

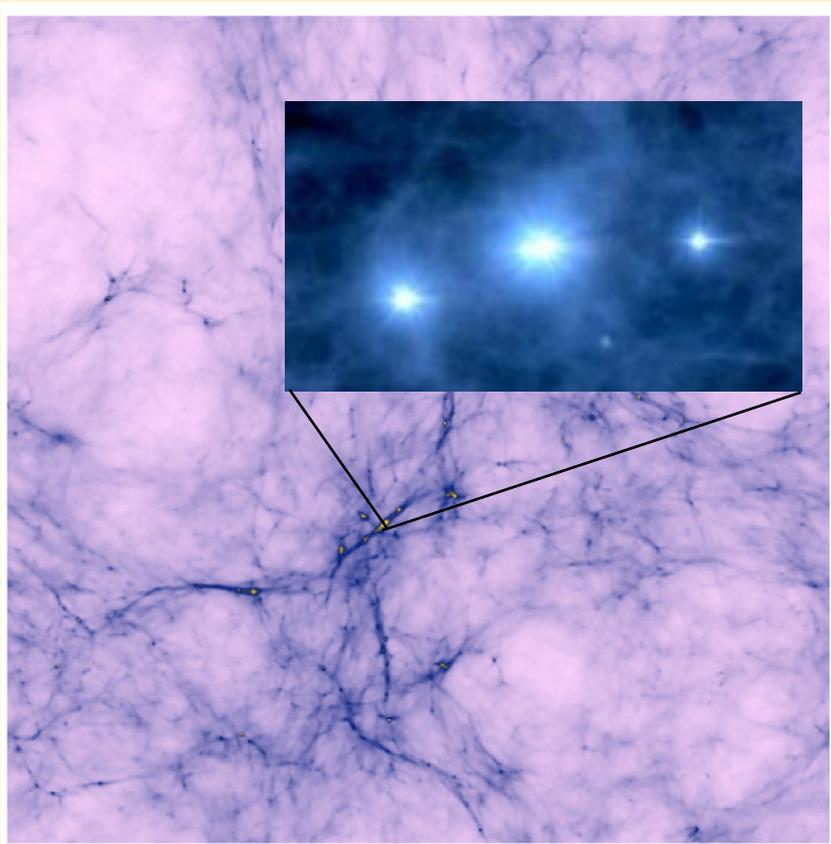
初代星と恒星物理

細川 隆史 (京大物2・天体核)

OUTLINE

I. The First Stars, II. The First SMBHs

I. The First Stars



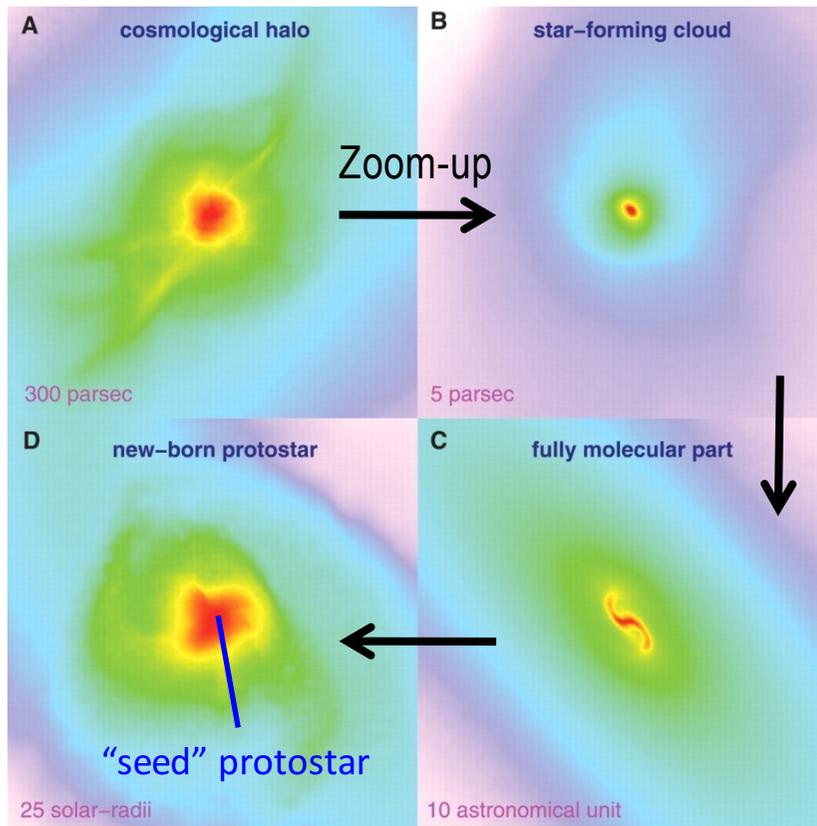
宇宙にはじまりがある以上、いつかどこかで宇宙最初の星(天体)が生まれた。

いつ、どうやって最初の星が生まれたのか？
一体どんな星だったのか？
典型mass,、mass分布、連星率はいくらか？

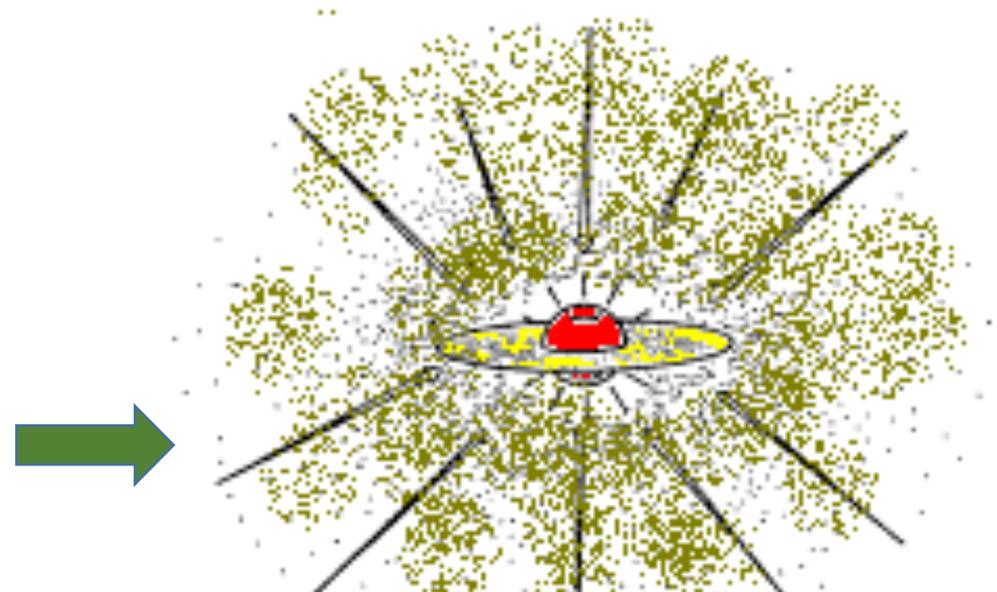
First Stars: How massive?

early collapse stage \Rightarrow late accretion stage

Yoshida, Omukai & Hernquist (2008)



$10^{-2} M_{\odot}$ protostar
surrounded by $>10^3 M_{\odot}$ gas envelope



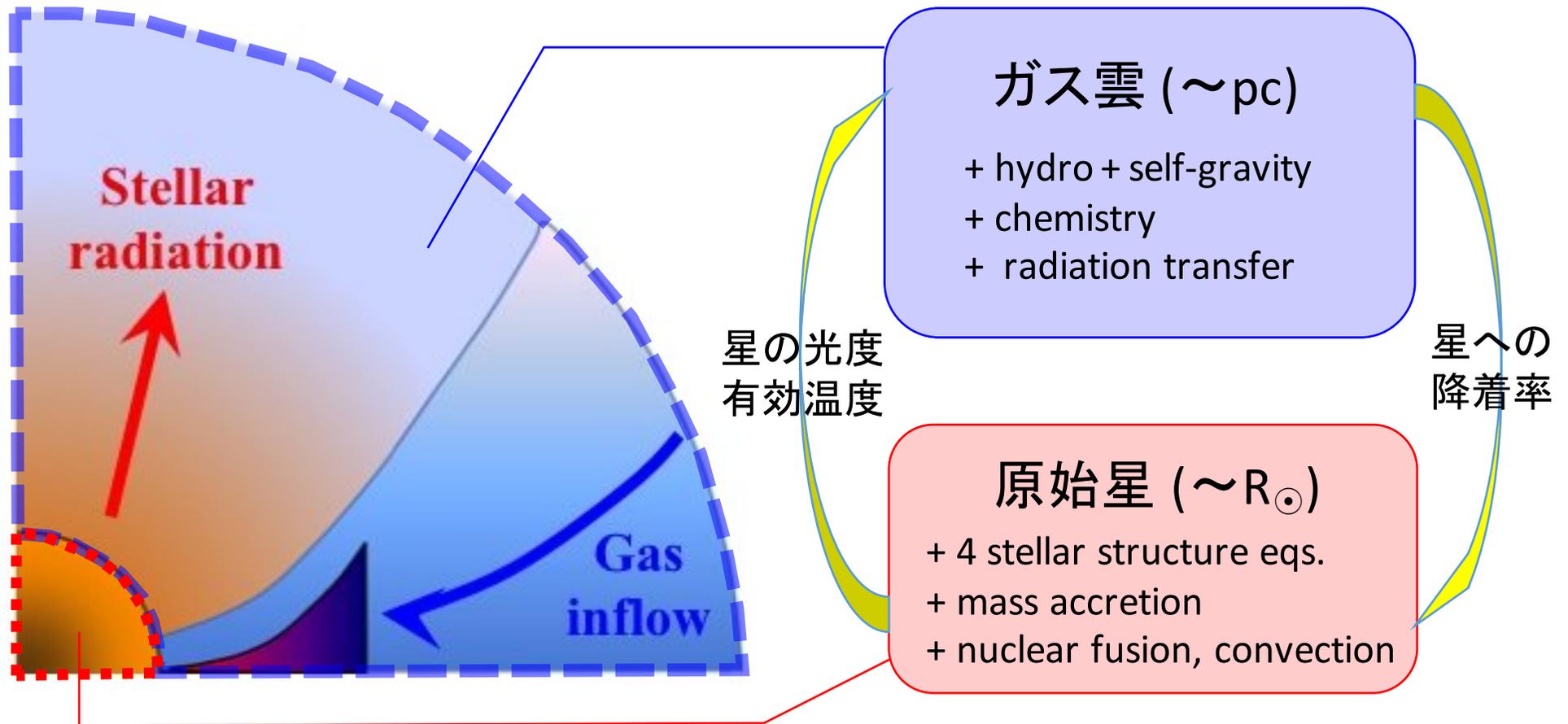
$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \sim 7 \times 10^{-4} M_{\odot}/\text{yr} \left(\frac{T}{300 \text{ K}} \right)^{3/2}$$

