星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション

課題責任者

町田正博 九州大学 理学研究院

著者

町田正博*1, 野崎 信吾*1, 平野信吾*2, 川崎良寛*1, 前田夏穂*3, 原田直人*1, 赤池 祐貴*1,

*1九州大学 理学研究院, *2神奈川大学 工学部 応用物理学科 *3神戸大学 理学研究科

キーワード:磁気流体,星形成,惑星形成,ジェット,弱電離プラズマ

1. はじめに

太陽系近傍の星形成領域では、星や惑星の誕生の過程 で磁場が重要な役割を果たす。星の誕生現場では、磁場に よって駆動するアウトフローや磁気制動の効果によって 収縮するガス雲の中心部分から適度に角運動量を星間空 間に輸送する。そのため、円盤分裂によって多重星や星団 を形成することなく、単一の星と星周円盤という系が誕 生する。

他方、初期宇宙の星形成環境では、磁場が極端に弱い。 そのため、磁場が星形成過程に与える影響は無視できる と考えられてきた。しかし、近年初期宇宙の星形成に関し て、星が誕生する現場で磁場が増幅し星形成過程に影響 を与えることが示唆されている。

この研究では、初期宇宙に誕生する超巨大星と磁場の 増幅に関する数値計算を行った。初期宇宙では、重元素が 存在しない、または少量のため、星形成ガスの冷却が効率 的ではない。また、周囲の天体からの輻射によって水素分 子が破壊されるような環境では、ガスは~10⁴ K 程度を保 ったまま収縮する。その結果、短時間で中心にガスが落下 し、高い質量降着率が実現される。落下したガスは最初に 出来た星の周りに巨大な円盤を作る。磁場がない場合、こ の巨大な円盤が自己重力によって分裂することによって 多重星系、またはミニ星団が誕生すると考えられていた。 この研究では、従来の計算では無視されていた、微小磁場 を考慮して初期宇宙の環境で大質量星形成過程の数値シ ミュレーションを行った。

2. 計算手法と初期条件

3次元磁気流体多層格子法の数値計算コードを用いて 初期宇宙での大質量星形成の計算を行った。初期宇宙の 元素組成を考慮した1zone モデルによりガスの熱進化を あらかじめ計算した。この計算からバロトロピック関係 式を構築し、熱進化計算を高速化した。

初期条件として、球対称ガス球を採用した。ガス球の中 心の数密度は10⁴cm⁻³、温度は~10⁴ Kとして、圧力と自己 重力で釣り合った平衡状態にあるガス球にわずかに摂動 を与えたものを準備した。このガス球の重力収縮の過程 を計算した。ガスが持つ金属量と磁場強度をパラメータ として15通りの計算を行った。

計算に使用した3次元磁気流体多層格子法の数値計算 コードは、ES4 で高速に計算出来るようチューニングされ ている。(i, j, k)=(256, 256, 32)の格子を 20 段重ねて原始 星形成後 500 年間の計算を行った。1 モデルの計算には、 実時間で三カ月程度要するため、ノード間はパラメータ 並列を用いて計算を行った。

3. 結果

図1は、モデル Z0B12(金属量0,初期磁場強度10⁻¹²G) の星形成後500年経過した時点の中心近傍のプラズマベ ータを表示している。図から分かるように中心から離れ た場所では、プラズマベータ~10¹⁰程度であり磁場強度は 極めて弱く、ダイナミクスに影響を与えない。他方、中心 部分では、プラズマベータが10-1000程度と磁場が増幅 している。また、図中に複数存在する球状の構造は原始星 に対応する。図に示されているように中心部分で大規模 な分裂が起こっており、数10個の星が誕生している。こ れらの星は合体によって一時的に数を減らすことがある が、合体後も周囲で分裂が起こるためミニ星団を形成す る。



au.



