

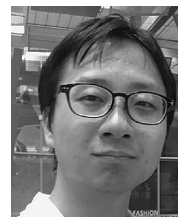
原始惑星系円盤の自己重力による分裂過程

高橋 実道

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3・

工学院大学先進工学部応用物理学科 〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1〉

e-mail: sanemichi@astr.tohoku.ac.jp



原始惑星系円盤は星形成の際に原始星の周囲に形成される円盤である。形成当初の原始惑星系円盤は非常に重く、自己重力不安定性により分裂する場合がある。原始惑星系円盤の自己重力による分裂は、ガス惑星や褐色矮星、連星系を形成するメカニズムの候補となっており、天体形成において非常に重要な過程と考えられている。しかし、原始惑星系円盤が分裂する条件はこれまで明らかになっていなかった。そこで、本研究では数値シミュレーションと線形解析を用いて円盤が分裂する条件を調べた。その結果、円盤に形成された渦状腕中でトゥームレの Q パラメータが0.6を下回ることが円盤分裂の条件であることを明らかにした。今後どのような状況で $Q < 0.6$ を満たす渦状腕が形成されるのかを調べることで、初期の分子雲コアの物理量等から原始惑星系円盤が分裂するのかを予言できるようになると期待される。

1. はじめに

原始惑星系円盤とは星の周囲に形成される円盤である。原始惑星系円盤はその名の通り、惑星が形成される母体となる。そのため、この円盤がどのような密度や温度構造をもっているのかは惑星形成に大きな影響を与える。筆者が原始惑星系円盤の研究を始めた動機も、もともとは惑星形成を理解するために、その大本となる原始惑星系円盤の形成・進化から一貫して研究を行おうというものであった。近年、すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡によって原始惑星系円盤を高い分解能で観測することが可能となり、円盤の詳細な構造が明らかになっている。観測の結果から、原始惑星系円盤は必ずしも滑らかな構造をもっているのではなく、スパイラルやリングなど複雑で多様な構造をもっていることが明らかになった。このような構造をもつ円盤が次々と観測されるなどということはそれまで予想されておらず、観測によってもた

らされた衝撃的な結果によって原始惑星系円盤の研究は大きな盛り上がりを見せている。また、理論研究の側面からも、原始惑星系円盤が原始星と同時に形成される過程について主にシミュレーションによって研究が進み、その全容が明らかになりつつある。

本稿ではこの原始惑星系円盤がどのようにして形成されるのかについて、これまでの研究で明らかになっていることを簡単にまとめたうえで、メインテーマである原始惑星系円盤の分裂現象について筆者の研究¹⁾を紹介する。

2. 原始星・原始惑星系円盤形成

原始惑星系円盤は原始星とともに星形成過程の初期の段階で形成される。そのため、円盤形成過程を理解するには原始星の形成過程から順に追っていく必要がある。

2.1 原始星の形成

星形成は分子雲中の分子雲コアと呼ばれる高密

度のガスが重力崩壊することによって開始する。分子雲コアは典型的に中心密度が約 10^4 cm^{-3} 、サイズが約 0.1 pc 、温度が約 10 K である。分子雲コアの質量は典型的には太陽質量程度で、この密度、温度に対応するジーンズ質量（重力崩壊に必要な最小質量）と同程度である。そのため、十分重い分子雲コアや密度が大きい分子雲コアは自身の重力を圧力で支えることができずに重力崩壊を引き起こす。重力崩壊する分子雲コアでは内側ほど早く収縮し、中心密度が増加する。このとき、初めは主にダストによる冷却が効率的に働きガスはほぼ 10 K を保ったまま収縮する。しかし、重力崩壊が進むと圧縮加熱により中心で温度が上昇し、中心付近のガスが圧力によって支えられるようになる。このとき中心に形成される天体をファーストコアと呼ぶ（図1）。ファーストコアの質量は、形成当初はおよそ $10^{-2} M_{\odot}$ 程度である^{2), 3)}。このファーストコア形成までの重力崩壊

