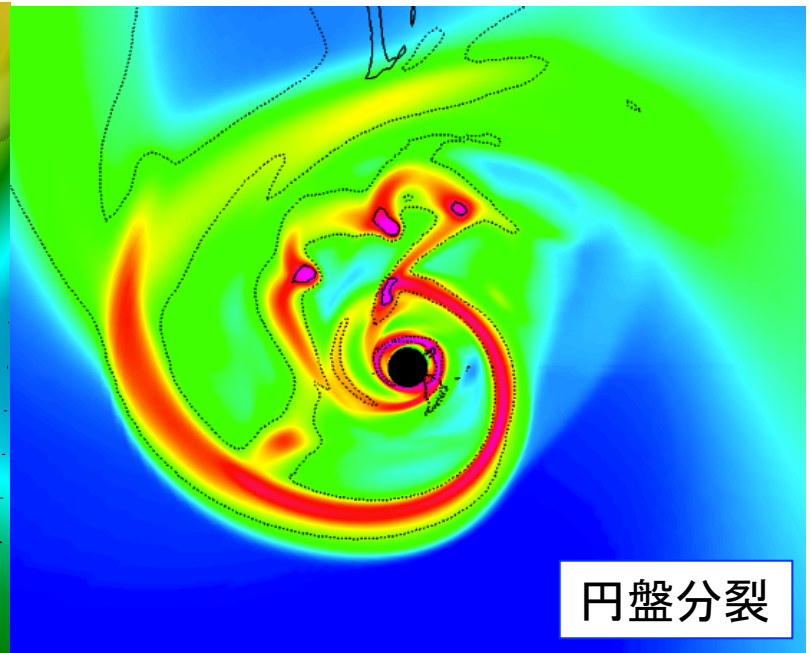
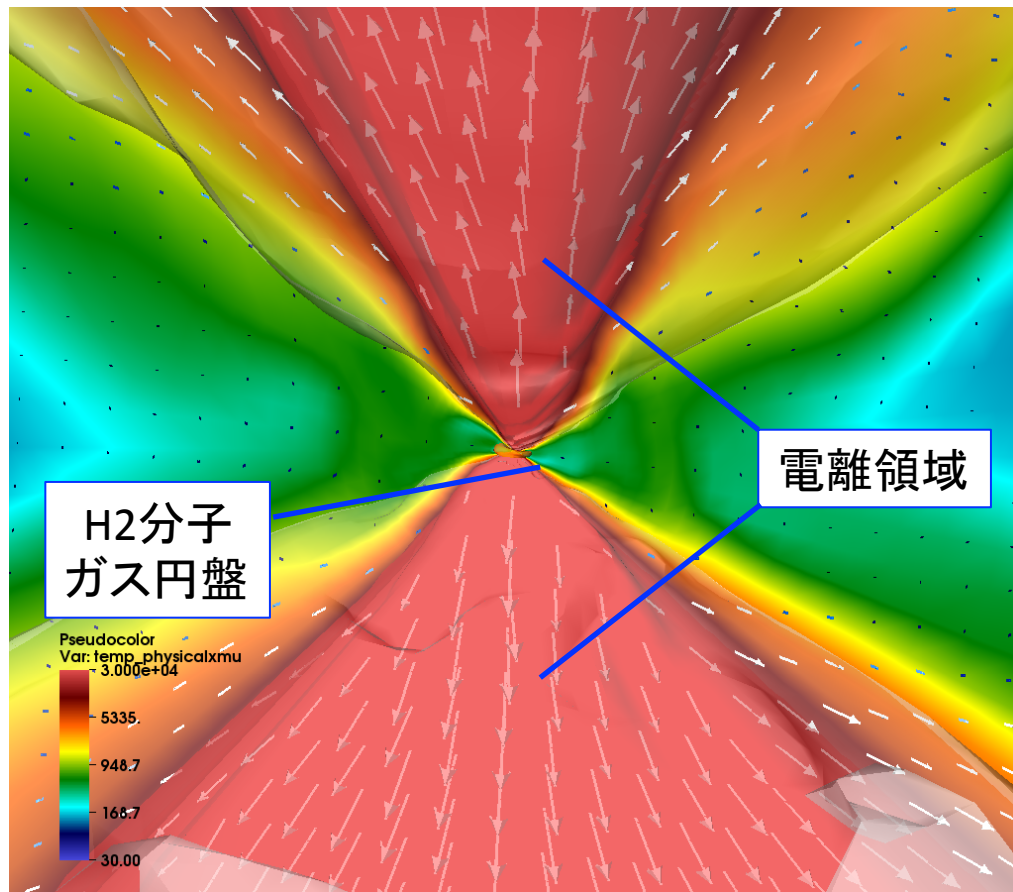


初代星形成におけるバースト的降着と間欠的UV feedback

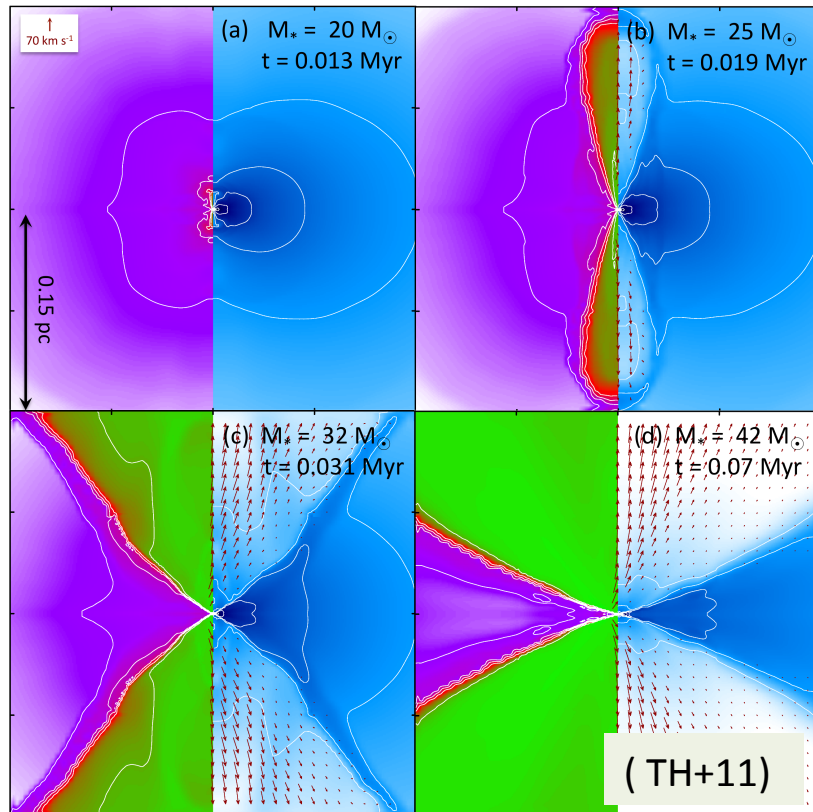


細川 隆史(東大)

