

jh230046

現実的な原始惑星系円盤のガス散逸シナリオ構築に向けた多角的アプローチ

高棹真介（大阪大学）

Abstract

惑星の形成条件を明らかにする上で、原始惑星系円盤のガスの散逸過程を理解することは必須となっている。しかしガス散逸を駆動する星の X 線や紫外線は円盤スケールよりも 4 桁以上小さいスケールの星大気から放射されており、このスケールギャップが散逸シナリオに大きな不定性を生じている。そこで我々は、星大気加熱モデル、星回りのガス分布に関わる星へのガス降着のモデル、そして星の光を浴びて散逸する円盤の計算モデルを総合するようなフレームワークを構築することで、この問題の解明に取り組んでいる。本年度は目標達成に必要なコード開発やフレームワークの土台作りを進めた。

1. Basic Information

(1) Collaborating JHPCN Centers

Tokyo

Osaka

(2) Theme Area

Large scale computational science area

(3) Research Areas

Very large-scale numerical computation

(4) Project Members and Their Roles

以下の 3 つの課題を 3 人で分担して進めている。

- (i) 磁場加熱を受ける星大気の磁気流体計算
- (ii) 星の輻射と熱化学反応計算を含めた 3 次元磁気流体モデルの構築
- (iii) 星・円盤の境界領域の 3 次元輻射磁気流体計算

高棹真介：(ii), (iii)

庄田宗人：(i)

仲谷峻平：(ii), (iii)

2. Purpose and Significance of the Research

星と惑星の誕生過程を明らかにするには、原始惑星系円盤の進化を解明する必要がある。しかし円盤にとっての光源である星や円盤内縁は全体のスケールから 4 桁以上も小さく、円盤との接続が未

解明であることから、過去の全てのシミュレーションモデルはシステム内側境界条件に大きな不定性を抱えている。それに対し本研究は、星形成のみならず太陽・恒星物理や降着円盤物理の知見を総合してこの不定性を取り除き、信頼度の高い円盤進化シナリオを構築しようとする取り組みである。そのために本研究では異なるコード間の長所を組み合わせたコードを用意したり、恒星研究と円盤研究を橋渡しするようなフレームワークを構築することを目指した。

3. Significance as JHPCN Joint Research Project

本課題が解決しようとする問題は、太陽・恒星物理、星・惑星形成、そして星大気の性質が関わる。その上、天体形成に広く共通する降着円盤の物理までが絡むため、我々の問題は宇宙物理の多岐にわたる知見を統合して初めて解くことができるものになっている。つまり、宇宙物理における幅広い分野の研究者たちが協力して取り組むべき課題である。この目的に向かって、本研究では 3 つの小課題を設定し、それらを総合することで目的達成を目指してきた。小課題のうちの 2 つは磁場とプラズマが複雑にカップルする多次元流体现象を扱うものになっている。その基礎方程式は流体力学方程式と Maxwell 方程式を組み合わせた磁気流体方程式を土台とするため、高度なシミュレーションを

要する。また3つ目の小課題に関しては、多次元の輻射輸送方程式と流体方程式、そして非平衡熱化学反応方程式を同時に高精度で解く必要がある。このような背景のため、JHPCN システムの提供する共同利用環境は、複数の共同研究者が共通の目的達成のために研究を進める上で必要なものであった。

4. Outline of Research Achievements up to FY2022 (Only for continuous projects)

該当しない。

- (a) 熱化学反応計算モジュールの移植と3次元並列計算のテスト
- (b) 入れ子格子を用いた領域分割にも対応した、星からの直接光の計算モジュールの導入
- (c) 熱化学反応計算モジュールの高速化
- (d) ガスの運動をラグランジュ的に追うトレーサー粒子の導入
- (e) 磁気加熱を受ける前主系列星大気からの EUV 放射スペクトル計算の実施
- (f) 星コロナの3次元高解像度モデルの構築
- (g) 星の EUV 放射で駆動される円盤光蒸発流の分類に関する理論構築

5. Details of FY2023 Research Achievements

- (a) 熱化学反応計算モジュールの移植と3次元並列計算のテスト

公開磁気流体コード PLUTO (Mignone et al. 2007 ApJS) を用いて仲谷が開発を進めてきた熱化学反応モジュールを、高棹が星・円盤研究に用いてきた、入れ子格子を使ったより柔軟なメッシュ構造に対応できる公開磁気流体コード Athena++ (Stone et al. 2020 ApJS) に移植した。今まで流体の運動と星の輻射まで含めた熱化学反応計算を同時に解くことに対応できていなかったが、現在は両者を同時に解けるようになり、かつ3次元並列化でコードが動いていることもテスト計算によって確認している。阪大の SQUID にて、100 コアと 400 コアを用いて並列化効率をス

