



東北大学



Theoretical Astrophysics  
Tohoku University

# Evolution of Primordial Protostars under Global Gas Accretion in 3D RHD Simulations

木村 和貴 (東北大学)

共同研究者

杉村 和幸(北海道大学), 細川 隆史(京都大学),  
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2025 12/1(月)-3(水) @ 福井

# Outline

---

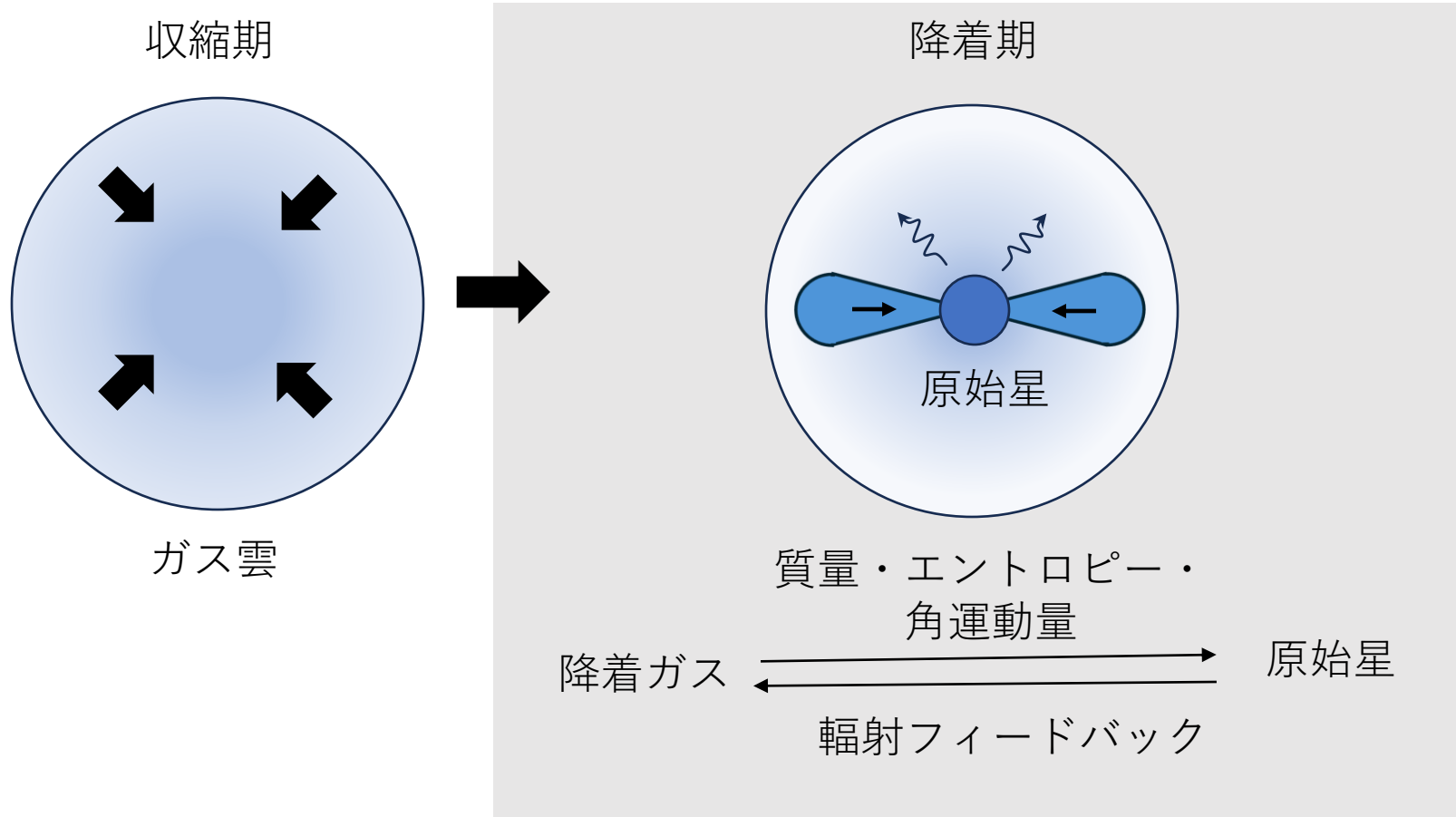
**1. Introduction**

2. Method

3. Results

4. Summary

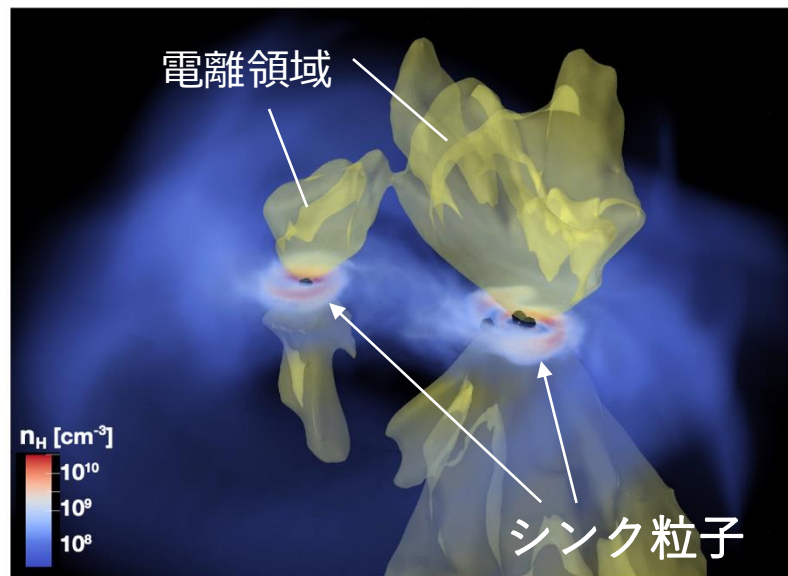
# 原始星と降着ガスの共進化



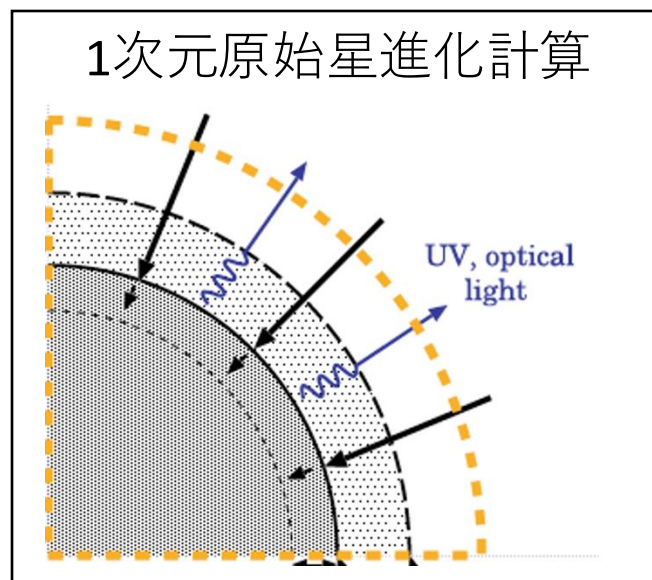
降着期における降着ガスのダイナミクスと原始星進化の理解が、形成される星の性質を知るには必要不可欠

# 3次元での原始星進化は？

## 3次元初代星形成シミュレーション



(Sugimura+20)



(Hosokawa & Omukai 09)

- 3次元シミュレーションでは原始星は分解していない。  
原始星近傍領域は1次元計算の結果をサブグリッドモデルとして実装。
- 原始星近傍の降着流や原始星に関する非対称性や回転の影響は未解明

