

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05032

研究課題名(和文) 偏波と輻射輸送に基づく星形成過程の研究：星間磁場の解明

研究課題名(英文) Star Formation Study Based on Polarization and Radiation Transfer: Role of Interstellar Magnetic Field

研究代表者

富阪 幸治 (Tomisaka, Kohji)

国立天文台・理論研究部・教授

研究者番号：70183879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ハーシェル衛星と星間偏光観測から、分子雲がフィラメント状で星間磁場に垂直であることが示されている。垂直な磁場によって支えられた等温ガスの平衡形状を自己無撞着場の方法で計算し、重力に抗して支えられる最大の線質量を得た。この力学平衡状態の安定性について磁気流体力学シミュレーションを用いて解析した。フィラメント方向の揺らぎにある臨界波長が存在し、臨界波長より長い波長が不安定となること、また臨界波長の約2倍の波長が最も不安定となることが分かった。さらに、最も不安定な波長でフィラメントは分裂し、ガスが等温である限り、ほぼ軸対称で、磁場と垂直に伸びて、収縮を続ける擬円盤が形成されることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Combining Herschel Space Observatory far infrared observations and interstellar polarization observations, it is shown molecular clouds are formed by ensembles of filaments which are perpendicularly threaded by the magnetic field. We obtained the magnetohydrostatic configuration and their maximum stable line-mass as a function of the magnetic flux per unit mass. Stability of such filament is studied with magnetohydrodynamical simulations. There exists the shortest wavelength above which the filament undergoes the gravitational instability (critical wavelength). The most unstable mode has a wavelength twice as long as the critical wavelength. The filament fragments with the most unstable wavelength and experiences runaway collapse as long as the gas is isothermal and forms a pseudo-disk which extends in the direction perpendicular to the magnetic field.

研究分野：シミュレーション天文学

キーワード：星間磁場 偏波 星形成 磁気流体力学 フィラメント 圧力平衡 重力安定性

1. 研究開始当初の背景

星形成において、第1義的に重要な磁場の観測は緒に就いたばかりである。理由は偏波観測の困難さゆえであった。星間磁場に垂直方向に主軸が整列したダスト起源の熱輻射を用いると直線偏波のBベクトルから星間磁場の方向が知れるが、その偏波率は低い。

一方で星形成のシミュレーション研究は、近年、長足の進歩を遂げ、大きなダイナミックレンジを持つ計算が可能となり、星形成過程の理解は大きく前進した。

ALMA望遠鏡をはじめとする高分解能観測装置においても、連続波直線偏波観測が利用可能になる時期に当たり、星形成過程が磁場にどう支配されているか、それが偏波観測でどのように観測されるはずであるかを明らかにすることが求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、分子雲がフィラメント状であるという現実的な星形成の初期状態から出発したMHDシミュレーションを行い、その進化を明らかにするとともに、星形成過程における偏波の時間進化を明らかにする。これを、観測開始が予定されているALMAの詳細観測と比較することで磁場の進化、星形成に果たす役割を解明することとした。

3. 研究の方法

(1) 分子雲がフィラメント状であるという最新の知見に基づく初期条件を作成し、
(2) それを用いて、入れ子状多重格子法を用いてダイナミックレンジの高い磁気流体力学(MHD)シミュレーションを行い、
(3) その結果(密度、磁場分布)を用いて、偏波に関する観測的可視化計算を遂行する。様々な初期状態(質量、回転速度、磁場強度、回転と磁場ベクトルのなす角など)について進化を計算することで、ダストの熱輻射「偏波観測」で見た磁場の進化を明らかにする。また、(3')これを同じくnon-LTE輻射輸送計算のポストプロセスをすることで、星間分子線観測予測を行う。

4. 研究成果

本研究を始めるにあたり、(1)現実的な初期条件からの星形成過程を明らかにすること、(2)分子雲からガス円盤までの進化を追跡し、偏波に現れる特徴を明らかにする、という目標を立てた。が、この間、中心星形成後のガス円盤の観測が進展し、その偏波が、磁場の走行方向を示さない可能性がにわかに着目された。中心星の輻射方向へ整列したダストからの放射[参考文献3]や整列していないダストが熱輻射を自己散乱する可能性[参考文献1]が提唱された。そのため、磁場への整列がより確実な、進化の初期である、分子雲、星なしコアから原始星を持つコアの段階に着目することとした。

