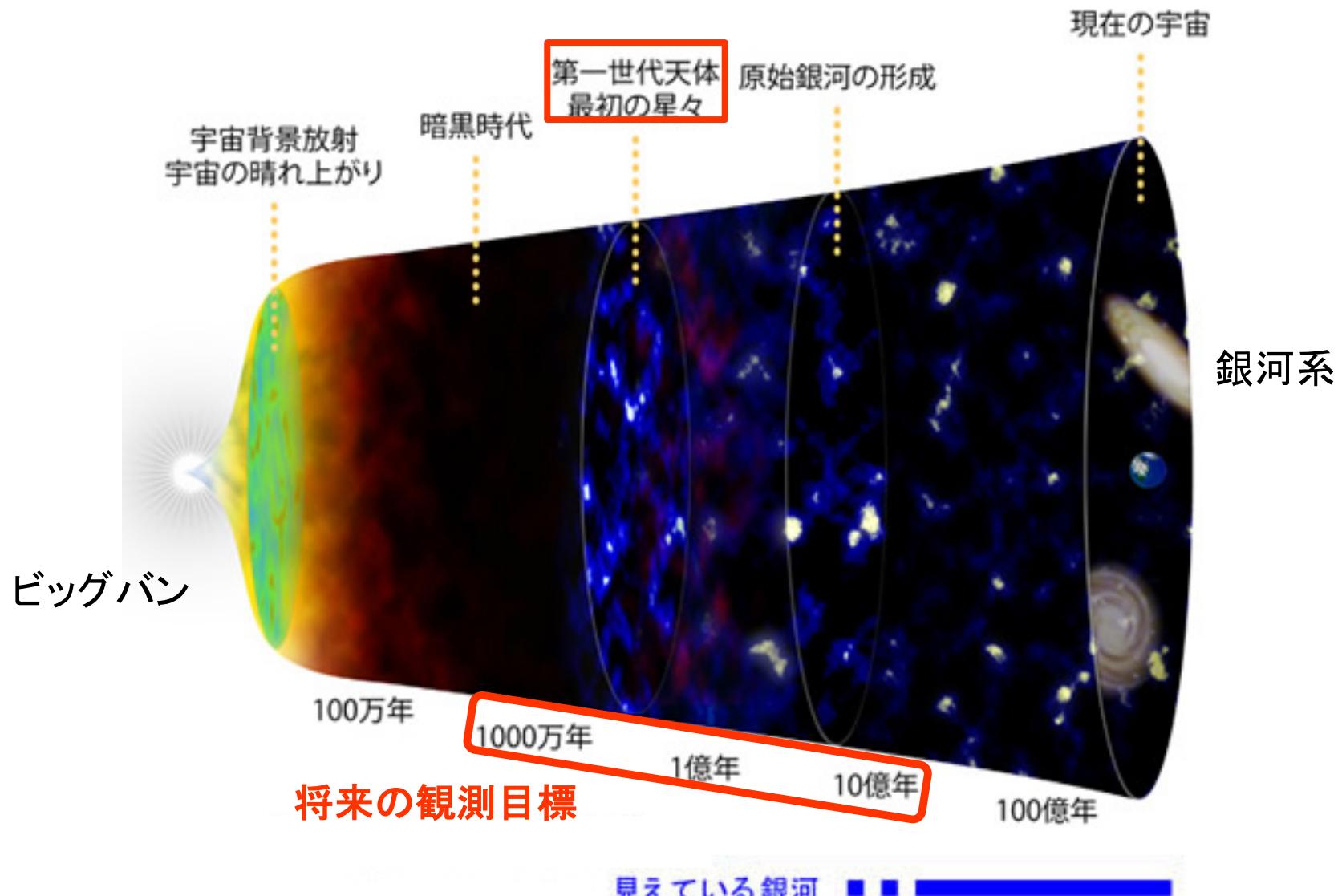


初代星の最大質量 と超巨大ブラックホール の起源

細川 隆史
(東京大→京都大)

宇宙最初の星形成

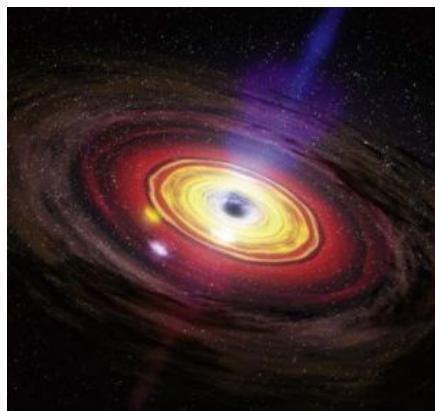


どこかの時点で、宇宙最初の星(=宇宙初代星)が生まれた。
それはいつ、どこだったのか？どんな星だったのだろうか？

初期宇宙での大質量星

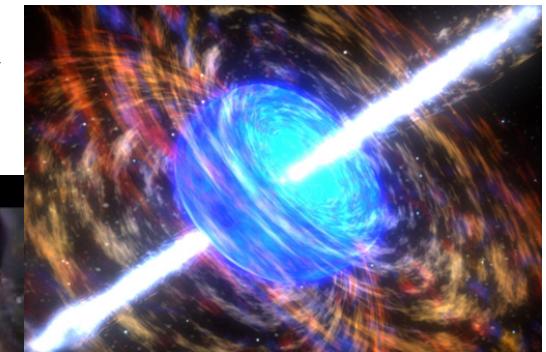
>10M_⦿の星がいつどれくらいできたかが特に重要

- 宇宙再電離、最初の重元素合成など、後の天体形成を左右
- 星の死 ⇒ 初代ブラックホール：超巨大ブラックホールの起源
- 遠方宇宙観測：
大質量星起源の放射を見る。γ線バーストなど爆発現象も有望

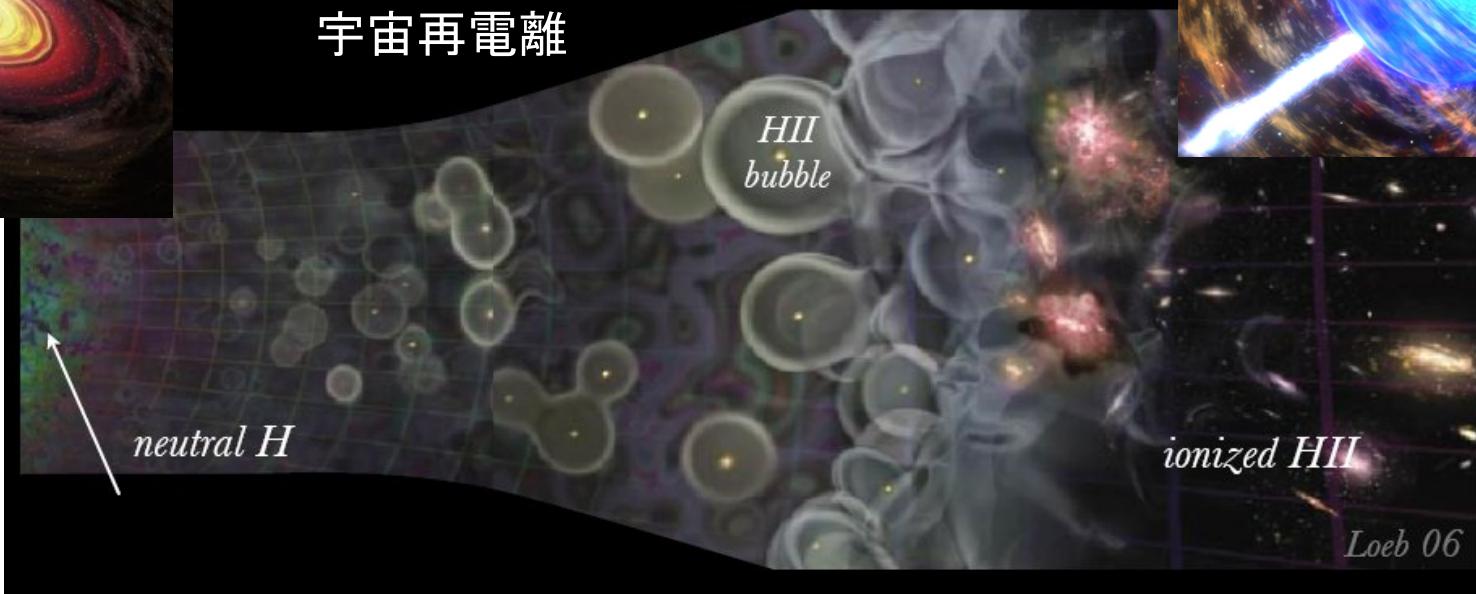


初代
ブラックホール

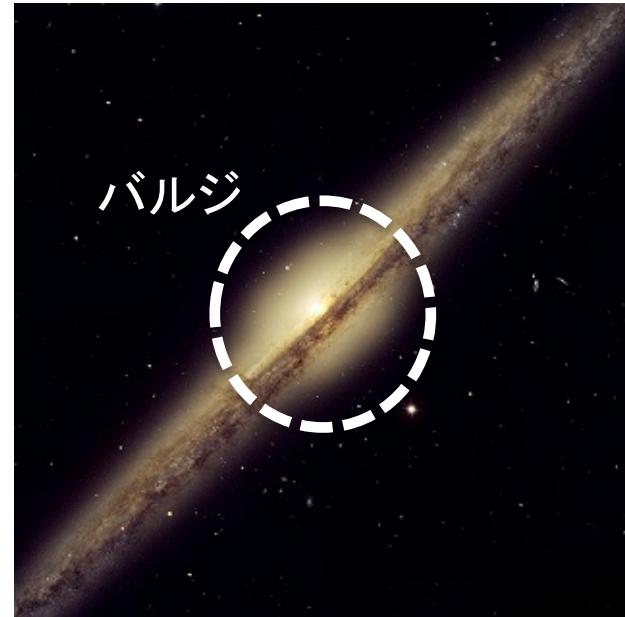
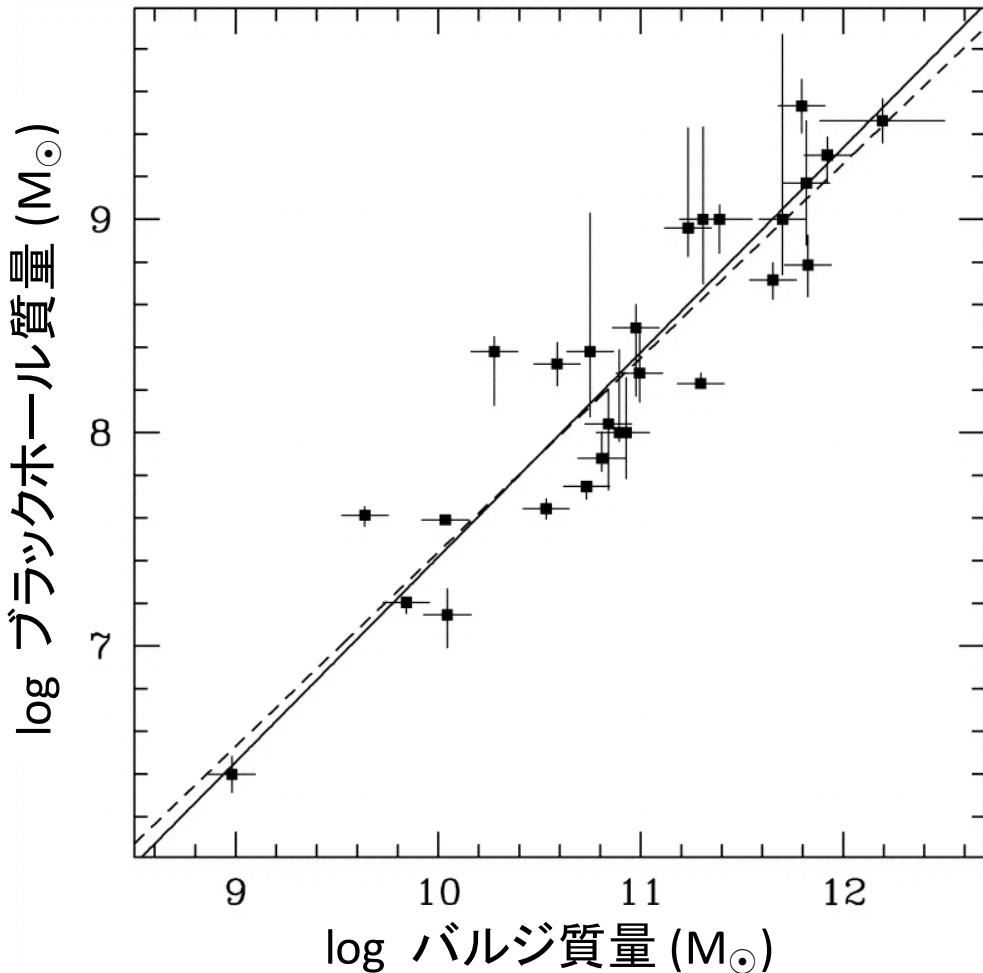
ガンマ線
バースト



宇宙再電離



Supermassive BH (SMBH)



ブラックホール質量は銀河バルジの質量に比例 (質量比およそ0.1%)

※全く長さスケールが異なる

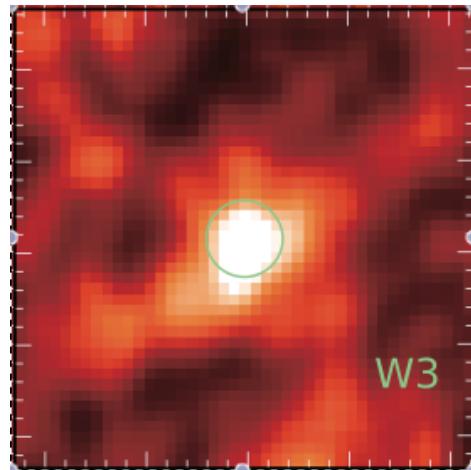
BH : 大きさ $2GM_{\text{BH}}/c^2 = 3 \times 10^{13} \text{ cm} (M_{\text{BH}}/10^8 M_{\odot})$

重力圏 $GM_{\text{BH}}/\sigma^2(\text{星の速度分散}) \sim 10^{19} \text{ cm} (M_{\text{BH}}/10^8 M_{\odot}) (\sigma/200 \text{ km/s})^{-2}$

バルジ: $10^4 \text{ 光年} = 10^{22} \text{ cm}$

宇宙最初のSMBHs?

最近、 $z > 6$ を超える宇宙で非常に明るいQSOsが見つかっている



+ $M_{\text{BH}} \sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$ @ $z = 7.085$
(Mortlock et al. 2011, Nature)

← + $M_{\text{BH}} \sim 1.2 \times 10^{10} M_{\odot}$ @ $z = 6.3$
(Wu et al. 2015, Nature):
(類似の天体およそ10例)

Age of the universe@ $z \sim 7$: 0.77Gyr. これまでに作る必要がある

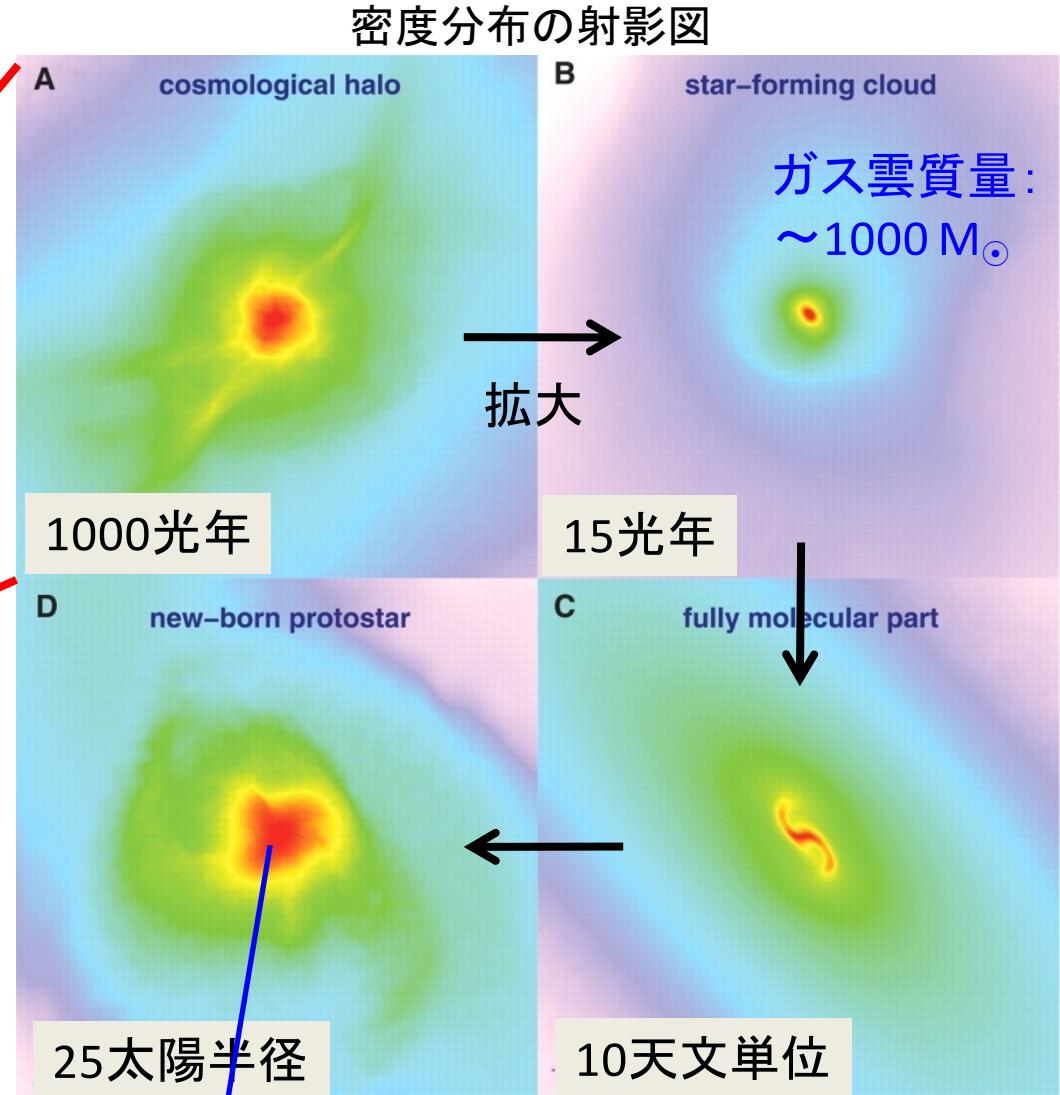
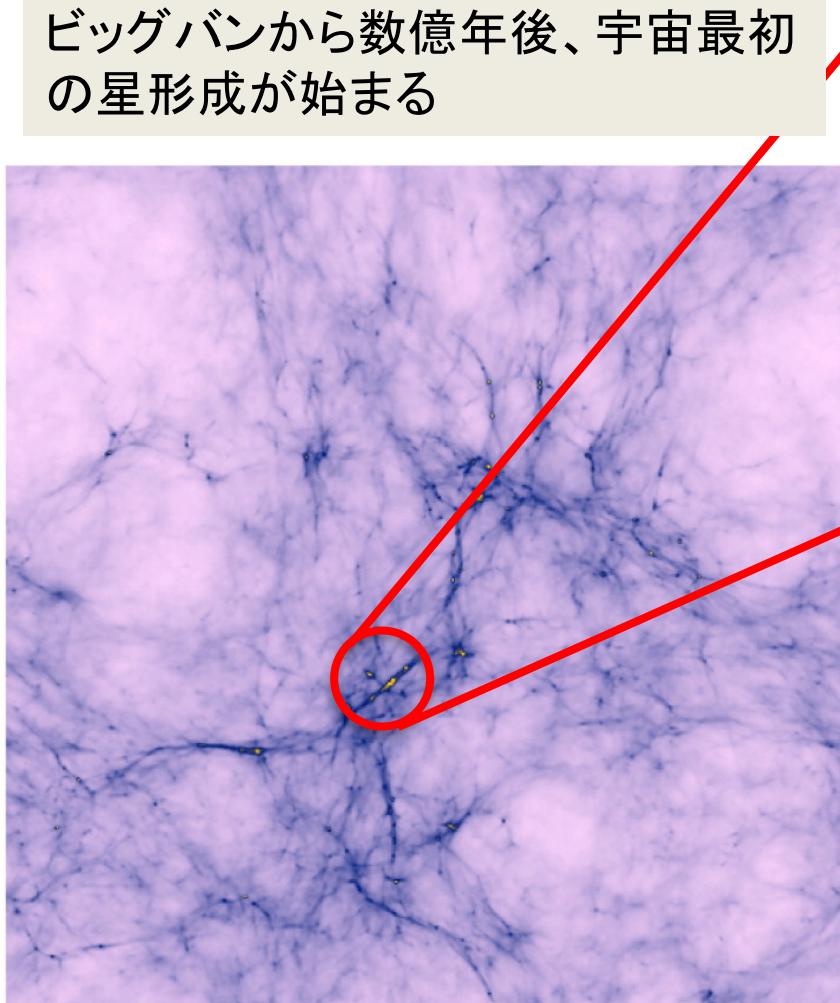
初代星の死後残されたBH ($\sim 10^2 M_{\odot}$)がエディントン降着率で成長

$$t_{\text{grow}} = 0.05 \log \left(\frac{10^9 M_{\odot}}{10^2 M_{\odot}} \right) \simeq 0.8 \text{Gyr} \quad \text{ぎりぎり?}$$

Key Questions

- + 初代星は典型的に何太陽質量の星として生まれるのか？
その質量分布はどのようにになっているのだろう？
- + 最大の初代星は何太陽質量なのだろうか？初期宇宙での
超巨大ブラックホール形成にどのように寄与するのか？

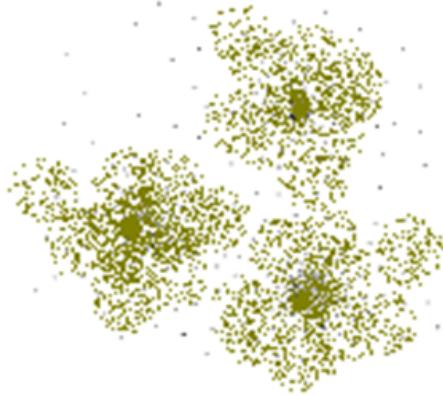
Seeded by First Stars?



