

ユニットテーマの軸「ダイナミクス・時空」 公聴会

2022年1月31日

1. ユニットテーマ名

Meta-hierarchy dynamics
(超階層ダイナミクス)

2. 核融合としての課題

自然現象は、“階層”による要素還元的な分離・接続で理解が進んできた。

従来、スケールの観点で階層と見なしてきた対象

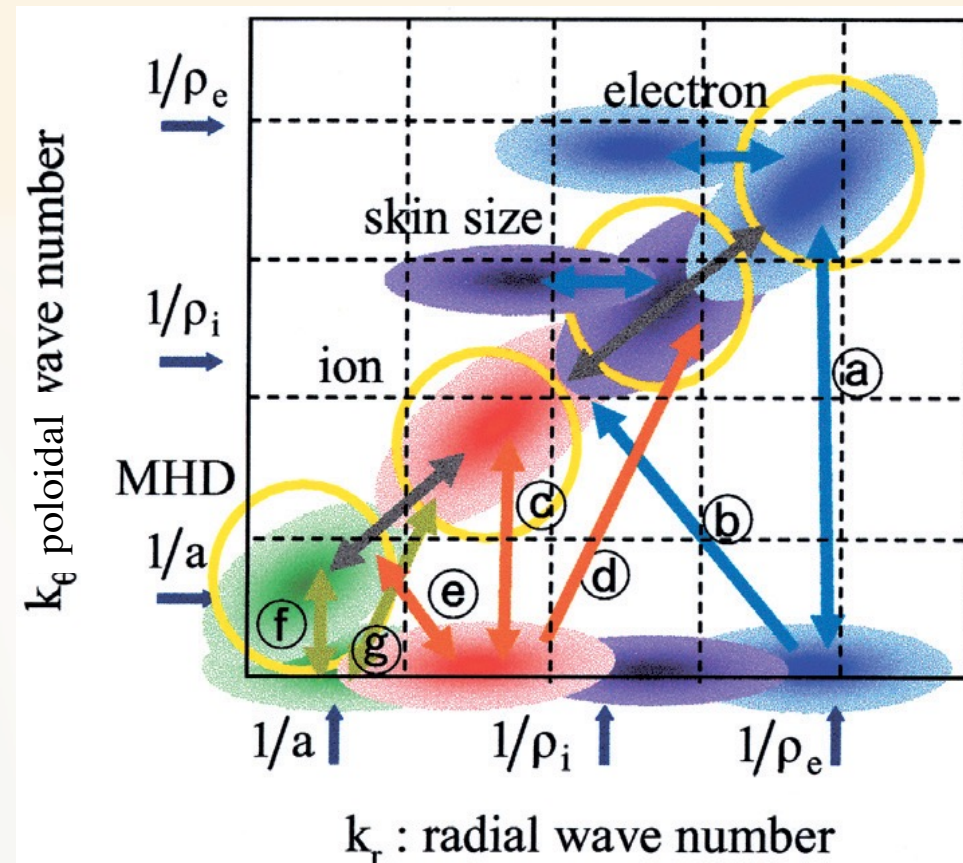
- ・ 電子運動スケール / イオン運動スケール,
- ・ 粒子描像 / 流体描像, …

