

LHD重水素プラズマにおけるノックオンテイル 観測シナリオの検討

Study on knock-on-tail observation scenario in LHD deuterium plasma

○松浦秀明¹、杉山翔太¹、梶元省吾¹、川本靖子¹、西谷健夫²、小川国大^{2,3}、
長壁正樹^{2,3}、磯部光孝^{2,3}、後藤拓也^{2,3}、御手洗修⁴

○MATSUURA Hideaki¹, SUGIYAMA Shota¹, KAJIMOTO Shogo¹, KAWAMOTO Yasuko¹,
NISHITANI Takeo², OGAWA Kunihiro^{2,3}, OSAKABE Masaki^{2,3},
ISOBE Mitsutaka^{2,3}, GOTO Takuya^{2,3}, MITARAI Osamu⁴

¹ 九大院工、²NIFS、³総研大、⁴東海大

¹Kyushu Univ., ²NIFS, ³SOKENDAI, ⁴Tokai Univ.

【はじめに】

イオンのエネルギーが高まると、散乱過程に核力の影響が現れる。微分散乱断面積の実測値から Coulomb 力による寄与を差し引き、残りを立体角にわたって積分したものは、核弾性散乱断面積と定義される[1]。核弾性散乱に関しては、古くより理論・実験研究が為されてきたが、核燃焼プラズマへの影響については、検証が不十分である。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[2]。成立性に影響がない場合でも、通常の実験・運転時に、中性子放出スペクトルや反応率の変化等を介して、その影響が測定値に現れ得る[2]。このような現象を念頭において、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る。本研究では、核弾性散乱効果の検証を念頭に、LHD 重水素プラズマにおけるノックオンテイル観測シナリオを検討した。

【検討結果】

核弾性散乱を介して、高速イオンがバルクイオンを高速領域に反跳させることで、バルクイオンの速度分布関数上にノックオン（非 Maxwell）テイルが形成される。Fig.1 に、重陽子密度 10^{19} m^{-3} の LHD 重水素プラズマに、180 keV 陽子 beam を 15 MW のパワーで入射した場合の重陽子分布関数（空間平均量）を示す。ノックオンテイルを“捕える”ために、(1) $\text{D(d,n)}^3\text{He}$, (2) $^6\text{Li(d,n)}^7\text{Be}$, (3) $^6\text{Li(d,p)}^7\text{Li}$ の 3 つの核反応で発生する中性子及び γ 線を利用する[3]。Fig.2 に $\text{D(d,n)}^3\text{He}$ 及び $^6\text{Li(d,n)}^7\text{Li}$ 反応断面積[4]を反応粒子の相対運動エネルギーの関数として示す。重陽子分布関数上のノックオンテイルの形成により、中性子及び γ 線の発生率が増加することが理解できる。発生率の絶対値は、中性子の方が大きくなるが、断面積の勾配より、 η 値（ $\equiv$ ノックオンテイルが形成された場合の発生率 / Maxwellian プラズマにおける発生率）は、 γ 線の方が大きく現れる。beam エネルギーが 180 keV と低めのため、 γ 線については、計数率の確保が課題である。計数率を高めるために、(a) $^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ を核とする TESPEL (Tracer-Encapsulated Solid Pellet) [5]の使用、(b)バルク温度を数 keV とすること（この場合 η 値は低下する）を検討した。入射した TESPEL と detector の位置関係、陽子 beam 及びプラズマ中の ^6Li 分布の最適化が前提となるが、最適化が可能であれば、Fig.1 の条件下 ($T_e=4 \text{ keV}$) で、ノックオンテイル形成により $3 \times 10^8 / \text{s}$ ($\eta \sim 6$) 程度の $0.48 / 0.43 \text{ MeV}$ γ 線の発生率（空間積分量）が見込まれる。DD 中性子に関しては、 $5 \times 10^{13} / \text{s}$ 程度の発生が予測されるが、 η 値は $1.4 \sim 2.0$ 程度に留まる。以上の結果は、一様プラズマを仮定した Boltzmann-Fokker-Planck モデルによるものであるが、一連の結果は、空間平均量を見る限り、DELTA5D 軌道解析コード[6]を用いた（空間分布を考慮した）評価値とほぼ一致する。現在、局所的な γ 線発生や、入射陽子のイオン化分布を考慮したより詳細な解析を進めている。

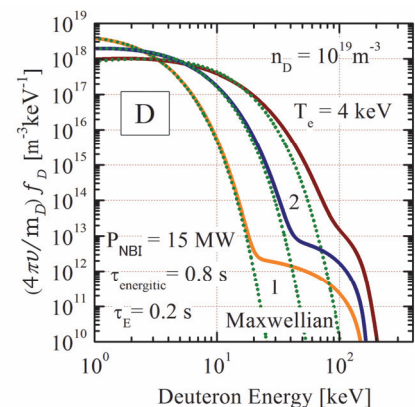


Fig.1: Knock-on tail formation in deuteron distribution function

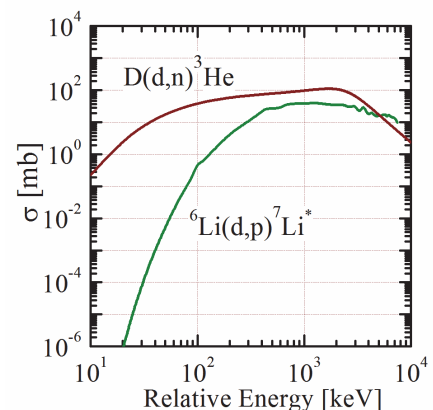


Fig.2: $\text{D(d,n)}^3\text{He}$ and $^6\text{Li(d,p)}^7\text{Li}^*$ cross sections as a function of relative energy

[1] J.J. Devaney and M.L. Stein, Nucl. Sci. Eng., **46** (1971) 323. [2] 松浦、他、プラズマ・核融合学会誌、**91** (2015) 449.

[3] H. Matsuura, et al., J. Plasma Fusion Res., **2** (2007) S1078. [4] V. T. Voronchev, et al., Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ., **51** (1991) 63.

[5] 佐藤、他、プラズマ・核融合学会誌、**91** (2015) 258. [6] D. A. Spong, Phys. Plasmas, **18** (2011) 056109.