Nonlinear outcomes of gravitational instability in irradiated protoplanetary disks

廣瀬重信 (JAMSTEC), Jiming Shi (Princeton)

2017年7月12日

基研研究会「原始惑星系円盤」

京都大学 基礎物理学研究所

降着円盤における重力不安定

- 回転と自己重力を考慮した音波の分散関係式 (Toomre 1964)

$$(\omega - m\Omega)^2 = c_{\rm s}^2 (k - k_{\rm crit})^2 + \left(1 - \frac{1}{Q^2}\right)$$

Toomre
パラメータ $Q \equiv \dfrac{c_{\rm s}\Omega}{\pi G \Sigma} < 1$ 不安定条件

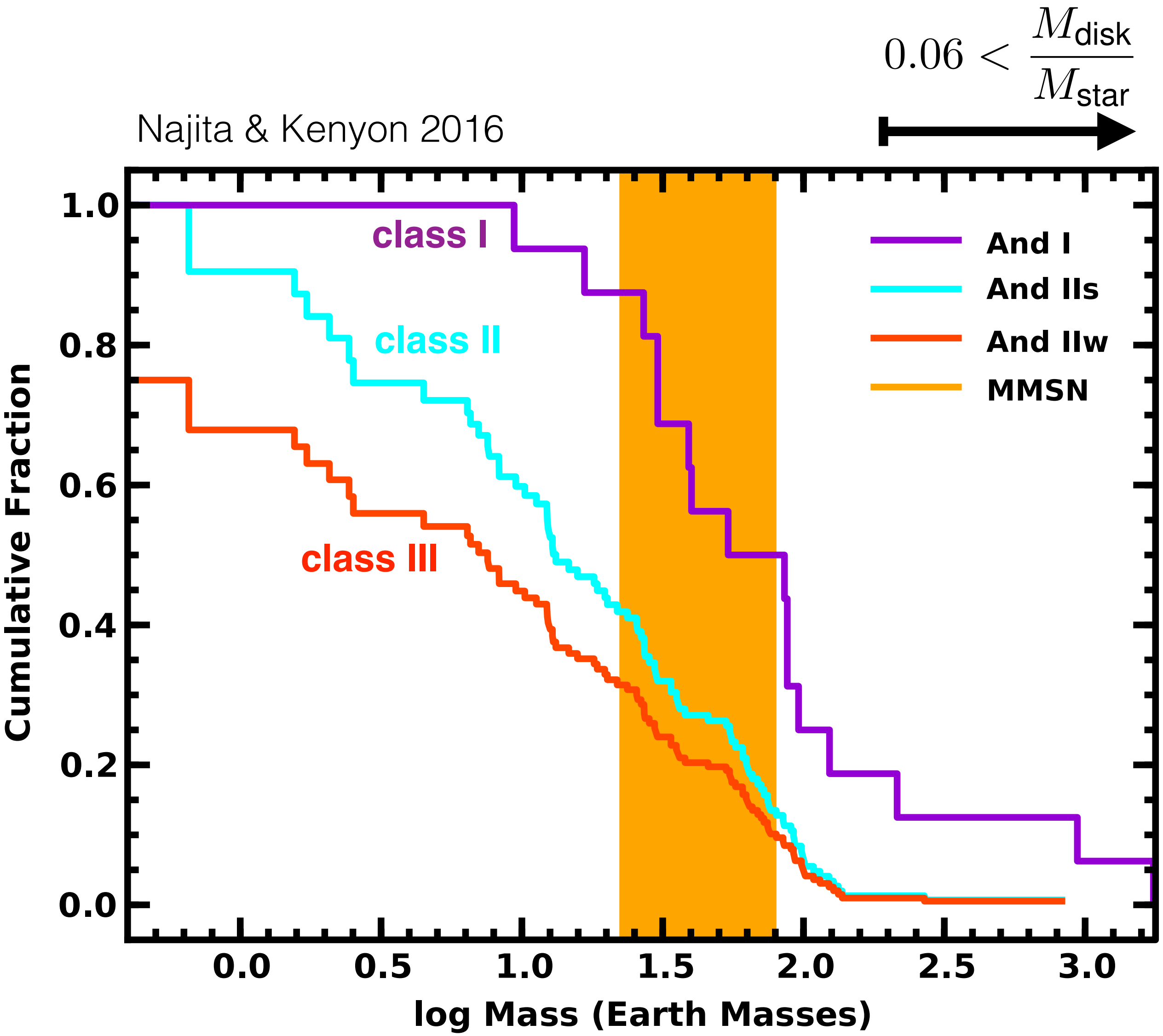
$$k_{\rm crit} \equiv \frac{\pi G \Sigma}{c_{\rm s}^2} \approx \frac{1}{QH}$$ 最大成長波数 $\approx$ スケールハイト $^{-1}$

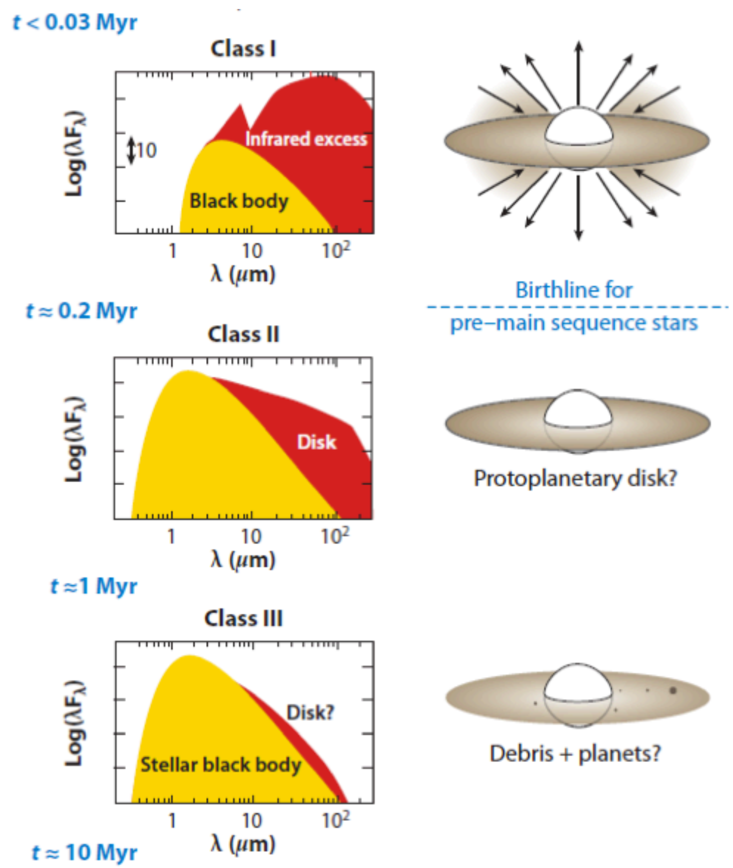
- 線形不安定条件 ($Q < 1$) を、円盤と中心星の質量比を用いて表すと

$$\frac{M_{\rm disk}}{M_{\rm star}} > 0.06 \left(\frac{f}{1}\right) \left(\frac{T}{10\ {\rm K}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{r}{100\ {\rm AU}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

原始惑星系円盤質量の時間進化

- 初期段階では、ある程度の割合の原始惑星系円盤が、自己重力の影響が無視できない質量を持つことが推定される





重力不安定の非線形発展: 重力乱流 vs. 分裂

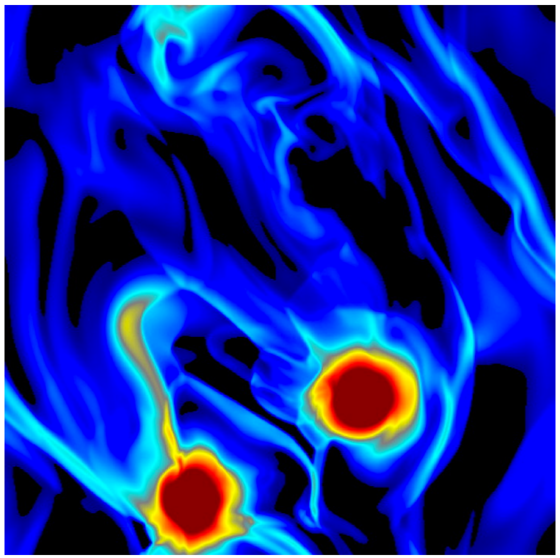
- Gammie (2001) は、簡単化した冷却関数

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{e}{\beta\Omega^{-1}}, \quad \boxed{\beta\ \text{cooling}}$$

