

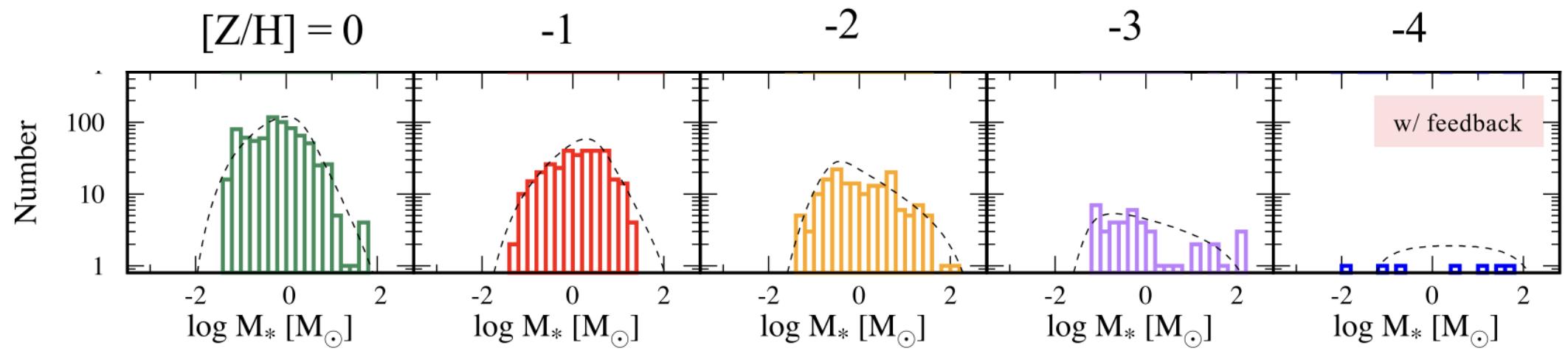
原始星のダスト加熱による分裂典型質量

京都大学 天体核研究室 M2 吉田壯希

@初代星・初代銀河研究会2025

イントロ

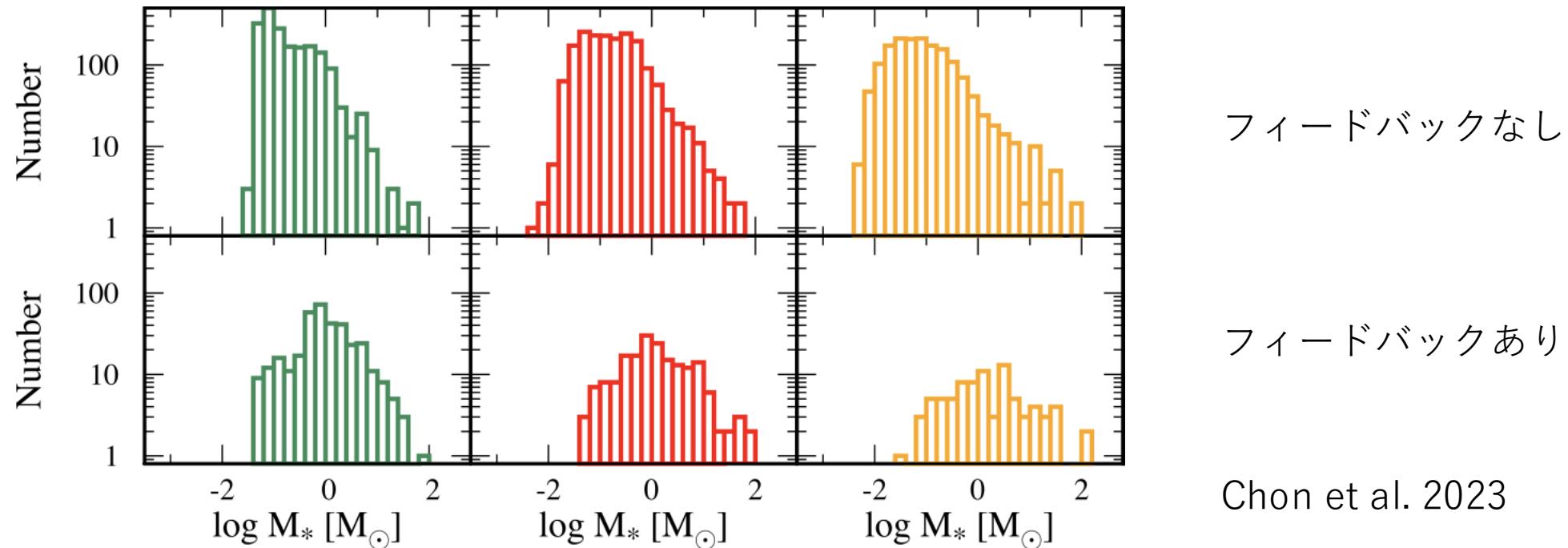
- JWSTでhigh-z銀河が観測されてきている
- pop iii銀河のIMFはtop-heavy
- Metallicityの増加に伴い普遍的なbottom-heavyなChabrierやSalpeter型に
- いつIMFはbottom-heavyになる？



