

位相空間揺らぎを検出する為の高速荷電交換分光計測システムの開発 Development of a charge exchange spectroscopy (CXS) system for detection of fluctuations in phase space

吉沼幹朗、居田克巳、小林達哉
Mikirou YOSHINUMA, Katsumi IDA, Tatsuya KOBAYASHI

核融合研
NIFS

はじめに

環状磁場閉じ込め装置におけるプラズマ輸送には、乱流の振る舞いが大きな役割を果たしている。プラズマ中には乱流とともに波が生じ、それにより位相空間の揺らぎ（速度分布関数の歪みとその空間分布）が生じることが予想されるため、位相空間の揺らぎがプラズマの輸送におよぼす影響にも注目する必要性がある。そこで、イオン系の位相空間揺らぎを観測するために高速荷電交換分光計測を開発し、イオンの速度分布関数の歪みを観測した。

荷電交換分光計測

荷電交換分光計測は、プラズマ中のイオンである完全電離のイオンと入射された中性粒子ビームとの荷電交換反応により放出される光のスペクトルを観測する。光源である不純物イオンの速度分布関数を反映するスペクトルを解析し、そのドップラー幅から温度を、ドップラーシフトから速度を、強度から密度を評価することができる。そこで、この荷電交換発光のスペクトルの歪みを観測することで、イオンの速度分布関数の歪みを観測できると考えられる。また、観測される光の発光位置が中性粒子ビームと観測視線が交差する位置であることから空間分布の観測が可能である。

荷電交換分光計測の高速化

速度分布関数の歪みは、数ミリ秒以内に素早く緩和されると予想されるため、荷電交換発光のスペクトルを高速に計測しなければならない。そのためには、十分な荷電交換反応による発光量の確保と、それを分析するための明るい光学系を持った分光器、分析されたスペクトル像を高感度および高速に取得できるイメージ検出器とが必要となる。

光量の確保と視線

LHD装置では、明るい光学系をもち、色収差がよく補正されているカメラレンズを用いた分光器を用いて荷電交換分光計測を行ってきた。コア径 $400\mu\text{m}$ の光ファイバーを用いて、 5msec の露光時間(200Hz)で炭素不純物のライン(CVI; 529.05nm)を用いて荷電交換分光計測が可能であった。この露光時間の制限は、プラズマからの発光強度で決まっている。そのため、分光システムに入射する光の量を増やすには、光ファイバーの本数を増やす必要がある。1本の光ファイバーでの計測が 200Hz で行えたため、50本の光ファイバーを用いることができれば、 10kHz での計測を視野にいれることができる。LHD装置の90ポートには、径方向104本×ポロイダル方向に15本並んだトロイダル方向に向けた視線がある。その中から異なる径方向位置にある50本のファイバー群を用いることで空間4点から放射される荷電交換分光による発光を得た。

マルチスリット分光器

図1に示す回折格子を用いたレンズ分光器に、入射ファイバーが50本、4列に並んだバンドルファイバーを利用し、マルチスリット分光器として利用した。バンドパスフィルターを装着しており他のスリットの干渉を防いでいる。視線から導かれた各位置50本の光をそれぞれのスリットに入射することで空間4点の観測を行った。縦方向に並んだ50本の光ファイバーからの分光イメージは、縦方向に加え合わせることで、信号強度を稼ぐことができる。この方法によって、回折格子を用いた分光器においても、波長分解能を維持したまま、多数のファイバーを利用することが可能となる。ここでは、 400μ

