

ダスト層の重力不安定による微惑星形成

道越秀吾 (筑波大学 計算科学研究センター)

2016 年 4 月 27 日

目次

- ① 研究の背景
- ② 計算法
- ③ 結果
- ④ 今後の数値シミュレーションの計画

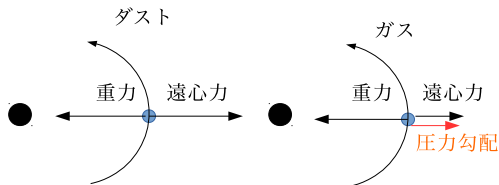
概要

- 乱流が原因で従来は困難と考えられてきた重力不安定による微惑星形成モデルを再検討
- 理論モデルによって、妥当なパラメータ範囲で重力不安定が可能であることが示唆された
- より詳細な微惑星形成過程の解明のための数値シミュレーションの計画を示す

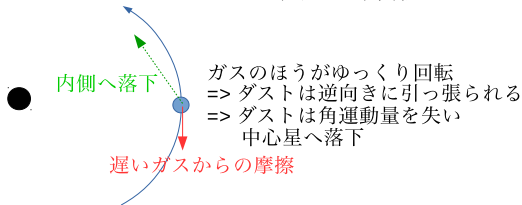
目次

- ① 研究の背景
- ② 計算法
- ③ 結果
- ④ 今後の数値シミュレーションの計画

メートルダストの落下問題

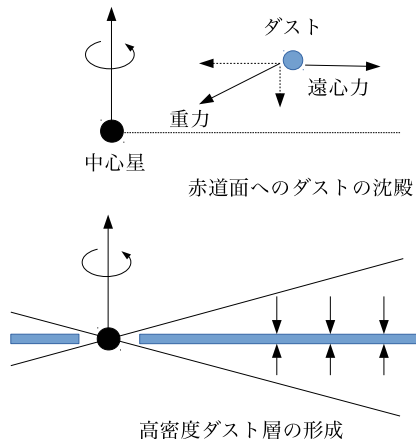


ガスの方が遠心力が小さくてよい
 ==> ガスはダストよりゆっくり回転



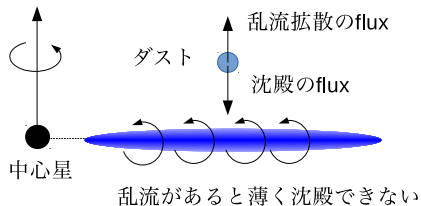
- メートル程度まで成長すると落下 (Radial drift barrier)(Adachi et al. 1976, Weidenschilling 1977)

重力不安定による微惑星形成



- ダスト層が臨値を超えるまで薄くなると自己重力の効果が強くなるため、**自己重力不安定**が発生
- 短時間でキロメートル微惑星が形成される (Radial drift barrier の回避)(Safronov 1969, Goldreich and Ward 1973)

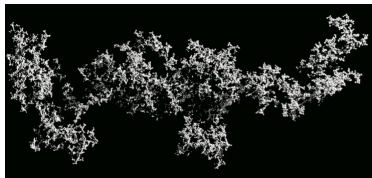
乱流による重力不安定の妨げ



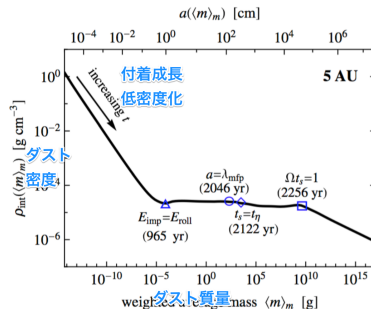
- 弱い乱流でも乱流拡散のために沈殿を妨げ、重力不安定がおきない
- 沈殿が原因で生じる乱流もある (シア不安定, e.g., Weidenschiling 1980, Michikoshi and Inutsuka 2006)

