



研究課題名 核融合プラズマの位相空間揺らぎがもたらす新しい輸送パラダイムの探求

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

いだ かつみ
居田 克巳

研究課題番号： 21H04973

研究者番号： 00184599

研究期間： 令和3年度～令和7年度 研究経費（期間全体の直接経費）： 480,500 千円

キーワード： 核融合プラズマ、位相空間揺らぎ、輸送

【研究の背景・目的】

核融合プラズマの研究は、核融合エネルギーの実現という目的をインセンティブに、1億度に至る高い中心温度と必要な密度を維持する手法と、輸送（勾配と流束との関係）の理解を重要課題として進められてきた。温度勾配と熱流束との関係は、熱流束の量が温度勾配に比例するという単純なものではなく、強い「非線形性」を持つことや、熱流束の量が局所的な温度勾配のみでは決まらない「非局所性」、あるいは「ヒステリシス」、「非周期振動」の存在などが指摘されている。波動のエネルギーが、波動と粒子のエネルギー交換により減衰する現象は、ランダウ減衰として古くからよく知られているが、乱流のエネルギーが異方性をもつ速度空間の歪みを通じてプラズマ流の駆動エネルギーへと変換される現象（帯状流や自発回転の発生）の発見は比較的近年である。この帯状流や自発回転がプラズマの輸送を左右していることも明らかになった。これらの発見はプラズマの「実空間の揺らぎ」と「速度空間の歪み」と「輸送」との複雑な相互作用の存在を示し、「速度空間の歪みの揺らぎ」が「輸送」を理解する上で重要であることを示唆している。

本研究の目的は、プラズマの速度空間歪みの揺らぎを観測し、揺らぎの研究を「実空間」から「位相空間」へと拡張することで、輸送物理を問い直すとするものである。さらに、「位相空間の歪みの揺らぎ」の観測に基づいて輸送のパラダイムシフトをもたらす知見を得ることである。

【研究の方法】

本研究課題では、1) イオンと電子の速度空間歪みの揺らぎを検出する計測システムを開発し、2) 高温プラズマを発生装置に設置して実験観測し、3) 理論・シミュレーションの結果と比較する。

1) イオンと電子の速度空間歪みの計測システム

1-1 高速荷電交換分光システム：中性粒子ビームとバルクプラズマとの荷電交換反応を利用した高速荷電交換分光システムを開発し、イオン衝突時間周波数を十分超えた高速周波数でイオンの速度空間のマクスウェル分布からの歪みを計測する。

1-2 電子サイクロトロン放射強度測定システム：磁場強度変化による放射の周波数の広がりをも最小にする視線で、電子の非マクスウェル成分による周波数の広がりを広周波数バンドの電子サイクロトロン放射強度測定システムで計測する。

1-3 ライン比分光法による高速電子の検出：プラズマからの発光線の強度は、電子衝突励起の励起断面積で決まる速度係数に依存する。励起断面積の速度依存性が異なる複数の上準位からの発光線に注目し、電子

の速度分布関数における高速度成分を計測する。

2) 高温プラズマ発生装置

プラズマ発生装置として、LHDとJT-60SAを利用する。令和3-4年度はイオンと電子の速度空間揺らぎの計測の実証と検証をLHDで行う。その後、多チャネル化などシステムの性能向上を経て、令和6-7年度にはJT-60SAで観測を行う。

3) 実験と理論の比較

本研究課題では、速度空間歪みの揺らぎの理論モデルを構築し、実験・観測との比較ができるシミュレーションコードを開発する。

【期待される成果と意義】

期待される研究結果は、高速荷電交換分光システムと広周波数バンド電子サイクロトロン放射強度測定器によって、超高温プラズマ中でのイオンと電子の「速度空間の歪みの揺らぎ」を世界で初めて、かつ同時・同地点で得ることである。この揺らぎは、今まで計測されてこなかった物理量なので、どの程度の揺動レベルであるのか？プラズマの温度の上昇とともに増加してくるのか？空間相関長はどの程度か？揺動の相関時間はどの程度か？などその性質については全く明らかになっていない。その性質を調べることで、揺らぎのスケール長とスケール時間が得られ、揺らぎの時空間構造が明らかになる。

「速度空間の歪みの揺動」の性質を理解することで、今まで「実空間」に閉じていたプラズマの揺らぎ（乱流）から、「速度空間」を含んだ「位相空間揺らぎ」に拡張できる。この「位相空間」への拡張は、マクスウェル分布を仮定して3つの物理量（密度、温度、流速）の揺らぎとして扱って来たプラズマの乱流研究を大きく進歩させ、プラズマの「位相空間揺らぎ」という新しい学術を切り拓くことを意味する。また、本研究結果は新たな閉じ込め改善への学術的指針を与えることができるので、ITER（国際熱核融合実験炉）における核融合燃焼実験など核融合研究開発におけるインパクトも極めて大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ “Bifurcation phenomena in magnetically confined toroidal plasmas”, [K.Ida](#), Advances in Physics: X Vol.5 1801354 (2020).
- ・ “Abrupt onset of tongue deformation and phase space response of ions in magnetically confined plasmas”, [K.Ida et.al.](#), Scientific Reports Vol.6 36217 (2016).

【ホームページ等】

現在準備中