

低金属量環境下での 原始星進化と星の最終質量

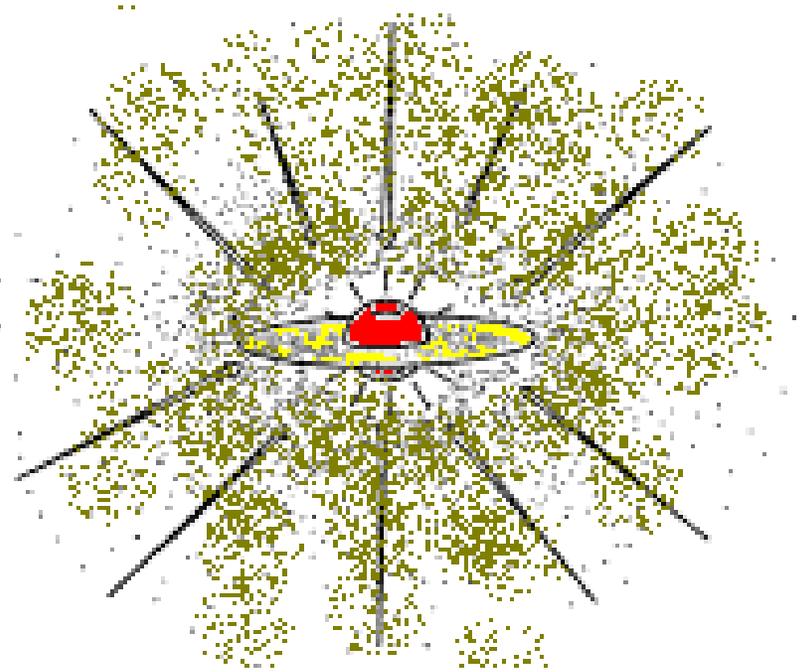
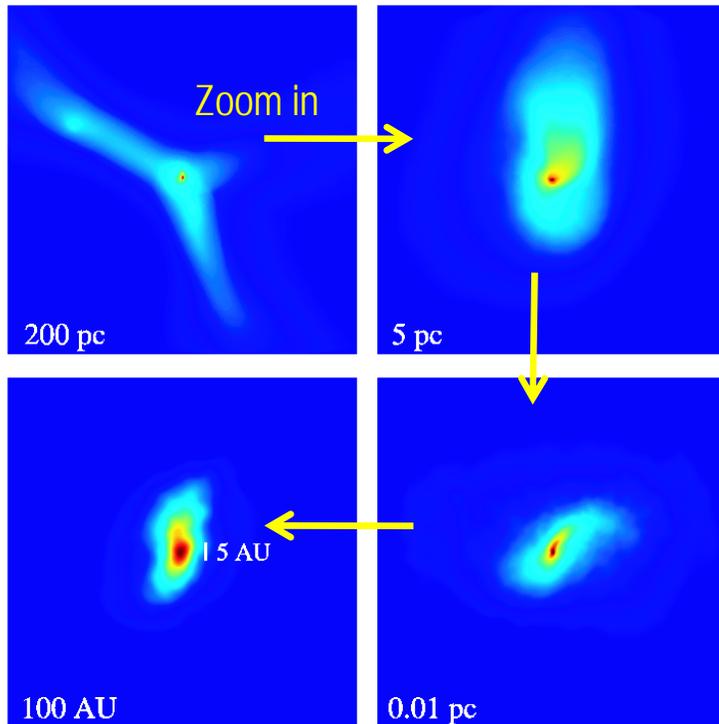
細川 隆史 (国立天文台)

共同研究者: 大向 一行

初代星の最終質量

ハロー中のガスコア重力収縮 ⇒ 原始星への質量降着

Yoshida et al. 06
密度分布の射影図



星の最終質量は降着がいつ終わるかで決まる。

元のガス雲全部降り積もるまで止まらない: $M_* \sim 1000M_{\odot}$

中心星のfeedbackで止まる: $M_* \sim 100M_{\odot}$ (UV光 McKee & Tan 08 他)

c.f. 銀河系の大質量星

現在のOB型星形成では星からのfeedback: **ダストにはたらく輻射圧**が非常によく効く。

予想される降着率:

$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \sim 2 \times 10^{-6} M_\odot/\text{yr} \left(\frac{T}{10\text{K}} \right)^{3/2}$$

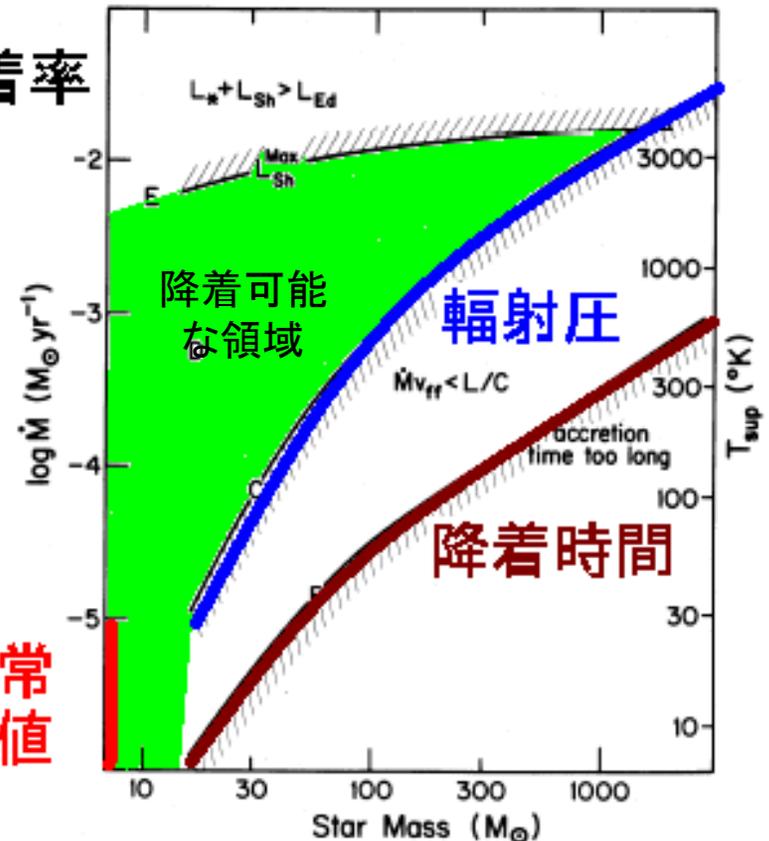
普通の降着率では降着は簡単に止められる。

▶ 大質量星形成問題

OB型星がどのように形成されたか分かっていない

降着率と星の上限質量

降着率



通常
の値

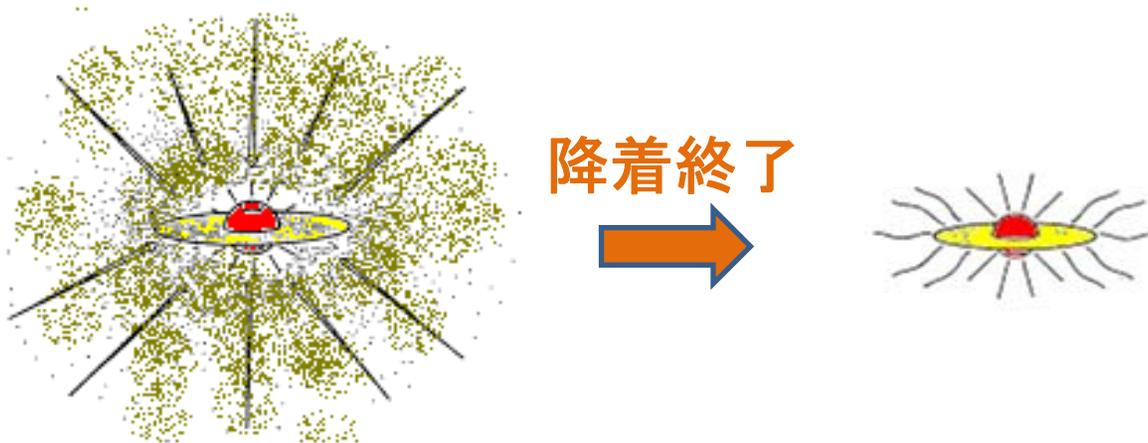
形成可能な質量

Wolfire & Cassinelli (1986)