for stellar lifetime ($\sim \text{Myr}$) $\rightarrow \sim 1000 M_{\odot}$ star

後期段階の研究が重要

どういった問題か

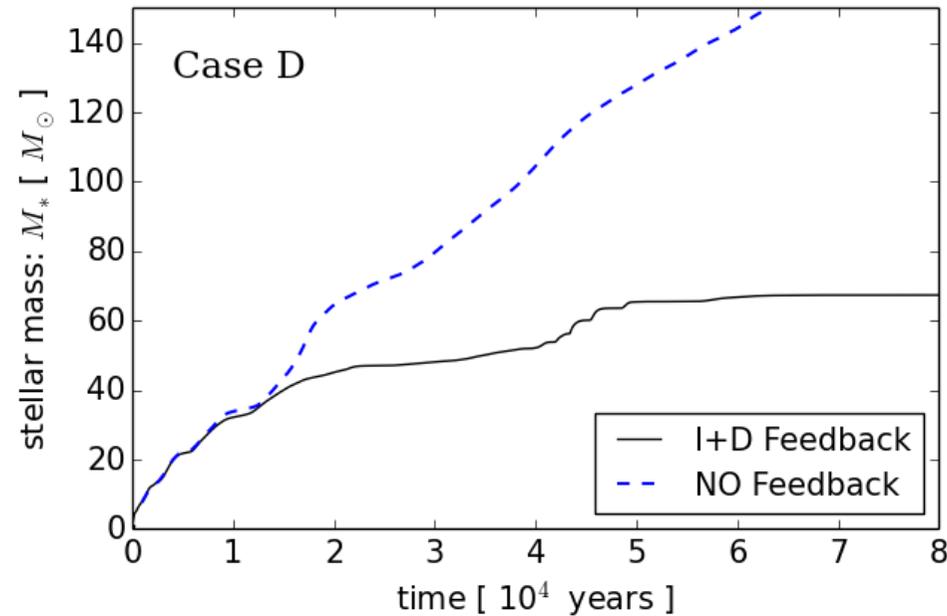
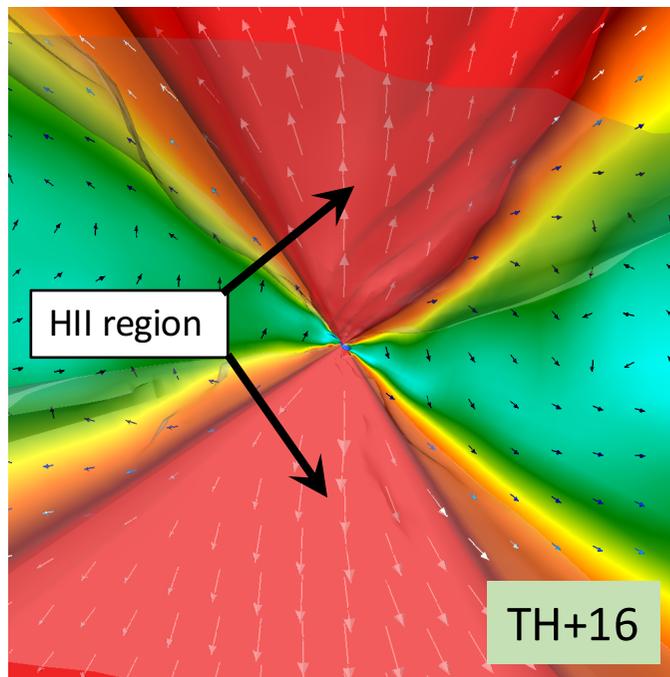
全然異なるスケールの現象を同時に扱う必要がある



質量降着する原始星の進化も重要になる

なぜ原始星進化？

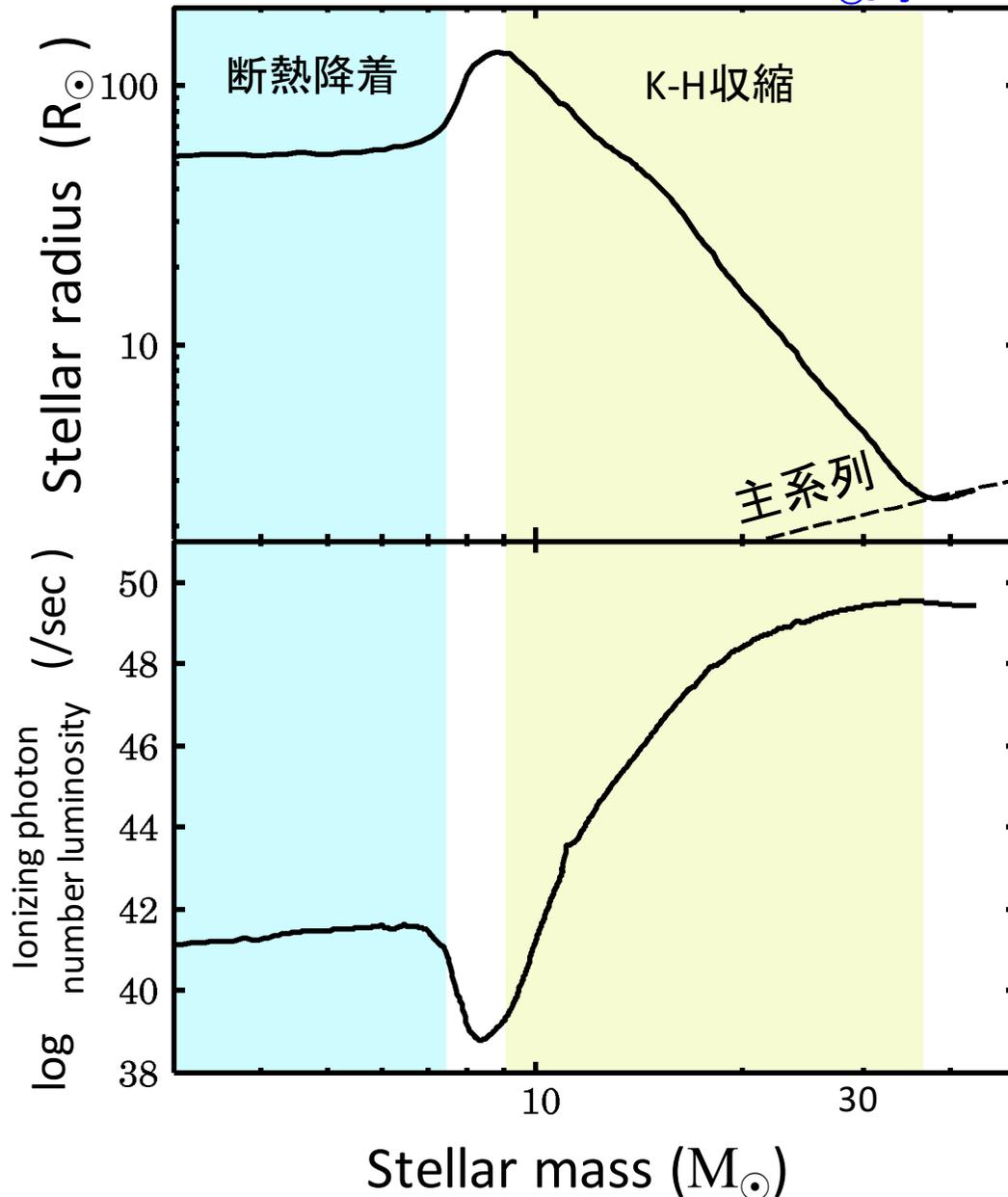
小→大スケールへのfeedbackが重要
今の場合にはUV光による電離領域の形成と膨張、円盤光蒸発
(TH+16, 11; Stacy+16, 12; Susa+14,13 etc)



- + UV feedbackは星への降着を阻害して最終質量を決めることがある
- + TH16: 星の進化計算 + 3D輻射流体simulationを並行して同時実行

星の収縮とFeedback

Mass acc. rate : $\sim 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$



前半: 断熱降着

(降着による加熱) > (放射による冷却)

↓ 急激な L_* 増加

後半: Kelvin-Helmholtz収縮

(放射による冷却) > (降着による加熱)

