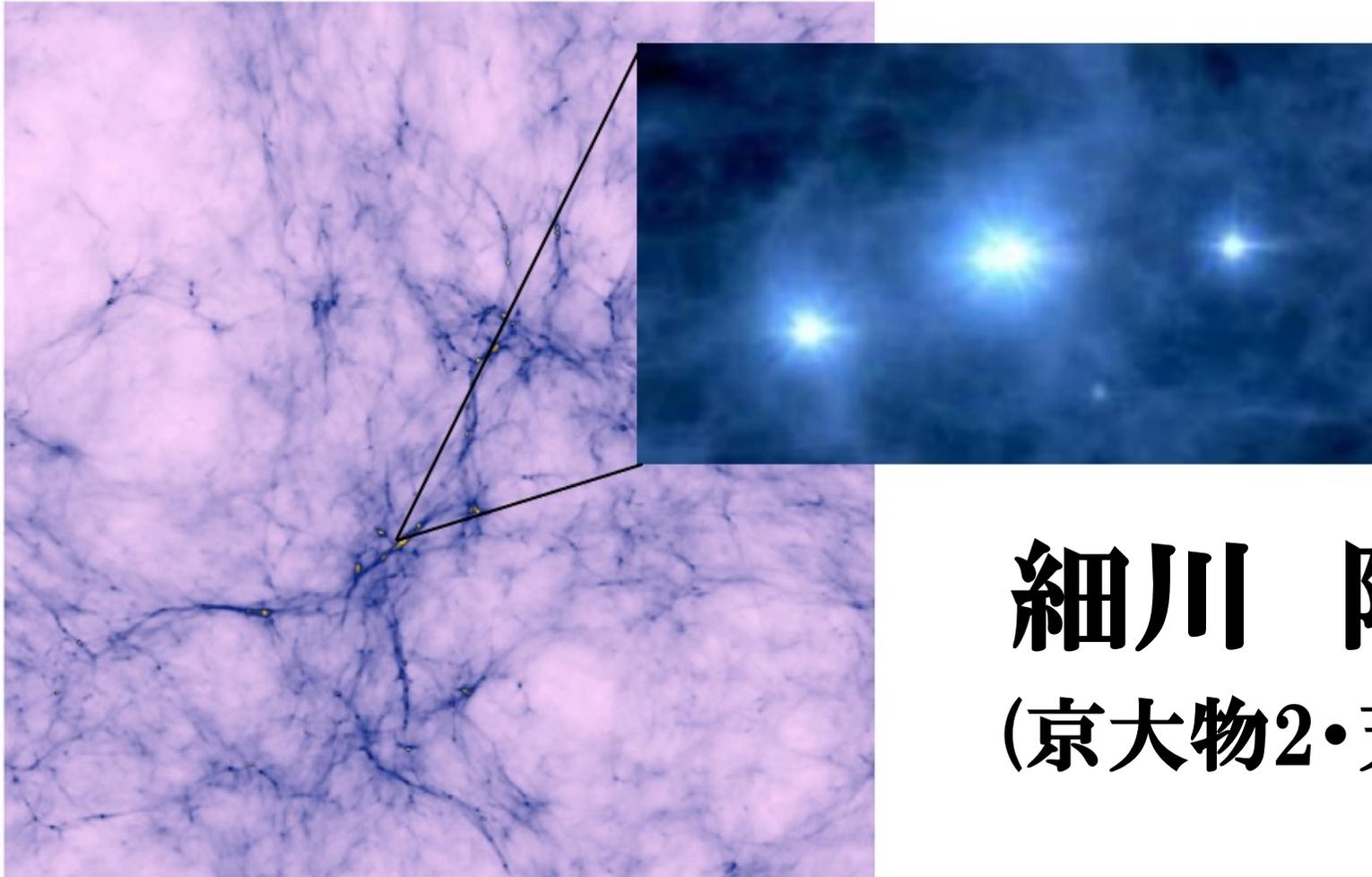
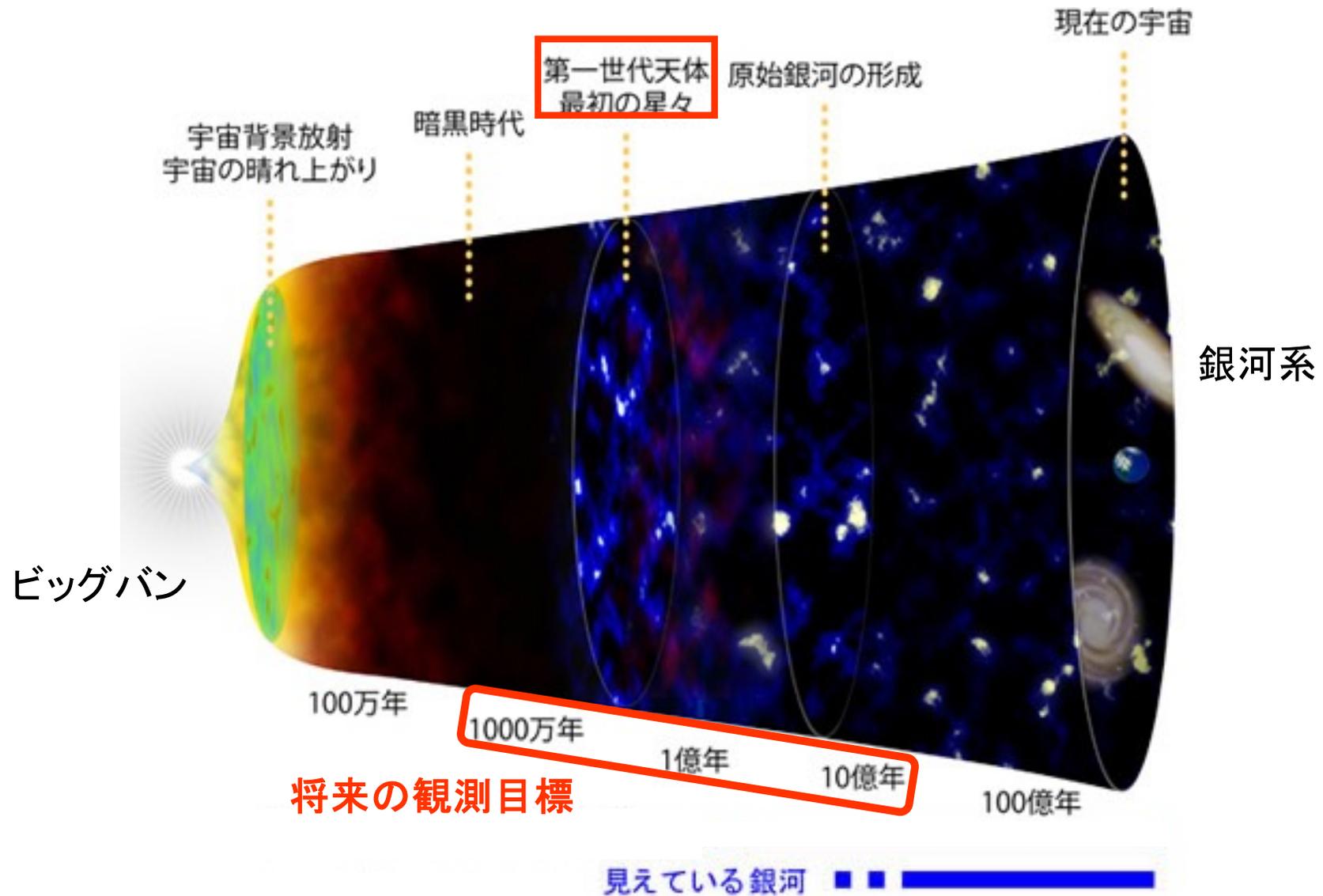