Motivation

では、低金属量($0 < Z < Z_{\odot}$)の環境ではどうなるか？

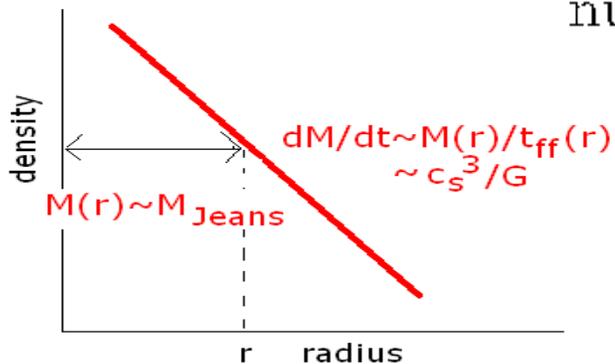
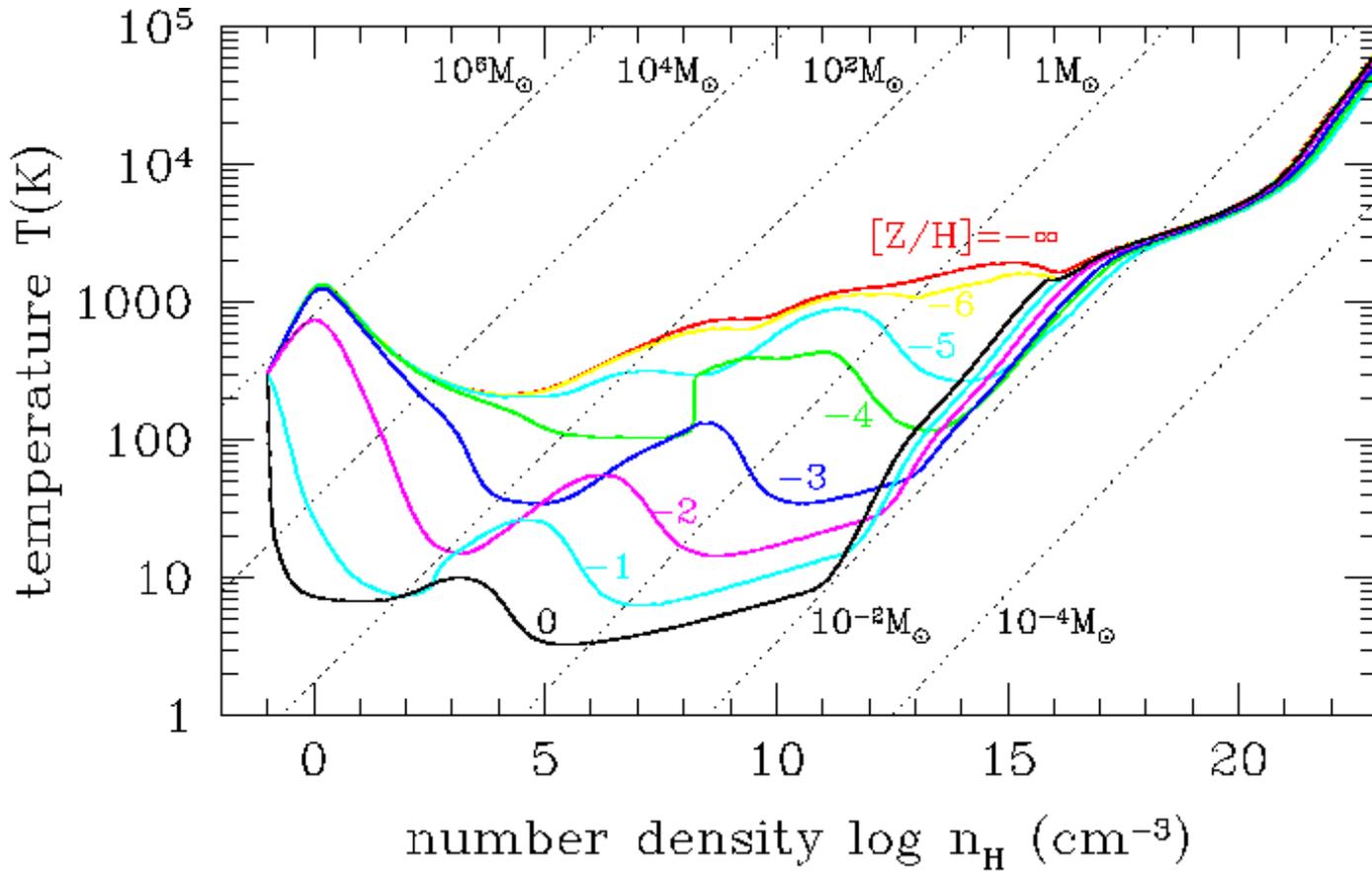
- * 質量降着がいつどのようにして止まるか
- * 金属量によってどのように変わるか



Approach

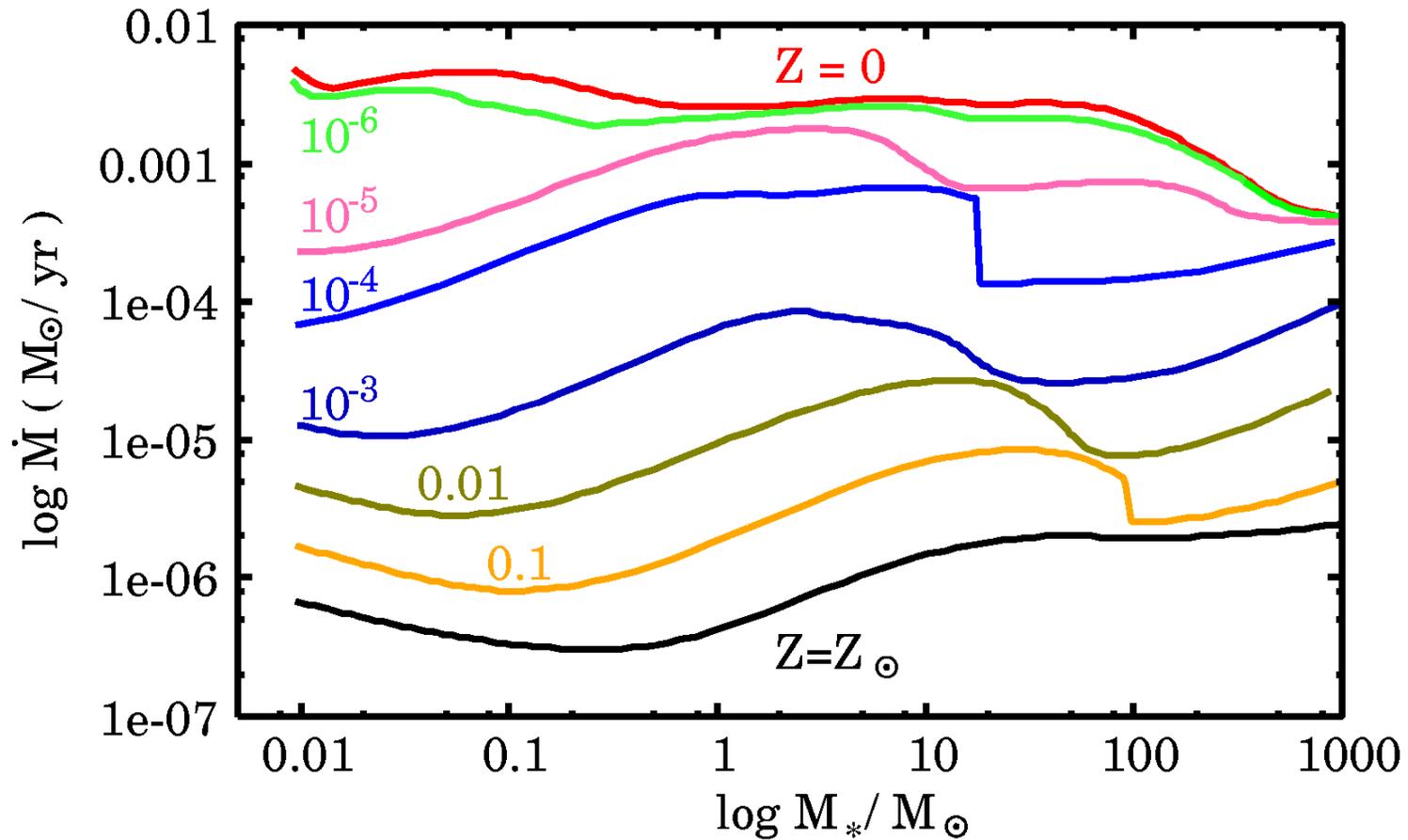
- ① 各 Z ごとのガスの熱進化 \Rightarrow 原始星への降着率
- ② 原始星進化: 星の構造を数値計算
- ③ 降着外層(球対称)に対するfeedbackを評価

金属量とガスの熱進化



(T, ρ) から ($c_s^3/G, M_{\text{Jeans}}$) を計算し、
降着率を星質量の関数として見積もる

金属量と降着率

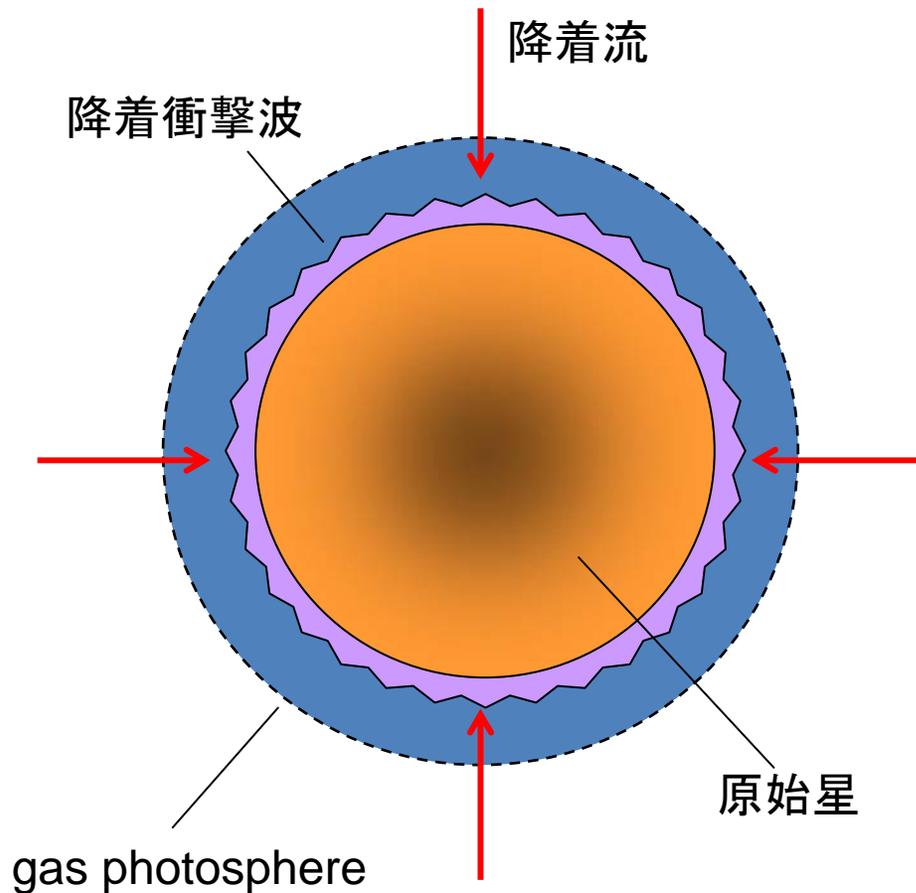


金属量が低いほど降着率が大きい

$\dot{M} \sim \frac{c_s^3}{G} \propto T^{3/2}$ であり、低金属量ほどガスが高温のまま密度を上げていくため

原始星進化の計算

Basic eq.: 4 stellar structure eqs.



