



大質量星形成における輻射フィードバックの 金属度・降着率依存性

福島 肇(東北大,京都大)

共同研究者：大向一行(東北大), 細川隆史(京都大)

目次

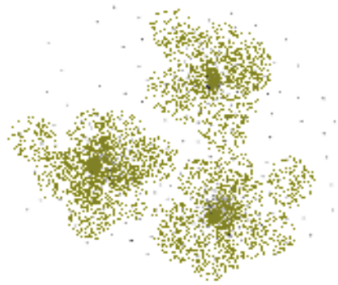
1. イントロダクション
2. ダスト層への輻射フィードバックについて
3. 計算モデル
4. 結果
5. HI領域形成によるフィードバック
6. モデル化および結果
7. まとめ

大質量星

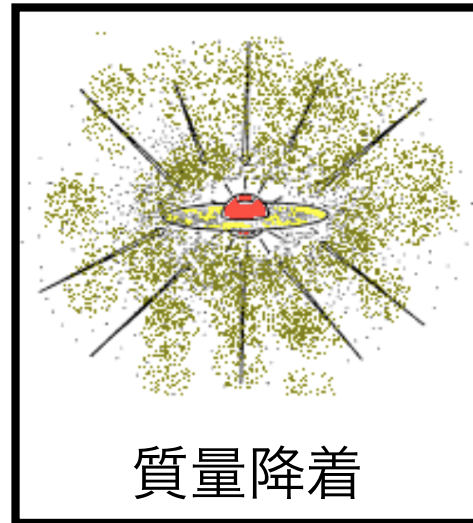
- ・ HII領域形成、超新星爆発により星間空間、銀河進化に大きく影響
- ・ 重力波源となる連星BHを形成

星に上限質量はあるのか？

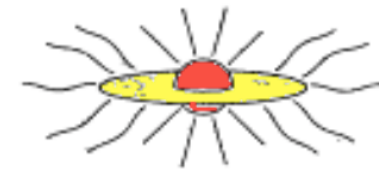
星形成の標準シナリオ



高密度コア重力崩壊



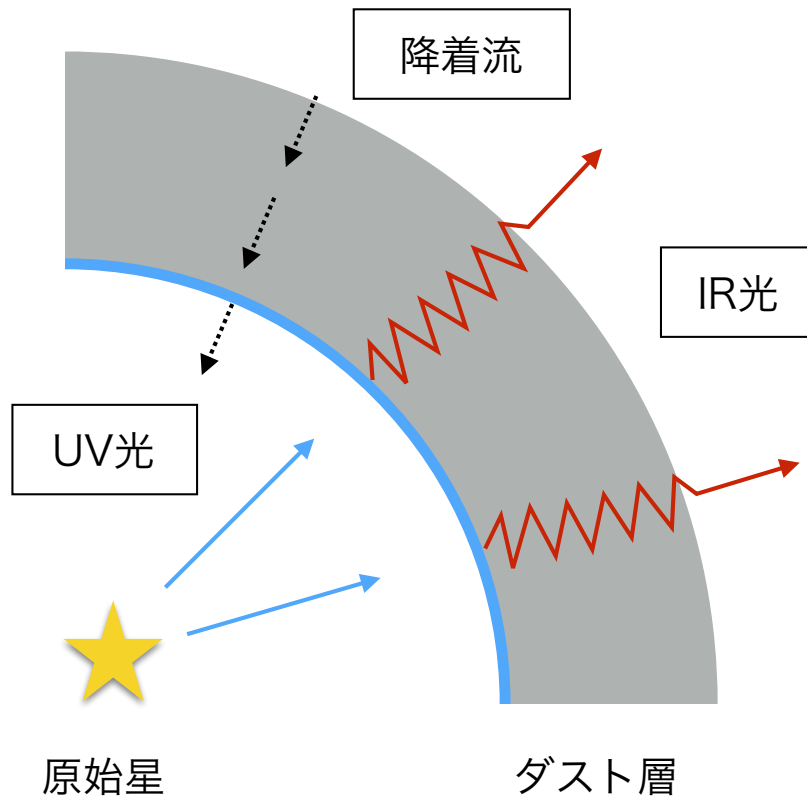
質量降着



降着が終わり質量決まる

原始星の光度が大きくなると輻射によって質量降着を抑制する

ダスト層への輻射フィードバック



降着流内に含まれるダスト粒子に原始星からの輻射が吸収・再放射される。この時、降着流に輻射圧がかかる

球対称降着において
金属度 $1Z_{\odot}$ 降着率 $10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の場合
 $\sim 15 M_{\odot}$ 輻射圧により降着できない

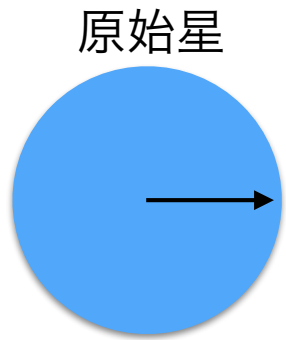
(Wolfire & Cassinelli 1987)

今回は輻射フィードバックの降着率・金属度の依存性を調べる

計算モデル

金属度、降着率一定を仮定 $0 \sim 1Z_{\odot}$ $10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1} \sim 10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$

1. 原始星降着進化計算から半径、光度を得る (Hosokawa & Omukai 2009より)



Prost Code : シューティング法による星構造進化計算

$$Z, \dot{M} \Rightarrow R(M_*), L(M_*)$$

2. 球対称定常降着を仮定し原始星外層構造を求める
ガス構造計算

$$\text{EoM} \quad u \frac{du}{dr} = -\frac{GM}{r^2} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + \frac{1}{c} \int d\nu \kappa_{\nu} F_{\nu} \quad \text{連続の式} \quad \rho = \frac{\dot{M}}{4\pi r^2 |u|}$$

$$\text{エネルギー式} \quad u \frac{de}{dr} + Pu \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \right) = 4\pi \left(\int \kappa_{\nu} J_{\nu} d\nu - \int \kappa_{\nu} B_{\nu} d\nu \right) + u \frac{d\epsilon}{dr}$$

