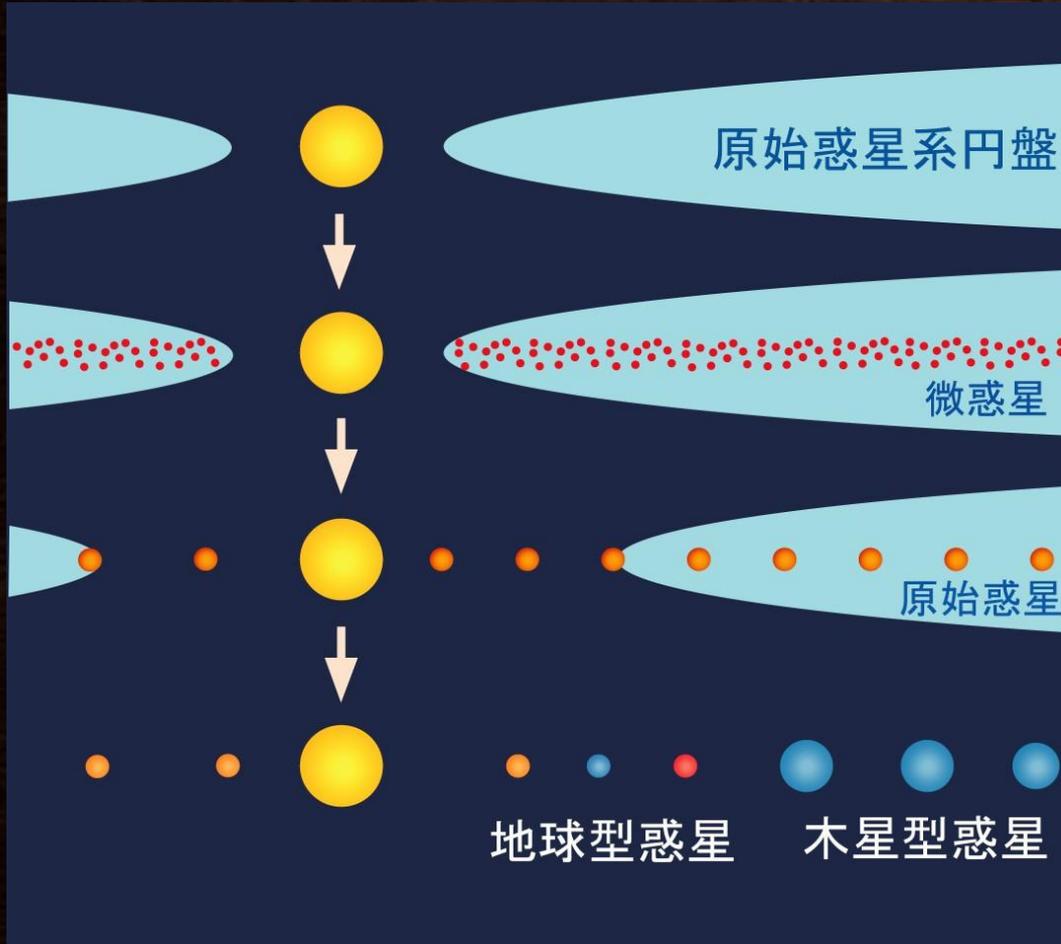


arXiv:1706.08975, ApJ in press

# ガス-ダスト抵抗力を考慮 したガス及びダスト円盤 の共進化

金川和弘 (シュチェチン大学),  
植田高啓 (東京工業大学),  
武藤恭之 (工学院大学),  
奥住聡 (東京工業大学)

