

## 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, 原田直人\*1, 平野信吾\*2, 前田夏穂\*3, 川崎良寛\*1, 野崎 信吾\*1

\*1九州大学 理学研究院, \*2東京大学 大学院理学系研究科, \*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

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。宇宙の晴れ上がり後、赤方偏移  $z=10-20$  で宇宙最初の星であるファーストスターが誕生する。これまでの研究からファーストスターは短寿命だと考えられており、誕生後 100 万年程度で超新星爆発を起こし、重元素を周囲に放出する。重元素を含んだガスは効率的な冷却によって重力収縮し太陽、または太陽の数倍程度の軽い次世代星を誕生させる。また、ファーストスターは、超新星爆発後に中心にブラックホールを残す。このブラックホールが銀河中心に存在する超大質量ブラックホールになる可能性も検討されている。そのため、ファーストスターは、その後の時代で形成する星や惑星の特性、または、宇宙の物質進化と密接に関わっている。

現在の星形成過程では、星間磁場が非常に重要な役割を果たす。磁場の効果である磁気制動やジェットによって過剰な角運動量が引き抜かれガス収縮を促進する。また、アウトフローによってガスの多くが星間空間に放出される。そのため、星の母体となるガスコアの3割程度が星になる。結果、磁場は星の質量の決定においても重要な役割を果たす。

他方、初期宇宙では磁場強度が極めて弱いと考えられている。そのためでのファーストスター形成の研究では多くの場合、磁場の効果が無視され続けてきた。この研究では、数値シミュレーションを用いて初期宇宙の微小磁場がファーストスター形成において及ぼす影響について調べた。

## 2. 計算手法と初期条件

我々がこれまで開発を続けてきた3次元磁気流体多層格子法の計算コードを用いて、ファーストスターの母体であるミニハローを初期条件として星(原始ファーストスター)が形成し、星形成後 1000 年間のシミュレーションを行った。

初期条件として、重力に対して圧力勾配力と外圧で釣り合ったガス球を準備し、密度擾乱を与えて重力収縮が誘起するよう設定する。このガス球に一様磁場と回転(剛体回転)を与える。回転は、重力エネルギーに対する回転エネルギーの割合が1%になるように設定する。回転エネルギーは低解像度の宇宙論シミュレーションで得られた値とほぼ同等である。また、磁場強度をパラメータとして、

初期宇宙で考えられる  $B_0=10^{-20}, 10^{-15}, 10^{-10}$  Gauss と極めて弱い磁場を採用する。また、比較のため  $B=0$  Gauss、つまり磁場が存在しない場合の計算も行う。

計算には我々が開発を続けてきた3次元磁気流体多層格子法の数値計算コードを使用する。このコードは、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1000年間の計算を行った。また、計算結果の空間解像度依存性を調べるためにパラメータは固定して解像度を変えた計算も行った。結果、原始星自体を空間分解すれば解像度によって定性的に結果は変わらない事が分かった。

## 3. 結果

初期宇宙の星形成過程では、ガスの温度が高く、また荷電粒子を吸着するダストが存在しないため、イオン化度はある程度高く保たれる。その結果、ジーンズスケール(重力と圧力で決まる典型的な長さ)での磁場の散逸は有効ではない。この場合、磁束の保存によって、磁場は密度の2/3(球対称)、または1/2(円盤形状)の幕で増幅する。図1は異なるモデルの磁場分布を時間ごとに示している。図で上段が最も弱磁場のモデル( $B_0=10^{-20}$ G)である。このモデルでは、星が出来る前の過程で重力収縮による密度の

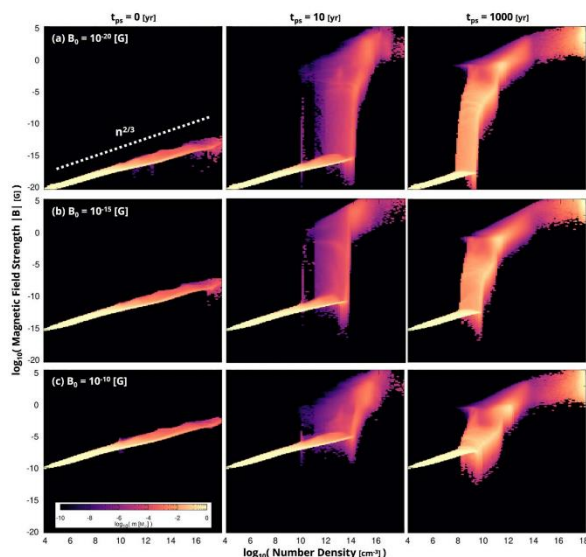


図1：磁場の時間進化。パネルの縦軸が磁場強度、横軸が中心密度。初期磁場  $B_0=10^{-20}, 10^{-15}, 10^{-10}$  G の場合の原始星形成時(左)、原始星形成後10年(中央)、1000年(右)の磁場強度分布を示している。