(1) フィラメント状分子雲の磁気静水圧平衡について、磁場に整列したダストからの熱輻射の偏光・偏波シミュレーションをおこなった。その結果、力学平衡状態のフィラメントは観測と同様に、長軸に垂直な星間磁場形状(多数)と長軸に平行な形状(少数)として観測されることが示された(雑誌論文14)。
(2) 力学平衡状態のフィラメントに密度ゆらぎを加え、その後の進化を解適合格子(adaptive Mesh Refinement法)による磁気流体力学コードSUFMATO[参考文献2]により追跡した。

初期に正弦波的な密度ゆらぎを加えても、無秩序な密度ゆらぎを加えても、収縮の様子に、収縮に要する時間以外は定性的な差は生じないことが分かった。

貫く磁場が強くない場合は、フィラメント方向の揺らぎにある臨界波長が存在し、臨界波長より長い波長が不安定となること、また臨界波長の約2倍の波長が最も不安定となることが分かった。さらに、最も不安定な波長でフィラメントは分裂し、ガスが等温である限り、ほぼ軸対称で、磁場と垂直に伸びて、収縮を続ける擬円盤が形成されることが分かった。

一方で、磁場が強い場合、(調査された範囲で)揺らぎが成長しなかった。これから、臨界的な磁場強度を超えると、どのような波長の揺らぎに対してもフィラメントは重力安定であることを示している可能性があることが分かった(雑誌論文6,7)。

(3) 力を及ぼさない様磁場と等温軸対称の円柱状密度分布を持つフィラメントの場合、この単純化された平衡形状の安定性について、線形解析を行った。

磁場が外側境界で固定されている場合は、重力不安定に対して、磁場によって顕著に安定化されることが見られた。

一方で、外側境界で電流0の場合、安定化に寄与しない場合があることが分かった(雑誌論文8)。

参考文献

- [1] Kataoka, A. 他, (2015) Millimeter-wave Polarization of Protoplanetary Disks due to Dust Scattering, *Astrophys. J.*, 809, 78.
- [2] Matsumoto, T. (2007) Self-Gravitational Magnetohydrodynamics with Adaptive Mesh Refinement for Protostellar Collapse, *PASJ*, 59, 905
- [3] Tazaki, R., Lazarian, A., and Nomura, H., (2017) Radiative Grain Alignment In Protoplanetary Disks: Implications for Polarimetric Observations, *Astrophys. J.*, 839, 56.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 15 件)

- (1) Kwon, J., Doi, Y., Tamura, M., Matsumura, M., Pattle, K., 他, (2018), A First Look at BISTRO Observations of the Oph-A core, *The Astrophysical Journal*, 859, 4, 10.3847/1538-4357/aabd82 査読あり.
- (2) Kandori, R., Tamura, M., Nagata, T., Tomisaka, K., Kusakabe, N., Nakajima, Y., Kwon, J., Nagayama, T. and Tatematsu, K. (2018), Distortion of Magnetic Fields in a Starless Core. III. Polarization Extinction Relationship in FeSt 1-457, *The Astrophysical Journal*, 857, 100, 10.3847/1538-4357/aab962 査読あり.
- (3) Wada, K., Fukushige, R., Izumi, T. and Tomisaka, K. (2018), Circumnuclear Multi-phase Gas in the Circinus Galaxy. I. Non-LTE Calculations of CO Lines, *The Astrophysical Journal*, 852, 88, 10.3847/1538-4357/aa9e53 査読あり.
- (4) Aso, Y., Ohashi, N., Aikawa, Y., Machida, M. N., Saigo, K., Saito, M., Takakuwa, S., Tomida, K., Tomisaka, K. and Yen, H.-W. (2017), ALMA Observations of the Protostar L1527 IRS: Probing Details of the Disk and the Envelope Structures, *The Astrophysical Journal*, 849, 56, 10.3847/1538-4357/aa8264 査読あり.
- (5) Aso, Y., Ohashi, N., Aikawa, Y., Machida, M. N., Saigo, K., Saito, M., Takakuwa, S., Tomida, K., Tomisaka, K., Yen, H.-W. and Williams, J. P. (2017), ALMA Observations of SMM11 Reveal an Extremely Young Protostar in Serpens Main Cluster, *The Astrophysical Journal*, 850, L2, 10.3847/2041-8213/aa9701 査読あり.
- (6) Tomisaka, K. (2017), Structures of Magnetically-Supported Filaments and their Appearance in the Linear Polarization, Submm/mm/cm QUESO Workshop 2017 (QUESO2017), 29, 10.5281/zenodo.1038105 査読なし.
- (7) Tomisaka, K. (2017), Magnetohydrostatic structures of magnetically-supported filaments and their stability, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 88, 571 査読なし.
- (8) Hanawa, T., Kudoh, T. and Tomisaka, K. (2017), Fragmentation of a Filamentary Cloud Permeated by a Perpendicular Magnetic Field, *The Astrophysical Journal*, 848, 2, 10.3847/1538-4357/aa8b6d 査読あり.
- (9) Kandori, R., Tamura, M., Tomisaka, K., Nakajima, Y., Kusakabe, N., Kwon, J., Nagayama, T., Nagata, T. and Tatematsu,

