

Title	分子雲コア中での星形成の数値シミュレーション
Author(s)	町田,正博
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2014, 4, p. 45-48
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70484
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

分子雲コア中での星形成の数値シミュレーション

町田 正博 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

1. はじめに

星は宇宙の最も基本的な構成要素であるため、そ の形成過程を理解することは重要である。観測から 星は銀河内の複数の領域で集団的に誕生しているこ とが分かっている。様々な観測によって我々近傍の 星形成領域は詳しく調べられており、以下のことが 理解されている。(1)星は分子雲コアと呼ばれる低 温で比較的密度が高いガスのかたまりの中で誕生す る、(2)星が誕生する際にはジェットとアウトフロ ーというガスの放出現象を示す、(3)生まれたばか りの星(原始星)の周りには星周円盤が出来、その 内部で惑星が誕生する。

しかし、観測のみによって星が誕生する過程を理 解することは困難である。実際に観測から分かるの は、"星が誕生する直前の初期条件である分子雲コ ア"と"星が誕生してしばらく経過した後の結果で ある原始星、ジェット、円盤"などであり、星が誕 生する現場(つまり星形成過程)は、密度が濃いガ ス雲中であるために如何なる波長の電磁場を用いて も観測する事は難しい。そのため星形成過程を理解 するためには、数値シミュレーションが必要となる。 我々は、星形成の母体となる分子雲コアを初期条件 としてその重力収縮から星や円盤が出来る過程、ま たはアウトフローやジェットが駆動する過程を調べ てきた。

2. 計算の設定と計算手法

上記のように星は分子雲コアの中で誕生する。分 子雲コアは詳細に観測されており、密度分布、角運 動量や磁場の強さと向きなどの情報が詳細に分かっ ている。円盤形成やアウトフロー、ジェットの駆動 には分子雲コアの磁場、回転が重要となる。シミュ レーションで星形成過程を理解するためには、観測 されているような分子雲コアを初期条件としてその 重力収縮の過程を計算する。しかし、分子雲コアと 原始星の空間スケールは大きく異なる。分子雲コア は>10⁴AUのスケールを持つのに対して、星の半径 は~0.01AUであるため空間スケールが6桁以上も異 なる。この大きく異なる空間スケールを解像するた めに、我々は多層格子法という計算手法を用いてい る。図1は、多層格子法の概念図である。実際には



図1:多層格子法の概念図

3 次元であるが、理解しやすさのため 2 次元で表示 している。多層格子法は、図のように空間分解能の 低いグリッドで全体を覆いながら、細かいグリッド で空間分解能の必要な領域を覆う手法であり、粗い グリッドから細かいグリッドまでを一体として時間 推進する。この手法により、原始星と分子雲コアと いう空間スケールが大きく異なる天体の両方を同時 に空間解像することが出来る。

また、分子雲コアは、ほぼ中性の水素分子から成 っているが、ある程度イオン化しているため磁場と 中性ガスは良く結合している。しかし、分子雲コア が収縮して密度が上昇すると電子が分子雲中にわず かに含まれるダストに吸着するためにイオン化度が 低下し、磁場がオーム散逸によって散逸する。その 散逸の過程も正しく計算するために Resistive MHD 方程式を解き、分子雲の進化を計算する。



図2:前期段階の進化

2. 星形成の前期段階の計算

星形成過程は、理論的にガスが収縮して原始星が 誕生する前の"前期段階(ガス収縮段階)"と原始星 形成後にガスが降着する"後期段階(ガス降着段階)" に分けられる。我々の近年の研究によってガス降着 段階の進化は、ほぼ理解することが出来た[1]-[5]。 図2は、分子雲コア収縮後、原始星が出来るまでの 構造の進化を示している。原始星は、収縮する分子 雲コアの中心部分で形成するため各々のパネルで空 間スケールが異なっている。図中の白黒の線は磁力 線を表している。また、高密度領域を赤の等密度面 で、中心部の密度・速度構造を壁面に投影している。

図から分かるように分子雲コアが収縮すると共に 磁力線が中心部に束ねられていく。中心密度が~10¹⁰ cm⁻³を超える中心部分が光学的に厚くなり温度(圧 力)が上昇しファーストコアという天体が(一時的 に)形成する。ファーストコアは非常に緩やかに断 熱的に収縮するために、収縮のタイムスケールが回 転のタイムスケールよりも長くなり磁力線が捻られ て回転と磁場の効果により低速のアウトフローが駆 動する。その後、中心密度がさらに上昇し~10¹⁶ cm⁻³ を超えると水素分子の解離が起こり、その吸熱反応 により第二収縮を起こす。水素分子がほぼ水素原子 に変換されるとガスは再び断熱的になり収縮が止ま り原始星が誕生する(図 2 の右下のパネルの赤い部 分)。誕生した原始星は高速で回転しているために磁 力線を激しく捻り高速のジェットが駆動する。

このように分子雲の収縮中にはファーストコアと 原始星という異なる天体が出来るために、異なる2 つのフロー(低速のアウトフローと高速のジェット) が現れる。

3. 星形成の後期段階の計算

我々や他のグループの研究によって原始星が出来 るまでの分子雲の進化は詳しく解明された。しかし、 この過程で誕生する原始星の質量(形成時のジーン ズ質量で決まる)は太陽の千分の1程度(ほぼ木星 の質量)であり、太陽質量まで成長するためには、 原始星にガスが降着する過程(後期段階)を長時間 計算する必要がある。ガスの降着はおよそ10-100万 年続くと考えられている。しかし、原始星、または 原始星からのジェットまでを空間分解してしまう と、計算のタイムステップが非常に短くなってしま い(~秒のオーダー!)太陽質量程度の星が誕生す るまでの計算は困難になる。

