

磁気回転不安定性の不均一な成長による原始惑星系円盤速度分布の変形とダスト集積

加藤 真理子 [1]; 中村 佳太 [2]; 丹所 良二 [3]; 藤本 正樹 [4]; 井田 茂 [5]

[1] 東工大・理・地球惑星; [2] 東工大・理工・地球惑星; [3] 東工大・理・地球惑星; [4] 宇宙機構・科学本部; [5] 東工大・地感

Modification of angular velocity distribution and concentration of the dusts by nonuniform growth of MRI in proto-planetary disks

Mariko Kato[1]; Keita Nakamura[2]; Ryoji Tandokoro[3]; Masaki Fujimoto[4]; Shigeru Ida[5]

[1] Dept. Earth and Planetary Sci., Tokyo Inst. Tech.; [2] Dept. Earth and Planetary Sci., Tokyo Inst. Tech.; [3] Dept. Earth and Planetary Sci., TIT; [4] ISAS, JAXA; [5] Dept. of Earth and Planetary Sci., Tokyo Inst. of Tech.

We have performed three-dimensional CIP-MOCCT simulations with test particles coupled via the gas drag force, to investigate the property of the Magneto Rotational Instability (MRI) in a proto-planetary disk with nonzero ohmic resistivity and the dust motion affected by the generated turbulence.

A proto-planetary disk is formed as the gas and dusts around a proto-star accrete. In the disk the planet formation proceeds. However, when the size of dust particles (the solid component of the planets to form) grows to 10 cm ~ 1 m, the dust particles fall quickly to the central star and the planetesimals cannot be formed. This unresolved problem is due to the angular momentum loss of a dust particle that is strongly dragged by the gas which rotates slower.

When the accretion disks have a weak magnetic field, it is well known that the Magneto Rotational Instability (MRI) is excited (Balbus & Hawley, 1991). Linear analyses by Sano & Miyama (1998) show that MRI growth rates are affected by various factors: The one that is highlighted here is the fact that weaker vertical magnetic field reduces the growth rate in the presence of finite resistivity.

A protoplanetary disk is considered to be weakly ionized. Then there can be a radial inhomogeneity of the MRI growth rate due to a spatial variation in the magnetic configuration. We have performed simulations of cases in which a MRI unstable and a MRI stable annulus are situated. Two-dimensional simulations show that the radial profile of the angular velocity can be so modified that the rigid rotation state is formed inside the unstable annulus and that the gas rotates faster than the dust particles in some part of the disk.

This result has the interesting implication that the super-rotating part of the disk will not only prevent the dust particles from falling to the central star but also to concentrate them substantially, which is a crucial process for the planetesimal formation. This recognition led us to perform three-dimensional simulations and to find the followings.

(1) Regarding the saturation state of MRI, the turbulence is completely quenched when the initial magnetic Reynolds number is uniform and is less than unity. However, we find that the turbulence caused by the inhomogeneous growth of MRI continues for a long time even if the spatially averaged magnetic Reynolds number $R_{m,ave}$ is less than unity.

(2) We simulated the dynamic of dusts as test particles. As a result, we found that dusts of any size are prevented from falling to the central star when $R_{m,ave} < 1$. Furthermore meter-sized dust particles are most strongly concentrated at the boundary of the area where the gas is faster-rotating and the area where the gas is slower-rotating than dusts, with its peak number density rising as high as 2000 times the initial value. This high concentration would lead to the planetesimal formation via gravitational instability.

3次元 CIP-MOCCT 法によって MHD シミュレーションを行い、さらにテスト粒子を加えて、原始惑星系円盤における磁気回転不安定性とその乱流中でのダストの振る舞いを調べた。原始星周りにガスとダスト(塵)が回転することで、原始惑星系円盤は形成される。そして、この中でダストが衝突・合体を繰り返すことで微惑星が形成される、とされる。しかし、この形成段階において、ダストが数十センチ以上になると急速に中心星へ落下してしまうという「ダスト落下問題」という未解決問題がある。これは、ガスが円盤圧力の影響を受けケプラー回転をしているダストよりも遅く回転しているために、ダストはガス抵抗力によって角運動量を失ってしまうからである。

一方、この円盤内に磁場が存在するとき磁気回転不安定性が起こることが知られており、この不安定性は角運動量輸送のメカニズムとして (Balbus & Hawley, 1991)、さらには円盤ガスの乱流レベルを決定するものとして注目されてきた。Sano & Miyama (1999) の線形解析の結果からは、この不安定性は様々な要因によって大きく性質が異なることがわかっている。

ここでは、電離度が一樣で垂直磁場の強い領域(不安定性が起こる)と弱い領域(安定)がある場合を考え、動径方向に異なった成長率をもつ MRI の効果を調べる。2次元計算の結果、ガスは不安定領域内で剛体回転をし、ある領域ではケプラー回転速度より速く回転するということがわかっている。この結果はダストが中心星へ落下するのを防ぐだけでなく、ダストが著しく集積し、微惑星が形成される可能性を生む興味深い結果である。そこで3次元系での振舞いへと研究を拡張したところ、以下の発見があった。

(1) 磁気回転不安定性の飽和状態そのものについて、全領域で一樣に磁気レイノルズ数が1以下であるときには、不安定性は起こるもののすぐに衰弱し安定状態になるが、成長率が動径方向に非一樣である場合、計算領域内平均の磁気レイノルズ数が1以下であっても、長時間乱流が残ることがわかった。

(2) テスト粒子を入れた計算を行い、ダストの運動を調べた。その結果、平均磁気レーノルズ数が1以下で、どのサイズのダストでも落下を防ぐ様子確かめられた。さらに、最も速く中心星へ落下するメートルサイズのダストが最も集積し、約2000倍以上にもなった。この結果は微惑星形成を十分示唆している。