

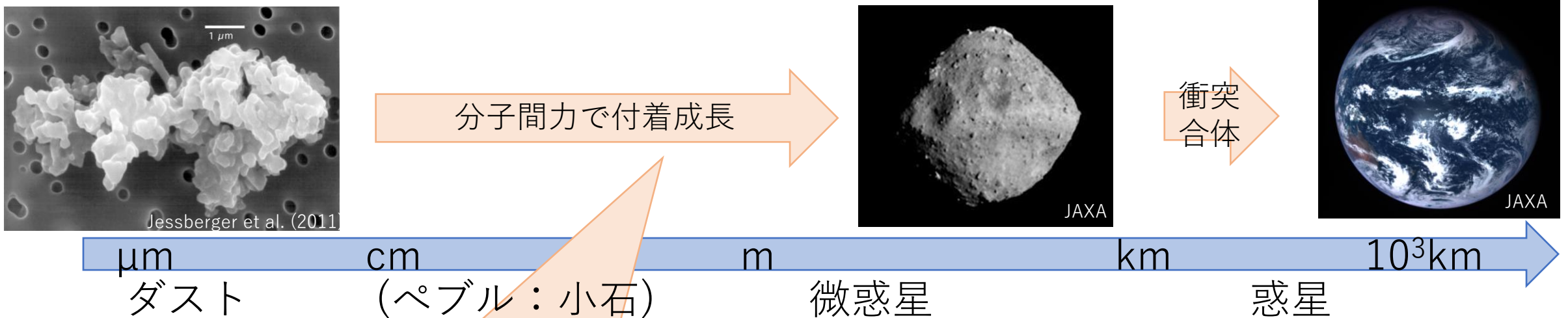
原始惑星系円盤における乱流とダスト成長 (天体形成研究会)

筑波大学 物理学類 4年 岩本歩夢

- 研究背景(惑星形成の過程)
- 中心星落下問題
- 衝突破壊問題
- 乱流クラスタリング
- ストリーミング不安定性
- 先行研究Ishihara et al.2018
- まとめ
- 自分の研究へ向けて

研究背景(惑星形成の過程)

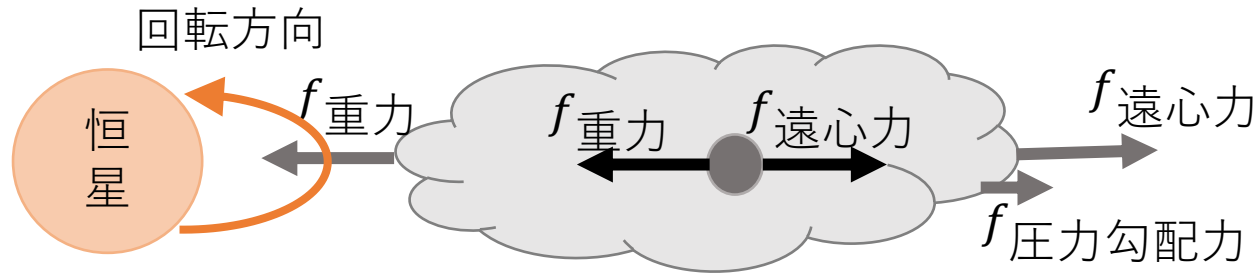
惑星は原始惑星系円盤に存在するダストから形成される。



- ・ **中心星落下問題**
(成長する前に中心星に落ちていってしまう)
- ・ **衝突破壊問題**
(ダストが衝突するときに付着せず壊れてしまう)

- ・ **乱流クラスタリング**
乱流の渦度が低い領域にダストが集まる効果
- ・ **ストリーミング不安定**
ダストが多いとき、風上・風下で受けるガス抵抗に差が生まれて相対速度が小さくなる

