

原始惑星系円盤の不安定性： ダスト粒子成長・沈殿の影響

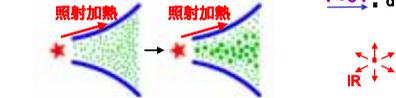
野村 英子、中川 義次 (神戸大自然科学)

ABSTRACT

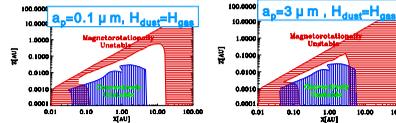
原始惑星系円盤の温度構造は、円盤内ダストによる中心星からの放射の吸収、再放射により決定される。従って、円盤構造、及び円盤内乱流の原因となる円盤不安定性は、円盤内ダストの性質に依存する。一方円盤内乱流は、ダストの沈殿の抑制等に影響を及ぼす。よって両者の総合的理解は、惑星形成初期段階の解明に不可欠である。本研究では、問題解明の第一階として、原始惑星系円盤内ダスト粒子の成長・沈殿過程が円盤不安定性へ及ぼす影響を調べた。具体的にはまず、移流項を取り入れたダスト粒子の合体成長方程式を解き、円盤内ダスト粒子のサイズ成長及び沈殿過程を調べた。次に求めたダスト分布を用い円盤構造を計算し、さらに円盤の不安定性の時間発展を調べた。その結果、熱対流不安定性は中心星からの放射加熱により $t \sim 3 \times 10^4$ 年で安定化した。また磁気回転不安定性は、 $t = 10^5$ 年でも $1 \text{ AU} < x < 10 \text{ AU}$ の赤道面では安定に保たれていることがわかった。

INTRODUCTION

原始惑星系円盤の構造



ダスト成長・沈殿と円盤不安定性



$a_p \uparrow \rightarrow$ 磁気回転不安定性 \nearrow
 \rightarrow 円盤赤道面付近で
 熱対流不安定性 \searrow
 磁気回転不安定性 \searrow
 (Nomura 2004)

円盤モデル

z方向の静水圧平衡

$$c_s^2 \frac{dp}{dz} = -\rho g_z = -\frac{\rho GM_* z}{(x^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$c_s^2 = 2kT / \mu m_p, M_* = 0.5 M_\odot$$

エネルギー・バランス (円盤面密度: Σ)

$$\frac{9}{4} \Sigma \alpha c_s^2 \Omega = \frac{3GM_* \dot{M}}{8\pi x^3} \left[1 - \left(\frac{R_*}{x} \right)^{1/2} \right]$$

$\dot{M}_{acc} = 10^{-8} M_\odot / \text{yr}$ ($= \text{const.}$), $\alpha = 0.01$

局所輻射平衡 (吸収・再放射)

$$\int_0^\infty dv \kappa_\nu \int I_\nu d\Omega = 4\pi \int dv \kappa_\nu B_\nu(T_{gr})$$

加熱源

(A) 赤道面における粘性加熱 (粘性)

$$Q_{vis} = (9/4) \Sigma \alpha c_s^2 \Omega$$

(B) 中心星からの放射加熱

$$Q_{star} = \sigma T_*^4, T_* = 4000 \text{ K}$$

輻射輸送方程式 (軸対称 2次元)

$$\frac{dI_\nu}{dr} = \rho \kappa_\nu (B_\nu - I_\nu)$$

$$I_\nu(r, \theta, \mu, \phi) = \int_0^\infty \kappa_\nu \rho(r', \theta', \mu') B_\nu(T(r', \theta'))$$

球座標 Short characteristic 法 (Dullemond & Turailla 2000)

iteration → 温度 & 密度分布

ダストの合体成長・赤道面への沈殿

ダストの合体成長方程式

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_i v_z)}{\partial z} = \frac{1}{2} m_i \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{i-j} \frac{\rho_j}{m_{j+1} m_j} - \rho_i \sum_{j=1}^i \alpha_{i+j} \frac{\rho_j}{m_{i+1} m_j}$$

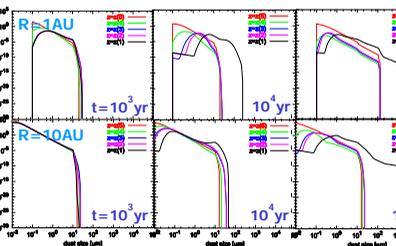
$$\alpha_{ij} = \pi (a_i + a_j)^2 (\Delta v_{ij} + \Delta v_{ij}^2) p_s$$