- ・ 生物のスケール階層

タンパク質 / 細胞膜 / 細胞 / … / 組織 / 個体 / 種 / 生態系

- ・ 物質のスケール階層

クォーク / 核子 / 原子 / 分子 / … / 恒星 / 銀河

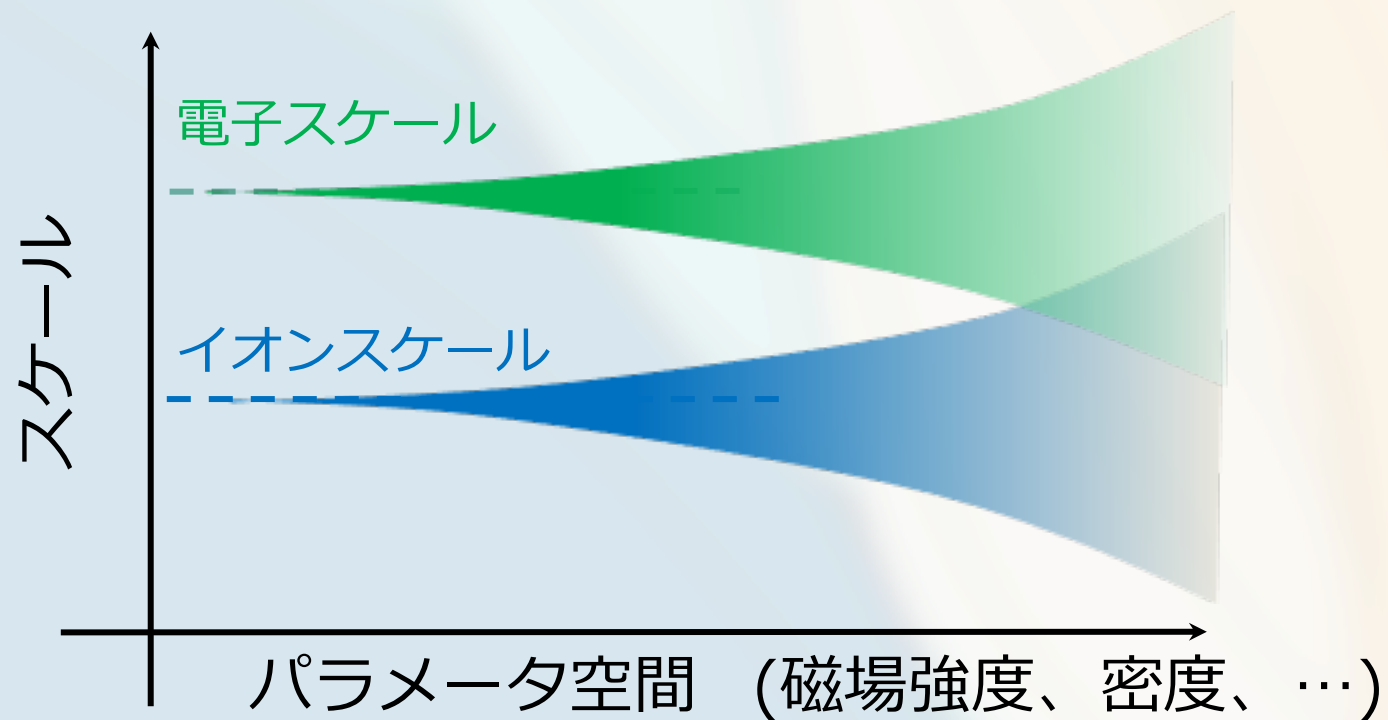


(Kishimoto 2004)

