国立天文台 天文学データ解析計算センター
大規模シミュレーションプロジェクト 成果報告書（平成16年度）

原始惑星系円盤内のダスト層における重力不安定による微惑星形成

カテゴリC　プロジェクトID：rms58c
関谷 実,　矢本 史治,　弓場 慎也（九州大学）

I. Introduction

原始惑星系円盤から惑星系が形成されるまでの段階において、円盤内のダスト（数 μm ～ 数 mm）から微惑星（数 km）が形成するまでの過程は現在でもまだよくわかっていない。この過程で有力なモデルには「付着成長モデル」と「重力不安定モデル」がある。本研究では後者のモデルについて数値流体シミュレーションを行った。

これまでの重力不安定に関する研究は、線形解析によって重力不安定の臨界状態を導いているものや重力不安定の臨界状態になるにはどのような条件が必要かを導いているものがほとんどである。一方、本研究では重力不安定の臨界状態に達したその後の進化に注目し、重力不安定によって密度がどのように変化していくのかを導いている。

II. Model

本研究では以下の仮定：(1) 軸対称2次元、(2) ダストのサイズが十分に小さい（$\leq$ 1mm）と仮定することによって、ダストとガスが十分に coupling しているとする1流体近似をおいている。1流体近似の仮定により、この混合流体は非圧縮とみなすことができる。また流体は理想流体に近似できる。したがって基礎方程式として、非圧縮の連続の式、オイラー運動方程式、自己重力のポアソン方程式を考慮し、MAC 法を用いて数値流体シミュレーションを行った。ダスト層の密度分布はガウス分布を与えた。この密度分布における重力不安定の線形解析は Yamoto and Sekiya (2004) によってなされている。その結果をもとに、本研究の初期条件を求めた。以下では、中心面に垂直な方向の空間スケールはダスト層のスケールハイトの4倍、メッシュ数は 256×256、中心星からの距離は 1AU での結果を示している。

III. Results

重力不安定の成長率が $\tilde{\omega}_{\rm i} = \omega_{\rm i}/\Omega_{\rm K}$=0.3 のときの結果を Fig. 1 に示している。図は円盤の z 方向に関して正の側のみを示している。

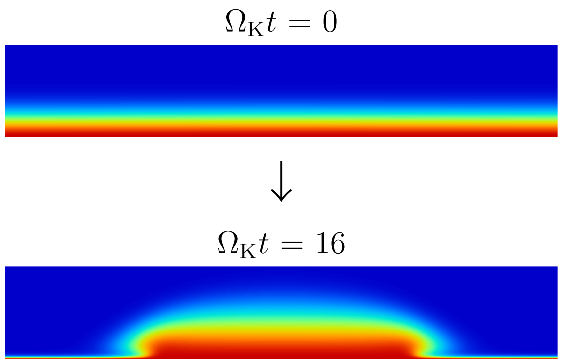

Fig. 1: 成長率 $\tilde{\omega}_{\rm i}$=0.3 のときの密度の変化。このときの中心面ダスト密度は臨界密度の約 1.1 倍である。動径方向のスケールは臨界波長とし、周期境界条件を用いている。

成長率 $\tilde{\omega}_{\rm i}$=0.5 のときの結果を Fig. 2 に示している。ダスト密度がガウス分布のときはダスト層のスケールハイトが中心面密度に反比例するので、この場合の空間スケールは成長率 $\tilde{\omega}_{\rm i}$=0.3 のときにくらべて約 0.9 倍になる。

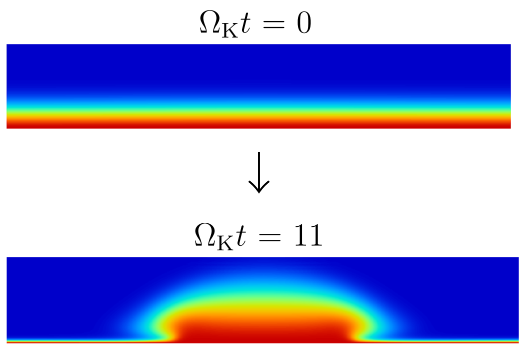

Fig. 2: 成長率 $\tilde{\omega}_{\mathrm{i}}$=0.5 のときの密度の変化。このときの中心面ダスト密度は臨界密度の約 1.25 倍である。空間スケールは成長率 $\tilde{\omega}_{\mathrm{i}}$=0.3 のときにくらべて約 0.9 倍である。

IV. Discussion

本研究の結果は初期条件に線形解析で求めた摂動量の値を用いている。非線形数値解と線形解析解の密度変化の比較例を Fig. 3 に示す。摂動量が小さいときは両者は一致しており、我々の計算コードが誤っていないための必要条件が満たされている。その一例を示している。図には示さなかったが、メッシュサイズを 64×64 に減らしても計算結果に大きな違いは無かった。このことも、計算コードの正しさを示している。

本研究ではダストとガスが十分に coupling していると仮定する 1 流体近似を用いているので混合流体は非圧縮である。したがって中心面密度が大きくなることはなく、成長率 ω_{i} も変化しない。(そのため、本研究では成長率 ω_{i} の値は恣意的に与えている。)一方、実際の原始惑星系円盤内では、ダストが中心面に向かって沈殿する。(つまり、ダストを流体とみなすとダストは圧縮性である。)これによって中心面の密度が大きくなり、重力不安定の臨界密度以上になった後も沈殿が続くことにより成長率 ω_{i} も徐々に大きくなると考えられる。そのため、重力不安定による微惑星形成を議論するためにはダストとガスを区別した 2 流体の計算をする必要がある。これが今後取り組むべき課題である。

V. Conclusions

- 原始惑星系円盤内のダスト層の重力不安定の臨界状態以降の時間発展を軸対称 1 流体近似の下で数値シミュレーションした。
- 摂動量が小さい間は非線形数値解は線形解析解と一致する。
- メッシュ数を変えても計算結果に大きな変化はない。

Reference

Yamoto F., Sekiya M., 2004. *Icarus*, **170**, 180-192.

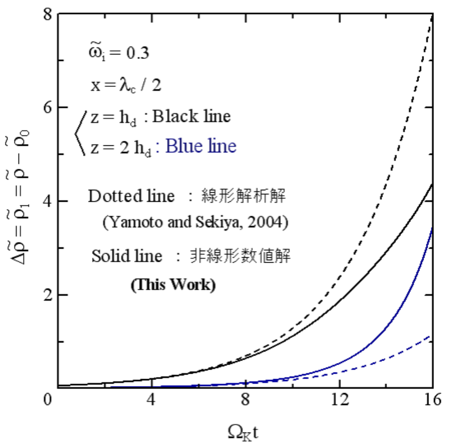

Fig. 3: 成長率 $\tilde{\omega}_{\mathrm{i}}$=0.3、$x = \lambda_{\mathrm{c}}/2$ (Fig. 1 における横方向の中心)、$z = h_{\mathrm{d}}$ (ダスト層のスケールハイト、黒線)もしくは $z = 2h_{\mathrm{d}}$ (青線)における線形解析解(点線)と非線形値解(実線)の摂動密度の時間変化を示している。どちらの z の位置でも時間がたつにつれて、非線形数値解において非線形項の効果が表れるため両者の差が大きくなる。$z = h_{\mathrm{d}}$ の位置では非線形数値解の値は線形解析解よりも小さくなるが、$z = 2h_{\mathrm{d}}$ の位置では線形解析解よりも大きくなることがわかった。