

軸1 「ダイナミクス・時空」

メタ階層ダイナミクス

Meta-hierarchy dynamics

連絡先 : meta-HD@nifs.ac.jp

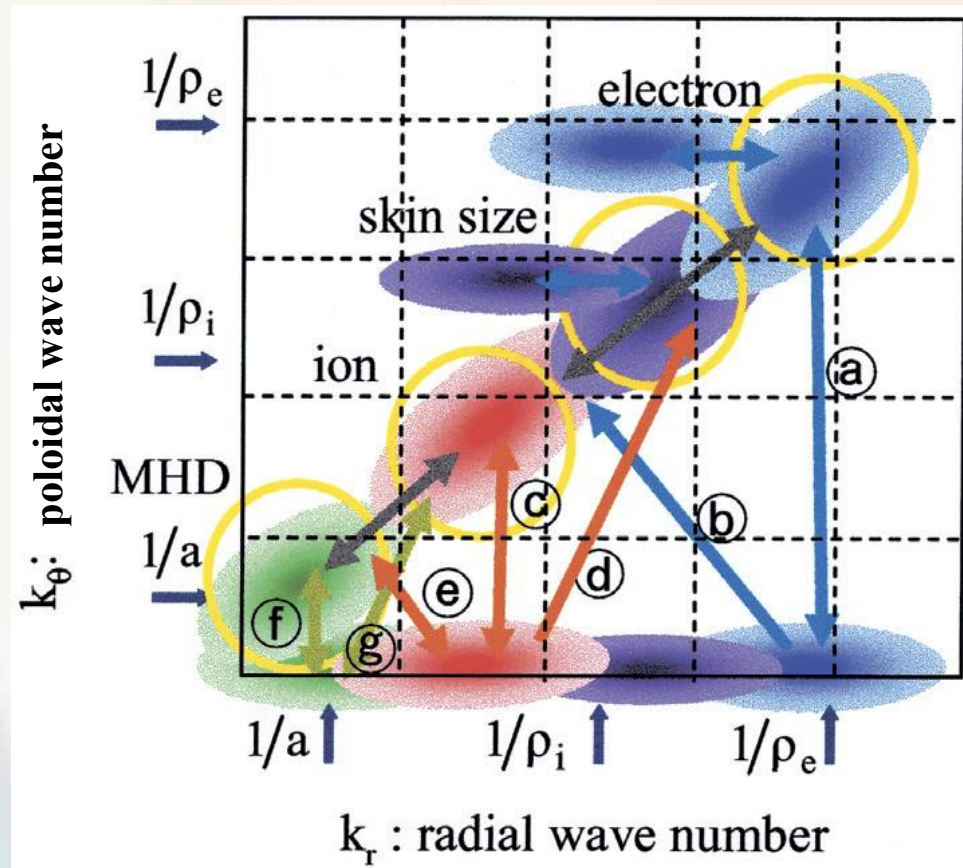
自然界における「階層」

- 自然が自発的に形作る構造、その特徴的な大きさが段階的(離散的)に見える様
 - 物質 クォーク / 核子 / 原子 / 分子 / 中距離秩序構造 / 連続体
 - 宇宙 分子ガス / 惑星 / 恒星 / 銀河 / 銀河団
 - 生物 タンパク質 / 細胞膜 / 細胞 / … / 組織 / 個体 / 種 / 生態系
- ある特徴的な大きさ (スケール) に注目することで、人間にとって理解し易くなる
 - 階層モデル化
 - 要素還元的

階層の特徴的スケール

階層を成す特徴的な大きさは「空間スケール」だけだろうか？

- 空間
粒子描像 / 流体描像
- 波数(逆空間)
電子運動スケール / イオン運動スケール
- エネルギー
- 時間
- etc.



