

# ダストに働く揚力の効果

大阪大学 宇宙進化グループ

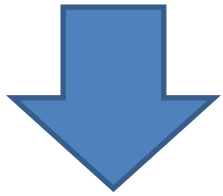
木村成生

# 目次

- イントロ  
惑星形成モデル、揚力、研究目的
- 見積もり  
ダストの回転  
揚力の大きさ
- まとめ
- 補足(無次元量の説明)

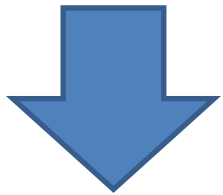
# 惑星形成の標準モデル

- ガスとダストからなる円盤



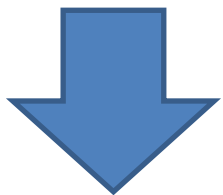
ダストの合体成長

- 微惑星の形成



微惑星の合体成長

- 原始惑星の形成



ガスの降着

- 岩石惑星 + ガス惑星

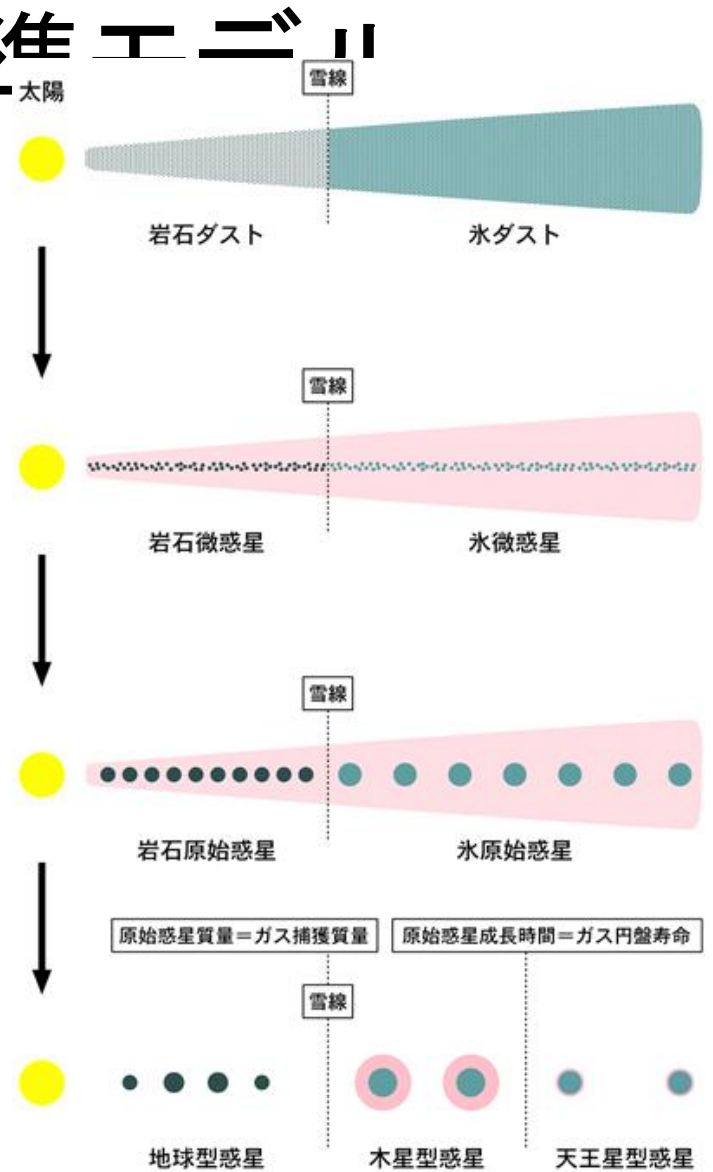


図: 理科年表オフィシャルサイト

本研究ではダストの合体成長について考察する

# ダストの合体成長

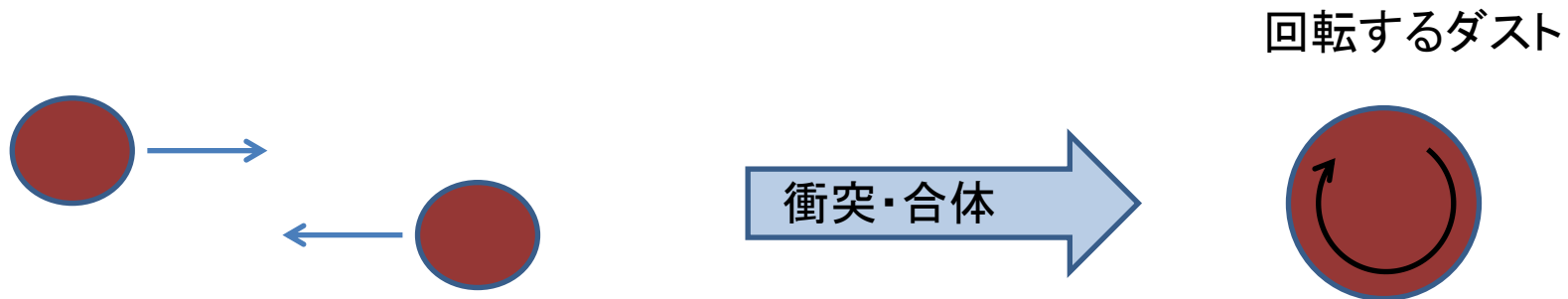
- ダストの衝突

衝突パラメータを持った衝突

→ダストは角運動量を持つ



回転するダストには揚力が働く可能性



# 揚力

- 回転体に働く揚力  
ベルヌーイの定理より  
流速大 → 圧力小  
流速小 → 圧力大

➡ 右図の向きに力が働く

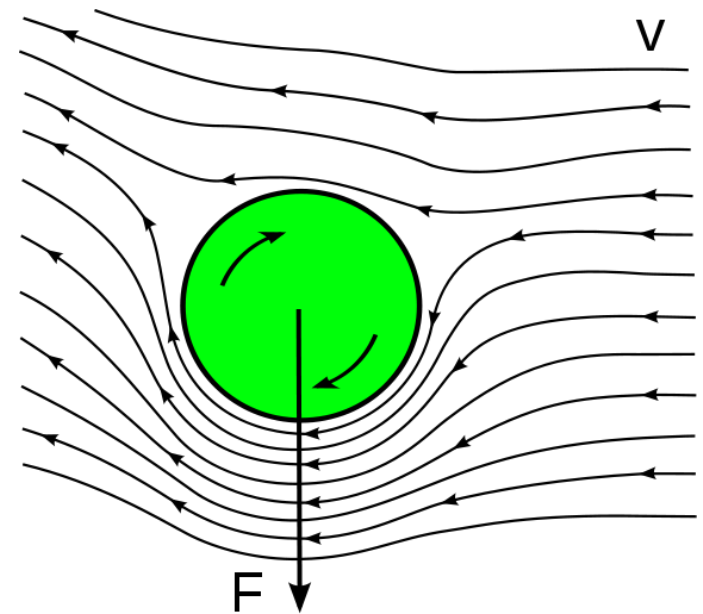


図: Wikipediaより

回転球に働く揚力(遅い粘性流の場合)

$$\vec{F}_L = \frac{2\pi}{3} \rho_g r_d^3 \vec{u} \times \vec{\Omega}_d$$

# 揚力は効くのか？

- 揚力の特徴

流体描像の時のみ働く  $\rightarrow K \leq 1$  ( $K \equiv \lambda_{\text{mfp}}/r_d$ )