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

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

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

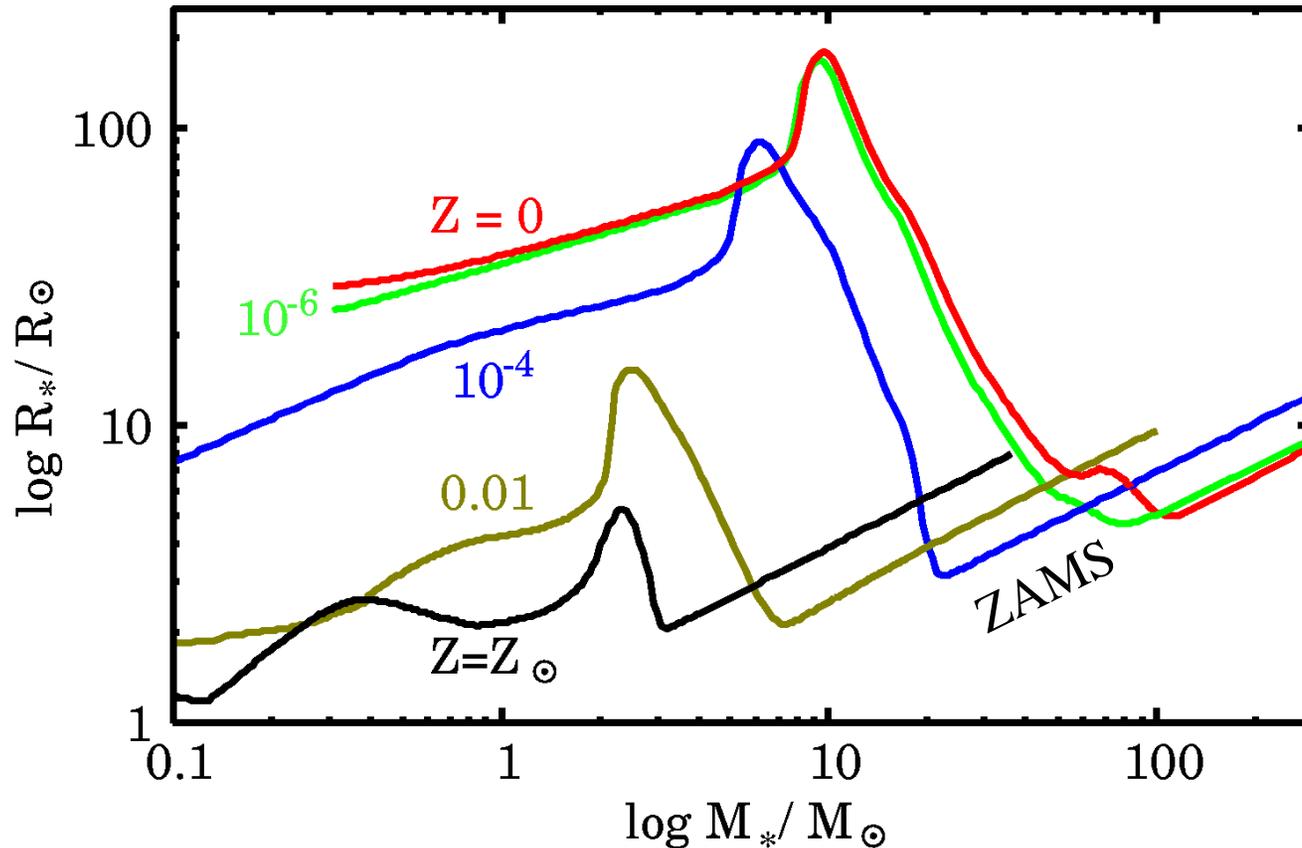
$$\text{Heat transport: } \frac{\partial T}{\partial m} = -\frac{T}{P} \frac{Gm}{4\pi r^4} \nabla$$

外部の定常降着流とshock条件で
接続

- 降着率は各Zに応じたガスの熱進化から与える

金属量と原始星進化

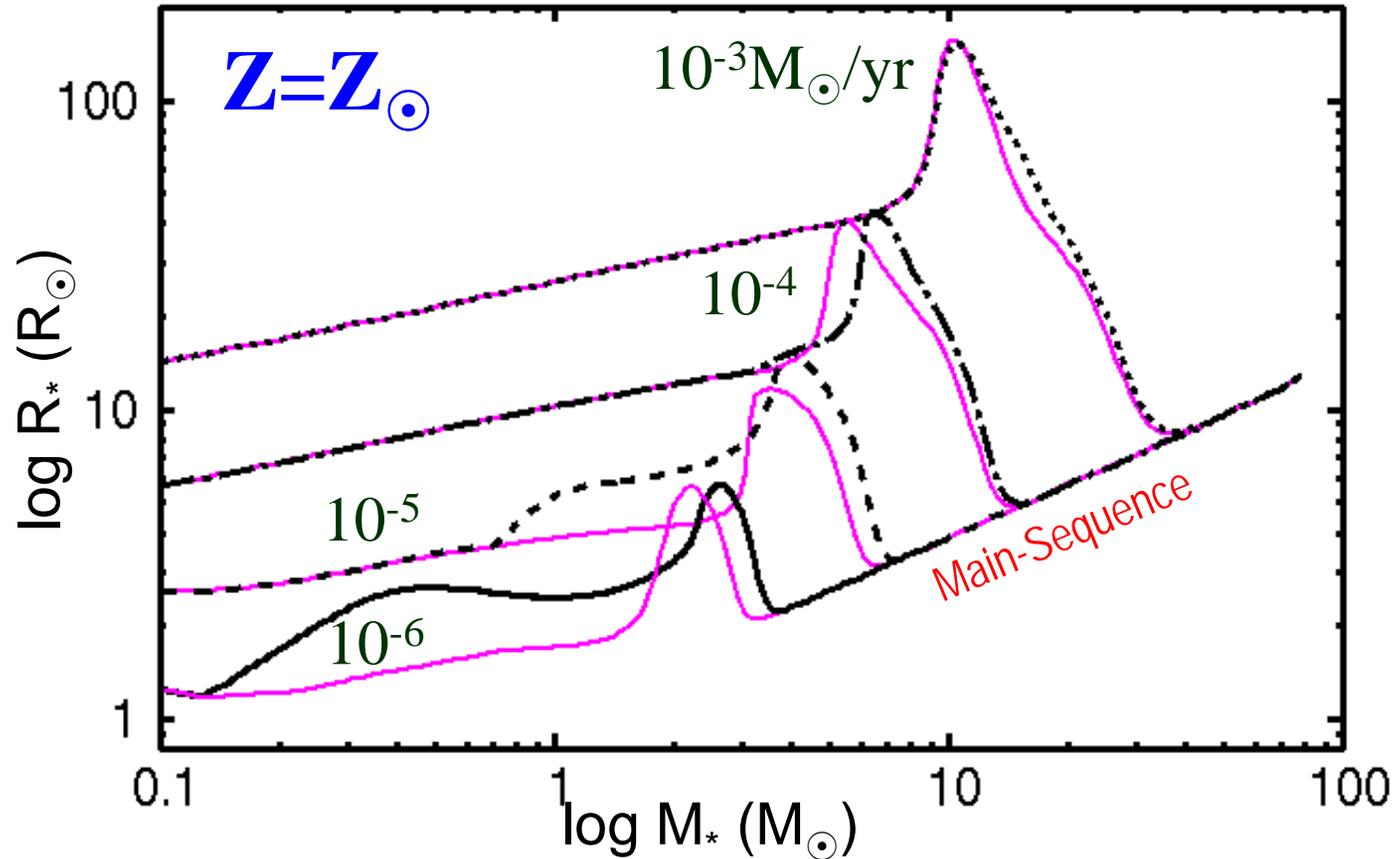
星質量－半径関係



金属量が低いほど - 原始星の半径が大きい
- ZAMSに至る質量が大きい
主に降着率が大きいことを反映

降着率の依存性

星質量—半径 関係



- 降着率が大きいと、
- 同質量で原始星の半径が大きい
 - 主系列に達する質量が大きい

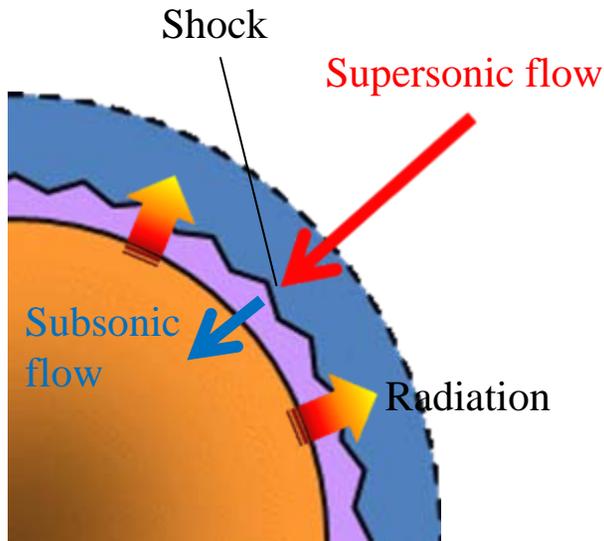
Why large R_* with high \dot{M} ?