沈殿の速度差 ブラウン運動

$$\Delta v_s = \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{dust}} \right) \left(\frac{GM_*}{x^3} \right)^{1/2} |a_i - a_j|$$

$$\Delta v_b = \left(\frac{8k_B T}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{1/2}$$

ダストサイズ分布の時間進化



円盤表面: ~初期分布、赤道面: > 1 mm に成長
 成長・沈殿の時間尺度: 半径小 短い

円盤の不安定性

熱対流不安定性

$$z'' - \text{ad} > 0 \quad \nabla_z = \frac{\partial \log T}{\partial \log P} \quad \nabla_{ad} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} = 5/7$$

磁気回転不安定性

オーム拡散による磁気回転不安定性の安定化

完全電離 (or : 小)

$$VA / c < H \quad (= Cs / \lambda)$$

部分電離 (: 大)

$$VA < H \quad \eta = \frac{c^2}{4\pi \sigma_c} = \frac{c^2 m_e \langle \sigma \nu \rangle_e}{4\pi e^2 x(e^-)}$$

(e.g., Sano & Miyama 1999)

電離度の計算

電離平衡: $x(e^-) \sim x(Mg^+)$

化学平衡: $x(Mg^+)$

宇宙線による電離

$H_2 + C.R. \rightarrow H_2^+ + e^-$, $[\zeta = \zeta_{CR} \exp(-\tau_{CR})]$

2体反応

$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$, $HCO^+ + Mg \rightarrow Mg^+ + HCO$

$H_3^+ + CO \rightarrow HCO^+ + H_2$, $Mg^+ + e^- \rightarrow Mg + h$

$HCO^+ + e^- \rightarrow CO + H$

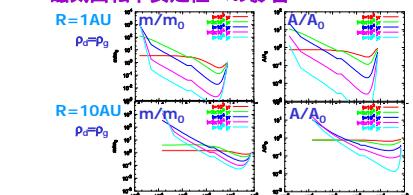
ガス・ダスト間相互作用 (ダスト表面の中性化反応)

$m^+(gas) + grain \rightarrow m(grain)$

$cR \nearrow \quad x(e^-) \searrow, a_p \nearrow \quad x(e^-) \nearrow$
 (cf. Sano et al. 2000)

ダストの成長・沈殿と円盤不安定性

磁気回転不安定性への影響

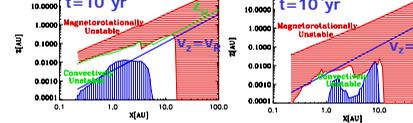


$H_{dust} \searrow$ 円盤赤道面付近で全ダスト表面積 \nearrow

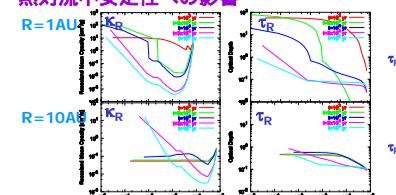
$a_p \nearrow$ 電離度 \nearrow 磁気回転不安定性 \searrow

電離度 \nearrow 磁気回転不安定性 \nearrow

円盤内不安定領域の時間進化



熱対流不安定性への影響



$H_{dust} \searrow$ 円盤表面でダスト吸収係数 \searrow

輻射加熱の影響 \nearrow 熱対流不安定性 \searrow

熱対流不安定性 \searrow

熱対流不安定性: $t > 3 \times 10^4 \text{ yr}$ で安定化

磁気回転不安定領域: $t = 10^5 \text{ yr}$ でも $1 \text{ AU} < x < 10 \text{ AU}$ の赤道面で安定

まとめ

原始惑星系円盤内のダスト粒子成長・沈殿過程 & 温度・密度分布計算

円盤不安定性の時間進化

$H_{dust} \searrow$ 円盤表面でダスト吸収係数 \searrow

中心星からの放射加熱の影響 \nearrow

$t > 3 \times 10^4 \text{ yr}$ で熱対流不安定領域安定化

$H_{dust} \searrow$ 円盤赤道面で全ダスト表面積 (イオン中性化率) \nearrow 電離度 \searrow

$t = 10^5 \text{ yr}$ でも $1 \text{ AU} < x < 10 \text{ AU}$ の赤道面で磁気回転安定

(但し $v_z > v_R$ では磁気回転不安定)