

降着円盤における微小スケール乱流の特性解明

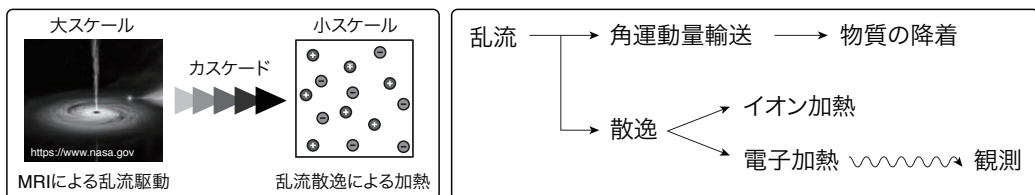
川面 洋平

東北大学学際科学フロンティア研究所

1. はじめに

光を発しないブラックホールを“見る”ためにはどうすればよいのだろうか。手がかりは「降着円盤」と呼ばれるブラックホールを取り巻くプラズマ流にある。降着円盤中で、プラズマは高温に加熱され電磁波を放射するため、降着円盤を観測することで間接的にブラックホールに関する情報（スピン等）を得ることができる。国際プロジェクト Event Horizon Telescope (EHT) では、銀河中心における降着円盤を観測しており、先日、M87 におけるブラックホールシャドーの画像が初公開され話題を呼んだ[1]。一方、観測結果から実際に降着円盤で何が起きているかを解釈するためには、理論とのすり合わせが必須である。また、直接計測ができない物理量は観測量と無矛盾な理論モデルから推測する必要がある。

そのための鍵となるのが**プラズマ乱流**である。天体の周囲を回転する物質が天体に落ち込むためには角運動量を失う必要がある。しかし宇宙プラズマにおける分子粘性は極めて低いため、物質が角運動量を失うためには、乱流による実行的な粘性が必要だと考えられている。従って降着円盤はすべからず乱流状態にある。乱流に起因するもう一つの重要な現象として**プラズマ加熱**がある。乱流のエネルギーを担っているのは電磁場や圧力場の揺動であるが、この揺動は降着円盤の厚み程度の大きさを持った“大スケール”において磁気回転不安定性(MRI)によって駆動される[2]、非線形効果によってより小さいスケールへと運ばれ(カスケード)、最終的に粒子運動サイズの“小スケール”において散逸される(図1左)。散逸したエネルギーはプラズマの熱エネルギーへと変換(加熱)される。今回 EHT が観測した降着円盤では、イオンと電子は異なる温度を持っていると考えられているが、EHT が観測できるのは電子からの光のみであるため、**乱流による加熱がイオンと電子のどちらをより加熱するかが EHT の観測結果を解釈する上で重要**である(図2右)。今回の EHT の論文ではイオンと電子の加熱比を適当なパラメータを用いて仮定しているが、パラメータのとり方次第で観測を説明できるシナリオが複数存在してしまうため[3]、イオンと電子の加熱比を物理的に決定する必要がある。

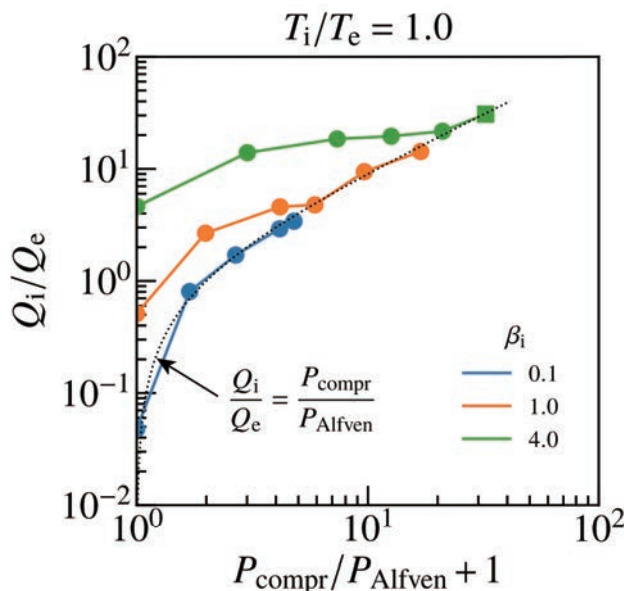


第1図: 降着円盤における乱流エネルギーの流れの模式図。

(左) 降着円盤のサイズと同程度大スケールにおいて MRI によって乱流が駆動され、非線形効果によってより小さいスケールにエネルギーが運ばれ、粒子運動のスケールで熱エネルギーへと散逸する。(右) 乱流によって角運動量が輸送され物質が降着すると同時に散逸が生じる。散逸したエネルギーはイオンと電子を加熱するが、そのうち電子加熱のみが放射として観測される。

