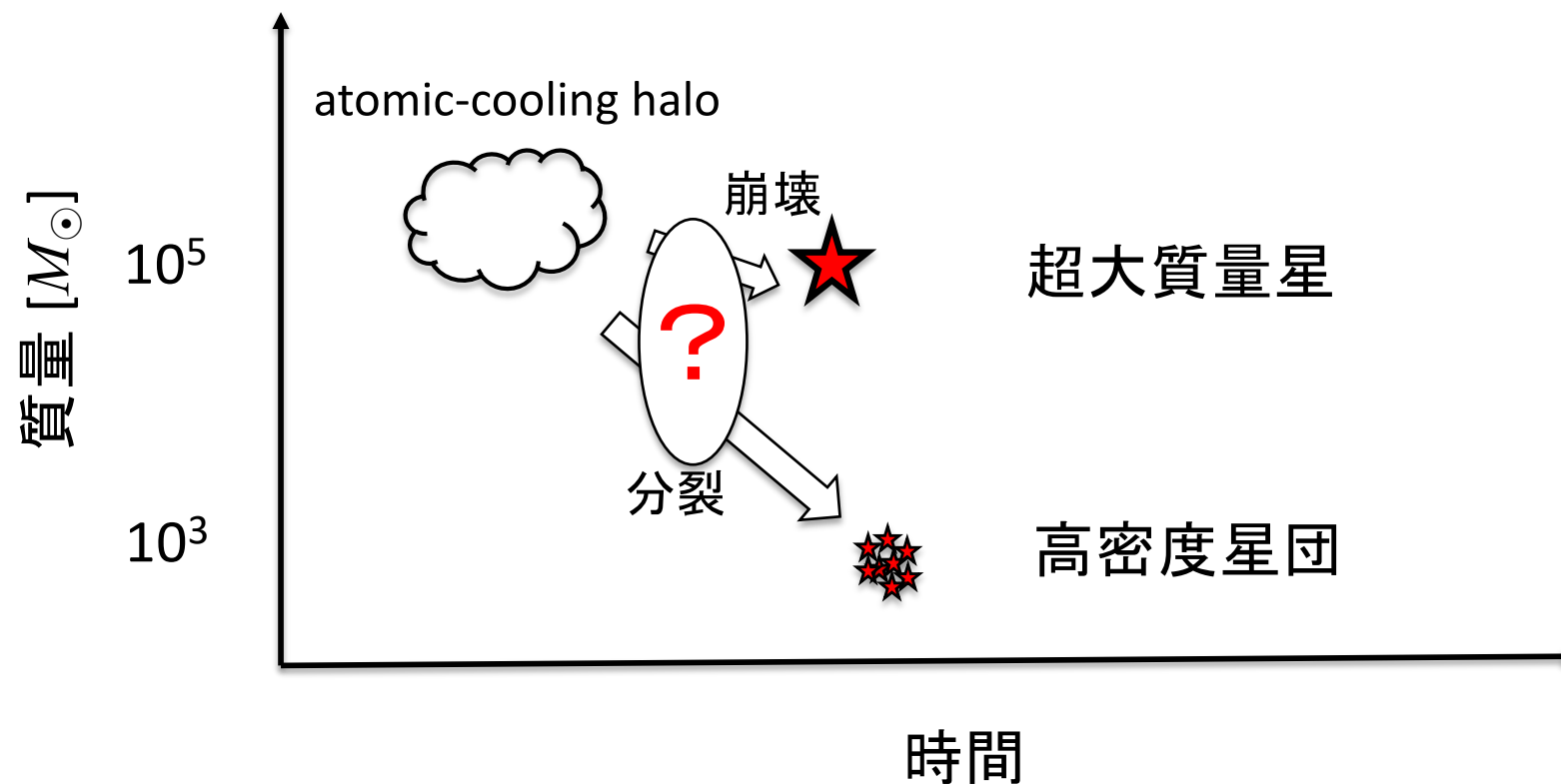


1Dで、中心星へのガス降着と星(分裂片)との合体率を計算

⇒ $\sim 10^5 M_{\odot}$ の超大質量星が形成

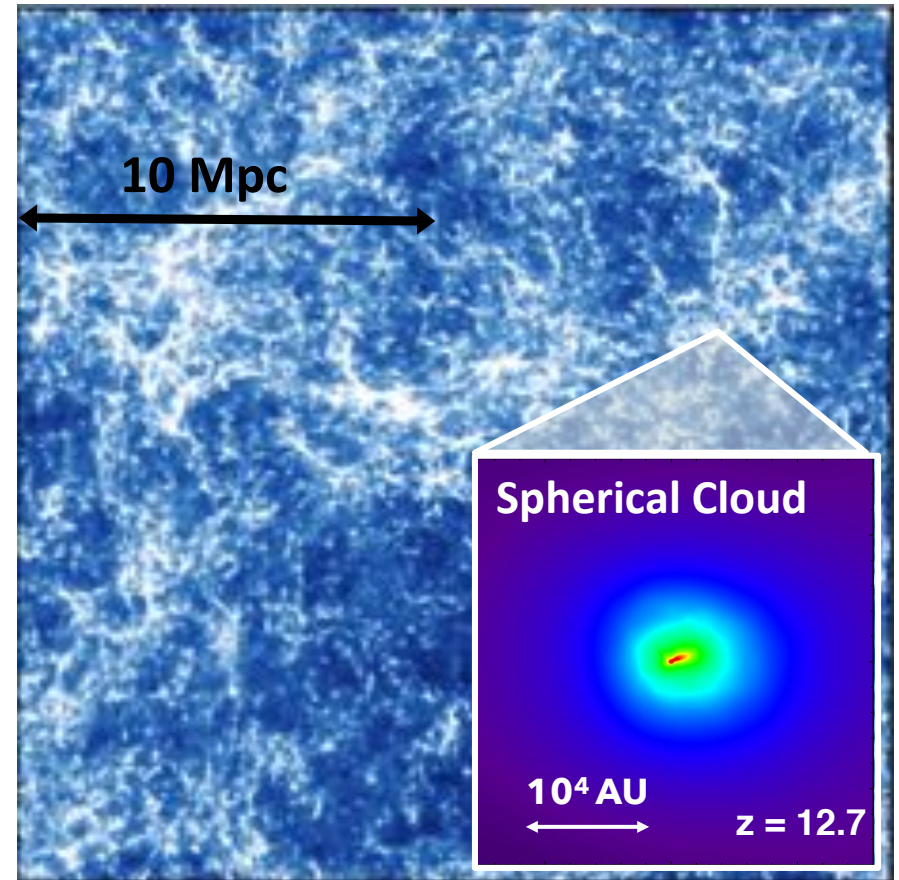
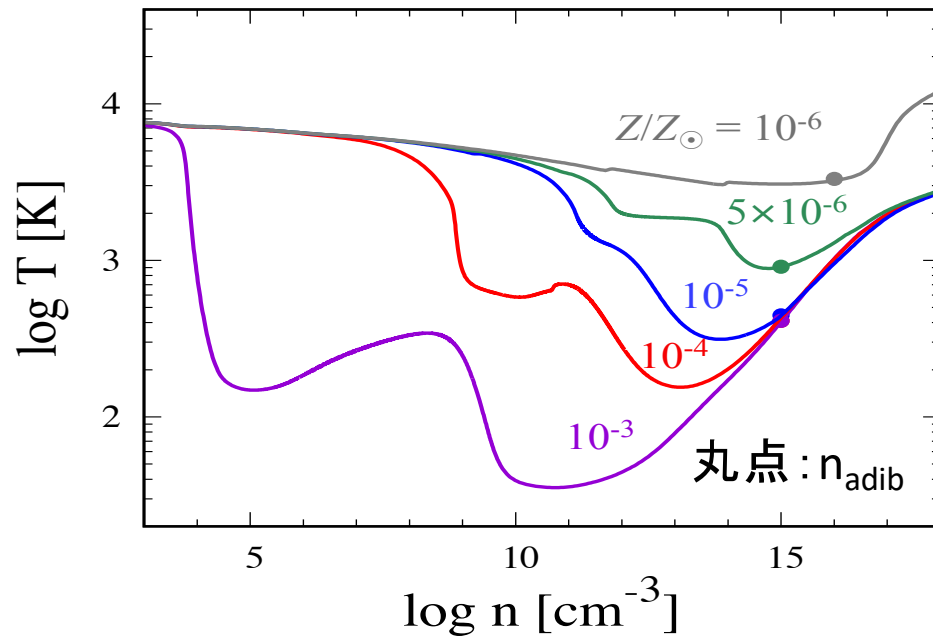
Purpose of this work

ガス雲のcollapseから始まる3次元流体計算を行うことで、低金属量環境下における超大質量星の形成可能性を調べる。



Numerical Setup

- Gadget2 (SPH + N-body)
- barotropic-EOS
