

初代星の質量降着進化 と最終質量

細川 隆史 (京大 天体核)

共同研究者： 大向 一行 (京大 天体核)

吉田 直紀 (IPMU)

Harold W. Yorke (JPL/

Caltech)

❖ 2010.12.20 理論懇 @ 基 ❖

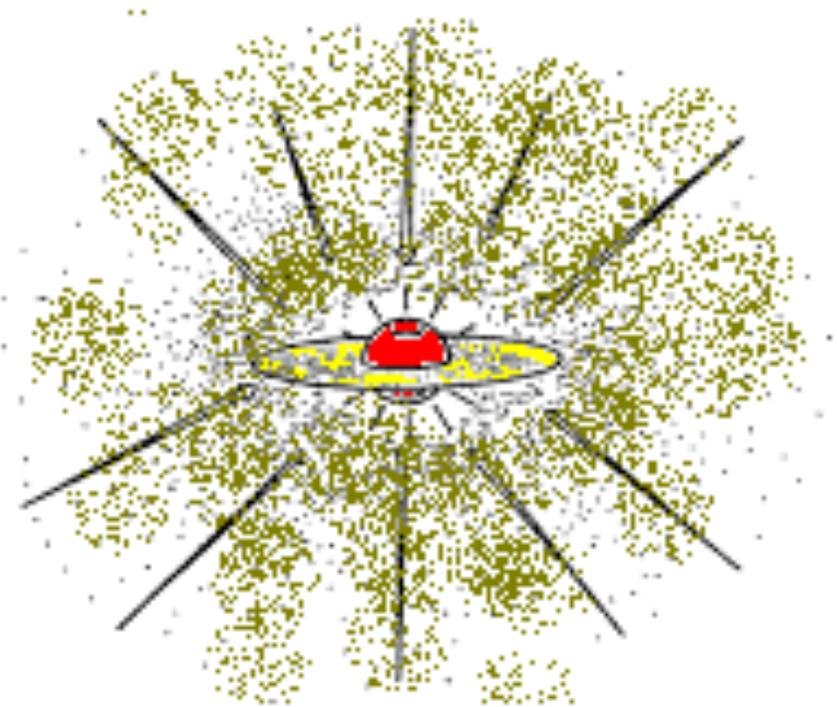
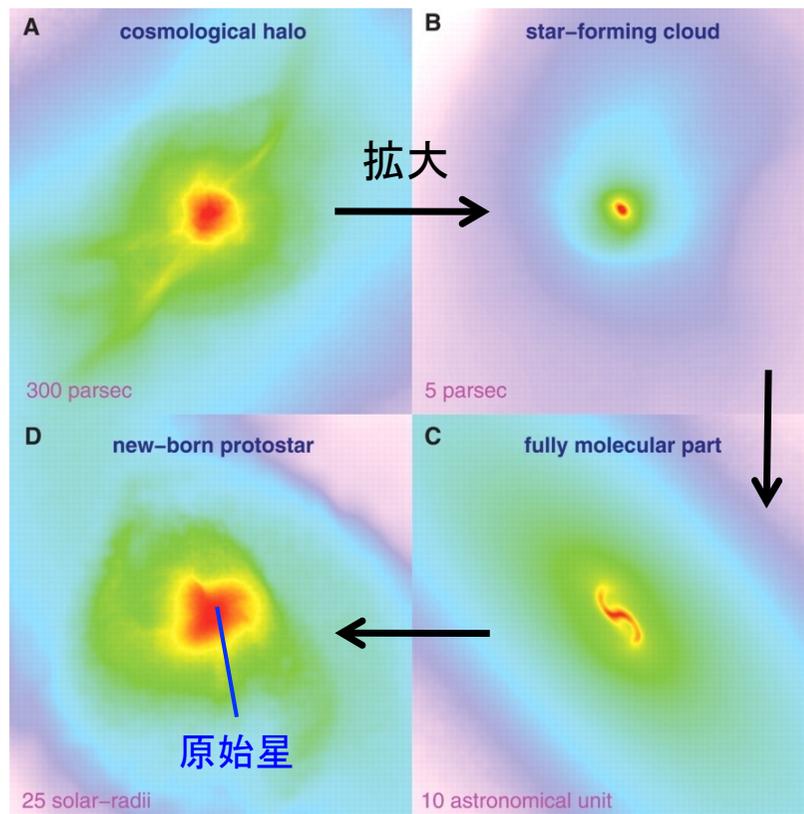
研

初代星は何太陽質量か

ハロー中のガスコア重力収縮 ⇒ 原始星への質量降着

吉田、大向、Hernquist (2008)