- 回転の持続

ダストの回転はガスからトルクを受けて減衰  
 $\rightarrow$ 減衰前に衝突による回転の供給が必要

- 揚力の大きさ

抗力との比(揚抗比)が重要

$$\frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D}$$

$$F_j = \frac{\pi r_d^2 \rho_g u^2}{2m_d} C_j \quad (j = L, D)$$

# 本研究の目的と内容

- 原始惑星系円盤にあるダストに対し揚力が効くかどうかを見積もる
- 揚力が効くかどうかを考えたい

→大きい ( $r_d \geq \lambda_{\text{mfp}} \sim 1\text{cm}$ )ダストのみに着目

- 回転は持続するのか？

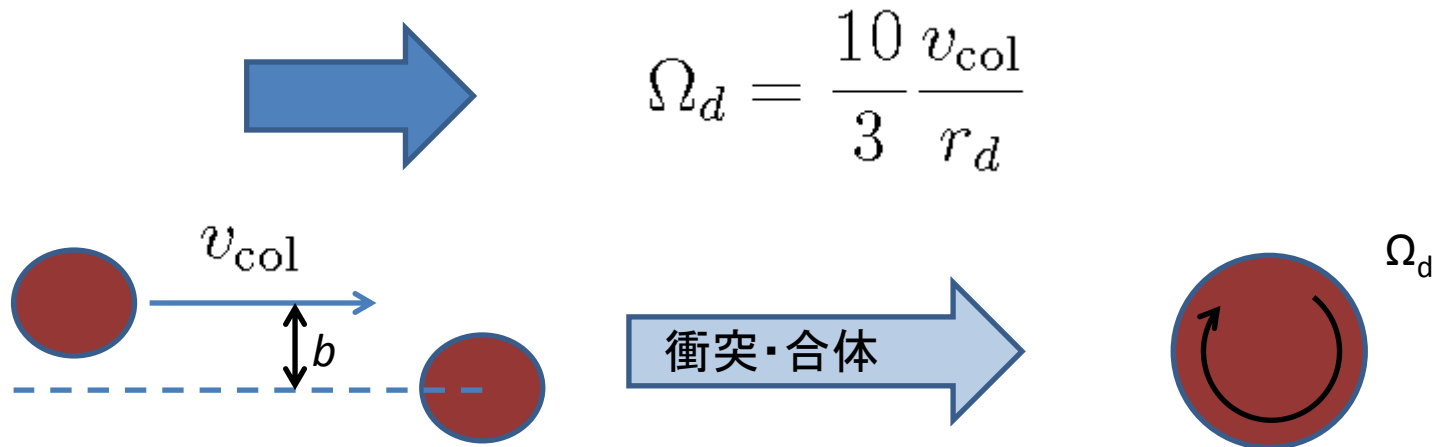
乱流ガス中でダストの衝突率を見積もり、ダストの回転が止まる時間と比べる

- 揚力の大きさ

回転の持続するダストについて揚抗比を求める

# 衝突による回転

- 一回の衝突で大きな角運動量を得たい  
→ 同程度のサイズのダストの衝突を考える
- 衝突時に持っている角運動量がすべてダストの角運動量に渡されると仮定
- 衝突パラメータの平均値  $\langle b \rangle = \frac{\int_0^{2r_d} b \cdot 2\pi b db}{\int_0^{2r_d} 2\pi b db} = 4r_d/3$





# 乱流による衝突率

- 原始惑星系円盤中のガス

乱流状態と考えられる (MRI, KH, etc.)

衝突率  $t_{\text{col}}^{-1} = v_{\text{col}} \sigma_d n_d$  を求めたい

- ダストの相対速度 (Ormel+, 07)

$$v_{\text{col}} = \begin{cases} 0 & (\text{St} < \text{Re}^{0.5}) \\ \alpha^{0.5} \text{St}^{0.5} c_s & (\text{Re}^{0.5} < \text{St} < 1) \\ \left( \frac{2\alpha}{1+\text{St}} \right)^{0.5} c_s & (1 < \text{St}) \end{cases}$$

$$\text{St} \equiv t_{\text{stop}}/t_{\text{dyn}}$$

# 乱流による衝突率

- ダスト密度

乱流拡散  $\longleftrightarrow$  沈殿  
つり合い

$$H_d = H_g \cdot \min\left(1, \sqrt{\frac{\alpha}{\min(\text{St}, 1/2)(1 + \text{St}^2)}}\right)$$

$$n_d = \frac{\rho_d}{m_d} = \frac{f_m(f_d \Sigma_g / H_d)}{m_d}$$

- MMSN ( $f_d=0.01$ )、1AUでの見積もり

