

# メタ階層ダイナミクス

## メタ階層ダイナミクス ユニット

核融合科学研究所



# ユニットメンバー

- 伊藤篤史 プラズマ-物質相互作用シミュレーション
- 伊神弘恵 非線形過程を考慮した波動加熱物理
- 笠原寛史 高周波波動加熱・非線形波動励起減衰機構の解明
- 川手朋子 プラズマ分光学、天体プラズマ
- 河村学思 プラズマ輸送モデリング
- 後藤基志 プラズマ分光学
- 坂本隆一 プラズマ-物質相互作用の実験研究
- 関哲夫 高周波波動の励起・伝播・吸収、波動粒子相互作用
- 高山有道 プラズマ-物質相互作用、計算機利用技術、情報セキュリティ
- 登田慎一郎 高温トロイダルプラズマにおける物理学
- 永岡賢一 位相空間ダイナミクスに注目した非線形過程の実験研究
- 仲田資季 プラズマ物理学
- 沼波政倫 プラズマ乱流シミュレーション, 理論物理
- 長谷川裕記 劇的変容現象の連結階層シミュレーション
- 松岡清吉 非軸対称磁場閉じ込めプラズマの輸送
- 加藤雄人 (東北大)
- 小林進二 (京都大)
- 前山伸也 (名古屋大)
- 佐藤直木 (東京大)
- 佐野孝好 (大阪大)
- 石黒静児 (NIFS名誉教授)

研究戦略会議  
所外メンバー



# 自然界における様々な構造

## ■ 自然界の構造

### ■ ウロボロスの蛇

宇宙地平線 ( $> 10^{28}$  cm) から大統一理論 (GUT,  $10^{-30}$  cm) を蛇の頭部から尻尾までを用いて表現。

### ■ 物質の“スケール”

クォーク / 核子 / 原子 / 分子 / 結晶 / 生物個体 / 恒星 / 星雲 / 銀河 ...

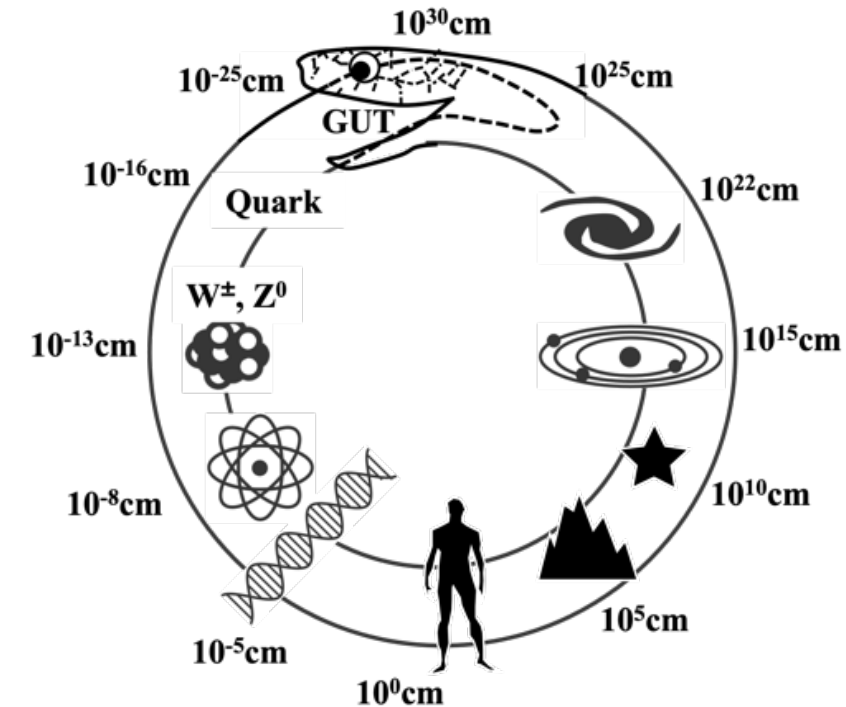
### ■ 生物の“機能”

蛋白質 / 細胞膜 / 細胞 / 組織 / 生物個体 / 種 / 生態系 ...

### ■ 物理学の“モデル (描像)”

粒子モデル / 流体モデル / 乱流モデル / 泡モデル ...

Cosmic Uroboros (Sheldon Glashow, 1957)



(cf.) 中国語 “阶层[jiēcéng]” (⇔ 日本語 “階層”)

阶 : Hierarchy, レベル

层 : Layer, 項目, 段階

# 核融合科学を取り巻く課題

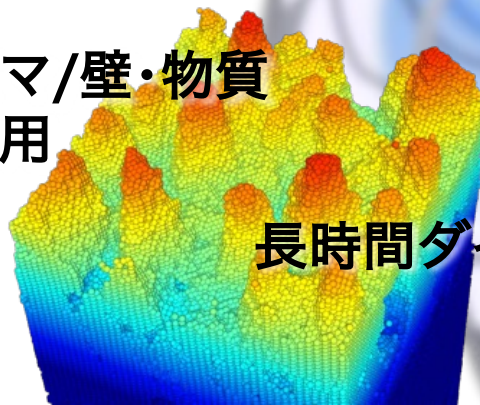
マイクロ-メゾ-マクロ  
スケール構造形成

非等方分布関数

有限スケール

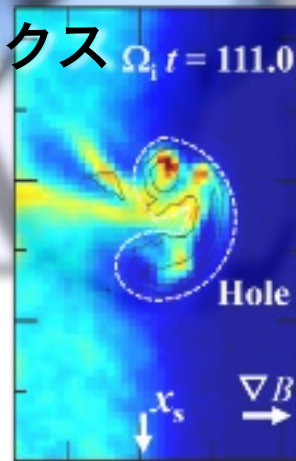
プラズマ分光

プラズマ/壁・物質  
相互作用

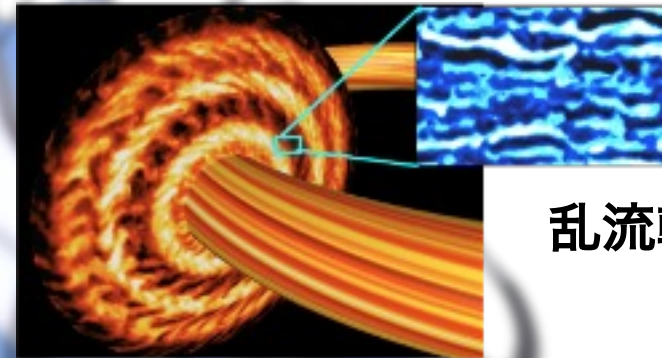


長時間ダイナミクス  $\Omega_i t = 111.0$

原子・分子過程



乱流渦と磁場の自己組織化



乱流輸送予測

位相空間ダイナミクス

(計画書より)