K-H収縮期

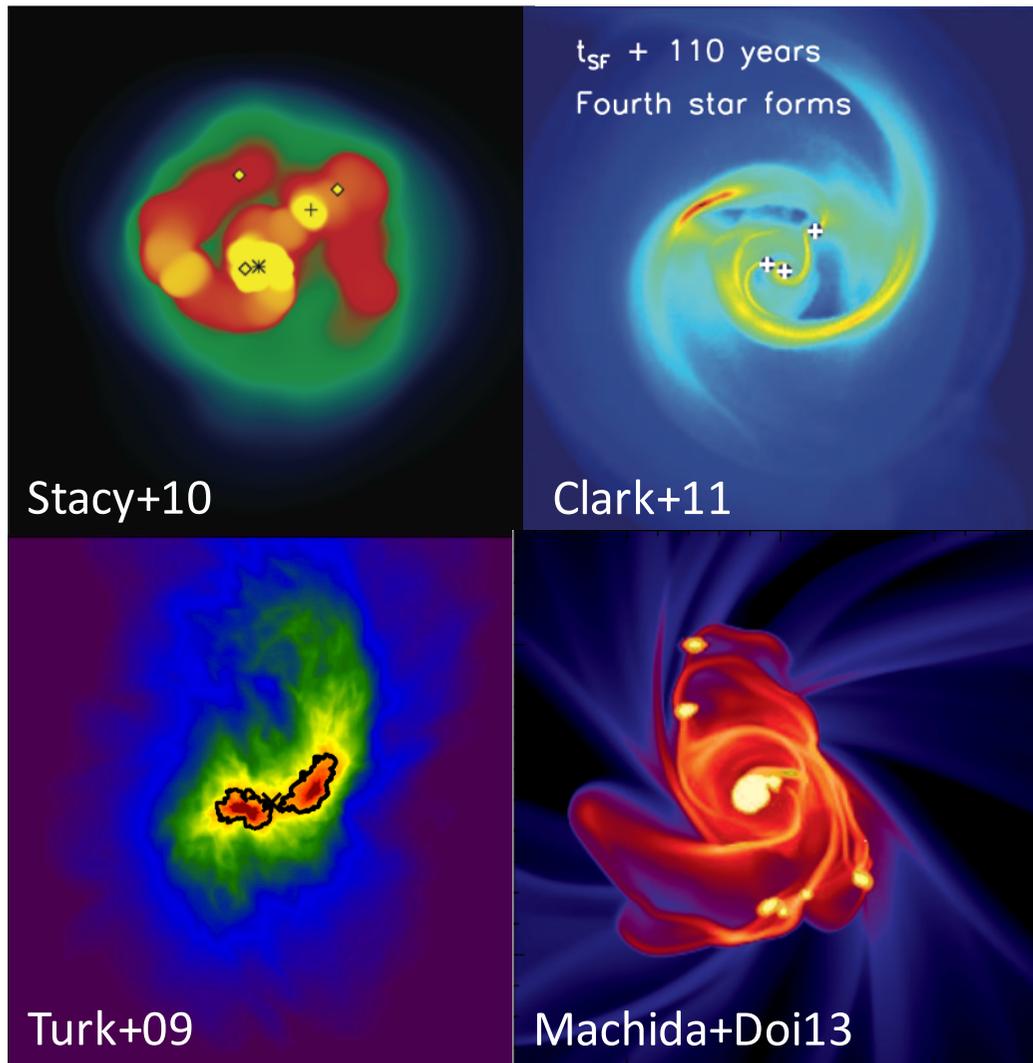
収縮(半径↓)

↓
有効温度↑・UV光度↑

KH収縮後期→主系列段階で
Feedbackがはたらく

円盤分裂

星周円盤重力不安定: global spiral armが成長して角運動量輸送
しかし、(円盤内のmass transfer) < (円盤へのinfall rate) で分裂



単独あるいは少数の
大質量星?

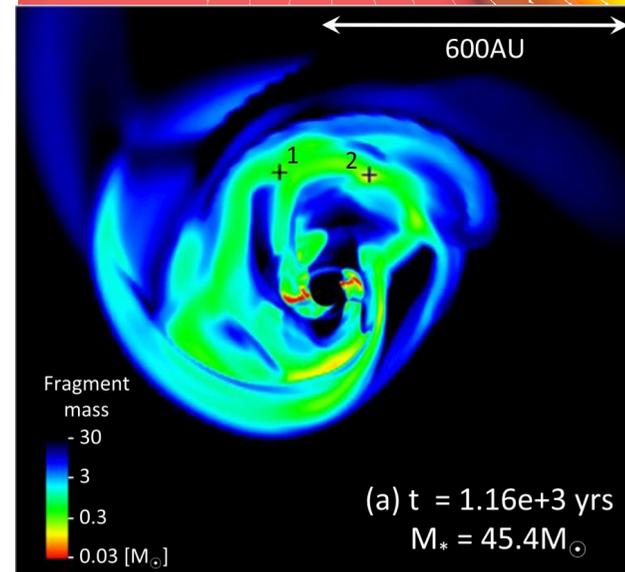
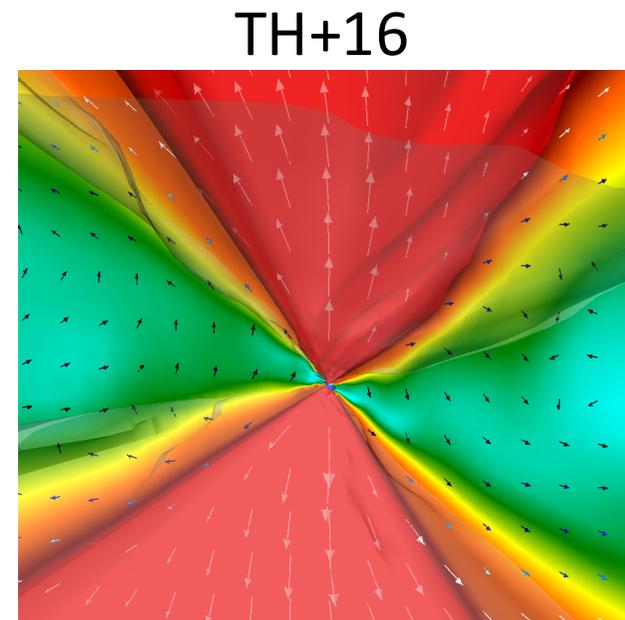
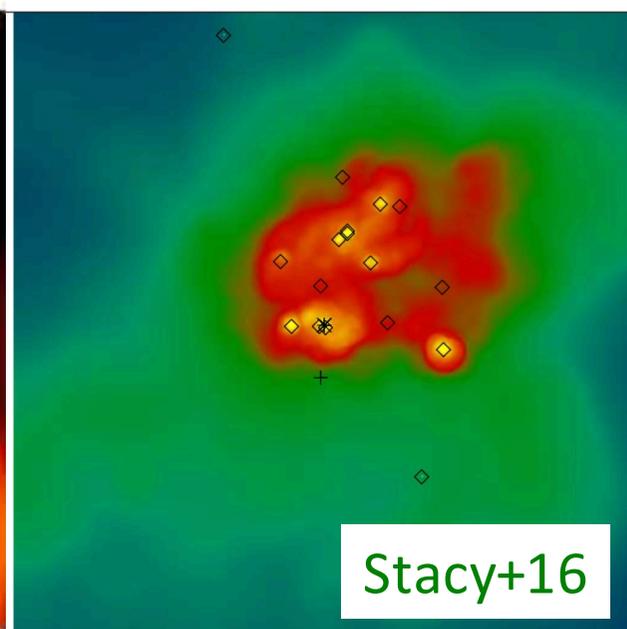


低質量の星を多数
含む星団?

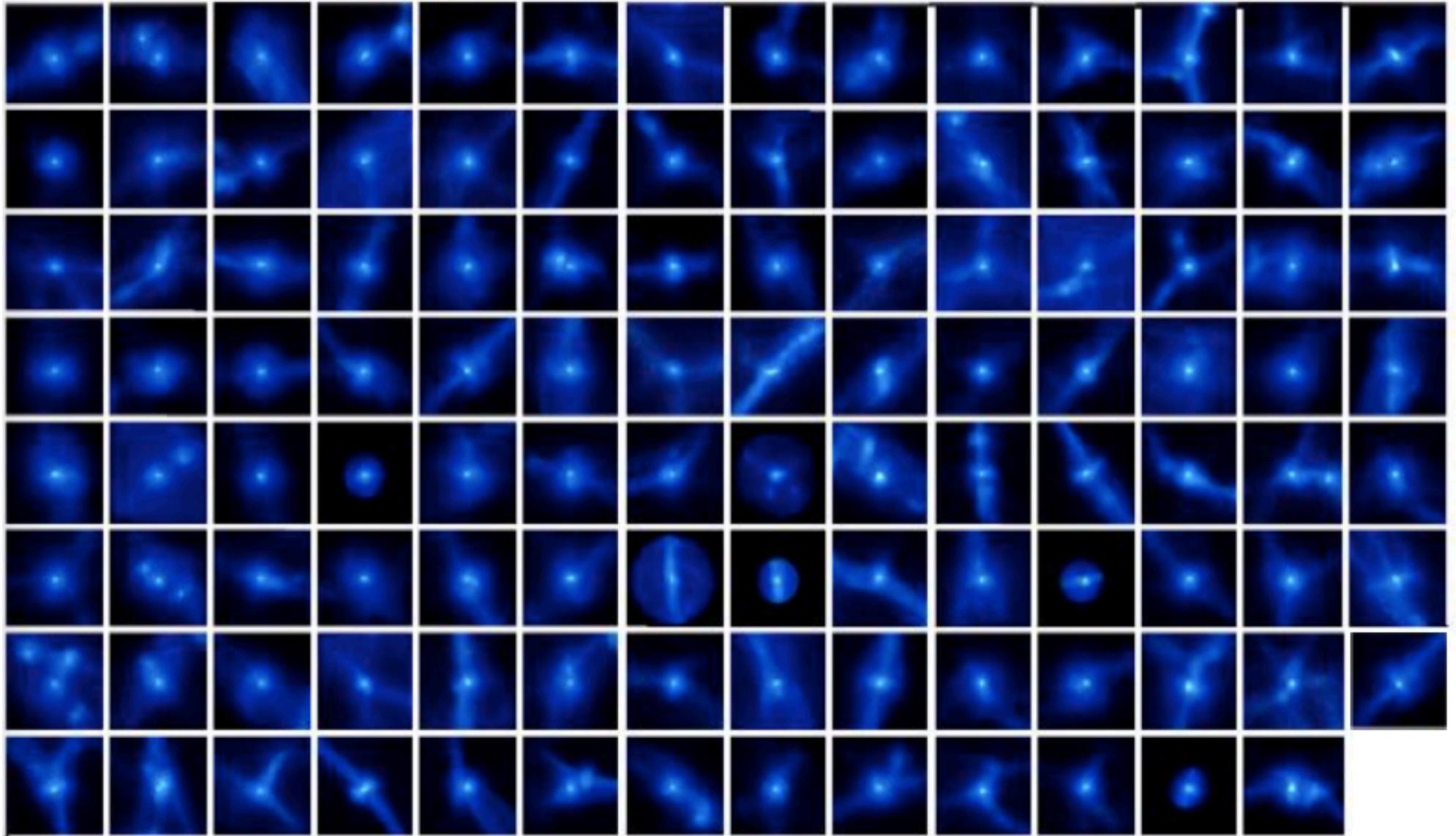
近接連星の形成mode?

