

トカマクプラズマ中の高速 α 粒子軌道と閉じ込めに対する核弾性散乱効果Effect of nuclear plus interference scattering on fast α -particle orbit and confinement in a tokamak plasmas

九大院工 ○澤田大輔、 松浦秀明、 中尾安幸

Daisuke Sawada, Hideaki Matsuura, Yasuyuki Nakao
Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University

1. 背景及び目的

磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて、高速イオンの減速と閉じ込めを理解することはプラズマ加熱、炉壁への負荷等の観点から重要である。粒子軌道計算は荷電粒子の挙動を知るために有用であり、それを用いてトカマク磁場中のイオンの拡散係数の解析[1]等がなされてきた。イオンのエネルギーが高くなると、その散乱過程には核力の影響が現われる[2]。微小角散乱である Coulomb 散乱と異なり核弾性散乱 (NI (nuclear plus interference) scattering) は大角度散乱であり、1 衝突当たりのエネルギー及び角運動量の変化量が大きいという特徴がある。

Kantrowitz & Conn は磁気ミラー型装置を想定して核弾性散乱によって粒子の運動方向が変化することで高速イオンが閉じ込め可能領域から逸脱し、損失が増加することを指摘した[3]。ただし、これは運動論的な手法である Boltzmann-Fokker-Planck 方程式に基づく解析であり、軌道計算で考慮される磁場中での粒子の運動は考慮されていない。トカマク磁場配位においては、衝突で粒子の運動方向が変わると軌道の種類が変化する場合があり、粒子の閉じ込めに影響を及ぼすことが知られている[4]。トカマク磁場中で核弾性散乱によって粒子運動が変化すると、粒子の軌道や体系からの損失に影響が現れることが予想される。特定の軌道から失われる粒子は炉壁の一点に集中することになるため、その増減は炉壁への負荷に重大な影響を与えうる。よって、その影響を評価することは重要である。

本研究ではトカマク磁場配位を想定し、荷電粒子軌道計算コードに核弾性散乱の効果を組み込み、その影響を評価することを目的とする。特に大角度散乱によって引き起こされる粒子軌道の変化と、その高速 α 粒子損失への影響を明らかにする。

2. 解析モデルおよび解析結果

公開されている粒子軌道計算コード ORBIT[5]に核弾性散乱効果を組み込む。

速度 v で運動しているテスト粒子 (α 粒子) が時間 Δt の間に核弾性散乱を起こす確率 $p(v)$ は $p(v) = n_b v \sigma_{NI} \Delta t$ となる。ここで n_b は背景プラズマイオンの数密度、 σ_{NI} は核弾性散乱断面積 (Perkins & Cullen の評価値[6]) である。テスト粒子に対して熱運動している背景プラズマイオンの速度は十分小さいとして無視する。また散乱は重心系で等方的と仮定する。このとき、1 回の散乱あたりのエネルギー変化 ΔE と散乱角 θ を時間 Δt 毎に運動方程式を解いて求めたエネルギー、運動方向に加えて補正することで、粒子軌道に対する核弾性散乱効果を取り入れる。

図 1 に核弾性散乱を考慮した場合の α 粒子損失割合 $f_{\text{lost}}^{\text{NI}}$ (α 粒子損失数/全発生粒子数) 100keV 刻み) と、核弾性散乱を無視した場合の α 粒子損失割合の増加割合 $(f_{\text{lost}}^{\text{w/oNI}} - f_{\text{lost}}^{\text{NI}}) / f_{\text{lost}}^{\text{NI}}$ を示す。計算は ITER 級 DT プラズマを想定して行い、解析の対象粒子は DT 反応で発生する 3.52MeV α 粒子を想定した。プラズマイオン及び電子の温度は 22keV、重陽子及びトリトンの密度は $6.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、計算時間は 2.6×10^5 トロイダル周期 (約 0.8 秒) とした。 α 粒子のエネルギーが 3.5MeV 近傍での損失割合が非常に多いが、これはほとんどが即時損失によるものである。即時損失は粒子の生成した位置と方向に大きく依存し、核弾性散乱の影響はほとんど現れないので α 粒子損失割合への影響も小さい。即時損失が支配的な領域以外では、ほとんどのエネルギーで核弾性散乱を無視することで損失粒子割合が増加している。これは核弾性散乱による減速の促進、及び軌道への影響を無視したことで、損失が増加したためである。 α 粒子損失割合の増加が低エネルギーで増加する傾向にあるのは、損失数が少ないために分母が小さくなったからである。現在は精度の問題で点にばらつきが見られるが、損失割合は平均で 5~8% 程度増加していると見積もられる。今後はより精度の高い計算を行う必要がある。

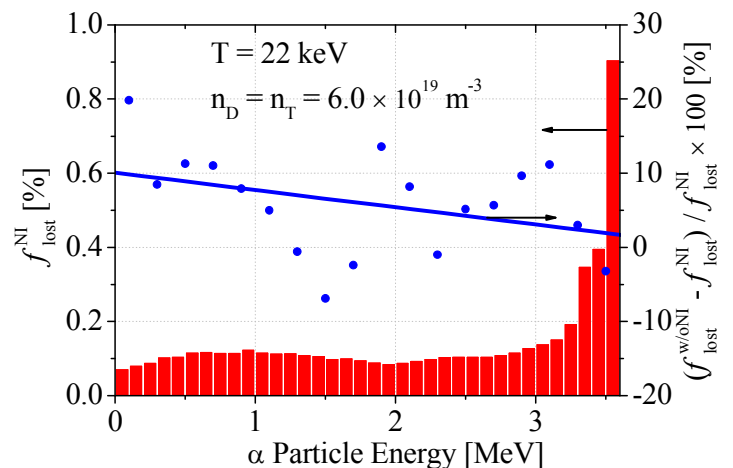


図 1 : 生成 α 粒子数に対する α 粒子損失割合と、その核弾性散乱を無視した場合の増加割合

参考文献

- [1] A. H. Boozer and G. Kuo-Petravic, Phys. Fluids **24**, (1981) 851.
- [2] J. J. Devaney and M. L. Stein, Nucl. Sci. Eng. **46**, (1971) 323.
- [3] F. D. Kantrowitz and R. W. Conn, Nucl. Fusion **24**, 1335 (1984).
- [4] B. B. Kadomtsev and O. P. Pogutse Nucl. Fusion **11**, (1971) 67.
- [5] R. B. White and M. S. Chance, Phys. Fluids **27**, (1984) 2455.
- [6] S. T. Perkins and D. E. Cullen, nucl. Sci. Eng. **77**, (1981) 20.