2. 核融合としての課題

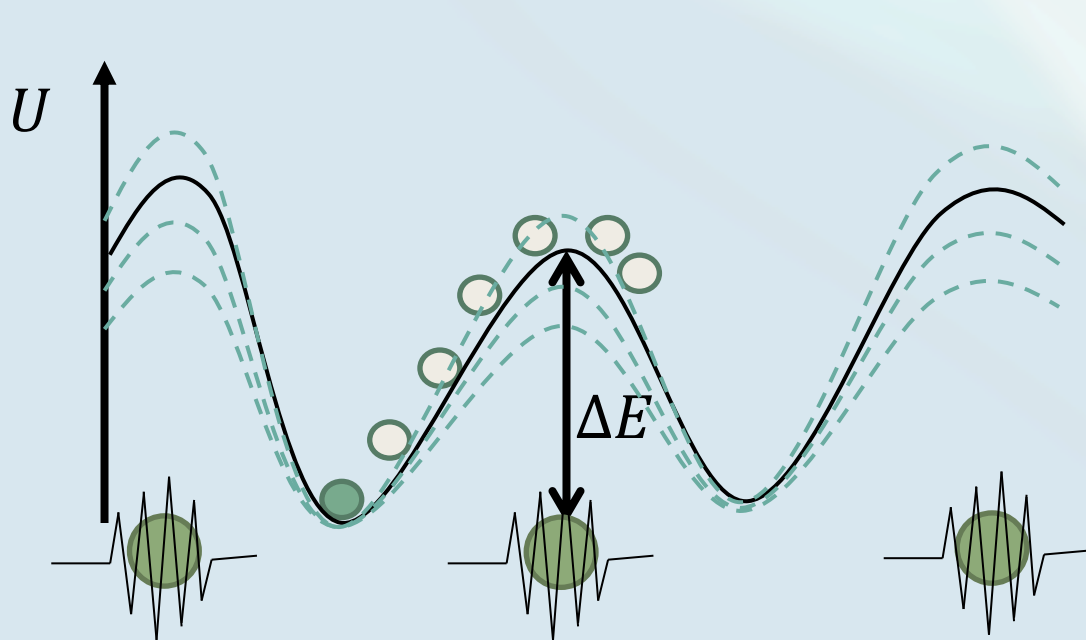
核融合研究の進展に伴い、

- ・ 階層を連続的に不鮮明にさせるパラメータの存在、
- ・ 新たな階層が発現したり重なり合うような事象、
が顕在化

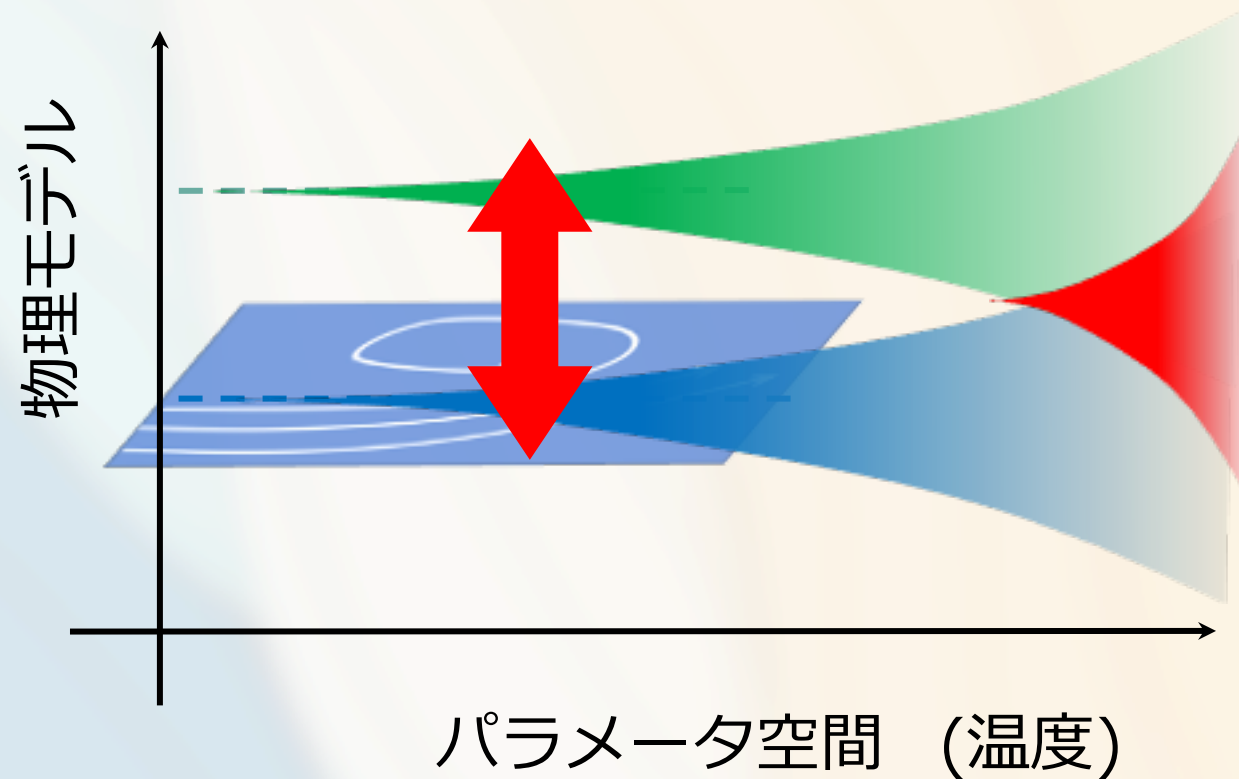


2. 核融合としての課題

- 物理モデルによる分離
- 物理モデルから帰結される運動 → 解空間を構成



- 物理モデル（解空間） → 階層
- 単純な直積空間ではない階層



2. 核融合としての課題

スケール階層だけでない、拡張した階層 “**meta-hierarchy**” と見なす対象

- ・ コアプラズマの平衡 (f_0) / 揺らぎ (δf)
- ・ 定常 / 突発
- ・ プラズマ / 固体

核融合装置における複数階層の存在を背景に持つ問題；

- ・ 閉じ込め性能や燃焼効率を左右する乱流輸送現象と分布・フロー形成
- ・ 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種粒子輸送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

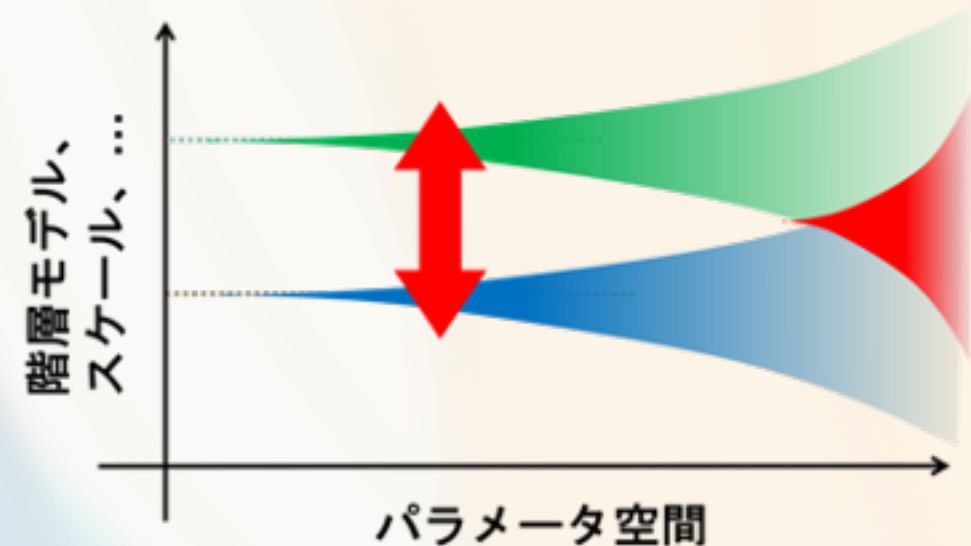
これらをスケール階層だけでない

“ meta-hierarchy ” の問題として俯瞰した共通課題と捉える。

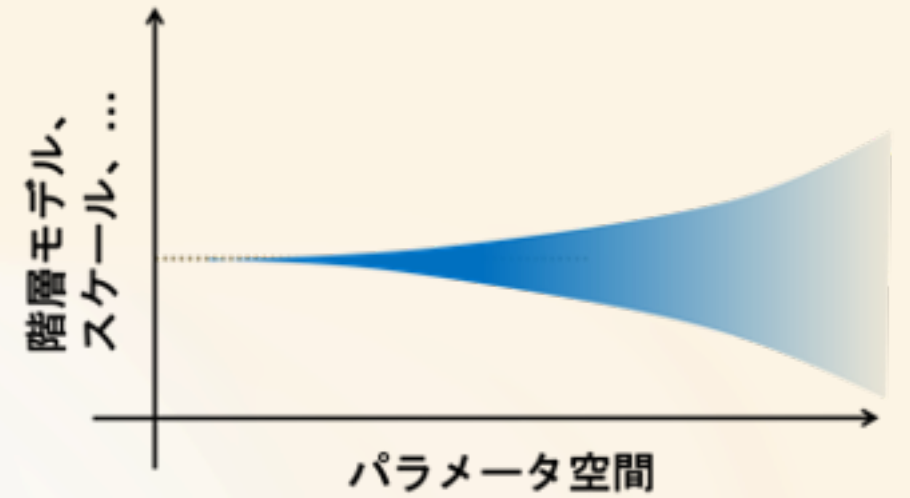
3. 学術的な特徴づけ（何の研究だといえるか）

- 俯瞰的に **階層とは何か？** を問わずにはられない。
- 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を追求する。

“Meta-hierarchy dynamics”
(超階層ダイナミクス)



4. アプローチ (定式化)