トロングスケールで計算したところ、86%であった。

- (b) 入れ子格子を用いた領域分割にも対応した、星からの直接光の計算モジュールの導入

これは球座標系での ray tracing に関するものである。星からの光の照射を熱化学反応計算で考慮するには、半径方向の光の伝搬をガス吸収なども含めて計算する必要がある。X. Bai (北京精華大) から、旧バージョンの Athena++ に導入していた ray tracing モジュールを提供してもらい、最新版の Athena++ へとマージさせた。その結果、入れ子格子を使った場合でも ray tracing が可能となった。PLUTO は入れ子格子や半径方向の並列化に対応していなかったため、今回の Athena++ でのアップデートによって PLUTO で困難だった大規模計算が可能になってきたことを意味する。

- (c) 熱化学反応計算モジュールの高速化

仲谷が開発したコードでは星の直接光の伝搬と化学反応を同時に反復的に解くことで implicit に解を求めていた。この方法は原理的に正しい一方で、高い計算コストを必要とするデメリットがあった。そこで計算コスト削減のため、直接光の伝搬と化学反応計算を分離して問題がないかを調査した。その結果、我々の注目するパラメータ範囲では結果が大きく影響を受けないことを確認した。今後はこの単純化した方法で計算を進める予定である。

- (d) ガスの運動をラグランジュ的に追うトレーサー粒子の導入

Chao-Chin Yang (アラバマ大) が旧バージョンの Athena++ で開発を進めていた粒子追跡計算モジュールを提供してもらい、最新のコードへの取り込みと I/O 関係のデバッグを行った。こちらも入れ子格子に対応している。観測される星近傍からのウィンドの起源を理解するには、観測との比較のための化学反応計算のみならず、そのガスがどこから来たのかも理解する必要がある。今回のアップデートで、それも可能になった。

(e) 磁気加熱を受ける前主系列星大気からの EUV 放射スペクトル計算の実施

星のコロナやその下部にある遷移層と呼ばれる大気層は、X 線や紫外線を放射して円盤の光蒸発を駆動する役目を持つ。大気のエネルギー源は星の表面对流がもつ運動エネルギーであり、そのエネルギーが磁場を介して上空に運ばれ熱化することで、大気加熱が起きると考えられている。

庄田が開発した既存の磁気流体コードは太陽型星(G 型主系列星)の大気計算に特化していた。今年度はこの制限を緩和し、小質量主系列星全般や原始星にも適用可能にするよう星表面における境界条件の決め方やコードの拡張を行った。エネルギー注入を決める星表面の境界条件は、星の有効温度と表面重力加速度を与えると、オパシティや星の構造論、エネルギー輸送の議論に則って対流の速度振幅が決まるというものにした。また表面の数値的な境界条件を、ネットの Poynting flux が時間的に一定になるように変更した(これまで波の振幅を時間的に固定していた)。これにより、定常状態の性質をより解釈しやすくなった。現状ではこのモデルをまず太陽型星に対して適用し、観測スペクトルを概ねよく再現できることを示した論文を用意し、Shoda, Namekata, and Takasao (Astronomy & Astrophysical) として査読誌に投稿中である。

庄田は TW Hya と呼ばれる観測的によく調査されている前主系列星のパラメータに対して、高解像度な磁力線方向 1 次元の磁気流体計算を実行し、放射スペクトルの理論的予測も行った。その結果を観測と比較したところ、磁気加熱が主要になると考えられる 1keV 付近の X 線域で良い一致を得た。まだ詳細な比較解釈は途中であるが、有望な結果を得ることができたと考えている。

(f) 星コロナの 3 次元高解像度モデルの構築

星コロナの磁気的な加熱は、磁力線方向に伝搬する波によるものだけでなく、隣り合う磁力線同士が絡み合って熱化するような場合でも生じる。後

者のような現象は 3 次元でしか起きないため、星大気の加熱を第一原理的に理解するには 3 次元計算が必要である。ただし計算コストや数値不安定性の観点から、過去の高解像度計算は限定的であった。特に、我々が対象としているような若い星で予想されている強く磁化した大気の計算は様々な困難からこれまで世界的に十分調査されてこなかった。

庄田は自身の 3 次元太陽コロナ計算モデルをより広いパラメータ空間に適用できるよう改良し、恒星コロナをより普遍的に調査できるようにした。特に 1 次元計算で理解が限定的であった、隣り合う磁場同士が絡み合うことで起きる局所的な高温度プラズマの生成も見えつつある。まだ結果は解析中であるが、若い星のコロナ計算が可能になりつつあるという点で進展が見られた。

(g) 星の EUV 放射で駆動される円盤光蒸発流の分類に関する理論構築

星の極端紫外線 (EUV) 放射は、円盤表面の水素分子や中性水素原子を重力束縛されないような温度まで加熱して、光蒸発と呼ばれるガス流を駆動する。ただし星のタイプによって紫外線強度は大きく変わるため、円盤光蒸発の速度といった性質が紫外線強度にどのように依存するのかを明らかにすることが重要であった。我々の目的としても、調査すべきパラメータ範囲を絞り込む上で光蒸発流の分類は重要な課題である。