過程をファーストコアという。

ファーストコア形成後も、その周囲にはファーストコアに向かって降着してきている分子雲コアのガスが大量に残っている。このガスがファーストコアに降着することでファーストコアの質量や密度、温度は徐々に増加していく。ファーストコアが十分高温になると、ファーストコア中の水素分子の解離が起こるようになる。水素分子の解離は吸熱反応なので、熱エネルギーが解離に使われることでファーストコアは圧力で自身を支えられなくなり、再び重力崩壊が起こる。これをセカンドコアという。水素分子の解離が終わると再びガスは圧力で支えられるようになり、中心に再び天体が形成される。これが原始星である。形成したばかりの原始星は質量が約 $10^{-3} M_{\odot}$ 、半径が約 10^{-2} au と非常に小さい⁴⁾。この原始星に周囲のガスがさらに降着することで原始星の質量が徐々に増加し、最終的な星質量まで成長していくことになる。

2.2 原始惑星系円盤の形成

現実の分子雲コアは初期に僅かに回転していることが観測的にわかっている^{5), 6)}。分子雲コアが回転している場合でもファーストコアや原始星形成過程は基本的には回転がない場合と変わらない。ファーストコア形成後、そこに回転する分子雲コアからのガス降着が進むと、ファーストコアに角運動量もちこまれることになる。その結果、ガス降着が進むにつれ、ファーストコアは圧力で支えられた球対称な構造から次第に遠心力で支えられた扁平な構造に進化する。その結果、原始星の周囲には遠心力で支えられた円盤が形成される（図1）。この円盤が原始惑星系円盤である⁷⁾⁻⁹⁾。

2.3 原始星と原始惑星系円盤の進化

では、このように形成された原始星と原始惑星系円盤はその後どのように進化していくのだろうか？ 円盤中のガスは遠心力で支えられているため、ガスの角運動量が変化しない限り中心星へと降着することはできない。円盤の形成後に外側か

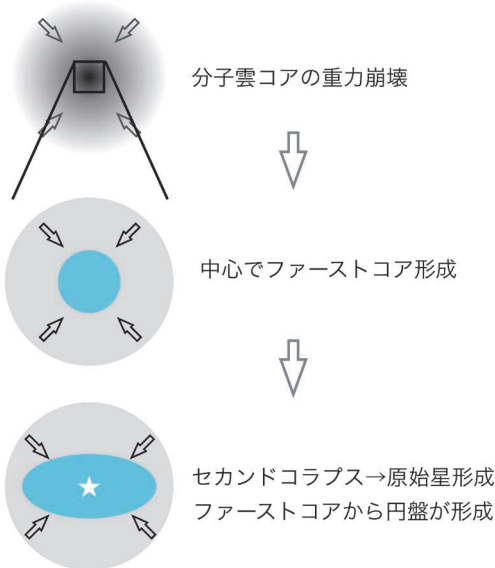


図1 原始星・原始惑星系円盤形成の概略図。星形成は分子雲コアの重力崩壊で始まり、ファーストコア形成、セカンドコアを経て原始星が形成される。原始星形成時に周囲に残っているファーストコアから次第に原始惑星系円盤が形成される。

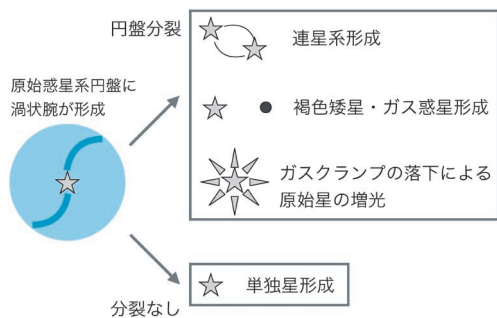


図2 原始惑星系円盤の分裂との関係が議論されている現象. 円盤の分裂は連星形成, 褐色矮星, ガス惑星形成につながる可能性が指摘されており, また, 分裂したガスクランプが原始星に落下するときに原始星の増光として観測される可能性がある.