原始星形成時の密度分布射影図



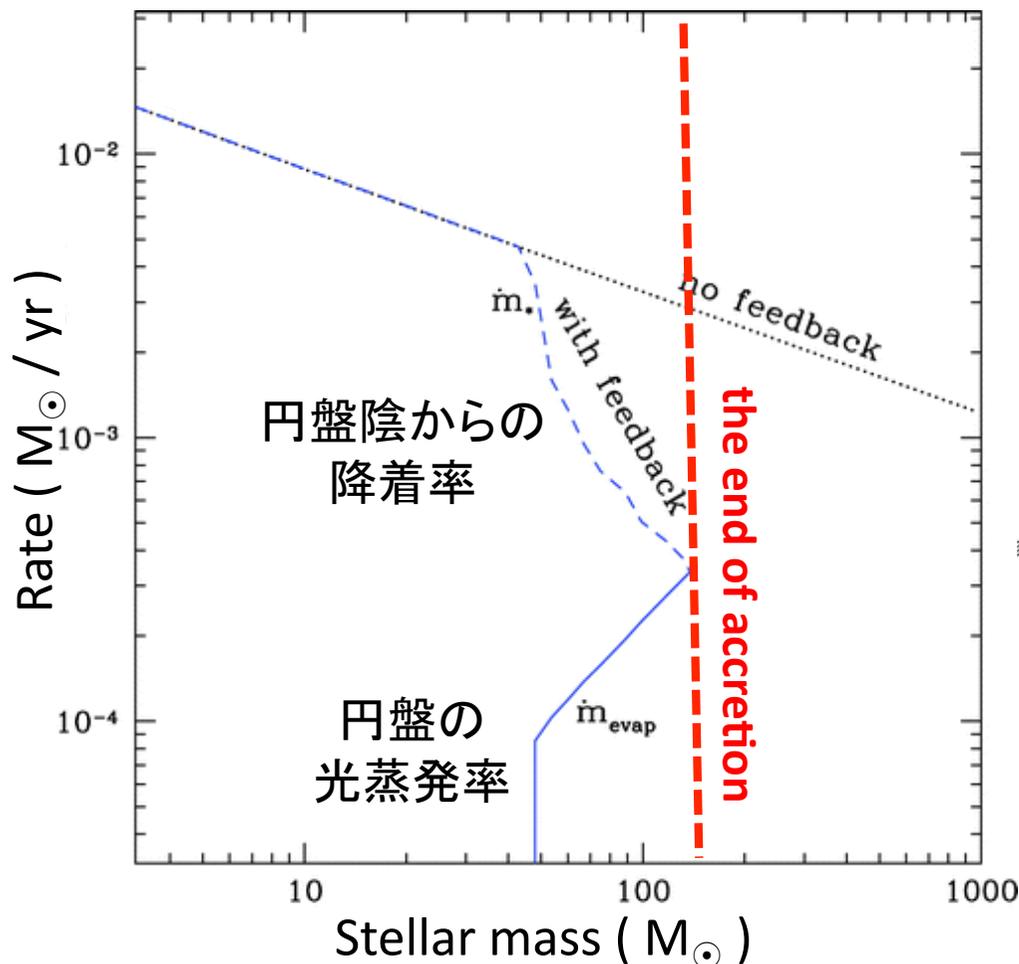
最終質量は降着が
いつ終わるかで決まる。

Collapse終了時: $10^{-2} M_{\odot}$ の原始星
 $10^3 M_{\odot}$ のガス

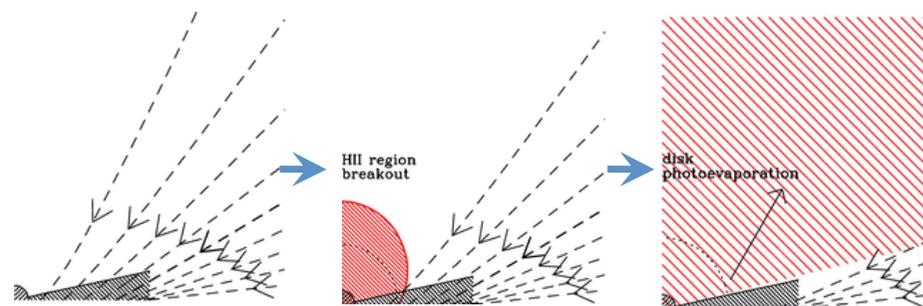
質量降着期の進化

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

星からのfeedbackなければ星が死ぬ前に全て降着可能 $\Rightarrow M_* \sim 1000 M_\odot$



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

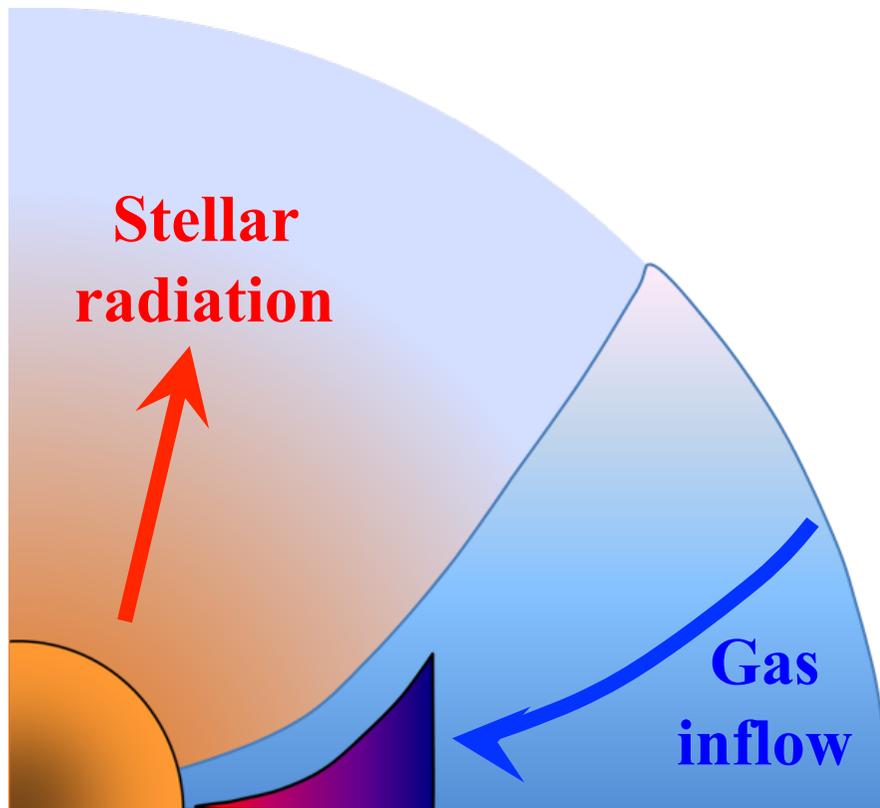


電離領域形成 + 円盤光蒸発

$M_* \sim 100 M_\odot$ で降着が止まると予想

研究の目的

- 星からのfeedbackを入れて質量降着期の進化を計算し、**初代星の最終質量を決める。**
- 特に電離領域形成にともなう円盤の光蒸発過程をくわしくしらべる



多次元性の効果を考える

- **ガス** 星周円盤をつくって赤道面から星へ降着
- **輻射** 円盤の極方向から優先的に抜ける

手法

輻射流体計算 (2次元軸対称) + 星進化計算

➤ Hydro + self-gravity

nested grid (入れ子格子)法 (e.g., Yorke & Bodenheimer 98)

➤ 化学反応

simplified network (15 reactions) with H, H⁺, H₂, e, H⁻

➤ 輻射輸送

輻射冷却 { - 連続光cooling (主にH free-bound opacityによる) **FLD**
- H₂ line cooling (各lineごとのτ考慮) **Sobolev近似**

Yoshida et al. 06

輻射feedback { - 光電離 (H+γ→H⁺ + e ; hv>13.6eV) **ray-tracing + FLD**
- 光解離 (H₂+γ→ 2H ; 11eV < hv <13.6eV)