2. ジャイロ運動論的乱流によるイオン・電子の加熱配分

しかし、乱流が MRI によって駆動されるスケールと乱流が散逸する微小スケールを同時に解くことは現在の数値計算資源では不可能である。そこで筆者らは大スケールと微小スケールを分割して解き、それぞれの結果を組み合わせることで降着円盤におけるイオンと電子の加熱比を求めるところを目指している。Kawazura et al., 2020 ではジャイロ運動論乱流の直接数値シミュレーションから微小スケールにおけるイオンと電子の加熱比を調査した[4]。その結果、イオンと電子の加熱比は慣性領域における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比の増加関数になることが明らかになった(図 2)。そこで、次の疑問となるのが、「大スケールにおいて MRI によって駆動される乱流における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比はいくらか?」である。本研究では電磁流体力学(MHD)の数値計算を用いてこの問題の答えを出すことを目標とする。



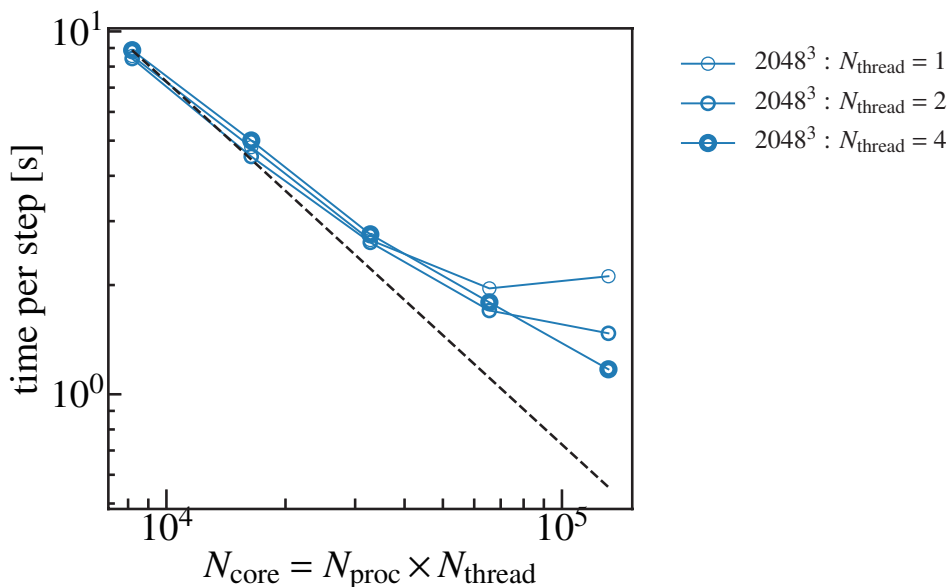
第2図: ジャイロ運動論的乱流におけるイオンと電子の加熱比。

縦軸はイオンと電子の加熱比、横軸は慣性領域における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比。色の違いはイオンの圧力と磁場の圧力の比 β_i 。いずれの β_i についてもイオンと電子の加熱比は圧縮的揺動と Alfvén 的揺動の比の増加関数となる。

3. 差動回転を考慮した簡約化電磁流体力学モデルとシミュレーションセットアップ

上記の通り、本研究の目標は MRI 乱流における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の比を求めることである。この比を数値シミュレーションから求めるためには、慣性領域を $k_{\parallel}/k_{\perp} \ll 1$ が成立するスケールまで解像する必要がある。ここで k_{\parallel} 及び k_{\perp} は磁場に対して水平及び垂直方向の波数を意味する。このスケールまで至らなければ、Alfvén 的揺動と圧縮的揺動がカップルしているため、解像度の上昇とともに比が変わる可能性がある。しかし、過去の研究から MRI 乱流には非局所エネルギー伝達が存在するため、慣性領域を十分解像することが困難であることが知られていた[5]。そこで本研究では、降着円盤の方位角方向に背景磁場が存在する場合を仮定する。このときは MRI の最大成長モードが $k_{\parallel}/k_{\perp} \ll 1$ を満たすため、 $k_{\parallel}/k_{\perp} \ll 1$ のオーダーリングをかけた MRI を考えることが出来る。

本研究では、降着円盤における MHD に $k_{\parallel}/k_{\perp} \ll 1$ のオーダーリングをかけた簡約化 MHD (RRMHD) を数値的に解く。x,y,z 方向それぞれに周期境界条件を課すことが出来るので、擬スペクトル法を用いてシミュレーションを行う。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 [6] 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、計算規模に成約がかかっていた。そこで本研究では 2 次元分割のライブラリ P3DFFT [7] 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を開発した。図 3 に開発したコードの Oakforest-PACS におけるスケーリングを示す。2048³ グリッドに対して 10⁵ プロセス程度までスケーリングしており、2 次元分割の効果が得られている。本研究では最大で 256×1024×1024 グリッドの計算を行い、プラズマ圧と磁気圧の比 β が 0.1, 1, 10 の 3 ケースを調査した。