($Z/Z_{\odot} = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 5 \times 10^{-6}, 10^{-6}$)



- multiple sink, merger (created at $n = 2 \times 10^{16} - 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

- sink radius

$$R_* = 12 \text{ AU} \left(\frac{M_*}{100 M_{\odot}} \right)^{1/2} \quad \text{Hosokawa+2013}$$

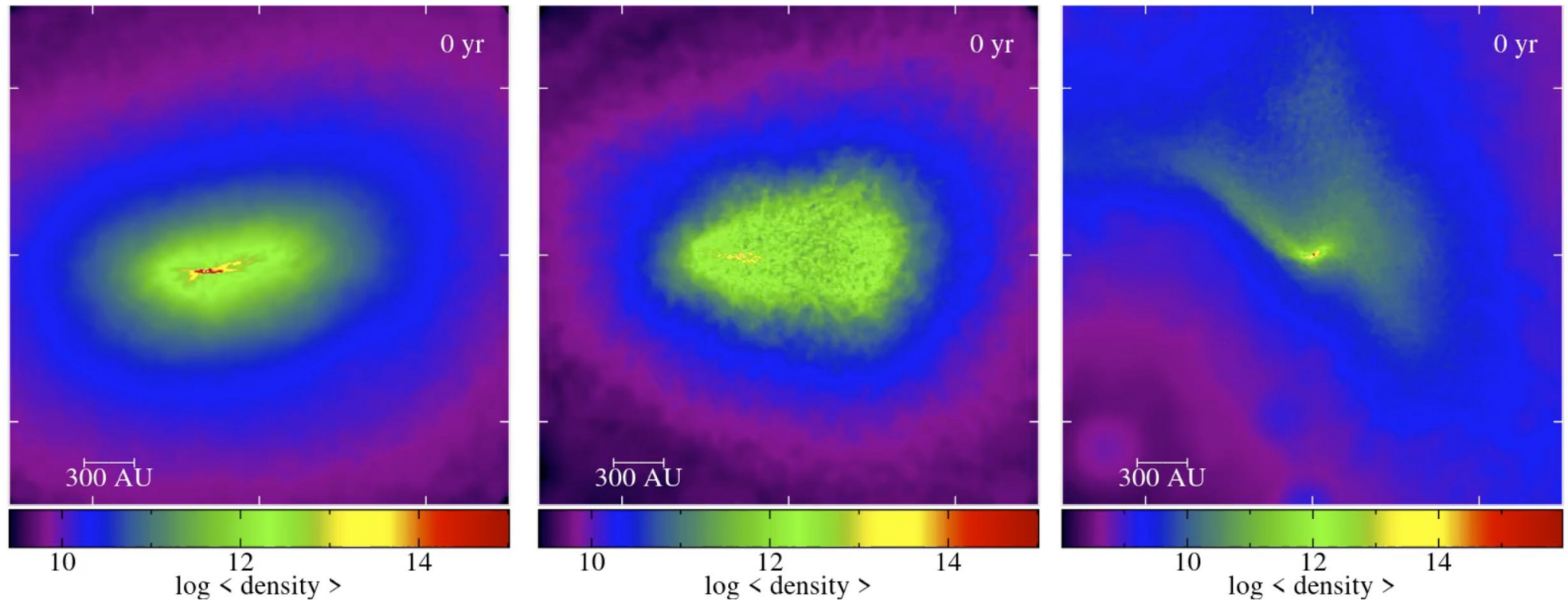
- Initial Condition \Rightarrow Spherical Cloud (SC+16,18)