# Key Question and Our Approach

---

降着流と原始星は3次元的にどのように相互作用しながら進化していくのか？



**降着流から原始星内部まで分解した高解像度3次元輻射流体計算  
(Kimura et al. 2025, arXiv:2510.13949)**

- 原始星内部まで適用できる新たな輻射流体ソルバーの開発
- 宇宙論的初期条件を用いた初代星の超大質量星形成に適用  
( $\dot{M} \sim 1M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ )

本日のトークはサイエンティフィックな結果にフォーカス。  
角運動量やエントロピーがどのように原始星に持ち込まれるか？

(関連研究 : Luo+18, Bhandare+20,24,25, Ahmad+23,24, Mayer+25)

# Outline

---

1. Introduction

**2. Method**

3. Results

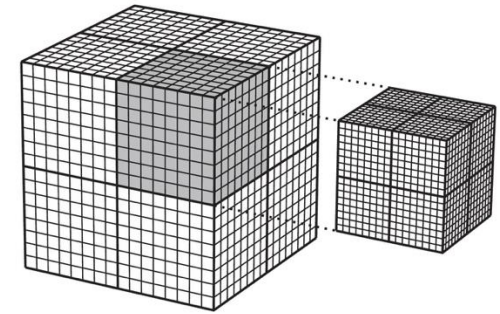
4. Summary

# 計算コード : SFUMATO-RT

- 自己重力
- Adaptive Mesh Refinement
- 始原ガスの化学反応・加熱冷却過程  
化学種:  $\text{H}, \text{H}_2, \text{H}^+, \text{H}^-, \text{H}^{2+}, \text{e}$
- **原始星内部まで解ける新たな輻射流体ソルバー**  
(詳細はarXiv:2510.13949を参照)



