

# 初期宇宙での 大質量星形成

細川 隆史 (東大)

銀河系の大質量星形成 : 08年理論懇でのreview参照  
(ppt file available on the web-site)

# 初期宇宙での星形成

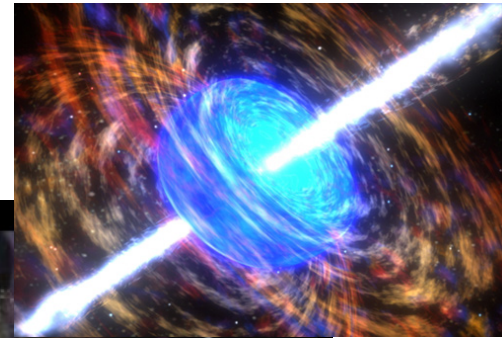
## 初期宇宙では大質量星が主役

- おそらく数の上で支配的 (e.g., 宇宙初代星 / Pop III星)
- 宇宙再電離、重元素汚染、ガンマ線バースト前駆体...
- 遠方銀河の観測は大質量星起源の放射を見る

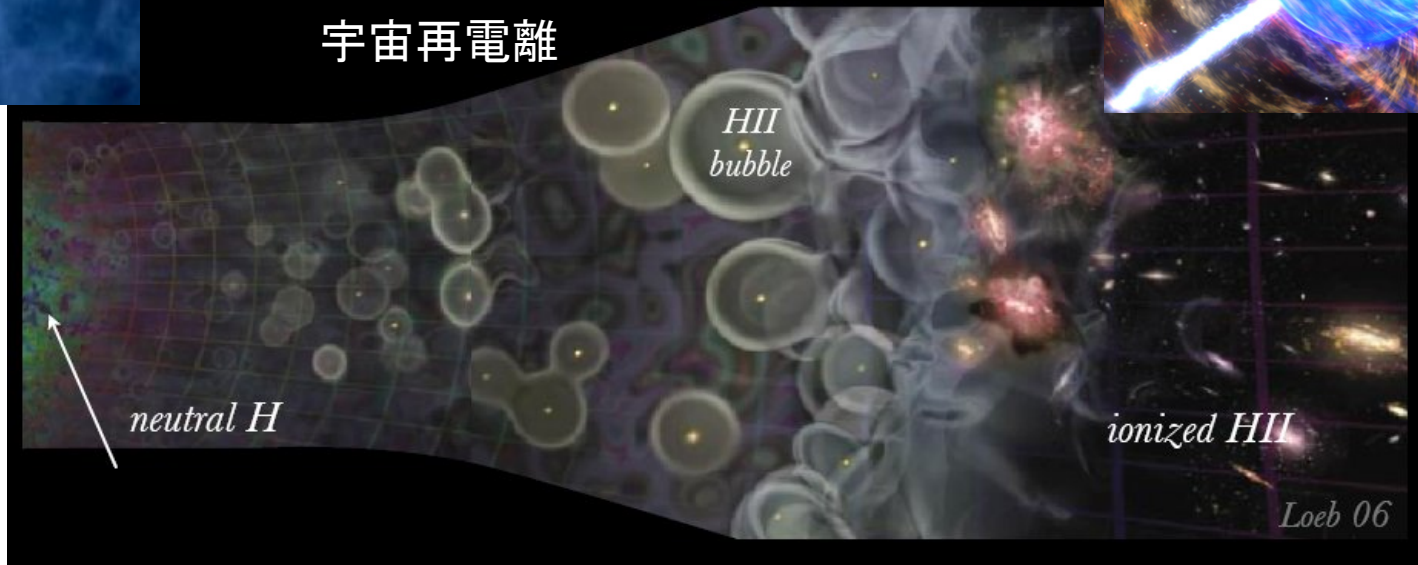


宇宙初代星  
(Pop III)

ガンマ線  
バースト



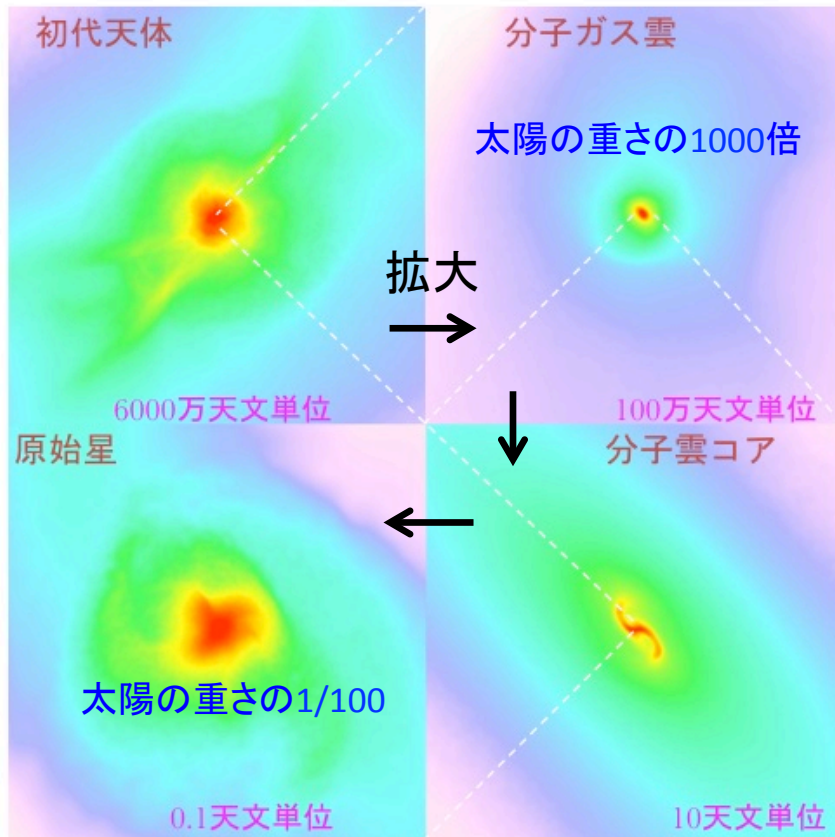
宇宙再電離



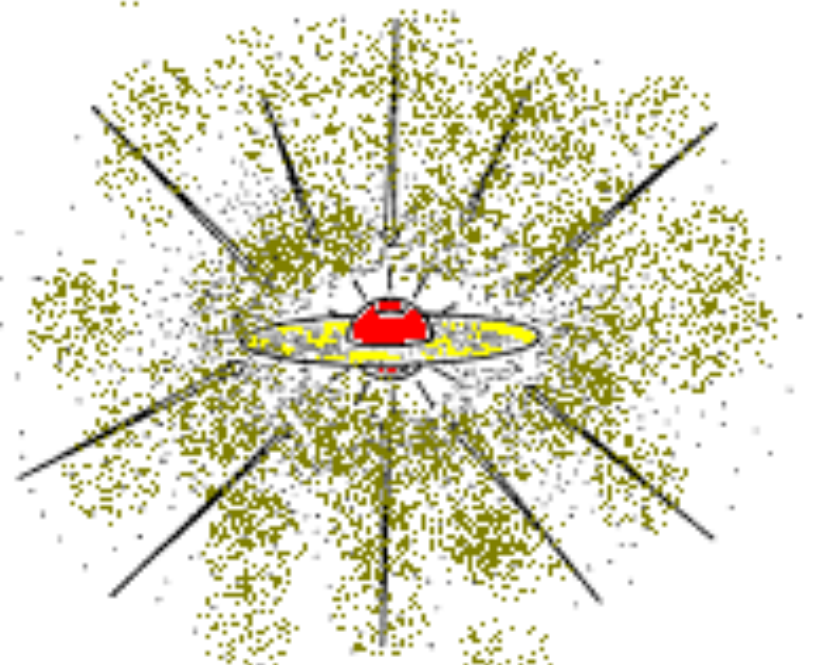
# 初代星は何太陽質量か

Yoshida, Omukai & Hernquist (2008)

