

# 軸3 「揺らぎ・乱流・輸送」 公聴会

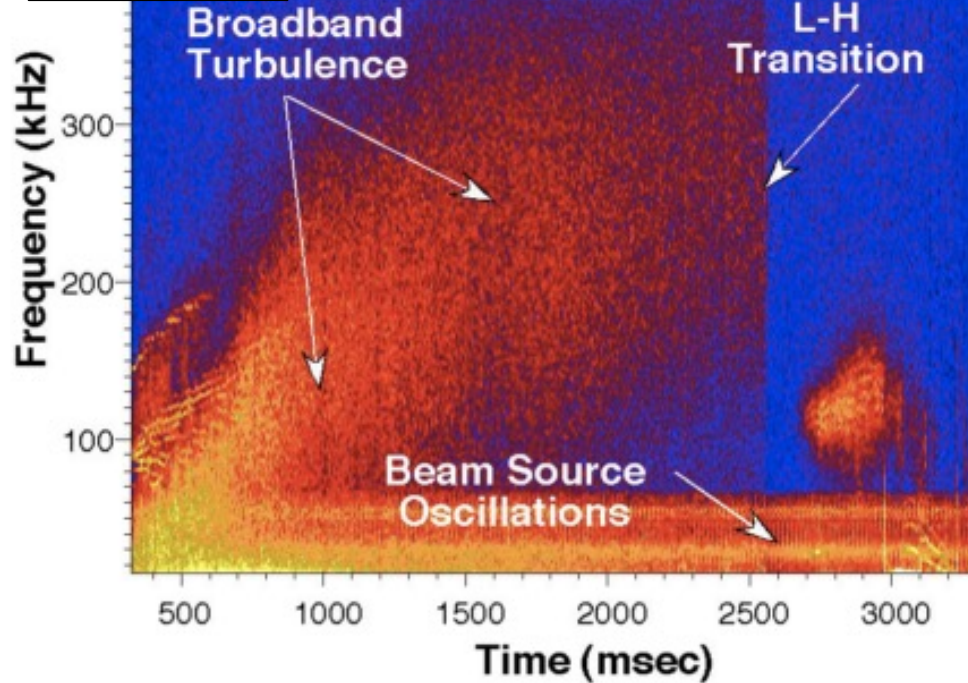
ユニットテーマ

位相空間乱流

Phase space turbulence

# 核融合としての課題

BES ( $\tilde{n}_e$ )

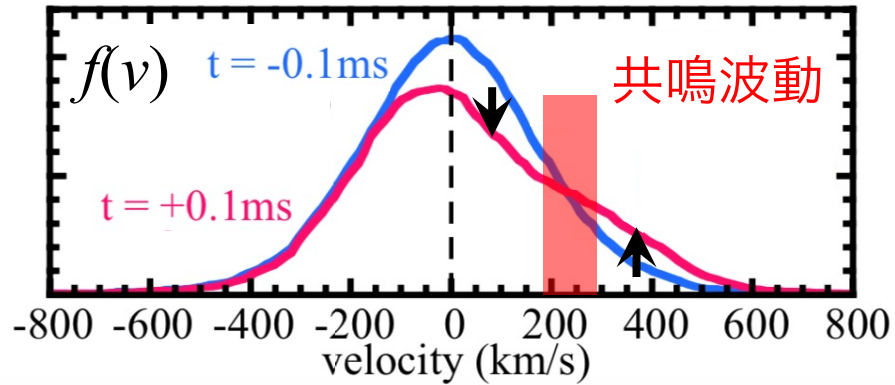


McKee+, Plasma Fusion Res. 2 S1025 (2007)

- 乱流輸送の重要性は広く認識されている
  - 低次の物性係数( $\chi$ など)を用いた輸送の特徴づけ
  - 密度揺動の直接計測
  - 理論シミュレーションによる物理機構同定
- 定性的な理解が得られ, ITER性能予測などにも貢献してきた
- 非局所・瞬時輸送, 突発輸送, 閉じ込め改善現象などの強い非線形過程に対する理解は限定的