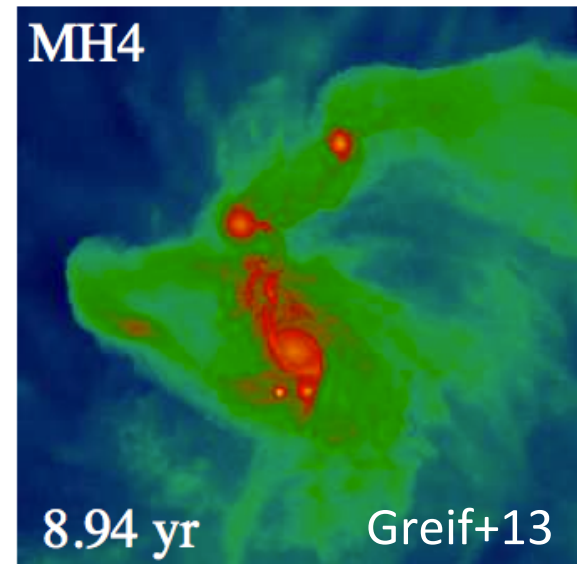
始原星の最大質量はいくらか

◇ 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)



大質量初代星の観測的兆候

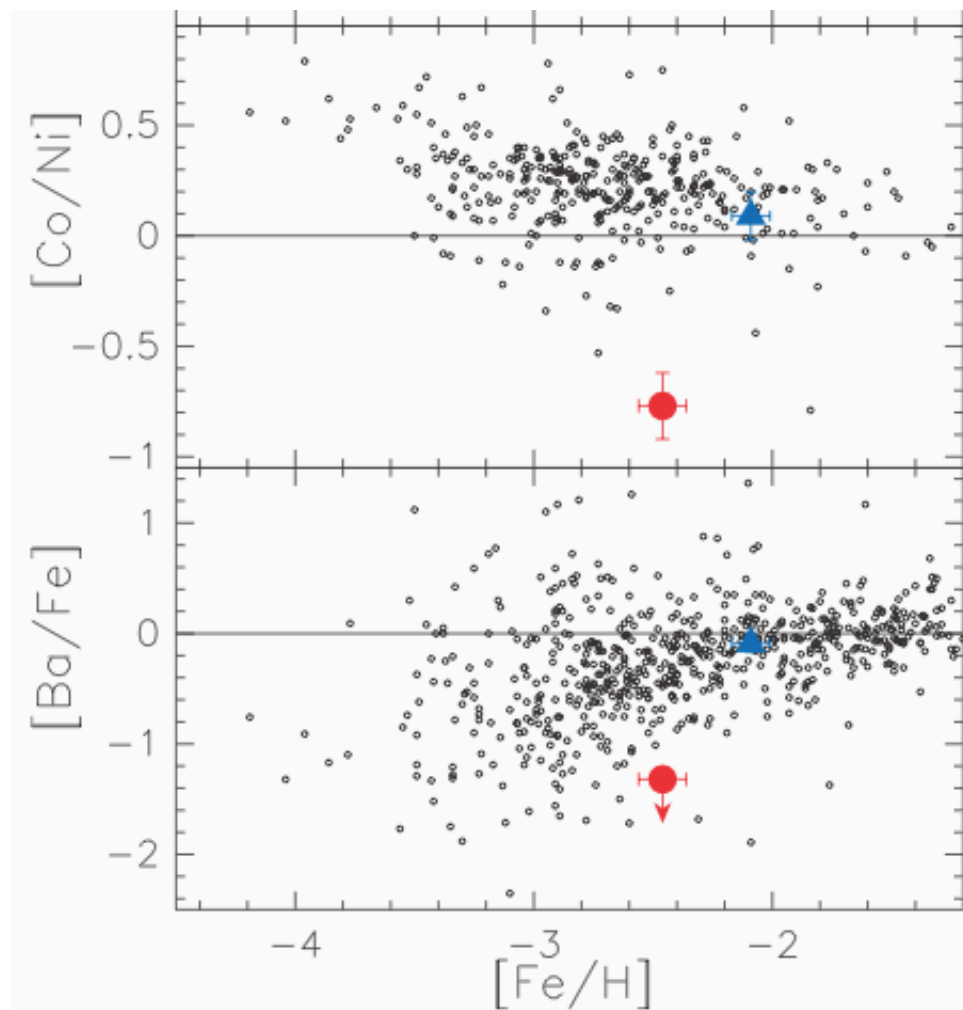
Aoki+14, Science

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

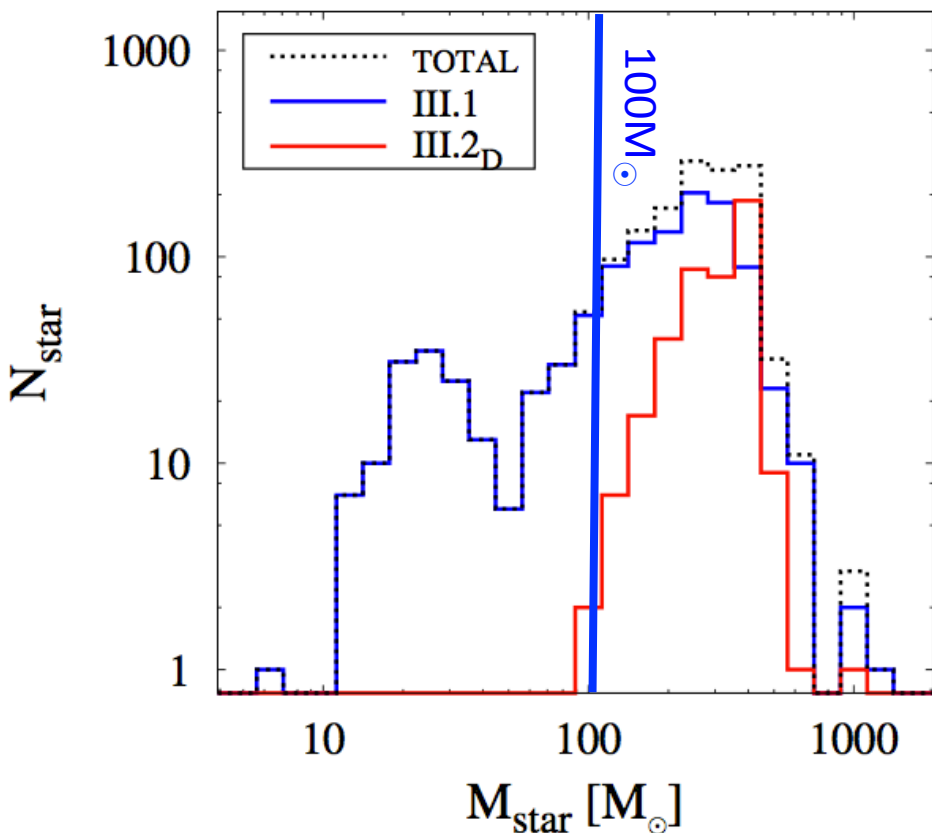
+ CCSNよりPISN、或はさらに
大質量のprogenitorの方が
組成を説明できる

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？