初期宇宙での大質量星 とブラックホール誕生



細川 隆史
(京大物2・天体核)

宇宙最初の日体形成

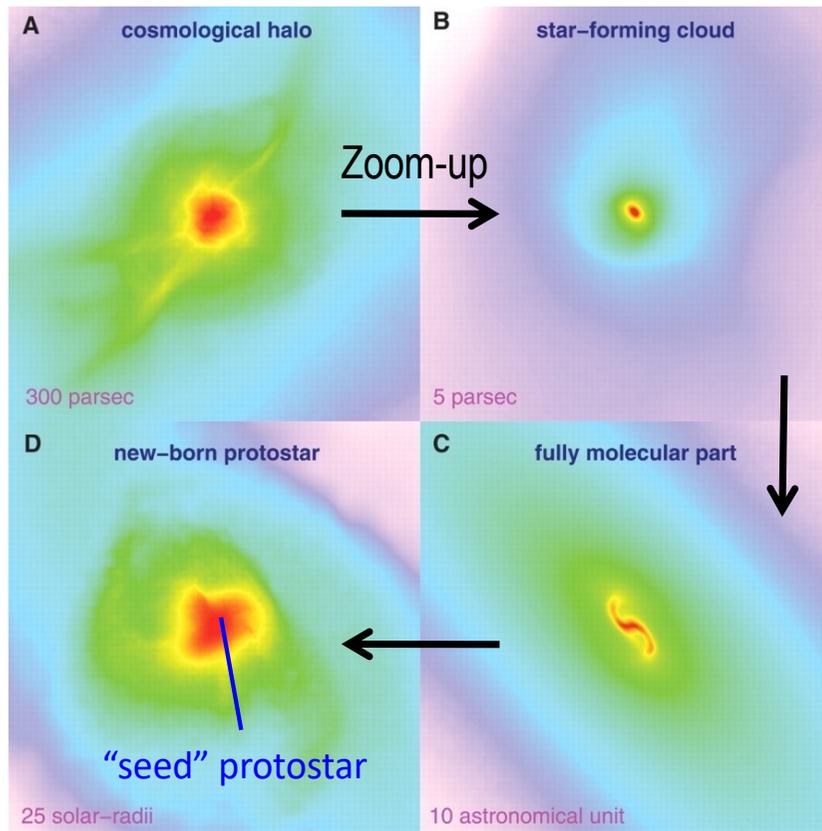


どこかの時点で、宇宙最初の日体(星, BH, 星団/銀河)が誕生。
それはいつ、どこでどのように起きたのか? どんな天体だったか?

