

永年重力不安定性の非線形解析

冨永 遼佑 (名古屋大、M2)

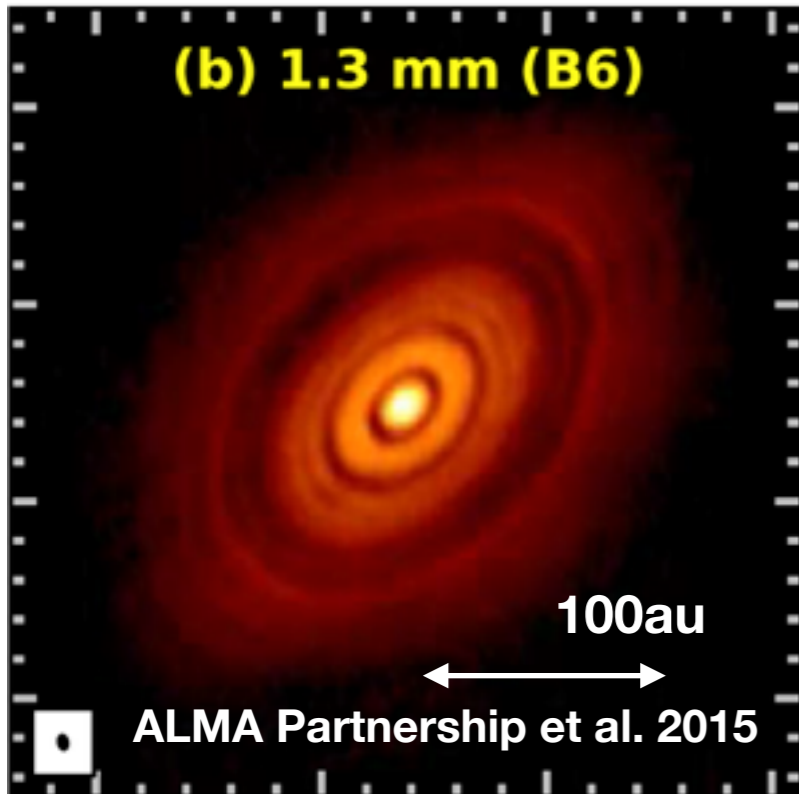
共同研究者:

犬塚修一郎、高橋実道

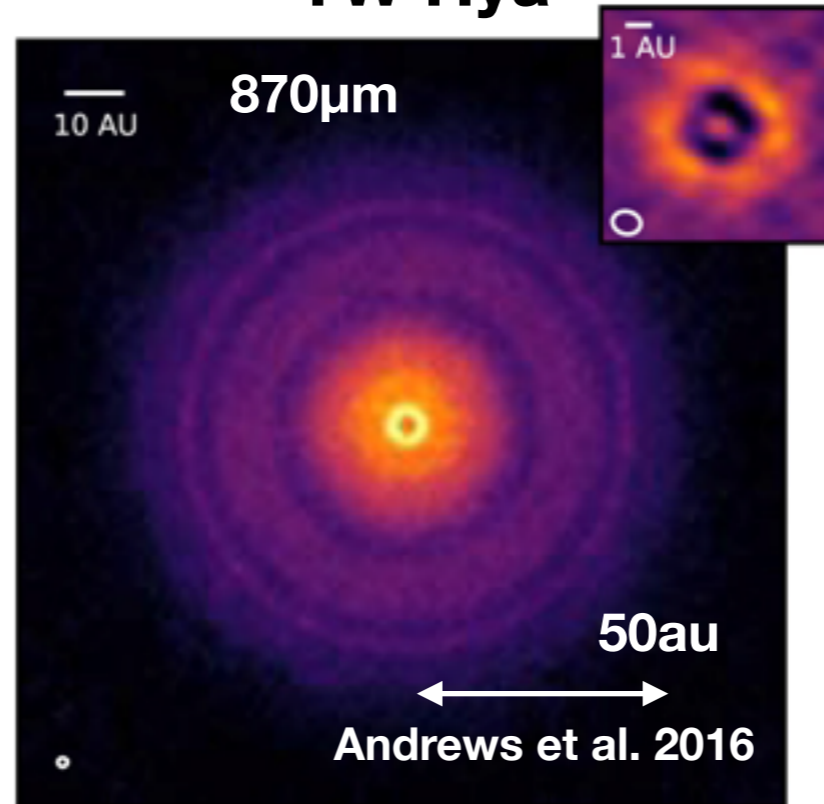
原始惑星系円盤における多重リング構造

ALMA望遠鏡による円盤観測

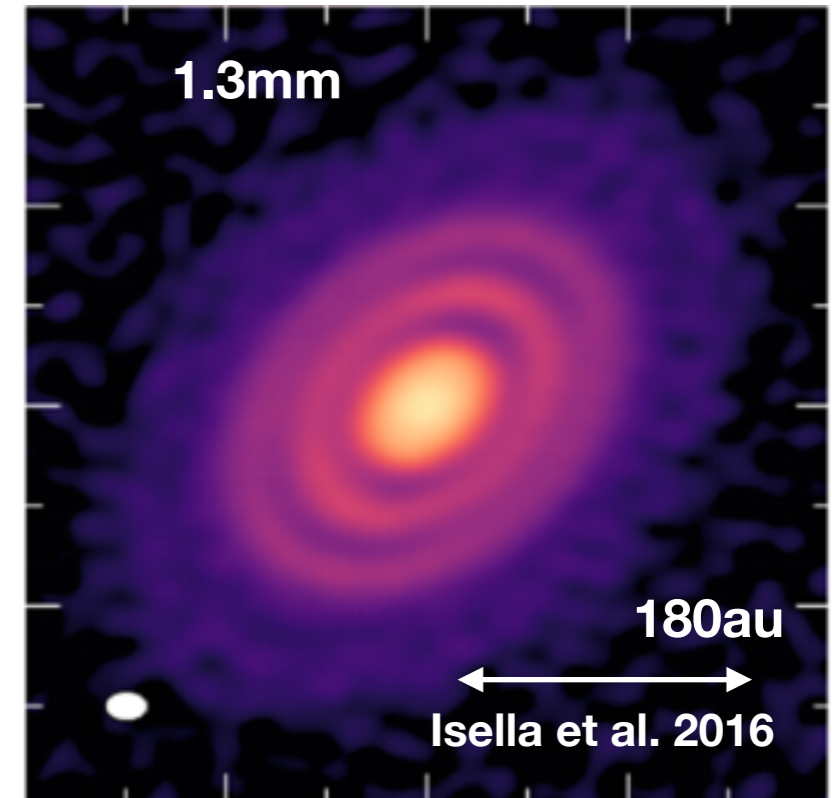
HL Tau



TW Hya



HD 163296



原始惑星系円盤内の多重リング構造

<—> 微惑星形成 or 惑星の存在を示唆

リング形成機構の解明は惑星形成理論の解明のために重要

永年重力不安定性 (Secular GI)

Takahashi & Inutsuka (2014)