ら降着してくるガスも遠心力によって中心星へと直接落下することはできず, 初めに円盤へと降着する. ガスを中心星へと落下させるためには, 円盤中でガスの角運動量を輸送し, 円盤の内側のガスの角運動量を引き抜く必要がある. ここで重要となるのが原始惑星系円盤の重力不安定性である. 原始星の周りに形成される原始惑星系円盤は, 形成当初は原始星よりも重い. これは形成初期の原始星の質量が, 原始惑星系円盤の元となっているファーストコアよりも1桁程度軽いことから理解できる. このような重い円盤は自己重力によって不安定になりやすい. 円盤で自己重力不安定性が成長すると円盤に渦状に伸びた構造(渦状腕)が形成される^{10), 11)}(図2). 円盤中のガスでは渦状腕からの重力によるトルクや, 渦状腕によって軌道を乱されることで生じるレイノルズストレスにより角運動量が輸送され, 中心に向かって降着する. このようにして, 分子雲コアのほとんどのガスは一度原始惑星系円盤に降着した後, 円盤を通して原始星へと降着することになる.

2.4 磁場の影響

磁場も原始星・原始惑星系円盤形成に大きな影響を与える. 磁力線に貫かれた分子雲コアは, 回転して磁場を巻き込みながら重力崩壊する. その

ため, 降着しているガスには回転方向とは逆向きの磁気張力が働き, 結果としてガスの角運動量は磁場に沿って上空へと輸送される. これを磁気制動と呼ぶ. この磁気制動によって, 原始惑星系円盤にもちこまれる角運動量は小さくなる. また, 円盤からも角運動量が引き抜かれるため, 円盤の半径や質量は磁場の影響で小さくなる. 磁気制動以外にも, 円盤中の磁場は磁気回転不安定性¹²⁾によって円盤中の乱流の起源にもなることが知られており, 乱流による角運動量輸送も引き起こす. 円盤の内側の方はガスが磁場と結合しなくなる“デッドゾーン”と呼ばれる領域となり, 磁場の効果では角運動量は輸送されない. そのような領域では上で述べた重力不安定性によって角運動量が輸送されることになる^{8), 9)}.

3. 原始惑星系円盤の分裂

重力的に不安定な円盤は, 上で述べた渦状腕を形成するだけでなく, 分裂してガスクランプを形成する場合がある. 円盤が分裂してできたガスクランプはもともと中心に存在する原始星とともに連星系を形成したり^{13), 14)}, 原始星の周囲を公転するガス惑星へと進化する可能性がある^{15), 16)}. また, 褐色矮星の起源としても注目されている^{17), 18)}. あるいは, 形成されたガスクランプは周囲に残っている円盤との相互作用で角運動量を失い, 原始星へと落下する場合も考えられる. このガスクランプの原始星への落下は, 原始星の増光として観測される可能性もある^{19), 20)}. このように原始惑星系円盤の分裂は星・惑星形成や原始星の観測等多くの研究と関連する重要な現象である(図2). しかし, 円盤の自己重力不安定性については古くから研究が行われているにもかかわらず, 原始惑星系円盤の形成・進化の過程でいつ円盤が分裂するのかについては, これまで明らかになっていなかった.

3.1 円盤の自己重力不安定性

円盤が自己重力に対して不安定になるかどうか

は、円盤中のガスが自己重力によって収縮する効果と、圧力や回転によって収縮を妨げる効果の比較で決まる。これらの比較で自己重力が十分強い場合に円盤は重力的に不安定になり、圧力や回転による効果が強い場合には円盤は安定となる。例えば、温度と面密度が一様な回転円盤の場合だと不安定となる条件が線形解析から簡単に得られる。この場合、円盤の不安定性はトゥームレの Q パラメータと呼ばれるパラメータで特徴づけられる。ケプラー回転する円盤では、トゥームレの Q パラメータは

$$Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma}$$

で与えられる。ここで c_s は音速、 Ω は円盤の回転角速度、 G は重力定数、 Σ は面密度である。この式の右辺の分母は重力でガスが収縮する寄与、分子は圧力や回転の効果で収縮が妨げられる寄与を表している。この Q パラメータが小さい（面密度が大きい、温度が低い、回転が遅い）ほど円盤は重力的に不安定となり、 $Q < 1$ は重力的に不安定な円盤、 $Q \geq 1$ は安定な円盤に対応する。実際の原始惑星系円盤に重力不安定性によって渦状腕が形成される条件は厳密にはこの Q で表すことはできないが、数値シミュレーションから Q が 1-2 程度の円盤で渦状腕が形成されることがわかっていてる。

