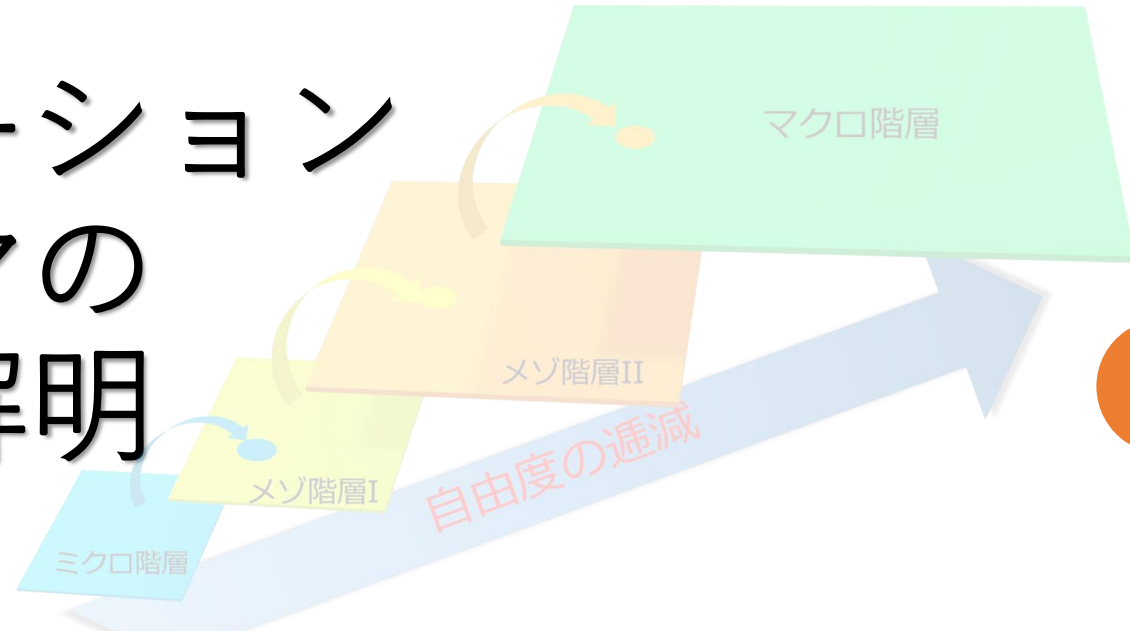


課題No.11

ボトムアップシミュレーション 手法によるプラズマの 階層性・多様性の解明



基礎物理シミュレーション研究系
宇佐見俊介

概要：ユニットの大方針

- このユニットでは、
階層性・多様性に満ちたプラズマ現象にフォーカスを当て、
「系の自由度を減らす記述をする」を必ず念頭において、
シミュレーション・理論をベースに研究を進め、
階層構造・多様な構造を明らかにすることを旨とする。
- ターゲットとなる現象は、例えば、
不安定性、構造形成（衝撃波など）、
磁気リコネクション、乱流
- 「**ボトムアップシミュレーション手法（仮）**」によって、研究を行う。