- 現在の核融合研究は, 燃焼炉を見据えた超低衝突プラズマを扱う段階に入っている
- 今後の核融合研究の重要課題として, **非熱的粒子の乱流輸送への影響(位相空間乱流)**を理解することが挙げられる

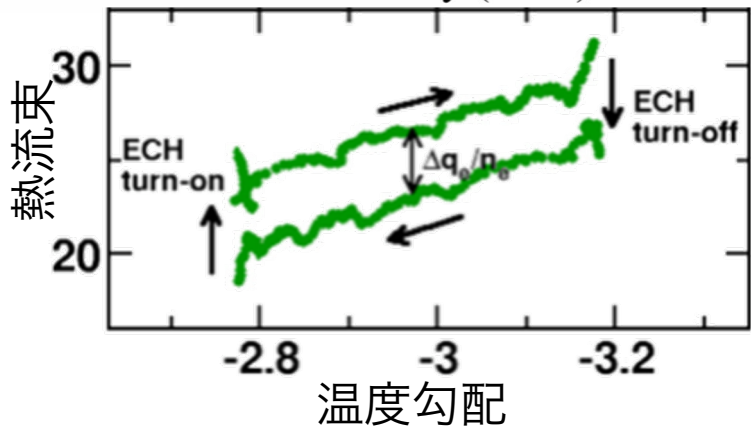
# 核融合としての課題 (具体例)



- ランダウ減衰による粒子加熱
- EGAM, MHDバースト, . . .

M. Osakabe+, IAEA FEC (2014)

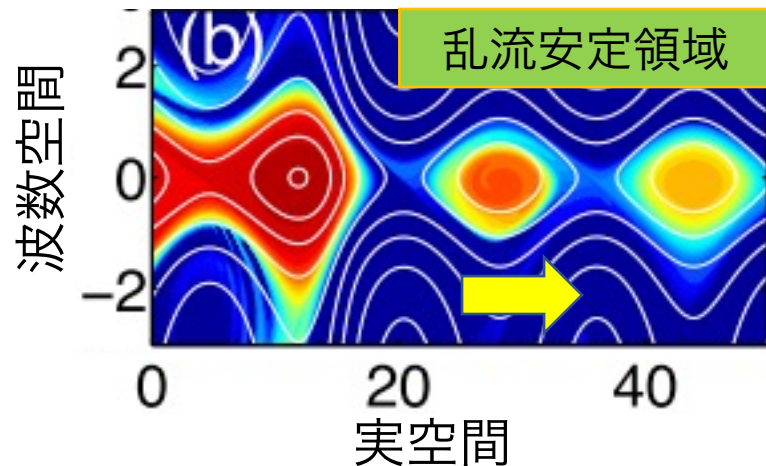
K. Ida+, submitted to Phys. Rev. Lett. (2021)



- 熱流束-勾配関係が多価関数化 (輸送ヒステリシス)
- ECHによる位相空間を介した乱流の直接増幅作用

S.-I Itoh and K Itoh, Sci. Rep. 2 860 (2012)

