

学位論文題名

Study on formation of gas giant planets in a
protoplanetary disk

(原始惑星系円盤での巨大ガス惑星の形成に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年の活発な観測的研究によって、候補天体を併せると 800 個以上の太陽系外惑星が発見されている。とりわけ、Hot Jupiter と呼ばれる恒星に非常に近い軌道を持つ惑星や、逆に恒星から非常に離れた位置 (100AU 以遠) にある惑星(Cold Neptune)など太陽系形成の標準理論(京都モデル)では説明できない惑星が次々と発見されており、その多様性の起源の解明のため目下活発に研究が進められている。なかでも、木星のような巨大ガス惑星はその強い重力により、原始惑星系円盤や他の惑星と強く相互作用し、惑星系の形成ならびに原始惑星系円盤の進化に多大な影響を与えるため、その形成および進化の過程を解明することは太陽系外惑星の多様性の起源を解明することにもつながるだろう。巨大ガス惑星は原始惑星系円盤に存在する固体成分が集まってできたコアが円盤のガスを自身の重力で捕獲することで形成されると考えられているが、大量の円盤ガスを捕獲するため(暴走的ガス捕獲とよばれる)にはある臨界コア質量以上の固体成分コアが必要である。この臨界コア質量は、原始惑星系円盤の温度および密度構造、ガス惑星大気の組成、固体成分コアの成長率などに依存すると考えられているが、その依存性の理解はいまだ十分とはいえない。本研究では、ガス惑星の構造と赤色巨星段階にある恒星の構造との類似点に着目し、恒星進化理論でよく用いられる無次元相似不変量を用いて、臨界コア質量をもつガス惑星の構造的な特徴を調べた。無次元相似不変量を用いることによって、ガス惑星の構造を 2 次元平面上の曲線として表現することができ、構造の特徴はその曲線の形状によってはっきりと示される。我々はまず、単一のポリトロープで表される簡単な熱的構造をもつガス惑星大気を仮定し、その構造を調べた。その結果、原始惑星系円盤に埋め込まれたガス惑星の構造は境界条件(惑星の半径は恒星からの距離と円盤の音速によって Bondi 半径か Hill 半径のどちらかをとる)と原始惑星の熱的構造によって以下の 3 つに分類できることが明らかになった。(I) 熱的構造が stiff なポリトロープ($N \leq 3$)で表され、惑星半径が Bondi 半径と一致するもの、(II) 惑星半径が Hill 半径と一致し、stiff なポリトロープで表されるもの、そして、(III) 熱的構造が soft なポリトロープで表されるもの(この場合は境界条件に依らない)。その形状は上記の構造の分類ごとにはっきりと異なり、それに伴い臨界コア質量をもつ構造の条件も異なる。さらに、我々は上記の結果を実際にありうるガス惑星の熱的構造に応用し、臨界コア質量がどのように変わるのかを調べ

た。過去の研究より、ガス惑星大気の熱的構造はポリトロープで表される部分の外側にほとんど等温な外層があることが知られている。そこで、等温外層の厚さをパラメータとして、惑星大気の熱構造をモデル化し、等温外層の厚さによって臨界コア質量をもつ大気の構造がどのように変化するかを調べた。その結果、等温外層の厚さが構造に及ぼす影響は以下の2つにまとめられることが分かった。(1) 等温外層が厚いほどガス惑星大気の底の温度は低くなる。結果として力学平衡を保つために必要な質量も小さくなり、臨界コア質量は小さくなる。この場合、構造の形状は単一のポリトロープで表される場合と変わらない。(2) Bondi 半径を惑星半径とする stiff なポリトロープを持つガス惑星大気の場合、ある程度等温外層が厚いと惑星大気内の熱エネルギーの増加が抑えられるため、構造の形状が Bondi 半径を持つ大気の形状から Hill 半径を持つ惑星大気の形状に遷移することが分かった。この形状の遷移に伴い、臨界コア質量は急激に減少する。このことは、臨界コア質量は惑星大気の冷却によって減少し、暴走的熱捕獲の開始の時期は等温外層の厚さの時間進化によって決定されることを示唆する。この結果は過去の研究の結果とも整合的であり、さらに深い臨界コア質量のパラメータ依存性を明らかにするものである。この結果を応用することで、太陽系外惑星の多様性の解明に寄与することができるだろう。

