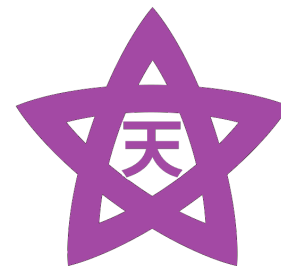




東北大学



Theoretical Astrophysics  
Tohoku University

# 超大質量星形成における 原始星構造と星周円盤の共進化

木村 和貴  
(東北大学)

共同研究者

細川隆史(京都大学)、杉村和幸(北海道大学)、福島肇(筑波大学)、  
大向一行(東北大学)

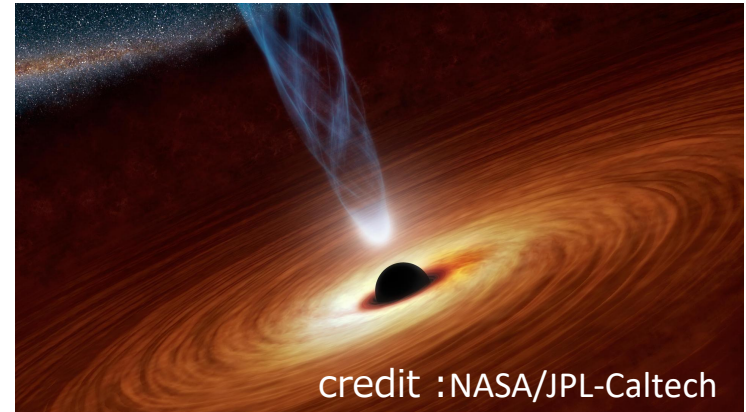
初代星・初代銀河研究会2023 11/20(月)-22(水)@北海道大学

# Direct Collapse (DC) シナリオ

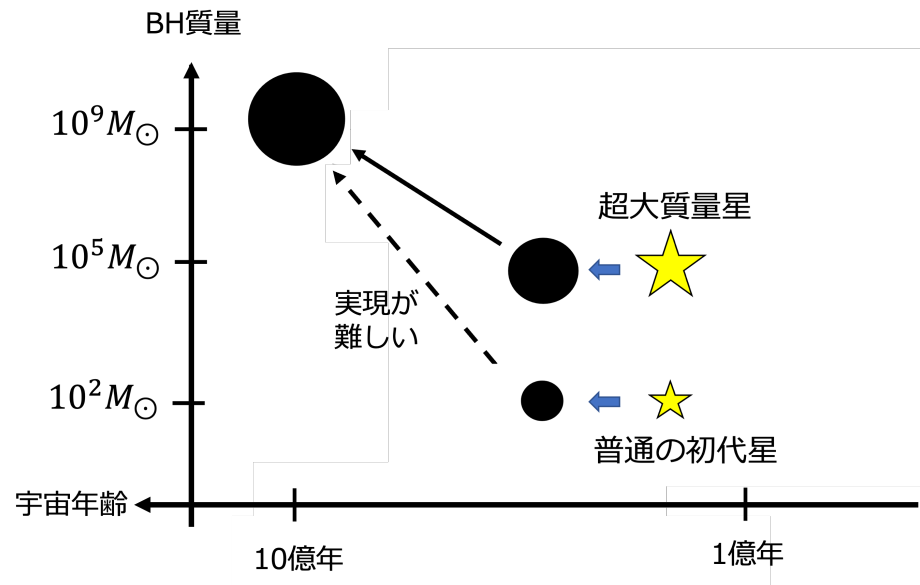
- Supermassive Black Hole (SMBH)

銀河中心に普遍的に存在し、  
銀河進化とも関係。

宇宙誕生から10億年以内に既に  
 $10^9 M_{\odot}$ を超えるSMBHが存在。



- DCシナリオ : 超大質量星( $\sim 10^5 M_{\odot}$ )を介したSMBH形成シナリオ



# 超大質量星はできるのか？

- 宇宙初期の特定の環境下では高い降着率の実現。(e.g. UV background)  
降着ガスへのフィードバックが効かずに降着が続けば超大質量星が形成。

$$0.1-1 M_{\odot}/\text{yr} \times 10^6 \text{ yr (星の寿命)} = 10^5-10^6 M_{\odot}$$

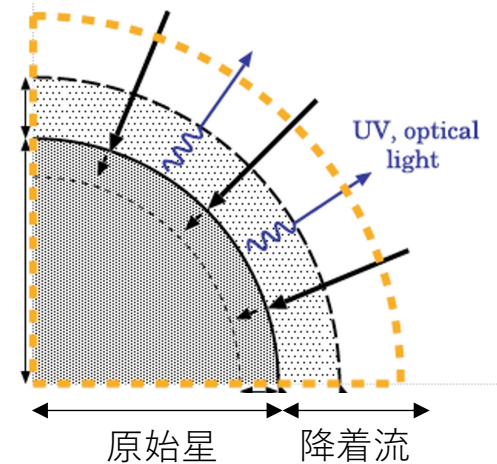
- フィードバック(輻射、回転)は効くのか？

ガス降着中の**原始星構造の進化**によって決まる。

これまで1D星進化計算でモデル化されてきたが、  
実際の宇宙には角運動量や乱流が存在。

本研究では3次元輻射流体シミュレーションで  
原始星の進化を追う。今回は原始星形成から  
100年間の進化を追った結果を紹介。

1D星進化計算の概念図  
(球対称を仮定)



(Hosokawa & Omukai 2009  
Hosokawa+2011)

# Method : 3次元輻射流体シミュレーション

- 計算コード : SFUMATO-RT

- 自己重力
- 適合格子法 (Adaptive Mesh Refinement)
  - ➡ 高い解像度で**星の内部構造まで分解**

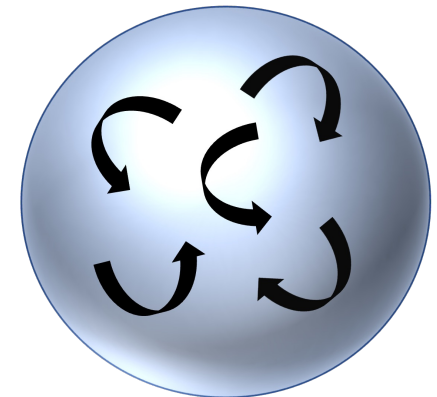


(Matsumoto 2007, Sugimura et al. 2020)

- 陽的M1クロージャ法(w/ 光速制限法)を用いた独自の輻射流体ソルバーを実装
  - ➡ 各セルで輻射に関する素過程を解く。星光度・冷却率などは計算中で求まる。  
(Fukushima et al. 2020, Rosdahl & Teyssier 2015)