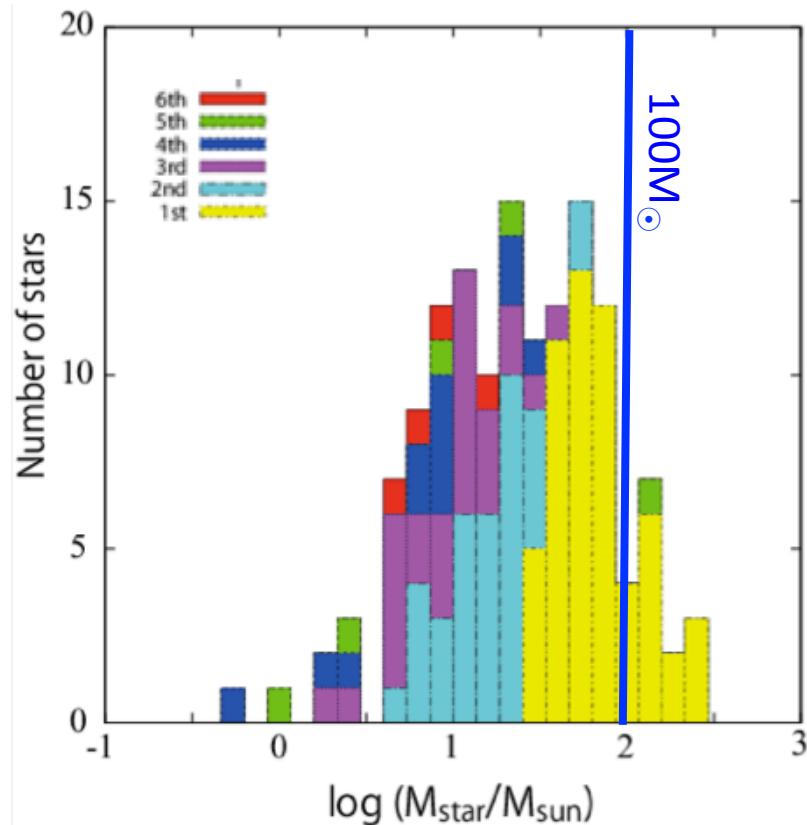


初代星のMass Spectrum

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+15 (also see Hirano+14)
- with ~ 1100 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

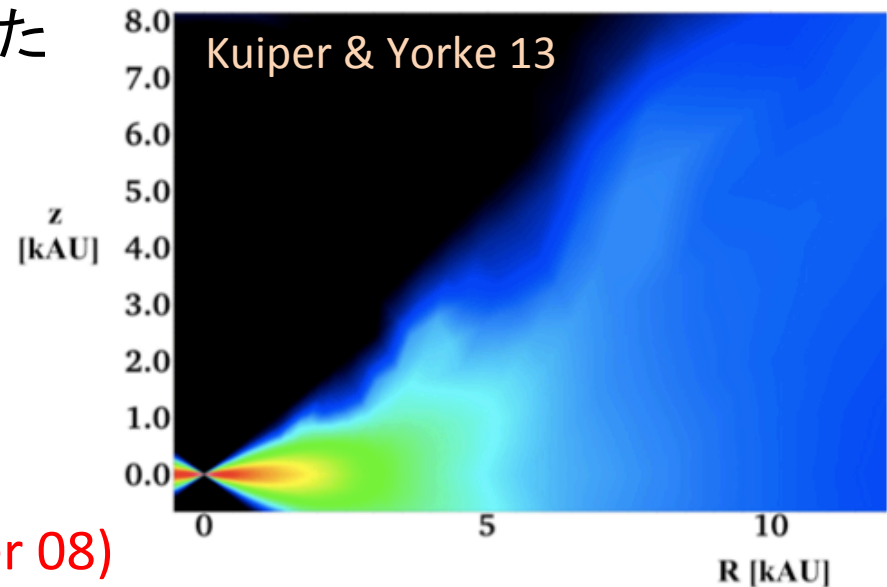
多次元MHD code: PLUTO ベース(e.g., Mignone et al. 07)

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)