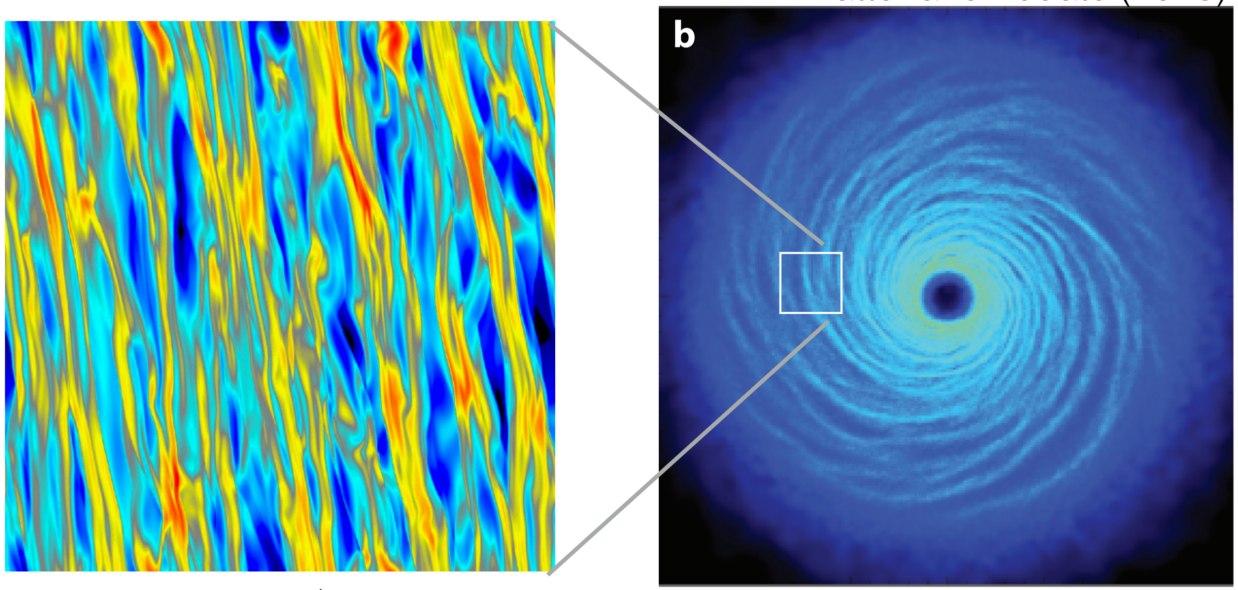
を用いた局所数値計算を行い、冷却時間と力学時間の比 β によって、非線形発展が異なることを見出した:

$$\begin{cases} \beta > 3 & \text{重力乱流 } (Q \sim 1) \Rightarrow \text{シアストレス起源} \\ \beta < 3 & \text{分裂} \Rightarrow \text{伴星・惑星形成.} \end{cases}$$

Kratter and Lodato (2016)



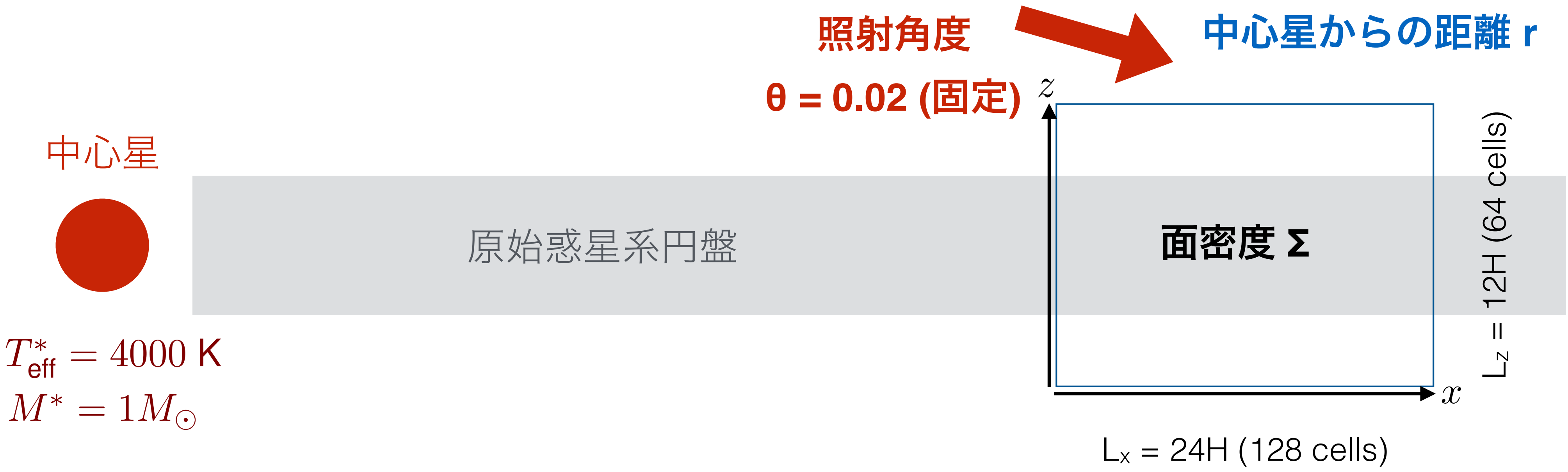
β = 2 (冷却が強いとき)



β = 10 (冷却が弱いとき)

本研究の目的と手法

- 現実的な熱力学（輻射冷却・状態方程式・中心星からの可視光輻射）を基づいて、原始惑星系円盤における重力不安定の非線形発展を調べる
- シアリングボックスを用いて 3 次元輻射流体力学計算を行う
  - 初期に成層した層流に、擾乱を与えてその非線形発展を追う
  - 計算パラメータは、中心星からの距離 r と、面密度 Σ（あるいは換算して $M_{\rm disk}/M_* = \pi r^2 \Sigma / M_*$）のみ
  - 面密度 Σ は、$0.06 < M_{\rm disk}/M_* < 0.25$ の範囲を考える



Angular momentum and energy transport in disks

e.g. Balbus & Papaloizou (1998)

- shear stress

$$W_{r\phi} \equiv \langle \rho u_r u_\phi \rangle - \langle B_r B_\phi \rangle$$

- transport equation of angular momentum J

$$\frac{\partial \langle J \rangle}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left(J\langle u_r \rangle + rW_{r\phi}\right)\right) = 0$$

- transport equation of mechanical energy E

"viscosity"-like

$$\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left(\langle E + \ldots \rangle\right)\langle u_r \rangle + \left(rW_{r\phi}\right)\Omega\right) = -W_{r\phi}\frac{d\Omega}{d\ln r}$$

dissipation
(local energy loss)

Angular momentum and energy transport in disks

- shear stress

e.g. Balbus & Papaloizou (1998)

$$W_{r\phi} \equiv \langle \rho u_r u_\phi \rangle - \langle B_r B_\phi \rangle + \left\langle \frac{g_r g_\phi}{4\pi G} \right\rangle$$

- transport equation of angular momentum J

$$\frac{\partial \langle J \rangle}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left(J\langle u_r \rangle + rW_{r\phi}\right)\right) = 0$$

- transport equation of mechanical energy E

"viscosity"-like

$$\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left(\langle E + \dots \rangle\right)\langle u_r \rangle + \left(rW_{r\phi}\right)\Omega + \mathcal{F}^*\right) = -W_{r\phi}\frac{d\Omega}{d\ln r}$$

$$\mathcal{F}^* \equiv \int \left\langle \rho u_r \Phi + \frac{g_r}{4\pi G}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} - r\Omega g_\phi\right)\right\rangle_\phi dz$$

