

降着円盤乱流における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の配分

川面 洋平

東北大学 学際科学フロンティア研究所

1. はじめに

ブラックホールは物理学者、天文学者、そして一般市民をも惹きつける謎に満ちた天体である。しかし、ブラックホールは光を発しないため観測することが困難である。ではブラックホールを“見る”ためにはどうすればよいのだろうか。手がかりはブラックホールを取り巻くプラズマの「降着流」にある。降着流中でプラズマは乱流状態になっており、このゆらぎのエネルギーが散逸することでプラズマは高温に加熱される。高温になったプラズマは電磁波を放射するため、この放射を観測することで間接的にブラックホールの情報を得ることができる（図 1）。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、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[1, 2]。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。そこで本研究では、かつてない超高解像度の電磁流体力学シミュレーションを行い、降着流中のプラズマ乱流の物理的性質を明らかにする。これにより、EHT が観測したブラックホールの影をより高精度に解釈することが可能になると期待される。

降着流におけるプラズマ乱流の性質の中でも特に重要となるのが、「乱流中の Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比」である。Kawazura et al., 2020 ではジャイロ運動論と呼ばれるモデルの直接数値シミュレーションを行い、微小スケールにおけるイオンと電子の加熱比が慣性領域における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比の増加関数になることを明らかにした[3]。降着円盤からの電磁放射は電子温度によって決定されるので、イオンと電子の加熱配分を担っている Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比を求めることは非常に重要である。

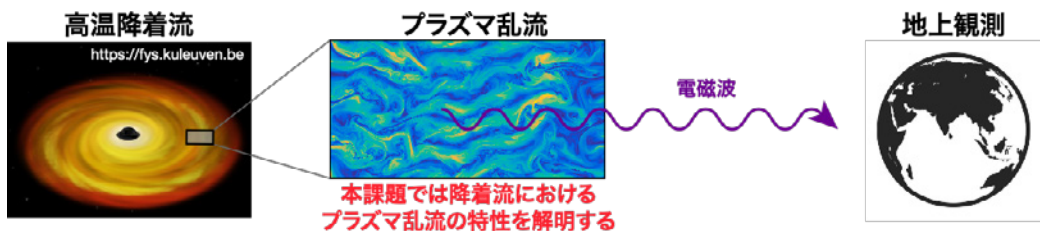


図 1. 本課題の対象の概念図。降着流中の乱流によってプラズマが高温に加熱され電磁波を放射する。こうして生成された電磁波によってブラックホールの間接的な観測が可能となる。本課題では、加熱の源となる乱流の特性を明らかにする。

2. 二次元分割擬スペクトル法コード CALLIOPE の開発

上記の通り乱流中の Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比が重要であるが、これまでの計算でこの値が求められたことはなかった。Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比を求めるためには乱流の慣性

領域に到達する必要があるが、降着円盤の乱流を駆動している磁気回転不安定性 (MRI) は注入領域がフーリエ空間でブロードバンドであるため、従来の数値解像度では慣性領域に到達することが出来ていなかった[4]。そこで本研究では、擬スペクトル法を用いて精度を上げることで実行的な解像度の改善を行った。擬スペクトル法では各ステップでFFTと逆FFTを行う必要があるため、並列分割の仕方が鍵となる。これまで降着円盤のシミュレーションで広く用いられてきた擬スペクトル法コード SNOOPY[5]では1次元分割が用いられてきた。そのため、 N^3 のグリッドに対して N プロセスしか使うことが出来ず、計算規模に制約がかかっていた。そこで本研究では二次元分割のライブラリ P3DFFT[6]を用いることで N^3 のグリッドに対して N^2 プロセスまで使えるコード CALLIOPE[7]を開発した (図2)。