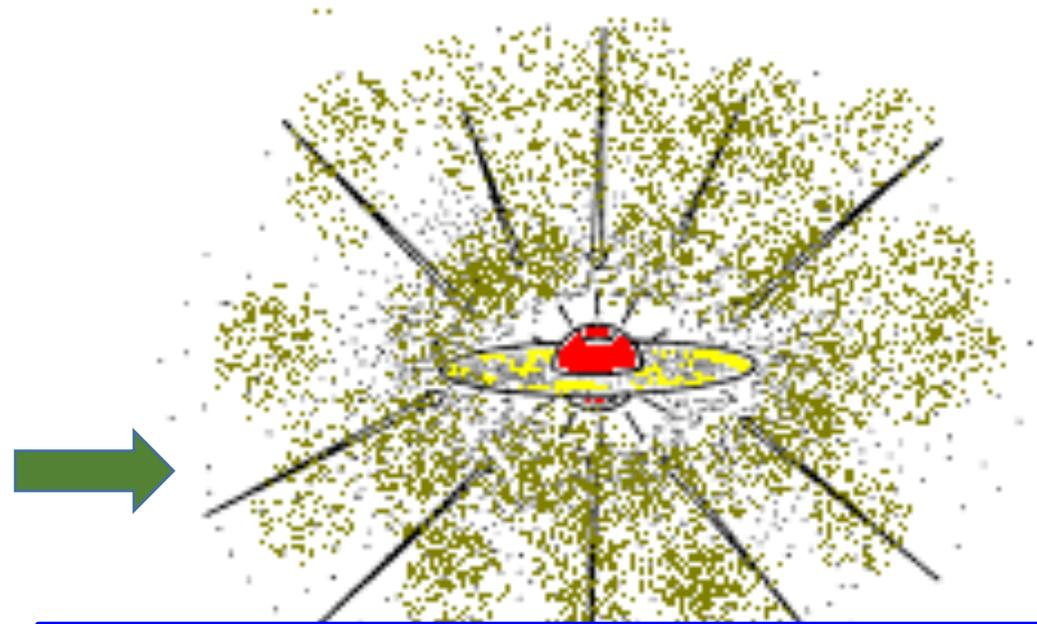
Pop III stars: how massive?

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

Does this really occur?

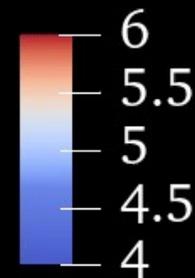
t = -151617yr

初代”連星”の誕生

© 杉村和幸
(北海道大学)

300000 AU

log(nH) [cm⁻³]



High-mass star formation @ $z \sim 25$

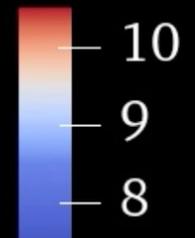
Sugimura, Matsumoto, TH+(20)

Hot plasma heated by
stellar irradiation (HII)