UV feedback + 円盤分裂

未だ混沌としておりさらなる研究が必要

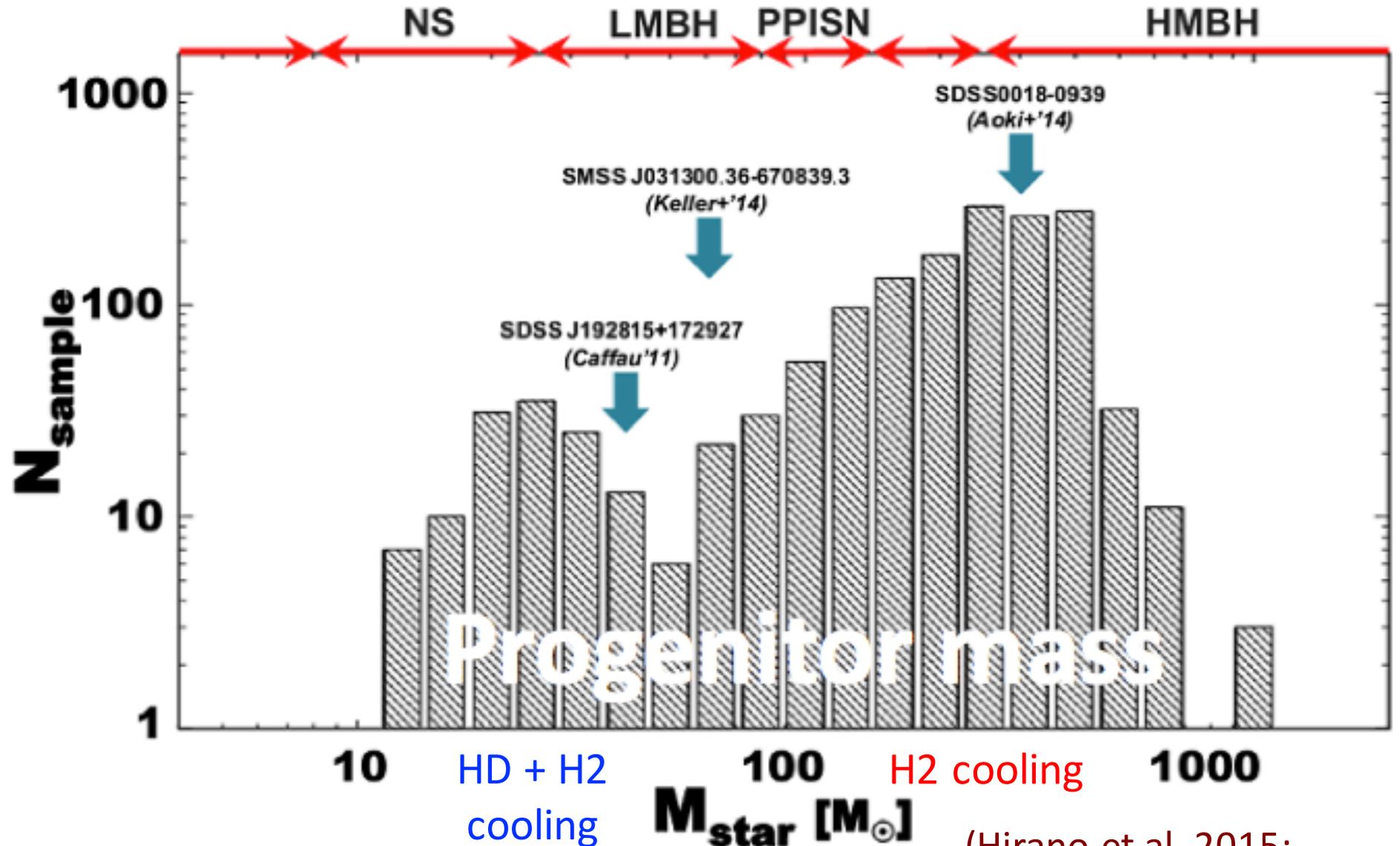


Cosmological Diversity



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

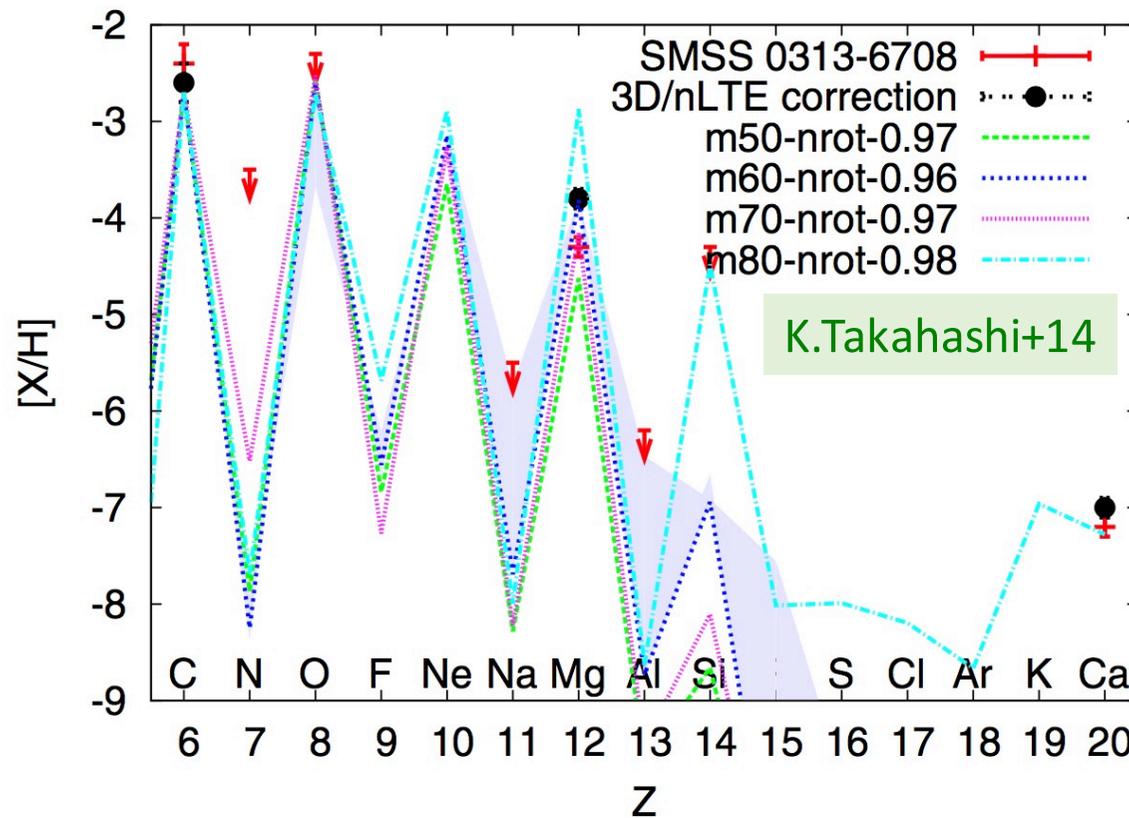
The “Mass Spectrum”



(Hirano et al. 2015;
also see Susa et al. 2015)

金属欠乏星による質量推定

星の進化計算と金属欠乏星の組成比較 → 明日の午後セッション



← $[Fe/H] < -7$ (Keller+14)

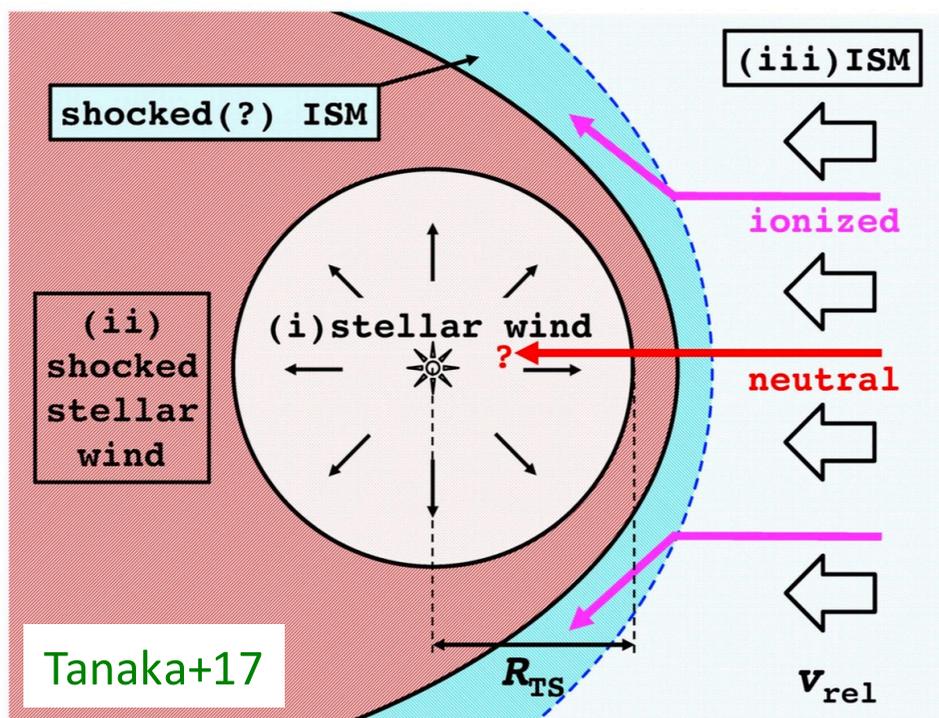
PISNの痕跡なし
(core collapse SNを支持)

- + そもそもPISNは一発でも $[Fe/H]$ をもっと大きくする
- + Controversial on SDSS J0018-0939 w/ $[Fe/H] = -2.5$ (Aoki+14)
(PISN, even more massive star, or neither...?)