Chon et al. 2023

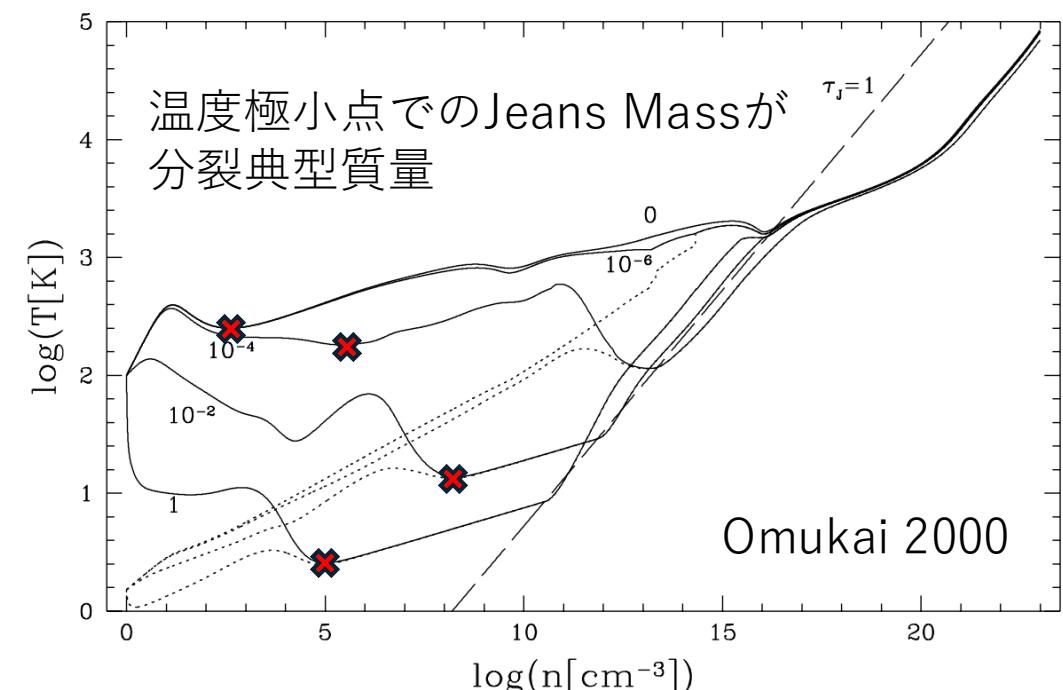
イントロ

- 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



分裂質量を決める方法 (one-zoneモデル)

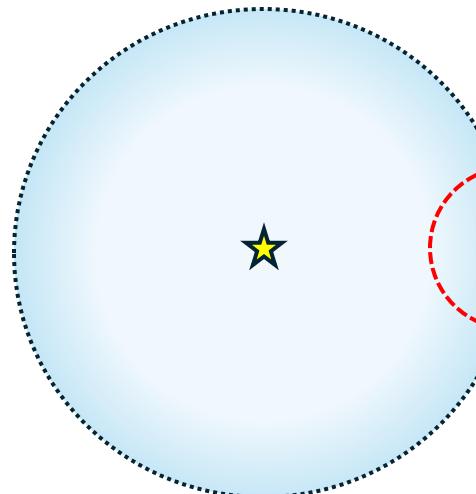
- one-zone計算で球対称ガス雲のcollapseを化学組成をときながら $\rho - T$ の進化を計算
- 有効断熱指数 $\gamma_{\text{eff}} \equiv \frac{d \ln P}{d \ln \rho}$
 $\gamma_{\text{eff}} < 1$ のときフィラメントで重力崩壊
 $\gamma_{\text{eff}} < 4/3$ のとき球対称で重力崩壊
 $\Rightarrow \gamma_{\text{eff}}$ が1以下から1以上に変化
= 温度が極小となる点で分裂が起こる
- そのときの半径より内側のガスは runaway collapse 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)



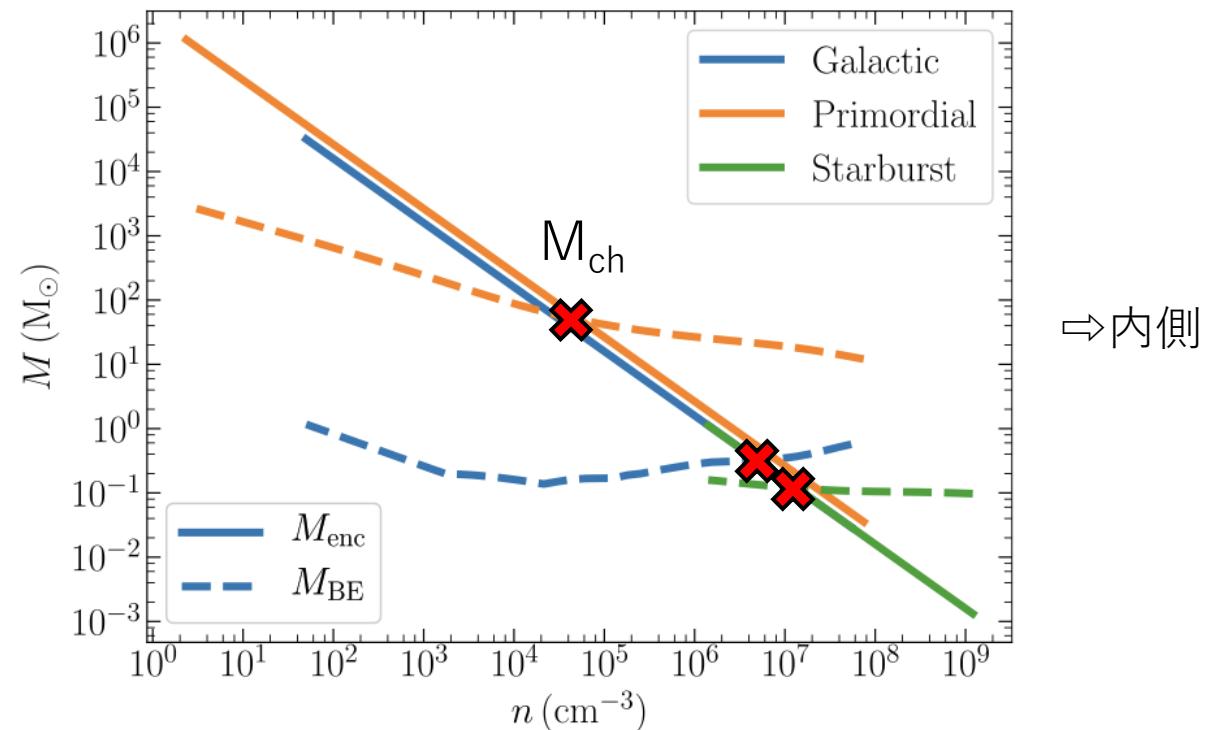
分裂に利用できるMass $M_{\text{enc}} \propto r^3 \rho \propto r^{1.5}$
※Massはほとんど外側に集まっている