自己重力安定な円盤

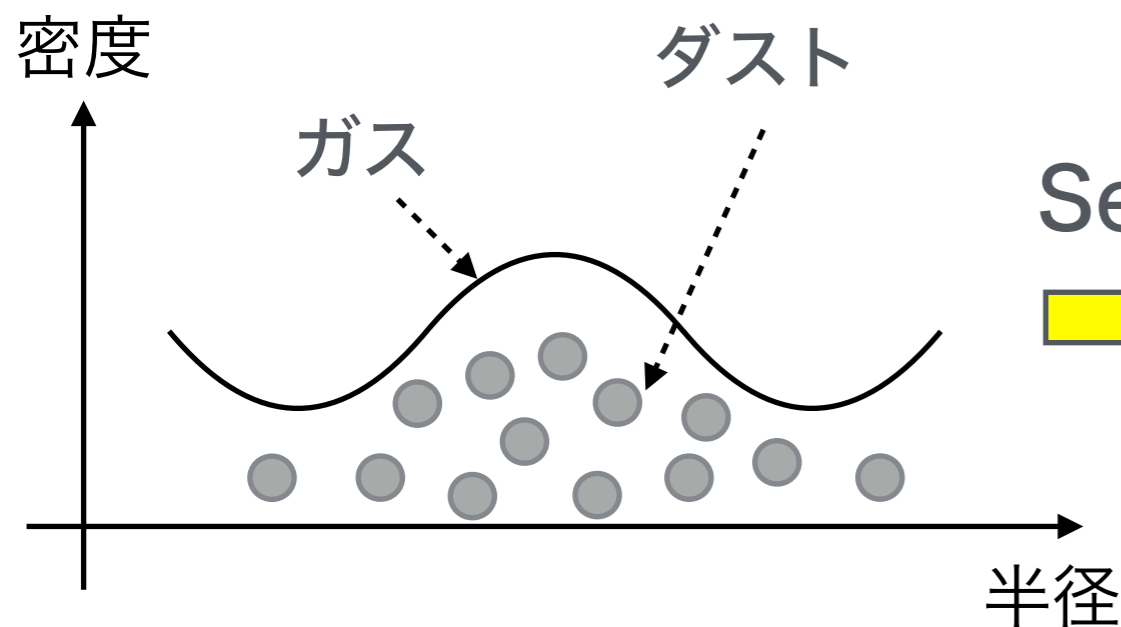
ガス ←----- 摩擦 -----> ダスト

局所線形解析

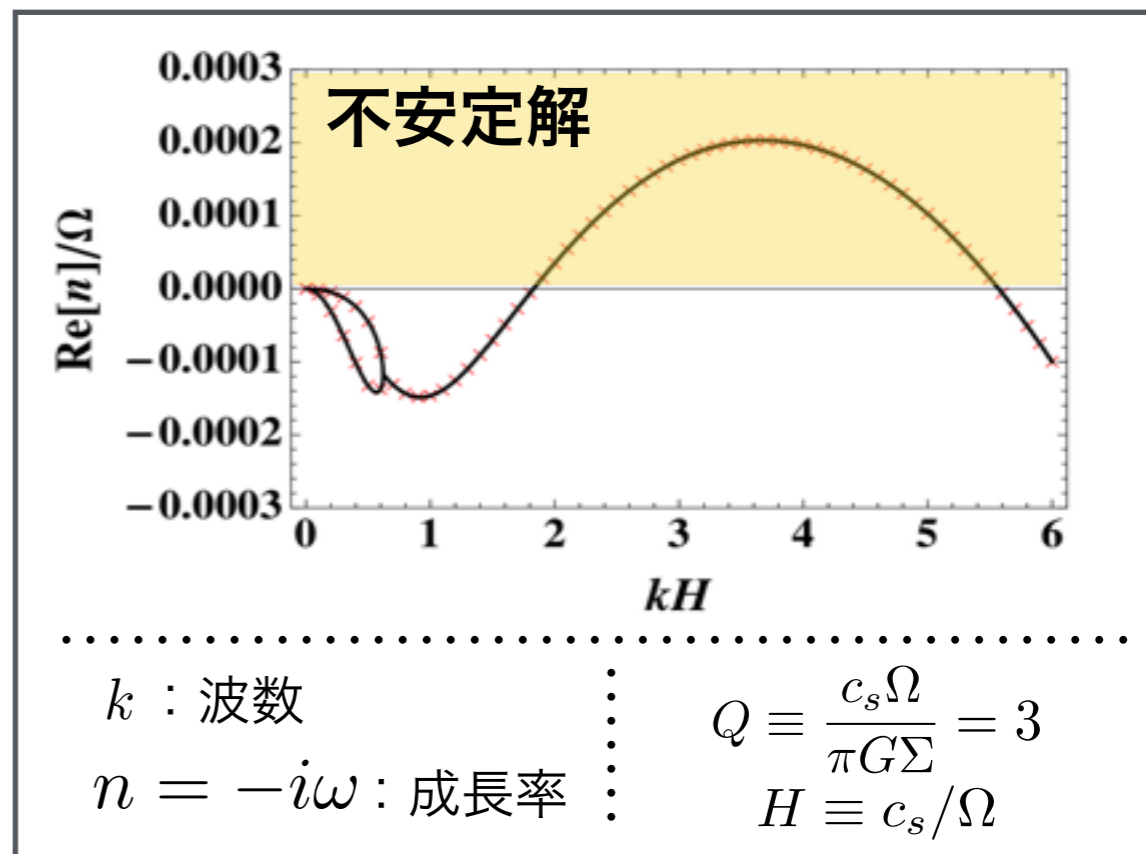
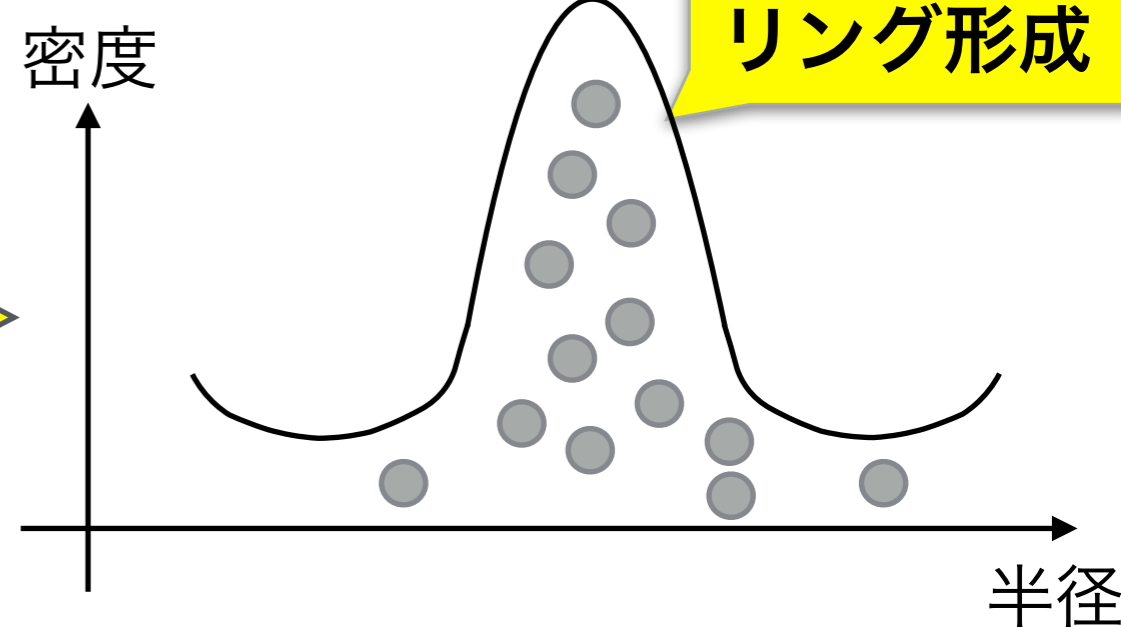
□ 成長時間：円盤の回転周期の $10^2 \sim 3$ 倍