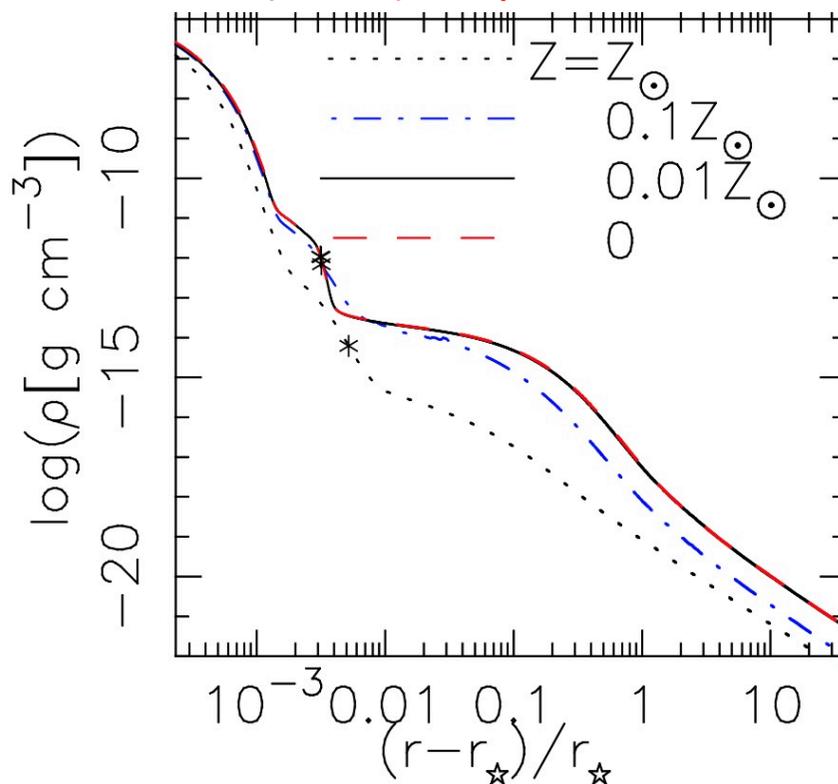
ISM重元素汚染とPopIII星風

銀河系内のISM中の重元素が金属欠乏星を汚染しえるか？

low-mass PopIII星まわりのコロナ加熱と星風駆動効率に依存:→田中(周太)氏talk



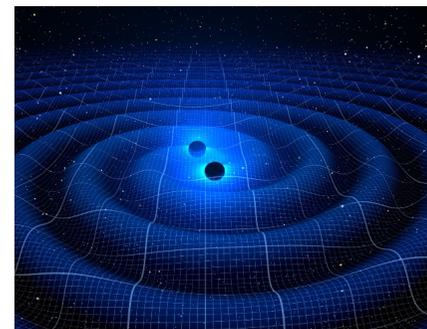
Suzuki (2017): PopIIIコロナ加熱



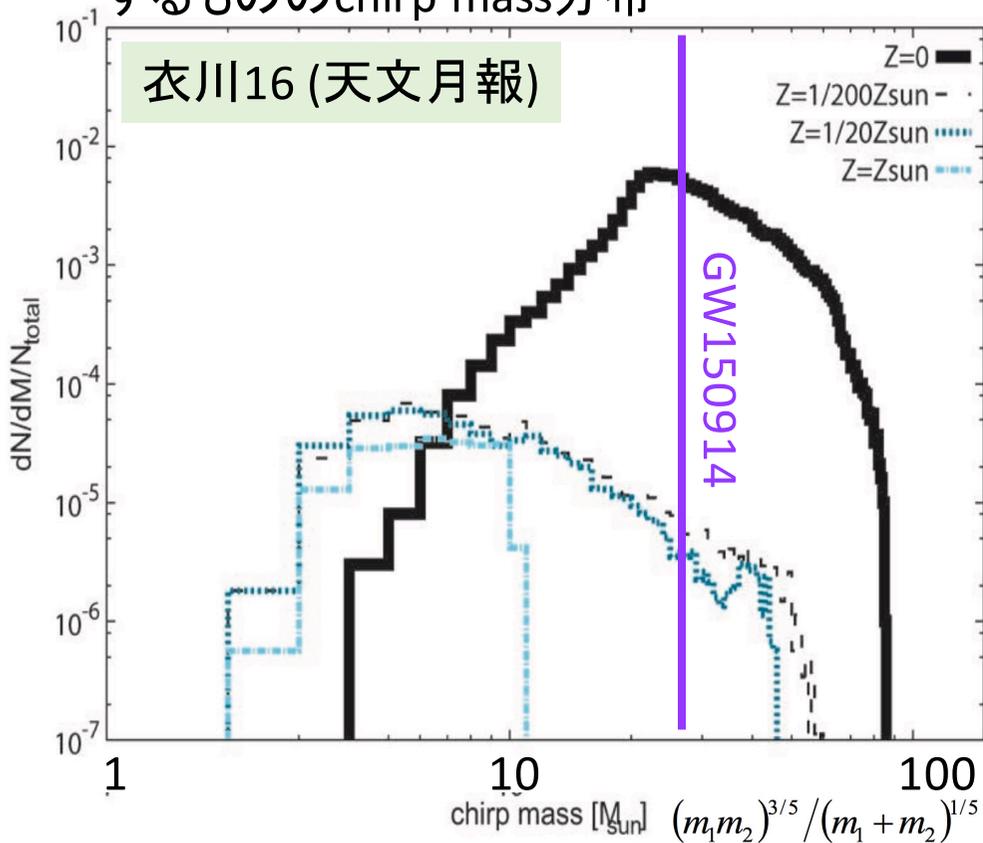
PopIIIは冷却効率が悪く、コロナ密度 \uparrow 、mass loss rate \uparrow (Pop Iの ~ 10 倍)

Pop III BH-BH連星?

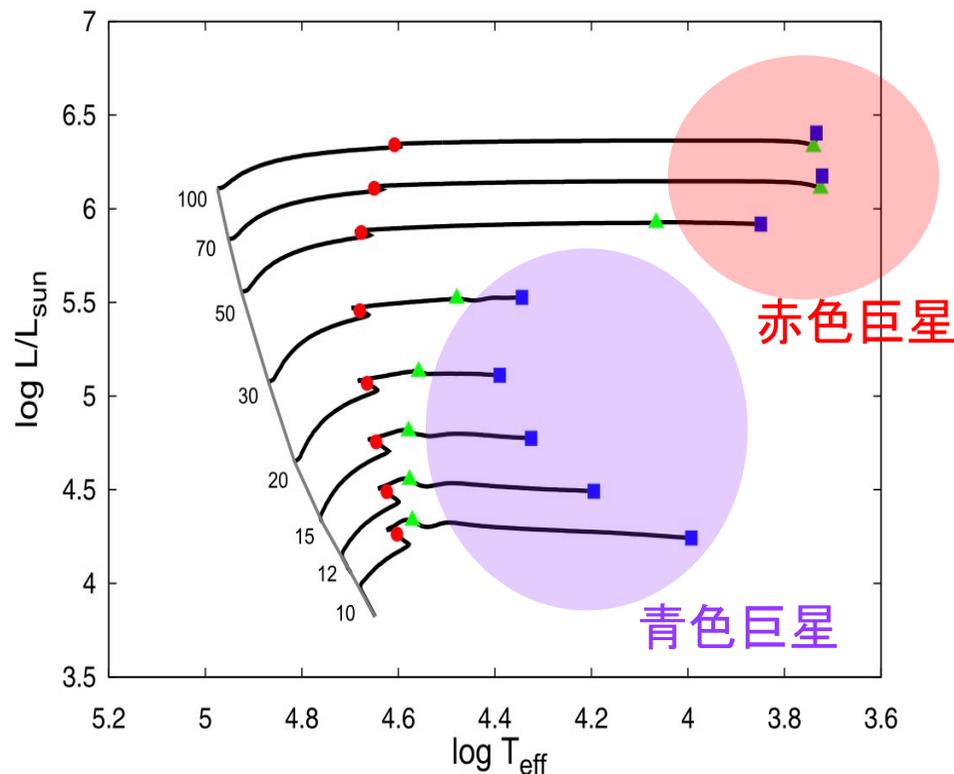
(Kinugawa+14,16; Nakamura+16; Inayoshi+17 etc)



百万個の連星のうち、宇宙年齢内に合体するもののchirp mass分布



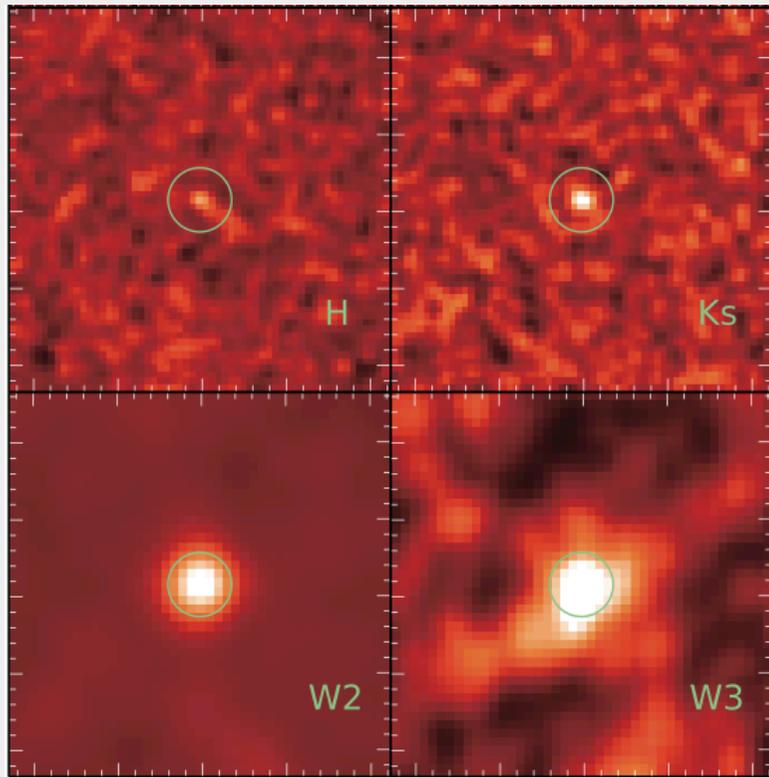
Pop IIIの場合は約 $30M_{\odot}$ にピーク
Pop I/IIではもっと低質量側に分布