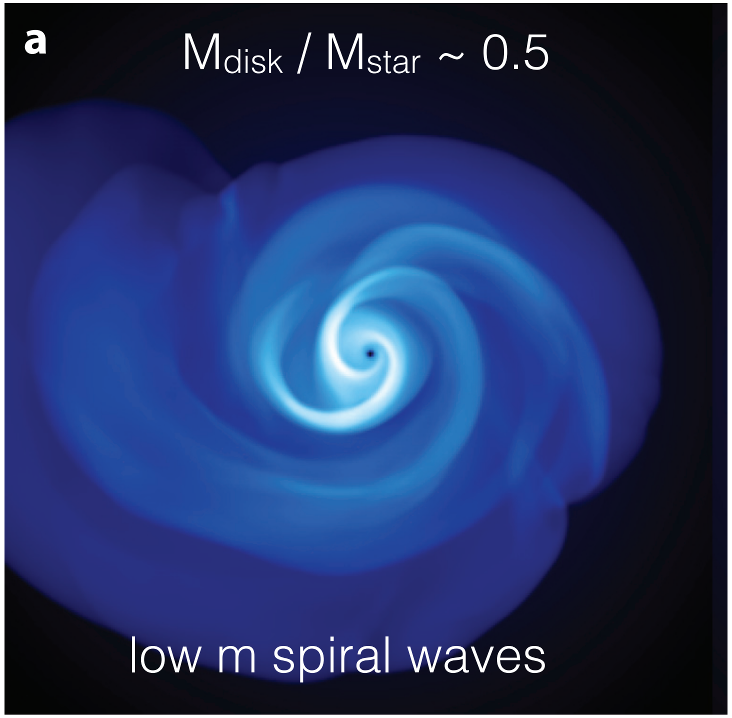
dissipation
(local energy loss)

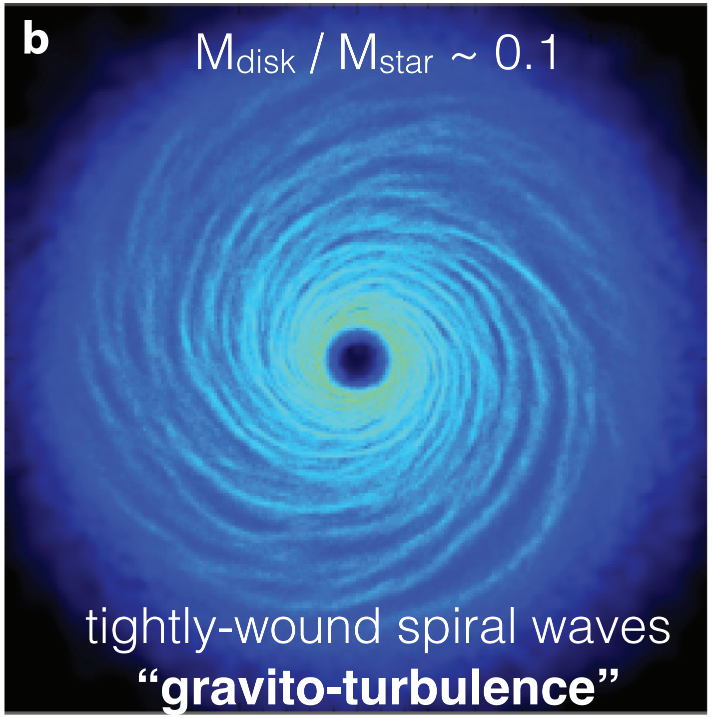
global energy transport due to gravity

シアリングボックス近似ではF* = 0となる

Locality of transport depends on M_{disk} / M_{star}

Kratter and Lodato (2016)





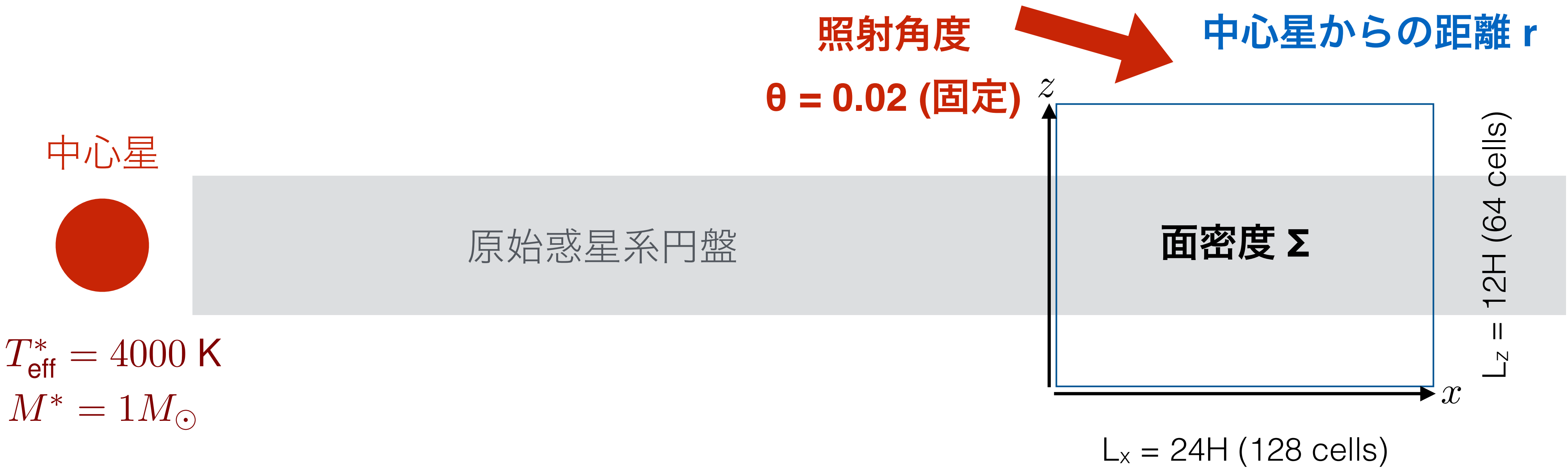
M_{disk} / M_{star}	large	**small**
energy transport	non-local	**local**

Caveat: c.f. Tsukamoto et al. (2015), Takahashi et al. (2016)