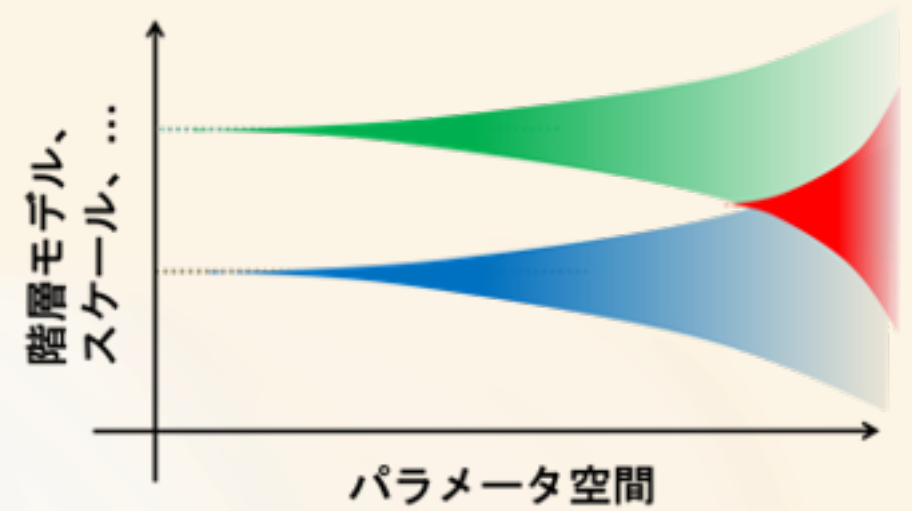
階層の定量化

- (例) 背景場の中で運動する粒子
…ある解空間上での運動という階層モデル
パラメータ変化に伴い背景場に揺らぎ
⇒ 解空間は広がりを持ち始め、階層境界が不鮮明に。(階層モデルからのずれ)
⇒ 階層の広がり ("厚み") を通して階層性を定量的に表現する。
- 粒子運動から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
- スケール変換極限で規定される階層から、不鮮明な階層性を正しく抽出：
繰りこみ群解析

4. アプローチ (定式化)

階層の混合

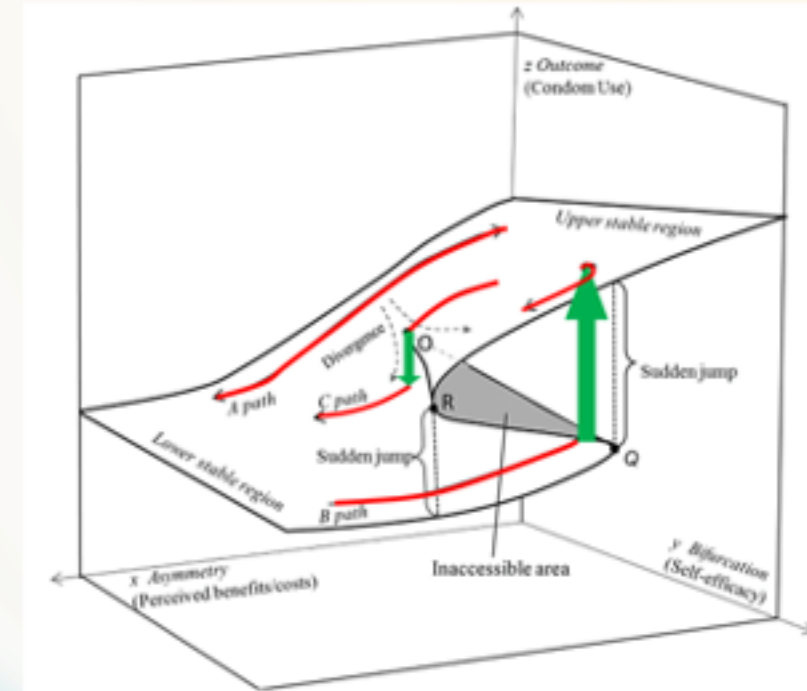
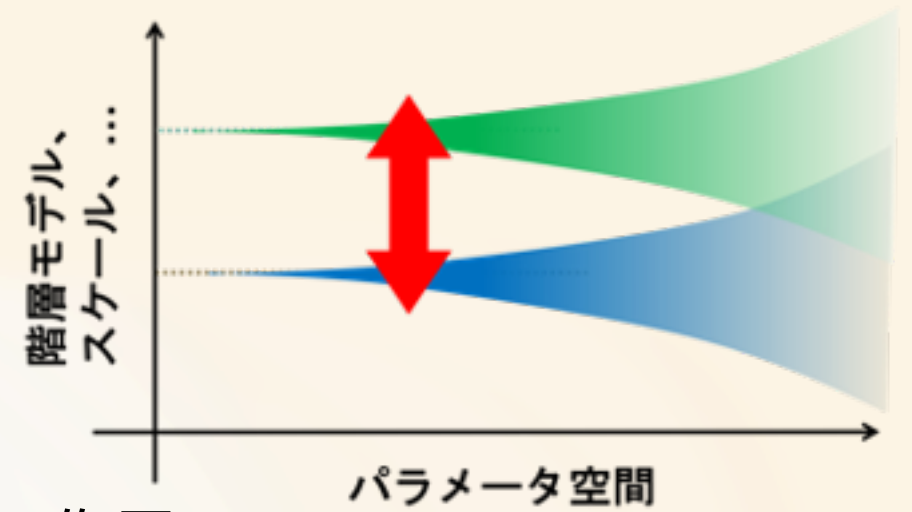
- ・ 階層の広がりが大きくなるにつれ、各階層を徐々に分離しづらくさせ、“混合”が起こり得る。
- ・ 異なるダイナミクスのスケールが近接して生じる混合、速度空間などの自由度を介して生じる混合など、“混合度”を定量評価する方法を確立する。
- ・ 階層性が混合し始める条件や領域、そこでの相互作用の強さの変遷などについて、混合度を用いた新たな理論モデルの構築、混合度の計測原理の提案、プラズマ実験における多変量同時計測、数値シミュレーション、などのアプローチで定式化する。



