

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, 富田賢吾*², 平野信吾*¹, 古賀駿大*¹, 樋口公紀*¹, 原田直人*¹

*¹九州大学 理学研究院, *²大阪大学 理学研究科

3次元非理想磁気流体シミュレーションを用いて分子雲コアの重力収縮過程の数値シミュレーションを行い、原始星と星周円盤の形成とアウトフローとジェットとの駆動について調べた。星形成領域に普遍的に観測される分子雲コアを初期条件として計算領域に設定した。観測される分子雲コアとほぼ同等の回転エネルギーと磁気エネルギーを与えて重力収縮の過程を計算し、ガス雲中で原始星が誕生し、その後、原始星にガスが降着する過程をおよそ 500年間計算した。また、初期に分子雲コアが持つ回転軸と大局磁場の方向を 45度傾けた。計算の結果、星周円盤の法線方向はスケールによって異なり円盤から駆動するアウトフローも速度成分ごとに伝搬の方向が異なることが分かった。また、円盤スケールの磁力線は円盤によって激しくゆがめられるためにその向きは分子雲コアの大局磁場の方向とは大きく異なることが分かった。これらシミュレーションから得られた結果は、近年の ALMA 望遠鏡の観測結果と整合的でありアウトフローとジェットとの駆動、また星周円盤の初期進化を解明することが出来た。

キーワード：原始惑星系円盤, 星形成, 磁気流体力学, 惑星形成, 宇宙ジェット

1. はじめに

近年 ALMA 望遠鏡によって星や円盤が誕生する様子が詳細に観測されるようになってきた[2, 6, 7]。星は、分子雲コアというガス塊の中で誕生する。分子雲コアは自身の重力によって収縮して中心部分が光学的に厚くなると原始星が誕生する。誕生したばかりの原始星は太陽の 1/1000 の程度の質量である。その後、ガス塊の中心部にガスが落下(降着)することによって原始星は成長する。落下するガスは角運動量を持つために原始星周囲に惑星形成の母体となる星周円盤(原始惑星系円盤)を形成する。

近年の ALMA 望遠鏡の観測によって星形成の後期の段階の原始惑星系円盤が詳細に観測されるようになってきた。観測された原始惑星系円盤には何本もの縞模様を確認出来、惑星が誕生していると考えられている。しかし、このような惑星形成の母体である円盤がどのようにして形成し成長したのか、また惑星形成は星形成のどの段階で始まったのかは未だ解明されていない。これは、(1)星形成初期段階の円盤は分子雲コアの残骸の濃いガス雲に覆われていることと(2)円盤のサイズが 10au 以下と小さいために直接観測が難しいためである。

また、星が誕生時にはアウトフローやジェットというガスの放出現象が起こる[2, 7]。原始星ジェットやアウトフローも ALMA 望遠鏡によって詳細に観測されはじめた。原始星ジェットとアウトフローは星周円盤、または原始惑星系円盤から駆動すると考えられている。アウトフロー、ジェットはスケールが大きいために若い段階の星でも観測が可能である。多くの場合、観測によってアウトフロー、ジェットが付随することを確認することが

分子雲コア中に星が誕生していることの証拠となる。そのため、これらジェット、アウトフローから星の成長段階や円盤の性質を理解することが出来る。しかし、ジェット、アウトフローの駆動機構については後述のように異なる駆動機構が提案されており未解明である。

この研究では、星と惑星の形成過程を理解するため分子雲コアから星が誕生するまでの数値シミュレーションを行い、観測と比較して星形成シナリオを構築することを目的とする。当該年度の研究では、特に原始星ジェット、アウトフローと星周円盤の相互作用についての研究を行った。また、最新の ALMA 望遠鏡の星形成領域のジェットとアウトフローの観測とシミュレーション結果を比較することによってジェット、アウトフローの駆動機構のみならず星周円盤の形成と進化についても議論することが出来る。

2. 初期条件と計算手法

星は分子雲コアの中で誕生する。また、分子雲コアは $\sim 10^4$ au の大きさを持ち、星や星周円盤よりも遥かに大きいため観測が容易であり、数多く観測されている。過去の観測から星形成の母体となる分子雲コアの物理的性質はよく理解されている。そのため、観測されている典型的な分子雲コアを初期条件として計算を行う[3]。