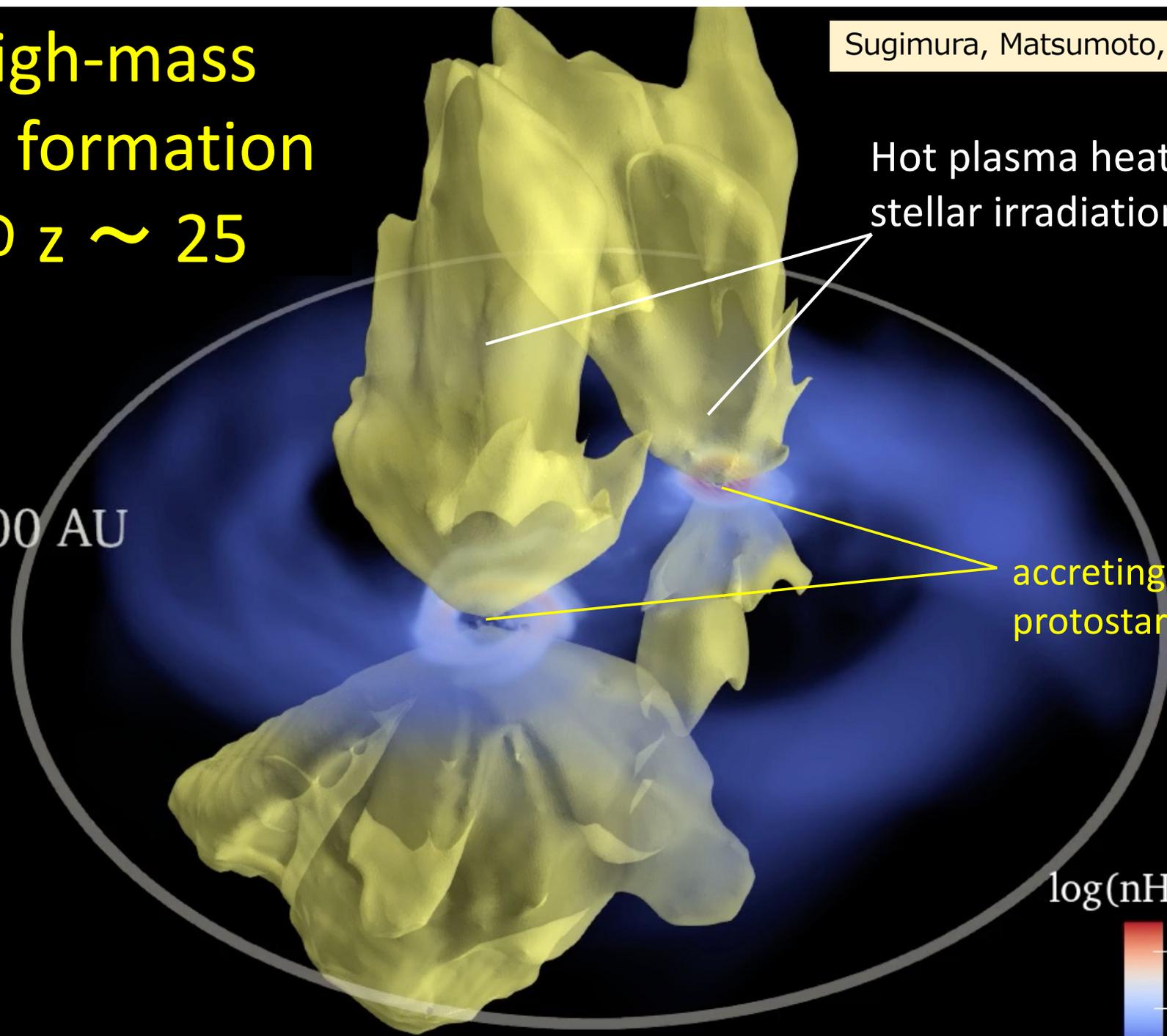
accreting
protostars

8000 AU

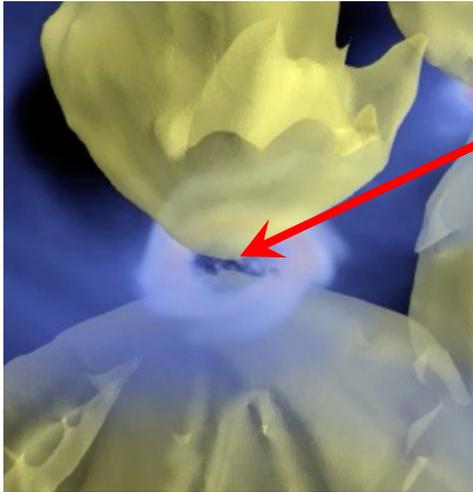
$\log(nH)$ [cm⁻³]



Birth of a massive binary systems with $\sim 50M_{\odot}$ stars



Protostar forms?



Yes and NO!

