

# ユニットテーマ合同会合

#2: プラズマの非平衡・非等方性研究 (後藤基志)

#3: 数理共創非線形プラズマ研究 (仲田資季)

#7: 制御可能な複雑系に潜む普遍性・特異性の研究 (沼波政倫)

#13: 位相空間力学による非平衡・非線形現象の研究 (永岡賢一)

#26: 多様なプラズマ現象を解析するための可視化表現法の研究とその普遍化 (大谷寛明)

#28: ギャップドスケールの科学/マイスタールール抽出 (伊藤篤史)

2021年7月20日@NIFS(online)

# アウトライン

- ・ユニット構築提案の紹介

  - ユニット仮称

  - ユニットテーマ

  - 研究概要(5つの軸)

  - 研究手法(研究プラットフォーム)

  - ユニット研究の活動ポリシー

- ・ディスカッション

# ユニット仮称

## 創発と消失の科学ユニット エマージェンス Emergence & エバネッセンス Evanescence Science

### ・創発(emergence)とは

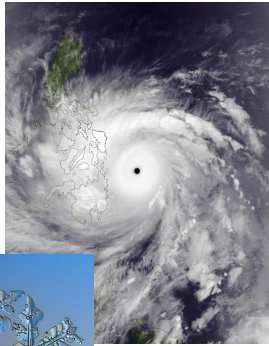
「部分の性質の単純な総和にとどまらない新たな性質が、全体として現れること」

- 元々は生物学の概念。物理・化学・情報科学・社会学・哲学などに広く波及。
- 例: 台風、雪の結晶、蟻塚、拍手の同期、生命・知能の創発 (究極的) など
- 広い対象を包括する考え方であるが、物理の概念としては曖昧さも残る。

### ・物理系としての”創発と消失” ※ここでの便宜上の定義

「系を構成している集団の要素間のマイクロな相互作用の結果として、構造・機能・秩序・運動などの特異な性質がマクロに発現、あるいは、不可逆に崩壊 / 緩和する現象」

- 例: 相転移・超流動・超伝導・自己組織化・パターン形成・同期・励振など。
- 創発した構造が消失する機構もあれば、創発の際に消失される機構もある。
- 核融合プラズマは (理論でも実験でも) 『創発と消失』のまさに坩堝。



台風

雪の結晶



wikipediaより

蟻塚



**“More is different”  
by P. W. Anderson 72’**

# 家族に教えたい「そうはつ」のフレーバー？

## 顔つき

”ある人の顔を構成する目、口、鼻などの各部分についてどれほど詳しい情報を持っていても、その人固有の「顔つき」は分かりません。顔つきはこれらの要素の位置関係から生まれる新しい性質であり、要素自体の知識に含まれないサムシングニューだからです。”

蔵本由紀「非線形科学」(集英社新書) p19から引用 & 一部表現の置き換え

## 『スイミー』 絵本作家レオ・レオニの作品

### → アクティブマター集団の創発のイメージ

\*\*絵本ではスイミー(黒い魚)がリーダー的役割のもと大規模構造を形成したが、実際のアクティブマターはリーダー的存在(中枢)が無くとも構造が創発される。



# ユニットテーマ

・プラズマ・宇宙・生命・生態系・社会といった自然界をかたちづくる本質的なメカニズムである『**創発と消失の原理**』を探究し、その過程から創発系に対する新しいマクロ描像 (粗視化/縮約モデルの構築)を導くことを目指す。

・場で閉じ込められた極限不均一・非等方系であり、時間・実空間に加えて速度空間にも自由度が広がる核融合プラズマの特徴を活かした『**複数の軸**』で研究を展開し、創発と消失の科学を原点に据えた”研究空間”を張る。

## 1. 揺らぎ駆動創発と消失

→ 乱流場の数理解造で創発の活性化機構に迫る“Beyond Fourier分解”