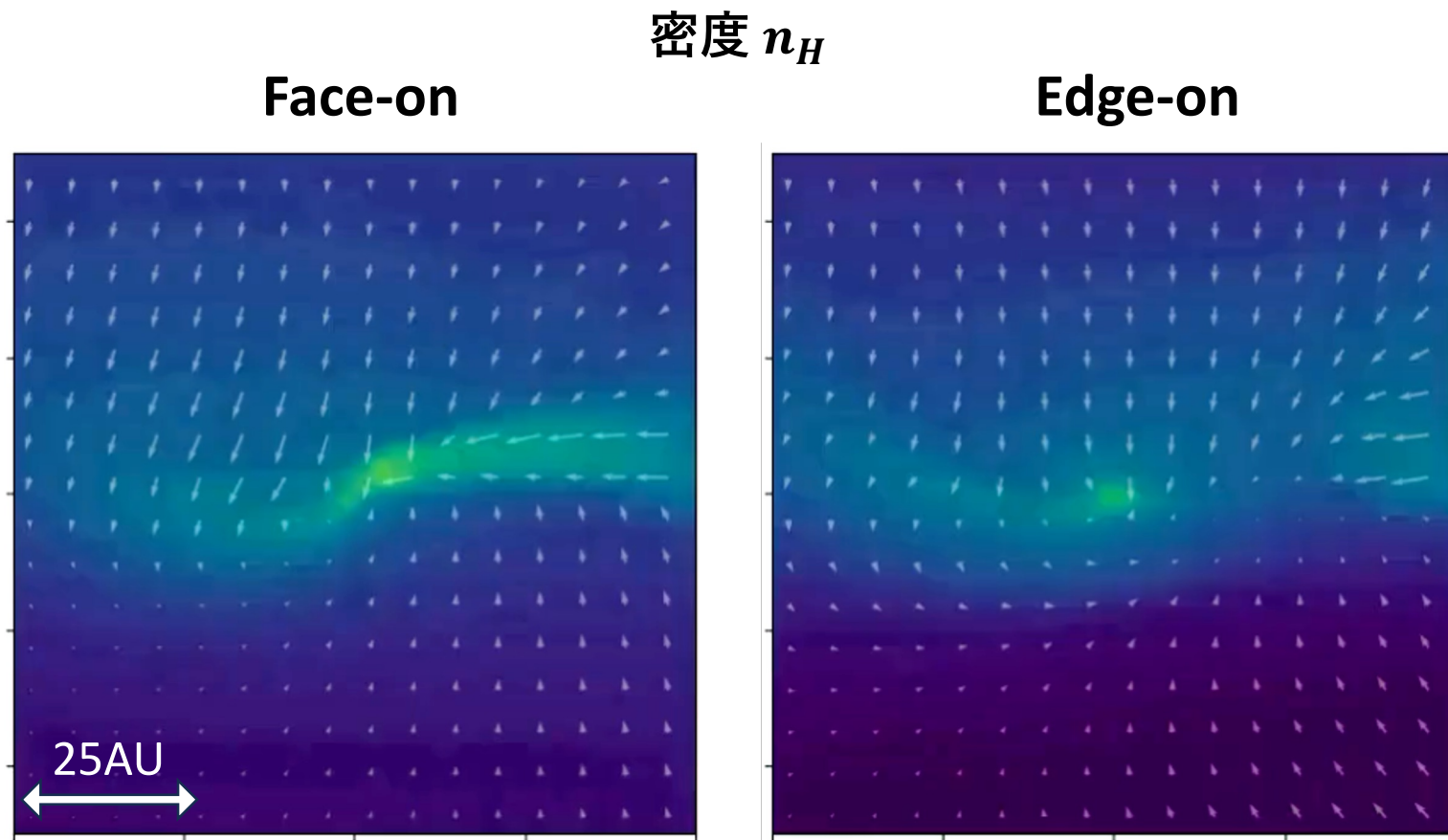
- 計算の初期条件 : 乱流込みのBonner-Ebert球

- 中心密度  $n_H = 10^9 \text{ cm}^{-3}$     温度  $T = 5 \times 10^3 \text{ K}$ 
  - ➡  $\dot{M} \sim 1 M_{\odot}/\text{yr}$  (Direct Collapseシナリオに対応)
- 乱流  
Power spectrum  $P(k) \propto k^{-4}$   
 $\sigma_v = \langle v^2 \rangle = c_s$  (Mach数=1)



**Result**

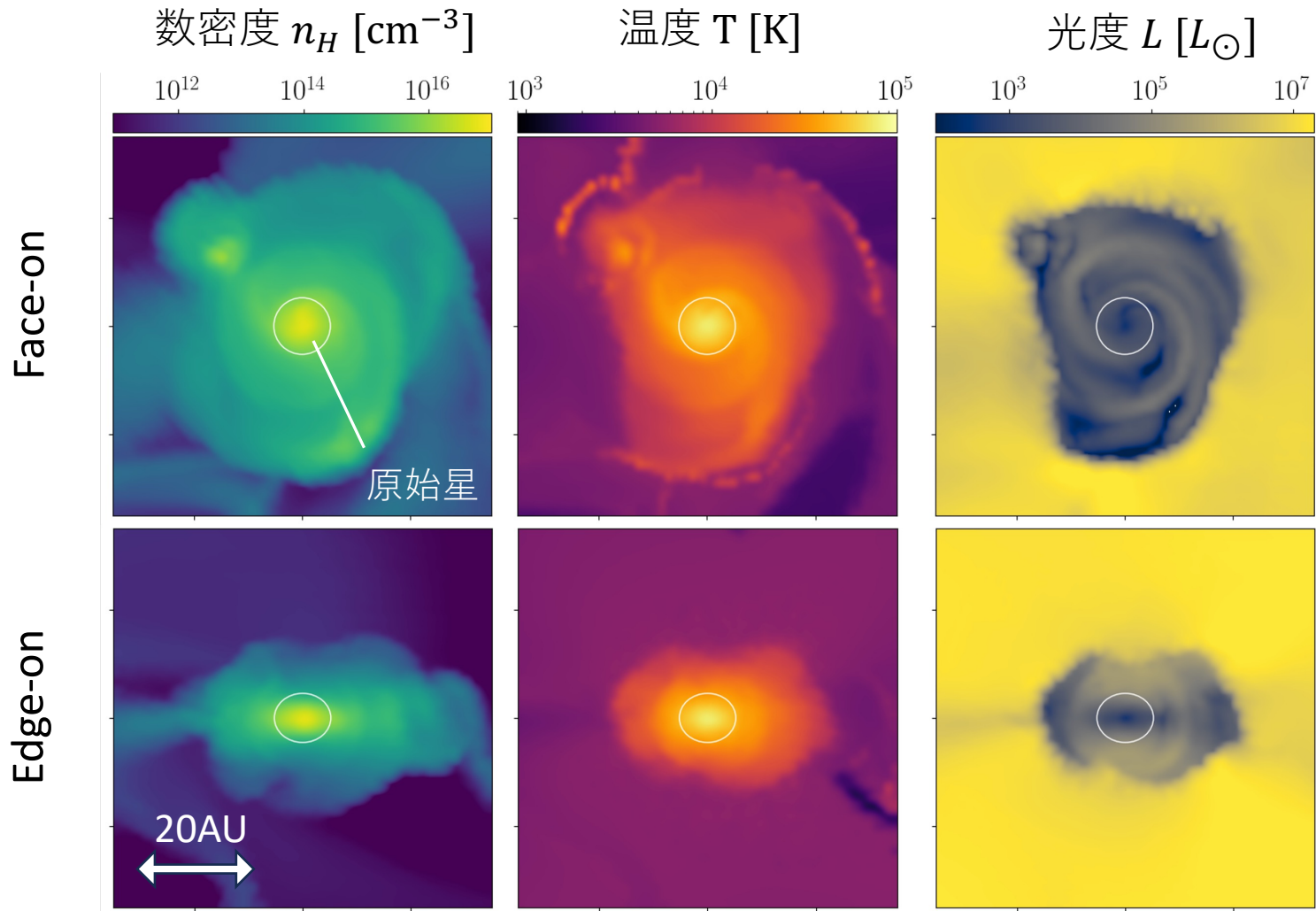
# Simulation Movie



原始星形成から -0.00 [yr]