中心星落下問題

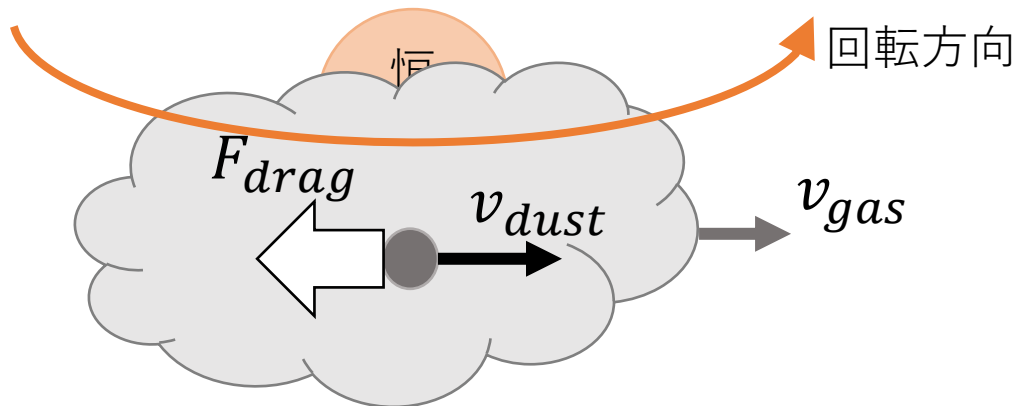


$$f_{\text{重力}}(r) = -\frac{GM}{r^2}$$

$$f_{\text{遠心力}}(r) = +r\Omega^2$$

$$f_{\text{圧力勾配力}}(r) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} > 0$$

- 円盤ガスには圧力勾配の力が働く。ガス中のダストには働かない。
(陸上で水中のような浮力を感じないのと同じ)



$$F_{\text{drag}} = -m \frac{v_{\text{dust}} - v_{\text{gas}}}{\tau_{\text{stop}}}$$

τ_{stop} : 制動時間。ダストがガスの運動になじむまでの時間。

ダストの大きさ、ガス密度の関数。

$$\text{ダストが小さいとき(エスプタイン領域)} \quad \tau_{\text{stop}} = \frac{\rho_d a}{\rho_g c_s}$$

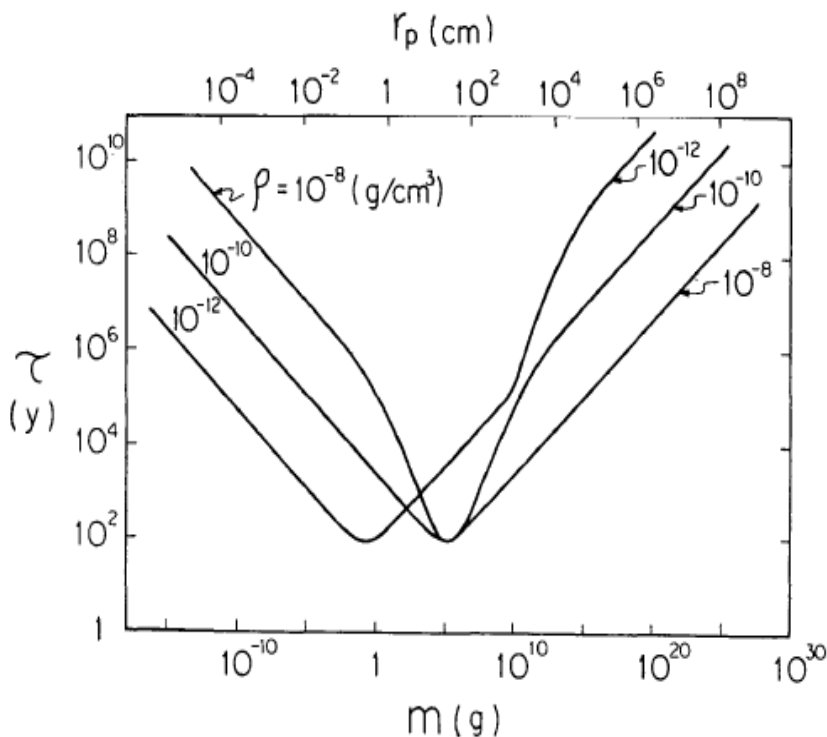
- ガスはダストよりもわずかに遅く回転するので、
ダストはガスによる抵抗(向かい風)を受けて角運動量を失っていく。

