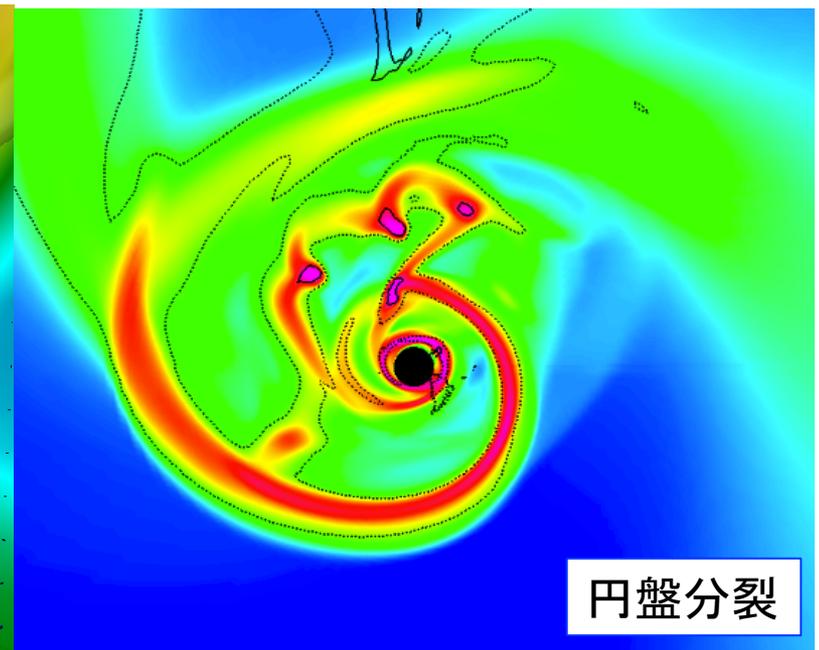
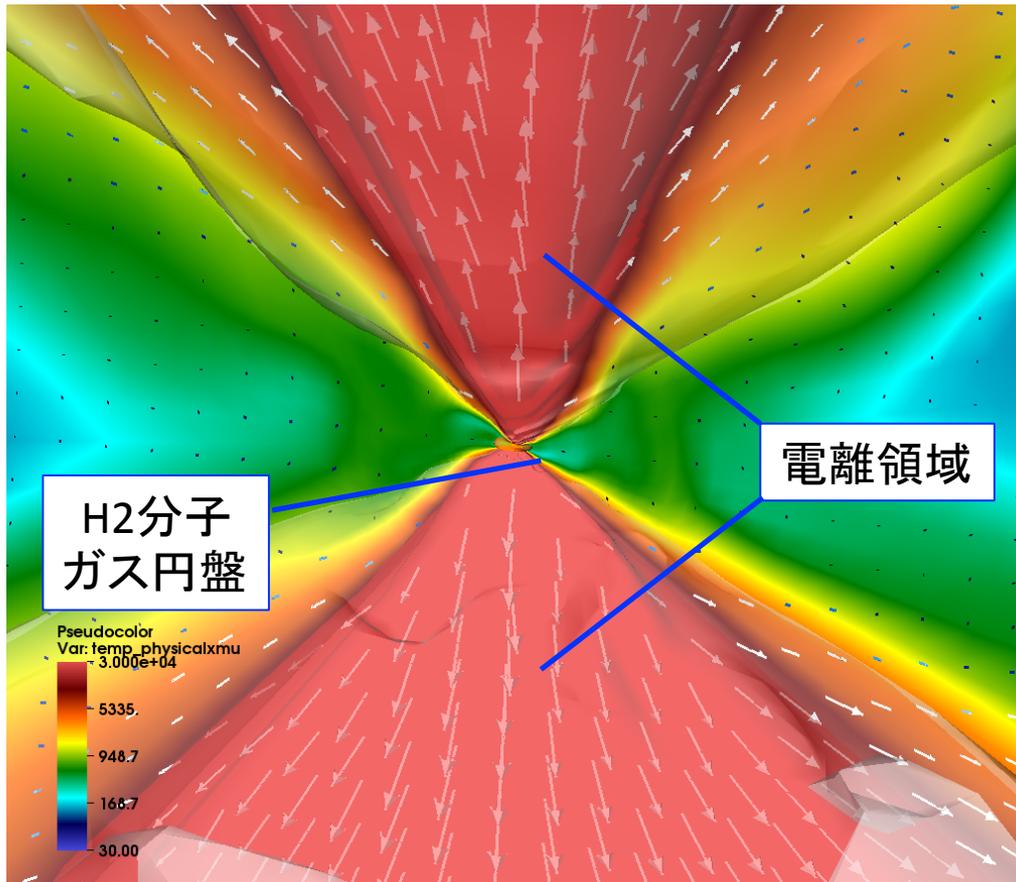


# 初代星形成におけるバースト的降着と間欠的UV feedback

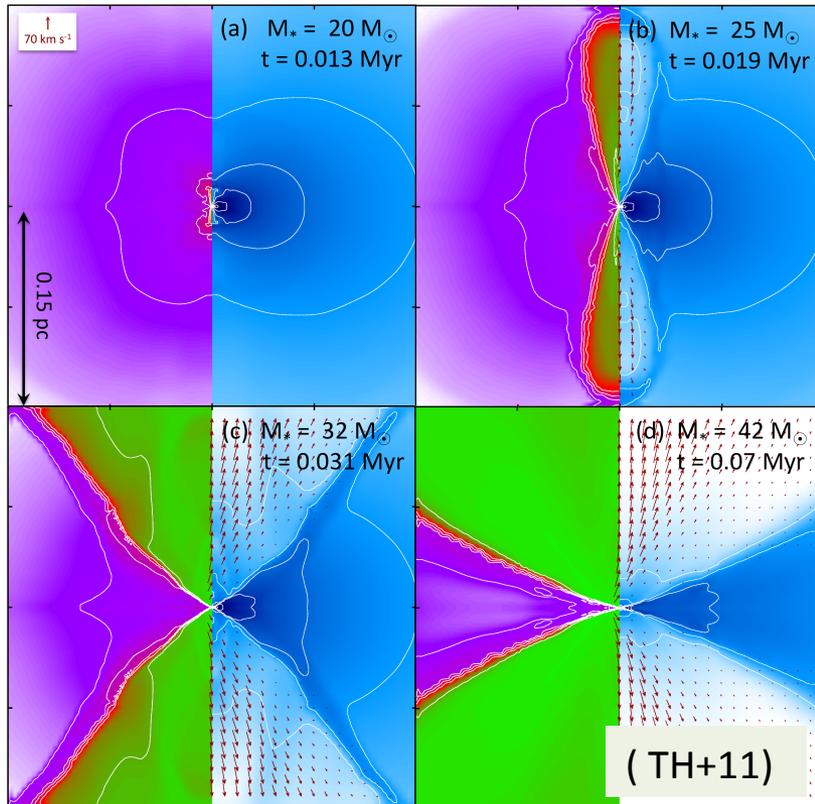


細川 隆史(東大)