星周円盤が形成され分裂を起こす。分裂片は中心星と合体。

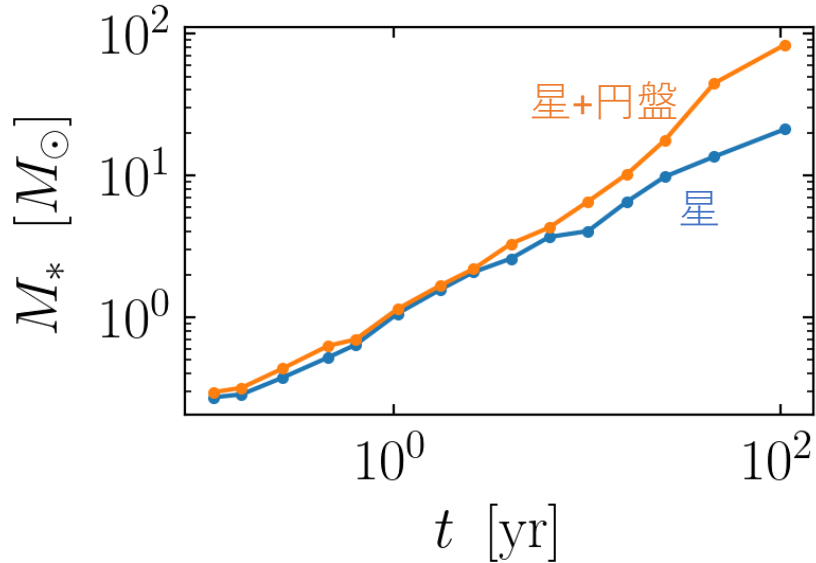
# Protostar-Disk System



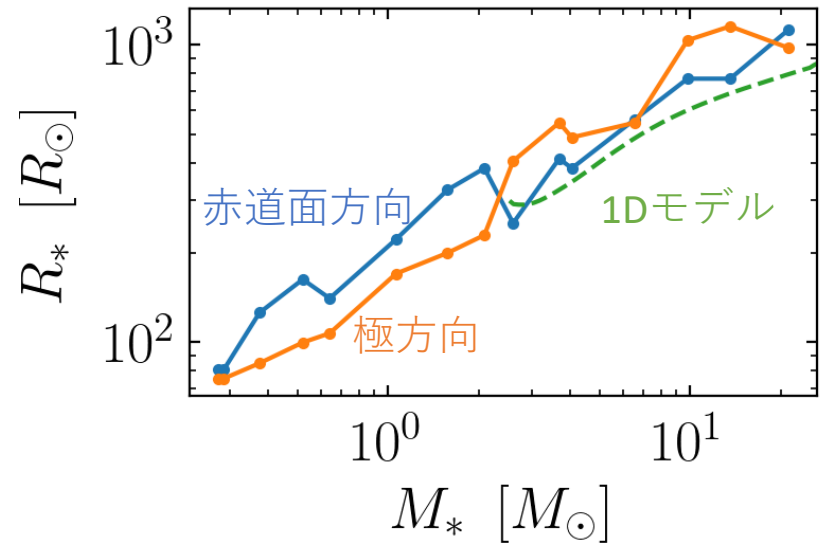
Optically Thickな 星+円盤 の系が形成される。  
本発表では圧力が遠心力に対して優勢な領域を原始星と定義。

# 原始星進化：質量-半径関係

星と円盤の質量進化



原始星の質量-半径関係



星+円盤には降着率  $1M_\odot/\text{yr}$  で質量が供給される。

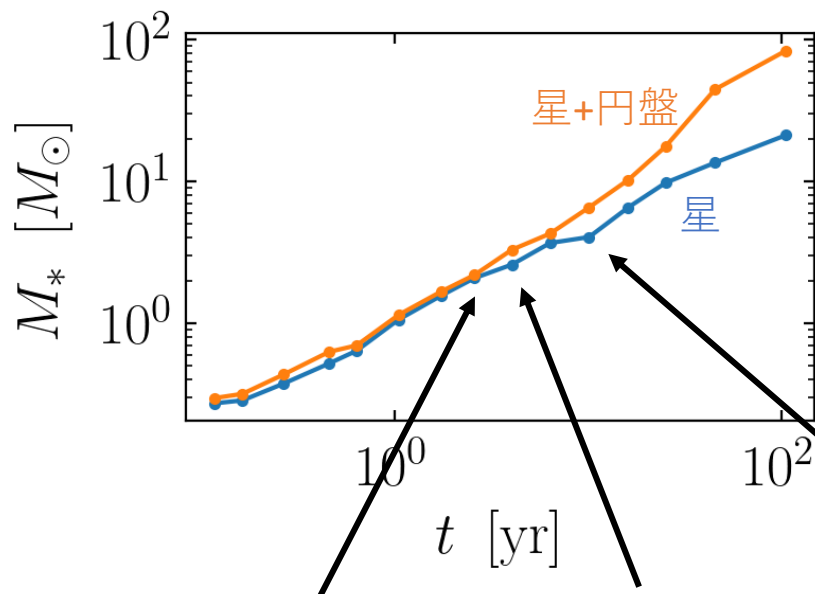
円盤が形成されると星への降着率は大きく落ちる。(Kimura+21)