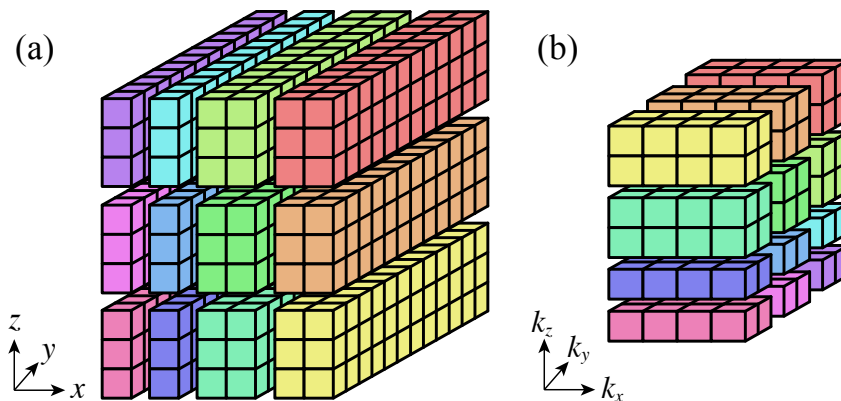


図2. CALLIOPE で用いている二次元分割。左は実空間グリッド、右はフーリエ空間グリッドに対応。

3. 結果

まず、CALLIOPE の並列性能に関して示す[7]。図3はOakforest-PACS及び富岳において測定したストロングスケーリングである。グリッド数は 2048^3 に固定した。Oakforest-PACSではスレッド数4のときが最も性能が高かった。この図からCalliopeの高い並列性能が見て取れる。

次に、CALLIOPEを用いて行ったMRI乱流の結果を示す[8]。図4は時間発展を示している。特に下パネルから、Alfvén的揺動と圧縮的揺動の比は1対2であることが分かる。この比率はプラズマのパラメータやシミュレーションのグリッド数を変えても不変であることを確認した。次に図5は乱流のエネルギースペクトルを示している。最も興味深いのは圧縮的揺動が波数の $-3/2$ 乗のべき乗則になっていることである。これまで多くのMRIシミュレーションで $-3/2$ 乗に近いスペクトルが見られていたが、ここまできれいにスペクトルの傾きが見えた例はない。さらにこのスペクトルは圧縮的揺動が支配的であることも見て取れる。この性質はプラズマのパラメータ β によらないことも分かる。

