01Cp06 LHD 重水素プラズマにおける高純度軽水素 beam 入射による重陽子分布関数上のノックオンテイル形成

Knock-on tail formation in deuteron velocity distribution function by high-purity hydrogen beam injection observed in the LHD deuterium plasma

○松浦秀明¹, 木村建¹, 浦川知己¹, 梅崎大介¹, 中島弘貴¹, 満井渡¹, 小川国大^{2,3}, 磯部光孝^{2,3}, 西谷健夫², 川本靖子², 大石鉄太郎^{2,3}, 後藤基志^{2,3}, 田村直樹^{2,3}, 長壁正樹^{2,3}, 杉山翔太⁴

OMATSUURA Hideaki¹, KIMURA Kento¹, URAKAWA Tomoki¹, UMEZAKI Daisuke¹, NAKASHIMA Koki¹, MITSUI Wataru¹, OGAWA Kunihiro^{2,3}, ISOBE Mitsutaka^{2,3}, NISHITANI Takeo², KAWAMOTO Yasuko¹, OISHI Tetsutarou^{2,3}, GOTO Motoshi^{2,3}, TAMURA Naoki^{2,3}, OSAKABE Masaki^{2,3}, SUGIYAMA Shota⁴

> ¹九大院工,²核融合研,³総研大,⁴量研 ¹Kyushu Univ.,²NIFS,³SOKENDAI,⁴QST

【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(核弾性散乱)[1].核弾性散乱は大角度の 散乱過程である.微小角 Coulomb 散乱と比較してその断面積は小さいが、1回の散乱当たりに Coulomb 散乱 と比べ相対的に大きなエネルギーが輸送される.大角度散乱特有の discrete なエネルギー輸送現象に起因し、 バルク速度分布関数上に非 Maxwell 高エネルギー成分(ノックオンテイル)が形成される.重水素速度分布関 数上にノックオンテイルが形成された場合は、力学的考察から DT 反応で発

数上にノックオンテイルが形成された場合は、刀字的考禁からDI 反応で発 生する中性子の放出スペクトルが Gauss 分布から歪むことが導かれる.DT 反応で発生したα粒子の核弾性散乱による重水素分布関数上のノックオン テイル形成は、JET における中性子スペクトルの歪みの観測によって確認 されている [2,3].核弾性散乱は、ノックオンテイル形成以外にも、核燃焼 プラズマに様々な影響を及ぼすことが解析的に指摘されており [4],我々は、 現状これらをひとまとめにして「核弾性散乱効果」と総称している.全て の効果は、核弾性散乱を介して繋がってはいるが、個々の物理現象に応じ た特有の傾向が現れると予想される為、現象に即してそれぞれを分析しつ つ、総合的に理解を進める必要がある.現在の論点は、「核弾性散乱効果」 を実験的に観測・定量し、理論モデルとの比較を通して理解を深めること である.我々はLHD 重水素プラズマにおいて、核弾性散乱が高速重陽子の 減速に及ぼす影響を観測した [5].核弾性散乱効果の理解には、他の観測(例 えばノックオンテイルの大きさ)との相対比較が重要である.NIFS 第 21 サ イクル LHD 実験(令和元年)において、高純度軽水素ビームを用いた、重水 素分布関数上のノックオンテイル形成の観測を行ったので、報告する.

【観測及び解析結果】

Fig. 1 に、重水素プラズマ($T_i(0)=1$ keV, $T_e(0)=10$ keV, $n_e(0)=0.5\times 10^{19}$ m⁻³)に高純度軽水素 beam を入射(放電開始後 3.8 s)した場合のNBIパワー, イオン・電子温度,電子密度,中性子発生率の時間変化の様子を示す.軽 水素 beam 入射前は、中性子発生率は 10¹¹ n/s 程度であったが、beam 入射 後緩やかに上昇し、1桁以上の増加が観測された. Beam 入射前は、温度変 化と中性子発生率変化がほぼ連動しており,熱成分(Maxwell 分布バルク重 陽子)が引き起こす DD 反応による中性子発生と考えられる.軽水素 beam 入射後はイオン及び電子温度が変動しているにもかかわらず、中性子発生 率はほぼ一定値を維持し続けており,熱成分による中性子発生とは考え難 い(高速重陽子の DD 反応への関与が示唆される). Beam 入射前後のイオ ン温度変化は 0.5 keV 程度であり、中性子発生が熱成分によるものとすれ ば、プラズマの状態に関わらず1桁以上の発生率の増加は説明がつかない. Fig. 2 に Fokker-Planck 及び Boltzmann-Fokker-Planck 解析 [6] に基づく中 性子発生率(単位体積当り)の時間変化を示す.緑の点線は熱核反応のみ, 赤線は熱核反応+ノックオンテイルとバルク重陽子間の反応、青線は熱核 反応+軽水素 beam 中に混入した重水素とバルク重陽子間の反応(c は軽 水素 beam 中の重水素の混入割合[質量パーセント])による中性子発生率



Fig. 1: Time evolution of the LHD







の時間変化である. 核弾性散乱により重水素速度分布関数上にノックオンテイルが形成されたと考えれば,約1桁の発生率増加割合については説明は可能である. 発表では,高純度軽水素 beam に万が一重水素が混入していた場合の詳細や,発生率上昇の時間スケール等,結果の解釈について議論を行う.

- J. J. Devaney and M. L. Stein, Nucl. Sci. Eng. 46 (1971) 323. [2] J. Källne, et al., Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 1264.
 L. Ballabio, et al., Phys. Rev. E 55 (1997) 335. [4] 松浦, 他, プラズマ・核融合学会誌 91 (2015) 449.
- [5] H. Matsuura., Nucl. Fusion 60 (2020) 066077. [6] 例えば: H. Matsuura, et al., Phys. Plasmas 13 (2006) 062507.