1Dモデルのように非常に膨らんだ星が形成。

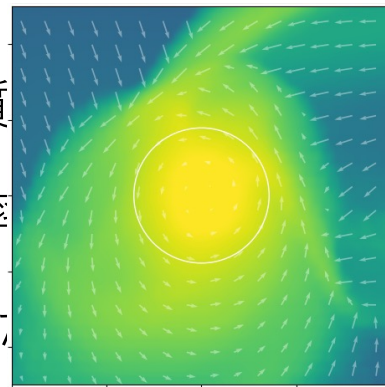
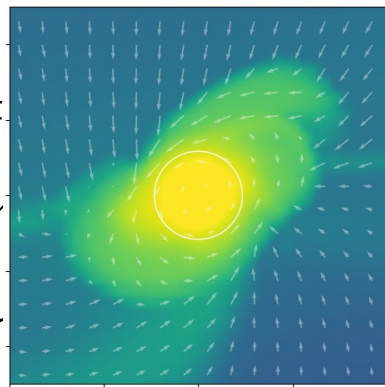
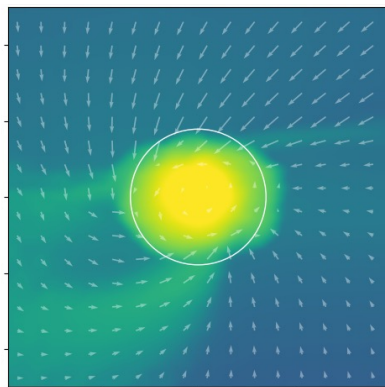
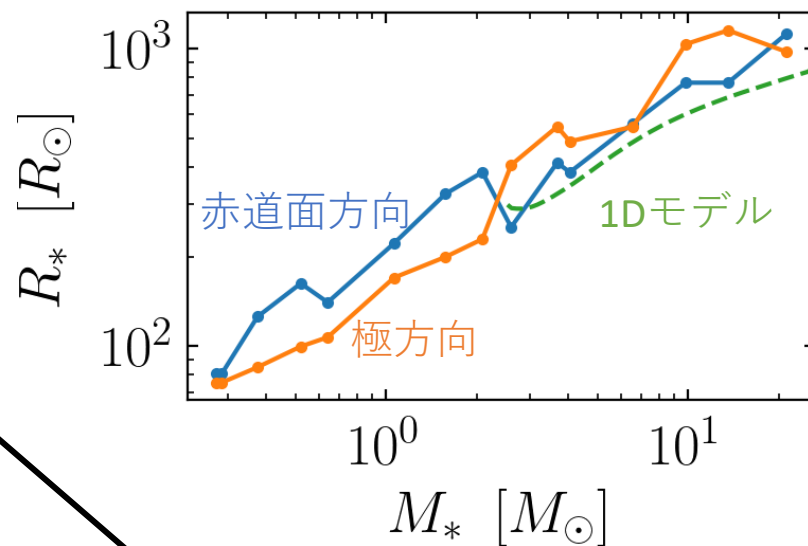


# 原始星進化：質量-半径関係

星と円盤の質量進化



原始星の質量-半径関係

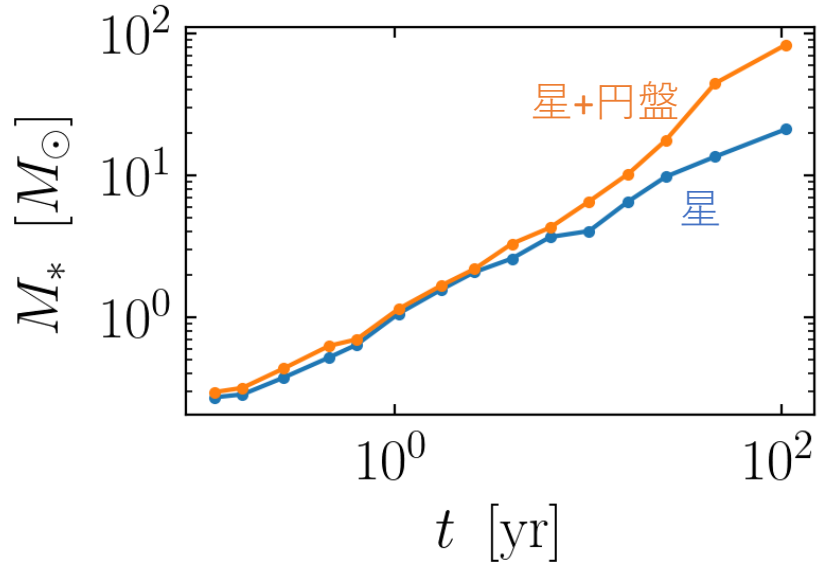


数密度分布 (Face-on)

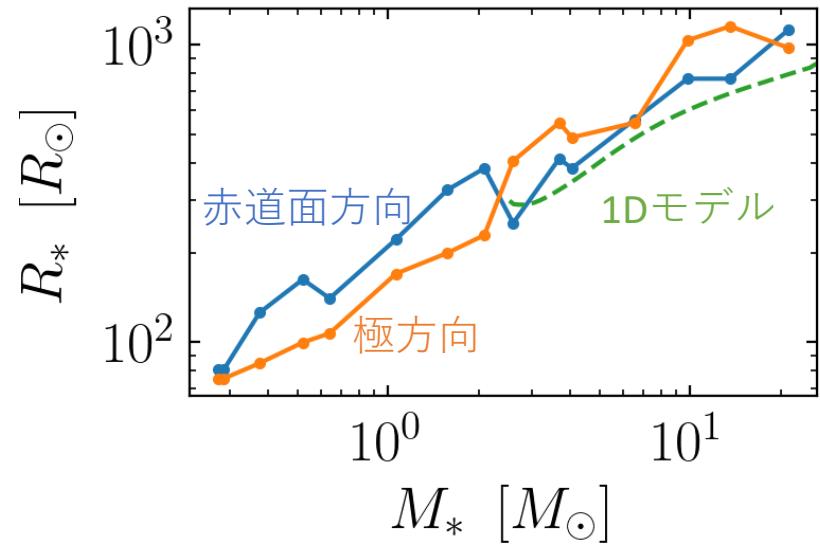
(Kimura+21)

# 原始星進化：質量-半径関係

星と円盤の質量進化



原始星の質量-半径関係

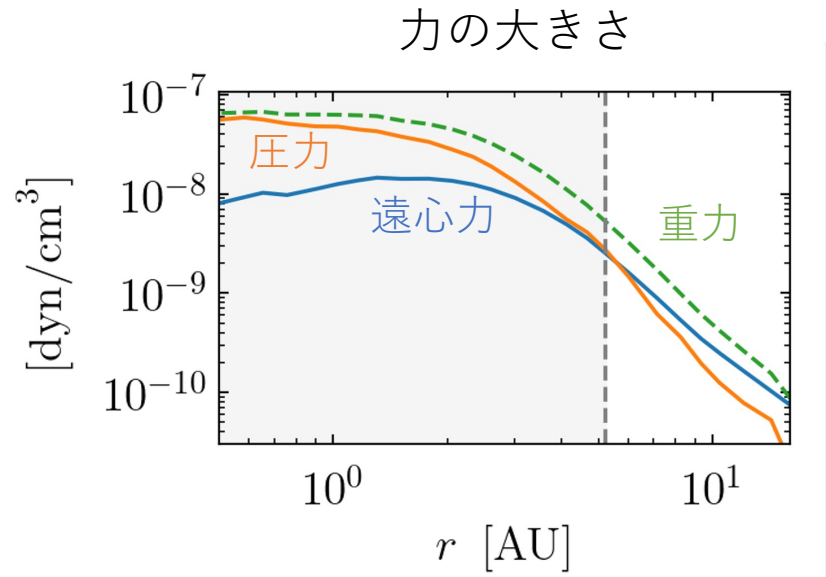
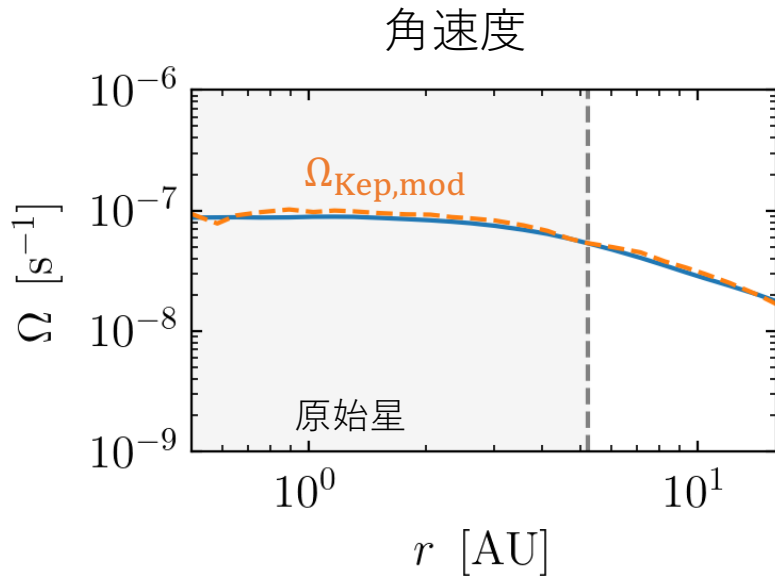


