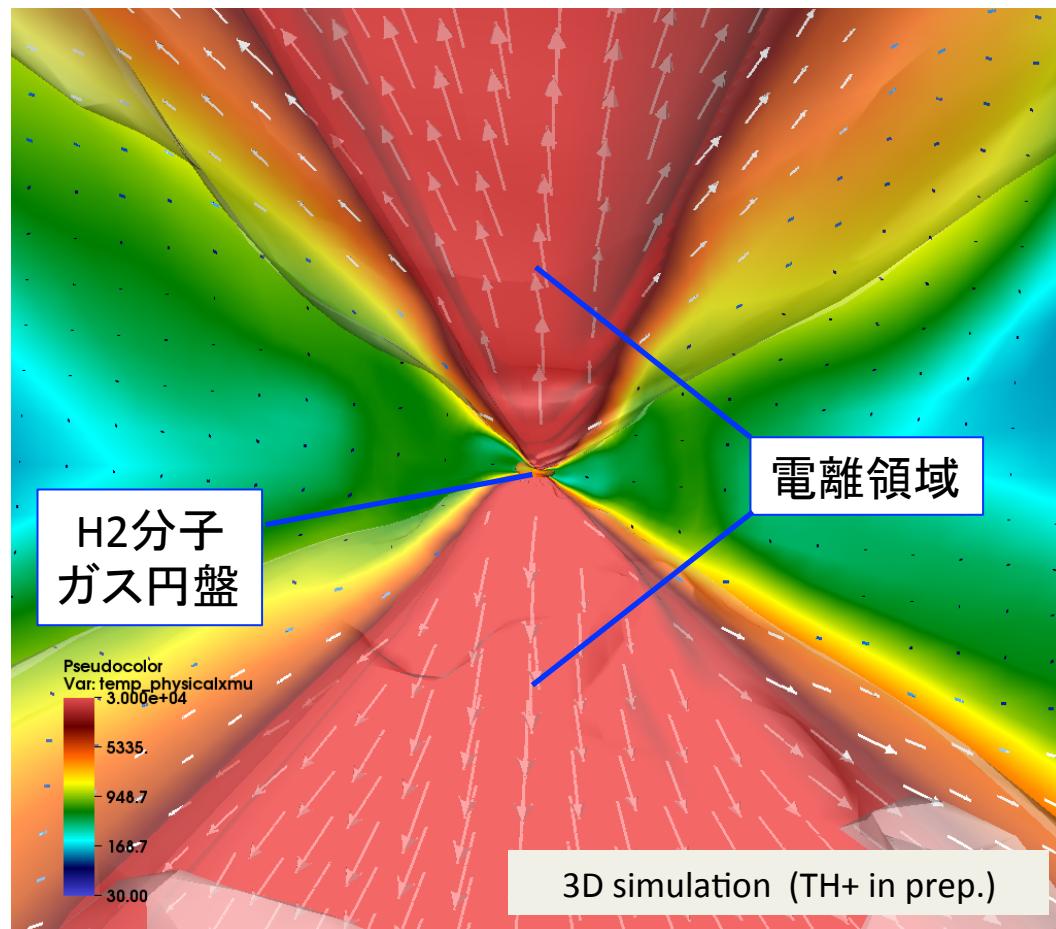


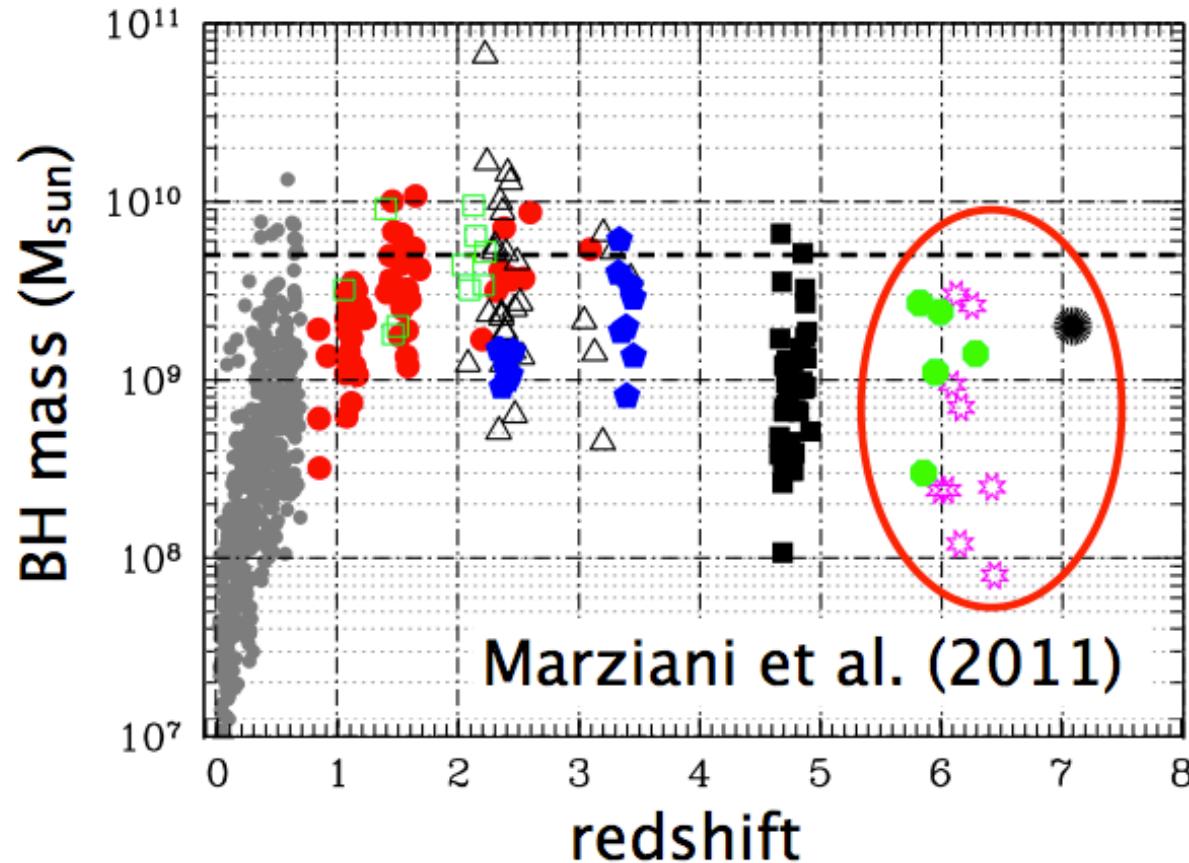
初期宇宙での大質量星形成と 巨大ブラックホールの起源



細川 隆史
(東京大)

