

原始惑星のガス捕獲による軌道進化 Orbital evolution of eccentric, gas-accreting protoplanets

菊地 章宏^{1*}, 樋口 有理可¹, 井田 茂¹
Akihiro Kikuchi^{1*}, Arika Higuchi¹, Shigeru Ida¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institut

近年の直接撮像による観測で、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が発見されている。しかし、このような惑星の形成は惑星形成の標準理論であるコア集積モデルではうまく説明できない。コア集積モデルでは、巨大ガス惑星は以下のように形成される。まず、微惑星の集積により原始惑星が形成される。さらなる集積により原始惑星の質量が限界コア質量に達すると、原始惑星を覆う大気が平衡を保てなくなり、暴走的にガスが流入し始める。このようにしてガスを捕獲することで、巨大ガス惑星が形成される。しかし、微惑星集積のタイムスケールは惑星のケプラー周期や原始惑星系円盤の質量分布に依存する。中心星から遠い場所では集積タイムスケールが長くなるため、原始惑星が限界コア質量に達する前に円盤が消失してしまう可能性が高い。そうなると遠方ではガス惑星は形成されない。そこで、集積タイムスケールの短い内側で作ったガス惑星を、別の巨大惑星の散乱で遠方に輸送するという、遠方のガス惑星形成シナリオがある。このモデルでは遠方に離心率の高いガス惑星が形成されるが、円軌道に近い軌道は実現できない。

本研究では、他の内側の惑星の散乱により遠方楕円軌道に進化した原始惑星が、ガスを捕獲しながら円軌道化するモデルを考える。つまり、原始惑星から巨大ガス惑星になる途中の段階の、ガスを捕獲する段階において、軌道進化することを考える。このモデルでは、原始惑星の形成時間を回避することができ、コア集積モデルによって巨大ガス惑星が形成される。モデルの詳細は以下ようになる。まず円盤の比較的内側で原始惑星コアが形成され、その後原始惑星が自身より内側にある巨大ガス惑星によって散乱されることで、離心率の大きな楕円軌道になる。楕円軌道にある原始惑星は、速度の異なるガスを捕獲することで軌道進化する。原始惑星は楕円軌道にある一方でガスは円軌道にあるので、ガスを捕獲することで円軌道化すると考えられる。また、ガスを捕獲するたびに衝突エネルギーが失われるが、失われる量が小さければ、軌道長半径はそれほど減少せず、長周期の惑星が形成されうる。

本研究では、楕円軌道にある原始惑星がガスを捕獲することによって、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が形成されるかどうかを調べた。ここではまず、無限に広がる円盤内に楕円軌道の原始惑星がある場合を考えた。また、円盤ガスが十分にあって収縮律速になっている場合を考えた。つまり、原始惑星のまわりのガスエンベロープの収縮速度が質量増加率を決めている場合で、質量増加率は円盤の密度や温度に依存しない。質量増加率は軌道上の各位置において等しく、1公転周期での軌道変化が微小だという仮定をすることで、軌道平均を行った。こうして1周期での変化を求めて、それを積分することで長期での軌道進化を求めた。このように解析的に導出した結果、軌道要素について、初期値と質量の依存性を明らかにした。ガスを捕獲することで、離心率は減少する一方、軌道長半径はあまり減少せず、初期の半分程度が限界であることがわかった。これより、原始惑星のガス捕獲による軌道進化で、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が形成されうるということがわかった。

次に、円盤構造を変えた場合を考えた。原始惑星が離心率の大きな楕円軌道にあるとき、円盤の大きさによっては原始惑星の軌道が円盤の外側に出ってしまう場合が考えられる。つまり、円盤半径の内側では収縮律速でガスを捕獲できる一方、円盤半径の外側では供給律速になっている場合である。供給律速のときは、円盤からのガスの流入速度が質量増加率を決めているので、原始惑星のガス捕獲率は円盤ガスの密度や温度に依存する。ここではまず、円盤半径の外側では全くガスを捕獲できない場合を考えた。その結果、円軌道化したときの軌道長半径と円盤の大きさに関係があることがわかった。発表では、多様な円盤構造と原始惑星の軌道進化の関係について詳しく議論する。

キーワード: 系外惑星, 円軌道長周期巨大ガス惑星, 惑星形成, ガス捕獲, 軌道進化

Keywords: exoplanet, distant jupiters in circular orbits, planetary formation, gas accretion, orbital evolution