分子雲コアを計算領域に再現するため、重力とガス圧でほぼ釣り合っている球状のガス球を計算領域に設定する。その後ガス球に観測から分かっている回転角速度と磁場強度を与える。回転角速度と磁場強度は一定とする。また、回転ベクトルと磁場ベクトルをパラメータと

して計算を行う[1, 4]。これは、観測されているジェット、アウトフローの非対称性や複雑さを再現するためである。ガス球の外側は一律な低密度ガスを配置する。アルフベン波の人為的な反射を防ぐために、外側境界をガス球の16倍遠い場所に設定する。

上記初期条件のもと自己重力を含んだ非理想磁気流体力学の方程式に従って計算を行う。計算コードは独自に開発を続けている多層格子法を用いる。多層格子法によって、空間解像度が必要な中心の星や円盤が出来る領域に動的に精度の良いグリッドを生成させて、原始星自体までを空間的に解像して計算を行う。

この計算では、地球シミュレータを用いて自己重力で収縮する分子雲コア中で原始星が出来、原始星形成後500年の計算を複数のパラメータで行った。

3. 結果

図1は、原始星形成後の密度分布を異なるスケールで示している[1, 4]。図中右上から左下に伸びている構造が原始星ジェットとアウトフロー。下段の図に示されているように中心に原始星が存在し、原始星を取り巻いて

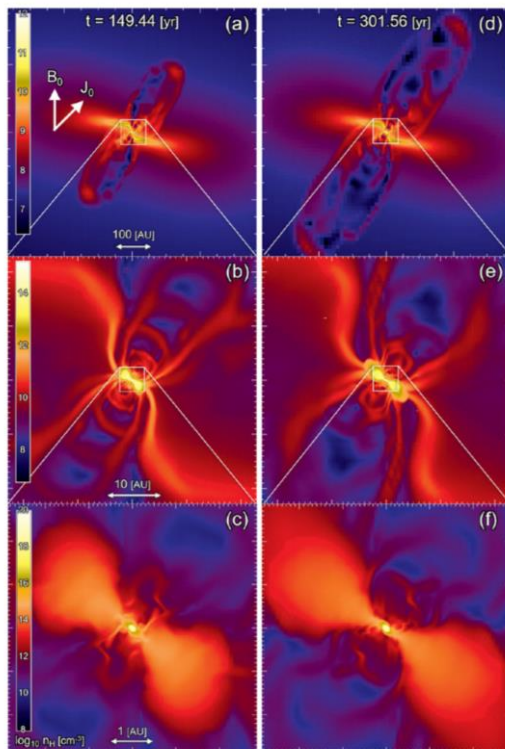


図1 y=0 切断面の密度分布。左と右では時間は異なる。中段と下段のパネルは上段のパネルの拡大図

いるのが星周円盤に対応する。また、ジェットのシェル状の構造は、星周円盤が重力不安定により非定常にガスが星に落下した結果、落下したガスの一部がジェットとして駆動したためである。重力エネルギーの一部がジェットの運動エネルギーに変換されるため、ジェットも非

定常に噴出しシェル構造を作る。

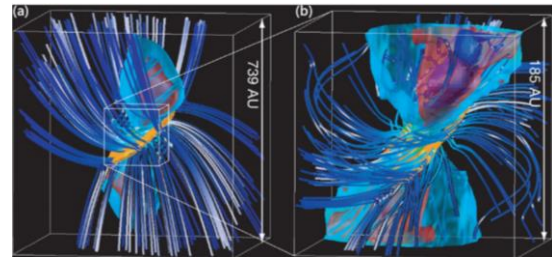


図2 星周円盤(オレンジの面)、ジェット(赤い領域)、アウトフロー(透明な青色の領域)と磁力線(青線)の3次元構造

図2は同じ計算モデルの3次元構造を示している[1, 4]。この図から青色で領域である低速アウトフローは赤、または青の領域で示した高速のジェットに対して傾いていることが分かる。つまり、低速のフローと高速のフローで伝搬の方向が異なる。これは、低速と高速のフローは円盤の各々異なる場所から駆動しており、円盤の法線方向(フローが伝搬する方向)が中心星から距離と共に異なっていることを示している。このシミュレーションの結果は近年のALMA望遠鏡の観測結果[7]と良く一致し、アウトフローとジェットの駆動機構、また円盤の性質を理解するために有用である。

