

LHD プラズマにおける高エネルギービーム間衝突の評価

The Estimation of the Collisions between Energetic Beam Particles in LHD Plasma

田原康祐, 浅井迅馬, 村上定義

Kosuke TAHARA, Hayama ASAI, and Sadayoshi MURAKAMI

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻

Department of Nuclear Engineering, Kyoto University

核融合プラズマでは核融合反応による α 粒子や ECH, ICRF 加熱, NBI 加熱などのプラズマ加熱により高エネルギー粒子が発生する。プラズマ粒子の衝突を考える際、多くの場合このような高エネルギー粒子間衝突の影響は非常に小さいとし、背景粒子との衝突のみを考慮している。しかし、プラズマ中の Coulomb 衝突による小角散乱を記述する Fokker-Planck 方程式は相対速度がゼロとなる点を特異点に持つため、相対速度の小さい粒子間の衝突によるピッチ角散乱の影響が大きくなる可能性があること、また高エネルギー粒子の密度が大きくなるに伴って高エネルギー粒子間の衝突効果が無視できなくなる可能性があるなど、ビーム間衝突の影響を考慮した解析を行うことは重要であると考えられる。

本研究では、5次元位相空間ドリフト運動論方程式解析コード GNET[1] に高エネルギー粒子間の衝突を計算するための非線形衝突演算子を導入し、LHD プラズマにおける NBI 加熱によって生じたビーム粒子間の衝突の影響を評価した。GNET では、プラズマ粒子の分布関数を、Maxwell 分布を仮定した背景分布 f_M と高エネルギー分布 f_{Beam} に分け $f = f_M + f_{Beam}$ とし、高エネルギー分布 f_{Beam} に対する運動論方程式を解いている。このとき衝突演算子は

$$C^{coll}(f_{Beam}) = C(f_{Beam}, f_M) + C(f_{Beam}, f_{Beam}) \quad (1)$$

となり、第1項が背景粒子との衝突を記述する従来の線形衝突演算子、第2項が新しく導入された高エネルギー粒子間の衝突を記述する衝突演算子で、これは変数 f_{Beam} に対し非線形である。シミュレーション条件としては、磁気軸位置 3.60m, 中心強度 $B_0 = 2.75$ T の LHD プラズマに対し NBI 装置 1 号機 (180keV) で重水素ビームを Counter 方向に接線入射した状況を想定している。背景粒子は電子と重水素を考え、電子密度および温度は $n_e = 1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, $T_i = T_e = 3$ keV で空間的に一様であるとしている。この条件の下、Coulomb 衝突に対する Fokker-Planck 方程式に基づいた Monte-Carlo 衝突演算子 [2] を用いて f_{Beam} の定常解を求めた。また、NBI のビームパワーを仮想的に変化させ、ビーム間衝突への影響を評価した。

従来の線形項のみを考慮した場合と、非線形項を考慮に入れた場合の比較結果の一例 (ビームパワー $P_{NBI} = 3\text{MW}$) を示す。Fig. 1 および Fig. 2 はビーム粒子の速度空間分布および特定のピッチ角について取り出した分布を表す。ビーム間衝突を考慮した場合、速度空間上での高エネルギー領域への拡散およびピッチ角散乱の増大が見られた。また Fig. 3 に示すように、非線形項を考慮した場合、実空間における高エネルギー粒子密度がピーク付近で 5% 減少、

その他の部分で増加した。これは高エネルギー粒子密度の大きくなるピーク付近でビーム間衝突が増加した結果、実空間上における粒子の拡散が増大し、粒子がピーク付近からその周辺に移動したことによるものと考えられる。これらの結果はビーム粒子間衝突の影響による実・速度空間両方での拡散の増加を示している。

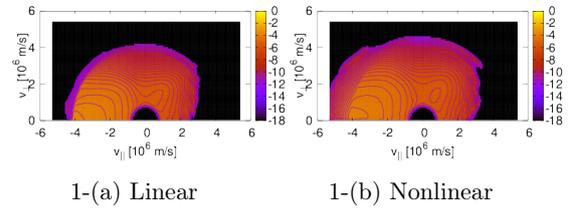


Fig. 1: ビーム粒子の速度分布関数の比較:(a) は線形項のみを考慮した場合の計算結果。(b) は非線形項をも考慮に入れた計算結果。

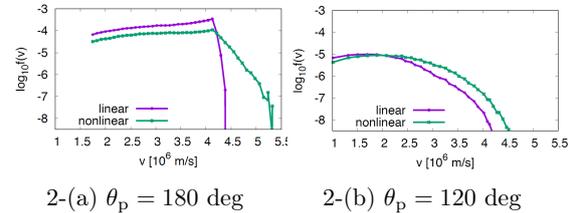


Fig. 2: 特定のピッチ角における速度分布関数の比較

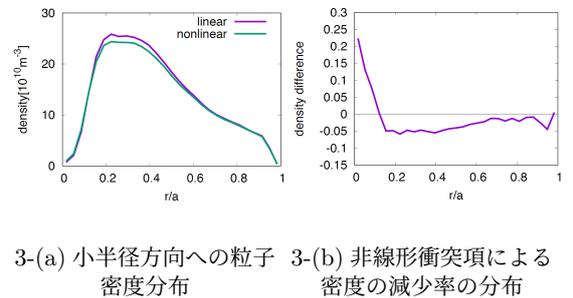


Fig. 3: 実空間におけるビーム粒子分布の比較:(a) は小半径方向への粒子分布の比較。(b) は非線形項を考慮に入れた密度分布の、線形項のみの分布からの変化の割合。

References

- [1] S. Murakami *et al.*, Nucl Fusion **40**, (2000) 693.
- [2] Y. Masaoka *et al.*, Plasma and Fusion Res **8**, 2403106 (2013)