

協同トムソン散乱計測 ～核融合プラズマ中の高速イオン追跡

西 浦 正 樹

プラズマ中に存在する高エネルギー荷電粒子の振る舞いを理解することは、安定性の高いプラズマを維持するためにもとても重要です。そこで、それら高エネルギー荷電粒子の速度分布を局所計測する手法として、ここでは電磁波の「散乱」を利用する「協同トムソン散乱計測」に関する研究を紹介します。

「散乱」という言葉から最初に連想することは、身近なところでは光が微粒子や宝石に当たってキラキラしているようなものを想像するのではないのでしょうか。これらも散乱現象です。夕焼けの赤く染まった空や晴天の青空なども光の散乱現象です。対象物の大きさや散乱波の波長などにより呼び名が変化します。「散乱」に関する研究は、古くはレイリー散乱、ミー散乱、ラザフォード散乱、コンプトン散乱、ラマン散乱等、発見した人物に由来するものが多数挙げられます。核融合プラズマ中の電子温度はトムソン散乱により計測されています。これは、入射したレーザー光がプラズマ中の電子により散乱される現象を利用します。入射

したレーザー光の散乱波は電子の熱運動による波長シフト(ドップラー広がり)を受けることになります。温度はこの熱運動の激しさを示す物理量なので、その波長の広がりから電子温度を見積もることができます。また、診断用レーザーの波長と受信角度を適切に選択することで、イオンの動きに追従している電子(イオンと集団運動している電子)からの散乱波が支配的になる密度・温度領域が存在するようになります。電子よりむしろイオンの動きを強く反映している場合に「協同トムソン散乱」計測と呼ばれ、イオンの速度分布関数を計測することが可能となります。電子からの散乱波がイオンの動きを反映していないと通常のトムソン散乱計測となります。図1に協同トムソン散乱計測の概略図を示します。計測システムの主要な構成として、入射波を発生させる発振器、散乱波を計測する受信器が必要となります。

1970年代に協同トムソン散乱理論が発展してきましたが、散乱波は非常に微弱であるため、困難な計測であると考えられてきました。近年、大電力ミリ波領域(周波数77GHz^{注1}だと波長4mm)の電子加熱用ミリ波源が利用できるようになり、この協同トムソン散乱計測の実現可能性が高くなってきました。大型ヘリカル装置(LHD)においては、ここ数年、電子加熱用77GHzミリ波源を用いた協

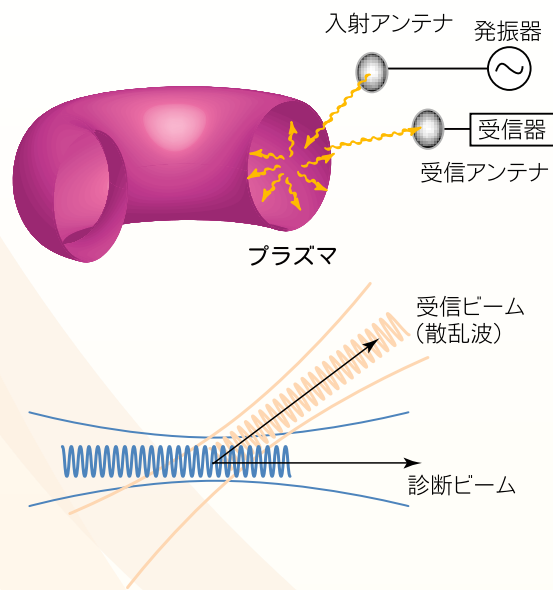


図1 協同トムソン散乱計測の概略。診断ビームと受信ビームが交差する散乱体積からの散乱波を準光学アンテナ(ミラー)により受信します。



図2 プラズマ側から見たLHD真空容器内の協同トムソン散乱計測に用いる入射・受信ミラー。

同トムソン散乱計測の可能性について検討し、散乱波受信システムの開発を進めてきました。現在、海外でも核融合プラズマを対象にした協同トムソン散乱計測は、デンマークとイタリアのグループによって開発が進められており、それぞれトカマク型核融合プラズマ装置ASDEX UpgradeとFTUにおいて採用されています。また、国際熱核融合実験炉(ITER)においても設計検討がなされています。

