

軸3 「揺らぎ・乱流・輸送」

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

これまでの乱流輸送研究では、準線形・拡散的輸送モデルが一般的に用いられてきた

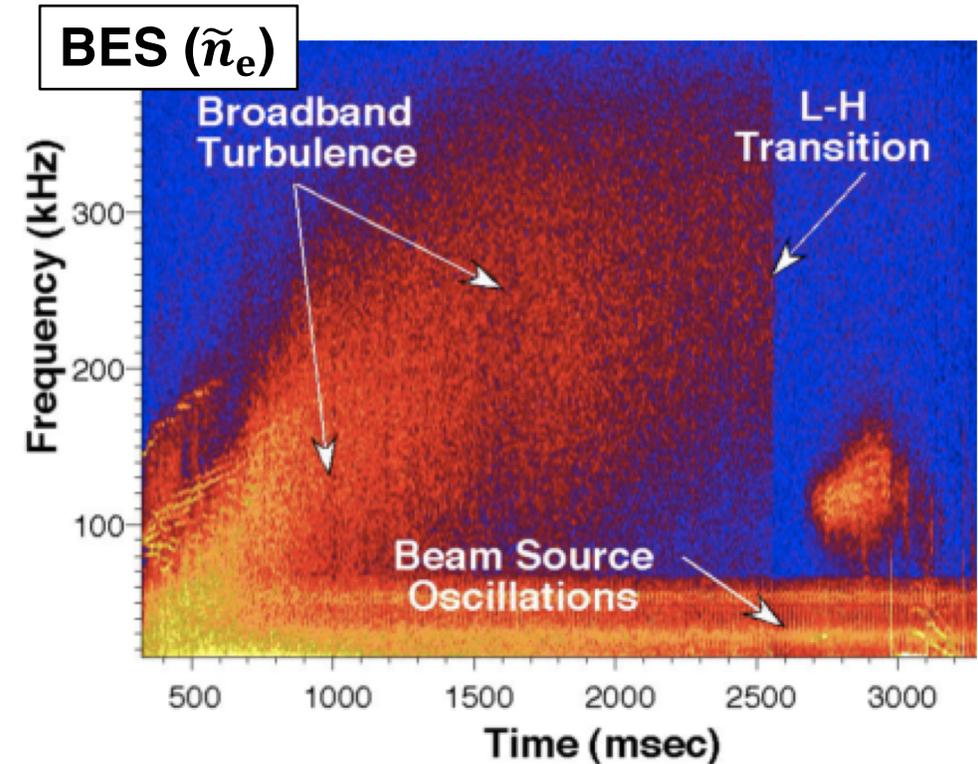
物理量 f の乱流輸送の、準線形・拡散近似は、

$$\langle \tilde{v}_r \tilde{f} \rangle = -D d\langle f \rangle / dx \quad (\text{定常状態では } D \sim \gamma / k^2)$$

実験的な D の同定や乱流揺動の計測、運動論的シミュレーションを用いた背景物理の考察などが行われている

➤ 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

➤ 一方で、非局所・瞬時輸送、突発輸送などの強い非線形過程に対する理解は限定的

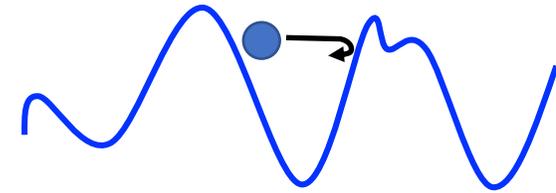


McKee+, Plasma Fusion Res. 2 S1025 (2007)

新たな枠組みとしての位相空間乱流

低衝突プラズマにおいて、ポテンシャル揺動と粒子運動の非線形相互作用が重要になると、揺動による粒子の補足が起こるようになる

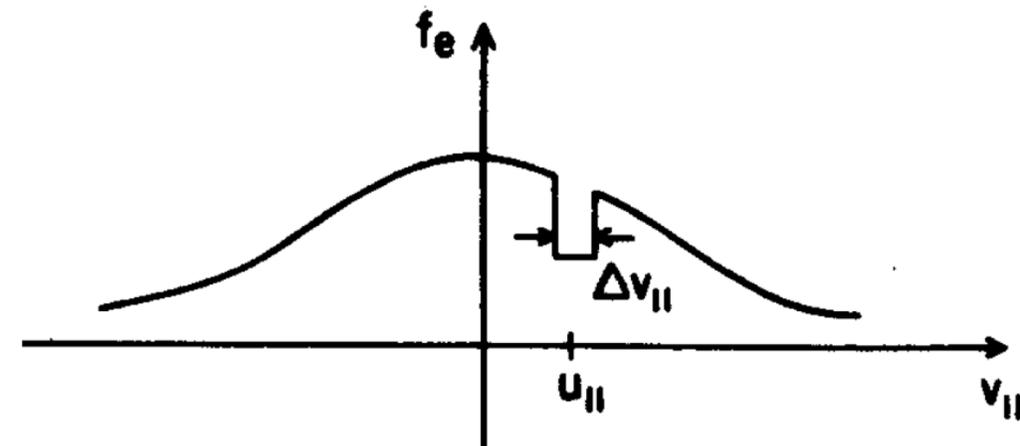
$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{q}{m} E \frac{\partial f}{\partial v} = 0,$$
$$-\nabla^2 \phi = \sum_i 4\pi n_0 q_i \int dv f_i,$$