Accretion Phase

$$Z = 10^{-6} Z_{\odot}$$

$$Z = 10^{-4} Z_{\odot}$$

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



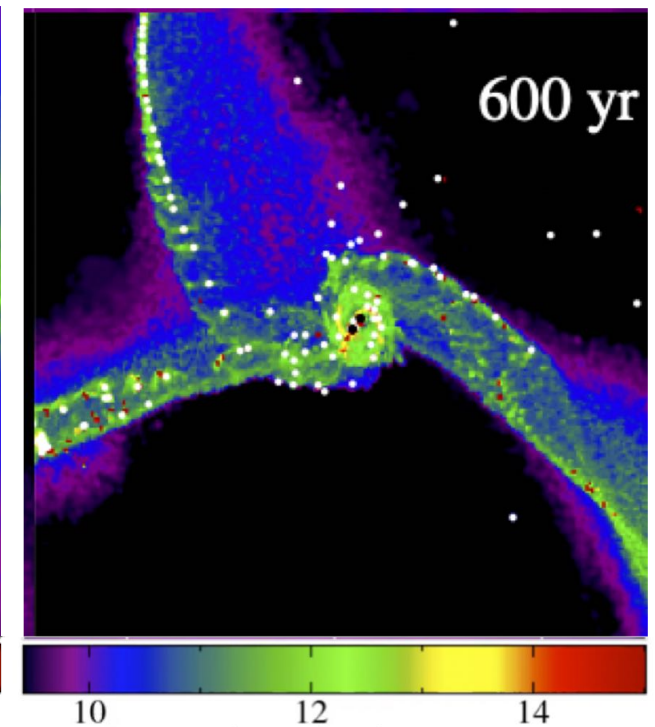
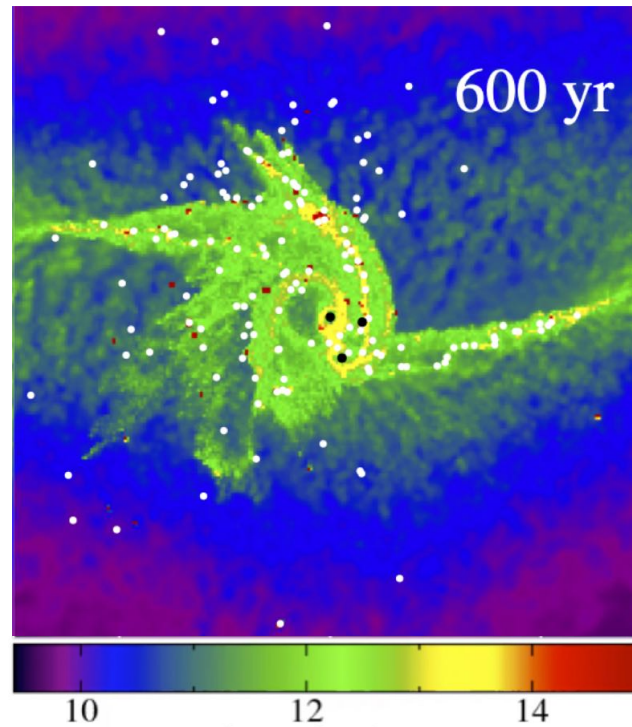
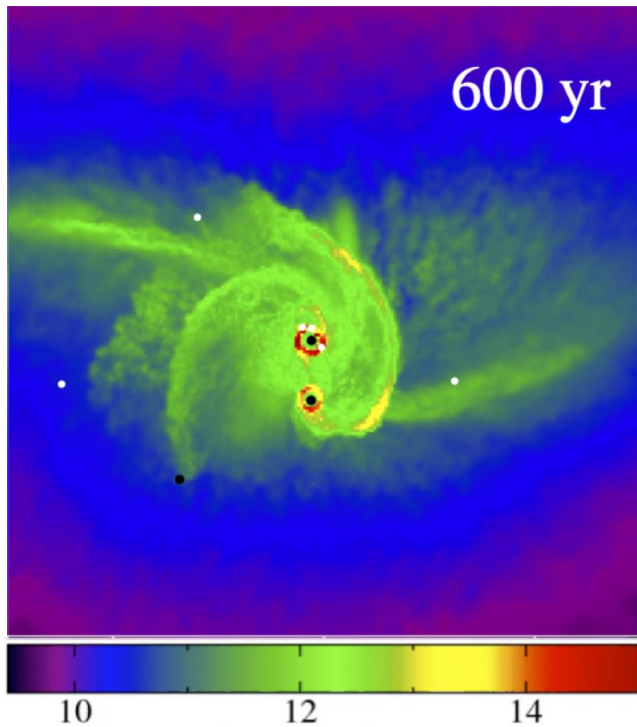
黒点: $M > 10 M_{\odot}$ の massive sink, 白点: $M < 10 M_{\odot}$ の small sink