□ 最大成長波長：~13 au @ $r=100$ au

→ 多重リング形成



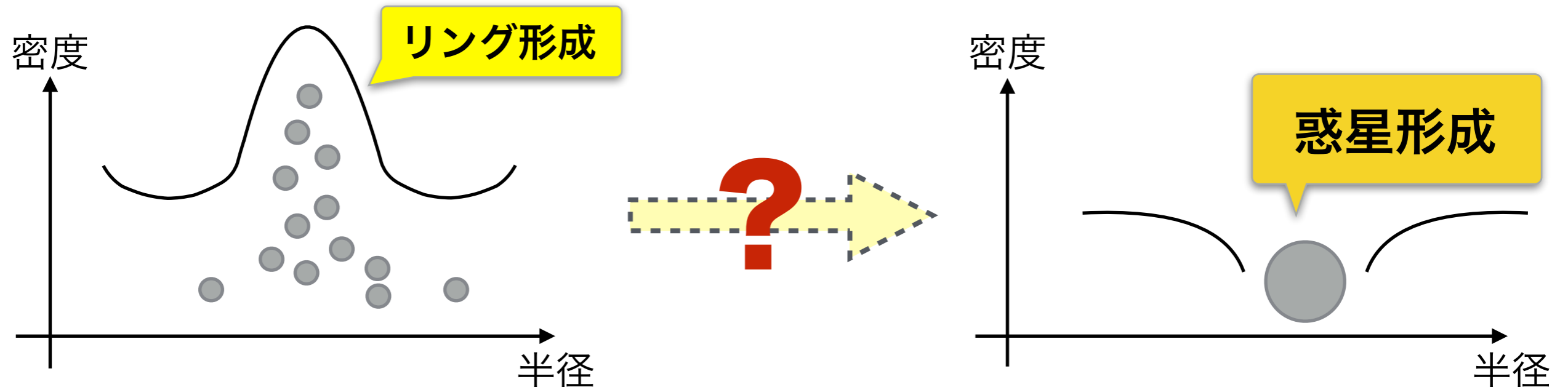
Secular GI



永年重力不安定性 (Secular GI)

Takahashi & Inutsuka (2016)

- 線形解析の結果, Secular GIによるリング形成がHL Tauで起きうる
- リング形成から起こる惑星形成を示唆
- より詳細な解析には数値計算が必要



本研究の目的

数値計算によってSecular GIの
非線形成長とリング形成機構を解明する

数値計算法

Secular GIの数値計算の困難

- 成長時間が円盤の回転周期よりかなり長い
- 摩擦 = 散逸 によって成長



数値誤差の蓄積によってSecular GIがかき消される

本研究

長時間流体計算法

✓ Lagrange mesh法

空間差分による数値散逸を回避

✓ Symplectic法

時間積分による数値散逸を回避

散逸系への応用

- ✓ 区分厳密解法を用いた摩擦の計算

Basic equations

Gas

Σ_g, Σ_d : 面密度

\mathbf{u}, \mathbf{v} : 速度

t_{stop} : ダストのstopping time

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u}) = 0$$

$$\Sigma_g \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -c_s^2 \nabla \Sigma_g - \Sigma_g \nabla \left(\Phi - \frac{GM_*}{r} \right) + \frac{\Sigma_d (\mathbf{v} - \mathbf{u})}{t_{\text{stop}}}$$

Dust

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

$$\Sigma_d \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -c_d^2 \nabla \Sigma_d - \Sigma_d \nabla \left(\Phi - \frac{GM_*}{r} \right) + \frac{\Sigma_d (\mathbf{u} - \mathbf{v})}{t_{\text{stop}}}$$

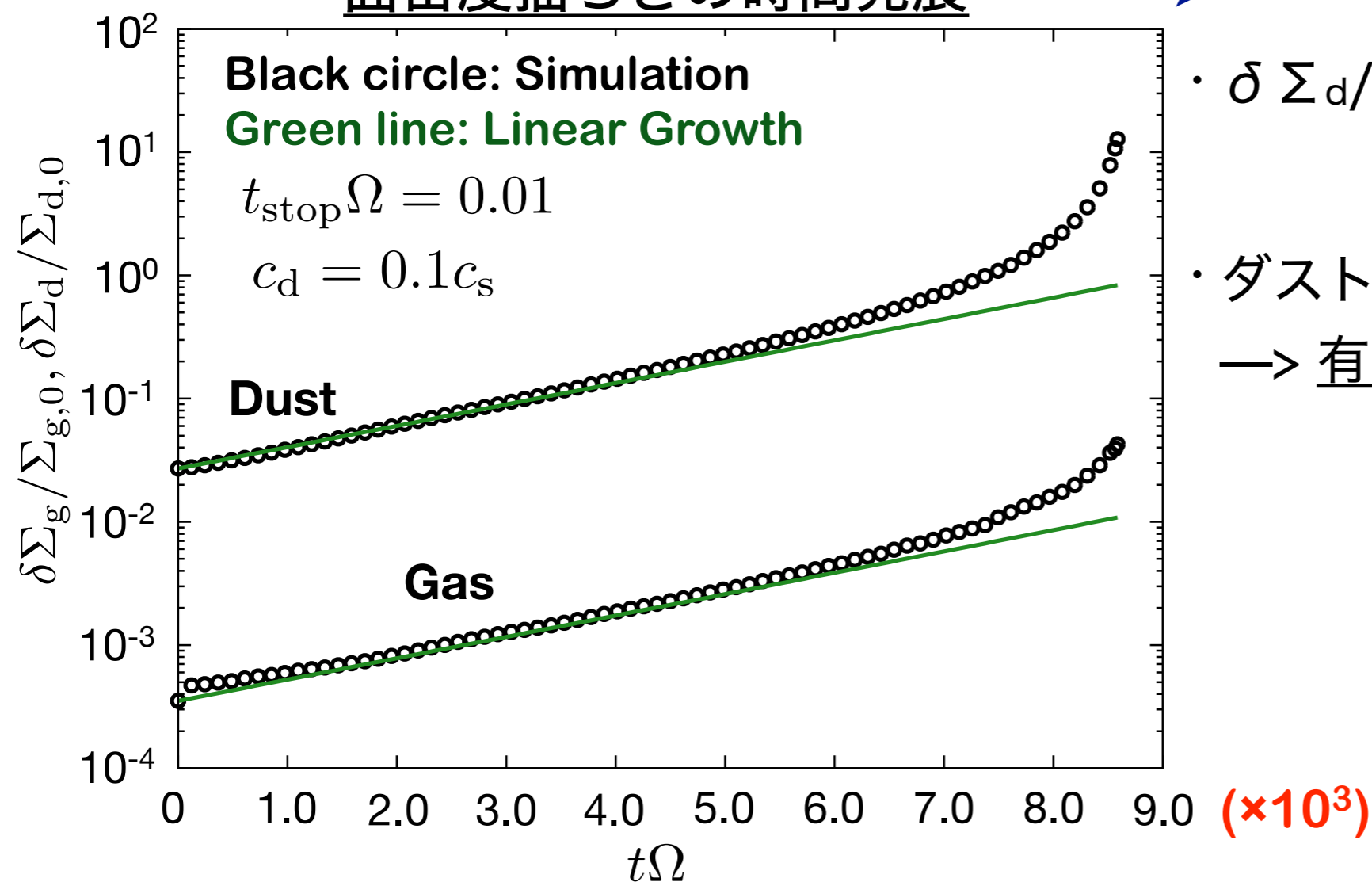
Poisson eq. $\nabla^2 \Phi = 4\pi G (\Sigma_g + \Sigma_d) \delta(z)$

永年重力不安定性の非線形計算

- 非線形計算(1): 線形解析との比較
 - 非線形計算(2): 大局的な進化
-

非線形計算と線形解析の比較

面密度揺らぎの時間発展



成長率 $\sim 10^{-4}\Omega$

- $\delta\Sigma_d/\Sigma_d = 0.3$ くらいから非線形成長
- ダストの面密度は発散する傾向
→ 有限の時間でダストリング崩壊

リングの崩壊時刻？

崩壊の速さ？

非線形計算と線形解析の比較

非線形成長が引き起こすリング崩壊

以下の関数を用いてダストの面密度進化をフィッティング:

$$f(\tilde{t}) = a(\tilde{t}_c - \tilde{t})^{-q}, \quad \tilde{t} \equiv tn_{\text{SGI}}$$

