

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14509

研究課題名（和文）超高解像度電磁流体力学シミュレーションで迫る降着円盤乱流の微小スケール特性

研究課題名（英文）Ultra-high-resolution magnetohydrodynamic simulations for the small-scale properties of accretion disk turbulence

研究代表者

川面 洋平（Kawazura, Yohei）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：80725375

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、降着円盤の局所乱流を高精度で解くための擬スペクトル法コードを作成し、富岳を用いて史上最高解像度の磁気回転乱流シミュレーションを行うことに成功した。その結果、これまでの磁気回転乱流では磁場エネルギーが運動エネルギーを上回ることが知られていたが、微小スケールでは磁場エネルギーと運動エネルギーが当配分され、スペクトルが波数の $-3/2$ 乗に従う「Alfvén乱流状態」になることを明らかにした。また、遅い磁気音波の持つエネルギーがAlfvén波のエネルギーの二倍になることもわかった。これらの結果は、我々が以前、簡約化電磁流体モデルによって導いた予測とピッタリ一致している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

降着円盤における乱流の特性は30年以上の未解決問題であった。本研究は、富岳を用いた超高解像度シミュレーションによってその答えを世界で初めて導いたという点において学術的な意味が大きい。また、その結果が簡約化磁気流体モデルの予測と一致するため、今後は降着円盤の微小スケールに関する研究は、高解像度シミュレーションを使わなくても、簡約化電磁流体で僅かな数値資源のシミュレーションで十分であるということを示しており、数値計算に必要な環境負荷の低減につながるだろう。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a pseudospectral code to accurately solve the local turbulence in accretion disks and succeeded in performing the highest-resolution magnetorotational turbulence simulation ever using the Fugaku supercomputer. As a result, while it has been known that magnetic energy exceeds kinetic energy in previous magnetorotational turbulence studies, we discovered that at smaller scales, magnetic energy and kinetic energy are energetically equipartitioned, leading to an 'Alfvén turbulence state' where the spectrum follows a $-3/2$ power law of the wavenumber. Additionally, we found that the energy of slow magnetosonic waves is twice that of Alfvén waves. These results perfectly match our previous predictions derived from a reduced magnetohydrodynamic model.

研究分野：プラズマ物理、天体物理学

キーワード：降着円盤 プラズマ乱流 電磁流体力学 並列計算

1. 研究開始当初の背景

Event Horizon Telescope (EHT) は、銀河中心にある巨大ブラックホールの降着流からの放射を捉える国際プロジェクトであり、つい先日ドーナツ状のブラックホールの影を捉えることに成功した。しかし、観測結果を物理的に解釈するための理論モデルの構築がまだ不完全であるため、実際にブラックホール周辺でどのようなプラズマが存在しているのか確定していない。

降着流におけるプラズマ乱流は、磁気回転不安定性 (MRI) によって駆動されているというのが通説である。MRI 乱流の直接数値シミュレーションは 1990 年初頭以来、膨大な数が行われてきた。しかしこれらの先行研究では以下に示すように数値解像度が不十分であり、乱流の特性を捉えるに至っていない。

まず最初に、通常の流体における乱流の一般論を述べる。乱流は大きい渦が小さい渦に分裂していき、最終的に微小スケールで散逸する過程である。このとき、3つの特徴的な空間スケールに分けることができる。1つ目はエネルギーが注入されるスケール、2つ目はスケール間のエネルギー流束が一定となるスケール (慣性領域)、そして3つ目が渦のエネルギーが粒子の熱エネルギーに変わる散逸スケールである。このうち、乱流の特徴である非線形効果が重要となるのが慣性領域である。すなわち乱流シミュレーションにおいて重要なことは、慣性領域を十分解像できるか、ということである。しかし MRI 乱流では、エネルギー注入スケールが広いため慣性領域に到達することが困難である実際、これまで行われてきた MRI 乱流シミュレーションにおいて、慣性領域の特徴を示すようなエネルギースペクトルは得られていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、富岳をはじめとするスーパーコンピュータを用いて、超高解像度の MRI 乱流シミュレーションを行い、降着円盤乱流における慣性領域の特性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

これまで行われてきた MRI 乱流シミュレーションでは、その多くが 2 次精度の有限差分法を用いている。それに対し、本研究では擬スペクトル法を用いたコードを開発し、MRI 乱流シミュレーションを行った。擬スペクトル法は空間を有限の格子点で離散化するのではなく、有限個のフーリエ係数の時間発展を解くという方法である。擬スペクトル法は無次元の精度を持っており数値粘性が存在しないため、2 次精度の有限差分と比較すると実効的に数倍の格子点を取ったことに相当する。擬スペクトル法は中性流体や電磁流体力学乱流のシミュレーションでは古くから使われている手法であるが、MRI 乱流にはほとんど用いられたことがなかった。そこで、擬スペクトル法を用いて新たに MRI 乱流用の電磁流体力学 (MHD) コードを開発し、かつてない高解像度な MRI 乱流シミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 擬スペクトル法コード CALLIOPE の開発