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_{cr})での値を分裂典型質量 M_{ch} とする

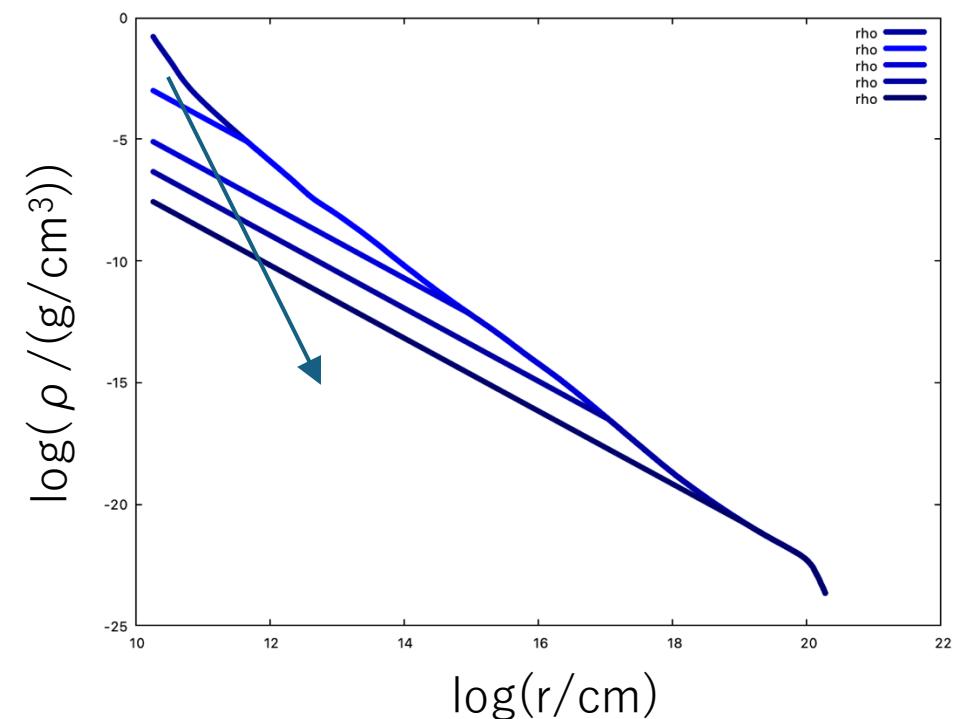
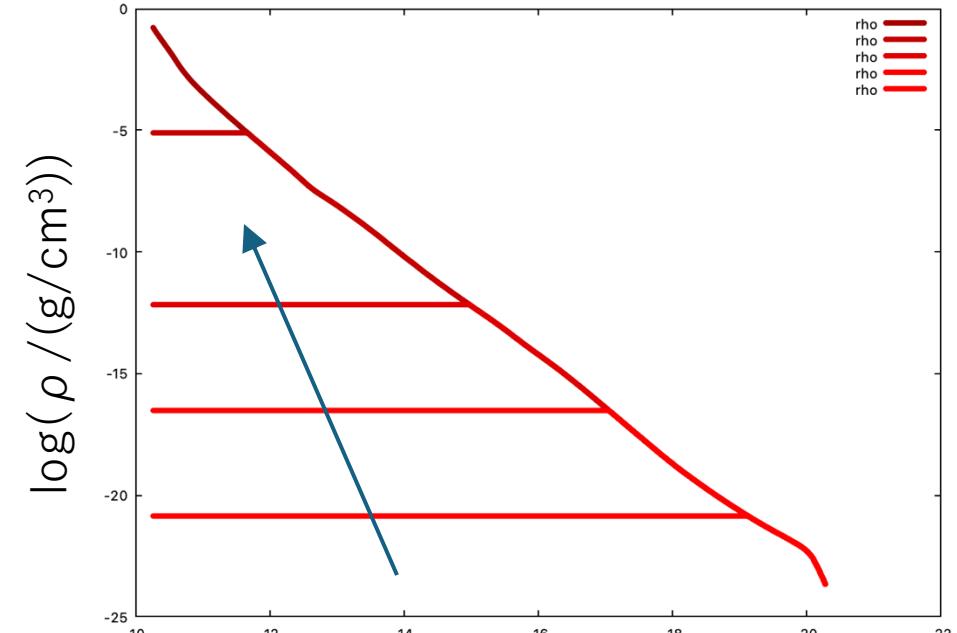
- one-zoneモデルで見積もった分裂質量との関係は？

