

異なる金属量における 星形成後期段階の進化

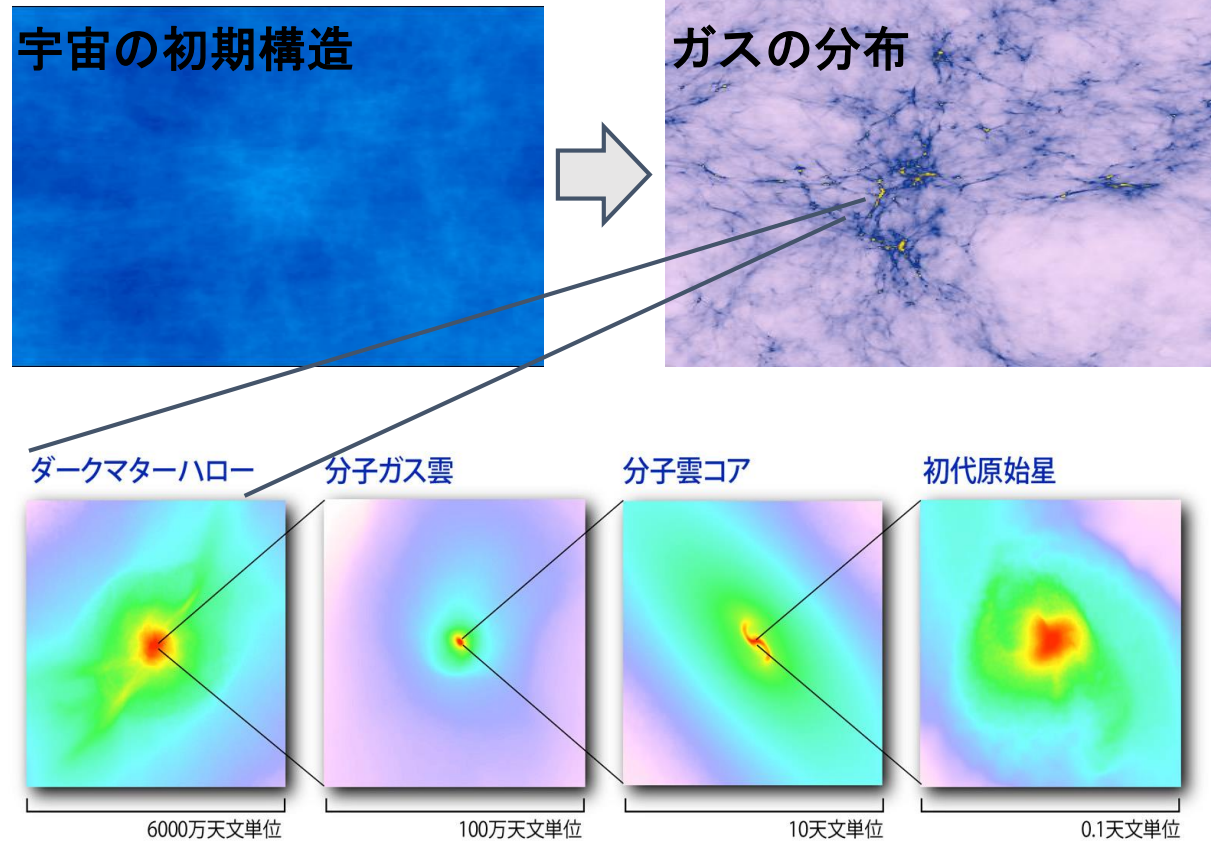
九州大学理学府地球惑星科学専攻

M1 中村 鉄平

共同研究者 町田 正博

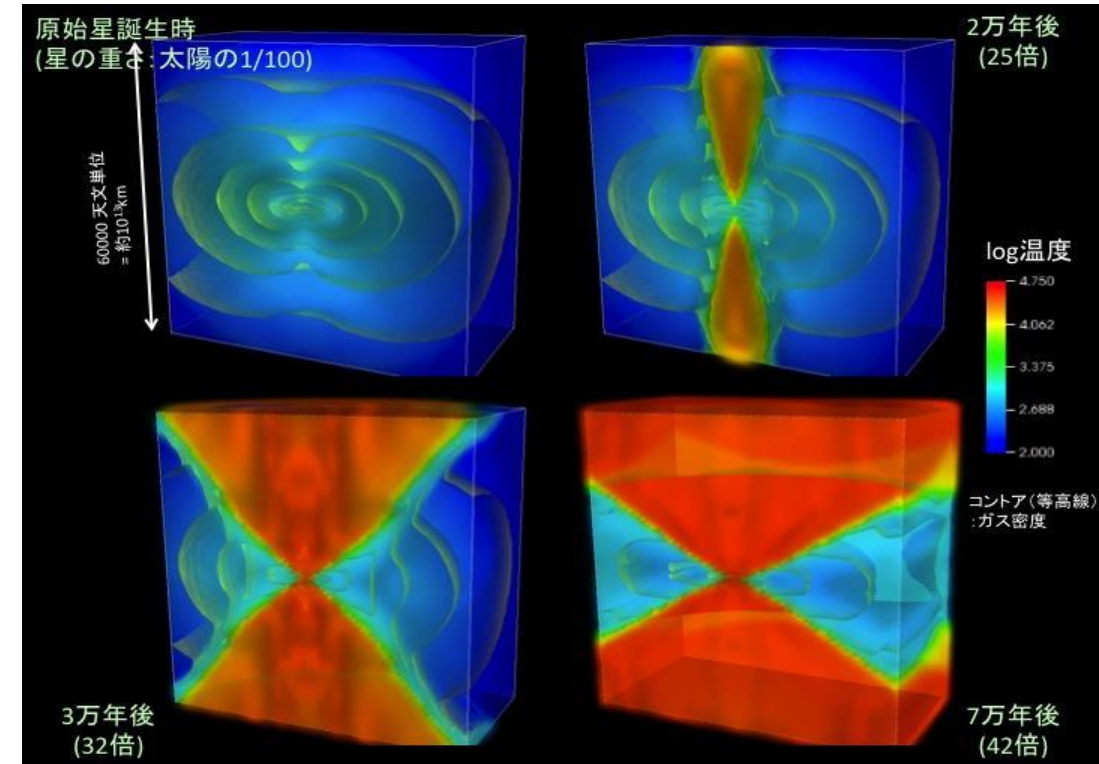
First star誕生のシナリオ(Metal zero)