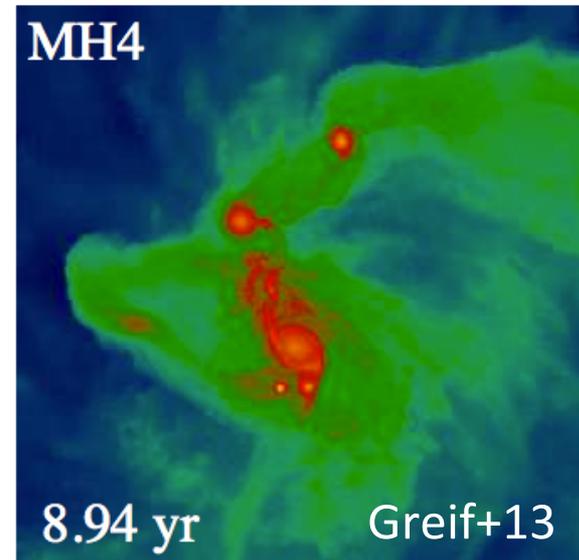
# 始原星の最大質量はいくらか

◇ 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

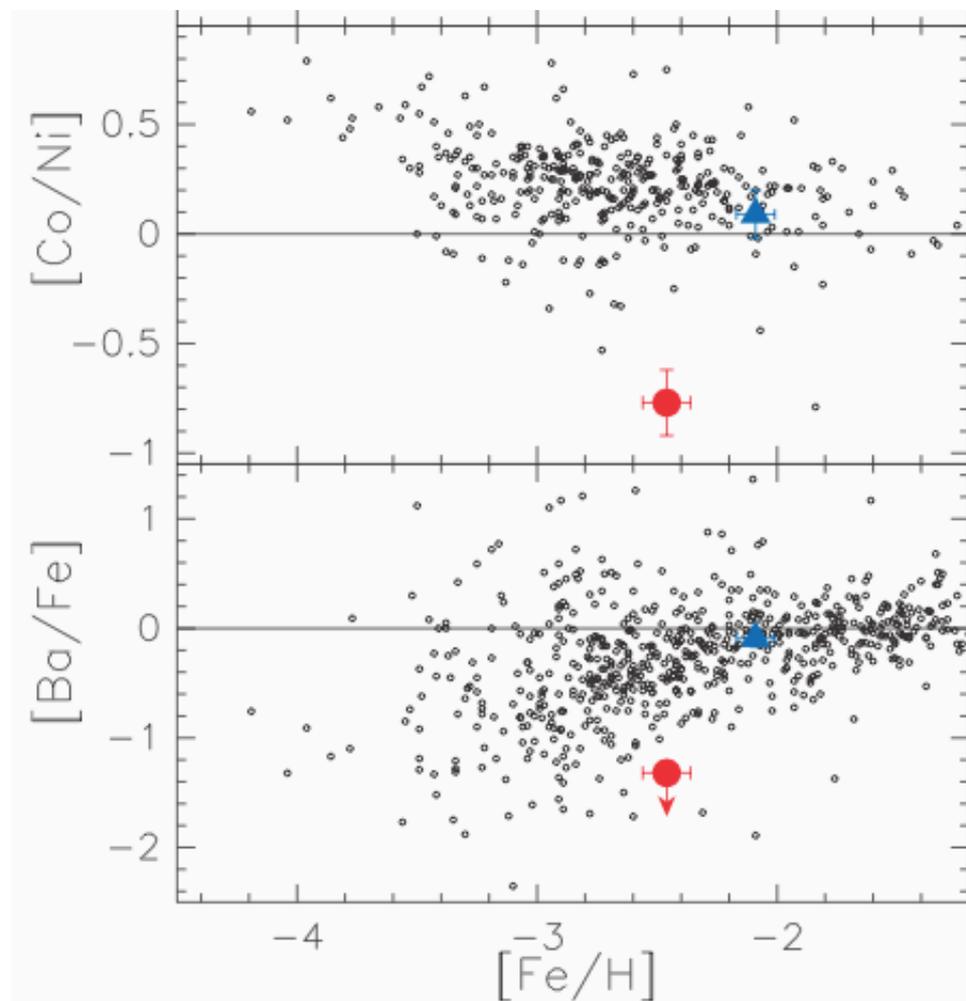
Aoki+14, Science

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

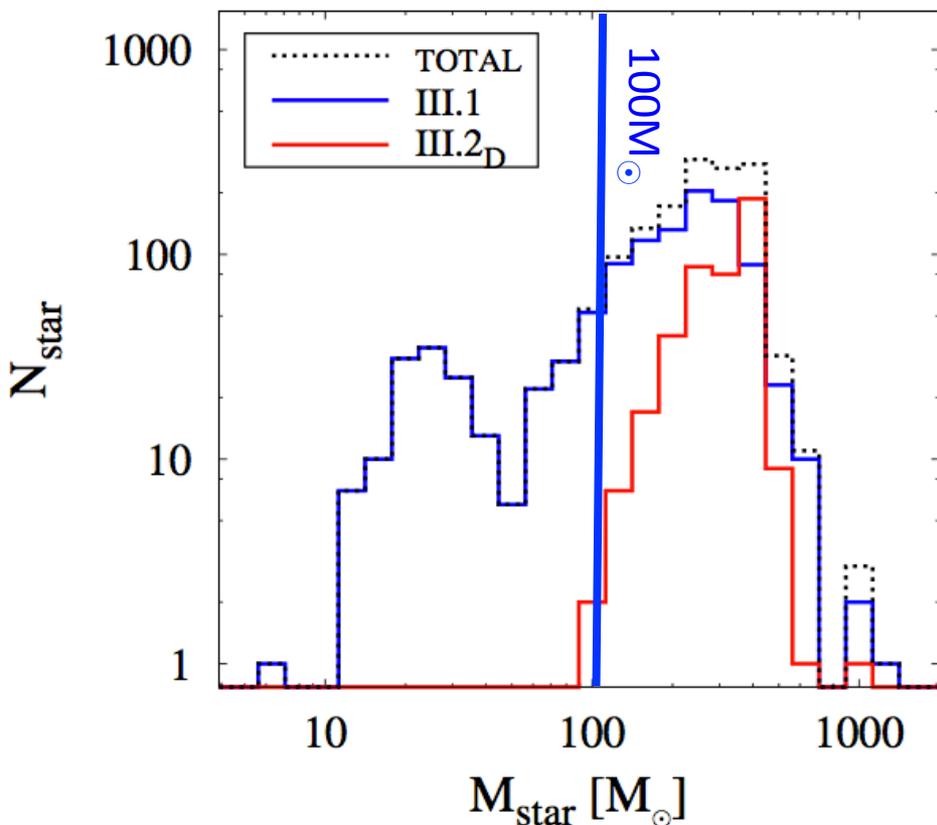
+ CCSNよりPISN、或はさらに  
大質量のprogenitorの方が  
組成を説明できる

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？