Yorke & Welz 96

TH & Inutsuka 06

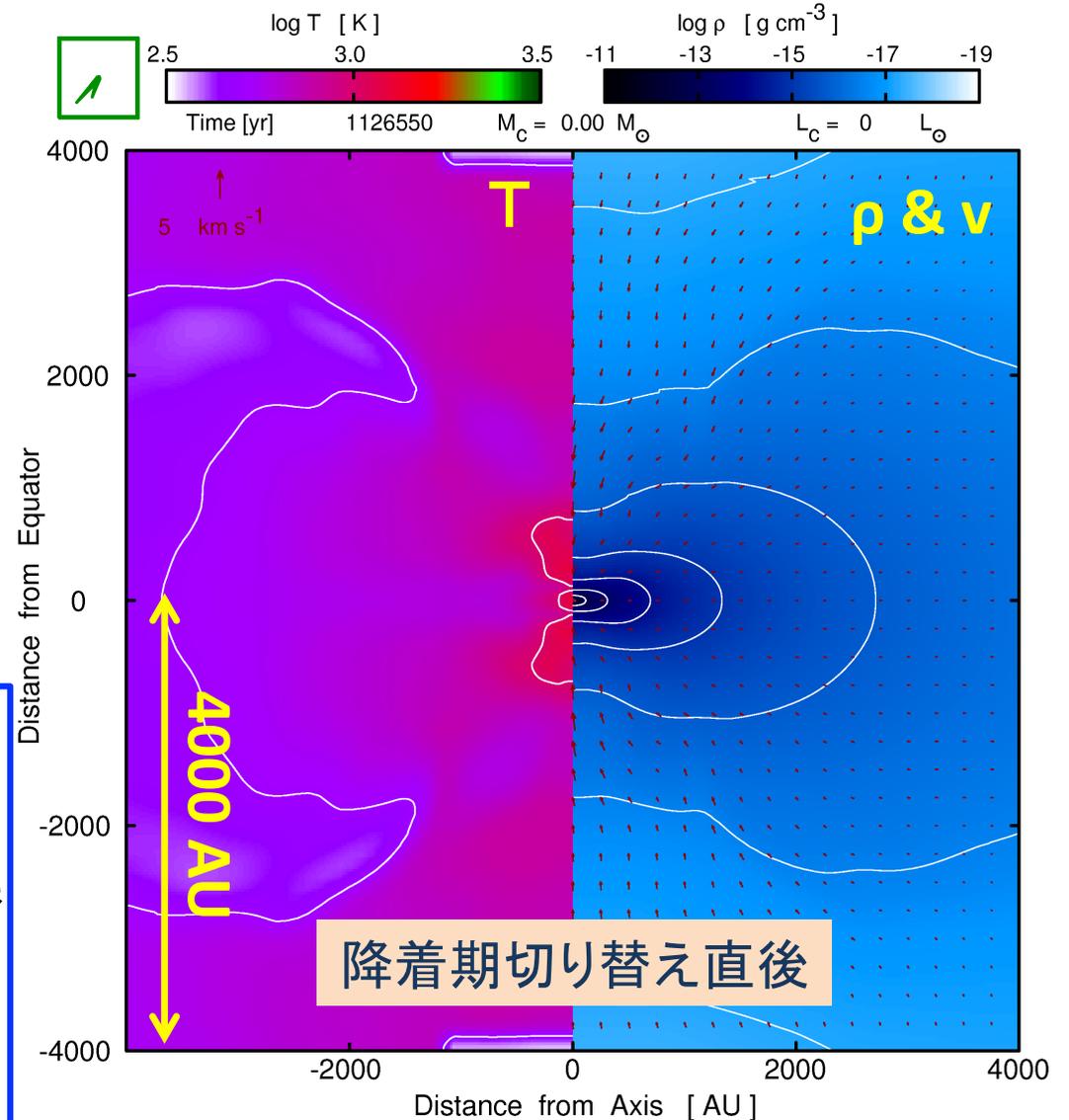
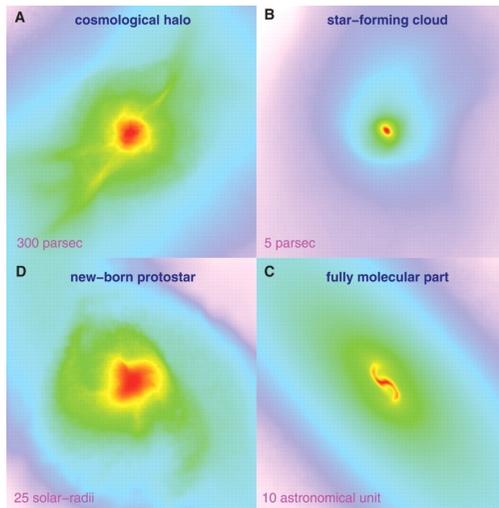
➤ 原始星進化

