

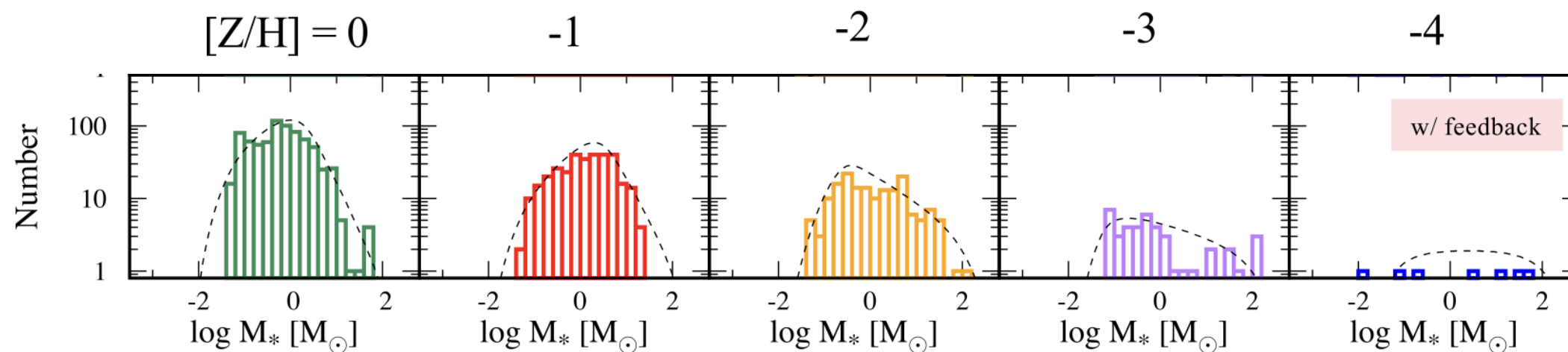
# 原始星のダスト加熱に よる分裂典型質量

京都大学 天体核研究室 M2 吉田壮希

@初代星・初代銀河研究会2025

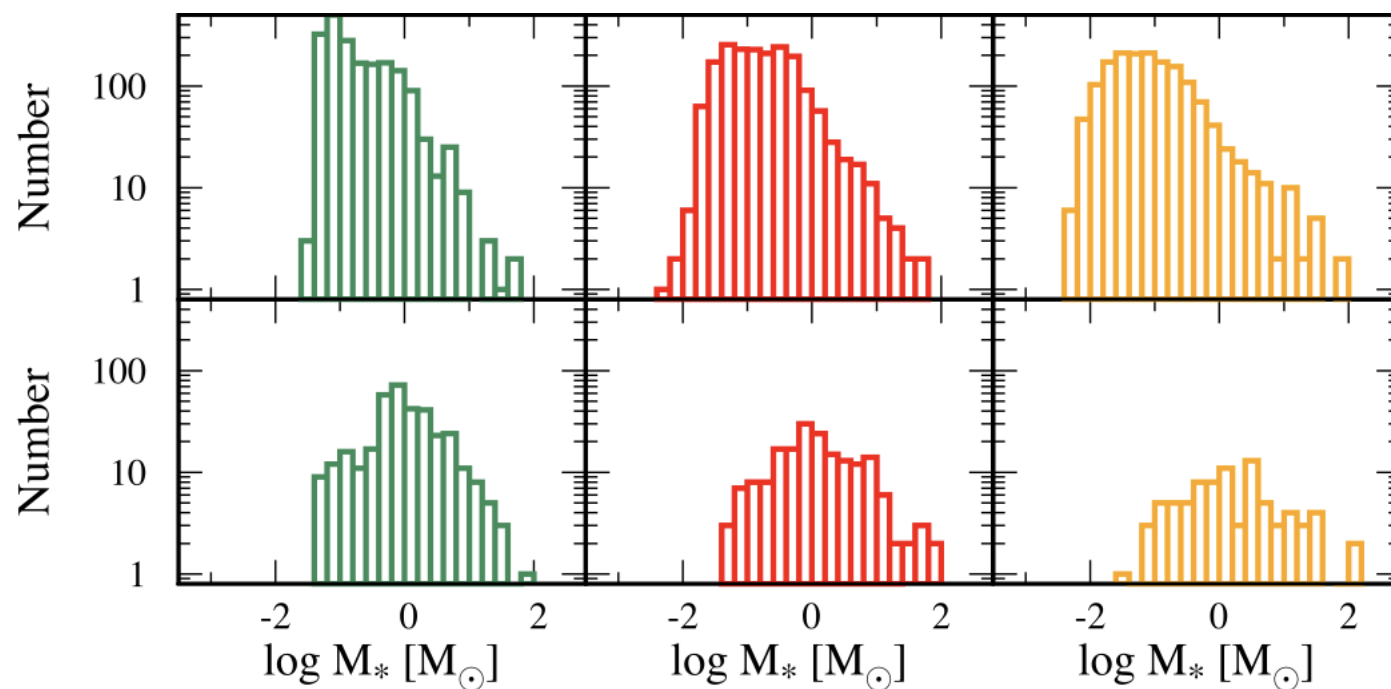
# イントロ

- JWSTでhigh- $z$ 銀河が観測されてきている
- pop iii銀河のIMFはtop-heavy
- Metallicityの増加に伴い普遍的なbottom-heavyなChabrierやSalpeter型に
- いつIMFはbottom-heavyになる？



# イントロ

- IMFの $1M_{\odot}$ 以下の低質量側には原始星フィードバックによるダストを介した加熱が効いている
- 温度が上がるとJeans質量が上昇  
⇒ 分裂による低質量星の形成が抑制