## 2. 速度空間駆動創発と消失

→ 分布関数構造や偏光分光で機構に迫る“Beyond moment展開”

## 3. 長時間駆動創発と消失

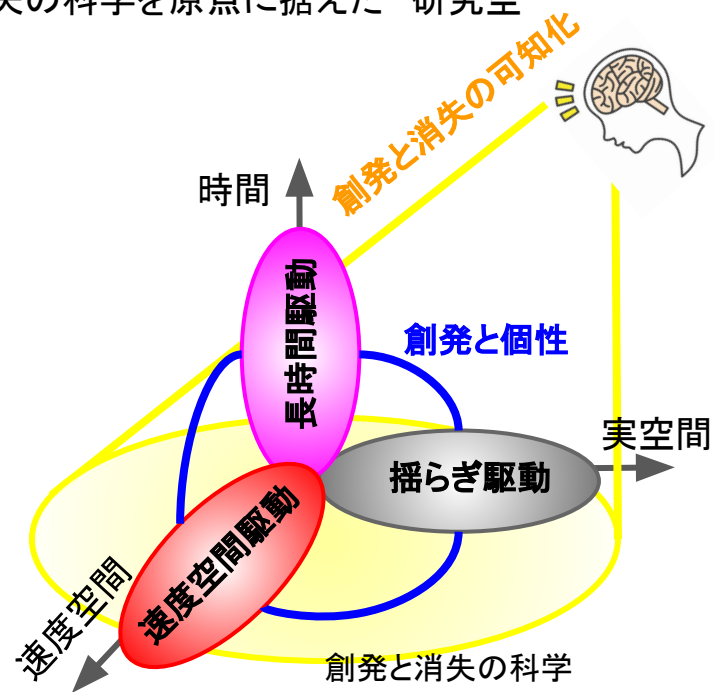
→ ギャップスケールシミュレーションで機構に迫る“Beyond the time”

## 4. 創発と個性

→ 生成消滅する個性で創発機構に迫る“Beyond 散逸機構”

## 5. 創発と消失の可知化

→ 高次元データから機構やイベントを知覚化する“Beyond 可視化”



# 研究概要 1. 揺らぎ駆動創発と消失

乱流場の数理構造で創発の活性化機構に迫る “Beyond Fourier分解”

**研究例1 創発としてのZonal Flow形成とその活性化機構や消失機構磁場の幾何構造から駆動)**

- 非凸非線形最適化問題+大規模シミュレーションとしての定式化
- 大自由度・非線形の揺らぎが生む高次元非線形関数の大域描写(ランドスケープ)やその地形(トポグラフィ)を数理・情報科学的手法を用いて分析・定量化

**研究例2 創発としての乱流の大域伝搬、局在化、構造同期**

- 揺らぎが雪崩的に伝搬して拡がる現象、逆にある部分に局在化する現象、渦が流れ場に捕獲される現象などに対して、幾何学的特徴やパターン構造に注目した相互作用の定式化や縮約モデルの構築

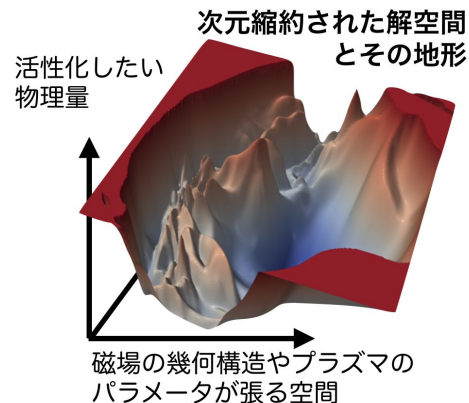
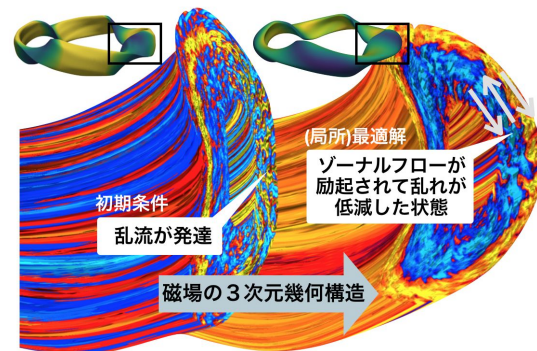
**研究例3 上記の創発を伴った運動論的乱流におけるエントロピー伝達機構の解明とその縮約化**