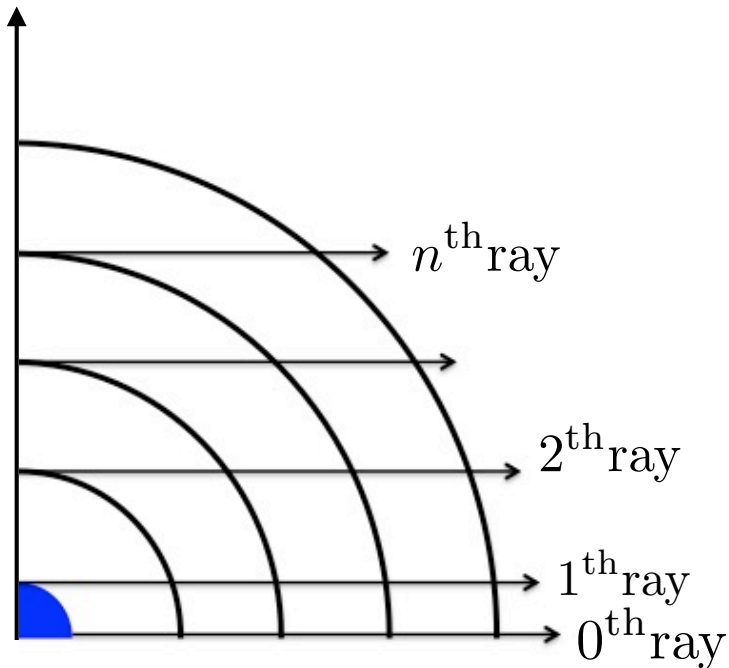
※圧力勾配は輻射圧と比べ十分小さい

輻射計算

モーメント式

$$0\text{次} \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 H_\nu)}{\partial r} = -\kappa_\nu \rho (J_\nu - S_\nu)$$

$$1\text{次} \quad \frac{\partial (f_\nu J_\nu)}{\partial r} + \frac{(3f_\nu - 1) J_\nu}{r} = -\kappa_\nu \rho H_\nu \quad f_\nu \text{ はraytracingから求める}$$



内側境界条件(星半径 R_*)

光度 L_*

外側境界条件(密度 10^{-19}gcm^{-3})

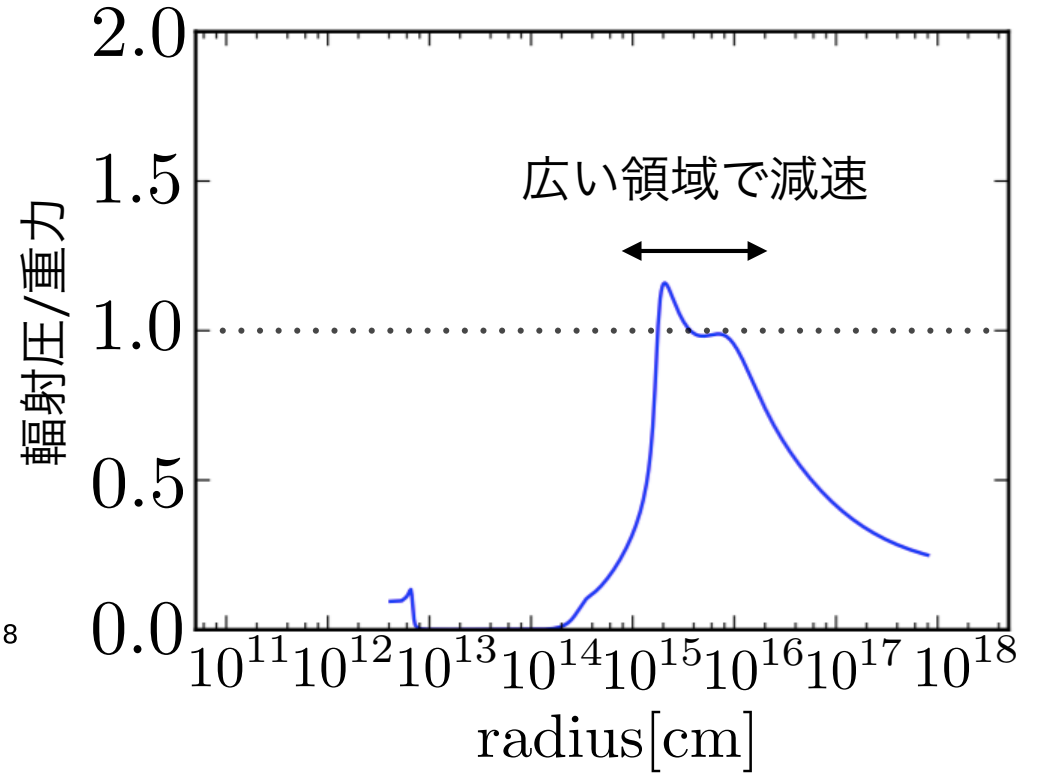
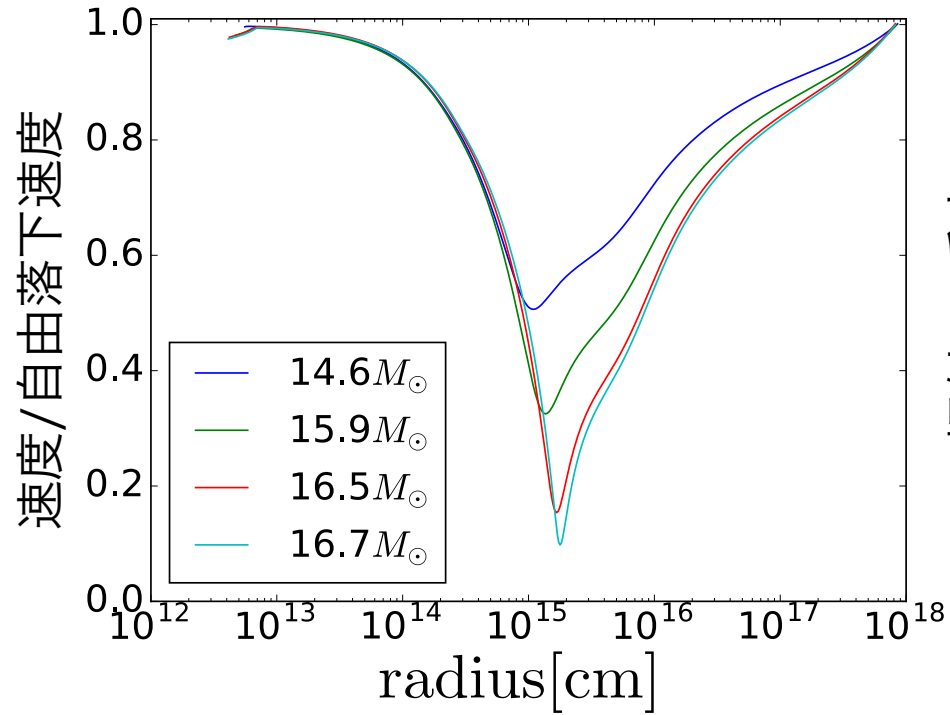
外部輻射 0