SMBHs at Very High Redshifts

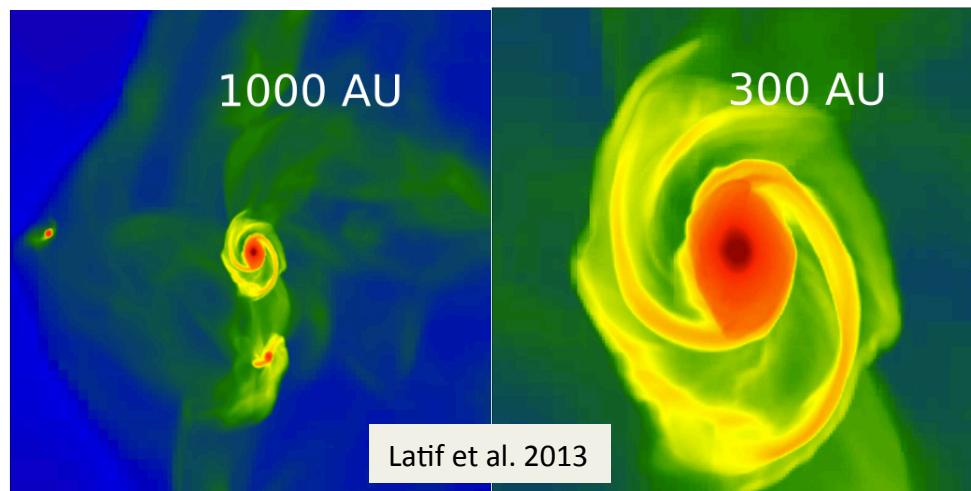
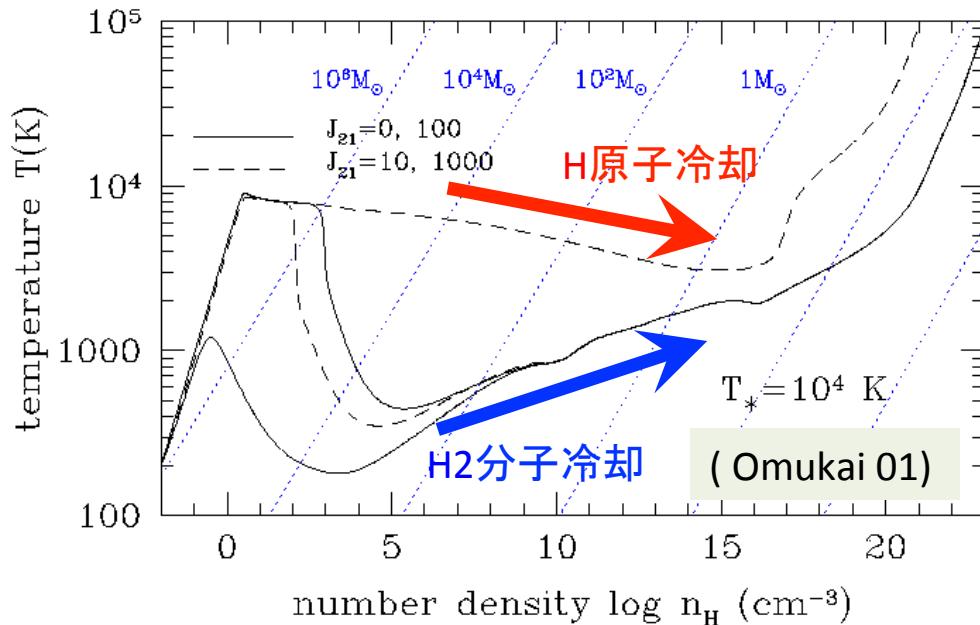
bright QSOs at $z > 6$ with SMBH of $> 10^9 M_{\odot}$



Age of the universe@ $z \sim 7$: 0.77Gyr. これまでに作る必要がある
非常に重い星が残す種BHから出発する方が都合がよい

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
(H₂分子破壊)



② H原子冷却によるcollapse
($T \sim 8000 \text{ K}$ 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

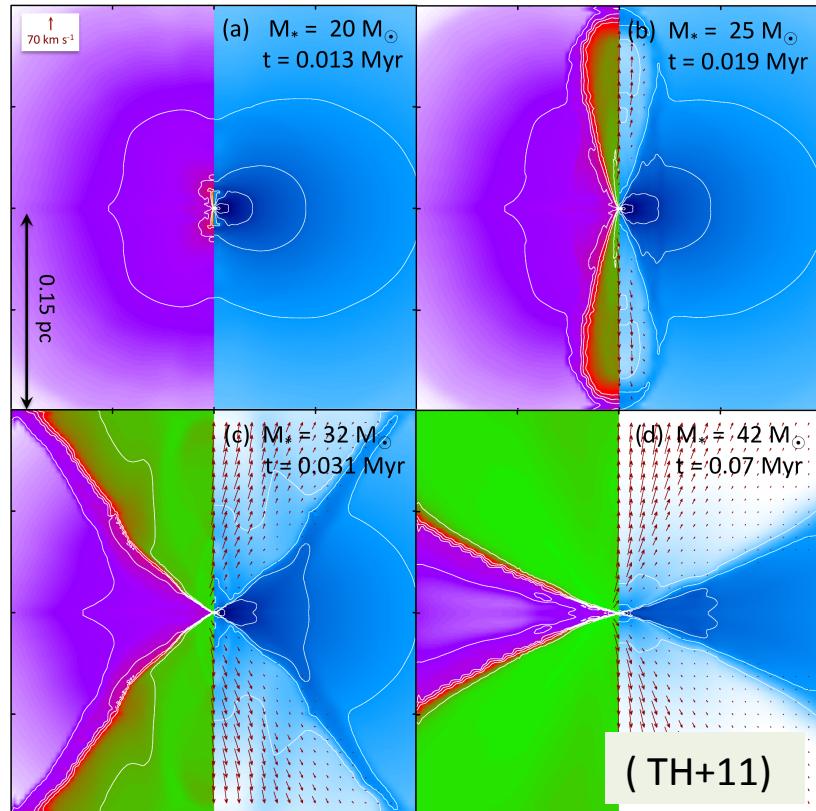
$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \propto T^{1.5}$$



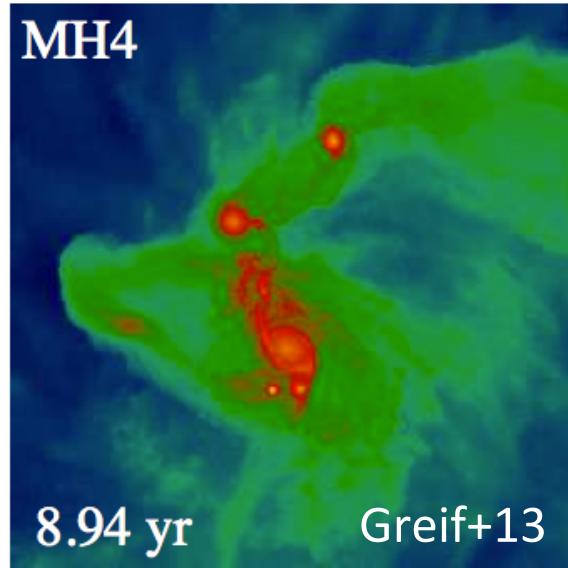
④ GR不安定による超大質量星
の崩壊 $\rightarrow 10^5 M_{\odot}$ BH

始原星の最大質量はいくらか

- ❖ ふつうの初代星は典型質量～数十 M_{\odot} が最近有力視
UV feedback (e.g., TH+2011; Susa+14), 円盤分裂 (e.g., Stacy+11; Greif+13)

