

# ダスト落下を考慮した原始惑星系円盤の 固体面密度分布の進化

福井 隆, 田中 秀和, 倉本 圭

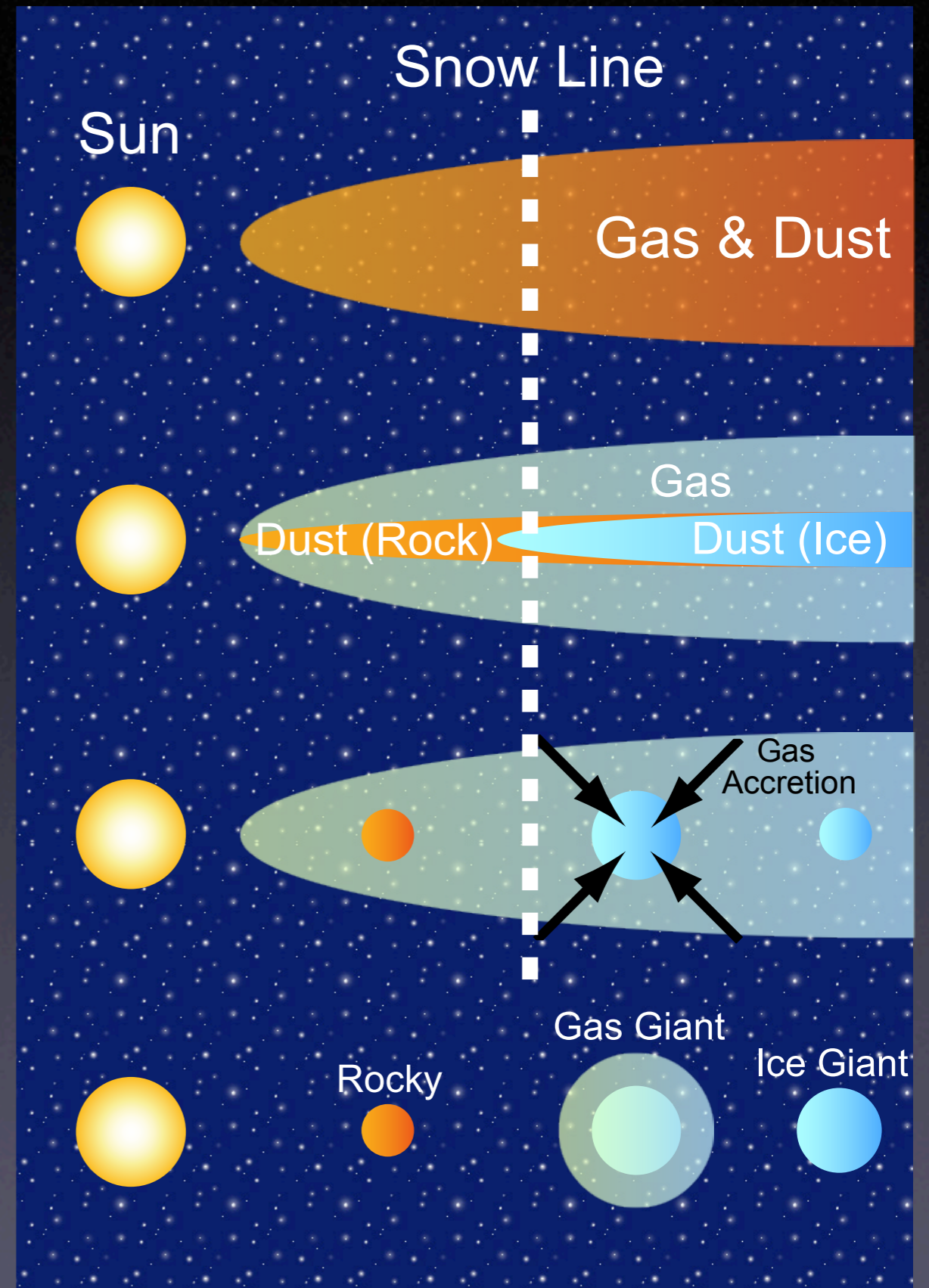
北海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻



# 円盤内側領域 (< 50 AU) の固体面密度分布

- 惑星形成の初期条件として, 最も基本的な情報
- 古典的アプローチ: 復元モデル (e.g., Hayashi et al. 1981)
  - 現在の太陽系惑星の質量・軌道の分布から再現
  - 必ずしも初期条件に対応せず
    - あくまで “最小質量”
    - 動径移動が無いことを仮定
- 観測的制約
  - 分解能等の問題で現状では困難