質量降着する星内部構造を数値計算 TH & Omukai 09

宇宙論的初期条件

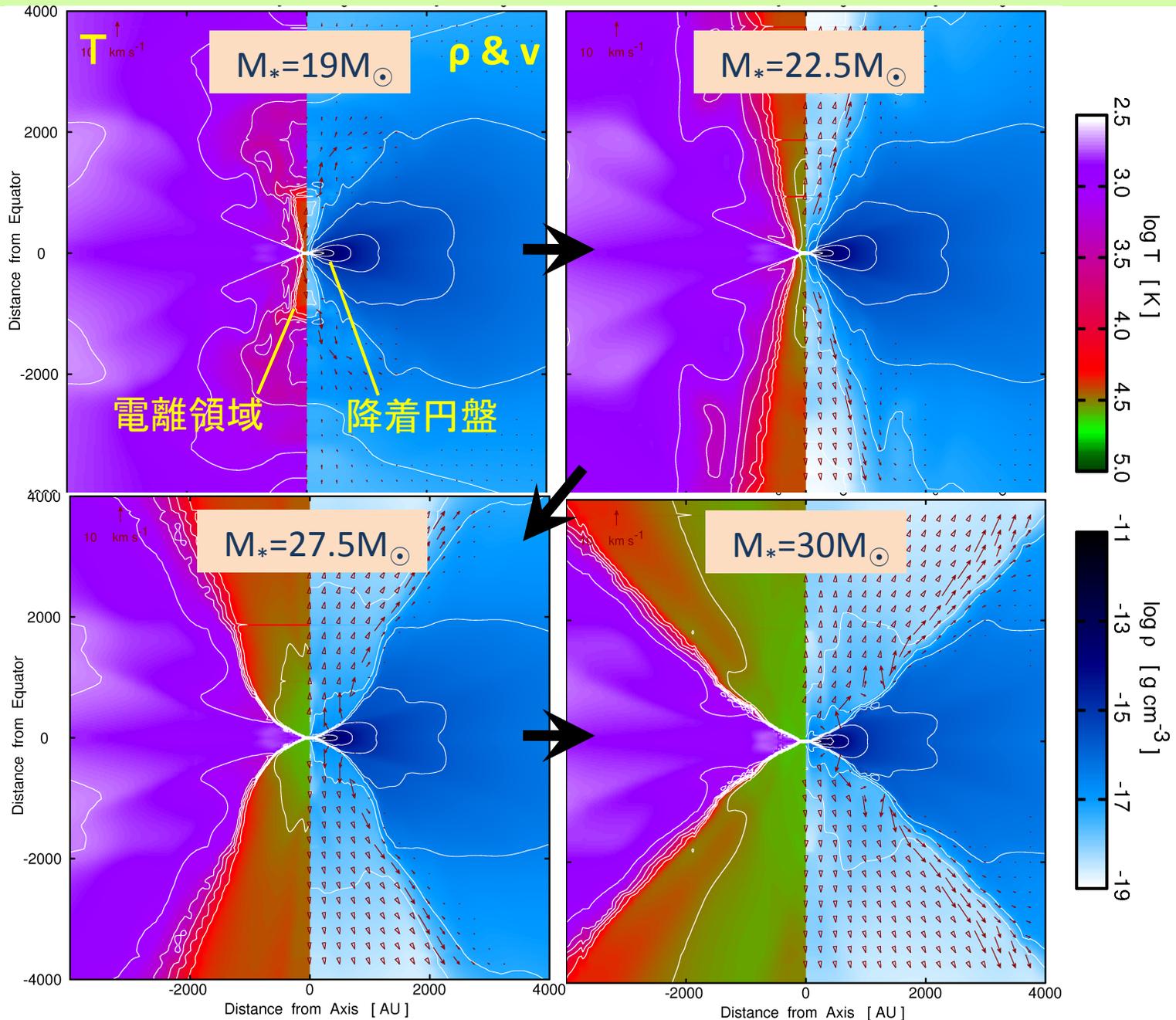
宇宙論的シミュレーションから
初期条件を作る

吉田
計算



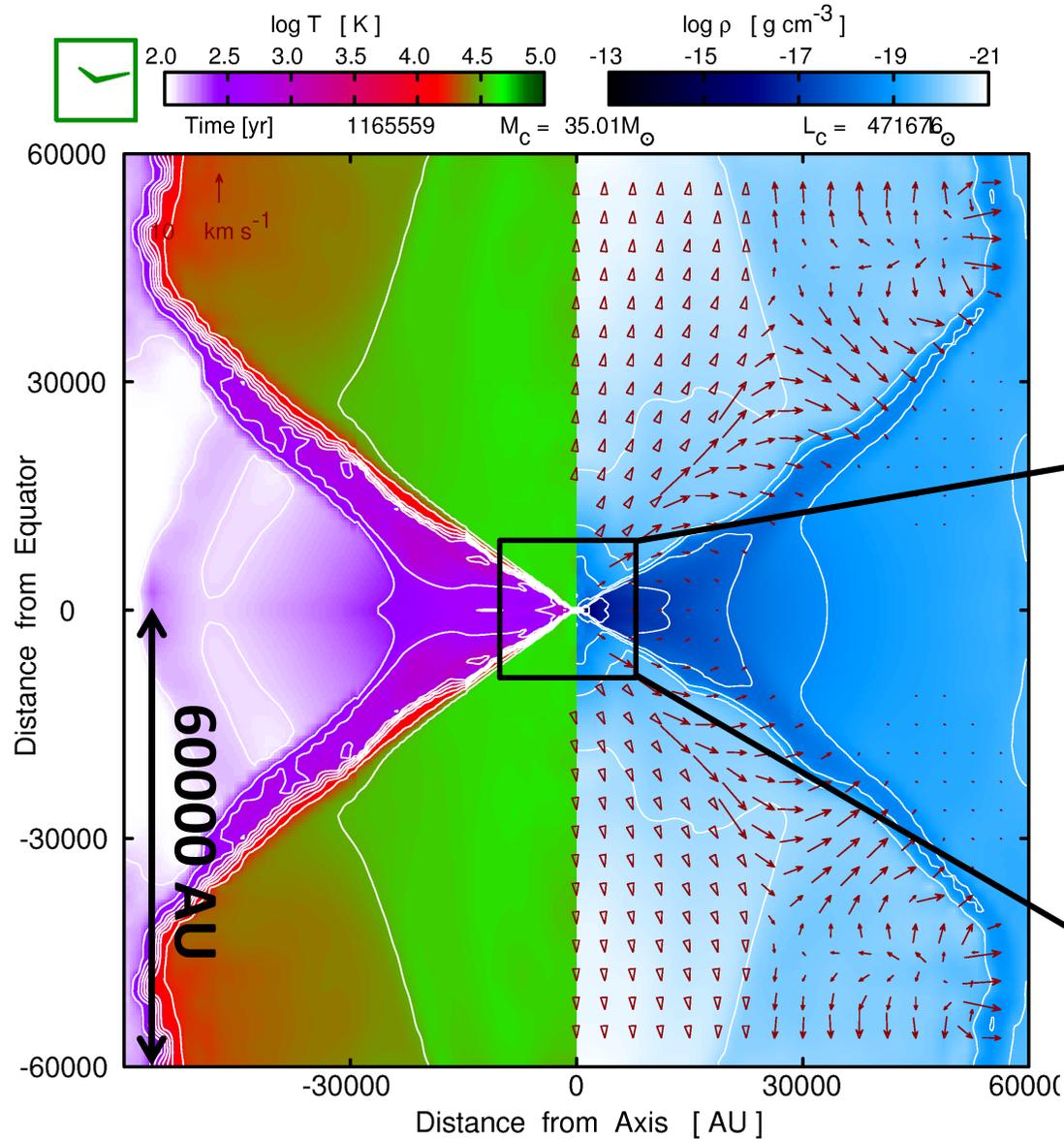
- run-away collapse途中から開始
(中心密度 $n_c \sim 10^6 / \text{cc}$ の時)
- $n_c \sim 10^{12} / \text{cc}$ になるまで軸対称下で
collapse計算
- その後中心にsink (10pc) を置いて
降着期進化に切り替え

