

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	QIU DECHUAN (邱徳川)
論文題目	Development of Multi-pass Thomson Scattering System with Delay Mechanism of Laser Pulses for Measuring Anisotropy of Electron Velocity Distribution Function on Heliotron J (ヘリオトロン Jにおける電子速度分布関数の非等方性を観測するためのレーザーパルスの遅延機構を有するマルチパストムソン散乱システムの開発)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は核融合高温磁化プラズマの電子の非等方速度分布関数を計測するためにレーザーパルス遅延機構により信号分離を行うマルチパストムソン散乱計測を開発し、Heliotron J 実験に適用し電子速度分布関数の非等方性を評価した結果をまとめている。高温磁化プラズマにおいて、速度分布関数の非等方性は等方流体モデルでは現れない輸送の駆動や不安定性の励起などを通じプラズマに影響を与えるため、多様なダイナミクスを持つ高温磁化プラズマ現象の隠された要素と考えられており、速度分布関数の非等方性の計測が課題となっている。本研究ではトムソン散乱計測では、レーザービームの入射方向と散乱光の検出方向で決まる散乱波数ベクトルの方向の速度分布関数が得られることを用いて、レーザービームを往復させるマルチパストムソン計測を構築し、往路と復路によりほぼ 90 度異なる 2 方向の速度分布関数を計測することで速度分布関数の非等方性を評価しており、以下の 7 章から構成されている。</p> <p>第 1 章は序論で、これまで TEXTOR、GAMMA-10、TST-2 などのマルチパストムソン散乱計測に関する先行研究成果を調査し、新しく開発したレーザーパルスの遅延機構を有するマルチパストムソン散乱システムを用いて速度分布関数の非等方性を計測する意義を明確に位置付けている。</p> <p>第 2 章は本研究を実施するヘリカル軸ヘリオトロン装置であるヘリオトロン J について、形成される磁力線構造とその磁力線による電子とイオンの閉じ込め、そして電子サイクロトロン共鳴加熱によって磁力線に垂直方向に電子を加速する実験について述べている。</p> <p>第 3 章は相対論効果を考慮した高温プラズマからのトムソン散乱について物理的な原理を述べ、レーザービームの入射方向と散乱光の検出方向で決まる散乱波数ベクトルの方向の速度分布関数が計測により得られることを示している。本研究で開発したマルチパストムソン散乱システムを用いることで、なぜ速度分布関数の非等方性の計測することができるかについて述べている。</p> <p>第 4 章はヘリオトロン J 装置の Nd:YAG レーザートムソン散乱計測装置についてレーザー入射光学系、散乱光集光光学系、分光システム、データ収集システムについて原理、構成、性能について記述している。</p> <p>第 5 章は新しく開発したレーザーパルス遅延機構を有するマルチパストムソン散乱計測システムの設計について述べている。5.2 節では、アバランシェフォトダイオードの散</p>			

乱光検出特性を考察し、速度分布関数の非等方性の計測にはレーザーパルスを分離するためのレーザーパルス遅延機構が必要となることを説明している。5.3.1節では、偏光制御光学システムを用いてレーザービームの光路を瞬時に変更し、パルスを冗長化した光路で往復させ遅延を実現する新しいパルス遅延法について述べている。本システムをヘリオトロン J 装置に適用するために既存のトムソン散乱計測システムに追加する光学コンポーネントの構成について説明している。そして偏光制御光学システムを正しく動作させるために必要なナノ秒オーダーで動作するタイミング制御システムの設計について 5.3.2 節で述べている。レーザーパルス遅延機構を実現し、同時にレーザービームパワーの長距離伝送による減衰を抑制するために新しくダブルイメージリレー型ビーム伝送システムを提案している。5.3.3節では、ガウスビームモデルを用いたシミュレーションコードの開発と伝送系の設計について説明している。5.4節では、マルチパスレーザーによる前方散乱光、後方散乱光は散乱スペクトルが異なるため、散乱スペクトル分光システムの干渉フィルターの透過帯域最適化コードを新たに開発し、最適化設計により電子温度および密度の測定精度を向上させることが可能なことを示している。

第6章は設計されたレーザーパルス遅延機構を有するマルチパストムソン散乱計測システムを構築し性能評価および初期プラズマ計測実験を行った結果について記述している。6.2.2節ではラマン散乱光を利用してレーザーパルス遅延機構の性能評価を行い、遅延時間が従来の4倍まで伸びたことを示し開発目標を達成できたことを述べている。6.2.3節ではビーム迷光を観測することによりマルチパストムソン散乱計測システムの基本動作に関する性能評価を行い18回以上のビーム往復を観測し目標とした性能が達成できたことを示し、レーザーパルスが10回以上正しく往復することにより観測されるラマン散乱光パワーが増大したことを示している。6.3節では電子サイクロトロン共鳴加熱プラズマに本計測を適用した初期的な実験結果について記述している。レーザーの往路復路でのトムソン散乱光の信号分離性能の評価について述べ、往路復路で散乱光スペクトルが大きく異なる事を計測したことを記述している。この計測から速度分布関数の非等方性を評価し、非等方性は小さいという結果と原因の考察を示している。

第7章では全体をまとめ、得られた重要な成果について記述している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

核融合炉における高温磁化プラズマ中の不安定性励起などの現象には速度分布関数の非等方性が強く関与している場合があり、特に電子の速度分布の非等方性の観測とその理解が求められている。本論文は、2方向の電子速度分布関数を計測するためにレーザーパルスを往復させるマルチパストムソン散乱計測を開発し、Heliotron J実験に適用し電子速度分布関数の非等方性を評価した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

- (1) 往路復路のレーザーパルスによるトムソン散乱信号を精度良く弁別するため、偏光制御システムを2つ用いる世界初の方式であるダブル偏光制御システムを開発し、レーザーパルスの遅延を制御して散乱信号を分離した。このダブル偏光制御システムの実現のためダブルイメージリレー型ビーム伝送システムを考案し、ガウシアンビームモデルを用いた設計により減衰を最小化して必要な性能を得ている。レーザーの往路復路により散乱スペクトルは大きく異なるが、スペクトル計測に用いる5個の干渉フィルターの通過帯域を最適化し、それぞれの散乱スペクトルを誤差10%以下で測定可能とした。
- (2) 本システムをHeliotron J装置に取り付け性能評価を行い、ミラーからの漏れ光の観測により18回以上の往復、ラマン散乱光の計測からレーザーパルスのプラズマ通過時間に従来の4倍の遅延を生じさせるとともに10回以上のビーム往復ができ、必要な性能を持つことを確認した。
- (3) 電子サイクロトロン共鳴加熱で生成したプラズマに適用し、往路復路で散乱スペクトルが大きく異なる事を観測した。ここから2方向の電子速度分布関数の広がりを評価し、電子の非等方性は小さいという初期的な結果を明らかにした。

以上、本研究はトムソン散乱計測によって高温磁化プラズマの電子速度分布関数の非等方性を評価する手法を示した。本研究を契機とし、プラズマの速度分布関数の非等方性の理解が進展することで、これまでの等方的描像では解けなかった謎が解決されることが期待できる。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年8月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降