3.2 重力的に不安定な円盤の分裂

上でも述べたように、 $Q \lesssim 1$ 程度の原始惑星系円盤に渦状腕が形成されると円盤中のガスの角運動量が輸送され、円盤から原始星へのガス降着が進む。そのため、渦状腕形成はガスの面密度を減少させ、自己重力を弱める。この結果、もし $Q \geq 1$ となると円盤は安定化され、渦状腕が形成されなくなり原始星への降着も止まる。一方、原始惑星系円盤の形成期では分子雲コアから円盤へのガス流入が続いているため、一度円盤が安定になったとしても面密度が増加することで再び円盤は不安定化し、円盤から原始星へのガス降着が起こる

ようになる。したがって、円盤へのガス降着による不安定化の効果と渦状腕による安定化の効果により、円盤は $Q \sim 1$ を保ちながら進化する。このような $Q \sim 1$ で渦状腕が形成している円盤の中には、進化の過程で分裂する物もあれば分裂しない物もある。そのため、原始惑星系円盤の分裂条件を考えるうえでは、 $Q \sim 1$ の円盤に対して、さらにどのような条件が円盤の分裂を決めているのかを知る必要がある。

3.3 円盤分裂条件の先行研究と問題点

先行研究として最も有名な研究は、冷却率に対する円盤の分裂条件である。この冷却率に対する条件は Gammie によって初めて示され²¹⁾、それ以降関連する多くの研究が行われている。この条件はもともとは原始惑星系円盤の 2 次元の局所的なシミュレーションから得られたもので、円盤中のガスの冷却のタイムスケールが原始惑星系円盤のダイナミカルタイムスケール ($1/\Omega$) の約 3 倍より小さい場合だと $Q=1$ の円盤が分裂するというものであった。また、その後 3 次元の大局的なシミュレーションでもこの条件が使用可能であると主張する研究が行われた²²⁾。この条件は、重力不安定性の成長のタイムスケール $\sim 1/\Omega$ の間に十分ガスを冷却できれば、ガスが圧力で支えられることなく収縮を続けるため分裂すると解釈できる。この条件は物理的に直感的で受け入れやすく、また、実用上便利であったため、多くの研究で用いられることになった。

しかし、その後の研究でこのような単純な原始惑星系円盤の分裂条件とは矛盾する結果が報告されている。例えば、原始惑星系円盤の形成・進化のシミュレーションから、冷却しない場合でも円盤が分裂する場合¹⁵⁾ や、十分早く冷却しているにもかかわらず円盤が分裂しない場合^{14), 23)} があることが示されている。このことは、冷却のタイムスケールが円盤分裂において本質的ではないことを示している。円盤の重力不安定性は、ガスの自己重力による収縮と、それを妨げる圧力と回転

の効果の関係で決まる。「冷却時間が十分短ければ分裂できる」という条件は、「圧力が十分効かなければ分裂できる」と言い換えることができるが、この条件は自己重力や回転の寄与を考慮していないという意味でも片手落ちの感が拭えない。

このような状況でも、これまでの円盤分裂の条件に関する研究は、主に分裂に必要な冷却率の臨界値を調べる研究であった。しかし、先行研究が示していることはむしろ、冷却率だけでは円盤分裂が予言できないということである。そのため、本当に必要な円盤分裂条件についての研究は、冷却率をパラメータとして分裂するかどうかを調べるのではなく、円盤が分裂する過程で何が起きているのかを明らかにし、その物理過程を理解することである。