- K. (2017), Distortion of Magnetic Fields in a Starless Core II: 3D Magnetic Field Structure of FeSt 1-457, *The Astrophysical Journal*, 848, 110, 10.3847/1538-4357/aa8d18 査読あり.
- (10) Kandori, R., Tamura, M., Kusakabe, N., Nakajima, Y., Kwon, J., Nagayama, T., Nagata, T., Tomisaka, K. and Tatematsu, K. (2017), Distortion of Magnetic Fields in a Starless Core: Near-infrared Polarimetry of FeSt 1-457, *The Astrophysical Journal*, 845, 32, 10.3847/1538-4357/aa7d58 査読あり.
- (11) Kataoka, A., Tsukagoshi, T., Pohl, A., Muto, T., Nagai, H., Stephens, I. W., Tomisaka, K. and Momose, M. (2017), The Evidence of Radio Polarization Induced by the Radiative Grain Alignment and Self-scattering of Dust Grains in a Protoplanetary Disk, *The Astrophysical Journal*, 844, L5, 10.3847/2041-8213/aa7e33 査読あり.
- (12) Ward-Thompson, D., Pattle, K., Bastien, P., Furuya, R. S., Kwon, W. 他, (2017), First Results from BISTRO: A SCUBA-2 Polarimeter Survey of the Gould Belt, *The Astrophysical Journal*, 842, 66, 10.3847/1538-4357/aa70a0 査読あり.
- (13) Aso, Y., Ohashi, N., Saigo, K., Koyamatsu, S., Aikawa, Y., Hayashi, M., Machida, M. N., Saito, M., Takakuwa, S., Tomida, K., Tomisaka, K. and Yen, H.-W. (2015), ALMA Observations of the Transition from Infall Motion to Keplerian Rotation around the Late-phase Protostar TMC-1A, *The Astrophysical Journal*, 812, 27, 10.1088/0004-637X/812/1/27 査読あり.
- (14) Tomisaka, K. (2015), Polarization Structure of Filamentary Clouds, *The Astrophysical Journal*, 807, 47, 10.1088/0004-637X/807/1/47 査読あり.
- (15) Hanawa, T. and Tomisaka, K. (2015), Structure and Stability of Filamentary Clouds Supported by Lateral Magnetic Field, *The Astrophysical Journal*, 801, 11, 10.1088/0004-637X/801/1/11 査読あり.

〔学会発表〕(計 21 件)

- (1) 神鳥亮, 田村元秀, 富阪幸治, 齋藤正雄, 立松健一, IRSF/SIRPOL チーム, グロビュールの砂時計型磁場構造の探査, 日本天文学会 2018 年春季年会
- (2) 松下祐子, 高橋智子, 町田正博, 富阪幸治, Class 0 天体 MMS5 から駆動するアウトフローとジェットの軸のずれ, 日本天文学会 2018 年春季年会