- フーリエ分解に基づく非線形エントロピー伝達解析[e.g., Nakata+ PoP2012]などの拡張

**乱流場と磁場が織りなす非線形相互作用の数理構造から創発を読み解く！**

数理・情報・物理の共創・融合的共同研究“TREFOIL”(有志)との連携も。

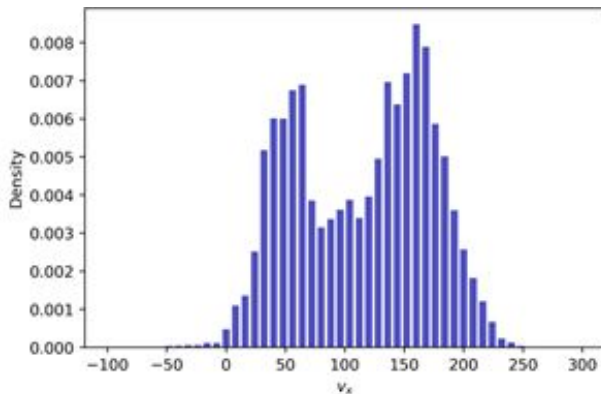
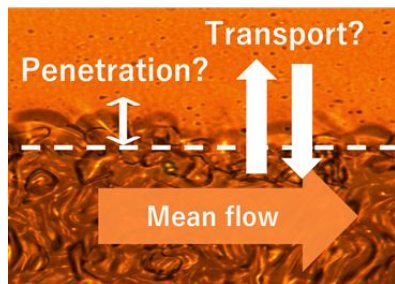
プラズマの高閉じ込め化にも貢献



# 研究概要 2. 速度空間駆動創発と消失

## 分布関数構造や偏光分光で機構に迫る "Beyond moment展開"

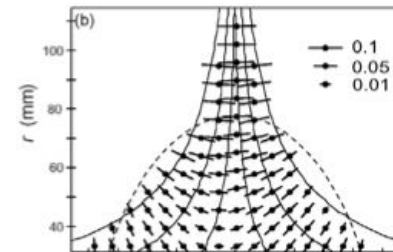
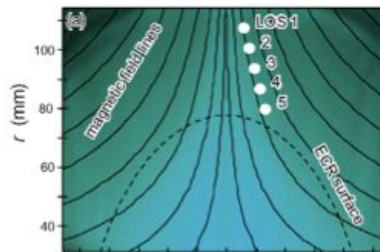
乱流中の構造形成を速度分布関数の形状から推定



乱流中の流れ場の構造形成に相関する特徴的な速度分布関数の形状を観測。ロールパターン形成 $\Rightarrow$ 2山分布関数

$\Rightarrow$ 分布関数の評価から、乱流中の巨視的、メソスケール構造の形成を推定 $\Rightarrow$ 輸送係数などの巨視的物性値推定

速度分布関数非等方性の創発・消失過程



ECRプラズマにおいて求めたヘリウム原子発光線の偏光マップ。磁場方向に偏光が生じており、非等方的EVDF(電子速度分布関数)を示唆。

EVDFの計測  $\Rightarrow$  粒子・運動論シミュレーションを用いた検証及び創発メカニズムの解明  $\Rightarrow$  非等方性消失メカニズムの解明  $\Rightarrow$  プラズマ閉じ込め特性に与える影響の評価