降着成長する原始星はsink粒子で置換
1D星の進化計算から星がどう光るかモデル化

降着原始星進化も直接
3D計算で追跡したい

New code development

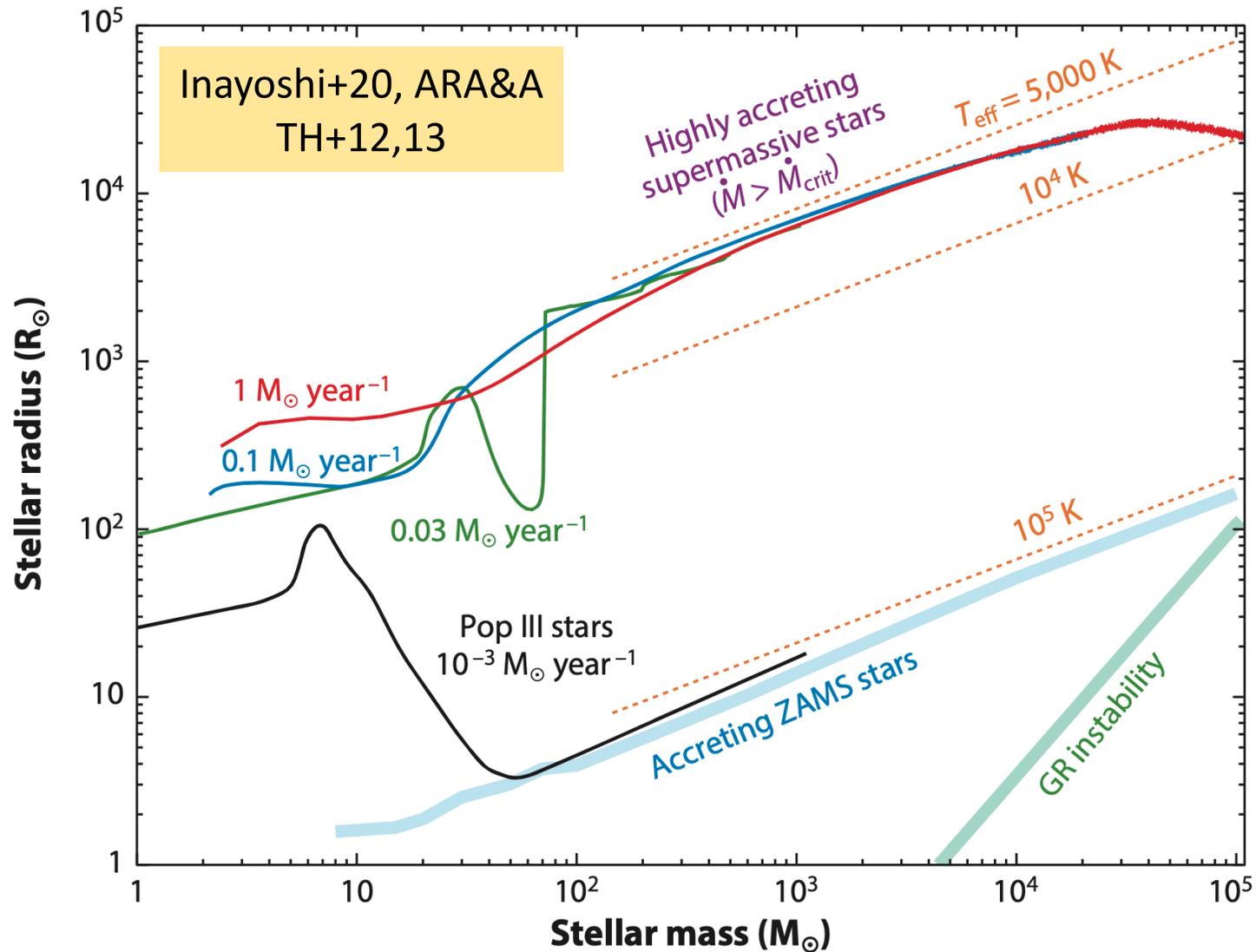


SFUMATO (Matsumoto+07)

w/ RHD implementations (e.g., Sugimura+20)

- **Explicit M1-closure** method w/ reduced speed of light (Fukushima & Yajima 21)
- modified scheme applicable for very dense medium (Rosdahl & Teysier 15)
- separately solving the radiation energy density & photon number density
- physical processes operating at the stellar densities

星の進化計算(1D)の予言

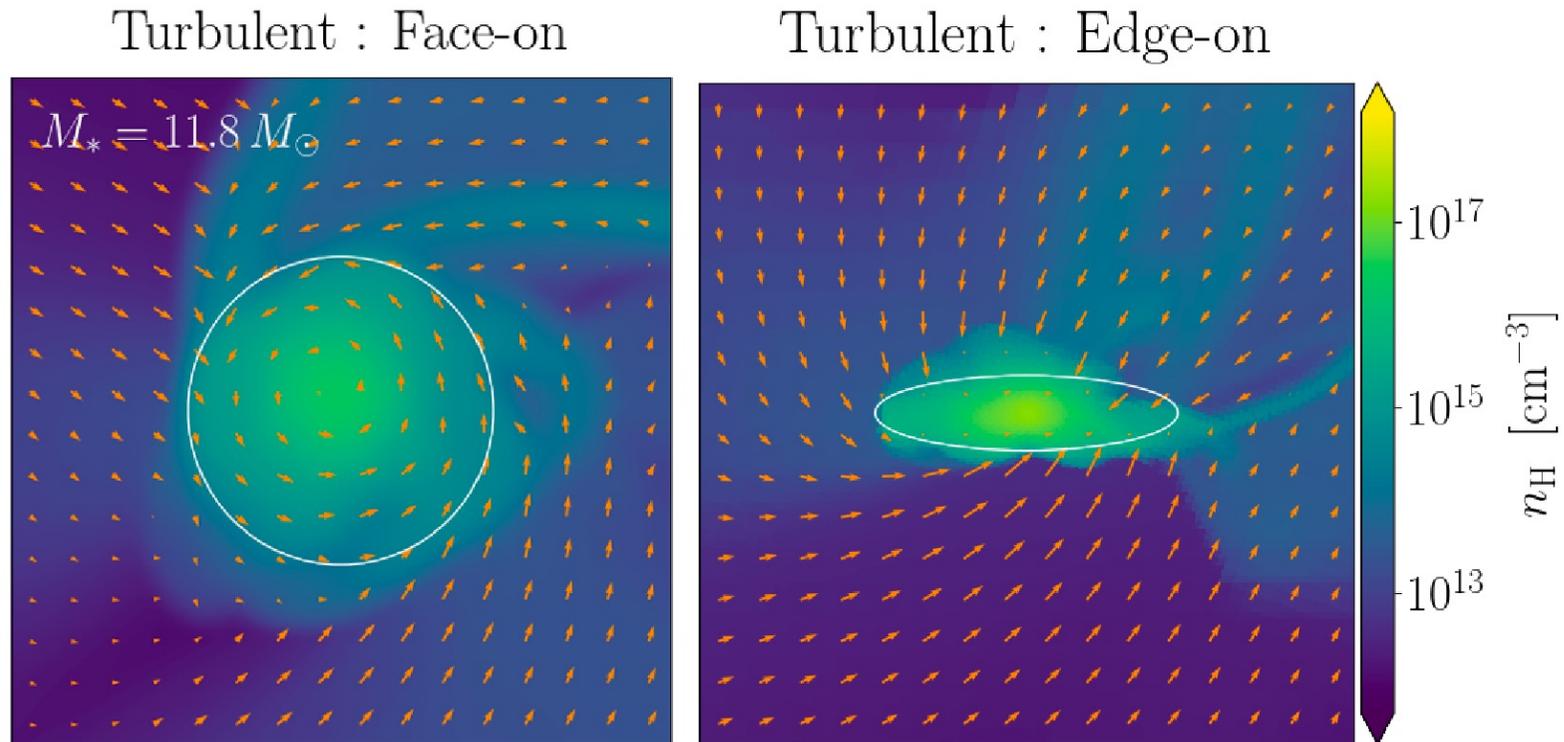


降着率が高ければ($> \sim a \text{ few} \times 0.01 M_{\odot} / \text{yr}$)、原始星は大半径に膨張

$T_{\text{eff}} \sim 5000 \text{ K} \rightarrow$ 電離光 emissivity 下がり feedback 弱体化 \rightarrow 超大質量星形成