4. 新たな円盤の分裂条件

4.1 分裂する渦状腕の構造

本質的な円盤分裂条件を明らかにするため、われわれはまずさまざまな初期条件や境界条件で自己重力円盤の2次元シミュレーションを行い、円盤が分裂する過程を詳細に解析した。円盤には重力不安定性により渦状腕が形成され、いくつかの場合では渦状腕のガスが腕に沿って収縮しながら分裂した。本研究では分裂した渦状腕としなかった渦状腕の両方について面密度や温度などを詳細に解析し、分裂を特徴づける物理量を調べた。

図3に分裂しなかった場合、図4に分裂した場合のシミュレーションの結果を示す。図3の上段の図は円盤の面密度分布を表している。われわれは面密度分布から渦状腕の位置を特定し、渦状腕に沿った物理量を取り出すことで渦状腕の構造を詳細に調べた。上図の黒点は本研究の解析で得られた渦状腕の中心を表している。下図はこの黒点で表した渦状腕での局所的なQの分布である。横軸は渦状腕に沿った長さである。分裂する渦状腕と分裂しない渦状腕では、このQの最小値に違いがあることがわかった。分裂しない場合の図

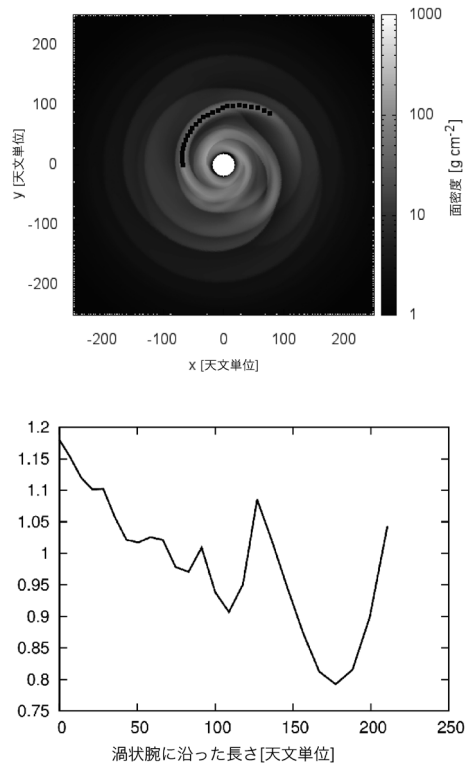


図3 分裂しなかった円盤のシミュレーション結果。上図：円盤の面密度分布。黒点は今回の解析で調べている渦状腕の中心を表す。下図：渦状腕に沿ったQパラメータの分布。全体で $Q > 0.6$ を満たしていることがわかる。

3では、全体で $Q > 0.8$ となっている。図4の上段、中段の図はそれぞれ分裂前、分裂後の円盤の面密度分布である。上段の図の黒点は、分裂する渦状腕の中心を表している。この渦状腕が分裂して形成されたガスクランプを中段の図に示している。下段の図は上段の図の黒点で表した分裂する渦状腕での局所的なQの分布である。分裂した場合の渦状腕では、Qが0.6を下回っている領域が存在している。この渦状腕はその後、 $Q < 0.6$ の領域に向かって渦状腕のガスが集まり、最終的に分裂することがわかった。ここではシミュレーション結果の一例だけを示したが、これ以外にも円盤の質量や中心星からの輻射の強度、円盤のスケールハイト、円盤の内縁半径などをさまざまに変えて