フィードバックなし

フィードバックあり

Chon et al. 2023

# 分裂質量を決める方法 (one-zoneモデル)

- one-zone計算で球対称ガス雲のcollapseを化学組成をときながら  $\rho$  -  $T$  進化を計算

- 有効断熱指数  $\gamma_{\text{eff}} \equiv \frac{d \ln P}{d \ln \rho}$

$\gamma_{\text{eff}} < 1$  のときフィラメントで重力崩壊

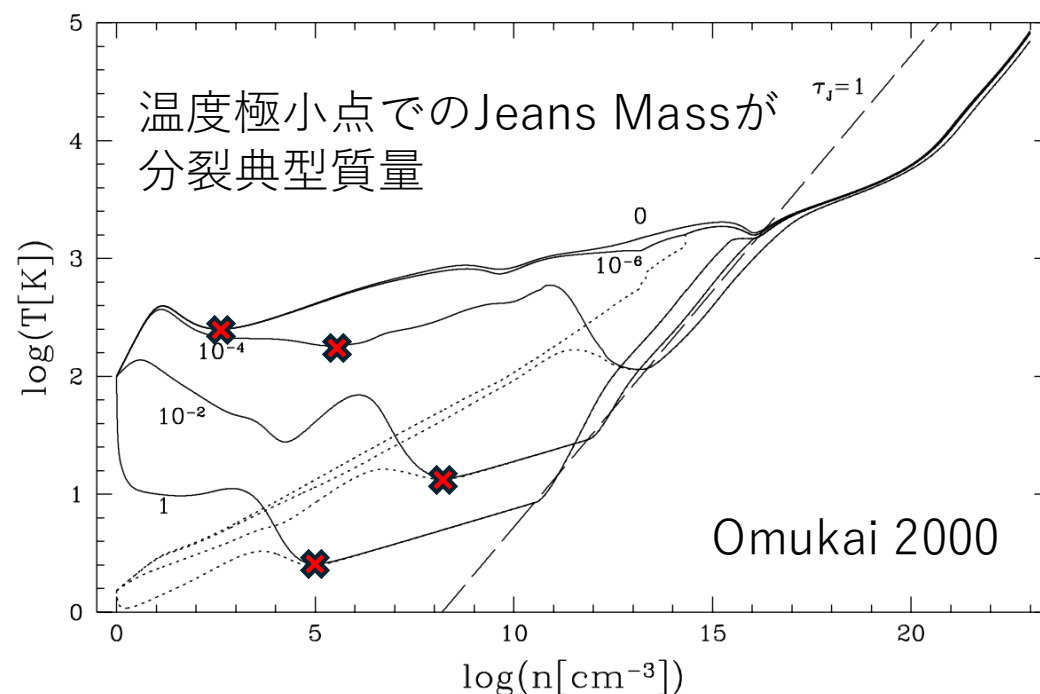
$\gamma_{\text{eff}} < 4/3$  のとき球対称で重力崩壊

$\Rightarrow \gamma_{\text{eff}}$  が1以下から1以上に変化

= 温度が極小となる点で

分裂が起こる

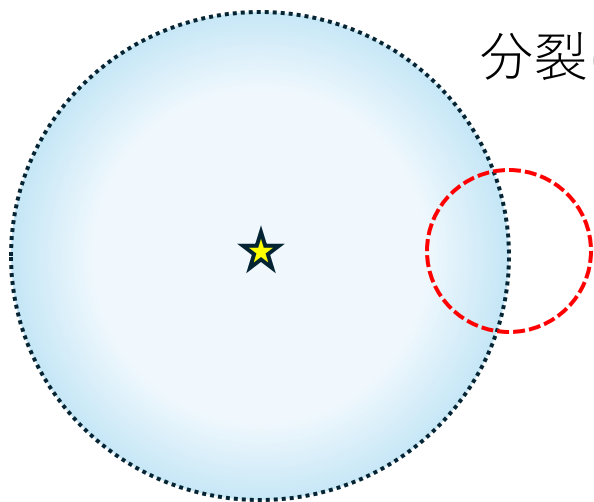
- そのときの半径より内側のガスは runaway collapseの後 いずれ降着して星質量になる



# 分裂質量を決める方法 (SK2022)

- Krumholz (2011)
  - 球対称の星形成で、降着期にガスが分裂できる最低質量を計算
  - 原始星が光ることを考慮してエネルギーバランスからダスト・ガスの温度プロファイルを求める
  - ある半径の点近くで分裂するために必要な質量はJeans mass
  - そこで分裂に使える質量はenclosed massで、Jeans massより速く上昇する
- ⇒分裂が始まる最低の半径、最小の質量がある
- Sharda & Krumholz (2022)ではこれをPrimordialまでMetallicityを変化させて分裂の典型質量を計算