S. Inagaki+, Nucl. Fusion 53 113006 (2013)



- 高エネルギー粒子駆動帯状流による乱流塊の移送
- 波動-乱流位相空間相互作用

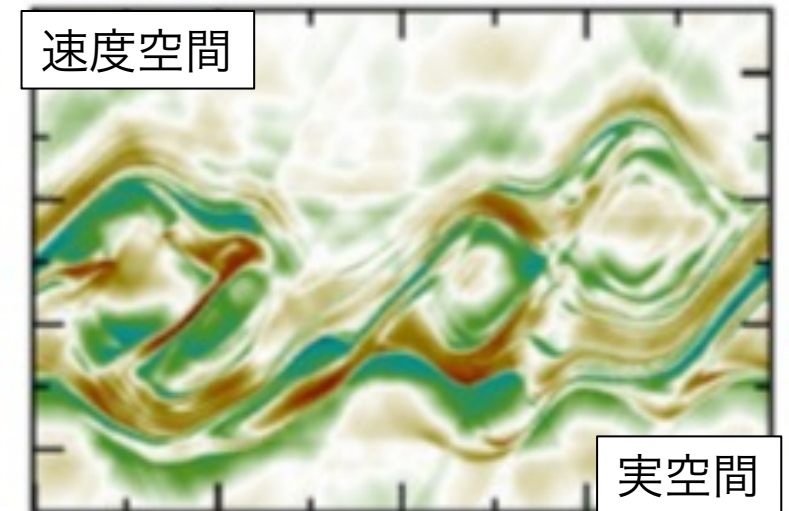
D. Zarzoso+, Phys. Rev. Lett. 110 125002 (2013)

M. Sasaki+, Sci. Rep. 7 16767 (2017)

位相空間における乱流の振る舞いが重要な現象が多く報告されている

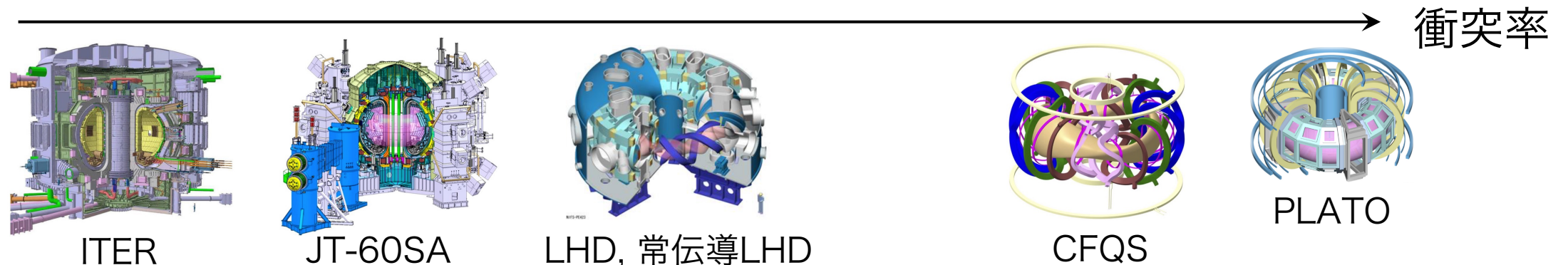
# 学術的位置付け

- 磁場閉じ込め高温プラズマに代表される非平衡状態にある系の普遍的な特徴づけには、新たな枠組みが必要
- 特に、速度分布関数に大きな自由度を持ちうる低衝突プラズマは、位相空間の直接計測などの実験的な知見をもとに一般化が進められるべき
- 波動-粒子相互作用の理論研究は、プラズマ乱流研究の黎明期より盛んに行われてきている
- プラズマの高温・低衝突化、プラズマ流体乱流の理解の進展、速度空間計測技術の向上により、**実験的な研究展開の機運が高まってきている**