(Kishimoto 2004)

「階層」のとらえ方が、分野・問題により多様化してきている

階層による理解の助け

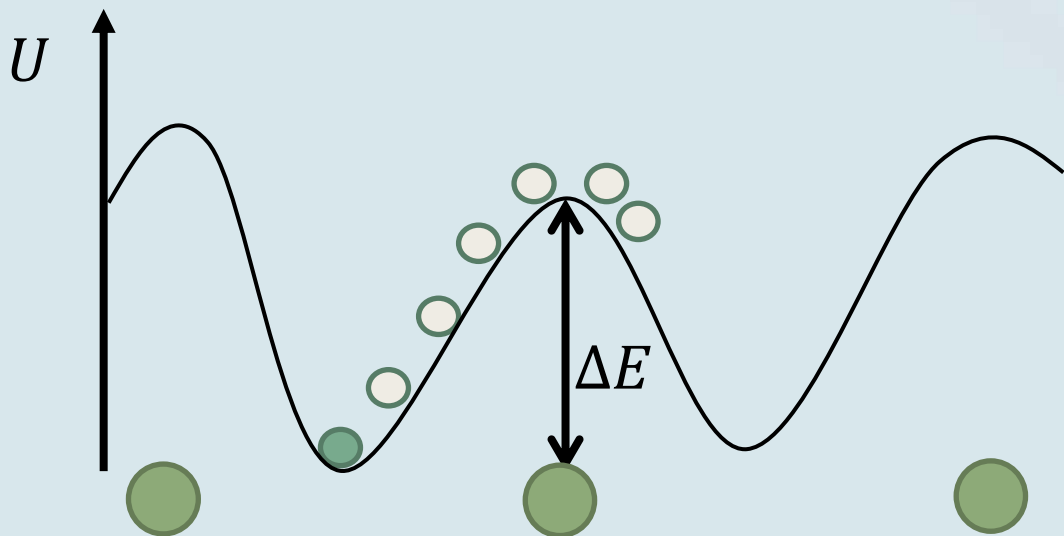
特徴的なスケールの着目することで、人間にとって理解の助けとなる

- スケールによる階層の分離 / 他のスケールの素過程を大胆に無視
- モデル化：閉じた方程式系として記述できる

$$\frac{\partial f}{\partial t} = a \frac{\partial f}{\partial x} + b \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + c \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + \dots$$