# 分裂質量を決める方法 (SK2022)



分裂に利用できるMass  $M_{\text{enc}} \propto r^3 \rho \propto r^{1.5}$

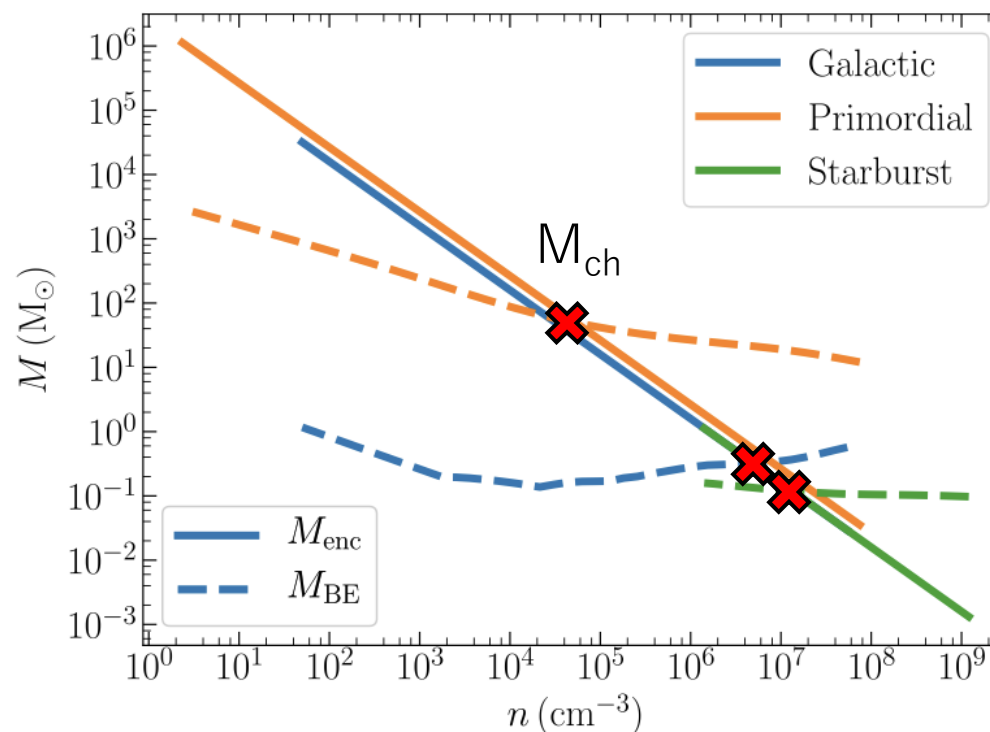
※Massはほとんど外側に集まっている

分裂に必要なMass  $M_{\text{BE}} \propto T^{3/2} \rho^{-1/2} \propto r^{0.75}$

⇒  $M_{\text{enc}}(r)$  と  $M_{\text{BE}}(r)$  の交点 ( $R_{\text{cr}}$ ) で  
の値を分裂典型質量  $M_{\text{ch}}$  とする

外側 ⇐

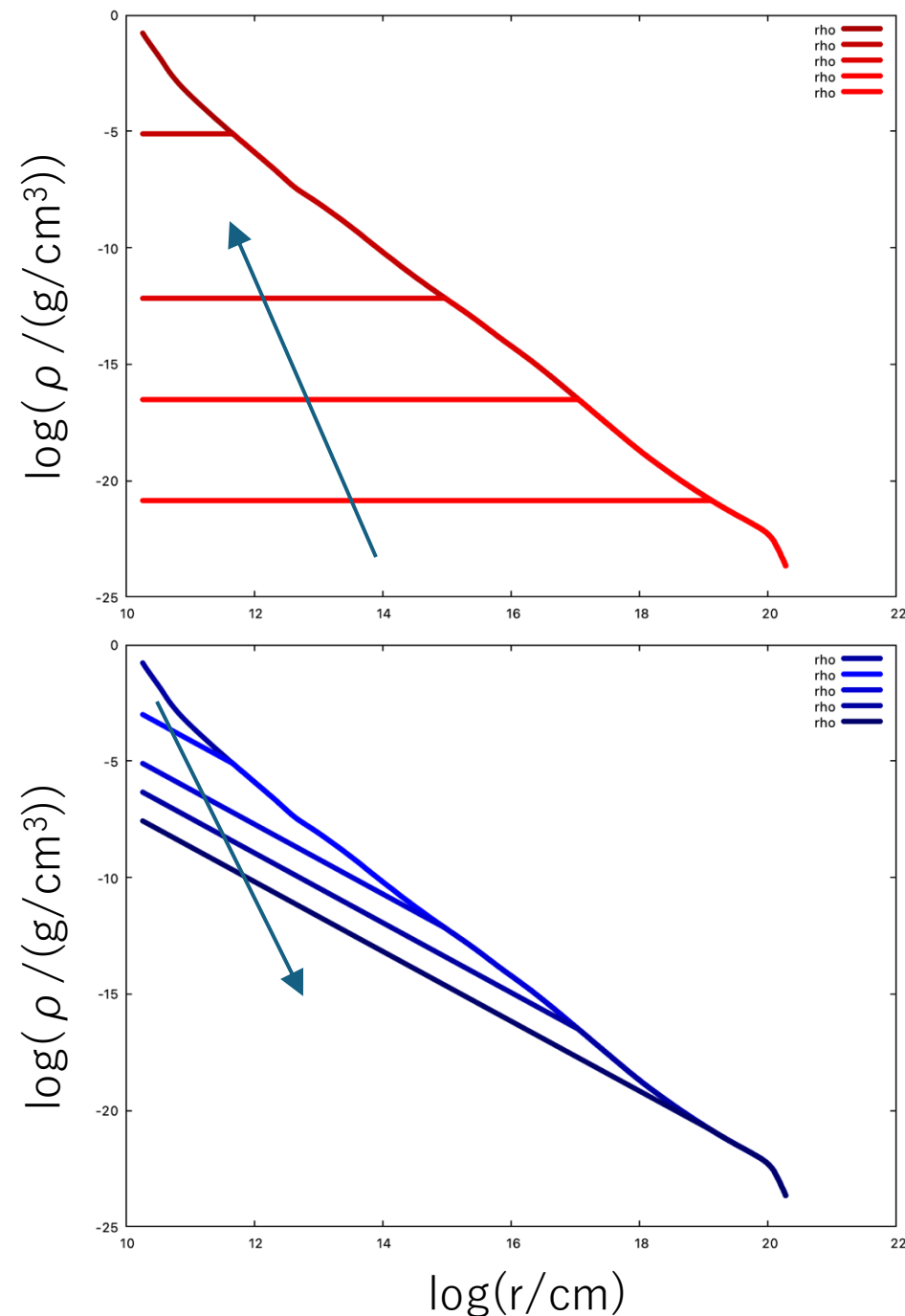
- one-zoneモデルで  
見積もった分裂質量との  
関係は？



⇒ 内側

# SK2022の問題点

- 降着期のある時刻での原始星の光度とガスの密度・組成分布を与えて分裂最小質量を求めている、原始星の進化とエンベロープの進化を合わせて考慮しているわけではない
- ガスの空間構造も単一のpower-lawを仮定しているが、本来はcollapseの過程とその後の降着に伴って密度分布ができていくはず
- そもそもダストのないprimordialでは原始星の加熱は効かないはずで、この方法で分裂質量を決められるのはおかしい？



# one-zoneモデルとの接続

- collapseでファーストコアができたあと、各時刻である半径  $R_{\text{infall}}$  までのガスは落下し始めているとする
- 降着率は  $R_{\text{infall}}$  での  $M_J/t_{\text{ff}}$  の数倍程度  $\dot{M} = f * c_s^3/G$
- 降着はfree-fall velocityでガスが降っていると考えると

