

2021 年 8 月 5 日

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ

位相空間構造形成と崩壊のシミュレーション研究

2. 提案者（氏名・所属）

藤堂泰、宇佐見俊介、樋田美栄子、佐藤雅彦、Wang Hao (NIFS)

3. テーマと研究内容の概要

テーマの意味

外部から注入された（または内部の源から発生した）粒子・エネルギーが輸送によって外部へ排出される非平衡開放系において形成される位相空間構造とその崩壊を、基礎物理方程式に基づいたシミュレーションにより研究する。あわせてシミュレーション結果と実験・観測との比較によってシミュレーションの妥当性を検証する実証研究を実施するとともに、これらのシミュレーション研究を可能とするシミュレーションモデルとシミュレーション手法・可視化手法の開発を推進する。

具体的な研究課題

1. 核燃焼プラズマの自己組織化

- 核燃焼プラズマにおける高エネルギー粒子駆動不安定性、帯状流、微視的乱流の相互作用
- 環状プラズマの圧力駆動型不安定性により形成される位相空間構造と圧力限界値

2. 高エネルギー粒子励起波動の多様な時間発展と周波数変調

- 粒子源と高エネルギー粒子励起波動による輸送が形成する位相空間構造
- 準定常状態や突発的な構造崩壊などの高エネルギー粒子励起波動の多様な時間発展
- 広周波数帯波動の非線形励起と各種粒子（高速粒子、電子、複数種イオン）間エネルギー移送
- 高エネルギー粒子励起波動の周波数変調と自発的に形成される位相空間構造

3. 磁気リコネクションや衝撃波などの非線形波動における無衝突散逸と構造形成

- 磁気リコネクション下流で形成される異常速度分布構造とリコネクション率上限値
- 無衝突衝撃波における粒子加速による高エネルギー粒子速度分布形成

10 年間のプロジェクトで達成する目標

目標は、非平衡開放系において位相空間構造を形成維持する輸送流束の規模・頻度分布や構造崩壊をもたらす臨界分布・トリガー機構などの法則性を多様な現象の中に見出し、位相空間動力学を基盤とした解析によりその物理機構を解明して、位相空間構造形成・崩壊の本質を描き出すダイアグラムを完成させることにある。具体的な研究課題では、核融合反応の自己加熱によって高温状態を維持する核燃焼プラズマが自律的に形成する位相空間構造を解明するとともに、安定な高ベータプラズマの位相空間構造の特徴と環状プラズマの圧力限界値を明らかにする。高エネルギー粒子励起波動の非線形励起とエネルギー移送の物理機構、および磁気リコネクションにおける位相空間構造形成とリコネクション率上限値の物理機構を解明する。

予想される成果の学術的な意義

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。

予想される成果である「位相空間における構造形成・崩壊の法則性と物理機構」は、波動粒子相互作用が本質的な役割を担う系における位相空間構造の形成と崩壊に着目した点が独創的であり、高い学術的意義を有すると考える。また、基礎物理方程式に基づいたシミュレーションによって見出される法則は普遍的な法則であり、非平衡系の研究に広く影響を与えることが期待される。

4. 位置づけ

研究課題の背景

核融合科学の学術的意義の一つは、非平衡開放系における構造形成と崩壊という普遍的課題を、無衝突プラズマという波動粒子相互作用が構造形成に対して本質的な役割を担う系において探求することであると考え。このため、核融合科学を分節化したテーマとして「位相空間における構造形成と崩壊」を切り出し、そのシミュレーション研究を本ユニットテーマとした。

関連するテーマとの比較, 特徴

本ユニットが解明を目指す「構造を形成維持する輸送流束の規模・頻度分布」や「構造崩壊をもたらす臨界分布・トリガー機構」は太陽フレアや地震などの多くの非平衡系と共通する課題である。本ユニットテーマは、位相空間構造に着目して基礎物理方程式に基づいたシミュレーションを実施する点や、波動粒子相互作用に代表される位相空間動力学を基盤とする点に特徴がある。

独創性, 優位性

位相空間構造の形成と崩壊における法則性を見出し、位相空間動力学を基盤とする解析により物理機構を解明する点に本ユニットテーマの独創性・優位性がある。本ユニットテーマで使用するシミュレーションコードは、粒子源と衝突を考慮した長時間計算の開発、熱イオン運動論的効果や開放系境界条件の導入などを世界的に先導してきた実績を有している。

5. 研究の方法

本課題では運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーションコード MEGA と粒子シミュレーションコード PASMO を使用する。MEGA は微視的乱流のシミュレーションが可能となるような拡張が必要であり、PASMO は大規模並列化が必要であるが、これらは十分に実現可能である。大規模シミュレーションの実行のためプラズマシミュレータ雷神が必須であり、さらに富岳など世界最高クラスのスパコンを用いることが視野に入る。

6. 自己評価

1) 未来志向であること

本ユニットテーマは未開拓の研究領域であり、未来志向であると考え。

2) 目標を具体的に示していること

ユニットの目標と各研究課題の目標を具体的に示している。

3) 10 年後に学术界に輝くテーマに育つこと

予想される成果の学術的な意義に述べた理由により、本ユニットテーマは学术界に輝くテーマに育つことが期待される。

4) 多様な「個人のテーマ」を包摂できること

「具体的な研究課題」の他にもプラズマのシミュレーション研究と関連研究を中心として多様な「個人のテーマ」を包摂できる。