中心星落下問題

- Adachi et al. 1976よりダストが小さいときの動径方向の落下速度は

$$v_{drift} = \frac{2\Delta v}{St + St^{-1}}$$

$St = \Omega_k \tau_{stop}$: ストークス数
 Ω_k : ケプラー角速度



落下速度はストークス数 St 、制動時間 τ_{stop} を介してダスト径に依存する。

MMSNモデルを仮定すると、

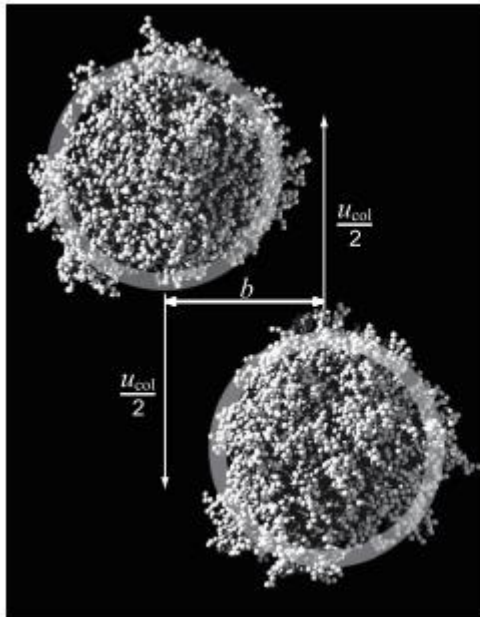
1AUに置いたcmスケールのダストは100年程度で中心星に落下してしまう！

このタイムスケールよりも速くダストを成長させ、落下を回避する必要がある。

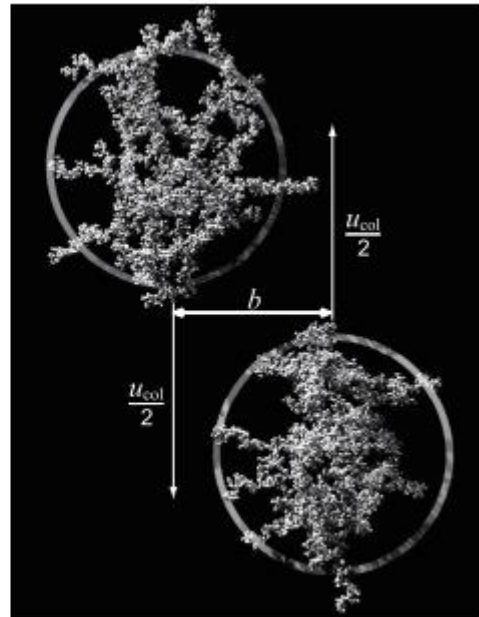
衝突破壊問題

- ダストが衝突するとき、相対速度が大きいと付着せず跳ね返ったり、破壊されてしまう。

(Wada et al.2009)



compact aggregate

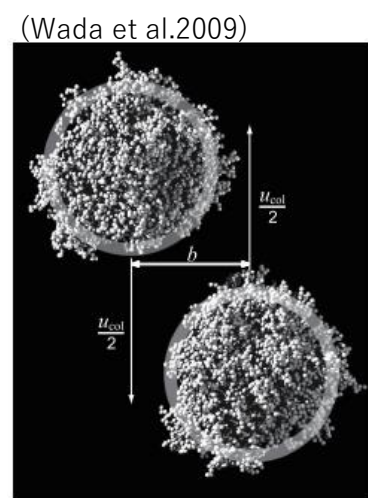


fluffy aggregate

- 密度が高い(compact)なダストよりも、密度が低い(fluffy)なダストのほうが付着しやすいことが分かっている
- 特に、fluffyな氷ダストでは、中心星落下問題、衝突破壊問題を回避できる。(Kataoka et al.2013)
- compactなケイ酸塩ダストの成長過程は未解明。