星内の典型的密度、圧力: $\rho \sim \frac{M}{R^3}$ $P \sim G \frac{M^2}{R^4}$

単原子理想気体の単位質量あたりエントロピー: s

$$s = \frac{3\mathcal{R}}{2\mu} \ln \left(\frac{P}{\rho^{5/3}} \right) + s_0 \quad \longrightarrow \quad R \propto M^{-1/3} \exp \left[\frac{2\mu}{3\mathcal{R}} (s - s_0) \right]$$

(同一質量で) エントロピーが大きいと半径が大きい



エントロピー生成 @ Accretion shock

降着率大 $\longrightarrow t_{\text{acc}} \ll t_{\text{cool}}$ @ post-shock

降着率大 \longrightarrow エントロピー大 \longrightarrow 半径大

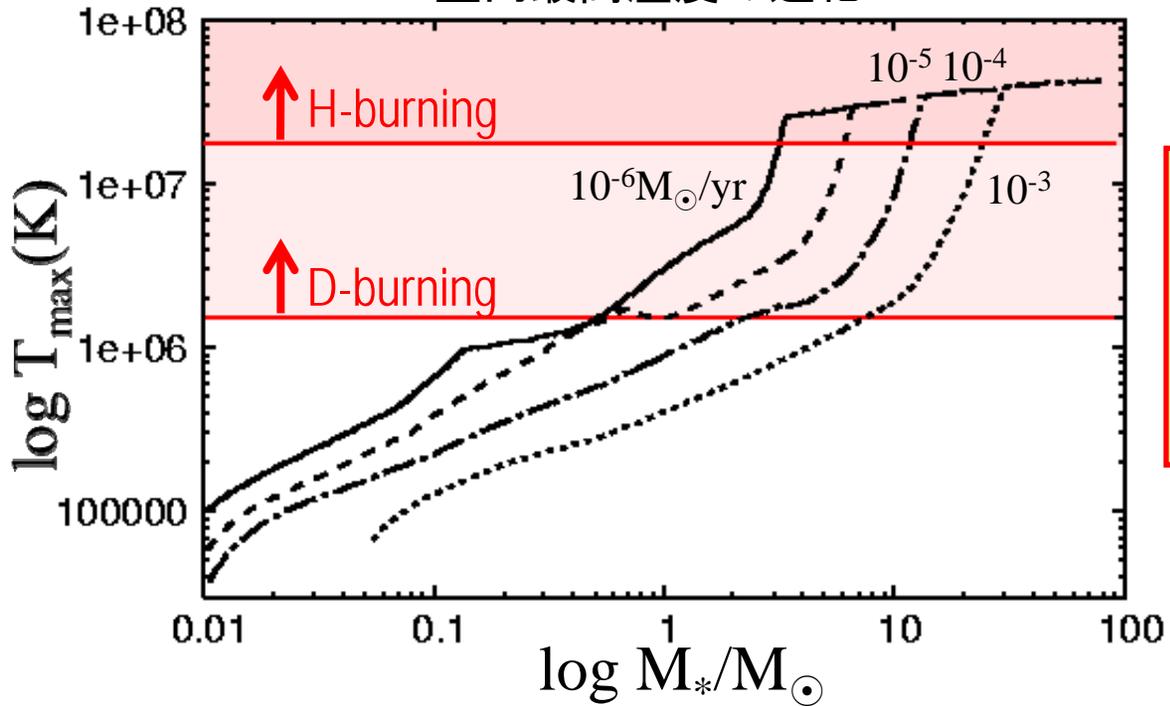
Why late fusion with high \dot{M} ?

星内の典型的密度、圧力: $\rho \sim \frac{M}{R^3}$ $P \sim G \frac{M^2}{R^4}$

→ 星内の典型的温度: $T = \frac{\mu}{\mathcal{R}} \frac{P}{\rho} \sim \frac{G \mu M}{\mathcal{R} R}$

(同一質量で) 半径が大きいと温度が低い

星内最高温度の進化



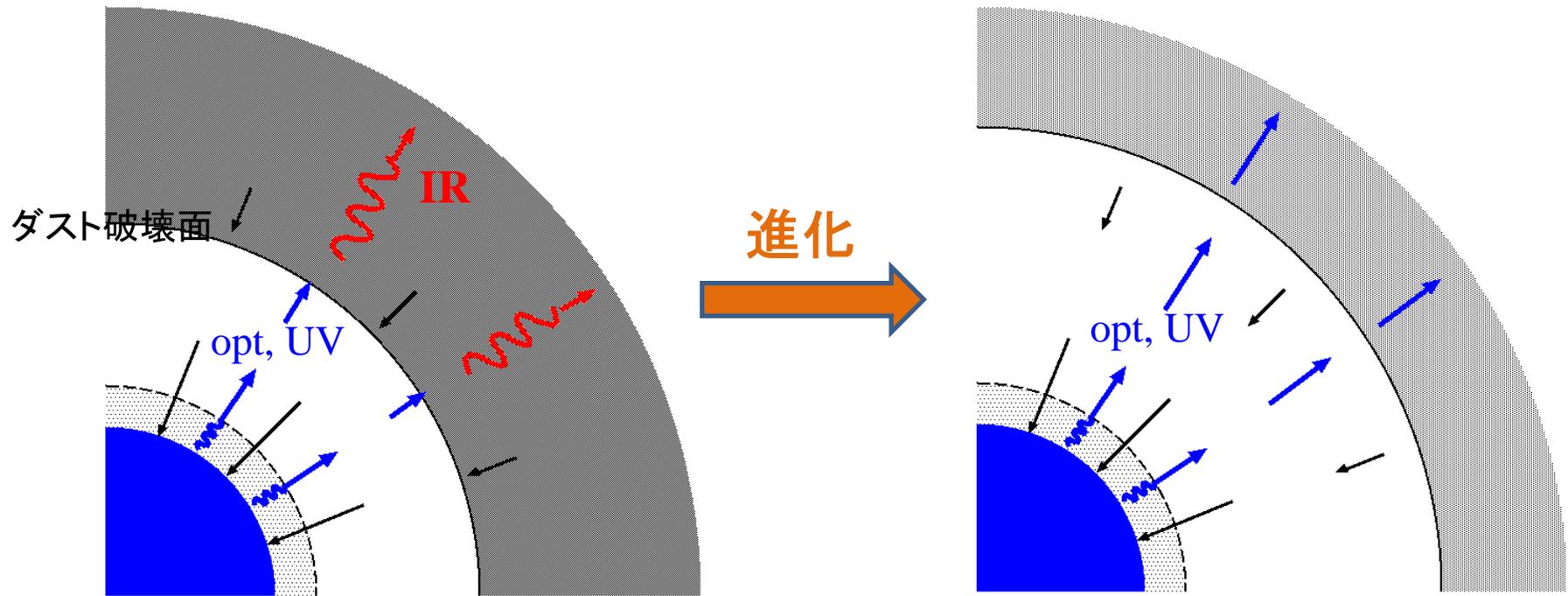
降着率大 → 半径大
 → 温度低
 → D,H点火遅

降着外層の構造

降着外層の構造と原始星進化の関係

① 星のopt, UV光に対してthick
IRに再放射

② 星のopt, UV光に対してthin
そのまま外層を通過



外層の $\tau \sim \kappa \rho (R_d) R_d$ (R_d ; ダスト破壊面半径), free-fall: $\rho (R_d) \propto R_d^{-3/2}$

$$\Rightarrow \tau \propto R_d^{-1/2}$$

原始星の質量 $\uparrow \Rightarrow R_d \uparrow$ 、 $\tau \downarrow$

降着可能条件

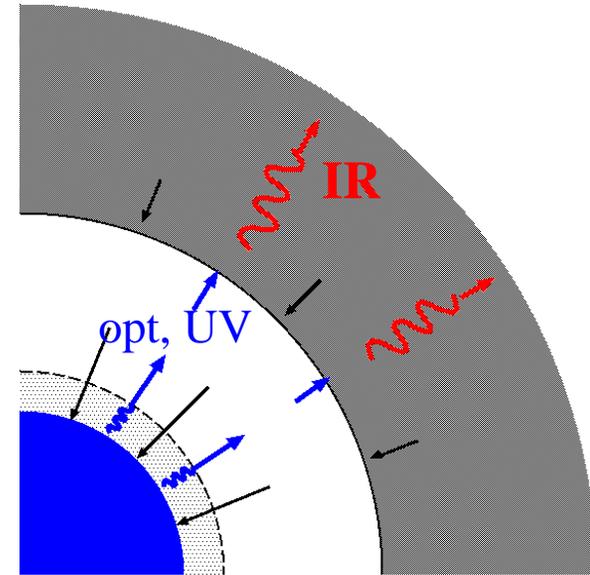
① thick外層

- ダスト破壊面での圧力バランス
(降着流のラム圧) > (輻射圧)

$$\rho u^2 > \frac{L_{\text{tot}}}{4\pi R_d^2 c}$$

- 星の光度がIRでのdust opacity
を用いたエディントン光度を超えない

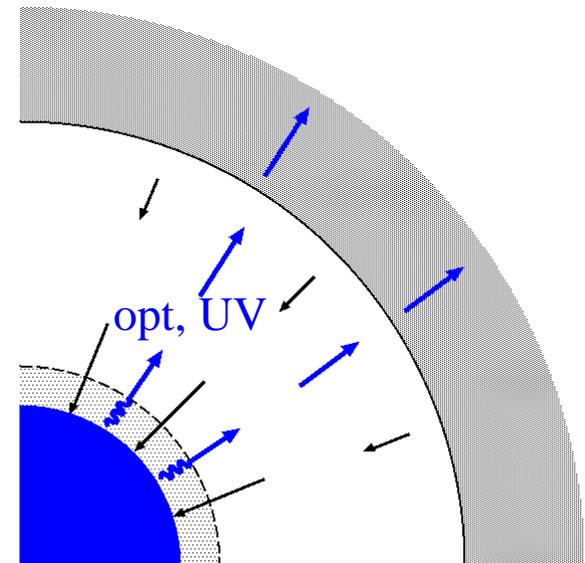
$$L_{\text{tot}} < L_{\text{Edd,IR}} \equiv \frac{4\pi cGM_*}{\kappa_{\text{IR}}}, \quad \kappa_{\text{IR}} \simeq 8 \left(\frac{Z}{Z_\odot} \right) \text{ cm}^2/\text{g}$$



