

別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Ionization Dynamics and Magnetorotational Instability in Protoplanetary and Circumplanetary Disks
(原始惑星系円盤及び周惑星円盤における電離度のダイナミクスと磁気回転不安定性)

氏 名 藤井 悠里

論 文 内 容 の 要 旨

恒星が誕生する際には、その星の周りにガス円盤が形成される。このガス円盤は原始惑星系円盤と呼ばれ、惑星はその中で形成されると考えられている。原始惑星系円盤の質量の大部分は水素分子やヘリウム原子からなる中性ガスが占め、わずかに固体微粒子が含まれている。固体微粒子が担う質量は円盤全体の1%程度であるが、岩石惑星やガス惑星のコアを形成する重要な材料物質である。

様々な観測から、原始惑星系円盤のガスは中心星に向かって落下していることが示唆されている。ケプラー回転するガスが円盤中心に向かって落下するには角運動量を外側に輸送する必要がある。しかし、流体力学的なガスの分子粘性は非常に小さく、観測から推定される激しい質量降着を説明することができない。この問題は、ブラックホール降着円盤でも同様に指摘されており、円盤ガスが乱流状態になることで角運動量が輸送されると理解されている。同様に、原始惑星系円盤においても乱流が実効的な粘性として働き質量降着が続いていると考えられる。この乱流の発生メカニズムは、磁気回転不安定性による磁気流体力学的な乱流であると考えられている。

磁気乱流の発生には、ガスが十分に電離している必要があるが、低温かつ高密度の原始惑星系円盤では必ずしもガスが十分に電離されているとは限らない。円盤ガスを電離させる要因は、宇宙線や中心星からの紫外線やX線、また放射性核種の崩壊などが知られている。これらの電離源によって円盤内の中性ガスが電離され、それに伴い様々な二次粒子が生成される。また、生成されたイオンと電子の再結合やガス中を漂う固体微粒子による荷電粒子の吸着などの反応も起こる。特に、固体微粒子が多く存在する場合には、電子が効率的に吸着されてしまうため、固体微粒子がほとんどない場合に比べ円盤ガスの電離度が著しく小さくなる。

本研究では、まず始めにこれらの化学反応の詳細なプロセスを定式化し、正確さを失うことなく高速に電離度進化を計算する手法を開発した。過去の研究から、固体微粒子の帯電量分布が正規分布になることが明らかにされているため、本研究では固体微粒子の平均帯電量と帯電量分布の分散の時間発展を解くことで解くべき式の数を減らした。

また、区分厳密解法とよばれる解析的手法を併用した数値計算法を用いて計算時間の短縮を図った。本研究の計算法を用いると、原始惑星系円盤の典型的なパラメータの場合には基礎方程式の直接計算より計算時間が10万分の1になった。

次に、この手法を周惑星円盤に適用した。周惑星円盤とは、原始惑星系円盤の中で巨大ガス惑星が形成される際にその周りに形成されるガス円盤である。周惑星円盤は衛星が形成される現場であると考えられており、その進化の理解は衛星形成論の構築に極めて重要である。中心天体の周りに形成される円盤という共通点から、過去の研究では周惑星円盤でも磁気流体力学的な乱流が主要な角運動輸送メカニズムであると想定されていた。しかし、実際に電離度を詳しく調べてみたところ、周惑星円盤では磁気乱流の発生が極めて困難だということが明らかになった。したがって、磁気乱流を仮定した従来のガス惑星及び衛星の形成論には修正が必要となる。また本研究により、静かな円盤の中でゆっくりと時間をかけて衛星が形成されるというシナリオが提案された。

最後に、Athena 磁気流体力学コードを用いて、原始惑星系円盤の電離状態の非定常進化の3次元シミュレーションを行った。非理想磁気流体力学シミュレーションを行う際には、各グリッドの電離度の評価が必要である。計算コストの問題から、これまでの研究の多くでは、密度から計算した平衡解をもちいて電離度が評価されてきた。この取り扱いは、化学反応のタイムスケールが流体の運動のタイムスケールよりも短い場合には問題ない。しかし、固体微粒子が少ない場合や、密度が低い領域では、化学反応のタイムスケールが小さくなるため、非平衡性が重要になってくると考えられる。本研究では前述の電離度計算スキームをAthenaコードに実装した。そして、流体の進化と同時に電離状態の非平衡進化を計算した。円盤ガスの多くが散逸し、さらに固体微粒子が大きな粒子に成長してしまった後のステージを想定してシミュレーションを行ったところ、円盤上空の電離度がその密度での平衡解よりも小さいという結果が得られた。これは、円盤風と呼ばれる円盤内部から表面への流れによって、電離度の低い円盤内部のガスが化学平衡になる前に表面まで運ばれるからだと考えられる。この効果は、電離度進化だけでなく、円盤の化学進化にも影響を与える可能性があり、さらに研究を進める必要がある。