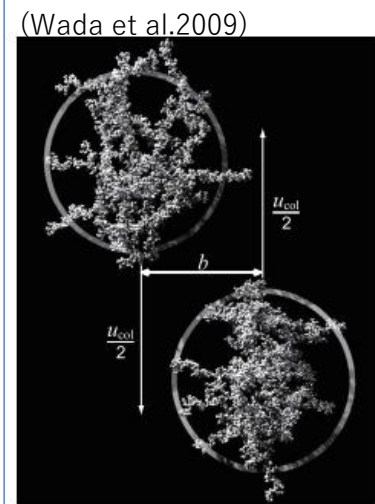
衝突破壊問題

- ダストを粘着性弾性球体として、表面エネルギーを考えるJKR理論に基づくN体シミュレーションで付着する限界の速度 v_{crit} を調べると、(Wada et al. 2013)



$$v_{crit} = 1.1 \left(\frac{a}{0.76\mu\text{m}} \right)^{-5/6} \text{ m/s}$$

...silicate compact dust



$$v_{crit} = 60(80) \left(\frac{a}{0.1\mu\text{m}} \right)^{-5/6} \text{ m/s}$$

...ice fluffy dust

$$v_{crit} = 6(8) \left(\frac{a}{0.1\mu\text{m}} \right)^{-5/6} \text{ m/s}$$

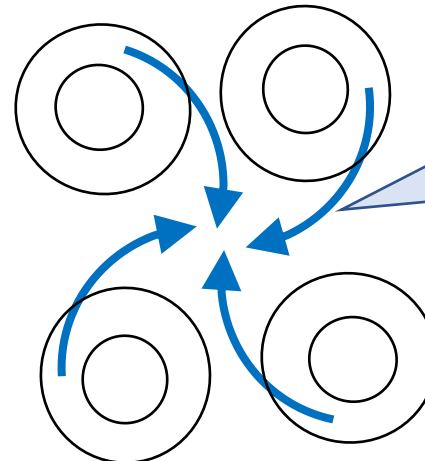
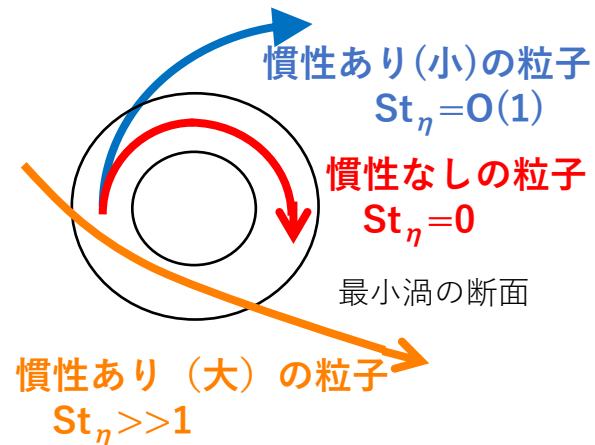
...silicate fluffy dust

- カッコ内は異なるサイズ同士の衝突時の値。
- Ishihara et al.2018ではcompact silicate ダストでの成長を目指す

乱流クラスタリング

$$St_{\eta} = \frac{\tau_{stop}}{\tau_{\eta}} = \frac{\text{制動時間}}{\text{最小渦の代表時間}}$$

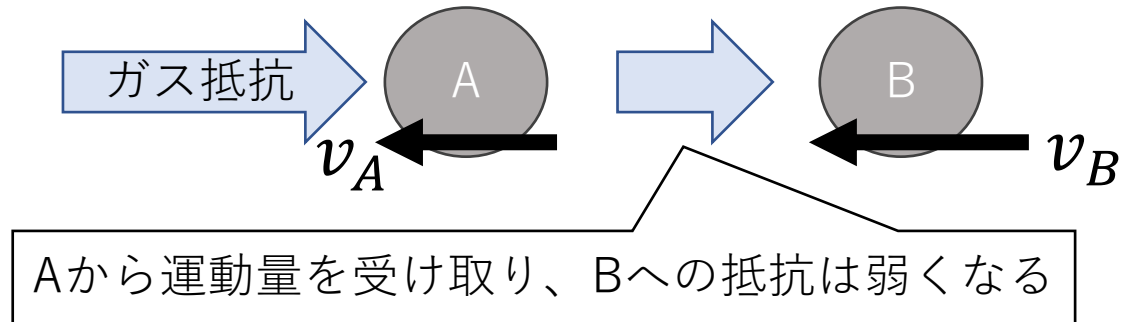
- 乱流の渦に乗って運動するダストは、
(最小渦に対する)ストークス数 St_{η} によって運動の様子が異なる。
- $St_{\eta} < O(1)$ のダストは渦から押し出されて渦度の低い領域に集団を形成する。(乱流クラスタリング効果)
- $St_{\eta} \ll 1$ だと渦と共に運動してクラスタ形成なし。
- $St_{\eta} \gg 1$ だと渦とは関係なく運動してクラスタ形成なし。