Yoshida, Omukai & Hernquist (2008)

宇宙最初の“赤ちゃん星”: ~ 0.001 太陽質量

ガス雲の重力崩壊



星になるためには、実に20桁近い密度の上昇が必要。
圧力で押し返す効果に打ち勝って自身の重力で潰れることで
この進化が始まる。このための条件：

$$\text{ジーンズ質量: } M_J = K \frac{c_s^3}{G^{3/2} \rho^{1/2}}$$

(球対称)

分子雲コアの温度、密度では $M_J \sim 1 M_{\odot}$ でコアの質量と同じくらい

状態方程式: $P \propto \rho^\gamma$ とすると、 $T \propto \rho^{\gamma-1}$

$$M_J \propto \rho^{(3\gamma-4)/2}$$

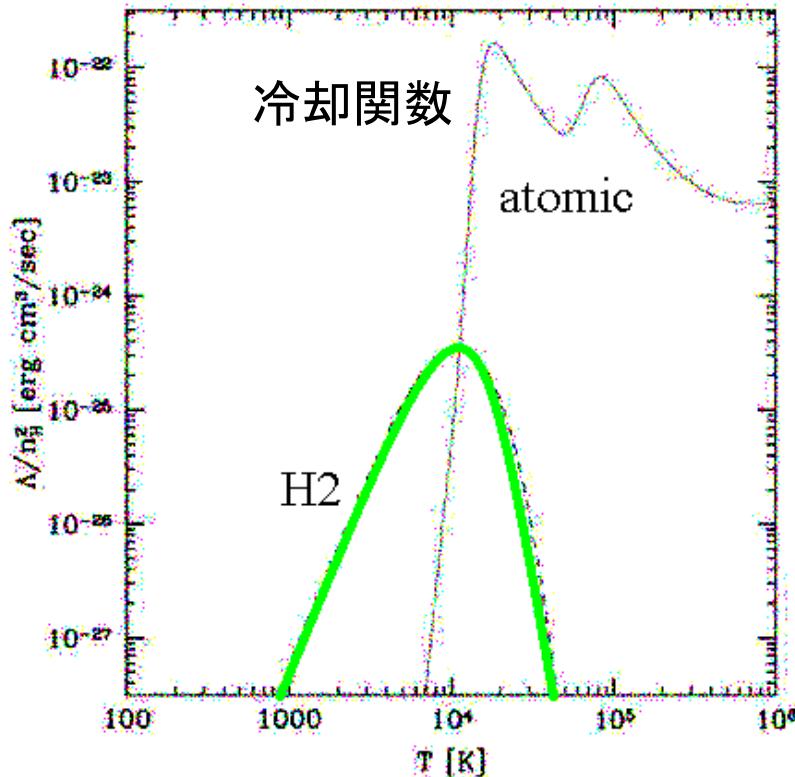
$\gamma < 4/3$: $\rho \uparrow \Rightarrow M_J \downarrow$; 不安定 \rightarrow collapse

$\gamma > 4/3$: $\rho \uparrow \Rightarrow M_J \uparrow$; 安定

$\gamma = 4/3$ が critical

状態方程式(γ) はガスがいかに効率よく冷えるかで決まる。

銀河系との違い



(e.g., Palla et al. 83, Galli & Palla 98)

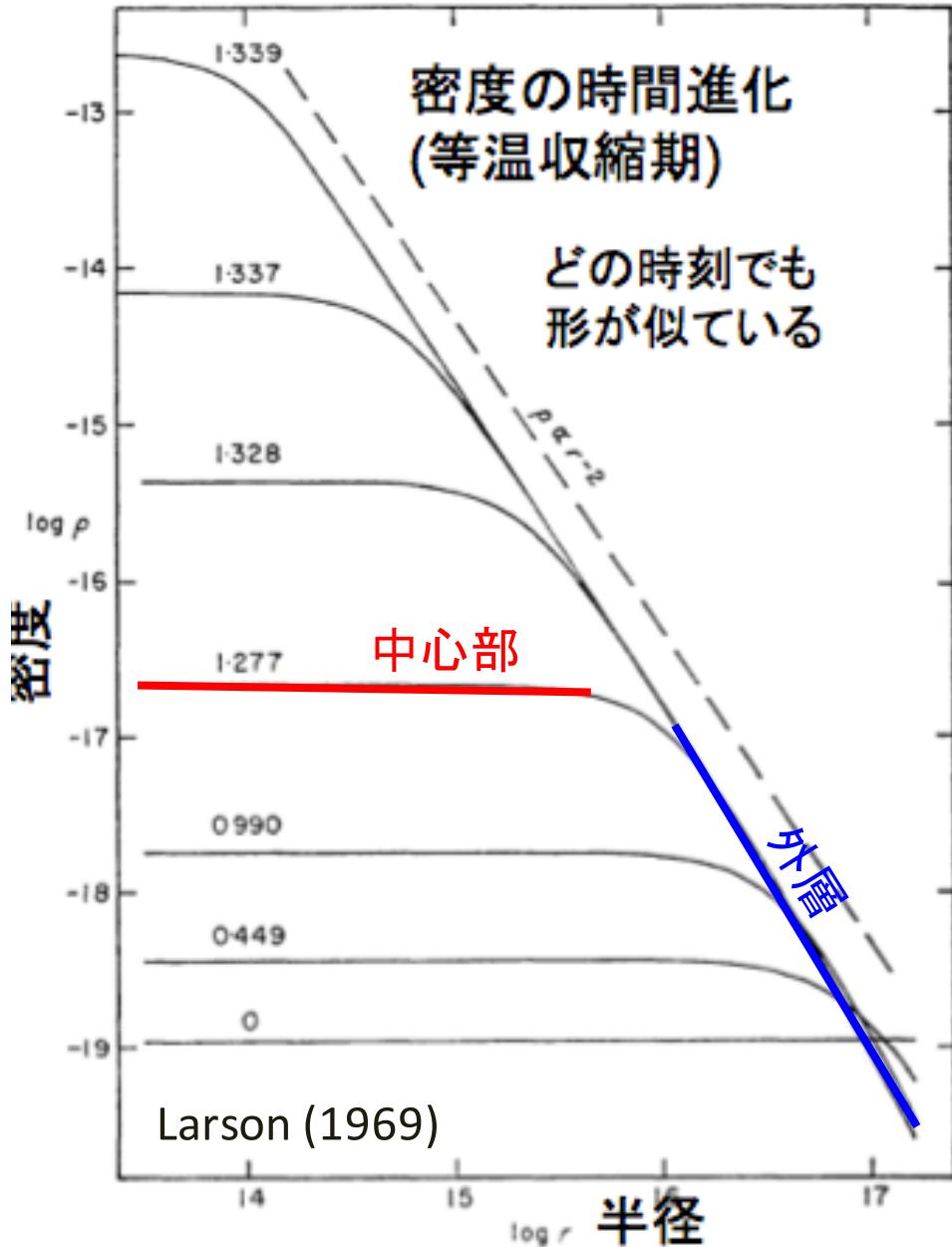
← ガス冷却過程：
H₂分子の回転・振動励起輝線放射
(T < 10000 K)

(CII, OI, CO, dust cooling etc. @ Galaxy)

H₂分子生成

- **H⁻ channel** : e catalyst ($n < 10^8 \text{cm}^{-3}$)
 $\text{H} + \text{e} \rightarrow \text{H}^- + \gamma, \quad \text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}$
- **3-body reaction** ($n > 10^8 \text{cm}^{-3}$) $3 \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$
(銀河系ではダスト上表面反応で生成)

Run-away collapse



密度ほぼ一定の中心部分

+
そのまわりの外層部分($\rho \propto r^{1/2}$)

の構造を維持しつつ中心部の密度上昇

一様中心部の質量～ジーンズ質量

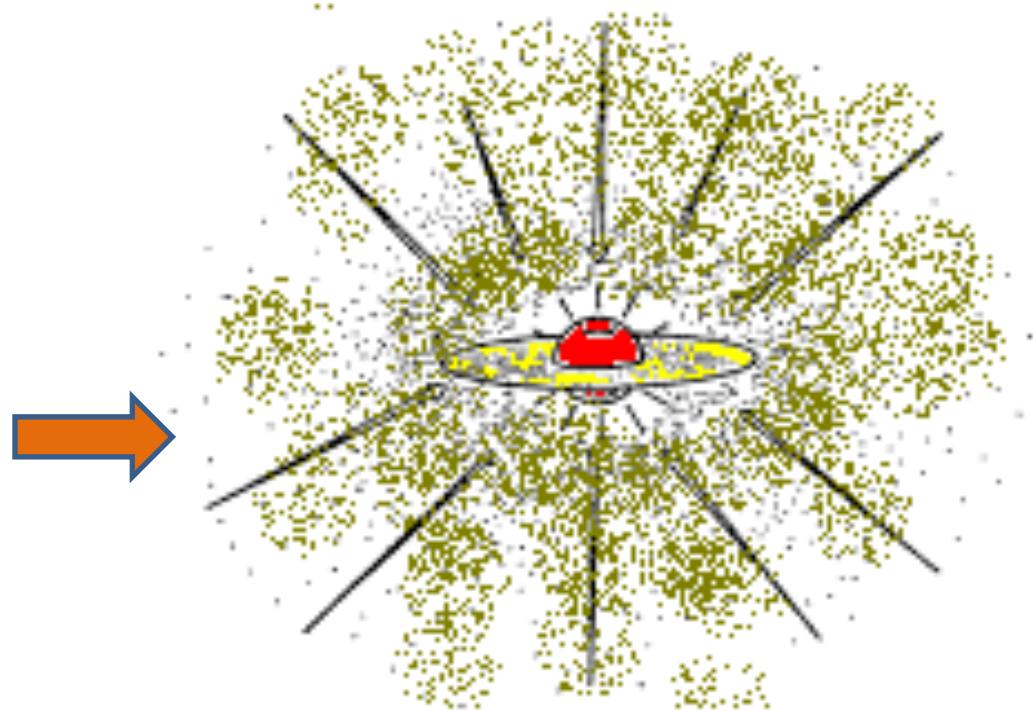
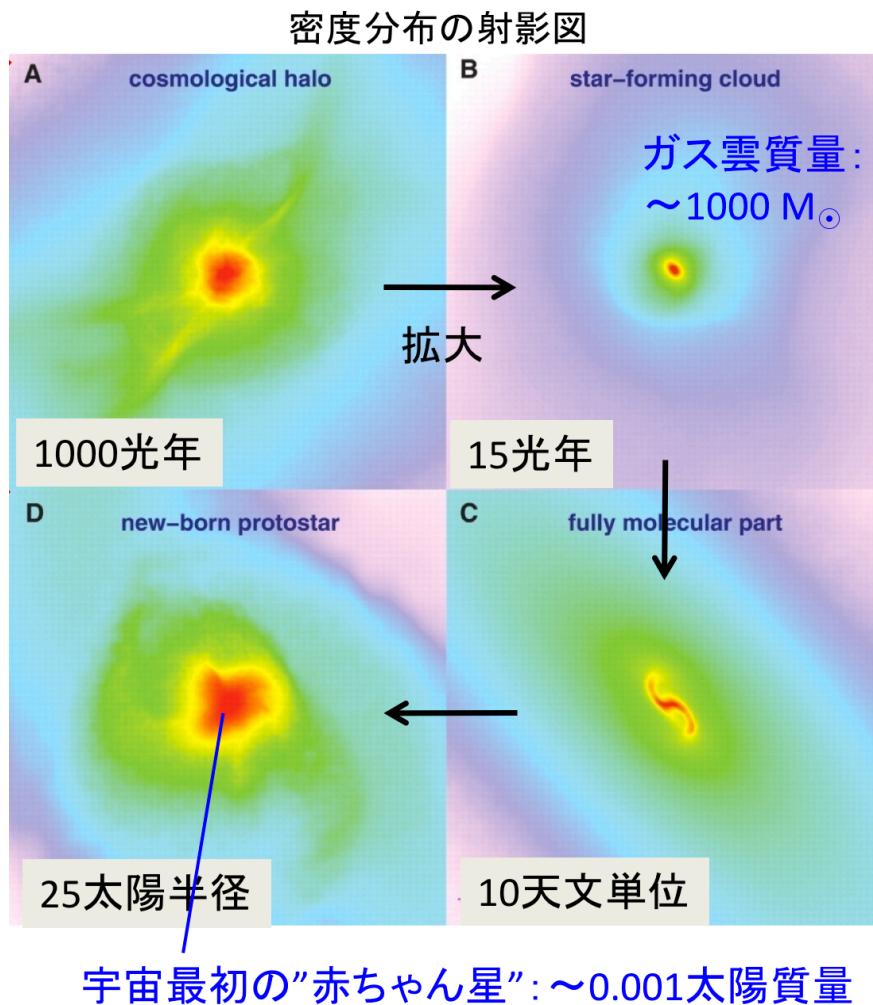
$$M_J \propto \rho^{(3\gamma-4)/2} \quad \gamma = \sim 1$$

$\rho \uparrow$ とともに中心部の質量は減少

崩壊する中心部から見ると、周囲を置き去りにして崩壊が進むように見える

何太陽質量の星ができるか

ハロー中のガスコア重力収縮
(前期段階) ⇒ 原始星への質量降着
(後期段階)



この後、原始星周囲のガスが
星に降り積もって星質量が増加する

星質量はこの時期に決まる

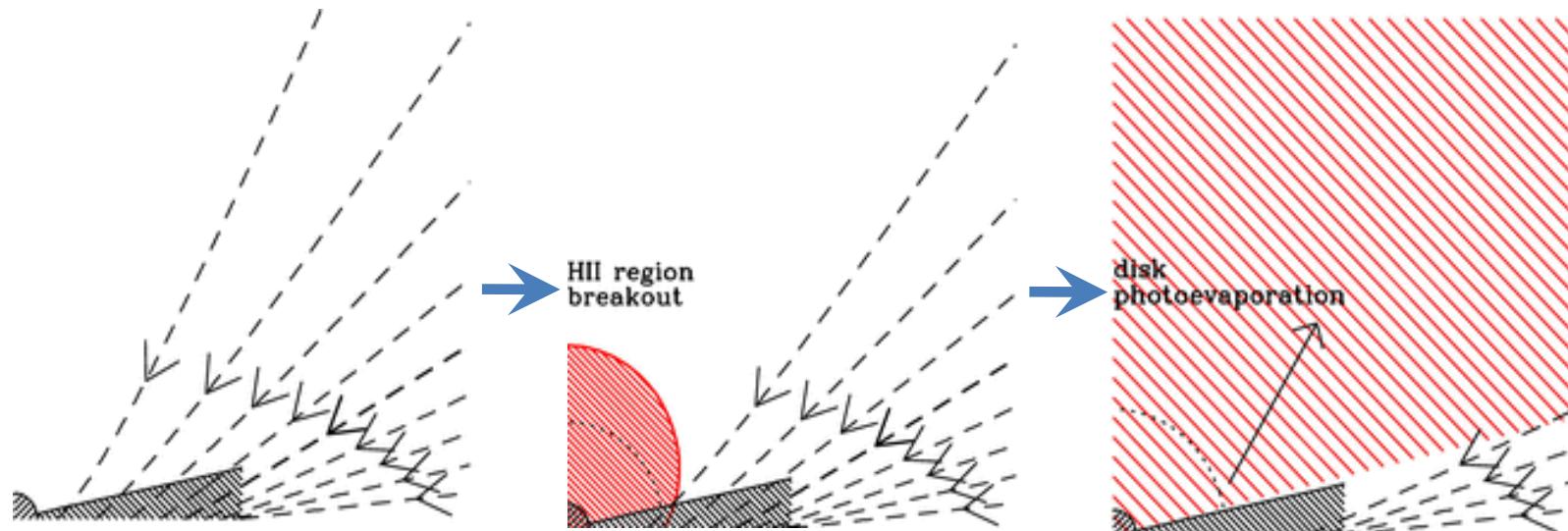
後期段階の進化

$$\text{予想される降着率: } \dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \sim 7 \times 10^{-4} M_\odot/\text{yr} \left(\frac{T}{300 \text{ K}} \right)^{3/2}$$

星の寿命(\sim Myr)間、降着が続いた場合 $\Rightarrow M_* \sim 1000 M_\odot$
(もとのガス雲の質量)

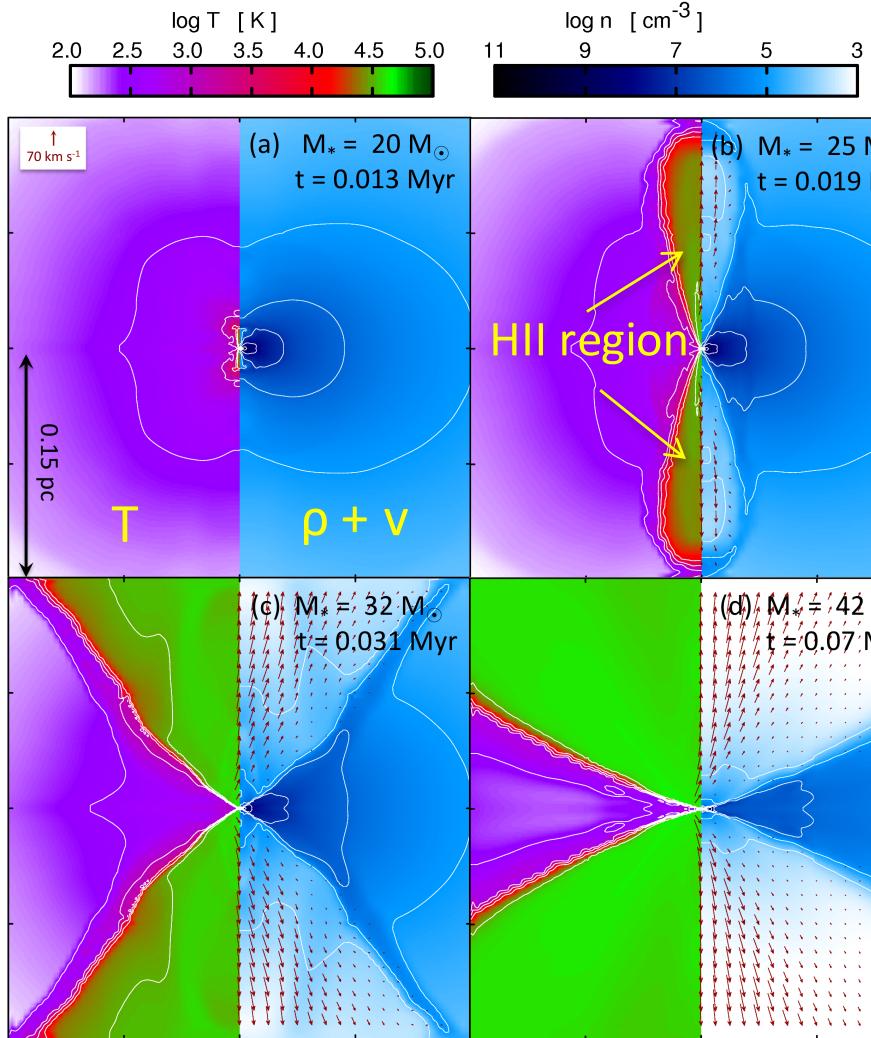
UV stellar feedback (e.g., McKee & Tan 08; TH et al. 2011)