# 研究概要 3. 長時間駆動創発と消失

## ギャップドスケールシミュレーションで機構に迫る “Beyond the Time”

### 例) プラズマ-固体相互作用は、時空間のギャップのある現象

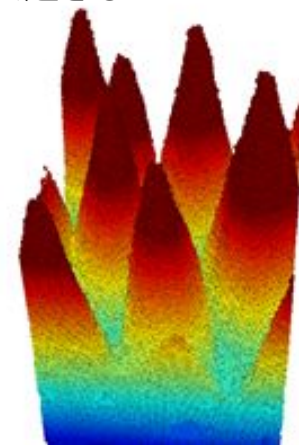
電子顕微鏡で見えるマイクロな構造変化は、人間の活動時間(秒・分・時間)をかけてようやく起きる

- ・マイクロな孤立イベントでも、長時間の積み重ねで集団現象に見える
- ・長時間ゆえの複数のメカニズムの競争が見える

### 時間方向だけを粗視化する計算手法の開発

- ・経過時間をboostする拡張Hamiltonian系MDの開発[Phys.Rev.Res.2019]
- ・動的モンテカルロで無駄なイベントを統計的に省く手法の開発
- ・独自のマルチハイブリッド計算

誰もとどかなかった長時間現象へ到達し創発のメカニズムを明らかにする



Heプラズマ誘起ファズ構造の再現. 全原子で100秒到達



# 研究概要 4. 創発と個性

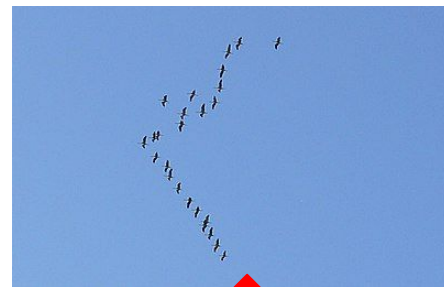
生成消滅する個性で創発機構に迫る “Beyond 散逸機構”

(例) 自律個体運動・共鳴・波動現象と  
プラズマにおける加熱・共鳴・波動現象とのアナロジー

- 渡鳥のV字編隊の群れ形成とプラズマ分布形成とのアナロジー (⇒ プラズマの高効率加熱手法の探索)
- 創発系と個性における「場」の役割とは？
- フロー・構造形成における創発系の共通モデルは何か？
- アクティブマター/プラズマにおける個性から集団現象に至る創発機構とは？
- 繰り込み群の流れの際に消失する自由度と創発する自由度とは？

散逸機構 (例: 統計的散逸による個々の粒子の個性消失) を超えた、創発現象に対する個性の影響を明らかにする

wikipedia



# 研究概要 5. 創発と消失の可知化

高次元データから創発と消失の機構やイベントを知覚化する“Beyond 可視化”

- 多種多様な現象・データから気づきを与える視覚情報へ変換
- 対話的な方法でデータ内部に潜む複雑な(因果)構造を解明
- 気づきを与える・腑に落ちた深い理解を得るための新しいデータ解析法の確立

→可知化(recognizable)・可測化(measurable)・可解化(understandable)

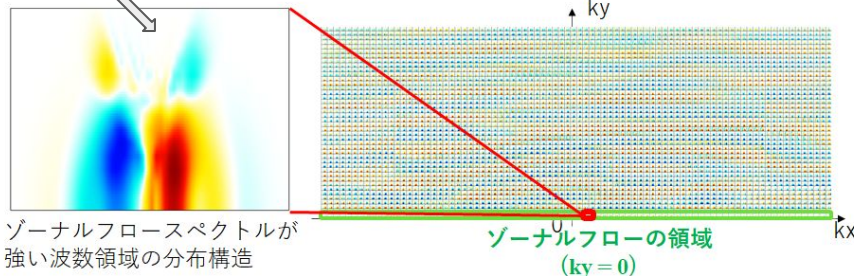
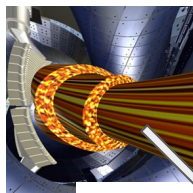
高次元非線形データの可知化表現法