(Matsumoto 07, Sugimura+20,23)



- 陽的M1-closure 法+光速制限法を原始星内部まで適用できるように  
改変。(Fukushima & Yajima 20, Rosdahl & Teyssier 15)
- エネルギー密度と個数密度の両方を解いて輻射スペクトルの空間・  
時間進化も解く。
- 原始星進化を正しく追うためにエネルギー保存形の重力ソルバー  
を使用

(Mullen+21)

# セットアップ

- 宇宙論的初期条件 from GADGET2 (Chon+18)

$z = 13$ において近傍銀河からの強いFUV放射を受けたガス雲

水素原子冷却により  $T \sim 8000K$

降着率  $\dot{M} \sim 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

- 計算ボックスサイズ  $\sim 100 \text{ pc}$

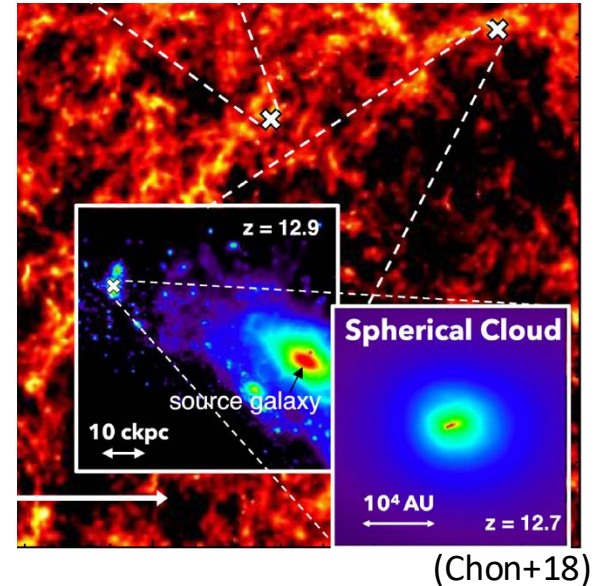
- 解像度

ジーンズ長を8セルで分解

シンク粒子は使わず原始星内部まで分解、**最小セル幅**  $= 4.7 \times 10^{-3} \text{ au}$ .

(c.f. 初代星の典型的な半径  $\gtrsim 0.5 \text{ au}$ , Hosokawa+12)