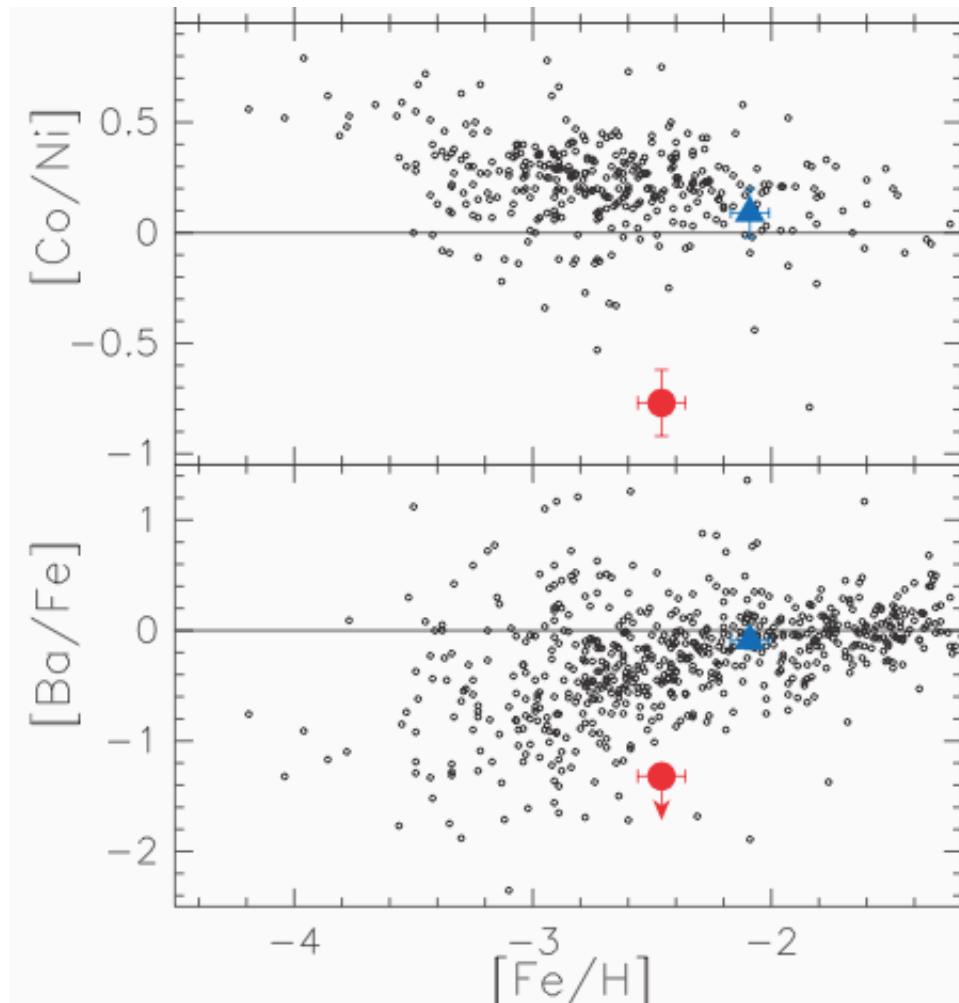


- ❖ 特殊なケースでは超大質量星 ($>10^5 M_{\odot}$) 形成？ (Direct Collapse説)
→ 鄭くん、櫻井くん話



DC説でも同様に星質量が下げられないのだろうか？

大質量初代星の観測的兆候



Aoki+14, Science

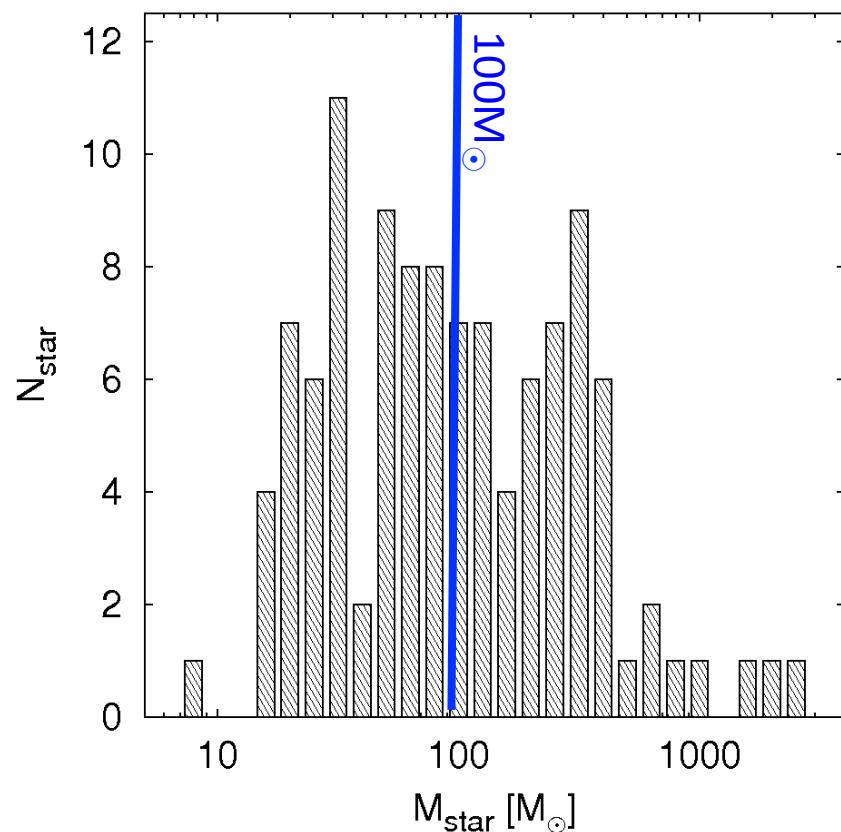
low-mass metal-poor star
SDSS J1820.5-093939.2

- +これまでの金属欠乏星組成と明らかに異なる
- + CCSNよりPISN、或はさらに大質量のprogenitorの方が組成を説明できる

ふつうの初代星で本当に
 $\sim 10^3 M_\odot$ の星はできないの
だろうか？

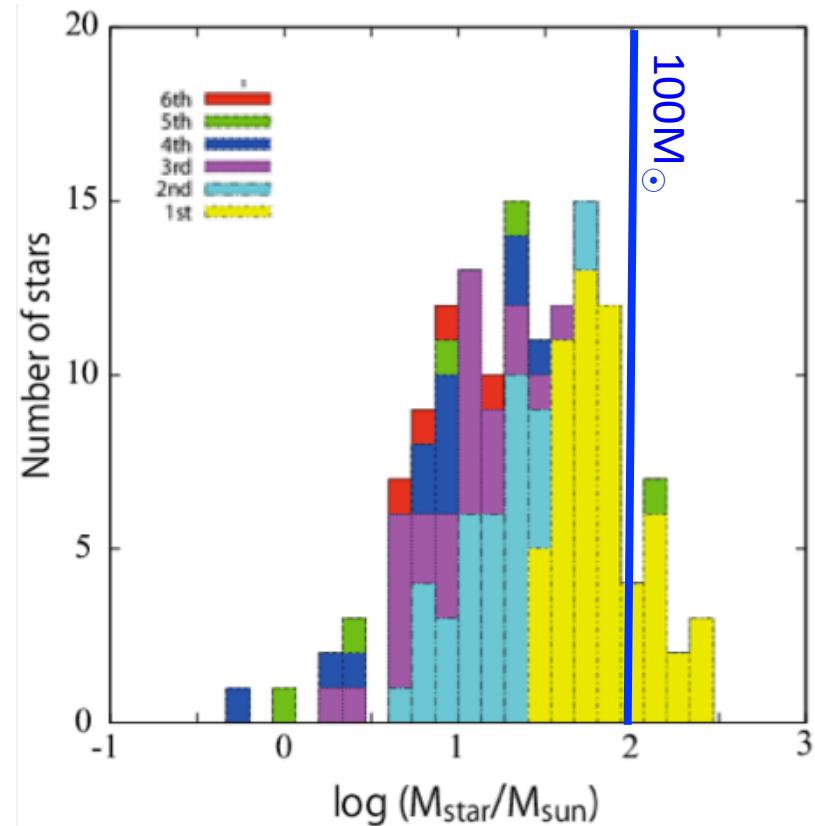
初代星のMass Spectrum

宇宙論的シミュレーションから星形成ガス雲を多数選び、
UV feedbackで星質量が決まるまでの長期進化を計算



Hirano, TH+14

- with ~ 110 gas clouds
- 2D RHD (電離+解離光feedback)