波動加熱

非線形波動

波動粒子相互作用

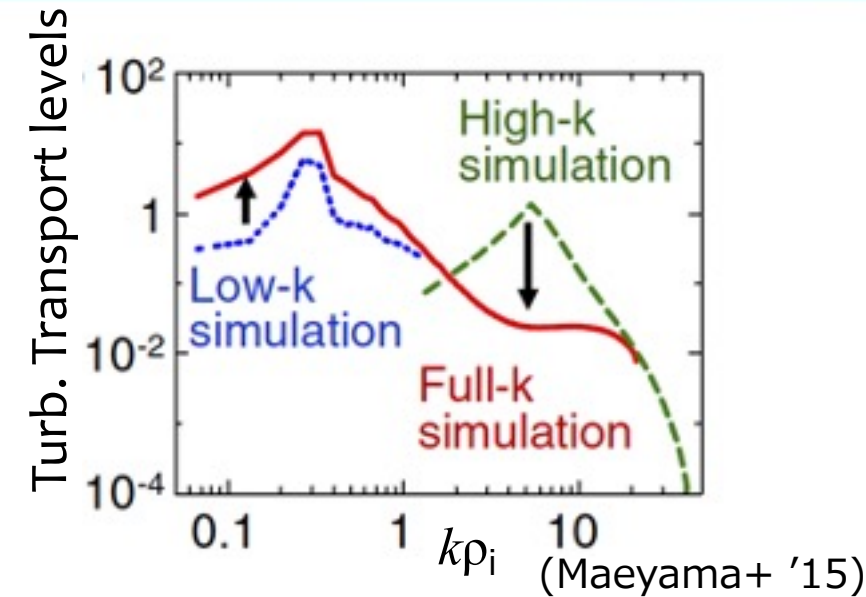
劇的変容現象

1. 階層性が内在する乱流・輸送の局所・大域的現象の解明
2. 非等方性速度分布下における電磁場・原子分子のエネルギーチャンネル研究
3. 周辺プラズマから物質表面における階層性の追求と複合過程モデリング
4. 多スケールにまたがる階層性から探る物理モデリングと普遍性の探究

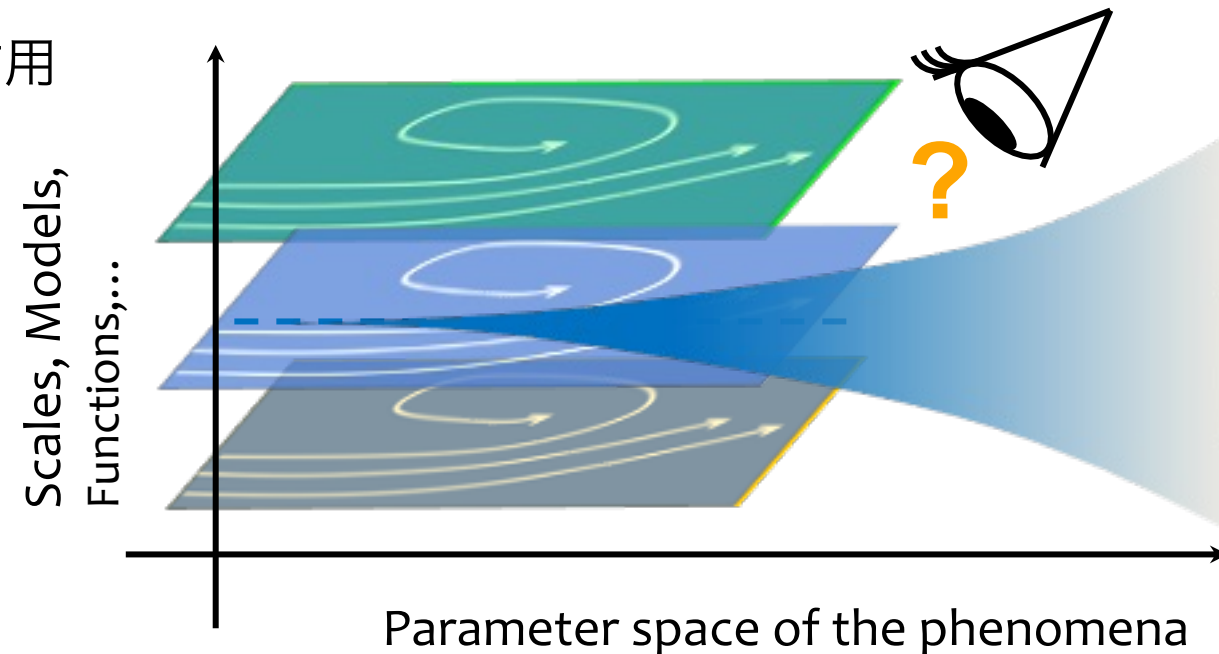
# 分離・接続による理解と課題

- 要素の分離と結合は常に有効か？
  - 実験・数値研究の進展に伴い、要素の分離と結合では上手く捉えられない現象が顕在化。
    - Ex. プラズマ乱流のマルチスケール性の表出 / 非表出
  - 明確に分離された要素による説明が難しい。
    - 各要素を規定する構造が不明瞭に。
  - 各要素・モデル・階層の間にはたらく相互作用がさらに複雑化。
- 高次（メタな）視点の必要性
  - 要素・モデル・階層を伴うダイナミクスを **メタな視点** から議論