密度揺らぎが成長する Yoshida他 2008



- ・ ダークマターの塊（ハロー）が形成
- ・ ダークマターと共に塊になったガスが冷却し、収縮
- ・ First 原始星の誕生

星周円盤からガスが降着し、原始星が成長



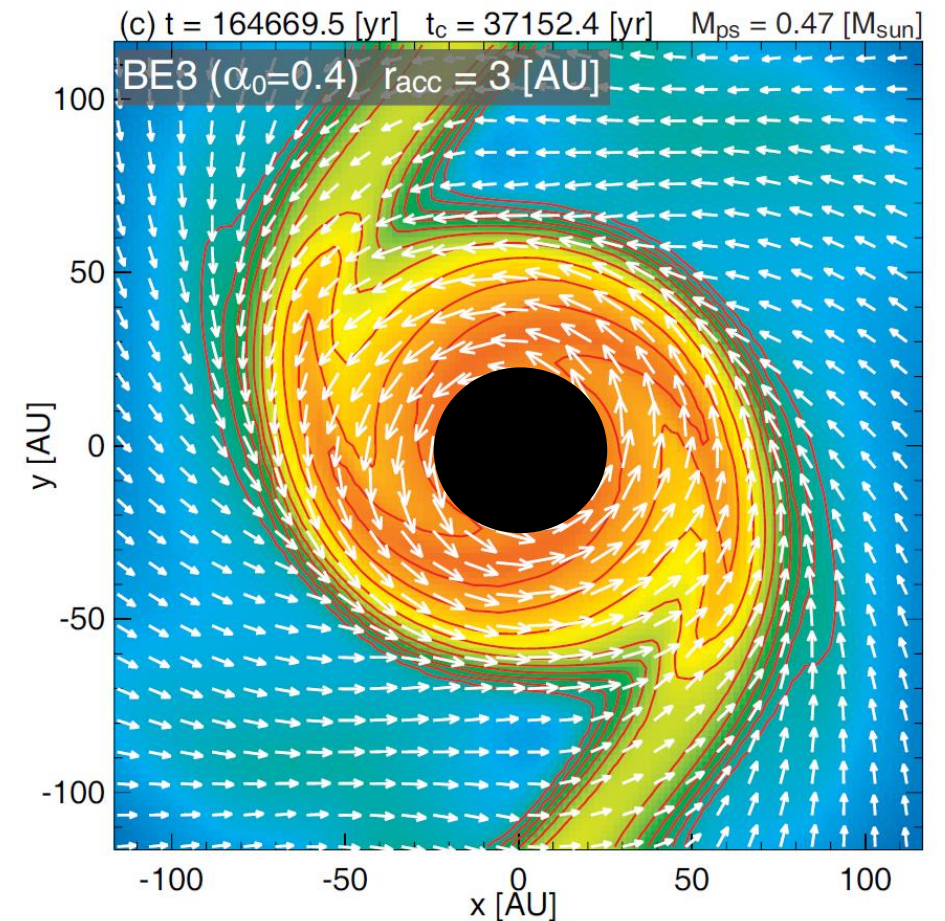
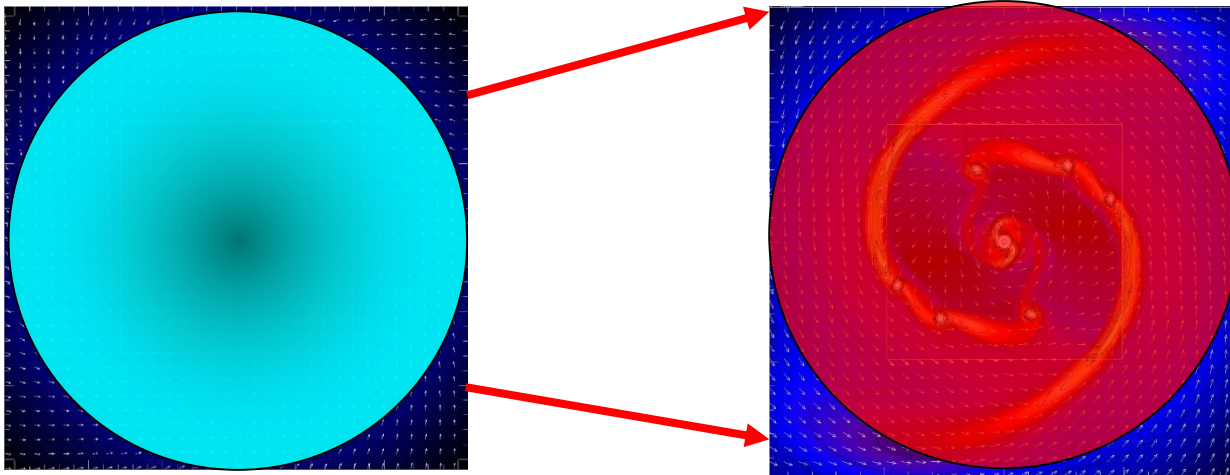
Hosokawa他 2011

- ・ 星からのfeedbackによりガスの降着率が下がり、最終的に星の成長は止まり、太陽の約40倍の質量の星が残る

Sink Treatment

- We need sink cells or sink particles to calculate the evolution of the circumstellar disk for a long duration
- but, ignores the internal structure

Calculation Without Sink (This study)



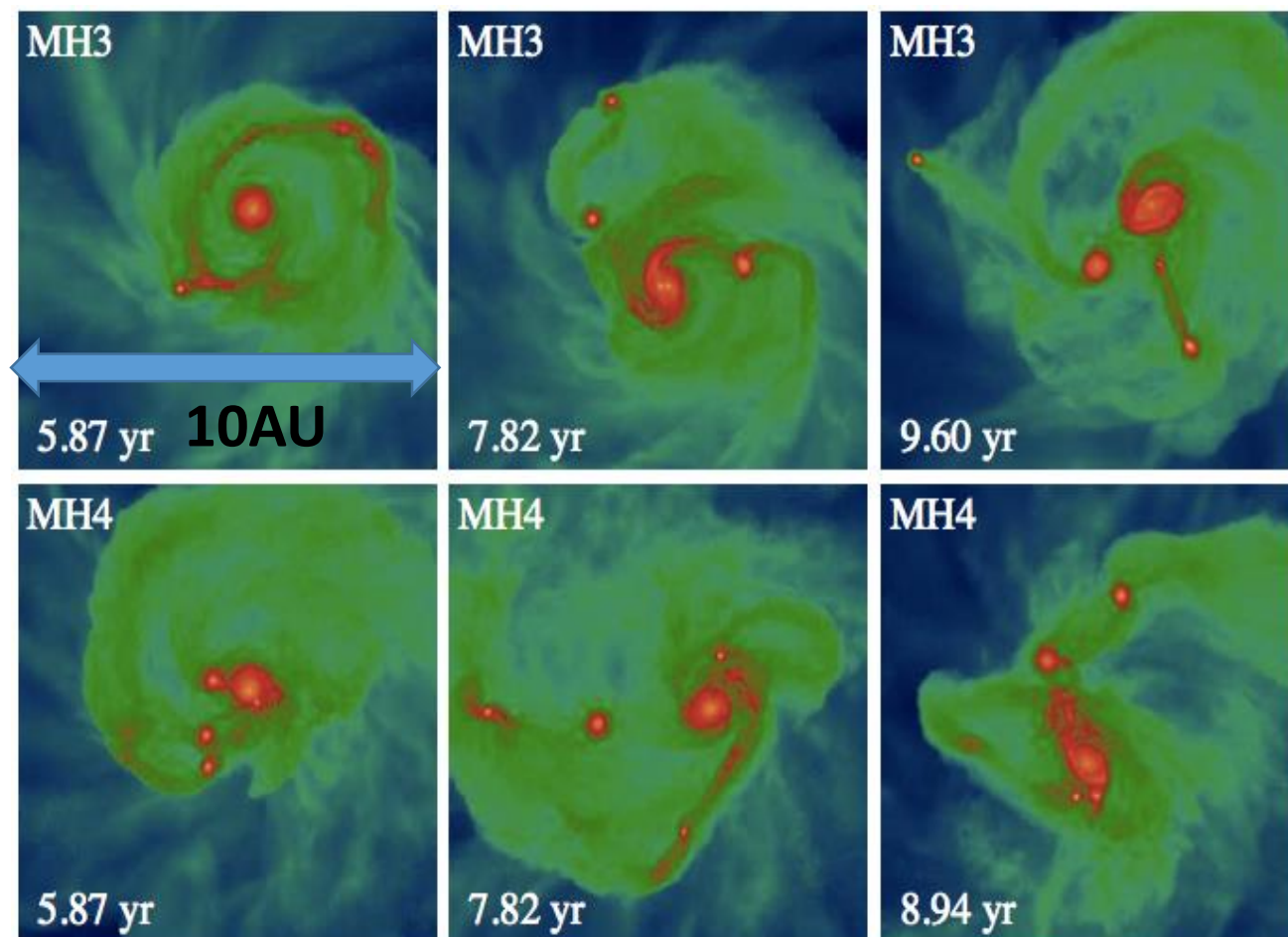
First star 最新の研究

First protostellar systemの中心部(10AU)を計算 (Greif他 2012)

