

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

核融合炉実現に向け、乱流によるプラズマ輸送の抑制は重要な課題である。これまでの乱流研究により、既存の実験装置における乱流輸送の定性的な特徴づけに成功し、ITER の性能予測などに貢献をもたらしてきた。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。また、現在の核融合研究は、燃焼炉を見据えた超低衝突プラズマを取り扱うフェーズに入っている。特に、ビーム加熱粒子や核反応生成アルファ粒子に代表される非等方・非熱化粒子による自発的な揺動発生とプラズマ加熱・閉じ込めへの影響は、核融合炉の成立性を左右する重要な問題である。実空間-速度空間に張られる「位相空間」に分布する非熱的粒子集団は磁場閉じ込めプラズマ特有の要素であり、熱化の過程でプラズマ閉じ込めへ影響を及ぼす。位相空間における乱流・波動・粒子の相互作用を定式化することは、定常炉における良好なプラズマ閉じ込めと効率的なアルファ加熱のために、今後益々重要になる課題である。

3. 学術的な特徴づけ

物性の特徴づけにおいては、これまで熱・統計力学がその役割を果たしてきた。磁場閉じ込め高温プラズマに代表される非平衡状態にある系は、熱・統計力学の適応範囲を超えているため、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。特に、上記したような速度分布関数に大きな自由度を持ちうる非熱的低衝突プラズマは、位相空間の直接計測などの実験的な知見をもとに一般化が進められるべきであると考えられる。空間的な相関を持つ波動は位相空間を介して、非局所的に媒質に作用することが実験的・理論的に示唆されている。これらは、従来の局所理論のみで表すことのできない現象である。特徴的な現象のモデル化を積み重ね、プラズマ乱流と波動・粒子位相空間相互作用を一般的に記述可能な、非平衡物性物理の構築に寄与する。

4. アプローチ (定式化)

これまでの研究の多くは、プラズマを流体として取り扱い、熱伝導係数などに代表される物性特性値を評価することで進められてきた。一方で、低次元の物性係数で表すことが不可能な複雑なプラズマ輸送・構造形成現象も多く報告されている。特に、ランダウ減衰などの波動-粒子相互作用は、位相空間に特徴的な構造を形成し、プラズマ閉じ込めに影響を及ぼす。これらの性質は低衝突である高温の核融合炉心プラズマで特に重要になる。近年の実空間・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、流体近似した乱流輸送の定量計測に加え位相空間揺動の直接計測装置を整備し、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。流体的なモデル化が妥当な高衝突領域か

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。

ら、粒子性が本質的になる低衝突領域までを網羅的に実験計測し、輸送を担う乱流の性質を評価する。これにより、乱流プラズマ輸送を的確に表すことのできる物性表現方法を模索する。

速度分布関数計測には、LHD 実験で蓄積された計測ノウハウ(荷電交換分光や協同トムソン散乱計測)を応用する。最先端の超高速受光器や、大口径光学系を活用し、時空間分解能を高める。また、先端解析法(機械学習、条件付きサンプリング法、モーメント法など)の活用で、波動・粒子相互作用の定量評価を進める。また、実験的アクチュエータの 1 つとして、電磁波の特性(トポロジカル性等)を積極的に利用する。その性質を実験的に調べるとともに、位相空間に外部摂動を与えるツールとして利用し、粒子集団応答モデルの検証(伝播・加熱・電流駆動等)や、プラズマ輸送物理の展開に役立てる。運動論的なシミュレーションを駆使し、速度分布関数・乱流場・波動が位相空間上でどのように相互作用するか観測する。

同時に、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を進める。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。このために、実験装置やプラズマをヴァーチャル空間に模擬し、定量的観測が可能になる計測器連携システムを構築する。シミュレーション空間上で異種計測器連携を模擬し、計測の定量性を評価する。その結果に基づいて計画した計測器構成を現実の実験装置に導入し、定量計測を実証する。エネルギー保存則から求めた総輸送量と、乱流計測より求めた輸送量の空間積分値を比較することで、定量性の検証を行う。

実験プラットフォームとして、常伝導 LHD, JT-60SA, PLATO, CFQS 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、宇宙プラズマなどにおいても普遍的に見られており、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、位相空間乱流を定式化することを目指す。特に、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の構築は、これらの分野に共通する課題である。実験室プラズマでの分布関数ゆらぎの直接計測を基にした、非平衡物性の一般的な表現方法の定式化に寄与する。

6. 独自性、優位性など

対象となるプラズマに対し近接計測が可能な点は、実験室プラズマにおける研究の大きな優位性である。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。