外側 ⇌



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て、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るはず
- 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_{infall} までのガスは落下し始めているとする

- 降着率は R_{infall} での M_J/t_{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

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

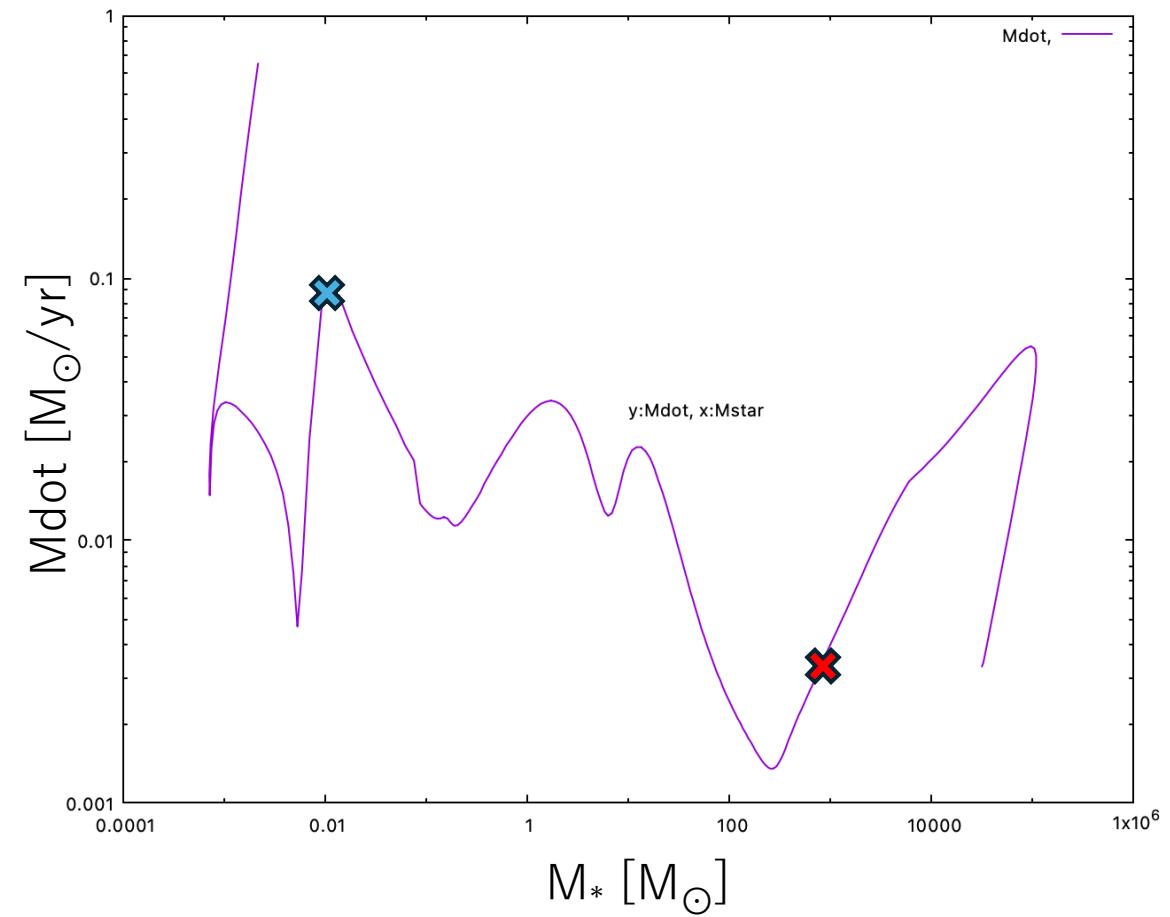
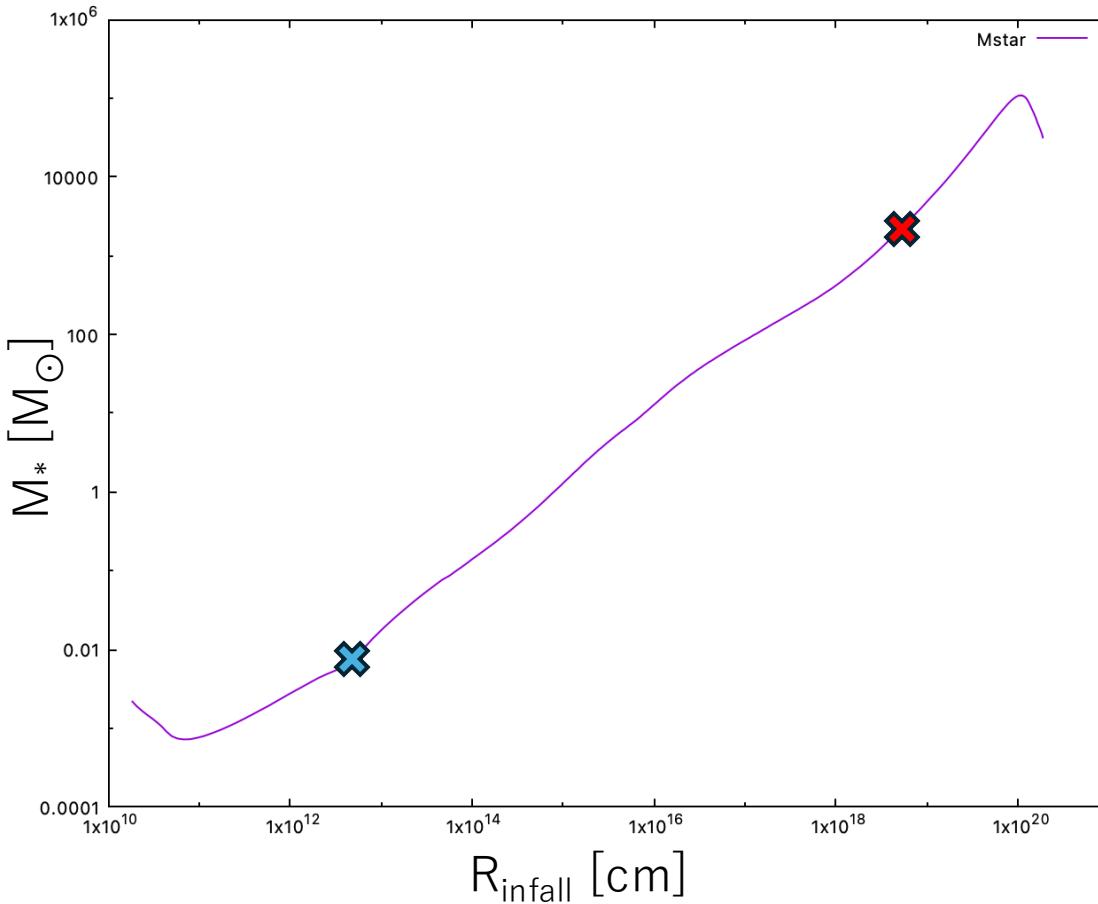
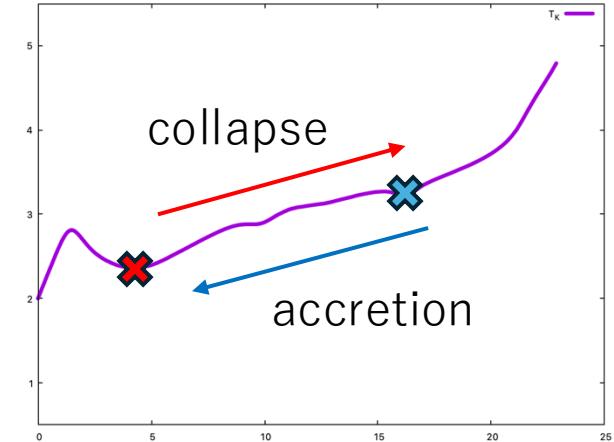
- 原始星質量は、 R_{infall} での M_J から free-fall している部分の mass を差し引いた質量で、これらは同じくらいのオーダー

