

平成 21 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

Type I migration in radiatively efficient disks

山田耕(神戸大学)

利用カテゴリ汎用 PC

<背景と研究目的>

地球質量程度の原始惑星が原始惑星系円盤の中で誕生すると、ガスと惑星の間で必然的に重力相互作用が生じる。この重力相互作用によって、円盤内には密度波が励起される一方、惑星は励起した密度波から潮汐トルクを受けて、惑星軌道が変化する。この軌道変化はタイプ I 惑星移動と呼ばれ、惑星系形成に重要な影響を与える物理作用の一つである。タイプ I 惑星移動の方向およびその速度は、円盤ガスの熱的な構造に依存して変化する。過去の多くの研究は、単純化のために動径方向に円盤の温度分布が一定であるという仮定で調べられてきた。それらの結果は、外側の密度波からの潮汐トルクが内側の密度波のそれよりも大きくなり、円盤の寿命よりも短いタイムスケールで惑星は内側に移動するというものであった。これは惑星が円盤中に生き残ることができないことを意味しており、惑星形成において重要な問題になっている。しかし、最近エネルギー方程式を考慮した数値計算が行えるようになり、円盤ガスのエントロピーが動径方向に沿って減少する場合、惑星は外側に移動することがわかってきた(Baruteau & Masset, 2008, Paardekooper & Papaloizou, 2008)。一方、T Tauri 星周りにある円盤の観測から円盤の密度・温度分布が推定されているが、それら観測値からエントロピー分布を求めると多くの円盤で負の傾きのエントロピー分布を持つ円盤が予想される。過去の研究で使われた円盤モデルは、熱が円盤からまったく散逸しないという極端な状況が想定され(この円盤モデルを断熱円盤という)、惑星の外移動の可能性を指摘している。しかし、実際の円盤では、ダストによって熱が円盤外に放射されることがあるため、必ずしも断熱近似が成り立つとは限らない。Morohoshi & Tanaka(2003)は、局所近似のもとで輻射輸送の効率が大きくなると、惑星にかかる片側トルクが等温の場合に近くなることを示した。そのため、断熱円盤では惑星の外移動が期待されても、実際は熱放射によって惑星の外移動が実現しない可能性がある。そこで、我々は光学的に薄い円盤内において輻射輸送、つまりオパシティーの大きさが惑星移動にどのような影響を与えるのかに注目して、2次元グローバル流体計算を用いて惑星移動のオパシティー依存性を調べた。

<結果>

図 1 は惑星にかかるトルク密度を示したものである。赤が断熱円盤の場合、青が等温円盤(温度分布を一様で固定した円盤モデル)の場合、紫が輻射輸送を考慮した円盤の場合(以下、これを輻射円盤と言う)である。断熱円盤と輻射円盤は負のベキのエントロピー分布を持つように設定されている。惑星にかかるトルクは、共回転トルクとリンドブラッドトルクの 2 つがあり、惑星移動はこの 2 つのトルクの兼ね合いで移動方向と速度が決まる。通常、惑星を基準として内側と外側のリンドブラッドトルクの差は負となり、惑星を内に押す。一方で、正の共回転トルクは惑星を外に押す。図 1 からわかるように、熱輸送効率が大きくなると正の共回転トルクが弱まる。これは、惑星前方の共軌道に沿って運動してきたガスが外側から内側に入る際に輻射によってエントロピーが変化して、断熱圧縮の場合と比較してガス密度が大きくなれないことが原因である。図 1 の場合、断熱円盤の全トルクは無次元化した量で $+9 \times 10^{-13}$ (速度では $2\text{AU}/10$ 万年の外移動) に対して等温円盤と輻射円盤では -6.7×10^{-12} (速度では $-2\text{AU}/10$ 万年の