4. アプローチ (定式化)

階層間の相互作用

- ・ 非平衡開放系でのミクロとマクロの階層間の相互作用
- ・ 異なる階層に属する独立に存在していた系が互いに
 関連し時間発展
 ⇒ 瞬間的に大きな相互作用が生じた場合は、
 不可逆な劇的変容をもたらす
- ・ マクロ-ミクロ連結階層法や、流入エネルギー等の
 能動的制御を用いた実験でアプローチする。



高温プラズマ乱流における階層混合

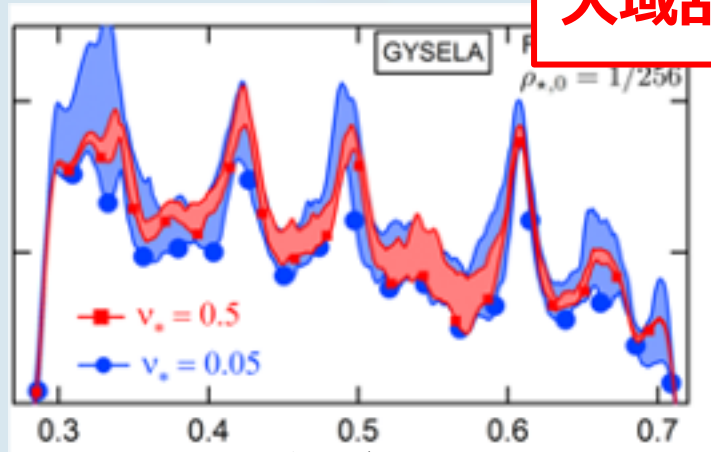
空間スケール kp_i

10^{-3} [平衡分布]

10^{-1} [Zonal Flows /staircase]

$10^0 \sim 2$ [ITG/ETG]

温度勾配分布

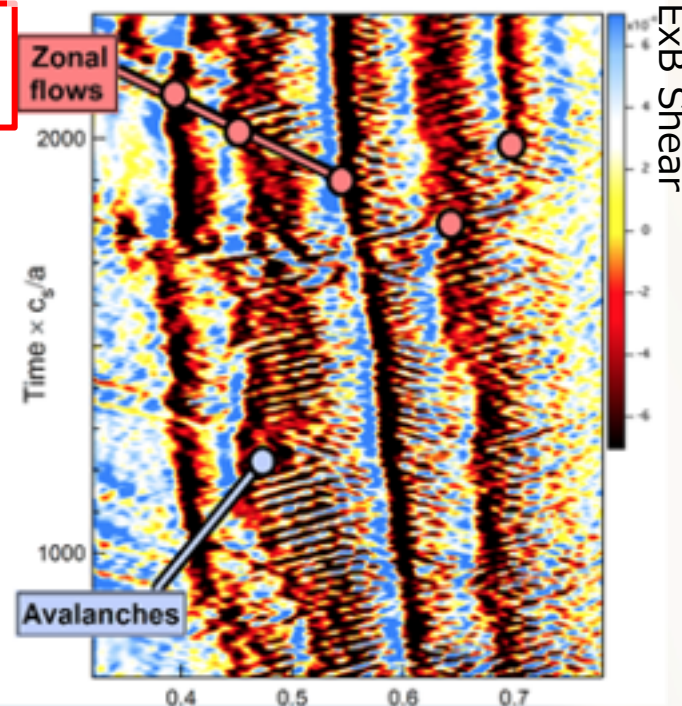


プラズマ半径

(Dif-Pradalier+ '17)