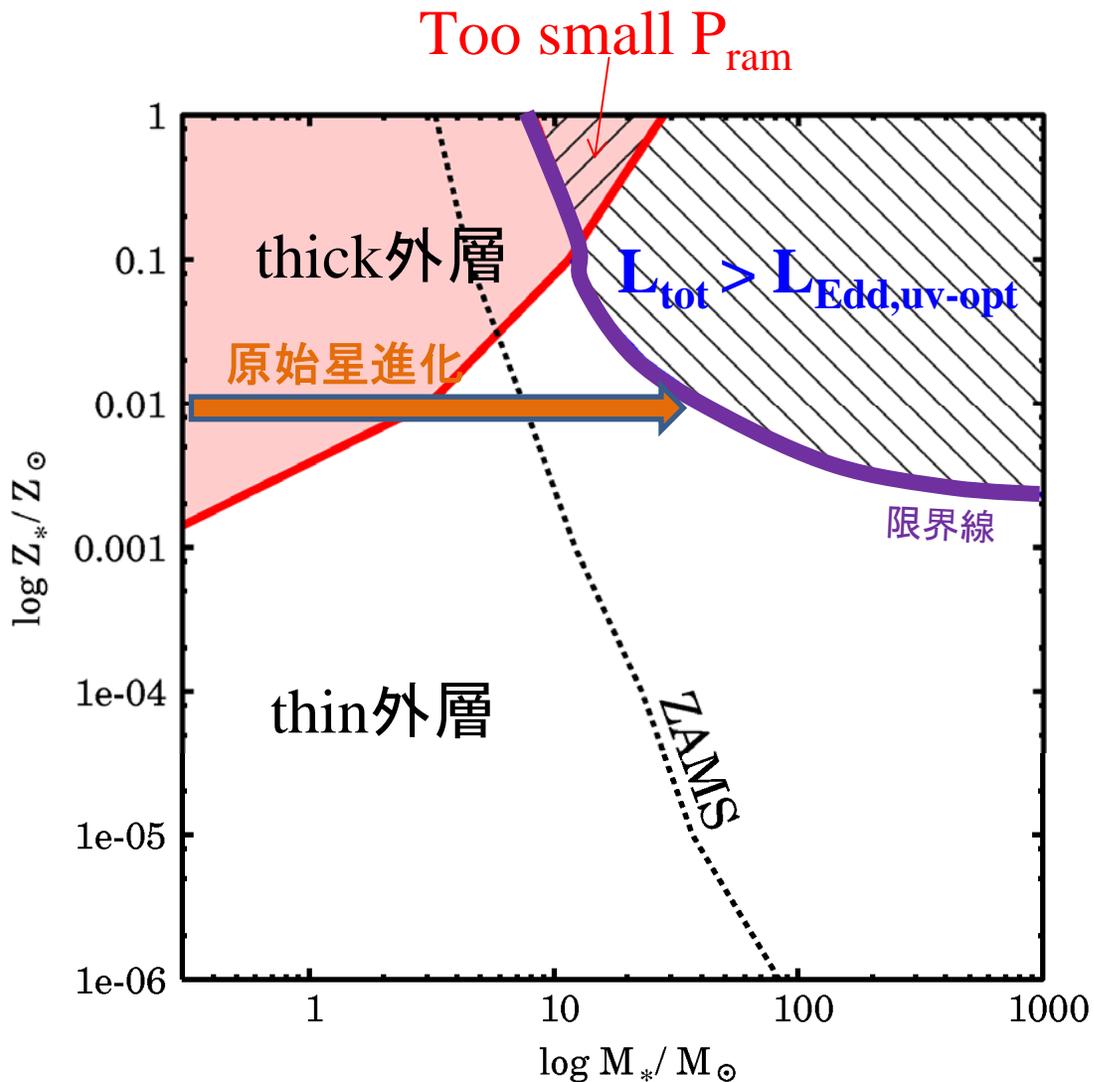
② thin外層

- 星の光度がopt,UVでのdust opacity
を用いたエディントン光度を超えない

$$L_{\text{tot}} < L_{\text{Edd,uv-opt}} \equiv \frac{4\pi cGM_*}{\kappa_{\text{uv-opt}}}, \quad \kappa_{\text{uv-opt}} \simeq 200 \left(\frac{Z}{Z_\odot} \right) \text{ cm}^2/\text{g}$$



輻射圧による上限質量



外層構造

$Z > 10^{-3} Z_\odot$ の時

thick \rightarrow thin 外層

これより低金属量

ずっとthin

輻射圧の効果

$Z > 0.1 Z_\odot$ thick外層

$0.1 Z_\odot > Z > 10^{-3} Z_\odot$ thin外層

に対する輻射圧が降着を妨げるのに効く。

これより低金属量では別過程

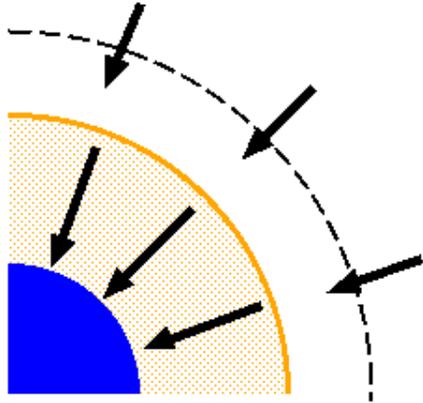
HII region & lifetime

➤ 降着流中の電離領域膨張

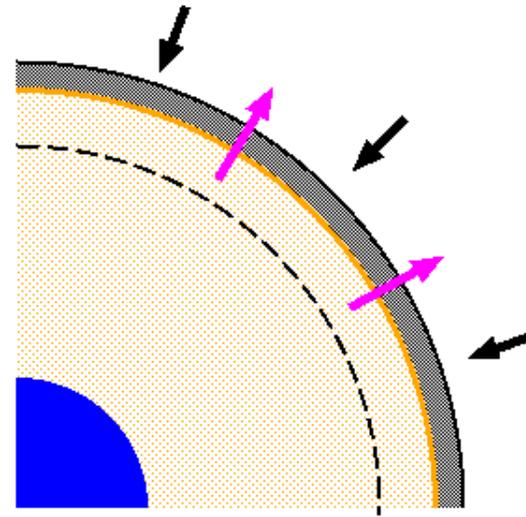
電離領域を通して降着可能な条件：

(降着流のラム圧) > (電離領域内の圧力)

限界半径
$$r_g = \frac{GM_*}{c_{\text{HII}}^2}$$



電離領域が十分小さければ
ラム圧大で降着可能

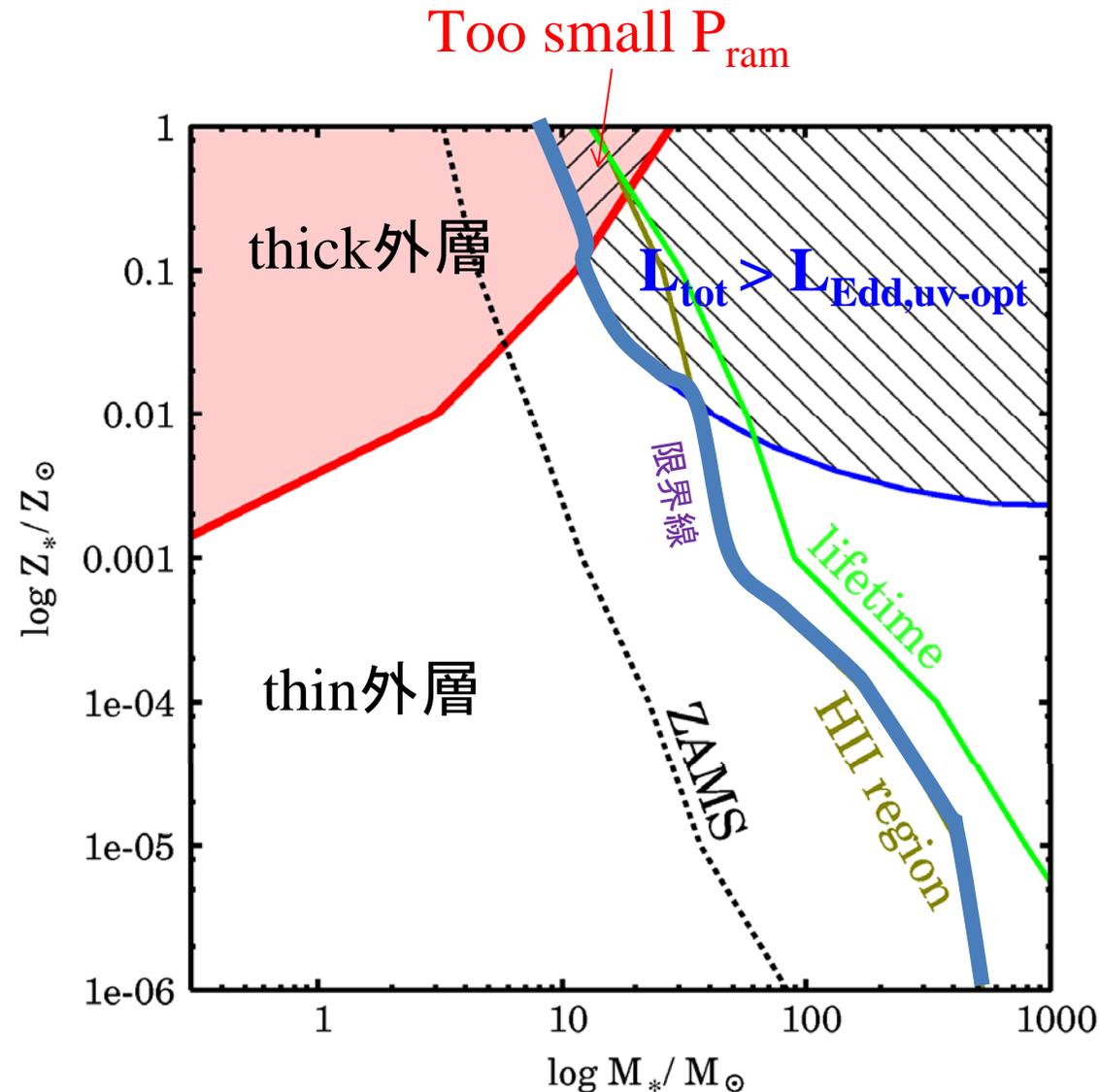


電離領域が大きくなると、圧力差により
衝撃波が立ちガスを掃きながら膨張

➤ 星の寿命

(進化の経過時間) < (主系列星の寿命) の時に降着可能

金属量と上限質量



質量降着の障害による
上限質量:

