

発展的研究計画スタート支援 研究報告書

2022年2月28日

核融合システム研究系 川手朋子

研究課題名: 非等方場中にあるプラズマの微細磁場構造の理解

共同研究者:

川本靖子、中野治久、後藤基志、Joseph J. Simons (核融合研)

黄于蔚、山崎大輝、一本潔、上野悟 (京都大)

【研究背景】

本研究の学術的「問い」は、非等方な放射場・粒子速度場にあるプラズマの磁場はどのような構造を持つかである。天体プラズマや磁場閉じ込め核融合プラズマなど様々な条件において、磁場は基本パラメータであるとともに、天体・核融合プラズマ中のエネルギー輸送・散逸を考える上で、マルチスケールな磁場構造の理解は不可欠である。

磁場の絶対量・方向を計測する強力な手法として、分光偏光手法がある。分光偏光手法でプラズマから離れた場所から計測できることが最大の利点であり、天体プラズマ計測、および実験室プラズマでプローブ起源の揺動を回避する際の主たる物理診断手法となる。一方、分光偏光計測データから磁場を診断するためには、プラズマ中の原子と場の相互作用の理解が必須となる。

【研究目的】

本研究の目的は非等方な放射場・速度場中にあるプラズマの磁場を、リモート計測により取得することである。そのために様々な要因で発生する偏光信号を原子過程の観点から分離する。本研究では小型放電装置を製作することによりプラズマ基礎実験の環境を構築し、それを用いて「ドップラーフリー分光法の開発」および「分光偏光法によるハンレ効果の検証」を行うことにより、偏光信号から微小な磁場またはその変化量と他の非等方場の成分を分離する。

【研究方法】

本研究では非等方場が混在したプラズマにおける磁場を 10^{-4} テスラの精度で明らかにする。そのため、本研究では主に(2) 誘導結合プラズマ生成用小型高周波放電装置の製作 (2) レーザー吸収分光によるドップラーフリー分光法の開発 (3) 太陽観測用分光偏光装置によりハンレ効果を用いた磁場診断手法の開発を行う。

小型高周波放電装置では、移動・運搬可能な規模でプラズマの生成を行う。高周波電圧を印加することでガラス管内に誘導結合型プラズマを生成する(図1)。プラズマの物理パラメータは電子密度 10^{11} - 10^{12} cm^{-3} 、電子温度数 eV 程度とする。このパラメータは太陽では彩層上部と同程度であり、核融合プラズマでは周辺部よりやや低密度である。電子温度・電子密度・電場・磁場変化は分光と同時にプローブにより計測する。これをレーザー吸収分光・分光偏光計測の放射光源とする。



図1 加熱実験棟内にある放電装置

【研究成果】

2021年度は主に実験開始のための環境構築を行った。(1)小型放電装置 (2)レーザーシステム (3)分光偏光スペクトルモデルのそれぞれについて以下に記述する。

(1)小型放電装置

提案当初は、図1に示す放電装置と同仕様様のものを製作し、ガラス管越しに分光偏光計測することを想定していた。一方で、使用するガラス管の真空・放電時のガラスの内部応力変化とその再現性が、計測する偏光信号に影響を及ぼしうる。ガラス管の内部応力による偏光特性を調査するため、放電前後の同じ外径・内径のガラス管について、ミューラー行列の計測を8月に京都大学理学研究科附属飛騨天文台にて行った。計測は同施設所蔵ミューラー行列測定システム(図2; Ichimoto et al. 2006, Pub. NAOJ)を用いて常温・大気圧中、ガラス管の計測位置を変えながら偏光特性データを取得した。その結果、最大20%程度の直線偏光-円偏光間のクロストークがあることを確認した。

これを受け、放電領域と計測領域を分離する方針(図3)に変更し、9-1月にかけて仕様策定、システム全体の設計、および真空部品の設計を行った。2022年2月現在納品手続き中であり、2022年3月に組み立てを行う。これにより年度内のファーストプラズマを目指す。

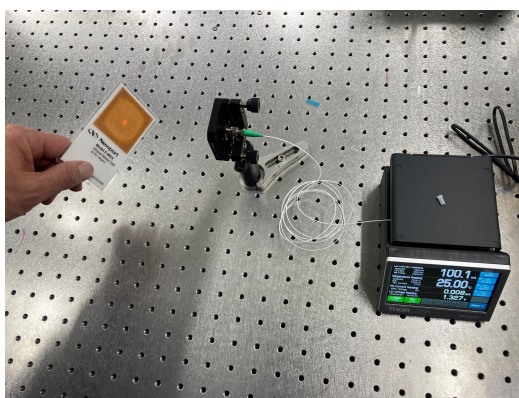


図3 組み立てたレーザーシステム。レーザーの波長は赤外線(1083 nm)であり、センサーカードにより赤色の輝点として可視化されている。

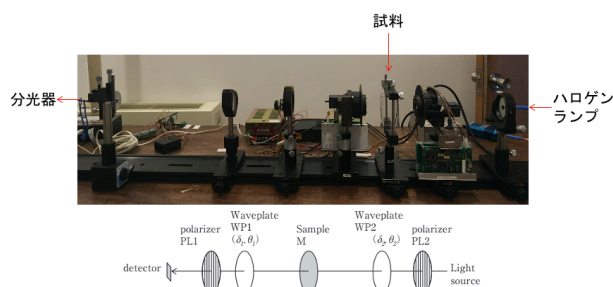


図2 ミューラー行列測定システム(Ichimoto et al. 2006, Pub. NAOJ)