Accretion Phase

$$Z = 10^{-6} Z_{\odot}$$

$$Z = 10^{-4} Z_{\odot}$$

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



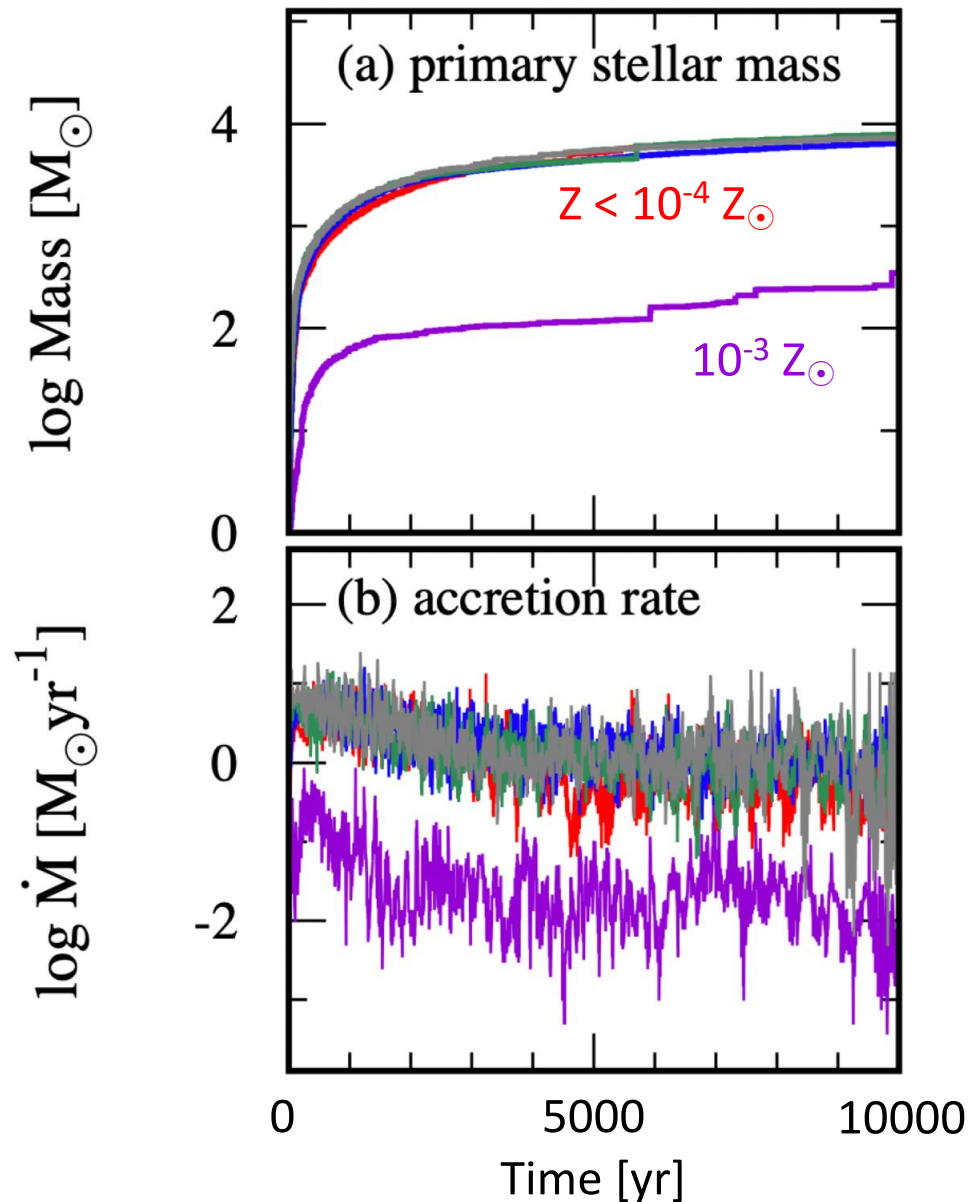
あまり分裂が起きない
Massive starが形成する
(先行研究とconsistent)

Dust冷却により激しく分裂
中心にmassive starが形成
($Z/Z_{\odot} = 10^{-6}$ と同様)

金属輝線による冷却により
大域的な構造が変化
分裂により星団が形成する。

黒点: $M > 10 M_{\odot}$ のmassive sink, 白点: $M < 10 M_{\odot}$ のsmall sink

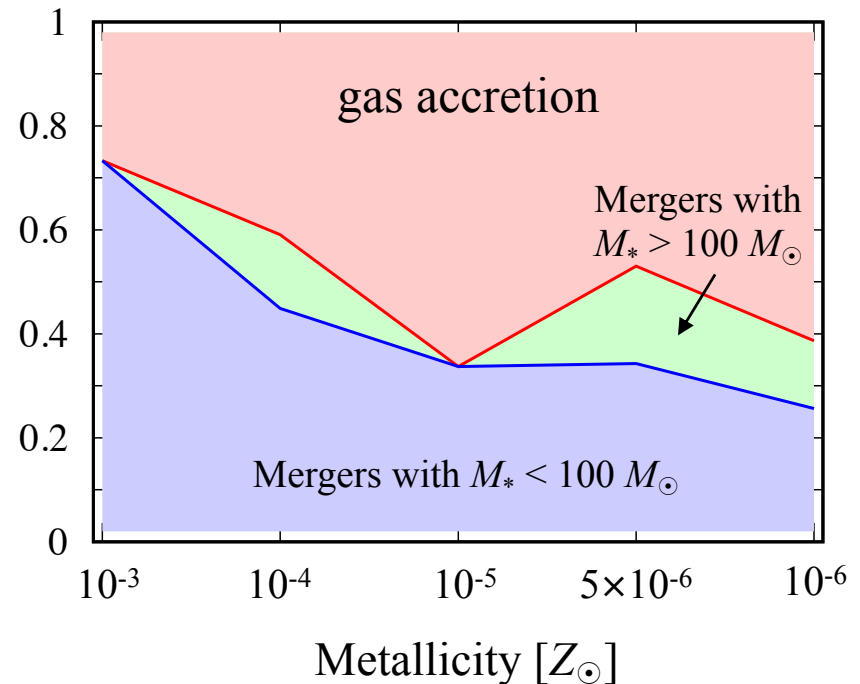
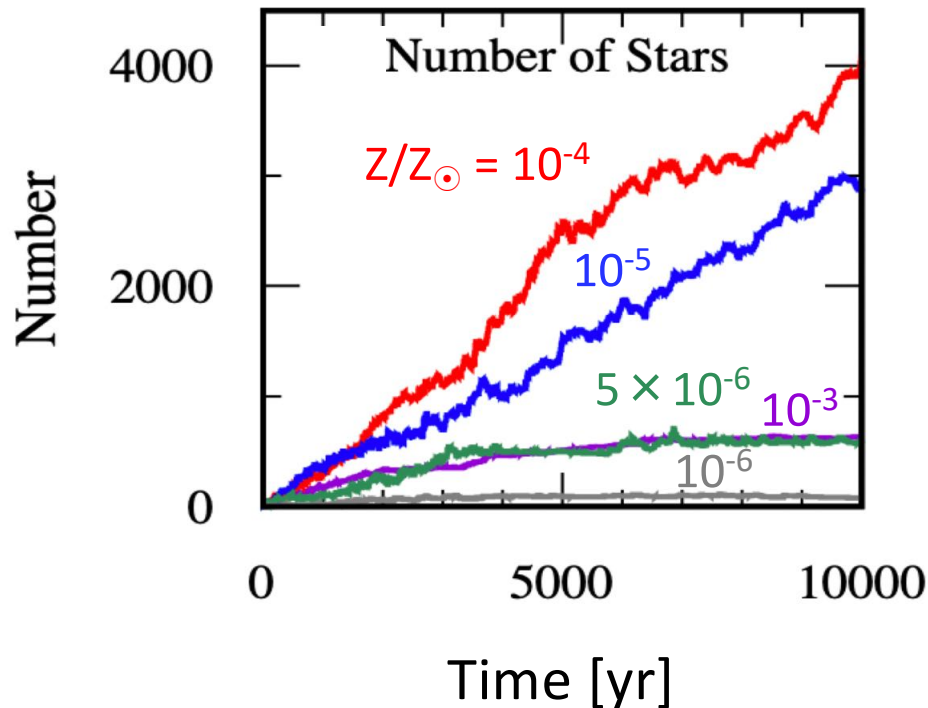
Mass Evolution