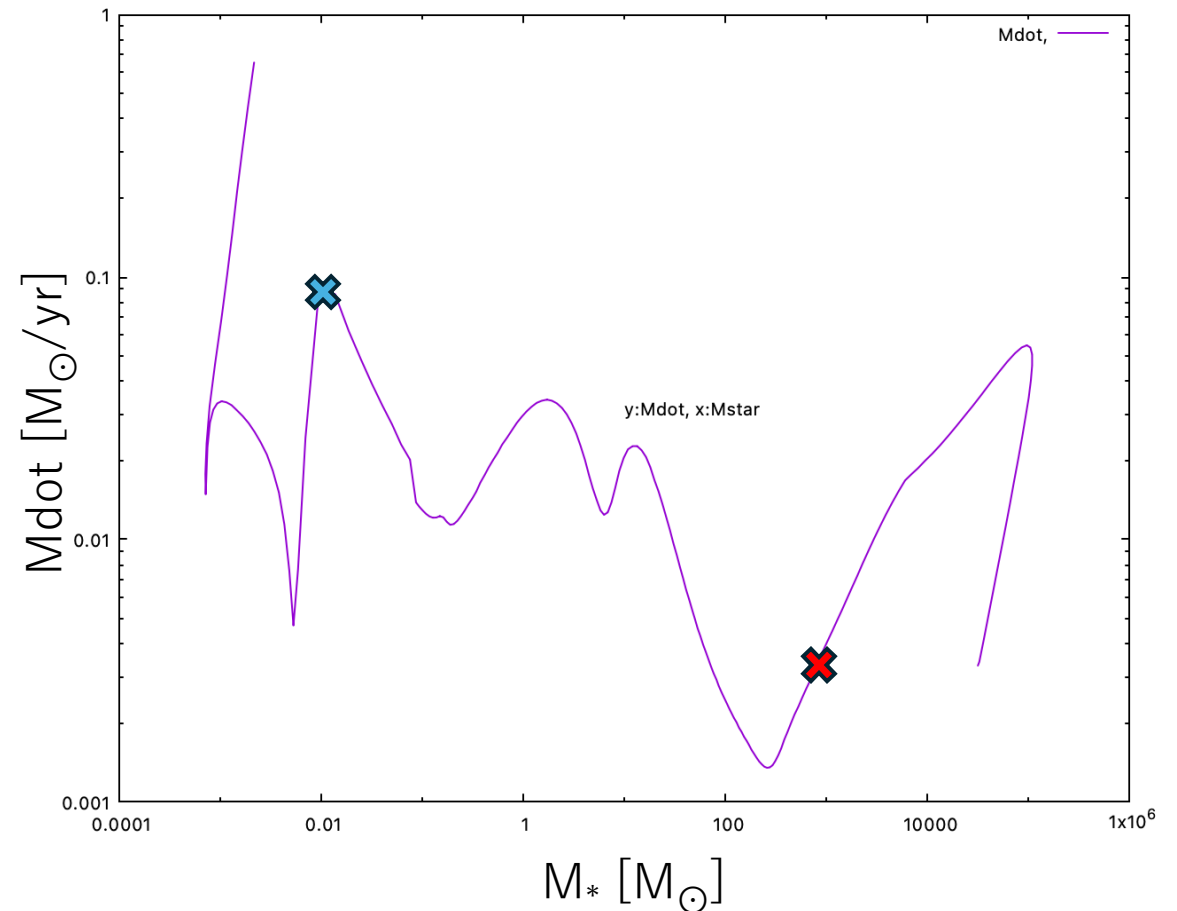
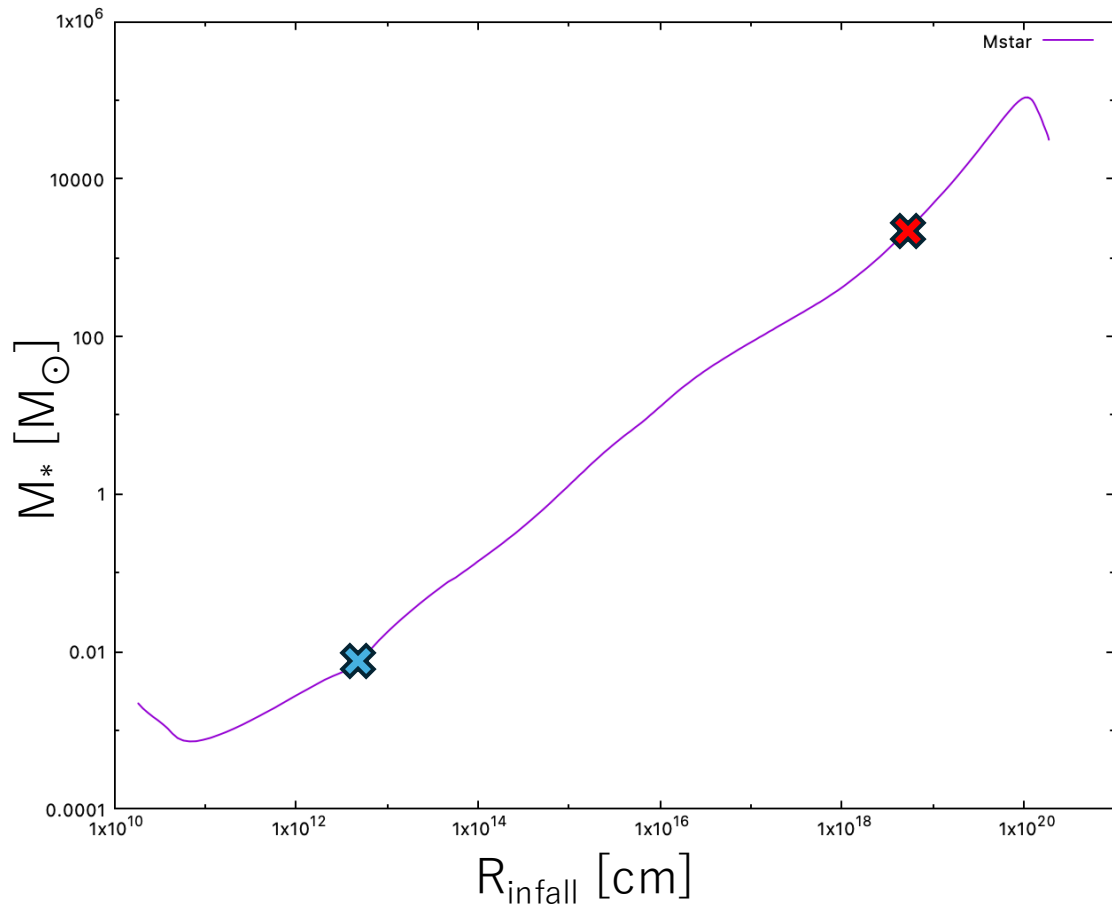
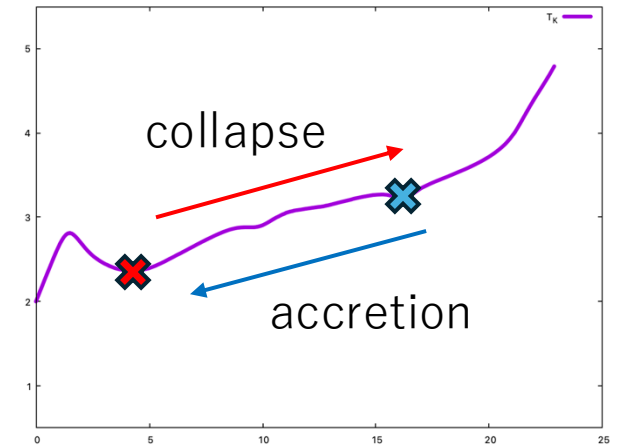
$$\rho(r) = \frac{\dot{M}}{4\pi\sqrt{2GM_*}r^3} \propto r^{-3/2}$$