$M > 50M_{\odot}$: 赤色巨星になり共通外層進化で
たくさん質量損失。のち合体

$M < 50M_{\odot}$: 青色巨星にとどまり共通外層を
経ない。星風も効かずそのまま
合体 (このパスはPopIIIのみ)

II. The First SMBHs



← $M_{\text{BH}} \sim 1.2 \times 10^{10} M_{\odot}$ @ $z=6.3$
(Wu et al. 2015, Nature)

史上最大光度のQSO

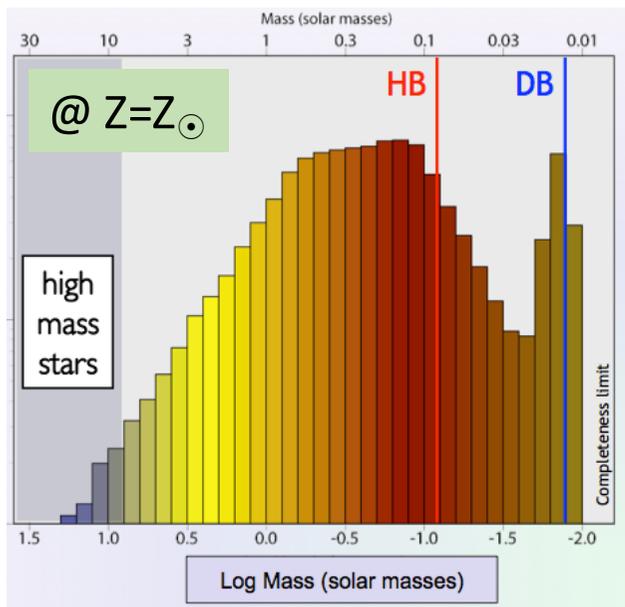
(全光度) $= \sim 4 \times 10^{14} L_{\odot}$

ビッグバン後10億年以内に $10^9 M_{\odot}$ を上回る
超巨大ブラックホールが存在している。

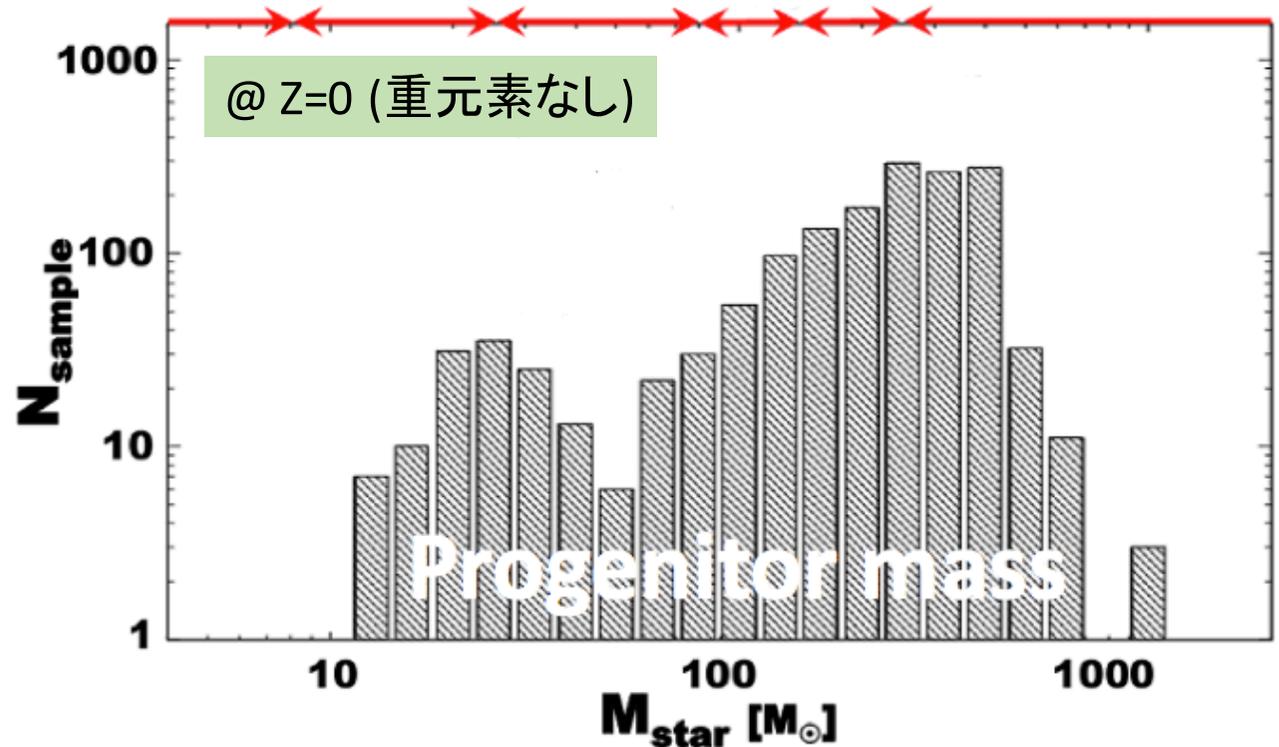
この時間内にどうやって形成されたのか？
初期宇宙での天体形成の枠組みでうまく
説明できるだろうか？

Key Question

What is the maximum mass of the first star?
(What is the maximum mass of the seed BHs ?)



typical mass $\sim 1M_{\odot}$
 $\sim 100M_{\odot}$ star rarely forms

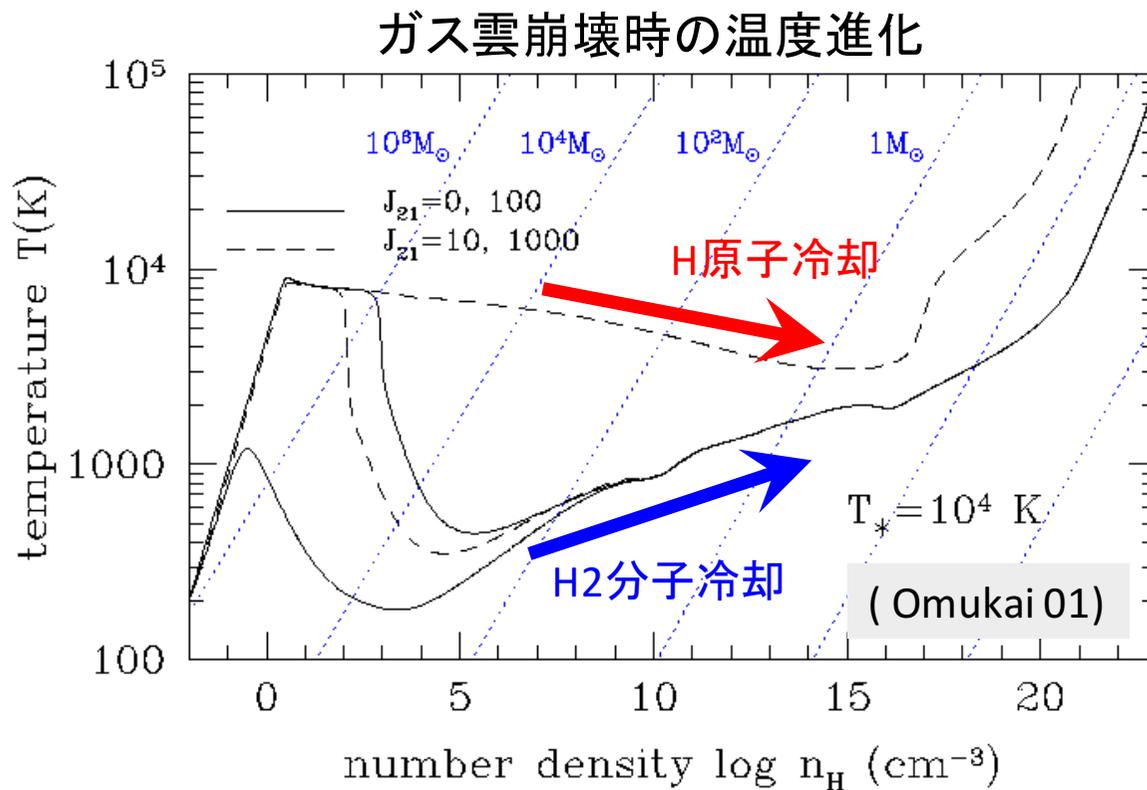


typical mass $\sim 100 M_{\odot}$?

Maximum mass for this case? $\sim >10000M_{\odot}$ star rarely forms?