- $Z/Z_{\odot} < 10^{-4}$ ではmetallicityによらず、 $1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ のペースで成長
⇒ dust冷却は分裂を促進、中心星の質量進化を阻害しない
⇒ **超大質量星**が形成

- $Z/Z_{\odot} = 10^{-3}$ では、質量降着率が大きく下がる($\sim 0.01 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)
⇒ 金属輝線による冷却で、より低温で重力崩壊が起こる。
⇒ 中心星の成長は非効率的に。
($\dot{M} \propto T^{3/2}$)
⇒ **高密度星団**が形成

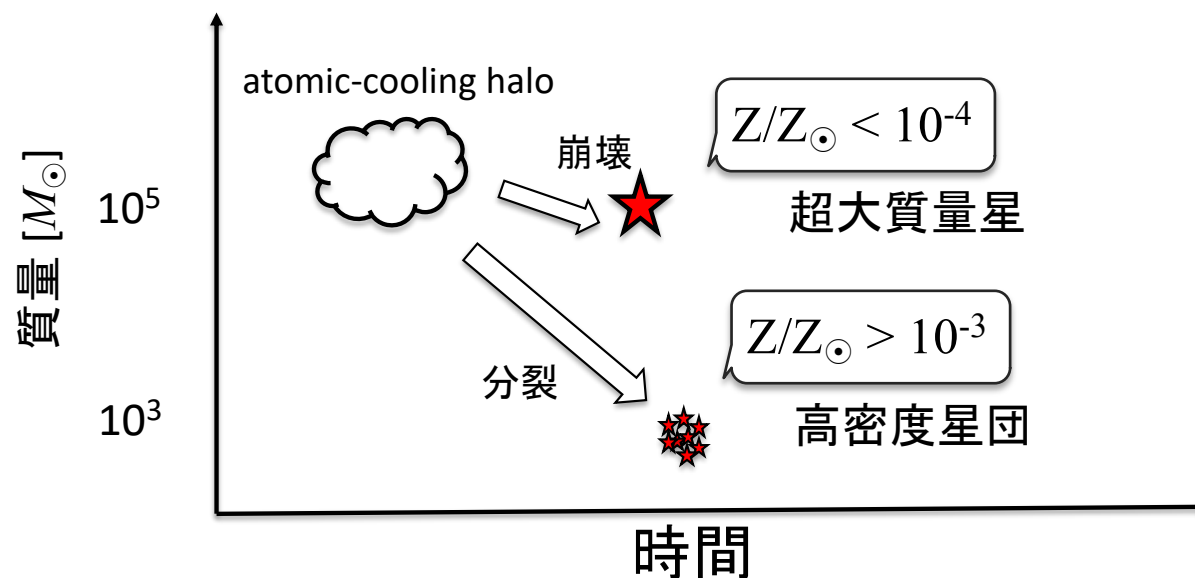
Merger v.s. Accretion



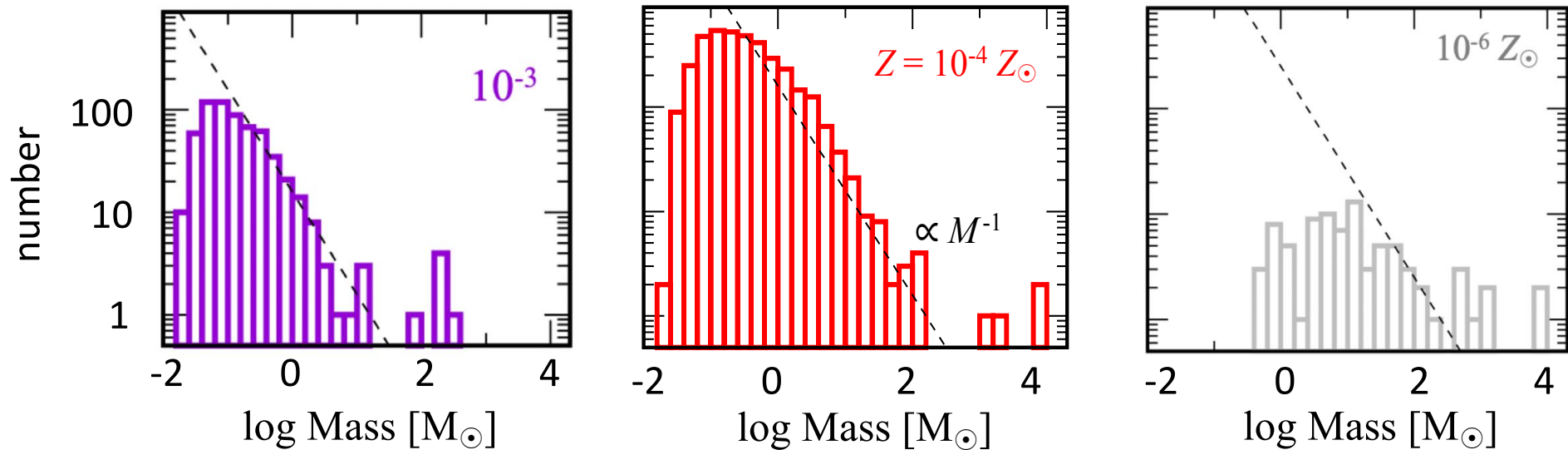
金属量が上がるとともに、合体による質量成長が支配的になる。
⇒ ダスト冷却により高密度での分裂が起こるが、
合体により中心星は成長する。

Summary

- 初期宇宙における低金属量環境での超大質量星形成過程について、1万年の質量進化を追った。
- $Z/Z_{\odot} < 10^{-4}$ では $6-8 \times 10^3 M_{\odot}$ の星が形成。
 - ダスト冷却により分裂はするものの、中心星は効率的に質量成長する。
- $Z/Z_{\odot} = 10^{-3}$ では $350 M_{\odot}$ の星が形成。
 - 金属輝線冷却により、より低温で崩壊が起こる。
 - 中心星への降着率は大きく低下 ($\sim 0.01 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)