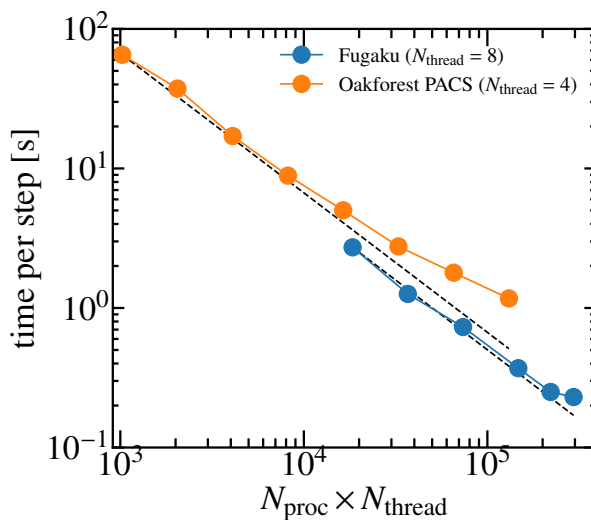


図 3. Oakforest-PACS 及び富岳における CALLIOPE のストロングスケーリング。

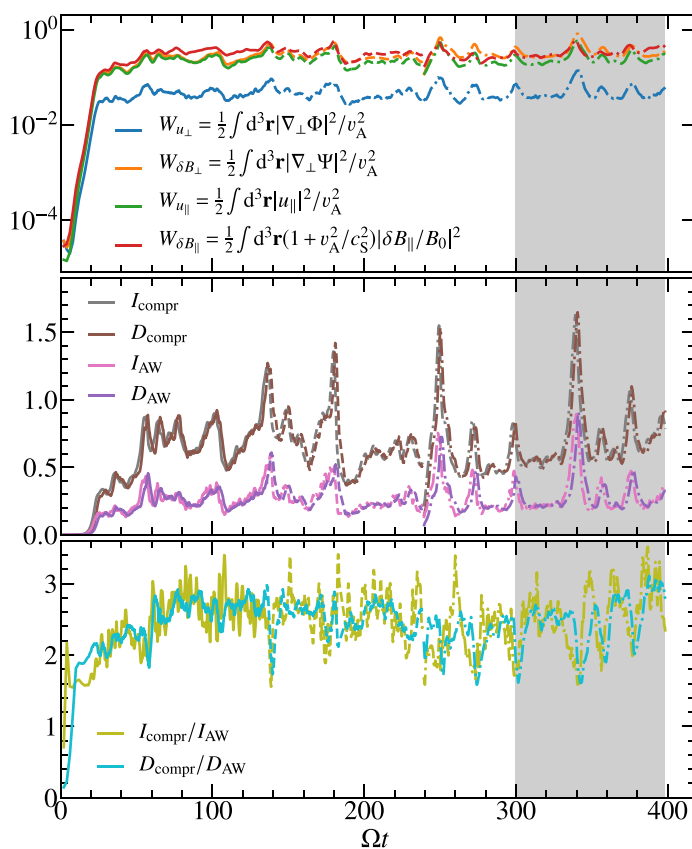


図 4. MRI 乱流シミュレーションの時間発展。(上) Alfvén 的揺動 (u_{\perp} 、 δB_{\perp}) と圧縮的揺動 (u_{\parallel} 、 δB_{\parallel}) のエネルギー、(中央) Alfvén 的揺動と圧縮的揺動のエネルギー注入率 (I) と散逸率 (D)、(下) 注入率と散逸率の Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比。

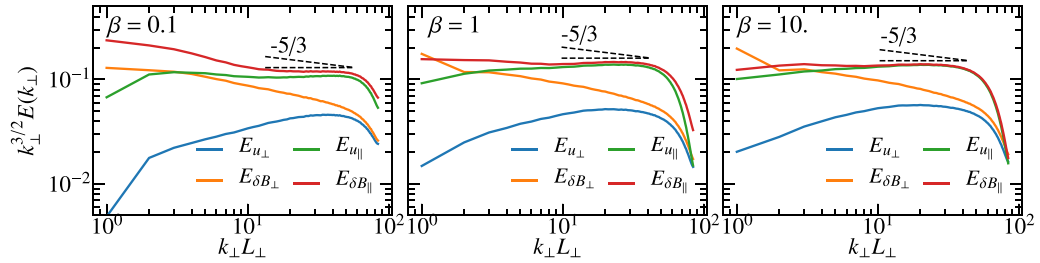


図5. エネルギースペクトル。左から右に $\beta = 0.1, 1, 10$ のシミュレーションに対応する。

4. まとめ

本研究では、二次元分割擬スペクトル法コード CALLIOPE を開発し、高い並列性能を発揮できることを確認した。次に CALLIOPE を用いて MRI 乱流のシミュレーションを行い、Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比が 2 対 1 になること、パワースペクトルが波数の $-3/2$ 乗になることを明らかにした。以上の結果は論文[7]及び[8]で出版済みである。現在、今後はさらなる高解像度シミュレーションを行うとともに、様々な乱流解析を行う予定である。

参考文献

- [1] EHT Collaboration 2019 First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *Astrophys. J. Lett.* **875**, L1.
- [2] EHT Collaboration 2022 First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way. *Astrophys. J. Lett.* **930**, L12.
- [3] Kawazura, Y., Schekochihin, A. A., Barnes, M., TenBarge, J. M., Tong, Y., Klein, K. G. & Dorland, W. 2020 Ion versus electron heating in compressively driven astrophysical gyrokinetic turbulence. *Phys. Rev. X* **10**, 041050.
- [4] Lesur, G. & Longaretti, P. Y. 2011 Non-linear energy transfers in accretion discs MRI turbulence. I. Net vertical field case. *Astron. Astrophys.* **528**, A17.
- [5] <https://ipag.osug.fr/~lesurg/snoopy.html>
- [6] <https://p3dfft.readthedocs.io>
- [7] Kawazura, Y. 2022 Calliope: Pseudospectral shearing magnetohydrodynamics code with a pencil decomposition. *Astrophys. J.* **928** 113.
- [8] Kawazura, Y., Schekochihin, A. A., Barnes, M., Dorland, W., and Balbus, S. A. 2022 Energy partition between Alfvénic and compressive fluctuations in magnetorotational turbulence with near-azimuthal mean magnetic field. *J. Plasma Phys.* **88**, 905880311.