

ITG乱流による電子・イオンエネルギー交換の ジャイロ運動論的シミュレーション解析

学生証番号 47216079 氏名 加藤 鉄志
(指導教員 洲鎌 英雄 教授)

Key Words: 核融合プラズマ物理, ジャイロ運動論, 数値シミュレーション, ITG乱流, エネルギー交換.

1. 序論

核融合反応によってエネルギーを賄おうという挑戦は前世紀から続く。国際熱核融合実験炉ITERや日本のJT60-SAでは磁場閉じ込め方式で超高温プラズマを長時間閉じ込めることを目指している。

磁場閉じ込めプラズマでは乱流が粒子・熱フラックスを引き起こすと共に、乱流によって電子・イオン間のエネルギー交換が発生する[1, 2]。先行研究[3]では、特定のプラズマ条件で乱流エネルギー交換の影響を調べている。そこでは、プラズマの大域的な密度・温度分布に対して乱流エネルギー交換は殆ど影響しないと主張している。

しかし、[3]では衝突エネルギー交換との比較がなされておらず、使用したプラズマ条件も衝突によるエネルギー交換が支配的となる条件であった。そのため、衝突周波数が小さくなる超高温プラズマの場合の乱流エネルギー交換の影響を十分に議論できていない。

本論文では、ジャイロ運動論的シミュレーションにより、トカマクプラズマにおける電子とイオンの間のエネルギー交換に対するイオン温度勾配(ITG)乱流の影響を定量的に評価し、衝突周波数や電子・イオン温度比等のプラズマ条件に対する依存性を調べ、クーロン衝突によるエネルギー交換と比較し、また、波数空間スペクトル解析を行うことによって、乱流エネルギー交換の特性を明らかにする。

2. 理論背景

2.1. プラズマ物理の階層性とジャイロ運動論

磁場閉じ込め核融合プラズマはミクロなジャイロ運動からマクロな輸送に至るまで、様々な時空間スケール階層の現象を包含する複雑なシステムである。このような階層性が存在するため、関心のあるプラズマ現象の生ずる時空間スケールに適したモデルを用いることが有効である。

ジャイロ運動論は、ジャイロ周波数に比べて十分

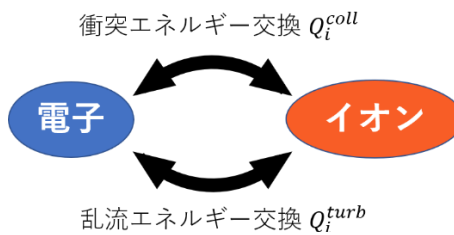


図1 電子・イオン間のエネルギー交換

小さい周波数帯で、磁力線垂直方向にジャイロ半径程度の波長を有するプラズマ揺動に対する運動論的效果を正しく記述できる。また非線形性により生ずるプラズマ乱流現象も扱うことができる。

2.2. ジャイロ運動論的シミュレーションコード

本研究ではジャイロ運動論的シミュレーションコードGKV[4]を用いた。このシミュレーションコードでは、磁場閉じ込めプラズマ領域全体を解くのではなく、磁力線に沿った磁束管の領域を扱っている。この領域中の密度・温度・密度勾配・温度勾配は固定し、粒子分布関数や電磁場の揺動成分の計算を行うことで、局所的なプラズマ乱流をシミュレーションすることができる。

2.3. 衝突・乱流エネルギー交換

電子からイオンへのエネルギーの移送はクーロン衝突および乱流揺動により引き起こされ(図1)、それぞれ Q_i^{coll} , Q_i^{turb} として次式により与えられる。

$$Q_i^{coll} = \frac{3m_e}{m_i} n_e v_e (T_e - T_i) \quad (1)$$

$$Q_i^{turb} = e \int d^3v \sum_{\mathbf{k}_\perp} \left[h_i(\mathbf{k}_\perp) \frac{\partial \psi(\mathbf{k}_\perp)}{\partial t} \right] \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{k}_\perp は磁力線垂直方向の波数ベクトル、 m は質量、 n は数密度、 v は衝突周波数、 T は温度を示し、添え字 i, e はそれぞれイオンと電子を表す。また、ジャイロ運動論から導出される $h(\mathbf{k}_\perp)$, $\psi(\mathbf{k}_\perp)$ の中で、 $h(\mathbf{k}_\perp)$ は位相空間上の分布関数の非断熱揺動成分を表し、 $\psi(\mathbf{k}_\perp)$ は静電ポテンシャル揺動

とベクトルポテンシャル揺動から構成されるポテンシャル関数を表す。ここで Q_i^{coll} , Q_i^{turb} は電子からイオンへエネルギーが流れる方向を正の向きとする (図1では右向きが正)。

2.4. 乱流エネルギー交換の物理メカニズム

定常乱流状態における乱流エネルギー交換 Q_i^{turb} の定義式(2)は次のように書き替えられる。

$$Q_i^{turb} = \sum_{\mathbf{k}_\perp} \{J_{s\parallel}(\mathbf{k}_\perp) + J_{sB}(\mathbf{k}_\perp) + J_{s\psi}(\mathbf{k}_\perp) + J_{sC}(\mathbf{k}_\perp)\} \quad (3)$$