Susa+14

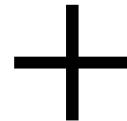
- with ~ 60 gas clouds
- 3D RHD (解離光feedback)

Updating to 3D Simulations

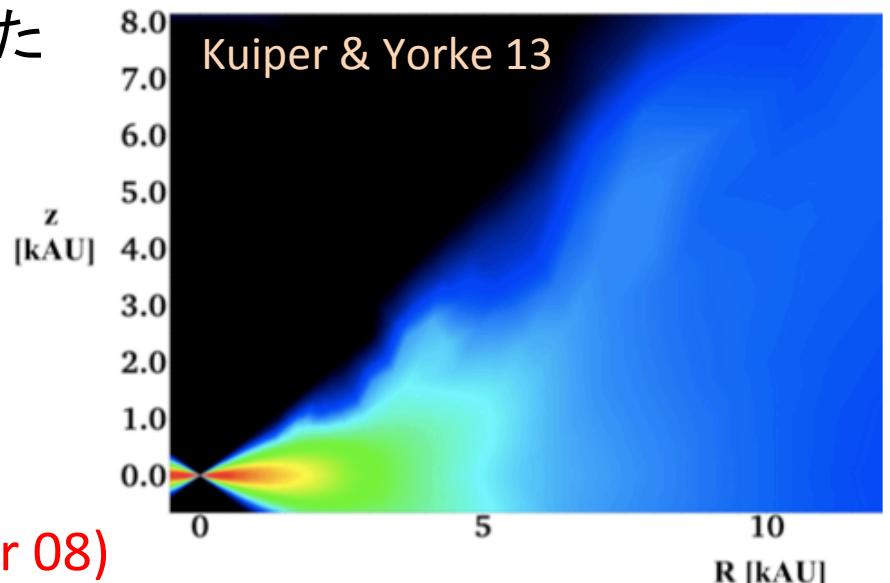
多次元MHD code: PLUTO ベース(e.g., Mignone et al. 07)

銀河系の大質量星形成用に開発された
改良版 (R.Kuiper+10 etc.)

(+ self-gravity & FLD solvers)

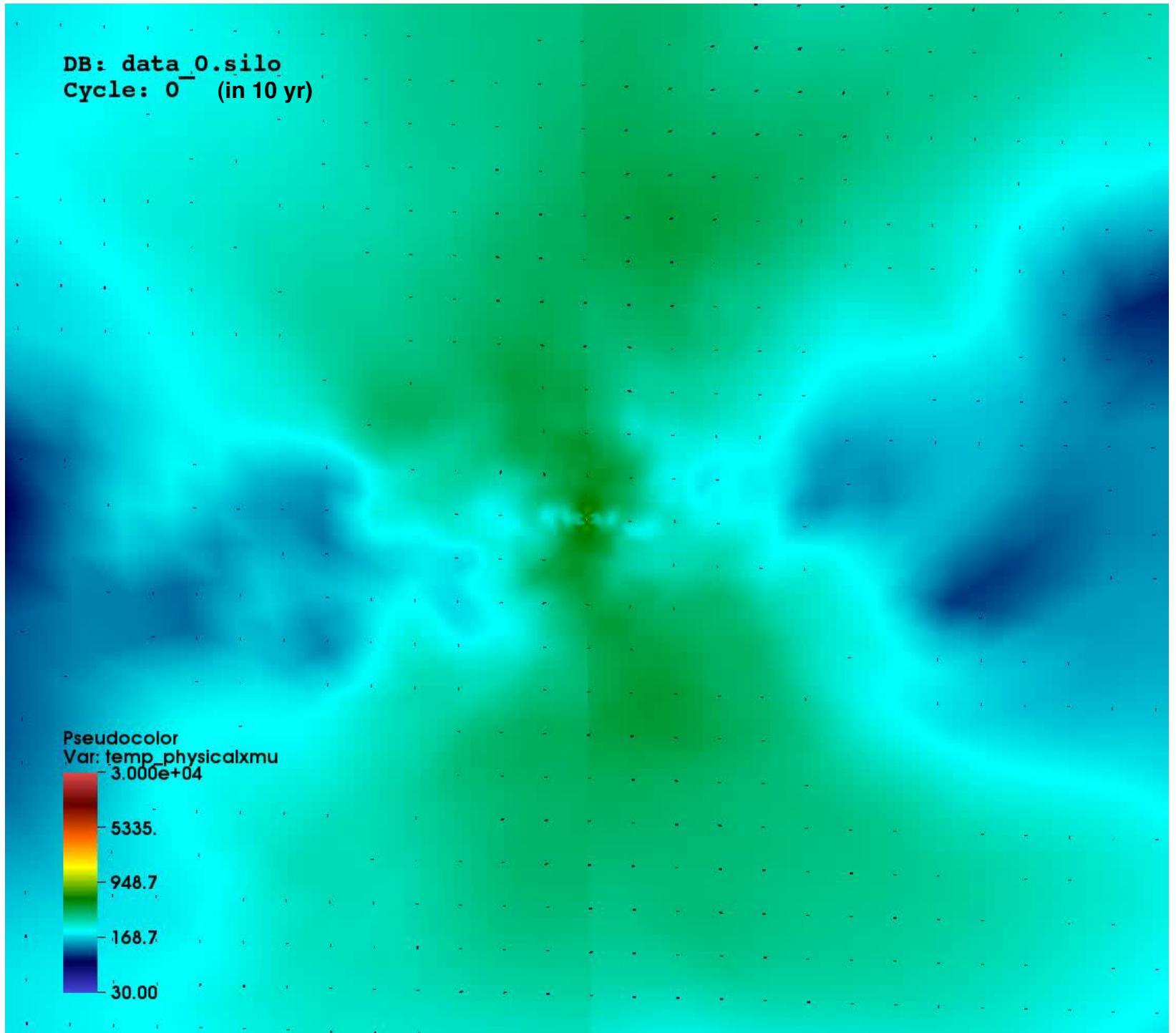


- EUV(電離)/FUV(解離)輻射輸送
- 始原ガス($Z=0$)Chemistry
- 星の進化計算 (Yorke & Bodenheimer 08)
- Cosmological initial condition (Hirano+14)

