

# 微惑星形成の重力不安定モデルにおける Drag Instability

白井 陽祐 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

微惑星形成における重力不安定モデルは  $\mu$  m サイズから cm サイズの円盤中のダストから自己重力不安定による収縮を経て微惑星を形成するモデルである。自己重力による不安定が起きるにはダスト密度が円盤中で極端に高くなるような領域ができることが必要であるが、円盤を最小質量モデルに仮定すると恒星の重力などによって平均場的にそのような領域を作ることは困難であると考えられている。その他のメカニズムで局所的に高密度な領域が出来る可能性があるが、そのひとつとして考えられるのが Drag Instability と言われるメカニズムである。今回は Chiang&Youdin (2010) から重力不安定モデル全体の概観と Drag Instability のメカニズムを理解することに注力した。

## 1 Introduction

原始惑星系円盤中のダストは恒星の重力によって垂直方向に赤道面に向かって沈降し赤道面付近にダスト密度の高い層が形成されると考えられる。しかし、乱流やケルビンヘルムホルツ不安定の影響によってダストの沈降そのものやダスト層全体が薄くなることが妨げられる可能性が指摘されている。したがって平均場的にダストが自己重力不安定に陥るまで高密度に濃集することが困難であると考えられる。恒星重力以外の要因によってダストが局所的に濃集する可能性として、ガス圧が高い領域や乱流渦の隙間にダストが濃集していくメカニズムなどが考えられている。その中でも本発表ではダスト層が一定程度形成された後に発生する Drag Instability に注目する。局所的な圧力勾配へのダストの濃集や乱流渦の隙間へのダスト濃集はダスト層の形成に関わらず発生するが、Drag Instability はガスによる drag がダスト粒子の運動に対して働く結果として、ダストの密度ゆらぎを増大させ不安定を招くメカニズムであり、ダスト層における重力不安定を議論する上で重要である。この不安定はダスト層がある程度成層した場合に必ず発生すると考えられるためその詳細を理解することは微惑星形成プロセスを理解する上で重要な問題である。

## 2 Methods

Drag Instability を表す基礎方程式を Goodman&Pindor (2000) に基づいて示す。

ダスト層を円盤径方向一次元で垂直方向に積分した面密度とともに考え、径方向のダストの運動に対してダスト面密度の関数によって与えられるガスによる drag が働くモデルを考える。

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\Sigma v) = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g - \gamma(\Sigma)v$$

$\Sigma$  は面密度、 $v$  はダストの径方向への運動の速度、 $\gamma$  はダストにはたらくガスによる drag の大きさを示す係数を表し、 $g$  は重力・圧力・コリオリ力を代理する項である。

この基礎方程式系に対して以下の  $\gamma$  の一次のテイラー展開による近似を用いてフーリエ依存 ( $\exp(\Gamma t - ikx)$ ) の線形摂動を与え安定性の解析を行う。(  $\Gamma$ : 実部が成長率、虚部が角振動数を表す定数/ $i$ : 虚数単位)

$$\gamma(\Sigma) \approx \gamma_0 + d\gamma/d\Sigma|_0 \Sigma'$$

### 3 Results

以上により線型安定性解析から以下の分散関係式を得ることが出来る。

$$\Gamma = \frac{\Gamma_0}{2} \left( -1 + 2i\tilde{k} \pm \sqrt{1 - 4i\delta_\gamma \tilde{k}} \right)$$

$$\tilde{k} \equiv kv_0/\gamma_0, \delta_\gamma \equiv d\ln\gamma/d\ln\Sigma|_0$$

この分散関係式から  $\delta_\gamma \neq 0$  に対して必ず正の角速度を持つことが分かる。これによりガスによる drag がダストに対して集合的に働く場合必ず不安定をもたらすことが示されている。