- ・その場可視化
- ・視る可視化からコンピュータビジョンへ
- ・多次元時系列データの解析
- ・離散データからのデータ科学による方程式導出
- ・視覚、聴覚、触覚による対話的VR表現

核融合炉デジタルツイン建設

シミュレーション科学とデータ科学の融合→データの可知化

可視化を含む知的探究プロセスの方法論としての体系化



物理・シミュレーション

高度な実験測定

可知化

数理・統計データ科学

揺らぎ駆動

速度空間駆動

長時間駆動

創発と個性

プラズマ・核融合における創発

自然界の創発現象

シミュレーション・数理

高度な実験測定

可知化・データ科学

他現象とのアナロジー

揺らぎ駆動

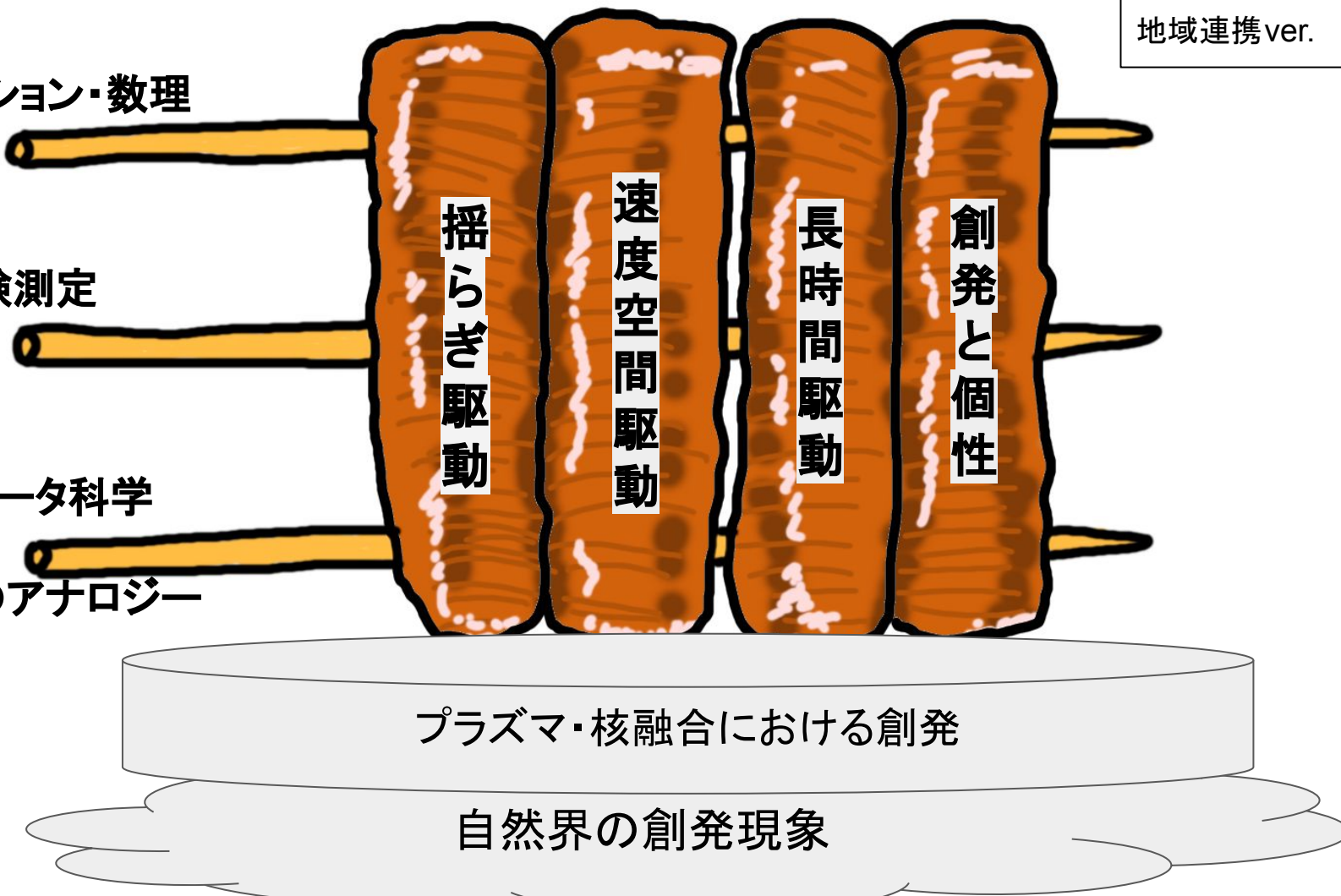
速度空間駆動

長時間駆動

創発と個性

プラズマ・核融合における創発

自然界の創発現象



# プラズマ・核融合における創発と消失

核燃焼とアルファ加熱

分布形成(L-H遷移、ITB形成、不純物ホール、SDC)と崩壊/緩和

Zonal Flowと輸送抑制、自発トロイダル回転、GAM/eGAM、渦形成

乱流/輸送の大域伝搬や局在化、非局所相互作用(シーソー)、ヒステリシス

水素同位体の混合/非混合状態

ボロン混入による不純物の蓄積/非蓄積状態遷移

ディスラプションやMHDバースト

デタッチメント

シーズ形成、カオス磁場構造炉の高自律運転

磁気リコネクション、ソーラーフレア、放射線帯形成、ダイナモ

波動-粒子相互作用と粒子加速・加熱

ダストプラズマ

プラズマ照射化の表面微細構造、fuzz・バブル～低温プラズマ応用まで

照射損傷下の材料自己組織化、長時間メカニカルアロイングによるミクロな粒界制御

# 4ヶ条との照らし合わせ

## 1. 未来志向

- ・創発の起源やその機構・消失の理解は、物理のみならず・生命・宇宙の構造・脳・意識などの問題において本質的である。
