

惑星系形成における双極分子流の役割

渡邊 誠一郎 (名大・理)

1. 惑星形成過程 (微惑星の形成まで)

まず、惑星系形成過程は、微惑星の形成を境に二分される。ここでは微惑星形成までの過程に関する、現在の標準的な描像を概観しよう (図1を参照)。

星と惑星系は、分子雲で生まれた。分子雲はフラクタルな構造をもつが、特に密度の高い分子雲コアは、星間磁場や乱流によって支えられ、準静的に収縮している。この分子雲コアが自己重力不安定によって動的な重力収縮を開始すると中心に原始星が形成される。収縮は、密度の高い中心部で始まり、外へと音速の膨張波として伝搬していく。収縮が球対称に進行すると、中心への単位時間当たりの質量降着量 $\dot{M}_0$ は、ほぼ一定となり、

$$\dot{M}_0 = 0.975c^3/G \quad (1)$$

で与えられる。ここで c は分子雲コアの実効的な音速、 G は万有引力定数である。質量降着率の大きさは 10^5 – 10^6 年かかって太陽質量のガスを供給する程度である。

中心に落下したガスが解放するエネルギーによって原始星は輝き始める。原始星の放射は、落下中のガス (エンベロープ) に含まれるダストに一旦吸収され、さらに外側 (約 10 AU) で再放出される。このため原始星の見かけの温度は 100 K 程度となり、可視光では見えない。

分子雲コアは、ゆっくりだが回転している。そのため、収縮の後期になると、角運動量の大きなガスが落下してくる。このガスは直接原始星まで落下できず、遠心力と重力がつりあう半径でケプラー回転する。この結果、原始星のまわりに原始惑星系円盤 (以下では単に円盤とよぶ) が形成される。こうなると、直接原始星に落下する質量は減少し、円盤に垂直な方向からは原始星が直接見えるようになる。この段階が古典的 T タウリ型星と考えられる。

このステージで、円盤と垂直な方向に超音速の光ジェットが吹き出し、双極分子流を駆動している。この光ジェットの成因については後で述べる。

円盤の形成期は、激しい乱流状態にあり、能動的円盤の状態にある。この段階のディスクは、トルクによって、角運動量が外側に、質量が内側 (中心星側) に輸送されるため、降着円盤とも呼ばれる。こうして、大きな角運動量を持った物質も螺旋を描いて中心星へと輸送される。

ところで、円盤には様々な流体力学的不安定が内在する。これらのうち自己重力不安定は特に重要である。円盤の質量が中心星の 1/4 程度になると円盤構造は軸対称なゆらぎに対して不安定化し、多くの塊に分裂することが知られている。ところが、非軸対称なゆらぎに対してはより小さい円盤質量で不安定化するらしい。これは、円盤がケプラー回転しているためで、自己重力の関与したシア不安定の一種とみなすことができる。この場合、不安定は、円盤は分裂させず、むしろ乱流を生じさせ、トルクを増大させる。つまり、トルクが不十分であると円盤に質量が溜まり、それがトルクを増大させて、円盤の分裂を防ぐ効果があると期待される。

乱流中で、ダストは、合体により成長するが、大きくなるとこわれ易くなり、成長は頭打ちになる。一方で、ダストは、ガスよりゆっくり公転するため、抵抗を受け、ガスに対して

相対的に内側へと移動する。その結果、ダストは成長しながら中心星へ螺旋を描いて落ちていく。円盤の鉛直方向には乱流でよく混ぜられ、ダストはほとんど沈澱できない。そのため、能動的円盤の段階で惑星形成は起こらないと考えられる。

分子雲からのガスの降り積もりが無くなると、円盤質量は減少し、自己重力不安定に起因するトルクは減少する。その結果、円盤は、乱流が弱く質量輸送率 M_D の小さい、受動的円盤へと進化していくだろう。一方、中心星は、ジェットの吹き出しが衰え、コロナが形成され、強い X 線が放出される、弱輝線 T タウリ型星の段階に入る。この段階で、円盤は、中心星に質量を供給する役割を終え、内部で惑星を育む母胎としての役割を果たすようになる。

乱流が弱まるとダストは円盤の中心面付近に沈澱する。乱流の無い静かな円盤でのダストの沈澱時間は数千年程度である。これは、乱流が衰えていくタイムスケール (約 10^6 年) に比べて十分に短く、ダストは乱流減衰に応じて沈澱していくと考えられる。ダストが薄い層に沈澱していくと、そのダスト層自体の重力が無視できなくなる。ダスト層の厚みがガス円盤の典型的な厚みの 10^{-4} 程度になると、層は自己重力不安定により分裂し、その結果生じた塊が微惑星を形成することになる。