ここで $J_{s\parallel}(\mathbf{k}_\perp)$, $J_{sB}(\mathbf{k}_\perp)$, $J_{s\psi}(\mathbf{k}_\perp)$, $J_{sC}(\mathbf{k}_\perp)$ は揺動ポテンシャルによる力と、それぞれ、粒子の磁力線方向速度、 ∇B -曲率ドリフト速度、揺動ポテンシャル自身が駆動するドリフト速度との積、ならびに、衝突項による揺動ポテンシャルエネルギーの変化率によって与えられる。そのため、乱流エネルギー交換は、揺動ポテンシャルを媒介した仕事のやり取りであると解釈することができ、これら4つの成分が各波数モードの乱流エネルギー交換を構成する。

3. シミュレーション設定

今回は運動論的電子を考慮したイオン温度勾配 (ITG) モード乱流を対象として、準中性近似かつ Cyclone DIII-D Base Case のプラズマ条件[5] (電子とイオンは非等温も含める。電子温度勾配は0と仮定する。) で乱流エネルギー交換量を計算した。また、イオン β 値 (プラズマのイオン圧力と磁気圧の比) を $\beta_i = 1 \times 10^{-5}$ と設定した。

このようなプラズマ条件で、電子とイオンの温度と温度比を変化させながら、衝突と乱流のエネルギー交換の特徴の違い、および乱流エネルギー交換の波数空間の波数空間におけるスペクトル分布構造を調べた。

4. シミュレーション結果

4.1. 衝突エネルギー交換との比較

電子とイオンの温度比 T_e/T_i に対する衝突エネルギー交換と乱流エネルギー交換の変化を図2に示す。この結果から、温度比が大きくなるほど乱流エネルギー交換量が衝突エネルギー交換量よりもはるかに大きくなるのが分かる。また、衝突の場合はイオンと電子の温度差によってエネルギーの流れが変わるが、乱流ではイオンの方が電子より低温である場合も、イオンから電子へエネルギーが流れている。さらに、等温状態の場合、衝突エネルギー交換量は0になるが、乱流エネルギー交換量は0にならない。

このように、電子とイオンの温度や温度比に依存して、衝突と乱流のエネルギー交換の絶対値の

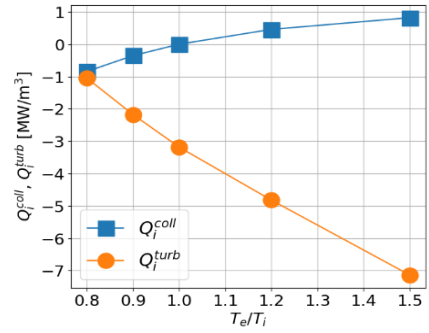


図2 衝突と乱流のエネルギー交換量

($T_i = 3.0\text{keV}$, $n_e = n_i = 1.0 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$, $B = 1.91\text{T}$)

比や符号が、大きく異なることがわかった。

4.2. 乱流エネルギー交換の波数スペクトル解析

(3) 式に示した4つの成分のスペクトル特性をそれぞれ調べた。ここで、ITG不安定性の強い波数モード領域と、ITGモード特有のゾーナルフローモードでは、各成分の及ぼす影響に違いがあることが明らかになった。イオンに注目すると、不安定な波数モード領域では主に $J_{iB}(\mathbf{k}_\perp)$ が卓越するのに対し、イオンのゾーナルフロー成分は $J_{i\psi}(\mathbf{k}_\perp)$ が支配的な影響を及ぼしている。

5. まとめと今後の展望

本研究によって、ITG乱流による電子・イオン間のエネルギー交換は、高イオン温度領域において、クーロン衝突によるエネルギー交換よりもはるかに大きくなり、また、電子温度がイオン温度よりも高い場合でも、衝突エネルギー交換とは反対向きに、イオンから電子へのエネルギー移送をもたらすことが示された。

今後は、乱流エネルギー交換量を乱流シミュレーションよりも短時間に予測するモデルの構築を見据えて、不安定性の線形成長率と乱流による粒子・熱輸送フラックス・熱交換の波数スペクトル構造を調べ、それらの関係に注目する。さらに、ITG乱流だけでなく捕捉電子 (TEM) や電子温度勾配 (ETG) の不安定性から発生する乱流にも対象を広げて研究を進める。

参考文献

- [1] H. Sugama, M. Okamoto, W. Horton, and M. Wakatani, Phys. Plasma 3, 2379, 1996.
- [2] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and M. Nunami, Phys. Plasma 16, 112503, 2009.
- [3] J. Candy, Phys. Plasmas, 20, 082503, 2013.
- [4] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24, 2006.
- [5] A. M. Dimits et al., Phys. Plasma 7, 969, 2000.