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)



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
($T \sim 8000 \text{ K}$ 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

$$\dot{M} \sim \frac{M_{\text{J}}}{t_{\text{ff}}} = \frac{c_{\text{s}}^3}{G} \propto T^{1.5}$$

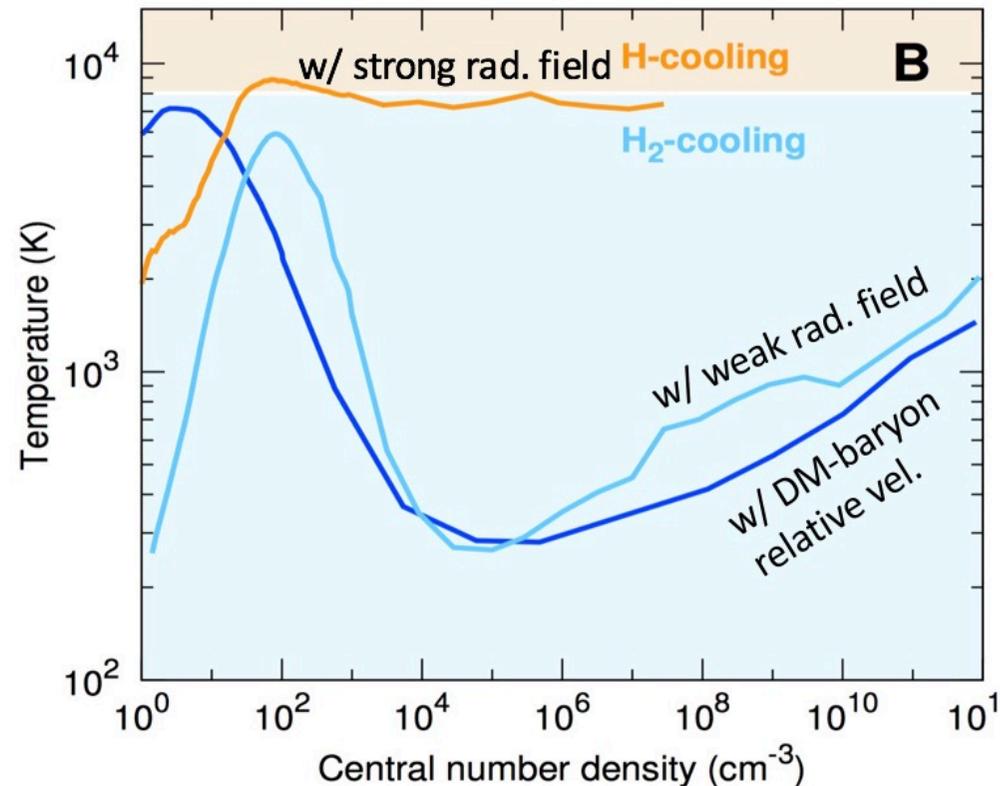
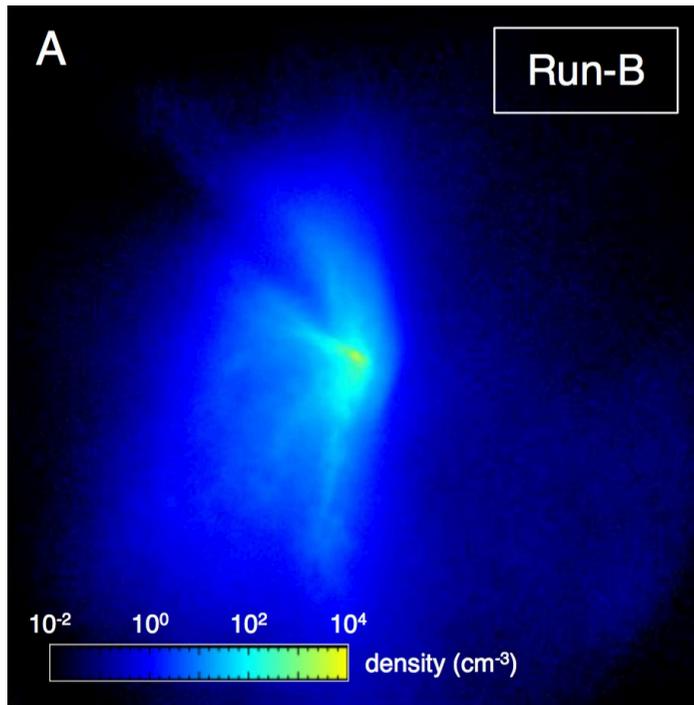


④GR不安定による超大質量星
の崩壊 $\rightarrow 10^5 M_{\odot}$ BH

Supersonic gas streams enhance the formation of massive black holes in the early universe

Science, (2017), 357, 1375

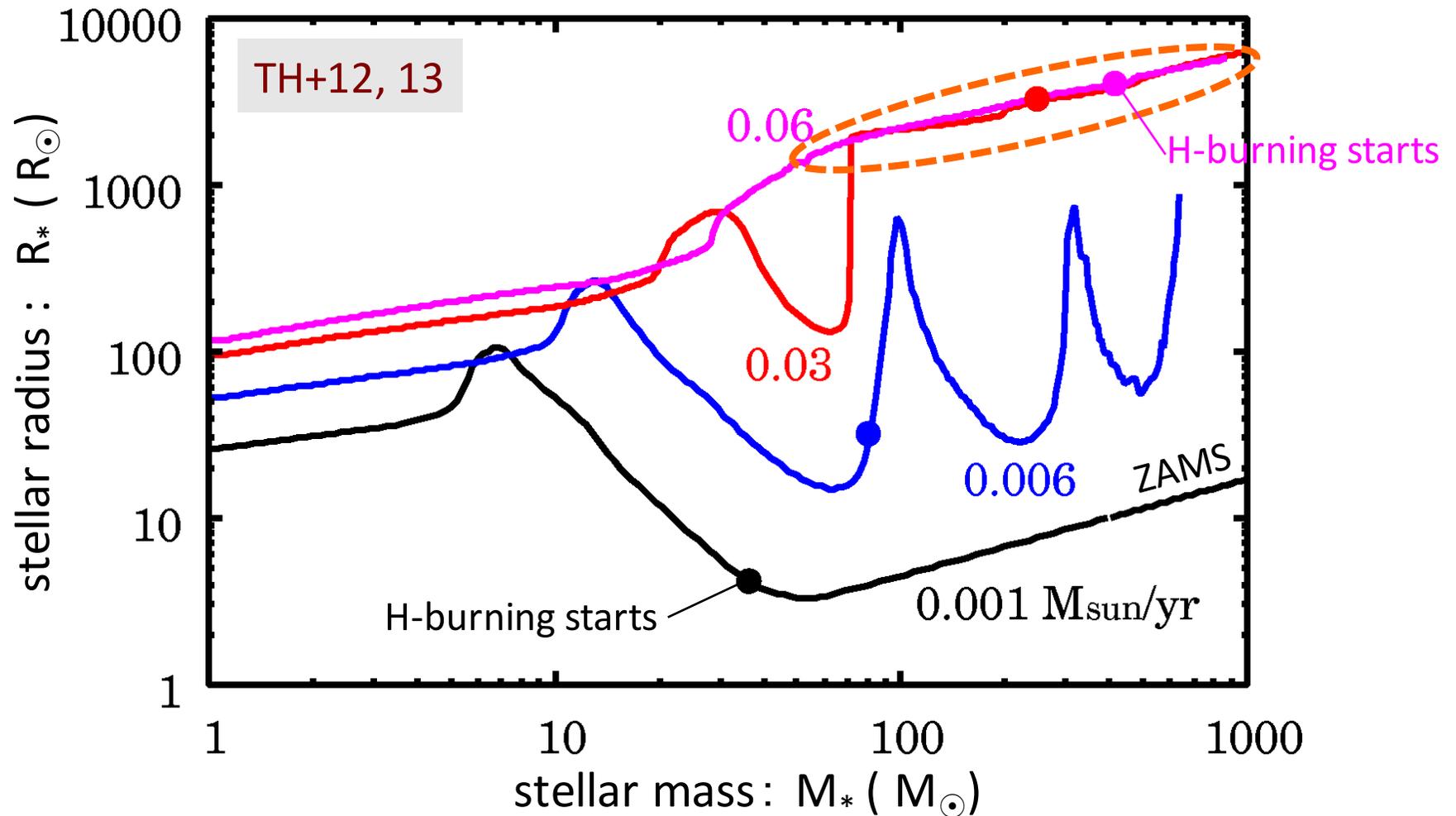
Shingo Hirano,^{1,2*} Takashi Hosokawa,^{2,3,4} Naoki Yoshida,^{2,4,5} Rolf Kuiper⁶



下の低温pathに落ちても必ずしも失敗でない: 急速ガス降着が実現する場合がある

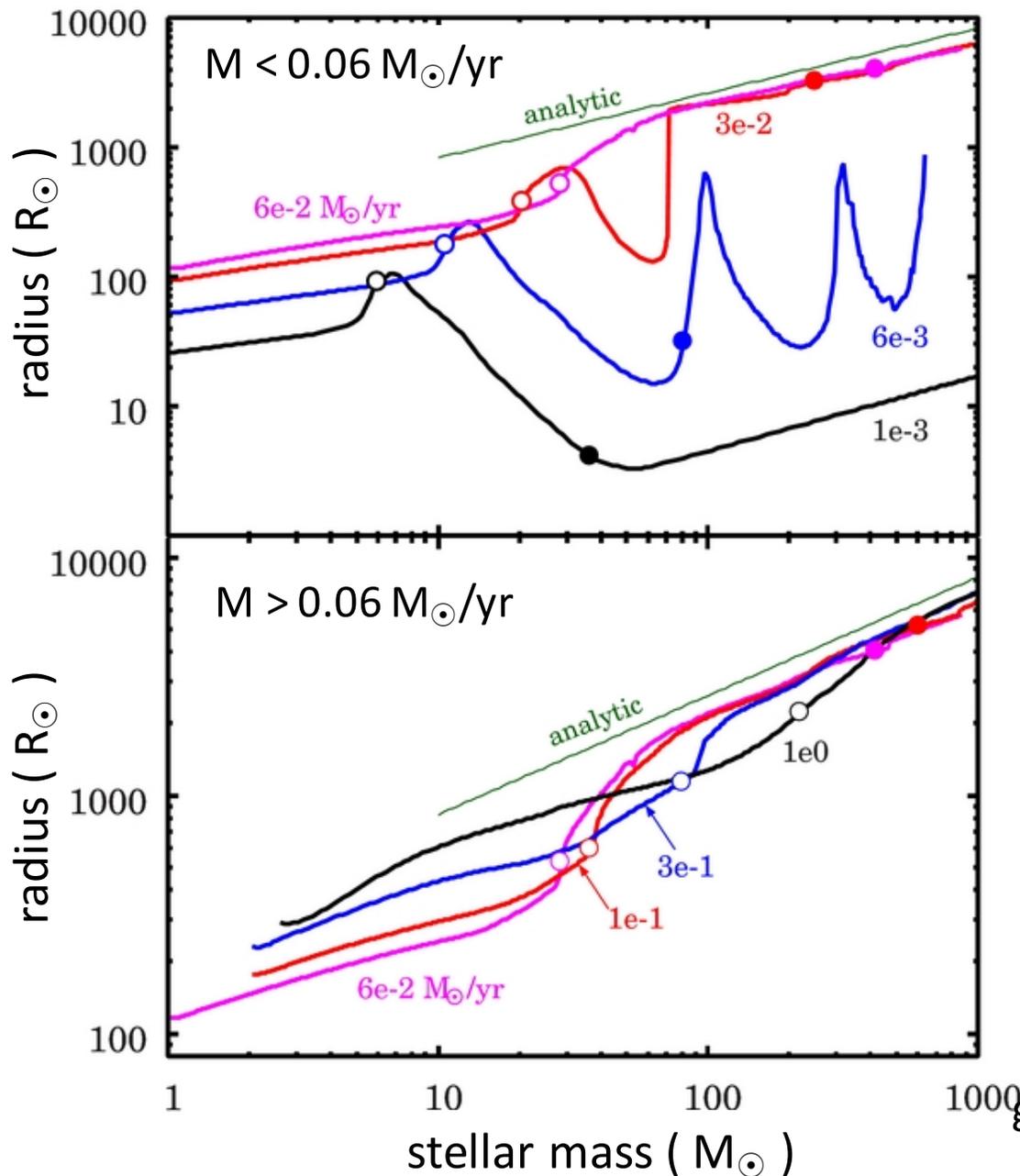
$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \propto T^{1.5} \quad \text{しかし、} M_{\text{cloud}} \gg M_{\text{Jeans}} \text{ならOK}$$

"Supergiant Protostar"



With very rapid accretion $> 0.01 M_{\odot}/\text{yr}$, the protostar never contracts to reach the ZAMS stage, but **continues to expands**.