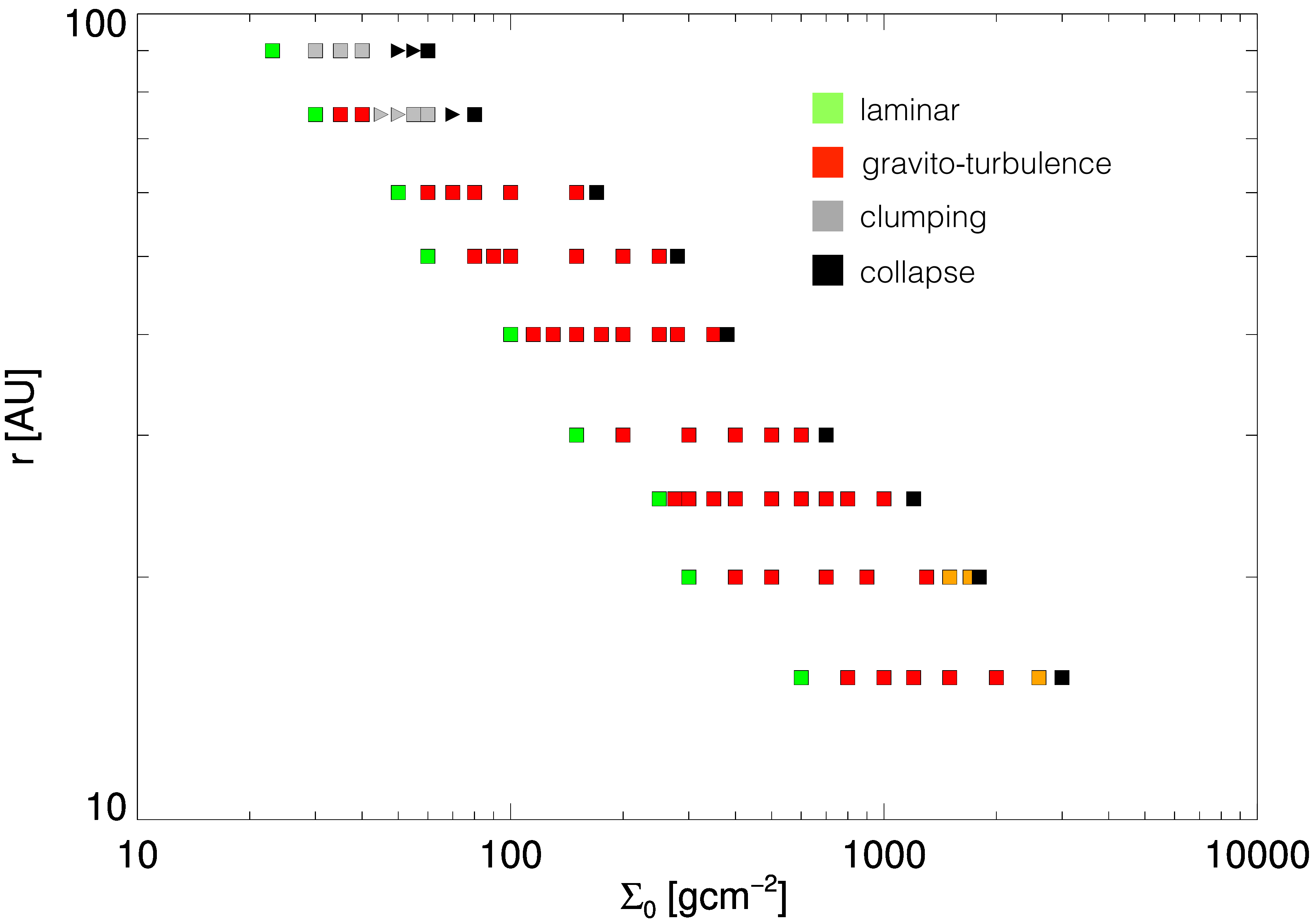
本研究の目的と手法

- 現実的な熱力学（輻射冷却・状態方程式・中心星からの可視光輻射）を基づいて、原始惑星系円盤における重力不安定の非線形発展を調べる

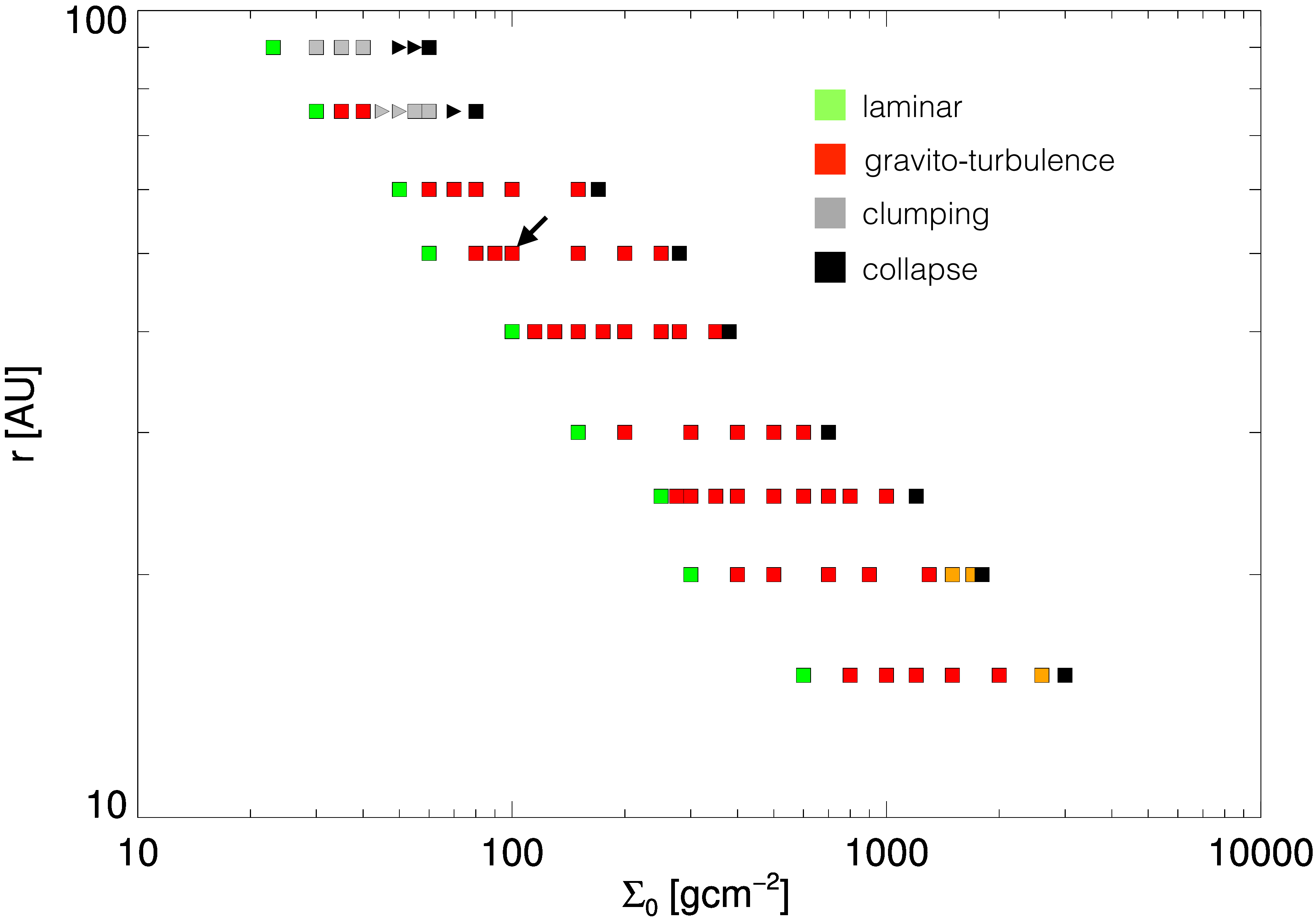
- シアリングボックスを用いて３次元輻射流体力学計算を行う
  - 初期に成層した層流に、擾乱を与えてその非線形発展を追う
  - 計算パラメータは、中心星からの距離 r と、面密度 Σ（あるいは換算して $M_{\rm disk}/M_* = \pi r^2 \Sigma / M_*$）のみ
  - 面密度 Σ は、$0.06 < \Sigma < 0.25$ の範囲を考える



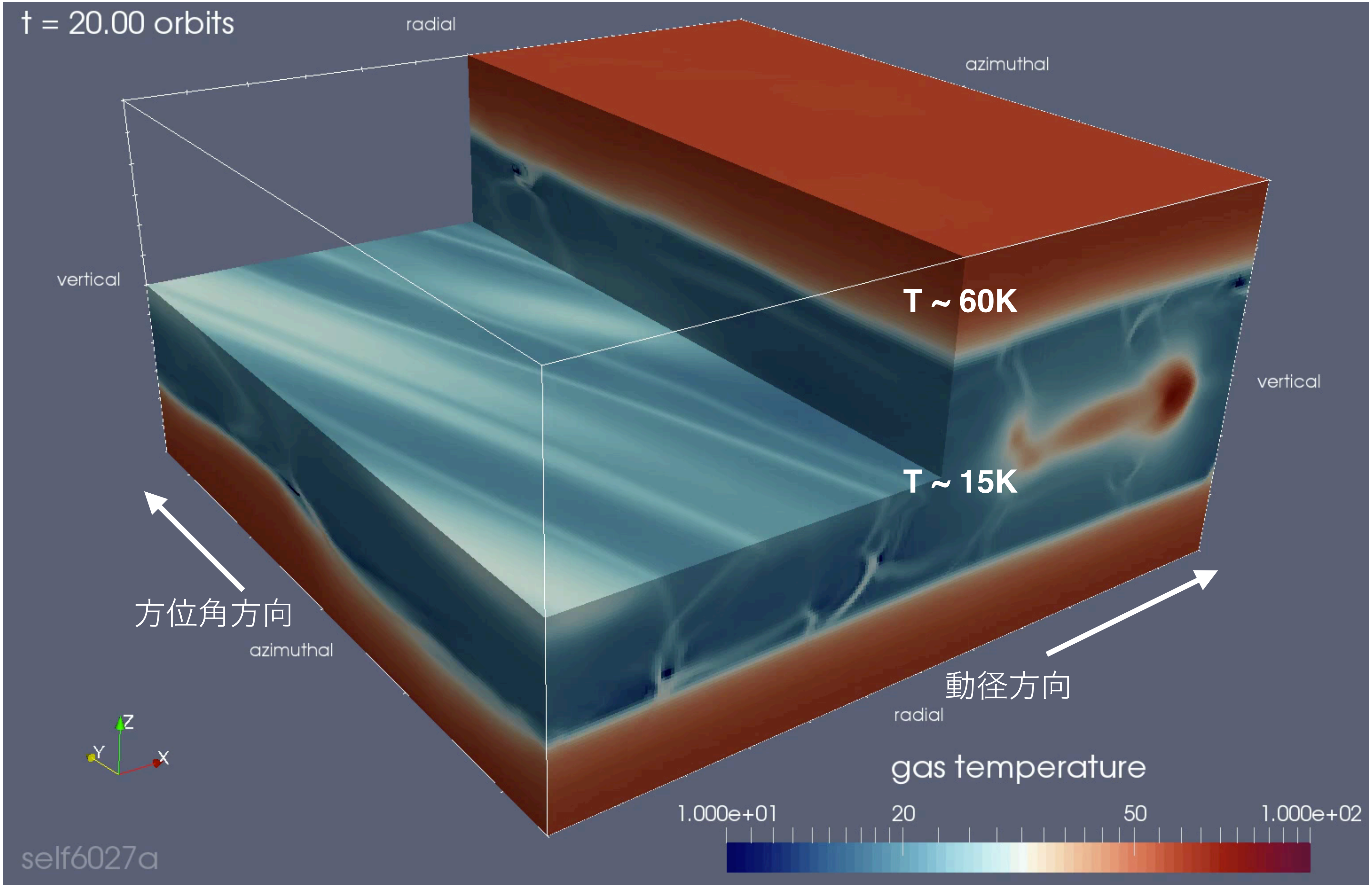
Nonlinear outcomes of GI: dependence on r and Σ