増加によって、磁場強度が  $10^{-15}$  G 程度まで増幅しているのが分かる。しかし、 $10^{-15}$  G では磁場強度が弱すぎてダイナミクスに影響を与えない。

その後、星形成後 10 年間で、原始星近傍の高密度領域で磁場が  $10^5$  G まで急増幅していることが分かる。重力収縮の過程で、中心部分で分裂が起こり、複数の原始星が誕生した。また、各々の原始星は高速で自転している。この時期の磁場の急増幅は、原始星の軌道運動と各々の原始星の自転がダイナモとして働いたことによるものである。その後、分裂片は磁気制動によって最も大きな原始星に落下し単一の星が残るが、単一の星の自転と原始星周囲のガスの差動回転によって図 1 右図のように磁場は増幅し続けることが分かる。 $B_0=10^{-15}$ G (中段)  $10^{-10}$  G (下段) の場合も同様の磁場増幅が起こっていることが確認出来る。磁場が弱い場合は、ローレンツ力は非常に弱く、磁場によるフィードバックが無視できる。結果、磁場がダイナミクスに影響を与える回転エネルギー、重力エネルギーと同等の強度になるまで増幅を続ける。

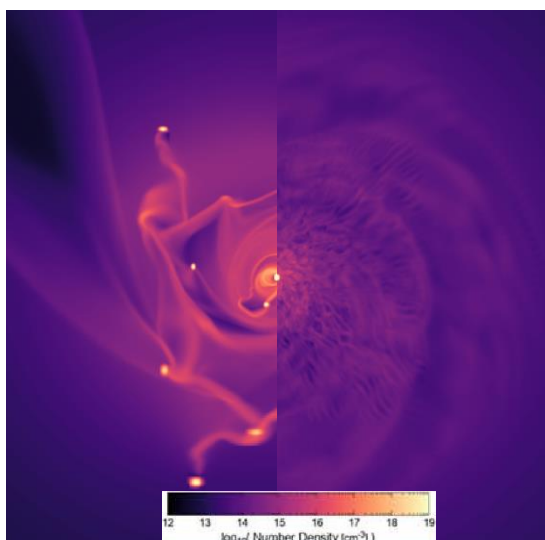


図 2：初期に磁場が無い場合( $B_0=0$ ,左)と弱磁場( $B_0=10^{-20}$ G)が存在している場合の原始星形成後 1000 年後の密度分布。

図 2 は、磁場を無視したモデル( $B_0=0$ , 左)と磁場を考慮したモデル( $B_0=10^{-20}$ G, 右)の違いを一枚のパネルに示したものである。図から分かるように磁場を無視した場合には中心部の角運動量輸送が効率的でないため回転により分裂が起こり多くの原始星が誕生する。

他方、右図のように磁場を考慮した場合は、磁場による角運動量輸送が効率的であり、渦巻状にガスが落下し分裂は起こらない。この場合は、図のように単一の大質量ファーストスターが誕生する。このように、初期磁場が微小であっても、星形成の過程で磁場が急増幅する。そのため、磁場はファーストスター形成に重要な役割りを果たすことが分かる。

#### 4. まとめと議論

微小磁場がある場合のファーストスター形成の数値シミュレーションを行った。従来、初期宇宙の磁場が極めて弱いためファーストスター形成において磁場の効果は無視出来ると考えられてきた。しかし、我々の計算によって、星形成後の複数の星の軌道運動と星自身の自転によって磁場は急増幅を起こすことが分かった。その結果、磁気制動などの磁場の効果によって、磁場増幅後の分裂が抑制される。また、複数の星は軌道角運動量を失って中心星に落下することが分かった。さらに、中心星周囲には回転で支えられる星周円盤も形成しない。