降着原始星 in 3D

Kimura, TH, Sugimura, & Fukushima, ApJ, in press (arXiv:2303.12100)

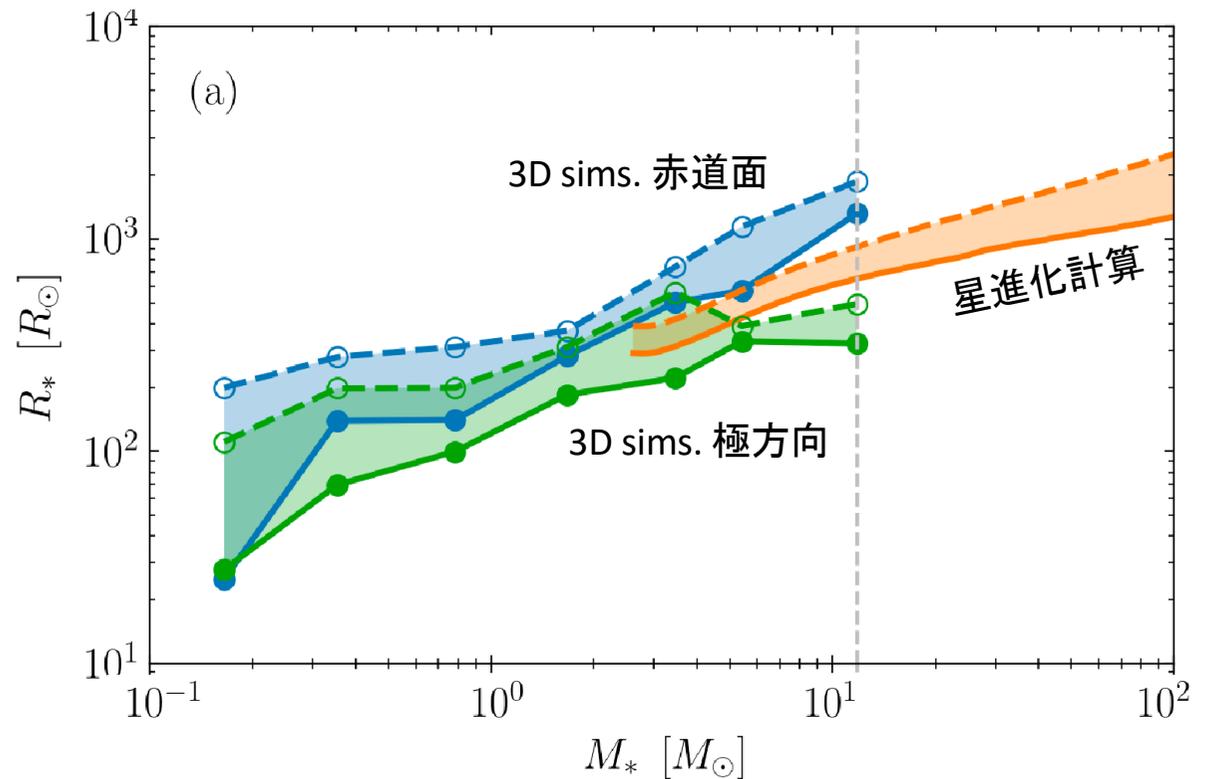
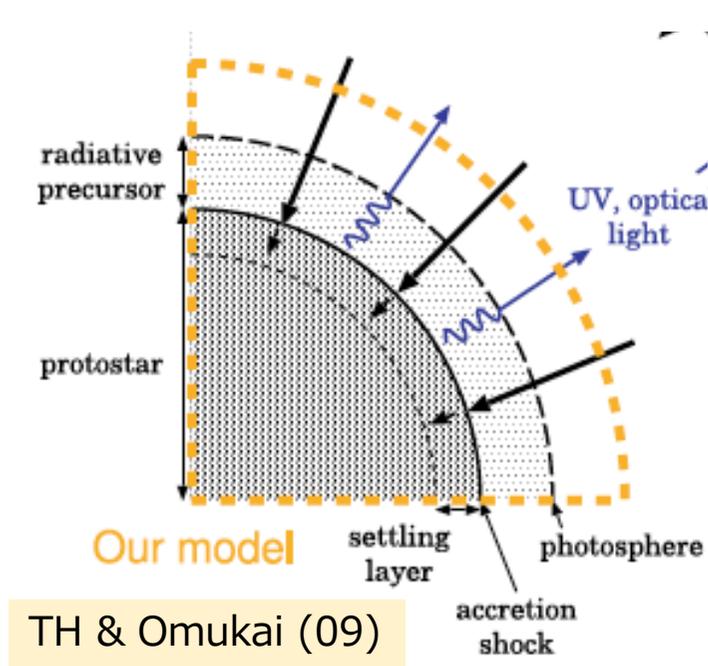


pancake状の高速回転原始星の出現 (w/ 初期乱流場による角運動量)