$$\text{速度} \quad u = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad \frac{de}{dr} = 0$$

輻射とガスの計算を ρ, T について収束するまで計算を繰り返す

結果 降着率 $10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$

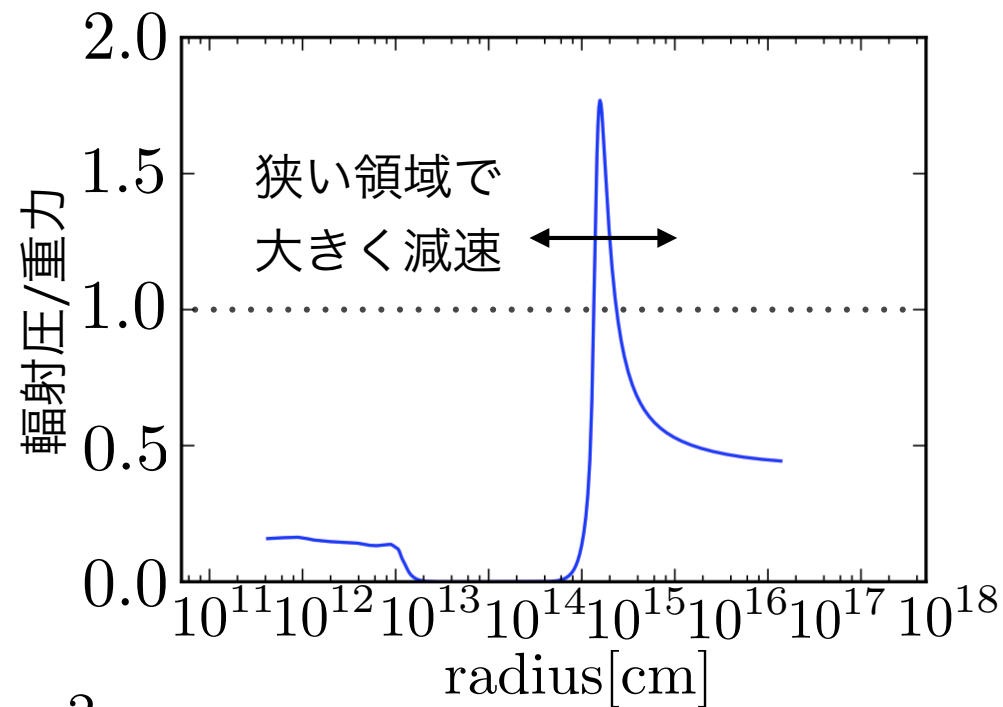
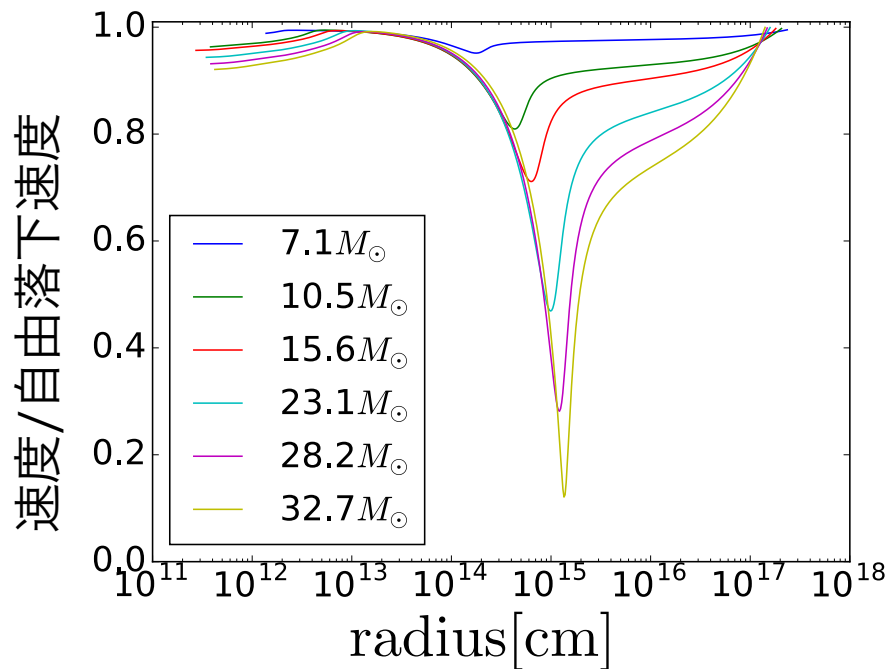
金属度 $1 Z_{\odot}$