これまで擬スペクトル法を用いた電磁流体力学コードとして SNOOPY が広く使われていたが、SNOOPY は 1 次元方向にしか並列分割出来ない欠点があった。2 次元分割型の擬スペクトル法コードで公開されているものがないため、その開発から行った。2 次元分割 FFT ライブラリである P3DFFT を用いてコード作成を行い、簡約化 MHD、非圧縮 MHD、等温圧縮 MHD を解くことができるコードを開発し、降着円盤の局所計算に用いられる Shearing coordinate remapping にも対応させた。富岳で並列性能のベンチマークを取り、20 万コア以上の理想的な並列性能を示した (Kawazura 2022, ApJ, 928, 113 および Kawazura 2022, J. Phys. Soc. Jpn., 91, 115002)。CALLIOPE コードは GitHub にて公開した (<https://github.com/ykawazura/calliope>)。

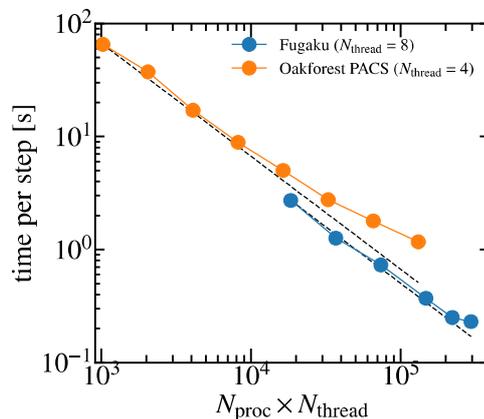


図 1: CALLIOPE コードの並列性能

(2) 世界最高解像度 MRI 乱流シミュレーションの成功

上記、擬スペクトルコード CALLIOPE を富岳で実行し、世界最高解像度の MRI 乱流シミュレーションを行った。図2に示すように、スケール間エネルギー伝達フラックスが一定になることを示し、慣性領域に到達したことを示した。次に電磁場揺動を Alfvén mode と Slow mode に分解した(図3)。すると、Slow mode が Alfvén mode の2倍のエネルギーを持ち、Slow mode 中の電場と速度場のスペクトルは共に波数の $-3/2$ 乗になることがわかった。これは、我々が簡約化 MHD を用いて導出した予測 (Kawazura et al., 2022 J. Plasma Phys. 88, 905880311) と精確に一致しており、降着円盤における簡約化 MHD 近似の妥当が示された。

