

核反応生成イオンの分光計測に基づく高速イオン速度分布関数診断法に関する研究

木村, 建斗

<https://hdl.handle.net/2324/6787595>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 木村 建斗

論 文 名 : 核反応生成イオンの分光計測に基づく高速イオン速度分布関数診断法に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

核融合プラズマでは、外部加熱や核融合反応、大角度散乱等によって高速イオンが生成される。高速イオンはプラズマ中の燃料イオンにエネルギーを付与して減速し、速度分布関数上に非Maxwell成分を形成する。高速イオンは、プラズマ加熱を担っており高温プラズマの維持に欠かせない。高速イオンのプラズマ内での輸送現象や不安定性との相互作用について理解するために、速度分布関数を把握しておく必要がある。現在、全てのエネルギー領域をカバーできる速度分布関数診断法は存在していないため開発が続けられている。高速イオン速度分布関数診断法として、核反応で生成される中性子や γ 線のエネルギースペクトルから高速イオンの情報を得る計測法がある。MeV オーダの中性子や γ 線を計測する場合、計測器のエネルギー分解能が低く、高い分解能を持つ計測器の開発が必要となる。高エネルギー分解能を有する計測法として、荷電交換反応によって中性化した高速イオンの可視光スペクトルから高速イオンの情報を得る荷電交換分光計測法がある。荷電交換された高速イオンから放出される光はDoppler効果を強く受け、可視光スペクトルの形状変化やピークシフトを介して高速イオンの情報が得られる。荷電交換分光計測の一種として、重陽子の可視光スペクトルを計測することで重陽子の速度分布関数を診断するFast ion D alpha (FIDA)があり、数10 keVから100 keV程度のエネルギーを持つ重陽子の物理研究に対して実績がある。荷電交換反応の断面積は100 keV程度の重陽子エネルギー域にピークを有しているため、重陽子のエネルギーがMeVオーダに達すると、急激にFIDAスペクトルの発光強度が低下し計測が困難となることが指摘されている。また、診断ビーム中の中性原子(軽水素や重水素)から放出される可視光がFIDAスペクトルに干渉し、計測可能なエネルギー領域が限定される。

荷電交換分光計測の対象を重陽子-重陽子(DD)反応で生成される ^3He にすることで、MeVオーダのエネルギーを持つ重陽子速度分布関数の診断性能を高められる可能性がある。DD反応断面積のピークは重陽子エネルギーが1 MeV程度の領域に存在しており、重陽子の情報を増幅することができる。また、元素種が異なるため診断ビームからの発光の影響を受けず、さらに、他元素の発光線が ^3He の可視光スペクトル周辺には存在しない。一方で、荷電交換分光計測においてノイズとなる制動放射の強度は、電子密度の二乗に比例する。したがって、高電子密度運転下では ^3He の可視光スペクトルの不確かさが増大し計測が困難になることが予想される。本研究では、これらの問題を検討した上で、高速イオン速度分布関数診断法としてDD反応で生成される ^3He の可視光スペクトルの利用を提案し、簡易モデルによってその有効性を検証した。さらに、提案手法の計測性能を向上させるような計測ジオメトリの検討を行い、高電子密度運転下における提案手法の有効性を示した。

本論文は全5章で構成される。

第1章では、磁場閉じ込め核融合の基本的な事項について概説し、高速イオン速度分布関数診断法についてまとめた。従来の診断法の問題点を指摘し、本研究の目的を述べた。

第2章では、本研究の解析に用いた数値解析モデルについて説明した。重陽子や ^3He の速度分布関数の解析モデルについてまとめ、DD反応で生成される ^3He の放出スペクトルの計算方法を示した。計測視線の幾何配置を考慮した ^3He の可視光スペクトルの線積分値の評価方法について説明した。

第3章では、重水素ビームを入射した重水素プラズマを想定し、空間一様・速度空間等方な簡易モデルによって提案手法の有効性を明らかにした。DD反応で生成される ^3He の可視光スペクトルを求め、提案手法の有効性をDoppler広がりの変化量、S/N値から評価した。Doppler広がりの変化量は、現行の可視光分光計の波長分解能に対して最大で40倍大きく、計測可能であることを確認した。 ^3He の可視光スペクトルのS/N値は最大で25であり、低電子密度運転下において高精度の計測が期待できる。提案手法とFIDAの計測性能を比較した。重水素ビームの入射エネルギーが1.5 MeVの場合、可視光スペクトルのDoppler広がりの変化量とS/N値の積が従来の診断法より約10倍大きくなった。低電子密度運転下に限定すれば、提案手法が高速重陽子の速度分布関数の診断に利用可能であり、核反応を介することでMeVオーダの重陽子の診断において計測性能が改善されることを明らかにした。

第4章では、プラズマの温度・密度の空間分布や、イオンの運動方向、計測視線の幾何配置を考慮した解析モデルを用いて、より正確な ^3He の可視光スペクトルの評価を行った。制動放射によるノイズが大きくなる高電子密度運転下において、 ^3He の可視光スペクトルの不確かさを低減させるような計測ジオメトリの検討を行った。商用炉へ提案手法を適用するためには、高電子密度運転下において計測精度を確保する必要がある。複数の計測ジオメトリにおける ^3He の可視光スペクトルの線積分値の不確かさを求めた。高電子密度運転下において、 ^3He の可視光スペクトルの不確かさを5%以内に低減できるような計測ジオメトリを明らかにした。

第5章では、本研究で示した結果を総括し今後の展望を述べた。