電離領域の形成 + 星周円盤の光蒸発

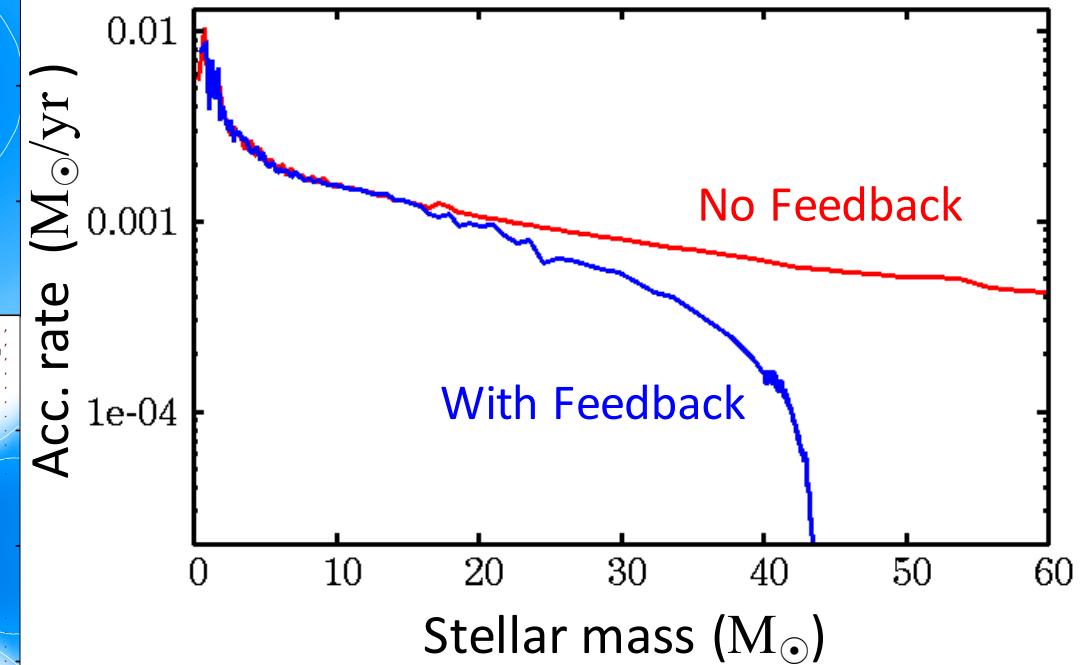


途中で降着が止められて星質量はそんなに大きくなれない

Protostellar UV Feedback



TH+11, 12; Hirano et al. 14
(also see McKee & Tan 08)

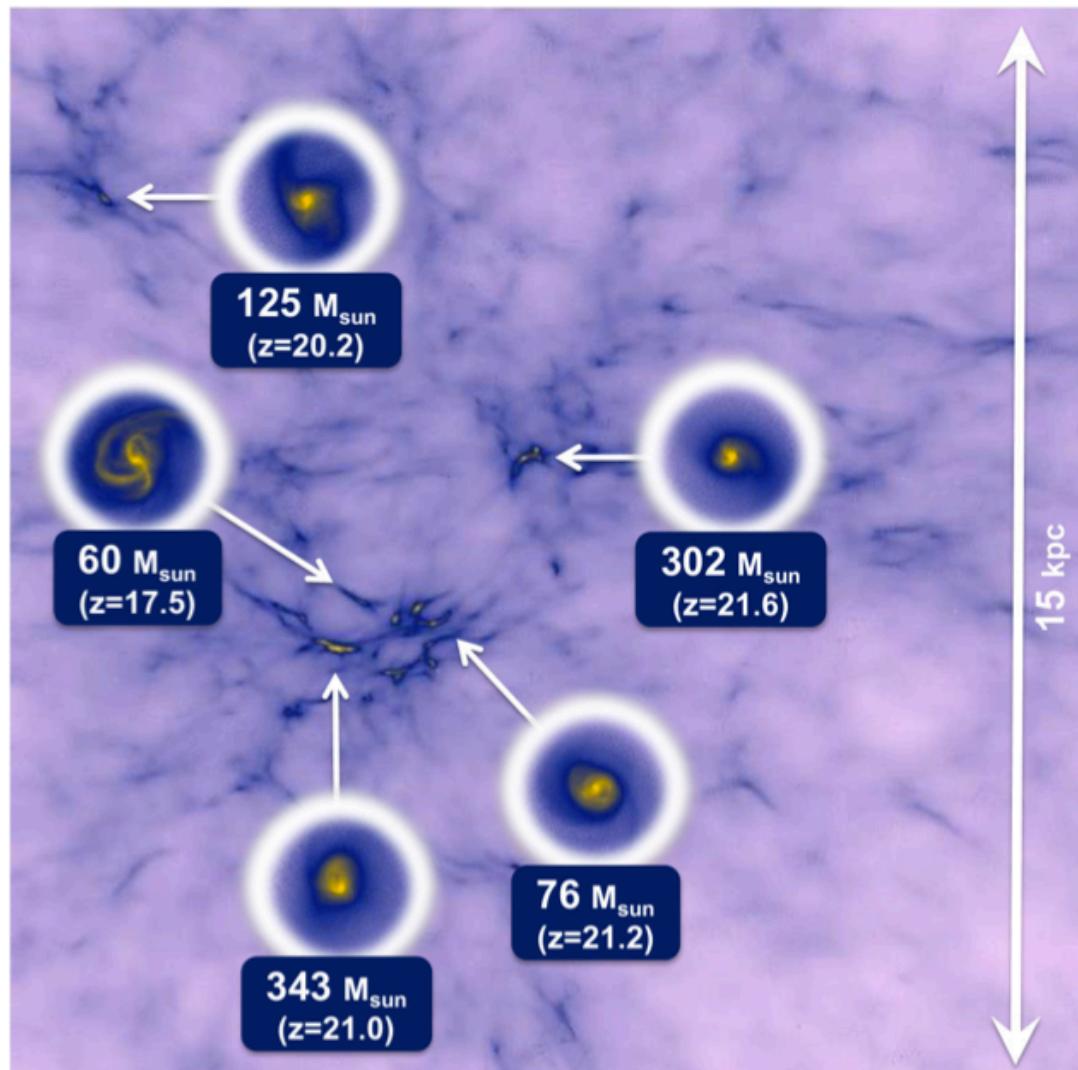


- Acc. rate is significantly reduced by the stellar UV feedback
- Mass accretion is shut off when the stellar mass is $\sim 43 M_\odot$

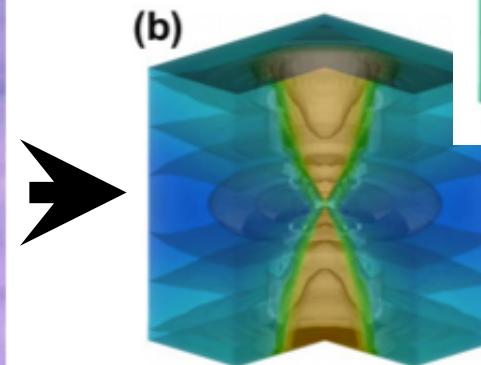
>1000個の初代星

星質量分布を調べるため、星形成ガス雲を多数同定。
原始星の誕生後、後期段階の進化までシミュレーションで追跡

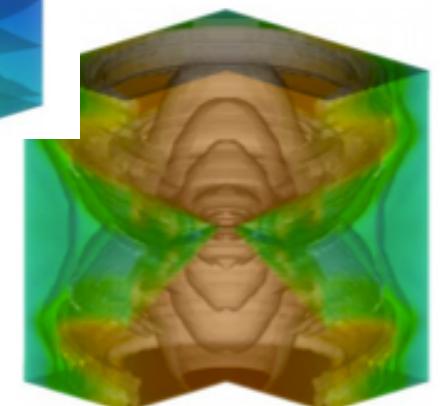
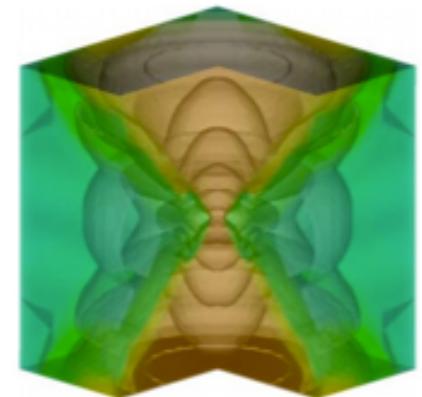
(Hirano, TH et al. 2014; 2015)



電離領域
の形成

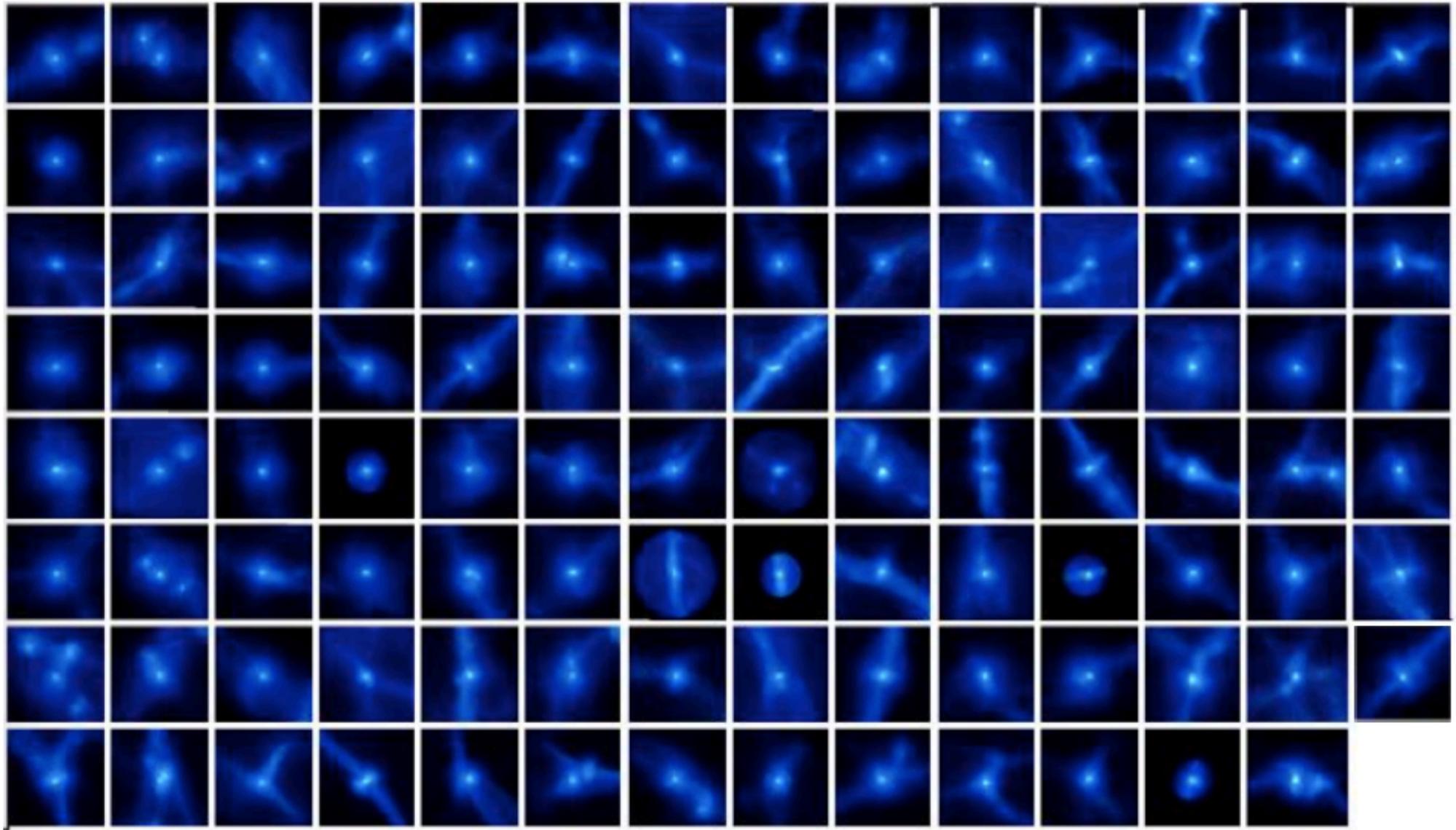


(b)



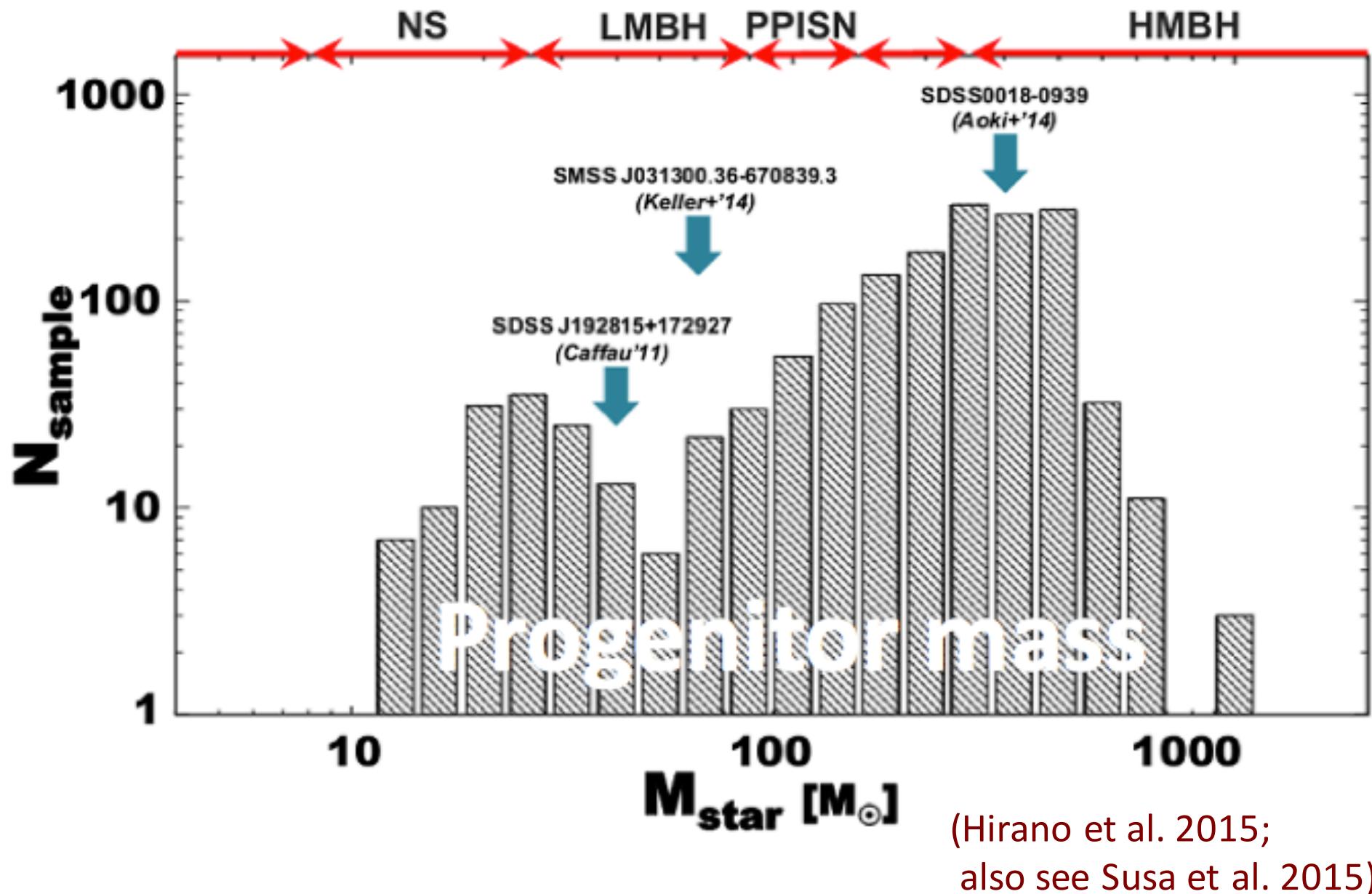
最終的にガス降着が止まって星質量
が定まる

Great Diversity



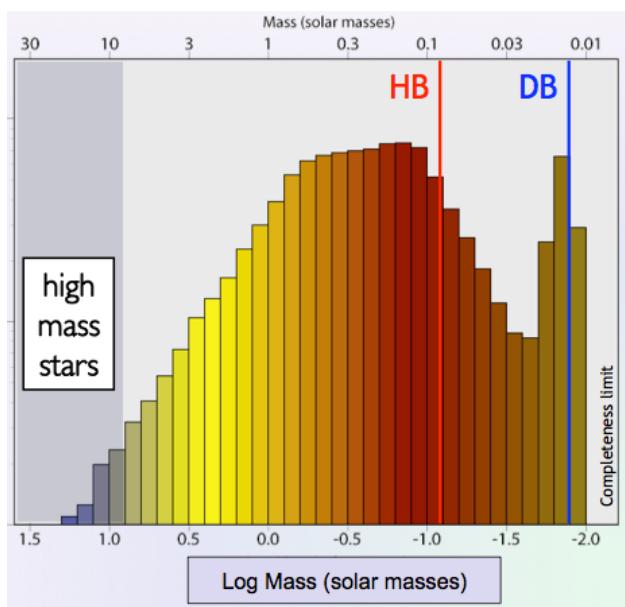
Hirano+14では約100個、Hirano+15では約1000個のガス雲の統計的性質と、それにもとづく星質量分布を調べた

The “Mass Spectrum”



初代星の最大質量?

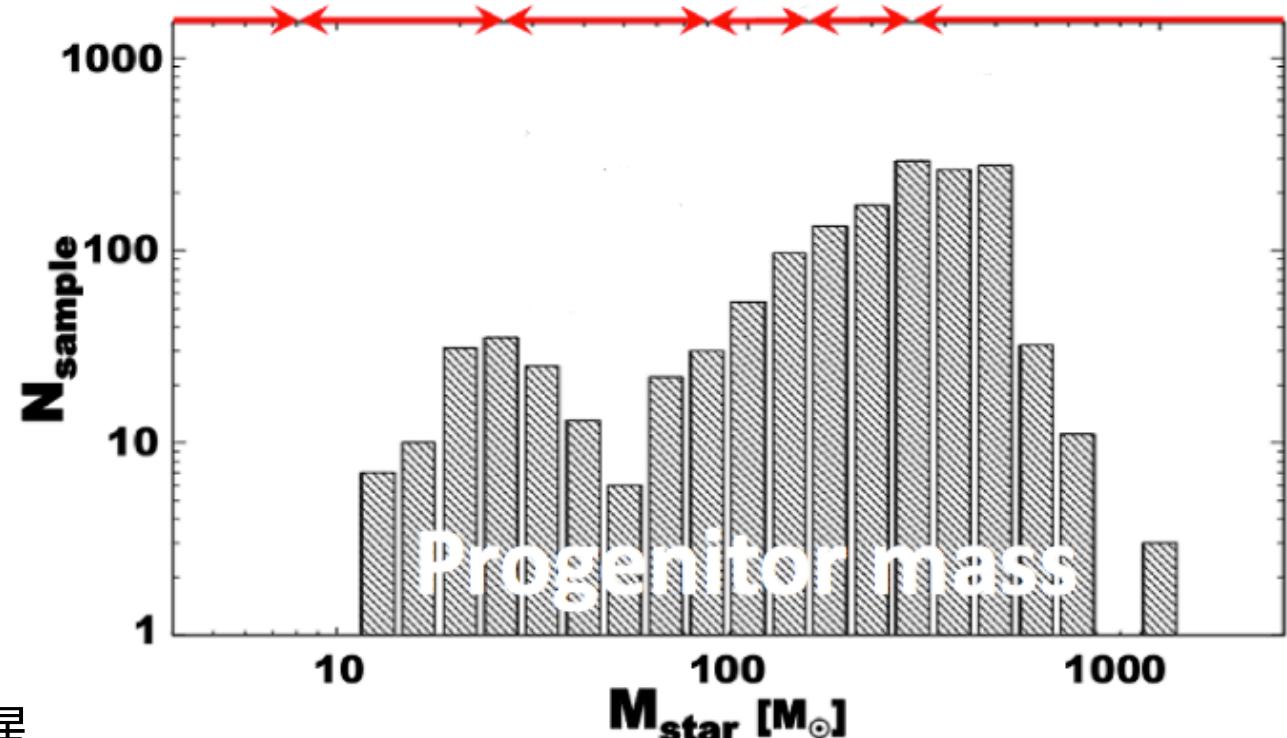
現在の宇宙 [Z=Z_☉]



典型星質量 $\sim 1M_{\odot}$

ごくまれに $\sim 100M_{\odot}$ の大質量星

初期宇宙 [Z=0]



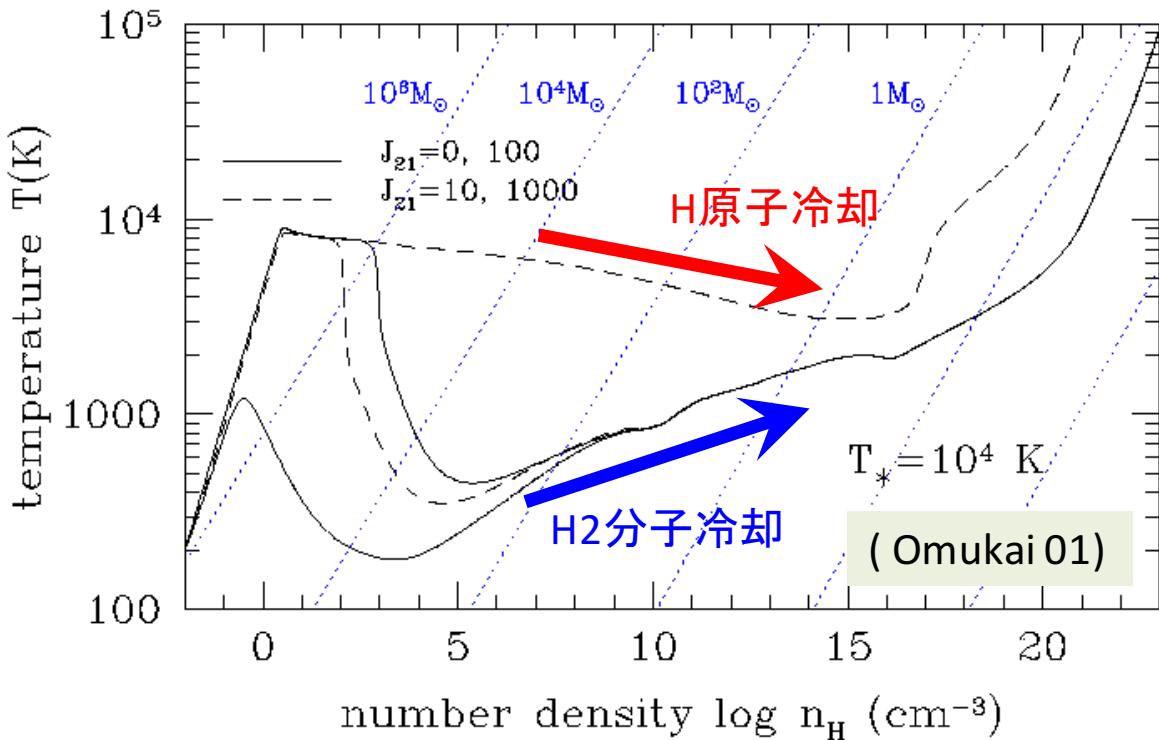
典型星質量 \sim 数 $10-1000M_{\odot}$?