# 惑星形成のシナリオ



円盤ガスには微量のダストが含まれる(典型的にガスの1%)。

円盤ガス中のダストが集まって、微惑星が形成。

微惑星の衝突・合体によって原始惑星が形成。

ガス円盤が消失し、惑星系ができる。

# 微惑星形成

Johansen&Yodin 2007

## ダスト落下問題

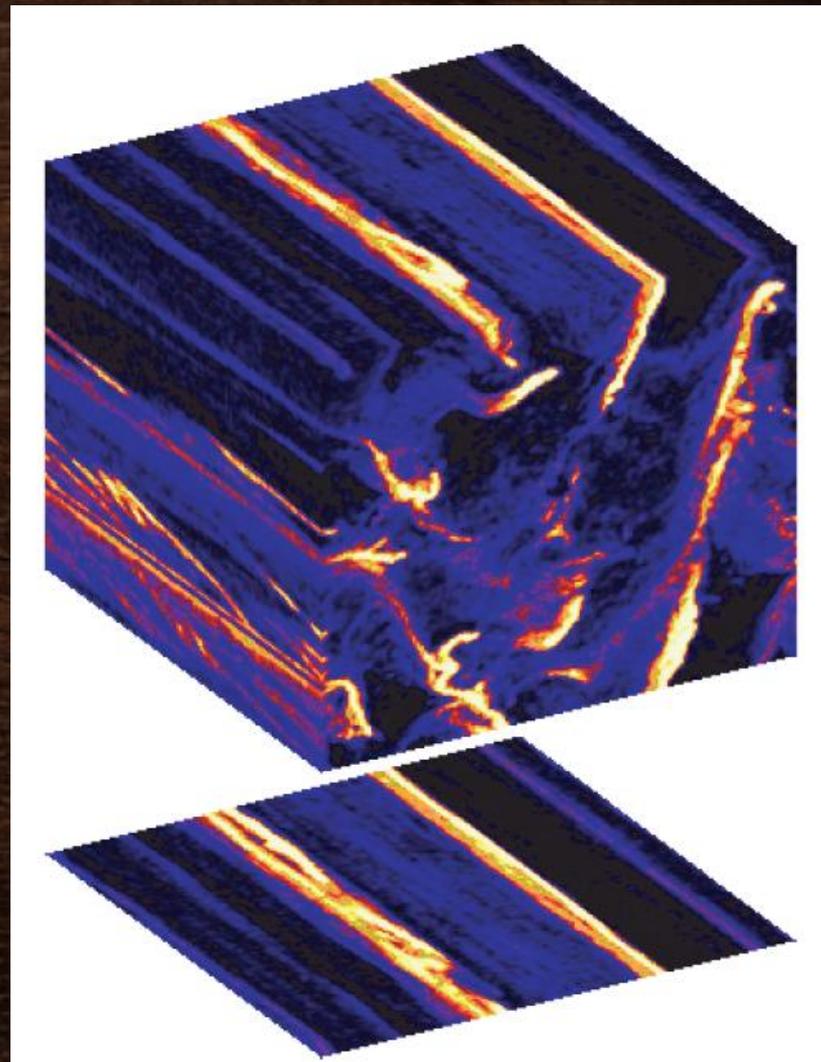
成長するより早くダストが落下してしまう

### 解決策

- ダスト層を不安定にして作る
- ダストをふわふわにする

ダスト層を不安定にするにはダスト/ガス比をあげることが必要

- Pressure bump, SGI
- 光蒸発
- ダストのガスへのフィードバック効果 (本研究)



# ガス・ダストの運動

## •ダスト

ガスの抵抗を受けて角運動量を失い、円盤内側に落下。

$$v_R \simeq 2\eta V_K \sim 0.01 \left( \frac{St}{1} \right) \text{AU/yr},$$

## •ガス

– 乱流粘性による角運動量輸送によって、(円盤内側では)円盤内側に落下。

$$V_{\text{vis}} \simeq \frac{3\nu}{R} \sim 10^{-5} \left( \frac{\alpha}{10^{-3}} \right) \text{AU/yr}$$

– さらにダストが失った角運動量を受け取る。

# ガス・ダストの運動

## 基礎方程式

ダスト

$$\frac{\partial v_R}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) v_R - \frac{v_\phi^2}{R} = -\frac{GM_*}{R^2} - \frac{v_R - V_R}{t_{\text{stop}}}$$

$$\frac{\partial v_\phi}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) v_\phi + \frac{v_R v_\phi}{R} = \frac{v_\phi - V_\phi}{t_{\text{stop}}},$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) v_z = -\frac{GM_*}{R^3} z - \frac{v_z - V_z}{t_{\text{stop}}},$$

ガス-ダスト抵抗力

ガス

$$\frac{\partial V_R}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) V_R - \frac{V_\phi^2}{R} = -\frac{c_s^2}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial R} - \frac{GM_*}{R^2} + \frac{f_R}{\rho_g} - \frac{\rho_d}{\rho_g} \frac{V_R - v_R}{t_{\text{stop}}},$$

$$\frac{\partial V_\phi}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) V_\phi + \frac{V_R V_\phi}{R} = -\frac{f_\phi}{\rho_g} - \frac{\rho_d}{\rho_g} \frac{V_\phi - v_\phi}{t_{\text{stop}}},$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) V_z = -\frac{c_s^2}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial z} - \frac{GM_*}{R^3} z + \frac{f_z}{\rho_g} - \frac{\rho_d}{\rho_g} \frac{V_z - v_z}{t_{\text{stop}}},$$