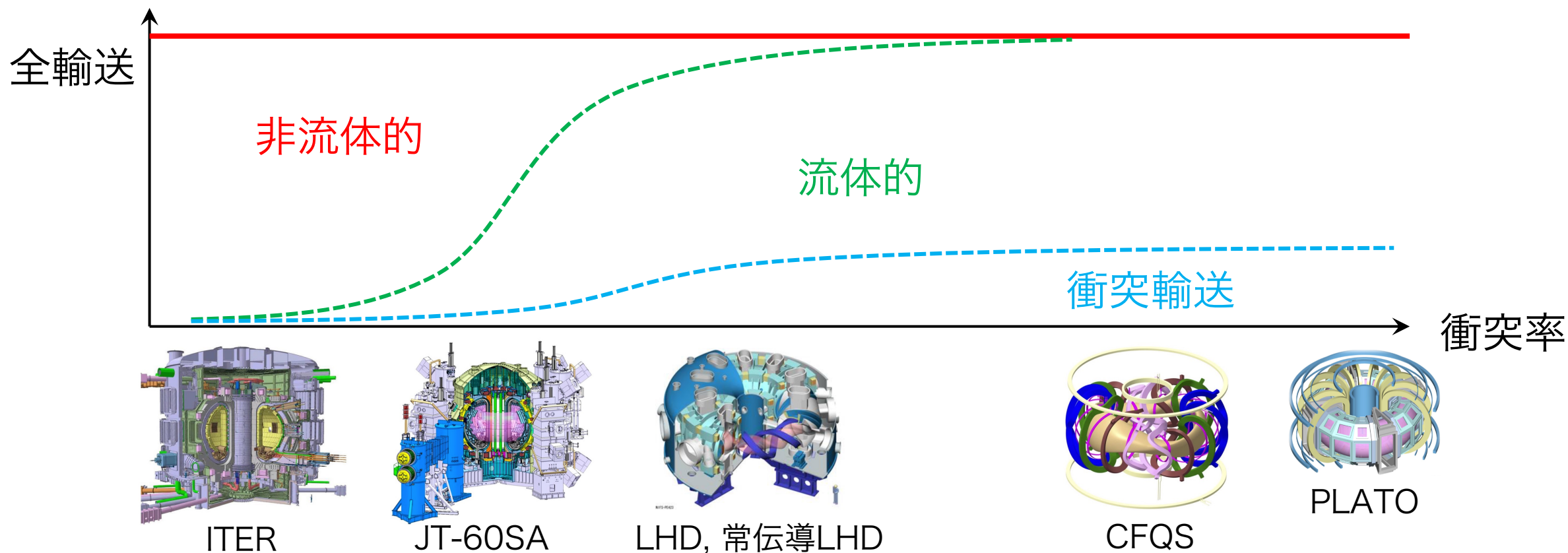
# アプローチ（定式化）

- これまでの研究の多くは、プラズマを流体として取り扱い、熱伝導係数などに代表される熱・統計力学的な物性特性値を評価することで進められてきた
- 乱流の計測は、主に流体モデルの「密度」に対してのみ行われてきた
- 流体近似した乱流輸送の定量計測に加え位相空間揺動の直接計測装置を整備し、位相空間乱流がプラズマ閉じ込めにもたらす影響を定量的に調査する
- 流体的なモデル化が妥当な高衝突領域から、粒子性が本質的になる低衝突領域までを網羅的に実験計測し、輸送を担う乱流の性質を評価する