未解明は2種に大別

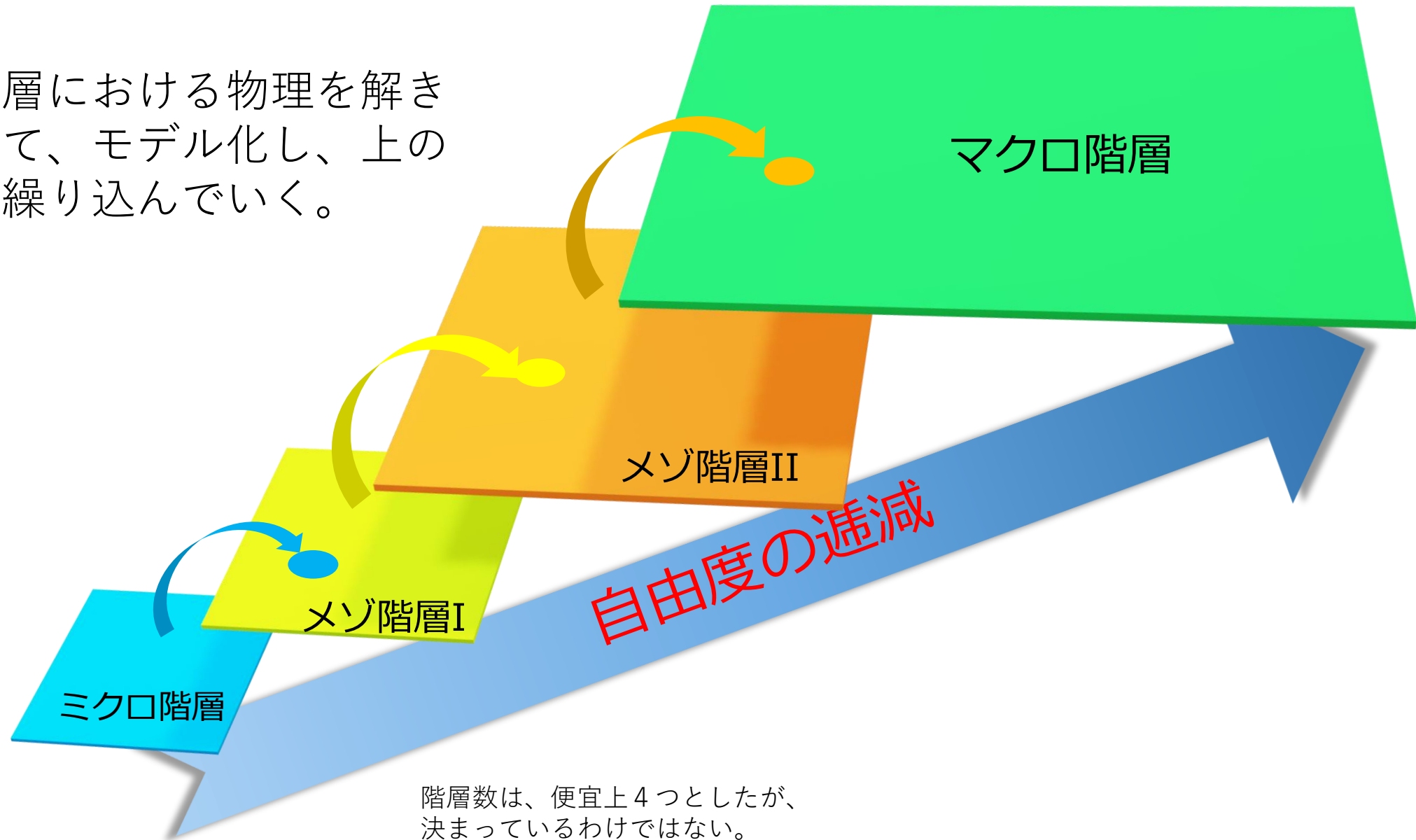
- 大元の原理・法則が未知… 素粒子、宇宙論
- 原理・法則は分かっているが、
現象が複雑なので分からない。… プラズマなどの物性
- ある意味哲学的な問い：
「そもそも、現象を理解した、解明したとは
どういうことを指すのか？」
を再認識してみた。

解明・理解とは？

- あるプラズマ現象に関わる全ての粒子運動・電磁場挙動を完全に記述したとしても、解明・理解したことにはならない。
- 解明・理解したとは
 - 他にも適用できる（外挿可能な）一般化理論を見つける。
 - 本質となるプロセスだけを抽出する。
 - 統計量を算出する。
- 共通するのは、**系に存在する自由度を減らして説明すること。**