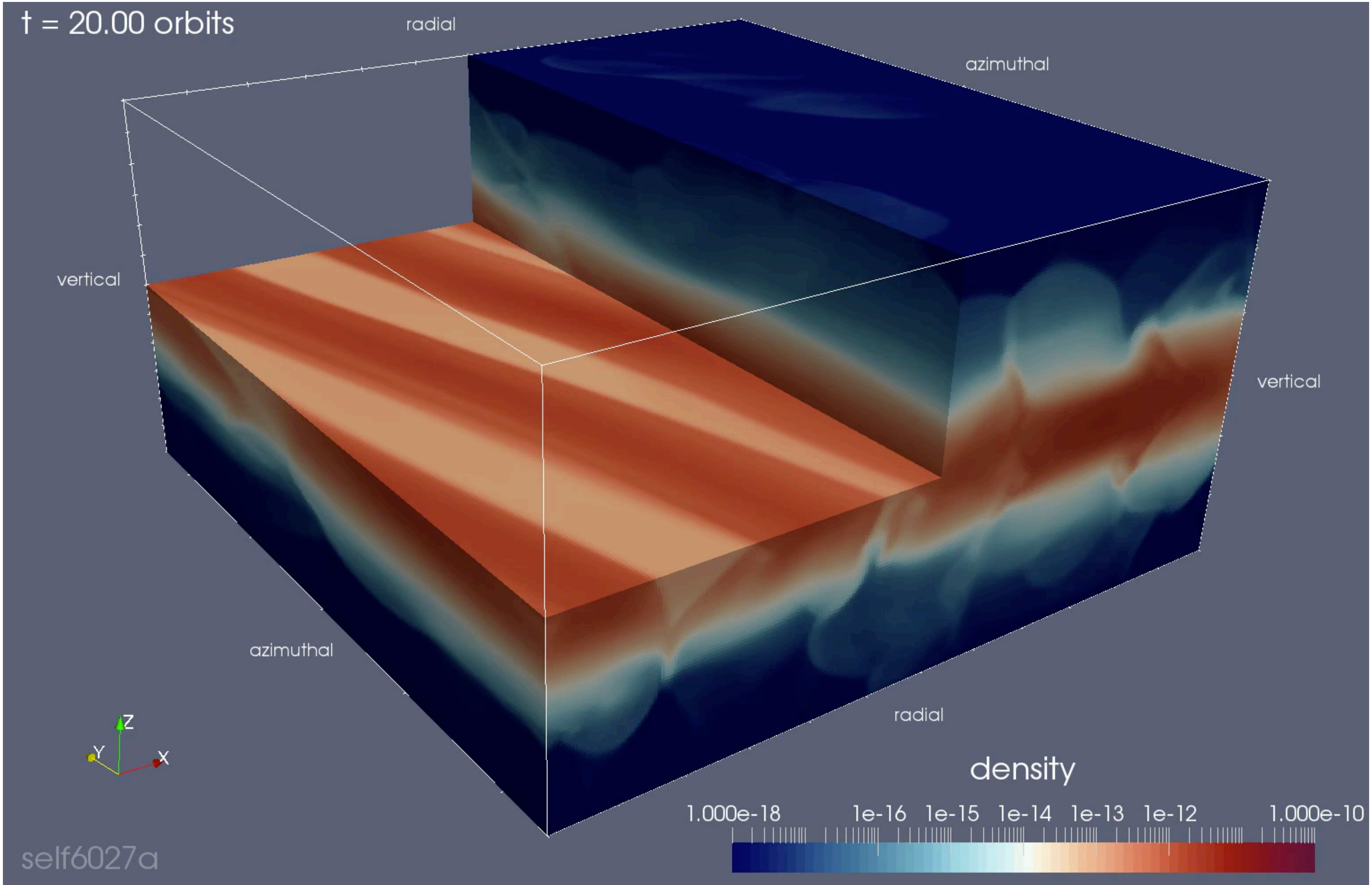
r = 50 AU, Σ = 100 gcm^{-2} の場合：gravito-turbulence



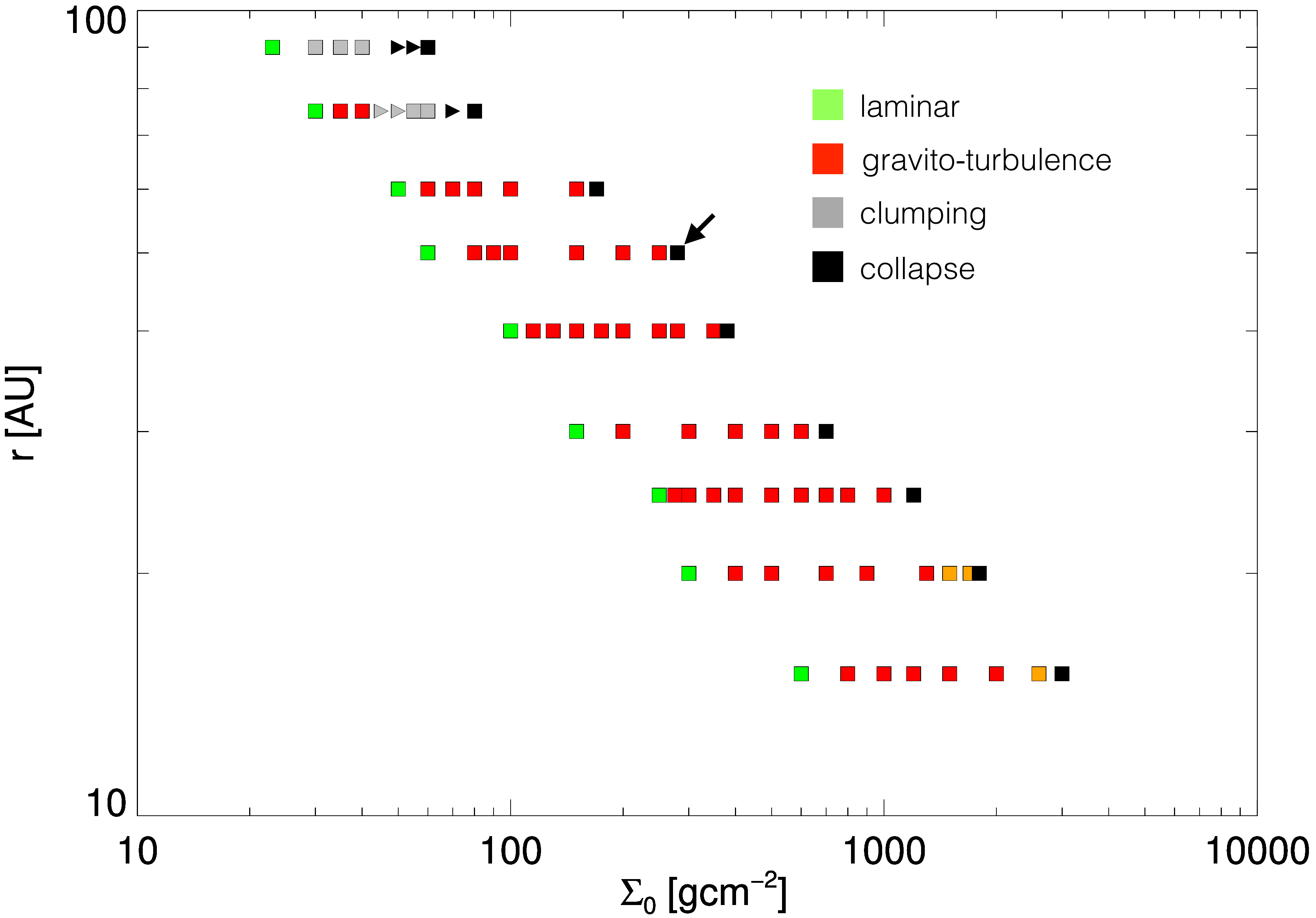
r = 50 AU, Σ = 100 gcm^{-2} の場合：gravito-turbulence