n_{SGI} : 成長率

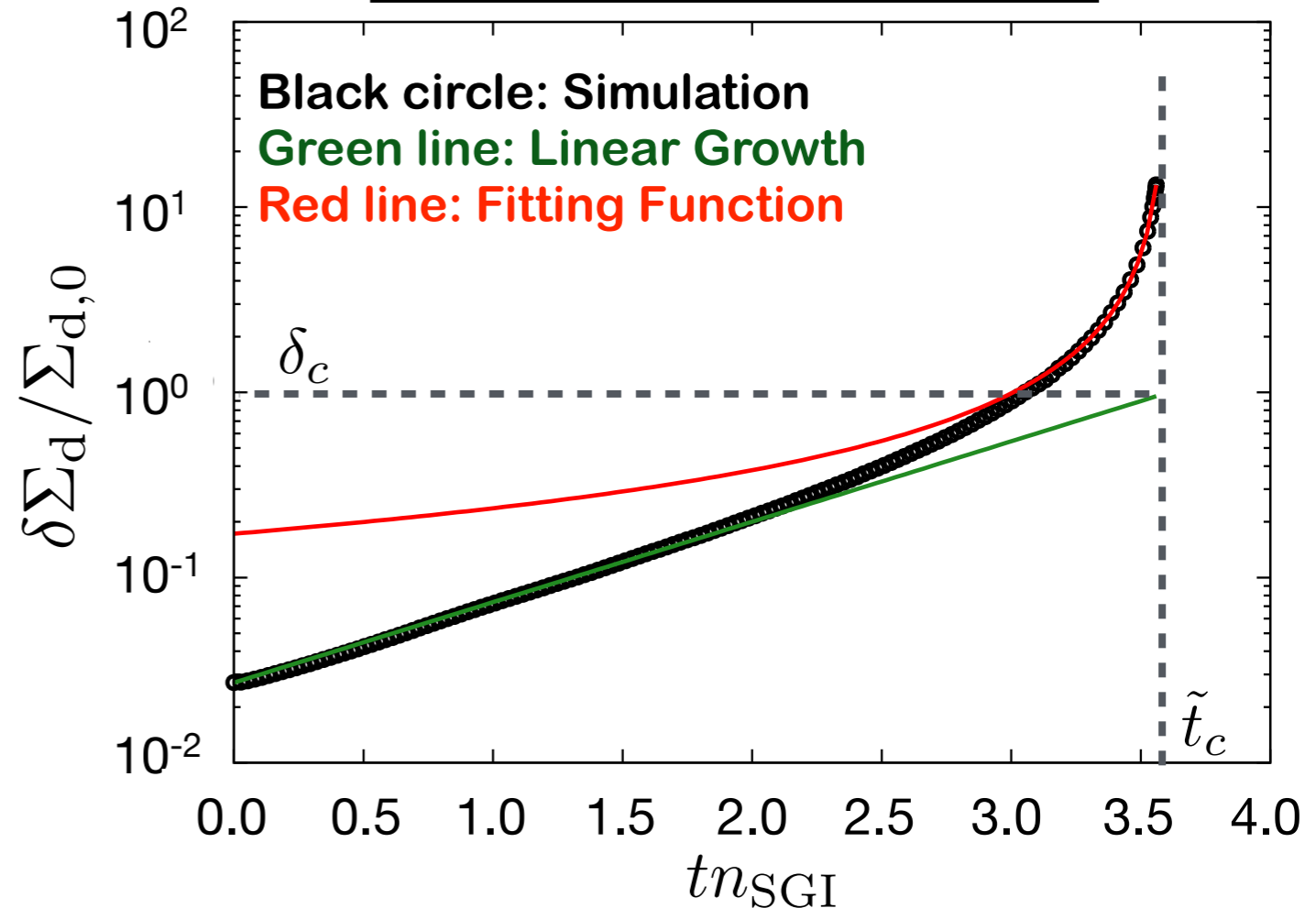
$\tilde{t}_c = t_c n_{\text{SGI}}$: 崩壊時刻

冪 q は崩壊の速さを表す

$t=t_c$ まで線形成長したと仮定し、
 δ_c を用いて“崩壊時刻”を定義する:

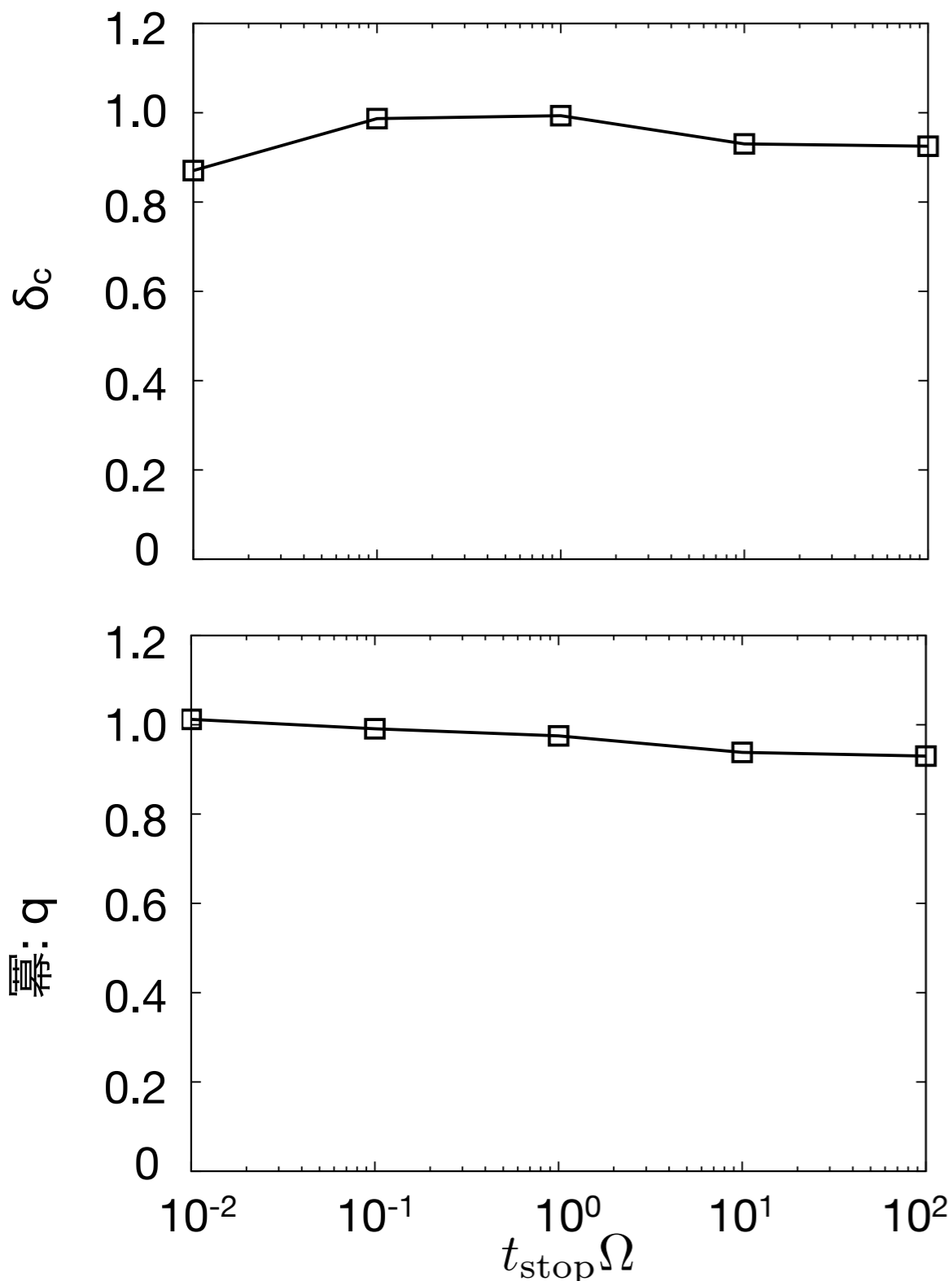
$$\delta_c \equiv \delta\Sigma_d(t = t_c) / \Sigma_{d,0}$$