時間が経つほど、原始星の赤道面が伸び降着円盤が成長
(※ 原始星と円盤の明確な区別はない)

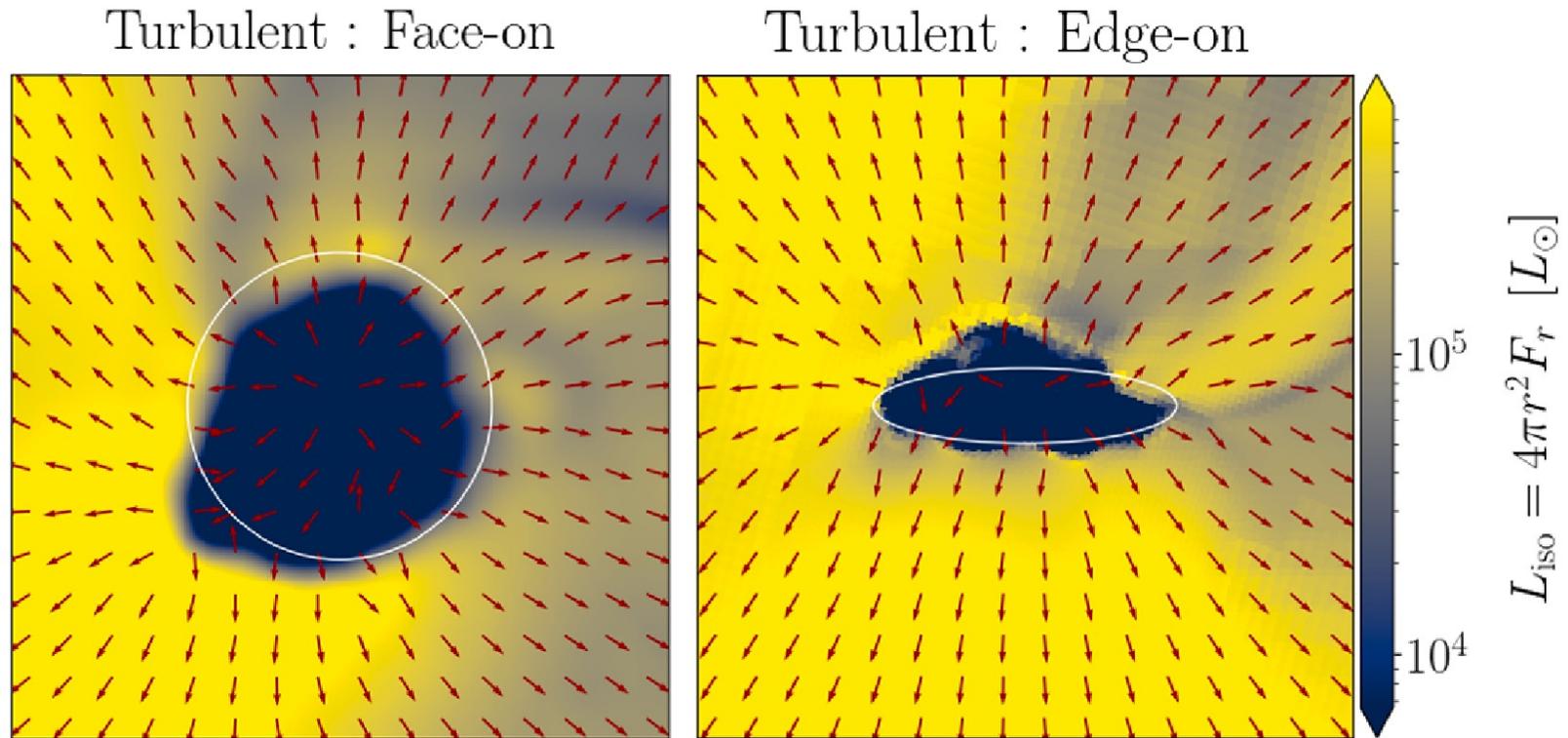
3D sims. *v.s.* 星の進化計算

星半径進化 (※ 降着衝撃波の外側、降着流中に光球面ができる)



3D計算は回転の極方向と赤道方向で差が拡大していく。が、平均的には星の進化計算の予言した、大半径(100-1000 R_\odot)原始星が出現 (c.f. Luo et al. 2018)