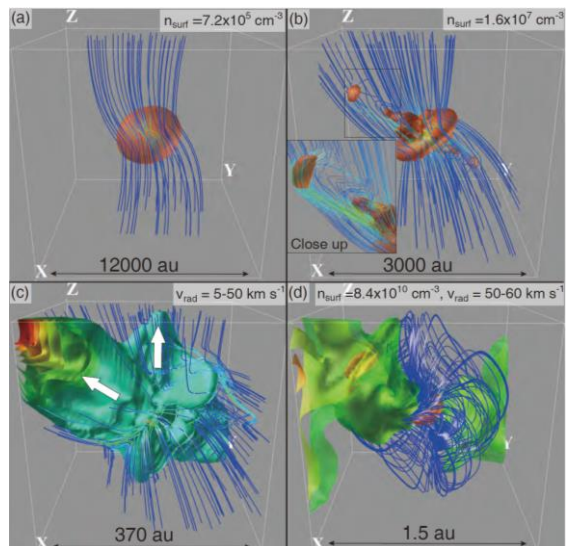


図3 図1,2とは異なるモデルの分子雲コアスケールから原始星スケールの構造。中心の赤色の領域は高密度領域。青、緑、黄色はジェットとアウトフローの構造。青色の線は磁力線。

図3は、図1、2と異なるモデルの3次元構造を示している。このモデルでは初期に分子雲コアの回転軸を大局磁場の方向から 80° 傾けて計算を行った。計算の結果、ジェットの駆動方向が時間と共に大きく変動することが分かった。これは、円盤(の法線軸)が激しく振動していることを意味している。また、右上の図にみえるようにジェットによって放出されたガス塊によって大局磁場が乱されている。他方、右下の図で見られるように原始星周囲には dipole 磁場構造が発達した。

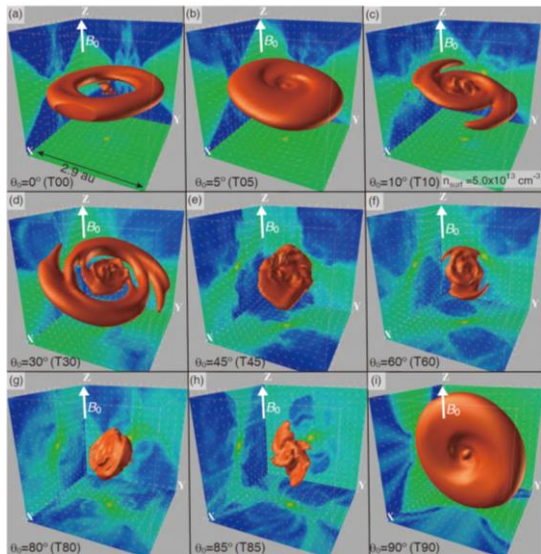


図4 モデルごとの星周円盤の構造(茶色の領域)。中心部の密度構造が各々の壁面に投影されている。また、初期の大局磁場の方向を白矢印で示している。

図4は、モデルごとの星周円盤の構造を示している。星周円盤は回転によって支えられているために円盤形成領域の角運動量ベクトルにほぼ垂直に形成する。しかし、初期に分子雲コアが保持している角運動量は星形成過程で大幅に減少(輸送)される。アウトフローとジェットによって少量のガスが多くの角運動量を持ち星間空間に放出される。また、磁気制動によって中心部の角運動量はインフォリングエンベロープに輸送される。さらに円盤中に発展する重力不安定による重力トルクも角運動量輸送に寄与する。そのため、円盤形成付近では様々な過程によって角運動量が輸送される。図4は、星周円盤の向きは分子雲コアの磁場の向きと相関が無いことを示している。そのため、円盤の法線方向を特定するためには、ジェットやアウトフローのより円盤に近い領域での観測が重要となる。

また、これらとは別に低金属量下でもアウトフローが駆動することが分かった[3]。星形成環境として初期宇宙で実現されるような低金属量を持つガス中での星形成、または星形成が非常に活発な star burst 銀河中で

の星形成を考え星形成シミュレーションを実行した。その結果、多くの環境で円盤からアウトフローが駆動するが示された。これは、環境を変えても星形成過程は変わらず普遍的であることを意味している。

4. まとめ

この研究では、非理想磁気流体数値シミュレーションによって分子雲コア中での原始星の形成、原始星周囲からジェットやアウトフローの駆動、または円盤の形成と進化について調べた。