この困難を克服するためにシンクセルという手法 が用いられる。シンクとはすい込み口のことであり、 文字通りシンクセル内に落ち込んだ高密度のガスを 吸い込む(吸い込んだガスは中心星の重力源として のみ扱う)。この種の計算の典型的な時間尺度は自由 落下時間であり密度の1/2 乗に反比例する。そのた め、高密度ガスを取り除くとタイムステップを長く 取ることが出来、長時間の計算が可能になる。他方、 高密度ガスが存在する原始星近傍の領域は空間解像 できないというデメリットがある。しかし、原始星 形成後は原始星ではなく星周円盤にガスが降着し、 星周円盤は原始星よりずっと大きい空間スケールを 持つためにこのような扱いが可能となる。

図3にシンクセルを導入した場合の星周円盤の成 長を示している。近年、磁場の効果によって角運動 量が過剰に輸送されてしまい、回転円盤(星周円盤)





が形成されないという問題(Magnetic Braking Catastrophe)が指摘されていた。これは、具体的に は、磁気制動により円盤の角運動量が落下中のガス に輸送されてしまい、円盤を形成せずに中心星に直 接落下してしまうという問題である。観測的に星周 円盤は確認されており、また星周円盤(原始惑星系 円盤)は惑星形成の母体であるため、円盤が出来な いという事は星・惑星形成過程において様々な矛盾 を生じさせる。しかし、我々の計算によりシンクセ ルを導入した際にファーストコアを十分な空間精度 で分解すれば回転円盤が形成することが分かった。 これは、ガスの収縮が一時的に高密度のファースト コア中で止まり、磁場が散逸するために磁気制動が 非効率的になるためである [6], [7]。

図4は円盤形成後にさらに計算を進めた様子を異 なるスケールで表示している。左側のパネルはより 大きなスケールでの表示で、図中のオレンジ色の領 域はガスが流出している(アウトフロー)領域であ る[8]。また、右上のパネルから中心部分では円盤が 出来ており、アウトフローは円盤の外縁部から駆動 しているのが分かる。さらに右下のパネルでは、円 盤の中で分裂が起こり、惑星質量の分裂片が誕生し ている。

円盤の中心部分は電離度が低く磁場が散逸してい るために磁場が非常に弱い。そのため、アウトフロ ーが駆動する事はできない(アウトフローは磁気遠 心力という磁場と回転の効果によって駆動する)。結 果として円盤内縁部では、磁場による角運動輸送が 効率的ではなく回転円盤が形成する。回転円盤は遠 心力によって支えられているために、ガスが効率的 に中心星に落下することは出来ない。他方、円盤の 外縁部ではアウトフローや磁気制動によって効率的 に角運動量が外層に輸送されてガスは円盤内縁に落 下(移動)する。これらの効果のために円盤内縁部 にガスがたまり円盤の面密度が上昇し、自己重力に よって円盤内部で分裂が起こる。図4の右下のパネ ルの惑星質量天体はこの過程によって形成した。

図5は円盤内縁の分裂によって形成した惑星質量 天体の軌道運動を示している。円盤中で誕生した分 裂片の多くは、最終的には中心星に落下する。この 段階では、中心星は分裂片の落下によってその質量 を増加させる。また、いくつかの分裂片は中心星に 落下することなく生き残った。これらの分裂片は直 接撮像で観測されている中心星から遠い軌道を周回 する惑星になる可能性もある[9]。



図4:異なるスケールでの後期段階の進化

5. まとめと今後の研究

今まで数値シミュレーションを用いて、分子雲コ ア中での星形成過程の計算を行い、原始星の形成過 程、ジェット、アウトフローの駆動メカニズム、円 盤とガス惑星の形成過程を解明してきた。しかし、 上記のように後期段階の計算はシンクセルを用いて いるために原始星近傍を分解できていない。そのた め、図3、図4から分かるように原始星近傍から駆 動する高速ジェットの効果が無視されている。今後



は、中心星までを分解した星形成過程の数値計算を 実行し、星形成過程をより詳細に理解することを計 画している。

参考文献

- Machida, M. N., Tomisaka, K., Matsumoto, T., and Inutsuka, S. (2008), ApJ, 677, 327-347.
- (2) Machida, M. N., Inutsuka, S., and Matsumoto, T. (2008), ApJ, 676, 1088-1108.
- (3) Machida, M. N., Inutsuka, S.-i., and Matsumoto, T. (2007), ApJ, 670, 1198-1213.
- (4) Machida, M. N., Matsumoto, T., Hanawa, T., and Tomisaka, K. (2005), MNRAS, 362, 382-402.
- (5) Machida, M. N., Matsumoto, T., Tomisaka, K., and Hanawa, T. (2005), MNRAS, 362, 369-381.
- (6) Machida, M. N., Inutsuka, S., and Matsumoto, T. (2011), PASJ, 63, 555-.
- (7) Machida, M. N., Inutsuka, S, and Matsumoto, T. (2014), MNRAS, 438, 2278-2306.
- (8) Machida, M. N. and Hosokawa, T. (2013), MNRAS, 431, 1719-1744.
- (9) Inutsuka, S., Machida, M. N., and Matsumoto, T. (2010), ApJ, 718, L58-L62.