

重力不安定による微惑星形成のN体シミュレーション

京都大学 理学部 道越 秀吾¹, 犬塚 修一郎²

国立天文台 小久保 英一郎³

微惑星の形成メカニズムの有力なシナリオの一つとして、重力不安定性に基づく説がある。まず、中心星の重力によって原始惑星系円盤内の塵粒子が沈殿し、赤道面上に高密度塵粒子層が形成される。塵粒子密度が十分に大きくなると、自己重力不安定によりキロメートル程度の微惑星が形成される。この重力不安定性の時間発展はケプラー時間程度で起こるため、ガスとの摩擦による中心星への落下の時間尺度よりも非常に速い。従って、中心星に塵粒子は落下せず、微惑星が形成されうる。これまでのところ、重力不安定による微惑星形成の非線形段階については十分な研究が行われていない。我々はその研究の第一歩として、ガスが無いダストだけの円盤についてN体シミュレーションを行った。その際、スライドする箱による局所N体問題を扱った。粒子の衝突のモデルとして Accretion model を用いた。その結果、微惑星の形成過程は、非軸対称な密度パターンの形成、微惑星の形成、微惑星の急速な成長の3つに分けられることが分かった。

1 微惑星形成

1.1 惑星形成のシナリオ

惑星形成の標準モデルによると、惑星の固体成分の成長大きく2つに分けられる。まず最初の段階では、ミクロン程度のダストが成長しキロメートル程度の岩石に成長する。このキロメートルサイズの岩石のことを微惑星と呼ぶ。そして、次の段階では、微惑星は互いに衝突を繰り返し、地球型惑星や木星型惑星のコアになったと考えられている。微惑星の成長の段階では、ガス摩擦は弱い。しかし、微惑星が形成される前の段階ではガスとダストは非常によく相互作用し様々な複雑な現象を引き起こす。

ダストの合体成長は、センチメートル程度まで続くと考えられている。しかし、センチメートルからキロメートルサイズまでの成長はよく理解されていない。メートルサイズまでダストが成長したときに、ガス摩擦との相互作用によって、非常に早いタイムスケールで中心星に落下する。1 AU付近ではおよそ100年のタイムスケールである。単純なランダムな相互衝突による成長を考えた場合100年よりも成長が遅く、メートルサイズ以上に成長できない。

¹E-mail: shugo@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

²E-mail: inutsuka@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

³E-mail: kokubo@th.nao.ac.jp

この問題を克服する1つの有力なモデルが重力不安定モデルである。まず、中心星の重力によって原始惑星系円盤内のダストが沈殿し、赤道面上に高密度ダスト層が形成される。ダストの密度が十分に大きくなると、自己重力不安定が起きる。自己重力不安定の最大波長で分裂すると考えればキロメートル程度の微惑星が形成される。この重力不安定性の時間発展はケプラー時間程度で起こるため、ガスとの摩擦による中心星への落下のタイムスケールよりも非常に速い。従って、中心星へのダストの落下を避けることができる。

1.2 重力不安定のシミュレーション

重力不安定は、微惑星形成の1つの有力な説であるが、これまでのところ線形解析が行われただけで本格的なシミュレーションは少ない。そこで本研究は、ダストの N 体シミュレーションを行い重力不安定による微惑星形成過程を詳細に調べた。以下、研究結果を報告する。

2 シミュレーション

2.1 計算方法

中心星の質量を M_* 、ダストの質量をそれぞれ m_i とする。回転座標系 (x, y, z) を導入する。 x 軸は半径方向外側に向いており、 y 軸は回転方向、 z 軸は赤道面から鉛直上向きに向いている。座標原点は、半径 a 上を回転角速度 Ω_K で回転している。ここで、以下の仮定をする： $m_j \ll M$ 、 $|x_j|, |z_j| \ll a$ 、 $|\dot{x}_j|, |\dot{z}_j| \ll a\Omega_K$ 、 $|\ddot{x}_j|, |\ddot{z}_j| \ll a\Omega_K^2$ 。時間を Ω_K^{-1} 、長さをヒル半径 $ha = r_H$ 、質量を $h^3 M_*$ によってスケールする。ここで、 $h = (2m_p/3M_*)^{1/3}$ 、 m_p は特徴的なダストの質量である。このとき、粒子系の方程式はヒル方程式と呼ばれ