宇宙論的初期条件からはじめて構造形成の結果、数億年後に原始星が誕生



このあとガスが原始星に降り積もり星質量が増加する



ガス降着が終わったとき  
初代星の質量が決まる

太陽の1/100の原始星のまわりに  
太陽の1000倍のガスが残った状態

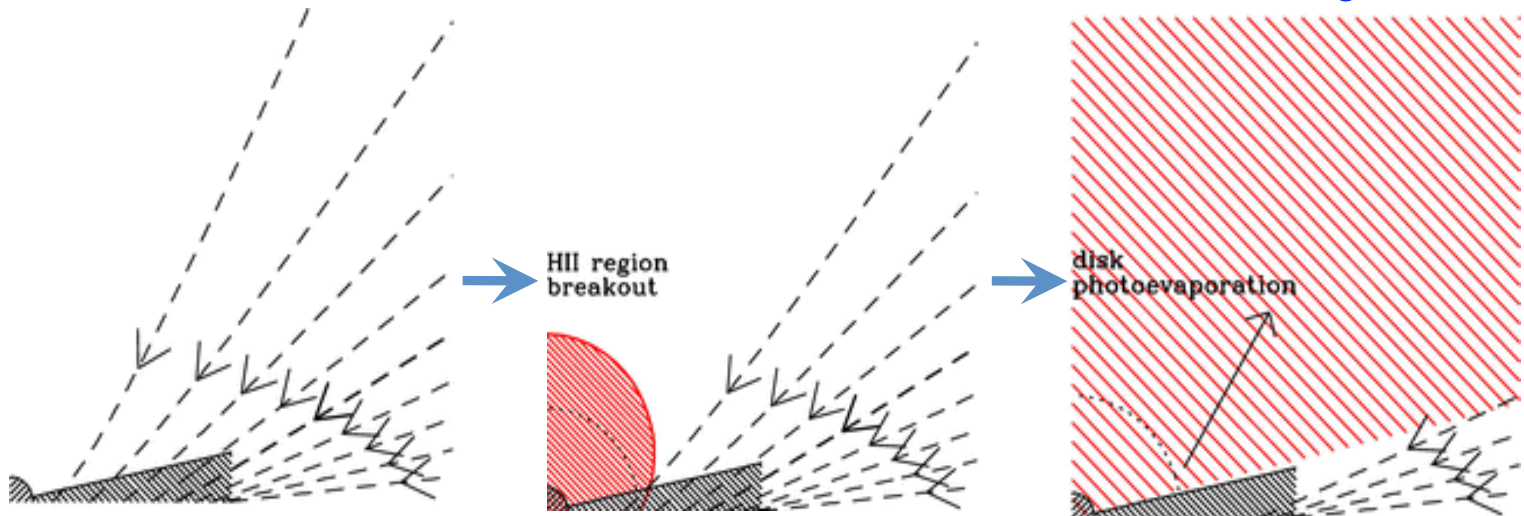
# 質量降着期の進化

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

星の寿命中( $\sim \text{Myr}$ )ずっとこの降着率で  
星質量が増加しつづけた場合  $\Rightarrow M_* \sim 1000 M_\odot$

UV stellar feedback (e.g., McKee & Tan 08)

電離領域の形成 + 星周円盤の光蒸発  $\rightarrow M_* \sim 150 M_\odot?$

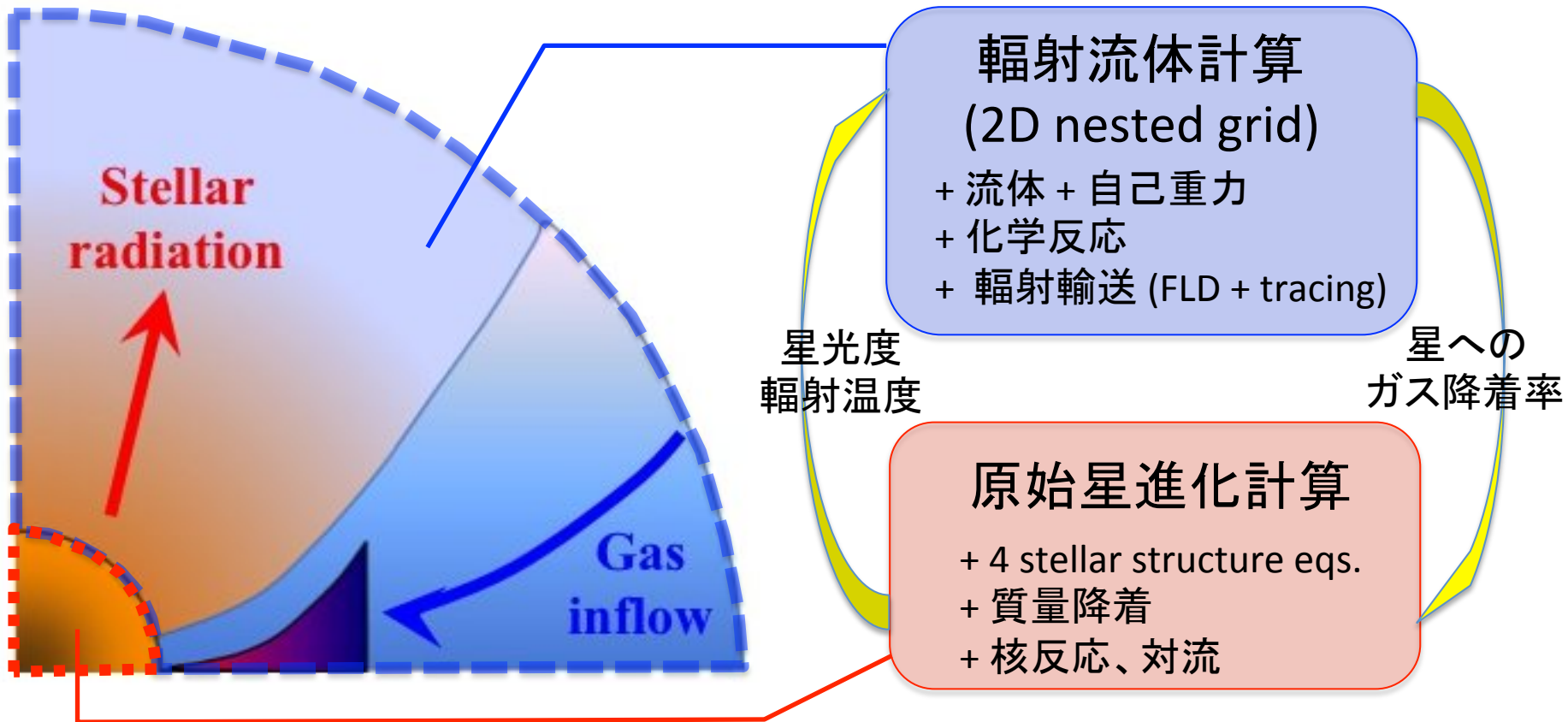


初代星=100M<sub>⊙</sub>を超えるようなvery massive stars?

# 直接数値計算

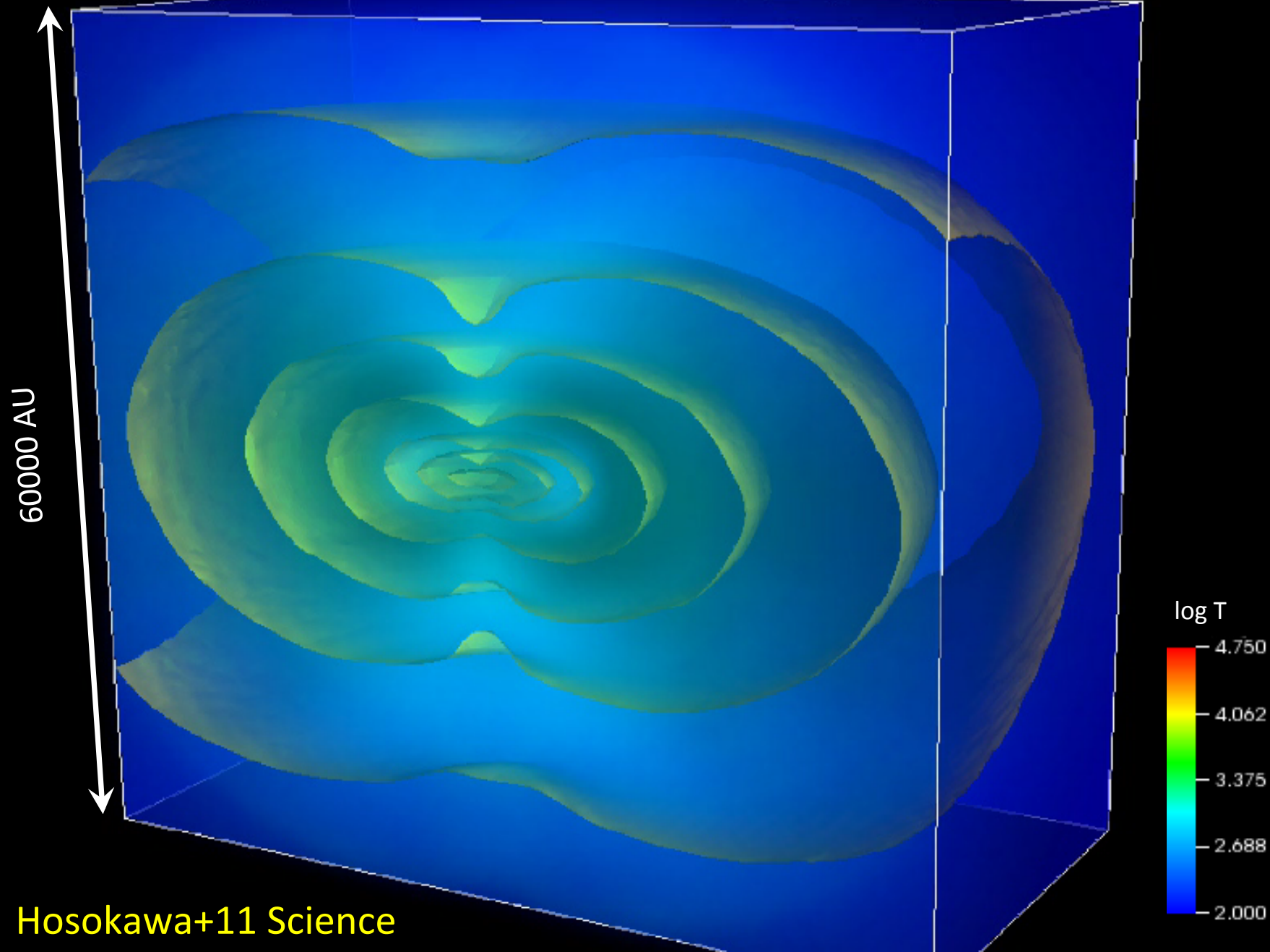
Hosokawa et al. (2011), *Science*, 334, 1250