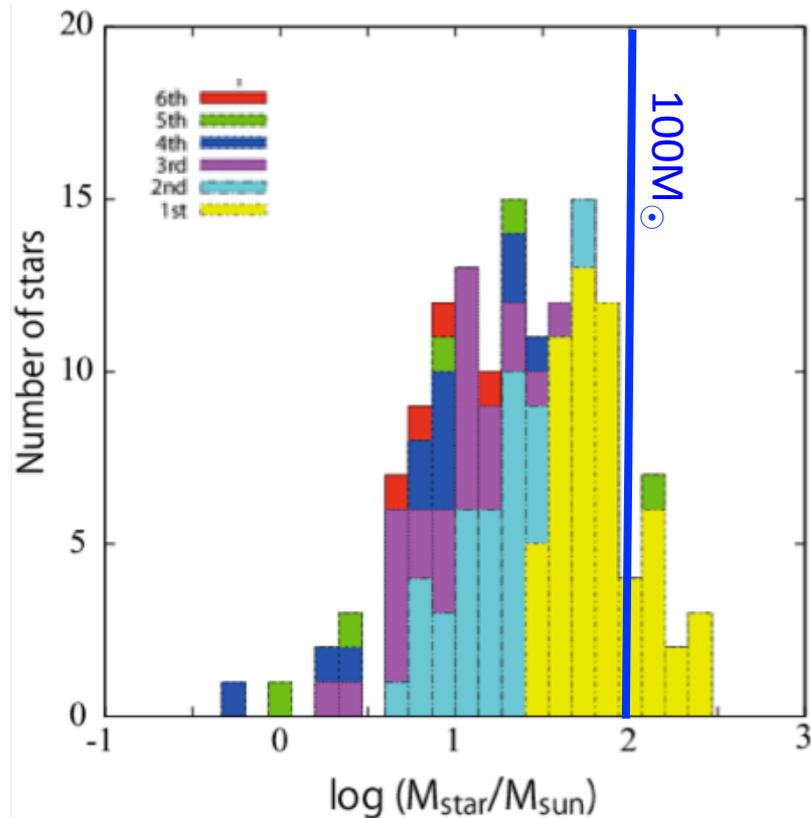


# 初代星のMass Spectrum

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  $\sim 1100$  gas clouds  
- 2D RHD (電離+解離光feedback)



Susa+14  
- with  $\sim 60$  gas clouds  
- 3D RHD (解離光feedback)

# Updating to 3D Simulations

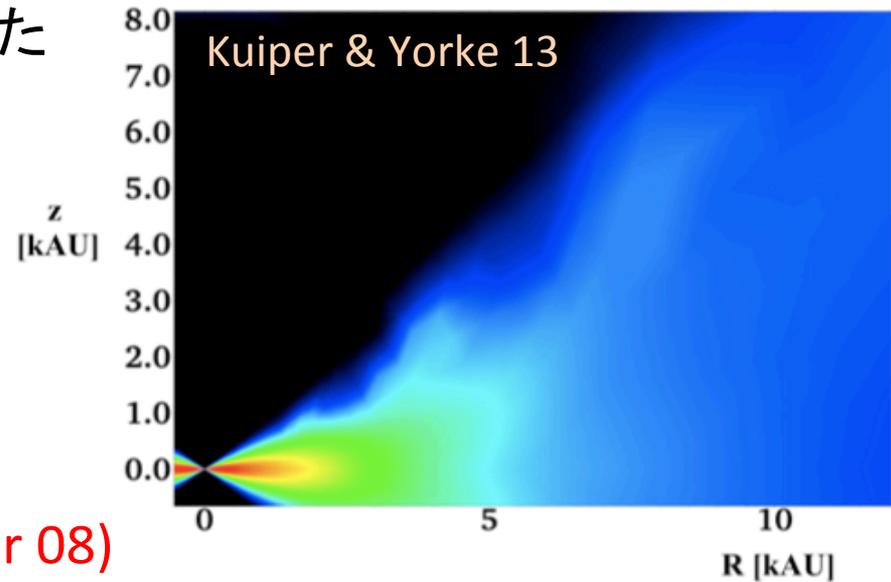
多次元MHD code: PLUTO ベース(e.g., Mignone et al. 07)

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)