$$t_{\text{col}} = \begin{cases} 3 \times 10^8 [\text{sec}] r_{d,1}^{-1} f_{m,1} & (\text{St} < 1/2) \\ 3 \times 10^7 [\text{sec}] f_{m,1} & (1 < \text{St}) \end{cases}$$

# ダストの回転の減衰

- 回転ダストは抵抗を受けてある程度時間が経過すると回転が止まる
- Stokes近似の下での回転の運動方程式

$$\vec{M} = -8\pi\mu r_d^3 \vec{\Omega}_d = I_d \frac{d\Omega_d}{dt}$$

抵抗により回転が止まる時間

$$t_{\text{brake}} \equiv \frac{I_d}{8\pi\mu r_d^3} \sim 3 \times 10^3 [\text{sec}] r_{d,1}^2$$

mサイズ以上:  $t_{\text{brake}} \geq t_{\text{col}}$  **回転持続可能**

数十cm以下:  $t_{\text{brake}} < t_{\text{col}}$  **回転は止まる**

# 揚力と抗力の比

- 抗力係数 (Ref : Adachi+, 76)

$$C_D = \frac{16}{K \cdot Re} \quad (K > 1)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (Re \leq 10)$$

$$0.5 < C_D < 1.5 \quad (Re \gg 1)$$

- 揚力係数

$$C_L = ?? \quad (K > 1)$$

$$C_L = \frac{4rd\Omega_d}{3u} \quad (Re \leq 10)$$

$$C_L = ?? \quad (Re \gg 1)$$

Reが大きいときや  
Kが小さいときの  
揚力については  
よくわかっていない

# 揚力と抗力の比

- 1mダストでのレイノルズ数

$Re \sim 14 \rightarrow$  Stokes則は使えない

$Re > 1$ ではダストの揚力係数もよくわからない

$\rightarrow$ 適用範囲外だが  $Re \leq 1$ での表式で見積もる

- 1mダストでの揚抗比

$$C_D/C_L \sim 1$$

$\rightarrow$  1mサイズのダストがどうにかしてできれば

揚力は効く可能性がある

# まとめ

- 原始惑星系円盤中のダストに揚力が働くか調べた。
- 乱流による回転の注入の時間と回転が止まるまでの時間を比べた。  
→1mサイズ以上だと回転が持続する
- その時の揚力と抗力の比は1:1程度

1mサイズのダストには揚力が効く可能性

# 補足：無次元定数

- ストークス数  $St \equiv t_{\text{stop}}/t_{\text{dyn}}$   
ガスとダストの結合率を表す数
- レイノルズ数  $Re \equiv VL/\nu$   
流れの特徴を決める数。慣性項と粘性項の比。Re大  
→乱流が発生しやすい、Re小→粘性が強い
- クヌッセン数  $K \equiv L/\lambda_{\text{mfp}}$   
流体近似が成り立つかどうかを決める数  
K<1: 流体、K>1: 希薄気体