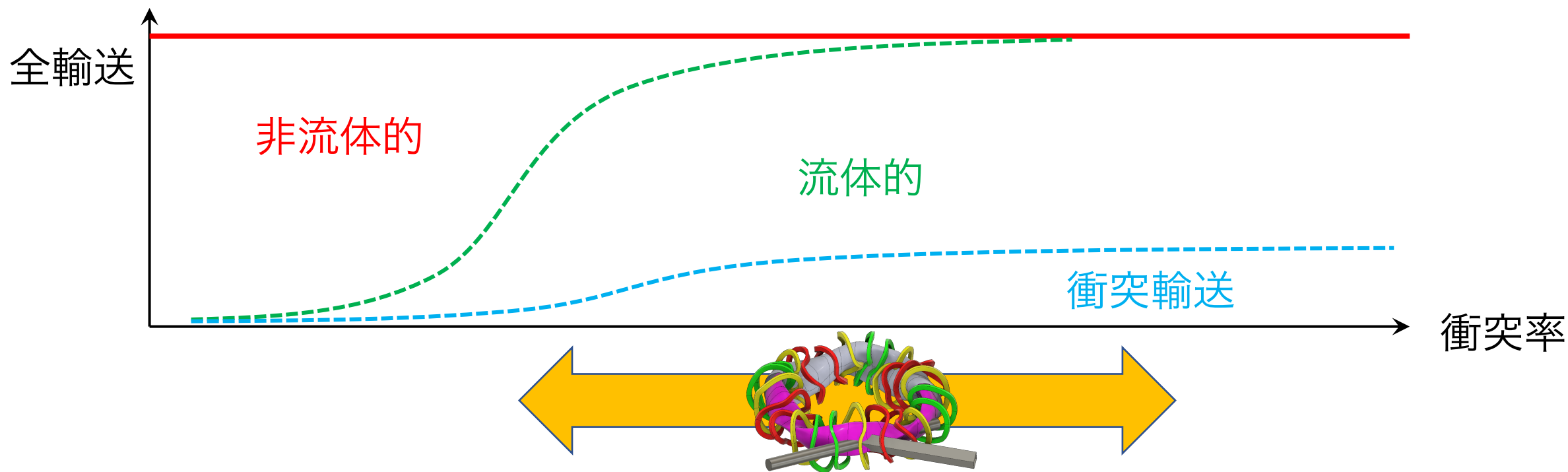
# アプローチ（定式化）

- 流体的なモデル化が妥当な高衝突領域から，粒子性が本質的になる低衝突領域までを網羅的に実験計測し，輸送を担う乱流の性質を評価する
- 例えば，以下のようなダイアグラムの作成を目指す



# アプローチ（定式化）

- 流体的なモデル化が妥当な高衝突領域から，粒子性が本質的になる低衝突領域までを網羅的に実験計測し，輸送を担う乱流の性質を評価する
- 例えば，以下のようなダイアグラムの作成を目指す