降着期: 電離領域の形成

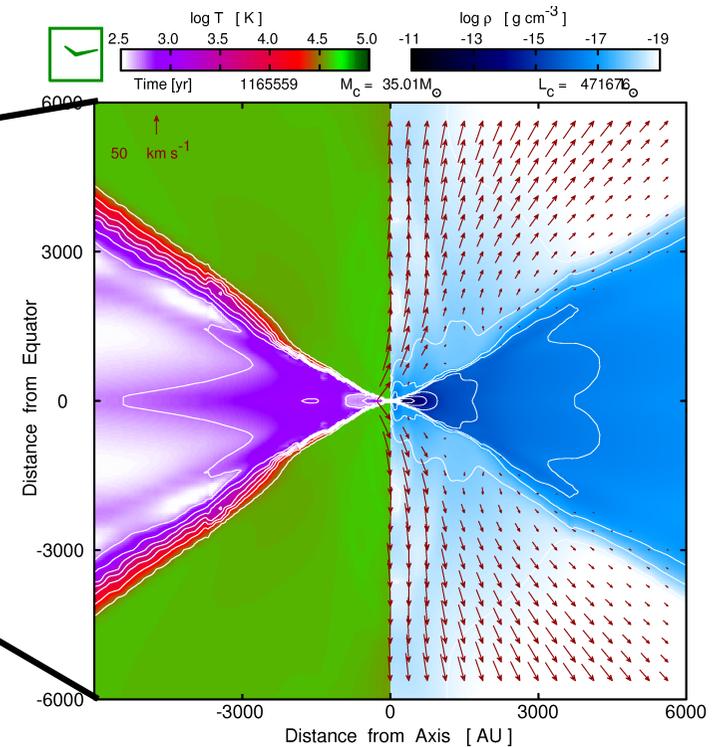


電離領域膨張と円盤光蒸発

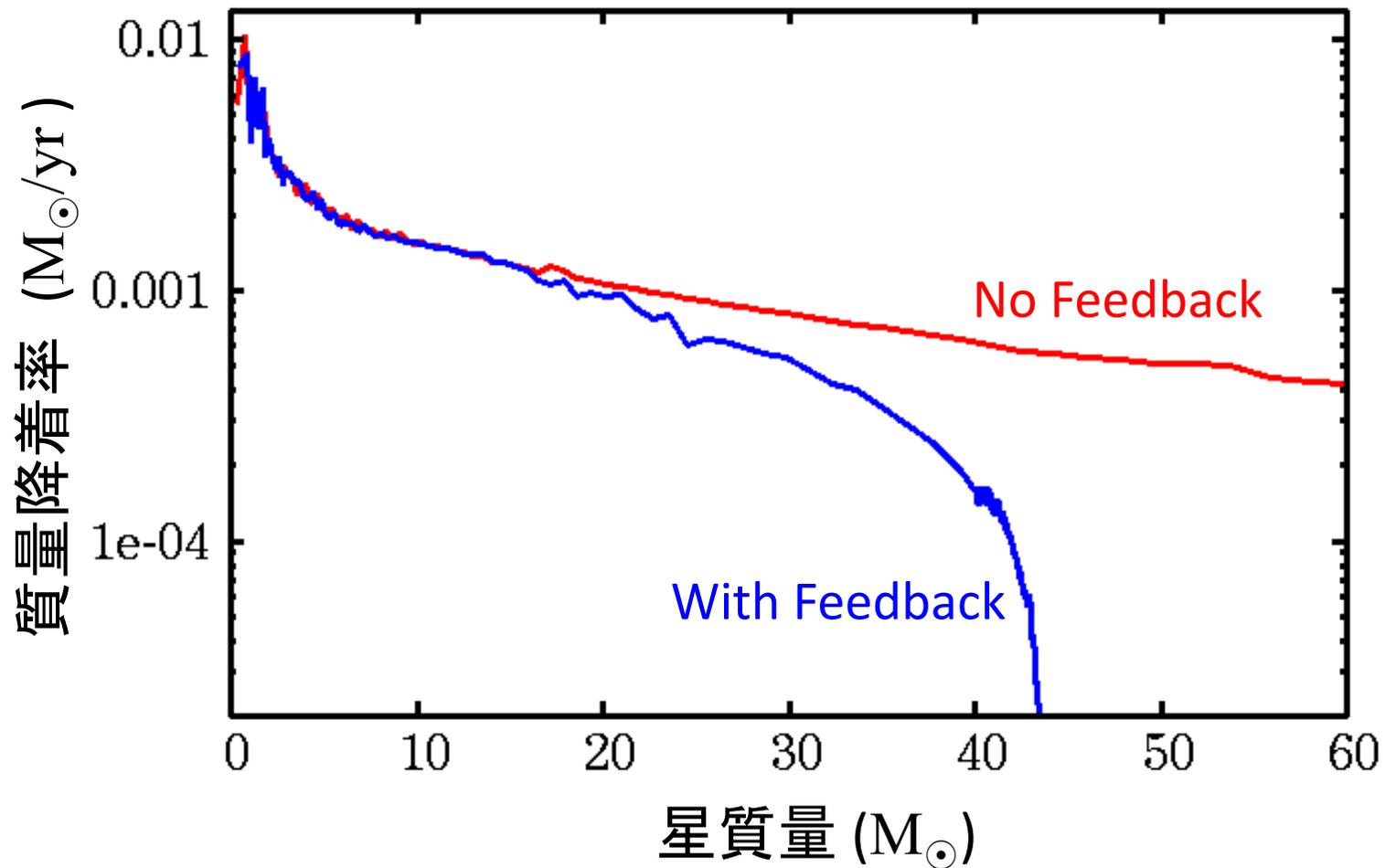
Snapshot @ $M_* = 35M_\odot$



- 電離領域の膨張
 - 極方向に大きく膨張
 - 円盤の陰以外のガスは飛ばされる
- 円盤光蒸発
 - a few x 10 km/s で極方向に抜ける

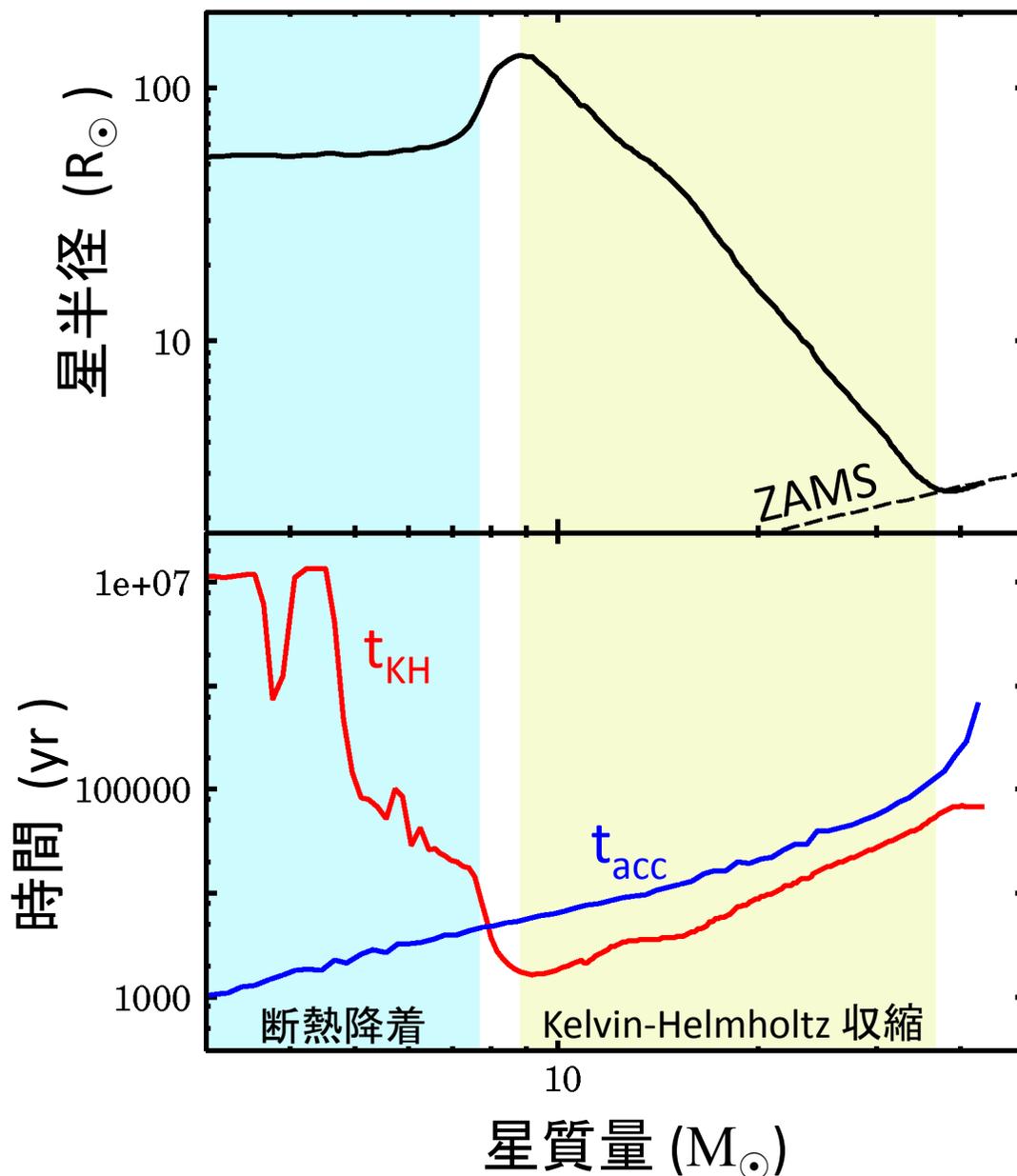


降着率の進化



- 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。

原始星の進化