星+円盤には降着率  $1M_\odot/\text{yr}$  で質量が供給される。

円盤が形成されると星への降着率は大きく落ちる。(Kimura+21)

1Dモデルのように非常に膨らんだ星が形成。

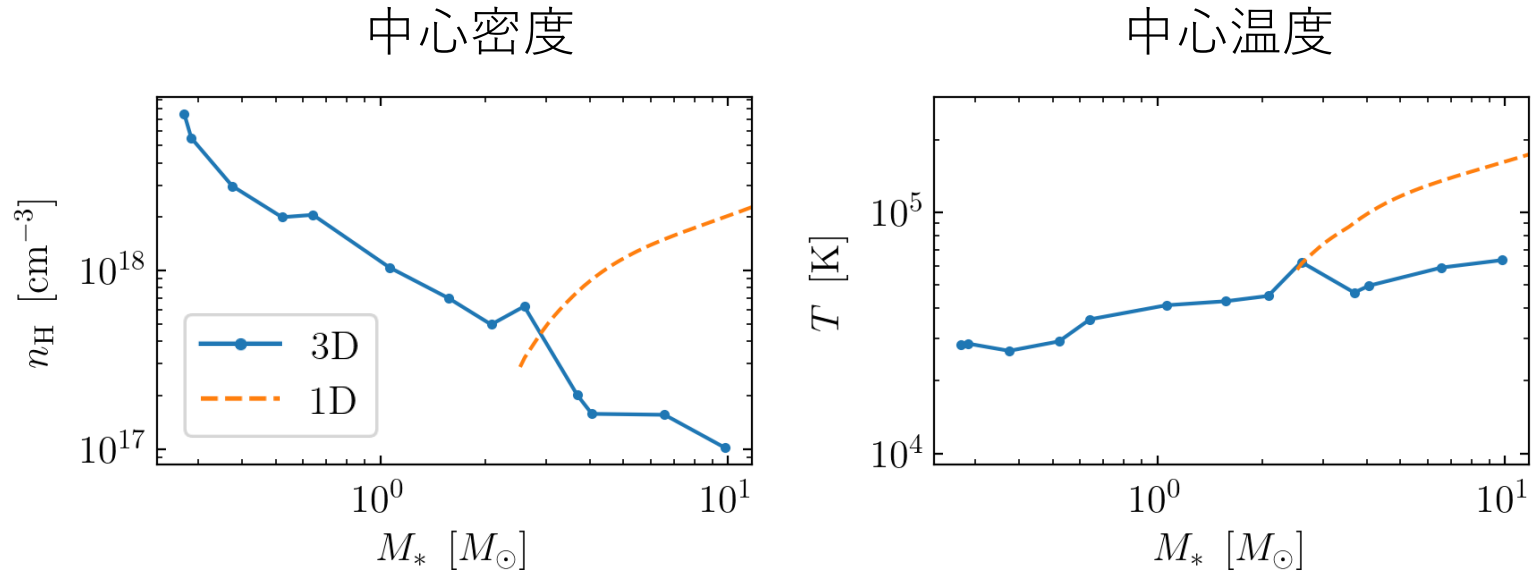
# 原始星の回転



$$\Omega = \Omega_{\text{Kep,mod}} \equiv \sqrt{\frac{GM_r}{r^3} + \frac{1}{r\rho} \frac{dP}{dr}} \quad \blackrightarrow \quad \text{圧力+遠心力が重力と釣り合った系}$$

先行研究のモデル(c.f. Paczynski 1991)で原始星に角運動量が持ち込まれ続けた場合に実現すると期待されるような角速度分布。原始星が円盤より早く回転しており、角運動量を星から円盤に運ぶことができる可能性がある。

# 原始星進化：星中心の密度温度



星の中心部の密度温度は1次元モデルよりも低くなる。  
1次元モデルよりも星中心部のエントロピーが増加している。

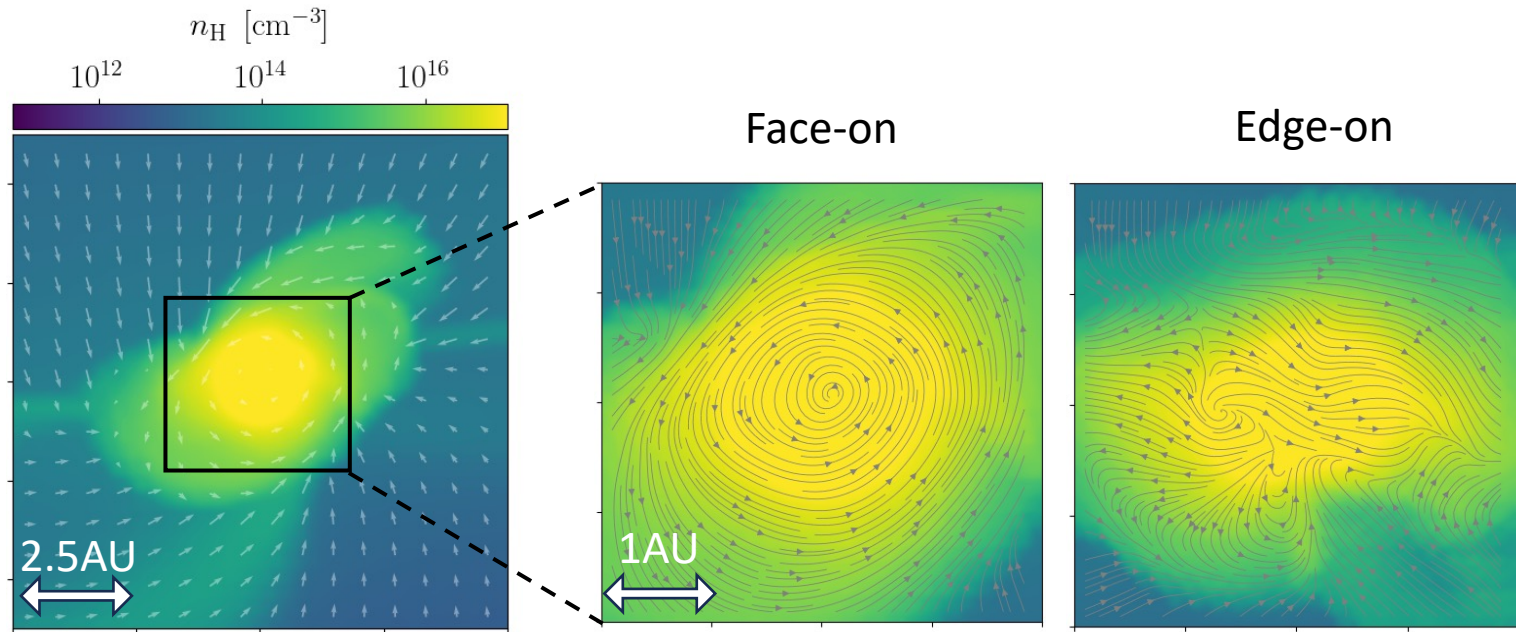
$$n_H \propto M_*^2 \exp\left(-\frac{2\mu}{R}s\right) \quad T \propto M_*^{\frac{4}{3}} \exp\left(-\frac{2\mu}{3R}s\right)$$