- 原始星質量は、  $R_{\text{infall}}$  での  $M_J$  からfree-fallしている部分のmassを差し引いた質量で、これらは同じくらいのオーダー  
⇒原始星の進化とガスの進化を同時に扱える  
ここでは光度  $L$  は  $M_*$  によらず降着率の定数倍とする



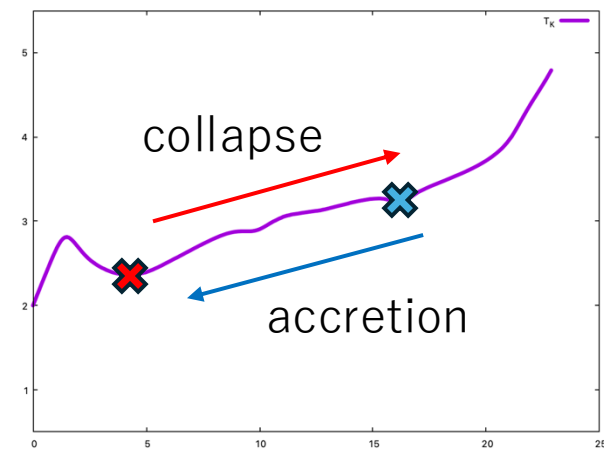
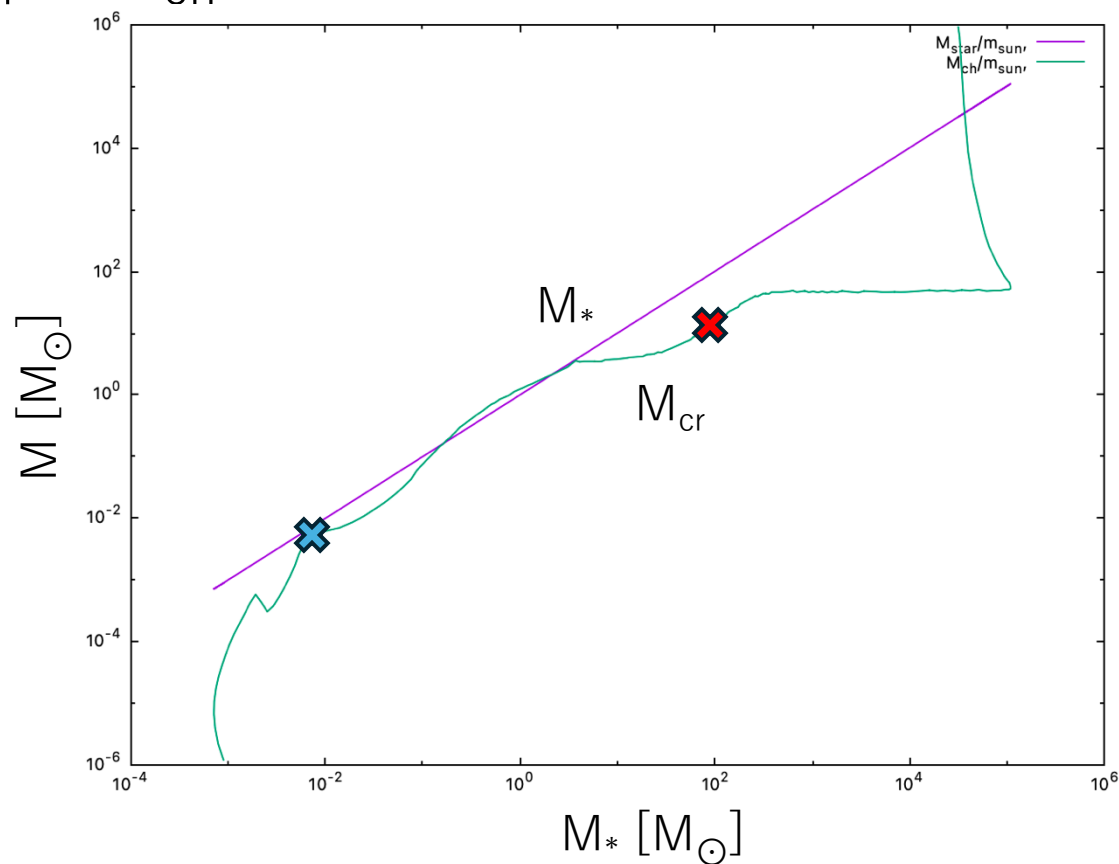
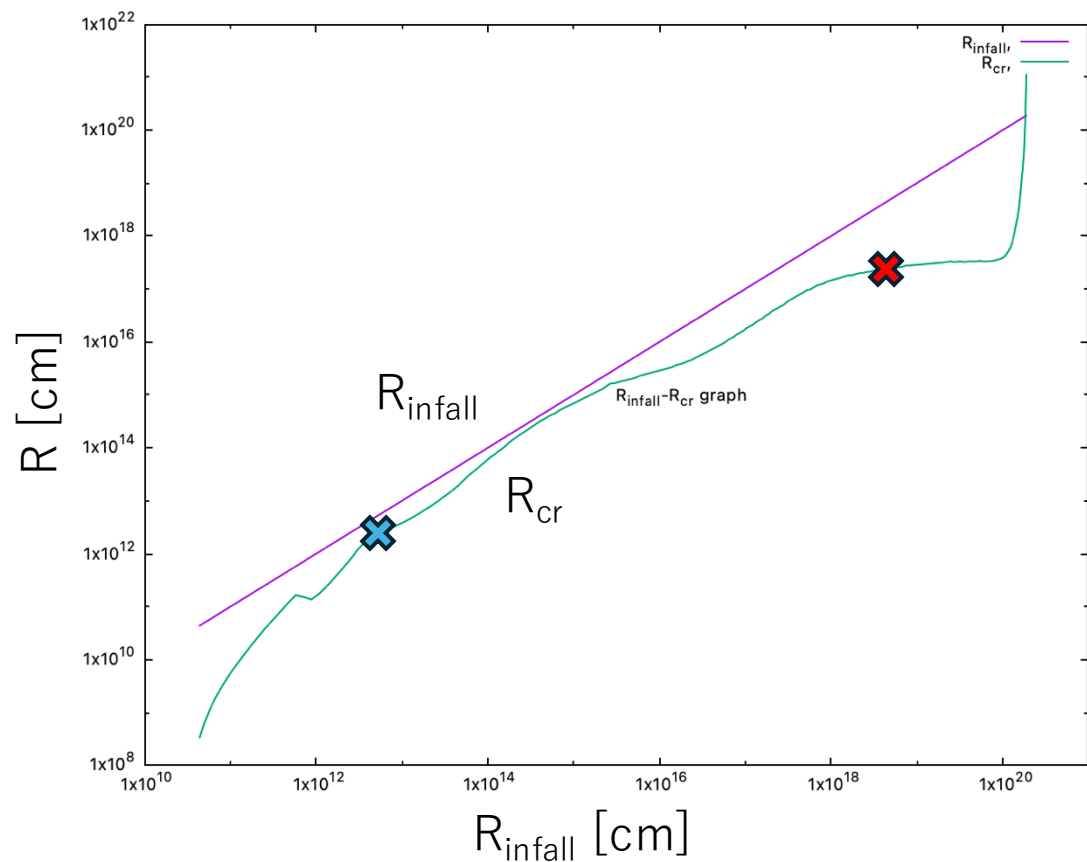
# one-zoneモデルとの接続