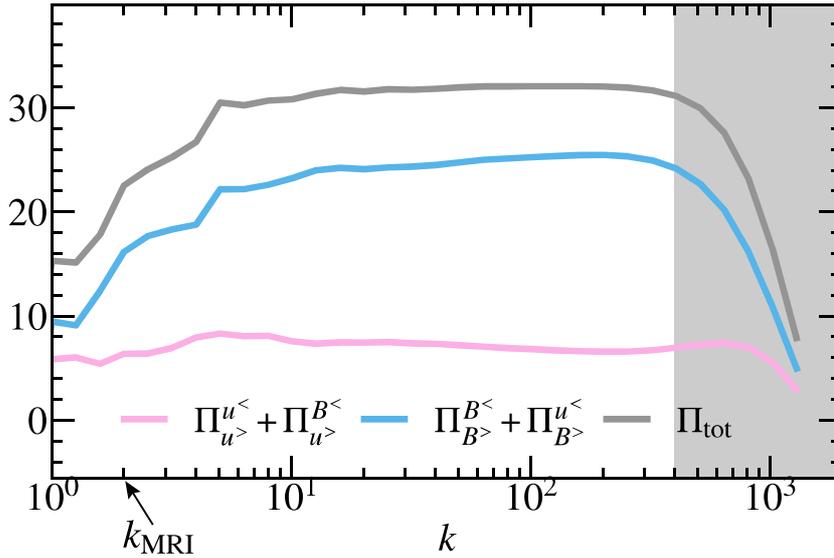


図2: MRI シミュレーションによって得られたスケール間伝達エネルギーフラックス。一定になっているところが慣性領域

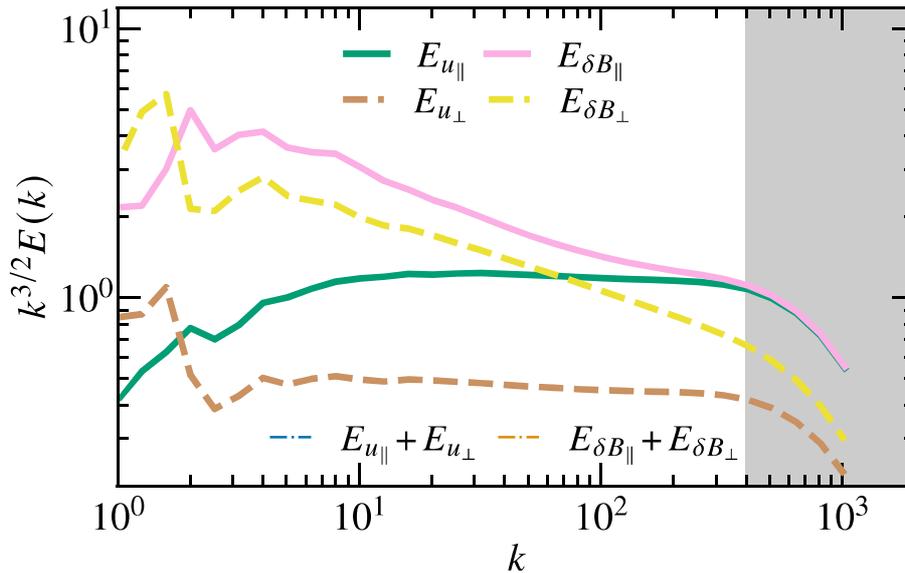


図3: MRI シミュレーションにおける Alfvén mode と Slow mode のスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Kawazura Y. | 4. 巻 89 |
| 2. 論文標題 Hall magnetohydrodynamics in a relativistically strong mean magnetic field | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics | 6. 最初と最後の頁 175890602 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/S0022377823001228 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Kawazura Yohei | 4. 巻 443 |
| 2. 論文標題 Yet another modification of relativistic magnetohydrodynamic waves: Electron thermal inertia | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters A | 6. 最初と最後の頁 128199 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physleta.2022.128199 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Kawazura Y., Schekochihin A.A., Barnes M., Dorland W., Balbus S.A. | 4. 巻 88 |
| 2. 論文標題 Energy partition between Alfvénic and compressive fluctuations in magnetorotational turbulence with near-azimuthal mean magnetic field | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics | 6. 最初と最後の頁 905880311 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/S0022377822000460 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Kawazura Yohei | 4. 巻 91 |
| 2. 論文標題 Integrating Factor Runge-Kutta Method in Shearing Coordinates | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 115002 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.115002 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Kawazura Y. | 4. 巻 928 |
| 2. 論文標題 CALLIOPE: Pseudospectral Shearing Magnetohydrodynamics Code with a Pencil Decomposition | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 113 ~ 113 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4f63 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名 Y. Kawazura, A.A. Schekochihin, M. Barnes, J.M. TenBerge, Y. Tong, K.G. Klein, and W. Dorland | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Ion versus Electron Heating in Compressively Driven Astrophysical Gyrokinetic Turbulence | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review X | 6. 最初と最後の頁 41050 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.10.041050 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yohei Kawazura |
| 2. 発表標題 Hall magnetohydrodynamics in relativistically strong mean magnetic field |
| 3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 川面 洋平, 木村 成生 |
| 2. 発表標題 局所MRI乱流の超高解像度シミュレーション |
| 3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Inertial range of magnetorotational turbulence: reduced magnetohydrodynamics and ultra-high resolution simulations |
| 2. 発表標題 Yohei Kawazura |
| 3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Y. Kawazura, A. A. Schekochihin, M. Barnes, J. M. TenBarge, Y. Tong, K. G. Klein, W. Dorland |
| 2. 発表標題 Ion versus Electron Heating in Compressively Driven Astrophysical Gyrokinetic Turbulence |
| 3. 学会等名 High Energy Density Science 2021 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 川面洋平, Alexander Schekochihin, Michael Barnes, William Dorland, Steven Balbus |
| 2. 発表標題 ほぼトロイダルな背景磁場を持つMRI乱流におけるAlfven的揺動と圧縮的揺動の分配 |
| 3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 川面洋平, Alexander Schekochihin, Michael Barnes, William Dorland, Steven Balbus |
| 2. 発表標題 簡約化電磁流体力学を用いた磁気回転乱流におけるAlfven的揺動と圧縮的揺動のデカップリングの解析 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Y. Kawazura |
| 2. 発表標題 Ion versus electron heating in collisionless accretion flows |
| 3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 川面洋平 |
| 2. 発表標題 2次元分割擬スペクトル法コードCalliopeによる超高解像度MRI乱流シミュレーション |
| 3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 川面洋平 |
| 2. 発表標題 天体プラズマ乱流中のイオンと電子の加熱配分に関する研究 |
| 3. 学会等名 第77回日本物理学会年次大会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 川面洋平, A. Schekochihin, M. A. Barnes, W. Dorland, S. A. Balbus |
| 2. 発表標題 MRI乱流におけるAlfveen的揺動と圧縮的揺動の散逸比 |
| 3. 学会等名 日本物理学会春期大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 川面洋平, A. Schekochihin, M. Barnes, S. Balbus, W. Dorland |
| 2. 発表標題 ほぼトロイダルな外部磁場を持つMRI乱流におけるAlfvenic揺動と圧縮性揺動の比 |
| 3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|