ガス粘性

# ガス・ダストの運動(定常解)

ガスは鉛直方向は静水圧平衡を仮定。

ダストは沈殿と鉛直方向の拡散が釣り合っているとす。

ダスト

$$v_R(R, z) = -\frac{2St'}{St'^2 + 1} \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_d} \eta V_K + \frac{1}{St'^2 + 1} \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_d} V_{\text{vis}},$$
$$v_\phi(R, z) = V_K + \frac{1}{St'^2 + 1} \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_d} \eta V_K - \frac{St'}{St'^2 + 1} \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_d} V_{\text{vis}},$$

ガス

$$V_R(R, z) = \frac{2St'}{St'^2 + 1} \frac{\rho_d}{\rho_g + \rho_d} \eta V_K + \left(1 - \frac{1}{St'^2 + 1} \frac{\rho_d}{\rho_g + \rho_d}\right) V_{\text{vis}},$$
$$V_\phi(R, z) = V_K + \left(\frac{1}{St'^2 + 1} \frac{\rho_d}{\rho_g + \rho_d} - 1\right) \eta V_K + \frac{St'}{St'^2 + 1} \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_d} V_{\text{vis}},$$

第1項 (ガス-ダスト抵抗力) (Nakagawa +86 と同じ) + 第2項 (ガス粘性)

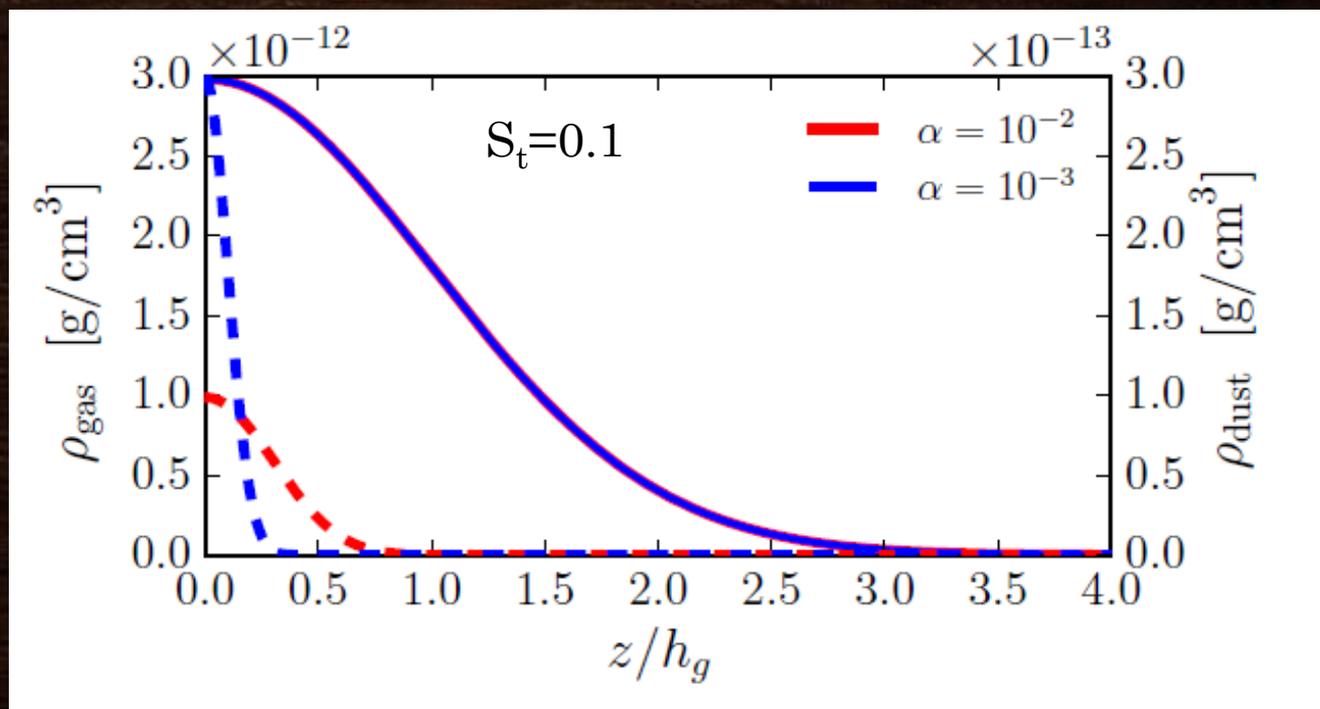
# ガス・ダストの鉛直構造

- ガスは静水圧平衡。
- ダストは、沈殿と乱流による拡散が釣り合っていると仮定。

$$\rho_g(R, z) = \rho_g(R, 0) \exp\left(-\frac{z^2}{2h_g^2}\right),$$

$$\rho_d(R, z) = \rho_d(R, 0) \exp\left(-\frac{z^2}{2h_d^2}\right),$$

$$h_d(R) = h_g(R) \sqrt{\frac{\alpha_{\phi z}/Sc}{\alpha_{\phi z}/Sc + St_{\text{mid}}}}.$$