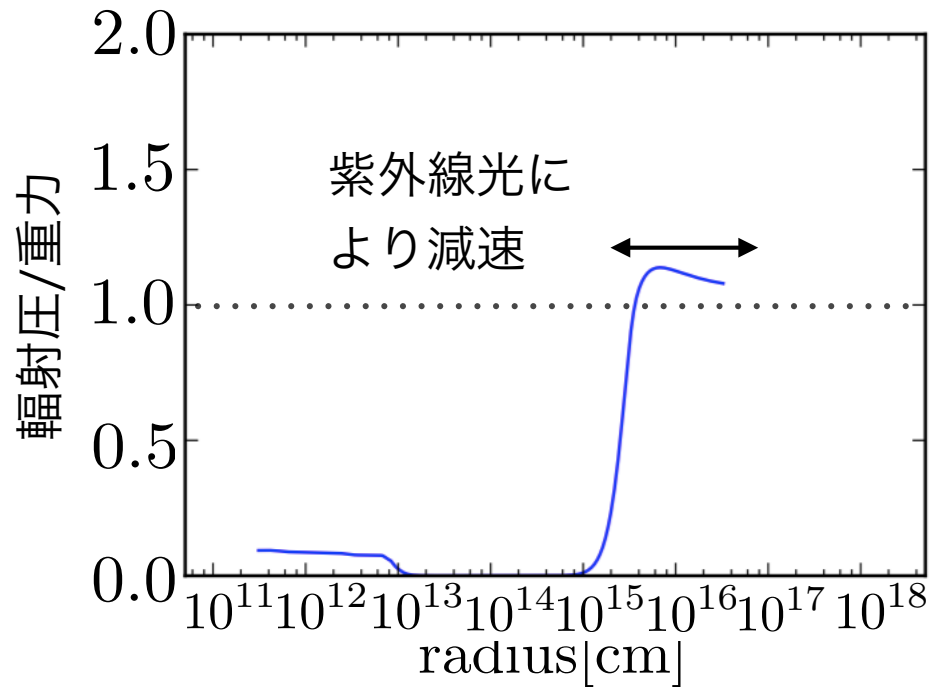
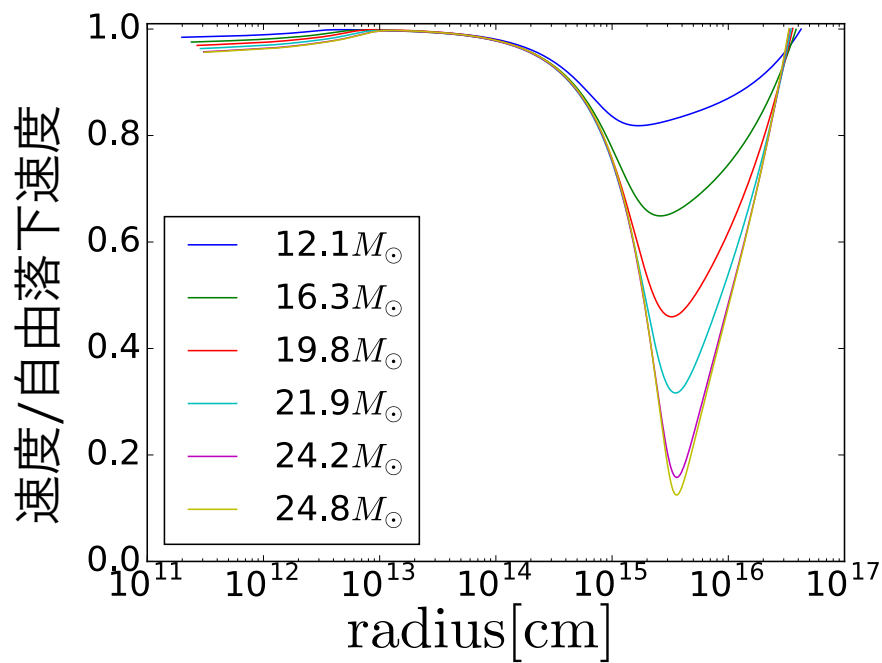
原始星質量増加によりダスト層で減速される様子がわかる

紫外線光がダスト破壊面近くで吸収され、残りは赤外線として外側に輸送される

降着率 $10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 金属度 $10^{-1} Z_{\odot}$