⇒ 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

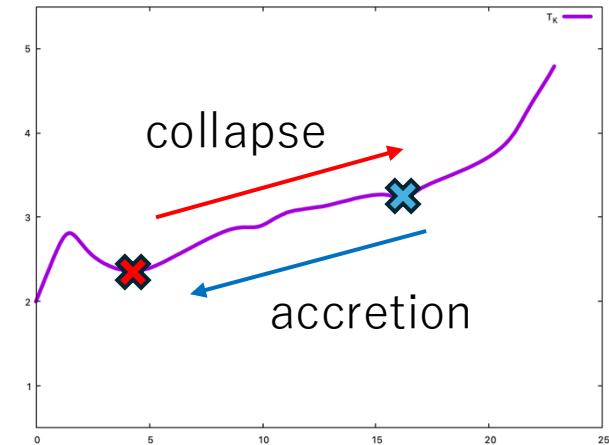
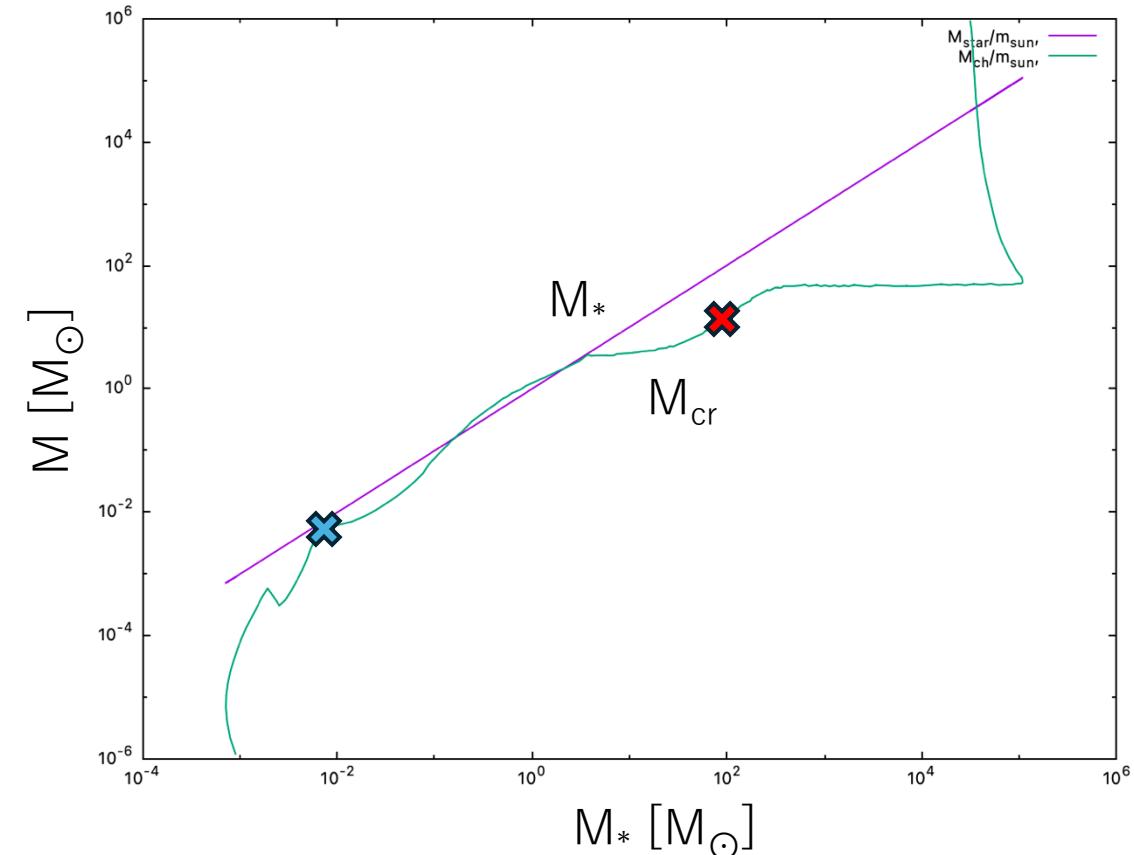
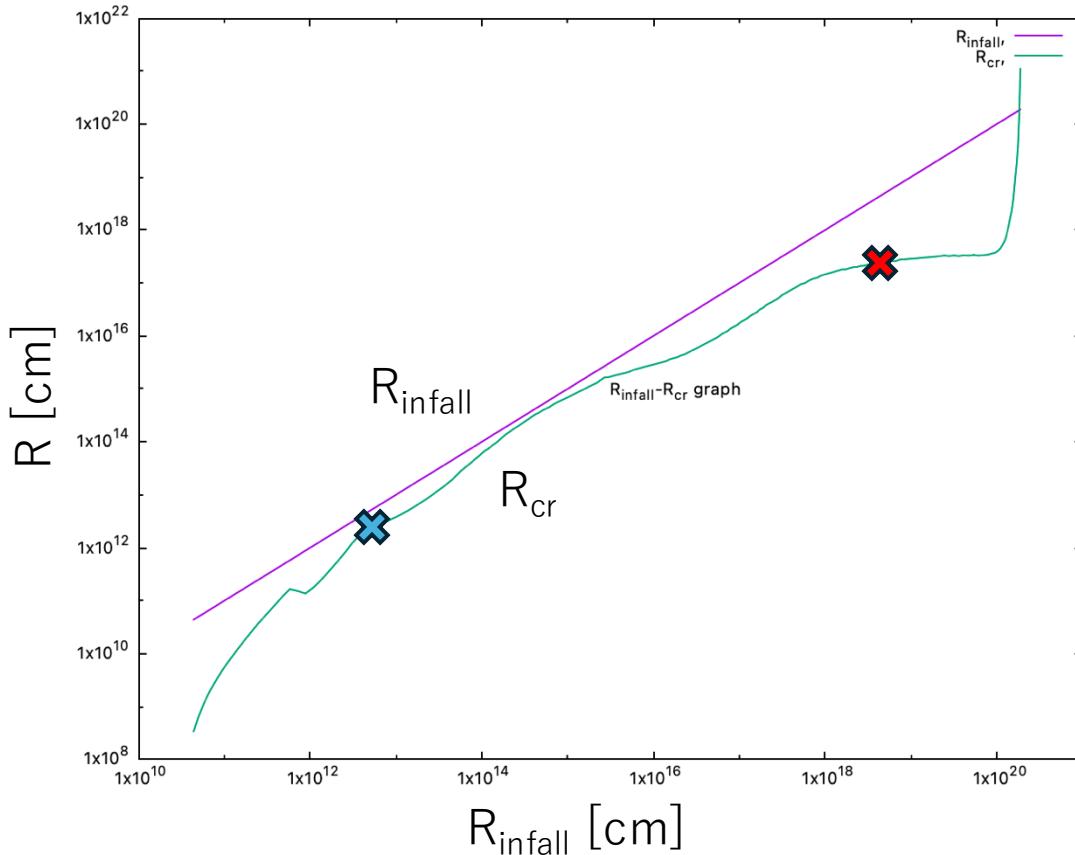
one-zoneモデルとの接続