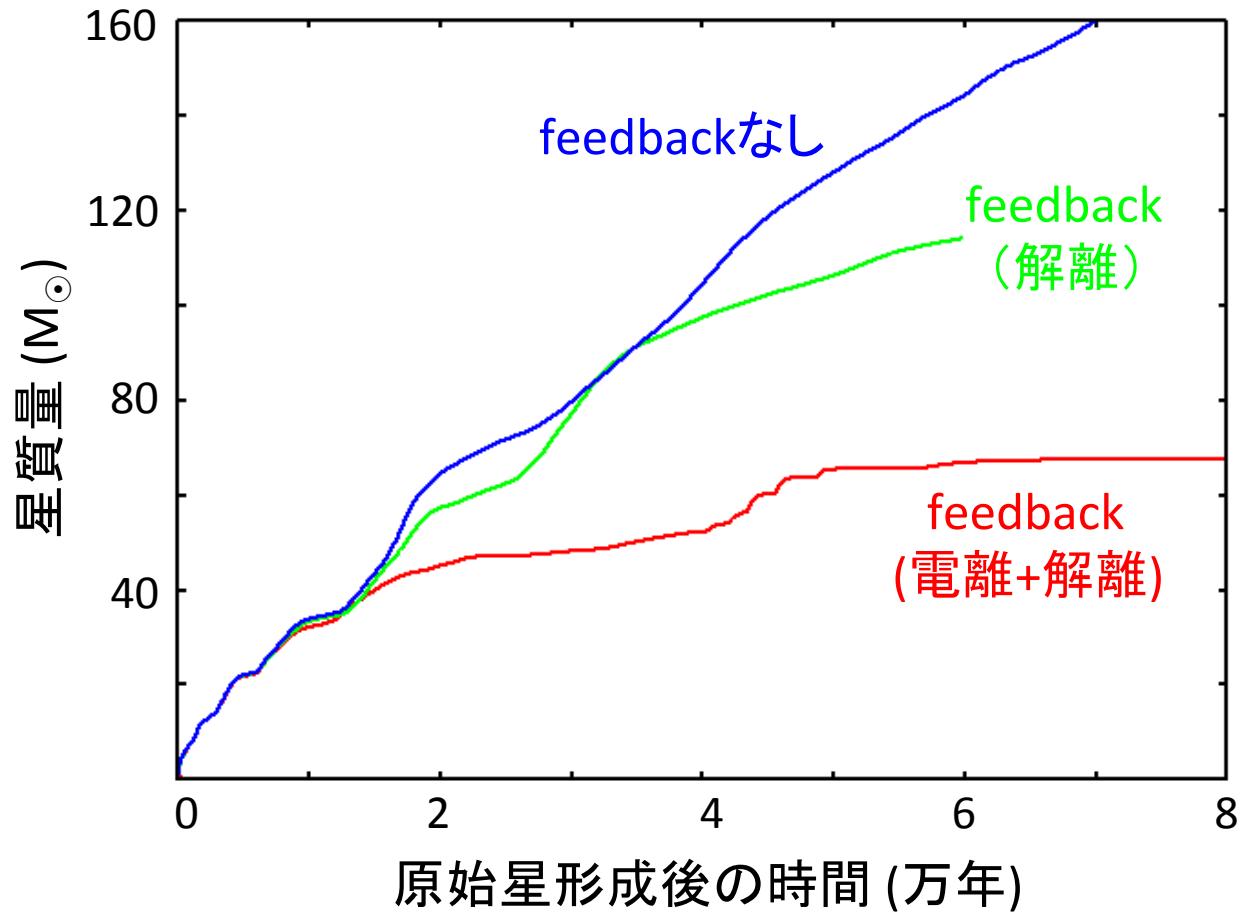


電離+解離feedbackを長時間($\sim 10^5$ 年)追跡する3D計算をめざす

(今日はふつうの初代星形成のみ)