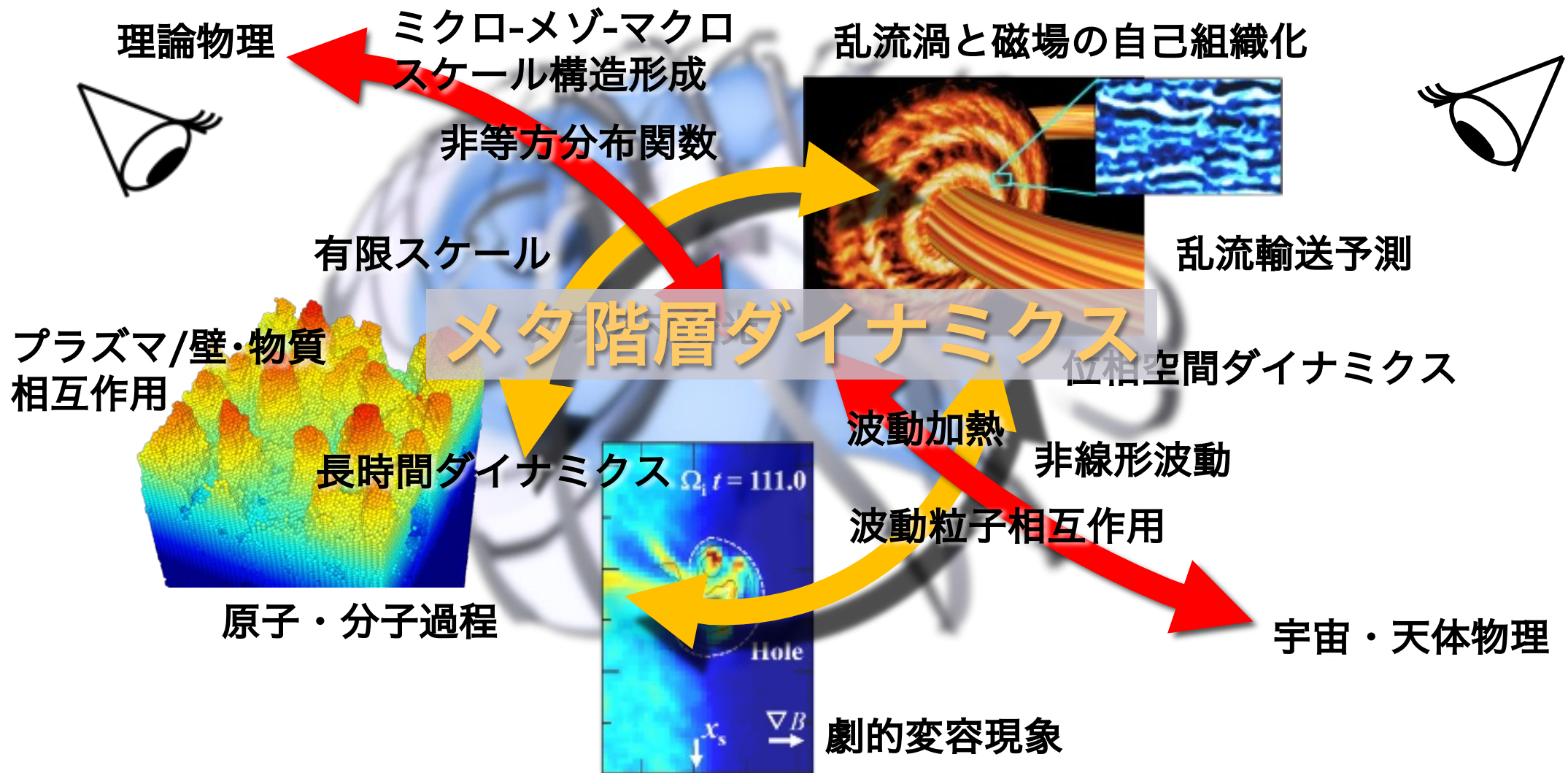
“**Meta hierarchy dynamics**”



プラズマ乱流のマルチスケール性 (Maeyama+ '15)



# 核融合科学を取り巻く課題



# 核融合科学を取り巻く課題



# ユニットメンバーのScope & Interests





伊藤 篤史

Atsushi M. ITO

(プラズマ-物質相互作用  
シミュレーション)

### Scope & Interests

- **プラズマ-物質界面における階層的現象の理解**  
プラズマが物質表面に引き起こすミクロな表面変化を分子シミュレーションを用いて研究する。量子化学まで考慮が必要な原子・分子・固体表面と、マクロな記述に支配されるプラズマとの間の階層性に興味がある。
- **電子の量子ダイナミクス**  
イオンが固体との相互作用で中性化する過程など、量子力学的な電子ダイナミクスとプラズマの関連を探求する。

Heプラズマ誘起Wファズ形成



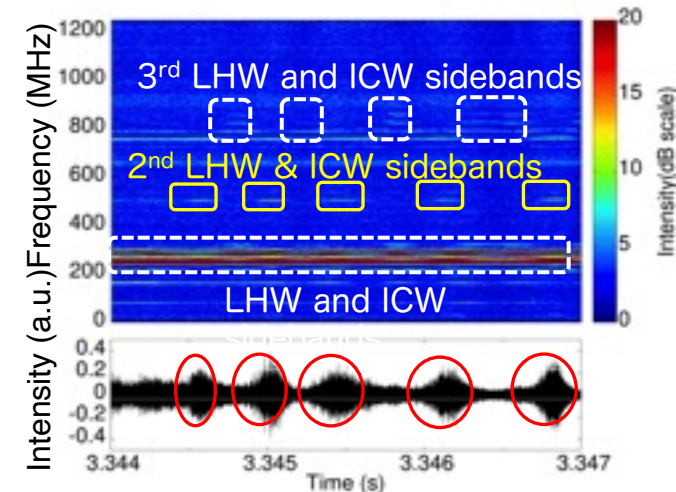
伊神 弘恵

Hiroe Igami

(非線形過程を考慮した  
波動加熱物理)

