

運動論による磁化プラズマ中の2次元静電乱流

Two-dimensional electrostatic turbulence in a magnetized plasma based on a kinetic theory

龍野 智哉^{1*}, M Barnes², S C Cowley³, W Dorland¹, G G Howes⁴, 沼田 龍介¹,
G G Plunk¹, A A Schekochihin²

Tomoya Tatsuno^{1*}, M Barnes², S C Cowley³, W Dorland¹, G G Howes⁴, R Numata¹,
G G Plunk¹, A A Schekochihin²

¹米メリーランド大, ²英オックスフォード大, ³英カラム研, ⁴米アイオワ大

¹U Maryland (USA), ²U Oxford (UK), ³Culham Inst (UK), ⁴U Iowa (USA)

宇宙や実験室などの大部分において、プラズマ中の乱流は無衝突、あるいは低衝突環境で起こる。

低衝突磁化プラズマにおける静電乱流は無衝突不変量(エントロピー)の位相空間内順カスケードを示す[1]。

ここでは非線形ExB運動による位相混合(非線形位相混合)を考える[2]。

磁化プラズマでは粒子は磁力線のまわりを回転しながらドリフト運動を行うが、この回転半径は粒子の熱速度に比例した差異をもつ。

小スケールの電場揺動が存在する場合、回転中心を共有し半径の異なる粒子は異なる実効ポテンシャルを感じるため、平均して異なるExB運動をする。

すなわち、各粒子の磁力線垂直方向の速度に応じてゆらぎに対する非線形応答が異なり、これが分布関数の速度空間構造となって現れるのである。

したがって運動論における乱流カスケードは、非線形位相混合により、粒子の熱Larmor半径より小さいスケールにおいて位置と速度空間で同時に進行し(慣性領域)、さらに小さいスケールにおいて、最終的に衝突が速度空間の構造を滑らかにする(散逸領域)。

2次元配位では無衝突不変量がもう一つ存在し、大スケールの極限ではプラズマの運動エネルギーに対応する。

Kolmogorovの現象論では、同一スケールにおいて二つの独立な不変量が同方向にカスケードすることは矛盾を招くため、第1不変量は順カスケード、第2不変量は逆カスケードを引き起こすと考えられる。

我々は静電的ジャイロ運動論モデルを用いて、磁化された低衝突プラズマ中の位相空間カスケードに関する、数値シミュレーションを行った。

ジャイロ運動論はFokker-Planck方程式を低周波数極限で簡約化したモデルであり、粒子の背景磁力線まわりの回転運動を平均化することによって速度空間座標から回転角を取り除いたものである。

磁力線に沿った変化を無視し、単純化された4次元位相空間(磁力線に垂直な位置空間2次元と回転角を除いた速度空間2次元)でAstroGK [3]を用いて自由減衰乱流の問題を取り扱った。

位置と速度空間スケールのカップリングを見るため、位置、速度空間にそれぞれFourier, Hankel変換を行い、さらに波数空間についてシェル平均を行って、Fourier-Hankel空間における2次元スペクトルを調べた。

本講演では、文献[1]で報告された第1不変量(エントロピー)に関する順カスケードに加え、第2

不変量に関する逆カスケードを示す.

非線形移送関数(transfer function)を数値的に調べることによって, 双カスケード(dual cascade)に特徴的な両不変量の非線形移送, すなわち第1不変量流束が小スケールへ, 第2不変量流束が大スケールへ移送されることを示す.

またFjortoftの議論[4]をFourier-Hankel空間に拡張し, この振る舞いを非線形3波相互作用で説明するとともに, 2次元自由減衰乱流に関するスケーリング則も示す予定である.

本研究はメリーランド核融合理論研究プログラム, Leverhulme財団磁化プラズマ乱流国際ネットワークの支援を受けている.

[1] T. Tatsuno et al., Phys. Rev. Lett. 103, 015003 (2009).

[2] W. Dorland and G. Hammett, Phys. Fluids B 5, 812 (1993).

[3] R. Numata et al., J. Comp. Phys., 投稿準備中(2010);

<http://sourceforge.net/projects/gyrokinetics/>

[4] R. Fjortoft, Tellus 2, 225 (1953).

キーワード: ジャイロ運動論, 静電乱流, 非線形位相混合, 双カスケード, 減衰乱流シミュレーション, ケルビン-ヘルムホルツ不安定性

Keywords: gyrokinetics, electrostatic turbulence, nonlinear phase mixing, dual cascade, decaying turbulence simulation, Kelvin-Helmholtz instability