より外側の領域の観測結果及び  
ダスト輸送理論による推定が必要

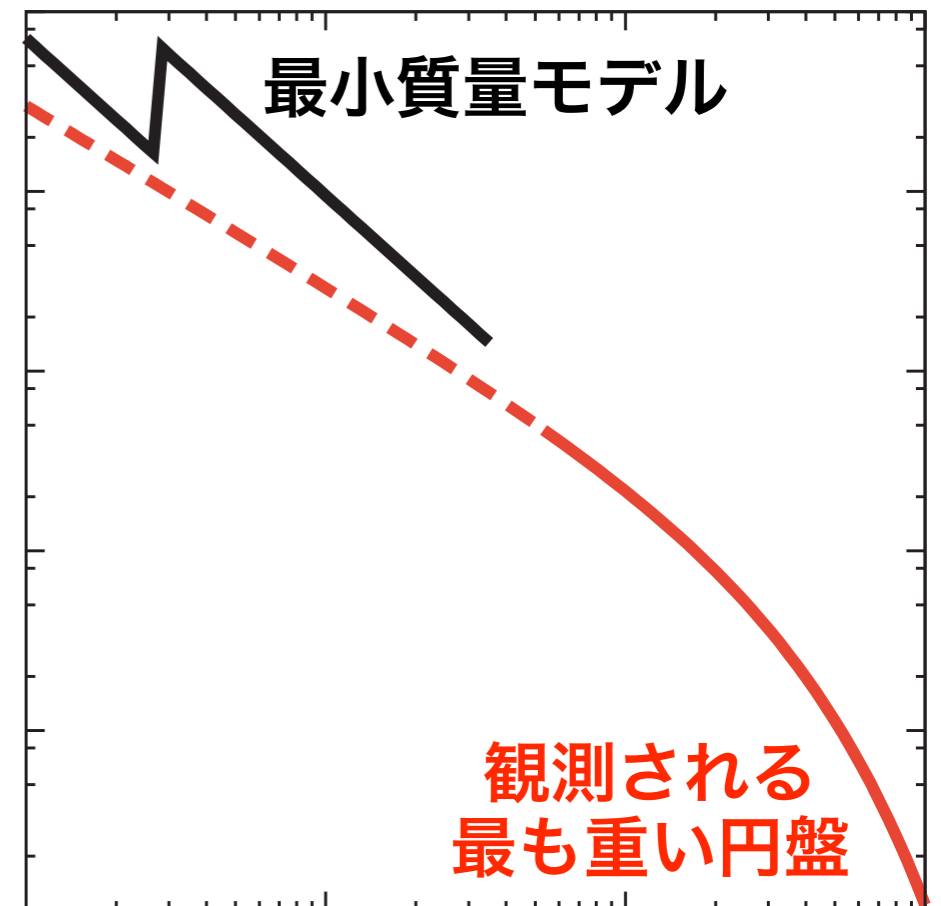




# 円盤外縁部の観測結果と標準的解釈

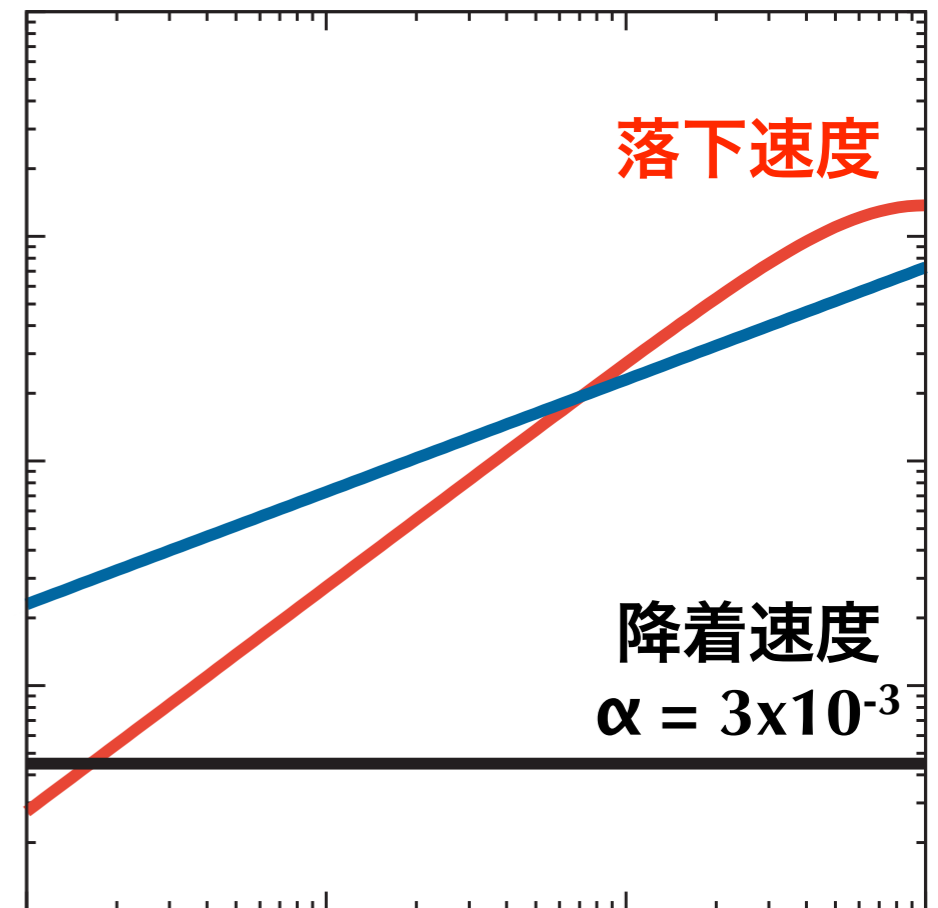
- CTTS の円盤外縁部の観測結果 (Kitamura et al. 2002)
  - 固体面密度 @ 100 AU :  
 $10^{-2} \sim 1 \text{ kg m}^{-2}$
  - 半径 : 100 ~ 1000 AU
  - ベキ : 0 ~ -1
  - 質量 :  $10^{-3} \sim 10^{-1} M_{\text{solar}}$
- $\alpha$  一定の粘性降着円盤モデル
  - $T \propto r^{1/2}$  の場合, ガス面密度は  $r$  にほぼ反比例
  - ダストがガスとよく連動すれば観測結果を説明

惑星形成領域の固体面密度は  
最小質量モデルに比べ著しく小?



