

国際共同研究で進める プラズマ電子温度・密度分布計測の高速化

安原 亮

みなさんは、ガリレオ・ガリレイという名前を聞いたことがあるかと思います。彼は、16世紀後半からイタリアで活躍した科学者で、天体観測とそれに基づく科学的な分析によって地動説を主張しました。これが原因で、カトリック教会に異端宣告を受けた際に発したとされる「それでも地球は動く」という言葉は非常に有名です。その彼の研究に大きく貢献した計測器が、当時の最先端技術である“望遠鏡”です。ガリレオは、この高性能な計測器を用いて、星の動きを詳細に観測、考察し、地動説を確信しました。また自ら性能を向上させ、月にクレーターがあることや、木星の衛星を発見しました。ガリレオの深い考察や天文学の新発見には、高性能な計測技術が不可欠だったと言えるのです。

さて、大型ヘリカル装置（LHD）で行われている核融合プラズマの研究でも、計測技術は非常に重要です。核融合プラズマの状態を知るために、プラズマの温度や密度といった情報を正確に計測する必要があります。LHDプラズマ中の電子の温度の計測にはトムソン散乱計測という手法が用いられます。1億度を超える高温プラズマの温度計測には、ガラス棒でできた市販の温度計は使えません。たちまち溶けてしまうからです。そこで強力なレーザー光をプラズマ中に入射して、プラズマ中の電子にレーザー光が衝突するときに発生する「トムソン散乱光」を測定することでプラズマ中の電子の温度を評価します（図1参照）。プラズマ中の電子は、動き回っているため、発生するトムソン散乱光はドップラー効果によって、入射したレーザー光とは違う色に変わります。この色の変化はプラズマの温度によって決まっているため、トムソン散乱光の色を見ることでプラズマの電子温度を知ることができるのです。またこの時、

トムソン散乱光の明るさを見ることでプラズマの電子密度を知ることができます。LHDで使用されているトムソン散乱計測装置は、最大144空間点で電子温度・密度分布の計測を行うことが可能です。空間分解能という点では世界トップレベルの性能を誇っています。ガリレオ同様、我々もこの高空間分解の計測器を用いて、これまでLHDプラズマ性能の向上や核融合プラズマの新発見などの成果を挙げてきました。

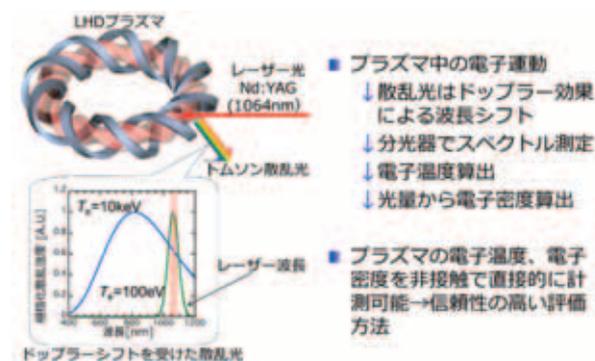


図1 トムソン散乱によるプラズマの電子温度・密度計測

では、このような高空間分解能LHDトムソン散乱装置を、さらに高性能化することを考えてみたいと思います。前段で説明したようにLHDのトムソン散乱計測装置は、世界最高の空間分解能を持っています。これはプラズマの細かい形状を観測する能力が、非常に高いということを意味しています。しかしながら、ガリレオが観測していた月と比べて、プラズマは非常に早く、時々刻々と形状が変化してしまいます。したがって空間分解能だけでなく、どれだけ早く繰り返し計測できるかという、時間分解能が非常に重要になります。LHDのトムソン散乱計測装置の繰り返し周波数は、10～100ヘルツに対応しています。これを高繰り返し・高時間分解能化することで、過渡的なプラズマ応答を含む高速なプラズマ現象の電子温