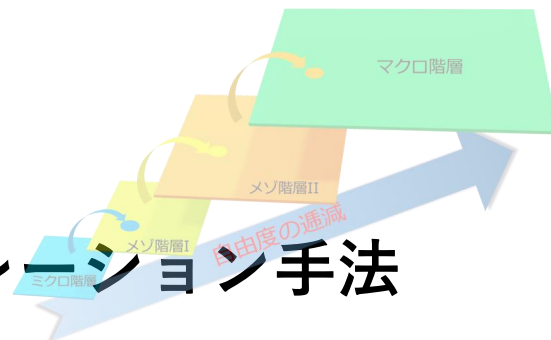
ボトムアップシミュレーション手法のイメージ

下の階層における物理を解き明かして、モデル化し、上の階層に繰り込んでいく。



階層数は、便宜上4つとしたが、決まっているわけではない。

「自由度を減らす」の違い



これまでの方法

究極の基礎方程式

クリモントビッチ方程式

微小体積で平均、粒子間衝突無視

ブラソフ
シミュレーション

粒子シミュレーション

ジャイロ位相無視

速度分布無視
(運動論効果無視)

ジャイロ
運動論
シミュレ
ーション

二流体シミュレーション

電子質量無視
(イオンと電子の違い無視)

MHDシミュレーション

ボトムアップシミュレーション手法

- これまでのオーソドックスなモデル化による自由度の削減が、適切なのか問い直す。
- 第一原理（粒子、ブラソフ）シミュレーションで現象を解析する。
- 現象の中に何らかの構造を見つけ出し、理論化・一般化する。
- その結果、自由度を減らす。
- 多階層シミュレーションモデル開発自体を目的としない。