+

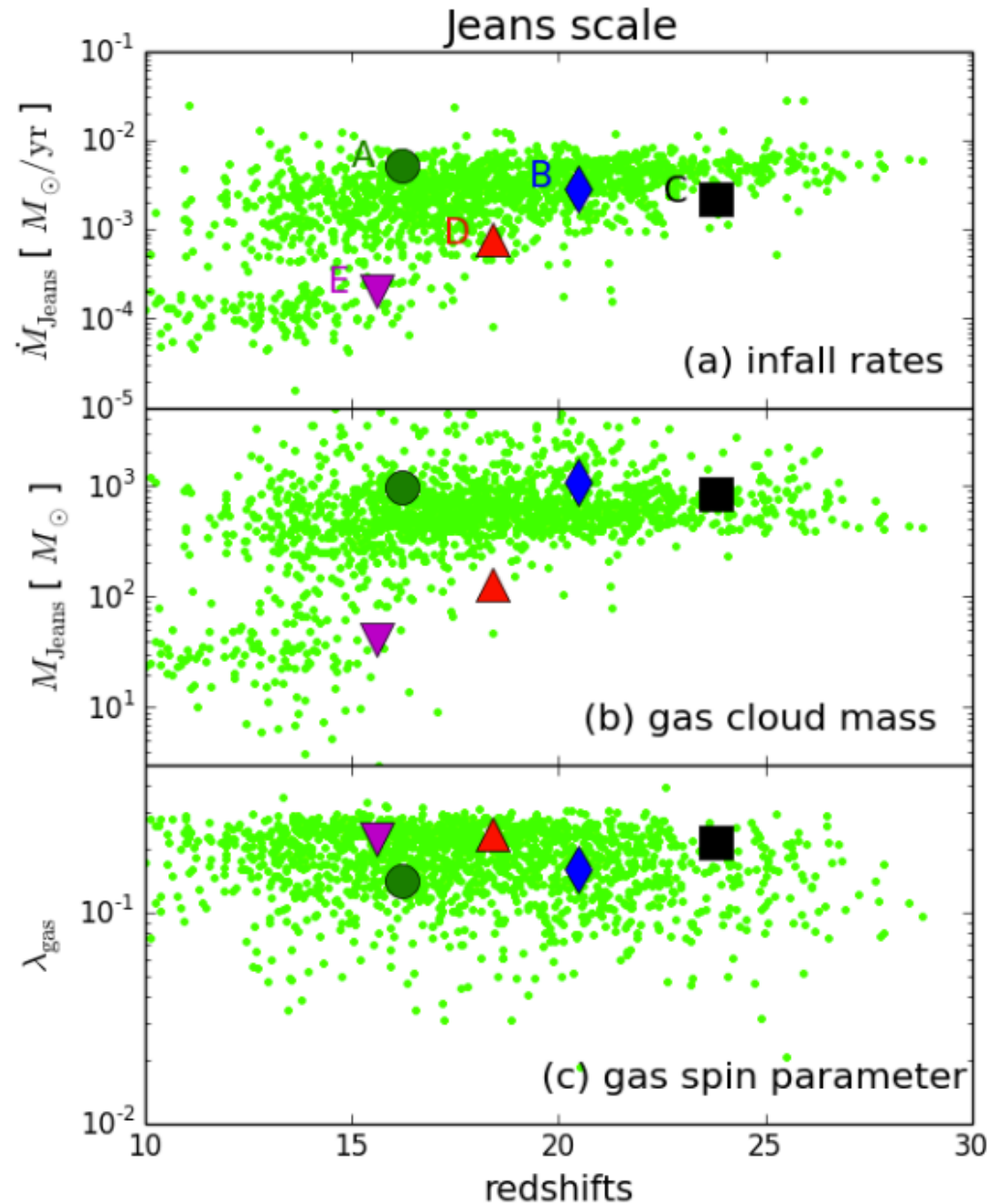
- EUV(電離)/FUV(解離)輻射輸送
- 始原ガス($Z=0$)Chemistry
- 星の進化計算 (Yorke & Bodenheimer 08)
- Cosmological initial condition (Hirano+14)

極座標 + 中心sink(半径30AUで不動)、2Dで用いたalpha粘性なし



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

ガス雲の性質 (初期条件)



