

ユニットテーマ提案書

1 テーマ名

メタ階層ダイナミクス meta-hierarchy dynamics

2 核融合としての課題

核融合装置における

- ・ 閉じ込め性能や燃焼効率を左右する大域的マルチスケール乱流・輸送と分布形成
- ・ 波動加熱時の不安定性励起に伴う加熱効率の劣化、乱流輸送の増加
- ・ 熱・粒子損失を引き起こす磁気リコネクションや ELM 等の突発的な不安定性発現
- ・ 放射損失の制御と多粒子種の循環の基礎過程である原子・分子・光相互作用
- ・ 核融合発電炉の耐久性と工学的成立を決定づけるプラズマ壁相互作用と炉材料

といった複数階層の存在を背景に持つ未解決問題を、“階層”の問題として俯瞰した共通課題として捉える。

3 学術的な特徴づけ（何の研究だといえるか）

幅広い時空間スケールやパラメータ領域にまたがる自然現象は、様々な「階層」で要素還元的に分離・接続することで理解が進んできた。電子とイオンの運動スケール、粒子モデルと流体モデルなどはその例である。しかし、実験・数値研究の進展に伴い顕在化してきた問題の多くは、階層分離では上手く捉えられない現象である。そこでは、一見すると階層として分離できていたものが物理パラメータに応じて連続的に不鮮明になる様子や、或いは、新たな階層が発現したり重なり合うような事象が現れ、改めて俯瞰的に**階層とは何か？**を問わずにはいられない。本ユニットでは、階層としての尤もらしさや、階層の持ち得る静的・動的な特徴を「階層性」と呼ぶことにし、従来のマルチスケール・マルチフィジクスを土台に、階層性とその大域構造やダイナミクス（メタ階層ダイナミクス）を追求する。

4 アプローチ（定式化）

階層性の定量化

プラズマや固体分子のように、電磁場やポテンシャル場といった背景場の中で動き回る粒子は、ある解空間上での運動という特定の階層モデルで捉えることができる。しかし、何らかのパラメータの変化に伴い背景場の揺らぎが大きくなると、解空間は広がりを持ち始め、階層境界が不鮮明になる（階層モデルからずれ始める）。このような階層の広がり（厚み）の問題を通して、階層性というものを定量的に表現する方法論を見出す。このような問題は、エネルギー保存に従った粒子の運動から大きな熱揺らぎによって自由エネルギーに従った運動へと捉えなおす統計力学や物性・分子化学の問題に通ずる。また、繰りこみ群の観点からは、スケール変換の極限に対応した鮮明な階層から外れていく不鮮明な階層を如何に正しく抽出するかという問題になる。多階層系においては、階層の広がりが、各々の階層を徐々に分離しづらくさせ、いわば混合が起こり得る。5次元乱流計算から見てきたイオン/電子スケールの不可分性などは良い対象となる。このような、異なるダイナミクスの時空間スケールが近接することで生じる混合や、速度空間などの自由度を介して生じ

る混合など、その混合度を定量評価する方法を確立する。これにより、階層性が混合し始める条件や領域、そこでの相互作用の強さの変遷などについて、混合度を用いた階層性の新たな理論モデルの構築、混合度の計測原理の考案、プラズマ実験における多変量同時計測、数値シミュレーションなどのアプローチで定量化していく。

階層間の相互作用

階層性のダイナミクスを捉えるには、階層の広がりに加え、相互作用が重要となる。階層間の相互作用は、特に突発的な現象においては顕著に変化する。波動加熱時に急成長する不安定性や、磁気リコネクション等、エネルギー流入のある非平衡開放系における代表的な現象では、局所領域でのエネルギー解放がトリガーとなり系全体に影響が及ぶ。ここでは、空間的・時間的・特性長的に離れた階層間の連関が極めて重要な鍵となる。このミクロとマクロの階層間の相互作用によって瞬間的に階層分離が破れ、時に不可逆な劇的変容をもたらす。すなわち、これまで異なる階層に属するとして独立に存在していた様々な運動が互いに関連しながら時間発展し、大域的な変動へとつながる。マクロ-ミクロ連結階層法を基盤としたアプローチ、常伝導 LHD 等における流入エネルギー等の能動的制御を用いた実験により、階層間の相互作用系や、劇的変容現象系の理解を進展させる。

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、ミクロモデルからとマクロモデルからの寄与を再定式化し、(1)階層の厚みや混合を導入したダイナミカルな階層性の定量化、(2)階層間の相互作用の理解の深化、(3)個々の層を超えた体系に統合するための方法論の開拓、を目指す。これらのような、階層や物理モデルの分離を超えた方法論を広く学术界に提示する。

予測される学術的な意義：階層性がダイナミカルに変容する物理描像は、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。本活動で、核融合プラズマ^{*}を題材に複雑な現象の織り成す階層性を追求することにより、生態、素粒子、宇宙など多くの科学に対して共通した問題を扱う事となる。特にここで探究される階層性の定量化と相互作用の法則性は、いわば“階層力学”として体系化され、それらは他分野で扱う現象でも検証・応用することができる。

(※ 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・質量比依存など)

6 独自性、優位性など

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性のダイナミクスと大域構造として捉え直す。核融合科学とは、プラズマ、原子分子、固体まで、自然界では共存しにくい現象を、実験室系において能動的に共存させ制御できる場である。例えば、プラズマ中に強力な高周波電場や高エネルギー粒子を入射することで、局所電場強度や荷電粒子の速度空間分布を自在に操ることが可能となり、シミュレーションによる予測や理論モデルの検証を効率的に実施できる。これらの特徴により、階層性の問題に対して精密な研究を展開できる。核融合研では、各分野の最前線に立つ専門家によるユニットが結集しており、本ユニットがハブとなってユニット間連携を促しながら、先鋭的な実験研究と理論シミュレーション研究という優位性を発揮して、階層性にまつわる研究を先導できる。