- (3) 古賀駿大, 塚本裕介, 奥住聡, 町田正博, 円盤形成におけるホール効果の影響: ダストサイズ分布と宇宙線強度依存性, 日本天文学会 2018 年春季年会
- (4) 山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠, 町田正博, 藤本正行, 銀河系ハローにおける超金属欠乏炭素過剰星の起源と星・連星系形成史, 日本天文学会 2018 年春季年会
- (5) 花輪知幸, 工藤哲洋, 富阪幸治, 乱流による実効的な圧力を考慮したフィラメントモデルの安定性, 日本天文学会 2017 年秋季年会
- (6) 松下祐子, 高橋智子, 町田正博, 富阪幸治, 中間質量星形成領域 OMC-3 MMS5 に付随する EHV アウトフロー, 日本天文学会 2017 年秋季年会
- (7) 麻生有佑, 平野尚美, 大橋永芳, 西合一矢, 齋藤正雄, 富阪幸治, 相川祐理, 高桑繁久, 富田賢吾, 町田正博, YEN Hsi-Wei, Jonathan P. WILLIAMS, Serpens Main の ALMA Cycle 3 観測: ミリ波で見る進化段階, 日本天文学会 2017 年秋季年会
- (8) 工藤哲洋, 花輪知幸, 富阪幸治, 磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の自己重力不安定性: 線形解析と数値シミュレーションとの比較, 日本天文学会 2017 年秋季年会
- (9) 崔仁士, 大橋永芳, 西合一矢, 松本倫明, 高桑繁久, 齋藤正雄, 麻生有佑, 相川祐理, 黒瀬一平, Hsi-Wei Yen, 富阪幸治, 富田賢吾, 町田正博, ALMA による Class I 原始星 L1489 IRS の観測 II: 歪んだ円盤構造, 日本天文学会 2017 年秋季年会
- (10) 樋口公紀, 町田正博, 須佐元, 低金属量環境における星形成過程, 日本天文学会 2017 年秋季年会
- (11) 福重亮佑, 和田桂一, 泉拓磨, 富阪幸治, 3 次元モンテカルロ輻射輸送計算による Circinus galaxy の分子ガス構造の解明, 日本天文学会 2017 年度春季年会
- (12) 花輪知幸, 工藤哲洋, 富阪幸治, 垂直な磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の Jeans 不安定, 日本天文学会 2017 年度春季年会
- (13) 富阪幸治, 松本倫明, 磁場に垂直に貫かれたフィラメント状星間雲の動的収縮, 日本天文学会 2017 年度春季年会
- (14) 崔仁士, 大橋永芳, 齋藤正雄, 西合一矢, 麻生有佑, Hsi-Wei Yen,
- (15) 高桑繁久, 相川祐理, 富阪幸治, 町田正博, 富田賢吾, 小屋松進, ALMA Cycle 2/3 のよる Class I 原始星 L1489 IRS の観測, 日本天文学会 2017 年度春季年会
- (16) 西海拓, 高橋智子, Edward B. Fomalont, 富阪幸治, 町田正博, 中西康一郎, ALMA 望遠鏡を用いたオリオン座分

子雲中の原始星(Class I 天体) 周囲の回転構造の研究, 日本天文学会 2017 年度春季年会

- (17) 古屋玲他, 動き始めた BISTRO:JCMT 搭載サブミリ波偏波計 POL-2 を用いた星形成領域の網羅的観測の現状, 日本天文学会 2016 年度秋季年会
- (18) 工藤哲洋, 富阪幸治, 花輪知幸, 磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の不安定性, 日本天文学会 2016 年度秋季年会
- (19) 黒瀬一平, 大橋永芳, 麻生有佑, 西合一矢, Hsi-Wei Yen, 高桑繁久, 相川祐理, 富阪幸治, 斉藤正雄, 林正彦, 深川美里, 町田正博, 富田賢吾, ALMA Cycle 1 による原始星 L1448-mm の観測, 日本天文学会 2016 年度春季年会
- (20) 麻生有佑, 大橋永芳, 相川祐理, 西合一矢, 齋藤正雄, 富阪幸治, 高桑繁久, Hsi-Wei Yen, 富田賢吾, 町田正博, 原始星 L1527 IRS 周囲のダストとガスの構造, 日本天文学会 2016 年度春季年会
- (21) 町田正博, 磁場と回転の効果による円盤の方向の空間依存性, 日本天文学会 2015 年秋季年会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
富阪幸治 (TOMISAKA, Kohji)
国立天文台・理論研究部・教授
研究者番号: 70183879

(2) 研究分担者

町田正博 (MACHIDA, Masahiro N.)
九州大学大学院理学研究院地球惑星科学
専攻・准教授
研究者番号： 10402786

(3) 連携研究者
()

研究者番号：

(4) 研究協力者
()