+

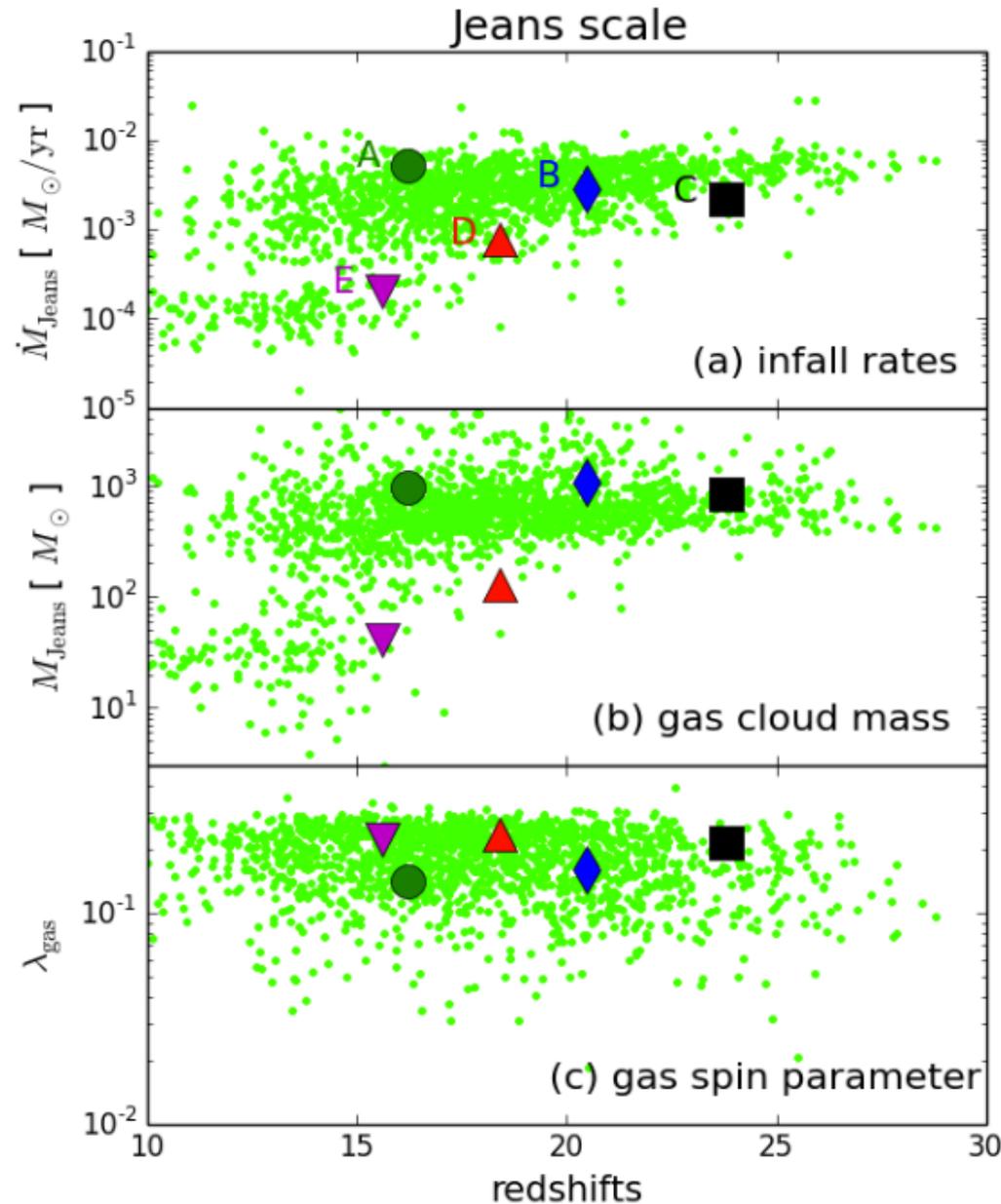
- EUV(電離)/FUV(解離)輻射輸送
- 始原ガス( $Z=0$ )Chemistry
- 星の進化計算 (Yorke & Bodenheimer 08)
- Cosmological initial condition (Hirano+14)

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)