- 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



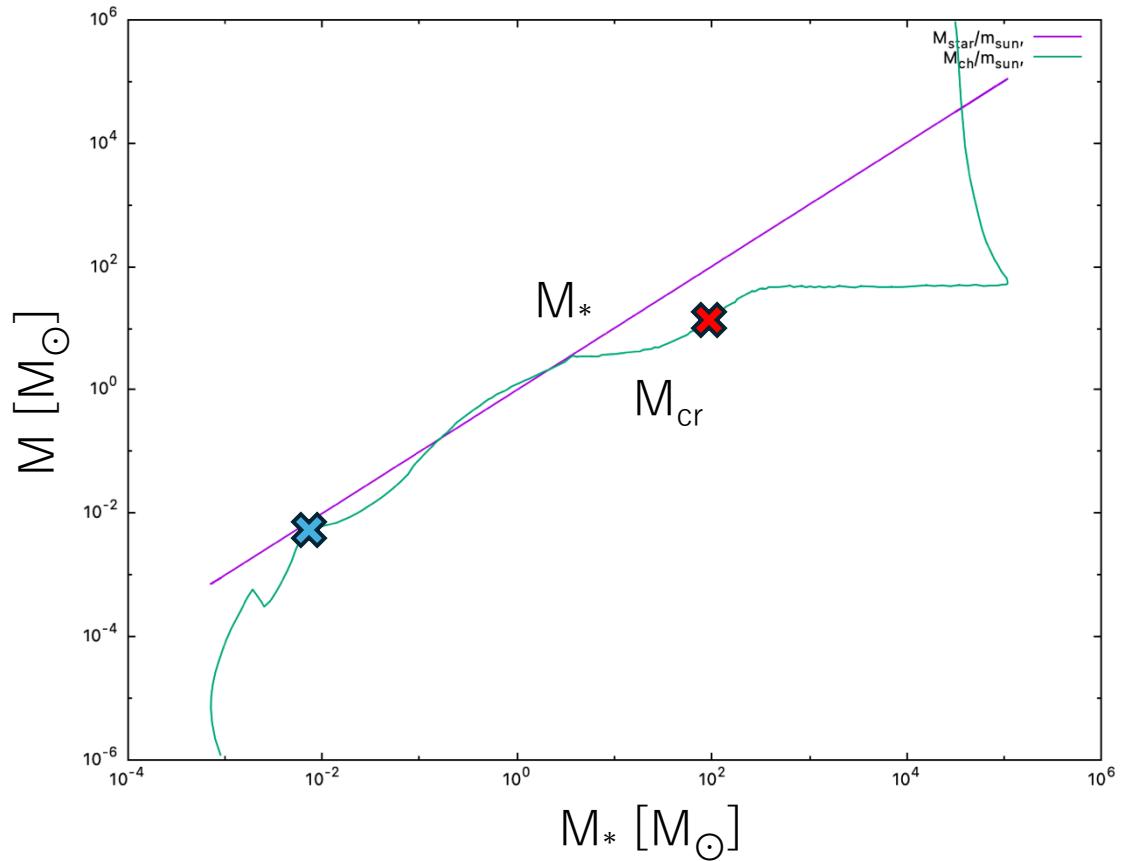
one-zoneモデルとの接続

- 各時刻で R_{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_{cr} と M_{ch} を計算



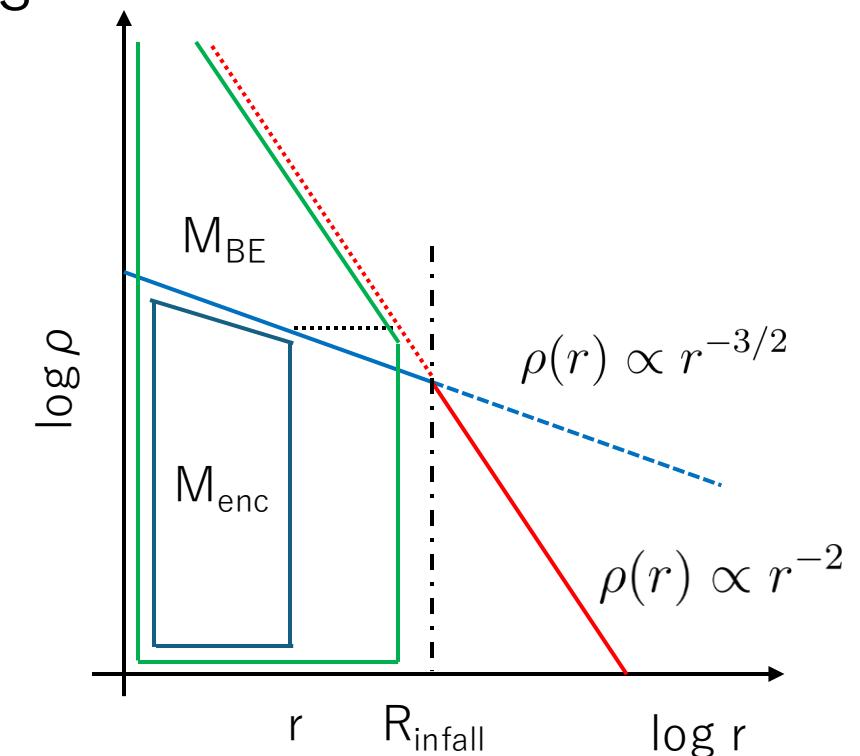
求まった M_{ch} の意味

- 求まった分裂典型質量 M_{ch} は時間とともに変化し、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_{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？