ダストが密集して、
衝突しやすくなる！

ストリーミング不安定性

- 中心星落下の過程で、軌道上の前方(風上)のダストは後方(風下)のダストよりも大きくガス抵抗を受けるので、
相対速度が小さくなる。 →付着しやすくなる！



ただし、ダストーガス比がある臨界値 Z_c を超える必要がある。

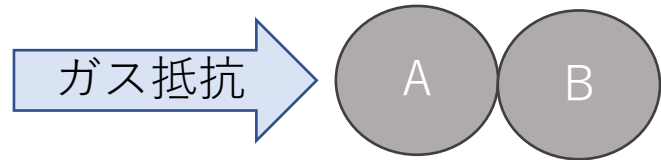
Z_c は St の関数であることが分かっている。

$$St = 10^{-2} \text{ で } 0.01 < Z_c < 0.02$$

$$St = 10^{-3} \text{ で } 0.03 < Z_c < 0.04 \quad (\text{Yang et al. 2017})$$

具体的には、以下が要件となる。

- ダストーガス比が数倍であること
- 小石(pebble:cmスケール)サイズまで成長したダスト($St = 0.01$ 程度)



$$|v_{BA}| = |v_A - v_B| < v_{crit} \text{ なら付着できる}$$

先行研究Ishihara et al.2018

- 高レイノルズ数 Re ($Re > 10^4$)の大規模直接数値シミュレーション (DNS)

原始惑星系円盤の乱流中を運動するダストを再現する。

→レイノルズ数：流体に働く慣性力と粘性力の比。

非線形性を表す。大きいと乱流的(無秩序)、小さいと層流的。

$Re > 100 \sim 1000$ は乱流の影響について報告があるが、 $Re > 10^4$ のDNSはほとんどされていない

→DNS：ナビエストークス方程式を直接数値積分する。

細かい渦まで正確に扱える一方、計算コストが Re とともに増大してしまう。

先行研究Ishihara et al.2018

- 計算方法

流体の計算
(非圧縮ナビエーストークス方程式)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

- 空間：フーリエスペクトル法
- 時間：4次ルンゲクッタ法

粒子の運動

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{V}$$

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{1}{\tau_{stop}} (\mathbf{u} - \mathbf{V})$$

