

原始惑星系円盤中での重力不安定による再帰的惑星形成

町田正博 (国立天文台)

利用カテゴリ SX9A

現在までに 500 を超える系外惑星が発見されている。観測の制限もあるが、これら発見された惑星のほとんどは、太陽系の木星や土星のような巨大ガス惑星だと考えられている。また、近年、すばる望遠鏡などの直接撮像によって、複数の惑星が発見されているが、これらのほとんどは中心星から ~ 10 AU 以遠を周回する巨大ガス惑星であることが分かっている。このような観測の進展に対して、現在の標準的な惑星形成理論は多種多様な惑星の形成を説明出来ていない。特に、中心星から 10 AU 以遠を周回する巨大ガス惑星の形成については、ほとんど理解されていない。これは、惑星形成の基本的なモデルであるコア・アクリションモデルでは、 $r > 10$ AU の軌道ではコアの集積時間が円盤のガスの散逸時間を超えてしまい、固体コアがガスを纏うことが出来ないためである。他方、もう一つのモデルとして重力不安定モデルがあるが、このモデルでは標準円盤モデルよりも十分に重い円盤質量を要求する。星形成過程で、そのような重い円盤が実際に出来るかどうかはあまり理解されていない。

これら多種多様な惑星の形成は惑星形成の母体となる星周円盤 (原始惑星系円盤) の形成と共に理解する必要がある。この研究では、星形成と共に円盤の形成と円盤内での惑星形成を理解するために、星形成前の分子雲コアから星が形成し、その後、十分円盤が成長するまでの数値シミュレーションを行った。ほぼ圧力と重力が釣り合っている状態のガス球に観測と同等の回転・磁気エネルギーを与えたものを初期条件として、その進化を計算した。また、星自体の大きさを空間的に解像すると長期間の時間推進が難しくなるため、1 AU 以内の領域をシンクセルとして円盤形成後の長時間計算を実現した。

計算の結果、磁場の散逸がガス惑星の形成と密接に関係していることが分かった (Machida et al. 2011b)。以前の我々の研究により、星形成前に出来るファーストコアという天体が星形成後に直接星周円盤になることが分かっている (Machida et al. 2010, Machida & Matsumoto 2011a)。このような円盤は重力的に不安定であるが、磁場が非常に弱い場合には、円盤全体にスパイラル構造が現れ、角運動量を効率的に外側に輸送する。そのため、円盤内のガスは、効率的に中心星に落下し円盤の面密度が下がり安定になり、分裂は起きにくい。他方、円盤内での磁場の散逸は、分裂によるガス惑星形成を促進する。形成する円盤の外縁は密度が低く、ガスのイオン化度が比較的高いために磁場と中性ガスがよく結合している。そのため、磁気制動により角運動量が輸送される。結果として、この外縁領域のガスは効率的に中心領域に流入する。また、磁場の効果によって図 1 左図で見られるように原始星アウトフローも駆動する。他方、円盤の内側領域では面密度が高いためイオン化度も低くなり、中性ガスと磁場は結合していない。このような領域では、オーム散逸により磁場が散逸する。その結果、磁場による角運動量輸送が有効でなくなりガスは円盤のより内側の領域に流入出来なくなる。さらに、この領域には円盤の外縁からガスが流入し続けるために、面密度が上昇し続ける。その結果、重力的に不安定になり分裂が起こり、原始ガス惑星が誕生する。

しかし、分裂後も円盤は十分に重いために、原始惑星は円盤との重力相互作用によって中心星に落下する。その後、再び円盤外周から円盤の中心流域へのガス流入により面密度

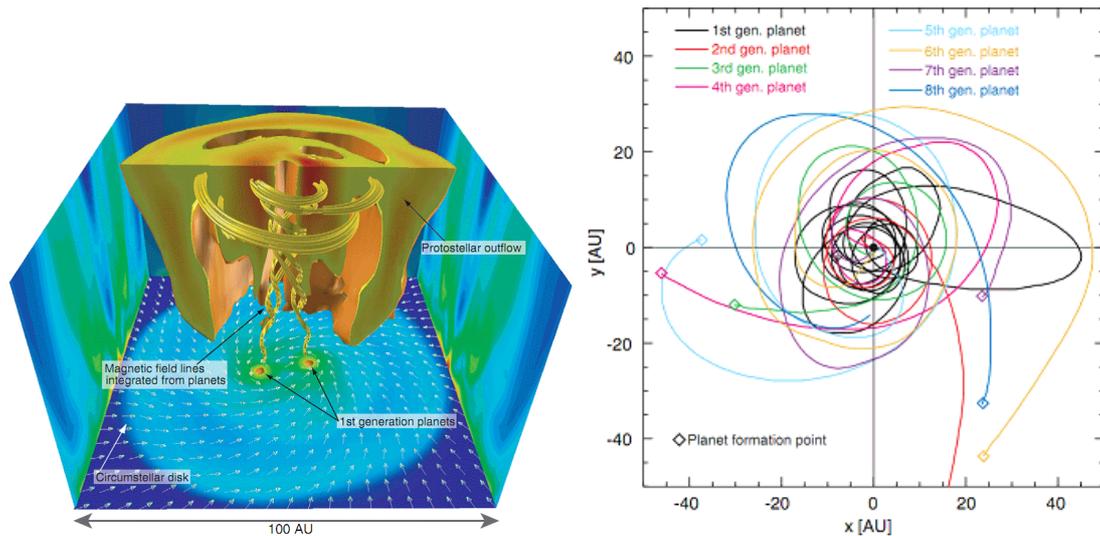


図 1: 左：原始惑星系円盤中での重力分裂によるガス惑星形成と原始星アウトフロー。カラーは密度、線は磁力線。黄色の円盤上空の構造は原始星アウトフローを示している。右：円盤中で出来た惑星の軌道進化。1-8 世代の惑星の軌道を表示している。

が上昇し分裂により原始惑星が誕生する。図 1 右図は、形成した惑星の軌道運動を示している。この図から惑星の形成とその落下、その後の分裂による惑星形成が繰り返されることが分かる。この惑星形成と落下のプロセスは、降着しているガスが枯渇するまで続く。また、惑星は中心星から $\sim 5 - 40$ AU 離れた領域で形成するが、この形成領域は磁場の散逸領域とほぼ一致している。この計算では、分子雲コアから円盤へのガス降着がほぼ終了するまで計算を行ったが、最終的に 16 個の惑星が誕生した。また、最後に誕生した 2 つの惑星は、中心星に落下せずに生き残った。この生き残った惑星がガス惑星に進化するかどうかを決定するためにはさらなる計算が必要となるが、これらの惑星が生き残った場合には観測されているような中心星から遠い軌道を周回する巨大ガス惑星に進化すると考えられる。

また、原始惑星の運動は、円盤の外縁から駆動する原始星アウトフローにも影響を与える。原始惑星の軌道周期と同期して、原始星アウトフローは間欠的に駆動する。さらに中心星への質量降着も原始惑星の軌道周期とよく同期している。そのため、観測から間欠的なアウトフローや中心星への非定常降着の周期を見積もることで原始惑星の存在や軌道周期を導出することが出来る可能性がある。

参考文献

- [1] Machida, M. N., & Matsumoto, T. 2011a, MNRAS, 413, 2767
- [2] Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2011b, ApJ, 729, 42
- [3] Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2010, ApJ, 724, 1006