中心星の進化、星からの輻射-降着ガスのダイナミクスを同時計算

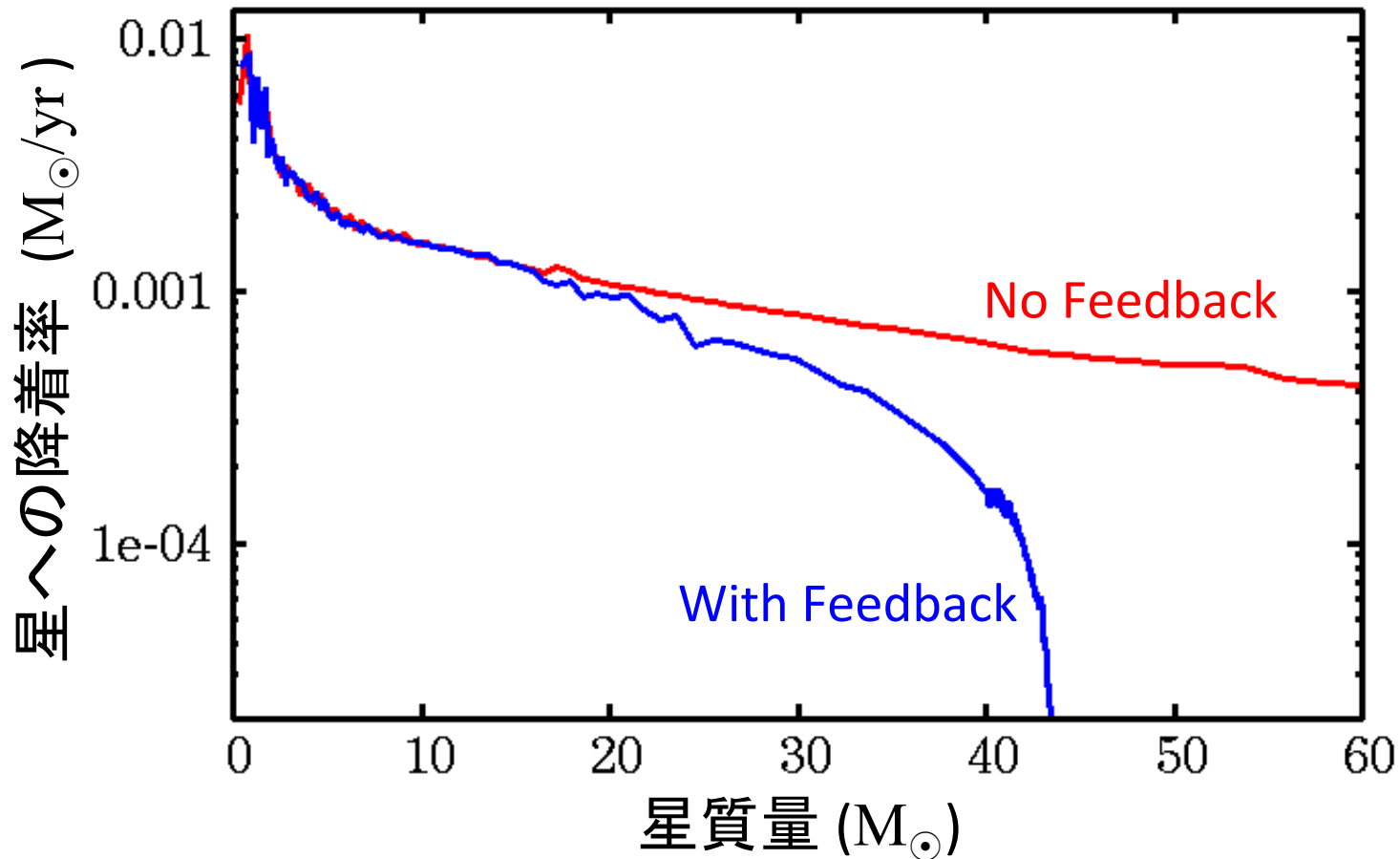


原始星誕生以後10万年間の進化を計算

Cosmological initial setting (data from Yoshida+09)



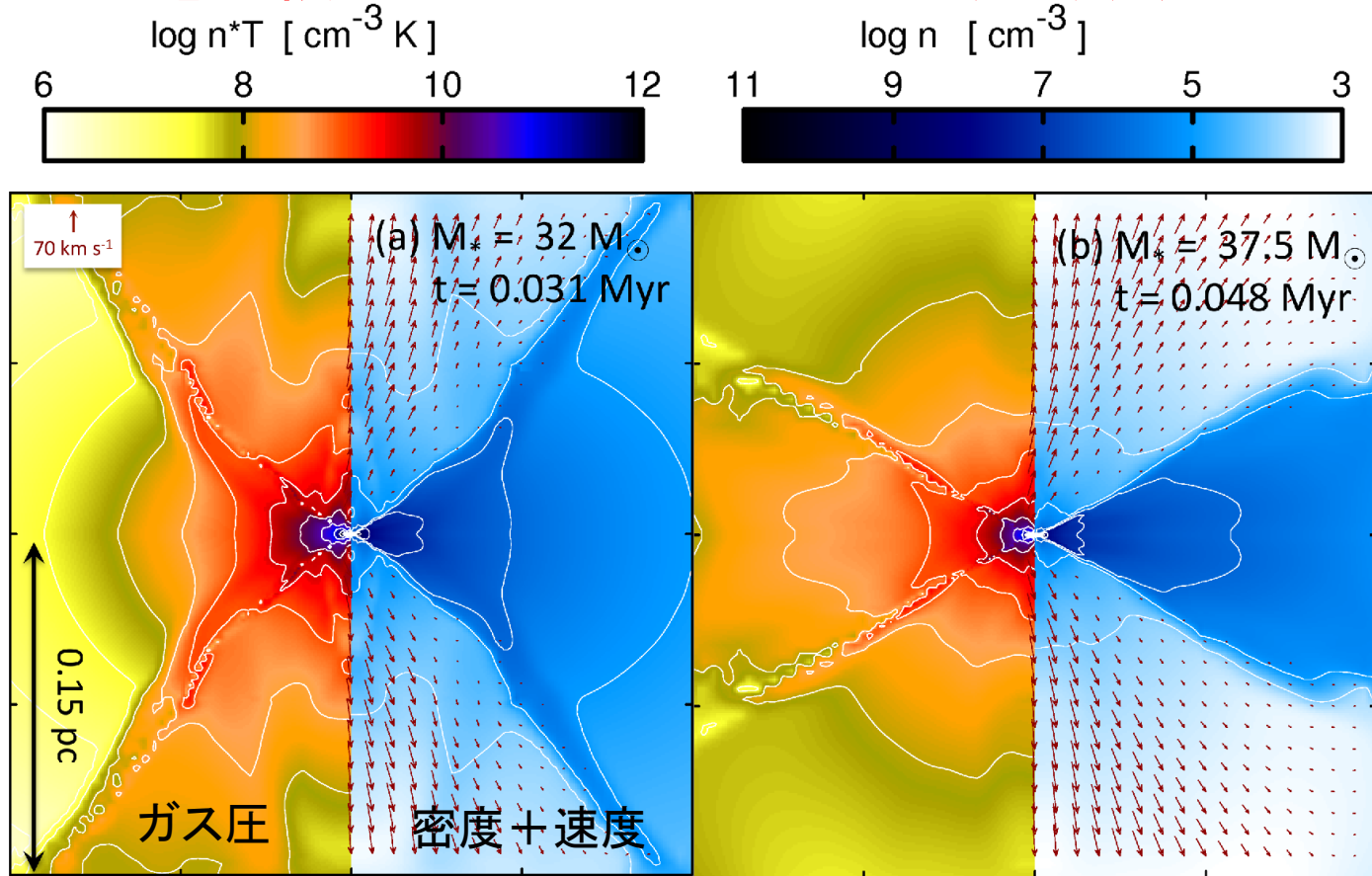
# 星へのガス降着史



- UV光feedbackの為に大幅に降着率が低下する
  - この場合、星質量 $\sim 45 M_{\odot}$ で星への降着が止まる
- これまで信じられてきたような超大質量星にはならない