# 問題点と本研究の目的

- ミリ波帯の SED 観測  
(e.g., Andrews & Williams 2007)
- ダストは  $> \text{mm}$  サイズに成長
- ダストはガス抵抗により中心方向へ落下
  - 大きなダストほど速度大
  - 固体面密度はガスのそれとは異なる進化を遂げる
- 本研究では...
  - ダスト落下を考慮した固体面密度分布の時間進化



円盤外縁部の観測は再現可能？

惑星形成に必要な固体は存在可能？



# 基礎方程式

- ダスト, ガスの動径 1 次元輸送方程式

$$\frac{\partial \Sigma_d}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_d v_r r)}_{\text{ガス抵抗による落下}} + \underbrace{\frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_d \nu r^{1/2}) \right]}_{\text{粘性降着に伴う移流・拡散}} \quad \frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_g \nu r^{1/2}) \right]$$

ガス抵抗による落下      粘性降着に伴う移流・拡散

- 乱流粘性係数 ...  $\alpha$  モデル (Shakura & Sunyaev 1973)

- $\alpha$  一定を仮定

$$\nu = \alpha c_s^2 / \Omega_K$$

- 中心面温度 ... 熱源として粘性散逸, 中心星の照射を考慮

- ダストの吸収係数 : Miyake & Nakagawa (1993) に従う

- ダストの動径落下速度

- ストークス数 (ダストの停止時間とケプラー時間の比) で記述

$$v_r \sim \text{St}(D) \frac{c_s^2}{v_K}$$



# ダスト成長過程のモデル化

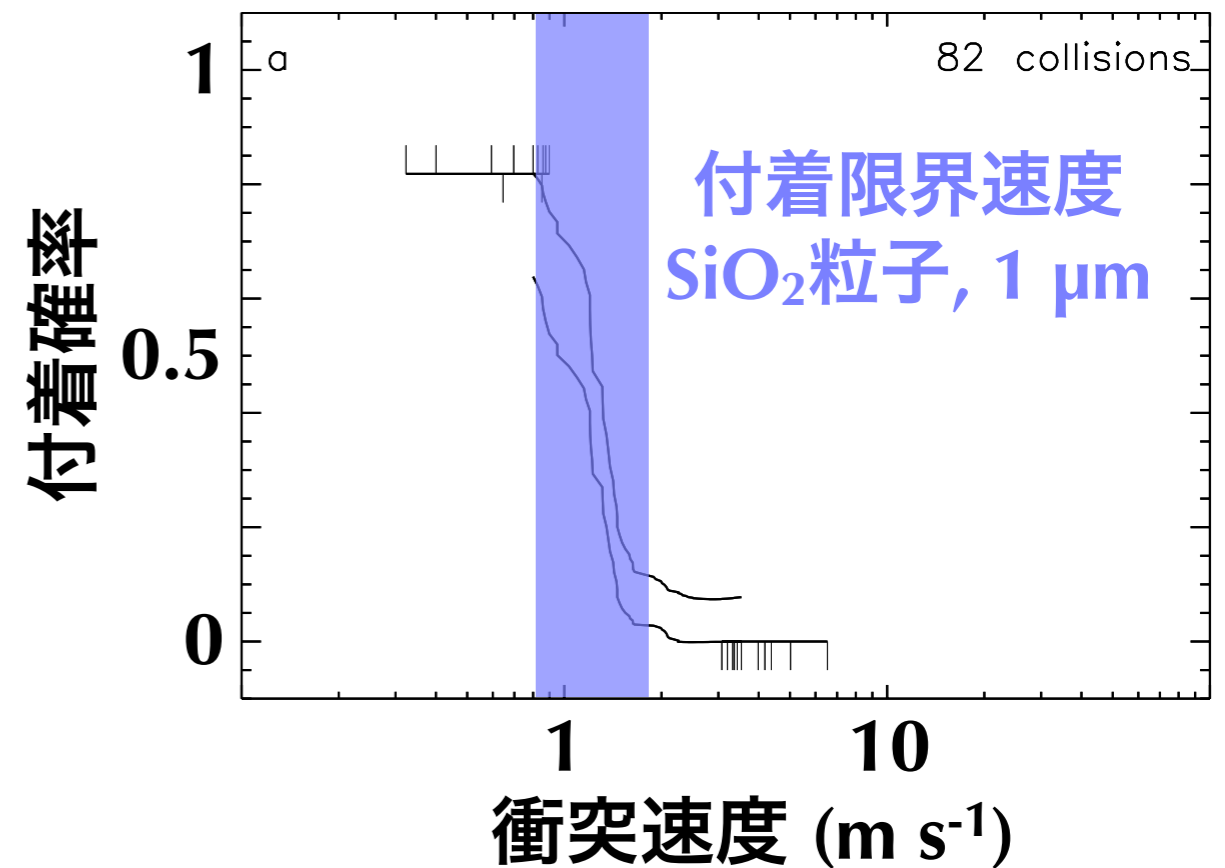
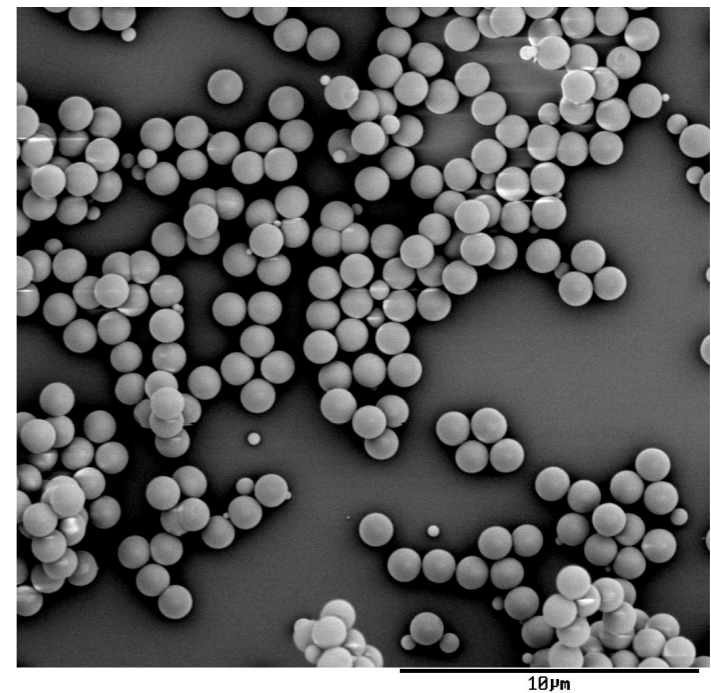
- ダストは主にガス乱流により励起される相互衝突により合体成長 (Cuzzi & Weidenschilling 1993)