このときの星の最大質量はどれくらいだろうか？

銀河系のように、ごくまれに典型値よりずっと大きな $1\text{万} \sim 10\text{万} M_{\odot}$ の星ができるか？
もし、そのような“超大質量星”があれば最初の SMBH の種になるだろうか？

超大質量星($\sim 10^5 M_{\odot}$)形成

初代星形成の特殊なケース(direct collapse説)



普通の初代星形成と同様に輻射
フィードバックで星質量増が阻害?
星がどのような構造を持って進化するか

①となりの星からの放射
にさらされたガス雲
(H₂分子破壊)

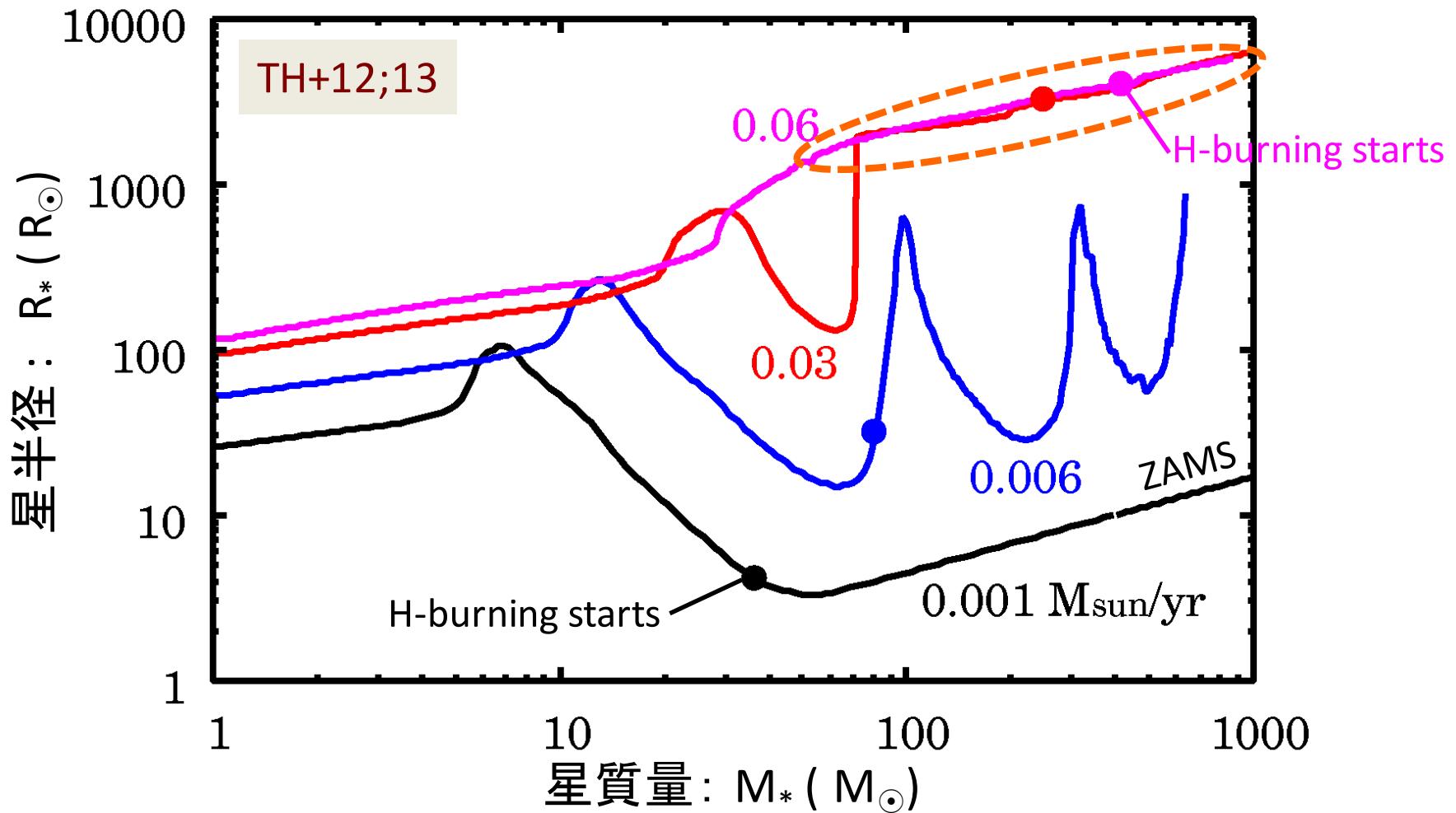
②H原子冷却による重力収縮
(T~8000Kでの等温収縮)

③超大降着率 ($> 0.1 M_{\odot}/\text{yr}$)
での原始星の成長

$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \propto T^{1.5}$$

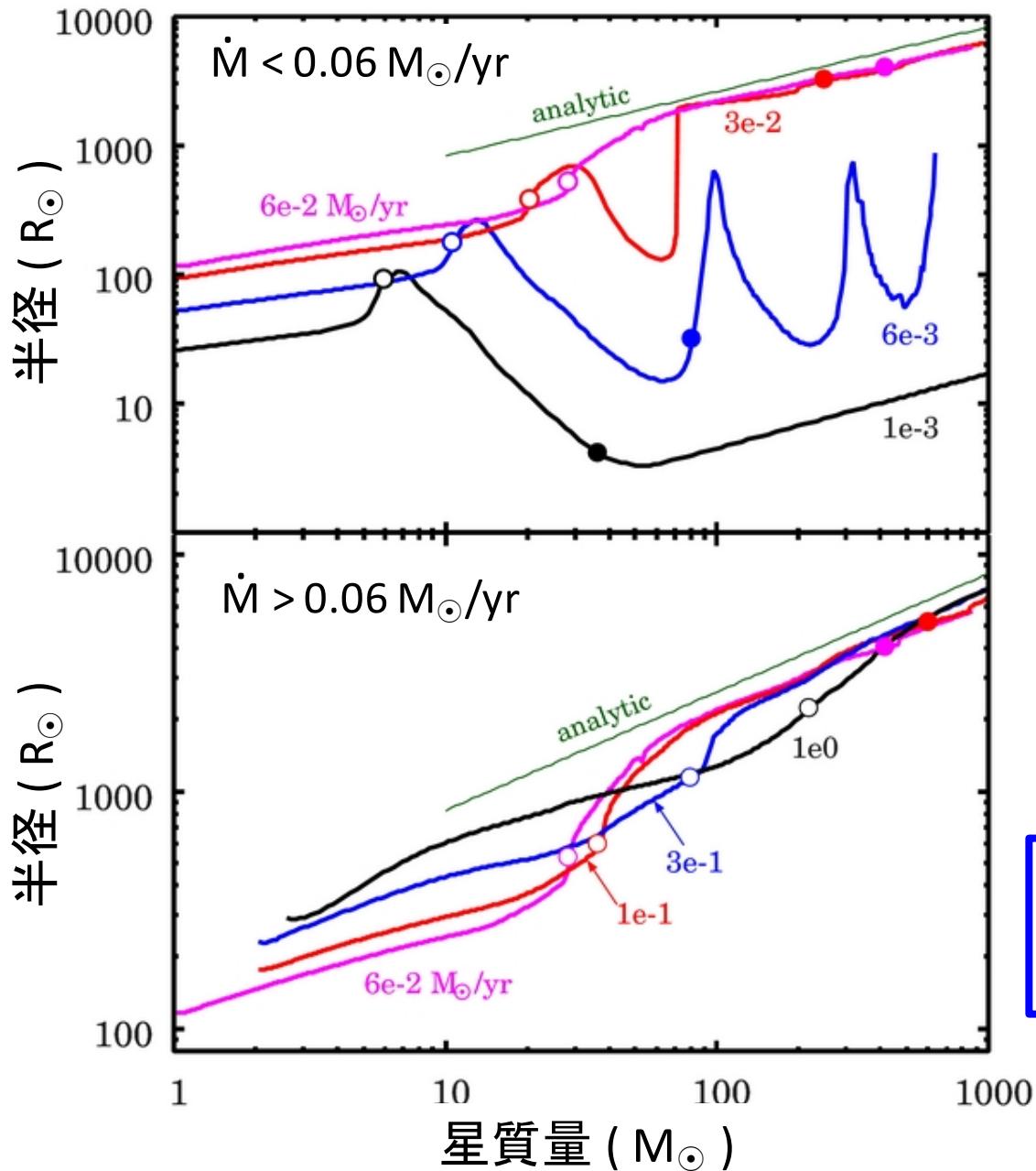
④GR不安定による超大質量星
の崩壊→ $10^5 M_{\odot}$ BH

原始星の巨星化



- $0.01 M_\odot/\text{yr}$ を超える急速降着の下では星の進化が定性的に異なる。原始星の”巨星化”
- 表面外層が効率的に熱を捨てられず、収縮できなくなる

質量-半径関係



星の光度: L_*

$$L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

+

$$L_* \simeq L_{\text{Edd}} \propto M_*$$

+

星表面温度はほぼ一定に固定される

$$T_{\text{eff}} \sim 5000\text{K}$$

(H- opacity の強い温度依存性のため)

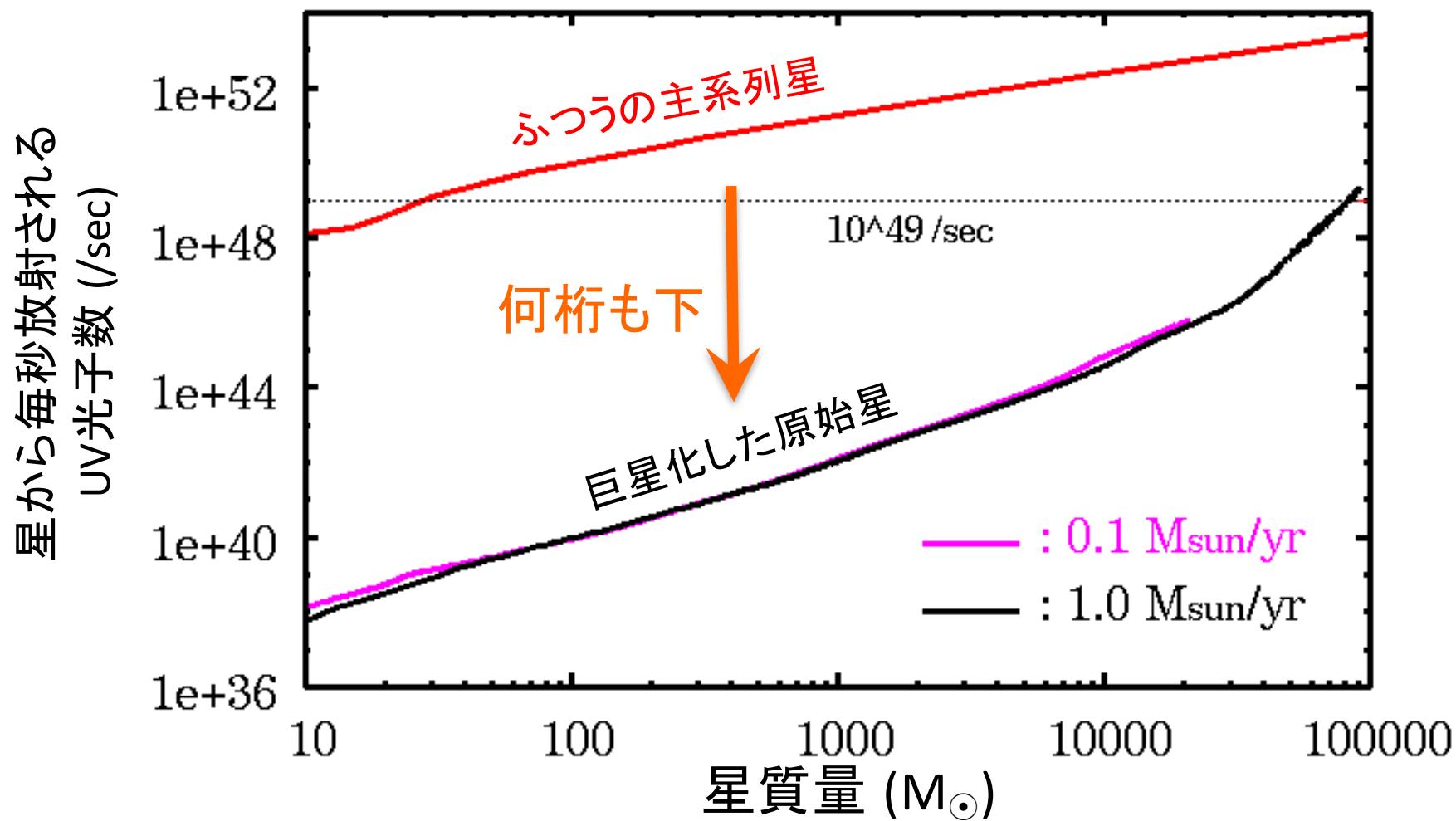
林トラックと同じ

↓

$$R_* \simeq 2.6 \times 10^3 R_{\odot} \left(\frac{M_*}{100 M_{\odot}} \right)^{1/2}$$

数値計算の結果とよく一致する

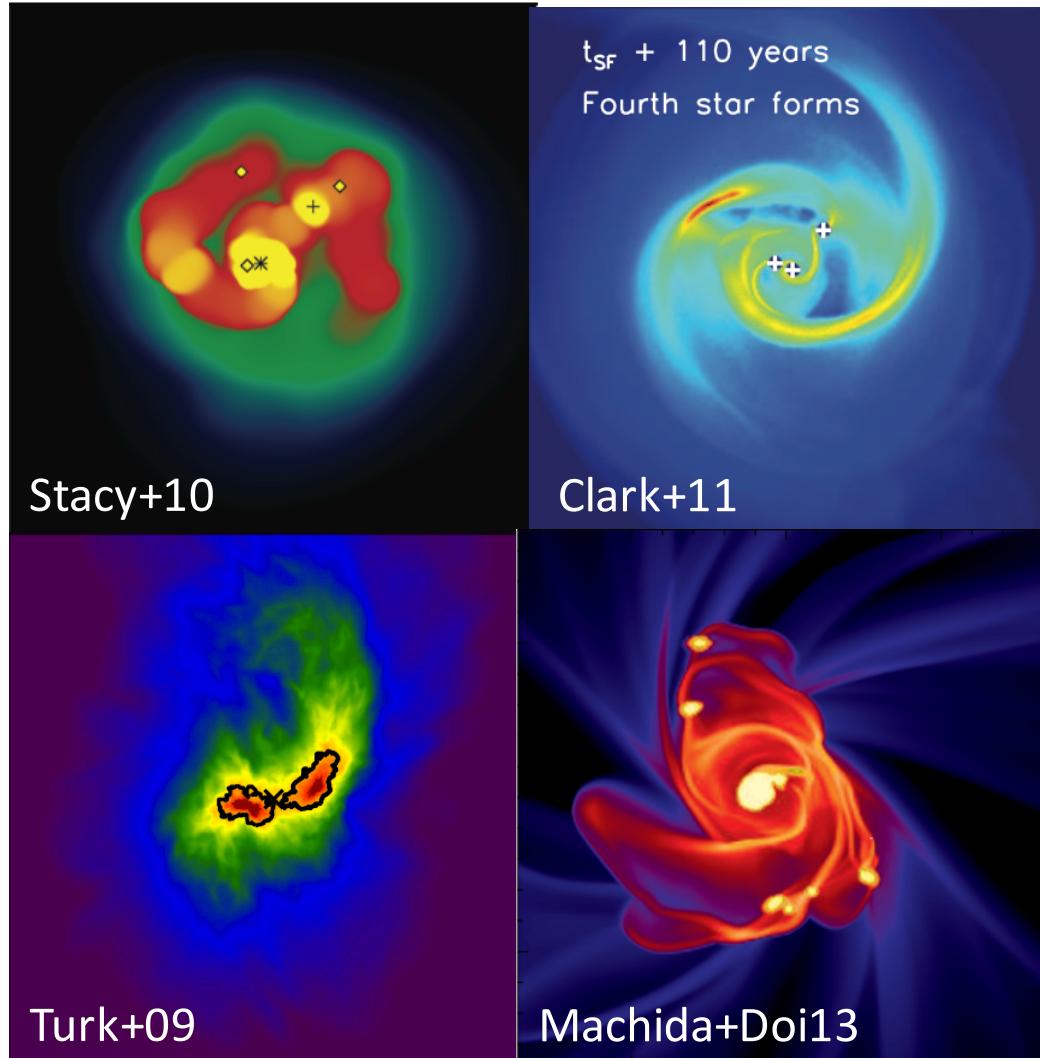
Weak UV Feedback



- 表面温度低い ($< 10^4 \text{K}$) → 星の出すUV光子数少ない
- UV feedbackが弱くなり、星へのガス降着を止めることが
できない

星周円盤の分裂

角運動量輸送は円盤ではなく重力トルクが担う。
円盤の自己重力不安定が強い場合 → 分裂



単独あるいは少数の大質量星?

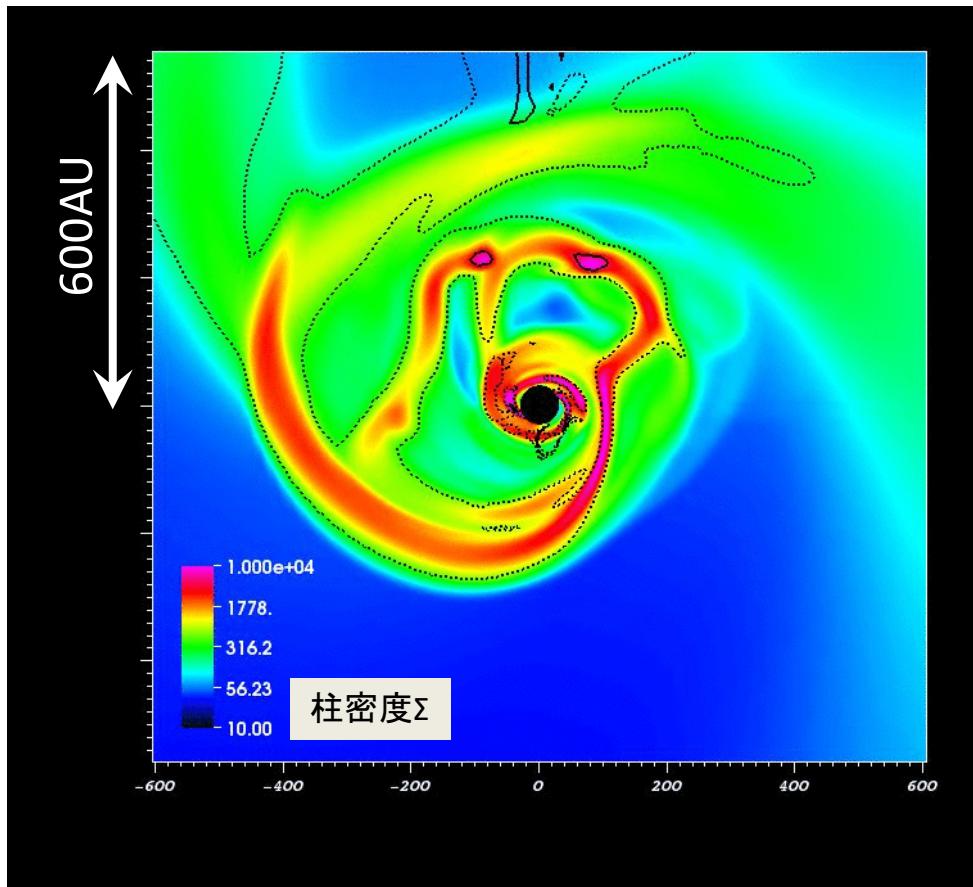


低質量の星を多数含む星団?