- 収縮期の初めから原始星形成後**18**年まで計算





# Outline

---

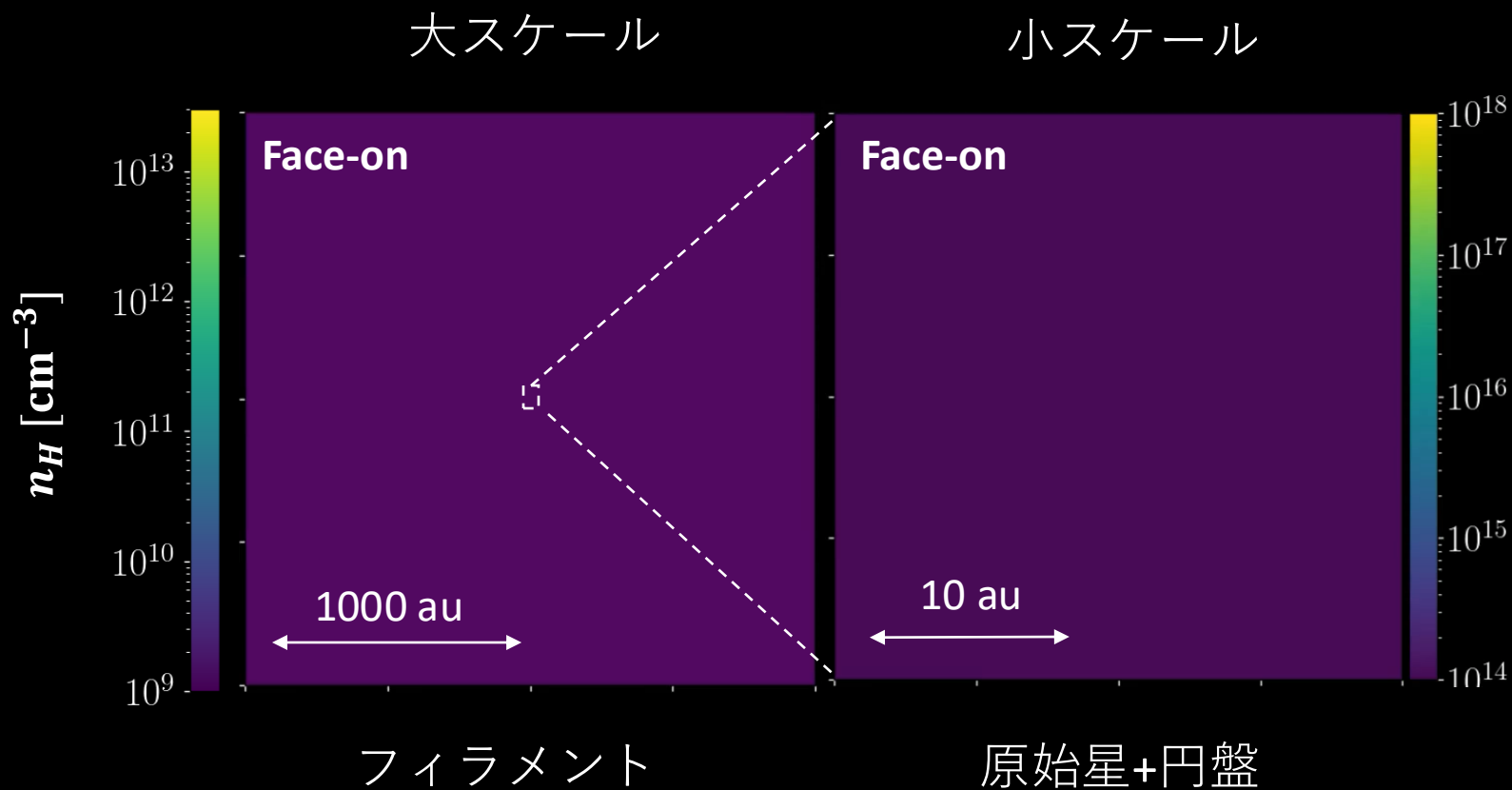
1. Introduction

2. Method

**3. Results**

4. Summary

# シミュレーションの全体像



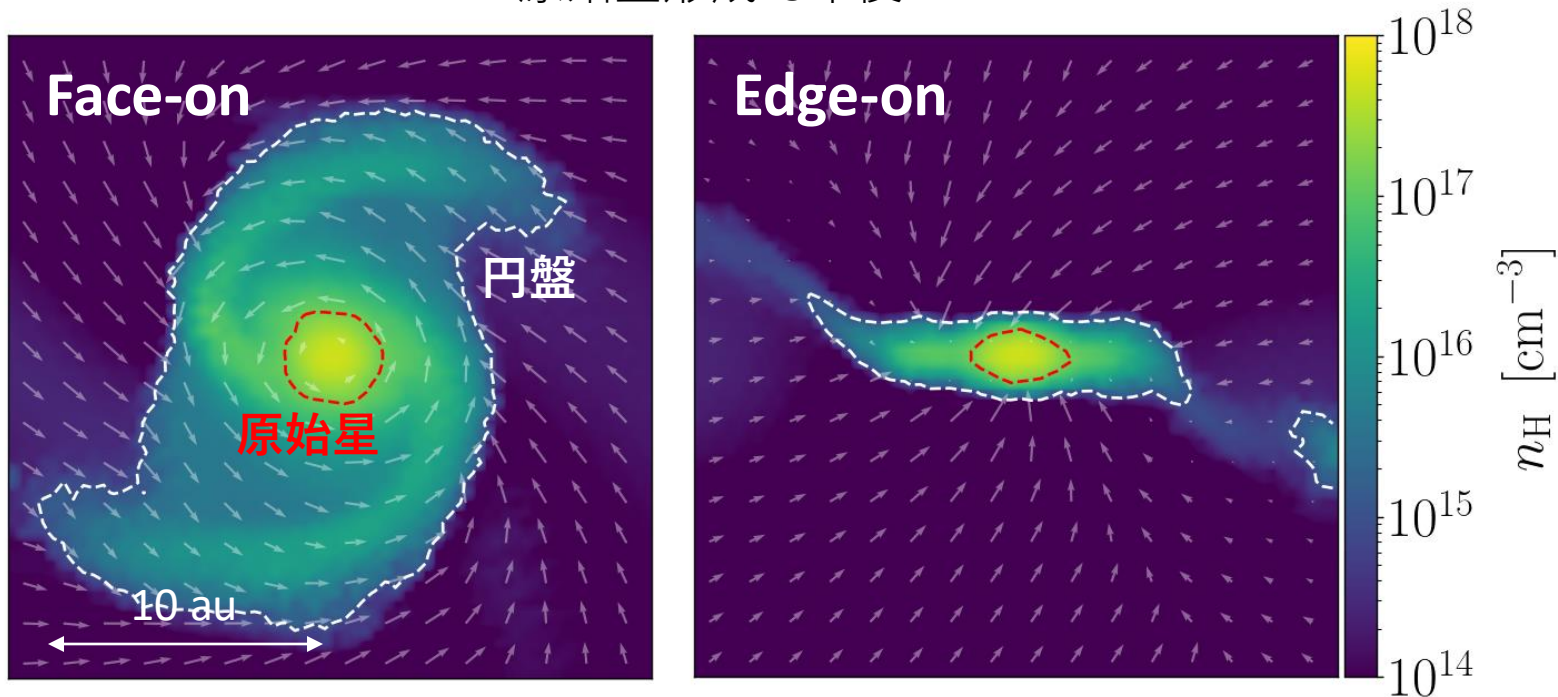
# 原始星と円盤の接続構造

1次元計算のように原始星表面に降着衝撃波は形成されない。  
原始星は厚い円盤の中に埋まっており、円盤と滑らかに接続。