我々の結果は、従来考えられていたように複数の星(ファーストスター)が出来るのではなく単一の超巨大質量星が出来る事を示している。計算は 1000 年間しか行っていないが、この後さらに中心星が進化すると従来の理論計算では、星周円盤の上下方向からの輻射により降着ガスの電離が起こり、ガスが散逸し中心星への降着が終了すると考えられている。しかし、磁場を考慮すると、星周円盤(または、回転円盤)は出来ない。そのため、星からの輻射がどのような影響を与えるのかは自明ではない。もし降着が止まらない場合は全てのガスが落下し、 $\sim 10^4$  太陽質量を持つ超巨大星になる可能性がある。その場合、相対論的効果によって重力崩壊が起こり、最終的には超大質量ブラックホールが誕生すると考えられる。そのため、ファーストスターが銀河中心の超巨大ブラックホールの起源であるというシナリオも考えることが出来る。

#### 4. 今後の展開

2021 年に打ち上げられた James Webb Space Telescope (JWST) の観測によって 2022 年に、宇宙初期(高赤方偏移,  $z>10$ )に十分に成長した巨大な銀河が数多く存在することが示された。また、初期宇宙の銀河は従来の理論予想よりも大きいことが分かった。赤方偏移  $z>10$  では、ファーストスター形成と銀河形成が同時に起こっている。この研究で示したように多くのファーストスターが単一の大質量ブラックホールになるのであれば、短時間で周囲のバリオンをブラックホール周辺に降着して星形成が活発になり銀河形成が促進されると考えられる。今後、JWST の観測結果とシミュレーションを比較検討することによって初期宇宙での天体形成を解明することが可能となる。

#### 謝辞

本研究の数値計算は、令和 4 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

- [1] Nozaki, S. and Machida, M. N. "Environmental effects of star-forming cores on mass accretion rate", MNRAS, 519, 5017, 2023
- [2] Koga, S. and Machida, M. N. "Dust motion and possibility

- of dust growth in a growing circumstellar disk", MNRAS, 519, 3995, 2023
- [3] Sato, A., Takahashi, S., Ishii, S., Ho, P. T. P., **Machida, M. N.**, Carpenter, J., Zapata, L. A., Teixeira, P. S., and Suri, S. "ALMA Fragmented Source Catalogue in Orion (FraSCO) I. Outflow interaction within an embedded cluster in OMC-2/FIR3, FIR4, and FIR5", 944, 92, 2023
- [4] Fukaya, S., Shinnaga, H., Furuya, R. S., Tomisaka, K., **Machida, M. N.**, and Harada, N. "Twisted magnetic field in star formation processes of L1521 F revealed by submillimeter dual band polarimetry using James Clerk Maxwell Telescope", PASJ, 75, 120, 2023
- [5] Koga, S., Kawasaki, Y., and **Machida, M. N.** "Implementation of dust particles in three-dimensional magnetohydrodynamics simulation: dust dynamics in a collapsing cloud core", MNRAS, 515, 6073-6092, 2022
- [6] Hirano, S., **Machida, M. N.**, and Basu, S. "Magnetic Effects Promote Supermassive Star Formation in Metal-enriched Atomic-cooling Halos", arXiv:2209.03574, 2022
- [7] Kawasaki, Y., Koga, S., and **Machida, M. N.** "Dust coagulation and fragmentation in a collapsing cloud core and their influence on non-ideal magnetohydrodynamic effects", MNRAS, 515, 2072-2087, 2022
- [8] Tokuda, K., Zahorecz, S., Kunitoshi, Y., Higashino, K., Tanaka, K. E. I., Konishi, A., Suzuki, T., Kitano, N., Harada, N., Shimonishi, T., Neelamkodan, N., Fukui, Y., Kawamura, A., Onishi, T., and **Machida, M. N.** "The First Detection of a Protostellar CO Outflow in the Small Magellanic Cloud with ALMA", ApJL, 936, L6, 2022
- [9] Bino, G., Basu, S., **Machida, M. N.**, Tritsis, A., Sharkawi, M., Kadam, K., and Das, I. "Synthetic Polarization Maps of an Outflow Zone from Magnetohydrodynamic Simulations", ApJ, 936, 29, 2022
- [10] Hirano, S. and **Machida, M. N.** "Exponentially Amplified Magnetic Field Eliminates Disk Fragmentation around Population III Protostars", ApJL, 935, L16, 2022
- [11] Maeda, N., Ohtsuki, K., Tanigawa, T., **Machida, M. N.**, and Suetsugu, R. "Delivery of Gas onto the Circumplanetary Disk of Giant Planets: Planetary-mass Dependence of the Source Region of Accreting Gas and Mass Accretion Rate", ApJ, 935, 56, 2022