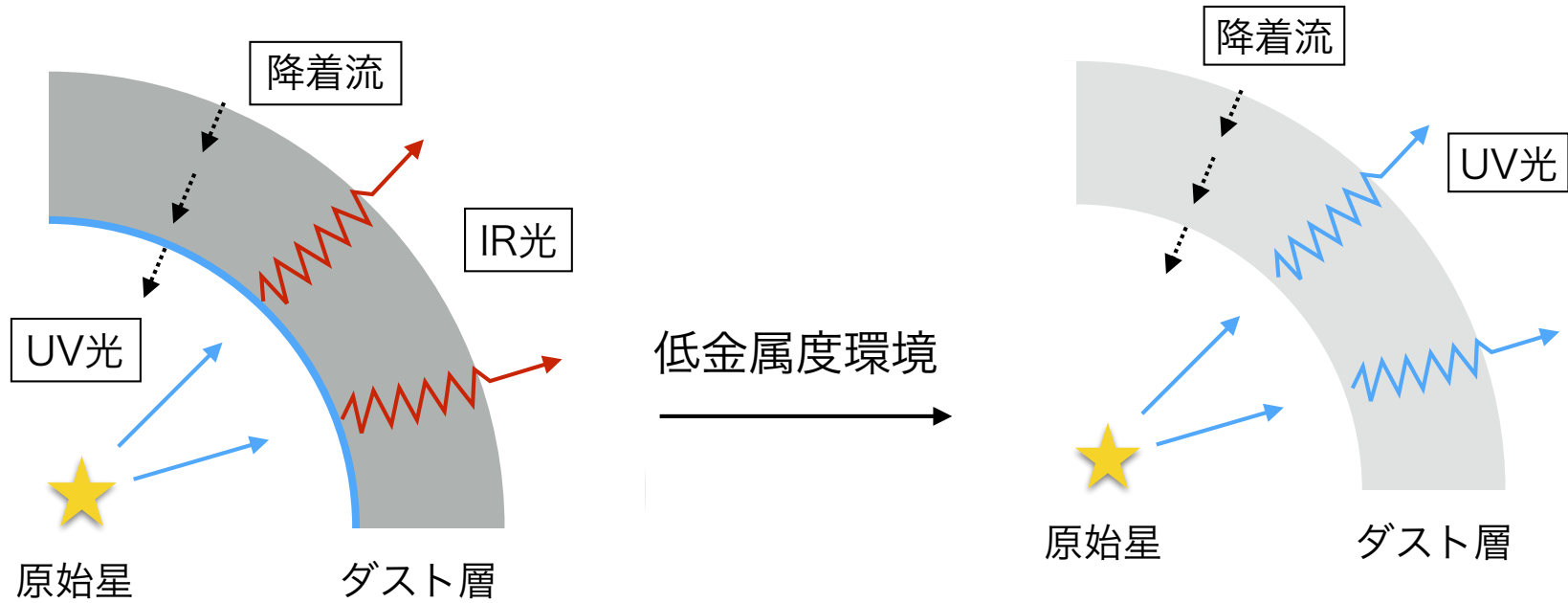


降着率 $10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 金属度 $10^{-2} Z_{\odot}$



ダスト層へのフィードバックの様子

(Hosokawa & Omukai 2009より)



(1) IR光による輻射圧

IR光がEddington光度を
超える

$$L_* > L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi cGM}{\kappa_{\text{IR}}}$$

(2) ダスト破壊面での輻射圧

ダスト破壊面で輻射圧
> ラム圧

$$\frac{L_*}{4\pi r_{\text{dc}}^2} > \rho u^2$$

(3) UV光による輻射圧

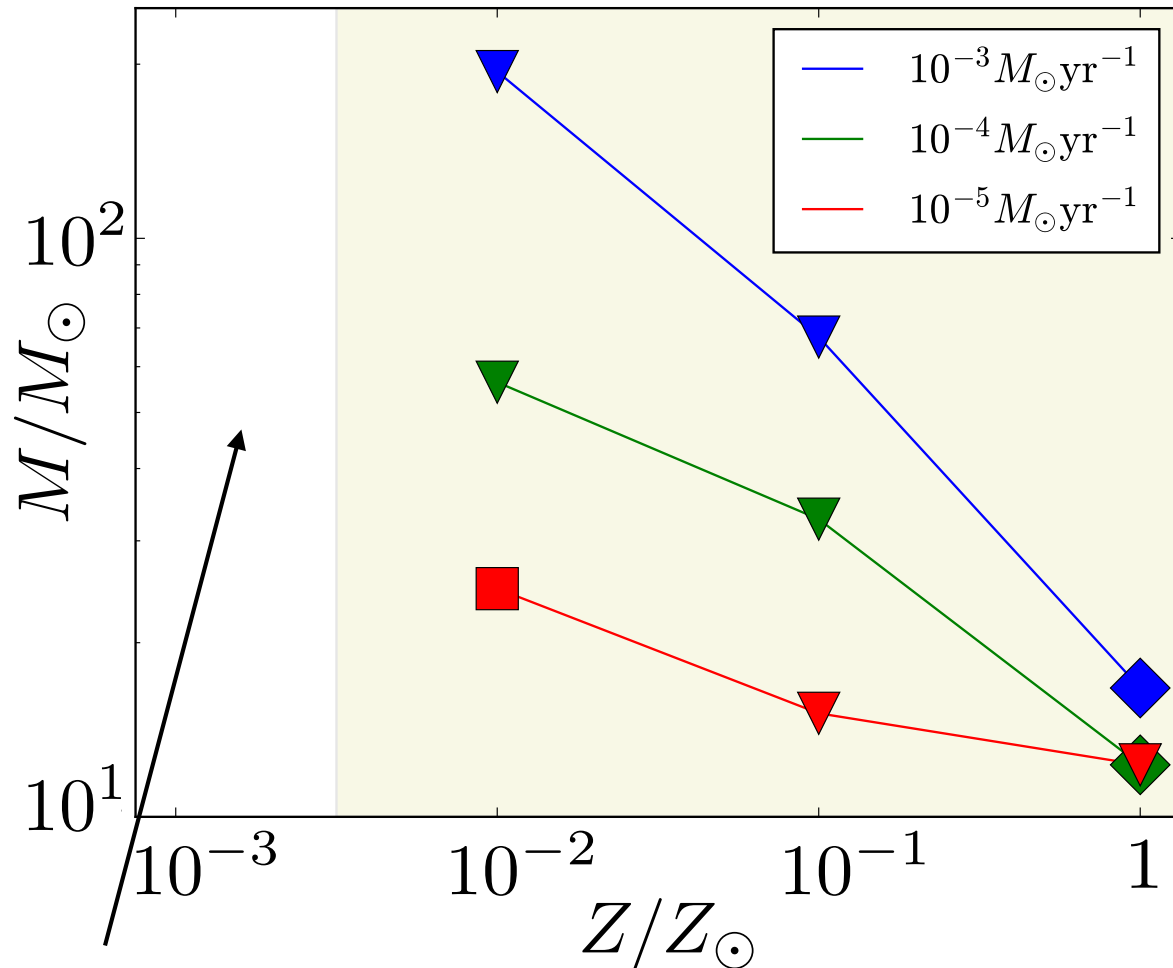
UV光がEddington光度
を超える

$$L_* > L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi cGM}{\kappa_{\text{UV}}}$$