### Scope & Interests

- **非熱プラズマの波動加熱**：大電力外来波動場、高エネルギー粒子注入がある系での、波動-粒子/波動-波動相互作用を考慮したプラズマ加熱機構の解明に取り組む
- **波動伝播が媒介する突発現象発現機構**：局所的プラズマパラメータ変化が、波動伝播を介して、ほぼ瞬時に離れた領域で発生する広帯域な突発的波動放射に与える影響を探究する



突発的放射の強度/周波数帯の入れ替わり



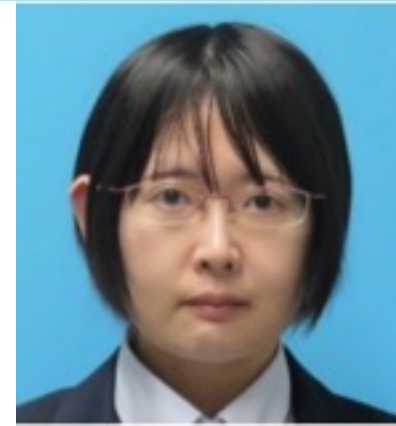
## 笠原 寛史

Hiroshi KASAHARA

(高周波波動加熱・非線形波動  
励起減衰機構の解明)

### Scope & Interests

- **非等方速度分布下での波動-粒子相互作用研究**  
高周波などにより強制的に歪ませた速度分布関数により引き起こされる非線形な波動励起・吸収に関するエネルギーチャンネル研究に挑戦し、マルチ物理スケールが介在する波動-粒子相互の物理機構の理解の進展を目指す。
- **プラズマ科学からの学際的研究**  
集団現象の宝庫で非等方な速度分布が達成できるプラズマにおけるボルツマン方程式を考慮した波動分散関係の定式化を目指し、マルチ物理スケールが介在する複雑系の取り扱いに関する共通物理・機構を議論する。



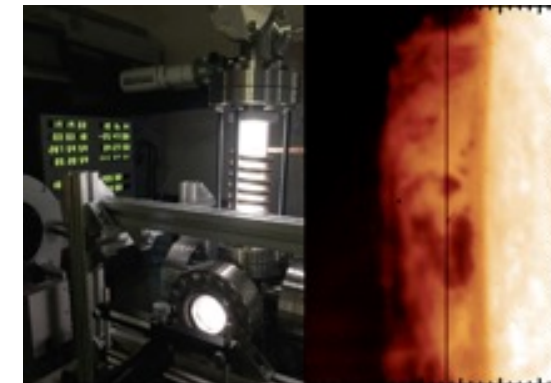
## 川手 朋子

Tomoko KAWATE

(プラズマ分光学、天体プラズマ)

### Scope & Interests

- **多粒子種プラズマの空間・エネルギー密度分布**  
主に分光偏光計測手法による、電磁相互作用・輻射輸送を介したイオン・電子空間密度分布とエネルギー状態分布形成過程、(準)安定状態への緩和過程の研究
- **プラズマ分光偏光診断**  
原子・分子の空間・エネルギー分布を利用した分光偏光計測によるプラズマ診断手法構築





河村 学思  
Gakushi KAWAMURA  
(プラズマ輸送モデリング)

### Scope & Interests

- **プラズマと物質の混交が形成する階層の研究**  
プラズマと中性物質が共存する系では両者の混交が生じる。分子・原子・イオンやそれらの励起状態の違いを含む多数の成分が時空間上で特徴的な階層を形成する。こういった物理過程の理解と制御を目指した研究を行う。
- **複合的な状態変化を記述する数値手法の開発**  
粒子と流体といった記述法を複合する階層にどう適応させるか、原子分子に用いられる記述法をどう取り入れるかなど、数値モデリングの視点から複合的な系の記述手法の開発を行う。

非接触プラズマ, プラズマ-壁相互作用, シース, ダイバータ

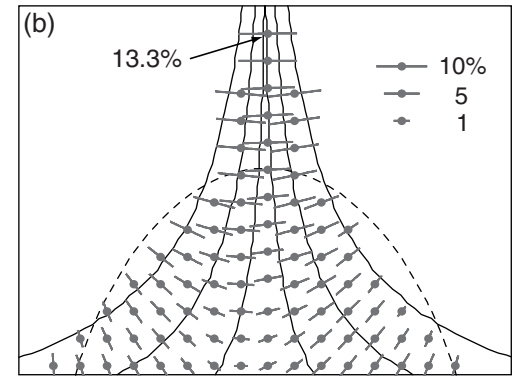


後藤 基志  
Motoshi GOTO  
(プラズマ分光学)

### Scope & Interests

- **偏光分光に基づく非等方性の研究**

非等方な電子衝突で励起した原子からの発光線は偏光する。計測された偏光特性からプラズマの非等方性を定量的に明らかにし、非等方性がプラズマ特性に与える影響を調べる。



- **プラズマ飽和吸収分光法の確立**

レーザーを用いてプラズマのイオンの速度分布関数に摂動を与え、原子モデルを用いた解析によりイオンの速度空間輸送特性を明らかにする。



坂本 隆一  
Ryuichi SAKAMOTO  
(プラズマ-物質相互作用  
の実験研究)

### Scope & Interests

プラズマと物質の相互作用によって生じる、密度や温度の時空間的な勾配下における、物質の輸送と構造形成

- **プラズマ中における固体水素の溶発と均質化**  
固体水素の溶発による高密度プラズモイドの形成と、プラズモイドの背景プラズマへの均質化過程.時空間スケールが異なる2つの素過程間の相互作用の理解.
- **非平衡環境下における微細構造形成**  
固体表面への高粒子束プラズマ照射によって引き起こされる非平衡環境下で生じる照射損傷と微細構造形成, さらに微細構造形成が引き起こすグローバルな材料特性変化といった, 時空間スケールが異なる素過程のダイナミックな相互作用の理解.