ダストの面密度揺らぎの進化



非線形計算と線形解析の比較

非線形成長が引き起こすリング崩壊



$$f(\tilde{t}) = a(\tilde{t}_c - \tilde{t})^{-q}$$

δ_c と q のstopping timeに対する依存性

→ ほとんどない

$$\delta_c \doteq 1, q \doteq 1$$

冪 q が1となった結果の解釈・理解

自由落下時間: $t_{\text{ff}} \sim 1/\sqrt{G\rho_d}$

ジーンズ長: $\lambda_J \sim c_d/\sqrt{G\rho_d}$

ダストの面密度:

$$\Sigma_d \sim \rho_d \lambda_J \sim c_d \sqrt{\rho_d/G}$$

$$\longrightarrow \Sigma_d \propto t_{\text{ff}}^{-1}$$

Note: 現実では円盤の厚みによって自己重力が弱められる → 非線形成長の飽和

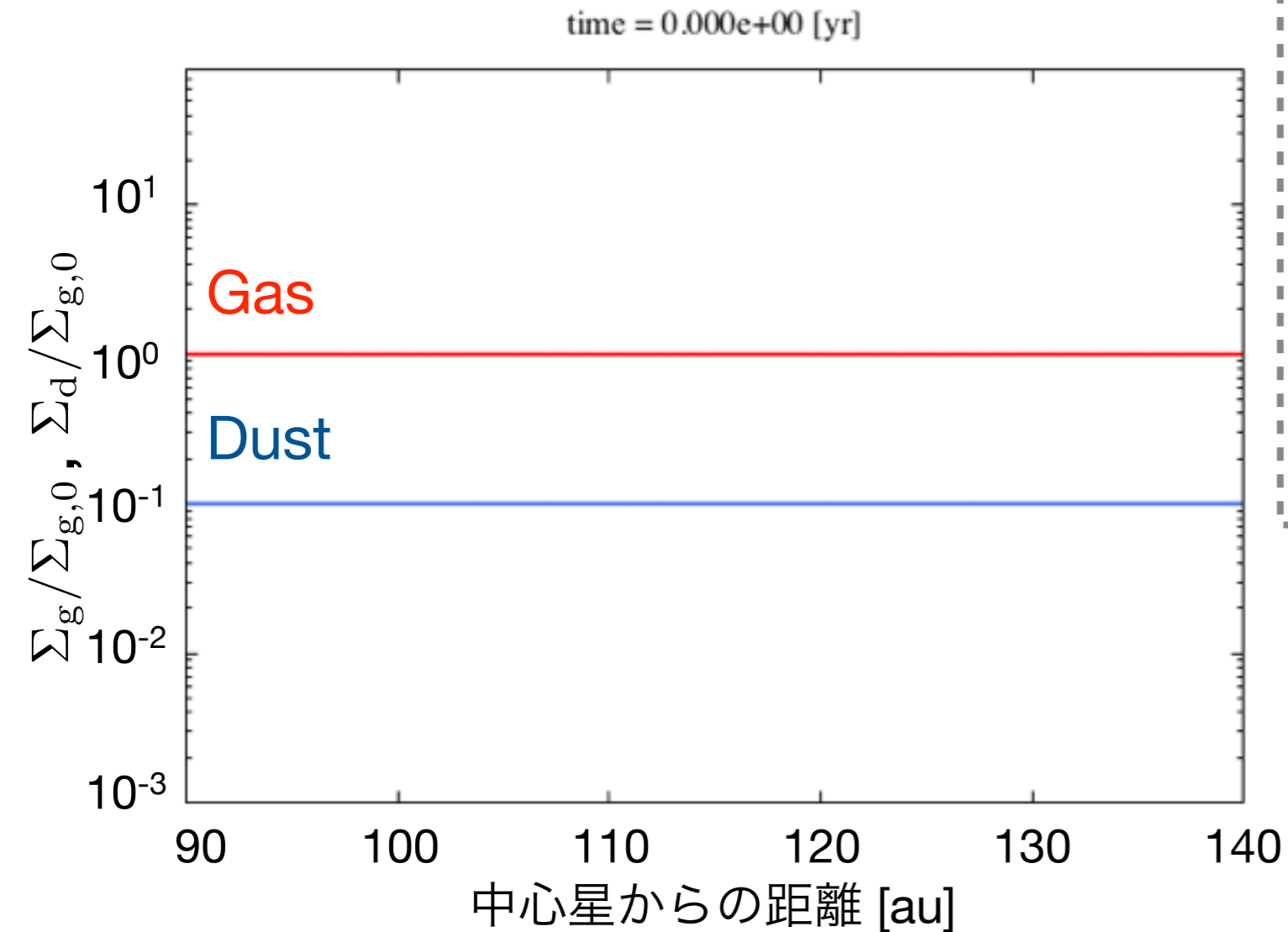
永年重力不安定性の非線形計算

- 非線形計算(1): 線形解析との比較
- 非線形計算(2): 大局的な進化

自己重力のソフトニングで成長が飽和した後に起こるダストリングの進化

永年重力不安定性の大局的な進化

リング形成 & リング落下



計算の設定

中心星質量: $M_* = 1M_\odot$

$\Sigma_{d,0}/\Sigma_{g,0} = 0.1, c_d/c_s = 0.1$

自己重力安定な円盤

($Q=3$ @ $r = 100$ au)

