

小特集

核燃焼プラズマにおける核弾性散乱と
その炉心特性への影響Nuclear Elastic Scattering and Its Effect on Reactor Characteristics
in Nuclear Burning Plasmas

1. はじめに

1. Introductory Remarks

松浦 秀明

MATSUURA Hideaki

九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門

(原稿受付: 2015年4月1日)

近年の核融合研究の進展に伴い、核反応を伴うプラズマを対象とした研究の重要性が一段と増している。高温プラズマでは、イオンの散乱過程としてクーロン散乱が支配的であるが、イオンのエネルギーが高くなると、その散乱断面積はクーロン力を介した場合のものとは異なってくるのが知られている。微分散乱断面積(単位立体角あたりの散乱断面積)の実測値から、純粋にクーロン力による部分を差し引き、残りを立体角にわたって積分したものが「核弾性散乱」断面積として与えられる。核弾性散乱が炉心プラズマに及ぼす影響は、古くより(例えばレビュー[1]:核弾性散乱効果へ言及、特集等[2,3]:解説記事)、現在に至るまで(第3章以降で解説)研究が継続して進められている。しかし、その詳細はあまり知られていない。核弾性散乱は、条件によっては、炉心プラズマの成立性に影響を及ぼす場合もある。成立性に影響がない場合でも、通常の実験・運転において、中性子の放出スペクトルや反応率の変化等を介して、核弾性散乱の影響が測定値に現れる場合もある。そのような現象を念頭において、今後の核燃焼を伴う核融合炉の研究開発にあたることは重要であろう。今回の小特集では、核弾性散乱という現象を、広くプラズマ・核融合分野の研究者に知っていただくことを念頭においた。解析の正確さを重視しつつも、厳密な数式を展開するのではなく、できるだけ平易な表現で、その本質を伝えることを目的として、小特集の企画を行った。

「核弾性散乱」という表記は、中尾安幸氏によって1970

Kyushu University, FUKUOKA 819-0395, Japan

年代に輸入された。古くから核物理分野で使用されてきた「Nuclear Elastic Scattering (NES)」という英語表記に基づいた和訳である。これまで、日本語表記は「核弾性散乱」で統一されてきたが、英文では様々な表現がなされてきた。例えば、単に「large angle scattering」(核弾性散乱は大角度の散乱過程とあってよいが、クーロン散乱にも大角度散乱過程が存在することにご留意いただきたい)、「Nuclear plus Interference (NI) scattering」, 「knock-on collision」, 「close collision」等である。筆者の知る限り、プラズマ核融合分野における上述の表記による散乱過程は、いずれも「核弾性散乱」である。核弾性散乱効果の一部は、例えば、核融合反応によって放出される中性子放出スペクトルの Gauss 分布から歪みとして現れる。中性子計測分野では、Neutron Emission Spectroscopyの略語としてNESという表記が定着しており、中性子計測に関わるテーマで核弾性散乱効果を論じる場合は、混乱を避けるため、他の表記と併用する場合がある。

核弾性散乱によって、プラズマイオンの速度分布関数上に非 Maxwell 成分(ノックオンテイル)が形成されることが知られている。プラズマ粒子の速度分布関数を知るために、Fokker-Planck 方程式が用いられる。Fokker-Planck 方程式の基本形は、Boltzmann 衝突積分における微分散乱断面積に Rutherford の微分散断面積を代入することで導かれる。核弾性散乱のように、相互作用がクーロン散乱ではない場合は、Boltzmann 方程式を解くために、反応に応じ

author's e-mail: mat@nucl.kyushu-u.ac.jp

た微分断面積を用意する必要がある。核分裂炉の解析では、中性子に対する Boltzmann 輸送方程式、或いは拡散近似を施して輸送方程式を簡略化した、中性子拡散方程式が用いられる。中性子と原子炉内の物質との核反応等の素過程が詳細に調べられ、断面積が「核データセット」として整備されている。これらの核データを輸送・拡散方程式に適用することで、核分裂炉心の中性子束（中性子の速度分布関数と同等の物理量）の評価、及び燃焼解析が行われる。