円盤分裂と大質量星形成

通常の初代星形成の3次元計算 (TH et al., ApJ, in press; arXiv: 1510.01407)

約100年間の進化



Contour: Toomre Q parameter
実線: $Q=0.1$, 点線: $Q=1.0$

分裂片はすべて100年程度で
中心星へ落下→合体

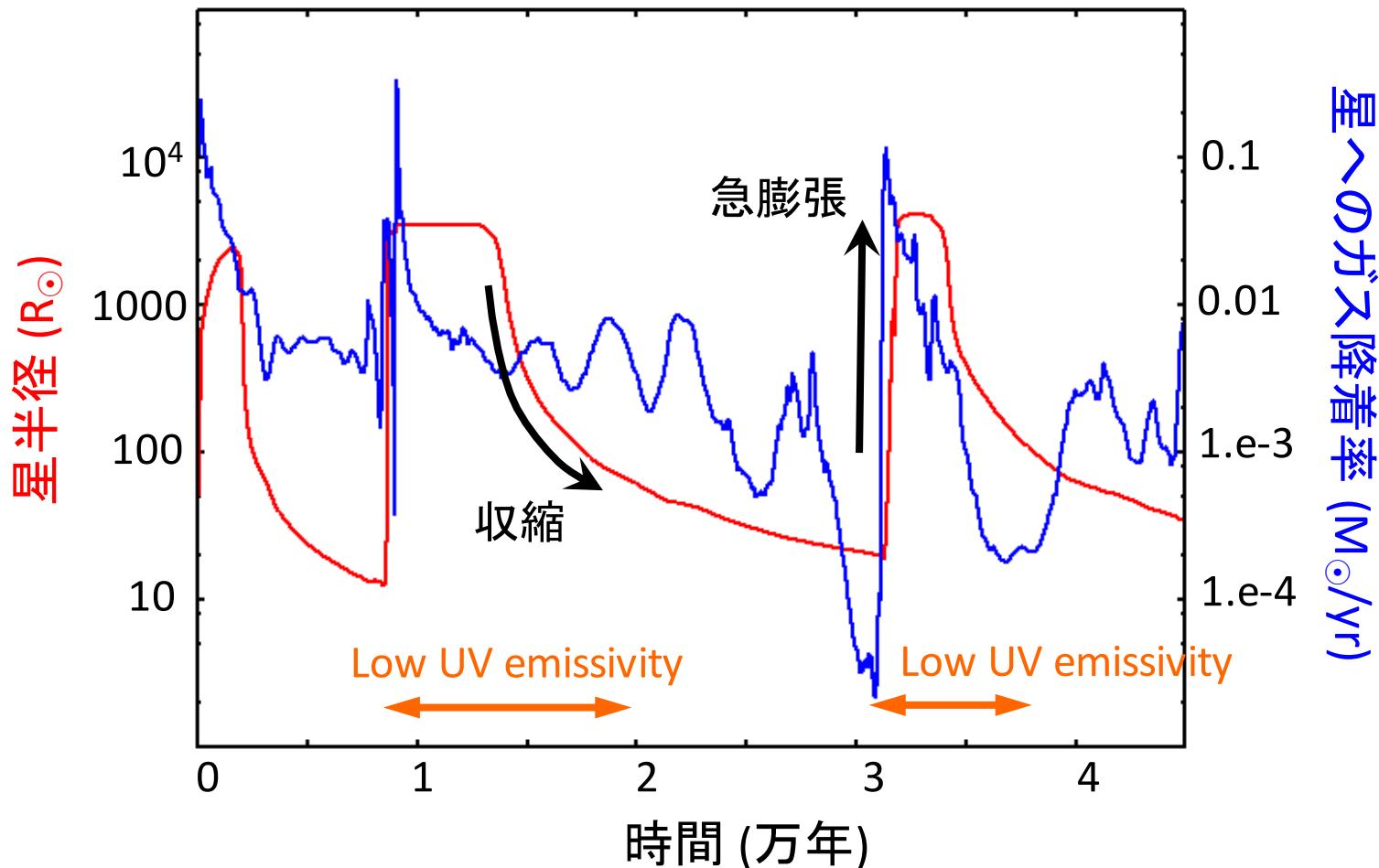
分裂が起きても必ずしも星質量が
下がるとは限らない

中心星に分裂片が落下して
降着burst



短時間ながら非常に急速な
ガス降着が起きる
(direct collapseの場合に匹敵)

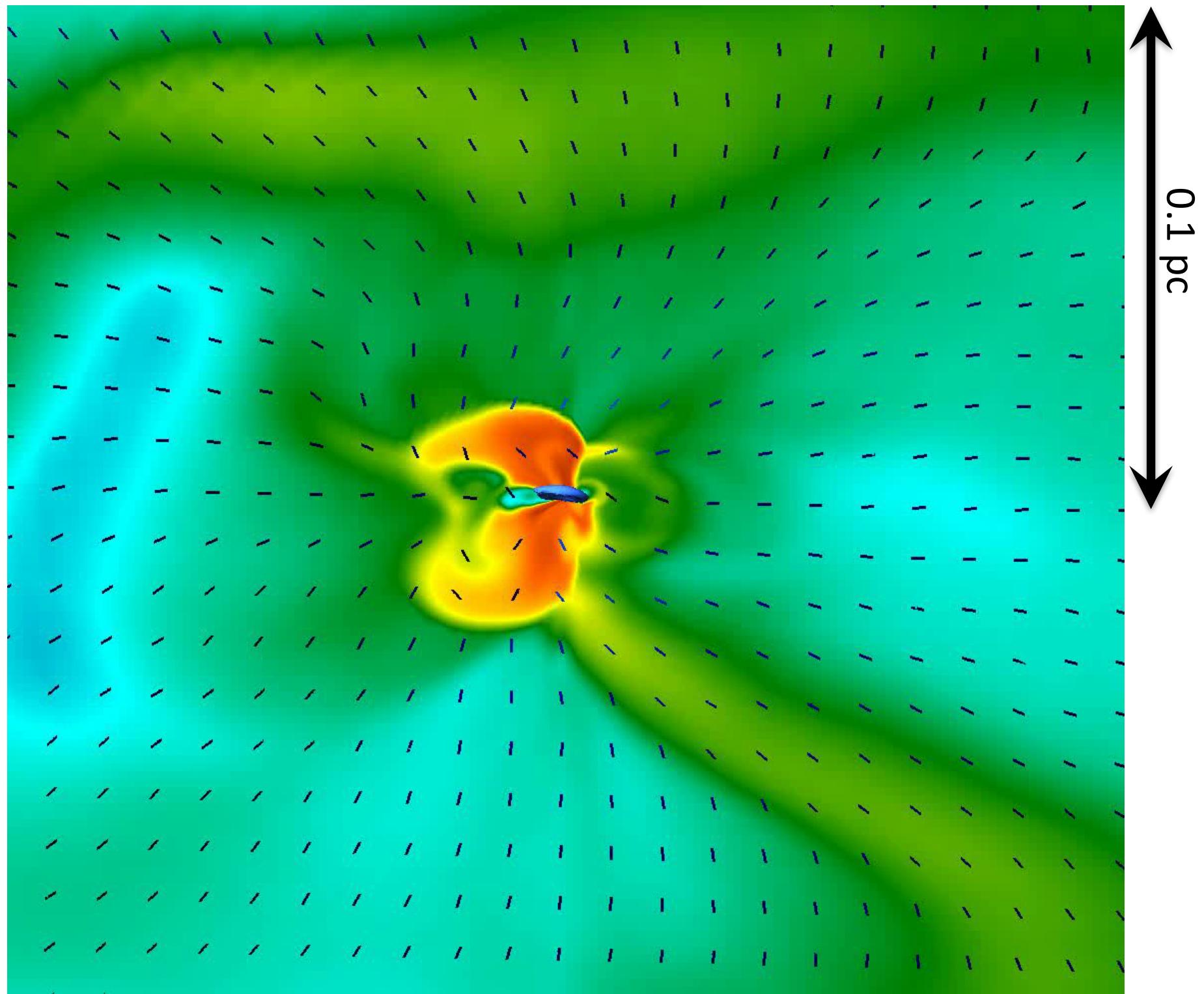
ここでも原始星の巨星化



降着バーストが起こると原始星があわせて巨星化する。一度膨張するとすぐには戻れない

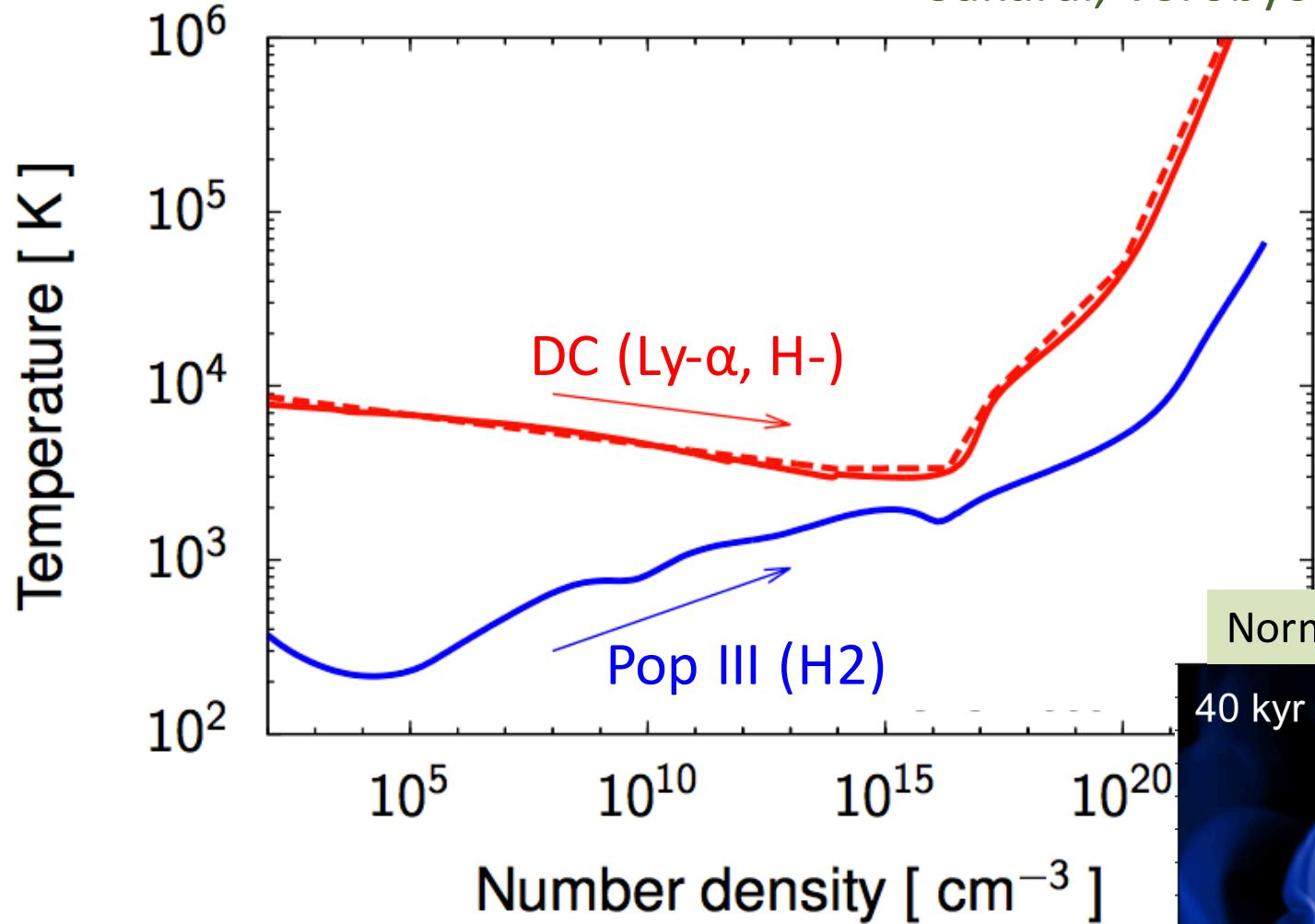


星のUV光度が下がり、フィードバック効果が弱まる
大質量初代星が形成



Direct Collapse v.s. Normal Pop III

Sakurai, Vorobyov, TH+(2016)



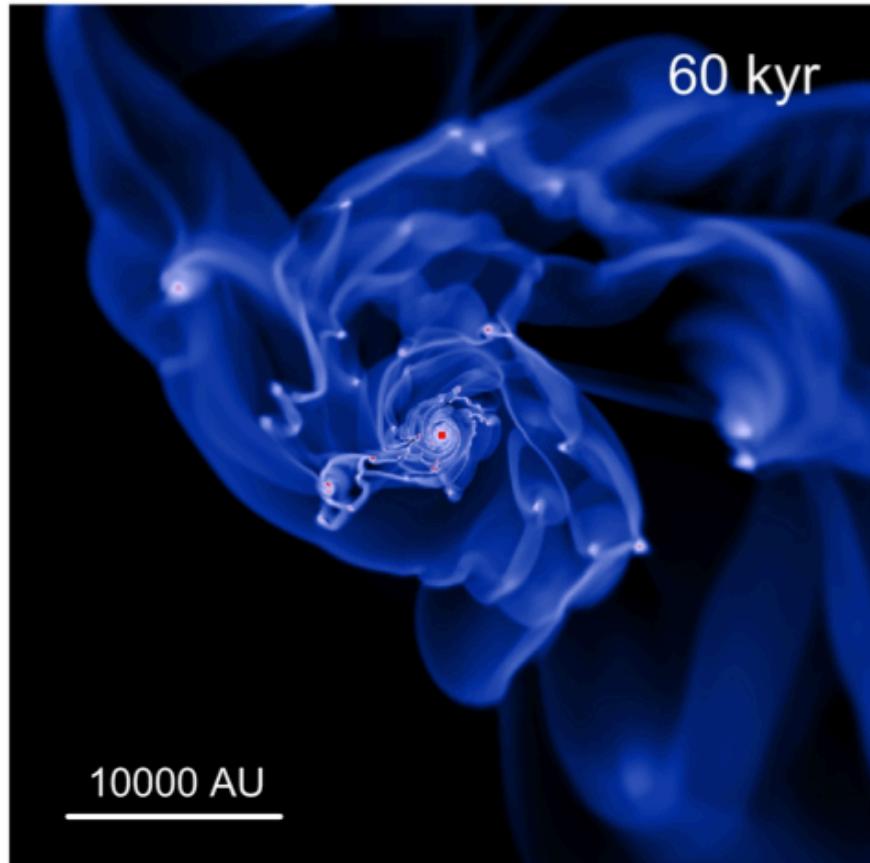
Normal PopIII case

40 kyr

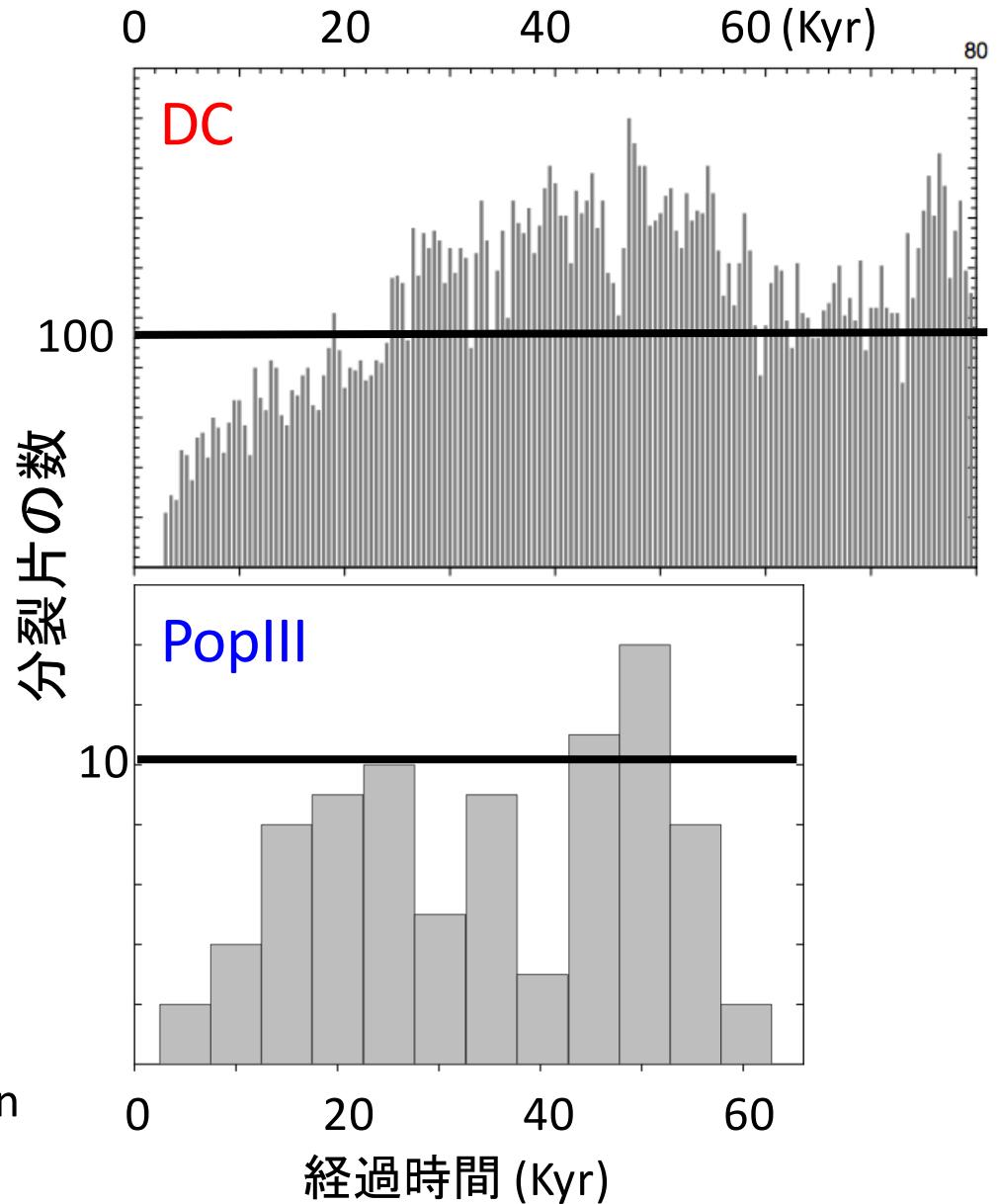
Vorobyov+13

それぞれの場合のbarotropicな状態方程式を仮定し
2D face-onでの円盤進化流体シミュレーション

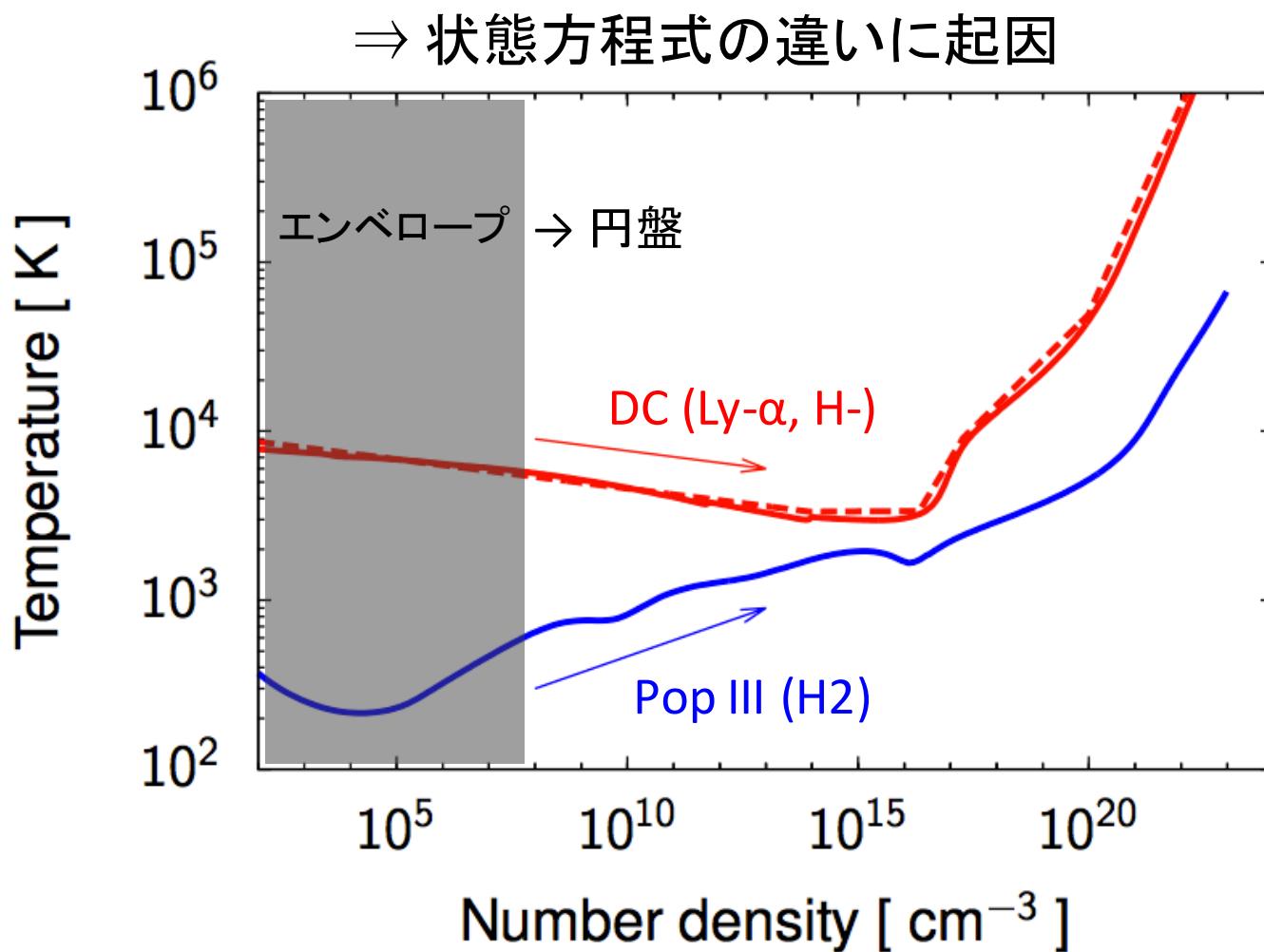
円盤分裂: DC v.s. Pop III cases



- DCの場合の方がより円盤が自己重力不安定で多数の分裂片が生じる
- ただし、大半は速やかに中心星へmigrationして降着(ejection)するものも少数あり)