ダストサイズ: 3mm

→ $t_{\text{stop}}\Omega \doteq 0.23$

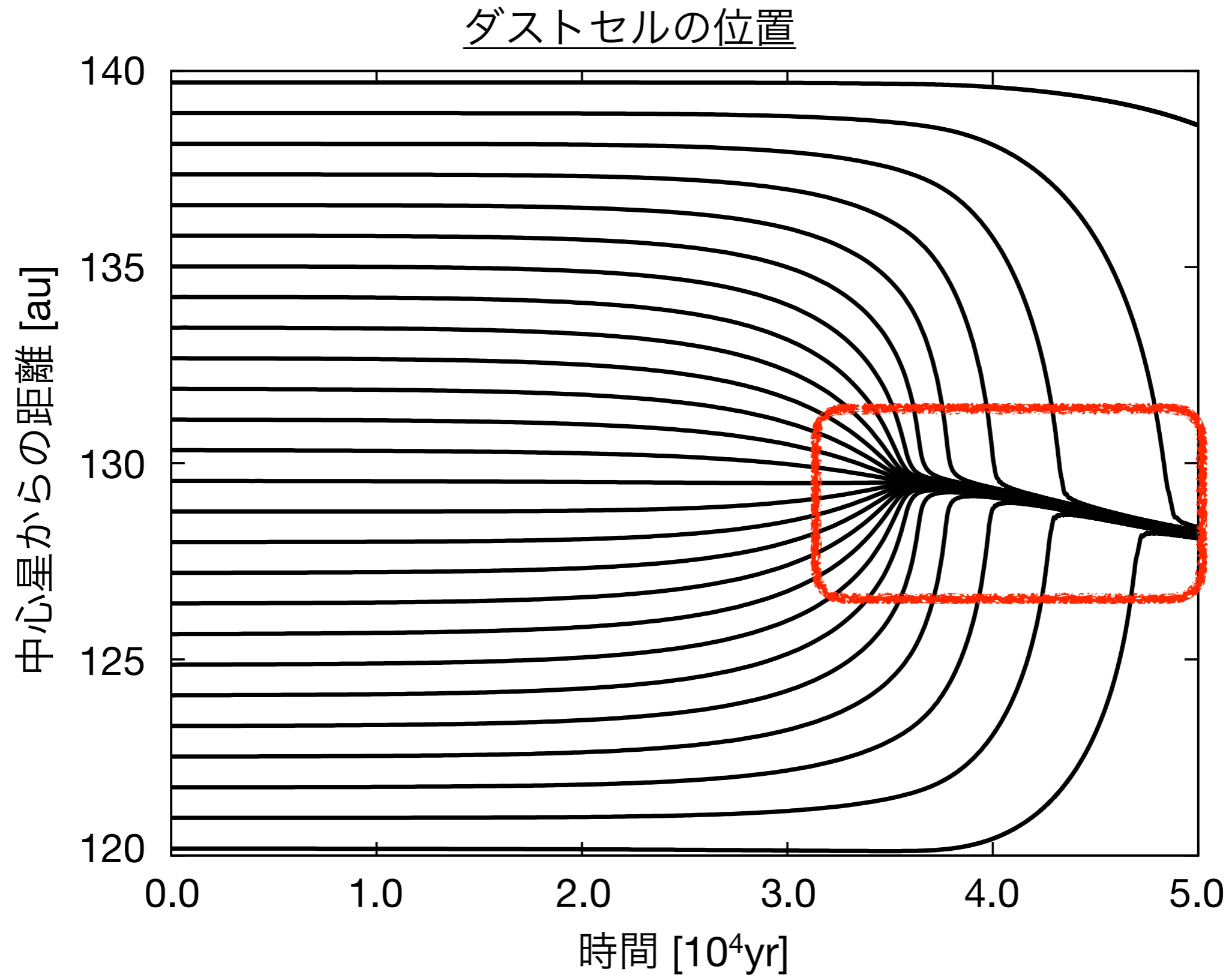
$\Sigma_d/\Sigma_{d,0} \sim 100$ まで成長

($\delta\Sigma_g/\Sigma_{g,0} \sim 0.1$)