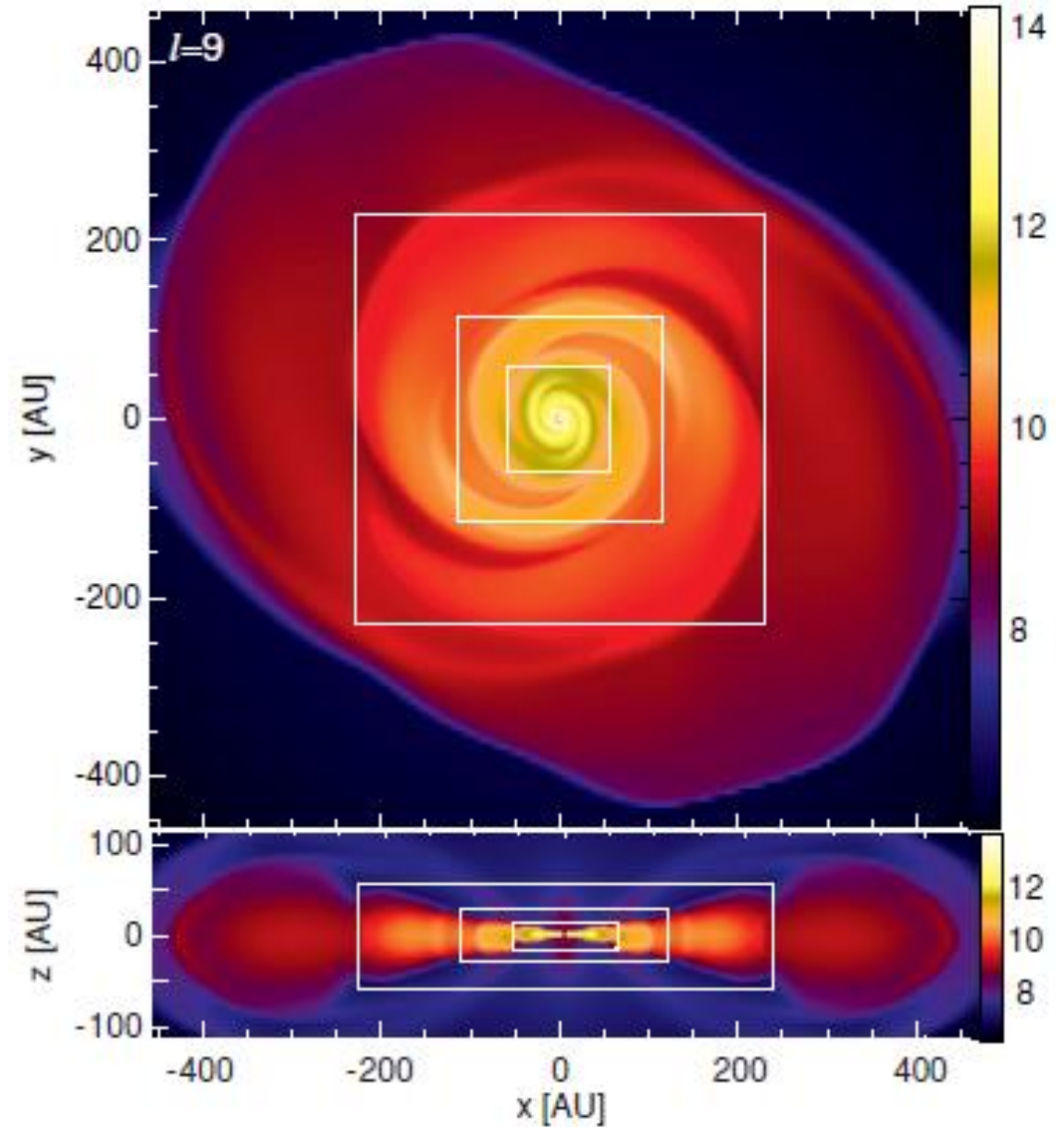
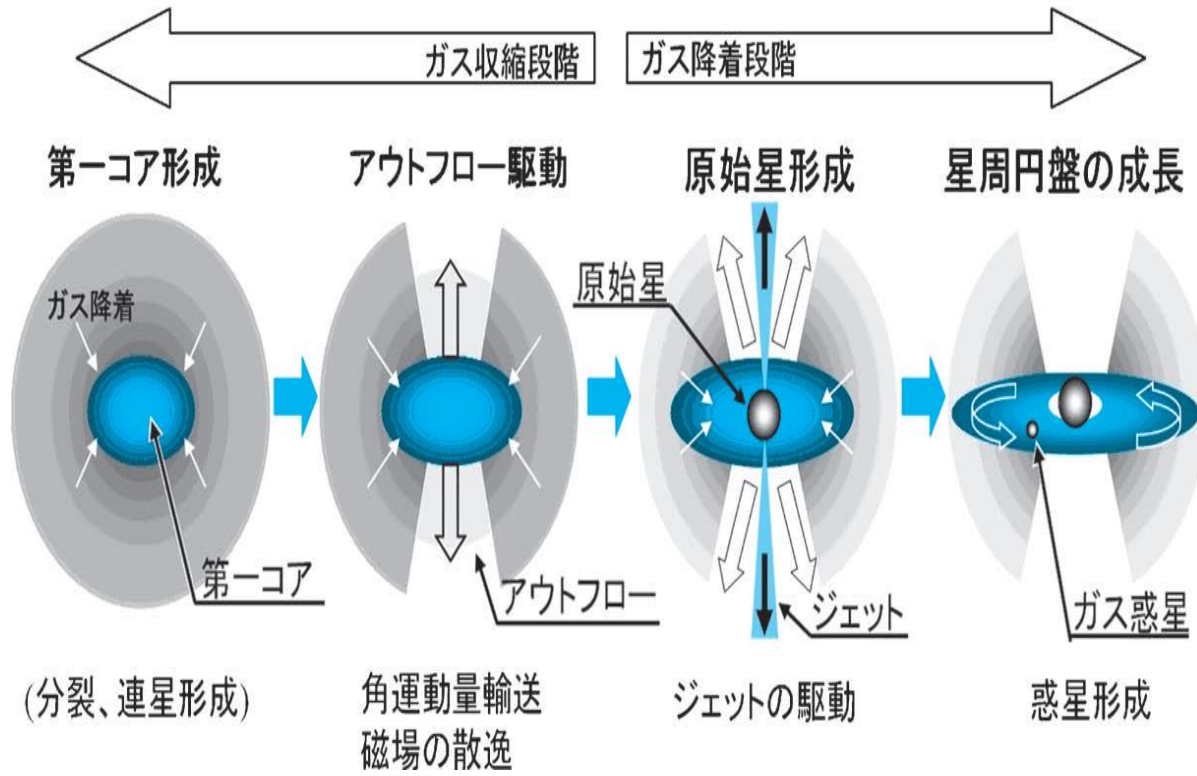
- 星周円盤が分裂して複数の原始星が誕生する
- 円盤で出来た原始星のおよそ半分は、中心の主星と合体した
- いくつかの原始星は中心近傍から放出された

注意

原始星形成後10年程度しか計算していない



現在の星形成(Metal rich)



Motivation

現在の星形成と宇宙初期の星形成には大きな差異がある。

これは星形成時の金属量の違いが
大きく影響していると考えられる。



金属量が星形成に与える影響を詳しく調べる必要がある。

Initial Setting

❑ Spherically Hydrostatic Core
(Bonnor-Ebert Sphere)

❑ Parameters: β_0

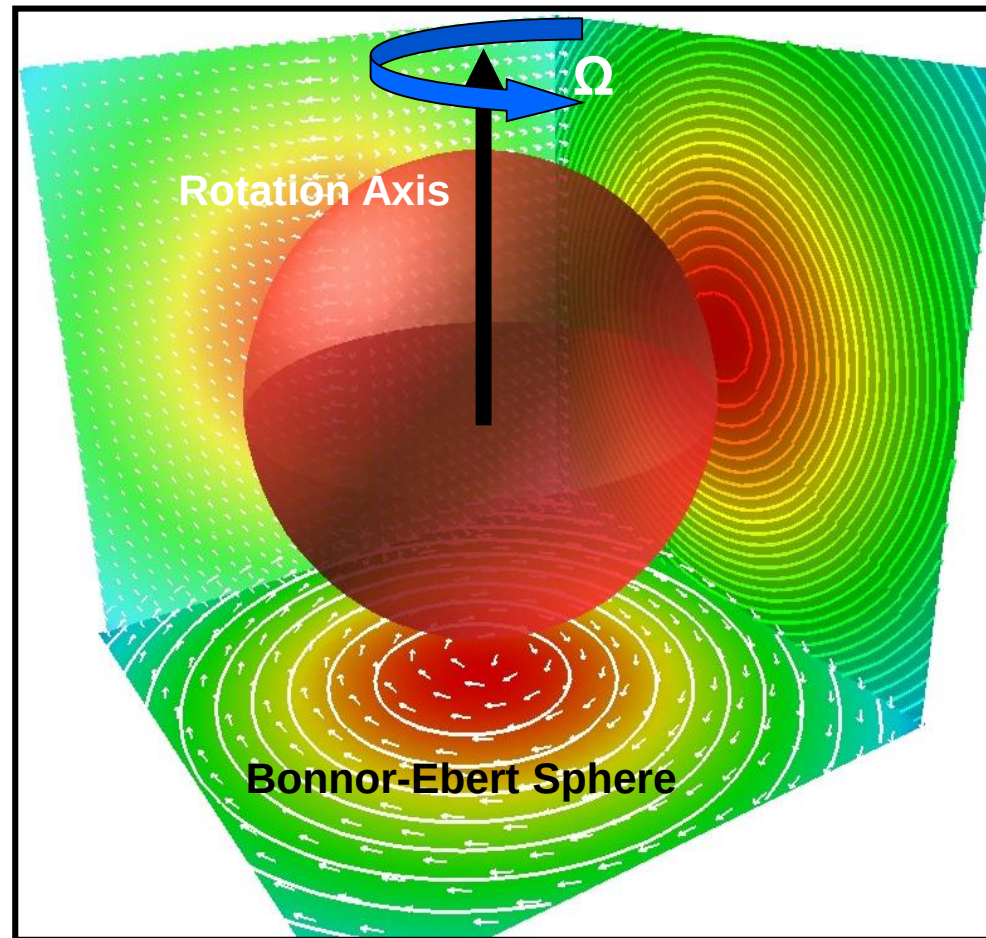
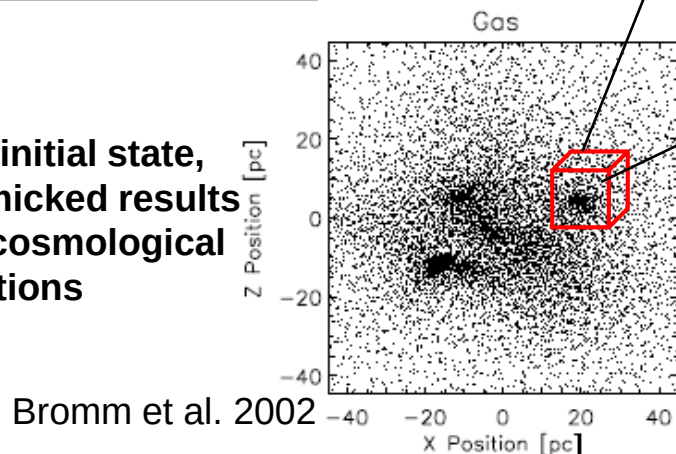
❑ 磁場は考慮に入れない