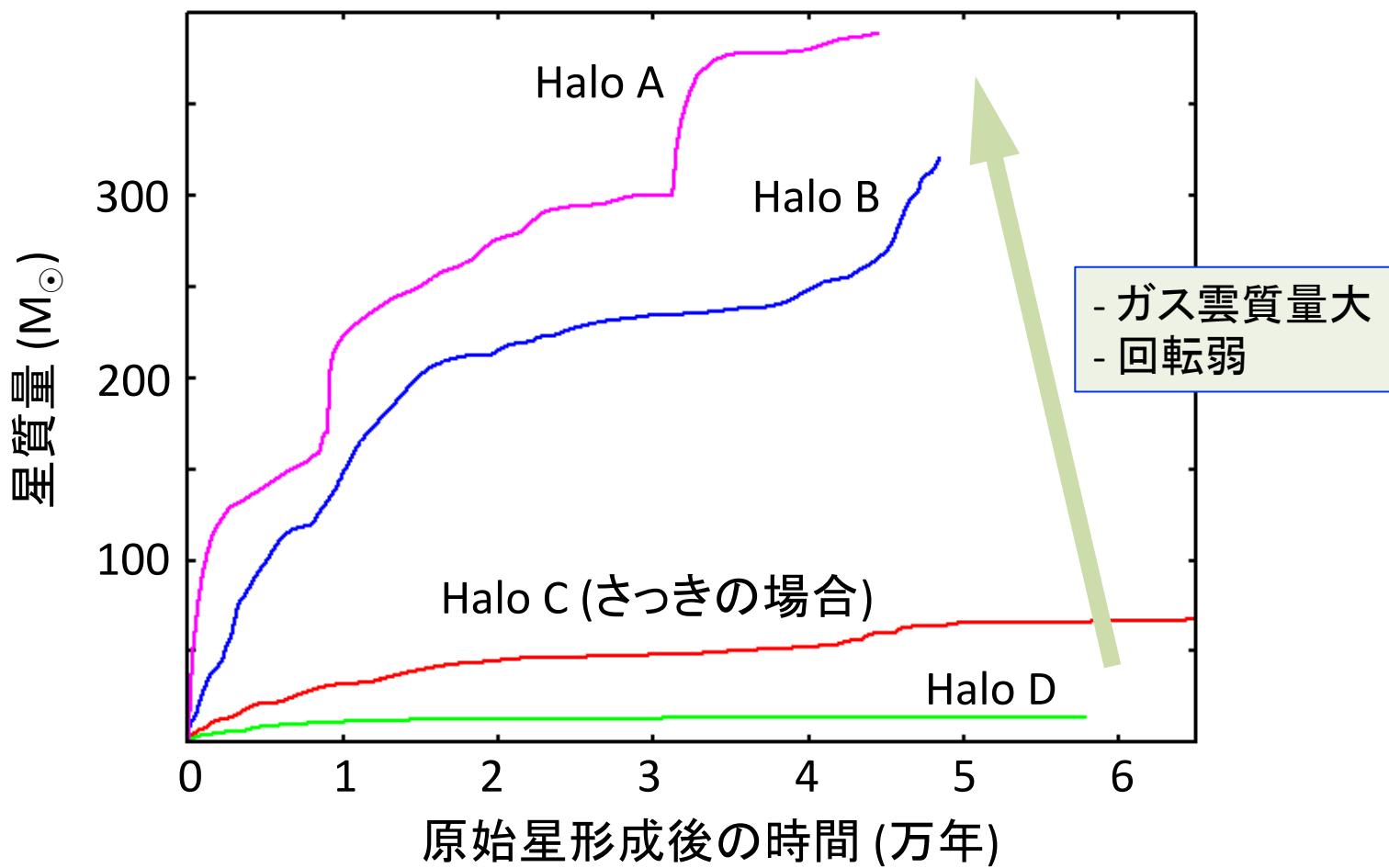


Stellar Mass Growth

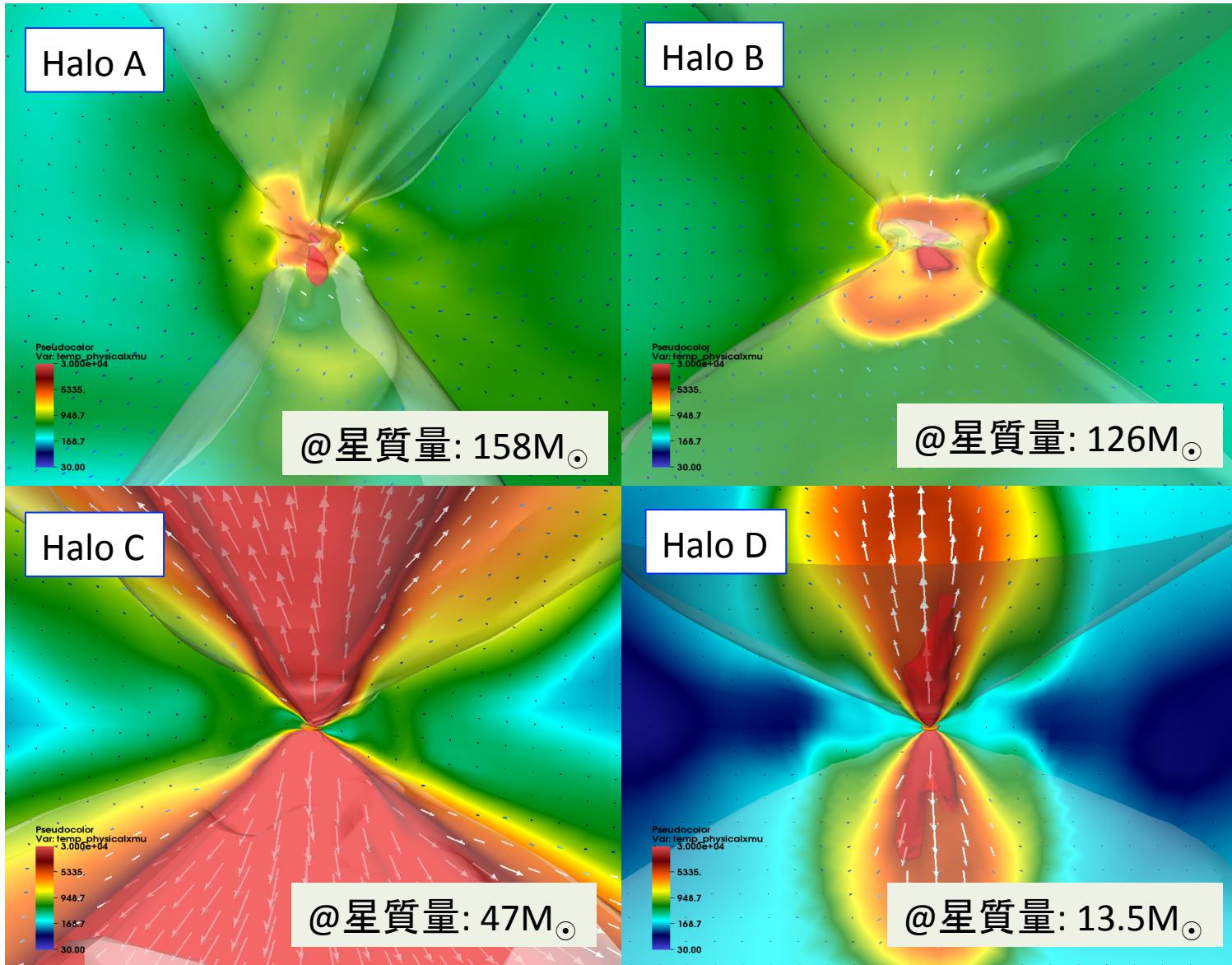


- + UV feedback (電離領域膨張 + 円盤光蒸発)により3Dでも原始星へのガス降着が抑制される
- + 電離+解離feedbackでは解離のみfeedbackのときより低質量になる

星質量の多様性

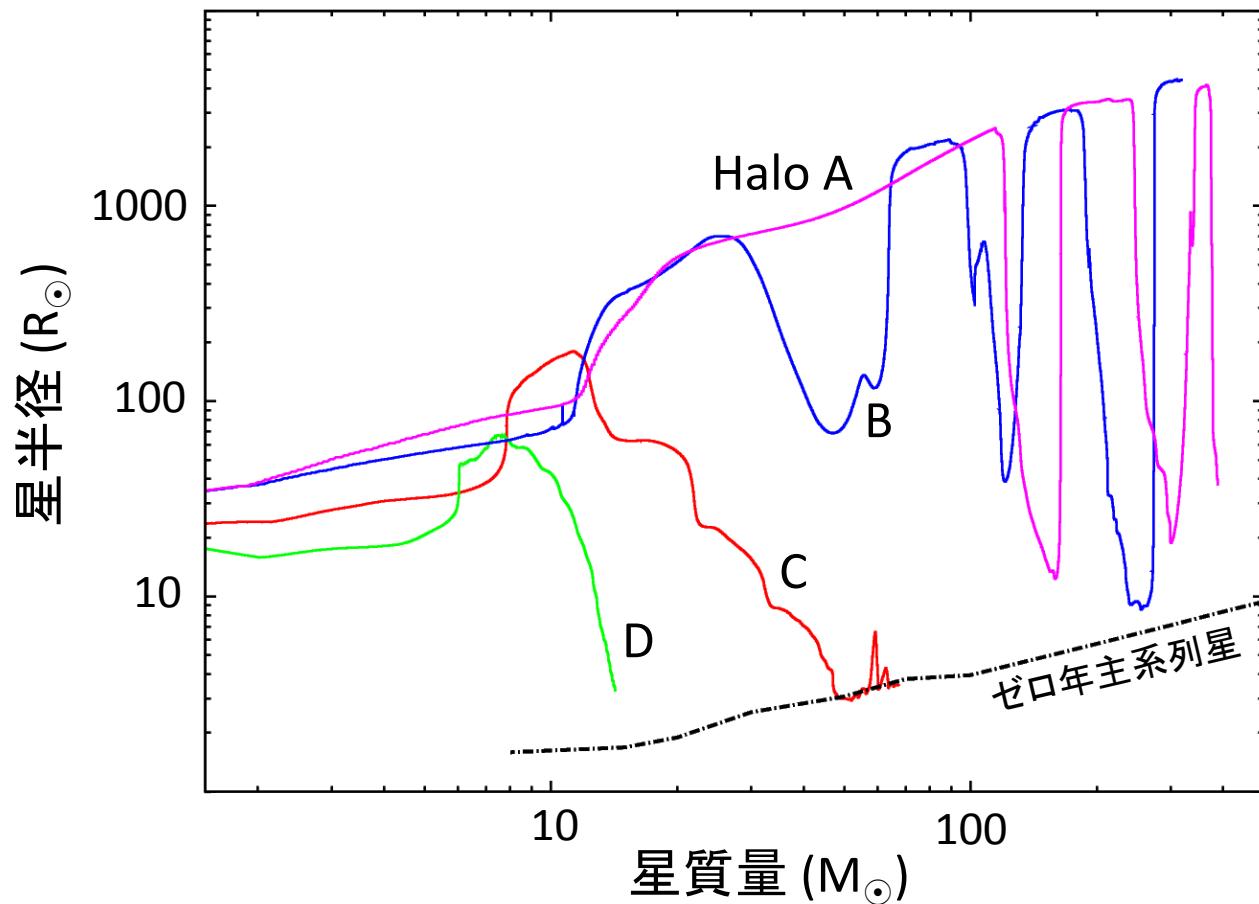


- + 母体ガス雲の個性により、星質量は数十～数百 M_{\odot} の広がりを持つ
(e.g., Hirano+2014; Susa+ 2014)
- + 3Dで電離feedbackありでも $300M_{\odot}$ 超(>PISN)の大質量星