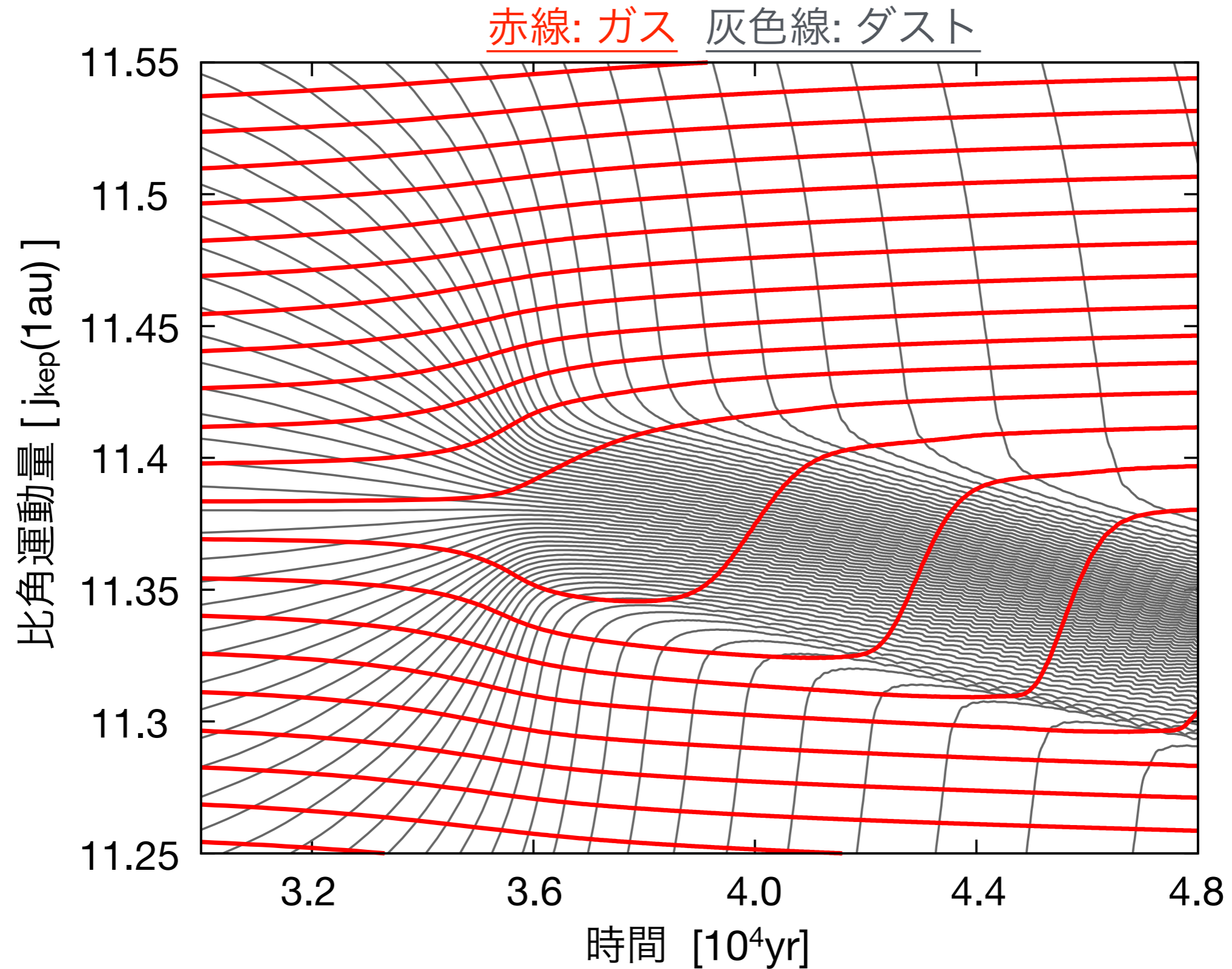
ダストガス比 ~ 10 の
ダストリングを形成

ダスト優勢なリングの形成 → 自己重力的分裂による微惑星形成

永年重力不安定性の非線形成長：リング落下

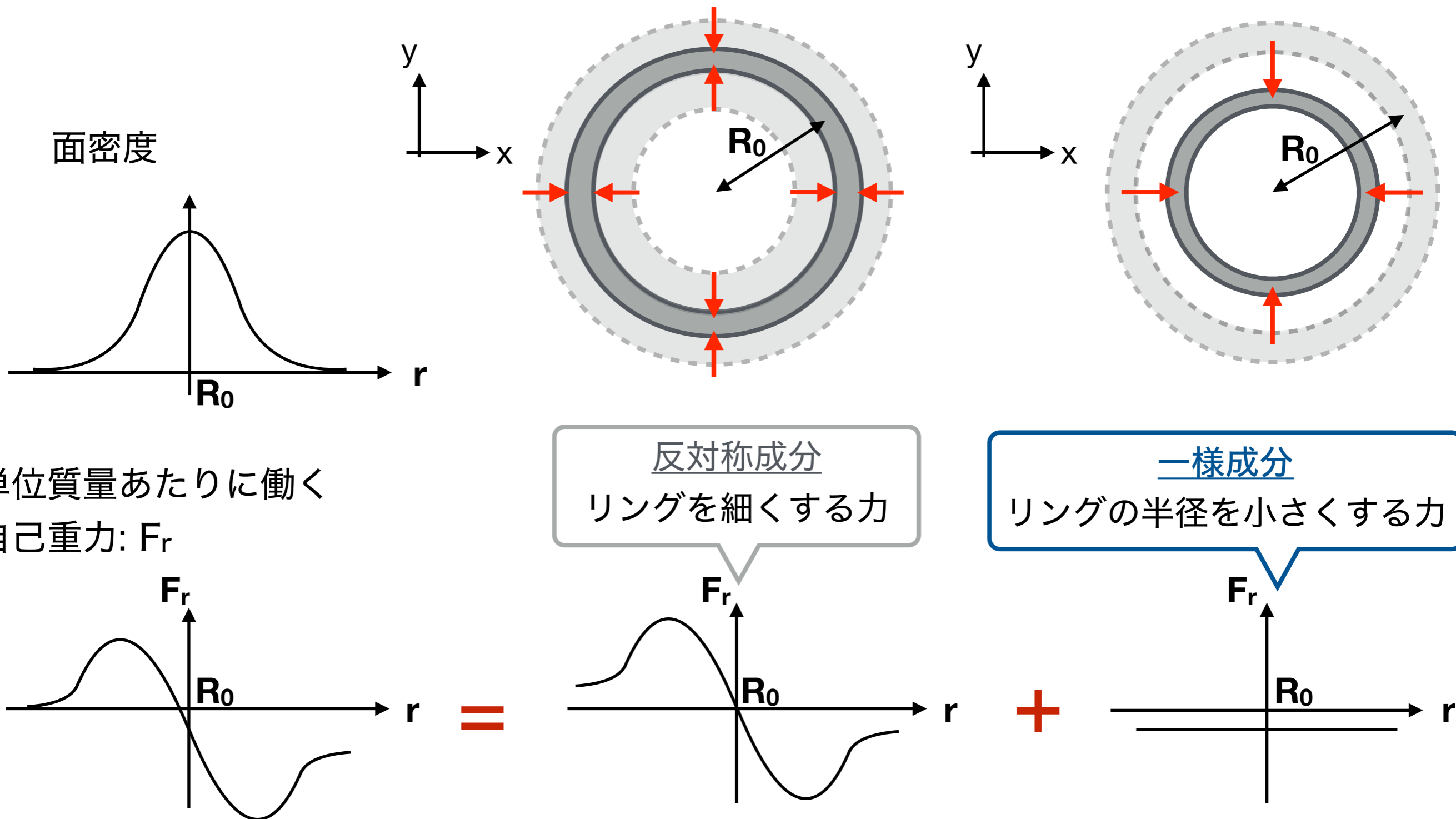


永年重力不安定性の非線形成長：リング落下



リング落下のメカニズム

リング自身の自己重力によって促進される落下



リング落下のメカニズム

仮定1: ガスの動径方向の速度は0

仮定2: ダストは終端速度

$$\frac{v_r}{t_{\text{stop}}} = 2\delta v_\theta \Omega_K \dots \dots \dots - \frac{c_d^2}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r} - \frac{\partial \Phi}{\partial r}$$

↓
コリオリカ

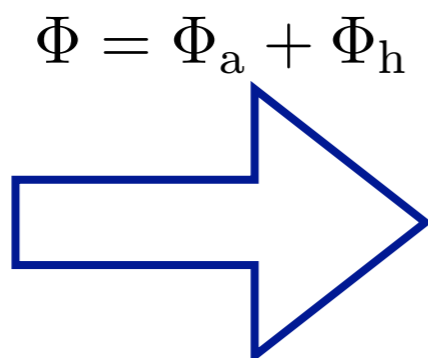
コリオリカは落下を少し減速するだけ → 落下は次の式で大雑把に理解出来る

$$\frac{v_r}{t_{\text{stop}}} \simeq - \frac{c_d^2}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r} - \frac{\partial \Phi}{\partial r}$$

非線形成長の飽和:

$$- \frac{c_d^2}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r} - \frac{\partial \Phi_a}{\partial r} = 0$$

リング重力の反対称成分

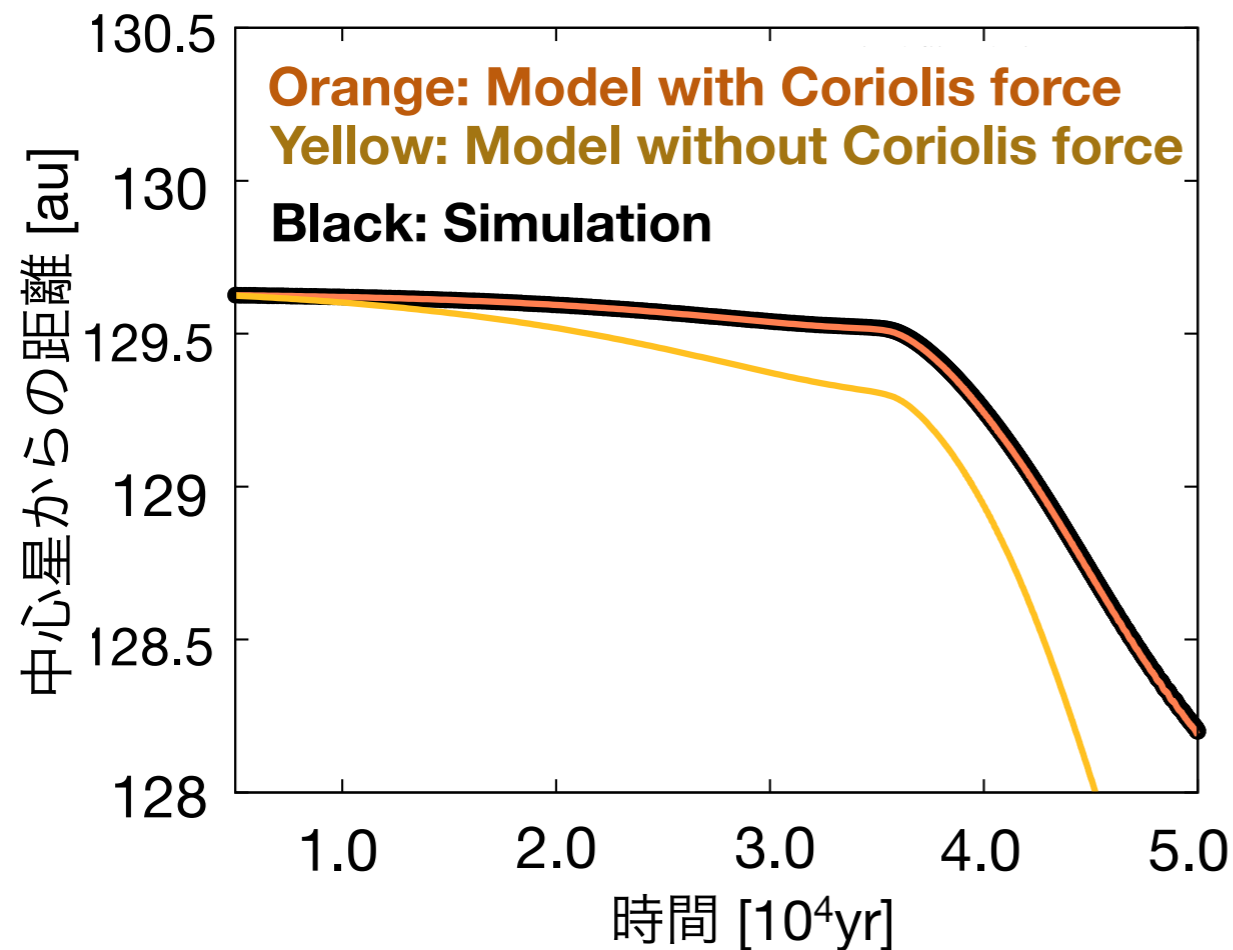


$$\frac{v_r}{t_{\text{stop}}} \simeq - \frac{\partial \Phi_h}{\partial r}$$

リング重力の一様成分

リング落下のメカニズム

リング自身の自己重力によって促進される落下



□ 半解析モデル

- ガスの動径方向の速度 = 0
- ダストの動径方向の速度 v_r : 終端速度
- ダストとガスの回転速度と Kepler速度の差 $\delta v_\phi, \delta u_\phi$ は微小

✓ リングの自己重力の一様成分 + ダストが受ける動径方向の摩擦 $\doteq 0$

$$v_r \simeq -t_{\text{stop}} \frac{\partial \Phi_h}{\partial r} \quad \left(-\frac{\partial \Phi_h}{\partial r} : \text{リングの自己重力の一様成分} \right)$$

リングの自己重力で円盤内側に引っ張られることで落下

ダストリング内での微惑星形成

(1) リングの落下速度はおおよそ $10^{-5} - 10^{-4}$ au/yr

(2) 非線形成長の結果ダストガス比が高い(~ 10)リングが形成された

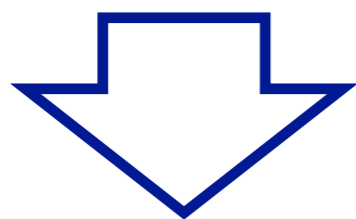
ダストガス比が高いとダストのドリフト速度も低下する

(Nakagawa et al. 1986)