第3図：Oakforest-PACS における新コードのスケーリング。

4. シミュレーション結果

まず図 4 に、MRI が非線形飽和したときの速度場と磁場の分布を示す。降着円盤の同径方向 (x 方向) に引き伸ばされた構造が見られるが、これは MRI によって生じるチャンネル流の名残に相当する。また、背景磁場に垂直な速度分布は細かいフィラメント状の構造を持っていることが見て取れる。

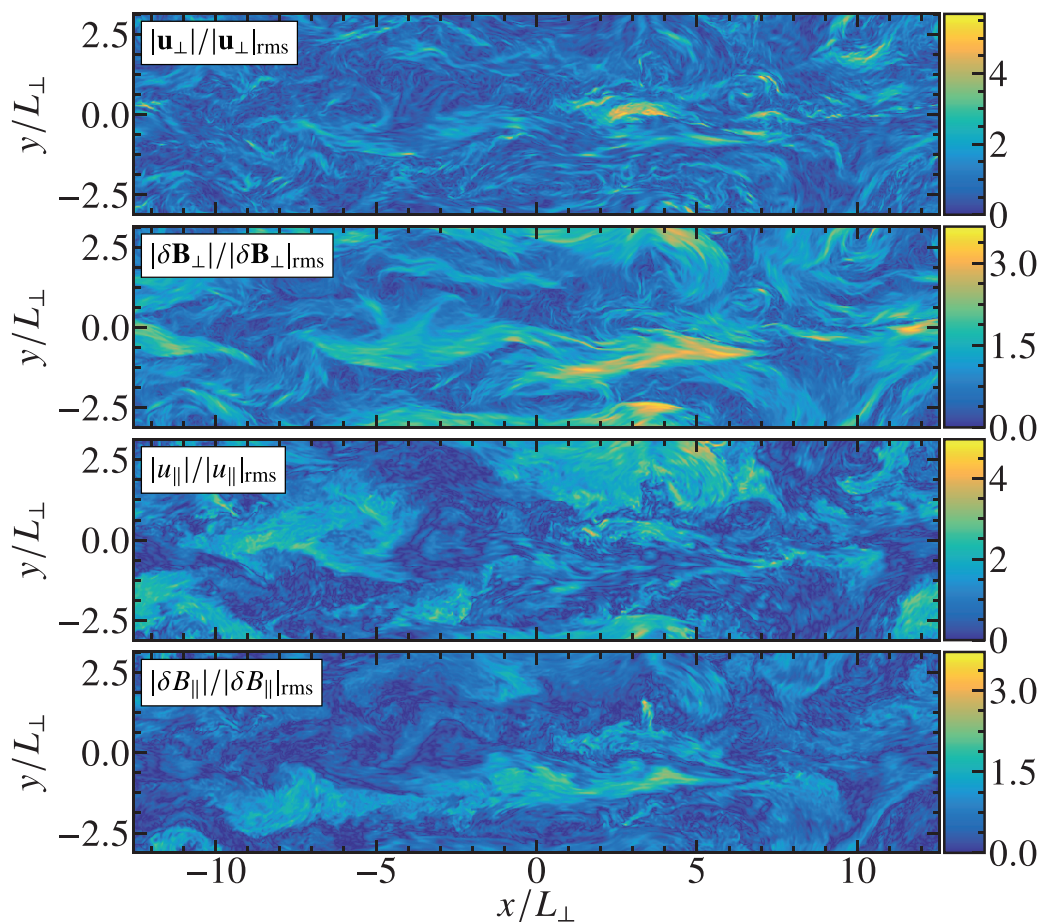
次に、図 5 に非線形項と線形項の波数空間スペクトルを示す。RRMHD では Alfvén 的揺動と圧縮的揺動が線形項によってのみカップルする。そのため、非線形項が線形項を上回っているときは Alfvén 的揺動と圧縮的揺動がデカップルしているということを意味する。実際に図 5 を見てみると、 β の値に依らず、MRI の駆動スケール (図の左端) から十分小さいスケールに行けば非線形項が線形項を上回っていることが分かる。従って、本シミュレーションでは Alfvén 的揺動

と圧縮的揺動がデカップルするスケールを解像できているということが示された。

次に、図6にグリッドスケールで測った圧縮的揺動と Alfvén 的揺動のエネルギーフラックスの比を示す。いずれの β でも 圧縮的揺動と Alfvén 的揺動のエネルギーフラックスの比はおおよそ 2であることが分かる。また、図中の線の色は異なる解像度に対応するが、解像度を下げてもエネルギーフラックスの比はほとんど変わらない。これは図5において低解像度のグリッドスケール $k_{\perp}L \approx 40$ あたりでも非線形項が線形項より十分大きく、Alfvén 的揺動と圧縮的揺動がデカップルしていることを示している。