成長のメカニズムを知るためにモード解析を行う。 $\Gamma$  の実部に着目して成長モードの  $\delta_\gamma$  に関するテイラー展開より

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_1 + \Gamma_2 = ikv_0 - i\delta_\gamma kv_0 + \gamma_0 \tilde{k}^2 \delta_\gamma^2$$

これと基礎方程式から  $v' = v'_0 + v'_1 + v'_2$  を求めると

$$v'_0 = 0$$

$$v'_1 = -\delta_\gamma (\Sigma'/\Sigma_0) v_0$$

$$v'_2 = -(\Gamma_1/\gamma) v'_1 = -i\tilde{k}\delta_\gamma^2 (\sigma'/\Sigma_0) v_0$$

$\Sigma', v'_0, v'_2, v'_2$  の変動を表したのが図 1 である。 $\delta_\gamma$  の一次の項を見ると  $v'_1$  は  $\Sigma'$  とともに大きくなる。 $\delta_\gamma > 0$  ならドリフト速度は密度極大に向かって drag force の摂動によって遅くなる。波は拡大しないが速度は変化する。 $\delta_\gamma$  の二次の項を見ると  $v'_1$  の加速は drag の対象となり二つ目の流  $v'_2$  を引き起こす。 $v'_2$  は  $v'_1$  の符号が密度極大 (極小) の場所で変わることから位相が  $-\pi/2$  ずれている。これが密度の摂動を増大させている要因である。

### 4 Discussion

Youdin&Goodman(2005) では 3次元ダスト・ガスの 2 流体モデルを使ってダスト-ガス間の相互作用を考慮して同様の安定性解析を行っているが Goodman&Pindor (2000) によるガスの drag がダストに対して集合的に働くと仮定した Drag Instability による不安定性解析の結果と同様の不安定性があること

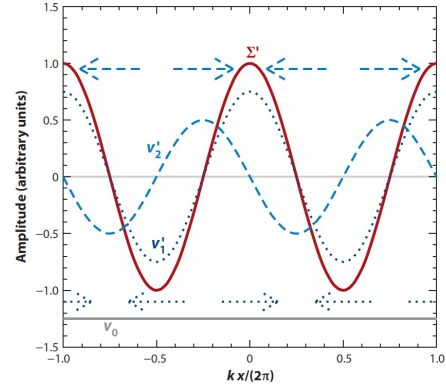


図 1: Chiang&Youdin(2010). より引用。縦軸は摂動の振幅、横軸は径方向の座標を摂動の波長で規格化したものを表す。平衡状態における径方向内側へのダストのドリフト速度は  $x$  近傍においてローカルに  $v_0$  で一定とし、灰色の実線で示している。赤の実線が波長  $2\pi/k$  の面密度の摂動 ( $\Sigma'$ )、濃青の破線が  $\delta_\gamma$  の一次のダストの速度の摂動 ( $v'_1$ )、青の破線が  $\delta_\gamma$  の二次のダストの速度の摂動 ( $v'_2$ ) を表している。また、濃青の破線の矢印が  $v'_1$  による、青の破線の矢印が  $v'_2$  によるダストの mass flux を表す。

が示されている。Youdin&Goodman(2005) においてはダスト層のダスト-ガス比とダストのストップングタイムが不安定の成長に対して重要なパラメーターであることが示されているが、このことから Drag Instability をケルビンヘルムホルツ不安定やダストサイズの合体成長による変化と共に考える必要があることを示している。

### 5 Conclusion

今回は Drag Instability 単体でのダストの濃集について理解することに注力したが、今後 Drag Instability とその他の不安定過程やダストの濃集メカニズム、ダストサイズ分布の進化がどのように関連、相互作用して自己重力不安定の発生に対して影響を及ぼすのかについて理解を深め検討していきたいと考えている。

## 6 Reference

E.Chiang and A.N.Youdin. 2010, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2010. 38:493-522

J.Goodman and B.Pindor. 2000, arXiv:astro-ph/9112538v1

Andrew N. Youdin and Jeremy Goodman.2005, arXiv:astro-ph/0409263v1