



課題参加者：陰山聡¹ (副代表), 坂本尚久¹, 片桐孝洋², 高橋大介³, 中島研吾⁴, 半場藤弘⁴, 宇佐見俊介⁵, 大谷寛明⁵ ¹神戸大, ²名大, ³筑波大, ⁴東大, ⁵核融合研

◆ 研究の目的[物理課題として]

大レイノルズ数(無衝突に近い)プラズマ乱流のためのシミュレーション手法の開発

(1): シミュレーションの大規模化 ⇄ 物理的知識の更新
⇒ マシン性能に依存しない普遍的な性質の抽出

(2): 乱流の階層性: マクロ → 格子で解像(GS),
ミクロ → 格子解像度以下(SGS)

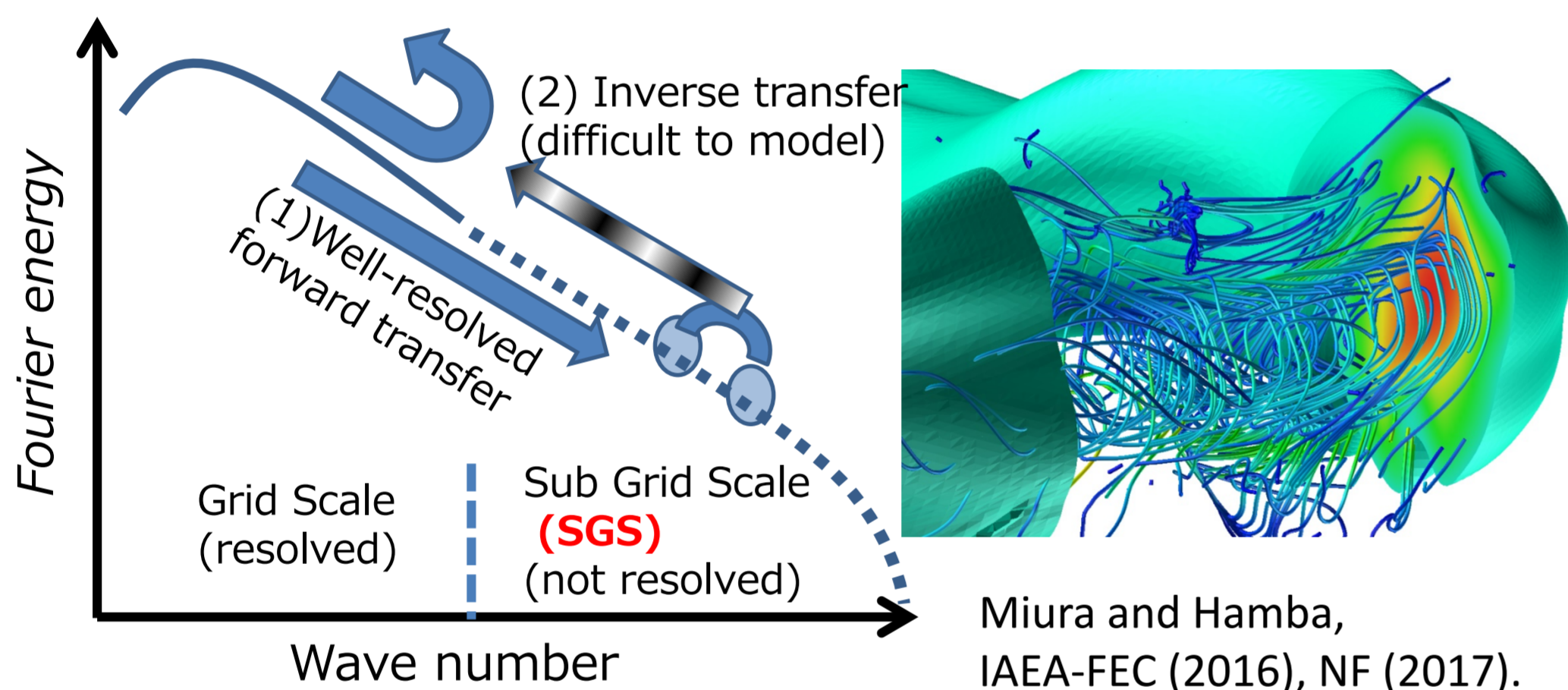
⇒ SGSはモデル化することで、シミュレーション規模を抑制
SGSモデルが妥当なら、ミクロスケールを深掘りする必要
なく、マクロスケールに専念可能