➤ **Cloud Rotation** $\beta_0 \equiv E_{\text{rot}} / E_{\text{grav}}$

$$\beta_0 = 10^{-3}$$

$$\Omega_0 = 10^{-14} [\text{s}^{-1}] \text{ at } n=10^4 \text{ cm}^{-3}$$

As the initial state,
we mimicked results
of the cosmological
simulations



❑ Initial Values

➤ Central density: $n=10^4 \text{ cm}^{-3}$

➤ Temperature: $T=10 \sim 230 \text{ K}$

➤ B.E. Radius: 1.3 pc

➤ Mass: $M_{\text{cloud}} = 10^3 M_{\text{sun}}$

Numerical Method

Grid size: 256 x 256 x 32

- **Grid level:** $l_{\max}=21$ (l : Grid Level)
- **Total grid number:** 256 x 256 x 32 x 21
- **Grid generation:** Jeans Condition

$l=23$: $L_{\text{box}} = 5 \text{ AU}$, $\Delta x_{l=21} \sim 0.4 R_{\text{sun}}$

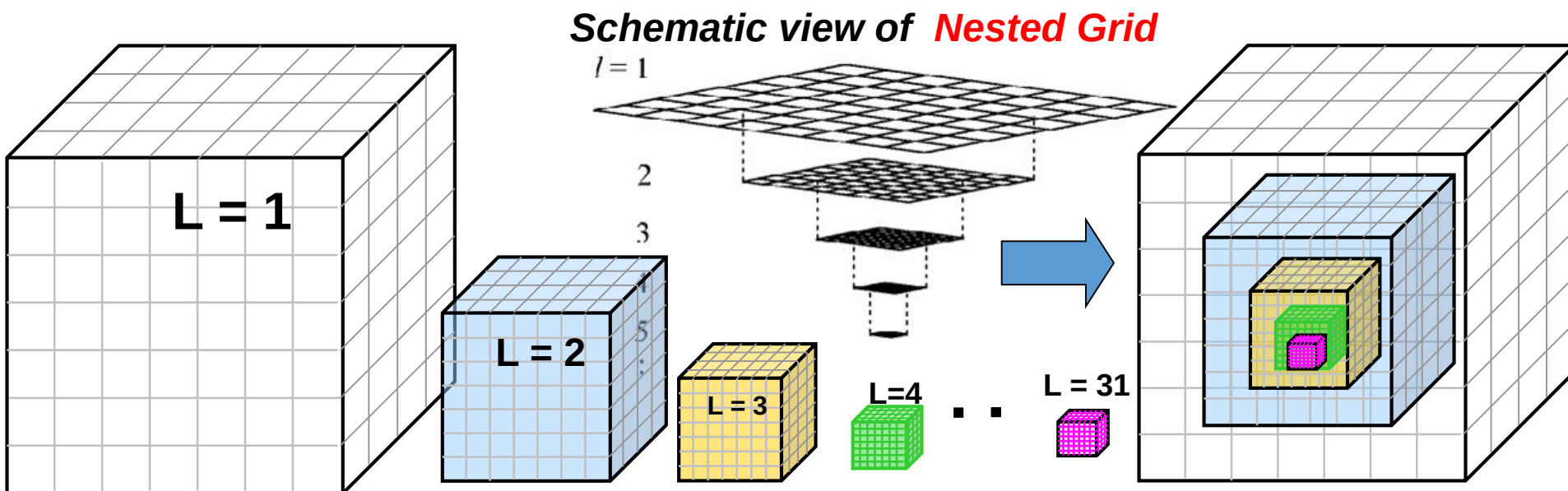
流体方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P - \rho \nabla \phi$$

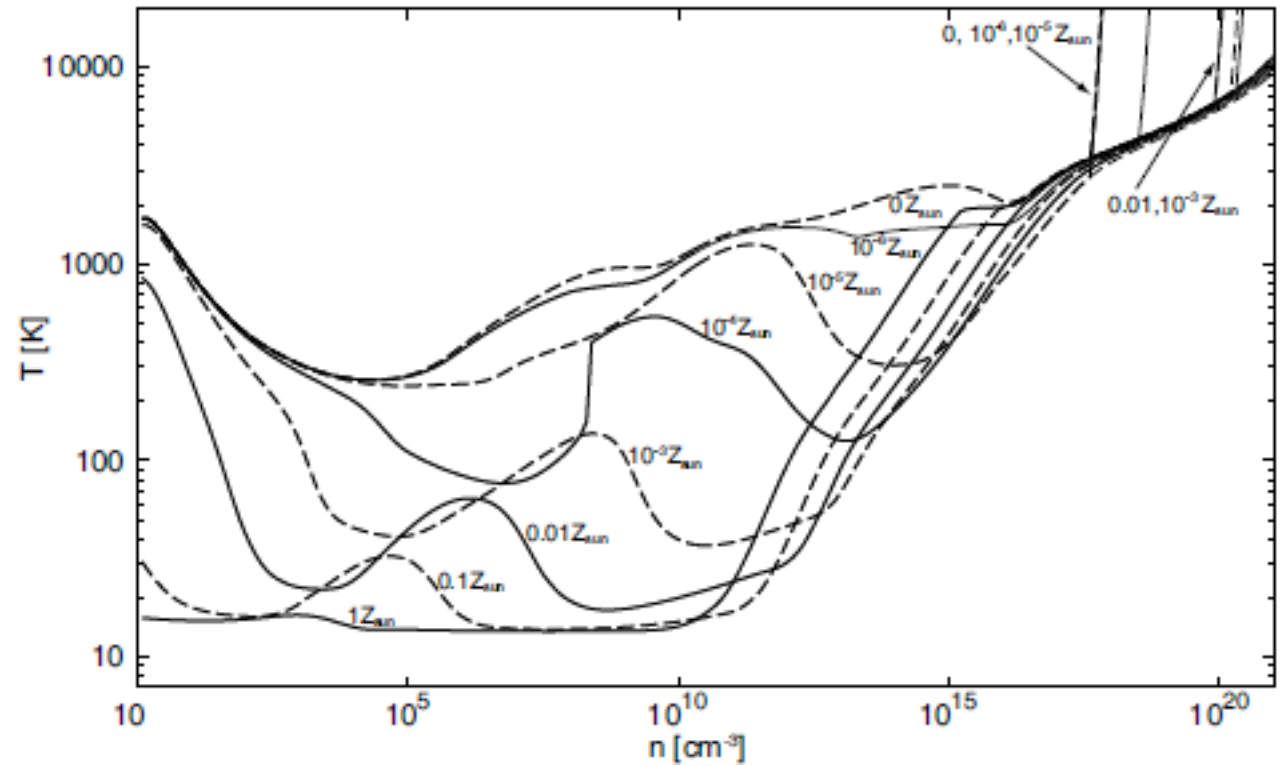
$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho,$$

$P=P(\rho) \leftarrow$ One-zone calc.