仲谷は、本課題で用いる熱化学反応モジュールが組み込まれた輻射流体コードを用いて、中心星からの EUV を浴びる円盤の時間進化を追い、EUV 強度をパラメータとして変えた計算を複数行った。さらに、解析的にも分類する理論を構築し、数値計算結果を説明した。この結果は、Nakatani, Turner, and Takasao (The Astrophysical Journal) として査読誌に現在投稿中である。

6. Self-review of Current Progress and Future Prospects

本年度は、星・惑星形成における異なる時空間スケールの現象を研究するメンバーが協力し、原始惑星系円盤のガス散逸過程を明らかにするための数値的なフレームワークの土台を構築することを目標にしていた。そのために互いの計算コードを共有し、コード開発も進めた。本研究の長期目標としては星の表面から大局円盤までに渡る各空間スケールの計算を実行した上で、それらを全て総合した輻射流体計算を行い、星スケールの構造が円盤進化に与える影響を明らかにすることである。本年度はそれに必要な計算コードの整備などを進めることであり、その目的は概ね達成できたとと言える。

2024年度も継続してこの課題に取り組むことが決まっており、その中で全スケールの要素を取り入れた円盤光蒸発の輻射流体計算を行うつもりである。X線やEUV光度を決める星の磁場強度や星への降着率といった小スケールの量に対し、100auスケールの光蒸発がどのように応答するのか明らかにしていきたい。

7. List of Publications and Presentations

(1) Journal Papers (Refereed)

(2) Proceedings of International Conference Papers (Refereed)

(3) Presentations at International conference (non-refereed)

- S. Takasao, “Impacts on stellar scale processes on disk evolution”, Simulating Physics in Celestial Ecosystems (SPiCE) workshop, Tohoku University, Mar 18–22, 2024 (invited)
- S. Takasao, “How do stellar magnetic fields influence the accretion and ejection processes around a protostar?”, Magnetic Fields from Clouds to Stars (Bfields-2024), Mitaka, Mar 25–29, 2024 (invited)

- S. Takasao, “A closer look at star-disk interaction of young stars”, 2nd Athena++ Workshop, the Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute (US), May 8–12, 2023 (invited)
- M. Shoda, “Solar wind modeling based on the hybrid scenario: interplay between Alfvén wave and interchange reconnection”, December 2023, AGU fall meeting 2023, San Francisco, USA (invited)
- M. Shoda, “Generation of magnetic switchbacks: expanding wave, interchange reconnection, or hybrid”, September 2023, ISSI workshop “Magnetic Switchbacks in the Young Solar Wind”, Bern, Switzerland (invited)
- M. Shoda, “Physics of PDI and its potential role in the solar wind”, June 2023, WISA 2023 meeting, Newcastle, UK (invited)
- M. Shoda, “Alfvén waves in the solar wind: a theoretical overview”, May 2023, AGU Chapman Conference “Advances in Understanding Alfvén Waves in the Sun and the Heliosphere”, Berlin, Germany (invited)
- Ryouhei Nakatani(+), Neal J. Turner, Yasuhiro Hasegawa, Gianni Cataldi, Yuri Aikawa, Sebastián Marino, Hiroshi Kobayashi, “Evolution from Protoplanetary Disks to Debris Disks: Effects of Photoevaporation,” Astronom 2023; Sheraton Hotel, Pasadena, CA, USA; Jun 29, 2023 (invited)
- Ryouhei Nakatani(+), “Molecular Photoevaporative Winds,” Core2Disk III; Institut Pascal, Paris-Saclay, France; Oct 5, 2023 (invited)

- - Riouhei Nakatani (+), “Gas-Rich Debris Disks’ Origins in Slow Photoevaporation Around Intermediate-Mass Stars” Dust Devils; University of Arizona, Tucson, AZ, USA; Mar 26, 2024

(4) Presentations at domestic conference
(non-refereed)

- 高棹真介「原始ガス惑星降着に対する磁気圏降着シミュレーションからの示唆」形成中の惑星およびその兆候に関する勉強会、オンライン、2023年6月15日（招待講演）
- 庄田宗人「日本の強みを活かす太陽風研究の方向性」, 2024年3月, ISEE 研究集会「太陽圏の次世代研究検討会」, 名古屋（招待講演）
- 庄田宗人「恒星 XUV 放射のフォワードモデリング：太陽から若い 太陽・前主系列段階へ」, 2024年2月, 惑星圏シンポジウム 2024, 仙台
- 庄田宗人「恒星 XUV 観測を用いたコロナ加熱モデルの検証」, 2023年9月, 日本天文学会 2023 秋季年会, 名古屋
- 仲谷峻平 (+) 「Gas-Rich Debris Disks’ Origins in Slow Photoevaporation Around Intermediate-Mass Stars」新学術「星・惑星形成」2023 年度大研究会、2023年12月、名古屋

(5) Published open software library and so on.

(6) Other (patents, press releases, books and so on)