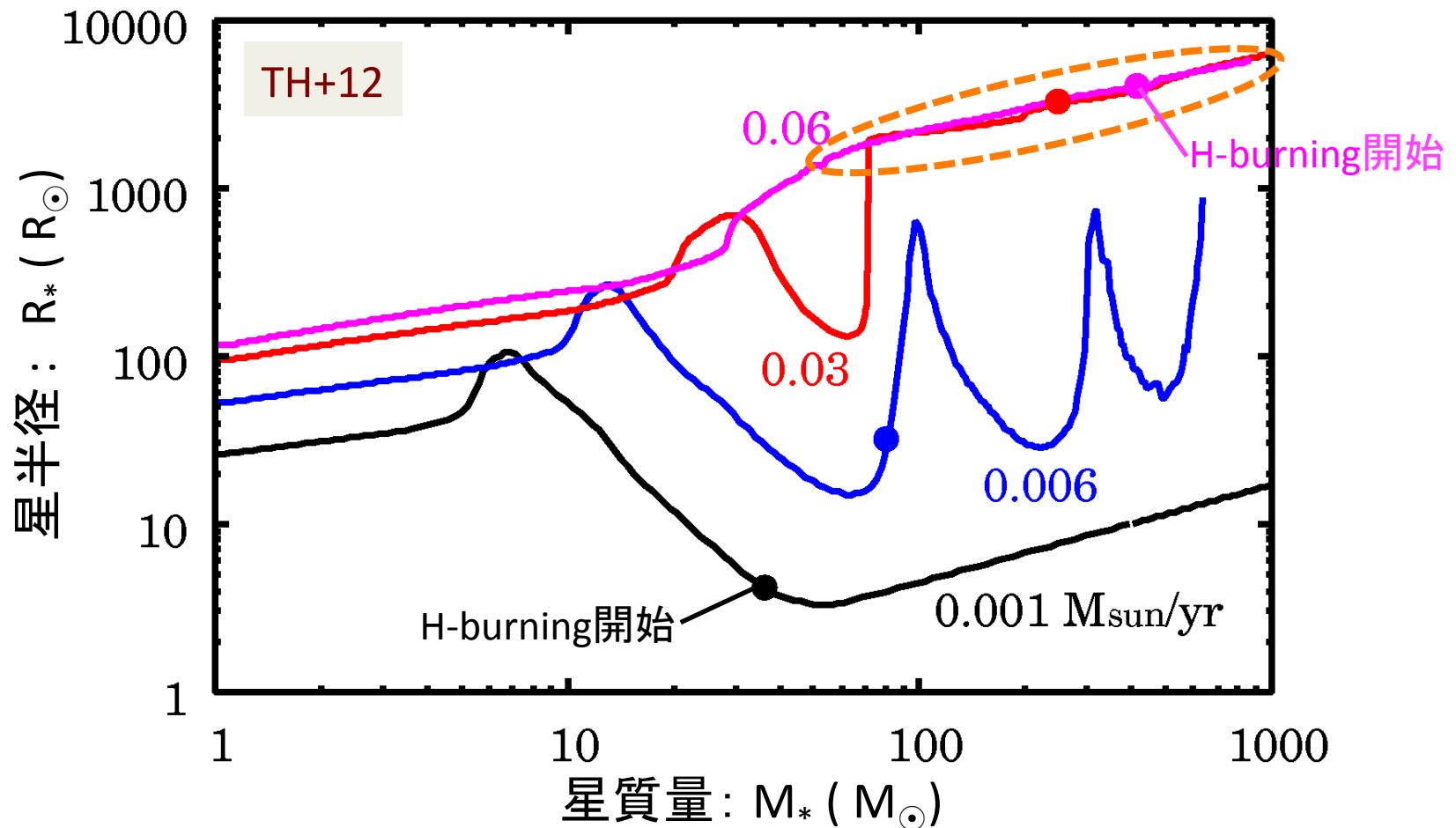
Halo A,Bの場合は、 $100M_{\odot}$ 超でもまだ電離領域が成長していない
(星質量が大きくなつて初めてfeedbackが効く)

原始星進化



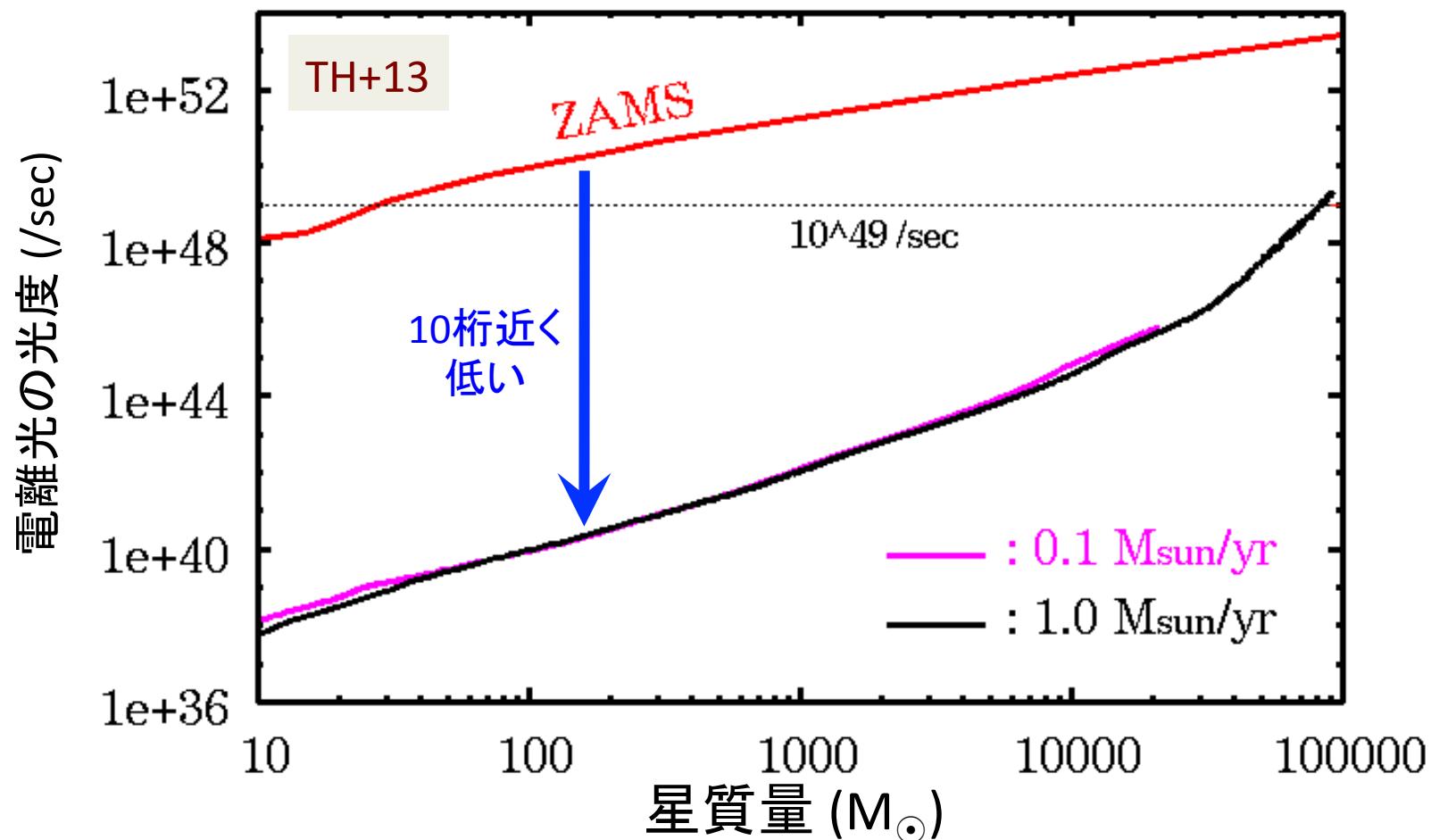
- + 星質量の大きいHalo A,Bは原始星が大きく膨張している
 $10^{-2} M_\odot/\text{yr}$ 以上の大降着率⇒原始星巨星化⇒UV光度小 (TH et al. 12, 13)
- ※ BH種をつくるDirect Collapse説では $>0.1 M_\odot/\text{yr}$ の降着率が期待