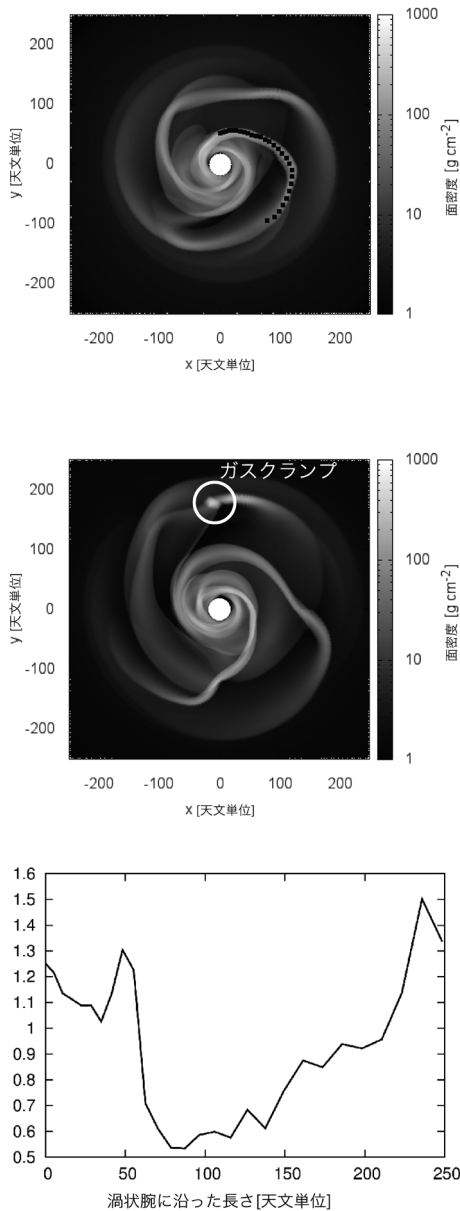


図4 分裂した円盤のシミュレーション結果. 上段: 分裂前の円盤の面密度分布. 中段: 分裂後の円盤の密度分布. 下段: 黒点で示した渦状腕に沿ったQ値の分布. 渦状腕上で $Q < 0.6$ を満たす領域が存在している.

計算を行っている. そして, そのすべての計算結果で円盤分裂の条件が「渦状腕中の局所的な Q が0.6以下になること」であることを発見した*1.

また, われわれはシミュレーションで形成された渦状腕中での冷却時間と分裂の関係も調べた. その結果, 先行研究で指摘されていたように, 冷却しないにもかかわらず分裂する渦状腕, 冷却が十分早いにもかかわらず分裂しない渦状腕が存在し, 従来の冷却率に対する分裂条件では円盤の分裂を予言できないことも確かめられた. この結果から, 従来の冷却率に対する条件ではなく, 本研究で得られた「渦状腕中の Q の値が0.6を下回る」という条件が円盤分裂の条件としてより本質的であることがわかった.

4.2 渦状腕の重力不安定性についての線形解析

われわれはこの計算結果からさらに踏み込んで, なぜ渦状腕中で $Q < 0.6$ になると分裂するのかを理解するため, 渦状腕の重力不安定性に注目して線形解析を行った. 円盤中に形成された渦状腕はダイナミカルタイム程度で散逸してしまうため, 線形解析に必要な非摂動状態を厳密に与えることが非常に困難である. そこで, 本研究では, 渦状腕を軸対称の「リング」だと近似して解析を行った. これは一見非常に大胆な近似だが, シミュレーションでは分裂が渦状腕の局所的な領域で起こっており, その領域では中心星からの距離がほとんど変化しないため(ピッチ角が小さい, 図3, 4の上図参照)渦状腕をリングで近似した線形解析は渦状腕の重力不安定性を本質的に再現していると考えられる. われわれはこの近似のもとでリングに沿った方向の揺らぎに対する局所線形解析を行い, リングの自己重力不安定性に対する分散関係を導出した. この線形解析は円盤の重力不安定性の線形解析とよく似ているが, 円盤と違

*1 初めに数本の渦状腕に対してこの分裂条件で説明できることがわかったときは, 「きっともう少し違う渦状腕を解析すればすぐに例外が見つかるだろう」と思っていた. しかし, さまざまなセットアップでシミュレーションを行い数十本の渦状腕について同様の解析をしても, 結局例外を発見することはできなかった. 条件の発見者が否定しようとしても否定できなかったということは, この条件が信用に値する物であることを示唆している個人的には思っている.