- Primordial ( $[Z/Z_{\odot}] = -24$ )で計算
- ファーストコア形成～温度の極小点まで



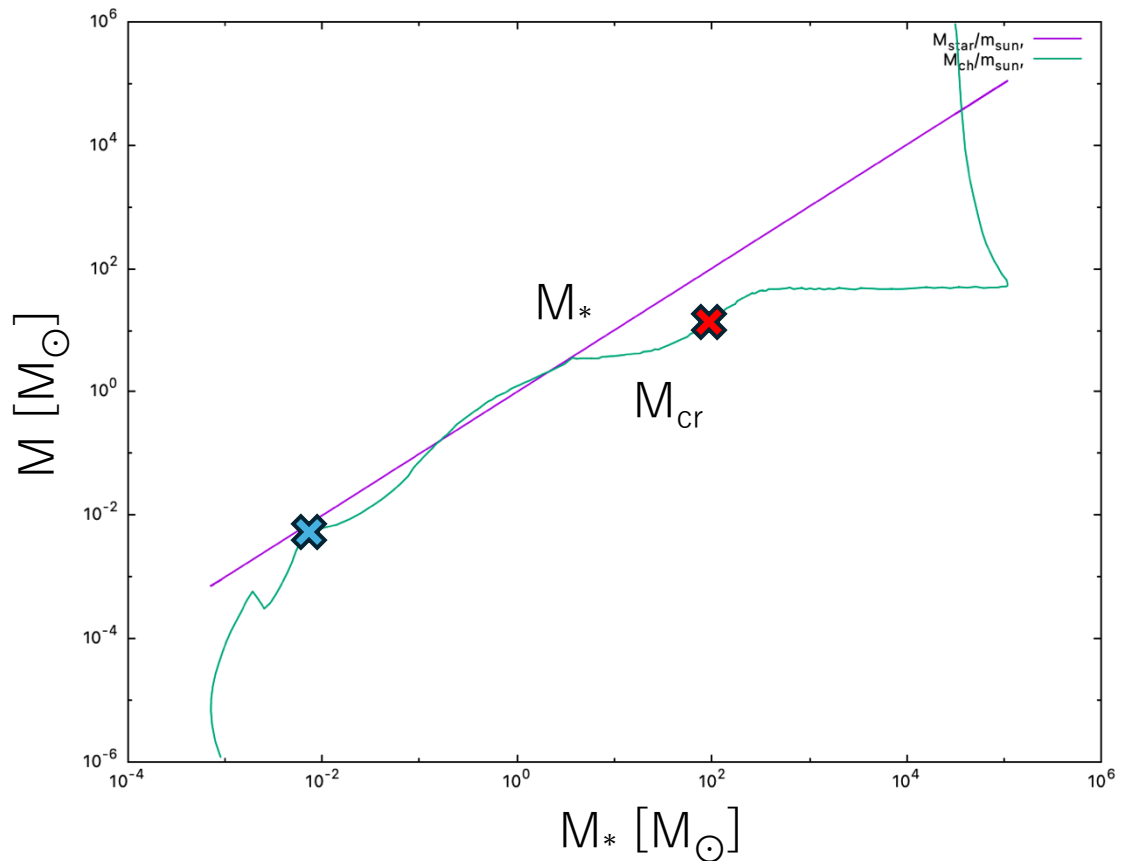
# one-zoneモデルとの接続

- 各時刻で $R_{\text{infall}}$ を  $\rho(r) \propto r^{-3/2}$  のガスの外縁として、そのときの原始星光度を使ってダスト温度を求め、 $R_{\text{cr}}$ と $M_{\text{ch}}$ を計算