関 哲夫  
Tetsuo SEKI  
(高周波波動の励起・伝播・  
吸収、波動粒子相互作用)

### Scope & Interests

- **波動粒子相互作用における階層ダイナミクス的アプローチによる理解**  
磁化プラズマ中における波動の励起、伝播及び吸収について、波動の動きや個々の粒子の運動、集団としてのプラズマの挙動等を階層を俯瞰した視点から捉え直すことを試みる。特に、波動粒子共鳴による波動の減衰や生成及び粒子の分布変化と、それが再び共鳴相互作用に及ぼす過程に興味がある。
- **共鳴相互作用の学際的研究**  
共鳴相互作用でのアプローチを波動粒子以外にも応用し、共鳴的・突発的に起こる現象についての理解を試みる。



## 高山 有道

Arimichi TAKAYAMA

(プラズマ-物質相互作用、  
計算機利用技術、  
情報セキュリティ)

### Scope & Interests

- **分子シミュレーションによる核融合炉材料研究**  
密度汎関数理論(DFT)に基づく第一原理計算、分子動力学法(MD)、二体衝突近似モデル(BCA)といった各種分子シミュレーション技法を用いて、核融合炉材料の内部や表面で起こる基礎反応過程を理解する。  
**計算技法・計算モデル・情報処理技術の探求**  
シミュレーション研究のための計算技法や計算モデル、大規模データの効率的な操作技術、セキュリティと利便性とのバランスのとれたITシステムといった諸課題について、実装を通じて探求する。

Low electron-density iso-surfaces for 6He-H cluster in tungsten  
[A.T., A.M.I., *et al.*, JNM 463 (2015) 355.]



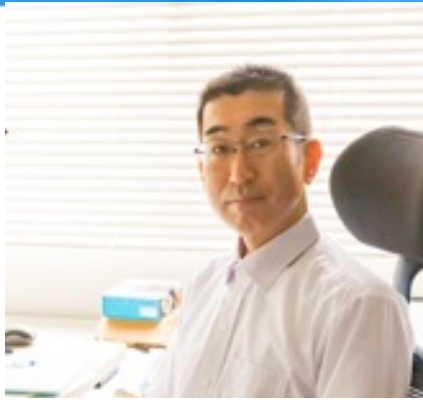
## 登田慎一郎

Shinichiro TODA

(高温トロイダルプラズマ  
における物理学)

### Scope & Interests

- **トロイダル装置におけるジャイロ運動論解析結果に基づくプラズマプロファイルの予測**  
局所ジャイロ運動解析  
+ 統合輸送シミュレーション  
→ 加熱入力が一定の場合、スケール分離が可能。  
簡約化モデルの構築 (TEM/ITGモード)
- **粒子とエネルギー入力の時間変化に対する応答の研究**  
スケール分離ができなくなる？



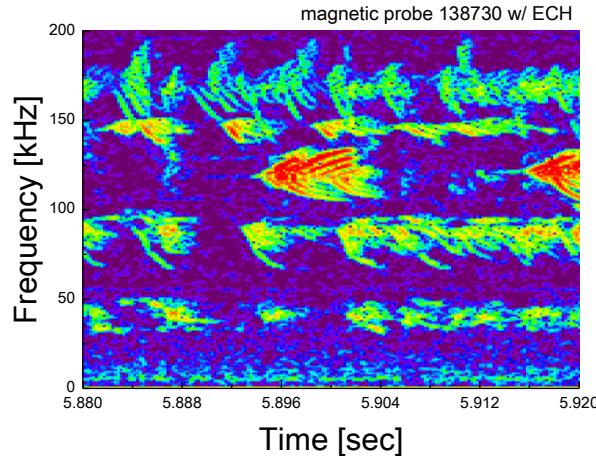
永岡 賢一

Kenichi NAGAOKA

(位相空間ダイナミクスに注目した非線形過程の実験研究)

### Scope & Interests

- **波動粒子相互作用の位相空間ダイナミクス**  
プラズマ中の不安定性励起・非線形飽和と輸送現象を位相空間のダイナミクスとして理解しその制御へ挑戦する。
- **乱流を利用した機能制御への挑戦**  
非平衡開放系の乱流は、巨視的構造形成や機能発現により系の性質を大きく変える。この乱流特性を機能として活用し、粒子輸送制御などへ挑戦する。



仲田 資季

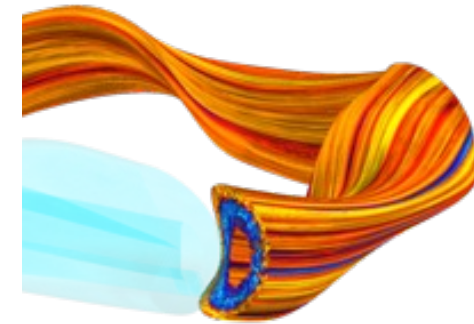
Motoki NAKATA

(プラズマ物理学)

### Scope & Interests

- **「幾何 x ゆらぎ・流動 x 機能創発」の研究**

多成分・複スケール乱流プラズマといった、幾何構造を伴う複雑流動現象の自己組織化や機能創発を活性化するメカニズムを、数理・情報・物理の融合的アプローチで探究する。



Zonal Flowの活性化

- **プラズマ乱流から展開する融合研究**
  - 流体計測や天体観測などにおける観測困難な乱流場構造を推定する深層学習モデリング
  - 生物リズム・ロコモーションの遷移を題材にした進化生物学/動物行動学との融合研究



# 沼波 政倫

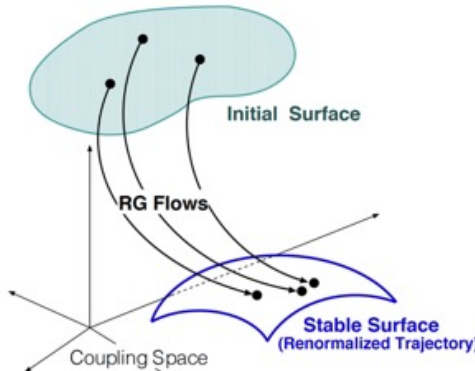
Masanori NUNAMI

(プラズマ乱流シミュレーション,  
理論物理)