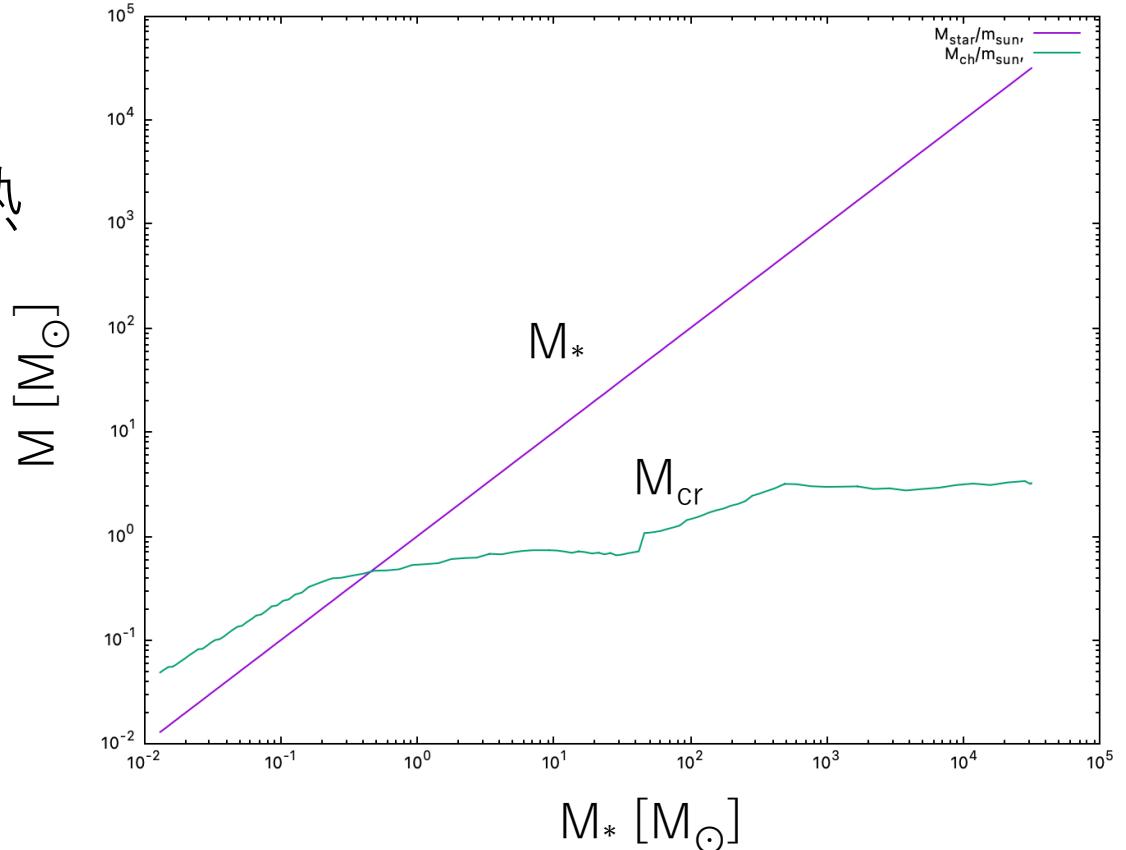
なぜ原始星質量と同程度か

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



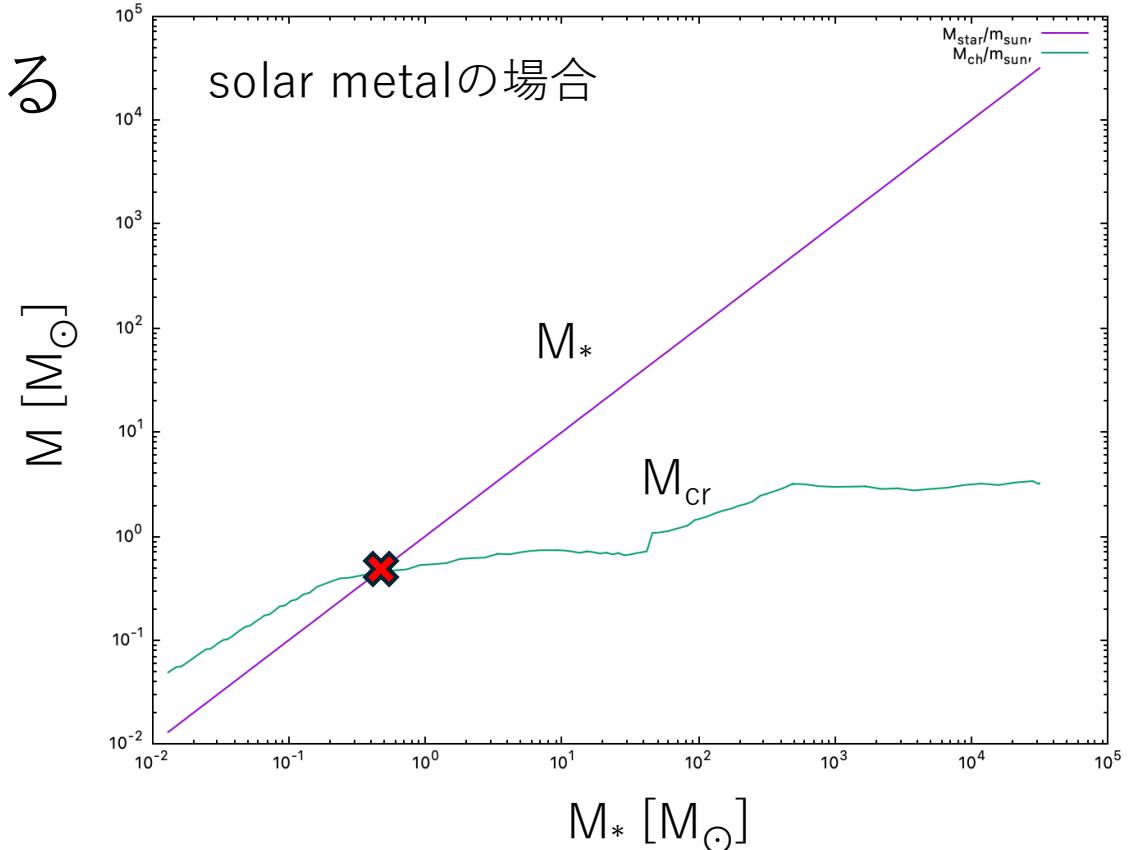
Primordialでないときには分裂質量は決まる？

- Primordialでなくとも、 M_{ch} が時間とともに変化するのは同じ
- 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_{infall} が小さいうちはダスト加熱によりJeans massが上昇し、 R_{cr} は R_{infall} より外側に
 $\Rightarrow M_{\text{ch}} > M_*$
- R_{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_{cr} で分裂できるが、そのタイムスケールは R_{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_{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_{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_* 、 $M_{\dot{M}}$ 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？