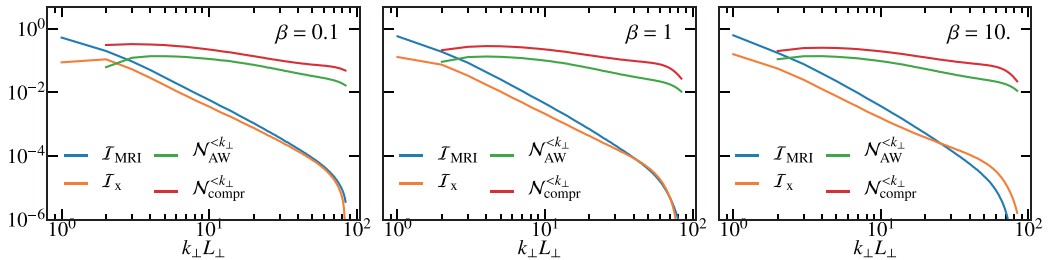
4. まとめと今後の課題

本研究では降着円盤の方位角方向に背景磁場が存在するときに限定して、MHD を簡約化した RRMHD を用いてシミュレーションを行った。その結果、微小スケールで Alfvén 的揺動と圧縮的揺動がデカップルすることが示され、また、圧縮的揺動と Alfvén 的揺動のエネルギーフラックスの比がほぼ 2 であることが分かった。この結果を Kawazura et al., 2020 で得られたイオンと電子の加熱比の結果と組み合わせると、降着円盤では常にイオンが選択的に加熱されるということになる。今後は、背景磁場を仮定しない一般的な状況における計算を行う予定である。



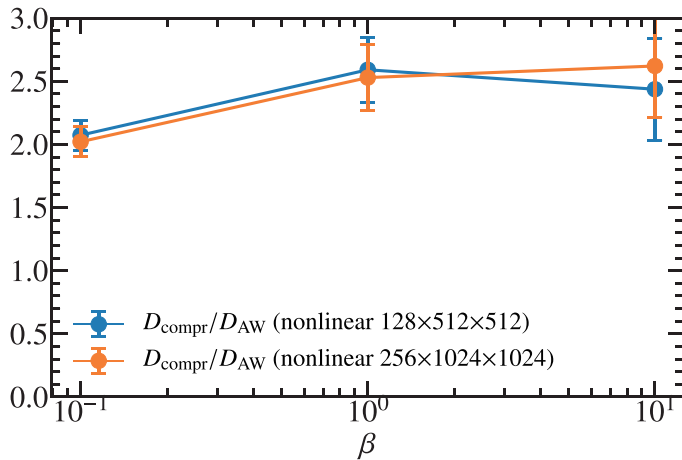
第4図: $\beta=1$ のときの乱流場の分布。

上から、方位角方向背景磁場に対して垂直な速度場、垂直な磁場変動、水平な速度場、水平な磁場変動の分布。前者2つは Alfvén 的揺動、後者2つは圧縮的揺動に対応する。x 軸は降着円盤の同径方向、y 軸は降着円盤に垂直な方向を示す。垂直速度場は細かい構造を持つが、それ以外の場は大きい構造を持つ。x 方向に引き伸ばされた構造は、MRI に初期に作られたチャンネル流の名残に相当する。



第5図：非線形カスケードと線形項それぞれのスペクトル。

Alfvén 的揺動と圧縮的揺動のカップリングがオレンジ線で表される、一方、赤線と緑線は非線形効果によってより小さいスケールに流れるエネルギーフラックスを表す。非線形項が線形項を上回ると Alfvén 的揺動と圧縮的揺動がデカップルすることが示されるので、本シミュレーションではデカップルが成立するスケールまで十分解像出来ていると言える。



第6図：圧縮的揺動と Alfvén 的揺動のエネルギーフラックス比。

横軸はプラズマの圧力と磁場の圧力の比 β に対応する。いずれの場合も、圧縮的揺動は Alfvén 的揺動に対しておよそ2倍のエネルギーフラックスを持っている。線の色は異なる解像度に対応する。

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] Balbus, S. A. & Hawley, J. F. 1991 A powerful local shear instability in weakly

- magnetized disks. I Linear analysis. *Astrophys. J.* **376**, 214.
- [3] EHT Collaboration 2019 First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical origin of the asymmetric ring. *Astrophys. J. Lett.* **875**, L5.
- [4] 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.
- [5] Lesur, G. & Longaretti, P. Y. 2011 Non-linear energy transfers in accretion discs MRI turbulence. I. Net vertical field case. *Astron. Astrophys.* **528**, A17.
- [6] <https://ipag.osug.fr/~lesurg/snoopy.html>
- [7] <https://p3dfft.readthedocs.io>