内移動)である。このような計算を円盤のエントロピー分布と輻射輸送効率を色々に変えて、全トルクを求めたのが図2である。図2から、エントロピー分布のベキが-0.4よりも小さく、かつ熱散逸のない円盤では惑星は外に移動する。これは共回転トルクが非常に強くなるためである。一方で、全トルクは円盤のオパシティーが増えると小さくなる。この結果に観測で支持されている円盤構造を適用すると、観測された円盤構造は輻射効率の減少とともに惑星の移動速度は内移動から外移動に変化する範囲に入る。ダストの輻射効率はダストサイズやその量に依存する。地球質量程度の比較的大きな惑星ができる円盤進化後期では、大きなダストが少量残っているだけだと考えられる。これは輻射効率が小さい状況に対応しており、移動速度は外移動か、内移動でもその速度は従来の見積もりよりも遅いと推定される。我々の結果は、従来指摘している『地球質量程度の惑星は円盤ガスの寿命に比べて短時間で中心星に落ちて円盤に残らない』という問題を緩和する。

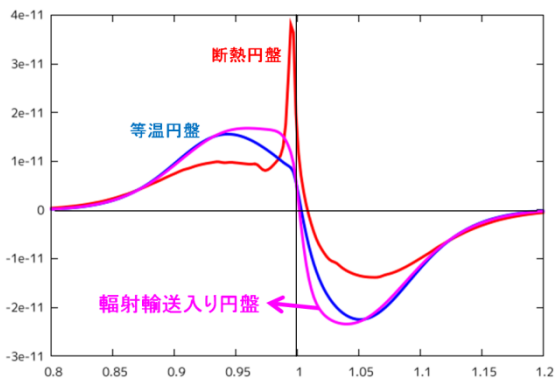


図1: 横軸は中心星からの距離を惑星軌道 r_p で割ったもの、縦軸はトルク密度($M_{\text{sun}} \times v_k^2 \times r_p$ で無次元化, M_{sun} は太陽質量, v_k は1 AUでのケプラー速度). 赤が断熱円盤, 青が等温円盤, 紫が典型的なダストオパシティーを使った場合の輻射円盤での惑星にかかるトルク密度を示している. どの円盤モデルも初期の密度・温度構造は同じで初期密度 $\propto r^{0.8}$, 初期温度 $\propto r^{0.7}$ である.

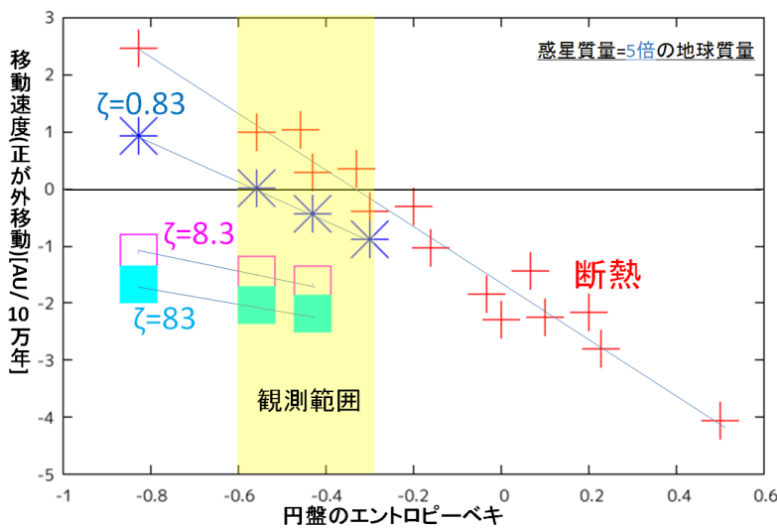


図2: 横軸は円盤のエントロピーベキ, 縦軸は移動速度(AU/10万年). 赤+が断熱円盤, 青*, 紫□, 水色■に行くにつれてオパシティー値を大きくしている. ζ は冷却時間とケプラー時間の比で(オパシティーに比例), 1cmダストに対する典型的なオパシティー値を使うと $\zeta=83$ に対応する. 黄色領域は円盤観測から推定される円盤のエントロピーベキ範囲を示す.

<参考文献>

Baruteau C., Masset F., 2008, ApJ, 672, 1054
 Paardekooper S.-J., Papaloizou J.C.B., 2008, A&A, 485,877
 Morohoshi K., Tanaka H., 2003, MNRAS, 346, 915