核反応体系において Boltzmann 方程式を解くための数値解析手法は、核分裂炉を対象として長年に渡って開発が為され、実験との比較、コードの整備が高い完成度をもって進められてきている。これらの充実した知見は、核融合炉の研究開発にあたっても有益であり、積極的に活用すべきであろう。方程式の取り扱いに関する基本的な考え方は、核融合炉と核分裂炉では大きな違いはない。核分裂炉では、中性子と場の原子核との相互作用を主体として問題を設定する（中性子同士の相関を論じることはほとんどない）。中性子に対して、場の原子核は質量数が大きく、平均運動エネルギーが小さい。この場合、各所で静止した原子核との衝突と見なす近似が適用できる。一方、核燃焼プラズマでは、衝突を起こすイオンの質量及び運動エネルギーは、ほぼ同程度であるため、このような近似は難しい。イオン同士の非線形衝突が重要になる場合もあり、注意が必要である。核燃焼プラズマにおける核弾性散乱効果の解析に際しても、様々なモデルが開発・使用されてきたが、その中でも最も有力な手法は、やはり Boltzmann 方程式をダイレクトに解くものである。筆者等は、長年に渡って、クーロン散乱による小角度散乱過程に Fokker-Planck 項、核弾性散乱による大角度散乱過程に Boltzmann 衝突項を用いた、Boltzmann-Fokker-Planck (BFP) モデル及びその解析コードの開発に力を注いできた。同モデルでは、微小散乱過程に基づく速度分布関数の変化と、プラズマ全体の巨視的粒子保存、及びエネルギーバランスは矛盾なく満足される。本小特集においては、その詳細にはあえて触れないが、提示する解析結果の多くは、これらのモデルに基づくものである。

核弾性散乱は、（クーロンポテンシャルの影響が相対的に弱まる）高エネルギーイオンの散乱過程に現れ易い。通常利用可能な核融合反応と考えられる D-T, D-D, D-³He 反応では、反応生成イオンのエネルギーとしては、D-³He 反応によって生成される 14.7 MeV 陽子のエネルギーが最

も高く、核弾性散乱の影響は D-³He プラズマで最も大きく現れる。D-³He 核融合炉の成立性は、古くから広く議論されてきたが[1-4]、核弾性散乱効果を含めたものは少ない。特に磁場閉じ込め D-³He プラズマでは、核弾性散乱を無視した場合、内部加熱パワーのイオン群への分配割合を約 1/3 に過小評価してしまう。核弾性散乱は、高速イオンの減速を促進する効果をもつ。これに伴い、核弾性散乱を無視した場合、反応生成陽子分布関数の高速成分を最大 4 ~ 7 割程過大に評価し、熱成分を 4 ~ 5 割程過小に評価してしまう。核弾性散乱は、核反応生成物の放出スペクトルや、高エネルギー粒子の損失過程にも大きな影響を及ぼす可能性がある（詳細は第 3 章をご覧ください）。筆者等は、D-³He 炉心プラズマの成立性に対する正確な評価を行うためには、核弾性散乱効果を考慮することが極めて重要と考えている。そのためにも、今後、実験的検証を含めたより詳細な核弾性散乱効果の検討が必要である。

第 2 章では、核弾性散乱の物理的メカニズムをクーロンポテンシャルと核力ポテンシャルが重なった状況下での散乱衝突という核物理の視点から詳しく解説する。核弾性散乱の定義、微分散乱断面積、クーロン散乱と比較した場合の特徴について説明し、核弾性散乱がプラズマ全般に及ぼす基本的な影響を定性的に紹介する。第 3 章では、磁場閉じ込め D-T 及び D-³He プラズマを対象として、Boltzmann-Fokker-Planck モデルに基づく最新の核弾性散乱効果の解析例を紹介し、核弾性散乱が炉心特性に及ぼす影響を解説する。第 4 章では、特に D-³He プラズマの点火条件に対する核弾性散乱効果を、アスペクト比の異なるトカマクプラズマを対象に詳述する。第 5 章では、慣性閉じ込めプラズマを対象として、点火燃焼特性に対する核弾性散乱効果を示すとともに、核弾性散乱を利用した爆縮コア診断について解説する。第 6 章では、既存の重水素プラズマを利用した核弾性散乱効果の実験的検証法について、最近の研究を紹介する。最後に第 7 章で、全体をあらためて概観し、今後の研究への期待を述べ、まとめとしたい。

参考文献

- [1] W.R. Fundamenski and A.A. Harms, *Fusion Technol.* **29**, 313 (1996).
- [2] 神前康次 他：プラズマ・核融合学会誌 **71**, 469 (1995).
- [3] 百田弘 他：日本原子力学会誌 **38**, 11 (1996).
- [4] L.C. Steinhauer *et al.*, *Fusion Technol.* **21**, 2217 (1992).