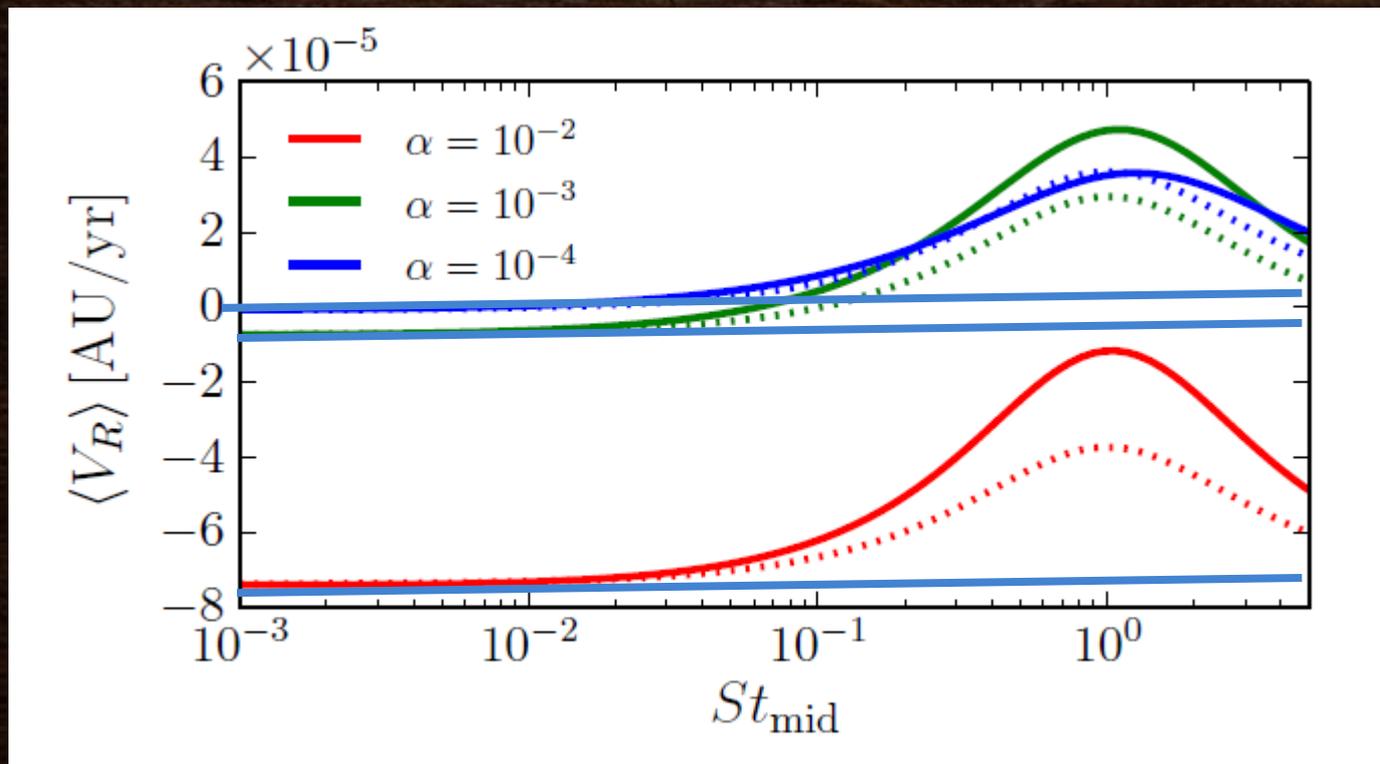


# ガスの運動 (定常解、鉛直平均)

鉛直方向に平均したガス動径速度

$$\langle V_R \rangle (R) = \frac{1}{\Sigma_g} \int_{-\infty}^{\infty} V_R \rho_g dz.$$