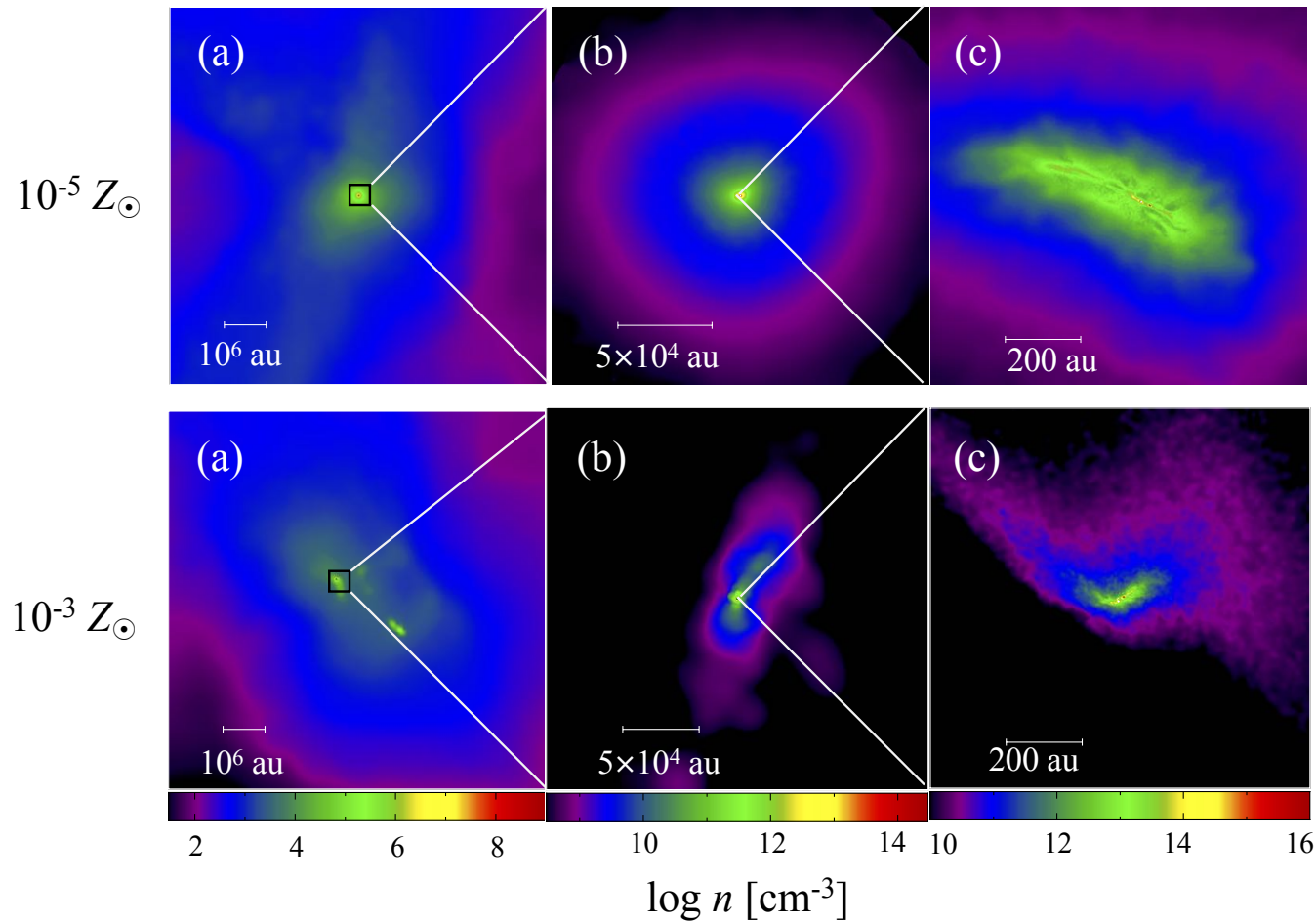
Mass distribution (1万年)



Low mass starの質量分布は $Z/Z_{\odot} > 5 \times 10^{-6}$ で同様
⇒ dust冷却のスケールで決まる。

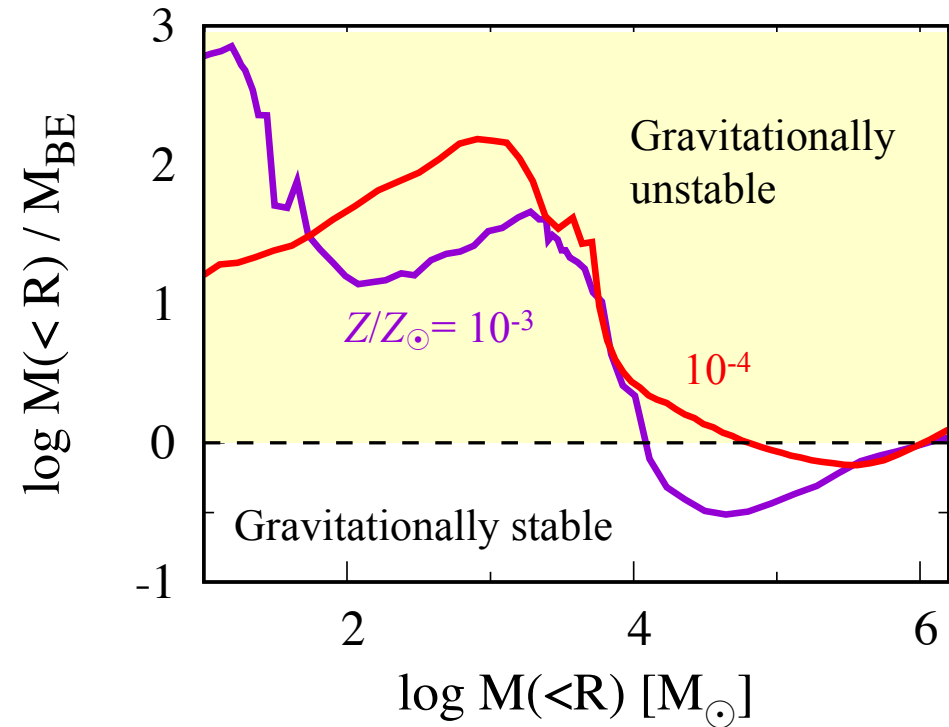
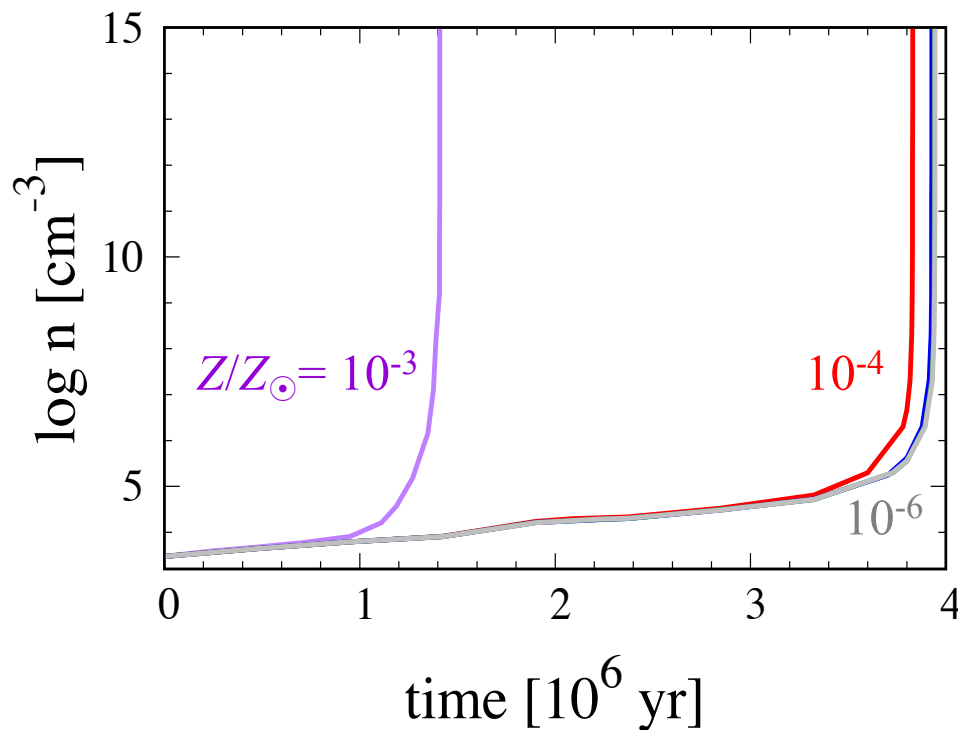
High mass starの質量分布は大スケールでのガスのflowを
反映している。
⇒ 重たい星が優先的に成長する。