あるスケールで c が小さく無視できる

- (単)階層 is 解空間？



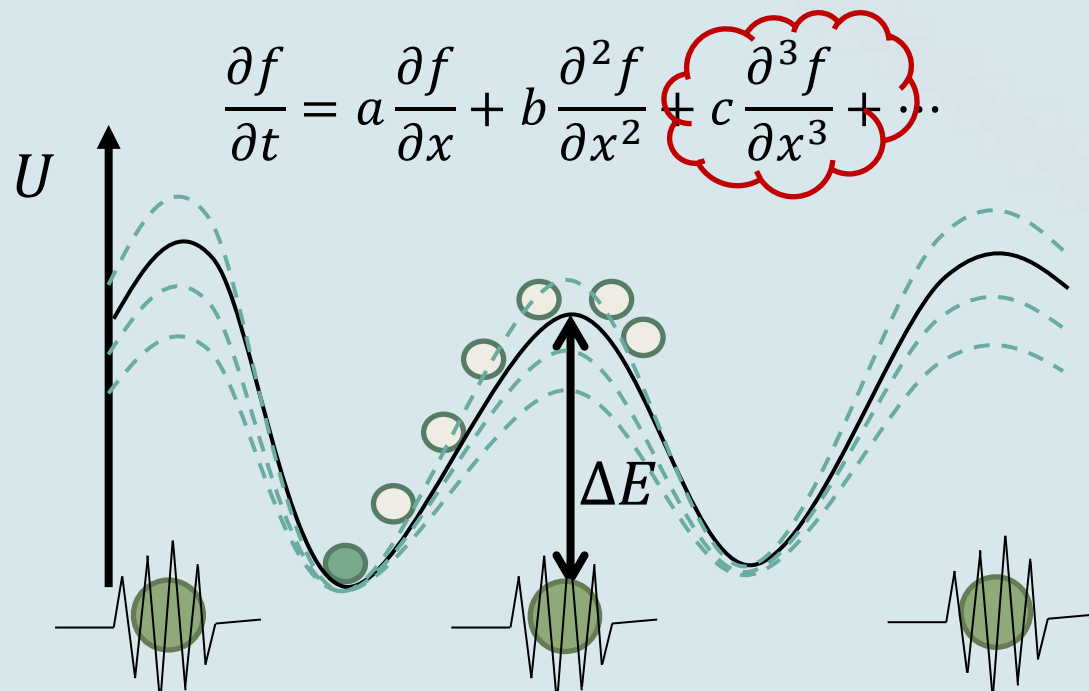
階層分離の破れ～ファジーな階層

いつでも階層モデルは成功するか？

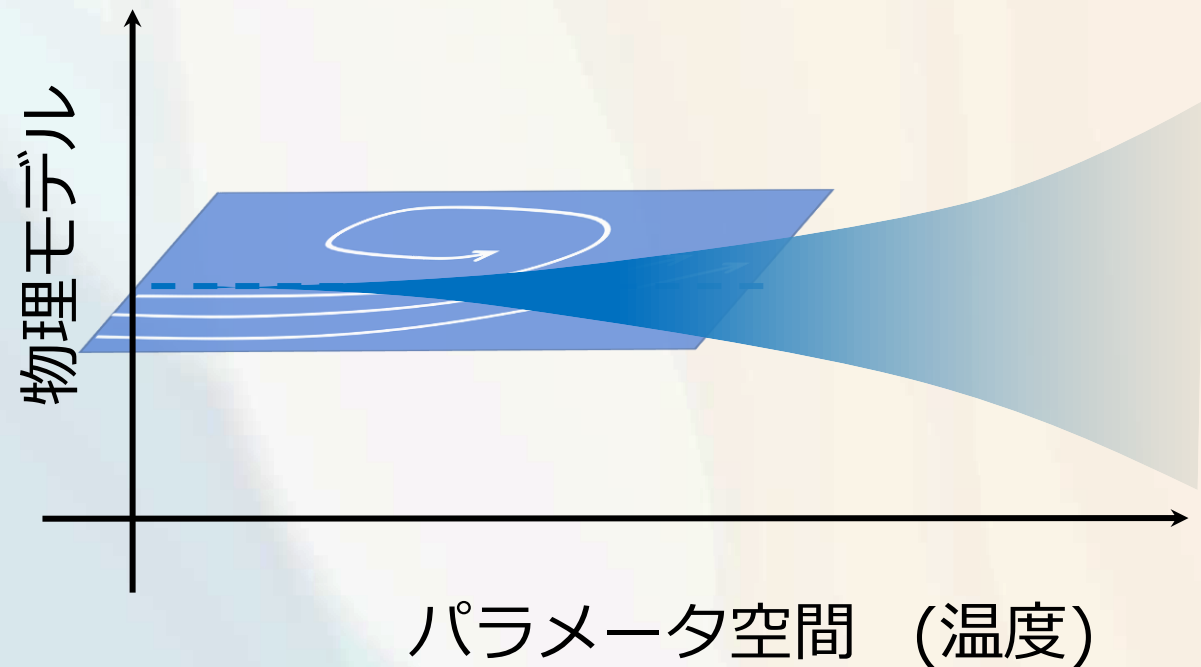
- 未解決の問題には、階層だという定義を人間が勝手に押し付けている場合があるのでは

スケール分離が破れるとき

- 階層間でスケール差が小さいとき→階層間相互作用の顕在化／複雑化／双方向
- あるパラメータの影響で項が無視できなくなるとき



$$\frac{\partial f}{\partial t} = a \frac{\partial f}{\partial x} + b \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + c \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + \dots$$