$s$ : エントロピー  $\mu$ : 平均分子量  $R$ : 気体定数 (c.f. Hosokawa+12)

核融合のタイミングなどに影響

# 原始星内部の速度構造

原始星形成から4年後の原始星内部の速度流線

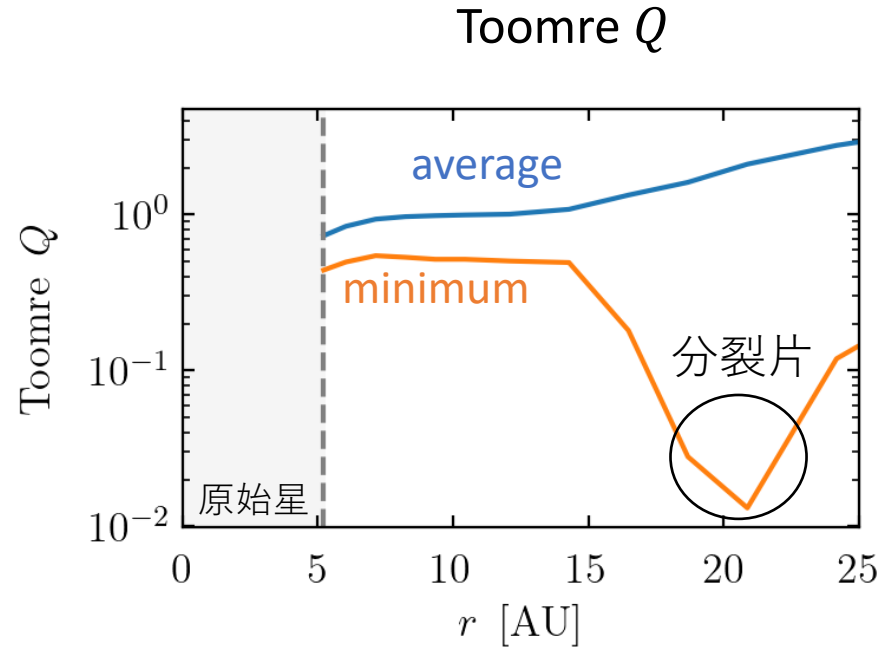
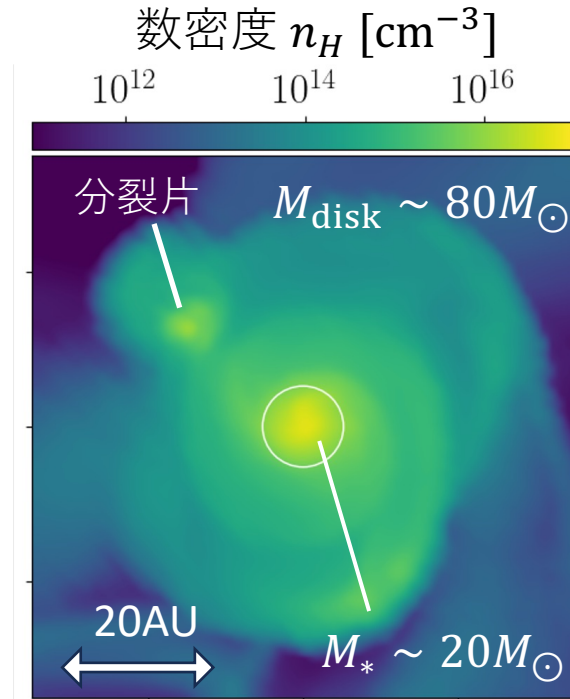


星の内部でも数km/s の subsonic で乱流的な速度場が存在。

後から降着してきた高エントロピーのガスが中心部まで落ち込むことで中心部のエントロピーが増加。原始星内部のガスは断熱的ではない。

# Massive Unstable Disk

原始星形成から100年後の円盤プロファイル



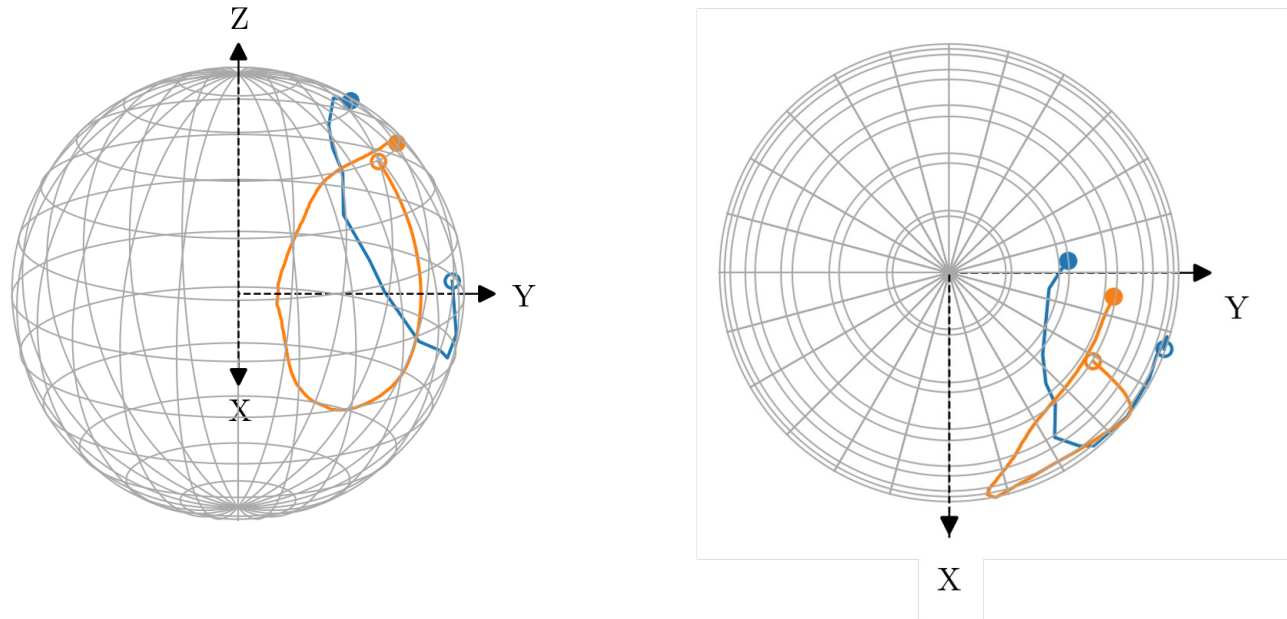
重たくて自己重力的に不安定な円盤が形成され、渦状腕の形成と頻繁な分裂が起こる。100年間で5回のmergerが発生