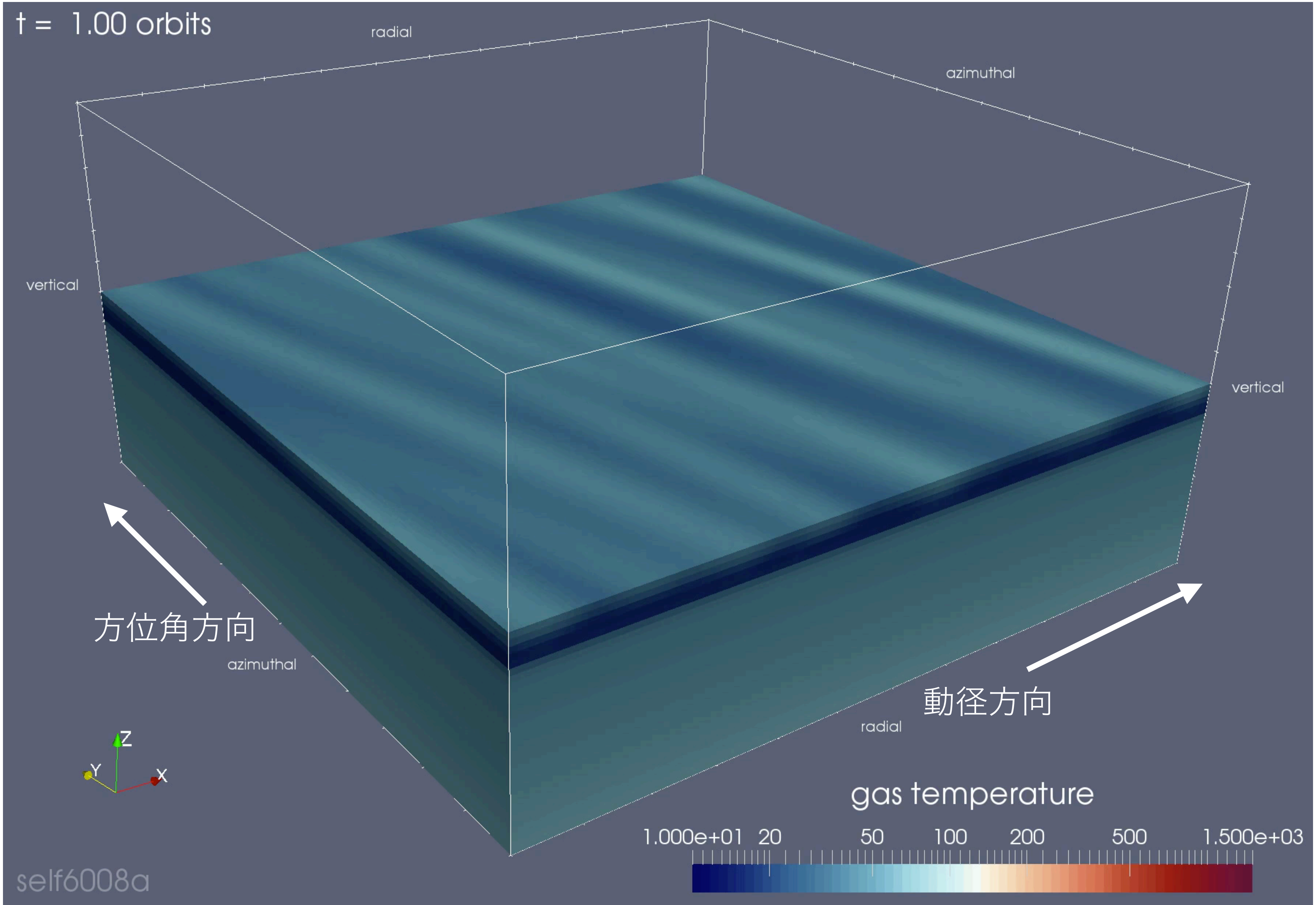
r = 50 AU, Σ = 100 gcm^{-2} の場合：gravito-turbulence



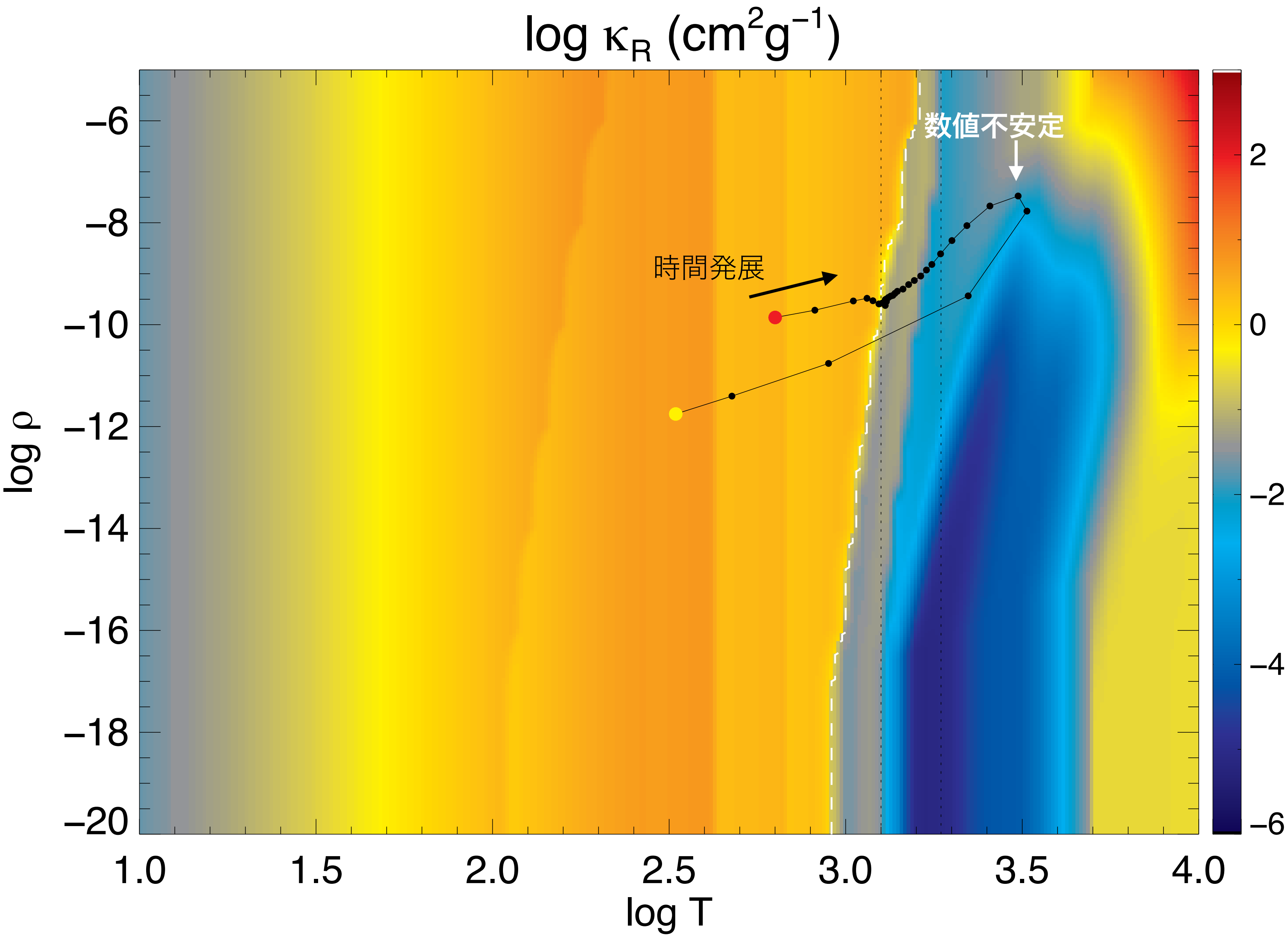
r = 50 AU, Σ = 300 gcm^{-3} の場合：runaway collapse