ダスト/ガス面密度比 0.01

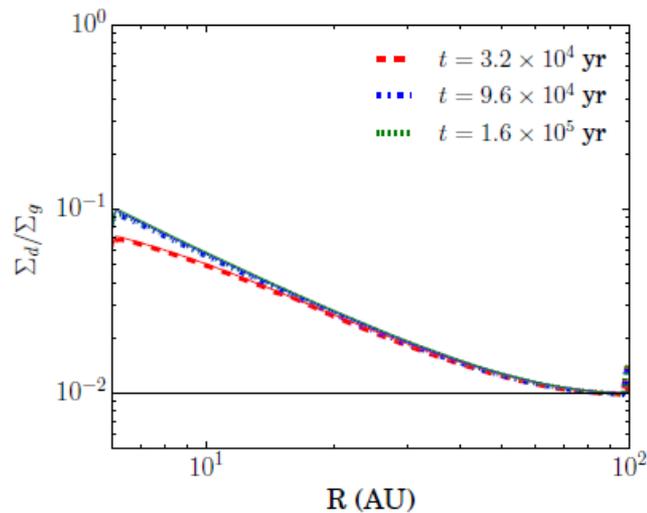
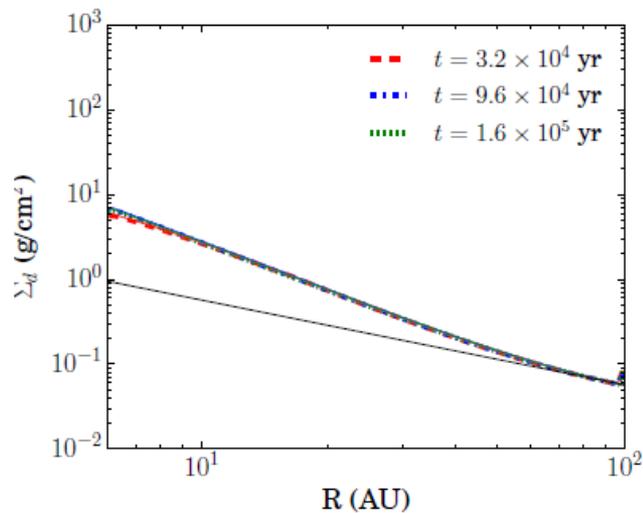
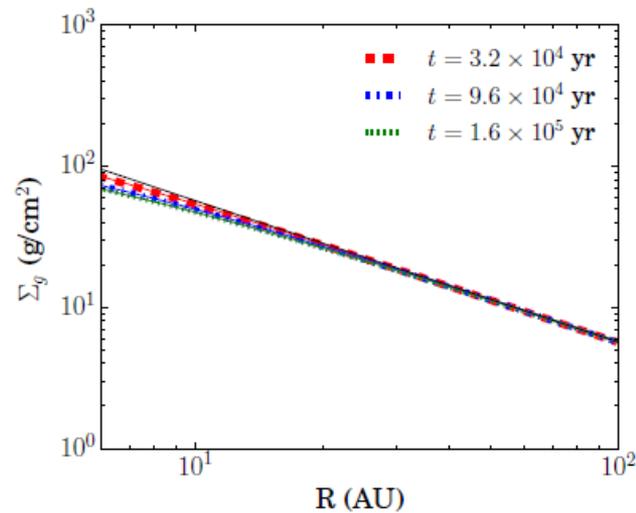
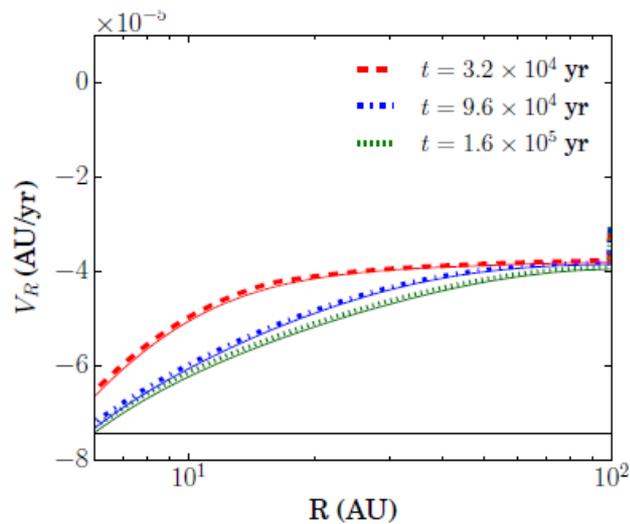


実線(ダストの沈殿を考慮した場合), 破線(ダストの沈殿を考慮しない場合、2D)