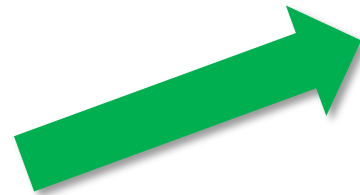
自由度逡減の方法



第一原理シミュレーションによる
構造発見・解明



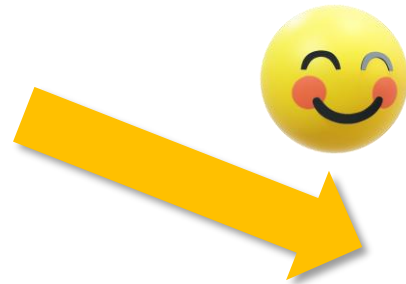
理論化・一般化
モデル化



メゾ階層・マクロ階層の方程式系に、パラメータを繰り込む

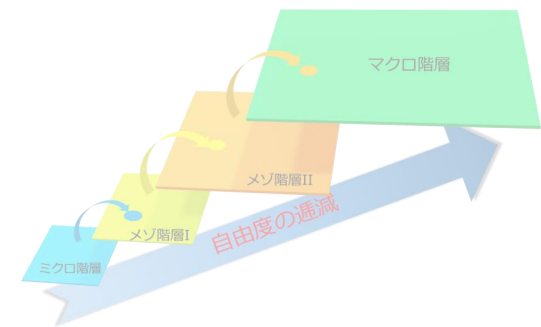


メゾ階層・マクロ階層の方程式系に、新しい項を繰り込む。



**新しいメゾ階層・マクロ階層を
創り出す
(新しい方程式系を創り出す)**

研究のサイクル・必要な研究者



• 第1段階：現象を第一原理で計算・他モデルと比較

- これまでのモデル化を問い直す。

シミュレーション研究者

• 第2段階：ある階層で物理を解明

- 新しい知見を得る。

プラズマ物理学研究者

粒子

運動論

ハイブリッド

流体

原子分子過程

• 第3段階：解明した物理のモデル化

- 上階層の方程式に繰り込みor新しい階層の創出

理論研究者

数学者

AI研究者

• 第4段階：シミュレーションコード化

- 適切にコーディングする。

コード開発者

計算機科学の研究者

これを繰り返して、最上位階層の全系シミュレーションを完成

最上位階層の全系シミュレーションが使う計算資源

<<

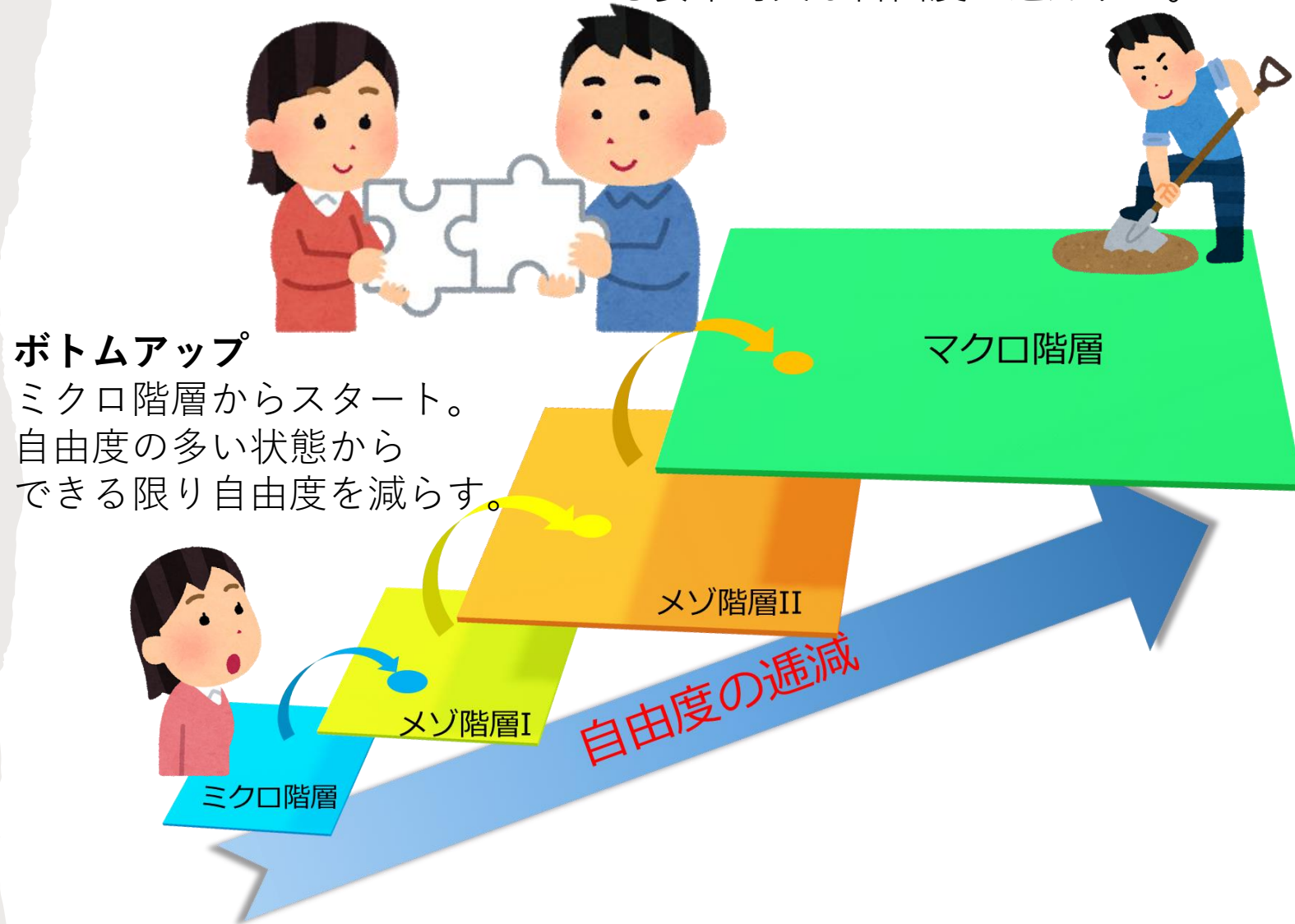
一番下の階層（第一原理）で全系のシミュレーションが使う計算資源

トップダウン シミュレーション？

- トップダウンシミュレーションという言い方をすることも可能。根本は同じ研究哲学を、別の視点から説明している。
 - 最初に、マクロ階層の方程式系がある（例えば、MHD）
 - そのマクロ方程式系に、必要な微視的効果・運動論効果を取り入れてモデルを発展させていく。
- ボトムアップとトップダウンを同時に進めて、2つが交わる点を作るのがベスト？