Collapse phase



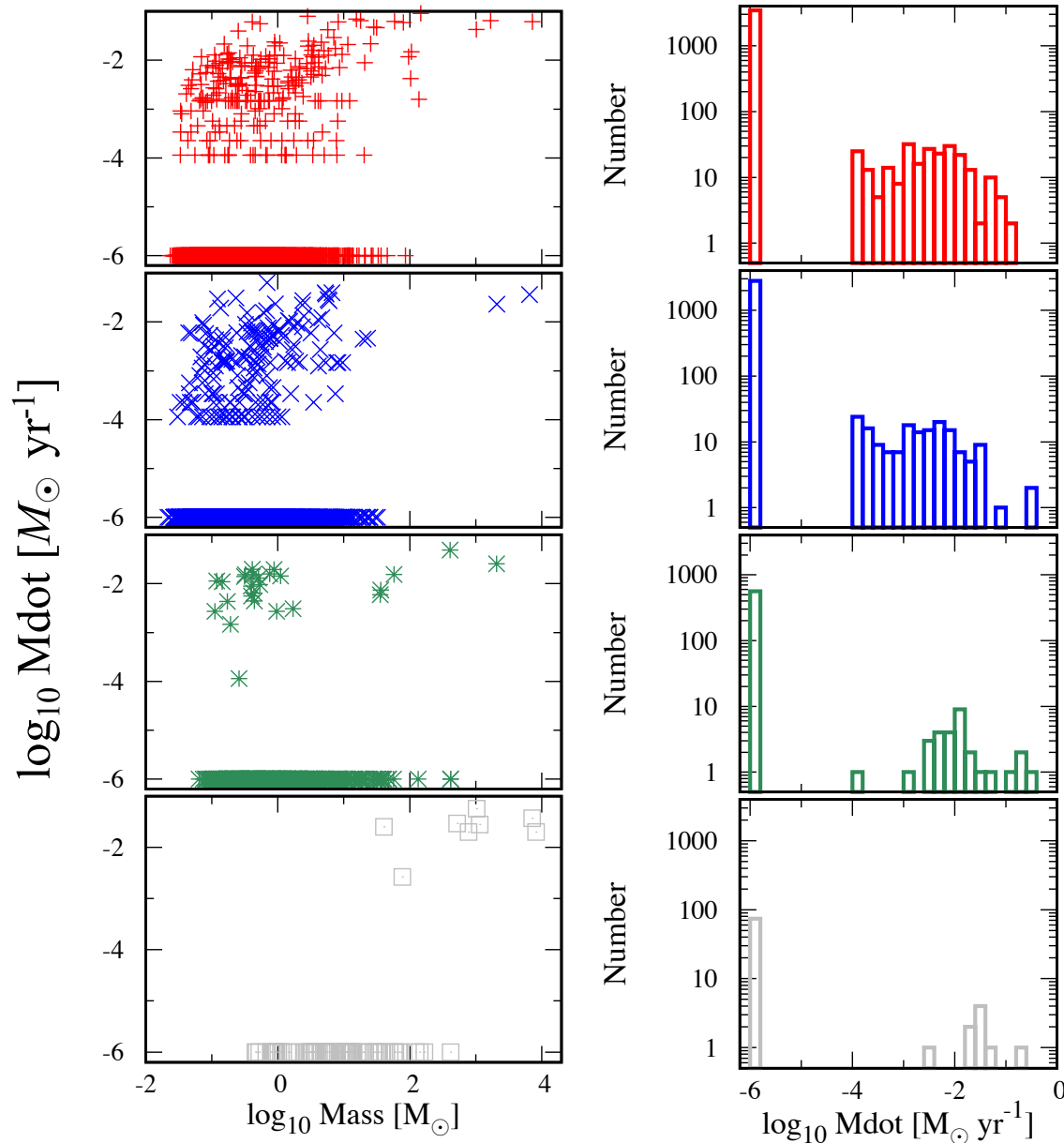
$Z/Z_{\odot} < 10^{-4}$ では大域的な構造は変わらない。
⇒ dust冷却はsmall scale ($< 10^3$ au) の構造のみ変える。