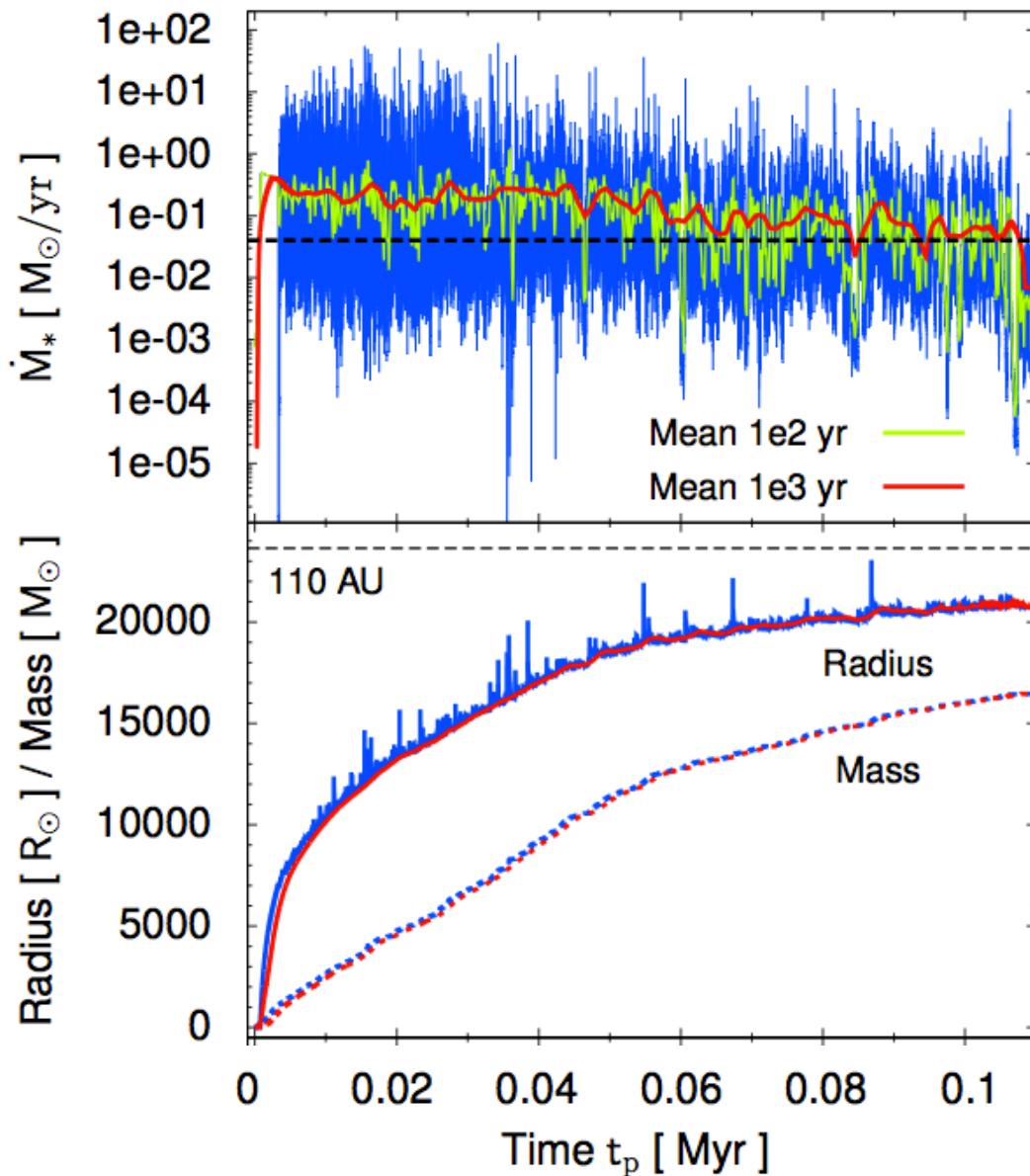
Why so unstable disk?



円盤の重力不安定: 円盤での質量輸送rateとエンベロープから円盤への質量降着rateのバランスで決まる。 $Q \sim \mathcal{O}(1) \times (T_{\text{disk}}/T_{\text{env}})^{3/2}$

n-T線が右下がりのDCの方がQが小さくなり、より円盤が不安定になる

降着史と原始星進化



ふつうのPopIIIのときより激しい
変動

静穏期が1000年以上持続する
ことはない

Post-processで星の進化計算

→ 原始星は収縮せず単調膨張
UV光度も弱いまま質量増

Summary

Origins of SMBHs in the early universe;
What is the maximum mass of the first stars?

⇒ $\sim 1000M_{\odot}$ in the normal formation channel, but
 $\sim 10^5 M_{\odot}$ stars may rarely form (Direct Collapse)

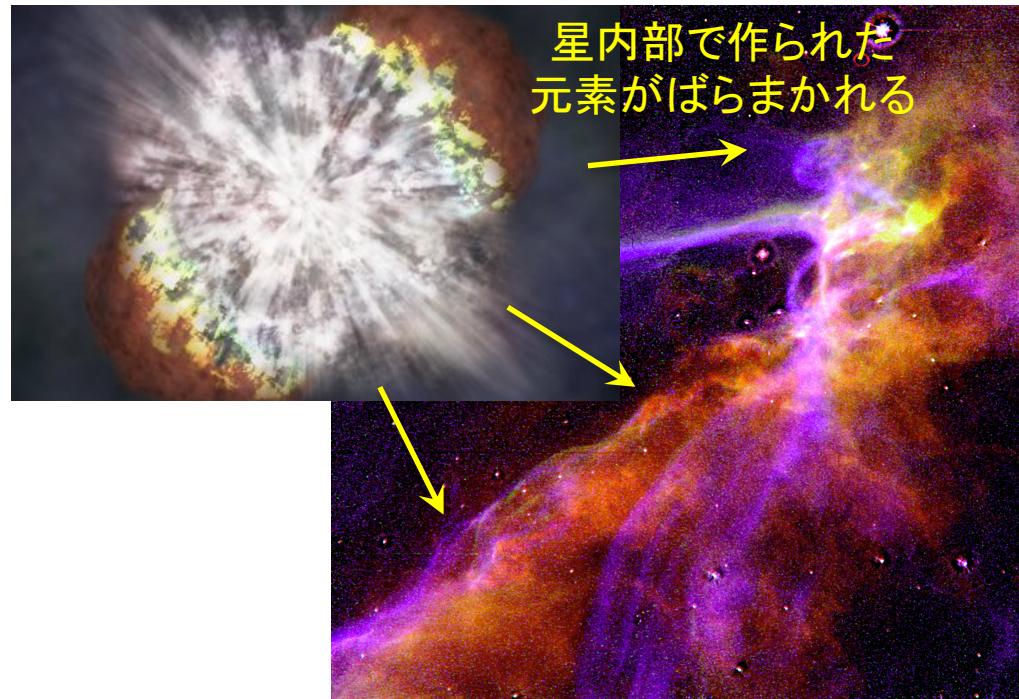
UVフィードバック と円盤分裂は星質量を下げる。
が、条件次第。好条件下では大質量星形成を必ずしも妨げない。

Additional pages

観測との比較

銀河系内にも初代星の痕跡が残っている：
系内最古の星々

初代星が死を迎えたときの
超新星爆発



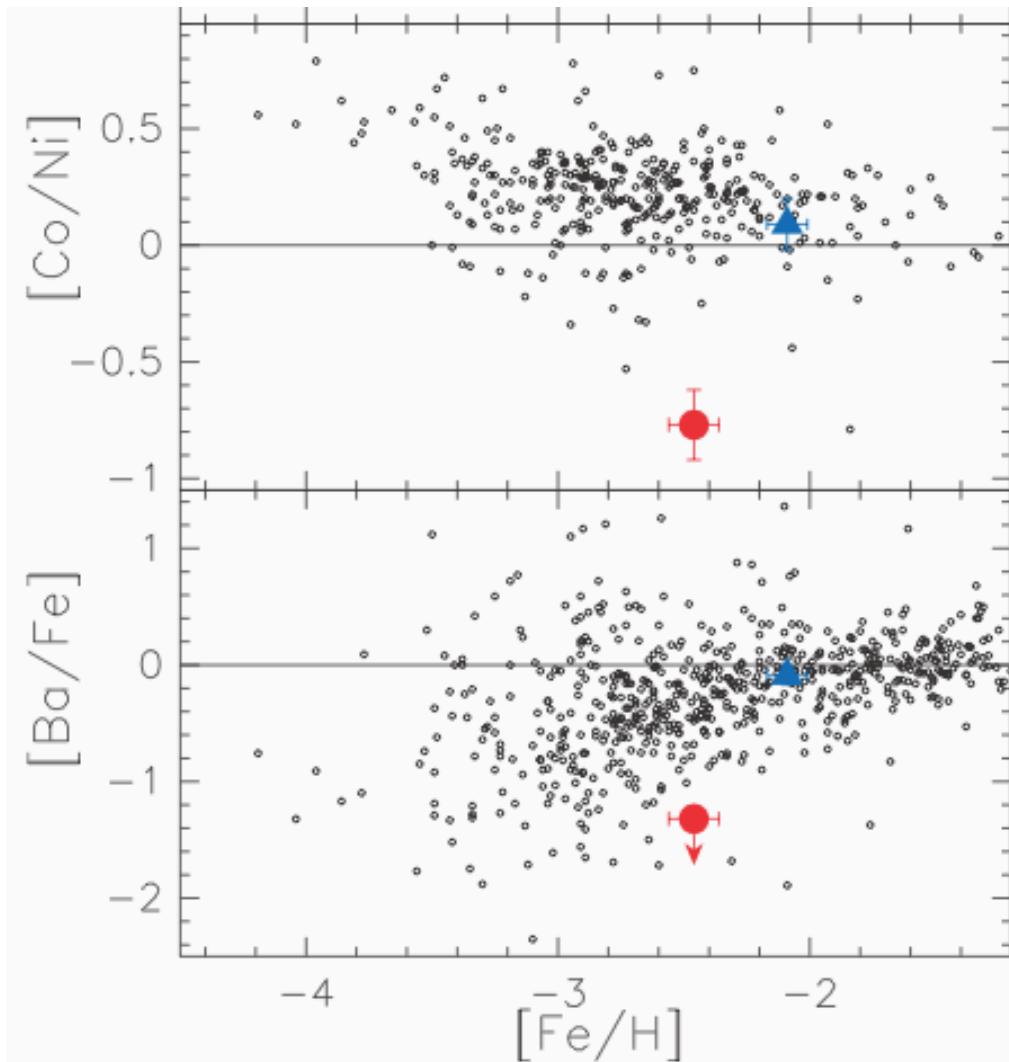
このガスから誕生した星には
初代星で作られた元素比率が残る

元素比率を観測
→ 初代星の質量を推定



数百太陽質量 → pair-instability SN: 痕跡なし
初代星は太陽の数十倍(core-collapse SN)であったことを支持

Very massive first stars?



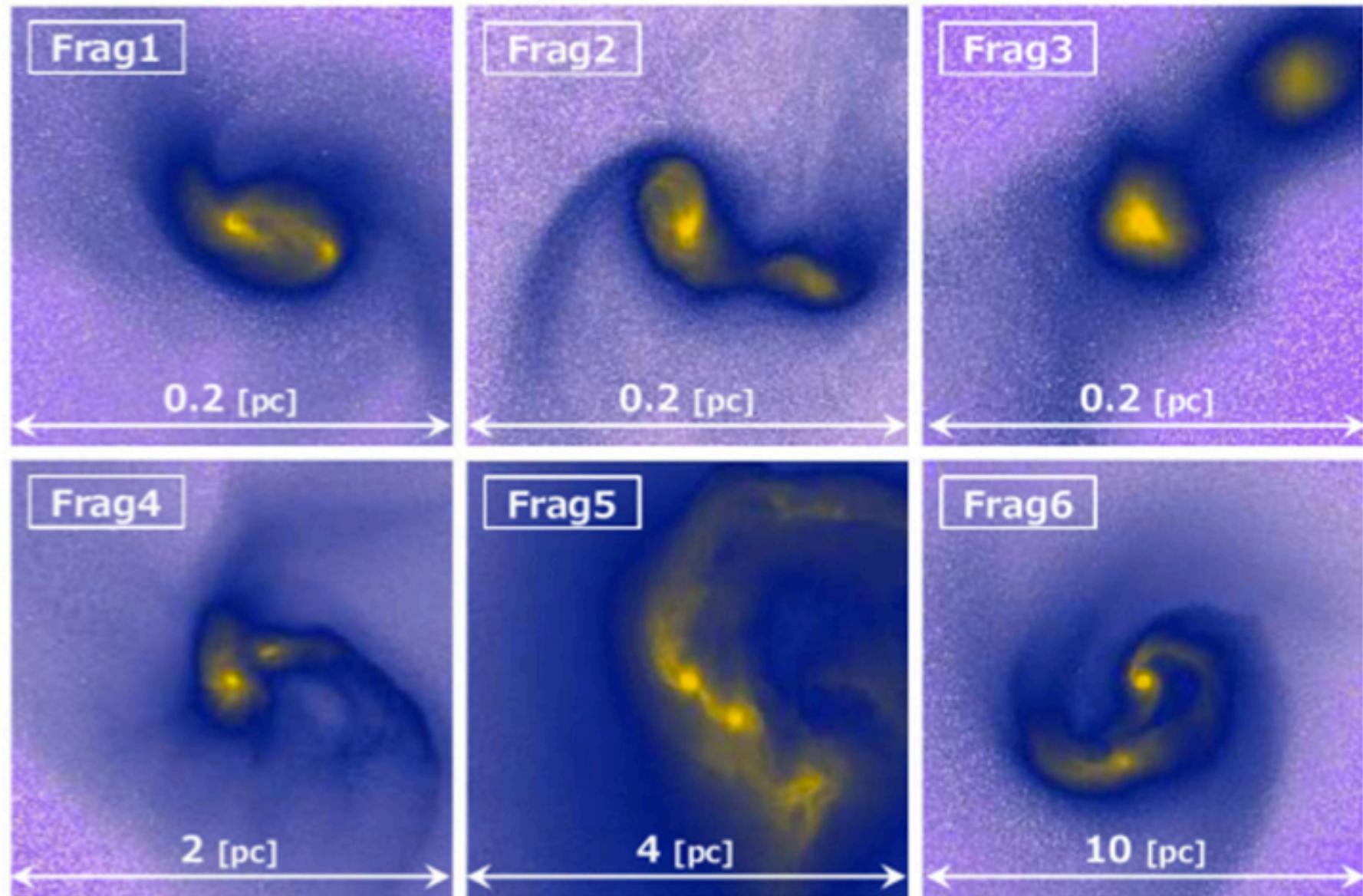
Aoki+14, Science

銀河系の低質量金属欠乏星
SDSS J1820.5-093939.2

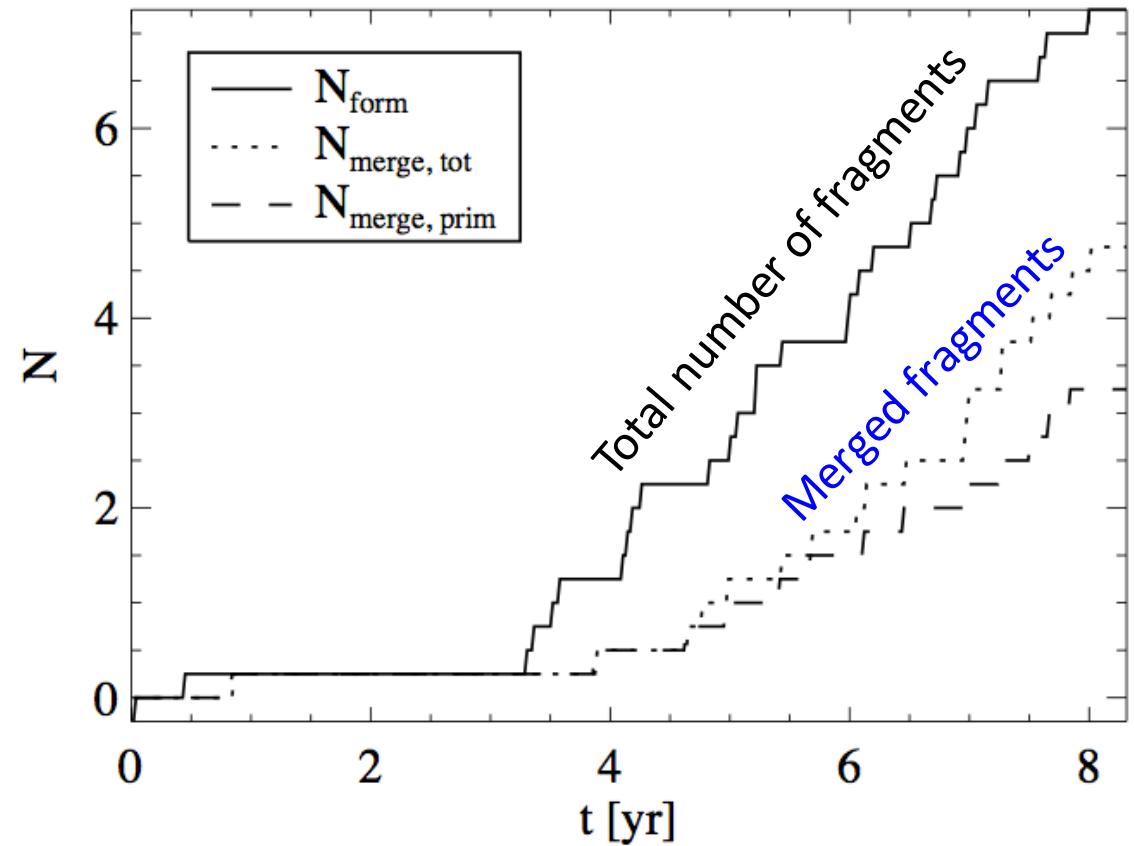
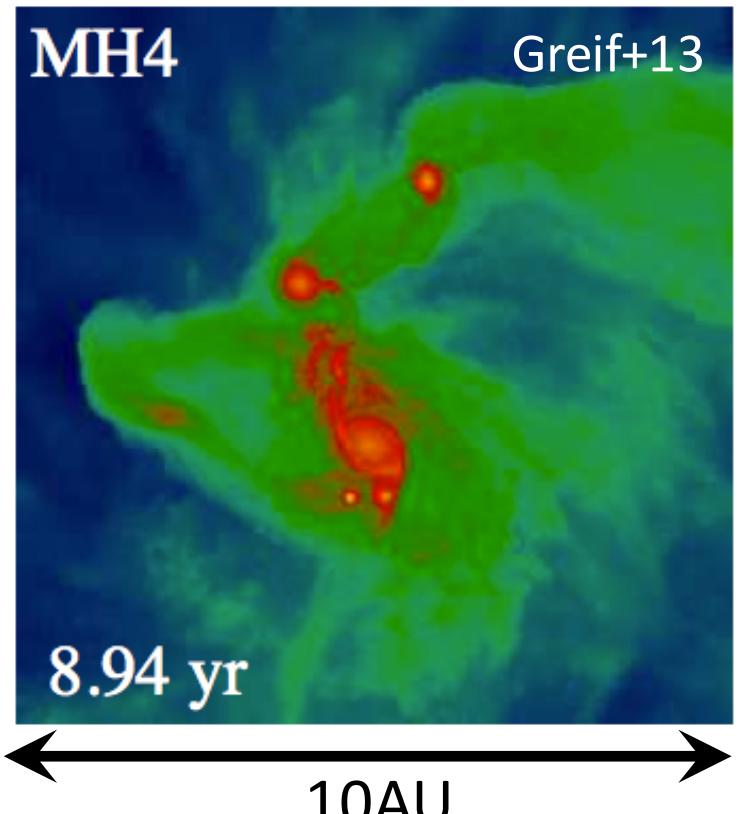
- + 他の金属欠乏星とは異なる特異な組成分布
- + PISNeか、或はより大質量の星の爆発で説明可能