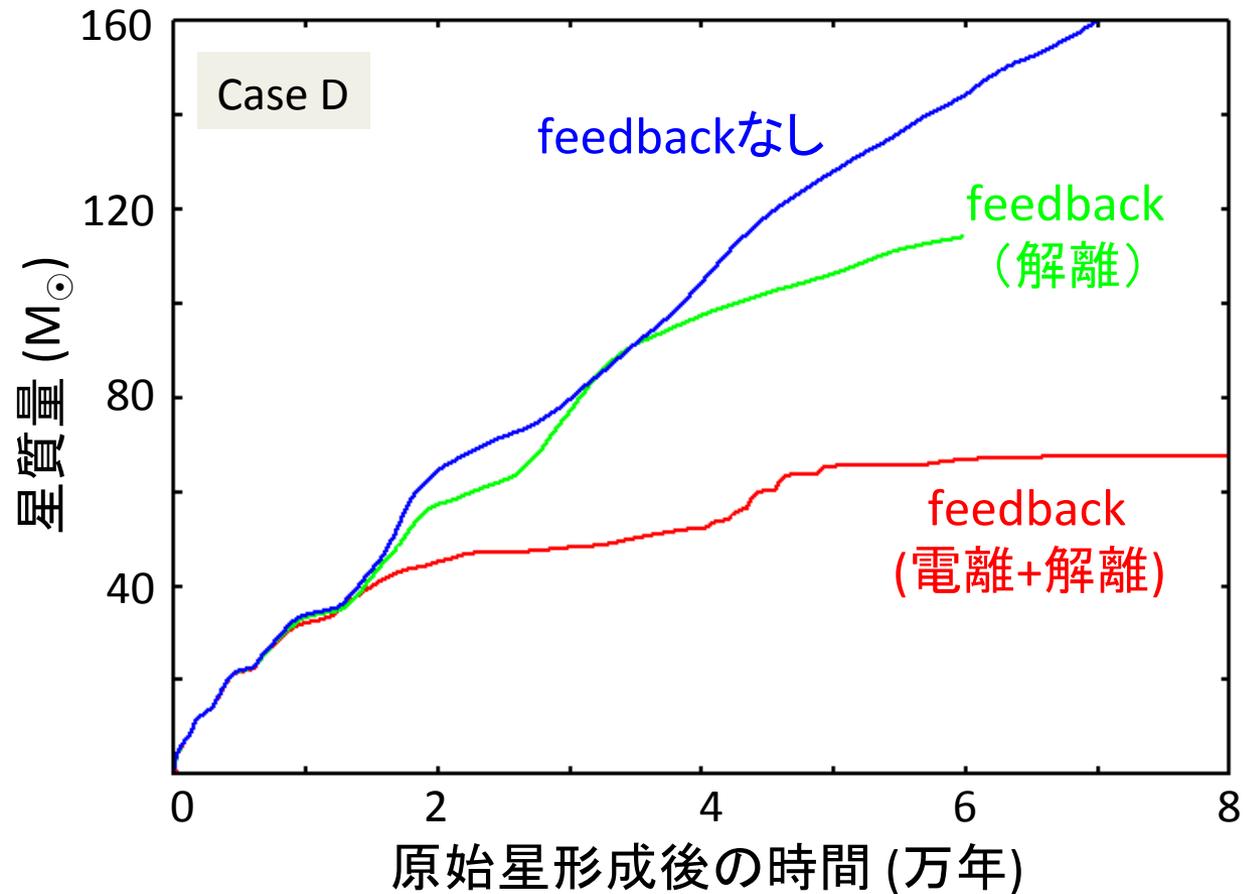
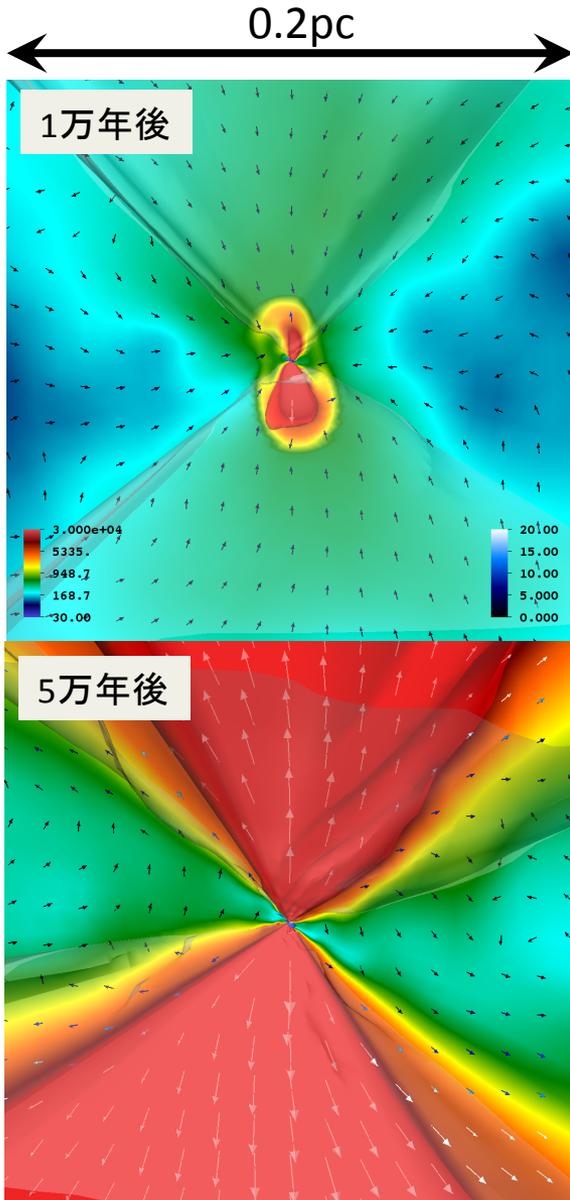
+ Hirano et al.の宇宙論シミュレーション  
でえられた始原ガス雲から5例  
(中心密度 $10^{13\sim 14}/\text{cc}$ 時点のsnapshots)

+ 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

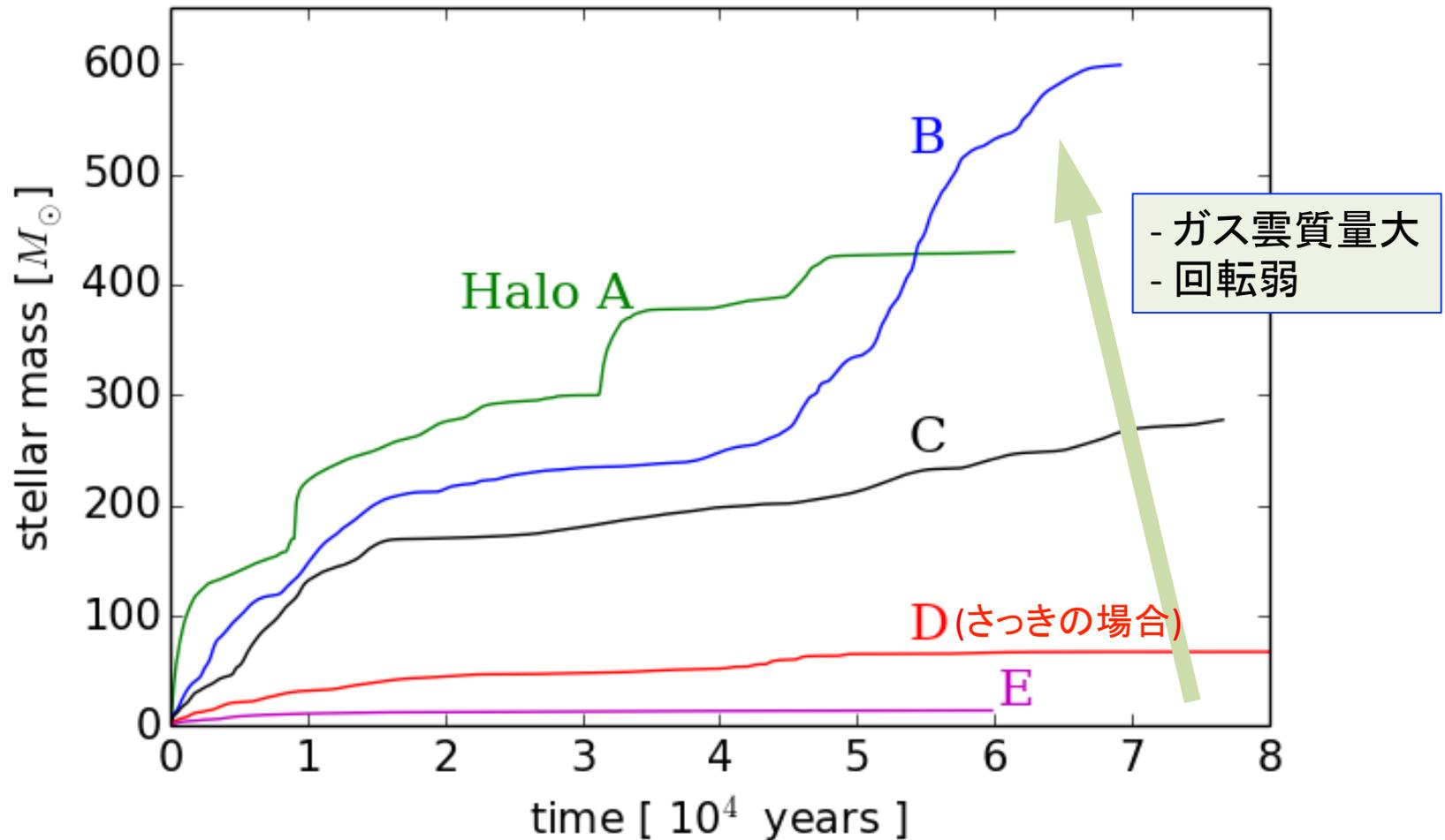
+ case Eではcollapse段階でHD冷却  
が効く ( $\rightarrow$  lower stellar mass)