## Scope & Interests

### 繰り込み群による階層ダイナミクスの研究

繰り込み群(RG)と安定多様体のアプローチから物理現象の階層構造の記述に挑戦する。特に、有限スケールを持つRG流れに着目し、メタ的視点からプラズマ乱流等の複雑現象を司る物理の抽出を目指す。



### プラズマ科学からの学際的研究

粒子法等のプラズマシミュレーション手法をプラズマ以外の系にも応用し、原理・手法の観点から複雑系における一般的性質を議論する。



# 長谷川 裕記

Hiroki HASEGAWA

(劇的変容現象の連結階層  
シミュレーション)

## Scope & Interests

### 劇的変容現象の連結階層シミュレーション

自然界のエネルギー循環に関わる様々な劇的変容現象(地球周辺や地球内部、実験室プラズマなど)を対象に、マクロ-ミクロ連結階層



(MMI)法を基盤とした斬新なシミュレーションアルゴリズムを開発し、その機構解明を通してマクロな系に現れる劇的変容過程の体系化をめざす。特に、マクロ-ミクロ層間の相互作用とその時空間領域の抽出、それらのモデリングなどが、大きな課題となる。

オーロラMMIシミュレーションで得られたオーロラ発光の可視化例。ミクロ層の計算によりオーロラ電子のエネルギー分布がわかるため、発光の計算が可能となる。



# 松岡 清吉

## Seikichi MATSUOKA

(非軸対称磁場閉じ込め  
プラズマの輸送)

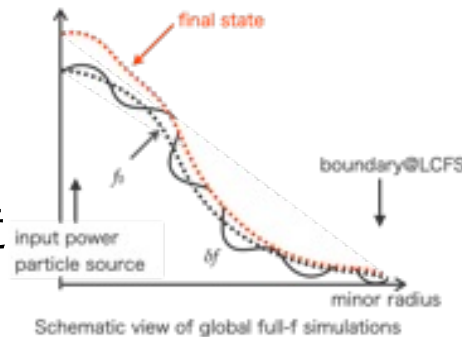
### Scope & Interests

- **第一原理に基づく大域的輸送・構造形成**

3次元磁場プラズマを対象とした大域的 *full-f* ジヤイロ運動論シミュレーション研究により、複雑磁場の幾何上でミクロな乱流とマクロな構造形成の振る舞いを探求する。

- **カオス力学としての3次元磁場**

明確な保存量のない3次元トーラス磁場における秩序的層構造の破れを、カオス力学的アプローチにより定量化する。



第一原理的な  
大域シミュレーションの模式図





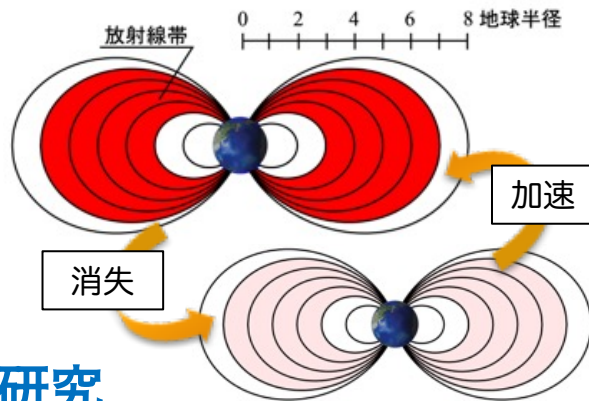
加藤 雄人  
Yuto KATOH

(東北大)

### Scope & Interests

#### • 磁気圏でのプラズマ波動粒子相互作用

放射線帯の消失・形成過程に代表される、異なるエネルギー階層・スケール階層の要素が結合し影響し合って推移する現象を理解し、その中の波動粒子相互作用の役割を究明する。



#### • プラズマ科学との学際的研究

異なるエネルギー階層の粒子間での波動を介した結合など、磁気圏と実験室に共通する現象を学際的に理解する。



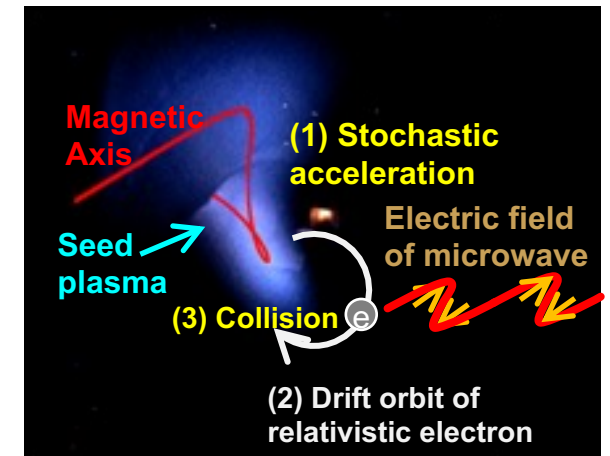
小林 進二  
Shinji KOBAYASHI

(京都大)

### Scope & Interests

#### • 宇宙・天体における粒子加速現象の実験室模擬

宇宙・天体プラズマで観測される統計加速現象を、磁場閉じ込めプラズマで模擬できる環境を構築することで、加速機構の基礎過程を理解するとともに、統計性・カオス性を考慮した実空間・速度空間の分布関数非線形成長・飽和現象の一般的な理解につなげる。





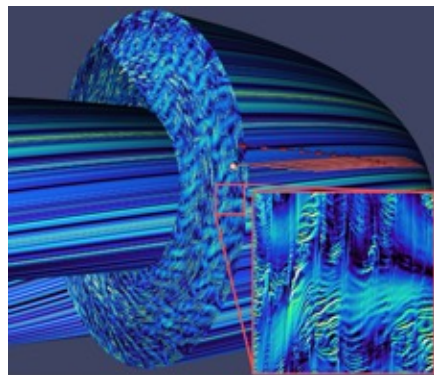
前山 伸也  
Shinya MAEYAMA

(名古屋大)