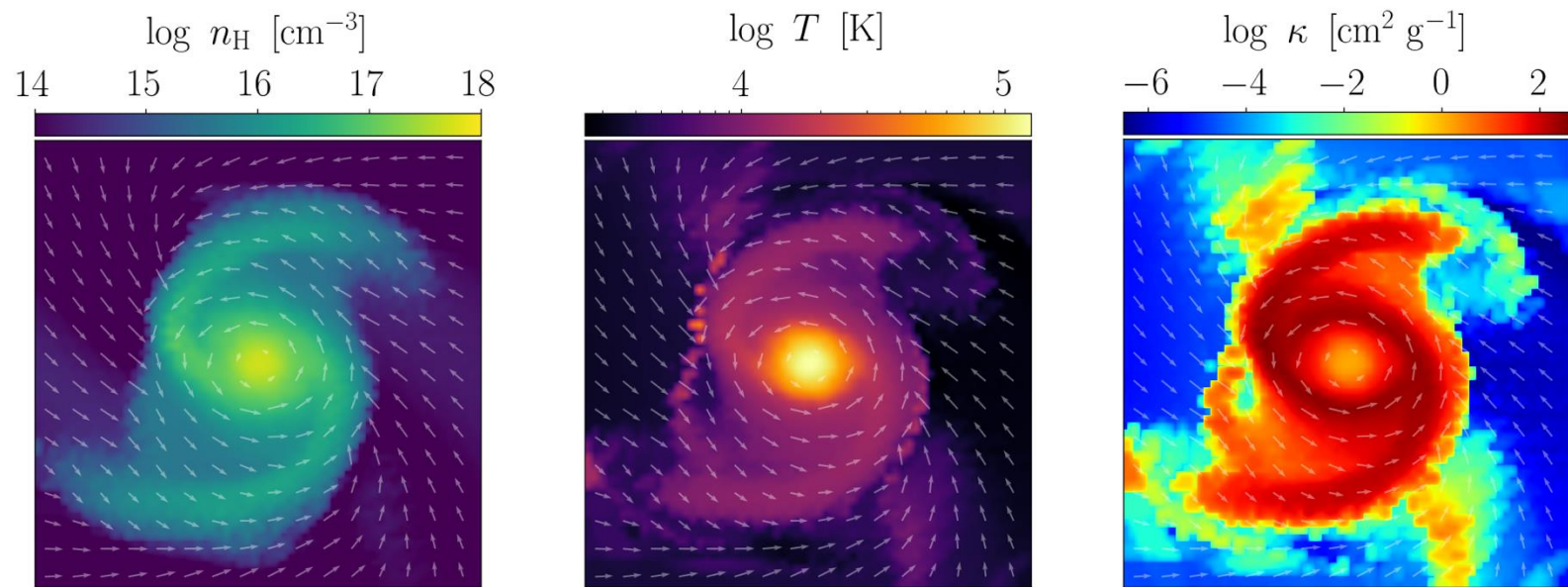
原始星：圧力サポート、剛体回転  $M_* \sim 7M_\odot$

星周円盤：遠心力サポート,  $M_{\text{disk}} \sim 15M_\odot$

原始星形成15年後

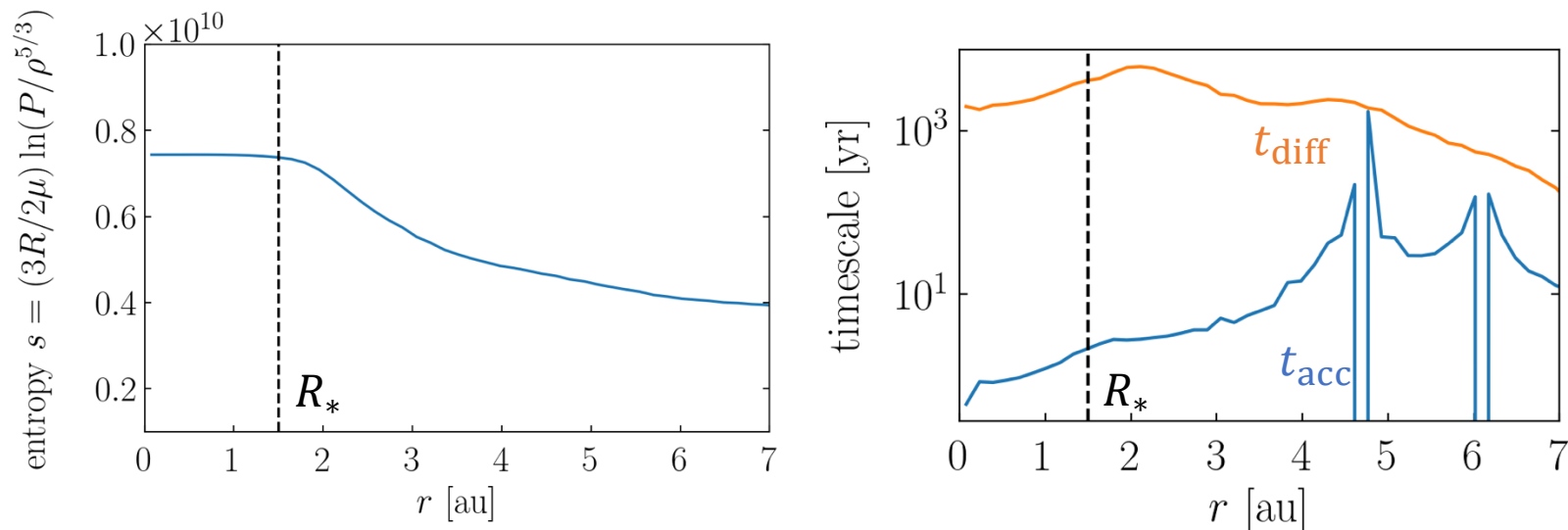


# 光学的に厚い星周円盤



- H or  $\text{H}^-$  bound-free opacityは  $T \sim 5000\text{K}$  あたりで急激に上昇。水素原子で冷却していたガスは円盤内でエネルギーが散逸して温度があがるとすぐに光学的に厚くなる。