$Z > 10^{-3} Z_\odot$ 輻射圧
a few $\times 10 M_\odot$

$Z < 10^{-3} Z_\odot$ 電離領域膨張
several $\times 10 M_\odot \sim$
several $\times 100 M_\odot$
金属量が低いほど大きい

Summary

低金属量環境下で質量降着しつつある原始星の進化を計算し、予想される外層へのfeedback過程を考えて星の最終質量を議論した。

➤ 原始星進化の金属量依存性

- low Z ほど - 原始星の半径が大きい
- ZAMSに至る質量が大きい

大降着率の為

➤ 降着外層の構造

- thick外層 (IR再放射有) \Rightarrow thin外層 (// 無)
- $Z < 10^{-3} Z_{\odot}$ ではずっとthin

➤ 金属量と星の最終質量

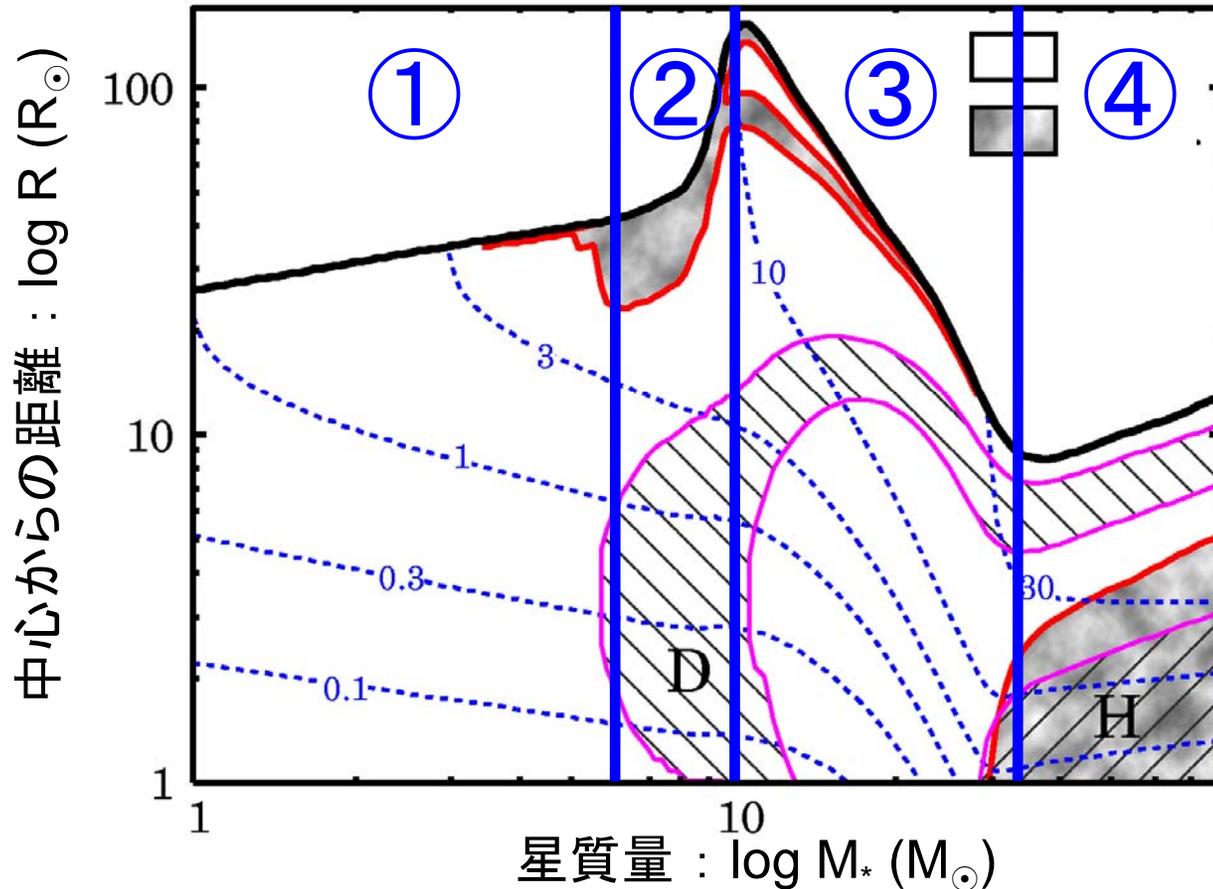
- * $Z > 10^{-3} Z_{\odot}$ 外層にはたらく輻射圧が効く
上限質量: a few $\times 10 M_{\odot}$
- * $Z < 10^{-3} Z_{\odot}$ 電離領域の動的膨張が効く
上限質量: 数 $10 M_{\odot}$ ~ 数 $100 M_{\odot}$

低金属量ほど
上限質量大

Supplement Pages

大降着率下での原始星進化

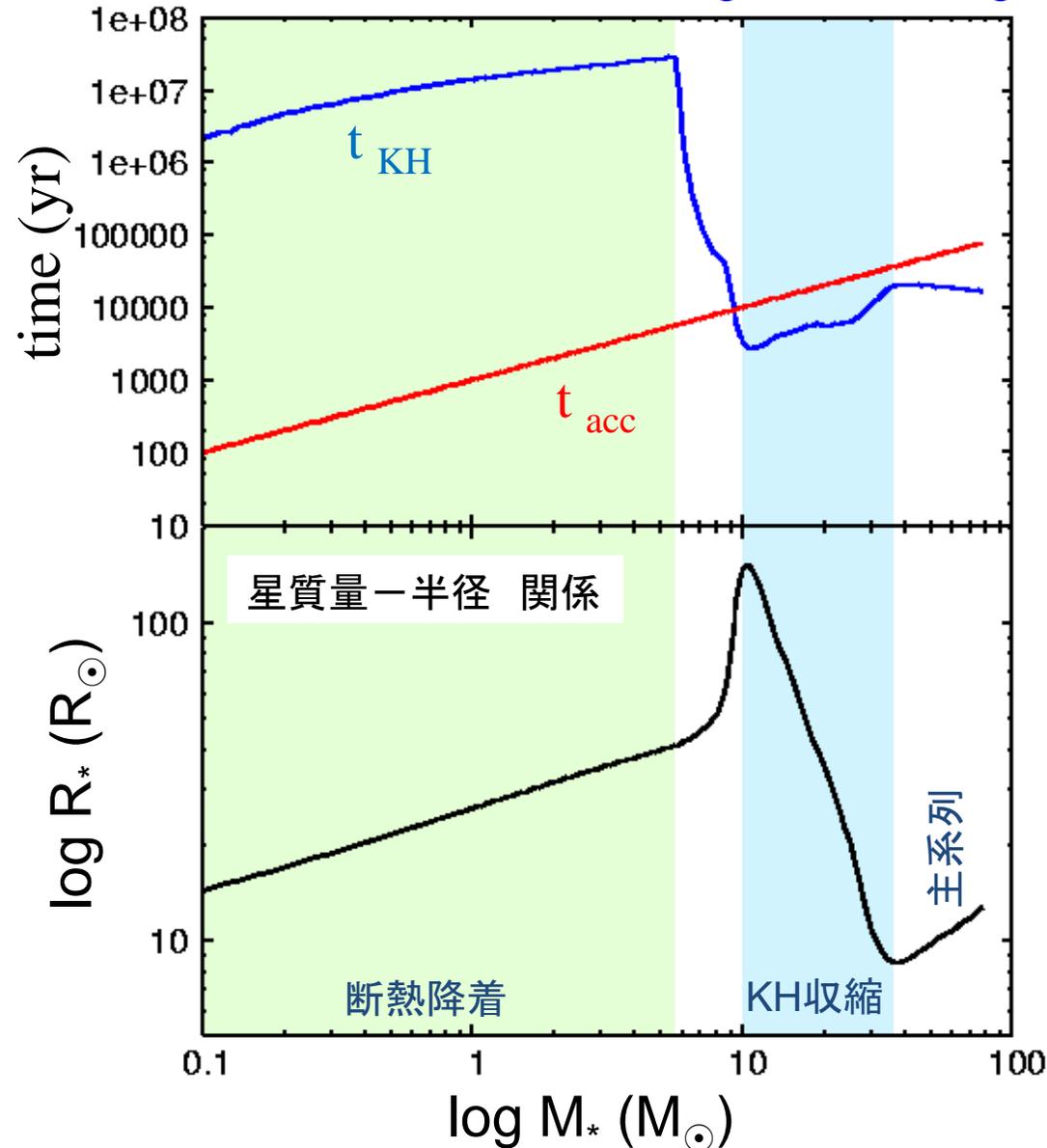
内部構造 : $\dot{M}=10^{-3}M_{\odot}/\text{yr}$



① はじめゆっくり膨張 ⇒ ② 急激に膨張
⇒ ③ 収縮 ⇒ ④ 水素燃焼 (主系列)

Basic Evolution

質量降着率: $10^{-3}M_{\odot}/\text{yr}$, $Z=Z_{\odot}$



2つの重要時間スケール

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

初期: $t_{\text{KH}} > t_{\text{acc}}$; 断熱降着
(徐々に膨張)