### Scope & Interests

- プラズマ乱流マルチスケール相互作用の研究

大規模並列シミュレーション手法の開発から物理機構の解析まで、新たな手法を開拓しつつ、複数階層の物理現象が関与するプラズマ乱流相互作用の持つ普遍性を解き明かす。



- 非線形相互作用解析・モデリング手法の研究

乱流の三波結合解析、非平衡統計物理の射影演算子法、マルチフィデリティモデリングなど、多様な方法論をプラズマ物理学の観点から応用・拡張し、方法論を軸として異分野との共通理解を探る



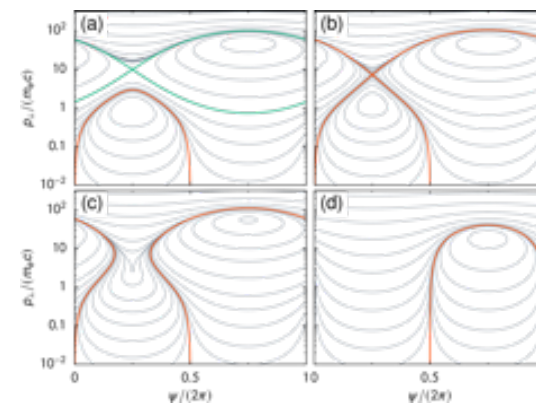
佐野 孝好  
Takayoshi SANO

(大阪大学レーザー科学研究所)

### Scope & Interests

- 極限環境での波動粒子相互作用の理解と実証

大振幅の電磁波によるプラズマ加熱・粒子加速は、運動論的スケールと流体スケールが複雑に絡み合った現象である。多階層の数値シミュレーションと実験の両面からその理解に迫る。



電磁波中の電子軌道相転移の解析

- レーザープラズマと天文学の融合

大出力レーザーの創出する高エネルギー密度状態を用いて、実験室における天体プラズマ研究を展開する。



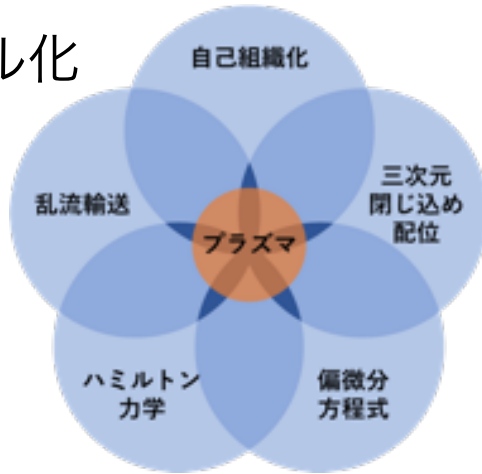
佐藤 直木  
Naoki SATO

(東京大)

### Scope & Interests

プラズマ現象を出発点とする物理と数学を跨ぐ未解決数理課題に関する理論研究

- 階層性を持つプラズマにおける自己組織化現象の解明
- プラズマ乱流輸送のモデル化
- 3次元閉じ込め配位の存在問題
- ハミルトン力学
- 連続体を記述する偏微分方程式の解析



石黒 静児  
Seiji ISHIGURO

(NIFS名誉教授)

### Scope & Interests

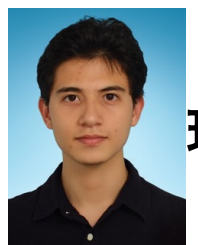
#### • 劇的変容現象の連結階層シミュレーション

自然界のエネルギー循環に関わる様々な劇的変容現象を対象に、マクロ-ミクロ連結階層 (MMI) 法を基盤とした斬新なシミュレーションアルゴリズムを開発し、その機構解明を通してマクロな系に現れる劇的変容過程の体系化をめざす。特に、これらの研究を飛躍させる革命的なコンピュータ・アーキテクチャーと得られたデータの表現法の開拓をおこなう。

Figure 9 in T. Sato,  
J. Phys.: Conf. Ser. **16**,  
310 (2005)

MMI Simulator のコンセプト  
例。T. Sato, J. Phys.:  
Conf. Ser. **16**, 310  
(2005) より。

# メタ階層ダイナミクス ユニット



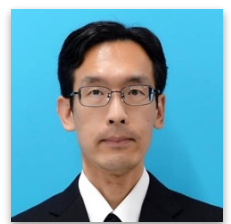
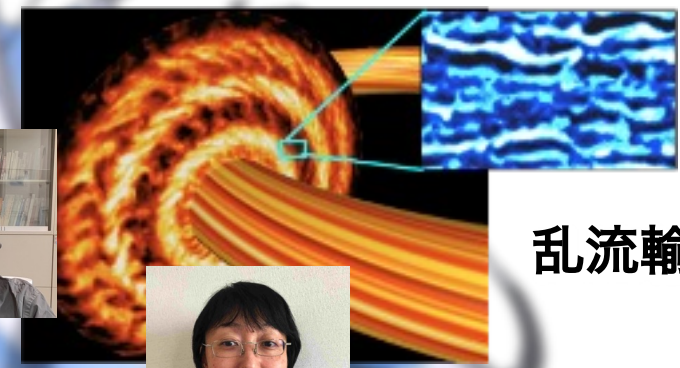
理論物理

マイクロ-メゾ-マクロ  
スケール構造形成

乱流渦と磁場の自己組織化



非等方分布関数



有限スケール

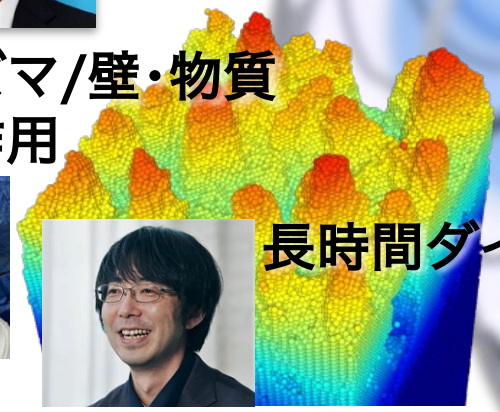
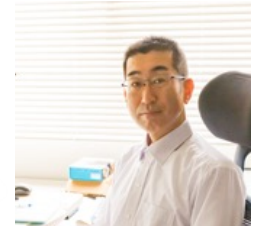