Protostellar Model

- To model protostellar evolution (mass and radius) & To suppress further contraction of the protostar
- Eos is artificially changed in high-density region (Tomisaka 2002)

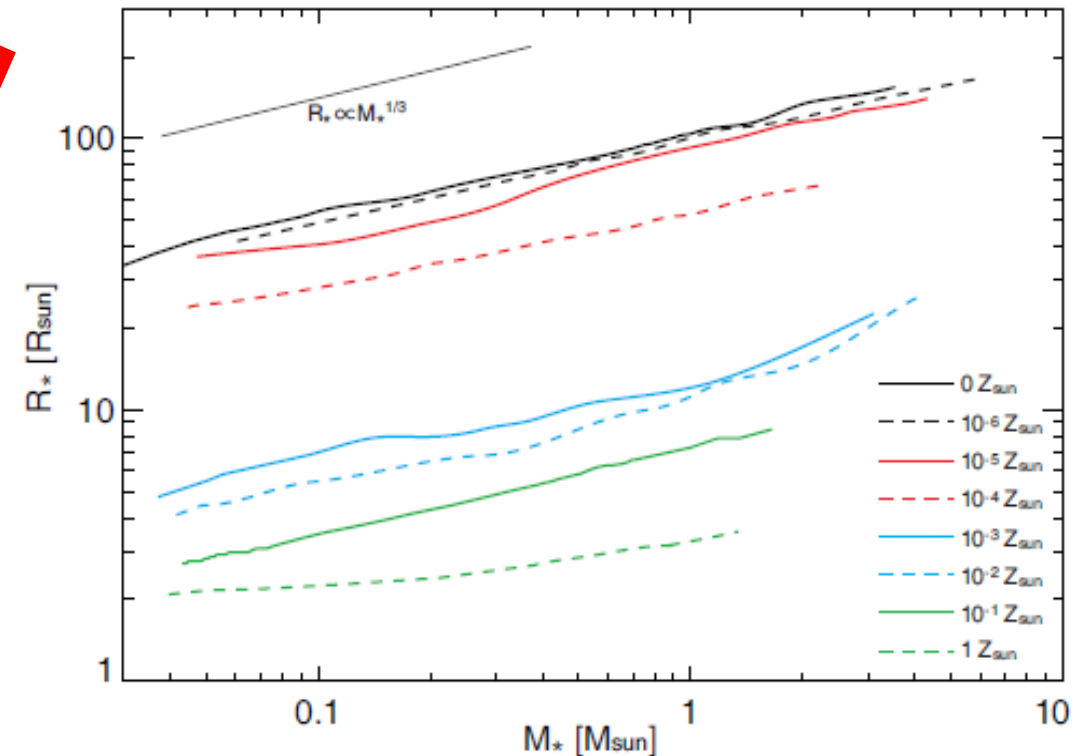


Omukai et al 2000,2005

One zone calculation

3D calculation without rotation

Protostellar mass and radius relation (Omukai & Palla) is well reproduced!



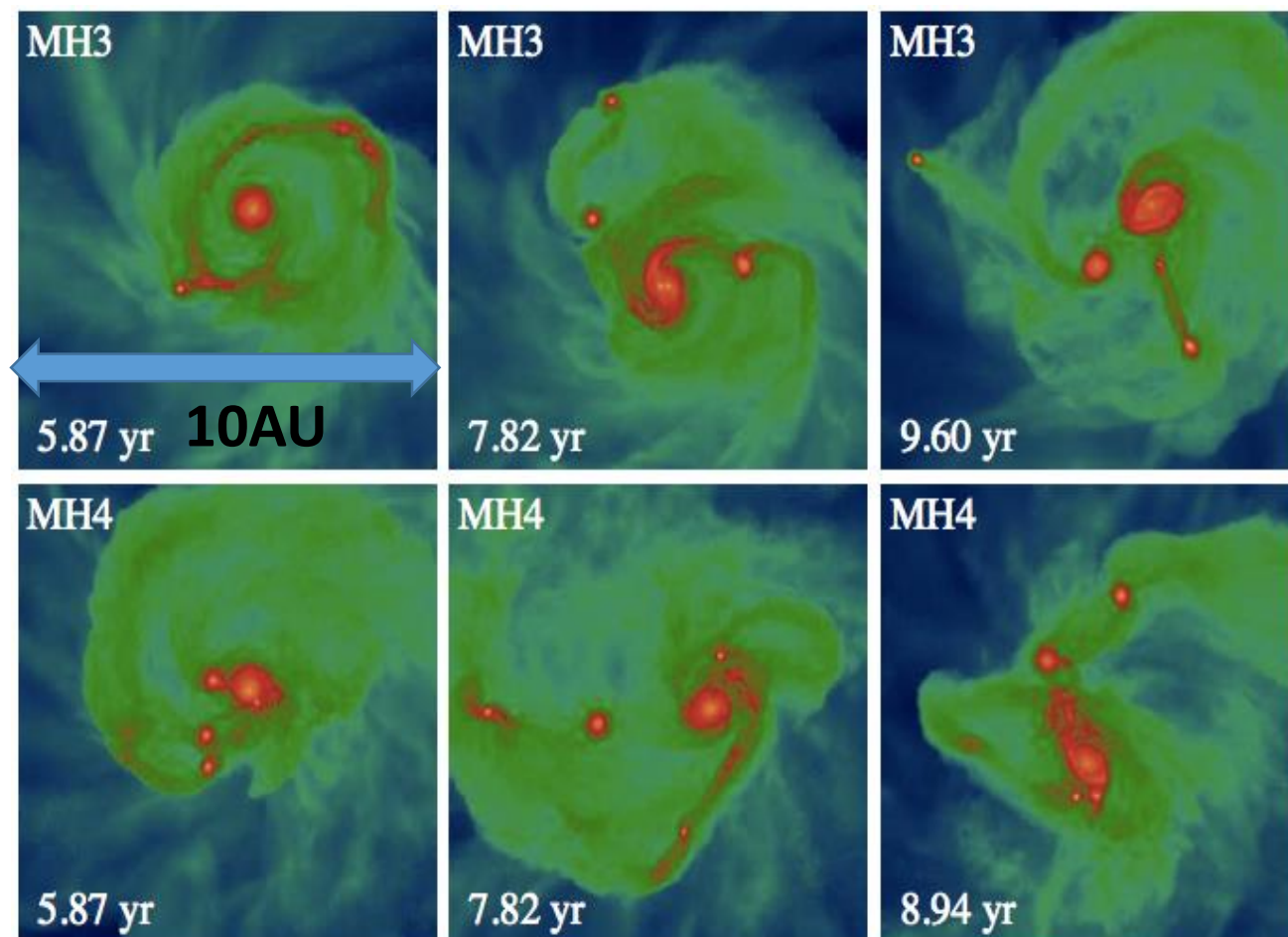
First star 最新の研究

First protostellar systemの中心部(10AU)を計算 (Greif他 2012)