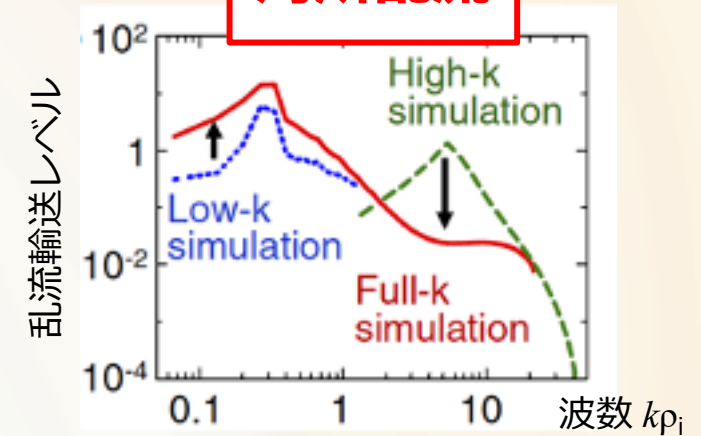
揺らぎ由来の
孤立的なメゾ構造の重畳

大域乱流



プラズマ半径

局所乱流



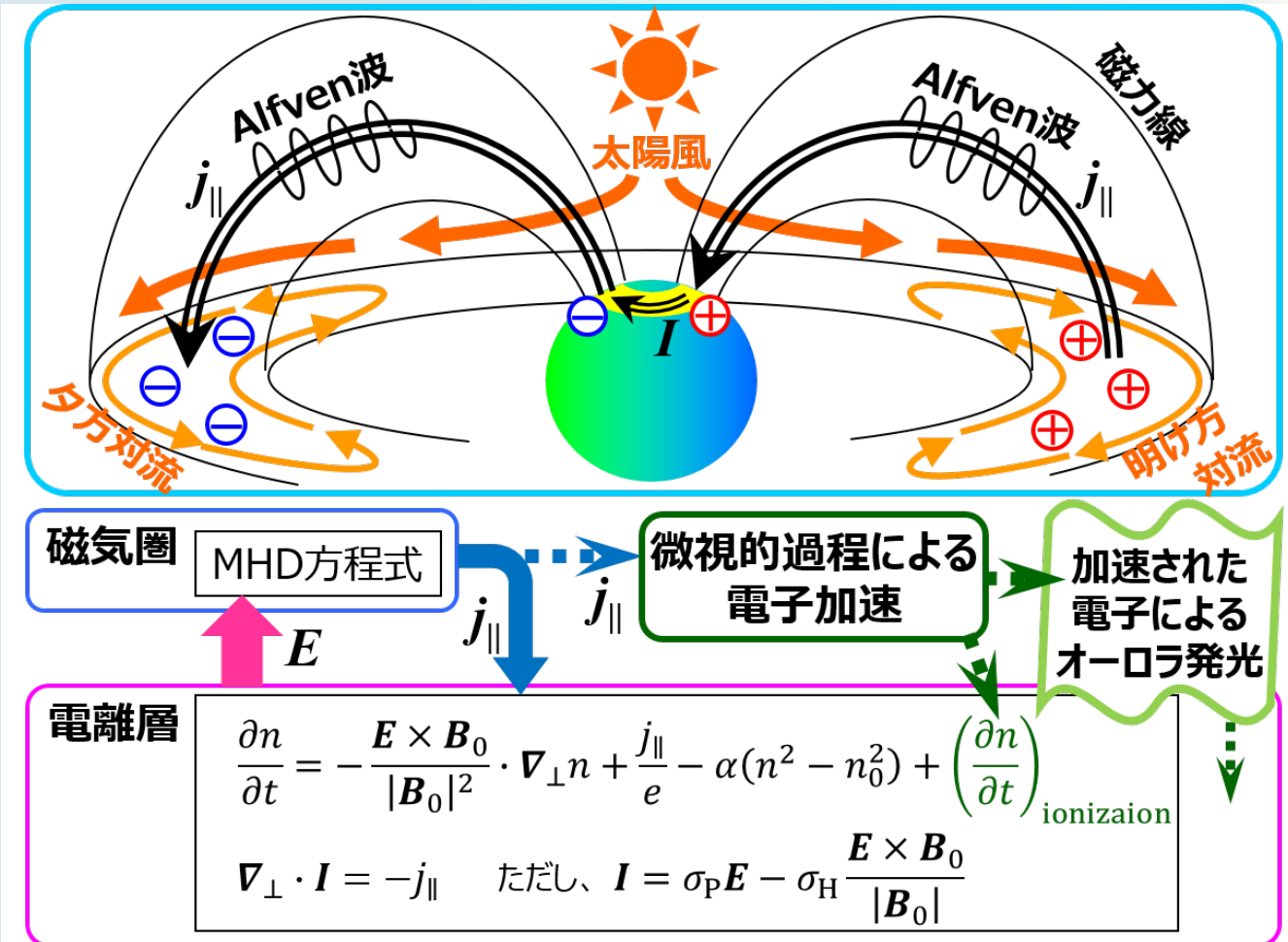
(Maeyama+ '15)