⇒ 重力不安定以外でのダスト成長が必要

付着成長による低密度ダストの形成



Wada et al. 2007

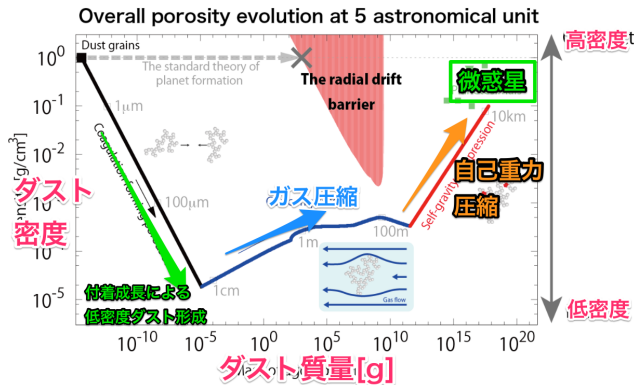


Okuzumi et al. 2012

- 合体成長シミュレーション ⇒ ダストは圧縮できず低密度になりながら成長 (e.g., Wada et al. 2007)
- 衝突圧縮が効くと密度低下が止まる (Okuzumi et al. 2009)
- 成長が早いため落下問題を回避可能 (Okuzumi et al. 2012)
- ⇒ しかし、コンパクトな微惑星にはならない ⇒ 別の圧縮過程が必要

ガス圧縮と重力圧縮による微惑星形成

- 低密度ダストはガス圧や自己重力によって圧縮しようとする
- 圧縮強度との比較でサイズが決まる (Kataoka et al. (2013))



Kataoka et al. 2013

- 落下問題を回避しつつ付着成長だけで微惑星形成可能

研究の目的

目的

- 合体成長の最終段階における重力不安定の可能性
- 低密度ダストの運動を調べる
- 重力不安定条件を満たすパラメータ条件を探る

目次

- ① 研究の背景
- ② 計算法
- ③ 結果
- ④ 今後の数値シミュレーションの計画

ダスト層の重力不安定の条件

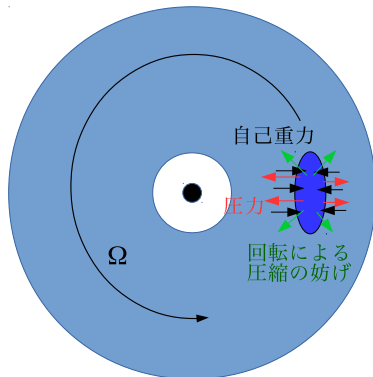
重力不安定を特徴付けるパラメータ
(Toomre の Q)

$$Q_T \simeq \frac{v\Omega}{3.36G\Sigma_d}$$

- Σ_d はダスト面密度、 v はダストの速度分散、 Ω は公転角速度、 G は万有引力定数

- Q が小さい時に不安定
- $Q < 2$ を重力不安定条件にする (Michikoshi et al. 2007, Michikoshi and Kokubo 2016)

- Σ_d は標準モデル (最小質量円盤モデル) (e.g., Hayashi 1985) を用いる
- ランダム速度 v が重要なパラメータ



ランダム速度の発展方程式

$$\frac{dv^2}{dt} = \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbstir}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{gasdrag}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbgrav}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{grav}}$$

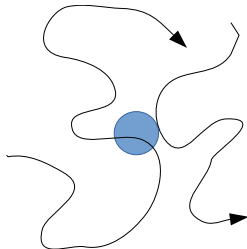
$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{gasdrag}}$	摩擦によるエネルギー散逸 (Adachi et al. 1976)
$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbstir}}$	乱流からの摩擦 (Youdin and Lithwick 2007)
$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbgrav}}$	乱流密度ゆらぎからの重力散乱 (Okuzumi and Ormel 2013)
$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{col}}$	衝突散逸 (Goldreich and Tremaine 1978)
$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{grav}}$	重力散乱 (Ida 1990)

赤字：加熱源、青字：冷却源

摩擦によるランダム速度変化

ガスとの摩擦には2つの効果がある

- 乱流拡散 \Rightarrow ランダム速度の上昇
- 摩擦で平均流に近づく \Rightarrow ランダム速度の減少

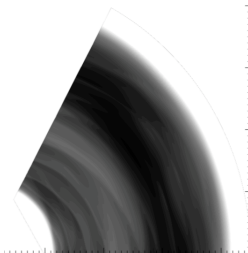


$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{gasdrag}}$	摩擦によるエネルギー散逸 (Adachi et al. 1976)
$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbstir}}$	乱流からの摩擦 (Youdin and Lithwick 2007)

$$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{gasdrag}} = -\frac{2}{t_s}v^2, \quad \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbstir}} = \frac{2\tau_e v_t^2}{S(\tau_e + S)}$$