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= 2 \frac{dy_i}{dt} + 3x_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{m_j}{r_{ij}^3} (x_j - x_i), \\ \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= -2 \frac{dx_i}{dt} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{m_j}{r_{ij}^3} (y_j - y_i), \\ \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= -z_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{m_j}{r_{ij}^3} (z_j - z_i), \end{aligned} \quad (1)$$

とあらわされる。右辺の第一項は、コリオリ力、第二項は、潮汐力と太陽の重力、第三項は、自己重力をあらわす。

また、境界条件はスライドする箱による周期境界条件である。図1の計算領域のコピーが配置されており、内側と外側の箱はそれぞれ逆方向にスライドしている。また、重力の計算にはカットオフを設けてある (図1)。

衝突は Accretion モデルを用いた。2つのダストが接触しているときに次の式を用いて速度を変化させる：

$$\mathbf{v}'_i = \mathbf{v}_i - \frac{m_j}{m_i + m_j} (1 + \epsilon) (\mathbf{n}_{ij} \cdot \mathbf{v}_{ij}) \mathbf{n}_{ij}, \quad (2)$$

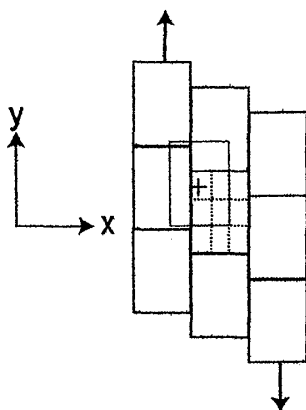


図 1: 計算領域の図である。陰をつけた領域が計算領域である。点線で分割された 9 つの領域が、サブ領域である。左上の十字で表された点にダストがあるとする。このときこの領域のまわりに計算領域と同じ大きさの領域を設ける。これを仮想領域と呼ぶ。仮想領域内の他のダストの重力の影響を受ける。

$$\mathbf{v}'_j = \mathbf{v}_j + \frac{m_i}{m_i + m_j} (1 + \epsilon) (\mathbf{n}_{ij} \cdot \mathbf{v}_{ij}) \mathbf{n}_{ij}. \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{v}_{ij}$ は相対速度であり、 $\mathbf{n}_{ij}$ はダストの相対位置を表す単位ベクトルである。そして、衝突後の速度を用いて、2 つの粒子が重力的に束縛されているかどうかを調べる。重力的に束縛されているときは、2 つの粒子を 1 つに結合させる。

2.2 計算結果

図 2 が計算結果である。微惑星の形成過程は以下の通りである。まず、一様のダスト分布が続く。このときダスト通しの非弾性衝突が起こり徐々に速度分散が減少している。そして、速度分散が十分に小さくなると重力不安定が起きる。これが $t = 1.0T_K$ の段階である。重力不安定時に斜めの密度パターンが現れる。そして、斜めの密度パターンの密度の濃い場所で微惑星の分裂生成が起きる。そして、微惑星の合体成長がすぐに始まり巨大な微惑星が形成される。最終的には数個の大きな微惑星が形成されて進化は止まる。

様々なパラメータを用いて依存性を調べた。その結果、初期に重力不安定に対して安定であれば普遍的にこのような形成過程を経て微惑星が形成されることが分かった。

3 まとめと展望

N 体シミュレーションによって重力不安定による微惑星の形成過程を調べた。線形解析からの予測では最大不安定波長程度に分裂すると予測していたが、今回のシミュレーションによって、線形解析から予測される大きさよりもすぐに大きく成長することが明らかとなった。