トップダウン

マクロ階層からスタート。
自由度の少ない状態に
必要不可欠な自由度を追加する。



ボトムアップ

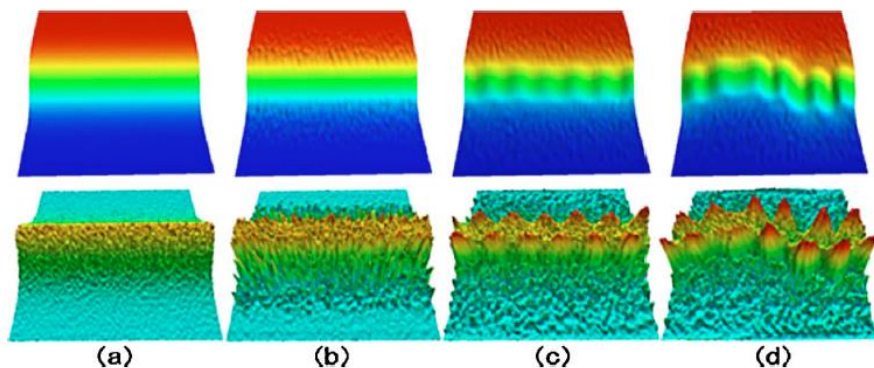
ミクロ階層からスタート。
自由度の多い状態から
できる限り自由度を減らす。

必要なツール

- **スーパーコンピュータ**が必須。
 - プラズマシミュレータ雷神
 - 富岳
- 特に、本質的な物理を解明してモデル化するには、多くのパラメータ・ランを行う必要があり、多くの計算資源を使用する。
- 研究をスピーディーに進めるため、**プラズマ分野の研究で占有**できるスパコンを要望する。



これまでのモデリング例：磁気リコネクション



粒子シミュレーションからリコネクション電場を見積もる

$$E_{y,rec} \approx \frac{1}{e} \frac{\partial v_{xe}}{\partial x} \sqrt{2m_e T_e}$$

Hesse PoP 1999

ドリフトキンク不安定性による異常抵抗発生

粒子シミュレーション結果から、電気抵抗を評価

$$\langle \mathbf{E}_x \rangle + \langle \mathbf{v}_y \rangle \langle \mathbf{B}_z \rangle = \text{nonideal terms} = \eta_{\text{eff}} \langle J_x \rangle$$

Moritaka, PoP, 2007

MHDシミュレーション

電気抵抗を人為的に組み込む

$$\eta = \alpha j'^2 \quad \text{if } j' \geq \delta, \quad \mathbf{0} \text{ otherwise}$$

$$j' = \frac{|j|\Delta}{|B| + \epsilon}$$

Raeder JGR, 1998

$$\eta(\mathbf{r}, t) = k_d [V_d(\mathbf{r}, t) - V_C] \quad \text{for } V_d > V_C,$$