乱流密度場からの重力散乱

- 乱流によって密度揺らぎが発生
- 密度揺らぎから重力を受けて軌道がランダムに変わる \Rightarrow ランダム速度の上昇

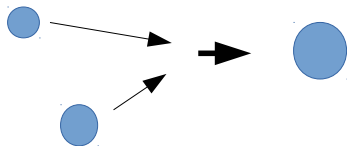


$$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbgrav}}$$

乱流密度ゆらぎからの重力散乱 (Okuzumi and Ormel 2013)

$$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbgrab}} = C_{\text{turb}} \alpha \left(\frac{\Sigma_g a^2}{M_*}\right) v_K^2 \Omega$$

衝突散逸



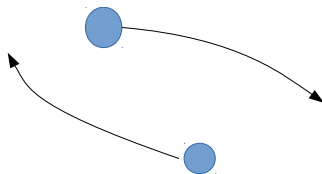
衝突合体による運動エネルギーの散逸

ランダム速度を減少させる

$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{col}}$	衝突散逸 (Goldreich and Tremaine 1978)
---	---

$$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{col}} = -C_{\text{col}}(n_{\text{d}}\pi r_{\text{d}}^2 v) \left(1 + \frac{v_{\text{esc}}^2}{v^2}\right) v^2$$

重力散乱



重力による二体散乱

円盤内の重力散乱はランダム速度を増加させる

$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{grav}}$	重力散乱 (Ida 1990)
--	-----------------

$$\left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{grav}} = n_d \pi (2Gm_d/v^2)^2 v \log \Lambda v^2$$

ランダム速度計算

$$\frac{dv^2}{dt} = \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbstir}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{gasdrag}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{turbgrav}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)_{\text{grav}}$$

の定常解を「右辺 = 0」から v を求める。

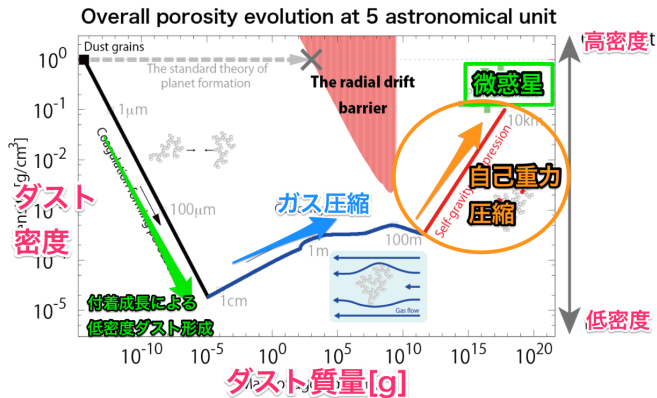
$$Q \simeq \frac{v\Omega}{3.36G\Sigma} < 2$$

から不安定となるパラメータを探る

目次

- ① 研究の背景
- ② 計算法
- ③ **結果**
- ④ 今後の数値シミュレーションの計画

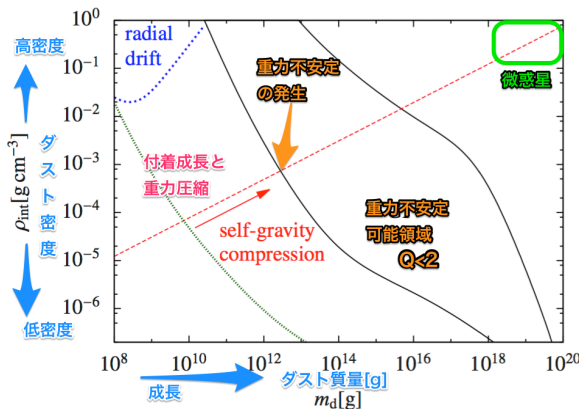
ガス圧縮と重力圧縮による微惑星形成



Kataoka et al. (2013)

