

超木星質量の巨大惑星による原始惑星系円盤のギャップ形成

田中佑希 (東北大学)

利用カテゴリ XC-Trial → XC-B

研究背景

現在までに多数の太陽系外惑星が発見されており、その質量や半径、軌道長半径などの特性は非常に多様性に富んでいることが分かっている。例えば木星型惑星の場合、ホットジュピターのような主星に極めて近い軌道を公転するものから、木星のように数 au 程度の遠方軌道を公転するものまで、数多くが発見されている。また、10 木星質量を超える大質量の巨大ガス惑星も発見されている。このような惑星は原始惑星系円盤の中で形成・進化したと考えられており、円盤の中で惑星がどう周囲を相互作用をして進化するかは、太陽系外惑星が持つ特性の起源を解明する上で重要である。

さらに、近年は ALMA による撮像観測によって、原始惑星系円盤の多くはリングやギャップなどの多様なサブ構造を持つことが分かってきた。これらの構造の詳細な起源は議論が続いているが、その候補の一つとして惑星と円盤の相互作用が挙げられる。原始惑星系円盤内に惑星が存在した場合、周囲の物質との相互作用によってギャップを形成するが、その深さや幅などの特徴は惑星質量や円盤の性質など様々な要素に依存する。そのため、惑星と円盤の相互作用を詳細に調べることは観測を解釈する上でも重要となる。

これまでに、数値流体計算を用いた惑星と円盤の相互作用の研究は活発に行われており、形成されるギャップの特徴や、惑星への質量降着率、軌道移動の速度などが調べられてきた。しかしそれらは木星質量程度や木星より軽い惑星に焦点を当てたものが多かった。発見されている系外惑星の中には木星の数倍の質量を持つものも多数あり、そのような惑星が原始惑星系円盤の中でどのように振る舞うか、その結果としてどのような惑星系が形成されるかについてはまだ理解が十分に進んでいない。また、超木星質量への円盤からの質量降着率を調べた過去の研究では、Bodenheimer et al. (2013) での値が Tanigawa & Tanaka (2016) のモデルと比べて 2 桁も小さいという食い違いが見られることが分かっている [1, 2]。質量降着率が小さいということは惑星が形成するギャップが非常に深くなっている可能性を示唆するが、Bodenheimer et al. (2013) が予測する質量降着率から予想されるギャップの深さは、Kanagawa et al. (2015) のギャップ深さを表す式とは一致しない [1, 3]。さらに Kley & Dirksen (2006) では、3 木星質量より大きな質量を持った惑星がある場合は円盤のガスが離心率を持った運動をし、5 木星質量より大きい惑星に対してはこの運動によりガスが惑星に供給されやすくなり質量降着率が軽い惑星に対するものよりも増大するという、Bodenheimer et al. (2013) とは反する結果も報告されている [4]。

本研究では、木星より大きな質量を持つ重いガス惑星が原始惑星系円盤とどのように相互作用をし、ギャップの特徴や惑星への質量降着率などが様々なパラメータにどう依存するかを、数値計算を用いて明らかにすることを目的とする。

モデル

本研究では、数値計算に公開流体シミュレーションコードである FARGO を用いた。FARGO は惑星を含んだ円盤の大局計算を行うためのコードであり、円盤の回転速度成分を平均速度と平均からのずれに分けることによって、高速に計算を行うことに特化している。本研究は 2 次元の流体計算であり、原始惑星系円盤の動径方向を 512 メッシュ、方位角方向に 1536 メッシュに分割した計算を行った。この解像度は過去の先行研究と同等かそれ以上のものであり、また惑星周辺のヒル半径を 10 メッシュ以上の十分な精度で分解することが出来ている。

計算のパラメータとして、惑星質量は 1~10 木星質量まで変化させ、形成されるギャップ特性の解析を行った。また形成されるギャップの幅や深さなどの特性は円盤の粘性やスケールハイトにも依存する。そのため、円盤の粘性とスケールハイトを変えた場合のギャップ形成にも着目した。また本計算では問題の切り分けを行うため、惑星へのガス降着は無視し、惑星重力によるギャップの形成のみに着目している。ガス降着を含めた計算は今後の課題であるが、既にガス降着を考慮した計算を開始しており、今後も XC50 を用いて計算を行う予定である。

結果

計算の結果、惑星質量が軽い場合は離心率の小さい対称なギャップが形成されるが、惑星質量が大きくなると非対称かつ非定常な離心率を持ったギャップ構造に移行することが示された。この傾向は Kley & Dirksen (2006) による結果と定性的には一致する。ただし