単スケールでは現れない
マルチスケール相互作用

- マクロ-メゾ-ミクロが共存・混合する階層性を司るパラメータは？
- ミクロ→マクロ & マクロ→ミクロ モデリング

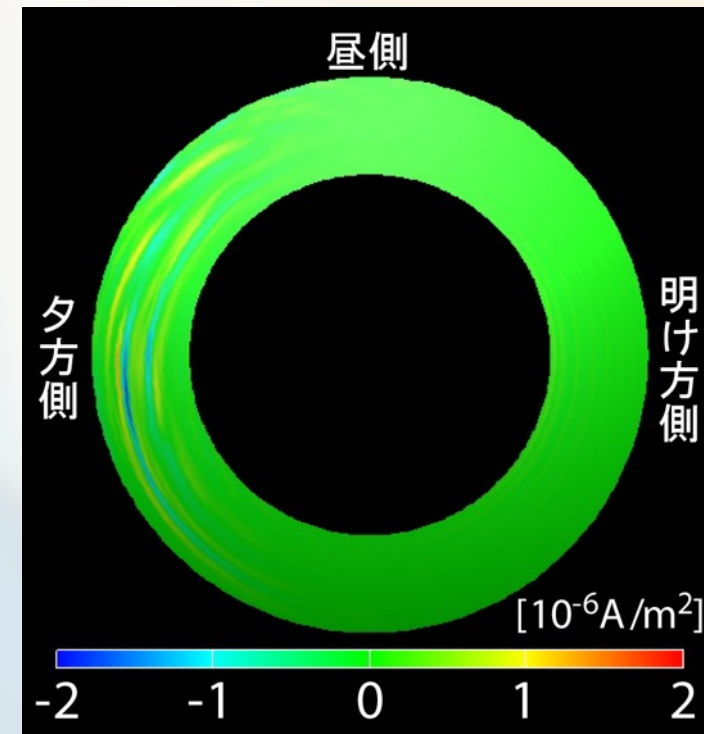
磁気圏-電離圏系での階層間相互作用

マクロ-ミクロ階層連結



階層間の相互作用が生じる前：

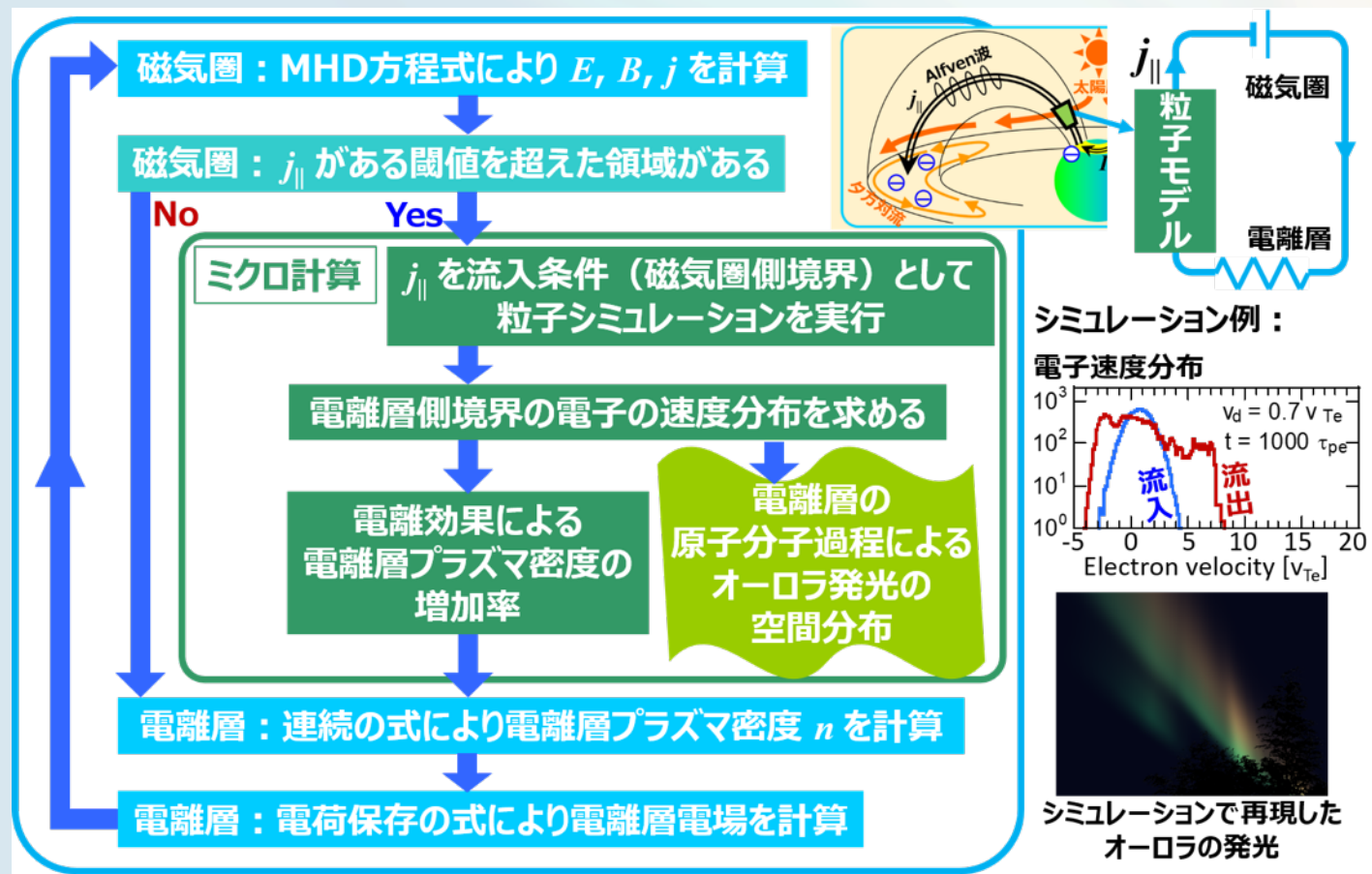
Alfvénフィードバック不安定性*によるアーク状の沿磁力線電流揺動分布の形成



(* Sato, 1978)