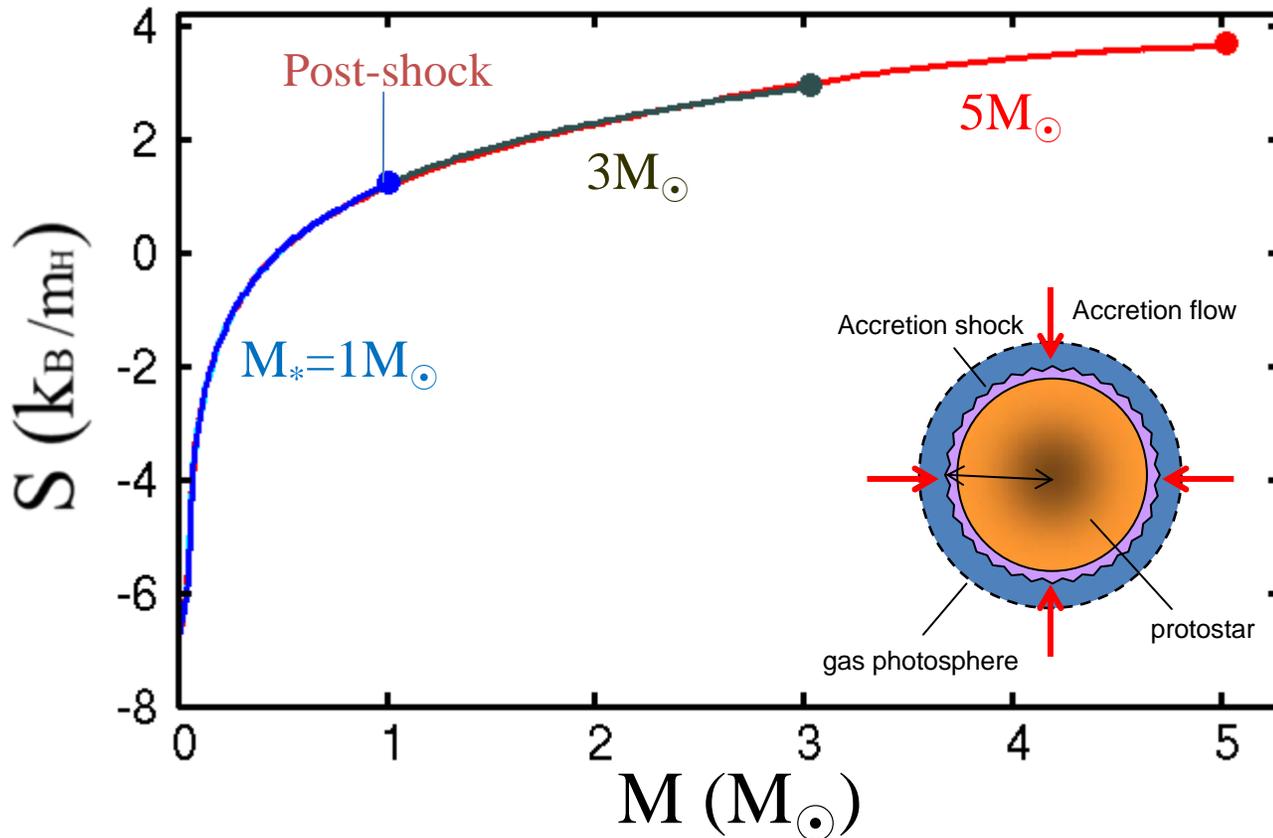
Opacity $\downarrow \Rightarrow t_{\text{KH}} \downarrow$

後期: $t_{\text{KH}} < t_{\text{acc}}$; K-H 収縮

過渡期: 急激な膨張

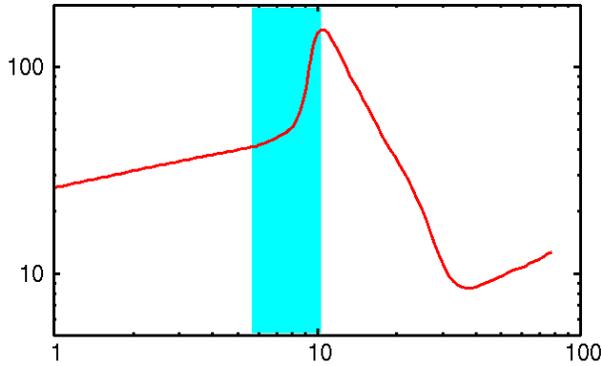
① ゆっくり膨張

entropy profile at $M_* = 1, 3, 5 M_\odot$



- 衝撃波直後のエントロピーが星内部まで保存されている
- 大降着率 \Rightarrow 星表面で **short acc. time : $t_{\text{acc}} < t_{\text{cool}}$** のため
- 星質量 $\uparrow \Rightarrow$ 衝撃波 強 \Rightarrow 星内のエントロピー 増 \Rightarrow **星の膨張**

② 急激に膨張



輻射によるエネルギー輸送
 ← opacityが効率を決める

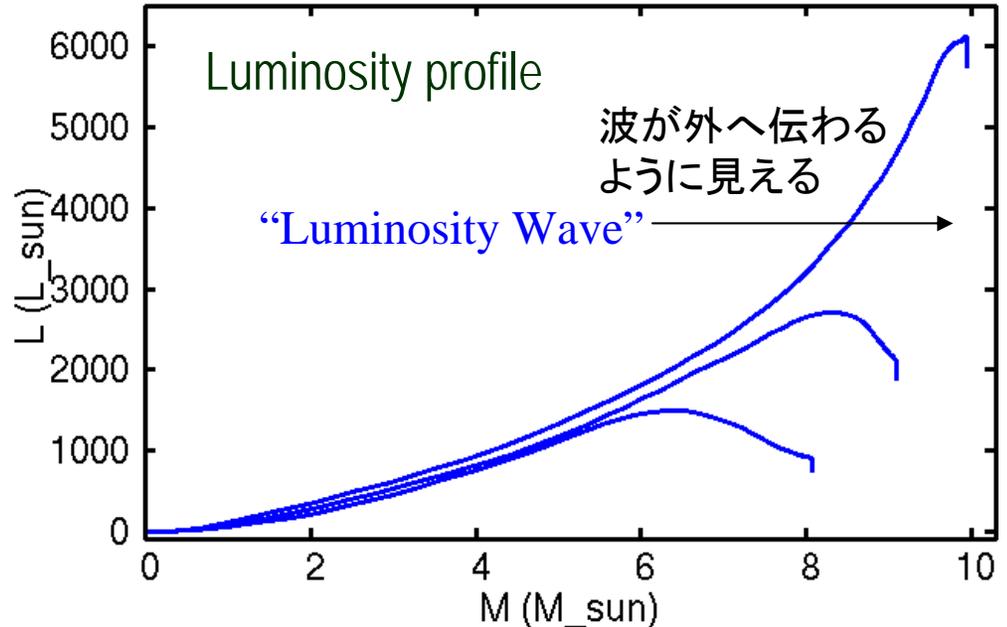
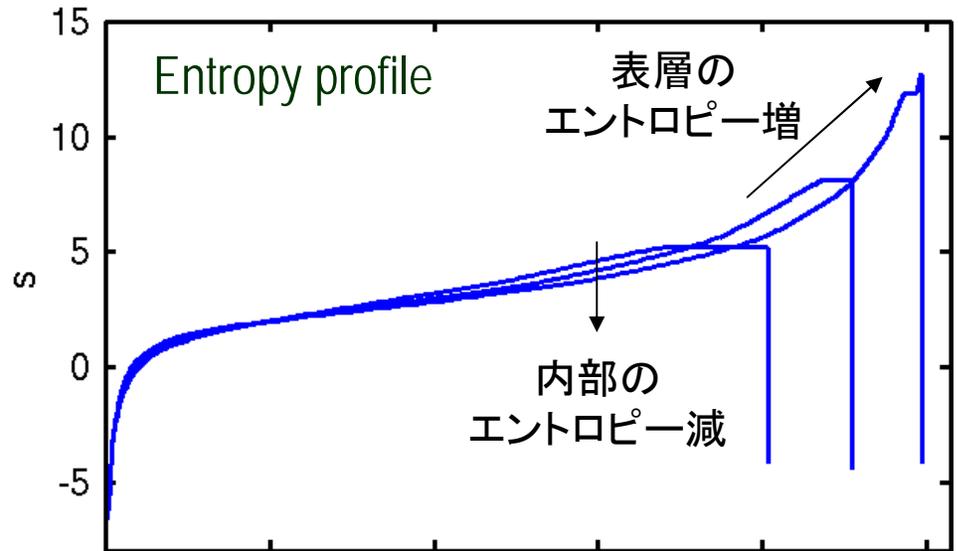
Kramers' opacity ;
 $\kappa \propto \rho T^{-3.5}$