(SGSモデル開発のためのミクロシミュレーションは重要)

◆ GS方程式と非等方SGSモデルの開発

ターゲット: 磁場閉じ込め核融合の短波長不安定性・飽和
研究

(1') back-scatter due to a coarse resolution



Miura and Hamba, IAEA-FEC (2016), NF (2017).

非等方モデルの検証結果は順調 (2018 ITC)
[開発継続中]

◆ Hall MHDから拡張MHDモデルへの移行
(ジャイロ粘性の導入)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(u_i u_j - B_i B_j) + \left(p + \frac{1}{2} B_k B_k \right) \delta_{ij} \right] + \nu \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0,$$

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i},$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial B_k}{\partial x_k} = 0,$$

$$E_i = -\epsilon_{ijk} (u_j - \epsilon_H J_j) B_k + \eta J_i.$$

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= -\epsilon_G S_{12}, \\ \Pi_{22} &= \epsilon_G S_{12}, \\ \Pi_{33} &= 0, \\ \Pi_{12} &= \Pi_{21} = \frac{\epsilon_G}{2} (S_{22} - S_{11}), \\ \Pi_{13} &= \Pi_{31} = -\epsilon_G S_{23}, \\ \Pi_{23} &= \Pi_{32} = \epsilon_G S_{13}. \end{aligned}$$

「ジャイロ粘性」は粘性ではない(磁力線の周りをプラズマが回転する効果) → 短波長成分の励起

大規模シミュレーションではSGSモデルによる短波長成分の代替が必須 (Hall MHD用SGSモデルを改良へ)

◆ 大規模シミュレーション擬スペクトルコード開発
乱流研究のプラットフォームとしてのコード開発
3次元FFT ...P3DFFTからFFTEへ

| 格子点数 | Nodes (Processes) | P3DFFT (通常版) | P3DFFT (_MANY) | FFTE (通常版) | FFTE (隠蔽版) |
|-----------------------------------|-------------------|--------------|----------------|------------|------------|
| N ³ =4096 ³ | 1024(16384) | 327.221 | 306.214 | 231.546 | 247.666 |
| N ³ =2048 ³ | 512(16384) | 42.553 | 38.879 | 30.668 | 27.524 |
| N ³ =1024 ³ | 128(4096) | 18.573 | 17.844 | 13.408 | 12.867 |
| N ³ =512 ³ | 32(1024) | 8.662 | 8.228 | 5.398 | 4.906 |
| N ³ =256 ³ | 8(256) | 4.321 | 2.700 | 2.700 | 2.550 |