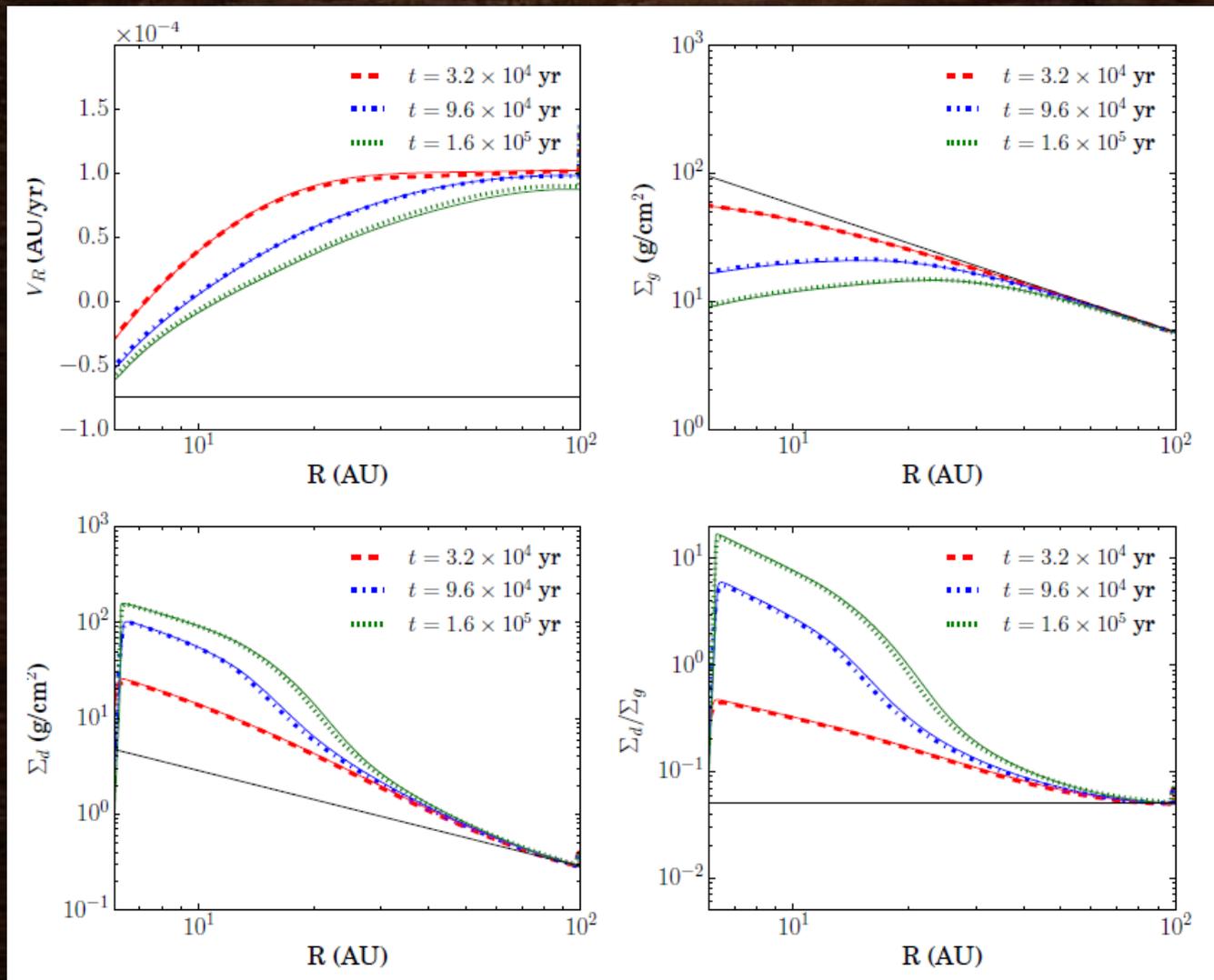
# ガス・ダスト円盤の進化計算

- 2D( $R, \phi$ )2流体(ガス、ダスト)シミュレーション & 1D モデル計算(定常動径速度+連続の式)
- 計算範囲  $4\text{AU} < R < 100\text{AU}$ , (512x128メッシュ)
- 初期条件
  - $\Sigma_{\text{gas}} = 540 \text{ g/cm}^2 (R/1\text{AU})^{-1}$
  - $h/R = 0.028 (R/1\text{AU})^{0.25}$
  - $\alpha$  パラメータは円盤全体で一定
  - 初期ダスト/ガス比は一定(1% or 5%)
- ダストサイズ一定 (3cm, 初期 $\text{St}=0.1$  at 10AU)