- ・この壮大なテーマに対して、核融合プラズマの特徴(時間・実空間・速度空間に広がる自由度)を最大限に活かして、創発と消失の科学という共通焦点を原点に据えながら、複数の軸で研究を展開する。
- ・複数の軸それぞれに新たな方法論の開拓("Beyond ○○")が含まれ、それらを通して相互に結びついた有機的な構造をとる。
- ・これによって個々の創発現象の研究だけからでは見ることができなかった新たな風景を拓き、原理の探究を通して、創発と消失の新しい見方や学術的取り扱いについてプラズマ・核融合分野からモデルケースを確立して発信する。

## 2. 具体目標

- ・プラズマならではの創発と消失とは何か？で複数の研究軸へ展開。
- ・相互に関連し合う複数の軸それぞれに対して具体的な研究課題と挑戦的目標(Beyond ○○形式)で設定している。

## 3. 10年後に輝くテーマ

- ・ここでの新しい方法論などを以て、(複雑系科学・生物科学・社会学など)これまで各論に散らばっていた創発現象の研究に対して、プラズマの創発と消失の観点で改めて科学する潮流をプラズマ・核融合分野にもたらし、かつ、創発と消失を対象として含む他の科学分野との橋を架ける。

## 4. 多様な個人テーマを包摂

- ・複数の研究軸がすでにあるが、これらとは異なる新しい創発と消失の軸を設定し、実験・理論を問わず”研究空間”を拡げていくことができる。

## 研究手法(研究プラットフォーム)

- ・計算機: Plasma Simulator(ペタフロップス級)に加えて、ワークステーション規模の計算機や外部の計算機資源(有償/無償)など、問題に合わせて適切に活用
- ・プラズマスラスタ(磁気ノズル)、HYPER-I、TPD、常伝導LHD、レーザー生成プラズマ、太陽観測、NBTS(Neutral Beam Test Stand)、液晶電気対流乱流、ヘリオトロンJなどの閉じ込め実験装置
- ・ヘッドマウントディスプレイなどのVR装置及びその開発プラットフォーム