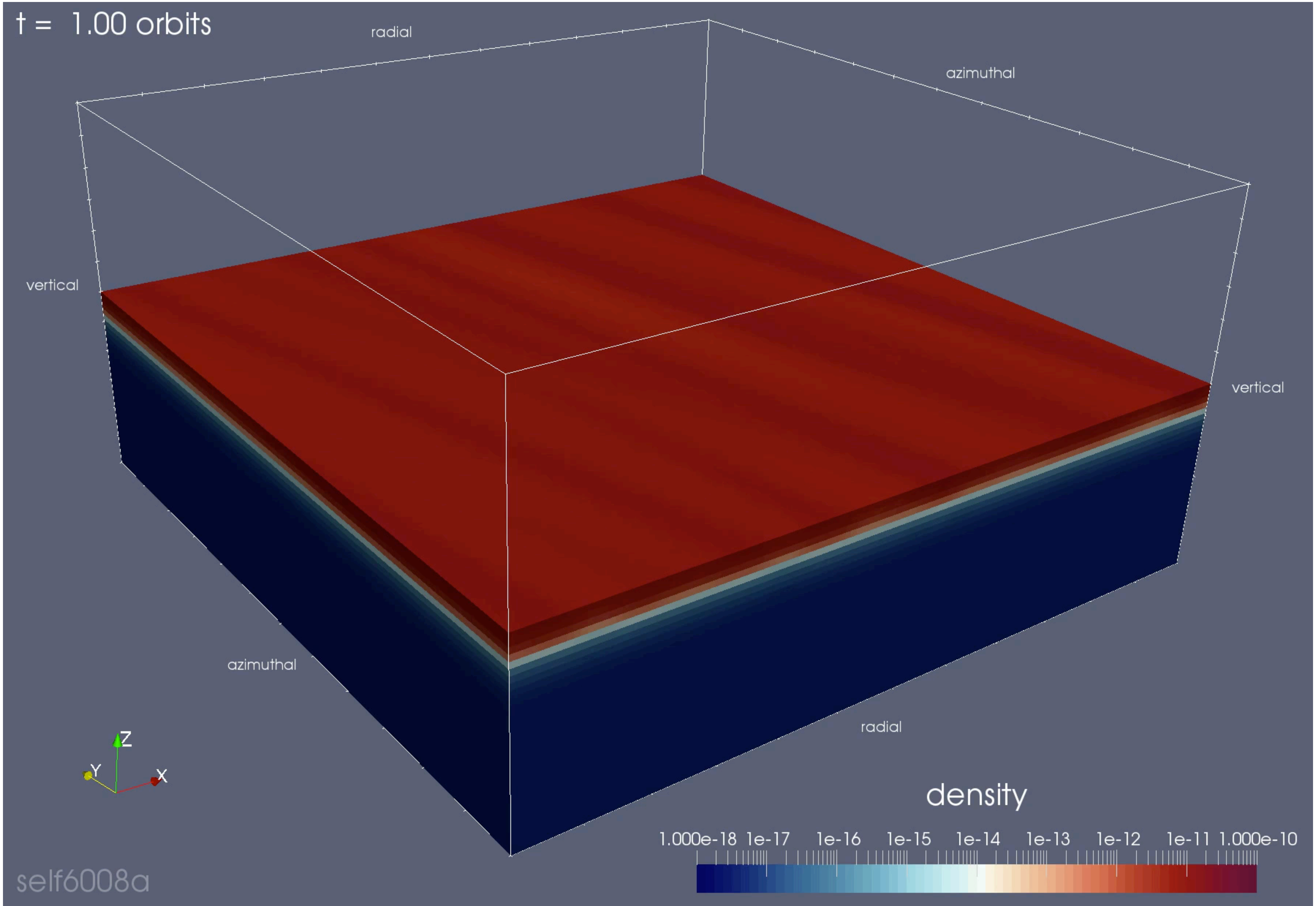
r = 50 AU, Σ = 300 gcm^{-3} の場合：runaway collapse