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



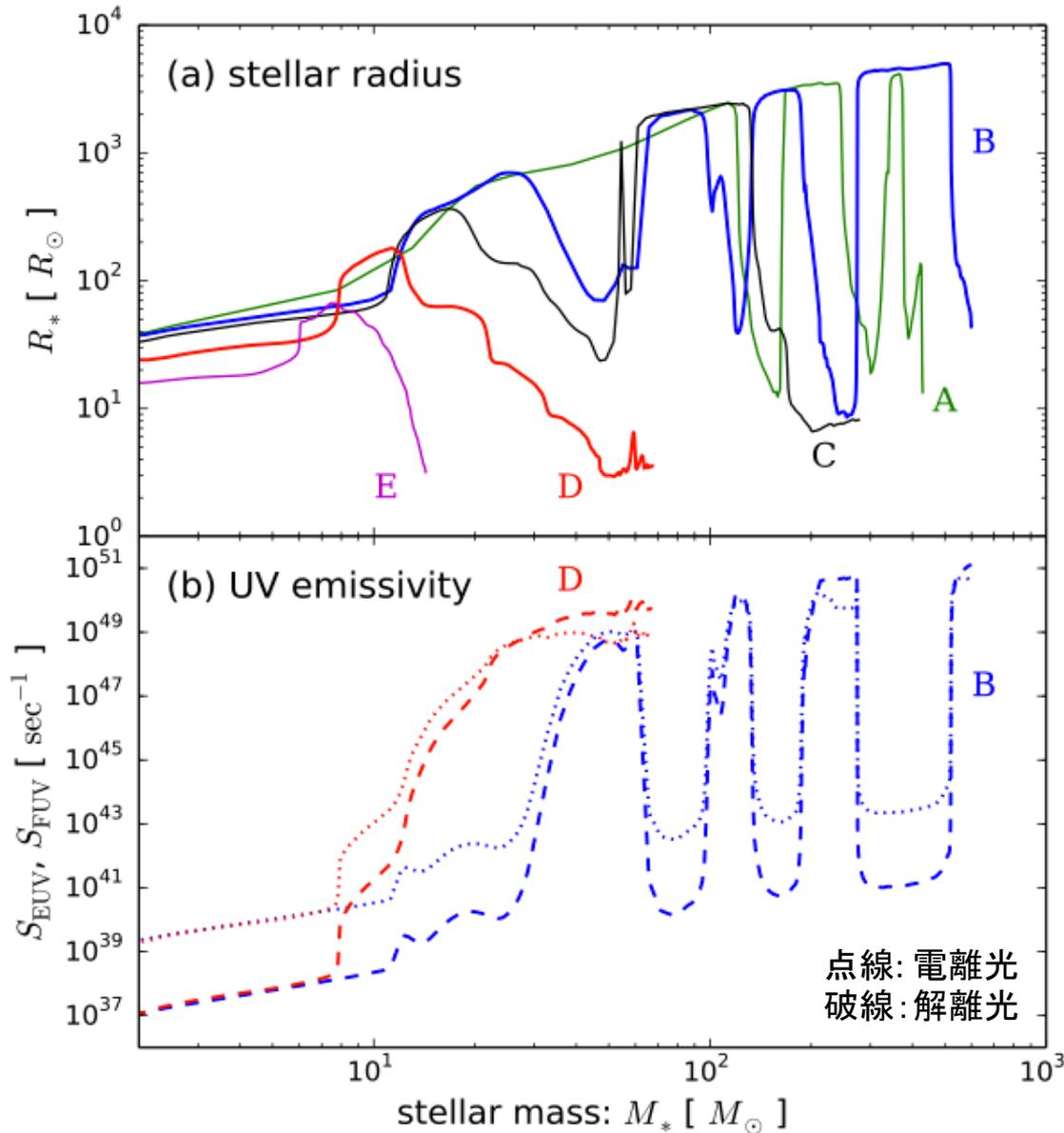
- + UV feedback (電離領域膨張 + 円盤光蒸発) により原始星へのガス降着抑制
- + 解離feedbackより電離feedbackがdominant

# 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)

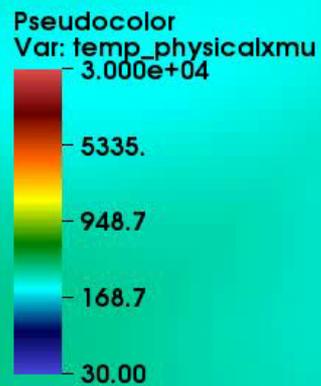
(もとはdirect collapse向け計算)