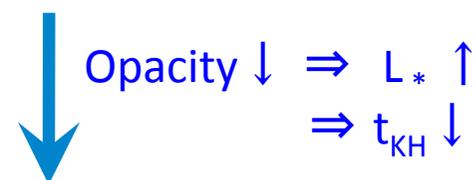


ゼロ年主系列 (ZAMS) 到着後
しばらくして降着終了

2つの重要時間スケール

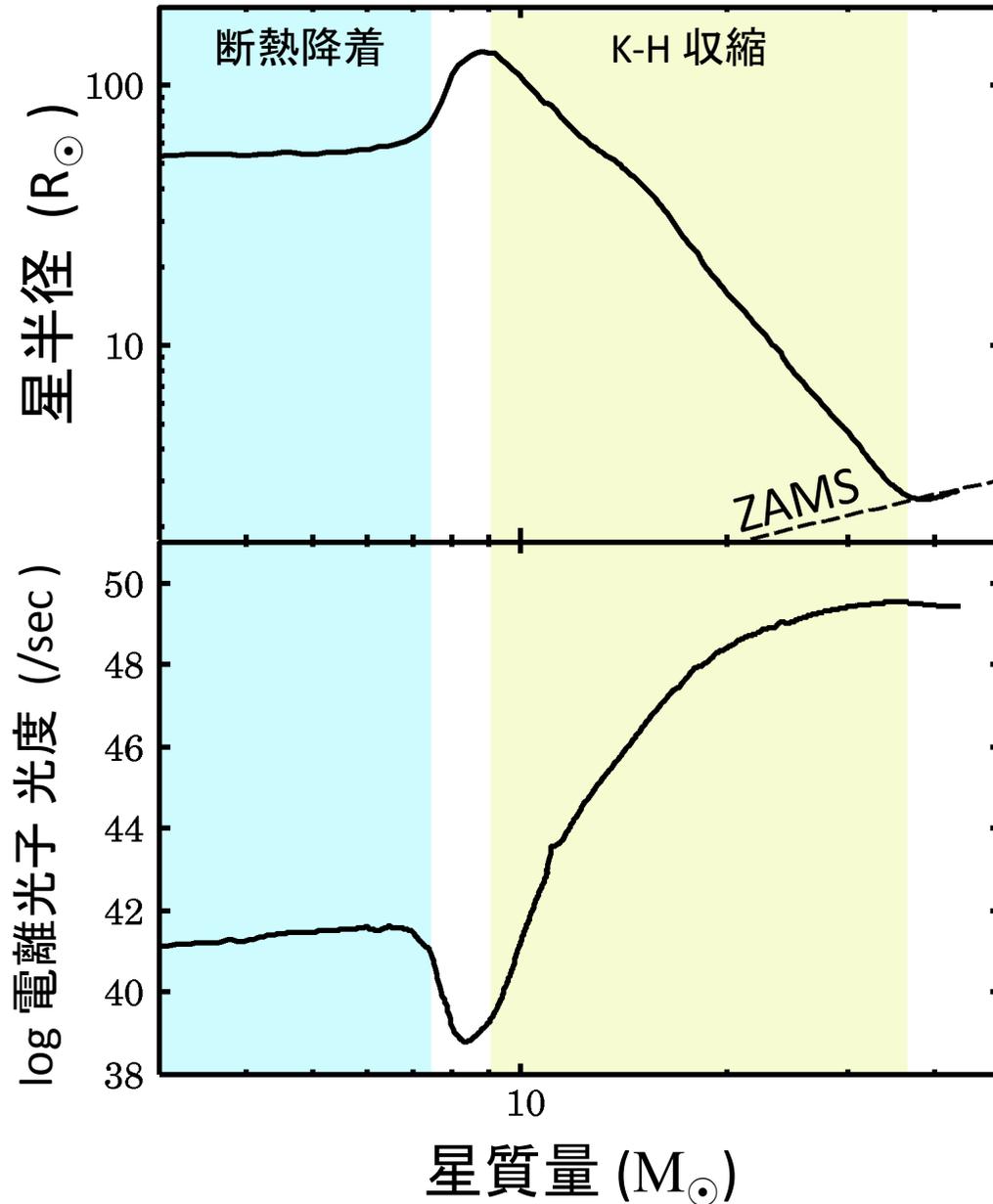
$$t_{\text{acc}} = \frac{M_*}{\dot{M}}, \quad t_{\text{KH}} = \frac{GM_*^2}{R_* L_*}$$

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光の進化



Kelvin-Helmholtz 収縮期

星の重力energy解放による

luminosity \uparrow

+

収縮 (半径 \downarrow)