ダスト粒子の柱密度の変化によりフィードバックの様子が変化する

ダスト層へのフィードバックまとめ

定常解を構成し、自由落下速度の1/10まで減速した質量を求める

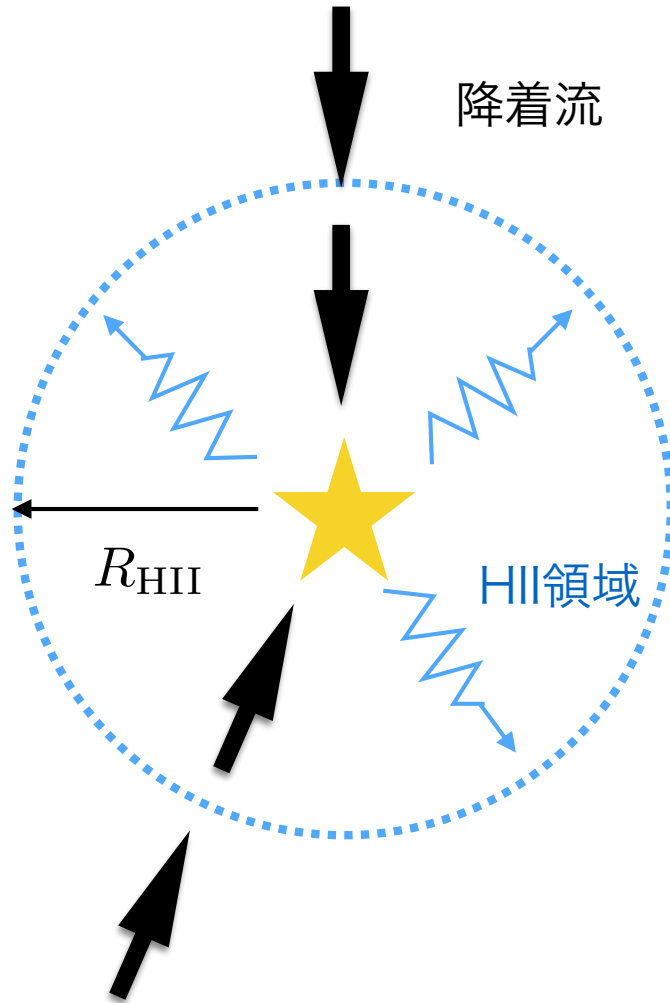


金属度が $10^{-3} Z_{\odot}$ 以下の場合、ダスト層への輻射フィードバックでは降着は止まらない

HII領域形成

金属度が $10^{-3} Z_{\odot}$ 以下の場合ではHII領域形成により質量が制限される

(Hosokawa & Omukai 2009)



HII領域が重力半径より大きくなると圧力勾配により降着流が押し返され、質量降着できない

重力半径

$$r_g = \frac{GM\phi_{\text{Ed}}}{c_{\text{HII}}^2} \quad c_{\text{HII}}: \text{音速} \quad \phi_{\text{Ed}} = 1 - \frac{L}{L_{\text{Ed}}}$$

(Mckee & tan 2008)

先行研究では、解析的な見積もりしか行われていないため今回は外層構造を数値計算することで輻射フィードバック効果を理解したい

HII領域半径

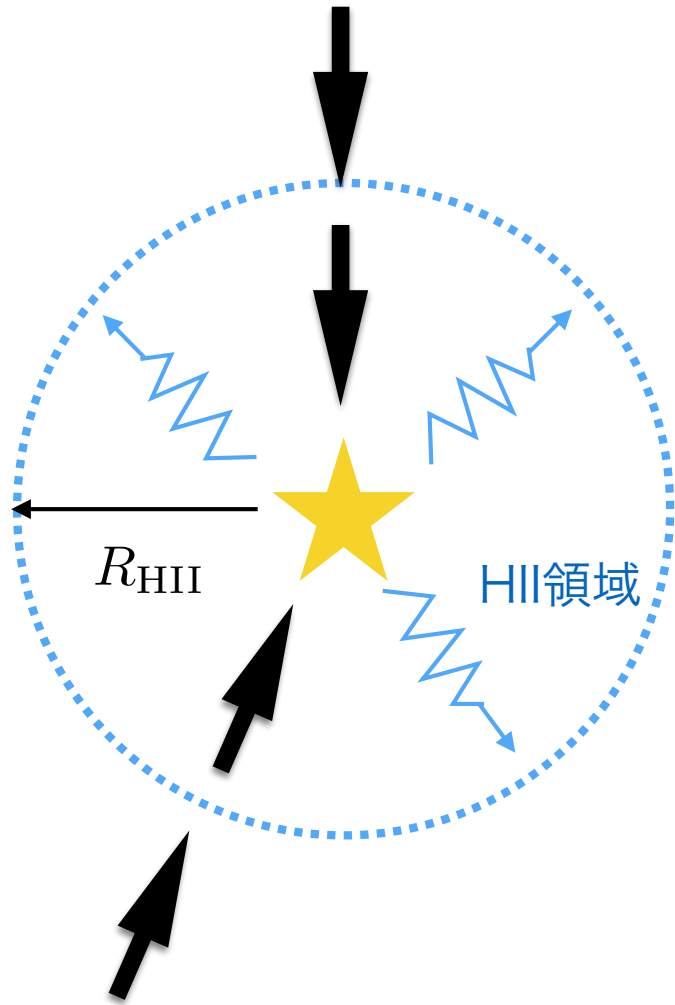
HII領域形成に関して電子散乱による輻射圧を考慮する

$$L_E = \frac{4\pi cGM}{\kappa_{sc}}$$

HII領域半径と電離光子数の関係(定常を仮定)

$$S = \int_{R_*}^{R_{\text{HII}}} \alpha n(\text{H}^+) n(\text{e}^-) dV + \frac{\dot{M}}{\mu m_{\text{H}}}$$