# なぜ降着が止まるか

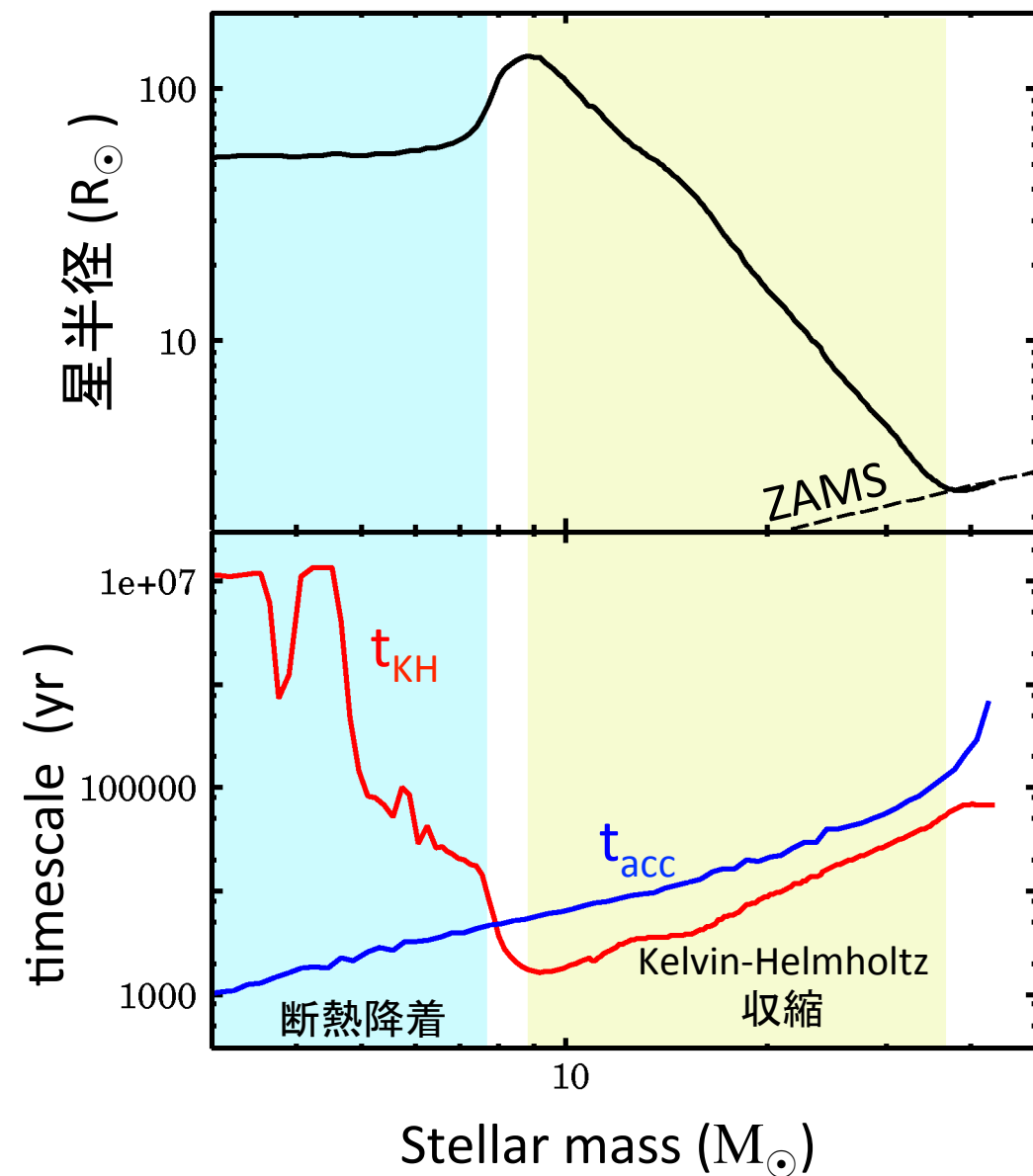
電離領域: ガス圧excessによる動的膨張



- 電離領域内は外向き圧力勾配 (光蒸発流による密度勾配のため)
- 衝撃波が円盤背後まで伝わると同じ外向き圧力勾配ができる
- 降着外層から円盤へのガス供給がまず止まる
- 孤立した円盤がじょじょに光蒸発



# 原始星進化

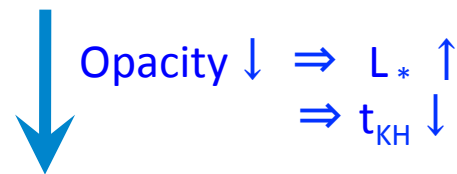


星がゼロ年主系列(ZAMS)に達してすぐ星への質量降着が終わる

2 characteristic timescales

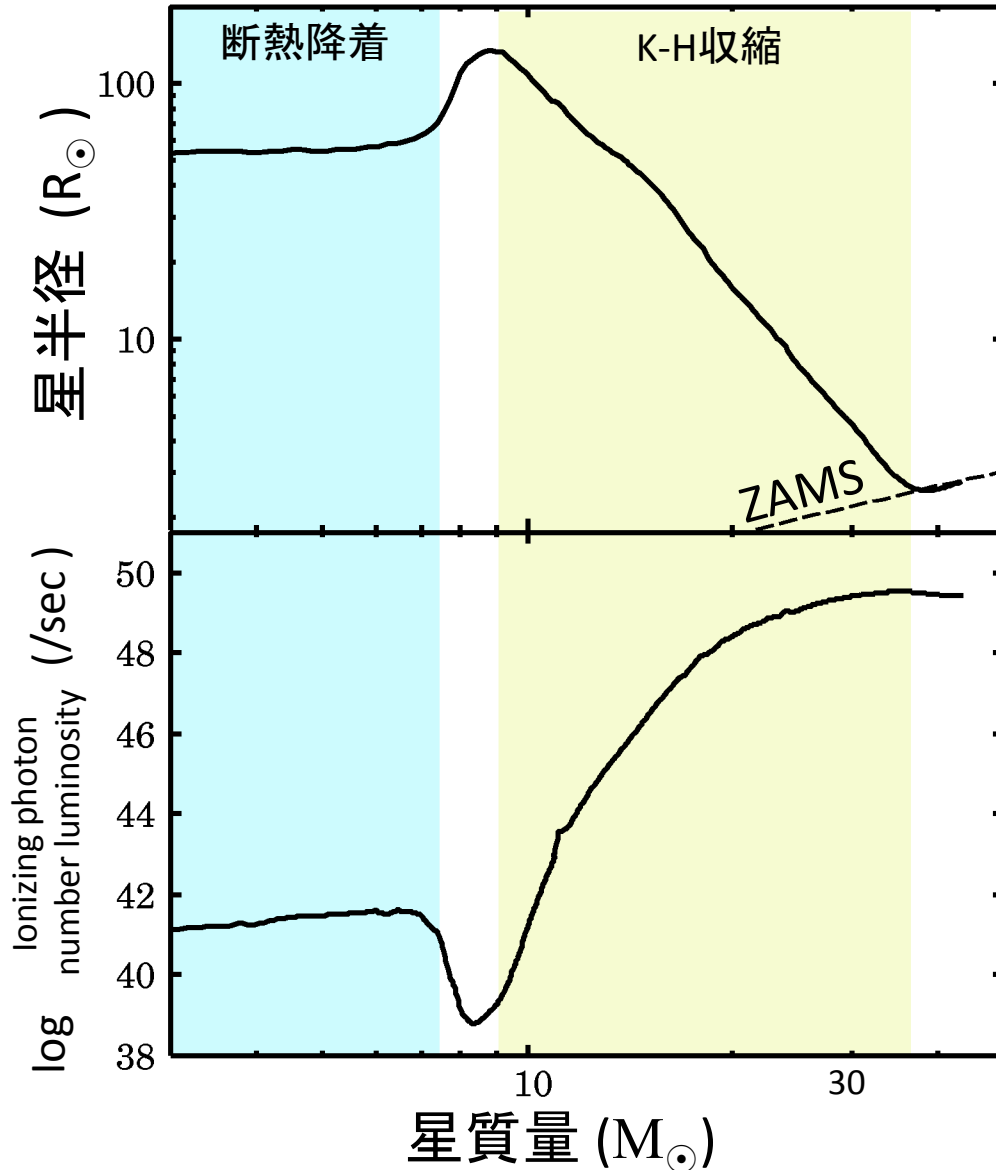
$$t_{\text{acc}} = \frac{M_*}{\dot{M}}, \quad t_{\text{KH}} = \frac{GM_*^2}{R_* L_*}$$

初期:  $t_{\text{KH}} > t_{\text{acc}}$ ; 断熱降着



後期:  $t_{\text{KH}} < t_{\text{acc}}$ ; K-H 収縮

# UV光度の進化



## K-H 収縮期

星光度  $\uparrow$   
by releasing grav. energy of the star  
+

星半径  $\downarrow$  (収縮)