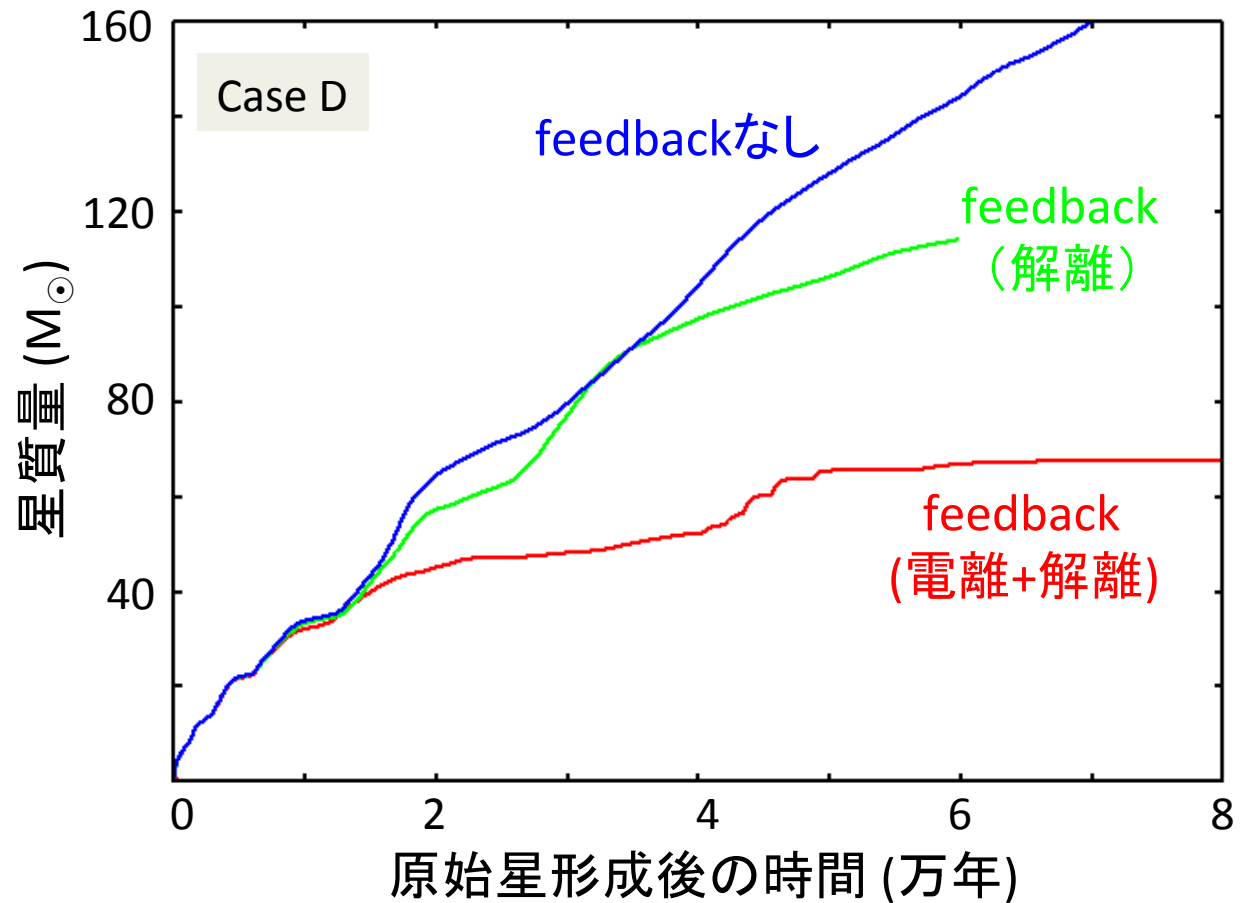
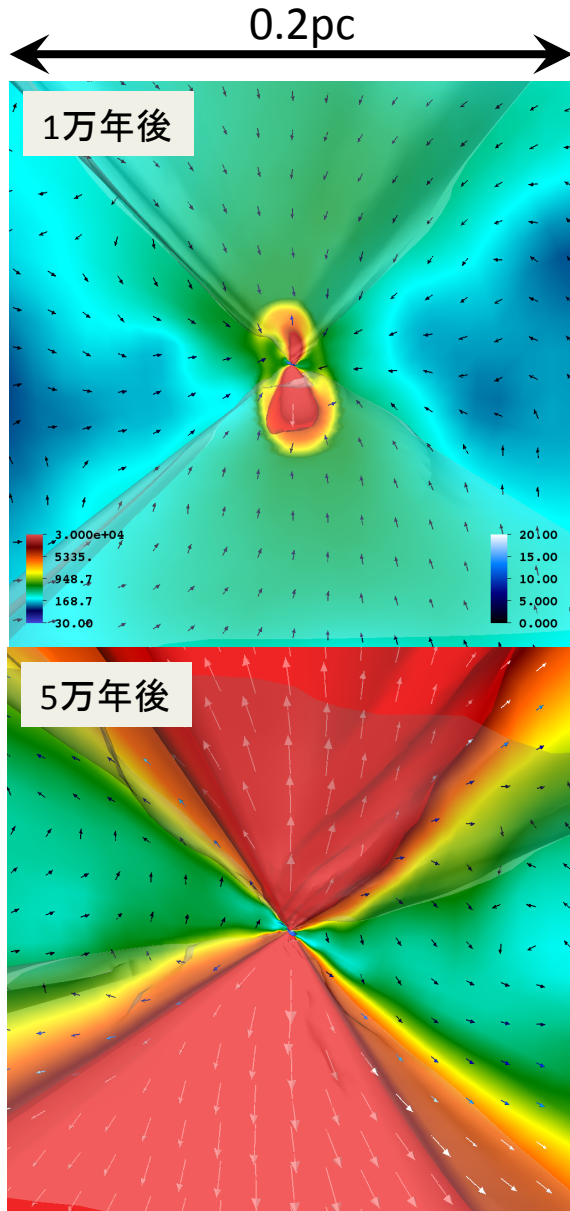
+ Hirano et al.の宇宙論シミュレーション
でえられた始原ガス雲から5例
(中心密度 $10^{13\sim 14}/\text{cc}$ 時点のsnapshots)

+ 2D計算では(expected) infall rateが
大きいほど星質量大

+ case BがHirano+15では最もtypical
とされたものに近い

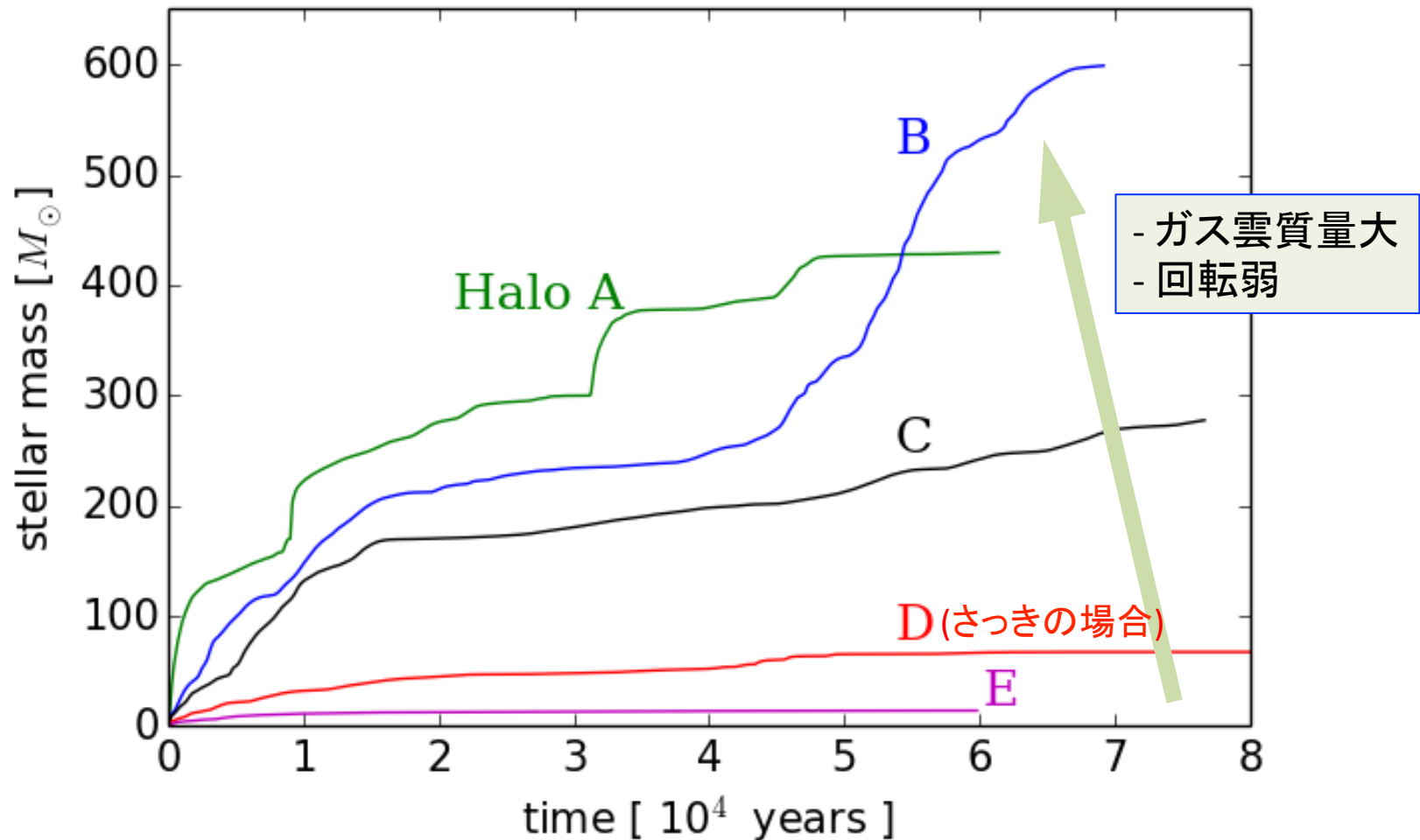
+ case Eではcollapse段階でHD冷却
が効く (\rightarrow lower stellar mass)