星内外の輻射場

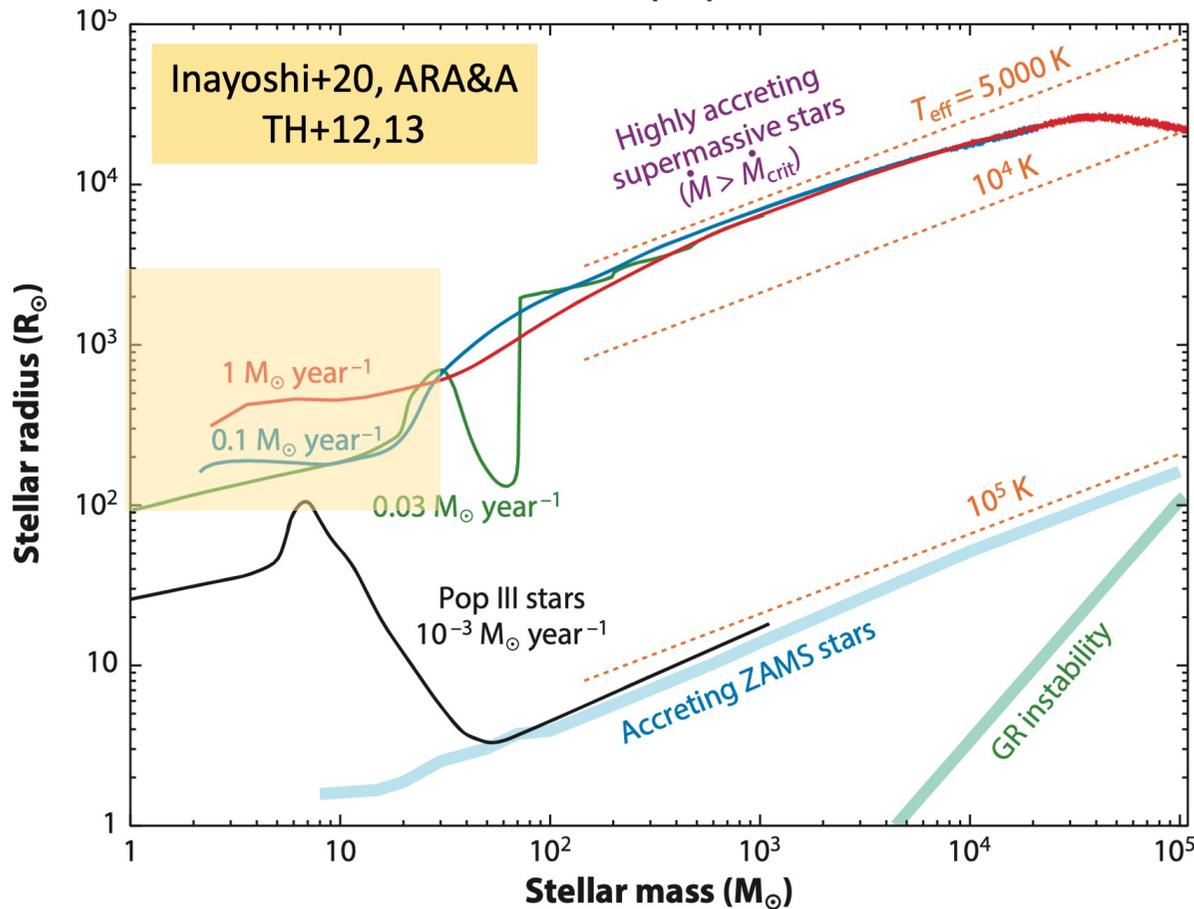
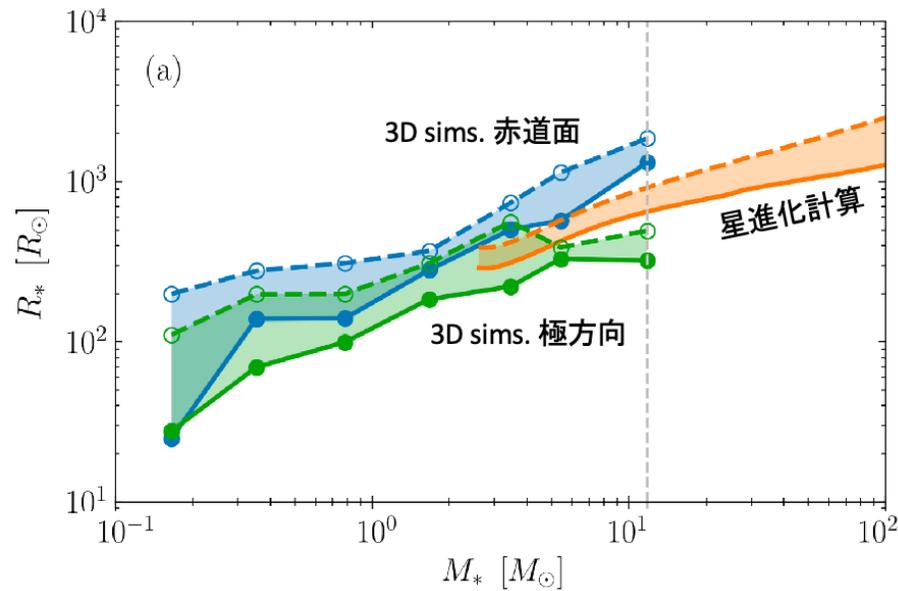


~ $10M_{\odot}$ の原始星に対し、光度 $L \sim 10^5 L_{\odot}$ (fluxの方向依存性あり)

~ Eddington value

降着障害の兆候なし。星外部は中性ガスで内部のみ電離状態
(※ $T_{\text{eff}} \sim 5000\text{K}$ で星周囲にはHII領域できず)

Outlook



← ほとんどの領域で1D
星の進化計算しかない

3D simulationsで開拓

※ 銀河系の星形成
でも同じ問題あり

Summary

+++ A new development in 3D simulations of Pop III star formation +++

急速降着する大質量原始星内部を直接分解する
3D輻射流体計算が可能になった

大光度かつ大半径の原始星が出現 (星の進化計算の予言と整合)

ただし、星は高速回転しその一部から星周降着円盤が成長していく
→ より長期の進化追跡