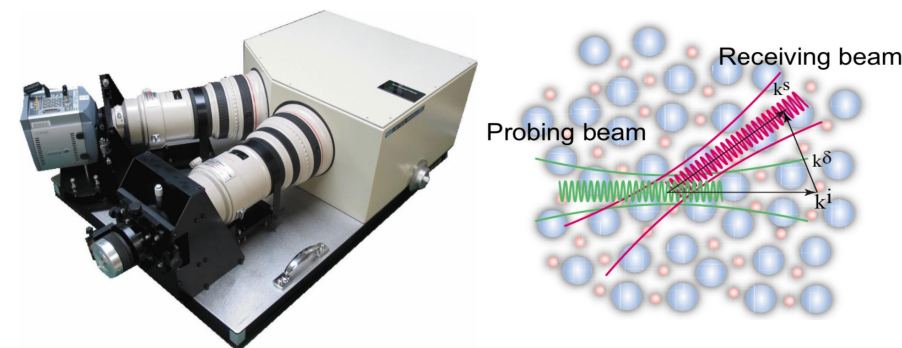


乱流抑制最適化（および強磁場化によるコンパクト炉）  
などを指向した新実験装置計画への参画

# アプローチ (定式化)

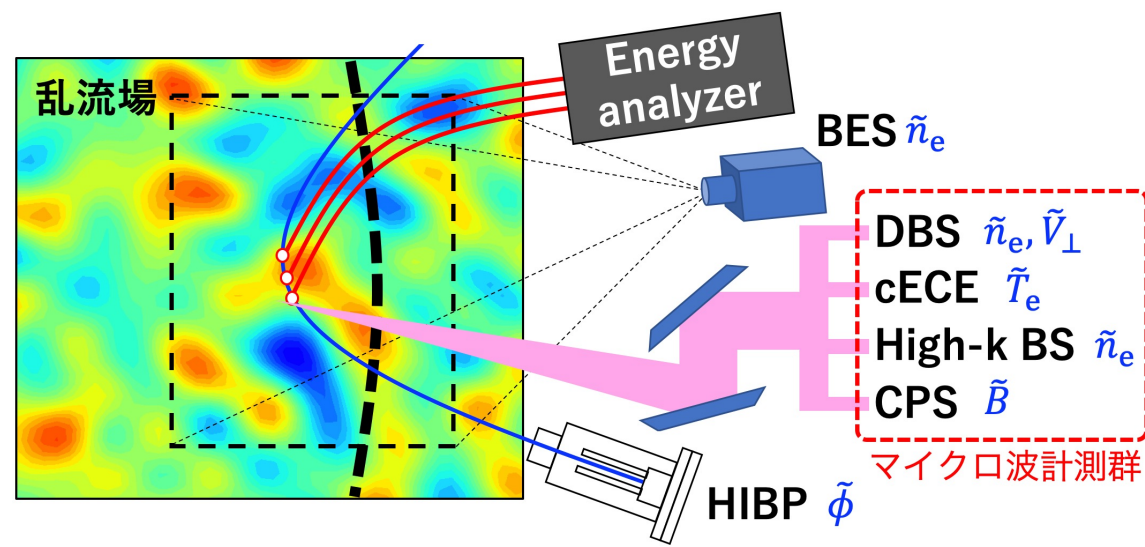
- 速度分布関数計測

- ✓ LHD実験で蓄積された計測ノウハウ(荷電交換分光や協同トムソン散乱計測など)を応用
- ✓ 先端解析法(機械学習, 条件付きサンプリング法, モーメント法など)の活用
- ✓ 電磁波の特性 (トポロジカル性等) を利用した位相空間への外部摂動付与
- ✓ 運動論的理論・シミュレーション研究