大質量 ($\sim 10^3 M_\odot$) 初代星
の最初の観測的兆候を
とらえた？

Binary candidates (Hirano+14)



Fragments can merge again

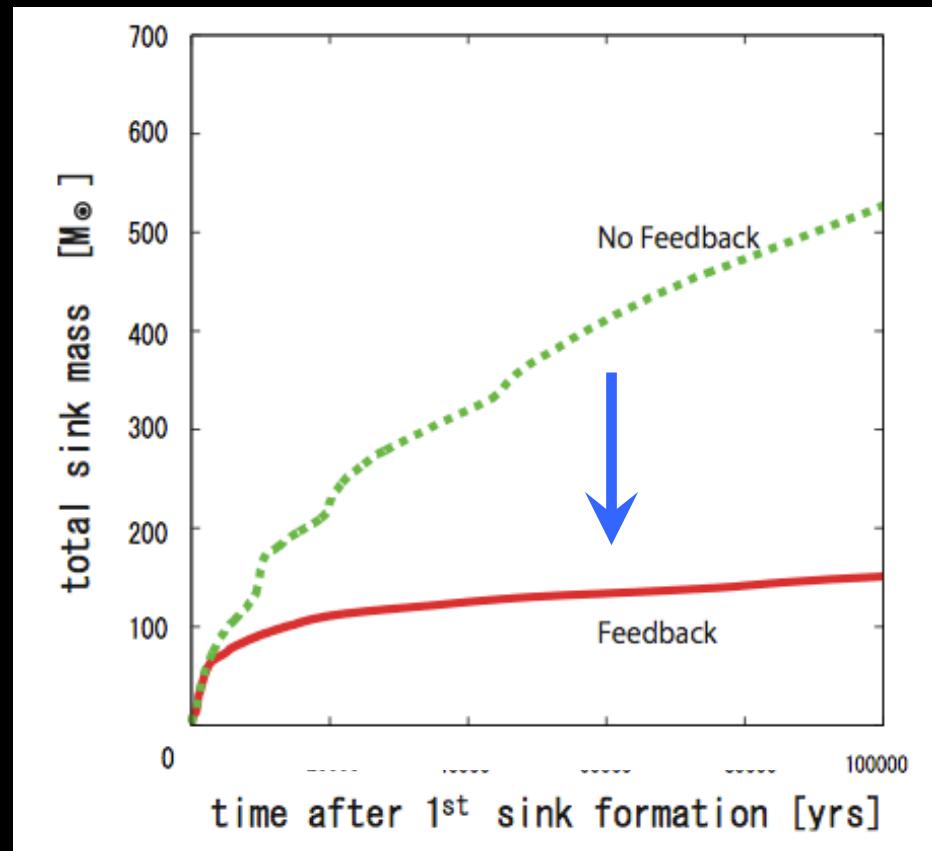
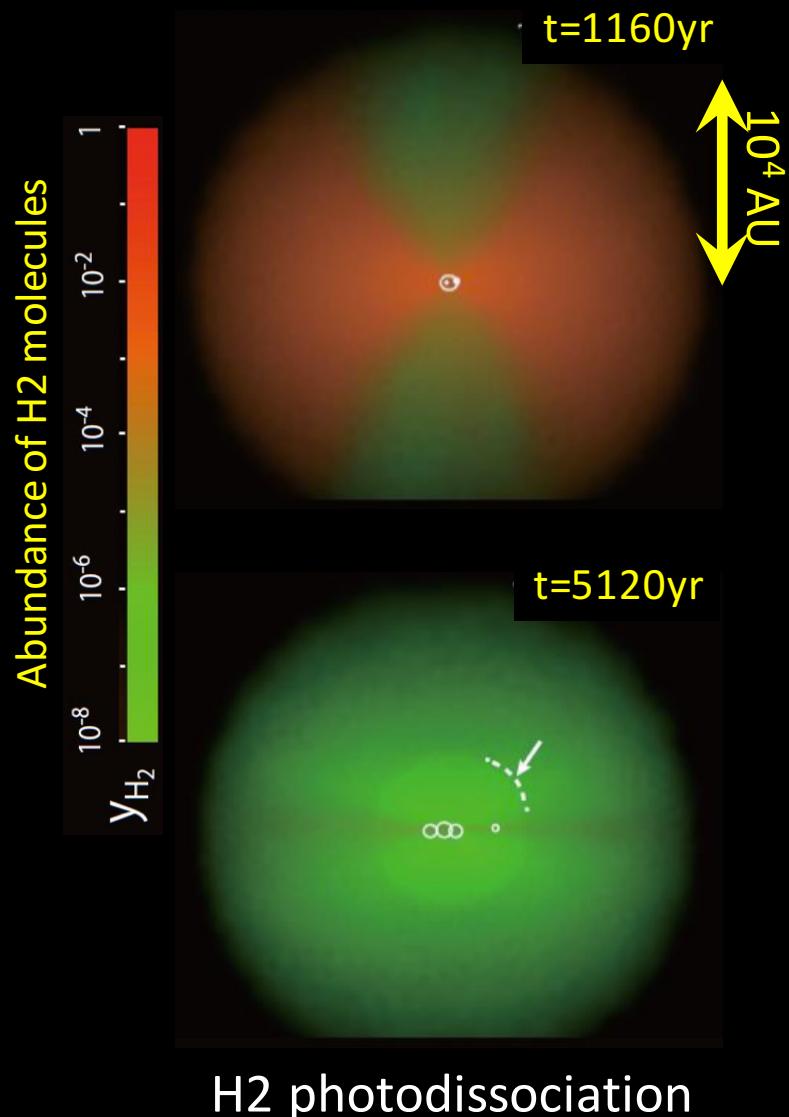


About 2/3 of the fragments merged away
1/3 survived via e.g., ejection events

High-mass stars will form even with lots of fragmentation?

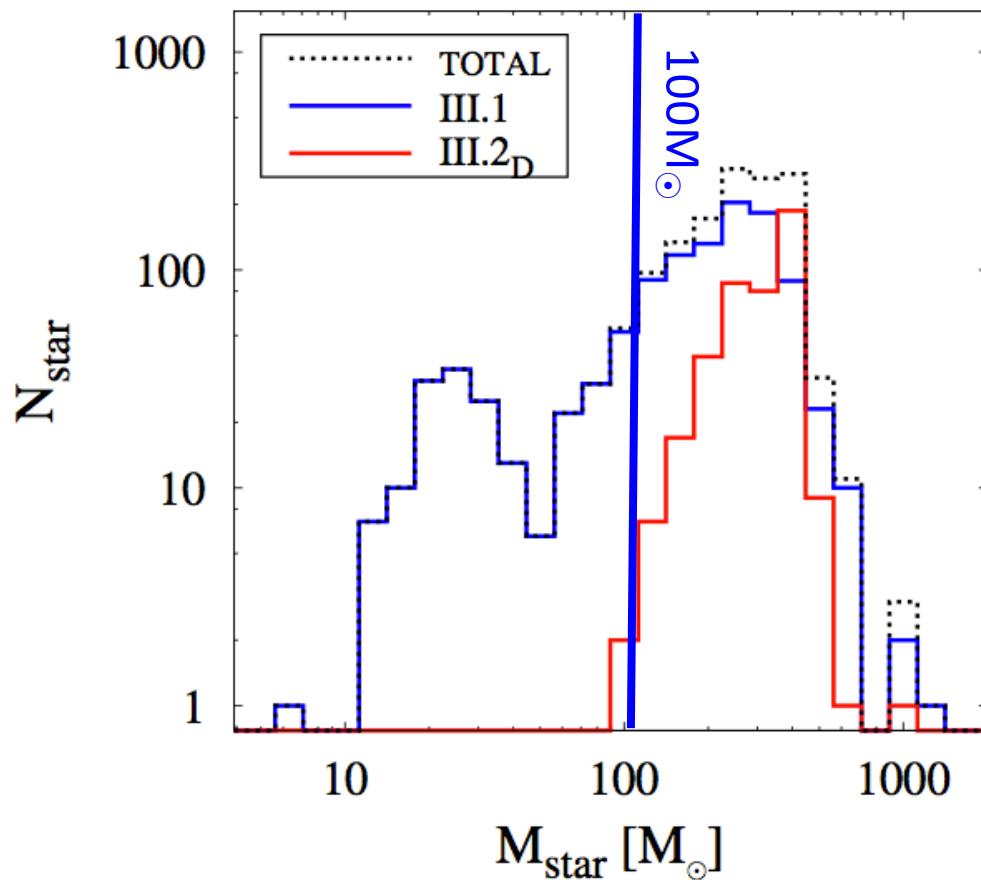
Susa+13,14

long-term ($\sim 10^5$ yrs) evolution with feedback in 3D



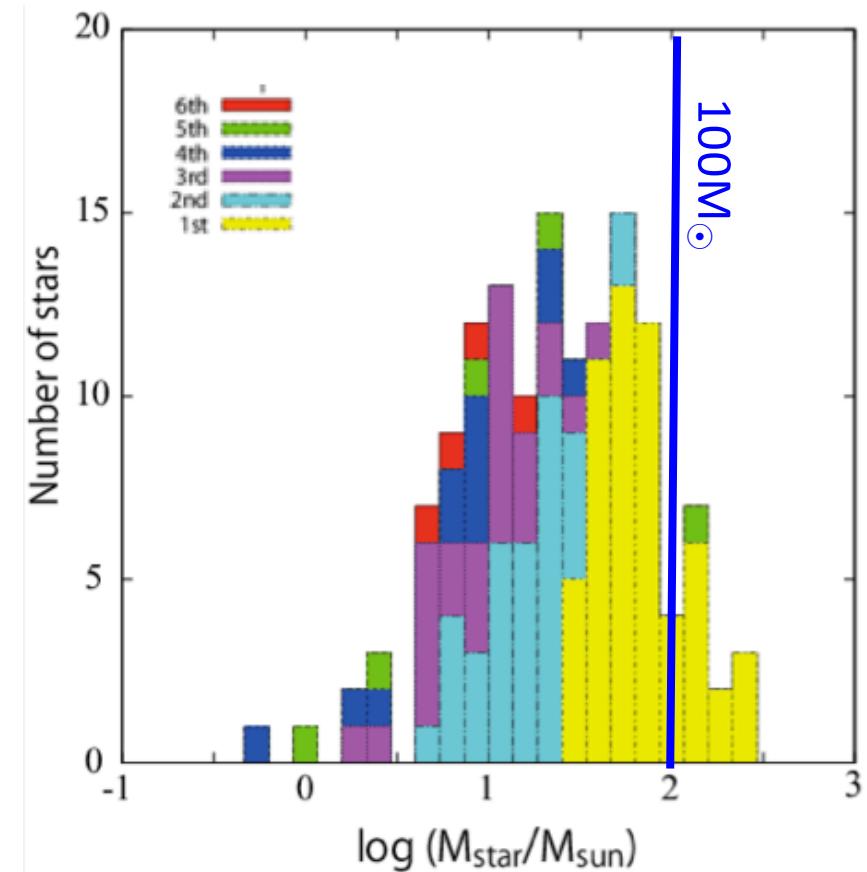
※ by dissociation (FUV) feedback
(HII region is not forming owing
to limited spatial resolution)

The Mass Spectrum



Hirano+15 (also see Hirano+14)

- with ~ 1100 gas clouds
- 2D RHD (EUV+FUV feedback)



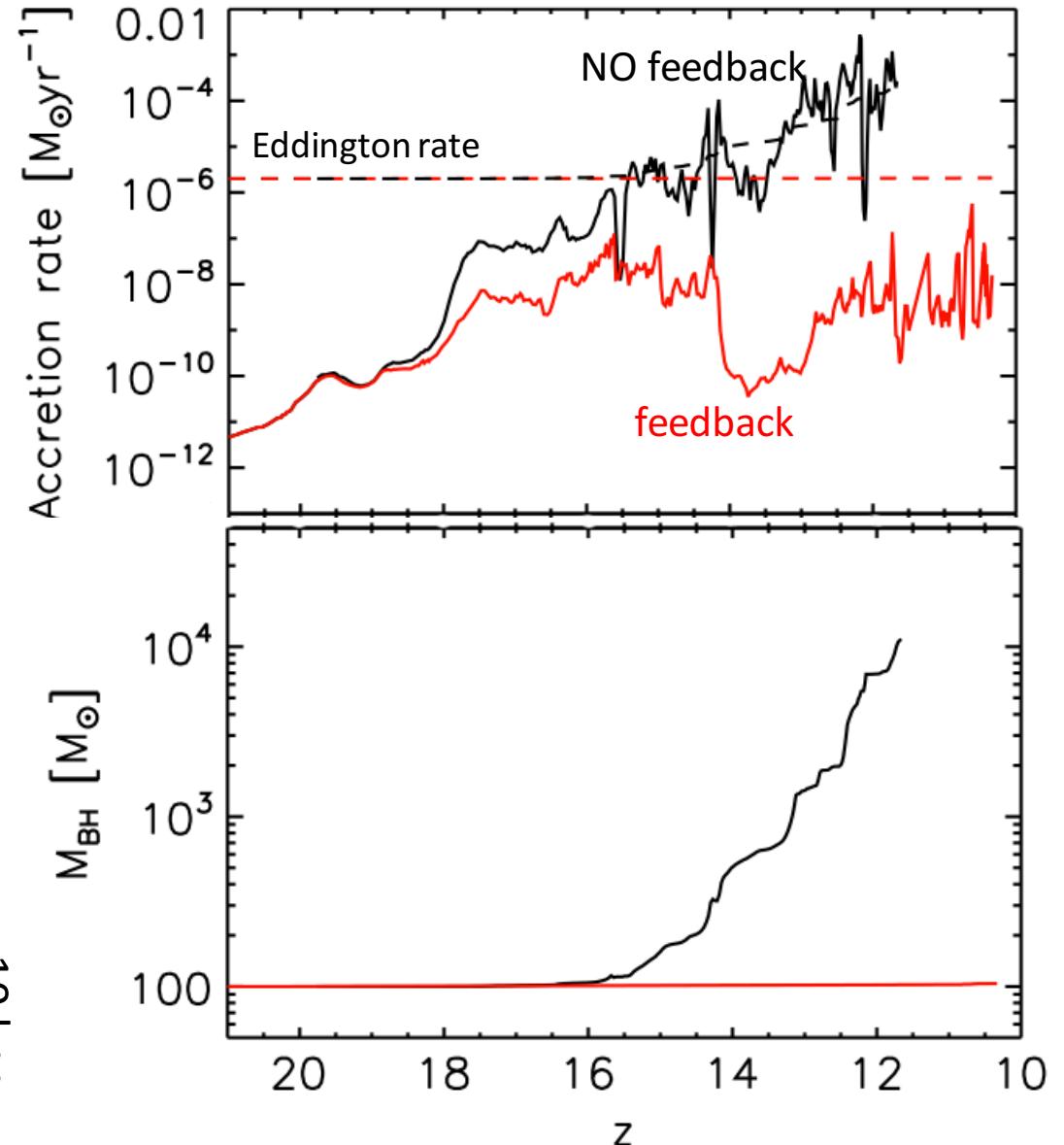
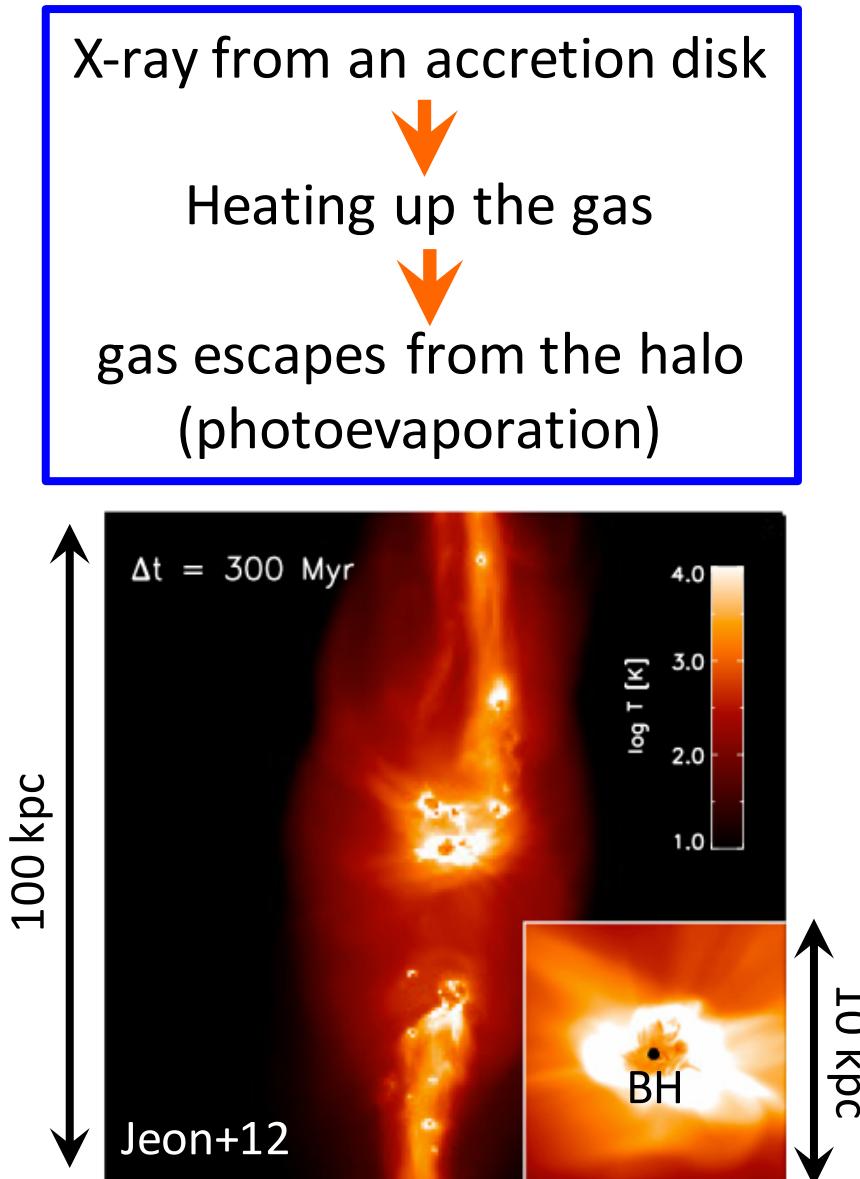
Susa+14 (also see Susa 13)

- with ~ 60 gas clouds
- 3D RHD (FUV feedback)

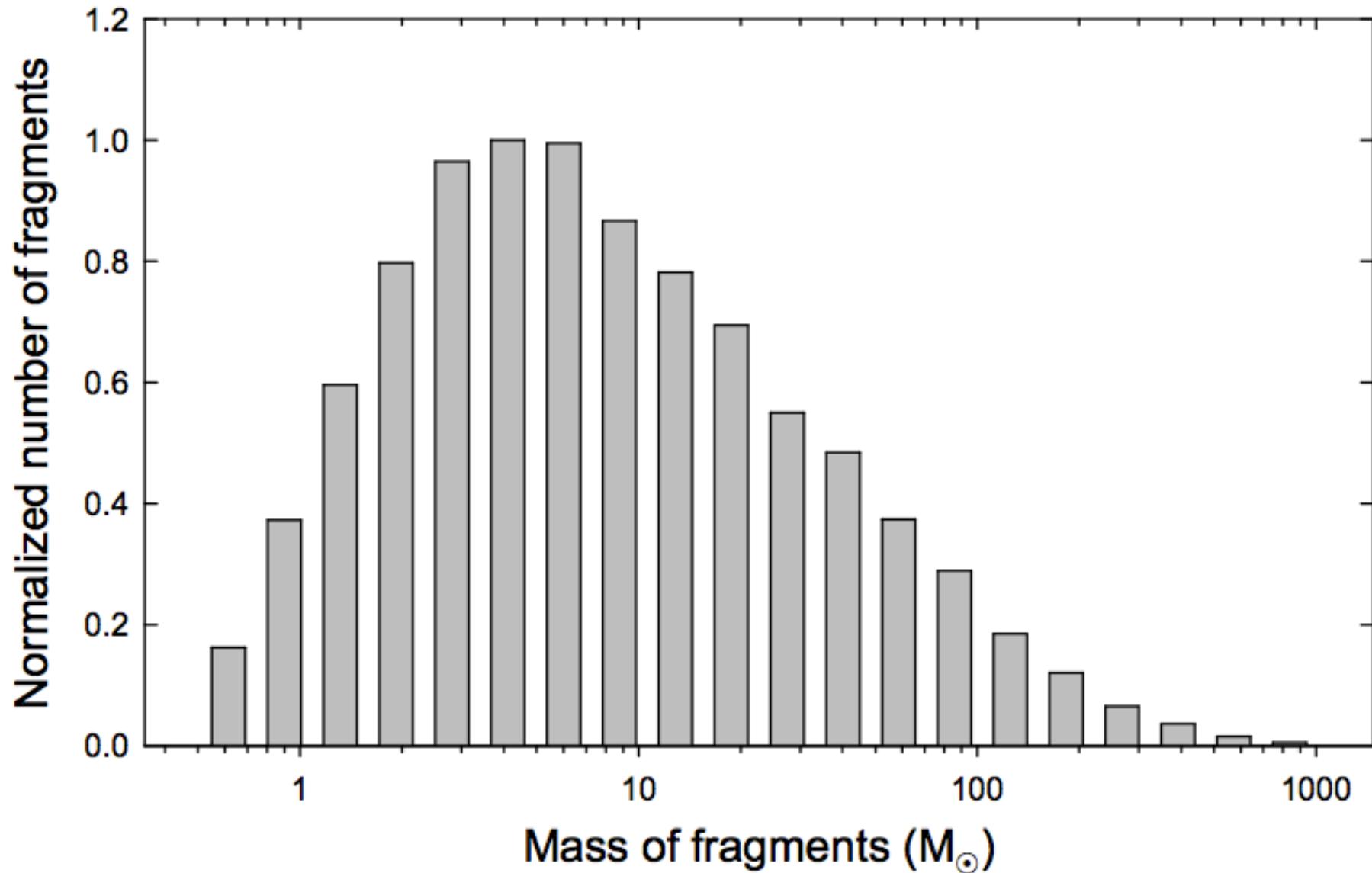
Great diversity is there. What about the typical mass?