- 星周円盤が分裂して複数の原始星が誕生する
- 円盤で出来た原始星のおよそ半分は、中心の主星と合体した
- いくつかの原始星は中心近傍から放出された

注意

原始星形成後10年程度しか計算していない



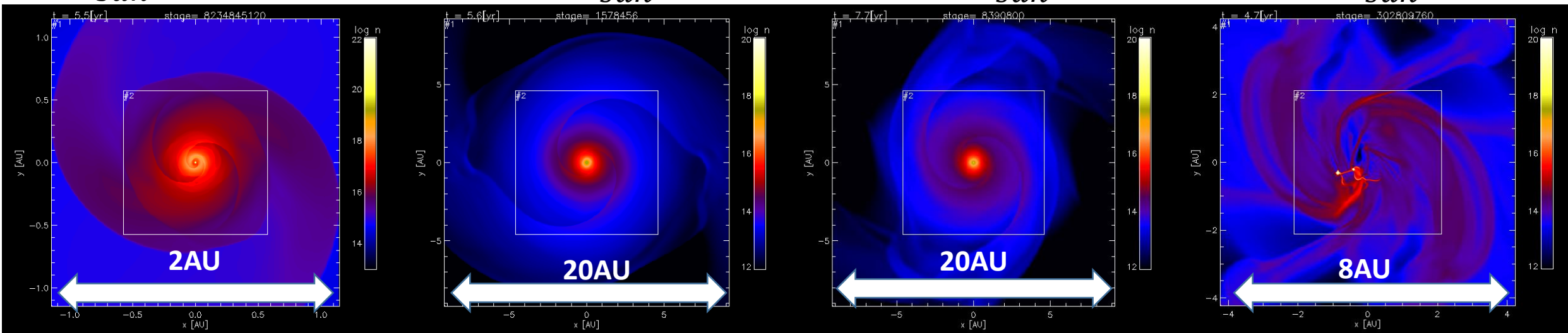
Result

$$z = z_{\text{sun}}$$

$$z = 10^{-1} z_{\text{sun}}$$

$$z = 10^{-2} z_{\text{sun}}$$

$$z = 10^{-3} z_{\text{sun}}$$

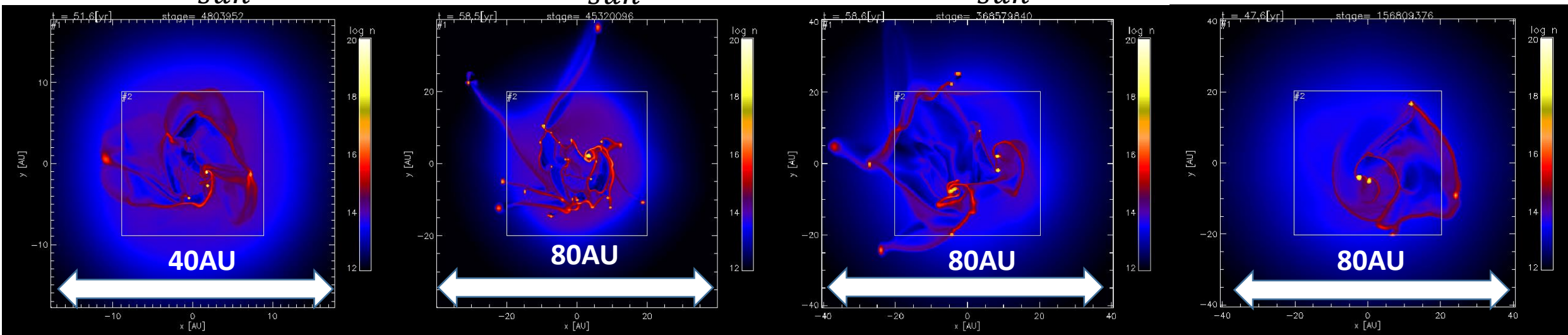


$$z = 10^{-4} z_{\text{sun}}$$

$$z = 10^{-5} z_{\text{sun}}$$

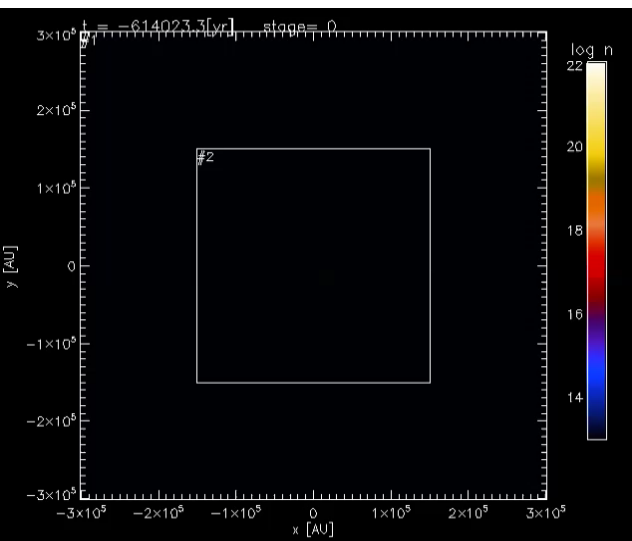
$$z = 10^{-6} z_{\text{sun}}$$

$$z = 0$$

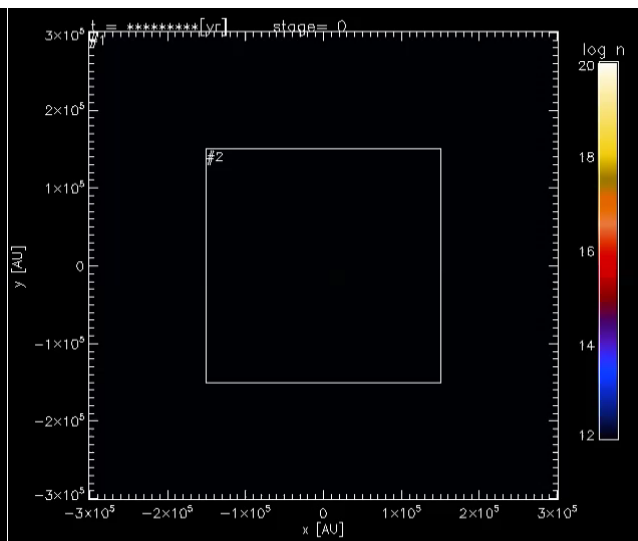


Result

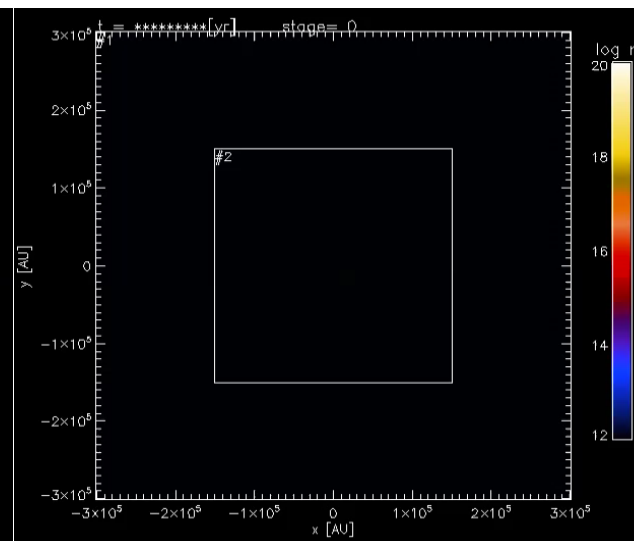
$$z = z_{\text{sun}}$$



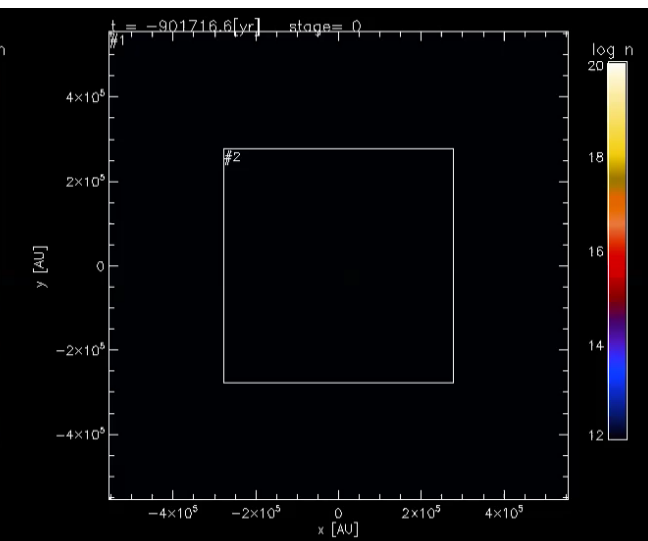