“Supergiant Protostar”



- $0.01 M_\odot/\text{yr}$ 超のとき膨張をつづける進化pathがある
- 収縮してZAMSに到達しない
- 降着率に依存せず、 $R_* \propto M_*^{1/2}$ で膨張

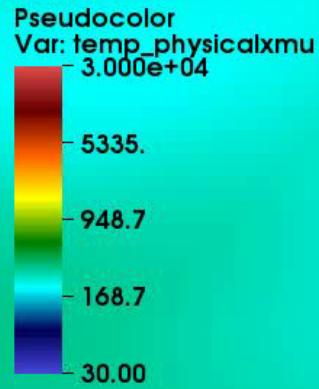
Weak UV Feedback



- 大半径 → 低有効温度 ($\sim < 10^4 K$) → 低UV光度
- UV feedbackが弱いので、星がsupermassiveになるまでガス降着が止められることはないであろう

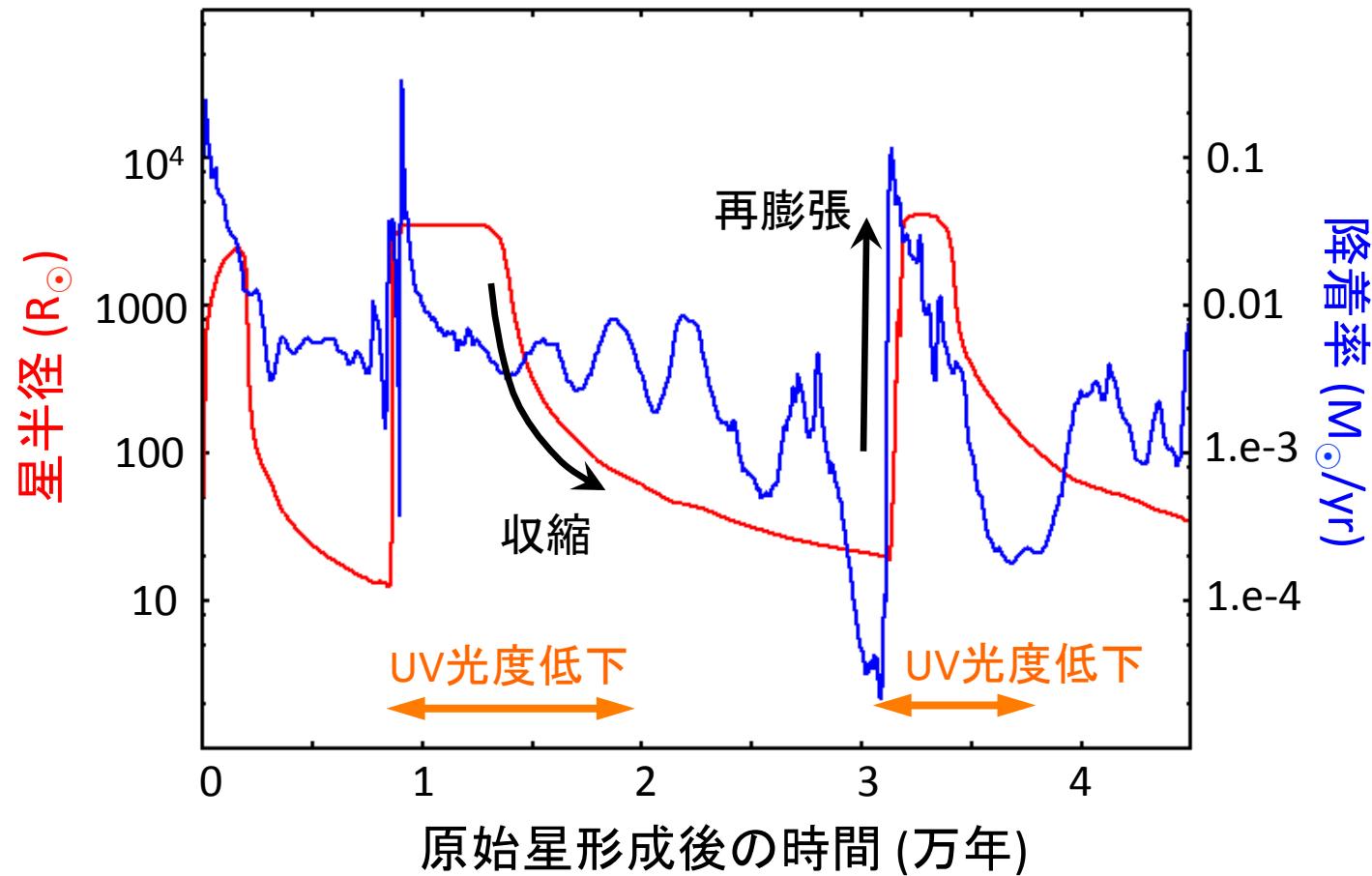
DB: data_0.silo
Cycle: 0⁻ (in 10 yr)

Halo A (星質量最大の場合)



~4pc

降着burstと原始星膨張



バースト降着で一度巨星化
すると、数千年間はそのまま

星半径～10AU



この間UV光度が低下して
feedback弱まる 間欠的UV feedback

星質量を増やす3D効果

まとめ

電離+解離feedback + 長時間($\sim 10^5$ 年)進化の3D計算

今回はふつうの初代星形成の話中心

- + 2D計算と同様に光電離feedbackが効く。星質量: 数十～数百 M_\odot
- + 3D効果: 降着率の時間変動 (episodic accretion)

大降着率で星が巨星化 (半径～10AU) → UV feedback弱体化

feedbackを回避して大質量星をつくるchannel (DC説で期待)
ふつうの初代星形成でも片鱗が見えている