Bottom-up scenario fails...

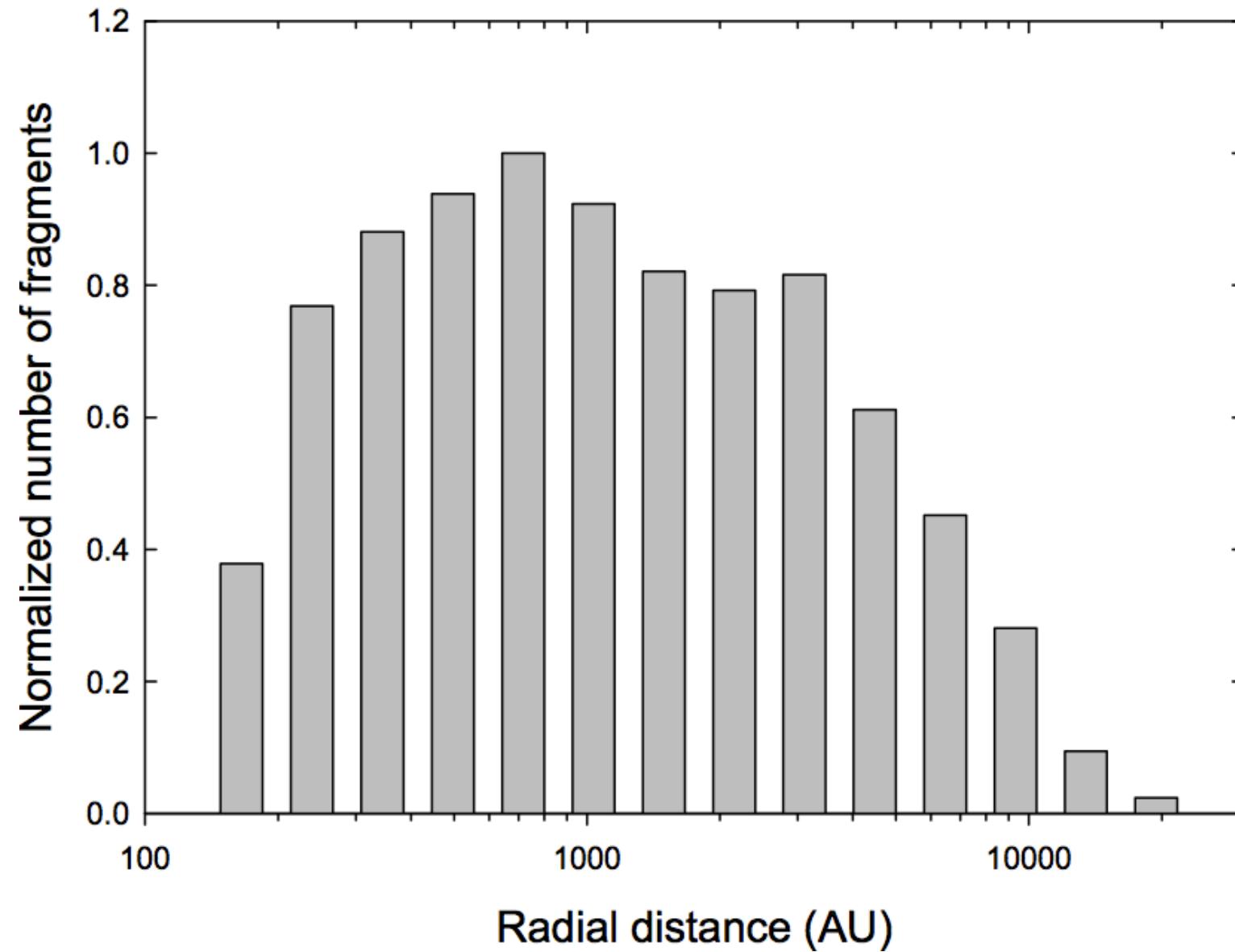
radiative feedback prevents the mass accretion



分裂片の質量分布



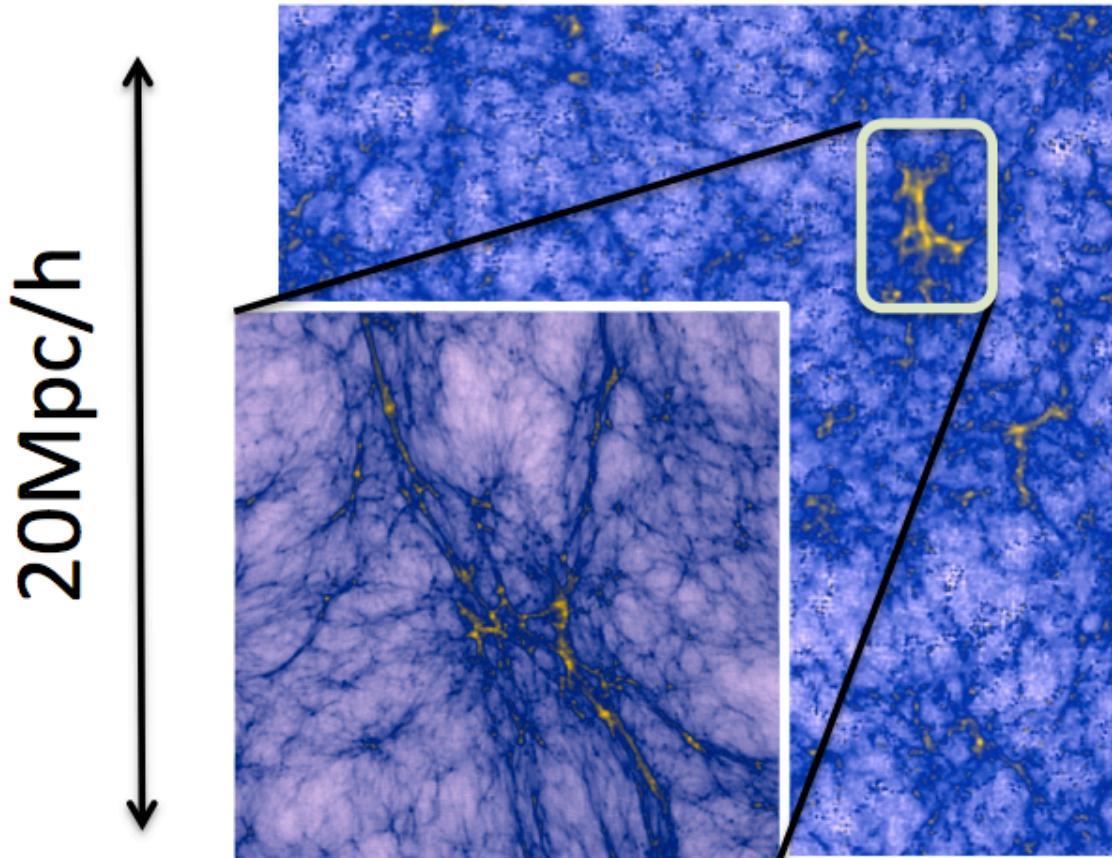
分裂片はどこで生じているか



Look for potential sites of DC

3 necessary conditions for the direct collapse

- + Nearby strong UV source to destroy H₂ molecules
- + Halo is massive enough to turn on H atomic cooling
- + Zero (or very low) metallicity



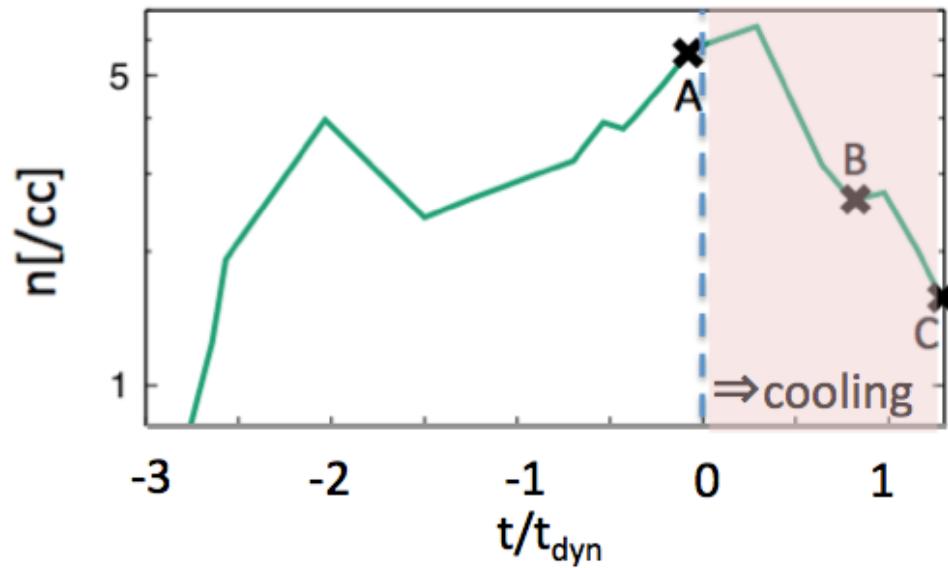
Locate DC candidate clouds
in cosmological simulations;

N-body
+
star/galaxy formation
semi-analytic models

~50 potential sites of DC

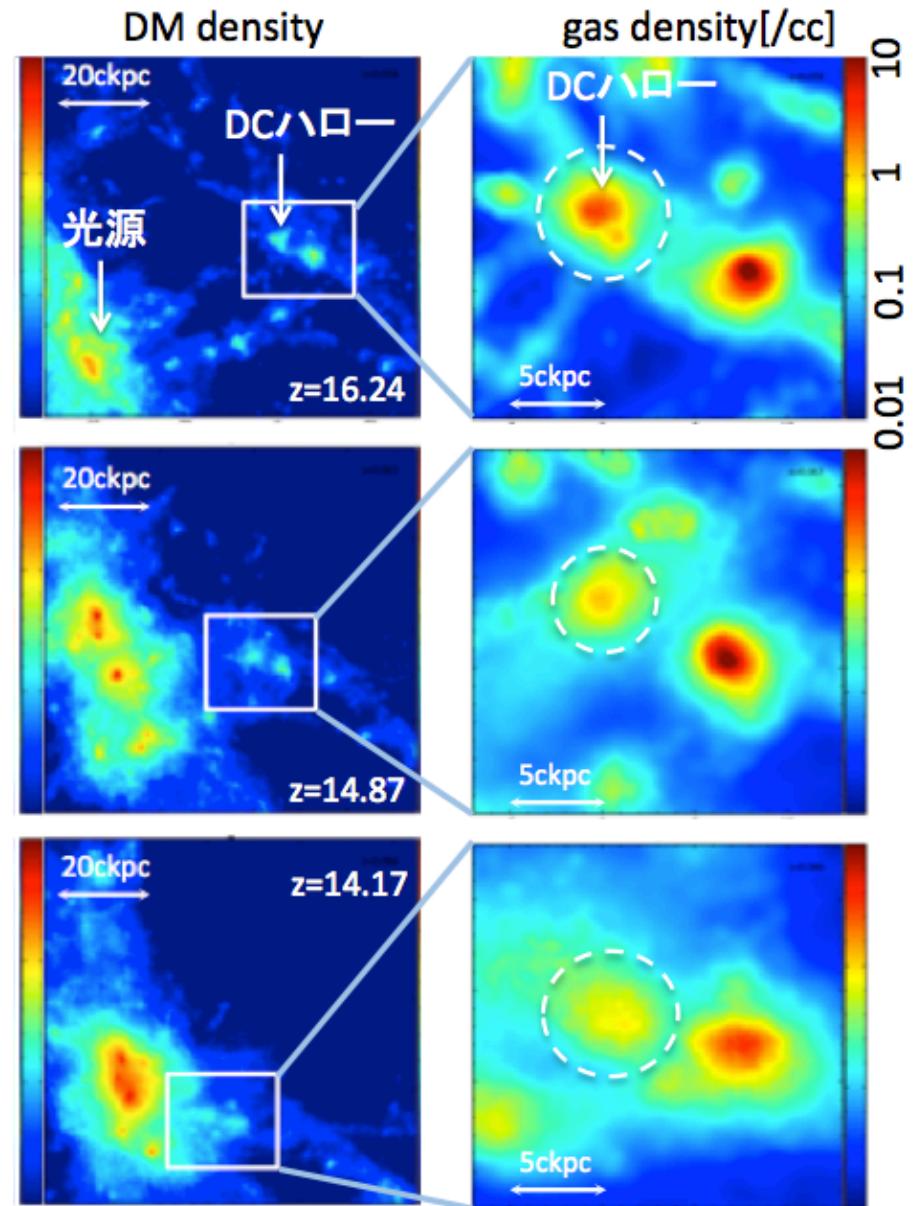
DC prevented by tidal effect

Follow the evolution of each cloud with N-body+SPH simulations



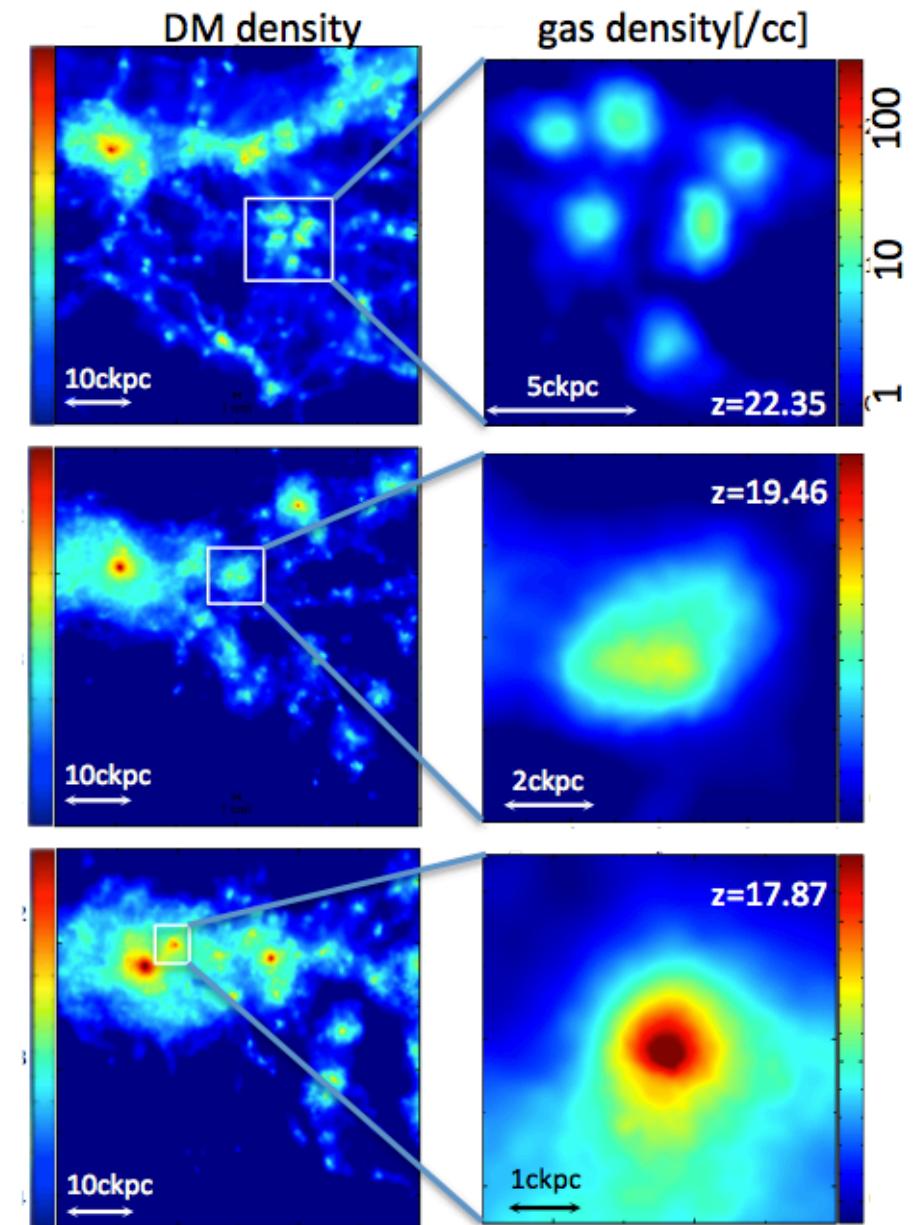
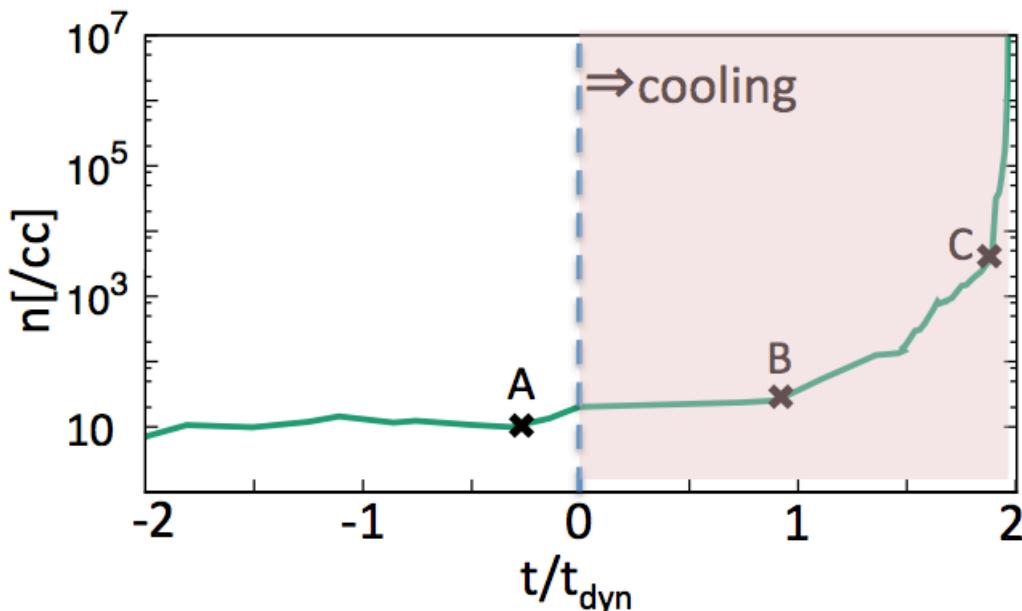
Density actually turns to decrease at some point for most of the cases.

Because of the strong tidal effect caused by nearby massive halos that have UV-emitting galaxies



Collapse aided by halo mergers

But collapse does occur for 2 cases,
where the density continues to increase.



The rapid halo mergers carry a large
mount of gas toward the cloud center,
which accelerates the collapse.

Finally $\sim 10^5 M_\odot$ stars to be formed?