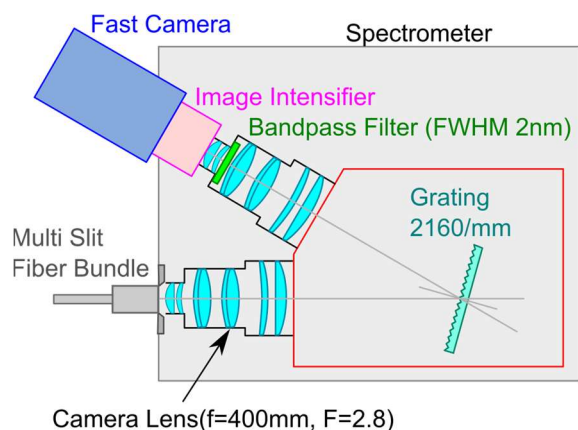


図 1： 高速荷電交換分光用の分光器システム

mの光ファイバーを50本並べて用いている。縦方向の長さは20mmを越えため、湾曲収差を補正するために、分光器の入射スリット（バンドルファイバーの並び）を湾曲させている。ここで使用した分光器の格子定数は、2160/nmで、逆分散は0.724nm/mmである。装置幅(FWHM)は、400 μ mのファイバーの開口を利用したときに0.34nmであった。

高速のイメージ検出器

従来は、EM (Electron Multiplying)-CCD検出器を用いて分光イメージを取得していた。スリットの縦方向の長さ、スリット間隔と観測波長幅を考慮して、検出器サイズが、十分に大きくかつ読み出し速度が速い、高速カメラ(フォトン製 Fastcam Nova S6)を利用した。さらに、感度を補強するために、イメージインテンシファイア (C10880-13C)を組み合わせた。高速カメラのサイズを896(幅)×512(高さ)で利用することで、光ファイバー4列の分光イメージを10kHzの時間サンプリングで取得することができた(図2)。

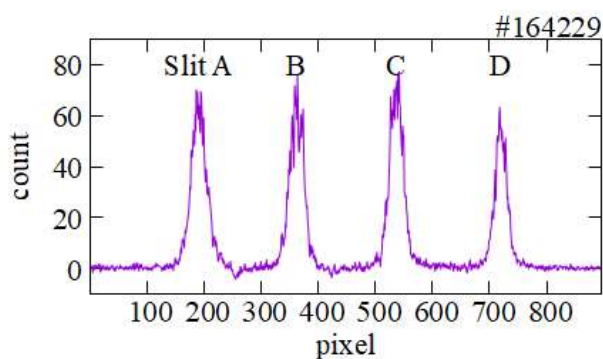


図 2: 高速カメラで観測された異なる空間位置からの荷電交換発光スペクトルの分光イメージ

実験シーケンスに同期したデータの取得

LHD装置においては、約3分間の間隔でプラズマの放電実験が行われる。その間にデータを取得し、外部記憶装置へと保存する必要がある。放電前にトリガー待ち状態に移し、イメージ取得後にデータを保存するシーケンス同期プログラムを開発し、LHDの実験周期に同期させて高速カメラを動作させた。これによってルーチン的にデータを取得することができ、様々な条件で行われる放電のデータを取得することが可能となった。

LHD実験への適用

LHD装置において、中性粒子ビームによる加熱されるプラズマに対して、10kHzでの高速荷電交換分光計測を行った。プラズマ中の高エネルギー粒子に起因する突発的なMHDイベントに伴い、数ミリ秒の時間で、イオンの速度分布が歪み、また緩和していく様子をとらえることに成功した(図3)。炭素のみではなく水素の $H\alpha$ の計測のための高速荷電交換分光計測が行われ、粒子と波の相互作用による加熱プロセスの研究が行われた[1]。

参考文献

- [1] K.Ida *et al.* “Direct observation of mass-dependent collisionless energy transfer via Landau and transit-time damping” Communications Physics 5 (2022) 228.

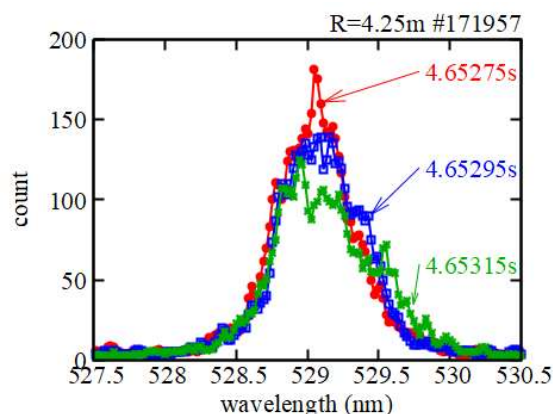


図 3： 10kHz の時間サンプリングで観測された MHD イベントに伴うスペクトルの歪みの時間変化