# ユニット活動のポリシー

- ・Open Questionであること(対象とする現象が違ってても方法論などはできるだけ教え合って影響を受け合う)
- ・自由な発想・奇抜なアイデアを真面目に考える。結果だけでなく過程を議論する。
- ・一過性の流行でなく、真のイノベーションを目指す。
- ・個々の研究を推進しながらも、プラズマ・核融合分野のみならず、他の学術分野との交流や融合研究をオーガナイズする。
- ・強いリーダーシップではなく、個々の研究者がそれぞれの色で光を放つような研究環境と雰囲気づくり。  
(メンバーがユニット活動全体をいつでも紹介できることが理想的)

# 議論：創発の物理をより詳しく定式化するために

## ・「創発」のなかの曖昧さ

→ どれくらいの集団(自由度)? どれくらい質的に異なる? ミクロとマクロの相対性?

→ 曖昧ゆえに多くの複雑な現象を包摂することができる。

## ・なので、物理として創発をうまく定式化していくことが重要

## ・創発機構の分類 \*\*すべてここでの造語です。ただし、哲学などの似た考えにインスパイアされたもの。

単方向性創発(単創発): 創発した性質/現象を個別要素が感知しない  
e.g., 磁化, viscosity, 同期振動, fuzz形成も?

双方向性創発(複創発): 創発した現象が個別要素にフィードバックする >> 自己言及的?  
e.g., Zonal Flow形成(乱流から創発するも、乱流に影響する)

創発と消失が織りなす階層構造: レベルA → 単創発 → レベルB → 複創発 → レベルC

→ 階層的な創発機構を捉えるには、核融合プラズマは格好の題材  
(固体・液体・中性ガス・プラズマからなる大自由度系で当然ながら非線形かつ開放系)

→ 時間・相空間上において、創発を駆動する起源を示す点と性質の発現を示す点の相互位置関係は?

→ 不可逆過程と切っても切れない関係なので、なにかしらの "エントロピー" を用いた定式化が重要。

## 議論：消失 (Evanescence)

「創発」だけでなく、「消失」をスコープに加えた点が新しいと感じている

- 発現が構造がそのままなのか、維持する機構が必要か、時定数を持って消えるのか、突発的に消えるのか。
- 消失の意味：
  - 創発したマクロな構造が消失する  
cf. 不可逆過程として消失されるとき、創発前の全く同じ状態には戻らない？
  - 創発の際に引き換えとして消失される  
cf. くりこみ群による表現 (irrelevantな自由度(個性)を捨て去り、relevantな構造を得る)

# 議論：メンバーシップと連携

## ユニットのモチベーション

- 今までにできなかったことを、出来るようにする
- 連携することで、個々の創発現象の研究だけからでは見ることができなかった新たな風景を拓く。

## 参加方法

- 「あなた」の扱う創発現象を新しい縦軸としてコミット！
- 「あなた」の得意な手法で横串としてコミット！

## 必要な連携

- 本ユニット内の実験に関わらず、他のユニット・所外の実験研究で見つかる様々な現象を取り上げて議論を展開する
- 分野間連携による方法論の導入と応用

## 共同提案に向けて (ユニット構築提案書締め切り 7/30)

本ユニットテーマに関して、共同提案者として参画し、今後共により良いテーマへと練り上げる作業を行うことに賛同頂ける方は

**7/26(月) 正午**

までに、お近くの提案者: 後藤、仲田、沼波、永岡、大谷、伊藤(篤) までご連絡ください。

※他のユニットテーマ共同提案とのメンバーの重複は不可であることにご留意ください。

※所外メンバーについて重複は問われません。