いリングの幅が有限であるため、面密度揺らぎに対する自己重力の大きさが変化する。このとき分散関係はリングの幅と線密度に依存していて、リングが細く線密度が大きい場合に不安定となる。

本研究で行ったシミュレーションの結果から、渦状腕の腕に垂直な方向の面密度分布がガウス分布で近似できることがわかった。これを用いると、渦状腕の幅と線密度を面密度分布と対応づけることができる。その結果、リングの分散関係を Q パラメータを使って書き直すことができる。こうして得られた分散関係からリングは $Q \leq 0.6$ で重力的に不安定になり、リングに沿ってガスが収縮することがわかった。このリングの重力不安定性の条件は、シミュレーションから得られた渦状腕の分裂条件と一致する。すなわち、円盤の分裂は渦状腕の自己重力不安定性が成長した結果として起こることがわかった。

5. まとめと今後の展望

本研究で行ったシミュレーションおよび線形解析から、円盤が分裂する条件は「円盤上に形成された渦状腕中で Q パラメータの値が 0.6 より小さくなり、渦状腕の重力不安定性が成長すること」だとわかった。これまでの先行研究では主に冷却率をパラメータとして与えたシミュレーションを行い、結果として分裂が起きるかどうかを調べるだけで、分裂する過程で渦状腕中のガスの詳細な振る舞いについては注目されてこなかった。それに対して、本研究では、シミュレーションから分裂条件を Q と対応づけただけでなく、その臨界値の物理的意味を線形解析から明らかにしたという点で、より本質的な分裂条件を発見することができた。図5に円盤が重力不安定性で分裂するかどうかを判定するためのフローチャートを示す。原始惑星系円盤が重力的に安定で全領域で $Q \geq 1$ を満たす場合、円盤に渦状腕などは形成されず滑らかな構造をもつことになる。一方、円盤が $Q \leq 1$ を満たすと重力不安定性が成長し、渦状腕が形

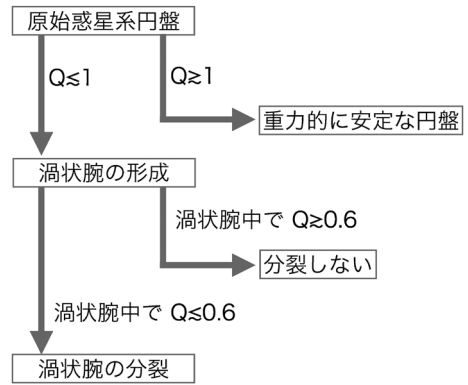


図5 本研究で明らかになった円盤が自己重力不安定性で分裂する過程のフローチャート。

成される。渦状腕が形成された円盤は平均的には $Q \sim 1$ 程度を保つことになる。渦状腕が形成された円盤のうち、より重力的に不安定な円盤は渦状腕で重力不安定性が成長し、分裂する。この分裂の条件が、本研究で得られた「渦状腕中で局所的に $Q < 0.6$ を満たす」という条件である。このように円盤分裂の過程を「円盤での渦状腕形成」と「渦状腕の分裂」に明確に分離できたことは、この研究結果の大きな意義の一つである。

この研究によって原始惑星系円盤の分裂条件についての理解を進めることができたが、まだこれですべてを理解できたわけではない。今後取り組むべき重要な課題の一つは、分裂条件を満たすような渦状腕が円盤に形成される過程を明らかにすることである。これを明らかにすることで、初期条件として与える円盤の面密度や温度の分布から、円盤が分裂するかどうかを直ちに予言することが可能となる。本研究のシミュレーションから得られた渦状腕では、 $Q < 0.6$ を満たす領域は渦状腕同士の間衝突・合体を経験している場合が多いことがわかった。分裂が起こる円盤であっても、円盤に形成されたすべての渦状腕が分裂するのではないため、衝突などで条件を満たしやすくなった渦状腕だけが分裂に至っていると考えられる。この点に留意しつつ今後解析を行うことが必要となる。