初期に大局磁場と非平行な回転を分子雲コアに与えることで星形成領域の観測で見られるような多様性を再現することが出来た。アウトフローとジェットの伝搬方向が異なることは、近年の ALMA 望遠鏡での観測でも示されている。

ジェットとアウトフローについては、その駆動機構について長年の論争があった。エンタレメント駆動シナリオと直接駆動シナリオという異なる2つのシナリオが提示されていた。従来までは前者のエンタレメント駆動シナリオが優勢であった。これは、ジェットのみが原始星システム(原始星+星周円盤)から駆動して、低速のアウトフローはジェットによって周りのガスが巻き上げられた結果駆動するというものである。言い換えるとジェットがその伝搬と共に周囲のガスにモーメントを与えることによって周囲のガスが緩やかに中心星から遠ざかる。この遠ざかるガス成分が低速アウトフローとして観測されるというものである。

他方、直接駆動モデルでは、ジェットはエンタレメント機構と同様に原始星近傍から噴出するが、低速のアウトフローは重力ポテンシャルの浅い円盤外縁から直接駆動するというものである。この機構では、ジェットとアウトローは異なる領域から直接駆動しており、ジェットとアウトフローの相互作用は密接ではない。上で述べたようにジェットとアウトフローは円盤形成の母体となる星周円盤(原始惑星系円盤)の性質と直接関係しているため、その駆動機構を特定することが重要である。

このシミュレーションと ALMA 望遠鏡との観測によって長年の論争であったアウトフロー、ジェットの駆動機構に決着をつけることが出来た。何ら人為的な仮定をせずに、分子雲コアの収縮の過程で高速のジェットと低速のアウトフローを再現することが出来た[1, 3, 4]。低速のアウトフローは円盤の外縁から駆動する。円盤外縁では、イオン化度が比較的高いため磁場と中性ガスはよく結合しており磁気遠心力風という機構によってアウトフローが駆動する。円盤の中心部は高密度で比較的低温であるためにイオン化度が極度に低く磁場の散逸がおこる。この領域では磁気駆動風は駆動しない。また、円盤の内縁近傍のガスは高温であるために、磁場と良く結合しており主に磁気圧駆動風という機構によって、高速ジェットが駆動する。

これらのシミュレーションから得られた描像は近年

の ALMA 望遠鏡による観測と整合的である[2, 6, 7]。ALMA 望遠鏡の観測によって、円盤の外縁から駆動する低速アウトフロー、アウトフローの回転、軸がずれて扁平した円盤、ジェットとアウトフローの伝搬方向が異なる天体などが観測されている。高解像度のシミュレーションと望遠鏡観測によって星形成過程の一端を解明することが出来た。

謝辞

本研究の数値計算は、平成 29 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 (ES) を用いて行いました。

文献

- [1] Machida, M. N., Hirano, S., and Kitta, H. "Misalignment of Magnetic Fields, Outflows and Discs in Star-forming Clouds", *MNRAS*, 2770 (2019/11)
- [2] Riaz, B., Machida, M. N., and Stamatellos, D. "ALMA reveals a pseudo-disc in a proto-brown dwarf", *MNRAS*, 486, 4114-4129 (2019/7)
- [3] Higuchi, K., Machida, M. N., and Susa, H. "Driving conditions of protostellar outflows in different star-forming environments", *MNRAS*, 486, 3741-3754 (2019/7)
- [4] Hirano, S. and Machida, M. N. "Origin of misalignments: protostellar jet, outflow, circumstellar disc, and magnetic field", *MNRAS*, 485, 4667-4674 (2019/7)
- [5] Machida, M. N. and Basu, S. "The First Two Thousand Years of Star Formation", *ApJ*, 876, 149 (2019/5)
- [6] Takahashi, S., Machida, M. N., Tomisaka, K., Ho, P. T. P., Fomalont, E. B., Nakanishi, K., and Girart, J. M. "ALMA High Angular Resolution Polarization Study: An Extremely Young Class 0 Source, OMC-3/MMS 6", *ApJ*, 872, 70 (2019/2)
- [7] Matsushita, Y., Takahashi, S., Machida, M. N., and Tomisaka, K. "A Very Compact Extremely High Velocity Flow toward MMS 5/OMC-3 Revealed with ALMA", *ApJ*, 871, 221 (2019/2)