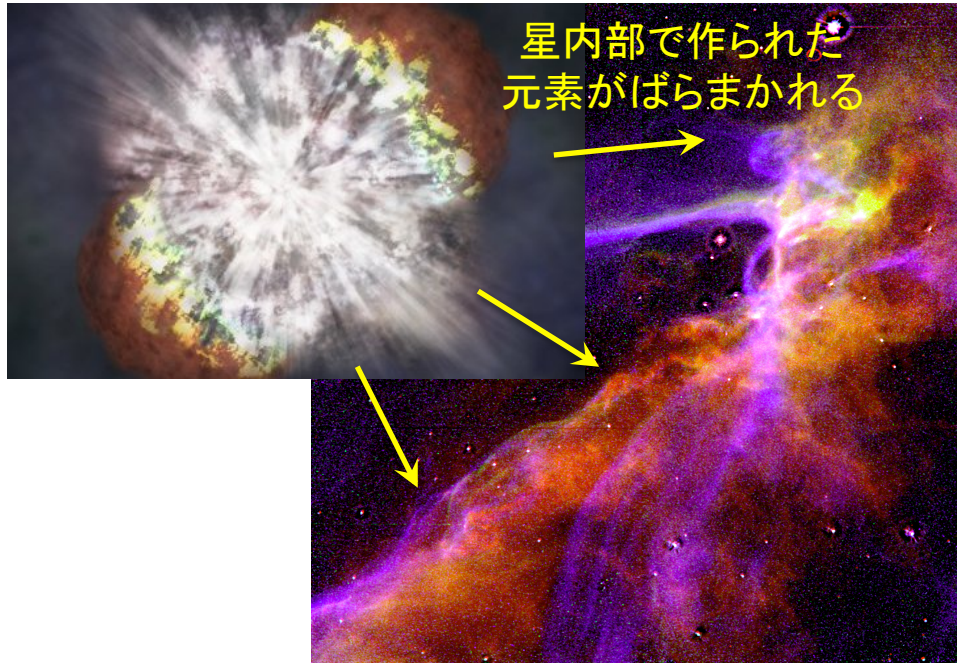
星の有効温度:  $T_{\text{eff}} \uparrow$   
星のUV光度  $\uparrow$