# 求まった $M_{\text{ch}}$ の意味

- 求まった分裂典型質量 $M_{\text{ch}}$ は時間とともに変化する、  
原始星質量と同程度であり続ける
- SK2022では、外縁での圧力と  
速度分散をパラメータとして  
与え、それにより $M_{\text{ch}}$ は  
10-1000  $M_{\odot}$ 程度の値で変化
- そもそも同じ分子雲でも  
進化とともに変化するなら  
この値は無意味？

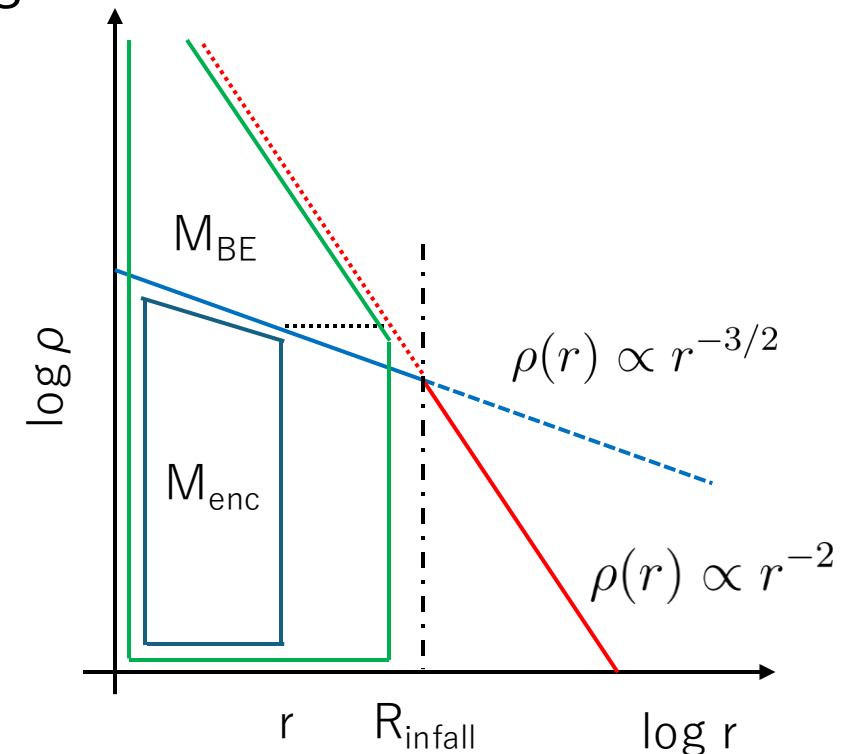


# なぜ原始星質量と同程度か

- Primordialではダストが存在せず、原始星の光度は温度プロファイルに影響しないため、温度は密度（と組成）で定まり、collapse時の同じ密度での温度になるはず

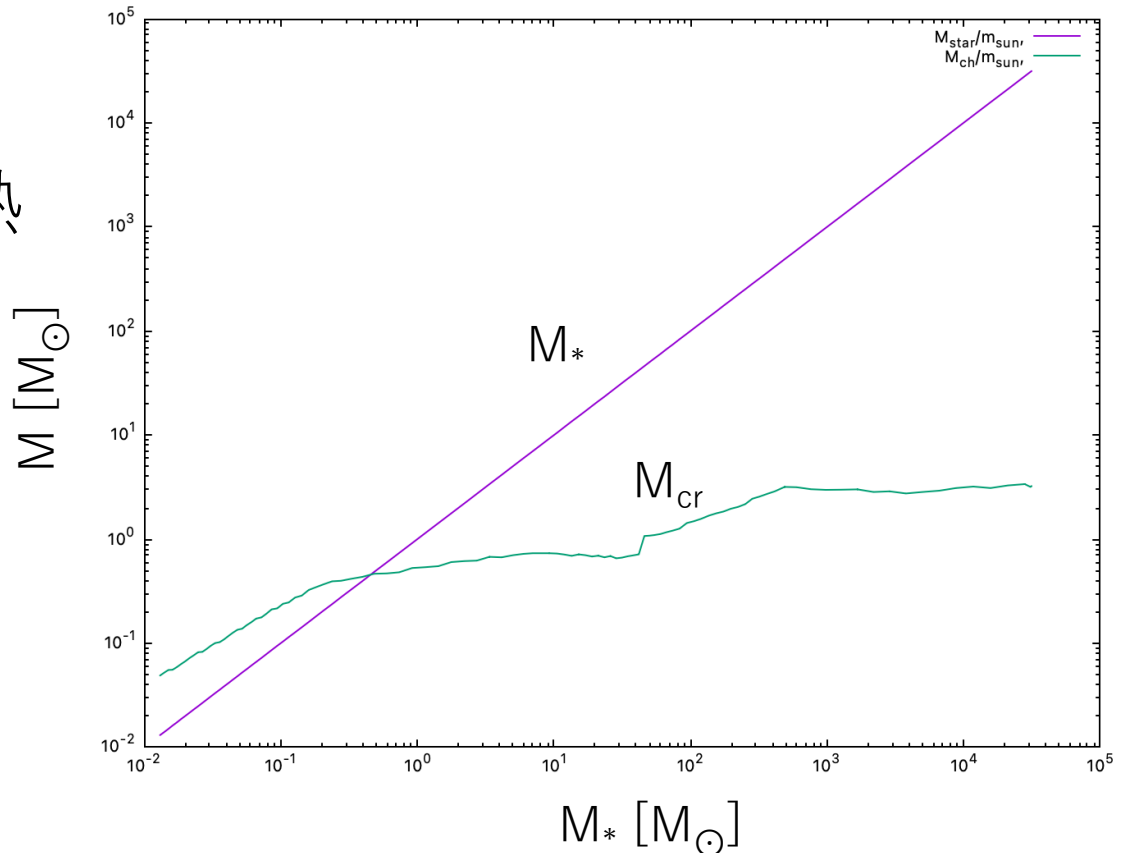
⇒  $M_{BE}(r)$  はその温度・密度でのJeans mass  
= collapse終了時点で  
その密度より内側にある総質量