Star and Planet Formation Simulations

Project Representative

Masahiro Machida Faculty of Science, Kyushu University

Authors

Masahiro Machida^{*1}, Kengo Tomida^{*2}, Koki Higuchi^{*1} Shunta Koga^{*1} and Naoto Harada^{*1}

^{*1} Faculty of Science, Kyushu University, ^{*2} School of Science, Osaka University

We investigated the driving of outflows and jets and the formation of circumstellar disk in gravitationally collapsing cloud cores using three-dimensional resistive magnetohydrodynamic simulations. To reproduce the asymmetry and complexity seen in observations, the rotation axis of the molecular cloud core is inclined from the global magnetic field. In the simulation, both the low-velocity outflow and high-velocity jet emerges. The low-velocity outflow is misaligned with the high-velocity jet. In addition, the disk normal and magnetic field direction around the circumstellar disk are not associated with the directions of the angular momentum and magnetic field of the large scale structure. Comparing the simulations results and recent ALMA observations, we could unveil the jet and outflow driving and the disk formation process.

Keywords : star formation, planet formation, protoplanetary disk, jet, MHD

1. Introduction

Recent ALMA observations are unveiling the formation and evolution of circumplanetary disk. Stars are born in molecular cloud cores. The molecular cloud core gradually contracts and the contraction stops after the central number density exceed 10^{20} cm^{-3} . The mass of the newborn star is about 0.01 solar mass. Then, the star grows in the gas accretion phase, during which the circumstellar disk forms around the protostar and drive high-velocity jet an low-velocity outflow [2, 6, 7]. However, the driving mechanism of jets and outflow and the formation process of the circumstellar disk is now yet understood. This study focuses on the early phase of the star formation with the state-of-art star-formation simulations.

2. Settings and Numerical Setups

Three dimensional resistive MHD Nested Grid code is used to calculate the star formation process in the gravitationally collapsing cloud, in which both the molecular cloud core and protostars are resolved with a sufficient spatial resolutions.

As the initial state, we used a critical Bonner-Ebert sphere. The rigid rotation and uniform magnetic field are imposed on the initial sphere. To reproduce the observations, the rotation axis of the prestellar cloud is adopted to be inclined from the direction of the global magnetic field.

3. Results

Figure 1 shows the density distribution on the $y=0$ cutting plane. The figure indicates that both the jet and outflow episodically appear near the disk. The shell-like structure in the outflow is formed due to the episodic mass ejection from the central region of the collapsing cloud. In the early star formation phase, the circumstellar disk is massive and the

gravitational instability occurs in the disk. The non-axisymmetric structure develops in the disk and the mass

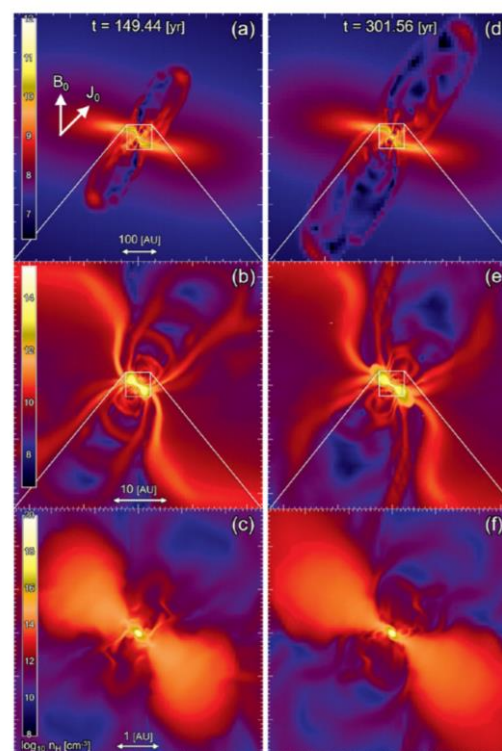


Fig. 1 Density distribution on the $y=0$ cutting plane. at different epochs and scale.

accretion rate suddenly increases. The jet is powered by the release of the gravitational energy of the accreting matter. Thus, the non-steady accretion induces the episodic mass ejection [1, 3, 4].