現実には、どこまで微惑星が大きく成長できるかが重要な問題である。今後は、成長の飽和を詳細に調べる予定である。

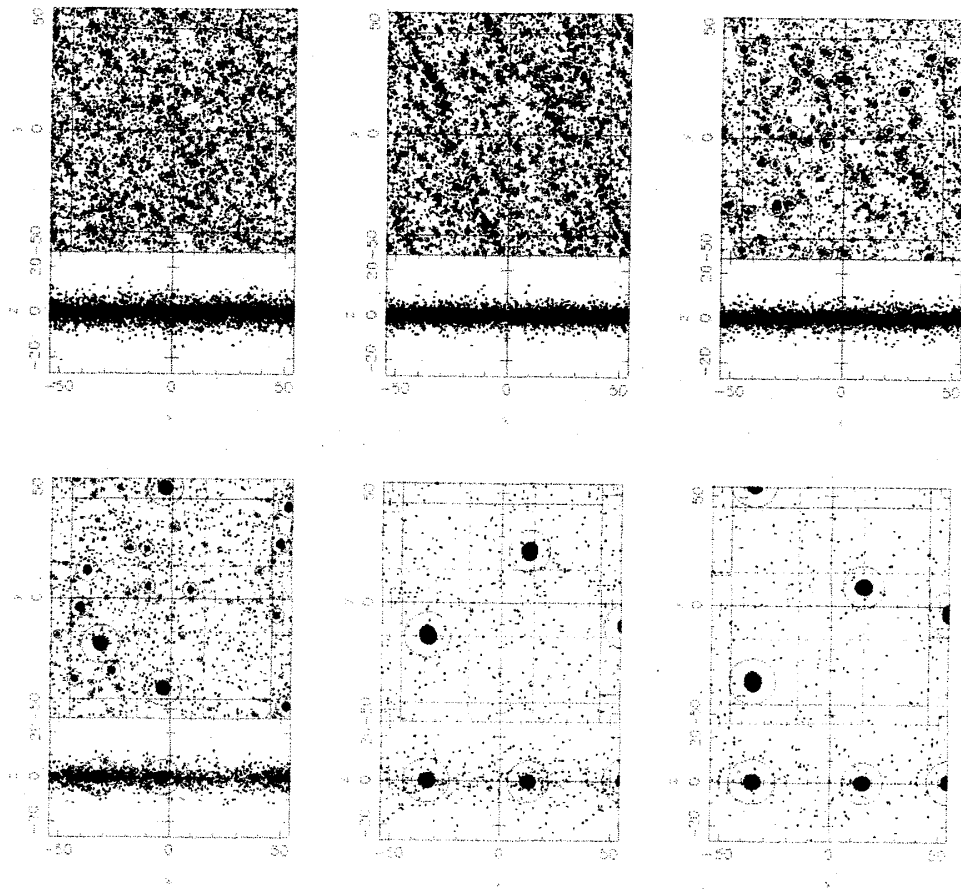


図 2: 計算結果のスナップショットである。時間は $t = 0.5T_K$ (左上), $t = 1.0T_K$ (中央上), $t = 2.0T_K$ (右上), $t = 3.0T_K$ (左下), $t = 6.0T_K$ (中央下), $t = 10.0T_K$ (右下) である。各スナップショットの上の段は、 xy 平面の射影であり、下の段は xz 平面の射影である。

参考文献

- 1) Michikoshi, S., Inutsuka, S., Kokubo, E., & Furuya, I. 2007, *Astrophys. J.*, 657, 521
- 2) Furuya, I. 'Formation of Planetesimals through Gravitational Instability of a Dust Layer' Kobe University, 2004.
- 3) Michikoshi, S. 'Theoretical Study on Planetesimal Formation through Gravitational Instability' Kyoto University, 2007.
- 4) Tanga, P., Weidenschilling, S. J., Michel, P., & Richardson, D. C. 2004, *A&A*, 427, 1105