Ordinary Massive ($M_* < 100M_\odot$) Star



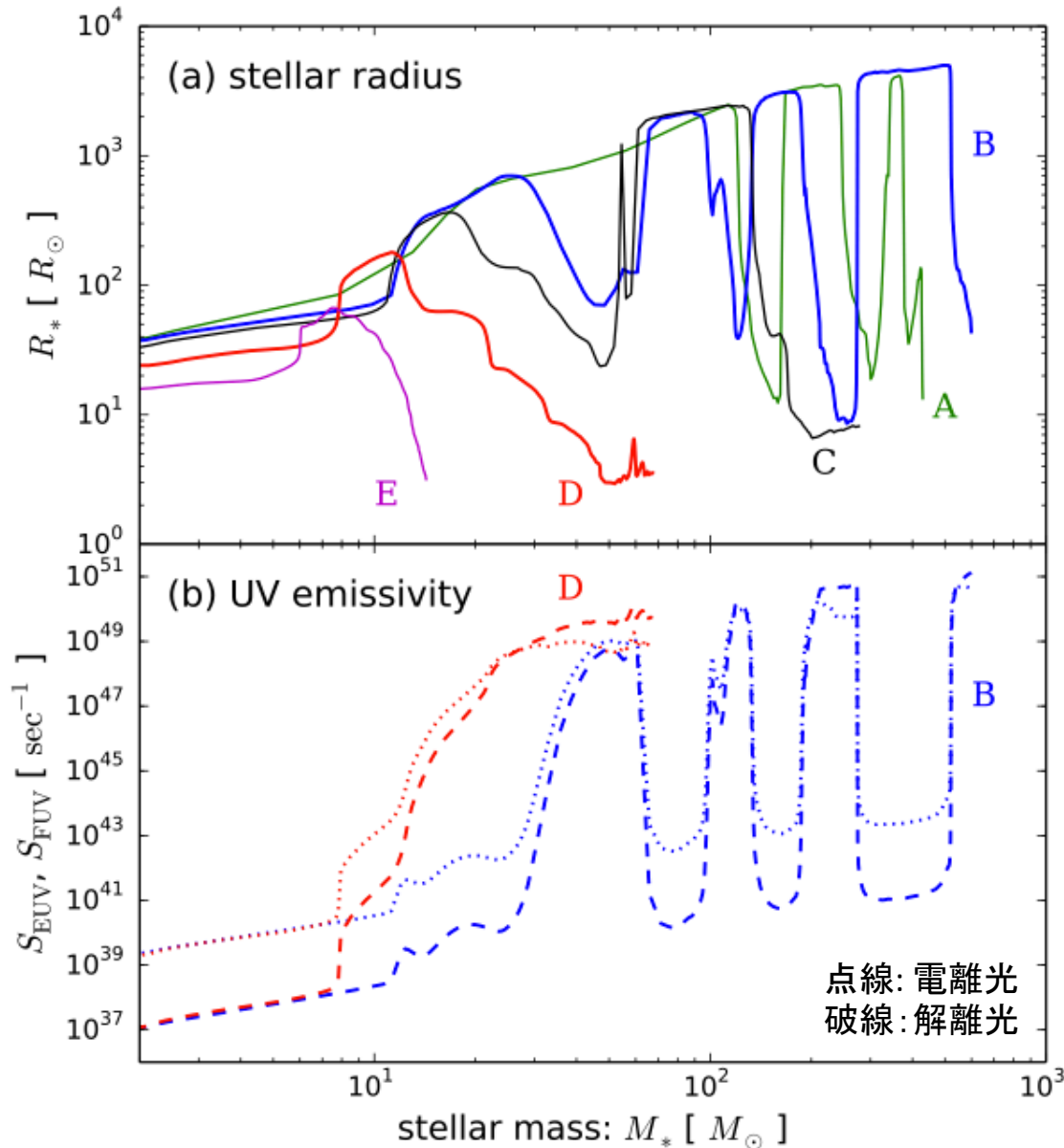
- + UV feedback (電離領域膨張 + 円盤光蒸発) により原始星へのガス降着抑制
- + 解離feedbackより電離feedbackがdominant

Diversity of Stellar Mass



3Dで電離+解離feedbackありでも250 M_{\odot} 超(>PISN)の大質量星ができる場合がわりとある (ガス雲の性質分布ではむしろこちらが典型的)

原始星進化とUV光度



星質量の大きいHalo A-Cは
原始星半径が非常に大きい

$10^{-2} M_\odot/\text{yr}$ 以上の大降着率



原始星巨星化



UV光度低下

(TH et al. 12, 13)

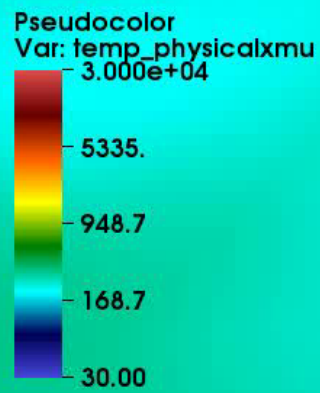
(もとはdirect collapse向け計算)

← Case B:

膨脹と収縮がくり返され、あわせて
UV光度が激しく上下している

DB: data 0.silo
Cycle: 0⁻ (in 10 yr)

Halo A (星質量400M_☉超)