Figure 2 shows three dimensional views of magnetic field,

jet, outflow and circumstellar disk, in which the scale is different in the left and right panels. The figure indicates that the configuration of magnetic field strongly depends on the spatial scale. This indicates that we cannot extract the information about the magnetic field and angular momentum vector of the cloud scale from the local structures. In addition, in the figure, the high-velocity component (red region) is inclined against the low-velocity component (blue region). The normal vectors of disk differ in different scale. Since the magnetic flow is driven along the disk normal direction, we can know the properties of disk from the outflow and jet.

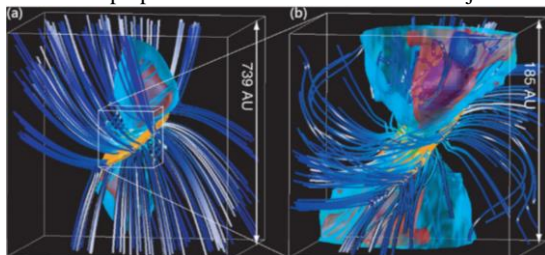


Fig.2 Circumstellar disk (orange surface), jet (red region), outflow (blue region) and magnetic field lines (blue lines).

we also executed the star formation simulations in different star-forming environments and showed that the outflow emerges when the star forming cloud has a low-metallicity and low or high ionization sources. Thus, the star formation process shown in this simulation is universally induced in various environments [3].

4. Summary

There are two controversial scenarios about the jet and outflow driving. The one is the entrainment scenario, and the other is the direct driven wind scenario. In the entrainment scenario, only the jet is driven from the disk, while the outflow is entrained by the jet. On the other hand, in the direct driven scenario, both the jet and outflow are driven from the circumstellar disk. Our simulations showed that, in addition to the jet, the outflow is also directly driven from the disk. In the disk outer region, the magnetic field is well coupled with the neutrals and the wind is driven by the magnetocentrifugally mechanism. In the disk inner region, the ionization rate is very low and the magnetic field is not coupled with neutrals. Thus, no wind appears. Near the protostar, the magnetic field is coupled with neutral again, and the high-velocity jets emerges. This is reason why two distinct flows appear in the star formation process.

When the disk normal differs in different scales, the high-velocity flow should be inclined from the low-velocity component as seen in Figure 2. On the other hand, the jet should be parallel to the outflow in the entrainment scenario because jet pass the linear momentum to the ambient gas.

Recent observation could detect a significant angle difference between the low and high-velocity components [7], which strongly supports the direct driven wind scenario.

Comparing simulations and observations, we could understand the star formation process. Especially, we could unveil the driving mechanism of the outflow and jet and the formation of the circumstellar disk.

However, we only calculated the disk evolution for about 500 years after protostar formation. Further calculations are necessary to comprehensively compare observations and simulations, because the existence possibility of very young objects is low.

Acknowledgement(

Simulations reported in this paper were performed by 2018 Koubo Kadai on Earth Simulator (NEC SX-ACE) at JAMSTEC.

References

- [1] Machida, M. N., Hirano, S., and Kitta, H. "Misalignment of Magnetic Fields, Outflows and Discs in Star-forming Clouds", *MNRAS*, 2770 (2019/11)
- [2] Riaz, B., Machida, M. N., and Stamatellos, D. "ALMA reveals a pseudo-disc in a proto-brown dwarf", *MNRAS*, 486, 4114-4129 (2019/7)
- [3] Higuchi, K., Machida, M. N., and Susa, H. "Driving conditions of protostellar outflows in different star-forming environments", *MNRAS*, 486, 3741-3754 (2019/7)
- [4] Hirano, S. and Machida, M. N. "Origin of misalignments: protostellar jet, outflow, circumstellar disc, and magnetic field", *MNRAS*, 485, 4667-4674 (2019/7)
- [5] Machida, M. N. and Basu, S. "The First Two Thousand Years of Star Formation", *ApJ*, 876, 149 (2019/5)
- [6] Takahashi, S., Machida, M. N., Tomisaka, K., Ho, P. T. P., Fomalont, E. B., Nakanishi, K., and Girart, J. M. "ALMA High Angular Resolution Polarization Study: An Extremely Young Class 0 Source, OMC-3/MMS 6", *ApJ*, 872, 70 (2019/2)
- [7] Matsushita, Y., Takahashi, S., Machida, M. N., and Tomisaka, K. "A Very Compact Extremely High Velocity Flow toward MMS 5/OMC-3 Revealed with ALMA", *ApJ*, 871, 221 (2019/2)