もはや「階層とは何か？」を問わずにはいられない

空間スケール階層だけでない、

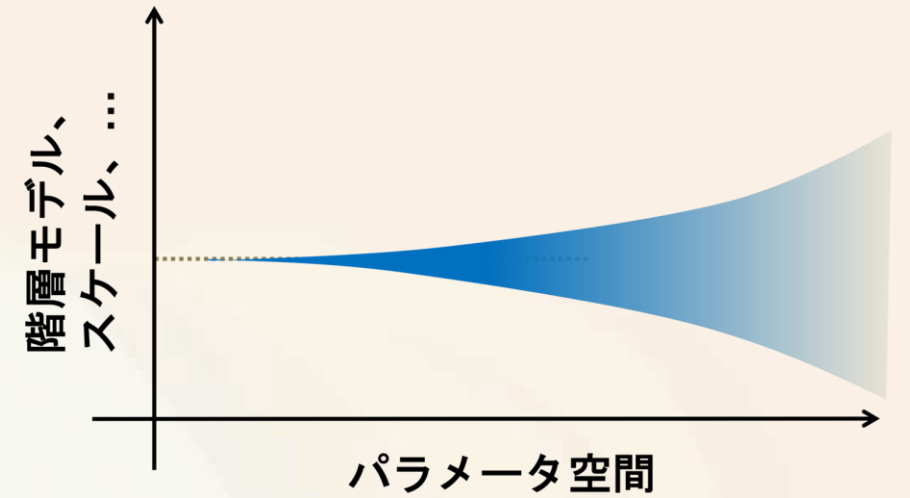
拡張した「メタ階層 (meta-hierarchy)」と捉えて研究を展開

プラズマ・核融合分野における「階層」の問題を包括できるユニットテーマ

- ・ 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
- ・ etc.

「先生(あなた)の注目している現象、それ、階層の問題ですよ！」

アプローチ：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・分子化学の手法

- 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

アプローチ：階層の混合／不可分な階層の扱い

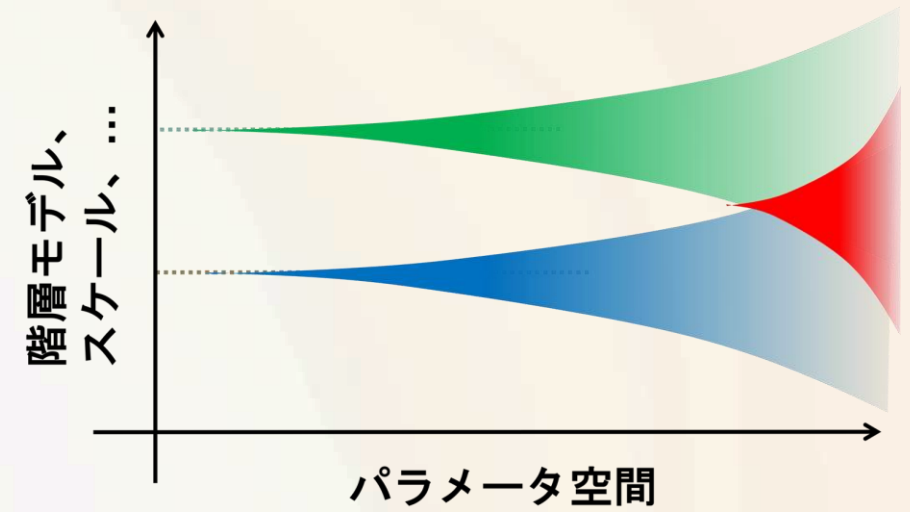
- ・ 階層がファジーになる／階層間の距離が近いことにより、“混合”が起こり得る。