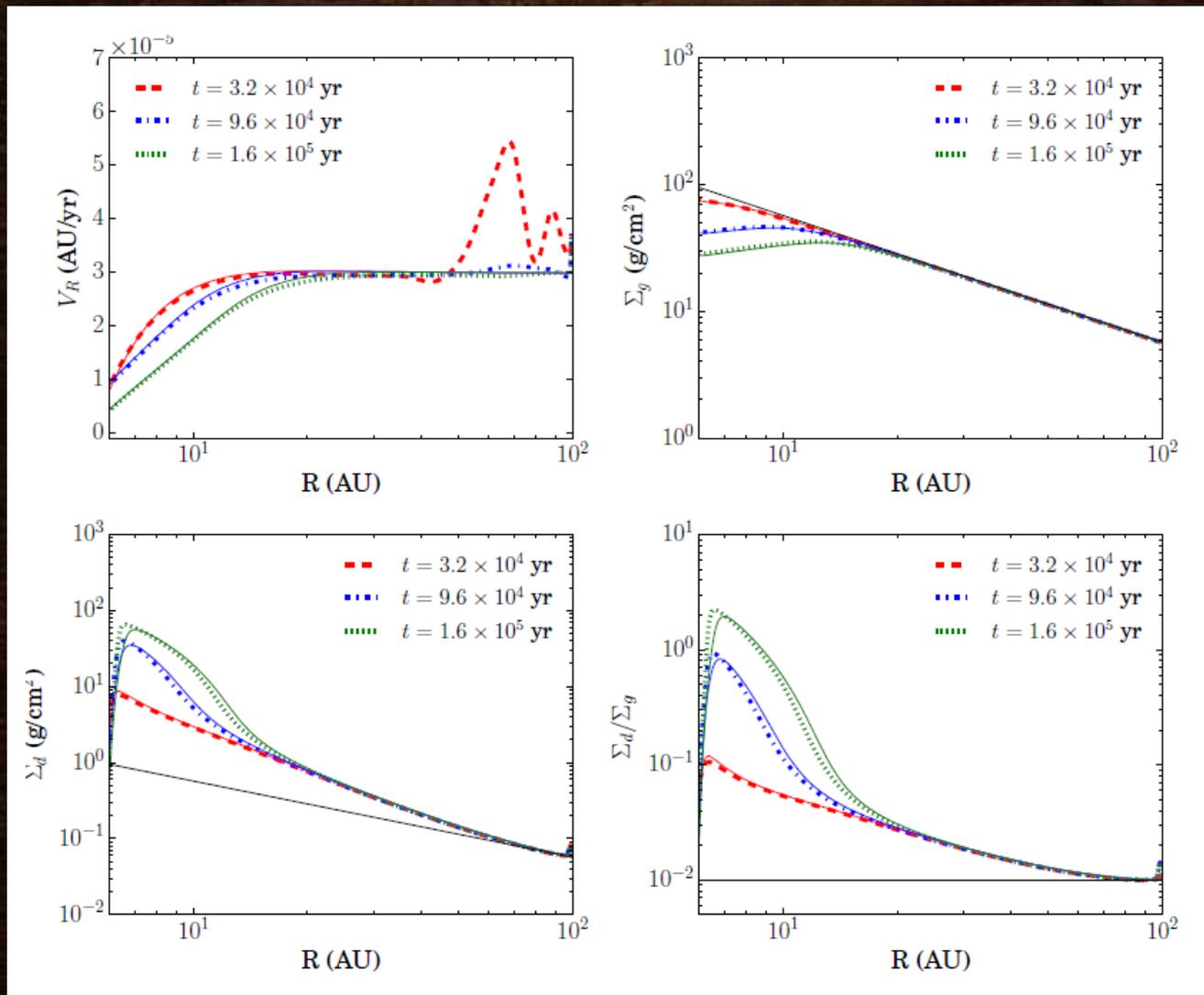
# 初期ダスト/ガス比 1%, $\alpha = 0.01$



# 初期ダスト/ガス比 5%, $\alpha = 0.01$



# 初期ダスト/ガス比 1%, $\alpha = 0.001$



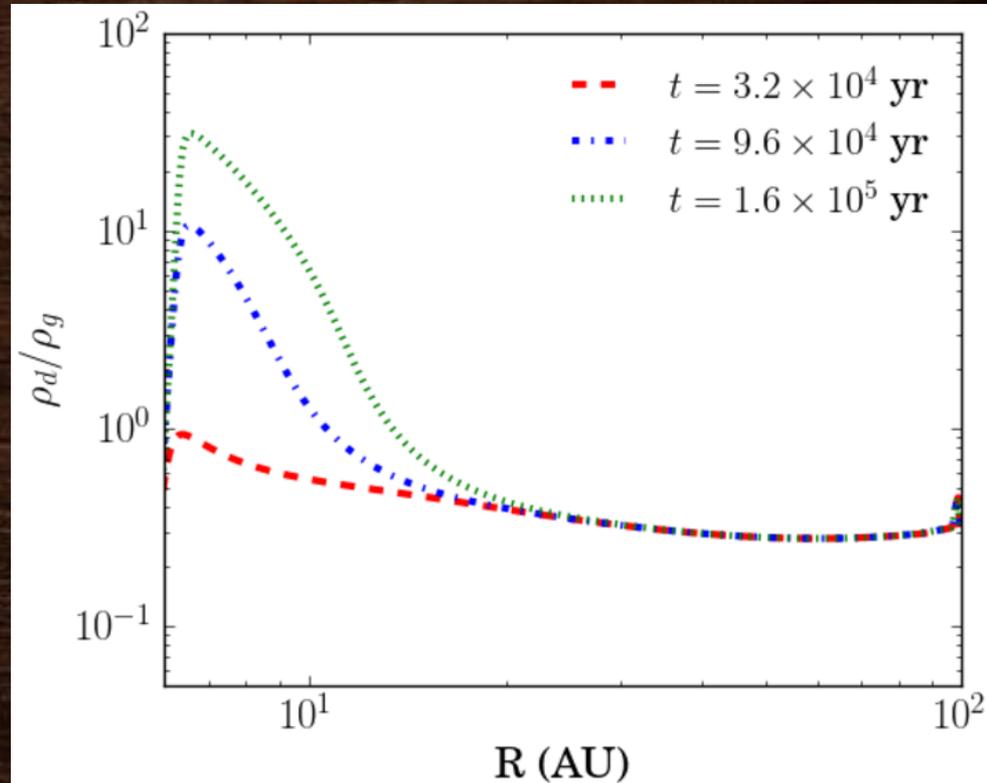
# 円盤内側での微惑星形成

- Streaming instability:  
 $\frac{\rho_{\text{dust}}}{\rho_{\text{gas}}}$  で効率的に  
微惑星を形成できる。

$$\frac{\Sigma_{\text{d}}}{\Sigma_{\text{g}}} = \frac{\rho_{\text{d}}(R, 0)}{\rho_{\text{g}}(R, 0)} \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + St_{\text{mid}}}}$$

~0.1

- 円盤内縁10AUの比較的広い領域で微惑星がSIで作れる可能性



# 円盤内側での微惑星形成

SIによる微惑星形成条件が満たされたとする。

Q. どれくらいの効率で微惑星ができるのか？

– ダスト流入フラックスの多くが微惑星になる場合 (効率大)

ガスが受けるダストのフィードバックが減少。ガス円盤はダストフリーの場合に戻る。

– 流入するダストよりも微惑星になるダストが少ない場合 (効率小)

