

核弾性散乱による2次元イオン分布関数の歪みと非等方中性子放出スペクトル Distortion of 2D ion distribution functions due to nuclear plus interference scattering and anisotropic neutron emission spectrum

内山大輔、松浦秀明、澤田大輔

Daisuke Uchiyama, Hideaki Matsuura, Daisuke Sawada

九大院工

Kyushu Univ.

1. 諸言

プラズマ中のイオン間のエネルギー輸送は、Coulomb 相互作用を介するものが支配的であるが、イオンのエネルギーが高くなると減速過程に核力の影響が現れる[1]。核弾性散乱（nuclear plus interference scattering）は大角度の散乱過程であり、Coulomb 散乱と比較して、一回の散乱当たりの輸送エネルギーが大きくなる。

これまで、核弾性散乱に伴うバルクイオン分布関数上のノックオンテイルの形成とそのプラズマ診断への応用が検討されている[2]。NBI 加熱を施した場合には、バルクイオンへ輸送されるエネルギーの分配割合[3]、及び核融合反応率[4]に影響が現れる。しかし、これらの解析のほとんどは1次元解析によるものであり、2次元解析は十分に行われていない。加熱を行った場合には特定方向に高速イオンが発生し、プラズマ加熱特性に影響を与える可能性が考えられる。また、中性子放出スペクトルも非等方的になるため、プラズマ診断の観点からも2次元解析が重要である。

2次元解析は、ICRF 加熱を想定した体系で進められてきた[5]が、計算時間の問題から、ICRF で加速された高速イオンとバルクイオンの速度差が十分大きいという近似がなされている。本研究では、Boltzmann 衝突積分に、一部、モンテカルロ計算を導入することにより、計算性能の改善を試みた。同手法を用いて2次元イオン分布関数および非等方中性子放出スペクトルの評価を行ったので報告する。

2. 解析モデル及び結果

^3He 少数イオン加熱を施した DT プラズマを想定し、加速された ^3He との衝突による、バルクイオンの高エネルギー領域への反跳を表すノックオンソースを計算した。この場合、ノックオンソースは次のように表される。

$$S(v_i, \mu_i) = \frac{2\pi}{v_i^2} \int_0^\infty dv_i' \int_{-1}^1 d\mu_i' \int_0^\infty dv_j \int_{-1}^1 d\mu_j v_i'^2 v_j^2 f_i(v_i', \mu_i') f_j(v_j, \mu_j) v_r \sigma(v_r) P(v_i' \rightarrow v_i, \mu_i' \rightarrow \mu_i | v_j, \mu_j) \quad (1)$$

$i = d, t \quad j = ^3\text{He}$

ここで、 μ は磁場ベクトルに対するイオンの速度の方向余弦を表し（ $\mu = \cos \theta$ 、イオンの速度が磁場となす角を θ とする）、 $P(v' \rightarrow v, \mu' \rightarrow \mu | v_j, \mu_j)$ は速さ v' 、方向余弦 μ' のイオンが速さ v_j 、方向余弦 μ_j のイオンとの核弾性散乱によって、速さ v 、方向余弦 μ となる確率を表す。核弾性散乱は重心系で等方的とし、モンテカルロ計算を行うことでこの確率を統計的に求める。(1)式のノックオンソースに対して Fokker-Planck 方程式を解くことで、イオンの速度分布関数を求めることができる。

図1に重陽子のノックオンソースを磁場に垂直及び平行な速度の関数として示す。計算では、バルクイオン（重陽子・トリトン）は温度 5keV のマクスウェル分布を仮定し、RF の加熱パワーは 33MW、イオン密度は $n_d = n_t = n_e / 2 = 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とした。重陽子の速度は 20keV の重陽子の速度で規格化されている。RF によって磁場に垂直な方向に加速された ^3He と衝突し、重陽子が磁場に垂直な方向の高エネルギー領域に反跳されていることが分かる。計算モデルの妥当性の確認のため、等方的な加熱を想定してノックオンソースを角度について積分した結果、従来の評価値[6]と同等であることを確認した。発表では、このノックオンソースに対して Fokker-Planck 方程式を解くことで得られた速度分布関数について議論する。

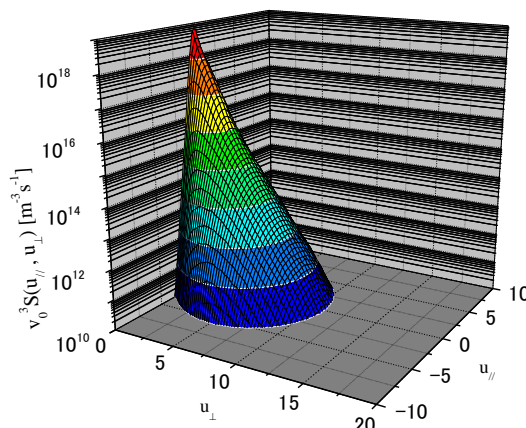


図1. 重陽子のノックオンソース

[1] J. J. Devaney and M. L. Stein, Nucl. Sci. Eng. **43** (1971) 323.

[3] H. Matsuura, et al., Phys. Plasmas. **13** (2006) 062507.

[5] A. Fujimaru, et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol.9 (2009) 1187.

[2] L. Ballabio, et al., and J. Källne, Phys. Rev. E **55** (1997) 3358.

[4] H. Matsuura, et al., Phys. Plasmas. **14** (2007) 054504.

[6] M. Nocente, et al., Nucl. Fusion **53** (2013) 053310.