

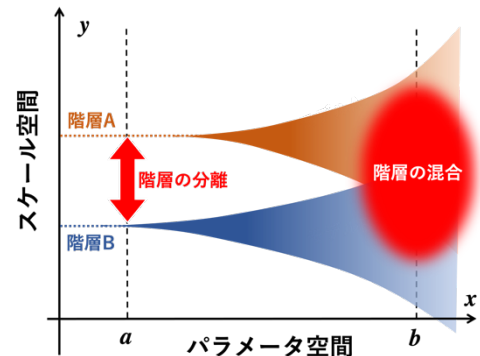
## ユニットテーマ提案書

### ① テーマ名

マイクロ・マクロ階層混合 (Micro-Macro Mixingscopy)

### ② 核融合としての課題

核融合科学を取り巻く諸現象は、時空間やエネルギーのスケールに広がりを持つ。それらに対して、理論モデルなどの「階層」で分離し、それらを接続することで、物理の理解が進んできた。一方で、近年の実験計測や計算機シミュレーションの著しい進展により、不安定性・乱流と粒子運動の共鳴現象や、プラズマ照射下の表面ダイナミクスのように、従来の階層化と接続では捉えきれない現象を目の当たりにするようになった。これらは、磁場強度や質量比、温度などの、あるパラメータ領域（図中  $x \sim a$ ）では離れているように見えていた階層が、別の領域（ $x \sim b$ ）では不可分になると捉えることができる。つまり後者では、極限やオーダリングによる**階層の分離・接続の操作では表現できず、いわば“階層が混合している”ことが本質的**となっている。階層分離の視点から離れ、マイクロ・マクロ階層混合という視点で捉え直すことで、新しい物理描像が拓ける。この描像に基づく方法論が確立されると、これまでの研究では**別個に扱わざるを得なかった異なる物理対象（炉心プラズマや分子集団など）に対して、“マイクロ・マクロ階層混合 (Micro-Macro Mixingscopy)”という新たな研究の基軸が生まれ、統一的な理解が可能になる。**



### ③ 学術的な特徴づけ（何の研究だといえるか）

本ユニットは、

- ・マイクロ・マクロ階層混合した系の物理法則をどう記述し定量化できるか？
- ・階層混合の概念で様々な現象を俯瞰したときに現れる普遍性は何か？

を問う。核融合プラズマの諸現象を**マイクロ・マクロの階層が不可分に混合する系として捉え直し**、その物理をマイクロ・マクロ描像、実験・理論といった従来の個別アプローチに加え、それらを融合した視点で解明する。

### ④ アプローチ（定式化）

実験・理論融合による階層混合度の定量化

特徴的な時空間スケールが近接することで生じる階層の混合や、速度空間などの自由度を介して生じる階層混合など、その混合度合いを表現し得る物理量や指標を混合度として提示する。混合度を観測するための新たな計測原理の考案に加え、プラズマ実験における多変量同時計測や理論・シミュレーションからのアプローチで、**階層の混合度を定量化する。**

階層混合の物理の方法論の確立

階層を分離する際に極限操作やオーダリングで“埋没”させていた階層混合の情報を、詳細な実験計測とデータ解析から表出させ、各々の階層モデルへ反映させる。また、第一原理シミュレーション

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。

ンからの高解像度データにより階層混合の特性が“正しく” 繰り込まれたモデルの構築を進める。さらに、集団現象としてのマクロ特性をミクروسケールにおける集団運動に反映させる力学モデルや計算・解析手法を開発する。これらのミクロ側・マクロ側双方のアプローチから、スケールと物理パラメータに対する混合度の依存性を評価し、**階層混合の物理を解析する方法論 (Micro-Macro Mixingscopy) を確立する。**

#### 研究の方法

令和4年度までの準備期間で、超伝導 LHD を用いたプラズマ加熱や分光計測、揺動計測による多変量同時計測手法の基礎研究を進める。その後、蓄積された LHD データとともに、常伝導 LHD 実験、JT-60SA、HYPER-I、TPD-II、レーザー生成プラズマ、天体プラズマ観測、Neutral Beam Test Stand、液晶対流実験などにより、階層の混合度計測の手法を確立する。また、プラズマシミュレータなどによる第一原理シミュレーションや数理的・データ科学的手法、自由エネルギー分子ダイナミクス、Wilson 繰り込み群などによる階層混合モデリングを進め、**理論研究と実験計測と統合した「階層混合の物理」を定式化する。**

#### ⑤ 学術的展開

**10年間で達成する目標：**核融合プラズマの諸現象を捉え直して、ミクロモデルからの寄与とマクロモデルからの寄与を再定式化し、階層混合を支配するパラメータを見出す。階層や物理モデルの分離を超えた方法論を、具体的な計測手法・計算手法・解析手法に昇華し、広く学術界に提示する。

**予測される学術的な意義：**階層が混合されたとする物理描像は、要素還元の対極にある「集団現象の物理パラダイム」である。本テーマでは、この描像が必須となる現象に富んだ核融合プラズマ<sup>\*</sup>を土台に「階層混合」という新しい学術分野を開拓する。従来の階層分離を出発点とした現象論を超える新しい方法論は、一般の複雑系を包摂できる。ここで確立される方法論自体が普遍性を持つならば、他分野で扱う現象でも検証することができ、**複雑系のパラダイムを転換させられる。**

(※ マルチスケール乱流とフロー形成・安定性、波動・不安定性と粒子運動の共鳴、揺らぎの大域伝搬、プラズマ-固体界面、分布関数の速度空間構造・非等方性、ペアプラズマ物性・質量比依存、流体方程式の完結モデルなど)

#### ⑥ 独自性、優位性など

**ユニットテーマ提案の背景：**複数の階層に跨る現象は、これまでも階層連結手法などによって精力的に研究が進められ、プラズマや地球・気象分野をはじめ、心臓シミュレータのように生命科学分野などでも広く議論されてきた。一方で、近年の実験計測や計算機シミュレーションの著しい進展により、核融合科学を進める上で階層分離・接続だけでは捉えることが難しい現象が顕在化してきた。

**独自性と優位性：**ここでは、従来の物理研究で仮定されてきた「階層」を跨ぐ現象を、階層という捉え方の再検証から始めて、分離や極限操作を前提としない階層混合系として捉え直す。これは広く一般の学術界においても独創的で、これまでの核融合研の先鋭的な実験計測とシミュレーション研究があつてこそ到達し得た視点であり、優位性を発揮できる。