

氏 名 片岡 章雅

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1706 号

学位授与の日付 平成26年9月29日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Planetesimal Formation via Fluffy Dust Aggregates

論文審査委員 主 査 教授 小久保 英一郎
教授 竝木 則行
准教授 松尾 宏
教授 渡邊 誠一郎 名古屋大学
准教授 中村 昭子 神戸大学

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Dust coagulation is the first step of planet formation. However, several theoretical problems still remain in dust coagulation models. One of the main problems is the radial drift barrier, which is a problem that dust grains with a size of 1 m quickly fall onto the central star and no planetesimal can form. In addition, laboratory experiments and numerical simulations found other problems: the fragmentation and the bouncing problems. The former is that dust grains experience high-speed collisions resulting in collisional disruption, and the latter is that dust grains collide but sometimes bounce and do not form larger bodies. By contrast, astronomical observations have evidenced the grain growth in protoplanetary disks, which are the birthplace of extra-solar planets. It has been shown that protoplanetary disks possess millimeter-sized dust grains. Thus, we have to construct the dust coagulation theory overcoming the theoretical problems to explain the formation of planetary systems being consistent with the disk observations.

This thesis aims to elucidate the dust coagulation process by introducing porosity evolution of dust aggregates. In protoplanetary disks, dust grains stick to each other to form porous structure. These clusters are called dust aggregates. Dust grains are thought to form extremely porous aggregates in protoplanetary disks. However, compression mechanisms to form compact planetesimals are still uncertain. For example, it has been shown that collisional compression is inefficient to compress highly porous aggregates. Therefore, compression mechanisms other than collisions are required to explain planetesimal formation.

In this thesis, we introduce static compression of porous dust aggregates. First, we perform numerical simulations of dust aggregates and derive the compressive strength of porous dust aggregates. The derived compressive strength has a form of $P = (E_{roll} / r_0^3) \phi^3$, where E_{roll} is the rolling energy, r_0 is the monomer radius, and ϕ is the filling factor of dust aggregates. We also analytically derive the formula and confirm the results of the numerical simulations. In addition, the derived formula smoothly connects to the results of laboratory experiments of relatively compact silicate aggregates.

Next, in order to introduce the static compression to dust coagulation in protoplanetary disks, we consider two origins of static compression, which are due to gas drag and self-gravity. As a result, we show the overall porosity evolution of dust aggregates in protoplanetary disks: dust grains coagulate to form fluffy aggregates, and then they are compressed by the gas-drag pressure and by their self-gravity to form planetesimals. The size and mass of the planetesimals are consistent with comets in the solar system, which are believed to be the remnants of planetesimals. Moreover, we found that icy aggregates are free from the three problems of planetesimal formation, which are the radial drift, fragmentation, and bouncing problems. In this way, the proposed scenario is the first coherent theory of dust coagulation from grains to planetesimals.

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

Finally, to investigate the observational properties of porous dust aggregates, we calculate the opacities of porous dust aggregates. We find that the opacities of porous dust aggregates are characterized by the product of the aggregate radius and the filling factor, except for the case where the aggregate radius is similar to the wavelength. The results suggest that the aggregate radius and the filling factor mostly degenerate in observations. They also suggest that the millimeter-wave emission of protoplanetary disks, which has been interpreted as the emission from compact millimeter-sized grains, can be interpreted as the emission from the extremely porous dust aggregates. In addition, we also derive the analytical expressions of the absorption and scattering opacities of porous dust aggregates, which will greatly reduce the computational costs to calculate the opacity. Moreover, we find a difference in absorption opacity between compact and highly porous aggregates caused by the interference, which occurs when aggregate radius is similar to observation wavelengths. Using the difference, we propose a way to distinguish between compact grains and fluffy dust aggregates in expected future observations.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、惑星系形成の第一段階であるダスト(固体微粒子)からの微惑星形成について、ダストアグリゲイト(集合塊)の内部密度の進化を考慮してダストの付着成長を調べた理論的研究の成果を報告するものである。本論文は5章からなる。