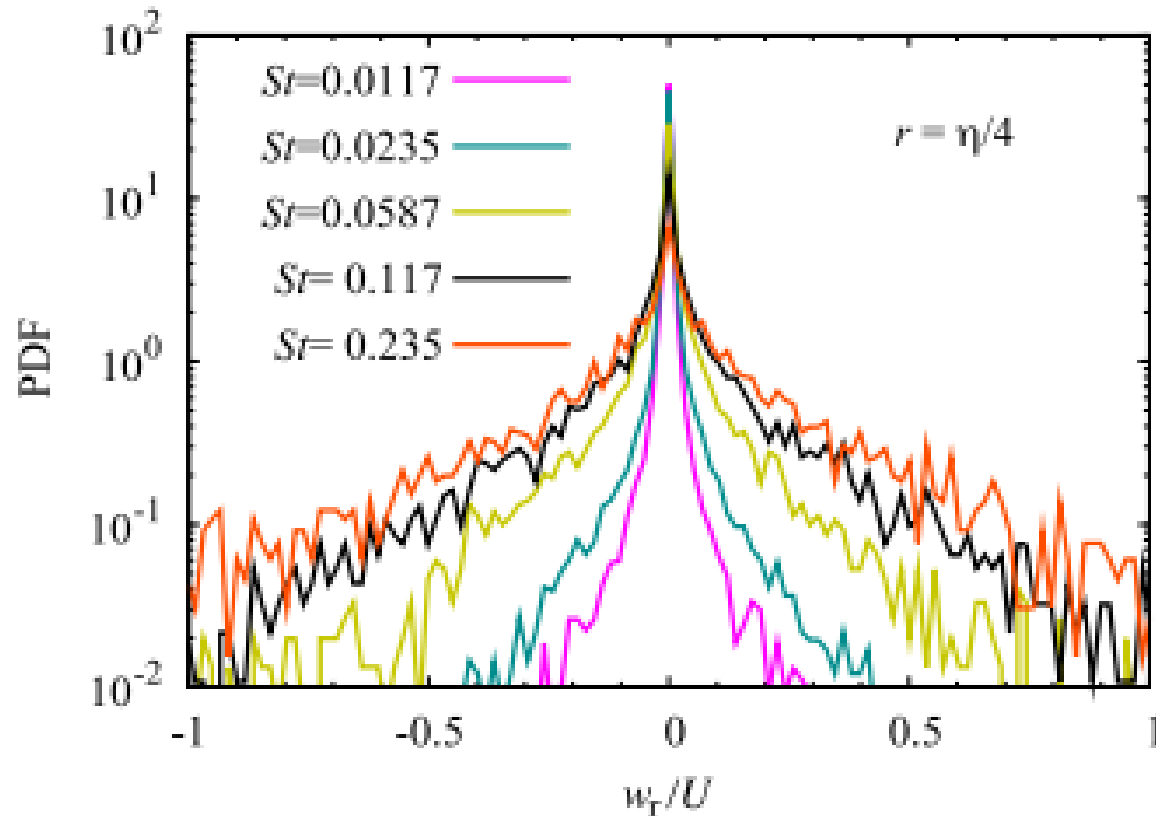
- 空間：3次スプライン補間
- 時間：4次ルンゲクッタ法

初期条件：十分発達した乱流場

$N = 128^3, 256^3, 512^3$ の粒子をランダムに配置

先行研究Ishihara et al.2018

- 結果一 相対速度の分布



- St に依存して、 St が大きくなると分散も大きくなる。

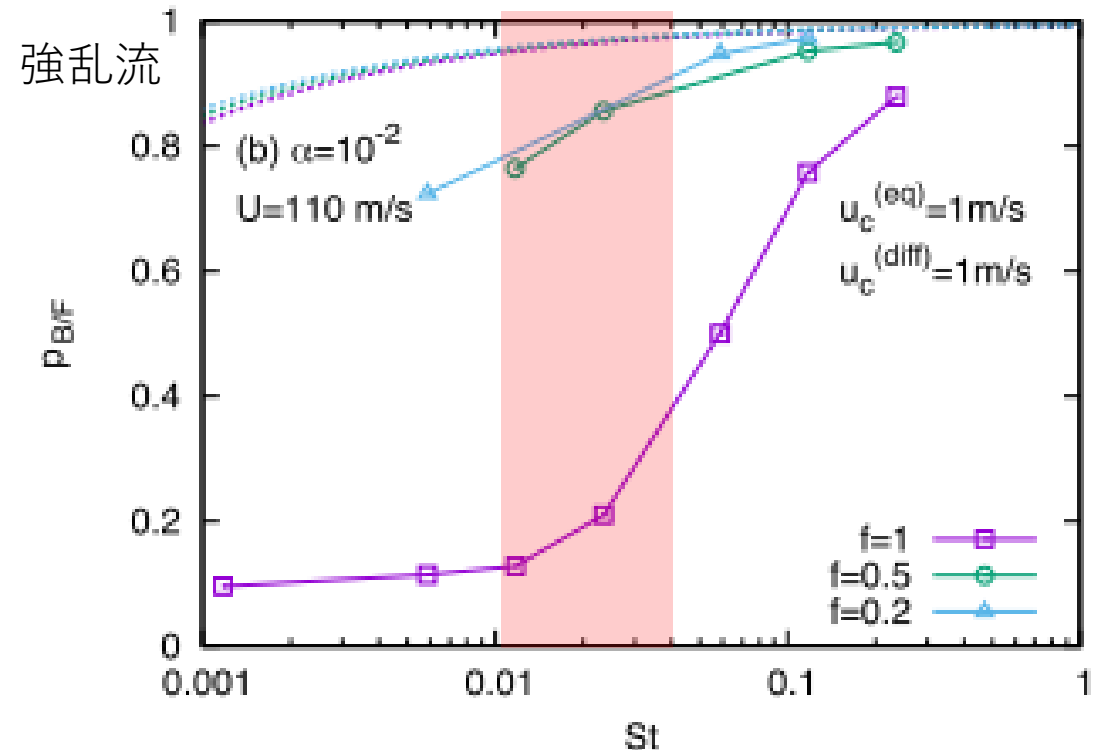
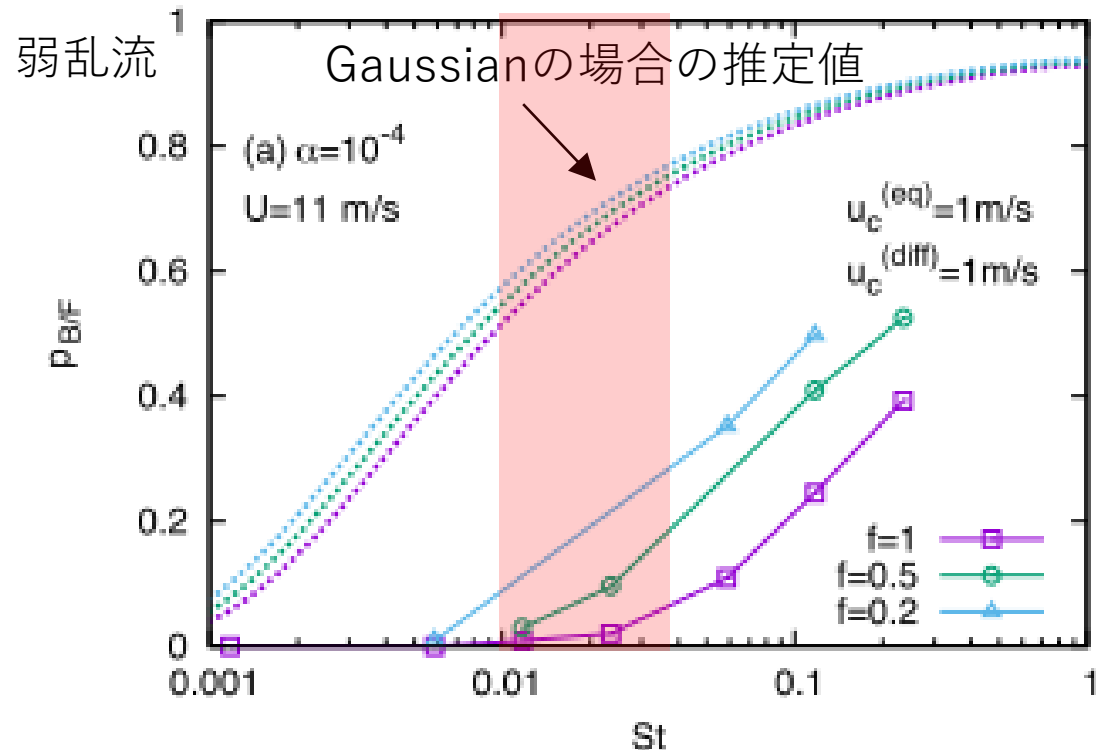
←(乱流クラスタリングの影響?)

- Gaussianにはならず、相対速度が小さい粒子が多くなっている。

Gaussianを仮定していた
従来の理論予測よりも、
限界付着速度を下回る粒子が多い。
→ 跳ね返り・破壊率が小さくなる

先行研究Ishihara et al.2018

- 跳ね返り・破壊率



従来の理論予測よりも成長しやすいことが予想される。

強乱流でも同じサイズの粒子では跳ね返り・破壊率は低い。

同じサイズの粒子は生き残ってcmサイズに成長できる可能性がある。

まとめ

- 相対速度の分布は従来の推定と異なり、相対速度の小さい粒子が多くなる分布が得られた。
- 強乱流場中でもcmサイズまでダストが成長できる可能性があることが分かった。
- 乱流クラスタリング効果でダストーガス比は数倍になる。
→ストリーミング不安定により岩石微惑星に成長できる可能性が示された。

自分の研究へ向けて

- ダストが合体して大きくなっていく過程を考慮に入れどう成長するか
- ストリーミング不安定性でkmサイズの微惑星まで成長できるか
- 先行研究のような乱流によるダストの成長は
中心星落下問題、衝突破壊問題を回避できているのか
- ほかのダスト→微惑星形成過程にはどのようなものが考えられているか
- 観測との比較