図2はmodel Z4B12 (金属量 Z=10⁻⁴ Zsun, 初期磁場強度 10⁻¹² G)の場合の原始星形成後 500 年間の磁場の増幅(上 段)とプラズマベータの変化(下段)を示している。横軸は ガスの数密度である。

図 2 左パネルから重力収縮の過程で、磁場がおよそ6 桁増幅したことが分かる。密度に対する磁場の冪は2/3 で あり、これはガス球がほぼ球対称にコラプスしたことを 意味している。原始星形成後 100 年後(中央のパネル)で は、所々で磁場が 0.01G、プラズマベータが 10⁵にまで達 している。図中のスパイク構造は原始星に対応する。さら に原始星形成後 500 年後を示した右のパネルからわかる ように、星形成コア中の広い領域で磁場が増幅している ことが分かる。

4. まとめと議論



図3は、磁場の増幅のメカニズムを模式的に示してい

る。過去の研究では、磁場の効果は無視されてきた。磁場 0の場合、「2.計算手法と初期条件」で述べた環境では質 量降着率が高いため、円盤分裂により多数の星が出来る。 また、星が出来る領域は時間とともに広がっていく。磁場 を考慮した場合も図1に示したように、激しく分裂が起 こり複数の星が誕生する。複数の星が誕生すると星々の 軌道運動によって磁場が増幅する。また、星の自転運動に よっても磁場は増幅する。その結果、図2に見られるよう に星周囲で磁場の急増幅が起こる。

磁場が増幅しダイナミクスに影響を与えるようになる と、磁場によって中心部の角運動量(星々の軌道角運動 量)が外側に輸送されるため星の軌道半径は縮まり最終 的に星々は合体する。合体すると磁場が弱い領域で再び 分裂により星々が誕生し、それらの軌道運動により磁場 が再び増幅する。結果、分裂による星形成、誕生した星の 軌道運動による磁場の増幅、増幅した磁場の効果による 星々の合体が繰り返される。そのため、磁場を無視した場 合と異なり、星形成コアの中心領域でミニ星団が保持さ れる。また、星は主に合体により質量を増加させる。計算 中に現れた最も重い星は1万太陽質量を超える。このよ うな星は短時間で寿命が尽き、その後超巨大ブラックホ ールに進化すると考えられる。この研究では、超巨大星と 超巨大ブラックホール形成の新たな道筋を示すことが出 来た。

5. 今後の展望

今回の成果は、水素分子が解離し水素原子が冷却材と なる星形成環境であり超巨大星が誕生する。超巨大星は 超巨大ブラックホールになると考えられる。他方、通常の 初代星形成では、水素分子を冷却材としており温度が水 素原子の場合と比較して低下する。そのため、今回の計算 で得られた超巨大星ではなく、100太陽質量程度の大 質量星となる。初代星環境では、磁場強度が不明であるが、 この研究と同様に磁場強度をパラメータとして初代星形 成を調べることによって、より普遍的に誕生すると考え られる初代星への磁場の影響を探ることが出来ると考え られる。

謝辞

本研究の数値計算は、令和 5 年度地球シミュレータ公募課題「星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション」によって採択された海洋研究開発機構の地球シ ミュレータ(ES4)を用いて行いました。

文献

- Sato, A., Tokuda, K., <u>Machida, M. N.</u>, Tachihara, K., <u>Harada, N.</u>, Yamasaki, H., <u>Hirano, S.</u>, Onishi, T., Matsushita, Y., "Secondary Outflow Driven by the Protostar Ser-emb 15 in Serpens", The Astrophysical Journal 958, December 2023.
- [2] Tokuda, K., Fukaya, N., Tachihara, K., Omura, M., <u>Harada, N., Nozaki, S.</u>, Shoshi, A., <u>Machida, M.</u> <u>N.</u>, "An ALMA-resolved View of 7000 au Protostellar Gas Ring around the Class I Source CrA-IRS 2 as a Possible Sign of Magnetic Flux Advection" The Astrophysical Journal 956, October 2023
- [3] Riaz, B., Thi, W.-F., <u>Machida, M. N.</u> "First observations of warm and cold methanol in Class 0/I proto-brown dwarfs", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 522, 4934-4954, July 2023
- [4] <u>Kawasaki, Y.</u>, <u>Machida, M. N.</u>, "Impact of turbulence intensity and fragmentation velocity on dust particle size evolution and non-ideal magnetohydrodynamics effects", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 522, 3679-3692, July 2023
- [6] <u>Hirano, S., Machida, M. N.</u>, Basu, S., "Magnetic Effects Promote Supermassive Star Formation in Metal-enriched Atomic-cooling Halos", The Astrophysical Journal 952, July 2023