S : 電離光子数 α : 再結合定数 n : 個数密度 \dot{M} : 降着率
(Omukai & Inutsuka 2002)



HII領域外からは降着流は自由落下してくると仮定

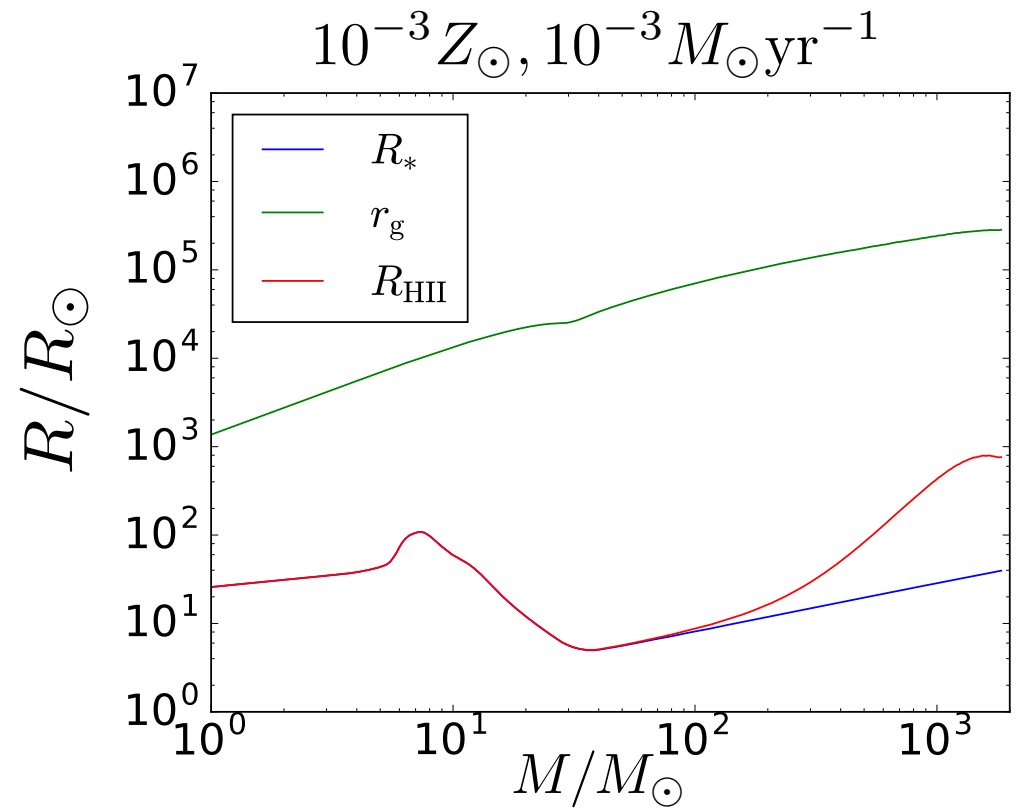
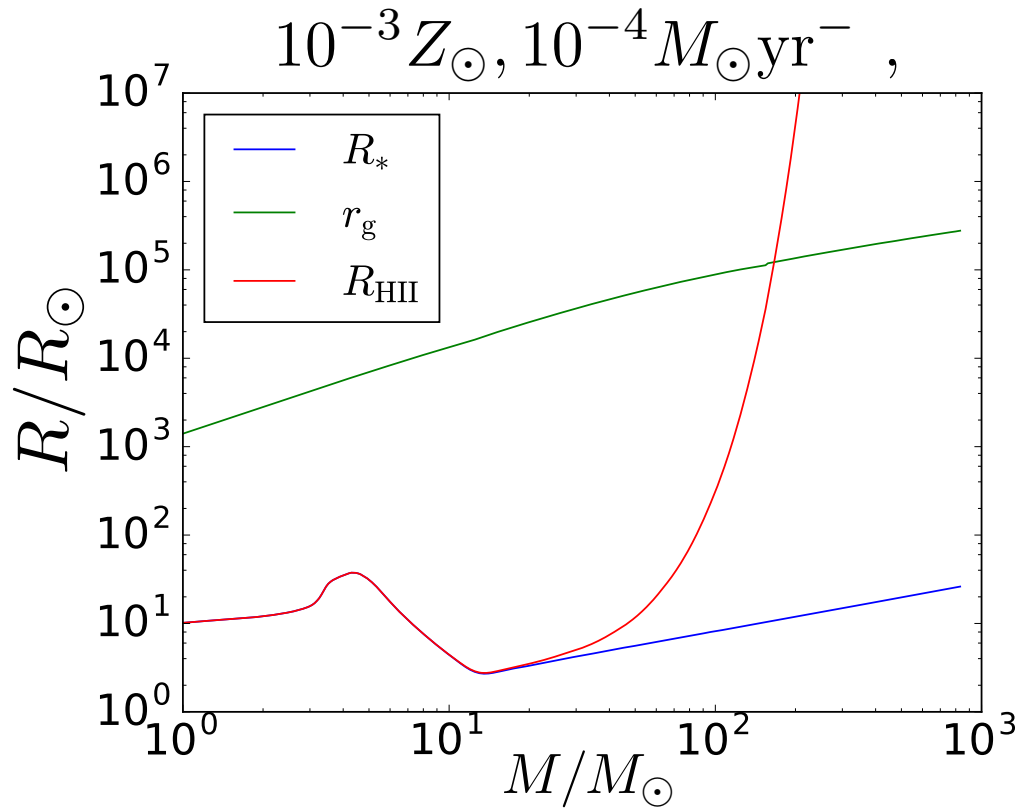
HII領域内で降着流は電子散乱に輻射圧を受ける

$$u \frac{du}{dr} = -\frac{GM}{r^2} + \frac{\kappa_{sc}}{c} \frac{L}{4\pi r^2}$$

降着流は定常を仮定 $\rho = \frac{\dot{M}}{4\pi r^2 |u|}$

$$R_{\text{HII}} = R_* \left[\exp \left(\frac{8\pi m_{\text{H}}^2 GM}{\alpha \dot{M}^2} (1 - L/L_E) S \right) - L/L_E \right] / (1 - L/L_E)$$