ダスト層の分裂で形成される微惑星の 1 個の質量は、約 10^{15} – 10^{18} kg 程度、大きさが数 km–数十 km である。こうした天体が、ディスク全体で数千億個も造られる。微惑星は小さいが、一人前の自己重力天体で、自分たちの重力で合体していくことができる。こうして惑星集積過程が進行し、惑星系ができてゆく。

微惑星形成までのステージでの主な問題点は次の通りである：

- 分子雲コアの持つ角運動量は、現在の太陽系の角運動量の 10^3 倍近い。ガス成分を還元した太陽系星雲に対しても数十倍程度である。
- 分子雲コアからの質量供給が停止する原因がわかっていない。生まれる星の質量 (IMF) は典型的には分子雲コアの質量の $1/5$ – $1/10$ に過ぎず、単純に分子雲コアガスの枯渇が原因でないことがわかる。
- 降着円盤の角運動量輸送を担うトルクの原因が明確になっていない。磁気トルク、自己重力トルク、乱流トルクの 3 つが有力である。
- 微惑星形成に必要な、ダストの極めて薄い層への沈澱は困難である。それは、ガス自体の乱流の他にも、ガスとダストの境界面での鉛直シア不安定による乱れ等、ダストの沈澱を妨げるいくつかの要因が挙げられるからである。
- 原始惑星系円盤の進化の結果決まる惑星の材料物質分布と太陽系の惑星分布からの還元モデルとして決められた林モデルとはどの程度整合性があるのか不明である。

2. 双極分子流発生のメカニズム

ここでは、双極分子流を駆動する光ジェットの発生のメカニズムを考える。円盤の最内側領域において中心星の磁気遠心力によりジェットを吹き出させるモデルは米国の F. Shu 等によって提唱された⁽¹⁾。

双極子磁場を持ち角速度 Ω_* で回転する中心星とその周囲をとりまく能動的円盤を考えよう (図 2 参照)。中心星は、双極子磁場を持つとする。

円盤は有限の抵抗率を持つため、磁場に貫かれる。円盤はほぼケプラー回転するために、その角速度 Ω が Ω_* と異なる部分ではシアにより磁力線の巻き込みが生じ、磁気散逸摩擦と磁力線の張力がつりあう形状になる。能動的円盤の段階では、円盤では中心星に向かって盛んな質量供給があるため中心星磁力線は、円盤を貫く部分で中心星側に引きずられ内に凸の形で湾曲する。この結果、 $\Omega = \Omega_*$ となる半径 R_c (共回転半径) 付近に R_c から $2R_c$ あたりを貫いていた磁力線が束ねられたようになる。

共回転半径付近では、磁力線が束ねられる効果で磁場が強化されるため、円盤の厚み程度の幅で共回転領域が形成される。

円盤内縁から R_c までの領域は、各場所でのケプラー角速度より小さな角速度 Ω_* で共回転している。そして弓なりの磁力線によって星の表面とつながっている。この磁力線に沿って実効ポテンシャルは減少するので、ガスは磁力線にそって星まで落下することができる。このとき落下ガスが持つ角運動量は、磁力線に沿って円盤に輸送される。

一方、 R_c の外側領域では、磁力線はディスク面を離れるにつれて外向きに広がっているため、磁気遠心力により荷電粒子を磁力線に沿って加速する。荷電粒子との衝突により中性粒子も加速されジェットとして吹き出す。加速されたガスは、アルベーン速度を超えると逆に磁力線を引きずり無限遠方まで飛び出す。定常なジェットは磁気音速点やアルベーン点を通過する解として求められる。

このジェットの吹きだしモデルは、魅力的だが、細部は詰められておらず、解の安定性・許容される諸パラメタの範囲もわかっていない。

3. 双極分子流の役割

双極分子流とそれを駆動する光ジェットが星・惑星系の形成に果たす、最も重要な役割を3つ挙げる。

まず、降着ガスの角運動量を奪い、中心星へと落下させる役割がある。円盤の共回転半径付近での角運動量の収支を考えてみよう。中心星の質量・半径・回転角速度を M_* , R_* , Ω_* とする。また、円盤とジェットの質量輸送率をそれぞれ $\dot{M}_D$, $\dot{M}_w$ とする。このとき、

$$\frac{d}{dt}(bM_*R_*^2\Omega_*) = \dot{M}_D R_c^2 \Omega_* + 2\pi R_c^3 \left(\nu_t \Sigma \frac{d\Omega}{dr} \right)_{R_c} - \dot{M}_w \bar{J} R_c^2 \Omega_* \quad (2)$$