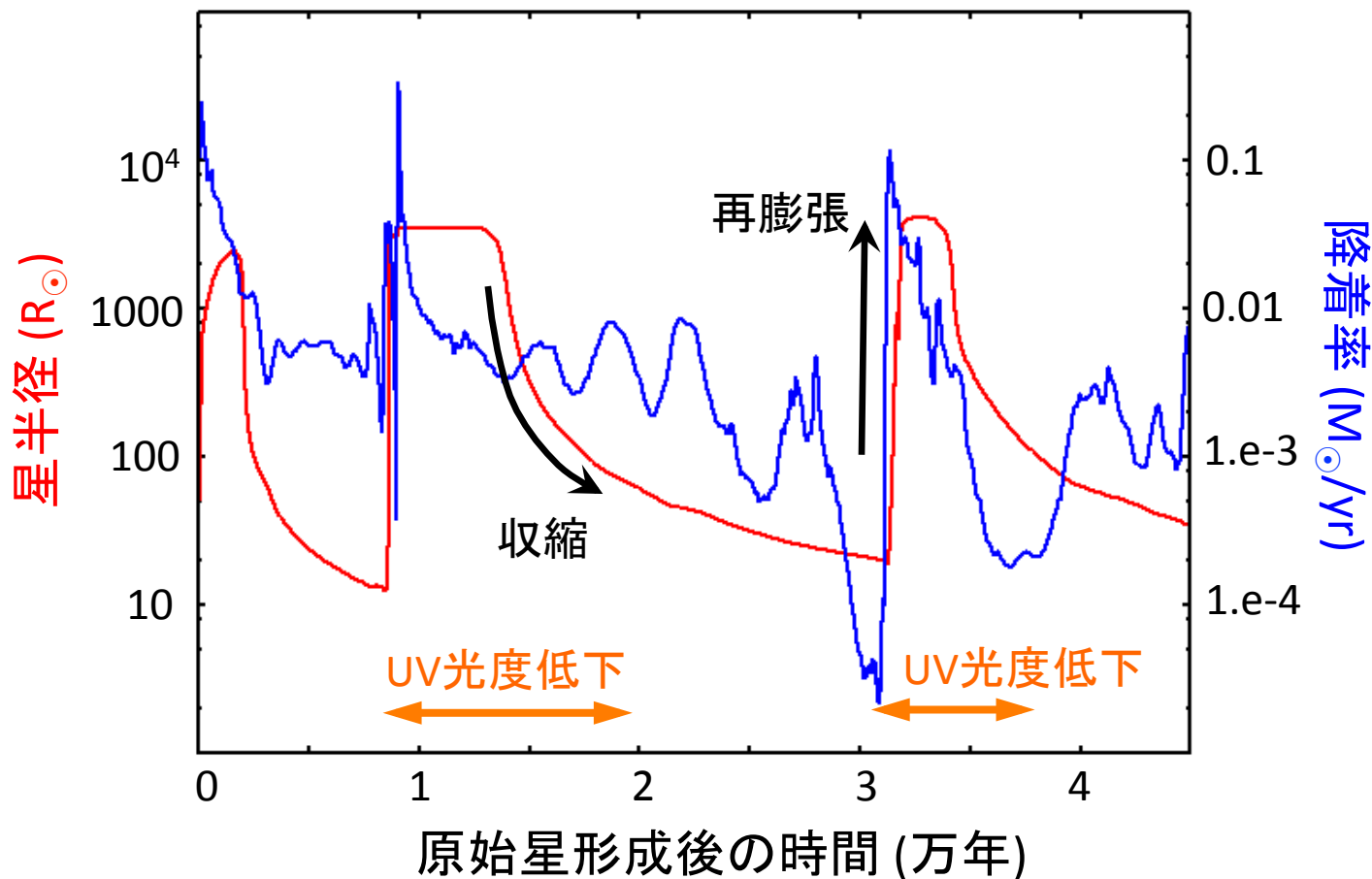


~4pc



A vertical double-headed arrow indicating a scale of approximately 4 parsecs.