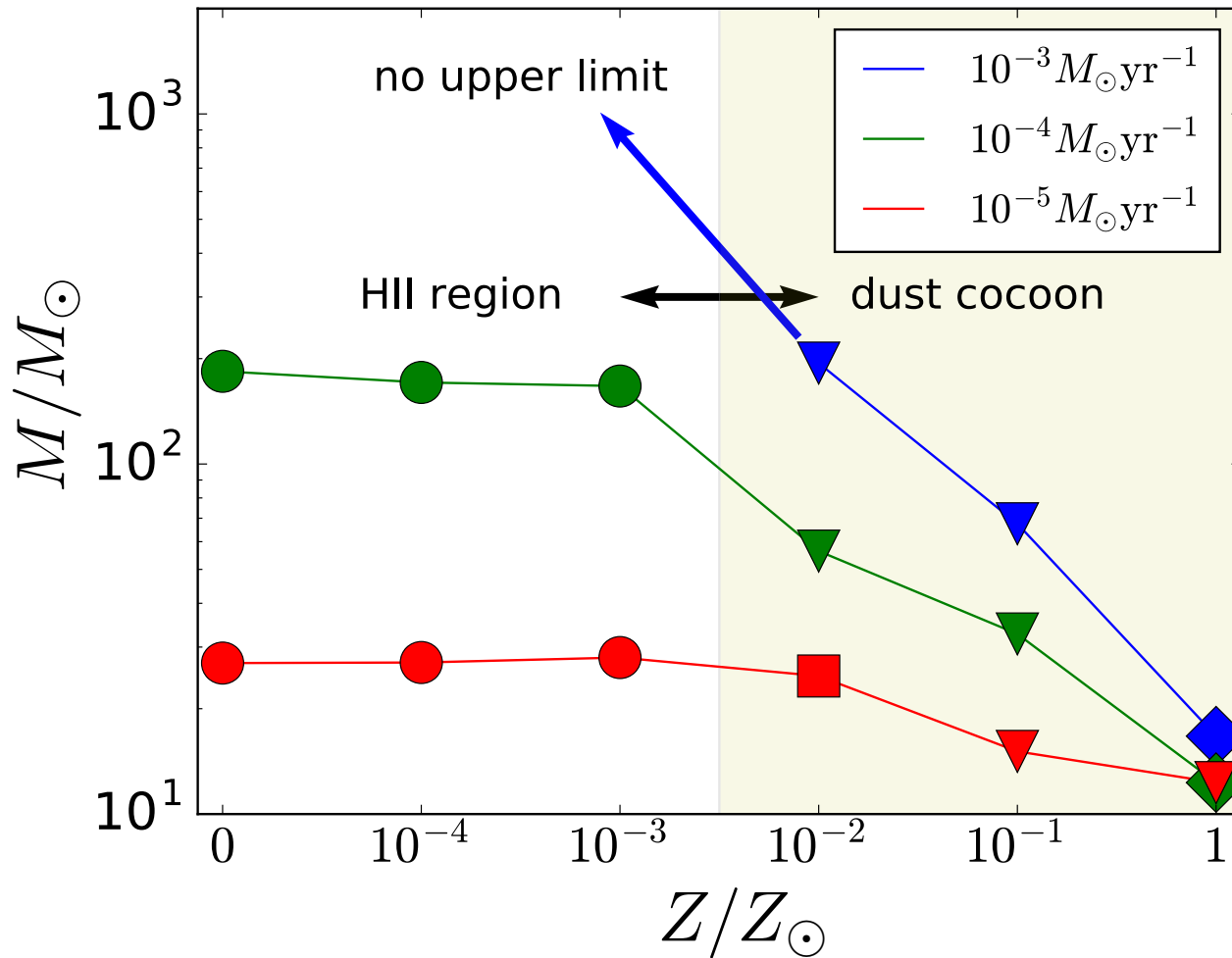
HII領域半径の見積もり



R_* : 原始星半径 R_{HII} : HII領域半径 r_g : 重力半径

高降着率 $10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の場合、輻射圧の効果でガス密度が上がるため
HII領域は広がらない

輻射フィードバックにより限界質量



金属度 $10^{-3} Z_{\odot}$ 以下の
場合、低降着率の場合には
HII領域形成により質量が制
限される

高降着率の場合、球対称に
限れば輻射圧によって星周
りの密度が上昇するため、
電離領域は広がれない

まとめ

- ・ 球対称定常解を数値的に求めることで原始星が輻射フィードバックにより質量降着が抑制される質量を求めた。
- ・ 太陽金属度程度の場合には降着率に限らず、10数太陽質量で輻射フィードバックにより質量降着が抑制される
- ・ 金属度が $10^{-3} Z_{\odot}$ 以下の場合にはダスト層への輻射フィードバックは効かず、より大質量星形成が可能
- ・ 今回は球対称を仮定したが、実際の原始星形成はディスクにより質量降着するため、多次元効果を今後考える必要がある