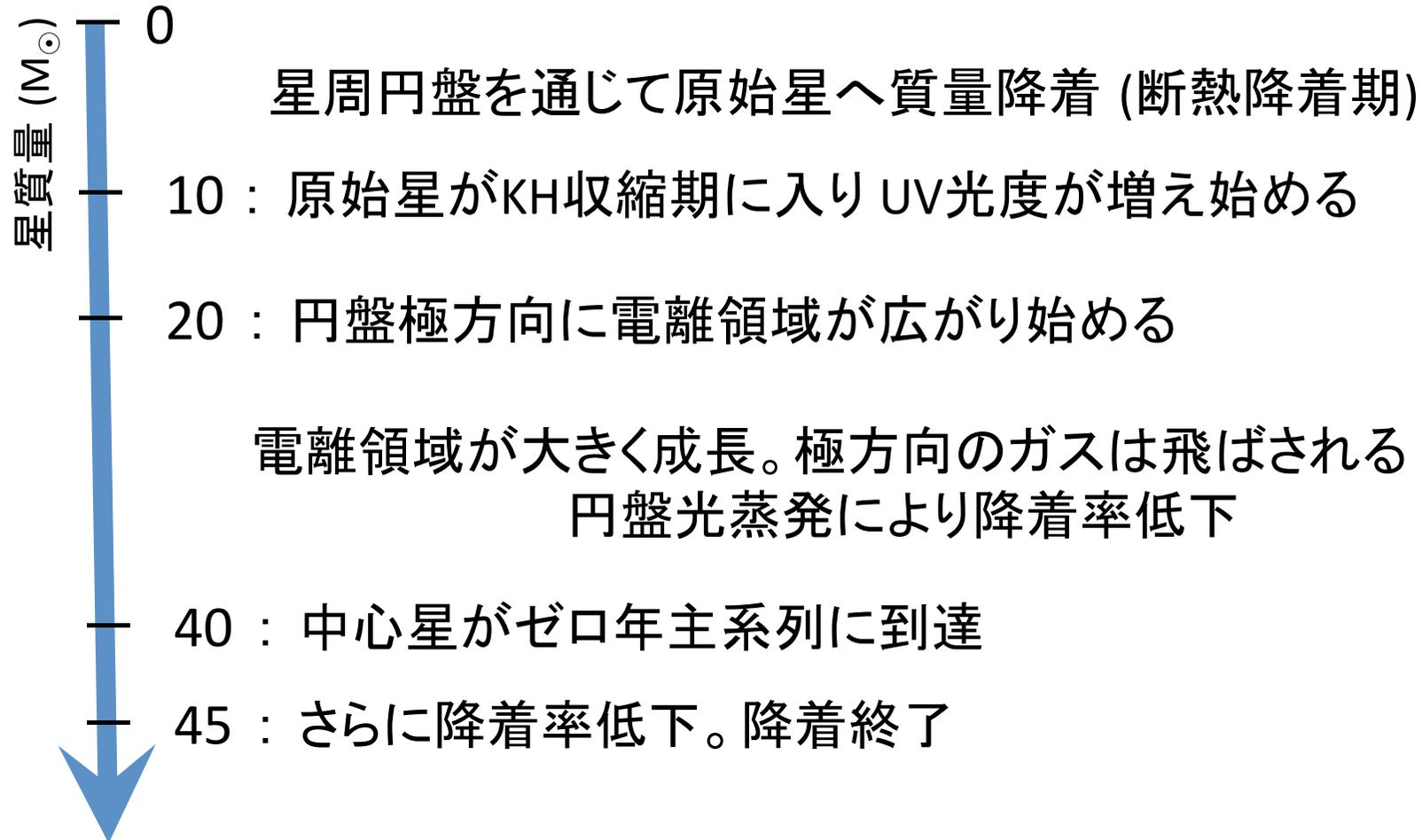
有効温度: $T_{\text{eff}} \uparrow$

UV光度 \uparrow

KH収縮期 \rightarrow 主系列にかけて
急激にUV feedbackが働き
降着を止める

Summary

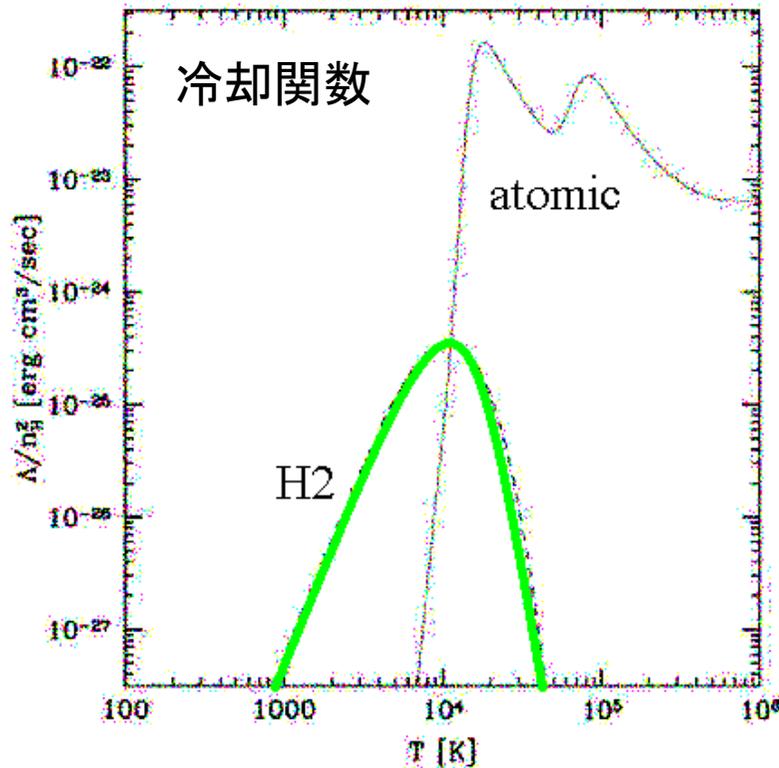
初代星の最終質量を調べるため、質量降着期の進化を計算



宇宙論的初期条件 → 最終質量 $< 100 M_{\odot}$

Supplementary Pages

銀河系との違い



金属量=0 (重元素なし、ダストなし)

のため熱・化学過程が異なる

← 冷却過程

10000 K 以下では水素分子のline放射で冷却

(CII,OI,CO, dust cooling etc.@ 銀河系)

H₂形成

- **H⁻ channel** : e触媒 (低密度 ; $n < 10^8 \text{cm}^{-3}$)



- **3体過程** (高密度 ; $n > 10^8 \text{cm}^{-3}$) $3 \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$

(ダスト上表面反応 @ 銀河系)

Sink内でのUV光子消費

➤ 電離領域形成の特徴的スケール

- 電離ガスの重力半径 : $R_g = GM_*/c_s^2 \sim 300 \text{ AU}$
- sink cellの大きさ : $R_{\text{sink}} \sim 10 \text{ AU}$
- 原始星半径 : $R_* \sim 1-100 R_\odot$

PROBLEM

UV photons are mainly consumed near the protostar by recombination but, no spatial resolution there ($r < R_{\text{sink}}$)

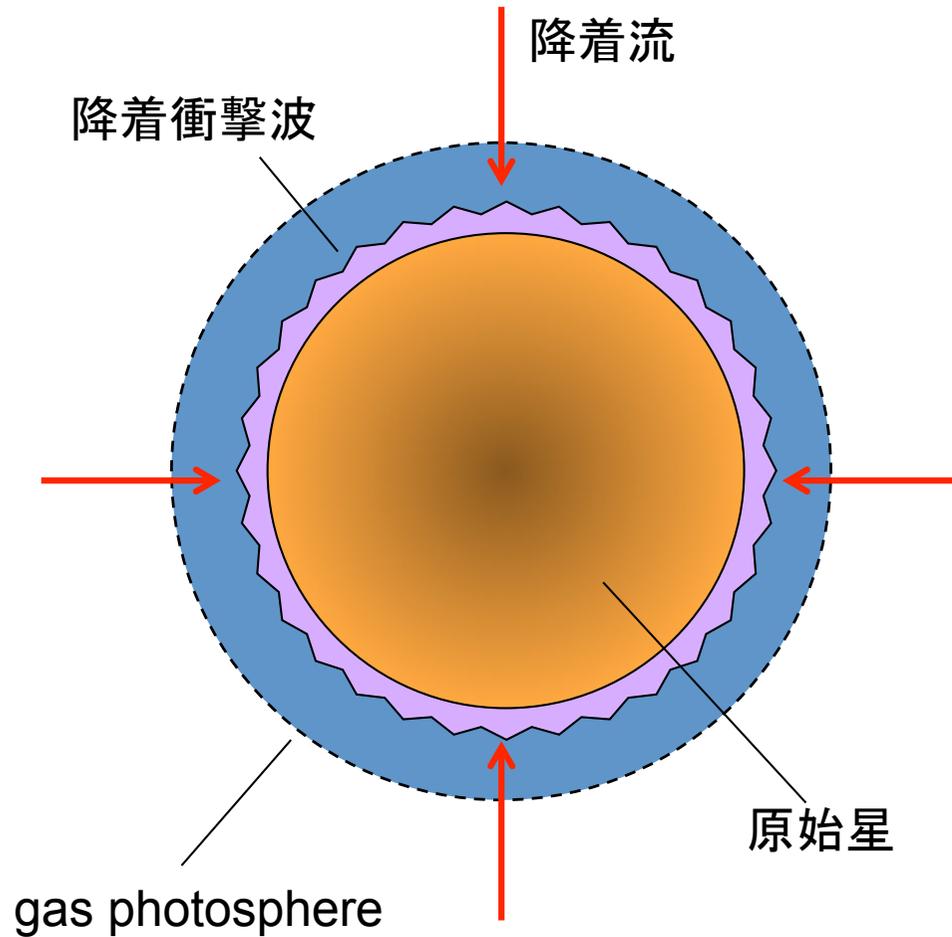
We consider the “**evacuation zone ($r < R_{\text{ev}}$)**”, where $R_{\text{sink}} < R_{\text{ev}} < R_g$, and estimate the UV consumption rate assuming the density profile at $r < R_{\text{ev}}$.

Using the (spherical) free-fall flow with density on Z-axis ρ ($Z = R_{\text{ev}}$) as a boundary value,

$$\text{UV consumption } r S_{\text{csm}} = \frac{\beta \dot{M}^2}{8\pi\mu^2 GM_*} \ln\left(\frac{R_{\text{ev}}}{R_*}\right)$$

原始星進化の計算

各金属量での降着率のもとで原始星の進化 (e.g., 半径, 光度) が
どうなるか原始星の構造を解いて調べる (e.g., Hosokawa & Omukai '09)



Basic eq.: 4 stellar structure eqs.