- $r \ll R_{infall}$  では  $M_{enc}(r) \ll M_{BE}(r)$
- $r \sim R_{infall}$  では  $M_{enc}(r) \sim M_{BE}(r) \sim M_*$   
⇒  $R_{cr} \sim R_{infall}$ ,  $M_{ch} \sim M_*$



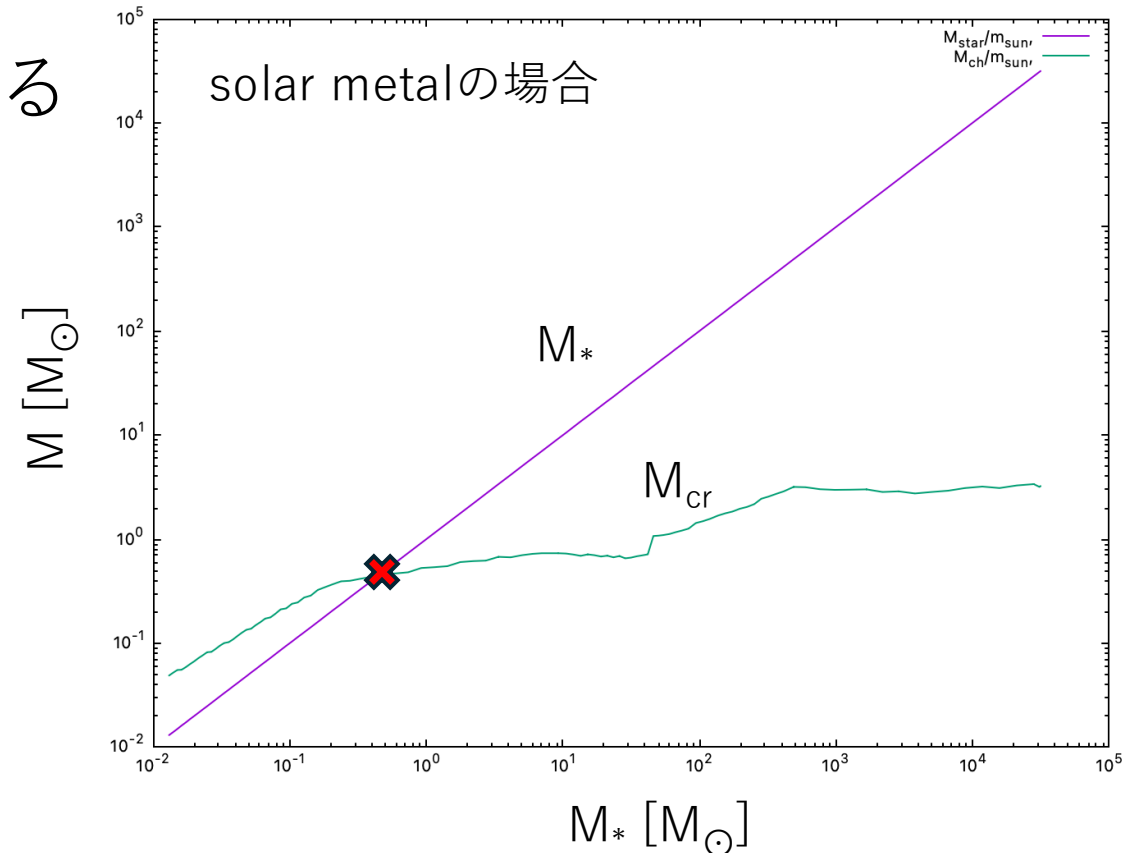
# Primordialでないときには分裂質量は決まる？

- Primordialでなくても、 $M_{\text{ch}}$ が時間とともに変化するのと同じ
- ダストは内側では加熱、外側では冷却としてはたらく、もしくはガス-ダストの結合が弱まり影響しなくなる
- $R_{\text{infall}}$ が小さいうちはダスト加熱によりJeans massが上昇し、 $R_{\text{cr}}$ は $R_{\text{infall}}$ より外側に  
 $\Rightarrow M_{\text{ch}} > M_*$
- $R_{\text{infall}}$ が大きくなるとその逆



# Primordialでないときには分裂質量は決まる？

- $M_{\text{ch}} > M_*$  のとき、 $R_{\text{cr}}$ で分裂できるが、そのタイムスケールは  $R_{\text{infall}}$  がその半径に到達するタイムスケールと同じなので、降着に巻き込まれ分裂できない
- $M_{\text{ch}} < M_*$  のとき、 $R_{\text{cr}}$ で分裂するタイムスケールは降着のタイムスケールと同程度  
⇒ 分裂できるように
- $M_{\text{cr}}$  が  $M_*$  に等しくなるときの質量が分裂最小質量を与える？



# 今後の展望

- Collapse後の密度プロファイルに加えて、各密度における化学組成もone-zone計算の結果を使う
- 原始星の進化（半径の時間変化）を計算し、 $M_*$ 、 $\dot{M}$ に対応した降着光度を使う
- フィードバックが効く場合はこの方法でmetallicityを変化させて分裂最低質量の変化を計算し、one-zoneの温度極小点を使った方法との関係を調べる
- フィードバックが効く境界のmetallicityは？