→ 元々、不可分な階層の扱い

- ・ “混合度／不可分具合”の定量評価

- ・ 階層の混合の起こる条件や領域の研究

- ・ アプローチ： 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



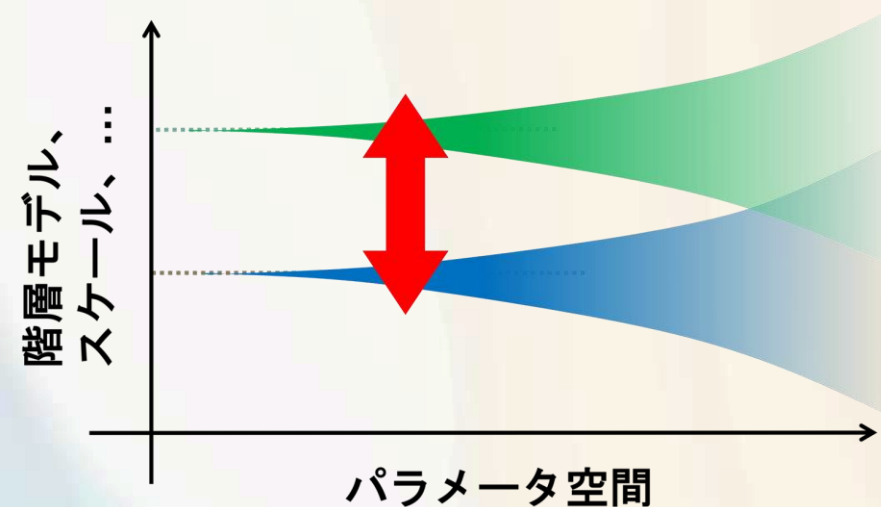
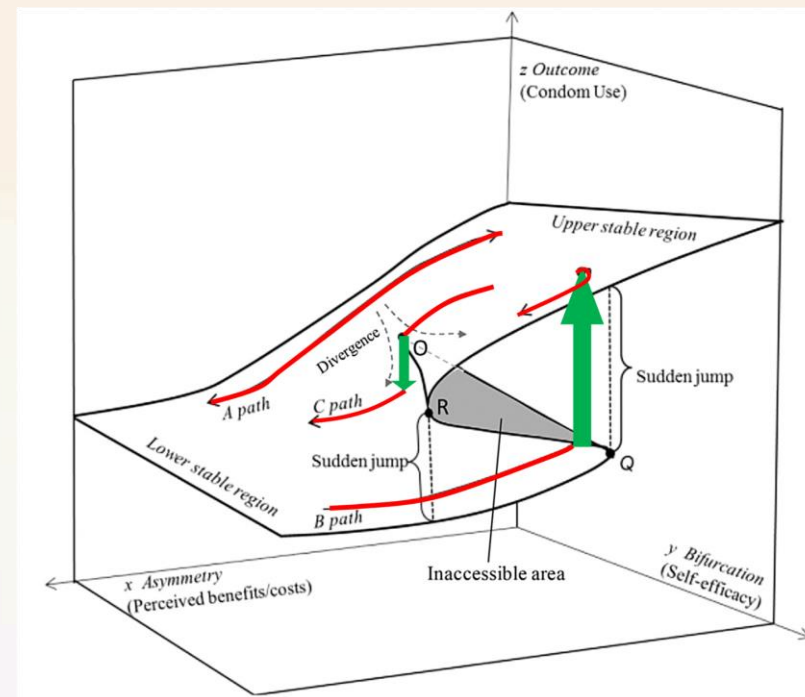
アプローチ：階層間の相互作用

- 非平衡開放系での扱い

→ 突発的な階層間相互作用による現象

～系の不可逆な劇的変容

- 相互作用の強さや質の変遷
- 階層間の距離が近いとき、不可分なのに連結？
- アプローチ：「階層連結」における連結法の尤もらしさ(理論・アルゴリズム)、流入エネルギー等の能動的制御を用いた実験