$$v_{\text{col}} \sim \text{St}(D)^{1/2} \sqrt{\alpha} c_s$$

$$t_{\text{grow}} \sim \frac{\Sigma_g}{\Sigma_d} \frac{1}{\Omega_K}$$

- 仮定

- ダストは秩序的に成長
  - ダスト総質量のうち大部分が同程度のサイズ
- 付着限界速度と衝突速度の大小により合体・破壊が決定 (Blum & Wurm 2008)
  - 合体 ... 衝突速度 < 限界速度
  - 破壊 ... 衝突速度 > 限界速度



Poppe et al. (2000)

# 動径落下速度の計算

- ダストの成長時間, 落下時間

$$t_{\text{grow}} \sim \frac{\Sigma_g}{\Sigma_d} \frac{1}{\Omega_K} \quad t_{\text{drift}} \sim \frac{rv_K}{\text{St}(D)c_s^2}$$

- 内側領域

- ダストはほとんど落下せずに, 速やかに成長
- 破壊が始まるサイズで成長停止

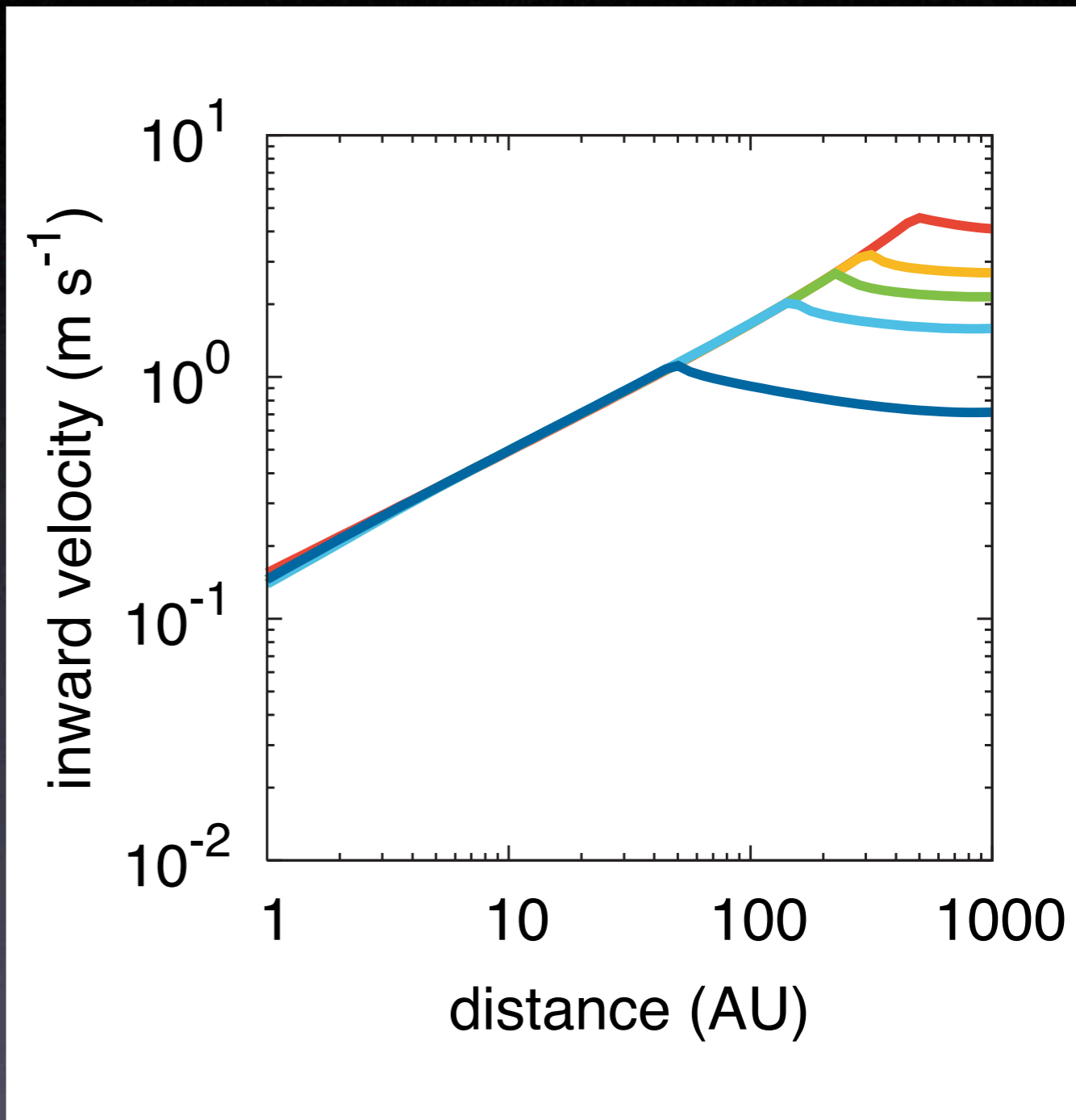
$$\text{St}(D)^{1/2} \sqrt{\alpha} c_s = v_{\text{crit}}$$

