

氏名	みち こと しゅう ご 道 越 秀 吾
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3130 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Theoretical Study on Planetesimal Formation through Gravitational Instability (重力不安定による微惑星形成の理論的研究)
論文調査委員	(主 査) 助教授 犬塚修一郎 教授 中村卓史 教授 畑 浩之

論 文 内 容 の 要 旨

微惑星とは、惑星が形成された原始惑星系円盤に多量に存在したと考えられているキロメートルサイズの天体である。微惑星が合体成長して地球型惑星や巨大ガス惑星のコアになったと考えられている。しかし、微惑星の形成過程は、よく理解されていない。

原始惑星系円盤にはミクロンサイズ程度の塵粒子が存在した。塵粒子間のランダムな衝突によって、微惑星まで成長したとすると、メートルサイズの塵粒子の落下問題を避けられない。これは、メートルサイズの塵粒子は、ガスとの相互作用によって、角運動量を失い太陽に100年程度で落下するという問題である。太陽への落下を避けるには、高速な成長が必要である。そのモデルの1つが重力不安定説である。センチメートルの塵粒子からキロメートルサイズの微惑星まで数年で成長する。

塵粒子は太陽の重力によって、原始惑星系円盤の赤道面に沈殿する。その結果、赤道面に高密度ダスト層が形成される。ダスト層の密度が十分に大きくなれば重力不安定が起きる。しかし、これにも問題が指摘されている。沈殿が進むとケルビンヘルムホルツ不安定が起きて乱流となり塵粒子の沈殿が妨げられる可能性がある。

そこで、ケルビンヘルムホルツ不安定の研究を行った。塵粒子とガスの2成分を考慮し、線形解析を行い、不安定に対する塵粒子の影響を詳細に調べた。その結果、塵粒子とガスの相対運動を考慮すると、不安定の成長率が抑制されることが分かった。また、幅広いパラメータによって解析を行い、様々な現象の時間尺度を比較して重力不安定の可能性を調べた。ケルビンヘルムホルツ不安定によって乱流が起きたとしても、乱流中で塵粒子が合体成長可能であれば、5メートル程度まで成長したとき、重力不安定が起きる可能性があることが分かった。

また、ほとんどの重力不安定による微惑星形成の研究では、非線形段階でどのような進化が起きるか詳しく検討されていない。そこで、数値シミュレーションを行い、重力不安定による微惑星形成の過程を調べた。簡単な為にガスの効果を無視し、N体シミュレーションを行った。

まず、塵粒子間の非弾性衝突によって、塵粒子の速度分散が減少する。速度分散が十分に小さくなれば、重力不安定が起きる。その後の進化は、大きく3つに分けられる。(1)wake-like structure と呼ばれる密度のパターンの出現 (2)線形解析の見積もりと同程度の塵粒子塊の形成 (3)塵粒子塊な急速な合体成長。最終的に数年で計算領域内のほとんどの塵粒子を数個の微惑星が吸収する。

つまり、この結果は、線形解析による見積もり程度の微惑星の段階はすぐに終わり、急速に微惑星が成長することを示している。実際の微惑星は線形解析の見積もりよりも大きい。そこで、最終的な微惑星の質量を調べるためにより大きな計算領域で計算を行った。その結果、回転方向にある質量は全て掃き集めるが、半径方向に十分に大きな計算領域をとった場合、数個の微惑星が安定して存在できることが分かった。これは、原始惑星形成で知られている寡占的成長が早い段階で起きた可能性を示唆している。

論文審査の結果の要旨

道越氏の研究は惑星形成過程の理論的研究に関するものである。1995年の最初の系外惑星の発見に始まり、現在知られている系外惑星の数は約200個にも及び、世界中で非常に精力的な観測研究が続けられている。その結果、太陽系とは非常に異なるさまざまな形態の惑星系が多数存在していることが分かった。これに刺激を受けて、惑星形成過程についての物理的な研究は関連分野の多くの研究者などから大きな注目を受けているが、現在でも惑星形成シナリオには二つの大きな困難が存在している。一つは、中心星に落下するよりも早く塵粒子を集積させて微惑星を形成するメカニズムに理論的矛盾を含んでいることであり、もう一つは形成された惑星が原始惑星系円盤のガスとの重力的相互作用により中心星に落下してしまうという問題である。道越氏はこの大きな未解決問題のうちの前者に取り組んで研究を進めてきた。

原始惑星系円盤内の塵粒子は赤道面に沈殿して高密度層となり、重力不安定性を経由して微惑星と呼ばれるキロメートル・サイズの天体となって、より大きな惑星の前駆体となることが期待されている。学位論文の前半では、この塵粒子の沈殿した層が流体力学的に不安定となって乱流化し十分に沈殿できないという問題についての非常に詳細な線形解析の結果である。これまでの研究では塵粒子とガスの振る舞いを記述する際に、強結合近似を用いた解析しか行われていなかったため、塵粒子が大きなサイズにまで成長した場合については解析できていなかったが、道越氏はその近似を外して2流体についての解析を行い、不安定性の一般性を明らかにした。この結果、塵粒子のサイズが大きくなれば不安定とならずに沈殿を続け、微惑星を形成する段階まで進化する可能性があることを見つけた。この内容については米国天体物理学会誌に発表されている。

また、論文の後半では、塵粒子の沈殿が進んで、塵粒子の層が重力不安定性を経由して微惑星を形成する段階の直接数値シミュレーションによる解析結果である。このような直接シミュレーションでは粒子同士の自己重力を含める必要があるため非常に困難であり、これまでほとんどなされていなかった。道越氏はこの問題に対して、重力多体系専用計算機を利用することで局所的な計算を行い、その非線形発展段階を明らかにした。この結果は、塵粒子の沈殿過程及び長期的な微惑星の合体成長過程の研究を進める上で不可欠な物理的な理解を進めたと言える。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。