高温プラズマ乱流における階層混合

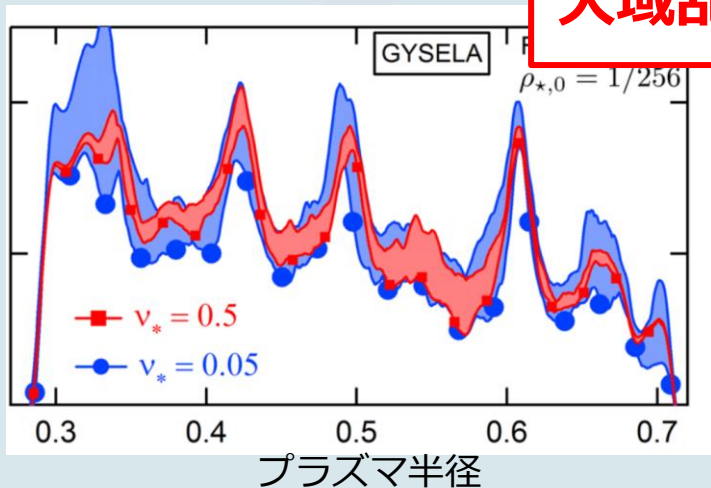
空間スケール kp_i

10^{-3} [平衡分布]

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

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

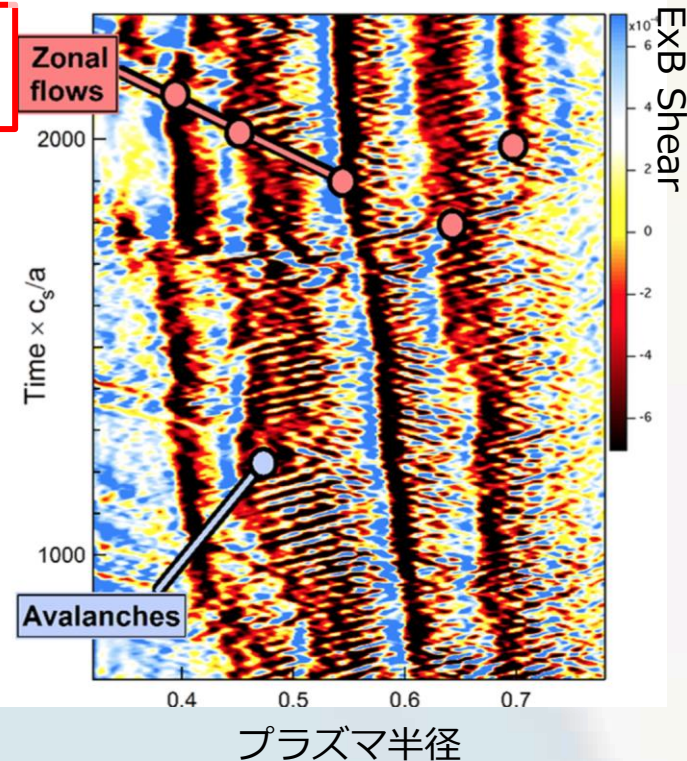
温度勾配分布



大域乱流

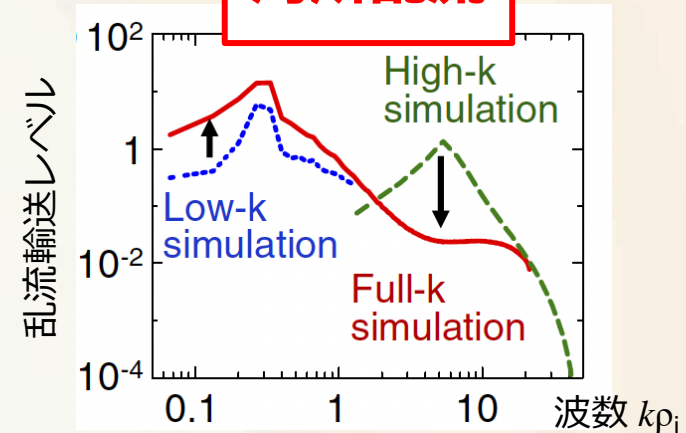
(Dif-Pradalier+ '17)