また、原始惑星と原始惑星系円盤は惑星重力による擾乱によって角運動量をやり取りする。その相互作用によって、惑星は円盤ガスの恒星への降着を妨げ、円盤面密度のギャップやインナーホールとよばれる円盤の惑星軌道よりも内側が消失してきた穴を作ることが理論的に予想されている。このことは観測的にも示唆されている。しかしながら、巨大ガス惑星によるギャップやインナーホールの形成について、観測可能な量と理論的な予想をつなげる定量的なモデルはいまだ存在しない。これは、数値流体シミュレーションでは惑星近傍のごく局所的なガスの流れと円盤全体の大局的なガスの運動を同時に解くことが非常に困難なためである。そこで、我々は必要な物理過程をモデル化し、軸対称な円盤モデルに取り入れることでガス惑星と原始惑星系円盤の共進化を調べることを試みた。本研究では、モデル化の第一段階として、動径方向の圧力勾配による円盤回転則の変化を考慮したギャップ構造を調べた。従来の研究では、圧力勾配による角速度の変化は全く無視されていたが、強い惑星重力によりギャップ内では急峻な面密度勾配ができるため、圧力勾配による角速度の変化は無視できない。本研究は円盤面密度分布と回転角速度分布を無矛盾に決めた初めての研究である。圧力勾配による角速度変化を考慮した結果、従来のモデルよりギャップの深さはかなり浅くなることが分かった。本研究はインナーホールおよびギャップ形成の定量的なモデルを作るための第一歩である。観測と比較可能なモデルを作るためには、より深いギャップを考え、また本研究では考えなかった惑星へのガス降着も考える必要があるだろう。

学位論文審査の要旨

主査	准教授	田中秀和
副査	教授	羽部朝男
副査	教授	小笹隆司
副査	准教授	徂徠和夫

学位論文題名

Study on formation of gas giant planets in a protoplanetary disk

(原始惑星系円盤での巨大ガス惑星の形成に関する研究)

博士学位論文審査等の結果について (報告)

近年、800 を超える太陽系外惑星が次々と発見されている。Hot Jupiter と呼ばれる非常に恒星の近くを周回する巨大惑星や、100AU程度の恒星から遠い位置に存在している巨大惑星など太陽系にはない多様な惑星が発見されているが、その多様性を説明する統一的な形成モデルは未だ存在しない。

本論文において申請者は、恒星内部構造理論で用いられるUV図による解析手法を巨大惑星大気に応用し、暴走ガス降着による巨大惑星の形成条件を簡単な熱的構造モデルを仮定し系統的に調べた。その結果、惑星大気がとりうる構造はガス惑星の境界条件と熱的構造によって3つに分類されることを明らかにし、それぞれ、暴走ガス降着の開始条件が異なることが分かった。また、従来惑星大気構造計算で用いられてきたある1つの境界条件は適切でないことも指摘した。本論文で行われた惑星大気構造の解析とそれによる結果は一般的なもので、幅広いパラメータ範囲に適用可能となっている。さらに、本論文では、惑星によって作られる原始惑星系円盤のギャップ構造についても研究を行った。惑星がつくる原始惑星系円盤のギャップ構造によって円盤回転速度も大きく変化する。本論文では円盤回転速度の変化と円盤ギャップ構造形成を連立させ、それぞれ無矛盾に解くことに成功した。それにより、回転速度の変化を考慮することで円盤ギャップは大幅に浅くなることを示した。この結果は、巨大惑星へのガス降着や軌道進化、ガス円盤進化など多くに影響を与え、多様な惑星系の成因解明につながる鍵となりうる。以上のように、著者の研究は、巨大ガス惑星の形成および進化に関し新たな知見をもたらすものであり、当該分野の今後の研究に対し大きな影響を与えると判断される。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。