

氏名	竹 内 拓
学位（専攻分野）	博士（理学）
学位記番号	総研大甲第191号
学位授与の日付	平成8年3月21日
学位授与の要件	数物科学研究科 天文科学専攻 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	The Evolution of Protoplanetary Disks Due to the Gravity of Protoplanets
論文審査委員	主 査 教 授 家 正 則 教 授 観 山 正 見 教 授 中 野 武 宣 教 授 木 下 宙 助教授 林 正 彦 教 授 尾 崎 洋 二（東京大学）

論文内容の要旨

最近の赤外線および電波による観測の進展は、生まれたばかりの星のまわりには、ガスと塵が円盤状に取り囲んでいることを明らかにした。この円盤の中で惑星系の形成が進行していると考えられており、原始惑星系円盤と呼ばれている。一方、原始惑星系円盤の中での惑星系の形成の理論も構築されており、様々な成功を収めているが、まだ未解決の問題も数多く残されている。そのひとつが、原始惑星系円盤のガスの散逸の問題である。惑星が誕生した後も、原始惑星系円盤にはまだガスが大量に残っているはずであるが、何らかのメカニズムによって散逸し、現在の太陽系のような高真空な状態になると考えられている。しかし、そのメカニズムについてはよく解っていない。これまでに、惑星の重力によってガスを散逸させる可能性が検討されたが、結果は否定的であった。それによると、惑星の重力が影響をおよぼす領域は惑星のごく近傍に限られるので、原始惑星系円盤全体のガスを散逸させることは出来ないとされてきた。しかし、これまでの研究では原始惑星系円盤を伝わる密度波の効果が無視されている。惑星の重力によって励起された密度波が円盤全体を伝わる事が出来るならば、惑星の影響は円盤全体におよぼさずである。このように考えて、本論文では、円盤内を密度波がどの程度伝わるのかを求めた。さらに、この密度波の伝播に伴った角運動量の輸送によって、原始惑星系円盤がどのように進化していくかを明らかにした。

第2章では、原始惑星系円盤の進化を記述する方程式を導く。原始惑星系円盤の進化は以下の2段階のプロセスによって起こる。まず、惑星の重力によって原始惑星系円盤内に密度波が励起され、この密度波が伝播することによって円盤内で角運動量が輸送される。密度波による角運動量輸送は円盤の密度構造の進化をもたらす。密度波の伝播する時間スケールに比べて、原始惑星系円盤の構造の変化する時間スケールはかなり長い。そのため、この2つのプロセスは独立に解く。密度波の伝播は線形近似を用いて解き、円盤構造の進化は数値的に解いた。

計算の結果、以下のような結果が得られた(第3章)。惑星の近傍で励起された密度波は、伝播していくにしたがい、円盤ガスの粘性によって減衰していく。したがって、密度波の伝達距離は原始惑星系円盤の粘性に大きく依存する。粘性が小さい場合には、密度波が減衰せずに遠くまで伝播し、円盤全体にまで到達しうることを明らかにした。一方、粘性が大きい場合には、密度波がすぐに減衰してしまいほとんど伝播しない。この密度波が角運動量を運ぶことにより、原始惑星系円盤の構造は変化してゆき、惑星軌道のまわりに空隙が形成される。この空隙の大きさは、密度波の伝播距離によって決定され、円盤の粘性が小さければ空隙の幅が大きくなることを示した。円盤の粘性が十分小さく、密度波が円盤全体に伝播する場合、惑星軌道の内側にあるガスは全て中心星に落ちてしまうことがわかった。したがって、惑星の重力は、惑星軌道の内側にあるガスの散逸のメカニズムとして有効であることが明らかになった。しかし内側のガスがなくなった段階で、惑星軌道の外側にはまだ大量のガスが残されており、このガスを散逸させることは出来ない。これは、惑星の重力が外側のガスを散逸させることよりもむしろ、惑星自身の軌道を変化させるように働くためである。つづいて、惑星により空隙が形成されるための条件を求めた。原始惑星系円盤のモデルとして標準的なモデルを用いた場合、空隙を形成するためには土