揺らぎ由来の
孤立的なメゾ構造の重畳



プラズマ半径

局所乱流



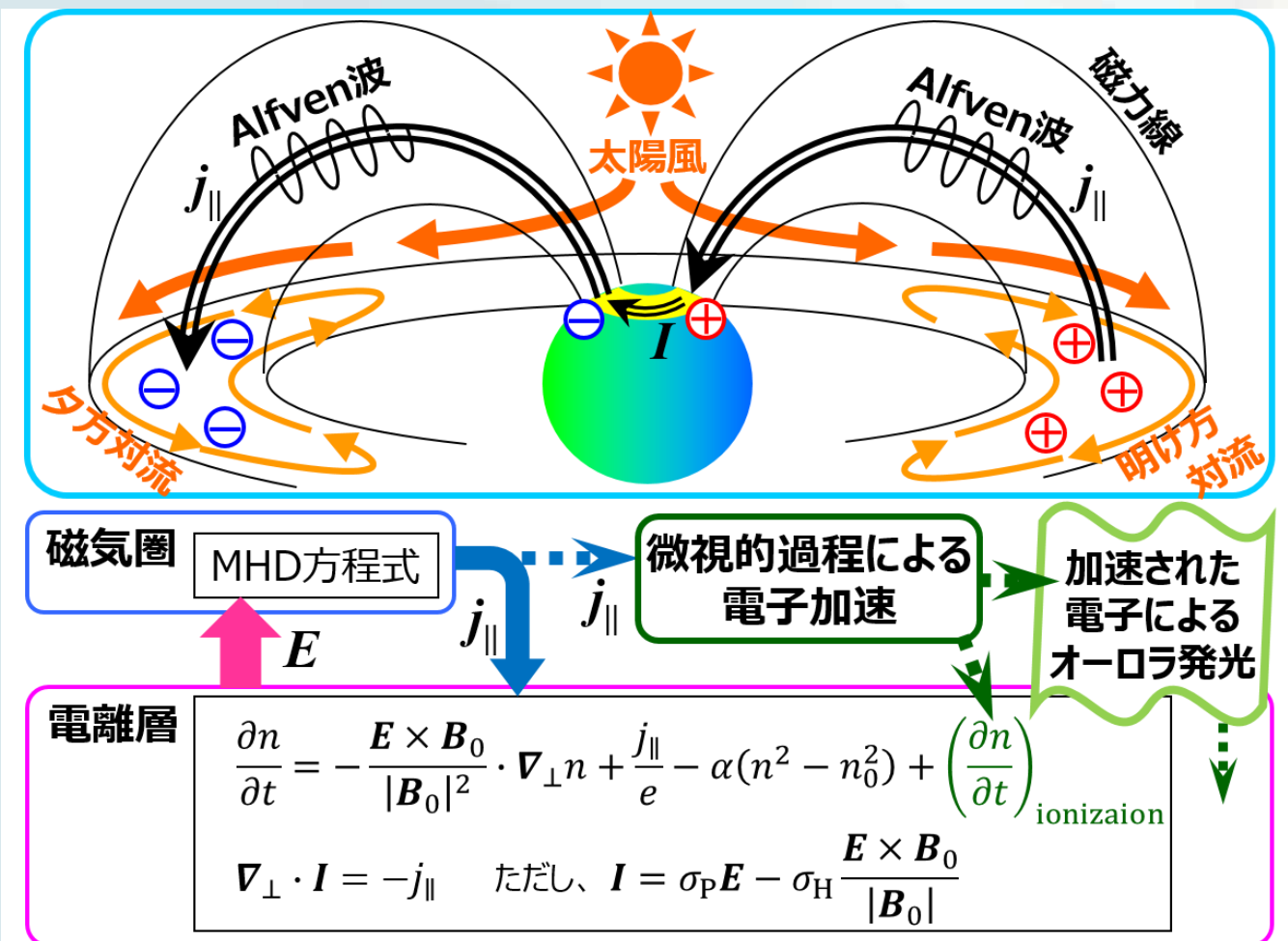
(Maeyama+ '15)