ここで b は星の構造から決まる定数で、全域で対流状態にある星では 0.14–0.2 程度である。また、 ν_t は乱流粘性率、 Σ は円盤の面密度 (単位面積当たりの密度)、 $\bar{J}$ はジェットの持ち出す単位質量当たりの角運動量である。左辺の星の角運動量変化は、右辺第1項の円盤からの質量降着による角運動量増加と、第2項の粘性トルクによる角運動量変化、さらに第3項のジェットにより角運動量が持ち去られる割合によって決まる。なお、質量収支は、

$$\dot{M}_* = \dot{M}_D - \dot{M}_w \quad (3)$$

と書ける。これらの式から、ジェットが効率良く角運動量を持ち出すため中心星のスピンアップが押さえられることがわかる。現在の太陽は、太陽系の全質量の 99.9% を占めるが、角運動量は 0.5% しか担っていないが、これは半径の大きな部分では円盤の粘性トルクにより、太陽近傍ではジェットにより、それぞれ効率よく角運動量が輸送されたためと考えられる。

次に、分子雲ガスに運動量を与え、中心星・円盤への質量供給を衰えさせる役割がある。観測される分子雲コアの質量分布に対して星の IMF は、低質量側にシフトしている。双極

分子流は、ディスクに垂直な方向の分子雲ガスを吹き払い、その影響は音速程度で周囲に伝わる。双極分子流からの影響が、膨張波より早く伝わる領域では、質量は中心星・円盤へは落下しない。このことから、単位時間に中心星・円盤に降着する質量(質量降着率) $\dot{M}$ を求めると(3)

$$\dot{M} = \left[\hat{t}^{-1/2} (2 - \hat{t}^{-1})^{1/2} \cos \phi - (1 - \hat{t}^{-1}) \sin \phi \right] \dot{M}_0 \quad (4)$$

となる。ここで、 ϕ は双極分子流を駆動するジェットの開き角、 $\hat{t}$ は分子雲コアが収縮を開始してからジェットが吹き出すまでに要する時間で規格化された時間である。

このため、質量供給は衰え、星の質量は自律的に調整される。分子雲コアからの質量供給停止のタイミングは、円盤質量の最大値を決めるため、連星系の形成条件とも関連する(3)。

最後に、惑星の材料物質の起源にも大きな役割を果たす。1節で見たように能動的円盤の中では、ダストは中心星へと落下する。このため、能動的円盤の段階で形成されたダストは、惑星形成には関与せず、受動的円盤の段階に各半径に運ばれてきたダストが惑星の材料物質になると考えられる。だが、ディスクの内縁付近から吹き出す光ジェットは、ダストを吹き上げサイズに応じてダストを遠方に再投入する(2)。つまり、能動的円盤の段階では、円盤中を内側へ落下したダストが、ジェットの吹きだし口付近で、高温(1500-2000 K)にさらされ部分蒸発したり凝縮する。融け残りのダストはディスク表面に運ばれると急速に冷却され、周囲から鉱物が凝縮する(これが始源的隕石中の高温包有物の周囲のリム構造の形成に対応するかも知れない)。これらがサイズに応じてジェットによって円盤の外側に運ばれ、低温のダストと混合されることになる。これは、カルシウムやアルミニウムに富んだ白色包有物(CAI)やコンドリュールといった比較的粒子サイズの揃った高温包有物が、マトリックスを構成する低温で保持された細粒ダストに混在するという、始源的な隕石の基本的な特徴を説明する。

このように、円盤の内縁部から吹き出す光ジェットは、惑星形成に対して極めて重要な役割を果たす。その発生メカニズムや進化については、現時点では不明な点が多いが、観測の蓄積とともに次々と解明が進むものと期待される。

参考文献

1. Shu, F., J. Najita, E. Ostriker, F. Wilkin, S. Ruden, and S. Lizano (1994) *Astrophys. J.* **429** 781-796.
2. Watanabe, S. (1994) *Proc. 27th ISAS Lunar Planet. Sympo.* 83-86.
3. Watanabe, S. and Uno K. (1996) *In preparation.*