$$= 0 \quad \text{for } V_d < V_C,$$

Ugai, PoP 2010

ボトムアップシミュレーション手法では：

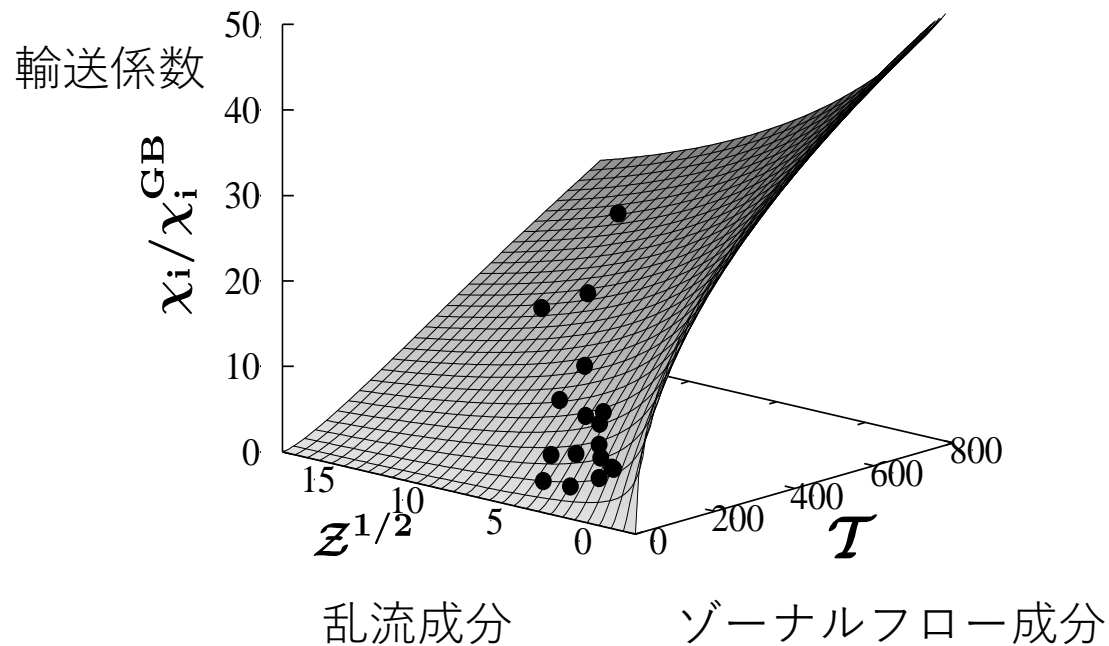
- 物理過程を解明した上で電気抵抗をモデル化する。
- そもそも $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$ が自由度の正しい削減なのか検証する。

これまでのモデリング例：乱流、ZF、輸送係数のつながり

- 数多くのジャイロ運動論シミュレーションデータから、**プラズマ乱流、ゾーナルフロー、輸送係数が有限自由度の関係式で繋がっている**ことが分かった。
- ヘリカル、トカマク等の磁場配位に関係なく成立している可能性がある。

ボトムアップシミュレーション手法では：
理論的アプローチ（例えば繰り込み群）等から、以下の謎に挑む。

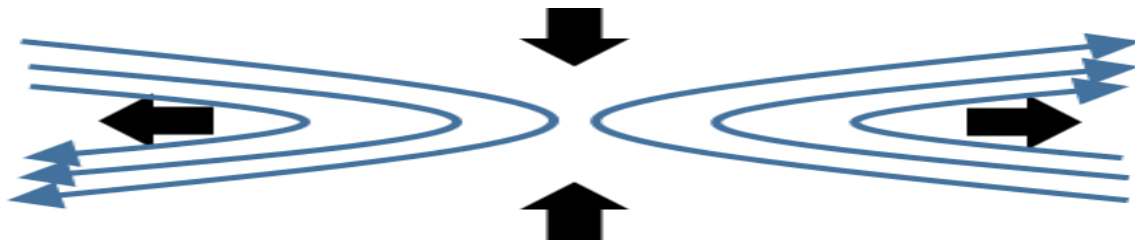
- なぜ、この自由度の縮約が成立するのか？
- 磁場閉じ込め系以外のシステムではどうなのか？