UV feedbackはKH収縮後期～  
ZAMS期にかけてはたらき、  
最終的に星へのガス降着を止める

# 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

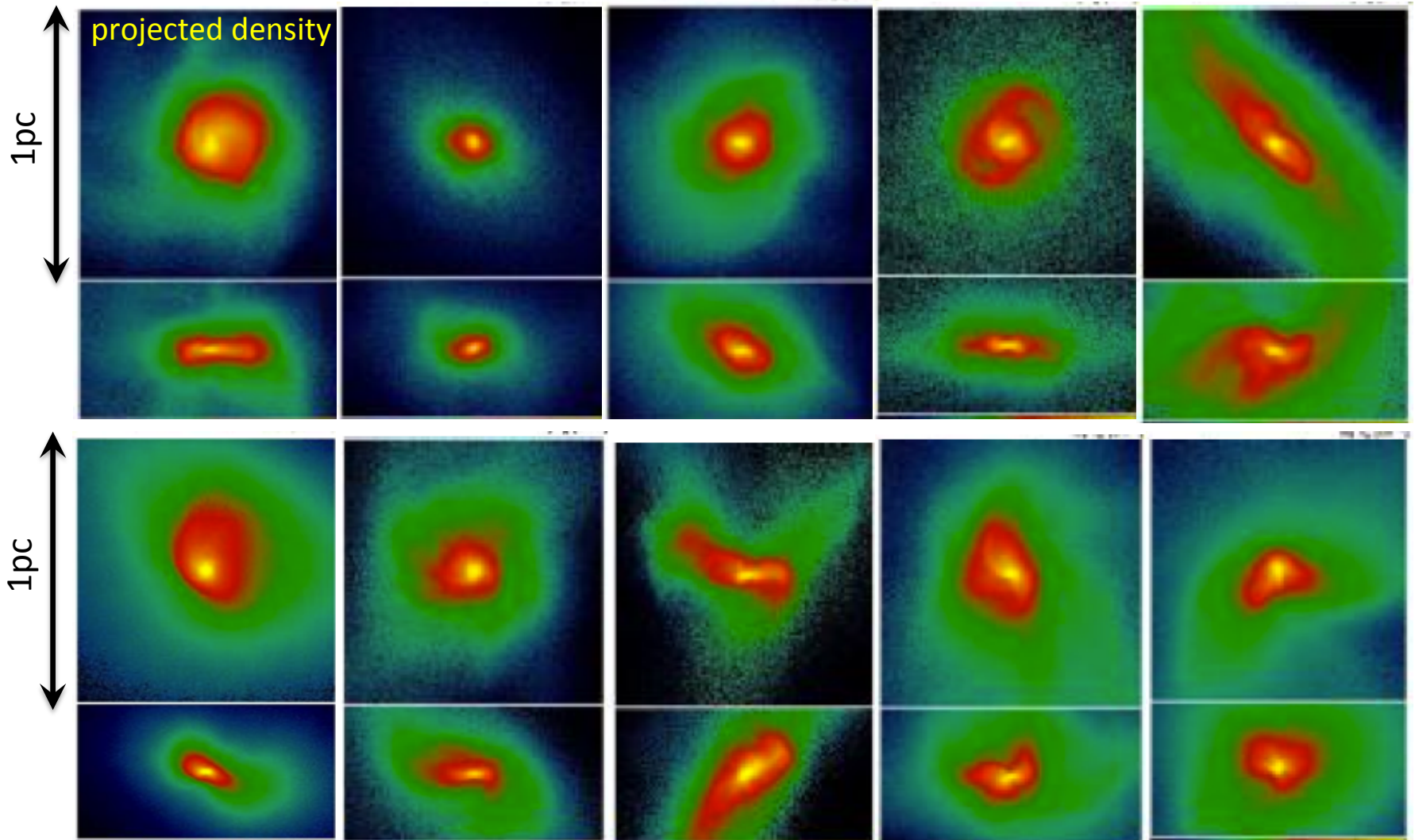


数百太陽質量 → pair-instability SN: 痕跡なし  
初代星は太陽の数十倍 (core-collapse SN) であったことを支持

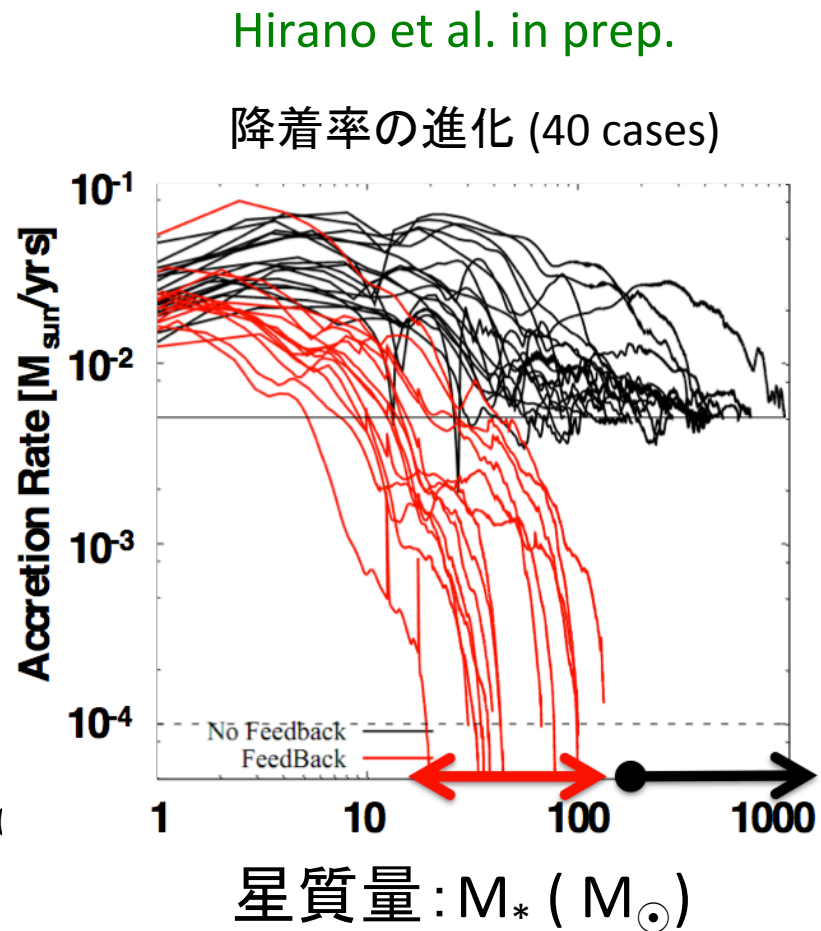
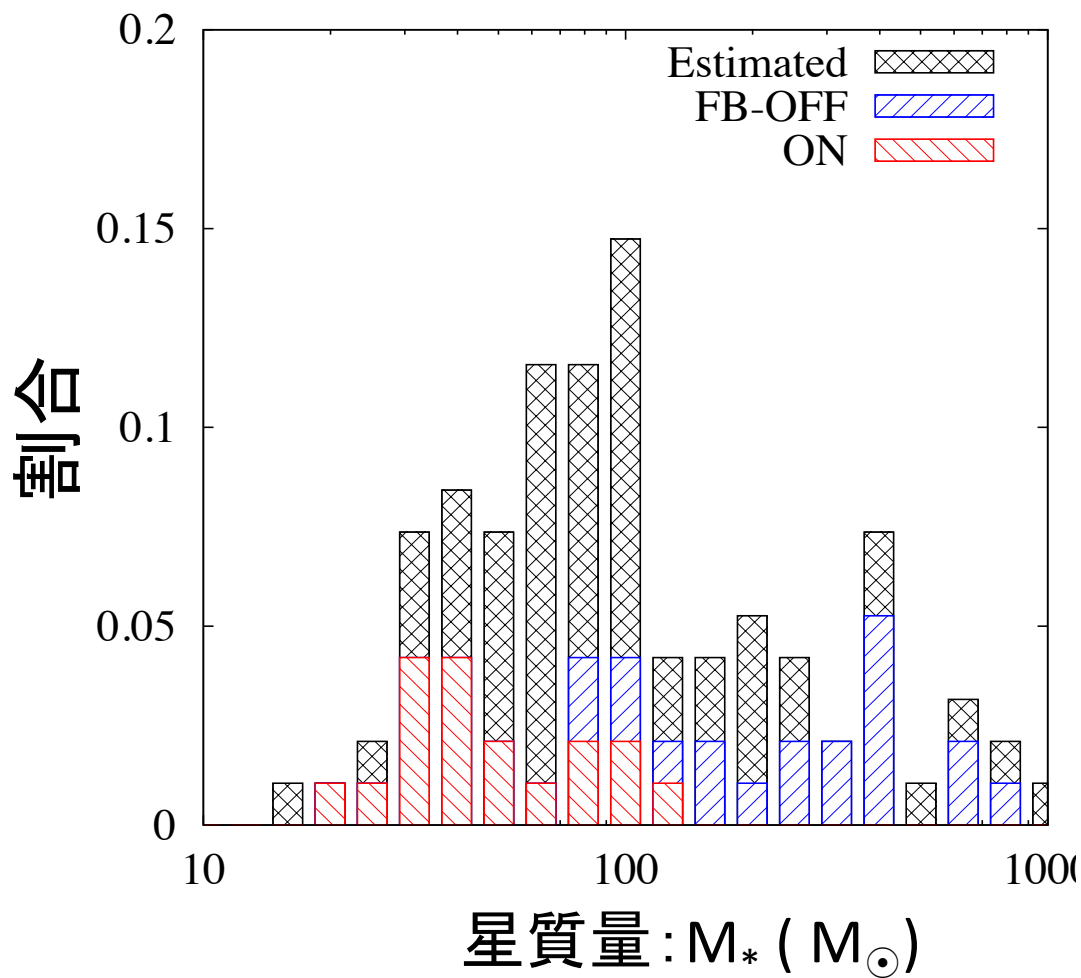
# Forming 100 First stars

始原ガス雲 in cosmological simulations → 原始星成長simulations **X 100**

初代星の質量分布を求める (平野くんポスター)



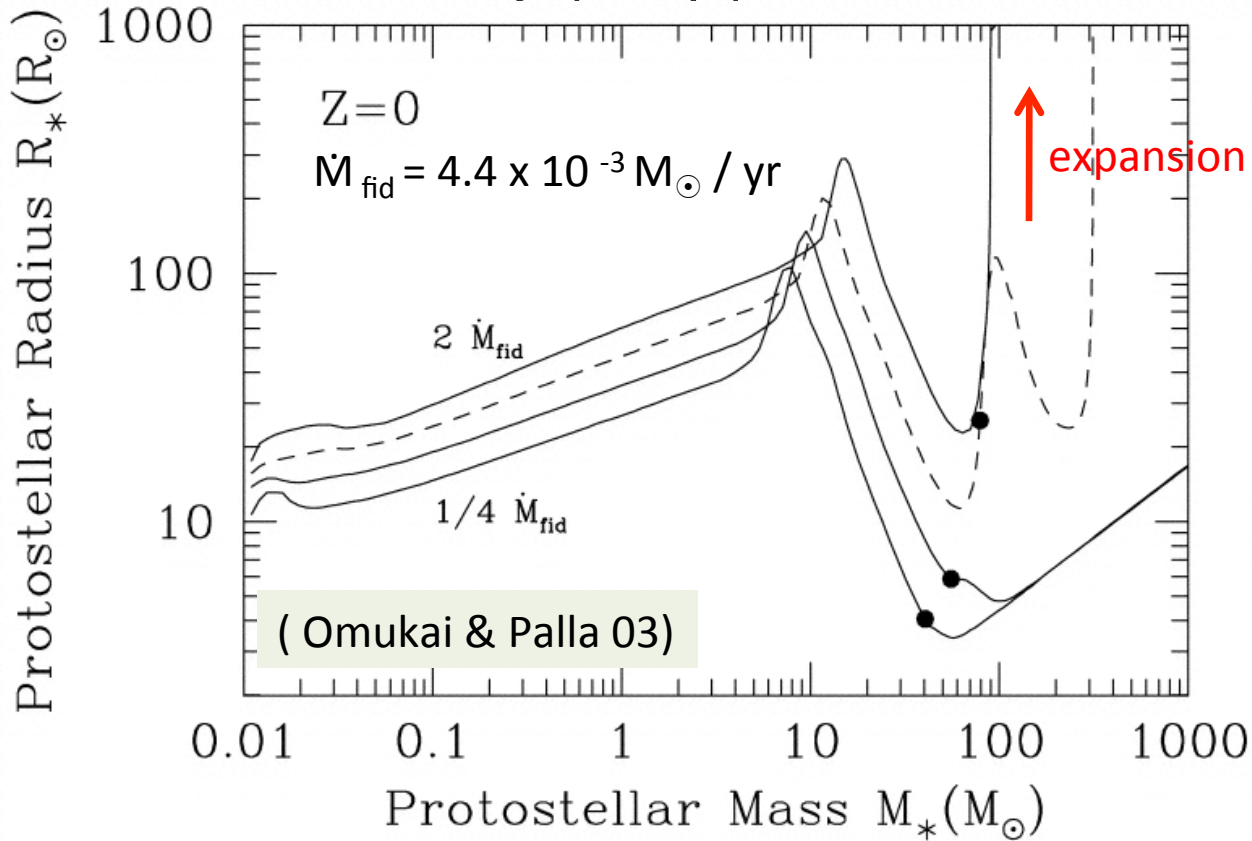
# Mass Spectrum



100 $M_\odot$ 以下に相当数あるが、100 $M_\odot$ 超のものもある  
100 $M_\odot$ 超に達するのもは降着率が大きく、feedbackが効いていない