磁気圏-電離圏系での階層間相互作用

マクロ-ミクロ階層連結



磁気圏-電離圏系での階層間相互作用

マクロ-ミクロ階層連結



階層間の相互作用が
トリガーとなる
劇的変容現象

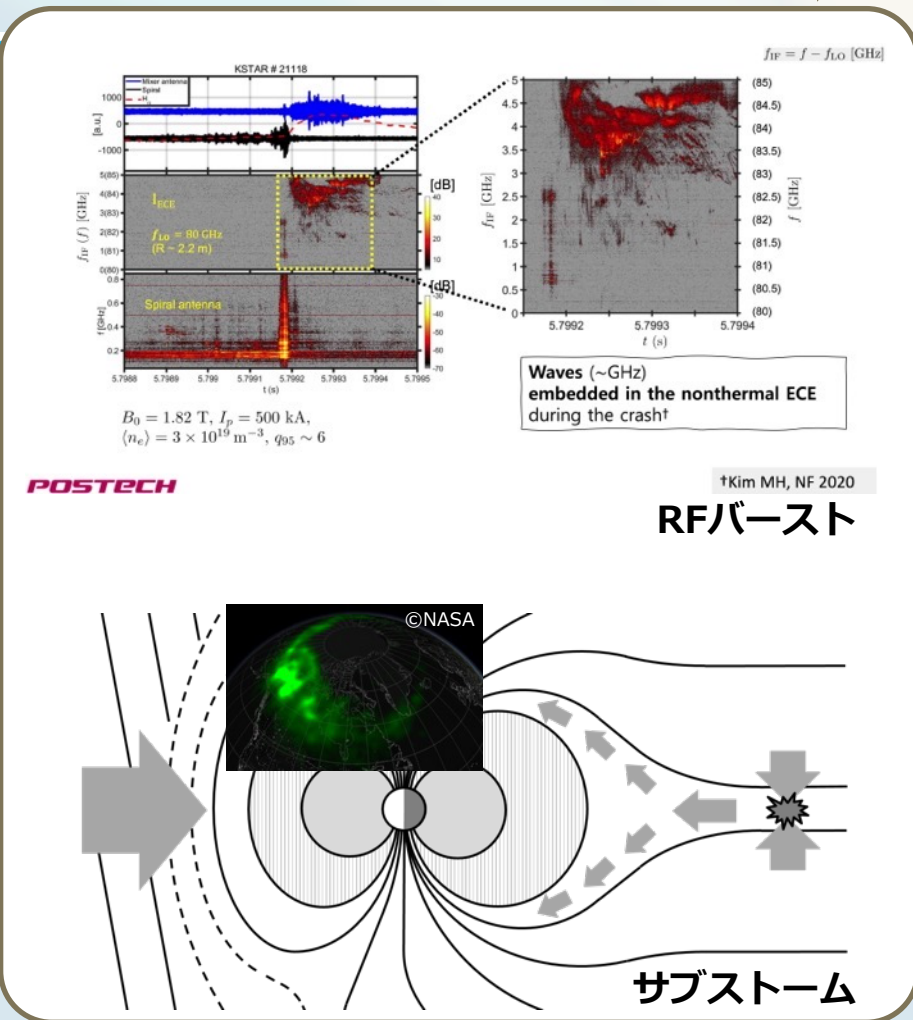
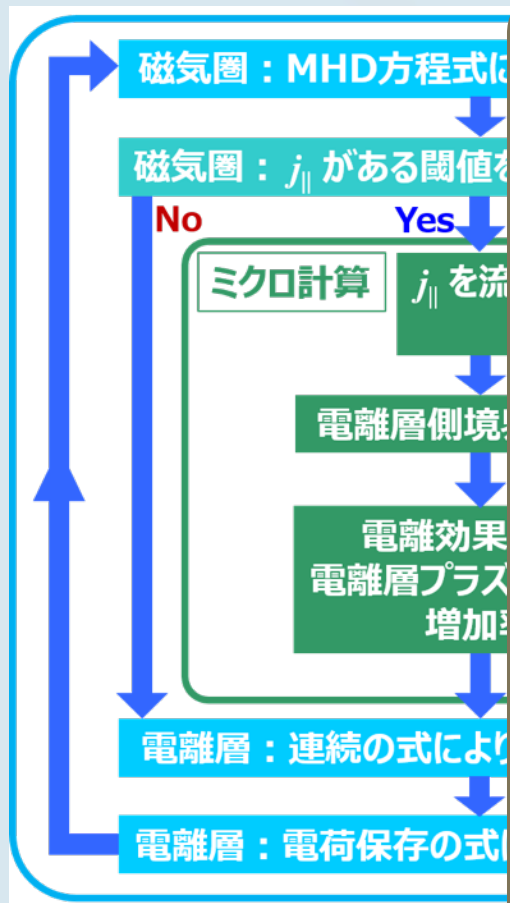
例えば、

- 核融合/スペースにおける
磁気リコネクション：

大域的ダイナミクス、波動伝播



局所領域内の微細構造、
ミクロ過程による異常抵抗、
粒子のピッチ角分布、
波動-粒子相互作用、etc.



RFバースト

サブストーム

5. 学術的展開

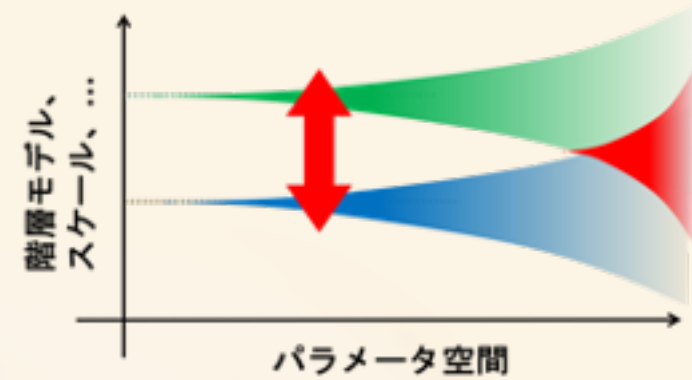
10年間で達成する目標

- ・ “階層” 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。階層や物理モデルの分離を超えた方法論を広く学術界に提示する。

予測される学術的な意義

- ・ 階層性のダイナミクスは、要素還元の対極である「集団現象の物理パラダイム」
- ・ 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。
- ・ 階層の定量化と相互作用の法則性は、他分野で扱う現象でも検証できる。

6. 独自性、優位性など



核融合科学において

スケール階層の方法論によって核融合科学は大きく発展してきた。その概念を拡張して、分離や極限操作を前提としない meta-hierarchy の大域構造とダイナミクスという視点で捉え直した。

他分野に対して

核融合科学は、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り、階層性の問題に対して精密な研究を展開できる。

本テーマがユニット間連携のハブの一つとなり、NIFSで実施してきた先鋭研究の優位性を発揮して、階層性にまつわる研究を先導できる。

ありがとうございました。