

## ユニットテーマ提案書

### 1. ユニットテーマ

位相空間乱流, Phase space turbulence

### 2. 核融合としての課題

核融合エネルギーの実現に向け、磁場閉じ込めプラズマ乱流輸送の抑制は重要な課題である。これまでの乱流研究では、輸送モデルとして、準線形・拡散的輸送モデルが用いられてきた。また、実験結果を説明するための拡散係数の同定や、ジャイロ運動論シミュレーションを用いた背景物理の推察などが進められてきている。一方で、非局所・瞬時輸送、突発輸送、閉じ込め改善現象などの、強い非線形過程に対する理解は未だ限定的である。来たる ITER・原型炉プラズマ研究時代に向け、これらの問題を解決することが望まれている。

### 3. 学術的な特徴づけ

磁場閉じ込め高温プラズマは非平衡系の代表例であり、その普遍的な特徴づけには新たな枠組みが必要とされる。中性乱流とプラズマ乱流の定性的な相違点の 1 つとして、速度空間の自由度が挙げられる。特にトラスプラズマには多様な共鳴現象が存在し、低衝突領域においては様々な波動・粒子相互作用が可能である。実空間・速度空間を合わせた位相空間に励起された乱流が有するスケーリング則は、中性乱流・MHD 乱流のものとは異なることが理論的に予測されている。

### 4. アプローチ (定式化)

準線形・拡散モデルによって表現することが困難な非線形プラズマ輸送・構造形成現象が多く報告されている。この問題を解決するため、乱流輸送モデリングの新たな枠組みとして、位相空間乱流に着目する。位相空間乱流の概念は、励起された乱流が粒子と相互作用することで位相空間に構造を励起し、輸送に寄与するというものである。これまで、超高温・無衝突プラズマにおける輸送現象の理解のため、主として理論的な議論がなされてきた。位相空間乱流により、乱流の亜臨界不安定性や非線形成長、輸送の非拡散化などが起こることが予測されており、上記した乱流輸送の未解決課題に進展をもたらすと期待される。近年では運動論シミュレーション技術の発展により、様々な位相空間非線形構造の発見や、輸送への影響の定量的評価がなされてきている。また、実空間・速度空間における乱流計測技術の発展に伴い、位相空間乱流輸送の実験的研究を進める機運が高まってきている。そこで本ユニットでは、理論・シミュレーション・実験の統合的なアプローチにより、位相空間乱流がプラズマ閉じ込めにもたらす影響を調査する。実空間に加え速度空間にも自由度を持つ乱流の持つ普遍的な性質を取り扱うための枠組みを定式化する。

計測技術の進展は大きいものの、位相空間乱流の直接計測は依然チャレンジングである。そこで本ユニットでは、研究の端緒を掴むため、計測器がカバーできる低周波数・低波数領域に形成される位相空間構造の実験的検証を目的とする。このような現象の例として、瞬時輸送現象や突発現

2ページ以内で記述し、10.5pt・行間1行を使用してください。青字の注意書きは削除してください。

象、マクロスケール揺動やストリーマなどの非線形構造などが挙げられる。理論モデルやジャイロ運動論で予測される分布関数構造が、実空間や速度分布関数の計測データにどのように現れるか（フットプリント）を予測し、得られた実験データと比較する。繰り返し起こる突発現象を独立の事象であると捉え、これらをアンサンブル平均することで位相空間計測の精度を上げる。また、実験的アクチュエータとして、ビームや電磁波による分布関数摂動を積極的に利用する。これらの新たな実験的知見をもとに、低自由度の理論的定式化をさらに進める。

準線形・拡散モデルが妥当と思われる高衝突領域、及び、位相空間乱流による輸送が本質的になる低衝突領域での、位相空間乱流の輸送への貢献を定量的に評価する。このため、従来の流体的な物理量を対象とする輸送の定量計測の整備も行う。輸送・応力の検証には、密度と静電位など、複数物理量の同時多点計測が必須である。

並行して、位相空間乱流計測手法の開発・高性能化に取り組む。イオン速度分布関数計測として、LHD実験で利用されている計測原理（荷電交換分光や協同トムソン散乱計測）を用いる。最先端の超高速受光器や大口径光学系を活用した信号増強を行う。また、垂直ECE計測やレーザー散乱計測などの電子速度分布関数計測器の開発も行う。これらに加え、先端解析法（機械学習、条件付きサンプリング法、モーメント解析など）の活用で、波動・粒子相互作用の定量評価を進める。

実験プラットフォームとして、LHD、JT-60SA、PLATO、CFQS、及び基礎装置などを用いる。共同研究で得られた知見を基に、より定量的計測に特化した新規実験装置の検討を行う。

## 5. 学術的展開

低衝突乱流プラズマは様々な磁場閉じ込めプラズマに普遍的に見られ、宇宙プラズマでは優れた位相空間計測が行われている。実験室・宇宙プラズマからの相補的なアプローチを行い、速度分布関数と波動、乱流場が複雑に相互作用しあう状態の、非平衡物性を定式化する枠組みを構築する。また、位相空間乱流のスケーリング則の研究が理論的に進められている。磁場閉じ込め低衝突プラズマで得られた位相空間乱流データを用いて、乱流理論モデルの実験的な検証を行う。

## 6. 独自性、優位性など

磁場閉じ込めプラズマ実験では、可視発光、電磁波、レーザーなどを用いた様々な速度分布関数計測が原理的に可能であり、技術的にもその実現方法が考案されている。核融合科学研究所では、LHD実験において独自性の高い速度分布関数計測器が稼働中であり、計測器導入・運用や、データ解析手法などの実績が蓄積されている。また、運動論的シミュレーションの運用も積極的に進められており、多くの成果を上げている。燃焼プラズマを見据える研究フェイズで、このような実験的・理論的研究の蓄積を持つメンバーでユニットを構成することができるのは、核融合研の持つ大きな優位性である。速度分布関数歪みの研究に関しては、特別推進研究(21H04973、研究代表者居田克巳教授)の予算措置により実施する。