度・密度分布を精密測定することが可能となり、今まで見てきた物理現象の深い理解や新発見が望めるのです。トムソン散乱計測の高速化は、計画段階のものも含めて世界的な潮流となってきました。例えばドイツのマックスプランクプラズマ物理研究所のヘリカル装置W7-Xでは、レーザー技術で先端を行くドイツの半導体励起固体レーザーを導入して1キロヘルツ (kHz=1,000ヘルツ) のオペレーションを模索しています。またイギリスの球状トカマク装置MASTでも8台のレーザーを使ったキロヘルツオーダーの高速トムソン散乱計測が行われています。このような状況は、時間分解能の向上が、新たな物理現象発見へのクリアな研究戦略であるためだと推測されます。

LHDでは、数年間の基礎的な検討を経て、2017年から米国ウィスコンシン大学マディソン校との国際共同研究プロジェクトとして、最大15キロヘルツで計測可能なトムソン散乱計測装置の開発を進めています。導入するシステムは、通常の30ヘルツのトムソン散乱計測を行いながら、これとは独立の2つのバーストモード（間欠運転）を持つレーザーを導入することで15キロヘルツの高速バーストモード（15ミリ秒 (ms=1/1,000秒) 間動作、225パルス）、1キロヘルツ（50ミリ秒動作、50パルス）のスローバーストモードでの計測が可能となります（図2参照）。LHDに設置する主要構成装置の一部は米国エネルギー省の支援を受けたウィスコンシン大学からの提供で、費用負担も含めて双方で本プロジェクトを展開しています。11月には提供装置に関わる契約の締結が終了し、現在急ピッチで、LHDへの導入を目指して開発を進めています。

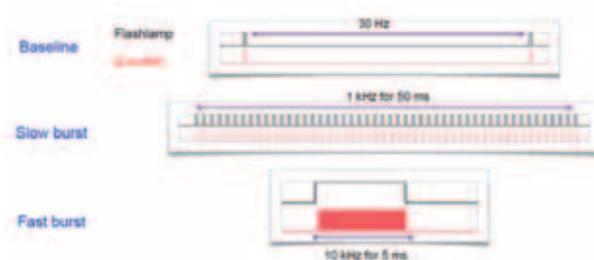


図2 高速トムソン散乱導入後の時間分解能別測定モード

本装置の肝は、トムソン散乱計測装置用のレーザーにあります。レーザーの高繰り返し化では、固体レーザー媒質内での発熱により、熱レンズ効果といった熱光学効果が問題となります（熱光学効果はいわゆる「かげろう」として一般に知られるものと同じ現象）。これはレーザー光の出力低下や光学損傷の原因となり、レーザーの高出力化を制限します。

そこで本研究では、媒質内に温度分布が発生する前に、レーザー増幅を行うことで熱光学効果を回避して1ミリ秒以下の時間幅で複数回パルスを発生させるレーザー装置を開発します。図3 (a) に示すように固体レーザーをフラッシュランプで光励起すると、図3 (b) のようにレーザーロッドの冷却過程で温度分布が発生してしまいます。しかしながら冷却過程の初期段階のごく短い時間では、ロッド外への熱伝達が間に合わず温度分布平坦な状況が生まれます（図3 (c)）。この平坦な温度分布が保たれている時間内にレーザーを高繰り返し動作させることで、レーザーの熱光学効果の問題を回避して、高速なトムソン散乱装置を実現することができるのです。

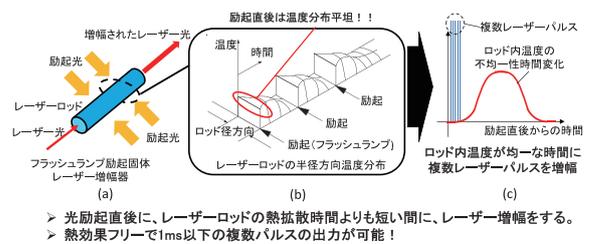


図3 高速トムソン計測用レーザーのバーストモード熱分布

ガリレオが、高性能な望遠鏡を用いて天文学の重要な発見を成し遂げたように、LHDにおいても、高速な電子温度・密度分布の計測装置を導入することで研究の更なる発展を得たいと思っています。17世紀に月を望遠鏡で眺めた時に、思い掛けずクレーターを発見したときのガリレオの高揚感は想像するだけでワクワクしてきます。LHDでもそんな新発見が期待できると、国際共同研究チーム一丸となって準備を進めています。

(高温プラズマ物理研究系 准教授)