

擬スペクトル MHD コードで狙う磁気回転乱流における慣性領域の解像

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

降着円盤は、ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体の周辺に形成されるプラズマの流れである。降着円盤は磁気回転不安定性 (MRI) によって駆動される電磁流体的な乱流状態になっている。磁気回転乱流はプラズマの角運動量輸送や加熱など降着円盤の物理的性質に深く関わっており、そ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。しかしこれまでは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慣性領域に到達することが困難である (図 1)。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。従って、MRI 乱流の本質は最初の研究から 30 年たった今でも謎に包まれたままということが出来る。本研究では、2次元分割擬スペクトル法という、これまで磁気回転乱流に用いられたことのない高精度スキームによって、磁気回転乱流の微小スケールの持つ性質に迫ることを目的としている。

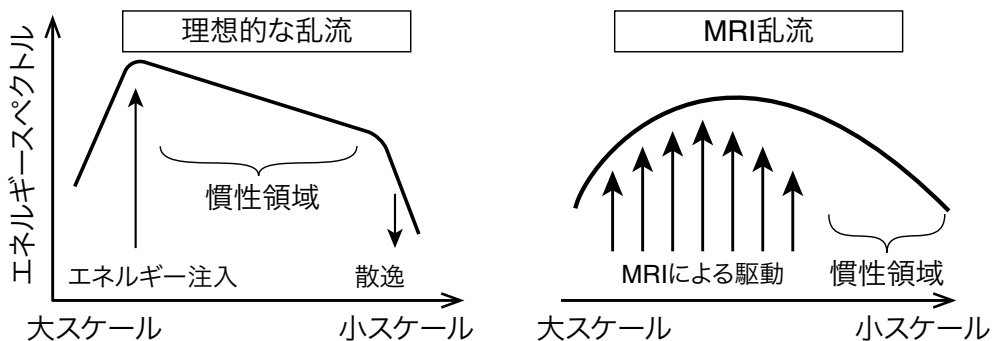


図 1. 理想的な乱流と MRI 乱流の比較。理想的な乱流では、エネルギー注入スケールが狭く、慣性領域を広く取れる。一方 MRI 乱流の場合、エネルギー注入スケールが広いいため、容易に慣性領域に到達できない。

2. 計算手法

本計算には自作コード CALLIOPE [1]を用いた。CALLIOPE では空間3次元方向を Fourier 分解し、非線形項は実空間で評価する擬スペクトル法を用いている。Pruned FFT を用いて2/3-ルールによるエイリアス誤差の除去を行っている。時間発展には Strong Stability Preserving Runge-Kutta 法を用いて、散逸項は Integrating Factor 法を用いている。

磁気回転乱流の微細構造を求めるために、Shearing box と呼ばれる降着円盤と共回転する Cartesian 座標におけるプラズマの発展を計算している。Shearing box は円盤の同径方向に周期境界ではなく擬スペクトル法が使えないため、任意の時刻に周期境界になる Shearing 座標に座標変換し、定期的に元の座標に戻す remapping 法を用いる[2]。Shearing 座標では散逸項が時間依存するため、時間依存する Integrating Factor 法を開発・導入した[3]。

3. 結果

CALLIOPE コードを用いて $4096 \times 4096 \times 2048$ グリッドの磁気回転乱流のシミュレーションを行った。これ以前に行われた磁気回転乱流で最もグリッド数が大きいのは Walker らによる $1024 \times 1024 \times 512$ グリッドのシミュレーション[4]であり、本研究で行ったシミュレーションは史上最高解像度の磁気回転乱流である。図2に得られたエネルギースペクトルを示す。Walker らのシミュレーションと比較して、磁場エネルギーと運動エネルギーのべき乗スペクトルが明確に見て取れる。具体的には、磁場エネルギーは波数 k の $-5/3$ 乗よりやや急峻で、運動エネルギーは k の $-3/2$ 乗になっている。図3(左)は、Cho & Lazarian の方法 [5]を用いて、電場と速度場を局所背景磁場に対して平行および垂直な成分に分解したときのスペクトルである。垂直な成分は Alfvén 的揺動を示し、平行な成分は圧縮的な揺動を示している。このスペクトル形状は、以前我々が簡約化磁気流体力学を用いて得たスペクトル ([6]及び図3右)とよく似ている。特に、圧縮的成分が波数 k の $-3/2$ 乗であること、圧縮的揺動は Alfvén 的揺動の2倍の強度を持っていることが一致している。このことは、磁気回転乱流において簡約化磁気流体近似が妥当であることを示している。簡約化磁気流体力学を用いれば、本研究のように高解像度なシミュレーションを行わずとも乱流の微小スケールを調べることができるため、本発見は非常に有用である。図4は、各スケール間の非線形エネルギー伝達関数である。この結果は、磁場・速度場いずれの間のエネルギー伝達も局所的になっていることを示している。磁気回転乱流で局所エネルギー伝達が見られたのは本研究が初めてである。

4. まとめ

史上最高解像度シミュレーションにより、磁気回転乱流のべき乗スペクトルの形状が明らかになった。また、Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の分解によって得られたスペクトルは、簡約化磁気流体力学によって得られたスペクトルと一致している。