ガスはフィードバックにより外側に動く。ガス密度が減少した場所で微惑星できる。

SIが起こったとして、どれくらいの効率でダストが微惑星になるのかが重要

# ダスト成長の影響

- ダスト成長が速いとガス構造に影響を与える前に、ダストが落ちきってしまう。

$$\tau_f \simeq \frac{l}{v_R} = 10^5 \text{yr} \left( \frac{100 \text{AU}}{R} \right) \left( \frac{S_t}{0.1} \right)$$

- 衝突破壊によるダスト成長の阻害

$$s_{\text{frag}} \sim \frac{2}{3\pi} \frac{\Sigma_g}{\rho_p \alpha} \left( \frac{v_{\text{frag}}}{c_s} \right)^2,$$

$V_{\text{frag}} = 10 \text{ m/s}$  程度であれば、円盤内側で  $S_t = 0.1$  程度になる (シリケートダスト?)

# まとめ

- ガス円盤進化へのダスト落下の影響を議論した。
- 落下するダストから角運動量を受け取るため、ガス粘性が比較的小さい場合(e.g.,  $\alpha = 10^{-3}$ ), または初期ダスト量が若干多い場合(e.g., 5%), 円盤中心部のガスが減少する。
- ガス減少により、ダスト/ガス比が上昇。Streaming instabilityによる微惑星形成に適した環境になる。
- 微惑星形成後は、微惑星形成の効率によって円盤進化は異なると考えられる。
- シリケートの微惑星を作れるかも？