# 大降着率での原始星成長

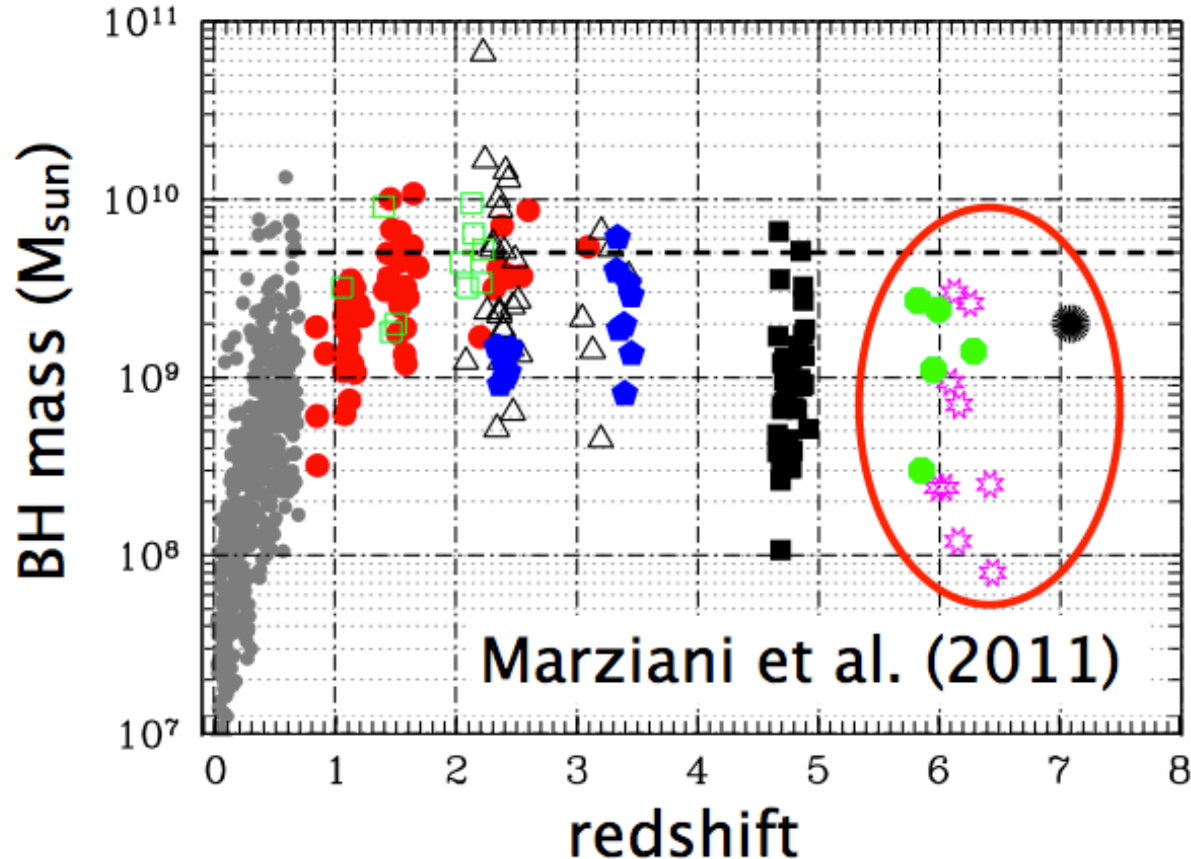
原始星半径の進化



- ▶  $4 \times 10^{-3} M_\odot / \text{yr}$ 超の降着率では原始星がZAMSに達する前に急激な膨張が起きる ( $L_* + L_{\text{acc}} \sim L_{\text{edd}}$ のため)
- ▶ ZAMSに近づけない=feedbackがきかない

# どこまで重い星ができるか

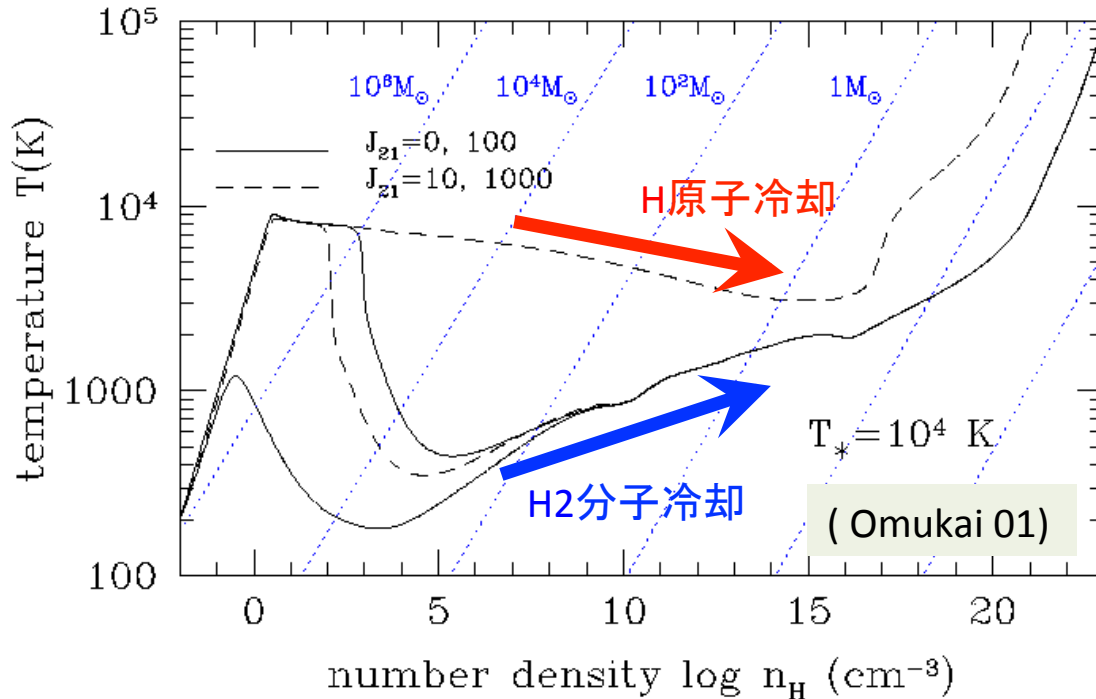
$z > 6$  に多数の明るいクエーサー SMBH質量 $10^9 M_{\odot}$ 超



- Eddington降着率がずっと維持されたとしても時間的にぎりぎり
- 種BHの質量？ 星質量が大きいほど大質量seed BH

# 超大質量星( $\sim 10^5 M_{\odot}$ )形成

## PopIII星形成の特殊なcase



① 強いFUV光にさらされたhalo (H<sub>2</sub>分子破壊)



② H原子冷却によるcollapse (T $\sim$ 8000Kでの等温収縮)