さらに円盤が成長すると連星形成や降着率の大きな変化が見えるかも？

# 角運動量・回転軸の変化

天球面上での回転軸の向き

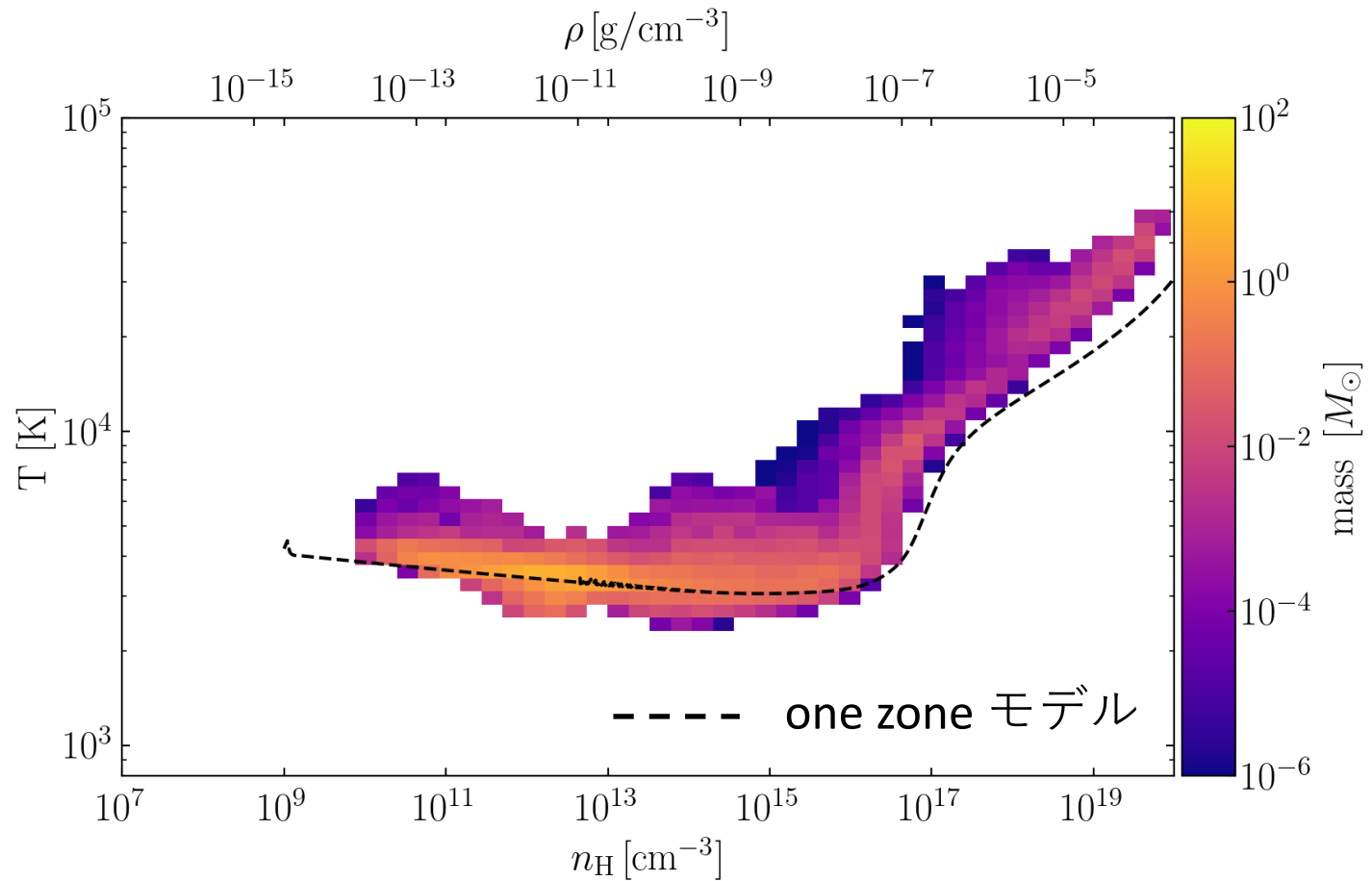
(x,y,z軸はシミュレーション中のもの)



— 星 + 円盤の回転軸の時間進化 — エンベロープが持つ角運動量から予想される回転軸の時間進化

原始星形成時の乱流的なエンベロープが持つ角運動量プロファイルに伴って星 + 円盤の角運動量・回転軸も変化。(c.f. Sugimura+23)