星程度の質量が必要であることがわかった。このことから、形成時の木星型惑星がまわりにあるガスを吸い込むことによって成長していく過程で、惑星の質量が土星程度まで大きくなるとまわりに空隙が形成され、惑星の成長が止まることが示唆される。

第4章では本論文の結果の応用を述べる。太陽系外の若い星のまわりで形成された惑星が原始惑星系円盤の構造を変化させた場合、どのように観測されるかについて計算を行った。原始惑星系円盤の粘性が小さく、惑星がその軌道の内側の円盤ガスを中心星に落とし、原始惑星系円盤の赤外スペクトルは大きく変化することがわかった。実際、このような変化を示唆する観測が報告されている。さらに、若い星の連星系の観測との比較を行った。生まれたばかりの星が伴星を持っている場合、やはり伴星の重力の影響で原始惑星系円盤に空隙が形成されることが、赤外および電波観測によって発見された。観測された空隙の幅はかなり広く、これまでの密度波の電波を無視した理論では説明が困難であった。本論文の結果を用いると、観測が矛盾なく説明できることを示した。さらに観測された空隙の幅から、原始惑星系円盤の粘性の値を見積もった。

第5章において、本論文で行った近似の妥当性について議論を行った。本論文では原始惑星系円盤の厚さは無限に薄いとしている。円盤の厚さを考慮した場合でも、原始惑星系円盤が鉛直方向に等温の構造を持っていれば本論文の結果は変更を受けない。

以上のように、原始惑星系円盤を伝わる密度波の効果を考慮に入れることによって、惑星が原始惑星系円盤の構造を大きく変えることが明らかになった。

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、原始惑星系円盤の進化における原始惑星の重力の効果を論じたものである。

惑星系の起源については、その母星のもととなる原始星の収縮過程において、原始星の周囲にガスと塵からなる円盤（原始惑星系円盤）が形成され、その円盤の中で発生した微惑星が衝突合体を繰り返して次第に成長し、惑星が生まれたものと考えられている。実際、最近の赤外線や電波観測によりそのような原始惑星系円盤と見られる天体がいくつか発見されている。しかしながら、このような原始惑星系円盤のガスと塵がどのように散逸して、現在の太陽系のような姿になるのかについては、その具体的機構が解明されていなかった。

申請者は、原始惑星系円盤中に形成された惑星が、その公転運動と共鳴する軌道位置（リンドブラッド共鳴）にあるガスに作用して、その重力により惑星系円盤中に密度運動を引き起こし、その波動により角運動量を輸送して円盤の密度分布が進化してゆく可能性について、具体的に検討を行った。

密度波が伝播する距離は円盤の粘性に依存し、粘性が大きい場合には波は円盤中をあまり遠くまで伝播する前に減衰してしまうが、粘性の小さい場合密度波は遠くまで伝播できる。従って、この機構は粘性が大きい場合にはあまり有効ではなく、むしろ粘性が小さい場合に有効な角運動量輸送機構であることを明かにした。

ケプラー回転し、面密度分布が $r^{-3/2}$ の原始惑星系円盤の標準的モデルについて、粘性をパラメータとして、惑星と密度波の相互作用による角運動量輸送過程を数値計算し、粘性が高い場合には惑星より内側の円盤が消散し、適度な粘性で惑星の質量が土星質量程度以上の場合には惑星軌道をはさんで円盤に空隙ができることを示した。このことは、逆に惑星が成長して土星程度の大きさにまで達すると、まわりのガスを吸着して原始惑星系円盤に空隙をつくるため、それ以上には惑星が成長できないことを示唆している。

さらに、実際におうし座GG星のまわりに観測された原始惑星系リングの観測にこのモデルを適用して、原始惑星系円盤の粘性を算出し、またその温度分布から赤外線スペクトルについて予測を行うことも可能であることを示した。

以上のように、本研究では、惑星により励起され原始惑星系円盤を伝わる密度波の効果を考慮することにより、惑星が原始惑星系円盤の構造を大きく変える働きをする場合があることを具体的に解明した。本研究結果は急速に発展しつつある赤外天文観測により具体的に検証しうる理論的予測を含んでおり、国際的にも注目される結果となっており、本論文を博士論文として十分な内容を備えたものであると判断した。