$$z = 10^{-1} z_{\text{sun}}$$



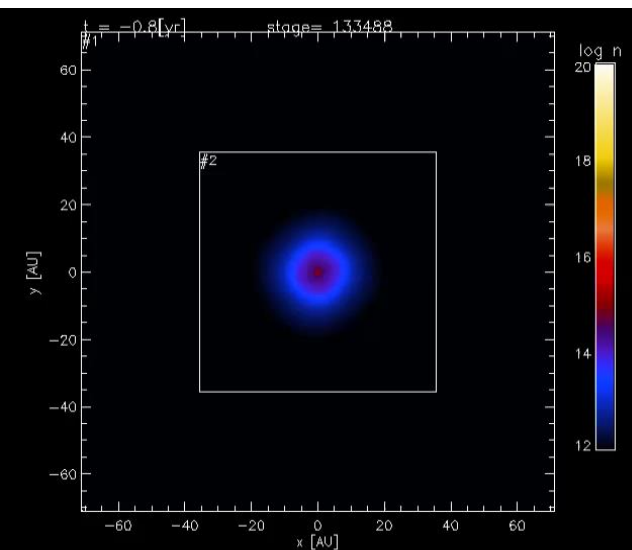
$$z = 10^{-2} z_{\text{sun}}$$



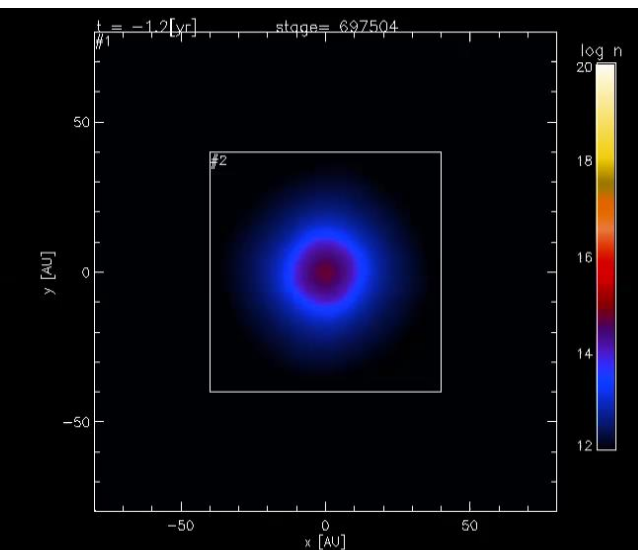
$$z = 10^{-3} z_{\text{sun}}$$



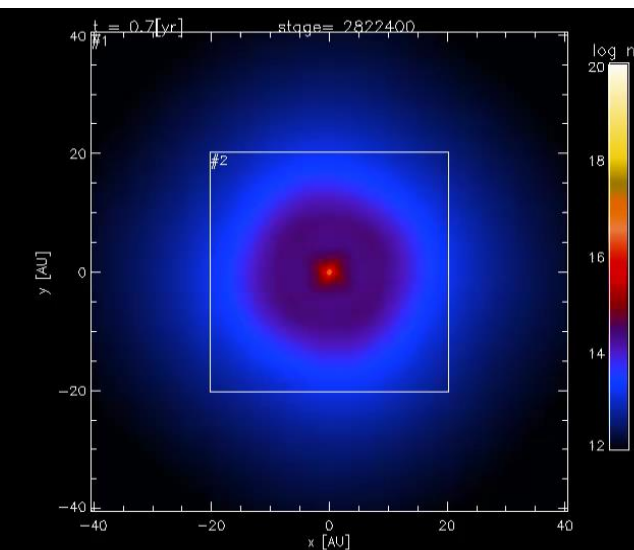
$$z = 10^{-4} z_{\text{sun}}$$



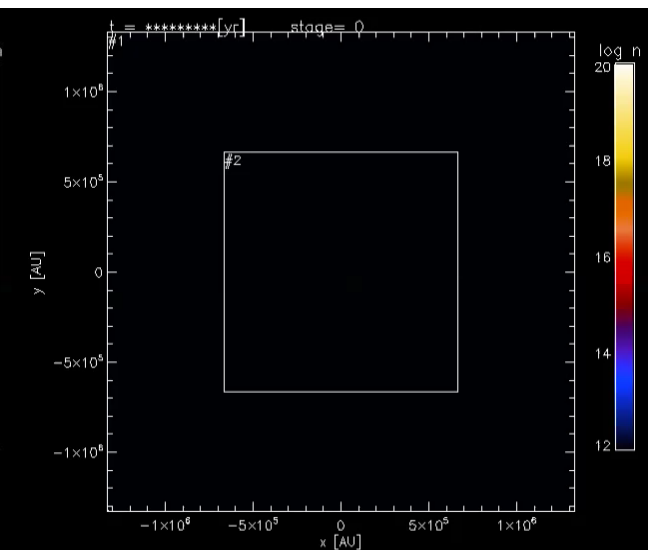
$$z = 10^{-5} z_{\text{sun}}$$



$$z = 10^{-6} z_{\text{sun}}$$

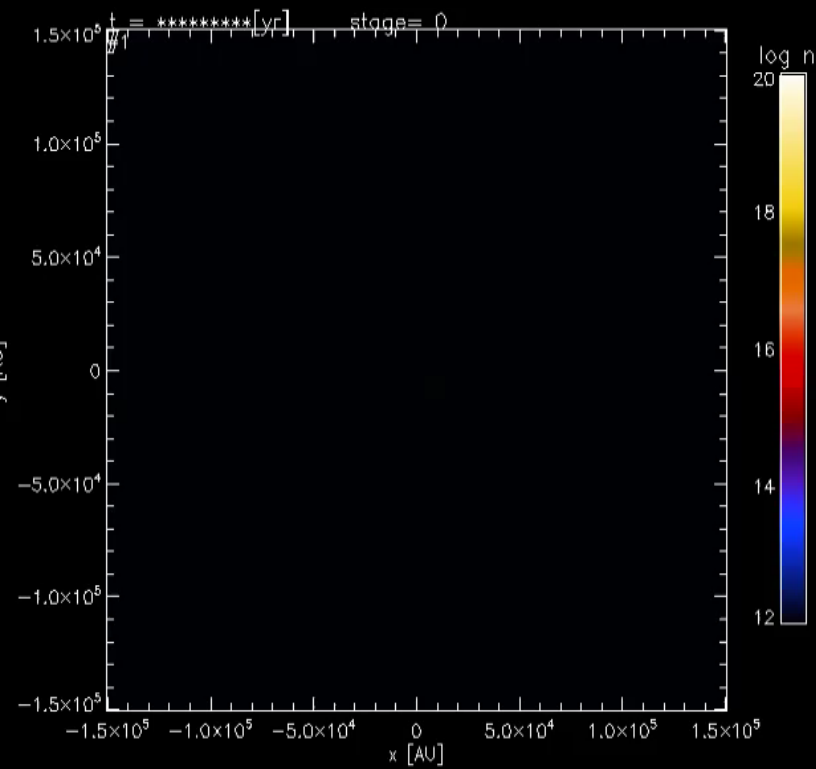


$$z = 0$$

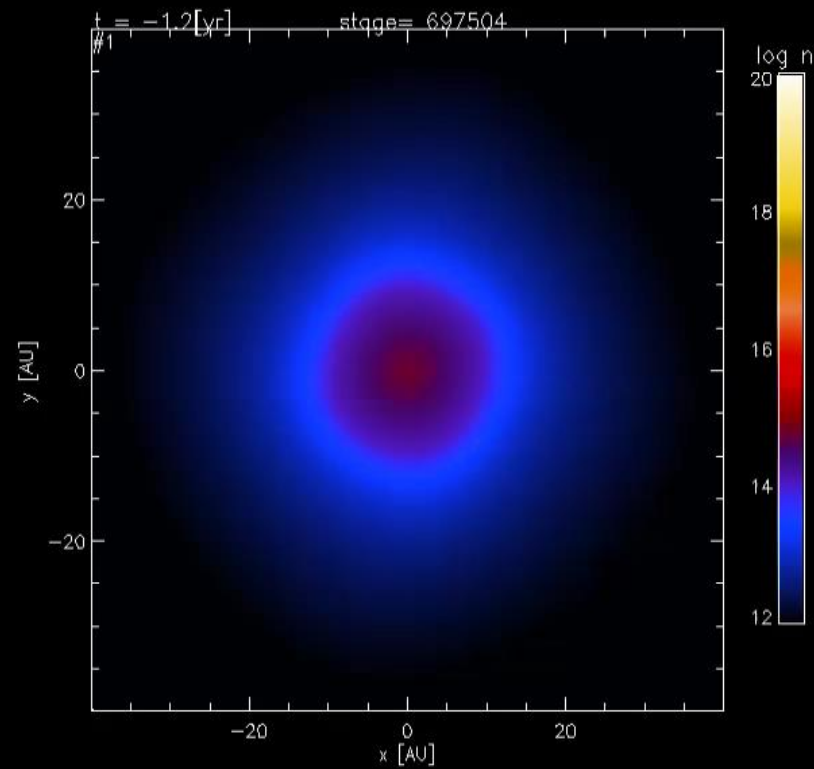


Result

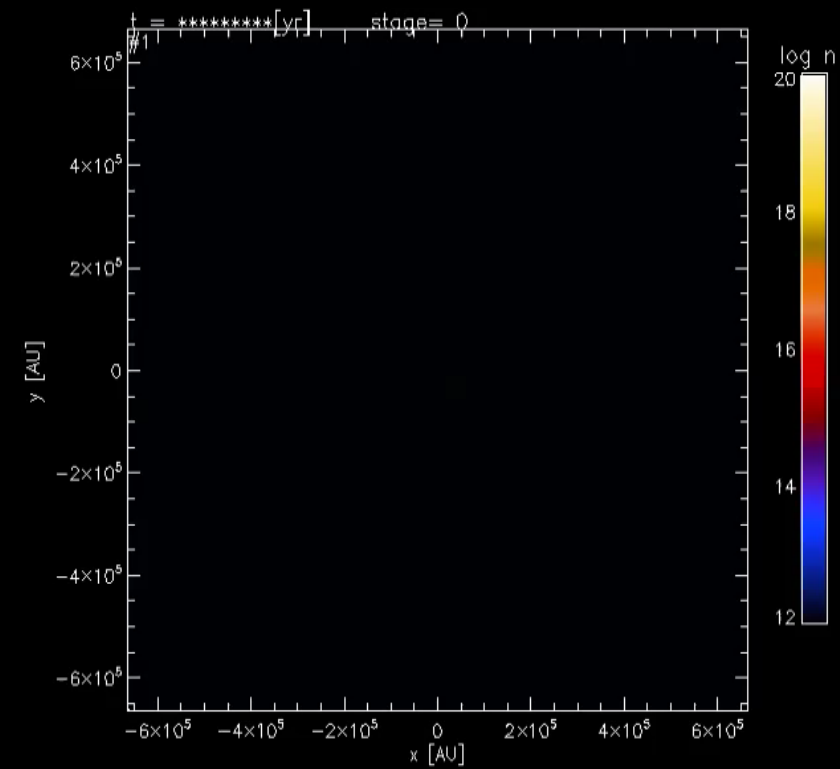
$$z = 10^{-2} z_{sun}$$



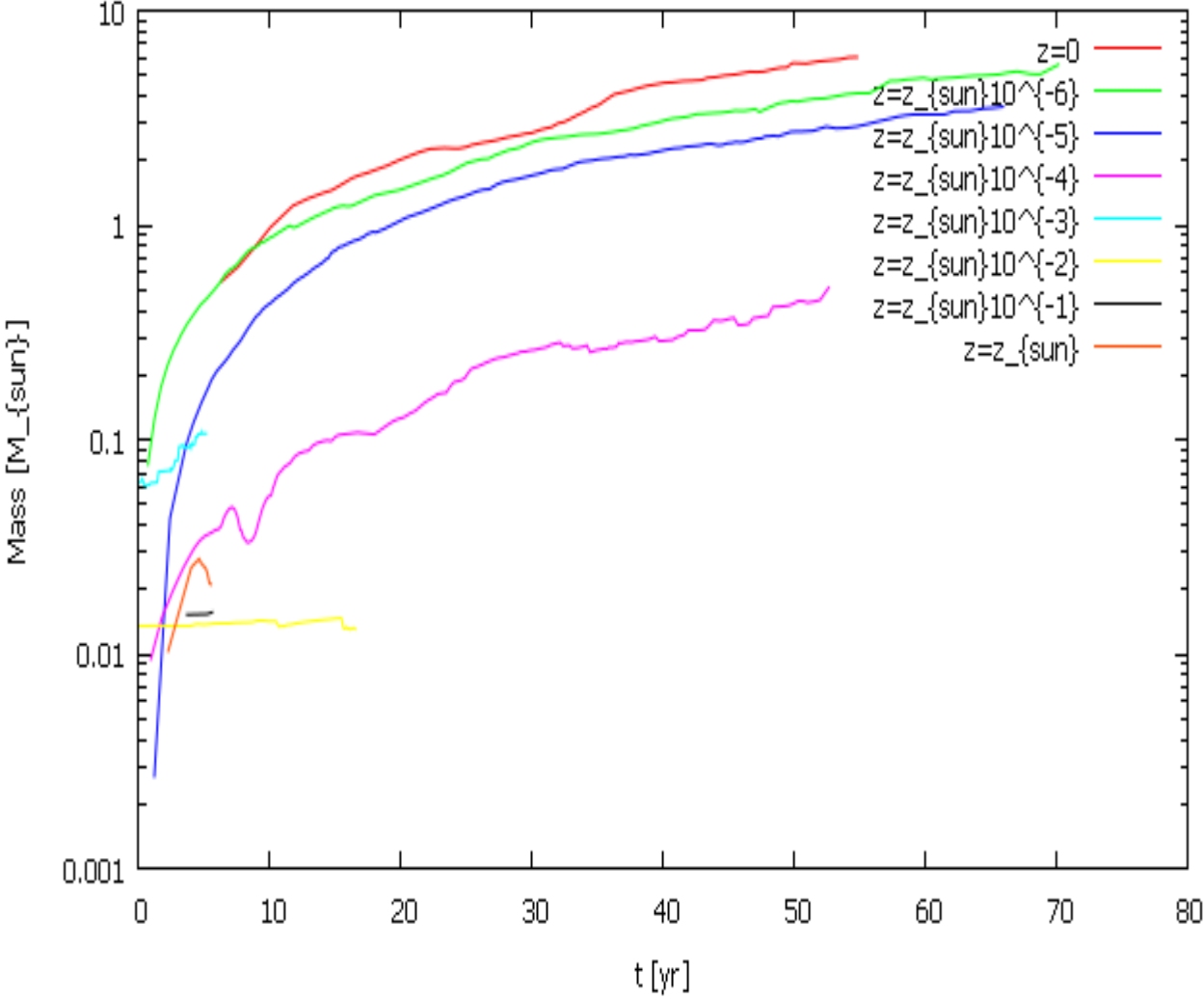