$M_* \uparrow \rightarrow \kappa \downarrow$

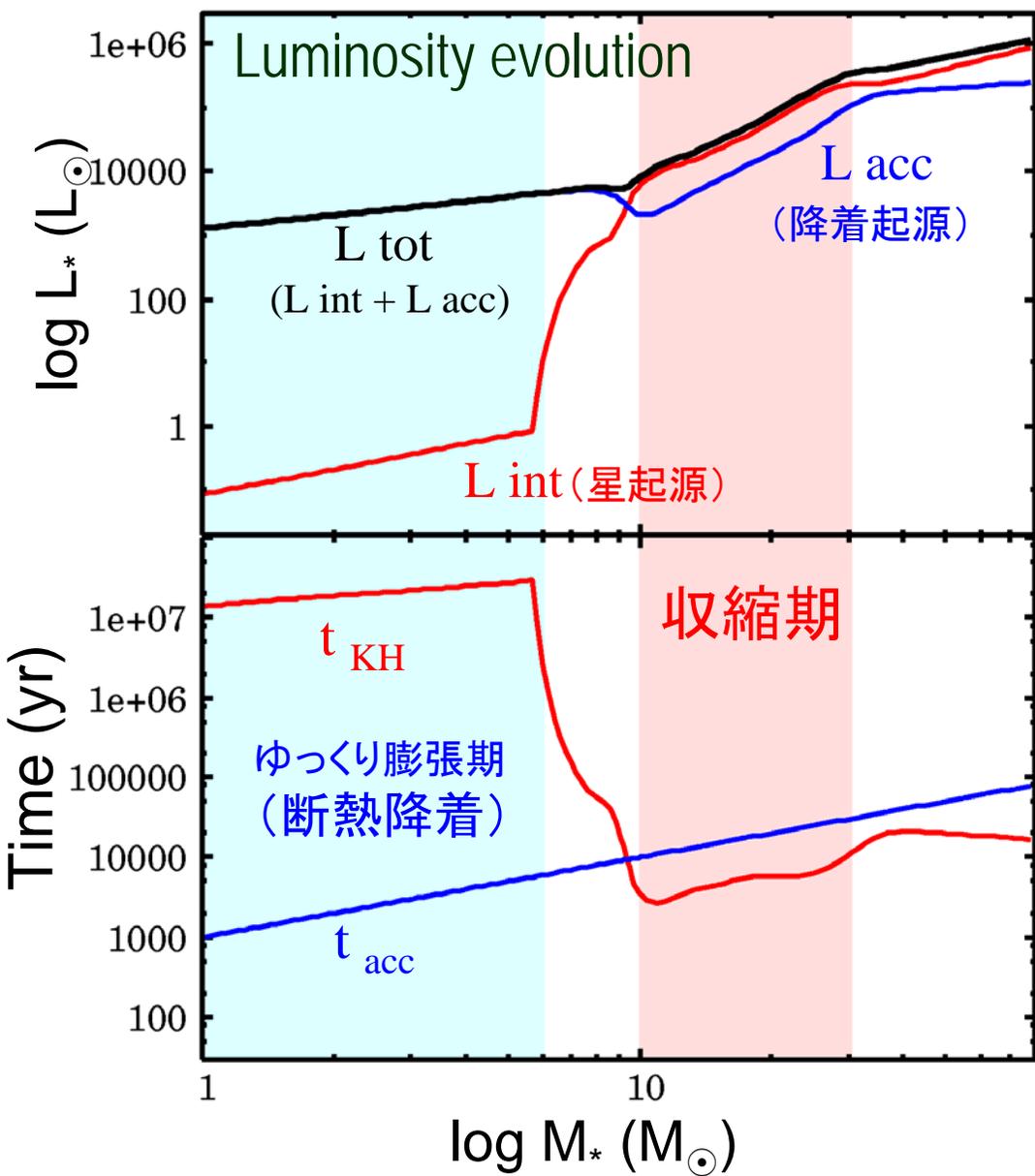
Opacityが下がるとともに、
 星内に蓄えられたエントロピー
 が星表面へ運ばれる

→ 急激に膨張

(Stahler, Palla & Salpeter '80)



③ 収縮



Opacityが下がることにより、
 $M_* > 5M_\odot$ で内部光度が急増

2つの重要時間スケール

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

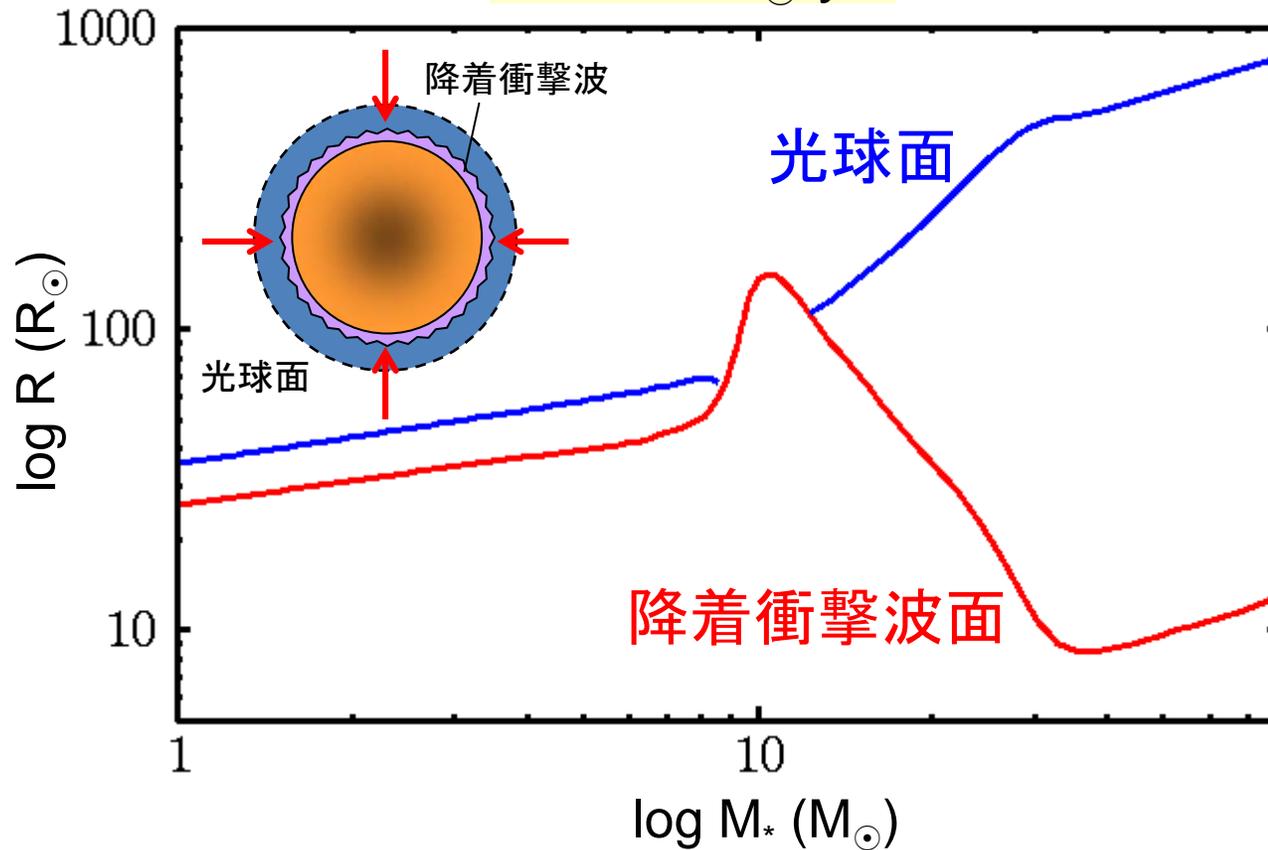
$$t_{KH} < t_{acc} \text{ at } M_* > 10 M_\odot$$

星がエネルギーを失う
 → 収縮 (負の比熱)

“ Kelvin-Helmholtz 収縮 ”

光球面と衝撃波

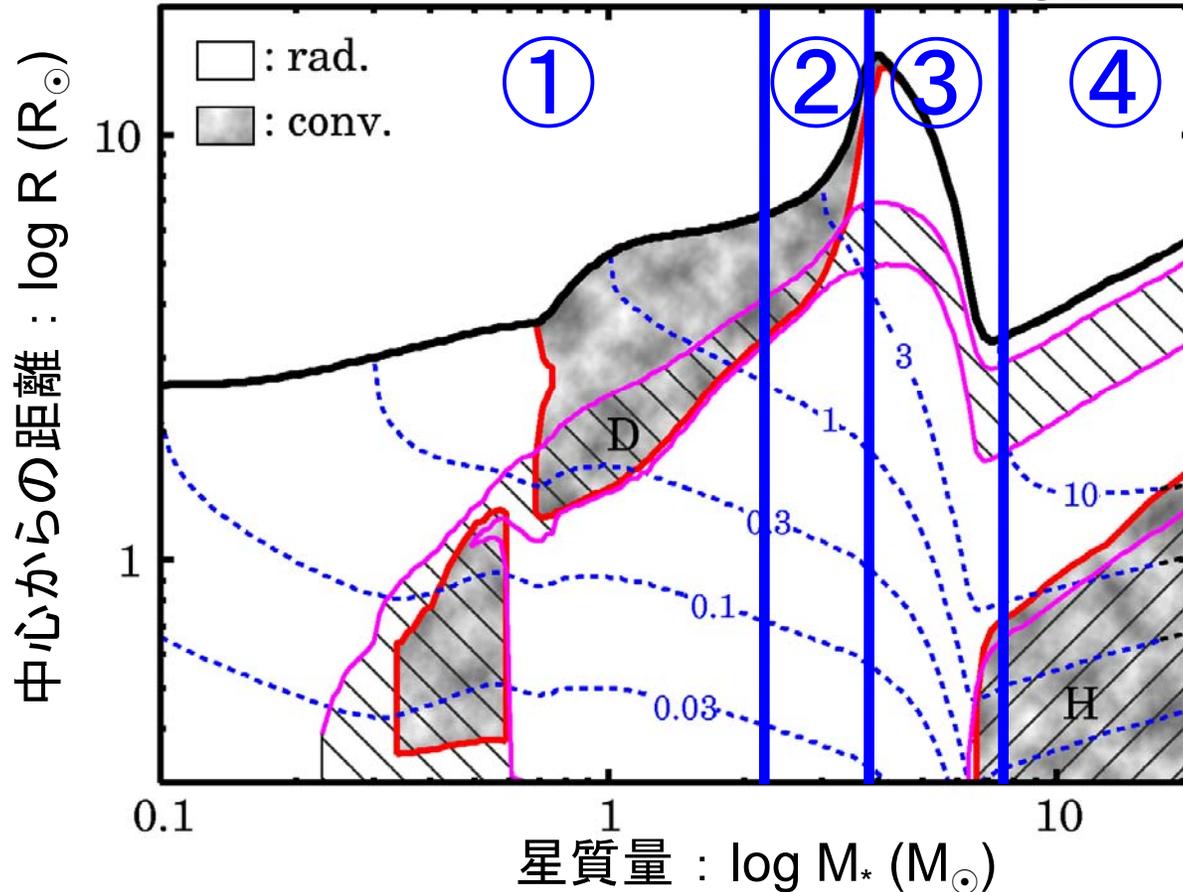
$$\dot{M} = 10^{-3} M_{\odot} / \text{yr}$$



- 降着率大 \Rightarrow 光学的に厚い降着流
- Photosphereは降着衝撃波よりずっと外側にある
- 大光度でも星の有効温度: T_{eff} は低くなる

低降着率下での原始星進化

内部構造 : $\dot{M}=10^{-5}M_{\odot}/\text{yr}$



① はじめゆっくり膨張 ⇒ ② 急激に膨張
⇒ ③ 収縮 ⇒ ④ 水素燃焼 (主系列)