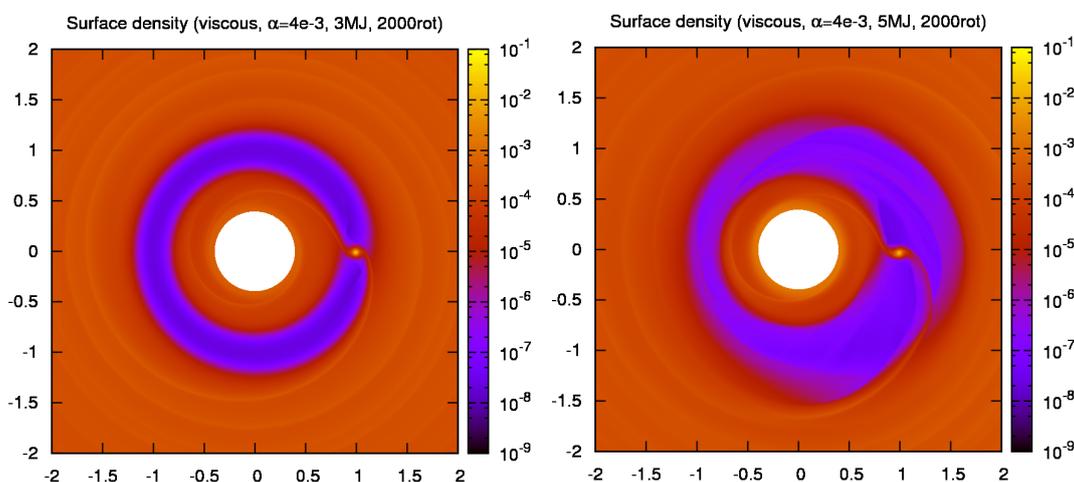


図 1: 3, 5 木星質量の惑星を原始惑星系円盤内に置いた場合の面密度分布の数値計算結果の例。左図は 3 木星質量の場合であり、円形のギャップが形成されているが、右図の 5 木星質量の場合はギャップの外縁が不安定性を示し、離心率を持った分布となっている。

Kley & Dirksen (2006) では 3 木星質量の惑星ですでにギャップが離心率を持つ非定常状態に移行しているのに対し、本研究では 3 木星質量では非定常とならず、5 木星質量で非定常となるという違いが見られた。これは使用している計算コードの違いや、設定する座

標系の違いに起因する間接力の取り扱いの違いによって生じていると考えられ、後者に関しては Kley & Dirksen (2006) にできる限り近づけた計算設定を行った場合 3 木星質量でも非定常ギャップが形成されることを見出した。

また、円盤の粘性とスケールハイトへの依存性を調査した結果、粘性が大きい場合、もしくはスケールハイトが大きい場合は、惑星質量が大きい場合でもギャップは定常に保たれることが判明した。そのため、ギャップが定常か非定常かを決定する本質的な要素は惑星質量ではなく、惑星質量・円盤の粘性・スケールハイトに依存するギャップの深さや幅といったギャップ特性であることが示唆された。

これらの結果を元に、ギャップ内の面密度から惑星への質量降着率の推定を行った。ギャップが定常で対称な状態の場合は惑星質量が大きくなるに従ってギャップ内の面密度が低下するため、惑星への質量降着率は減少する。しかし、ギャップが非定常となり離心率が付くと、非定常効果によりギャップ外縁からのガスの流入が発生する。そのためギャップ内面密度の低下が抑えられ、惑星への質量降着率は増加、もしくは底打ちとなる。これは Bodenheimer et al. (2013) とは大きく異なる振る舞いであり、惑星への質量降着率は惑星質量が大きい場合でも急激に低下せず、惑星の成長は効率的であることを示す結果である。

本研究の内容については、現在論文としてまとめている最中である。

参考文献

- [1] Bodenheimer, Peter, D'Angelo, Gennaro, Lissauer, Jack J., Fortney, Jonathan J., & Saumon, Didier, ApJ, 770, 120
- [2] Tanigawa, Takayuki, & Tanaka, Hidekazu, ApJ, 2016, 823, 48
- [3] Kanagawa, K. D., Tanaka, H., Muto, T., Tanigawa, T., & Takeuchi, T., 2015, MN-RAS, 448, 994
- [4] Kley, W. and Dirksen, G., 2006, A&A, 447, 369