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

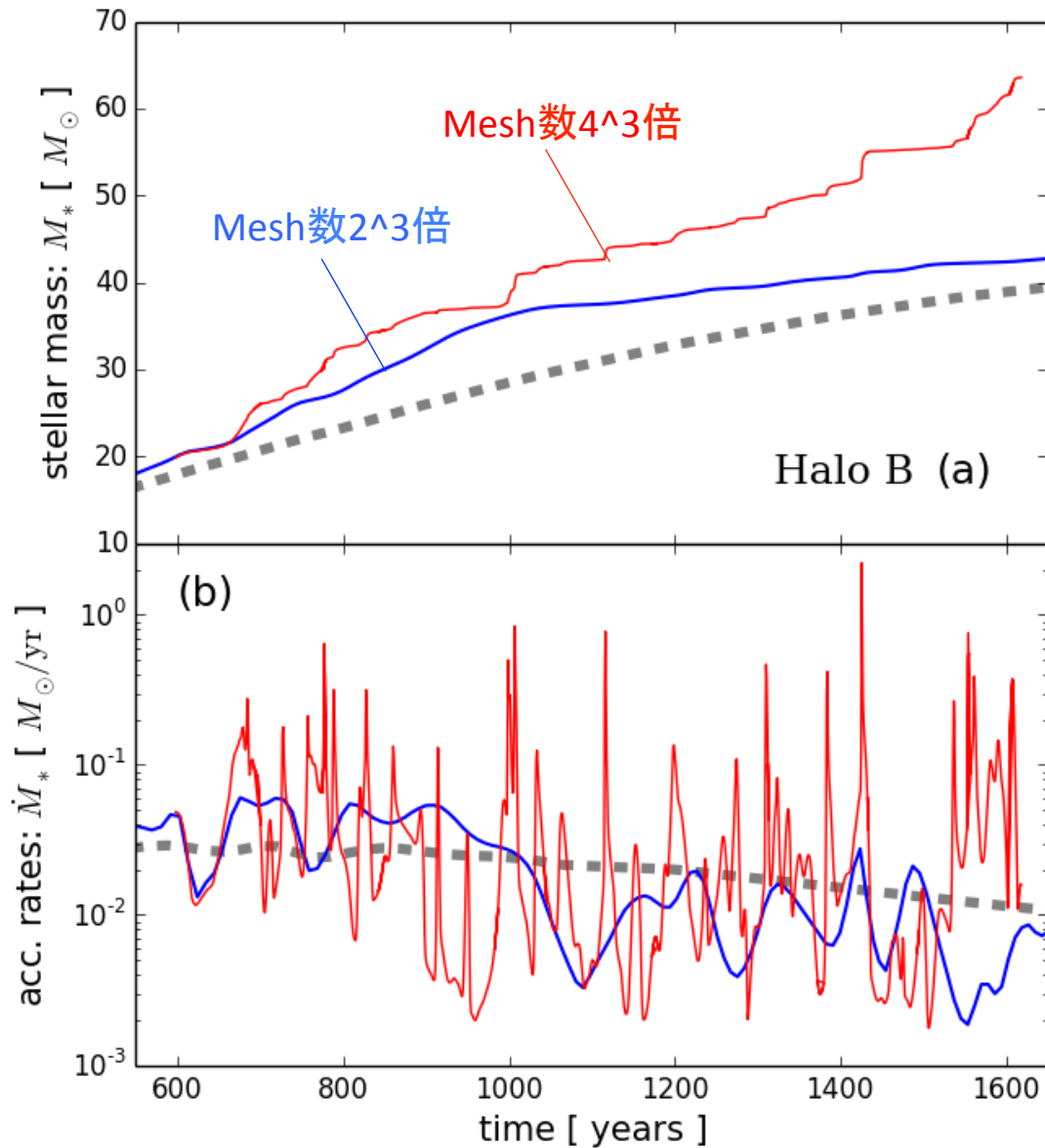
星半径 $\sim 10\text{AU}$



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

Accretion Should be Very Variable...

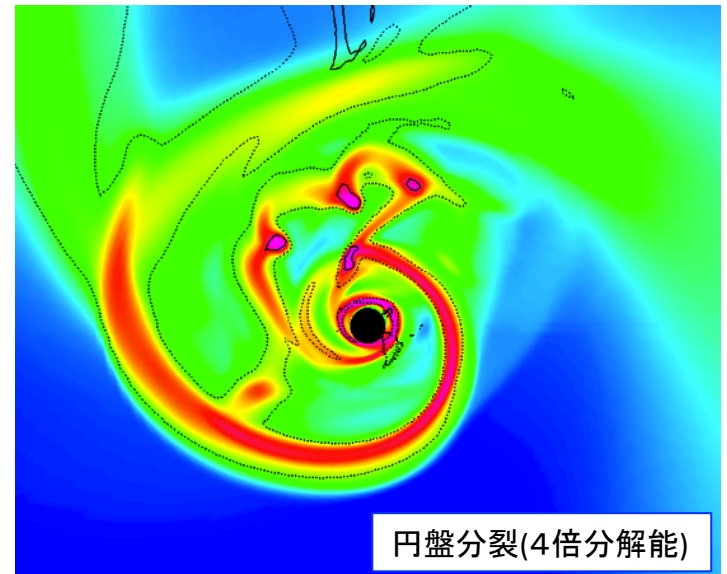


※空間分解能依存あり
with higher resolution,

+ より激しい時間変動

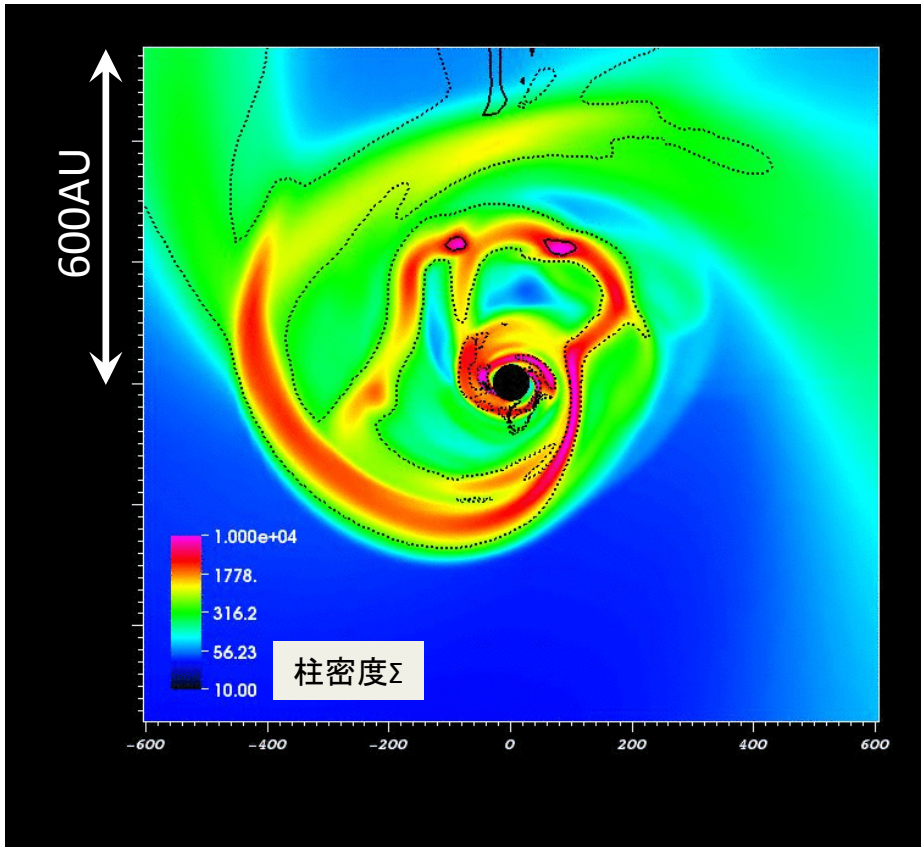
+ 中心星への平均降着率
は高まる傾向

+ 最も高い分解能ではさかんに
円盤分裂が起きる。



Channel to form very massive stars

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sinkへ落下→合体(今は仮定)
分裂が起きても必ずしも星質量が
下がるとは限らないのではないか

別の可能性

中心星に落下して降着burst



原始星の巨星化



UV feedback弱体化
さらなる合体

まとめ

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

+ 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 ~ 10 AU) \rightarrow UV feedback弱体化
たぶん合体も促進

Very/Super massive starsをつくるchannel (DC説でも期待)
ふつうの初代星形成でも片鱗が見えている