- 光球面は円盤表面に沿って形成される。

# 円盤降着によるエントロピー持ち込み



降着タイムスケール      輻射の拡散タイムスケール

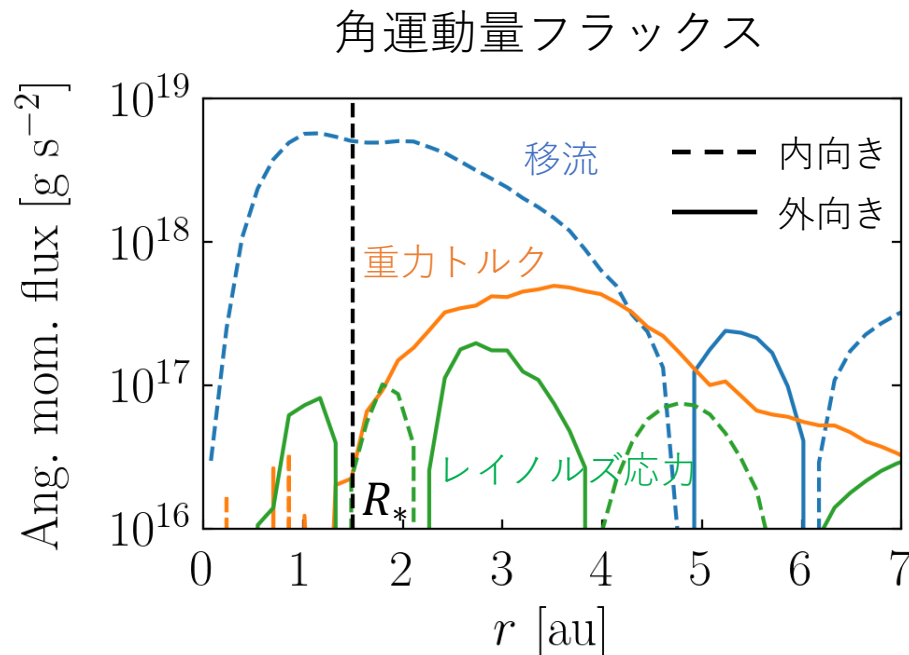
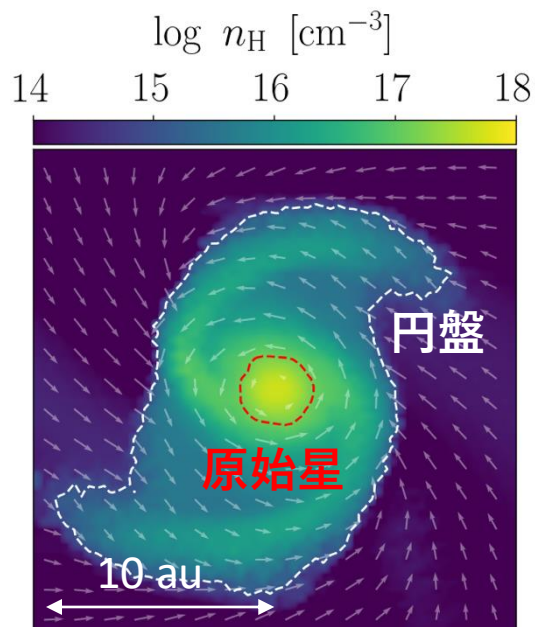
$$t_{\text{acc}} = \frac{R}{v_R} \ll t_{\text{diff}} = \frac{H_{\text{disk}}}{c} \tau$$