$$z = 10^{-5} z_{sun}$$



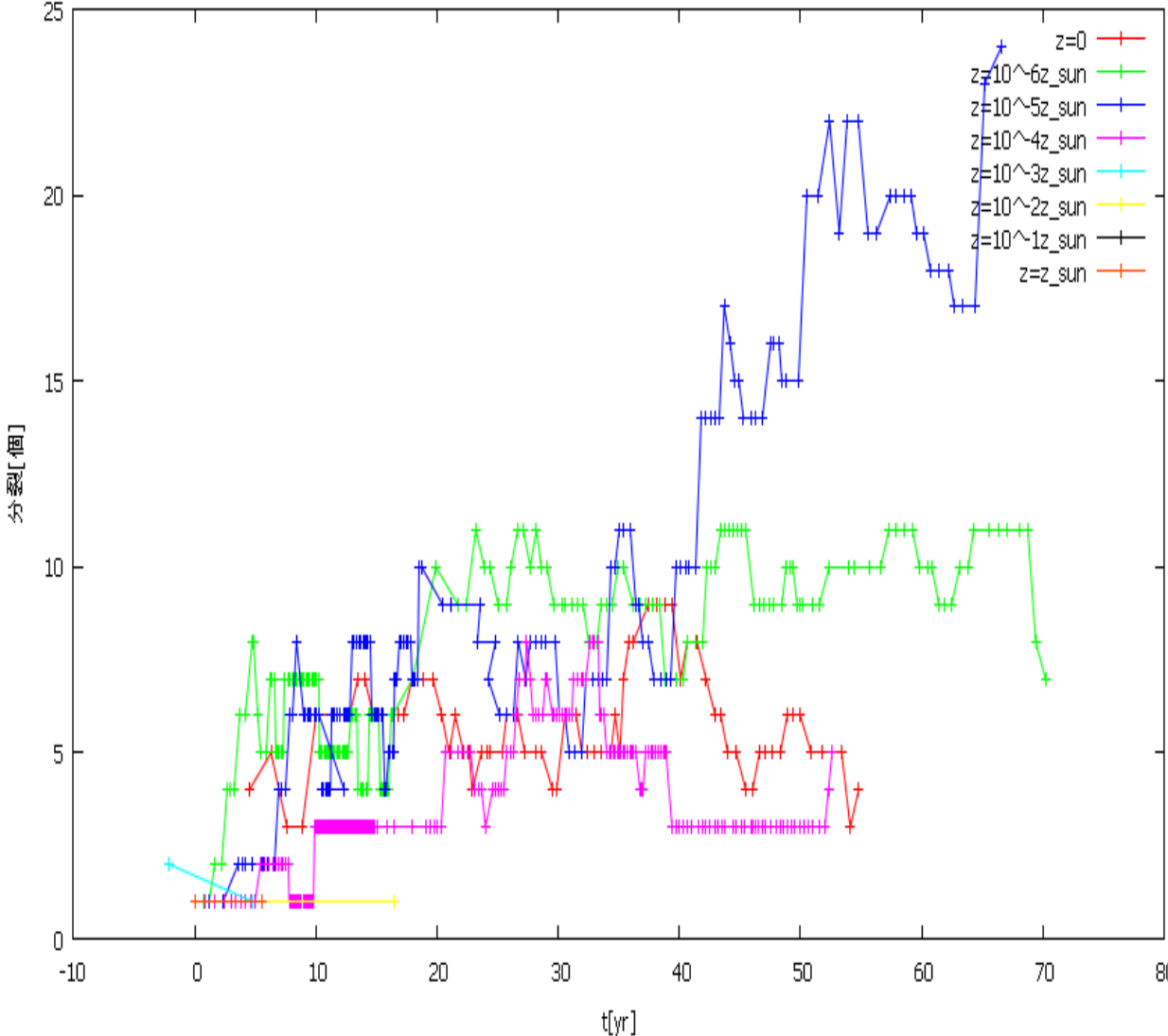
$$z = 0$$



All Stellar Mass



Fragment number



Summary

$z > 10^{-3} z_{sun} \Rightarrow$ 中心に主星ができ、その周辺に円盤が形成される現在の星形成プロセス

$z < 10^{-3} z_{sun} \Rightarrow$ ガスは分裂し複数の原始星が誕生する(cluster)

Discussion

1、First core

※金属量が高い場合 ($z > 10^{-3} z_{sun}$)

First coreの形成  星形成前に大局的なspiralが発達して、効率的に角運動量を輸送

 分裂を抑制

※金属量低い場合 ($z < 10^{-3} z_{sun}$)

First coreがすぐに消滅  spiralが発達せず、効率的に角運動量を輸送できない

 分裂を促進

2、質量降着率

※金属量が高い場合 ($z > 10^{-3} z_{sun}$)

質量降着率が低い  軽い円盤が形成される。安定。

 分裂を抑制

※金属量が低い場合 ($z < 10^{-3} z_{sun}$)

質量降着率が高い  重い円盤が形成される。不安定。

 分裂を促進