Physics



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

+

stellar luminosity: L_*

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

+

nearly constant effective temperature

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

(strong T-dependence of H- opacity)

(ref. Hayashi track)



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

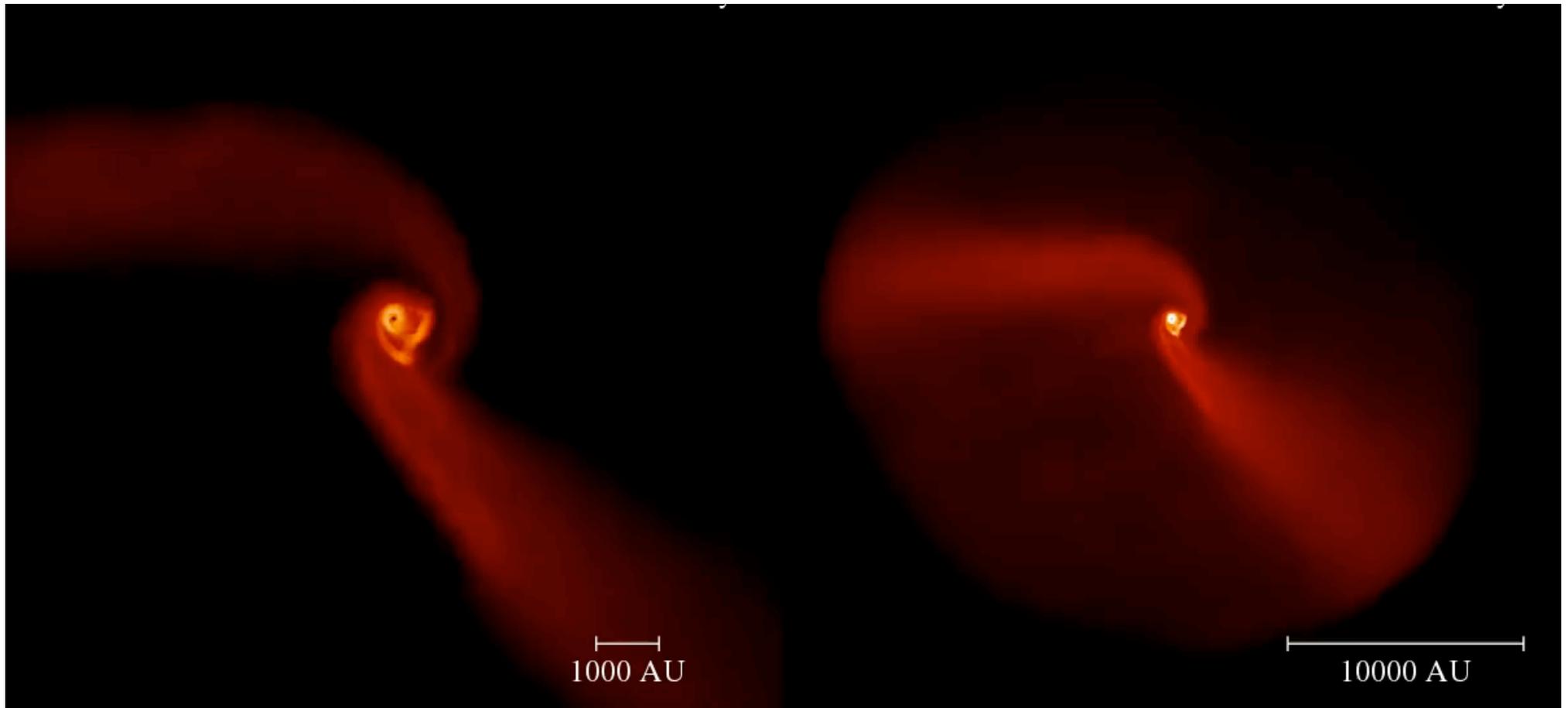
good agreement with the numerical results

Radiation hydrodynamics simulations of the formation of direct-collapse supermassive stellar systems

Sunmyon Chon, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida

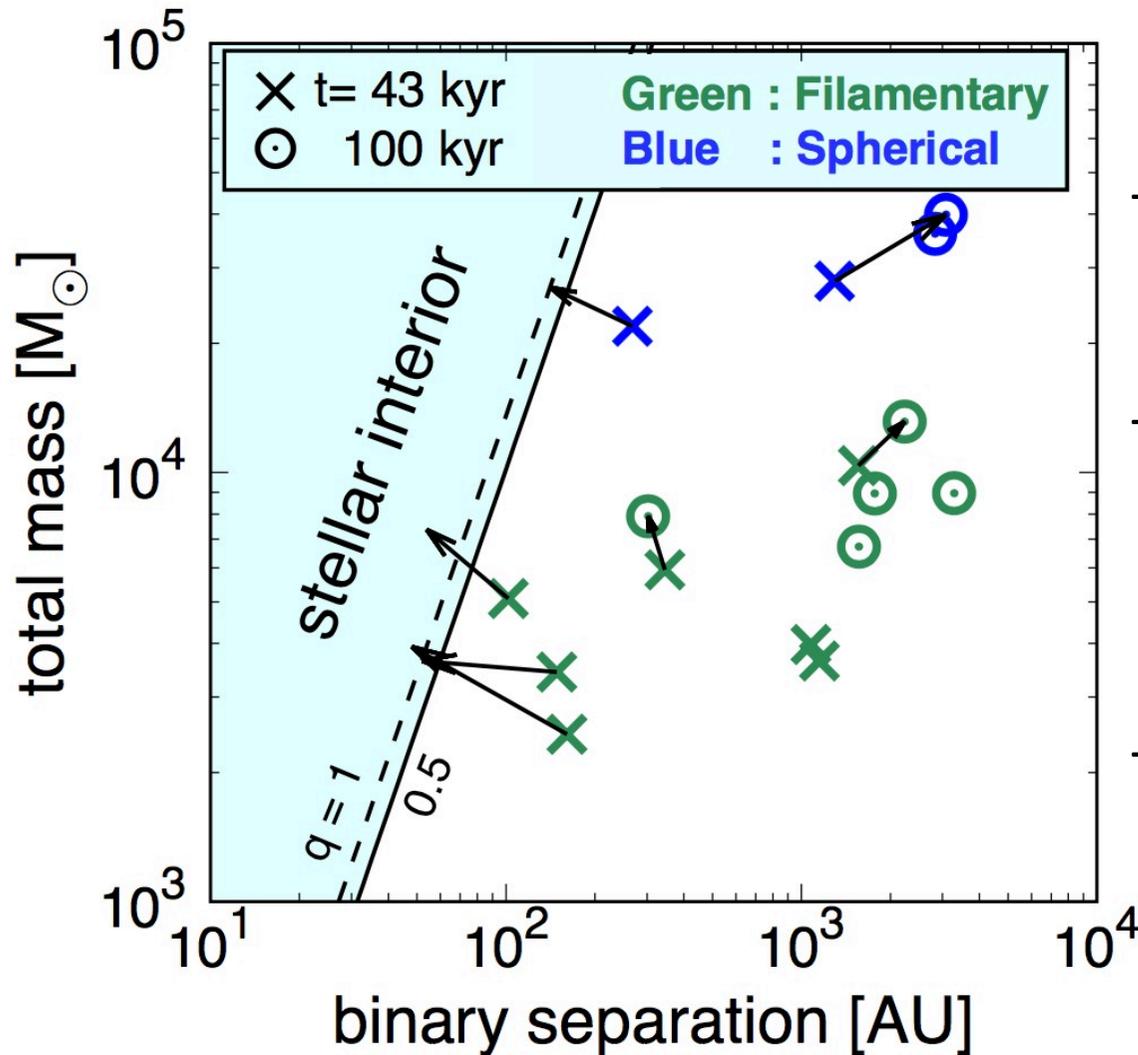
(Submitted on 14 Nov 2017)

arXiv:1711.05262



The star-forming cloud easily fragments via gravitational instability, which produce multiple star-disk systems → cluster of very massive stars (w/ some binaries)

超大質量連星



- + 生き残る星の約半数は連星をなしている
- + (連星間距離) \sim (星半径) になるものが相当数ある
星半径より縮めば合体(と仮定)
- + 形成期でもcommon envelopeのような連星進化があり得る

Summary

- + 初代星: 典型mass, mass分布、連星率...はいくらか
星の進化 + 3D輻射流体計算: Feedback + 分裂
さらなる研究が必要。観測との比較。GWの役割にも期待
 - + 初代SMBH: 時間が足りるか
超大質量星形成: 初代星形成との統一的な理解が必要
別の可能性? Super-Eddington accretion?
- 微量の重元素が加わった場合への拡張も必要 → 櫻井氏talk