$$v_r \sim \frac{v_{\text{crit}}^2}{\alpha v_K} \propto r^{1/2}$$

- 外縁部, ダスト/ガス比小

- 破壊サイズに達する前に落下
- “成長時間 = 落下時間” で決定

$$v_r(D) \sim \frac{\Sigma_d}{\Sigma_g} v_K$$





# パラメータ

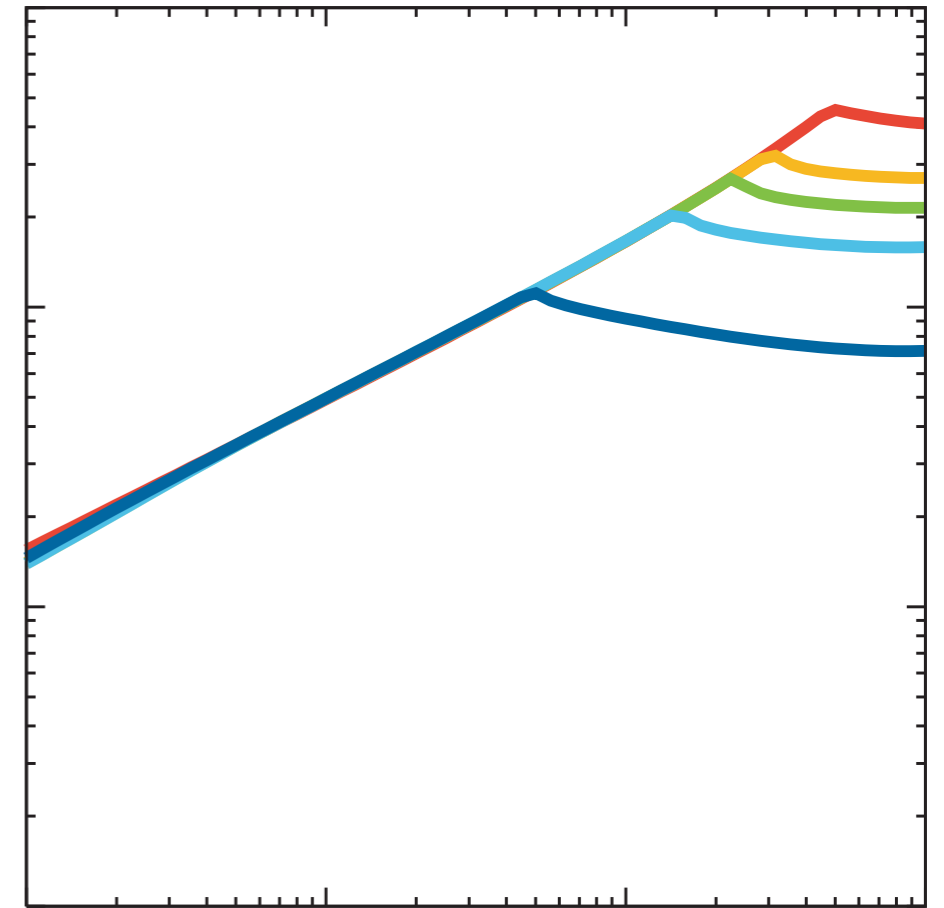
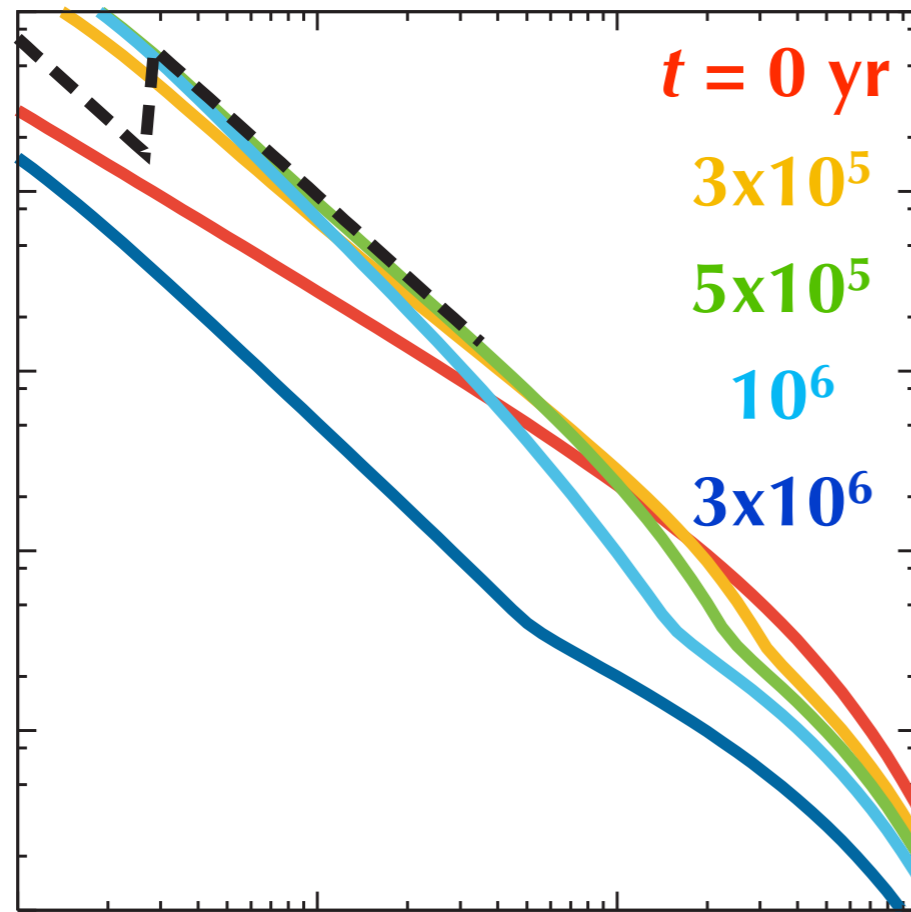
---