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

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

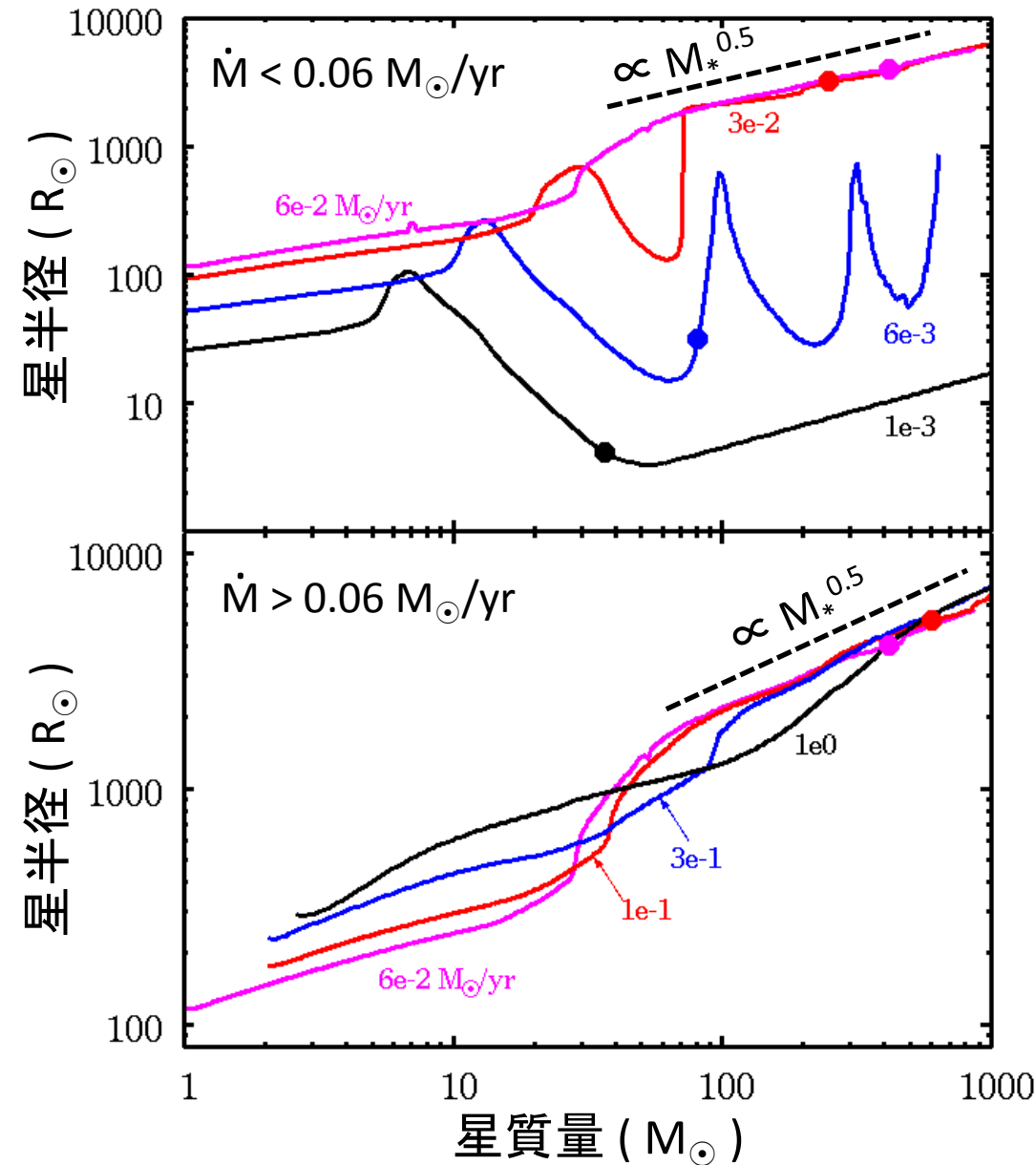


④ GR不安定による超大質量星の崩壊 $\rightarrow$ 10<sup>5</sup>M $_{\odot}$  BH

このようなさらに大きな降着率のもとでの原始星進化はどのようなになるか



# Supergiant Protostar



Hosokawa et al. (2012), *ApJ*

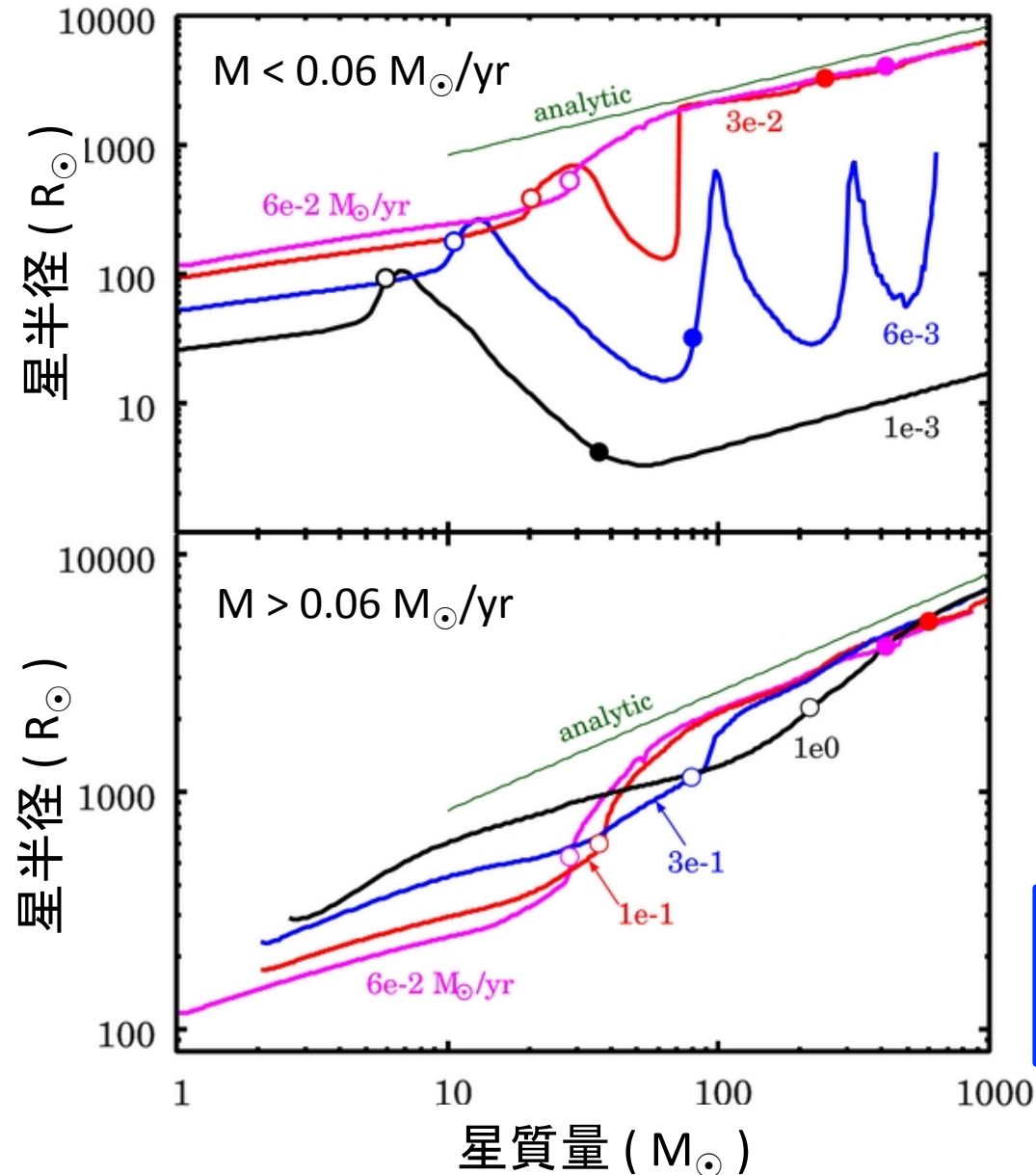
0.01  $M_{\odot}/\text{yr}$ 以上の降着率で  
原始星が膨張を続ける新たな  
進化経路

$M_* \propto R_*^{0.5}$  で膨張。一旦この関係  
に乗ると降着率によらない

1000  $M_{\odot}$  のとき半径  
 $R_* = 30 \underline{\text{AU}}$

“supergiant protostar”  
(稲吉くんポスター)

# Unique $M_*$ - $R_*$ relation



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

+

星の光度  $L_*$  ほぼ Eddington 光度

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

+

H opacity の強い温度依存性により  
星の有効温度:  $T_{\text{eff}} \sim 5000\text{K}$  (一定)

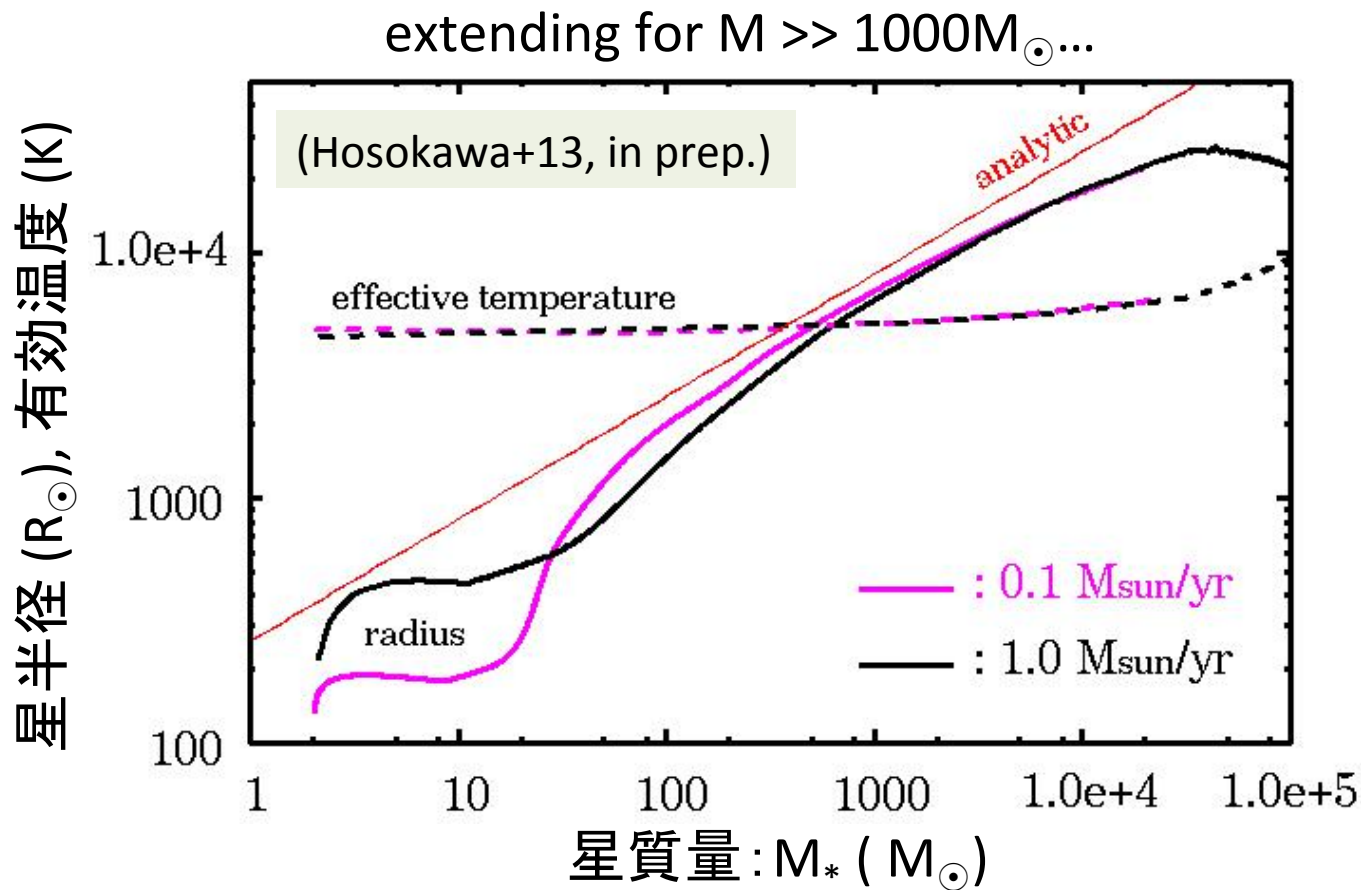
(ref. 林トラック)



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

数値計算結果とよく一致する

# Forming $10^5 M_{\odot}$ star



- supergiantのまま $10^5 M_{\odot}$ まで成長
- この間、有効温度数千度のまま  
→ UV 光度小でfeedbackが効かず超大質量星が形成

# Summary

## PopIII星は何太陽質量か

### ❖ 初代星

- UV feedbackにより数十 $M_{\odot}$ の星が相当数できる → core collapse SN
- 100 $M_{\odot}$ 超の星ができるpath:  $10^{-2}M_{\odot}/\text{yr}$ 超の大降着率が維持された場合

### ❖ H<sub>2</sub>分子が壊される特殊な場合: 0.1 $M_{\odot}/\text{yr}$ 超の超大降着率

“supergiant protostar”期を経て超大質量星( $10^5M_{\odot}$ )形成  
→ 直接崩壊によりmassive seed of SMBH