円盤の形成・進化と分裂の関係も、今後明らかにすべき問題である。本研究では、簡単のために周囲から円盤への降着がない、孤立した円盤について分裂のシミュレーションを行った。しかし、円盤分裂は面密度が大きく不安定になりやすい円盤形成期に起こると考えられる。このとき、円盤の面密度分布などは円盤への質量や角運動量の降着率などで決まる。この質量・角運動量降着率と円盤分裂の関係が明らかになれば、円盤分裂に必要な分子雲コアの性質も明らかになることが期待される。また、円盤が分裂した後形成されたガスクランプのその後の進化も興味のある問題である。ガスクランプが中心星へと落下するのか、生き残り星やガス惑星になるのかがわかれば、円盤分裂と天体形成との関係を明らかにすることができるだろう。今後これらの問題に取り組むことで、原始惑星系円盤の分裂について総合的に理解を進めていきたい。

謝 辞

本稿の内容は2016年に筆者らが発表した論文に基づいている¹⁾。本研究を進めるうえで多くのご助言をいただき、本稿の執筆にも協力していただいた共同研究者の犬塚修一郎氏、塚本裕介氏に感謝申し上げます。また、本稿の校正に協力していただいた杉村和幸氏、本稿を執筆する機会を与えていただいた町田正博氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Takahashi, S. Z., Tsukamoto, Y., Inutsuka, S., 2016, MNRAS 458, 3597
- 2) Larson R. B., 1969, MNRAS 145, 271
- 3) Masunaga H., Miyama S. M., Inutsuka S., 1998, ApJ 495, 346
- 4) Masunaga H., Inutsuka S., 2000, ApJ 531, 350
- 5) Goodman A. A., Benson P. J., Fuller G. A., Myers P. C., 1993, ApJ 406, 528
- 6) Caselli P., Benson P. J., Myers P. C., Tafalla M., 2002, ApJ 572, 238
- 7) Bate M. R., 1998, ApJ 508, L95
- 8) Inutsuka S., Machida M. N., Matsumoto T., 2010, ApJ 718, L58
- 9) Inutsuka S., 2012, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 01A307
- 10) Takahara F., 1976, Prog. Theor. Phys. 56, 1665
- 11) Iye M., 1978, PASJ 30, 223
- 12) Balbus, S. A., Hawley, J. F., 1991, ApJ 376, 214
- 13) Machida M. N., Tomisaka K., Matsumoto T., Inutsuka S., 2008, ApJ 677, 327
- 14) Kratter K. M., Matzner C. D., Krumholz M. R., Klein R. I., 2010, ApJ 708, 1585
- 15) Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto T., 2010, ApJ 724, 1006
- 16) Vorobyov E. I., Basu S., 2010, ApJ 714, L133
- 17) Stamatellos D., Whitworth A. P., 2009, MNRAS 392, 413
- 18) Basu S., Vorobyov E. I., 2012, ApJ 750, 30
- 19) Vorobyov E. I., Basu S., 2006, ApJ 650, 956
- 20) Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto T., 2011, ApJ 729, 42
- 21) Gammie C. E., 2001, ApJ 553, 174
- 22) Rice W. K. M., Lodato G., Armitage P. J., 2005, MNRAS 364, L56
- 23) Tsukamoto Y., Takahashi S. Z., Machida M. N., Inutsuka S., 2015, MNRAS 446, 1175

Fragmentation of Protoplanetary Disks by Self-Gravity

Sanemichi TAKAHASHI

*Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3
Aoba, Aramaki-Aza, Aoba-ku, Sendai
980-8578, Japan*

Abstract: Protoplanetary disks are very massive in the early evolution phase. These disks are gravitationally unstable, and some disks fragment. Fragmentation of the protoplanetary disk is a candidate of a formation mechanism of binary systems, brown dwarfs, and gas giant planets. The condition for fragmentation of the protoplanetary disk is, however, still unclear. We performed numerical simulations and linear stability analysis, and found that the condition of fragmentation is $Q < 0.6$ in spiral arms formed in the disks.