

電子熱輸送および粒子輸送における非捕捉電子の影響
Effects of passing electrons on electron heat and particle transport

朝比 祐一、井戸村泰宏、前山伸也¹、仲田資季²、石澤明宏³、渡邊智彦¹
 Y. Asahi, Y. Idomura, S. Maeyama¹, M. Nakata², A. Ishizawa³, T.-H. Watanabe¹

日本原子力研究開発機構、名古屋大学¹、核融合科学研究所²、京都大学³
 JAEA, Nagoya University¹, NIFS², Kyoto University³

従来の局所的ジャイロ運動論に基づく乱流輸送シミュレーションにおいて、イオン温度勾配乱流などイオンスケールの乱流を扱う場合、電子は断熱的に振る舞うと仮定されてきた。この仮定は、イオンスケール乱流の磁力線平行方向の位相速度 ω_r/k_{\parallel} が電子の移動速度である熱速度 v_{te} と比べて十分小さいという想定に基づき、特に非捕捉電子に対しては有効な仮定であると考えられる（捕捉電子の場合には、トロイダル歳差運動の周波数がイオンスケール乱流の周波数と同程度になるため非断熱応答が無視できない）。ここで、 ω_r はイオンスケールの乱流を駆動する不安定性を特徴づける反磁性ドリフト周波数、 k_{\parallel} は磁力線平行方向の波数である。しかしながら、有理面近傍においては、磁力線平行方向波数が 0 に漸近するため、断熱応答の仮定となる $\omega_r/k_{\parallel} \ll v_{te}$ は非捕捉粒子についても成立しない。この場合、非捕捉電子に対しても、非断熱応答すなわち運動論的効果が重要となり、電子熱輸送、粒子輸送への寄与が無視できないことが先行研究によって指摘されている [1]。

本研究では、局所的ジャイロ運動論コードの GKV コード [2]によって、電子モデルとして運動論的モデルと、ハイブリッドモデルの二つを用い、電子熱輸送および粒子輸送における非捕捉電子の影響を調べた。ここで、運動論的モデルでは、捕捉電子、非捕捉電子共に運動論的な応答を仮定するのに対し、ハイブリッドモデルでは、捕捉電子についてのみ運動論的な応答を仮定し、非捕捉電子については断熱応答を仮定する。ただし、ハイブリッドモデルのジャイロ運動論的方程式は非捕捉電子についても計算し、捕捉電子、非捕捉電子間のピッチ角散乱や非捕捉電子の乱流場に対する受動的な応答による輸送過程は計算した。

図 1 は、イオン温度勾配モードの線形計算における静電ポテンシャルの等値面図である。運動論的モデルにおいては、径方向に一定の間隔で、磁力線平行方向に伸びた構造が見られる。この間隔は、コードで用いられるフラックスチューブモデルの境界条件に起因し、有限ポロイダル波数を持つ

モードが磁力線平行方向に一周した時に異なる径方向波数を持つモードへと接続するという条件から決まる。フラックスチューブモデルでは、安全係数の径方向依存性はフラックスチューブ接続時のモードの位相変化を介して表現される。これによって、フラックスチューブモデルは局所モデルであるにも関わらず、有理面の表現が可能である。図 1 においては、磁力線平行方向に伸びたモード構造が形成されることで、線形的に最も不安定な径方向波数 0 のモードが、径方向波数の高いモードへと接続しており、これらのモード構造はその径方向波数で決まる間隔で存在する。一方、ハイブリッドモデルにおいてはこのような構造が見られないことから、この構造は非捕捉電子の有理面近傍における非断熱応答に起因することがわかる。

講演では、運動論モデルおよびハイブリッドモデルを用いた非線形計算によって調べた、イオン温度勾配乱流における電子熱輸送および粒子輸送に対する非捕捉電子の影響について論じる。

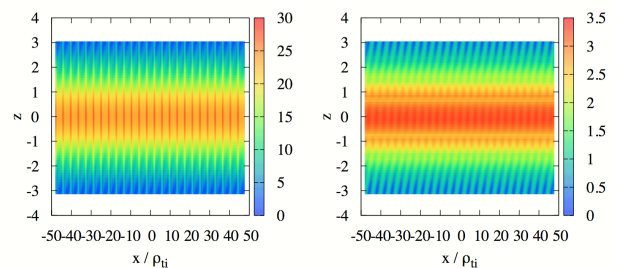


図 1 運動論的モデル（左図）とハイブリッドモデル（右図）における、規格化ポロイダル波数 $k_y \rho_{ti} = 0.3$ のイオン温度勾配モードの静電ポテンシャルの等値面図。x は小半径方向に対応し、z は磁力線平行方向に対応する。 ρ_{ti} はイオンラーマ半径。

[1] J. Dominski, S. Brunner, T. Gorler, F. Jenko, D. Told, and L. Villard. How non-adiabatic passing electron layers of linear microinstabilities affect turbulent transport. Phys. Plasmas, 22, 062303 (2015).

[2] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24 (2006).