LHDにおける協同トムソン散乱計測は診断ビームに周波数77GHz、出力約1メガワット(電子レンジの周波数の30倍、出力1000台分)の発振器(ジャイロトロン)を利用します。診断ビームは図2の入射ミラーを用いてプラズマ中の計測点を狙います。診断ビーム内の電子により散乱された電磁波は受信ミラー、導波管を介し受信器まで伝送されます。診断ビームが散乱ではなく、真空容器などで反射をして受信器に迷い込んでくる成分をノッチフィルター(77GHzのみを遮断させるフィルター)で除去し、77GHzを中心周波数として±3GHzの周波数スペクトルに分解します。図3に示したように、実際には77GHz前後のミリ波を直接周波数分解するのは困難ですので、±3GHzの低周波数帯の信号に変換しています。この変換された信号を約100MHz幅^{注2}の32チャンネルのバンドパスフィルター群で各周波数に振り分け、散乱スペクトルを取得します。

上に述べた入射・受信システムを用いて、LHDプラズマから協同トムソン散乱信号の時間変化を取得することに成功しました。図4は、50ミリ秒(50ミリ秒ON、50ミリ秒OFF)間隔で間欠的に高速イオンを発生させた際の協同トムソン散乱スペクトルの時間応答を示しています。高速イオンは中性粒子ビーム入射加熱(図中NB#3, NB#4)を利用して発生させています。周波数±0.3GHz以上の領域(青色)において信号強度の増加と減少が繰り返し見られます。散乱信号の時間応答からこの周

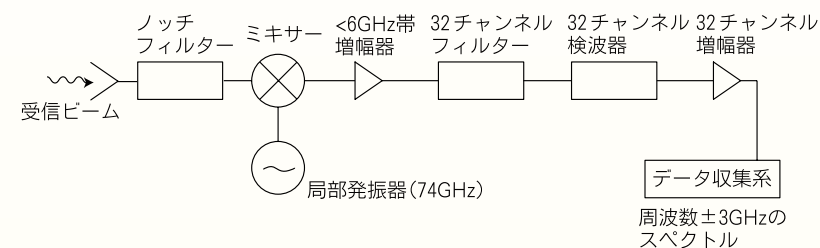


図3 協同トムソン散乱計測に用いる受信回路図。

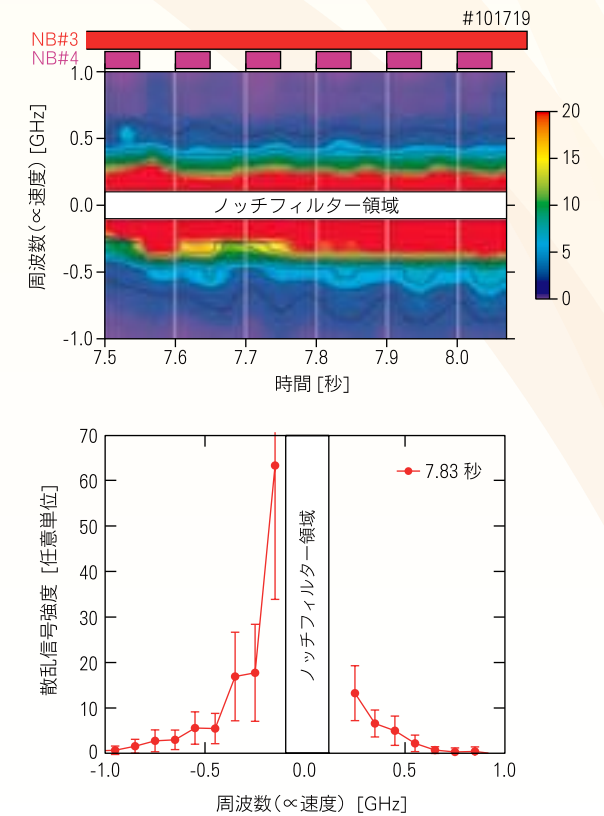


図4 上図はLHDプラズマ中心近傍の協同トムソン散乱計測によって得られた散乱信号の時間変化。青から赤色になるにつれて散乱信号(\propto 粒子数)が強くなる。下図は時間7.83秒のスペクトル。NB#3とNB#4はそれぞれ約180キロ電子ボルトと40キロ電子ボルトのプラズマ加熱ビームの入射時間を示しています。ビーム入射に伴うスペクトルの広がりが見られ、高速イオン密度が変化していると考えられます。

波数に対応する速度の高速水素イオン密度が増減していると考えられます。入射・受信ミラーの測定位置を変えることで、高速イオンの空間分布計測も可能となります。今後、高速イオンを精度良く定量評価するために、散乱理論と計測結果を比較しつつ、様々な視点から協同トムソン散乱計測の開発を進めていく予定です。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

注1: GHz(ギガヘルツ)は1秒間に10億回の振動を表す単位。

注2: MHz(メガヘルツ)は1秒間に100万回の振動を表す単位。