

星周円盤の自己重力不安定性と円盤分裂による惑星形成過程の研究

塚本裕介(東京大学)

利用カテゴリ XT4MD;

今日の惑星形成論は太陽系を唯一のモデルケースとしてその再現を目標に構築されてきた。その概略は(1)ガス円盤内でダストの自己重力不安定によって微惑星が形成、(2)次にそれらの微惑星が互いに衝突合体を起こし原始惑星、固体コアが形成、(3)固体惑星領域($< 5\text{AU}$)では原始惑星がお互いの軌道を乱し衝突する(ジャイアントインパクト)ことで地球のような固体惑星が形成され(4)ガス惑星領域($> 5\text{AU}$)では固体コアに円盤ガスが流入して木星、土星のようなガス惑星が形成される(コア集積モデル)、というものである。このモデルは微惑星集積と円盤ガスの散逸の時間スケールの差から固体惑星とガス惑星の共存や外縁の氷型惑星の存在を自然に説明できるため太陽系の惑星形成論としては広く受け入れられてきた。

しかし、近年の系外惑星の飛躍的な進展により、このようなモデルでは説明できない惑星系が続々と発見されてきている。例えばHR8799aという質量が太陽質量の1.5倍程度の恒星の周りにはb,c,d,eというそれぞれ木星の5-10倍程度の質量を持つ4つの惑星が発見されているが、それらの軌道長半径は15, 24, 38, 68 AUであり、驚くほど大きい。さらに、一番内縁の惑星HR8799eの内側と外縁の惑星HR8799bの外側には太陽系と同じような小惑星帯やカイパーベルト帯があることがダストの観測からわかっている。このような大きな軌道長半径をもつガス惑星をコア集積モデルではコアの形成が円盤の消失時間($10^6\text{-}7\text{ years}$)に対して非常に長い時間かかってしまい(太陽系と同じ円盤を仮定すると50 AUで 10^{10} years 以上)その場での形成は不可能である。その後、内側で形成したガス惑星が外側に移動するモデルも考えられたが、現実的なパラメータレンジでは説明できないことが示されている(Dodson-Robinson 2009)。このような惑星系を説明する有力なモデルとしては円盤の重力不安定説(Cameron 1978)があげられる。これは、円盤が重力不安定による分裂で直接ガス惑星を形成するというモデルである。太陽系のガス惑星の形成モデルとして重力不安定説は棄却されたものであるが逆に外側では円盤の温度も低く、中心星重力も小さくなるため重力不安定が起こりやすい。近年、解析的手法(Rafikov 2005)やシミュレーション(Boley et al 2007)によって精力的に研究がなされてきた。しかしながら従来の重力不安定の研究は初期条件として用いる円盤のモデル(特に中心星と円盤の質量)によって結果が異なり、重力不安定が惑星形成過程の有力なメカニズムになりえるかはいまだ結論が出ていない

そこで、報告者は恣意的な円盤モデルを初期条件に用いることを問題視し、分子雲コアを初期条件として円盤の形成過程そしてその重力不安定の性質を一貫して行う流体シミュレーション研究を行い、原始星形成後の星周構造の進化とその重力不安定性を広いパラメータレンジで調べてきた。

報告者は円盤の形成過程を調べるために質量1半径数千AUの分子雲コアを初期条件にとり熱エネルギー、回転エネルギーと重力エネルギーの比、 β 、 α をパラメータとしてそれらによって星、円盤の進化、分裂過程がどのように変わるかを調べ、原始星-星周円盤の進化は定性的にmassive disk mode, late/early fragmentation mode, protostar dominant mode の4つのモードに分かれることを見出した。

この中で重力不安定、惑星形成過程にとって特に重要なものがmassive disk modeである。このモードでは円盤の質量は原始星の質量よりも重い期間が少なくとも 10^4 年以上続く。このような円盤は重力的に強く不安定であり、線形解析の結果によると分裂、惑星形成を起こすと従来は考えられていた。しかしながら、我々のシミュレーションによると非軸対称な渦状腕による大局的な角運動量輸送、原始星-円盤間の相互作用、断熱圧縮に対する圧力応答という3つの非線形メカニズムによって円盤は安定化することがわかった。これらの効果が複合的に円盤の安定化に寄与することを指摘したのは我々が世界初である。したがって円盤が分裂するためにはこれらの効果の時間スケールよりも十分早く円盤の質量が降着によって増える必要があることが分かった。

Massive disk modelは分裂を起こさなかった全13シミュレーション中8つを占めた。シミュレーションのパラメータは分子雲コアの観測から示唆される値(Caselli et al 2002)を用いているため、実際の宇宙でも多くの単一星の円盤進化の過程では中心星より円盤が重い段階($M_{\text{disk}} / M_{\text{star}} > 1.0$)が数万年続くフェーズがあることがこの研究によって示された。このような円盤は上述の円盤の重力不安定のシミュレーションで仮定されている典型的な円盤(典型的には $M_{\text{disk}} / M_{\text{star}} \approx 0.1$)よりも極めて重く、いままでのシミュレーションの常識を根底から覆す非常に重要な発見である。本シミュレーションでは円盤の熱進化をBarotropic近似を用いていたため、詳細な円盤の熱進化過程を議論できなかったがこのように非常に重い円盤はHR8799のような惑星系の形成を議論するための重要なスタート地点となると思われる。この業績は論文として2011年度にMNRAS誌に掲載された。