

イオン温度勾配駆動乱流における不純物輸送解析

Analyses of impurity transport in ion temperature gradient driven turbulence

井戸村 泰宏、オブレジャン ケビン
Yasuhiro IDOMURA, Kevin OBREJAN原子力機構
JAEA

炉心プラズマにおける燃料純度やエネルギーの放射損失を左右する不純物輸送はITERにおける重要課題となっている。多くのトカマク装置において粒子種に依存する複雑な不純物輸送特性が観測されており、特に、炉心性態への影響が大きい高Z不純物の輸送特性が注目されている。ASDEX-U実験[Neu,JNM03]ではタングステンが炉心に蓄積し、これに電子サイクロトロン加熱(ECH)を印加することでタングステンが炉心から排気される現象が観測されている。一方、[McDermott,PPCF11]では、ホウ素の輸送が調べられており、タングステンとは逆にECH印加後にホウ素が炉心に蓄積する現象が観測されている。このように不純物輸送は粒子種や加熱状態に依存して複雑な振る舞いを示すが、その物理機構は完全には理解されていない。

本研究では、第一原理モデルに基づく不純物輸送解析に向けてジャイロ運動論的トロイダル5次元full-fオ일러コードGT5D [Idomura, JCP16]を改良した。高Z不純物とバルクイオンや電子の異種粒子衝突演算子は速度空間のマルチスケール問題となり、数値的取り扱いが難しくなる。この問題を解決するために、低エネルギー領域の衝突係数の発散を抑制するフィルタ関数とテスト粒子衝突演算子の陰解法ソルバを導入し、高Z不純物の解析を実現した。

図1はGT5Dを用いて実施したイオン温度勾配駆動(ITG)乱流数値実験で観測した4種類のトレーサ不純物の径方向分布を示す。全ての粒子種に対して、同じ形状の径方向分布で初期条件(破線)を与えたが、ITG乱流における不純物輸送によって低Z不純物の分布の緩和、および、高Z不純物の炉心への蓄積という実験的観測を定性的に再現することに成功した。この不純物分布形成をもたらす新古典輸送と乱流輸送を詳細に調べた結果、乱流輸送に関しては、

低Z不純物では外向きの輸送が支配的であり、高Z不純物になるほどピンチが大きくなるという、先行研究の準線形解析[Angioni,POP12]と定性的に矛盾しない依存性が観測された。一方、新古典輸送に関しては、イオン系において新古典理論を大きく上回る粒子束が観測された。この粒子束を詳細に解析した結果、乱流輸送と新古典輸送の新たな相互作用機構が明らかになった。ITG乱流の励起によりバルクプラズマの乱流粒子束が駆動されると両極性条件を満たすように径電場が発展する。この径電場によって測地線音響モード(GAM)と同様のポロイダル流の圧縮によって上下非対称な密度揺動が発生する。ここで、ポロイダル流の圧縮は磁力線方向の熱運動により打ち消されるため、電子ではほとんど発生せず、重い高Z不純物ほど大きな密度揺動が形成される。この密度揺動と磁気ドリフトが結合することで、バルクプラズマの乱流粒子束を打ち消す方向に不純物粒子束が発生する。上記の結果から、複雑な不純物輸送特性を理解するには乱流輸送と新古典輸送の自己無撞着な相互作用を考慮することが必須であることがわかった。

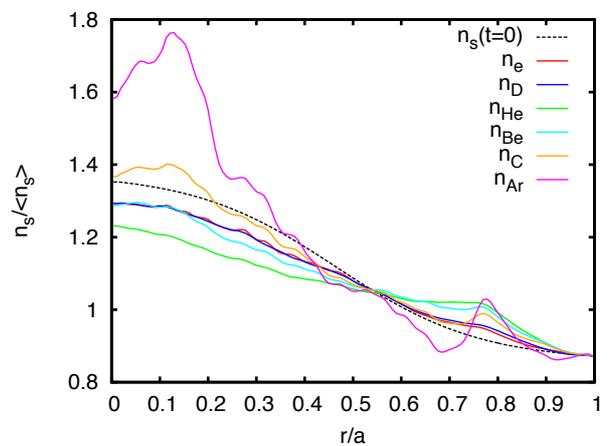


図1: GT5Dによるイオン温度勾配駆動乱流熱数値実験で観測した4種類(He, Be, C, Ar)のトレーサ不純物(相対電荷密度 $q_s n_s / q_e n_e = 10^{-4}$)の規格化密度分布。