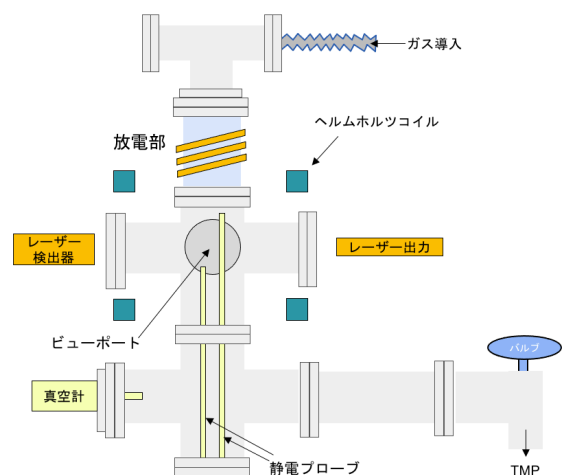


図3 真空容器概念図。放電部から下に流れるプラズマをビューポート越しに計測する。

(2)レーザーシステム

基本的なレーザー照射のための部品を購入、組み立てを行い、レーザーが出力されていることを確認した(図4)。強度・波長の安定性と波長変更の精度・再現性について、2022年度から本格的に調査を行っていく。

(3)分光偏光スペクトルモデル構築

放電装置・レーザーシステムを用いた分光偏光手法による磁場計測実験とともに、実験と比較するための原子分光モデルを構築中である。非等方放射場・粒子速度場に磁場が加わった際の水素・ヘリウムの偏光分光信号モデルについて、2022年3月に開催される日本物理学会春季年会にて発表予定である。

【今後の発展】

短期的な計画として、今年度の装置組み立てののち

- 小型放電装置で生成したプラズマの物理量計測と制御
- レーザーシステムの較正、プラズマへの照射によるレーザー飽和吸収分光計測
- 飛騨天文台計測機器群による小型放電プラズマと太陽プラズマのスペクトルの直接比較と磁場推定
- 非等方放射場・粒子速度場・磁場の混ざったプラズマにおける分光偏光スペクトルのモデル構築

を行う。これらの研究を遂行するため、2022年度核融合科学研究所一般共同研究および2022年度科研費挑戦的研究(萌芽)への応募を行った。また飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡のマシントime確保のため、2022年度観測研究課題公募に応募を行う。

物理量計測のための電子温度・電子密度計測のための静電プローブの材料は2021年度に購入済みであり、プラズマ放電が安定ののち製作する準備が整っている。一方静電プローブ信号から物理量に変換するプログラムはこれから作成する。磁場計測用のテスラメータも測定子とともに購入済みである。USBインターフェースによるPC取り込みにより、すぐに計測が可能である。磁場印加のためのヘルムホルツコイルも、材料は2021年度に購入済みであり、2022年度にコイルを作成する。

核融合研における分光計測試験について、2021年度工学プロジェクトの一環として設計・製作した可視分光器を用いる。放電プラズマから得られる分光データとLHDの周辺プラズマの分光データと比較することで物理量の違いによるスペクトルの変化を調査する。

中期・長期的な展望として、本研究の応用・発展先は多岐にわたるが、例えば

- a. 磁場閉じ込め核融合プラズマにおける磁場揺動計測
- b. レーザー光源による多種イオン系における非局所的なエネルギー輸送の模擬
- c. プラズマ分光偏光に関連する分野(天文・実験室プラズマ)との連携

が挙げられる。

a.) 本研究の目的である微細磁場構造の理解に向けて、放電装置およびレーザー飽和吸収分光システムを用いた基礎実験を経て、磁場閉じ込めプラズマ装置でのレーザーによる磁場揺動計測を目指す。

b.) 天体プラズマでは定常状態にあっても、原子のエネルギー状態は放射場により熱平衡状態から変化する。その結果、電離・解離に至るためのエネルギーも放射場に依存し、電離・解離により粒子数や電離度が変化することにより、エネルギー輸送条件が変化する。放射によるエネルギー輸送は波長に依存し、例えば水素からの紫外線連続光放射が鉄やケイ素の電離度に寄与する(e.g. Fontenla et al. 2009 ApJ)など、イオン種をまたいで非局所的に影響する場合もある。磁場閉じ込めプラズマにおけるダイバータ周辺でも分子過程における輻射輸送の影響は議論されてきた(Terry et al. 1998 PhPl)。このような複雑な放射場と磁場の効果を、分光偏光手法を用いて分離する手法を確立することが本研究の主題であり、レーザー照射による放射場の模擬により原子状態・プラズマダイナミクスの理解に発展させる。

c.) 上記に述べたように、本プロジェクトで開始した小型放電装置とレーザー光源からなる実験を行うことで、天文・核融合両分野が対象とするプラズマにおける磁場構造形成と、それに伴うエネルギー輸送の理解のための基礎研究を展開する。飛騨天文台の望遠鏡や核融合研の分光器のみならず、光学計測装置群を用いた物理量診断の検証とともに、放射を含む多種イオン系のダイナミクスの理解を進めていきたい。支援いただいたことを心から感謝します。