最小質量円盤でダストリングが形成されると

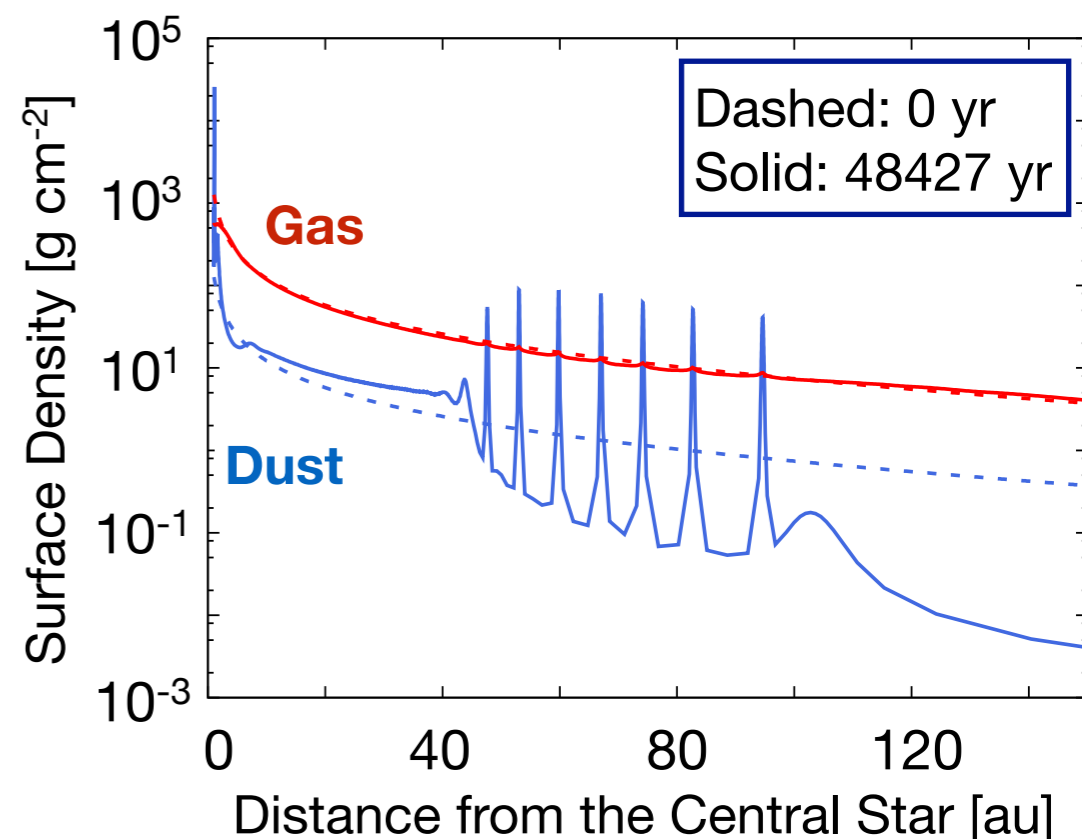
ドリフト速度 \sim リング落下速度

@ダストリング



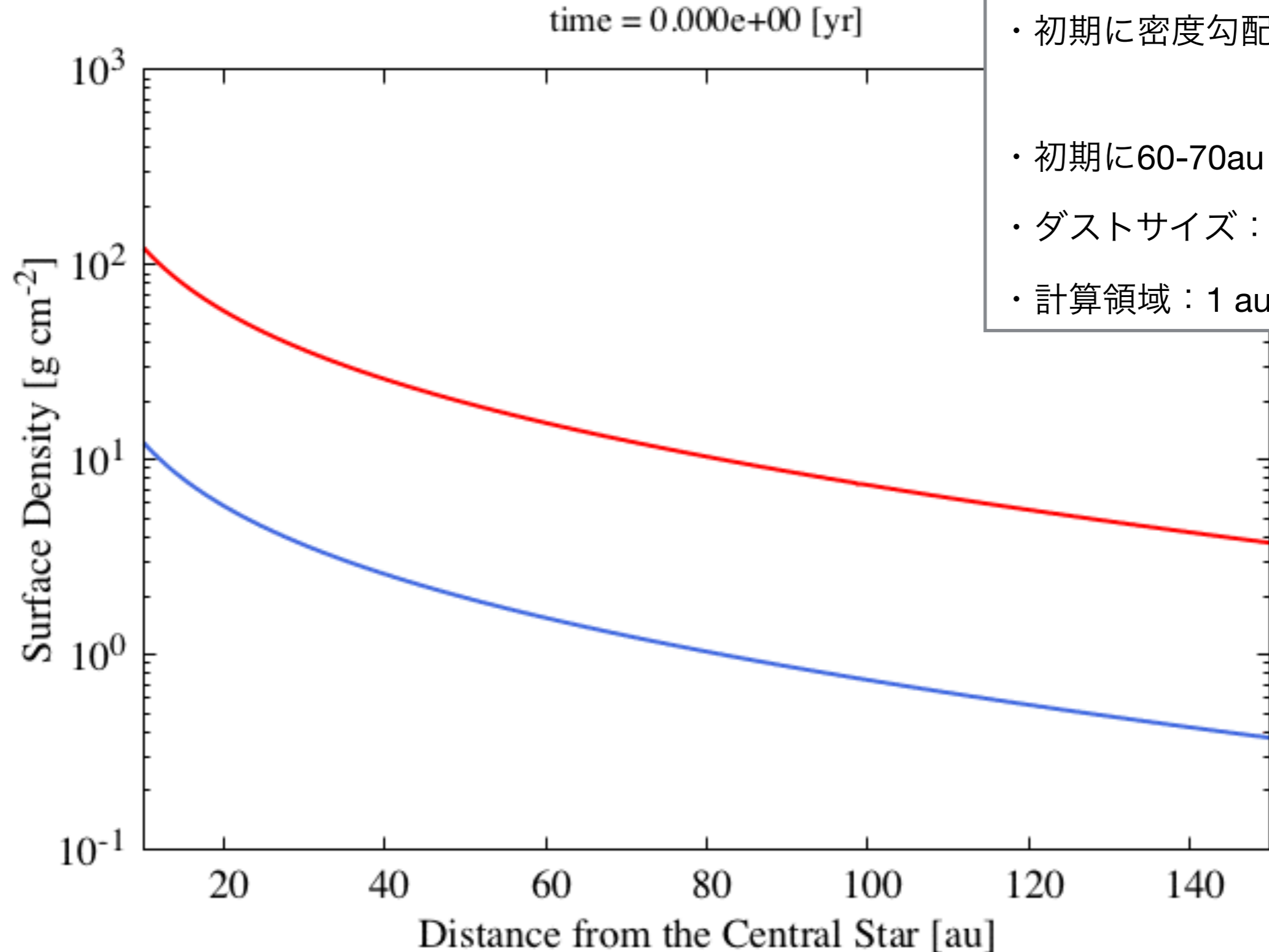
円盤内で永年重力不安定性が成長すれば

非線形成長から微惑星形成に発展する



Preliminary result

初期にダストがドリフトしている円盤でも永年重力不安定性が成長！



- 初期に密度勾配のある円盤： $\Sigma \propto r^{-1}$
- 初期に60-70auくらいで $Q=3$
- ダストサイズ：3mm
- 計算領域：1 au - 240 au

まとめと今後の課題

□ まとめ

永年重力不安定性の非線形計算

- ダストが先行して非線形成長: 密度は時間に反比例して進化 $\Sigma_d \propto t_{\text{ff}}^{-1}$
- ダスト優勢なリングの形成: ダストガス比が10程度まで成長
→ 自己重力的分裂による微惑星形成に繋がる
- リング自身の重力によってダストリングは落下 $v_r \simeq -t_{\text{stop}} \frac{\partial \Phi_h}{\partial r}$
リング落下速度 (~ ドリフト速度@ダストリング)は十分遅い
→ ダストの中心星への落下を回避して微惑星形成に繋がる可能性あり

□ 今後の課題

- 初期に大局的な圧力勾配のある円盤での非線形成長
- ガス乱流によるダストの拡散
- ダストのサイズ進化、分布

Ongoing !