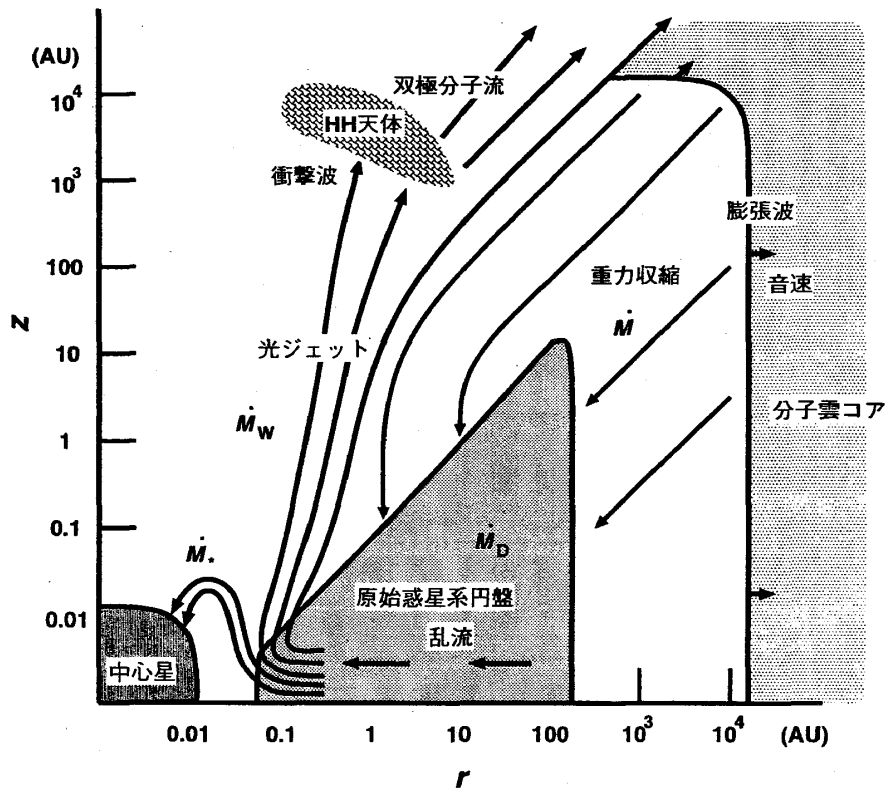


図1 惑星系形成時の模式図

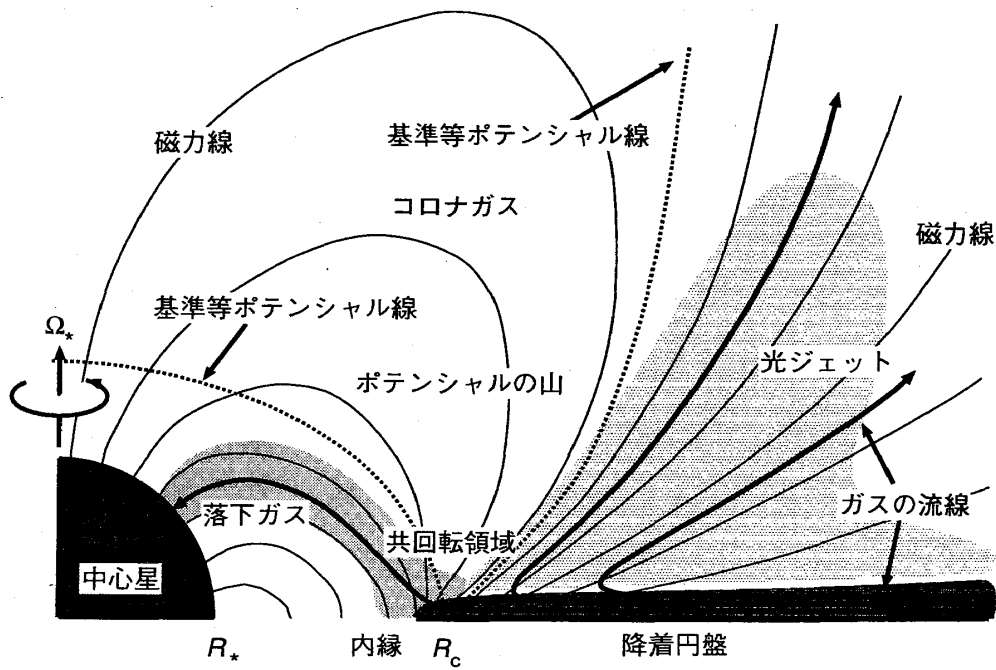


図2 磁気遠心力風モデル (円盤面に垂直な断面図)