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：

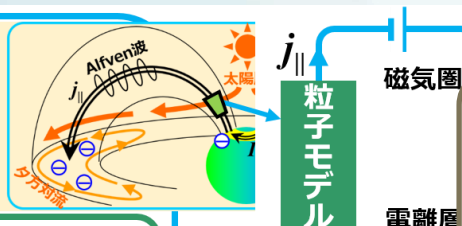
Alfvénフィードバック不安定性*による
アーク状の沿磁力線電流揺動分布の形成



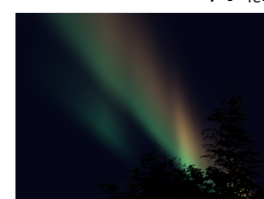
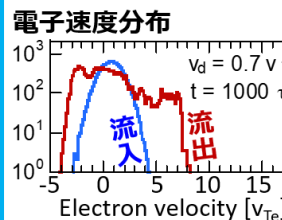
(* Sato, 1978)

磁気圏-電離圏系での階層間相互作用

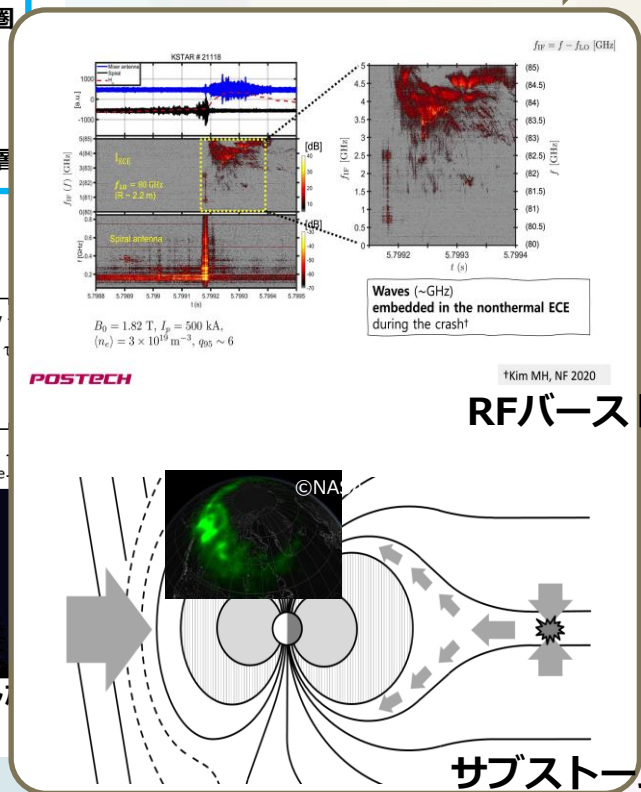
マクロ-ミクロ階層連結



シミュレーション例:



シミュレーションで再現したオーロラの発光



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.

(* Sato, 1978)

活動

連絡先：meta-HD@nifs.ac.jp

- 多様化した階層の概念を、「メタ階層」として捉えなおすことで、新たな展開を図る
- プラズマ・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る
- NIFSは自然科学における「階層」の研究を推進してきた背景があり、今後も他分野と連携して、相互の進展を遂げることができる
- 本テーマがユニット間連携のハブの一つとなり、分野内外の連携を促す
- スタイル：
 - 「階層」を鍵に、自身の現在の研究課題を捉えなおしたい人
 - 「階層」を鍵に、理論・シミュレーションの方法論を展開したい人
 - 「階層」を鍵に、実験の新しい測定や解析、解釈について探求したい人
 - 「階層」を鍵に、プラズマ核融合と他分野の連携研究を展開したい人
 - 「階層」を鍵に、、、

さあ、一緒に階層の研究をやりましょう！