- ダストが付着成長・自己重力圧縮していく段階を調べる

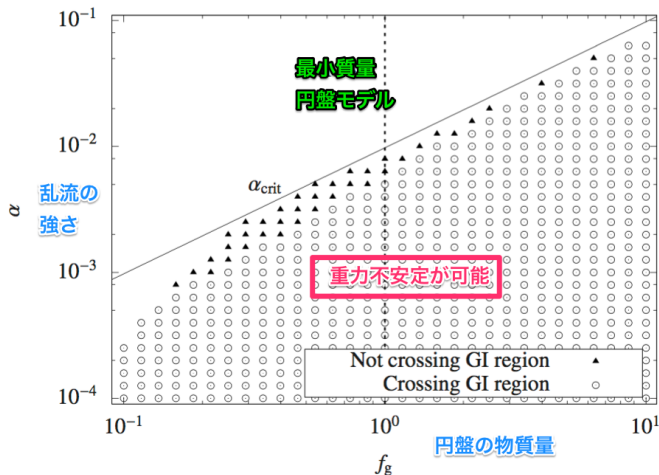
結果:標準モデル



乱流の強さ $\alpha = 10^{-3}$, 円盤全体の物質質量 $f_g = 1$ (最小質量円盤モデル)

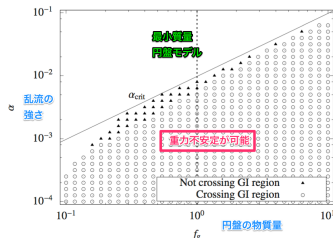
- 重力圧縮の進化トラック (Kataoka et al. 2013) を描くと重力不安定領域を横切る
- 進化トラックが変わっても重力不安定領域はさけられない

形成可能なパラメータ領域



- 進化トラックが重力不安定領域を通過するパラメータを調べ、重力不安定可能な領域を調べた。
- 円盤が重いほど (f_g が大きいほど)、乱流が弱いほど (α が小さいほど) 重力不安定領域を通過しやすい

重力不安定可能な乱流の上限



$$\alpha < \alpha_{\text{crit}} = 8.30 \times 10^1 \frac{C_{\text{col}} Q_{\text{crit}}^2 a^2 \Sigma_{\text{d}}^3}{\sqrt{C_{\text{turb}} \tau_e} C_{\text{D}} \eta M_* \Sigma_{\text{g}}^2},$$

$$\alpha_{\text{crit}} \simeq 10^{-2} \tau_e^{-1/2} f_g \left(\frac{f_d}{0.018} \right)^3 \left(\frac{T_1}{120 \text{ K}} \right)^{-1} \left(\frac{C_{\text{turb}}}{3.1 \times 10^{-2}} \right)^{-1/2} \left(\frac{a}{5 \text{ AU}} \right)^{-1/4}.$$

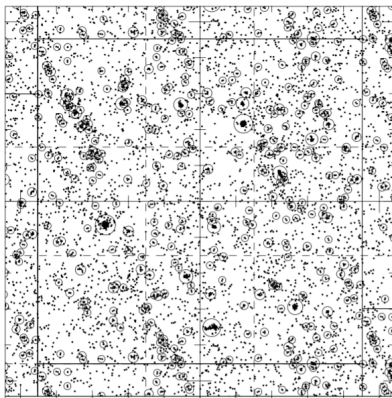
- 臨界的な乱流強度を見積もった
- 温度 (T_1)、物質質量 (f_g)、ダストガス比 (f_d) が重要なパラメータ。中心星からの距離 (a) にはほとんど依存しない
- 一般に考えられる乱流強度、円盤の物質質量において重力不安定は起きる可能性がある

目次

- ① 研究の背景
- ② 計算法
- ③ 結果
- ④ 今後の数値シミュレーションの計画

微惑星形成の数値シミュレーションに向けて

Michikoshi et al. 2007, 2009, 2010 において、低密度ダストの重力不安定のシミュレーションを行った



- 乱流の効果が入っていない
- ガスへのバックリアクションがない

⇒ これらの効果を取り入れたシミュレーションを計画中

まとめ

研究の背景

- 古典的な重力不安定は、乱流拡散によって妨げられて困難とされてきた
- かわりに付着成長と重力圧縮による微惑星形成が有力視されている (e.g., Kataoka et al. 2013)
- \Rightarrow 付着成長の最終段階に重力不安定がおきないか調べた

結果

- 妥当なパラメータレンジにおいて、**重力不安定が起きる**ことがわかった
- 今後はこの現象の数値シミュレーションを行っていく