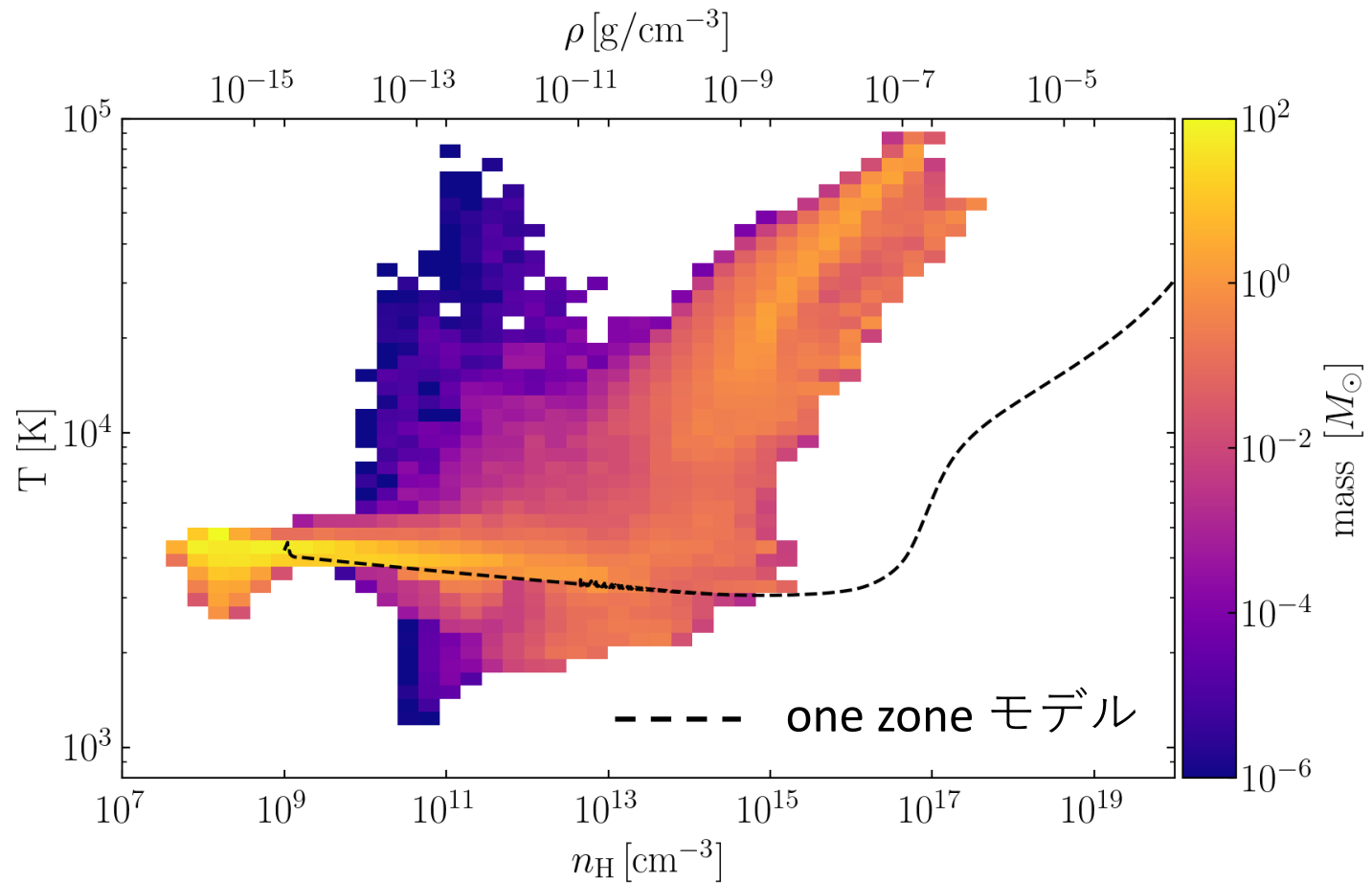
# $\rho - T$ Plane at Protostellar Birth



収縮期(原始星形成まで)はone zoneモデルと同様の熱進化。

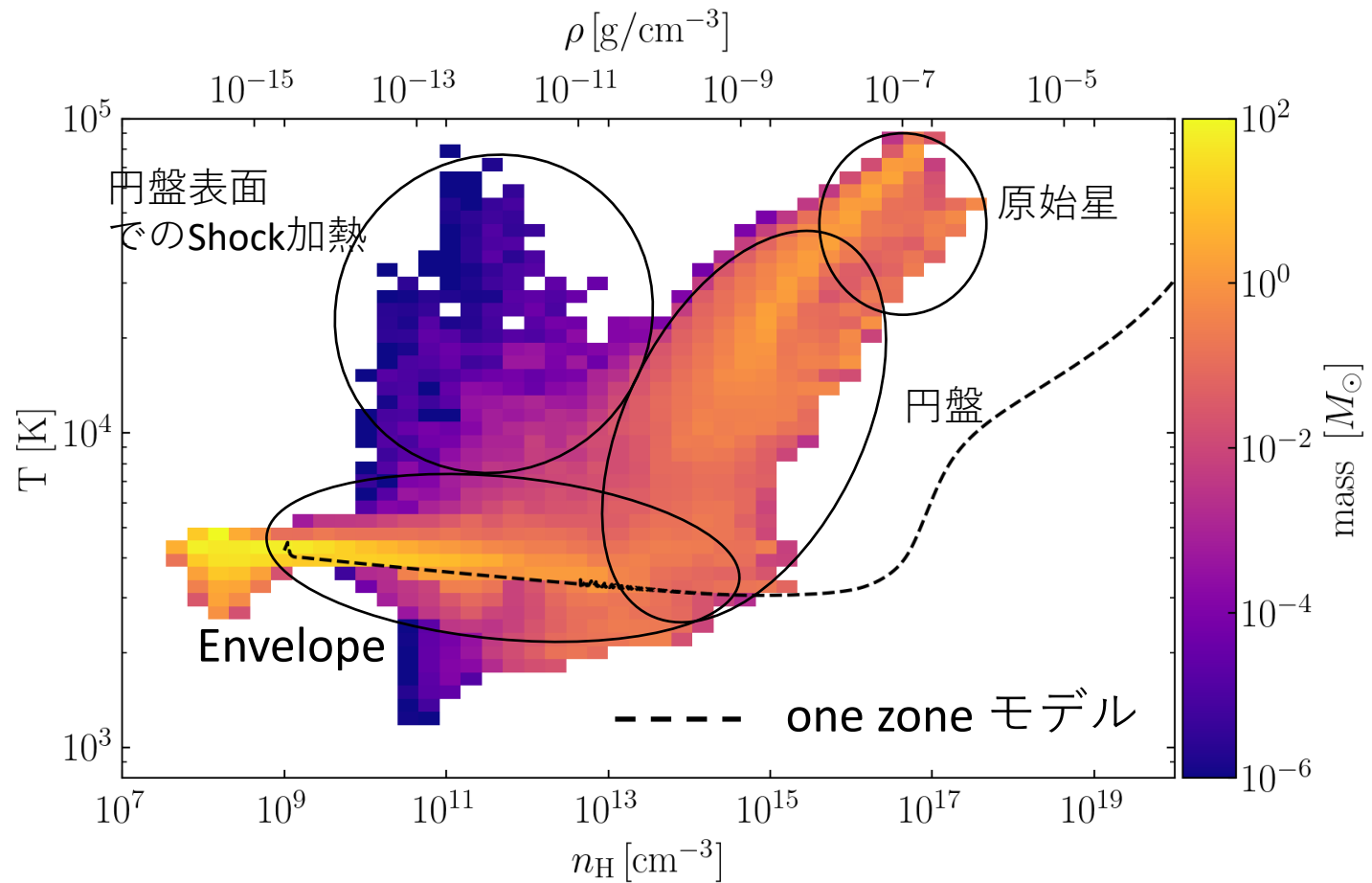


# $\rho - T$ Plane at 100 yrs after Protostellar Birth



降着期に円盤が形成されるとOne Zoneモデルからずれた熱進化を辿る。

# $\rho - T$ Plane at 100 yrs after Protostellar Birth



降着期に円盤が形成されるとOne Zoneモデルからずれた熱進化を辿る。

# Summary

---

- 最終的にどういった星が形成されるかは、ガス降着している原始星の進化に依存。3次元的な原始星進化を理解したい。
- 高解像度3次元輻射流体シミュレーションで超大質量星形成における原始星進化を100年間追った。
- 3次元構造によって星の進化は様々な影響を受ける。
  - ✓ 原始星は強く回転、中心密度温度は減少
  - ✓ 不安定な円盤の形成、中心星への降着率は減少
  - ✓ 円盤形成によるOne-zoneモデルと異なる熱進化
- Future Work  
より長時間の計算(少なくとも500年ぐらいは計算できそう)。連星の形成や、nuclear burningの影響など。最終的に形成される星にどんな影響がでそうか？