

FIDA 計測データを用いた LHD おける高速イオン速度分布関数の再構成手法の開発

Fast-ion velocity-space reconstruction using FIDA measurements in LHD plasma

鈴木航介¹, 村上定義¹, 大館暁², 藤原大², 山口裕之²

Kosuke SUZUKI¹, Sadayoshi MURAKAMI¹, Satoshi OHDACHI², Yutaka FUJIWARA², Hiroyuki YAMAGUCHI²

京都大学大学院工学研究科¹, 核融合科学研究所²

Department of Nuclear Engineering, Kyoto University¹, National Institute for Fusion Science²

磁場閉じ込め型核融合の実現に向けて、高速イオンの閉じ込めは重要な課題の一つである。近年、高速イオンの空間・速度情報を計測する手法として、高速イオンの荷電交換反応で発生する光を利用した、FIDA (Fast-ion $D\alpha$) 計測が注目されている。これを利用すれば、計測した FIDA 信号から速度分布関数を推定する再構成 (トモグラフィー) が可能になる。トカマク型では FIDA 計測データを用いた速度分布関数の再構成 [1] が成功しているが、ヘリカル型では磁場の三次元性により再構成が困難となっている。本研究では 5 次元位相空間ドリフト運動論方程式を解く GNET コード [2]、および高速イオンの空間・速度分布関数から FIDA 信号が生起する順過程を再現する FIDASIM コード [3] を用いて、LHD 実験時の FIDA 計測情報から高速イオンの分布関数をトモグラフィーにより再構成する手法を開発する。

トモグラフィーは観測から物理量を推定する線形回帰問題として定式化され、一般に解が不定な不良条件問題となる。そこで求める解を何かしらの基底関数で有限級数近似を行い、級数の各項の係数を求める問題に変えることで不良性を克服する手法が一般的である。この手法では解にとって性質のよい基底関数を選ぶことが重要である。本研究では NBI 入射時の速度分布関数の理論解である減衰分布 [4] を用いて、基底関数を構成する。これにより物理的な特徴を最大限保ち、ノイズに対して頑健な再構成が期待できる。さらに本研究ではガウス過程回帰という手法で再構成を行なう。ガウス過程回帰はベイズの定理に基づく確率論的な回帰手法であり、解の不確実性の評価、回帰パラメタの自動的な最適化、事前解の組み込みなどが可能となる。特に減衰分布を事前解として用い、観測に基づいて推定解を微調整する方法により、観測の欠損を内挿できる

ことが期待される。

高速イオンの閉じ込め機構解明には、NBI 粒子の減速過程での輸送機構、波動粒子相互作用、乱流との相関など多くの課題がある。軸対称な磁場配位を持ち高速イオンがほぼ古典的な振る舞いに従うと考えられているトカマクと比べ、三次元的な磁場配位を持つヘリカルでは高エネルギー粒子の拡散機構が複雑になり、微細な解析が必要となる。そのため、これまでシミュレーションによる解析が主流であった所に、実験データからの間接的観測による運動論的解釈が可能になることは意義深い。本手法により、不安定性発生前後の空間・速度分布関数を直接評価し、理論モデルの発展に寄与することが期待される。

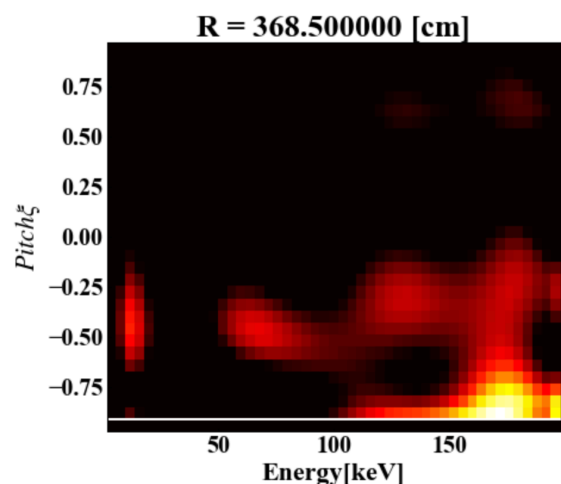


Fig. 1: 減衰分布を事前解としたガウス過程回帰で再構成した速度分布関数

- [1] Madsen B et al., Nucl. Fusion **60** (2020) 066024
- [2] S. Murakami et al., Nucl. Fusion **40** (2000) 693.
- [3] Heidbrink W W et al., Commun. Comput. Phys. **10** (2011) 716741.

[4] J. D. Gaffey, Jr., *J. Plasma Phys.* **16** (1976) 149.