$v_R$  : 動径方向速度       $H_{\text{disk}}$  : 円盤の厚み       $\tau$  : 円盤の垂直方向の光学的厚み

円盤内の散逸で発生したエントロピーはそのまま原始星に持ち込まれる。

※球対称の時より原始星への降着率は落ちるのでエントロピーはゆっくり持ち込まれる

# 円盤内の角運動量輸送



- 重力トルクによる角運動量輸送は起きているが、移流による輸送の方が優勢。重力トルクによるスピンドアウンは期待できない(c.f. Lin+11)。
- 原始星の成長とともに角運動量も増えてゆく。

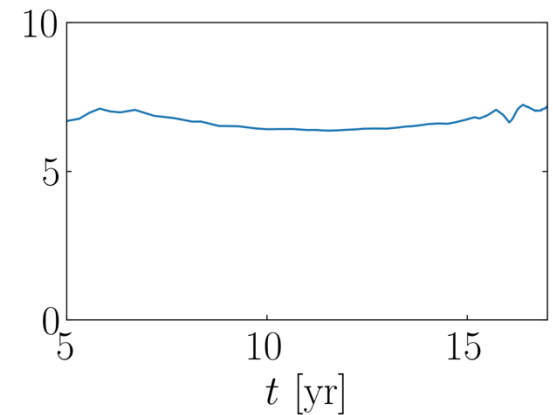
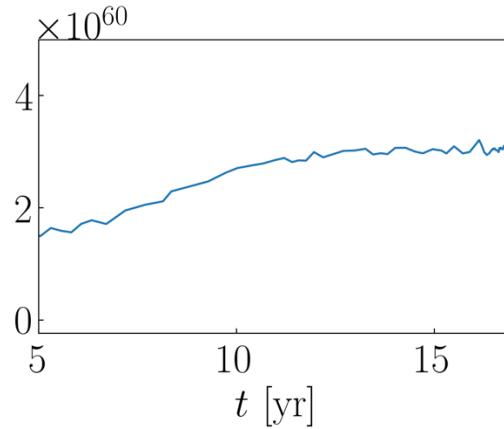
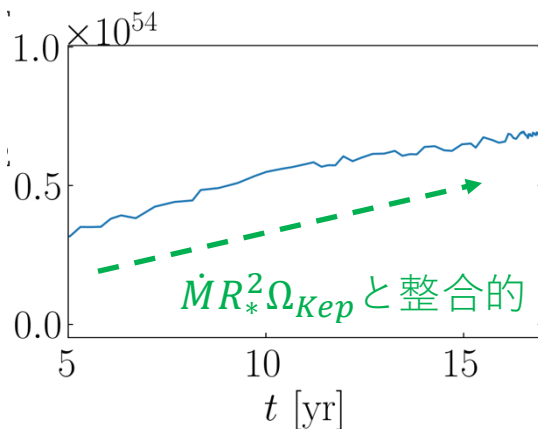
# 原始星のスピン進化

剛体回転における関係式  $J_s = I\Omega_s$

全角運動量  $J_s$  [ $\text{g cm}^2 \text{s}^{-1}$ ]

慣性  $I = \int dV \rho r^2$  [ $\text{g cm}^2$ ]

角速度  $\Omega_s$  [ $\text{yr}^{-1}$ ]