Onset of the gravitational collapse



金属輝線冷却によりガス雲の崩壊が促進される。
⇒より小さいスケールでガス雲の重力崩壊が始まる。

Mass distribution (1万年)



Mass functionの
冪の起源は？

⇒ competitive accretion
(e.g. Bonnell+2001),
なら、冪が-1

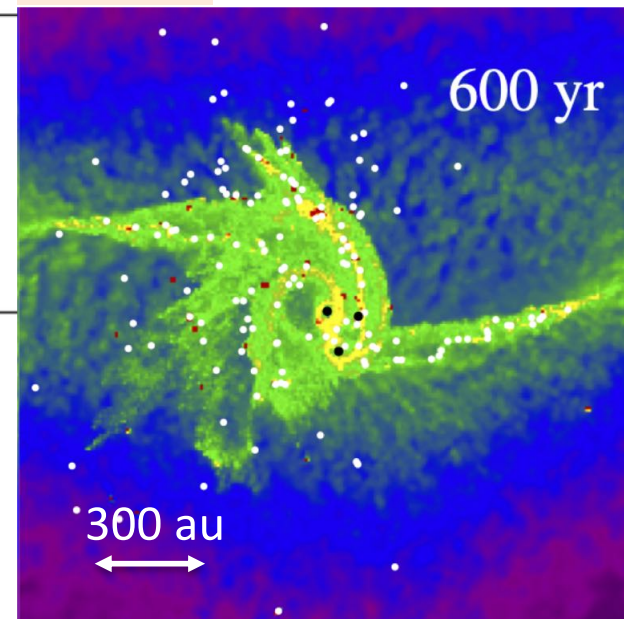
⇒ほとんどのsinkでは、
質量降着が止まっている。

Supermassive star or dense cluster?

先行研究(Sakurai+2017)と比べて、かなりコンパクトな領域に質量が集中している。

Table 3. Additional star cluster models with different parameters. The main difference from our fiducial model is described in the last column. The values of M_{DM} and N_{DM} , if DM is included, are the same as in the corresponding fiducial model and thus are not listed here. Note that the initial distribution of the stars for Model AnoDM and Arad are exactly the same as in the fiducial model A. Unless mentioned, the values are obtained by averaging over 3 realizations.

	$\bar{M}_{\text{cl},4}$ ($10^4 M_{\odot}$)	\bar{N}_3 (10^3)	\bar{r}_c (pc)	$\bar{\rho}_{c,5}$ ($M_{\odot} \text{pc}^{-3}$)	\bar{t}_{rh} (Myr)	\bar{t}_{rc} (kyr)	$\bar{\epsilon}_{\text{sfe}}$ (%)	$\bar{m}_{\text{max},f}$ (M_{\odot})	\bar{N}_{coll}	Notes
A	16.4	19.9	0.401	6.45×10^5	19.7	528	5.91	本計算	7	fiducial model (Table 1)
AnoDM	16.4	19.9	0.401	6.45×10^5	19.7	528	5.91			no DM
Arad	16.4	20.0	0.400	6.30×10^5	19.5	553	5.90			realization
Amax	16.5	18.6	0.394	7.31×10^5	17.2	157	5.95			realization
Amin	16.6	53.3	0.401	7.94×10^5	44.6	1040	5.99			realizations
Asfe1	28.5	34.5	0.509	5.47×10^5	48.3	511	10.3			1.16×10^{-4}
Asfe2	8.56	10.4	0.359	4.47×10^5	12.7	351	3.09			3.32×10^{-5}
Asfe3	1.75	2.10	0.361	8.51×10^4	8.61	144	0.629			



Detection rate of GWs

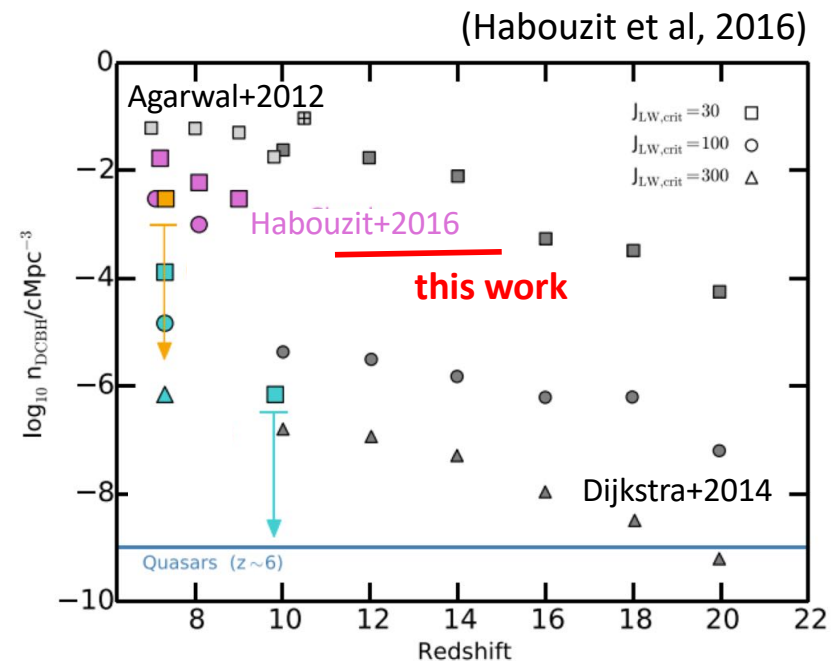
$$N_{\text{merge}} = N_{\text{DC}} f_{\text{binary}} f_{\text{merge}}$$

$$\sim 2 \times 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3} \left(\frac{N_{\text{merge}}}{5 \times 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}} \right) \left(\frac{f_{\text{binary}} f_{\text{merge}}}{4} \right)$$

今回の計算より

$$\dot{N}_{\text{event}} = 0.61 \text{ yr}^{-1} \left[\frac{N_{\text{merge}}}{2 \times 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3}} \right] \quad (\text{Haehnelt, 1994})$$

参考：先行研究ではSMSの形成率について様々な値が提唱されている(右図)。現状では不定性がかなり大きい、将来のGW観測でいくらか制限できるかもしれない。



Massive binaries

- どのmetallicityにおいても、massive binaryが出現
- binaryのseparationは時間とともに増大 (SC+19)
- mass ratioは1に近づく