一方で、磁場エネルギーと運動エネルギーのスペクトルが合わさるところまでは解像できなかった。今後は、さらなる高解像度化を目指し、磁場と速度場のスペクトルが一致したときにどのようなべき乗則になるかを明らかにしたい。

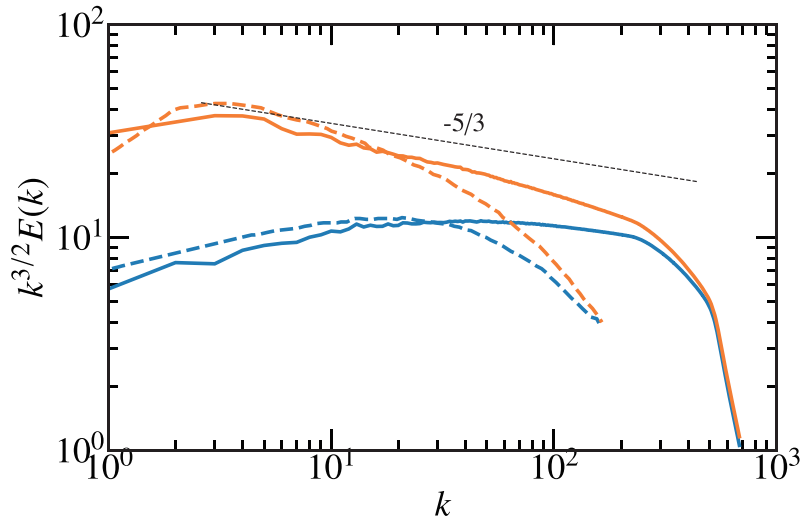


図2: (オレンジ) 磁場エネルギーおよび (青) 運動エネルギーのスペクトル。波数 k の $3/2$ 乗で補完してある。実線が本シミュレーションで得られたもので、破線は Walker らによるもの [5]。

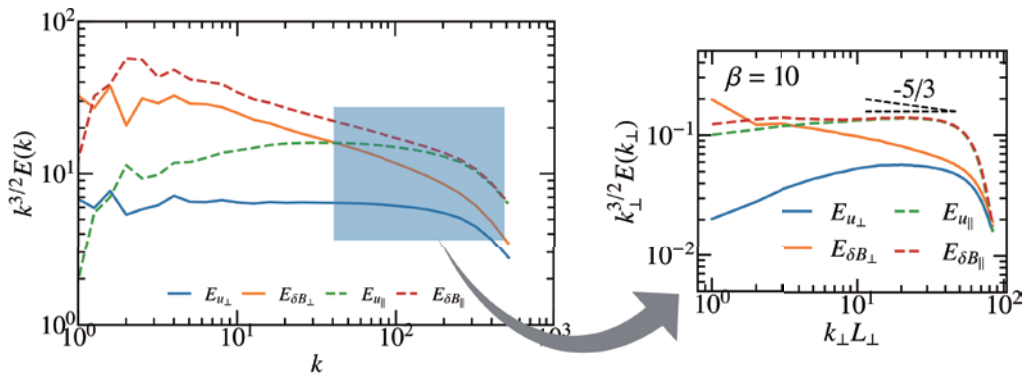


図3: (左) 図1のスペクトルを局所背景磁場に平行および垂直な成分に分解したもの。(右) 我々が以前行った簡約化磁気流体力学シミュレーションによって得られたスペクトル。

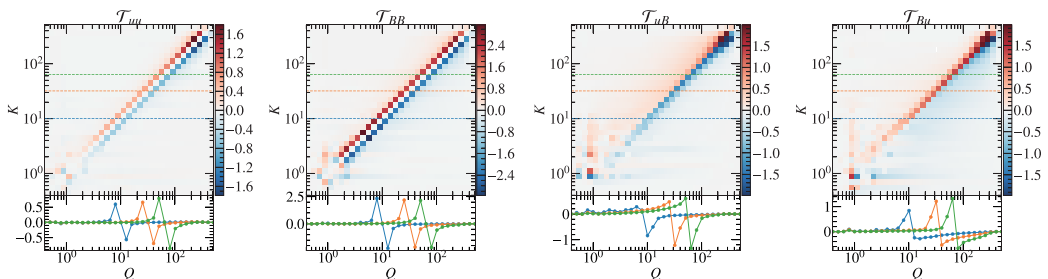


図4: 非線形項による各スケール間のエネルギー伝達。 $T_{ab}(Q, K)$ は波数 Q の場 a から波数 K の場 b へのエネルギー伝達を意味する。 u は速度場、 B は磁場を意味する。

参 考 文 献

- [1] Y. Kawazura, *Astrophys. J.*, 928, 113 (2022).
- [2] R. S. Rogallo, NASA/STI Technical Report, 81315 (1981).
- [3] Y. Kawazura, *J. Phys. Soc. Jpn*, 91, 115002 (2022).
- [4] J. Walker et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 457, L39 (2016).
- [5] J. Cho and A. Lazarian, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 345, 325 (2003).
- [6] Y. Kawazura et al., *J. Plasma Phys.*, 88, 905880311 (2022).