第1章は序章であり、研究の背景と目的が示されている。原始惑星系円盤中のダストの運動と付着成長、微視的物理過程と構造進化の基礎過程が説明され、さらにこれまでの原始惑星系円盤のダスト観測の結果が紹介されている。そして、ダストから微惑星までの成長過程を理論的に明かにすることが本論文の目的であることが示される。ダストの成長過程には、ダストが成長する前に中心星に落下してしまう中心星落下問題、ダストどうしの高速衝突によってダストが壊れてしまう衝突破壊問題、そして衝突しても付着せずに跳ね返ってしまう跳ね返り問題が知られている。ダストアグリゲイトの付着成長は、これらの問題を回避してダストから微惑星を形成可能な仮説であるとこれまで示唆されている。しかし、ダストアグリゲイトの内部密度が減少から増加に転じる物理過程が重要な問題として残されている。本論文ではこの問題を解決するために、ダストアグリゲイトの静的圧縮の導入を試みる。静的圧縮を考慮してダストアグリゲイトの内部密度(もしくは空隙率)の進化を計算することで、氷ダストの現実的な付着成長過程を明かにする。

第2章はダストアグリゲイトの静的圧縮についてである。ダストは付着成長によって低密度のダストアグリゲイトを形成すると考えられている。微惑星を形成するためにはダストアグリゲイトの密度を大きくする必要があるが、衝突による圧縮では十分に密度を大きくできないことがわかっている。出願者は、静的圧縮によるダストアグリゲイトの密度進化を考えるために、まず、ダストアグリゲイトの静的圧縮に対する圧縮強度を求めている。静的圧縮を表現可能な周期境界条件を用いてダストアグリゲイトの多体シミュレーションを行い、静的圧縮に対するダストアグリゲイトの圧縮強度の経験式を求め、その物理パラメータ依存性を理論的にも導いている。

第3章では、原始惑星系円盤のガスによる動圧とダストアグリゲイトの自己重力による静的圧縮を考え、第2章で得られたダストアグリゲイトの圧縮強度を用いて、ダストアグリゲイトの密度進化を計算し、ダストから微惑星までの進化をサイズ-密度面上で明かにしている。すなわち、ダストは初期は付着成長によって低密度なダストアグリゲイトを形成するが、成長するにつれて静的圧縮によって密度が大きくなり、最終的に微惑星となる。また、この成長過程は上記の3点の問題をすべて解決している。低密度ダストアグリゲイトの速い成長によって落下問題を、低速衝突によって破壊問題を、低密度によって跳ね返り問題を、それぞれ回避する。この研究によって、初めて、問題のない統一的なダストからの微惑星形成過程が示されている。

第4章は低密度ダストアグリゲイトの光学的特性についてである。第2章と第3章で得られた結果から、原始惑星系円盤中のダストは低密度でフラクタル次元が2から3のアグリゲイトになっていると考えられる。出願者はこのようなダストの光学的特性をミー散乱と有効媒質理論を用いて計算し、低密度ダストアグリゲイトとコンパクトダストを観測的

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

に区別する方法について議論している。

第 5 章では全体のまとめと今後の展望が述べられている。

以上、本論文は、これまでにないダストアグリゲイトの内部密度の進化を考慮してダストから微惑星までの現実的な進化を明かにした成果であり、さらにダストアグリゲイトの光学的特性までも計算し観測可能性を議論する先駆的な取り組みである。惑星系形成の初期段階を探る上でその重要性は大きく、高く評価できる。これはすでに第 2 章、第 3 章、第 4 章が国際的な学術雑誌にそれぞれ査読論文として出版されていることから明らかである。ただし、2 章において構成ダストの非球形性やサイズ分布が結果に与える影響の考察、3 章においてガスの動圧を静水圧として扱う近似の妥当性、4 章において有効媒質理論の妥当性の検証が今後の課題と考えられる。

なお、本論文の第 2 章と第 3 章は田中秀和、奥住聡、和田浩二との、第 4 章は奥住聡、田中秀和、野村英子との共同研究であるが、論文提出者が主体となって研究を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、審査委員会は全会一致で本論文が博士論文として優れたものであることを認め、合格であると判断する。