ストリーミング不安定性(補足)

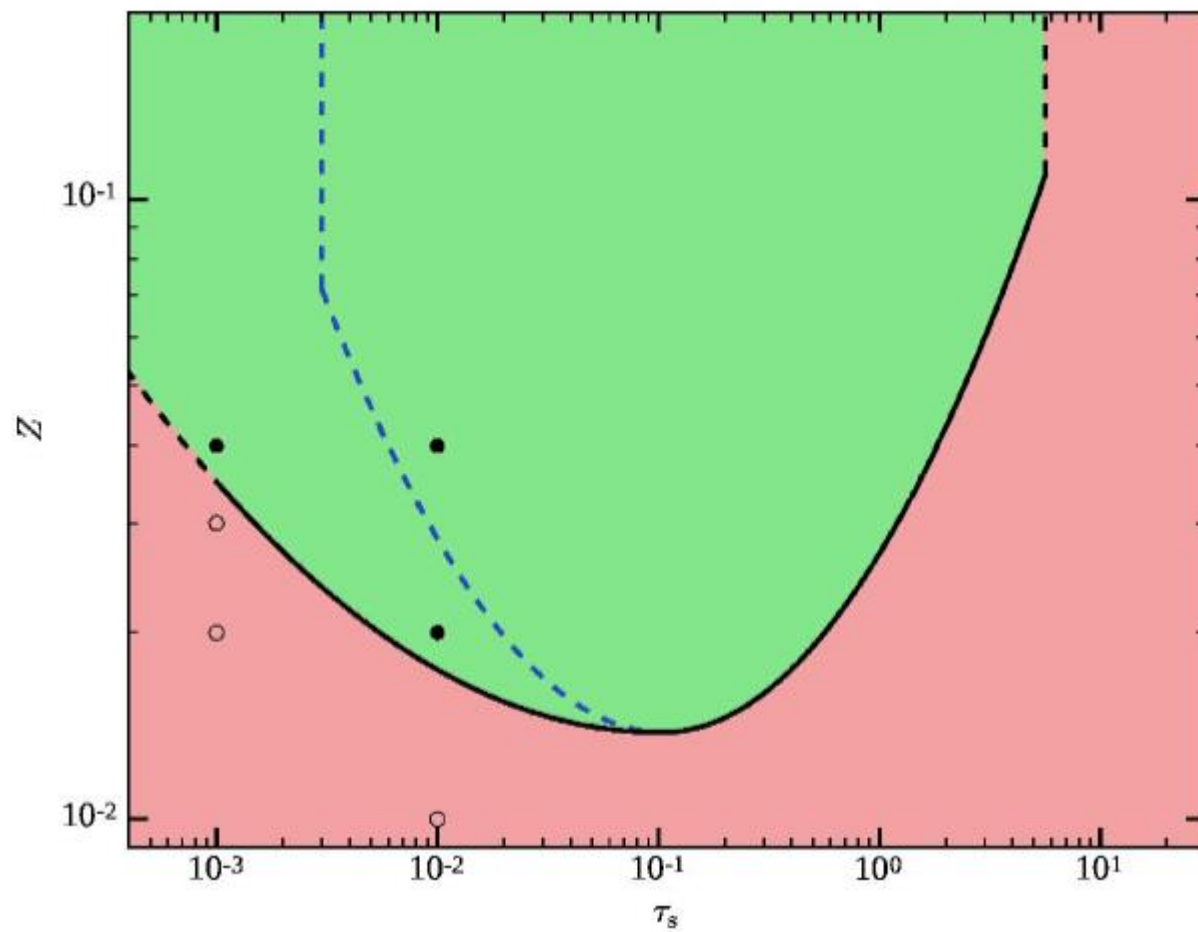
• (Yang, C.-C., Johansen, A. et al. Fig9)

●→ストリーミング不安定あり

○→ストリーミング不安定なし

黒実線→Carrera et al.2015

緑の領域ではストリーミング不安定が有効になりうる。



ストークス数と粒子径の関係

- (Johansen, A., Blum, J., Tanaka, H., et al. 2014)