← 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<sup>-</sup> (in 10 yr)

Halo A (星質量400M<sub>☉</sub>超)

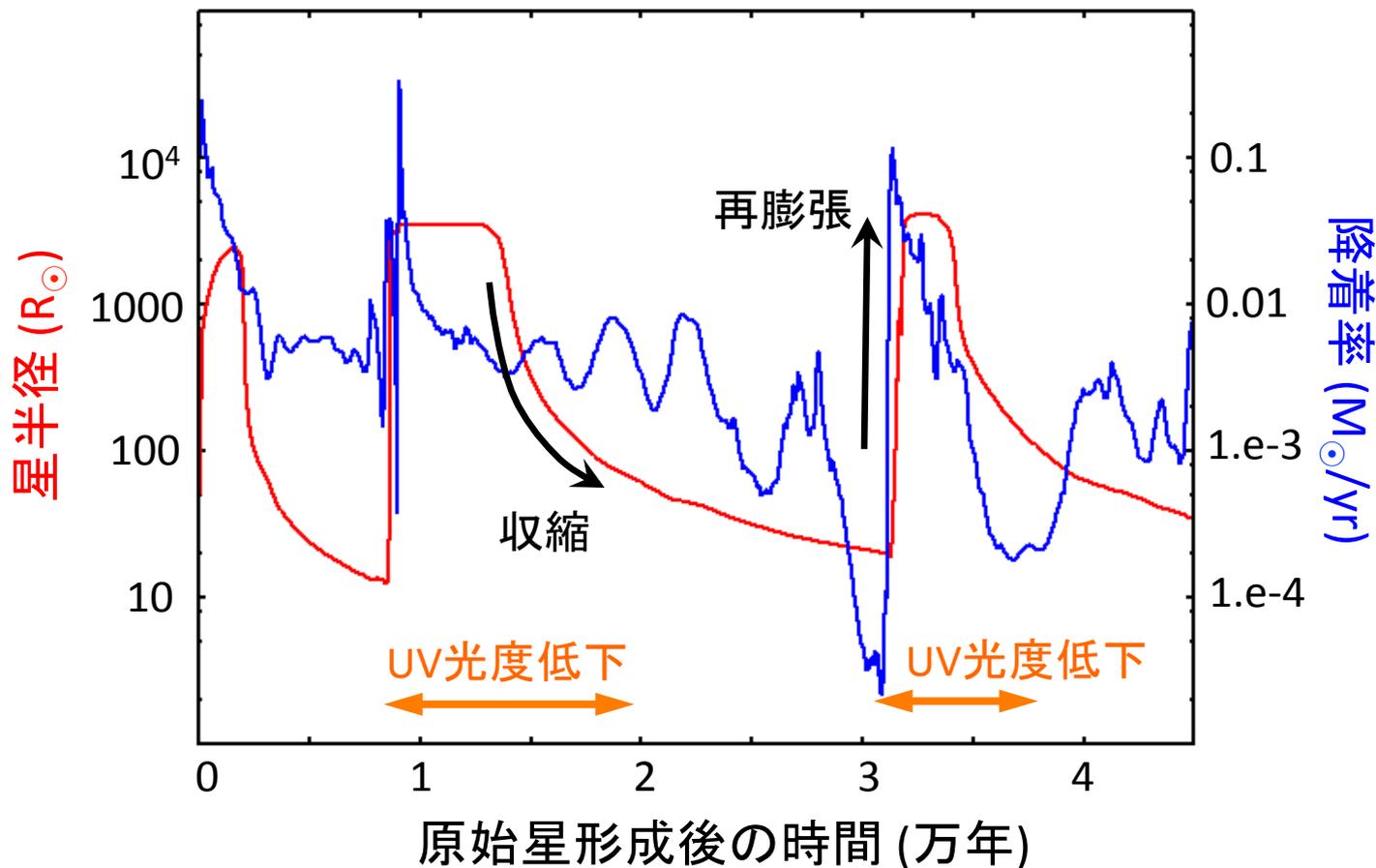


~4pc



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

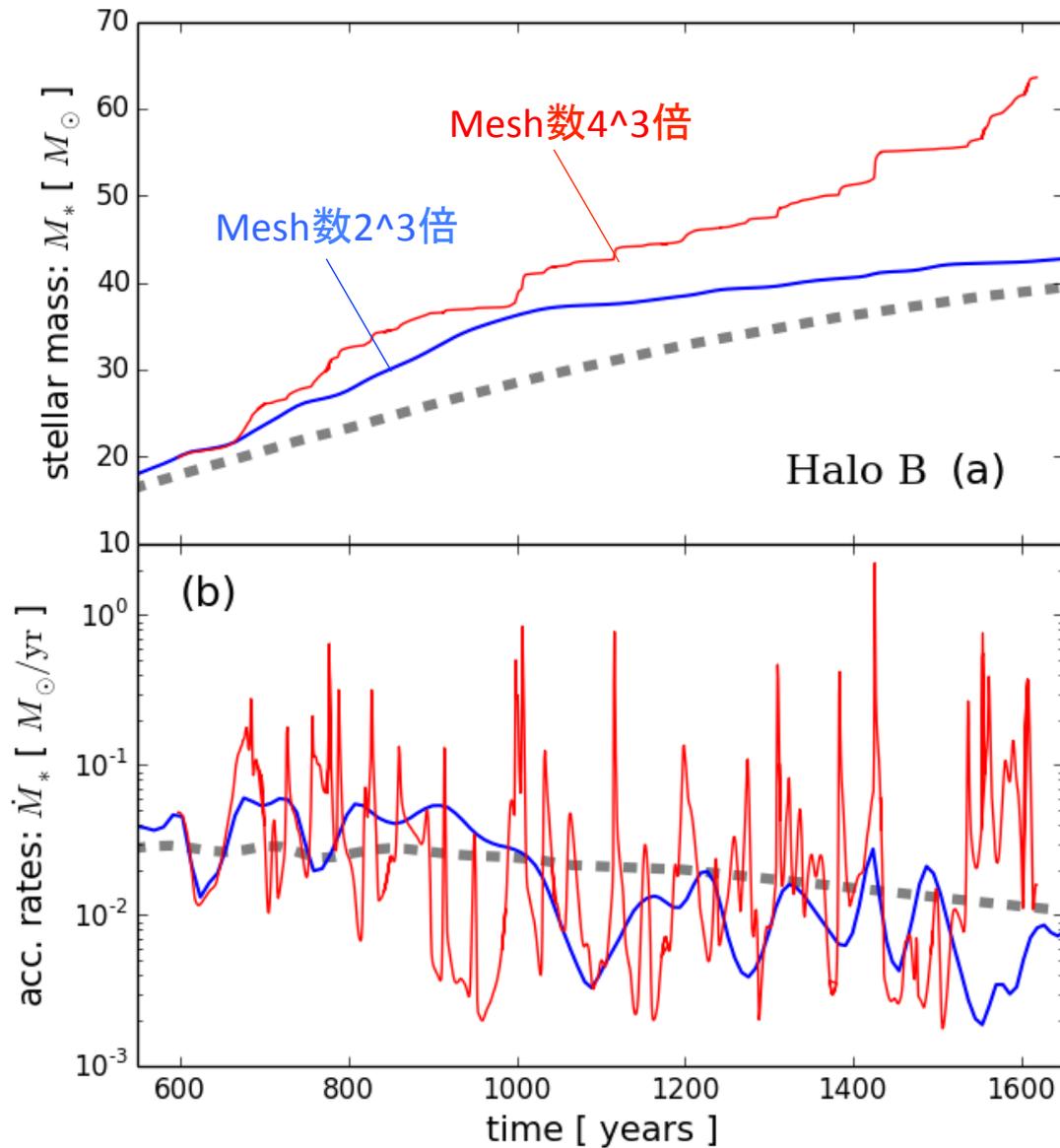
星半径  $\sim 10\text{AU}$