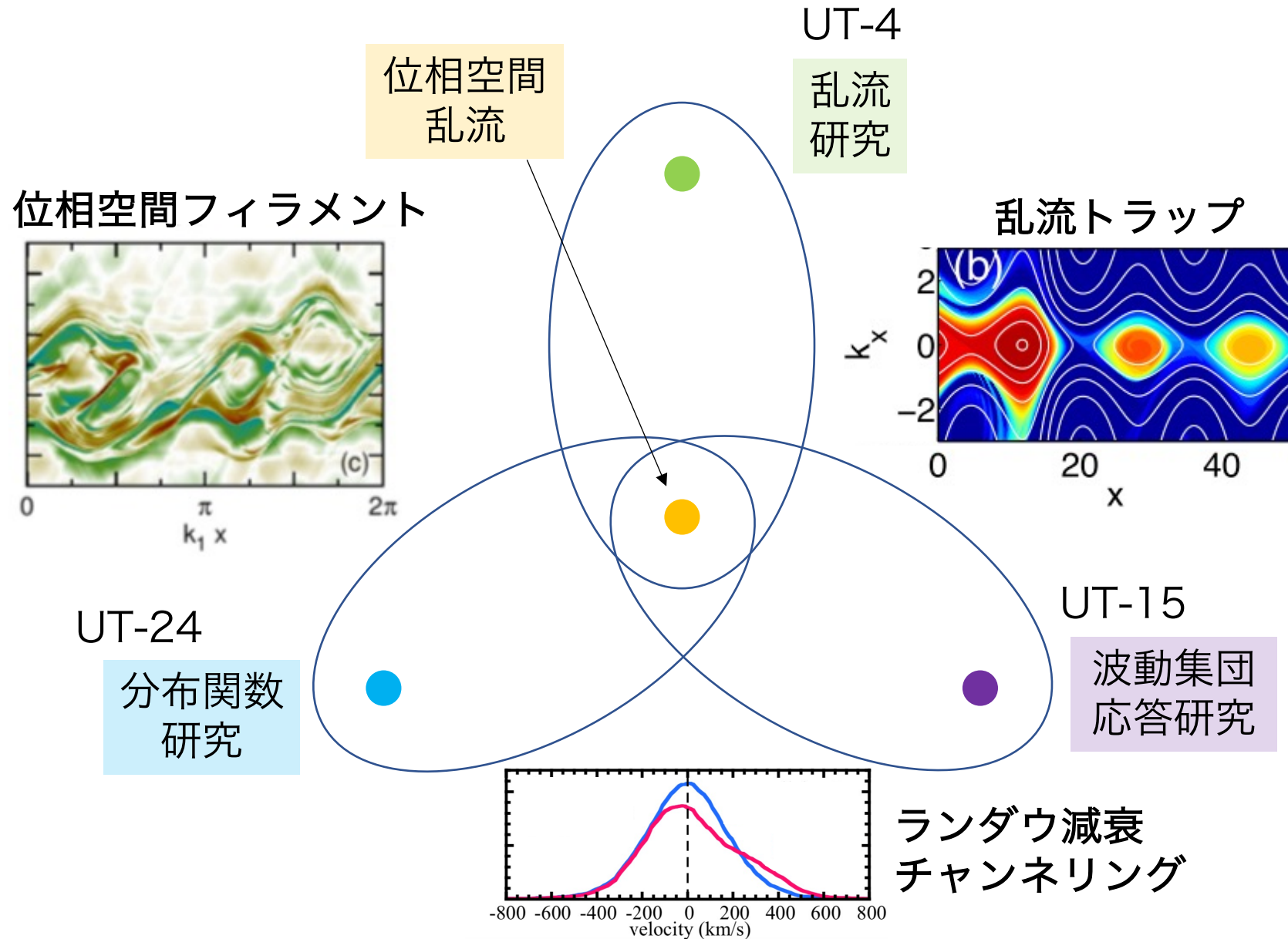
- 乱流輸送の定量計測

- ✓ 異なる物理量を同時計測し, 輸送を直接評価  
→ 複数計測器群連携を行う
- ✓ 計測シミュレータを用いたシステム設計
- ✓ エネルギー保存則から求めた輸送との定量比較
- ✓ 異なる物理量の間での位相差, 振幅差 (e.g. 非断熱性) の同定





# 個別ユニット提案との関係



3つの個別ユニット提案を包括するクラスターとしての軸「位相空間乱流」

- UT-4 定量プラズマ乱流輸送物理の創設 [小林達哉]
- UT-15 電磁波（トポロジカル）による粒子集団応答 [西浦正樹]
- UT-24 乱流物理研究 (位相空間乱流) [徳沢季彦]

ランダウ減衰  
チャンネルング

# 学術的展開

- 低衝突乱流プラズマは，核融合プラズマだけでなく，宇宙・天体プラズマなどにおいて普遍的に見られる
- 宇宙プラズマにおける粒子エネルギースペクトル計測には長い歴史がある
- 実験室・宇宙プラズマからの相補的なアプローチを行い，位相空間乱流を定式化することを目指す
- 特に，速度分布関数と波動，乱流場が複雑に相互作用しあう状態の，非平衡物性を定式化する枠組みの構築は，これらの分野に共通する課題である
- 実験室プラズマでの分布関数ゆらぎの直接計測を基にした，非平衡物性の一般的な表現方法の定式化に寄与する (c.f. エントロピー原理とゆらぎの定理)

## 独自性・優位性など

- プラズマに対し近接計測が可能な点と、パラメータを操作できる点は、実験室プラズマにおける研究の大きな優位性である
- 磁場閉じ込めプラズマ実験では、可視発光、電磁波、レーザーなどを用いた様々な速度分布関数計測が原理的に可能であり、技術的にもその実現方法が考案されている
- LHD実験で培った計測器導入・運用や、データ解析手法などのノウハウ
- 運動論的シミュレーションの運用も積極的に進められている
- 速度分布関数歪みの研究に関しては、特別推進研究(21H04973, 研究代表者居田克巳教授)の予算措置により実施する

# まとめ

- 「位相空間乱流」ユニットを提案した
- 燃焼プラズマにおける低衝突領域で輸送を担う要素を明らかにするのを目的とする
- これまでの低次数の物性値のみで輸送を表すパラダイムを脱し，位相空間の自由度を抽象化する輸送の表現方法を探索する
- 速度分布関数と波動，乱流場が複雑に相互作用しあう状態の，非平衡物性を定式化する枠組みの構築を目指す
- LHDで培った位相空間計測・乱流計測・電磁波技術を用いて実験的なアプローチを行う