乱流輸送予測

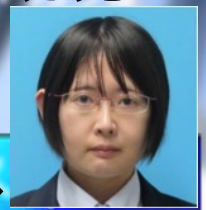
プラズマ/壁・物質  
相互作用

プラズマ分光

位相空間ダイナミクス



長時間ダイナミクス

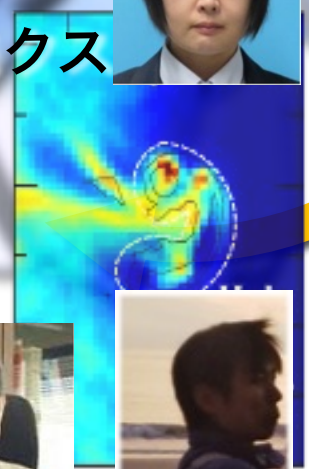


波動加熱

非線形波動



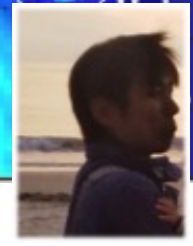
原子・分子過程



波動粒子相互作用



宇宙・天体物理



劇的変容現象



## これからのユニット活動

# これからのユニット活動

## ■ ユニットセミナー

- 研究セミナーを定期開催。
- 随時、“拡大セミナー”を開催し、所外・ユニット間での研究を発信。

## ■ 研究会

- “スタートアップ研究会”を近々に開催予定。
- メンバーのユニットにおける研究に関して、3日間程度で紹介・議論。

## ■ 常設ポスターセッション

- ユニットサロン(旧主幹室)にて、「常設ポスターセッション」を所内オープンで実施。
- 各自の研究進捗・課題を恒常的に共有。

## ■ 定期昼食会 / お茶会

- 研究動向・各自近況の共有、研究シーズのブレインストーミングを毎週開催。

# これからのユニット活動

## ■ 様々なチャンネルによるユニット間連携

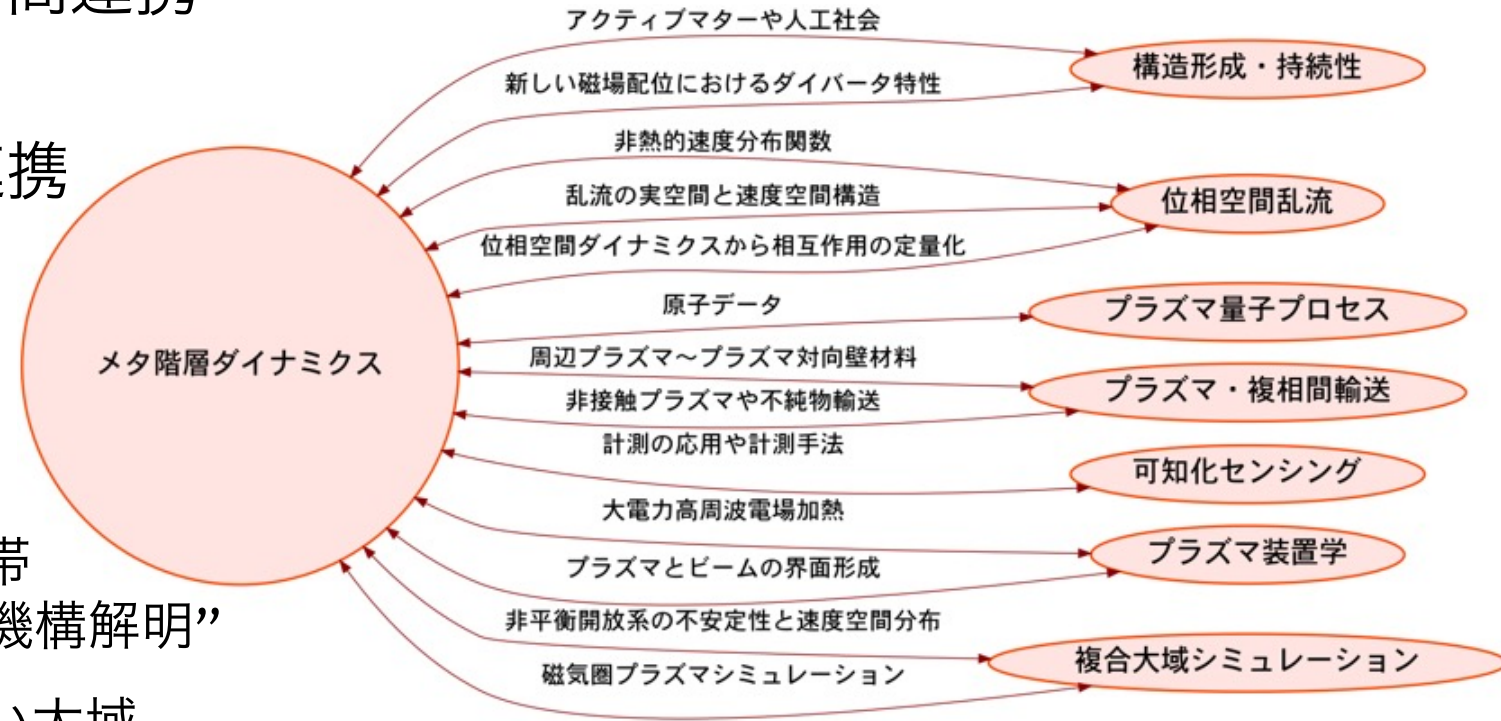
## ■ 新たにスタートしたユニット間連携

### ■ w/ 位相空間乱流ユニット

- ・ ”オーロラ観測プロジェクト”

### ■ w/ 複合大域シミュレーションユニット

- ・ ”核融合プラズマにおける広周波数帯電磁波放射（非定常、突発...）の機構解明”
- ・ ”粒子シミュレーションでは扱えない大域効果を取り入れるための手法開発”  
（波動伝播の大域的数値解析との連結など）



# メタ階層ダイナミクス ユニット