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...

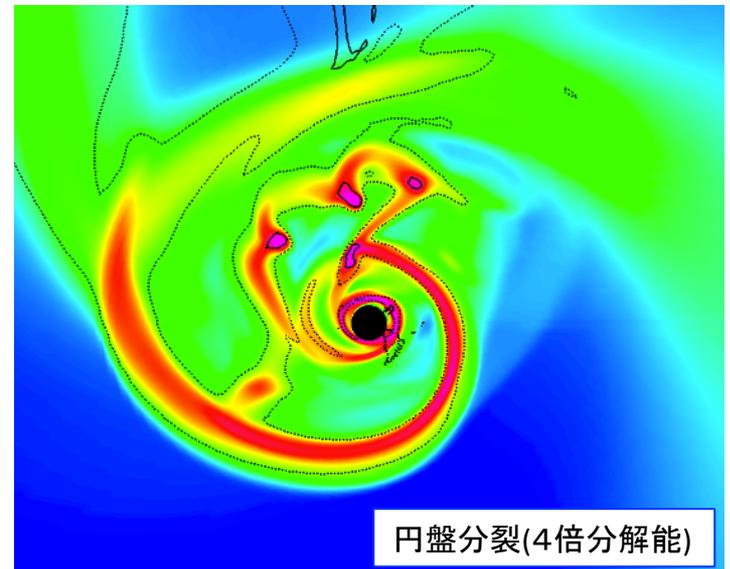


※空間分解能依存あり  
with higher resolution,

+ より激しい時間変動

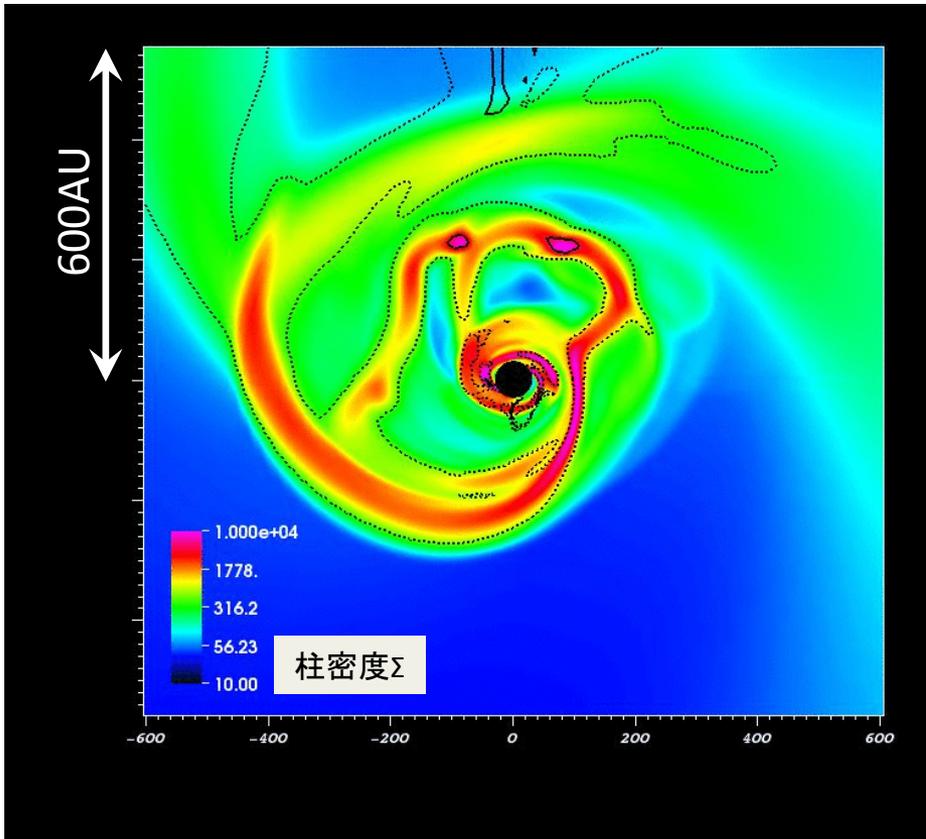
+ 中心星への平均降着率  
は高まる傾向

+ 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 $\sim 10$ 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