$$\text{Continuity: } \frac{\partial r}{\partial m} = \frac{1}{4\pi\rho r^2}$$

$$\text{Momentum: } \frac{\partial P}{\partial m} = -\frac{Gm}{4\pi r^4}$$

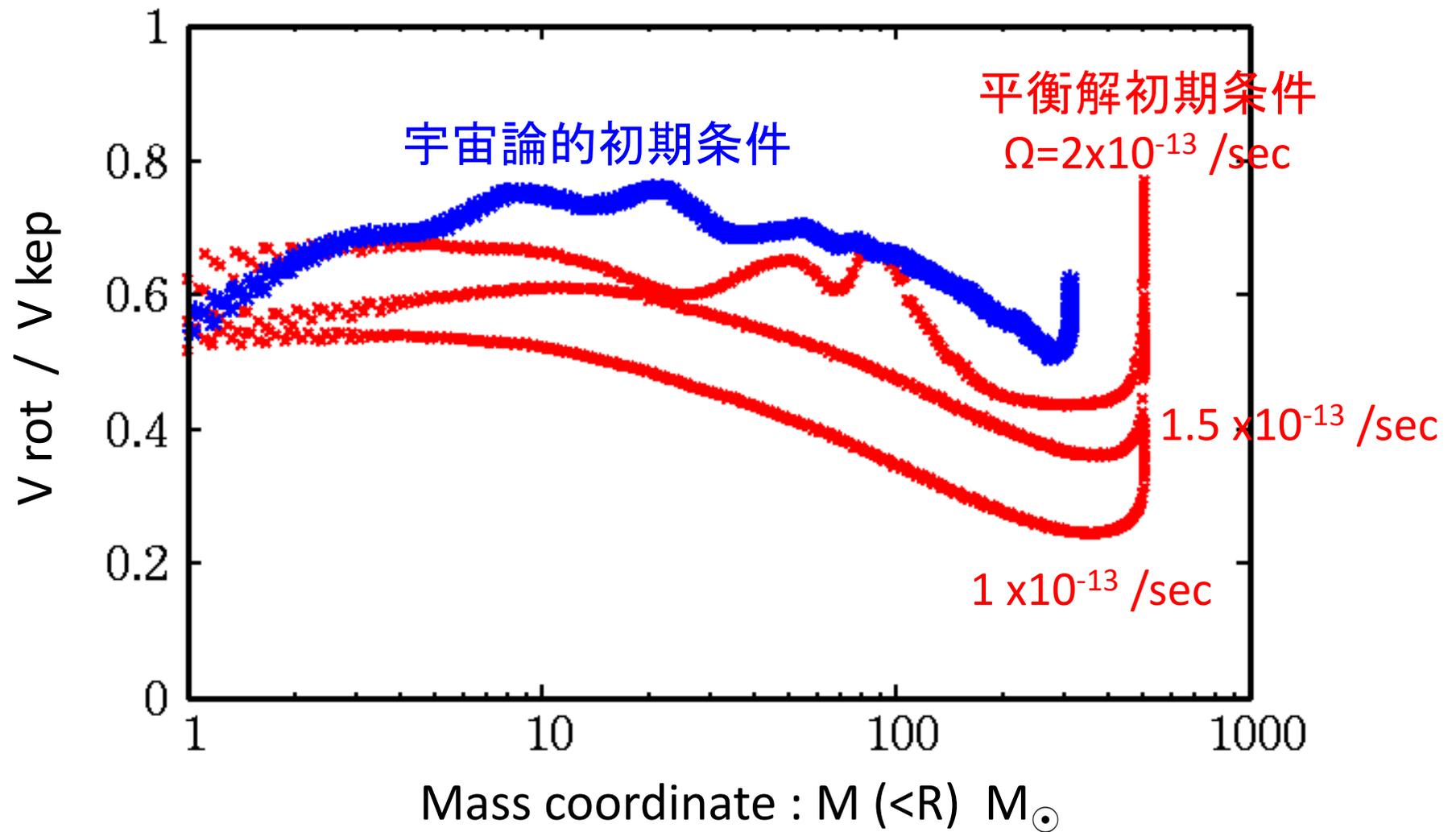
$$\text{Energy: } \frac{\partial l}{\partial m} = \epsilon_{\text{nuc}} + T \left(\frac{\partial s}{\partial t} \right)_m$$

$$\text{Heat transport: } \frac{\partial T}{\partial m} = -\frac{T}{P} \frac{Gm}{4\pi r^4} \nabla$$

外部の定常降着流とshock条件で
接続

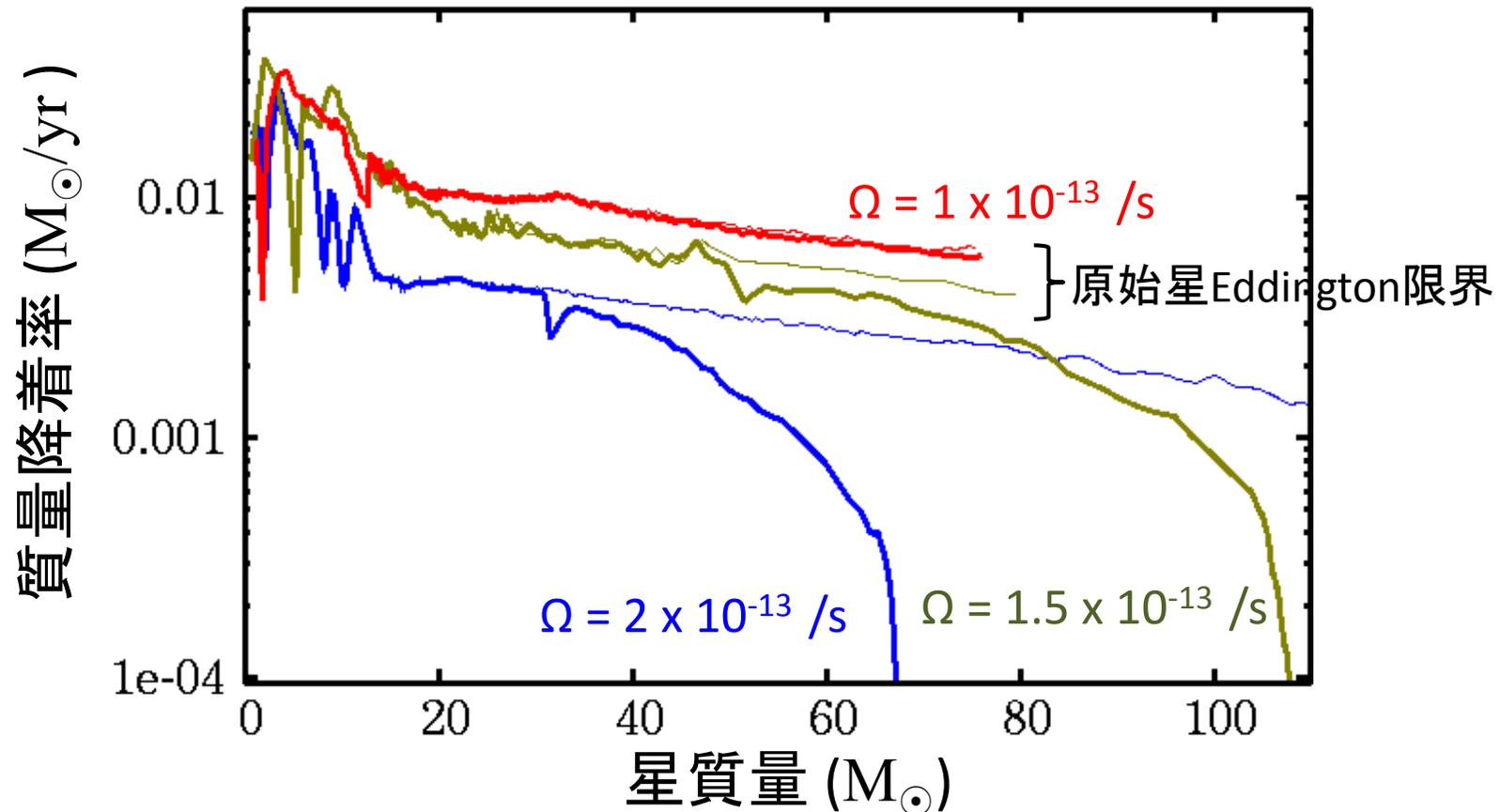
回転強度の比較

中心密度: $n_c \sim 10^{12}/\text{cc}$ の時点での回転速度分布



宇宙論的初期条件は回転強い場合に相当

回転強度の依存性



- 強回転: 電離領域膨張 + 円盤光蒸発
⇒ **upper mass limit at $M_* \sim < 100 M_{\odot}$**
- 弱回転: 電離領域膨張は遅れる ⇒ more massive star?
(但し、原始星のEddington限界に達する)

α -parameter依存性