中心星	質量	$1 M_{\text{solar}}$
	半径	$2.5 R_{\text{solar}}$
	表面温度	$4000 \text{ K}$
円盤	初期質量	$0.1 M_{\text{solar}}$
	初期半径	$500 \text{ AU}$
	初期ダスト/ガス比	$0.01$
	初期ベキ指数	$-1.0$
	$\alpha$	$3 \times 10^{-3}$
ダスト	バルク密度	$0.1 \text{ g cm}^{-3}$
	付着限界速度	$3 \text{ m s}^{-1}$

---



# 結果：固体面密度分布の進化

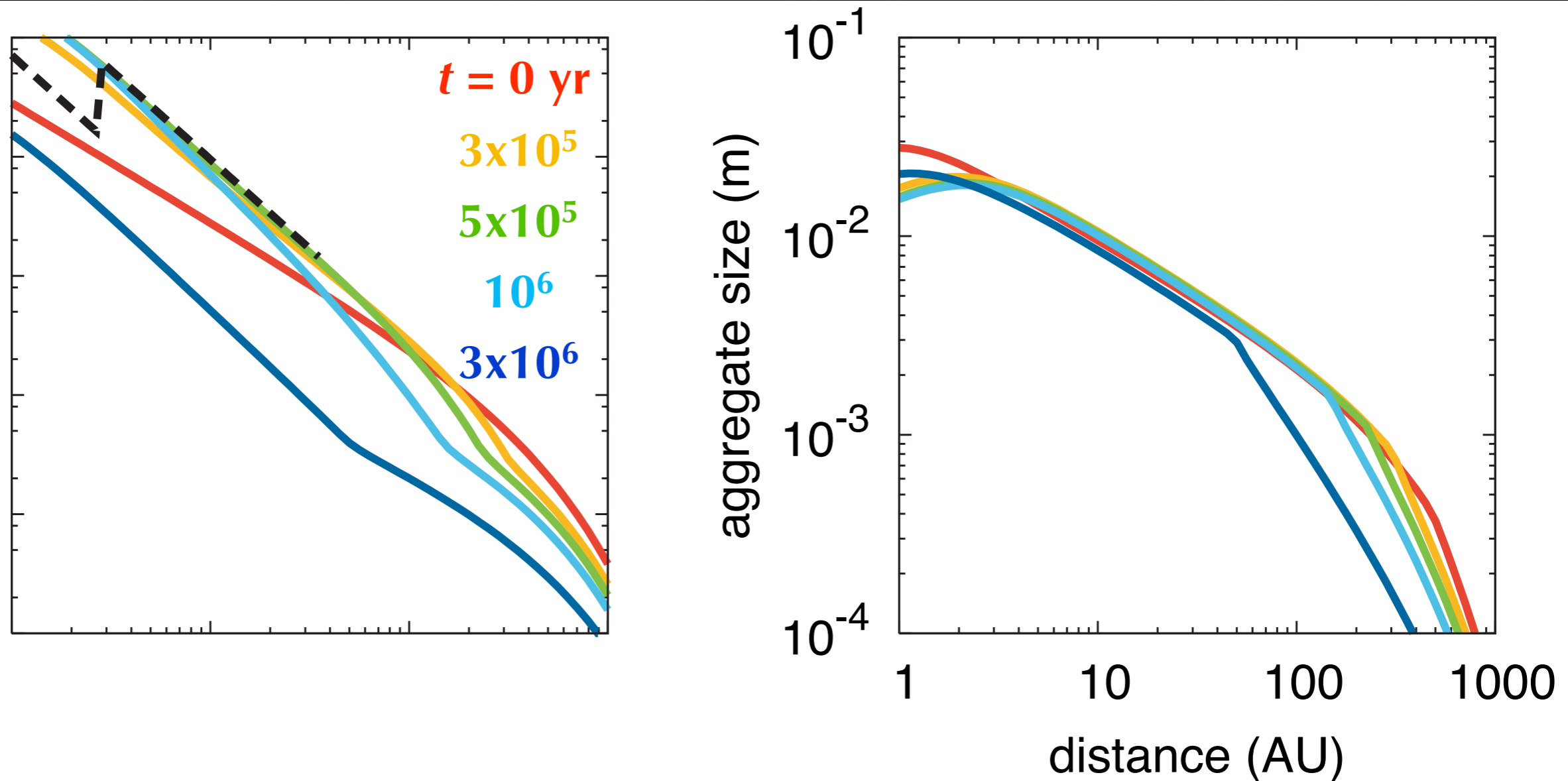


- 固体面密度分布 ... 外縁部は  $r^{-3/4}$ , 内側領域は  $r^{-3/2}$  にそれぞれ比例

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_d v_r r) = 0$$

- 外縁部の観測と矛盾せず, 惑星形成に必要な量の固体が存在可能

# 結果：固体面密度分布の進化

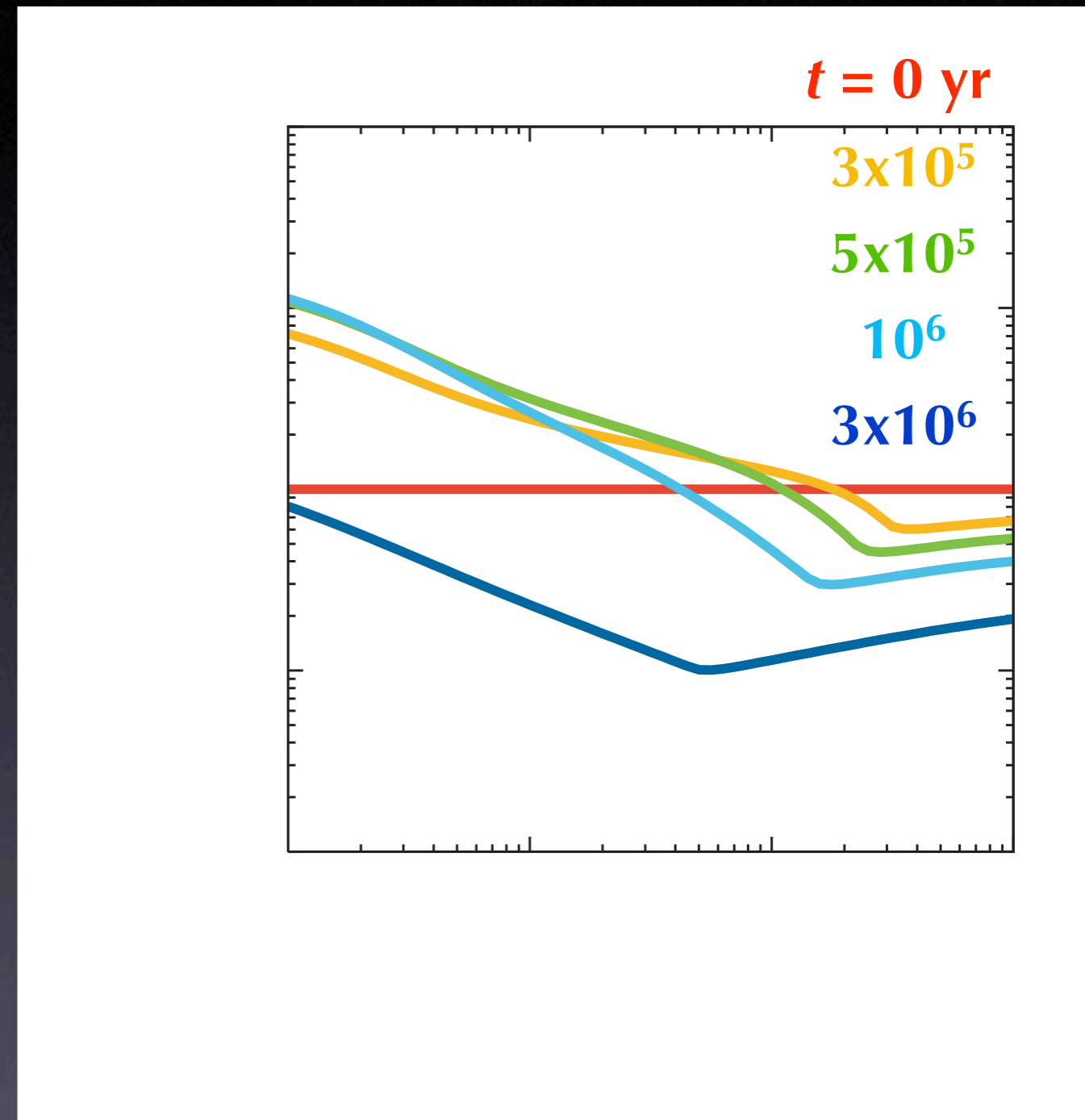


- 固体面密度分布 ... 外縁部は  $r^{-3/4}$ , 内側領域は  $r^{-3/2}$  にそれぞれ比例  
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_d v_r r) = 0$$
- 外縁部の観測と矛盾せず, 惑星形成に必要な量の固体が存在可能



# ダスト/ガス面密度比

- 円盤外縁部
  - 太陽組成の数分の1以下になって初めて  $r^{3/4}$  に比例する分布が再現
  - ダストの観測を基に見積もられたガス面密度は過小評価されている可能性
  - 初期質量は  $0.1 M_{\text{solar}}$  程度の円盤？
- 円盤内側領域
  - 1 Myr 程度の間, 太陽組成の10倍程度に上昇
  - 微惑星形成に有利な環境が形成



# パラメータ依存性

- $\rho_{\text{dust}} \sim -3/2$  の実現条件

$$\frac{t_{\text{diff}}}{t_{\text{fall}}} = \frac{r^2/\nu}{r/|v_r|} = \left(\frac{v_{\text{crit}}}{\alpha c_s}\right)^2 \gg 1$$