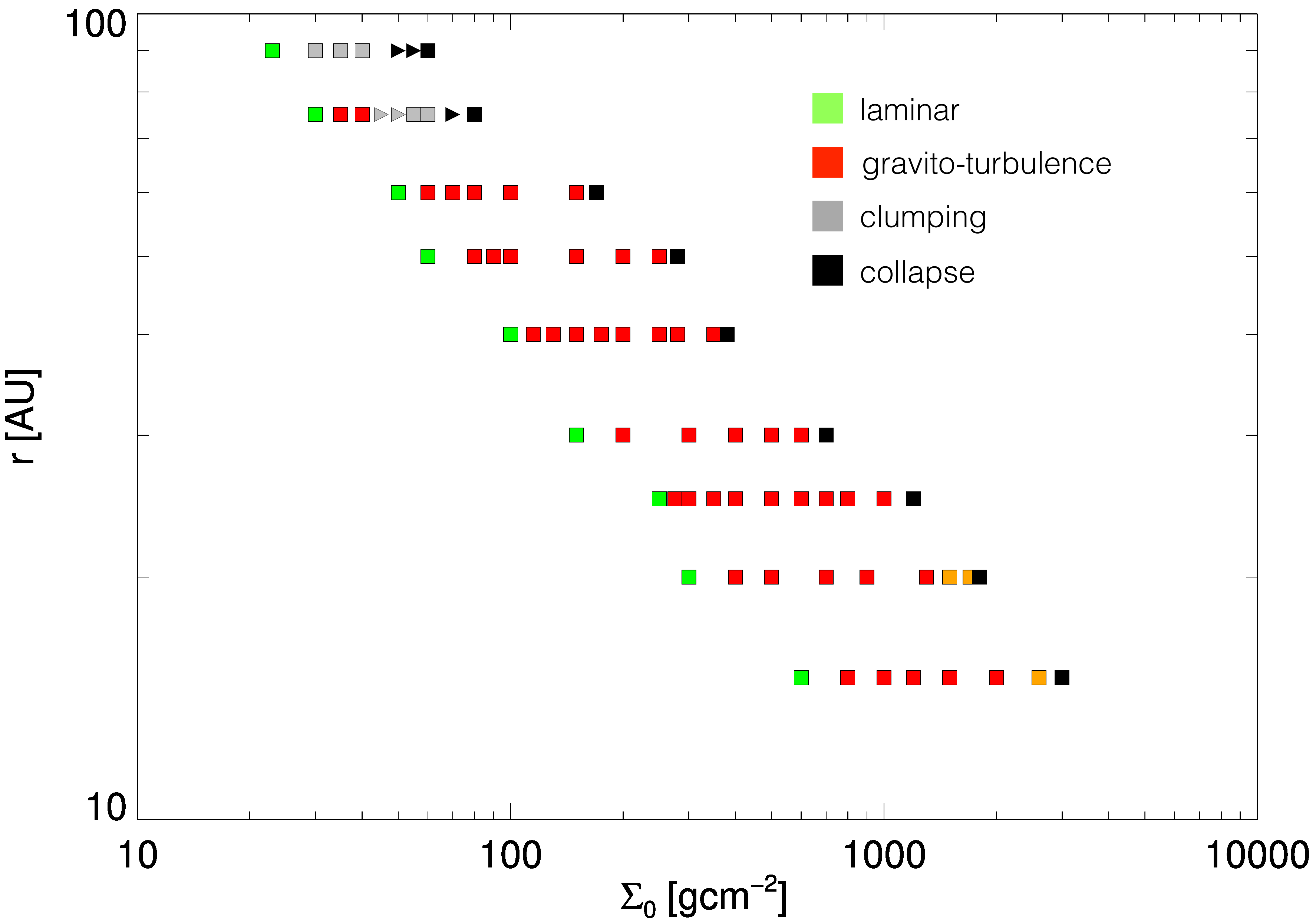
clump中心の温度・密度の時間変化



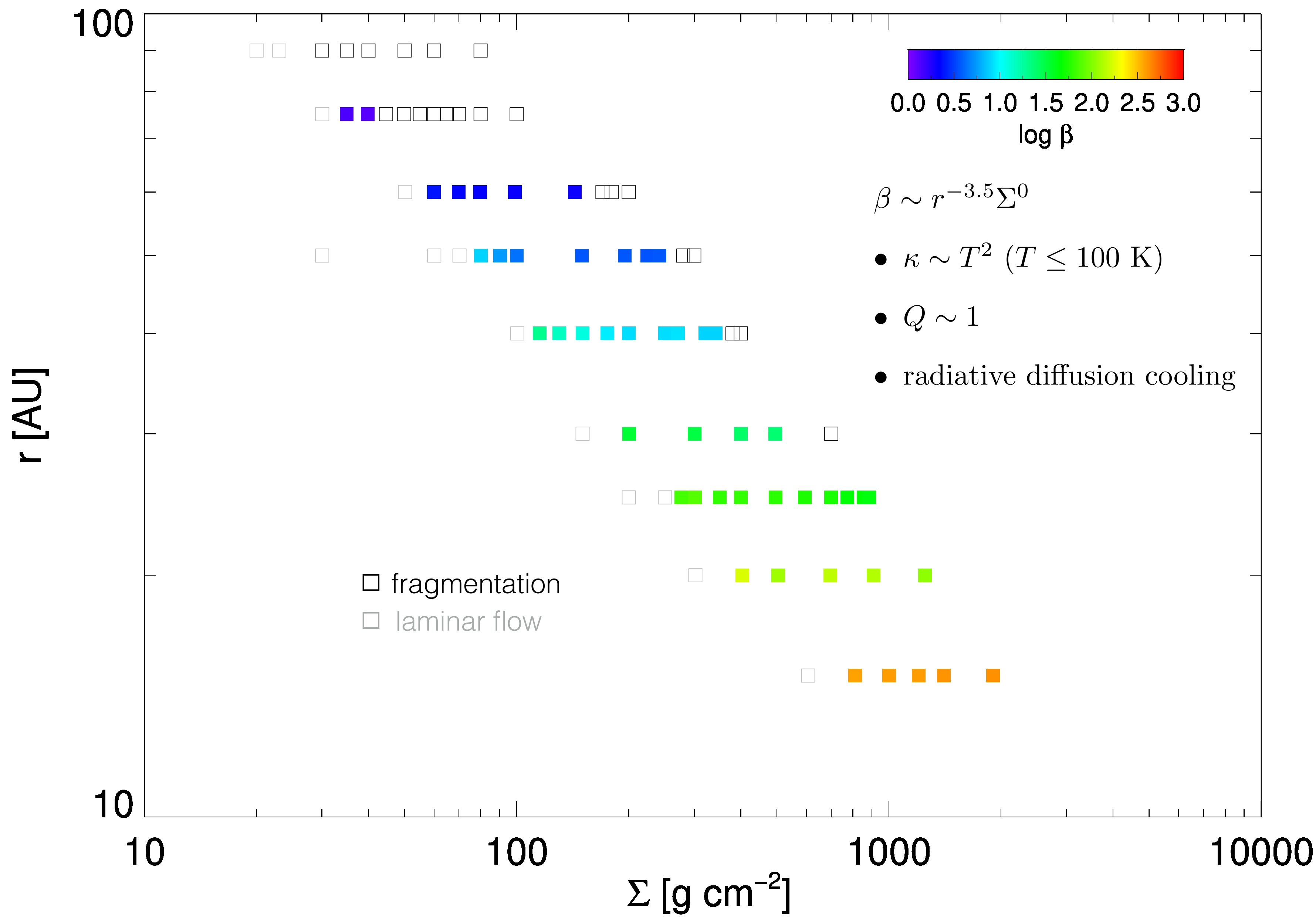
r = 50 AU, Σ = 300 gcm^{-3} の場合：runaway collapse



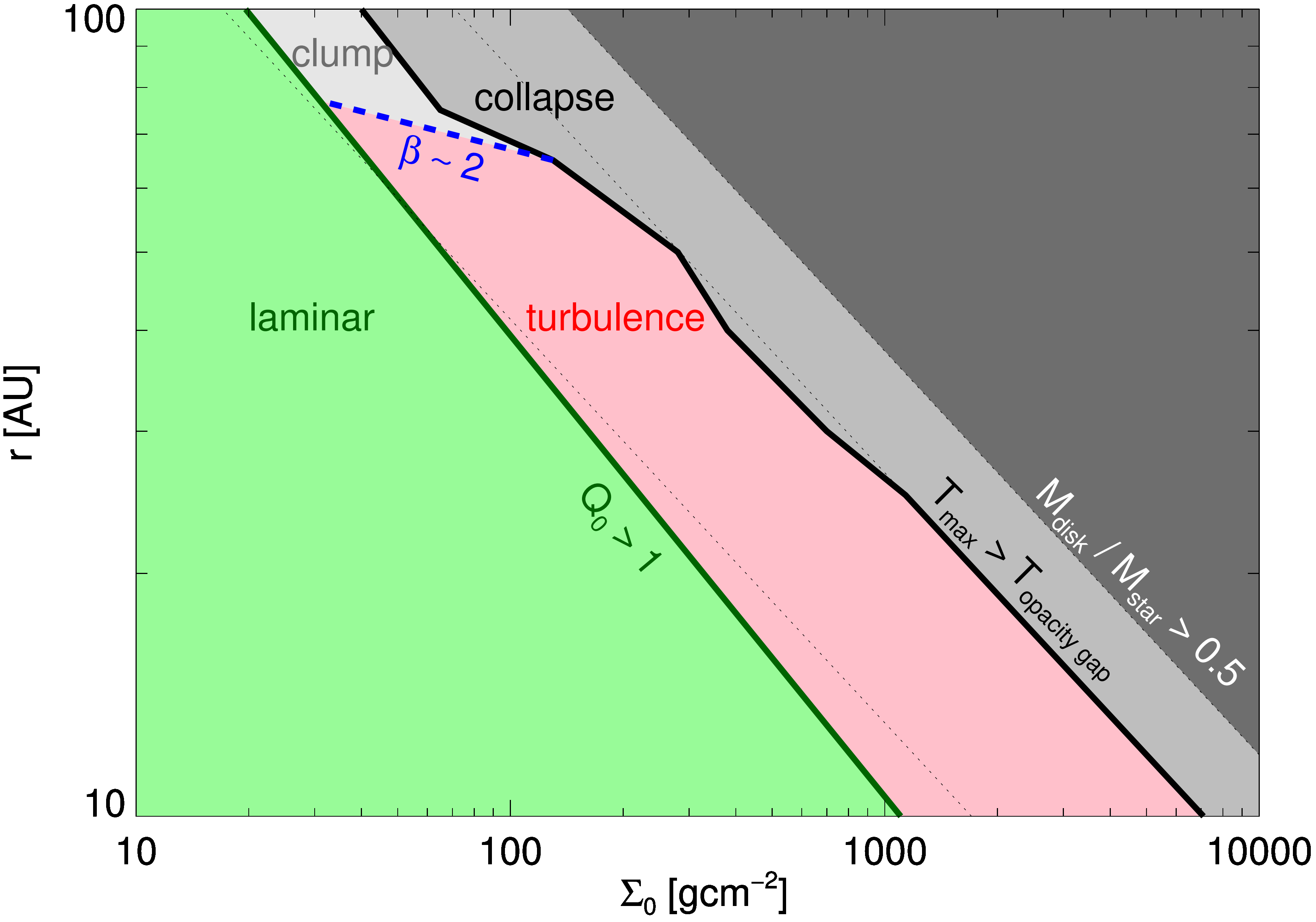
rが大きい側（r > 75AU）でclumpingが見られる



Effective cooling time β as a function of Σ and r



Nonlinear outcomes of GI in disks: phase diagram



まとめ

1. 原始惑星系円盤における重力不安定の非線形発展を、現実的な熱力学に基づいた 3 次元局所輻射流体力学計算を用いて調べた
2. 中心星からの距離 r と面密度 Σ への依存性は以下のようにまとめられる
   (a) （irradiation の平衡温度で定義した）Toomre $Q > 1$ の場合に重力不安定の非線形発展が見られる
   (b) effective $\beta \leq 2$ 程度となる半径 r が大きい側（$r \geq 75$AU）で、clumping が見られる
   (c) 面密度 Σ が十分大きい側では $T_{\mathrm{max}} > T_{\mathrm{opacity\ gap}}$ となり、runaway collapse が見られる
   (d) それ以外では、重力乱流状態が維持される