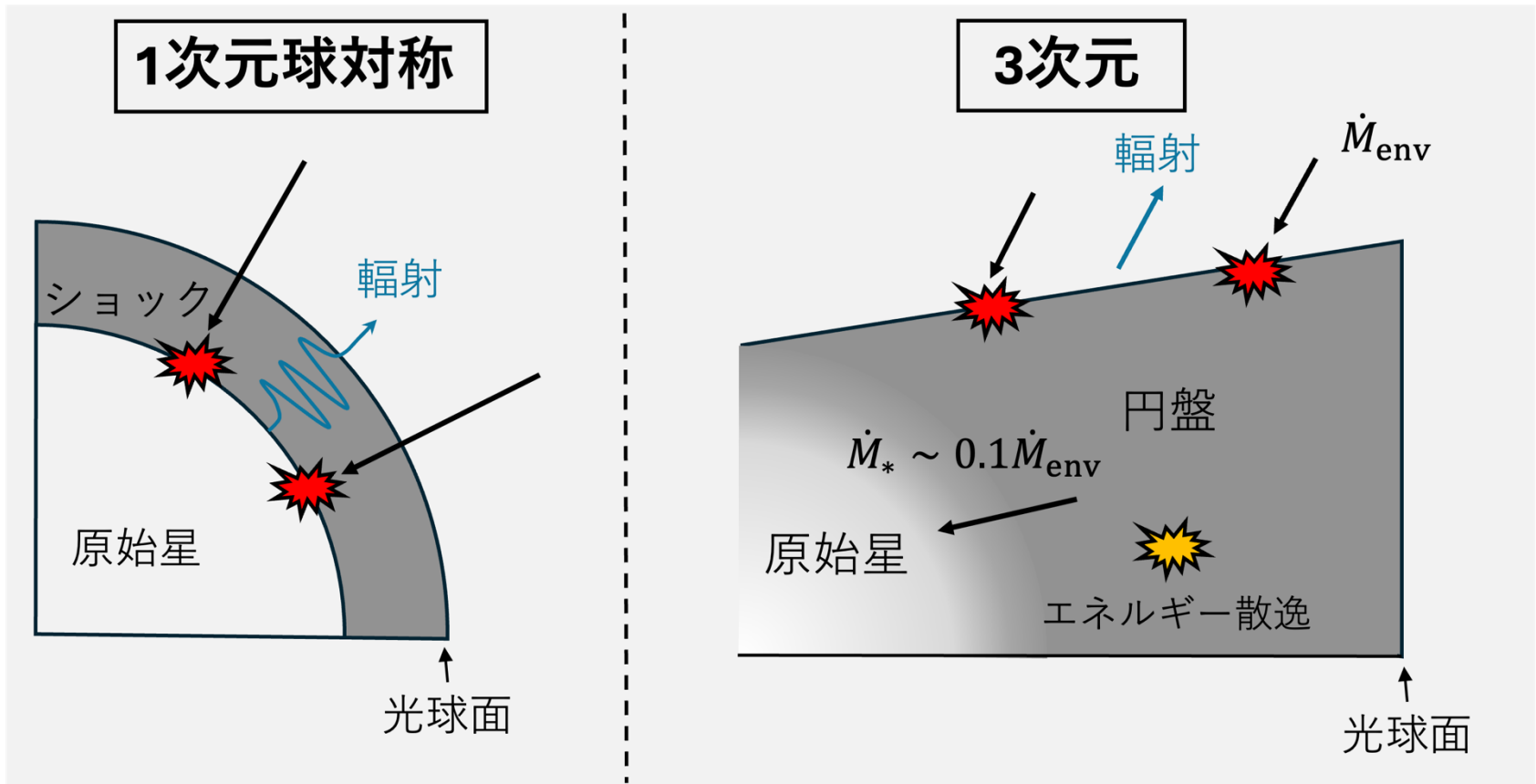
降着で角運動量  $J_s$  は増える

原始星の質量・半径(エントロピー)増大により慣性  $I$  もふえる

→ 結果として角速度  $\Omega_s$  はほぼ一定に保たれる。

Break up velocityには到達しない。

# 原始星進化の3次元的描像



- 原始星は光学的に厚い円盤の中に埋もれて存在
- 原始星への降着率はエンベロープからの降着率から1桁程度落ちる
- 降着により円盤の角運動量・エントロピーがそのまま原始星に



# Summary

---

- 降着流と原始星は3次元的にどのように相互作用し進化していくのか？
- 原始星を分解した3次元輻射流体シミュレーション
  - ✓ 厚い円盤の中に埋まった原始星
  - ✓ 星周円盤は光学的に厚く、円盤内の散逸で発生したエントロピーは原始星に持ち込まれる。
  - ✓ 重力トルクは弱く原始星の角運動量は降着と共に増加
- Future work
  - より長時間計算するとどうなる？
  - 通常の初代星形成の場合は？