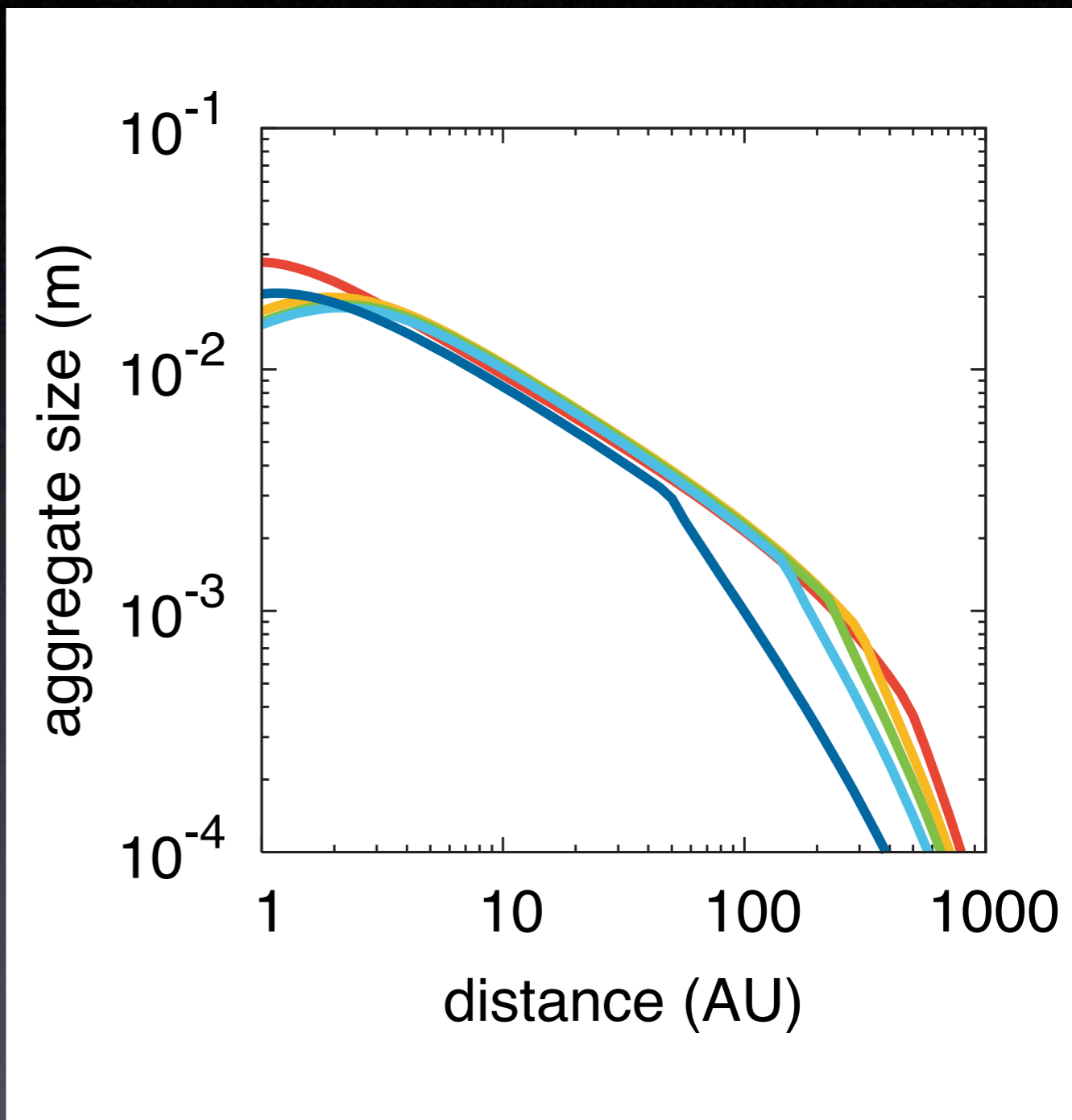
- 条件を満足しない領域では、  
固体面密度はガス面密度同様  
 $r$  にほぼ反比例した分布

- 面密度進化の時間スケール

- 乱流が弱い/付着限界速度が  
大きいと、ダストがより成長  
し、落下が促進

- $\rho_{\text{dust}} \sim -3/2$  の持続時間

$$\tau \sim 10^6 \left(\frac{R_{\text{disk}}}{500 \text{ AU}}\right) \left(\frac{\alpha}{3 \times 10^{-3}}\right) \left(\frac{v_{\text{crit}}}{3 \text{ m s}^{-1}}\right)^{-2}$$





# まとめ

- ダスト落下に伴う円盤の固体面密度分布の進化
  - 円盤外縁部で観測される固体面密度分布
    - 落下時間が成長時間に等しいダストの落下により説明
    - ダスト/ガス比が太陽組成の  $\sim 1/10$  となっている可能性
  - 円盤内側領域
    - $\alpha, v_{\text{crit}}$  一定の場合, より内側のダストに追いつつ落下
    - 固体面密度が著しく上昇, ベキが  $\sim -3/2$  分布へ進化
      - ダスト初期分布, 円盤ガス面密度・温度分布に依存せず
- 成立条件
  - ダスト落下が粘性降着に比べ支配的
- $\rho_{\text{dust}} \sim -3/2$  の分布が維持される時間スケール

$$\tau \sim 10^6 \left( \frac{R_{\text{disk}}}{500 \text{ AU}} \right) \left( \frac{\alpha}{3 \times 10^{-3}} \right) \left( \frac{v_{\text{crit}}}{3 \text{ m s}^{-1}} \right)^{-2}$$