取り組みたい研究トピック・課題（例）

以下は例。これからの構想フェーズで、議論していきたい。

- 磁気リコネクション
 - リコネクション率の上限0.1は、どんな物理が決めているのか？



$$\text{リコネクション率} = \frac{\text{インフロー速度}}{\text{アウトフロー速度}}$$

- 電気抵抗を外部の物理で完全に記述する。

$$\eta = \eta(B, n, J, v_{inflow}, T, \dots)$$

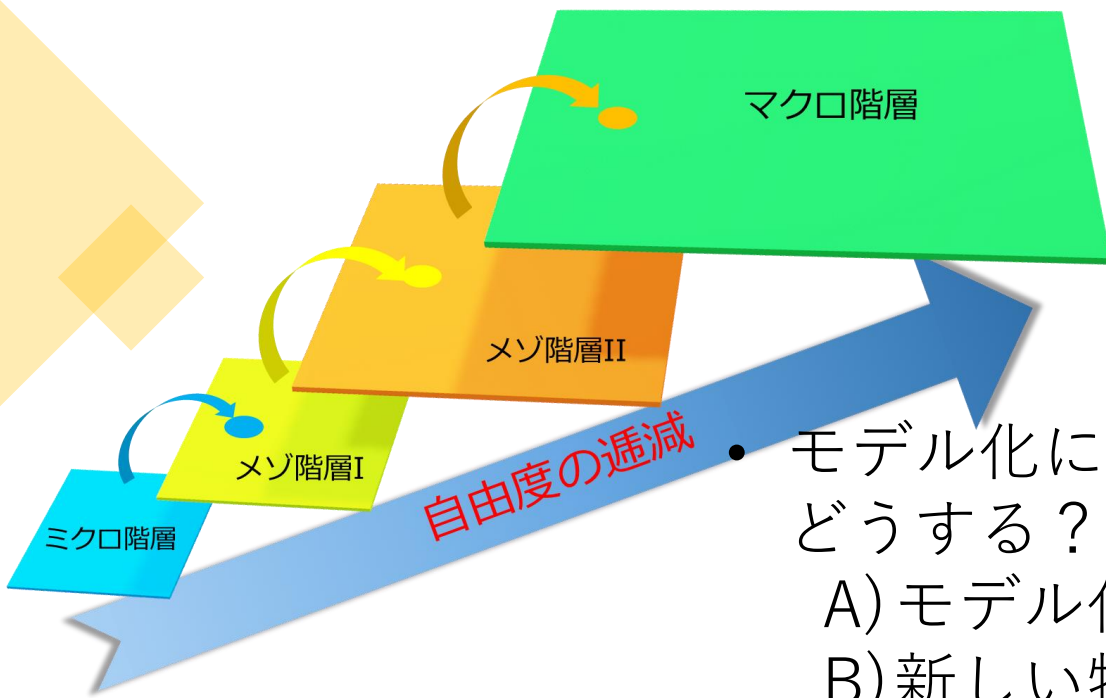
これができたら、リコネクション研究はほぼ完了。

取り組みたい研究トピック・課題（例）

以下は例。これからの構想フェーズで、議論していきたい。

研究トピック	挑戦したい課題
乱流	乱流輸送を決定している「必要最小限」の構成要素は何か？
	微視的効果を伴う乱流と巨視的な乱流の違いは何か？
非接触プラズマ	径方向輸送が増大する機構は何か？
MHD安定性	β 値の上限はどれだけか？
周辺プラズマ輸送	磁力線のカオスとプラズマのカオスはどのように相互作用するか？

(補足)



- モデル化によって落とした物理過程が重要になったらどうする？
 - A) モデル化・一般化が不十分
 - B) 新しい物理理論形成として重要な成果
- カオス理論での有名な言葉
「**蝶が羽ばたくと嵐が起こる**」
ありうることだが、自然の階層構造を無視している。
- 階層性の観点から捉え直すことが必要。
- 実際は、嵐を起こさない羽ばたきがほとんどであり、つまり、上の階層間への影響は限定的である。
→嵐を起こす蝶の羽ばたきを理論化、繰り込み