FFTEへの換装 + 通信時間隠蔽 = 劇的な高速化
隠蔽の高度化 + Oakforest-PACS向け最適化の進展へ

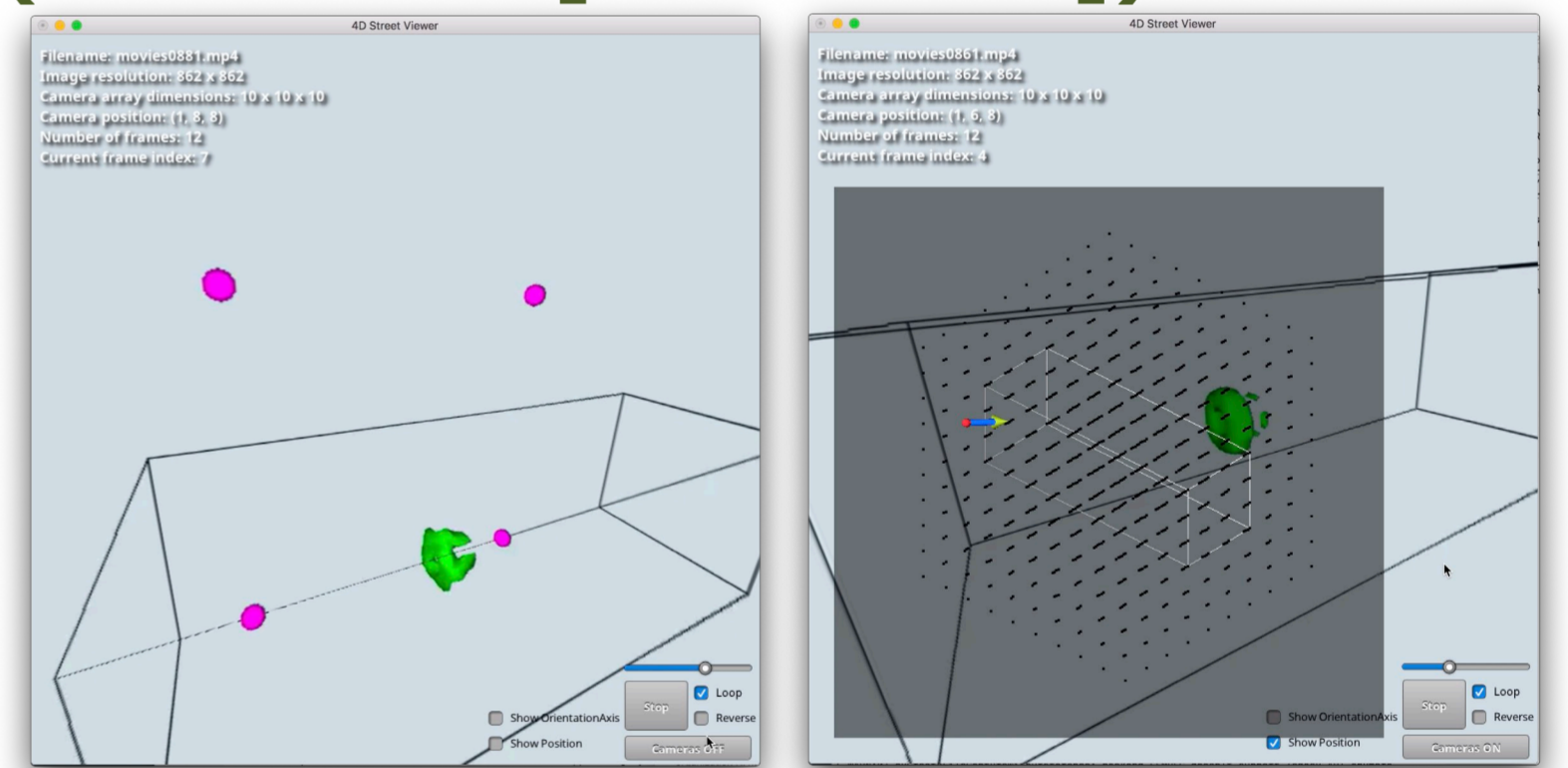
◆ 4次元ストリートビューによる可視化

全方位カメラによるin-situ 可視化 + 時系列
可視化動画の解析

1. MPMDモデル...要素技術の構築

- ・多視点・全方位・同時可視化ライブラリ
- ・動画ブラウザの開発

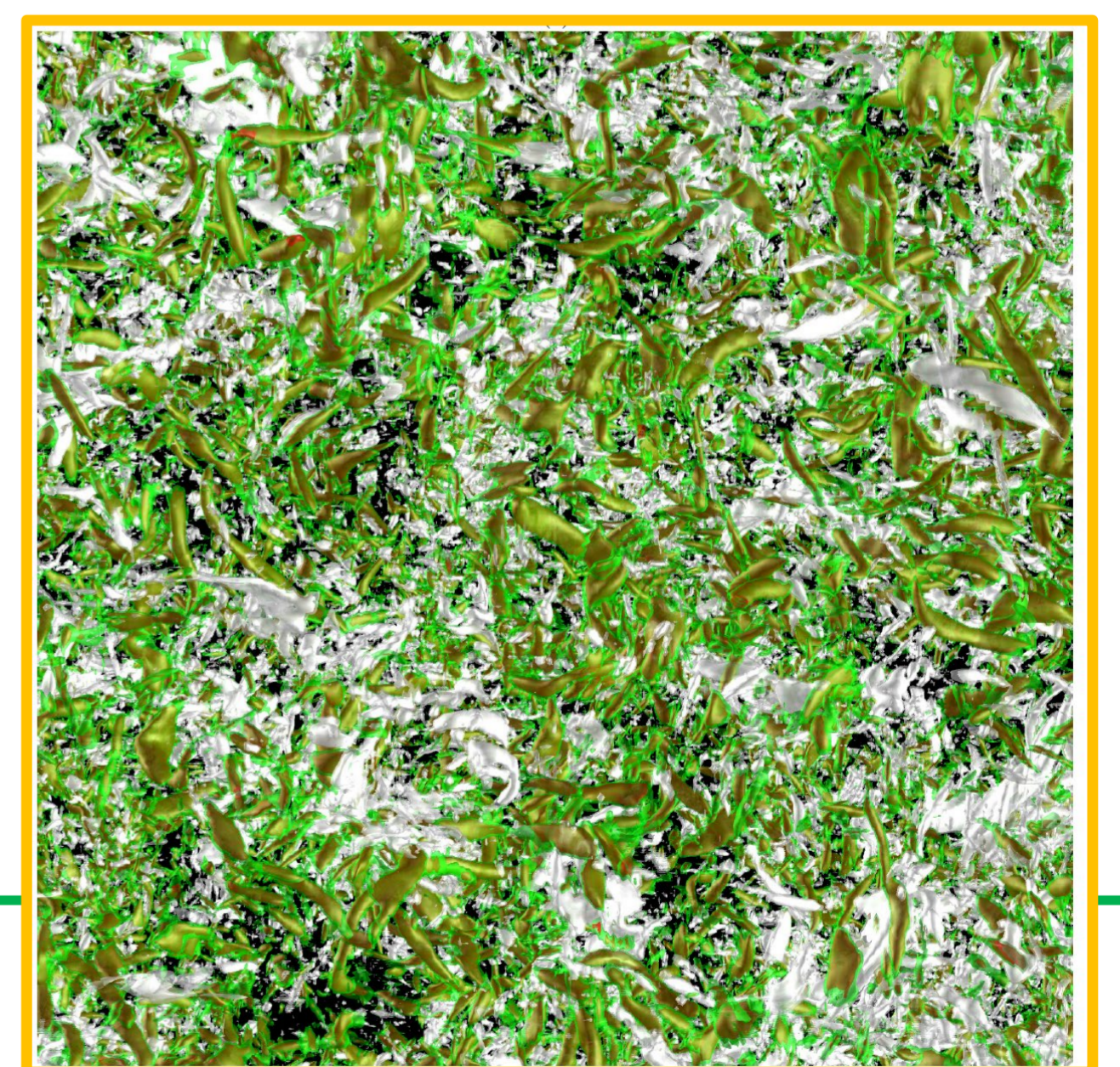
⇒ シミュレーションと同程度のコストで多方向同時可視化が可能に (可視化事例[スモークリング])



2. Hall MHD LESコードへの実装作業

乱流の微細構造の形成、
磁気リコネクションによる構造変化 etc. の素過程解析へ

大規模
シミュレーション
+ 微細構造
+ 全方位可視化
による研究の加速



Summary

Hall MHDモデルからジャイロ粘性を伴う拡張MHDモデルへと移行 (物理の複雑化)

P3DFFTからFFTEへの変更および計算時間隠蔽によるシミュレーション時間の劇的な短縮

4次元ストリートビュー in-situ 可視化との組み合わせによる、乱流の構造形成の素過程探求へ (eg 磁気リコネクション)