

太陽風磁気流体乱流の数値シミュレーション

Numerical simulation of solar wind magnetohydrodynamic turbulence

研究代表者：成行 泰裕 (富山大学・学術研究部教育学系)

nariyuki@edu.u-toyama.ac.jp

研究目的 (Research Objective):

本研究課題では流体系を中心とした 3 次元乱流の計算を中心に研究を進める。流体系を中心とした議論を行う背景としては、(1)乱流の統計的性質の議論を行う上では自由度(波数モード数)を十分確保した空間 3 次元計算が必要であること、(2)比較可能な乱流のモデルに磁気流体系を基にしたものが多いこと、(3)太陽風プラズマのグローバルな空間非一様性や数値計算の粗視化スケールと乱流の統計的性質の関連が流体系においてもまだ明らかではないこと、等が挙げられる。

本年度は、多次元磁気流体波[e.g., Primavera et al, ApJ, 2019]のパラメトリック不安定性を中心に計算を行った。具体的には、アーク偏波(arc-polarized)の磁気流体波[e.g., Del Zanna, GRL, 2001]について計算を行った。

計算手法 (Computational Aspects) :

3 次元の磁気流体系に対する直接数値計算を行った。空間微分には擬似スペクトル法を、時間積分には 2 次の有理ルンゲクッタ法(Wambecq, 1978)を用いている。ただし、ランダム擾乱を与えるための確率微分方程式には Euler-Maruyama 法を用いている。3 次元計算には各方向 128~256 の格子点を用いている。

研究成果 (Accomplishments) :

磁気流体系の厳密解としての有限振幅磁気流体波としては、波数ベクトルと背景磁場が平行になる円偏波の磁気流体波が題材として取り上げられることが多い。一方で、波数ベクトルと背景磁場がなす角が有限の場合でも、厳密解としての磁気流体波が存在する。この場合、 $\nabla \cdot \mathbf{b} = 0$ より背景磁場に平行な磁場擾乱が存在する一方で、背景磁場に垂直な成分についても、背景磁場と波数ベクトルがなす平面に対し垂直な成分と平行な成分とで性質が異なる。このような磁気流体波でもっとも単純なものの一つにアーク偏波の磁気流体波[e.g., Del Zanna, GRL, 2001]がある。Figure 1 は背景磁場に垂直な磁場成分の hodogram である。ここでは、このような弧状の軌跡を描く偏波をアーク偏波と呼ぶ。

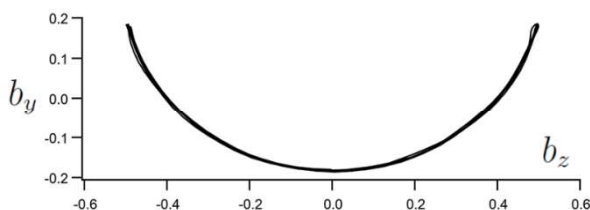


Figure 1 背景磁場に垂直な磁場成分の hodogram。 b_z が背景磁場と波数ベクトルがなす平面に対し垂直な成分。

Figure 2(a)は x 方向(背景磁場方向)の磁場の初期波形である。全磁場の大きさ($|b|$)が一定であることが分かる(灰色線)。また、背景磁場と波数ベクトルがなす面に対し平行な成分(b_x, b_y)が同じ波数を持つのにに対し、垂直な成分(b_z)の波数はその半分となっている。先行研究[Del Zanna, GRL, 2001; Del Zanna et al, JPP, 2015]では面に対し垂直な成分(シア成分)を正弦波で与えているが、ここでは面に平行かつ背景磁場に垂直な成分(b_y)を正弦波で与えている。図からわかるように、シア成分(b_z)の振幅が最も大きい。Figure 2(b)は z 方向に平均した密度の波数モードスペクトルである。初期の b_z は厳密には正弦波ではないが、 $(m_x, m_y)=(3,1)$ のフーリエ成分が支配的である。崩壊不安定性では親波アルヴェン波よりも大きな波数の密度擾乱が生成されるので、Fig.2(b)の $m_x=4$ の密度擾乱は b_z の崩壊不安定性で生成されたものであるということが分かる。一方で、Fig.2(b)からは $m_x=8$ にも弱く密度擾乱が励起されていることが分かる。磁場のスペクトルにも対応する子波が励起されており、波数モードの時間発展からは線形成長している様子が確認できるため、この密度擾乱は b_x, b_y の崩壊不安定性で生成された密度擾乱に対応するものと考えられる。ただし、Fig.2(b)のように初期に有限振幅の密度揺動を置いた場合、円偏波アルヴェン波のアナロジーからは初期に大きな振幅を与えられた不安定モードが優先的に成長することが予想されるが、アーク偏波ではそれが見られなかった。背景磁場と波数ベクトルのなす角に対する依存性やシア成分とそれ以外の成分の不安定性の相互作用などについて現在解析を進めている。

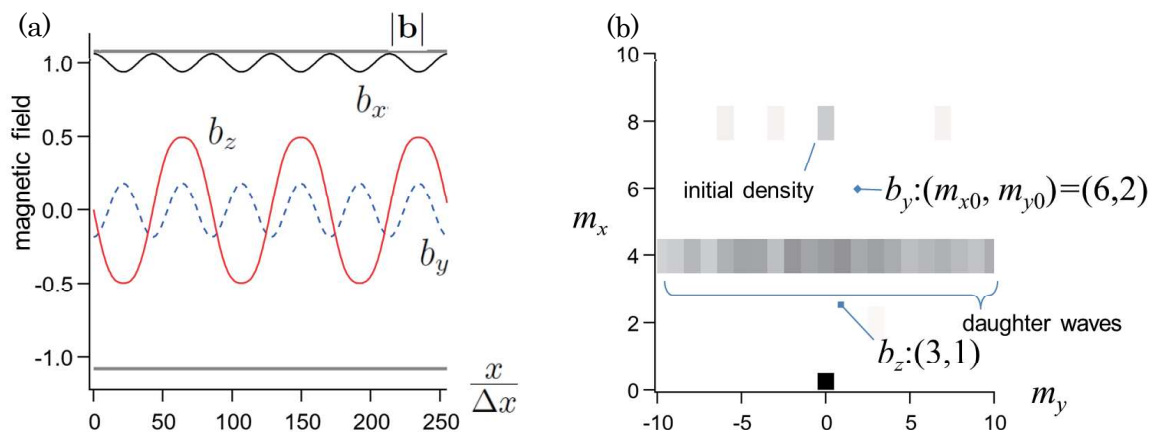


Figure 2 (a) x 方向(背景磁場方向)の磁場の初期波形、(b) z 方向に平均した密度の波数モードスペクトル

公表状況 (Publications) :

(口頭発表)

Y. Nariyuki, Multi-dimensional parametric decay instability of Alfvén waves driven by finite amplitude density fluctuations, 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2021), online, SG-03, 2021年9月.