P. W. Terry, P. H. Diamond and T. S. Hahm,
Phys. Fluids B 2, 2048 (1990)

例：補足された粒子の作るポテンシャル場による、粒子の補足：ドリフトホール

- ドリフトホールは、質量・運動量・エネルギー保存の拘束下での、最大エントロピー状態として予測される
- 勾配から自由エネルギーを得て非線形成長する



新たな枠組みとしての位相空間乱流

位相空間乱流により、マクロスコピックなプラズマの性質に影響が現れることが予測されている

例：輸送, 流れ場の励起, 電流駆動

予測されている輸送の特徴は,

- 輸送に非拡散項が現れる $\langle \tilde{v}_r \tilde{f} \rangle = -Dd\langle f \rangle/dx + F\langle f \rangle$
- 非線形成長する (突発性を有する)
- 亜臨界不安定である

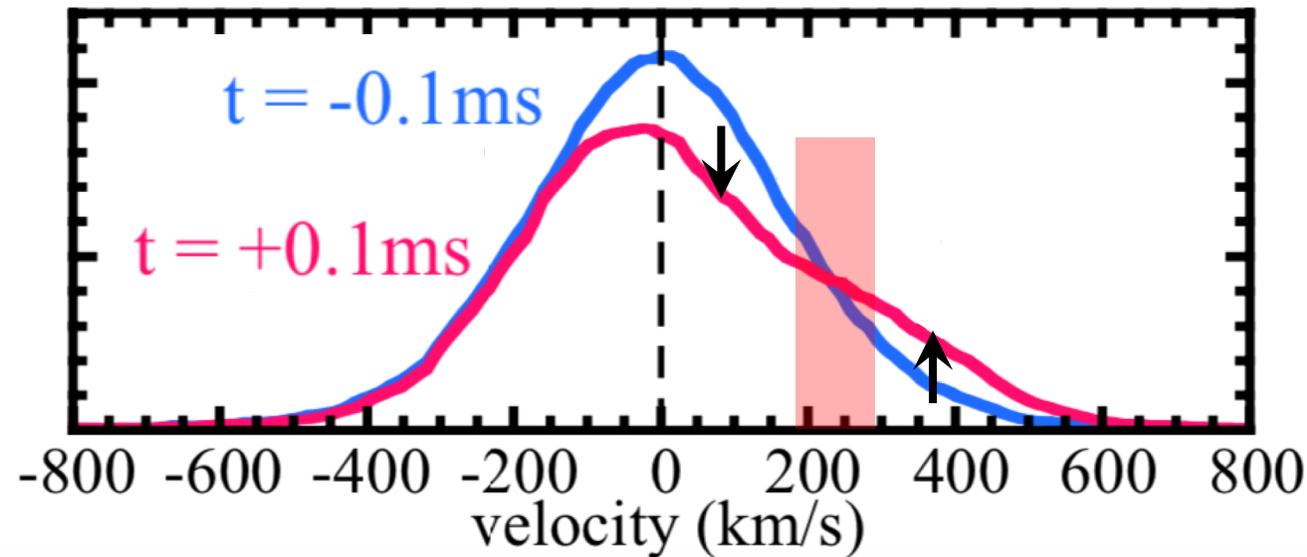
Y. Kosuga+, Nucl. Fusoin **57**, 072006 (2017)

プラズマ乱流輸送の未解決課題に回答を与える鍵となりうる

理論・シミュレーション・実験の統合的なアプローチにより、位相空間乱流がプラズマ閉じ込めにもたらす影響を調査する

速度分布関数計測の現状

- 実空間・速度空間における揺動計測技術の発展に伴い、位相空間乱流輸送の実験的研究を進める機運が高まってきている
- 現状LHDでは、実空間 $O(1-10)$ cm, 速度空間 $O(100)$ km/s, 時間 $O(10^{-4})$ sの計測で、分布関数の歪みの観測までを達成している
※時空間・速度分解能, 信号強度はトレードオフの関係



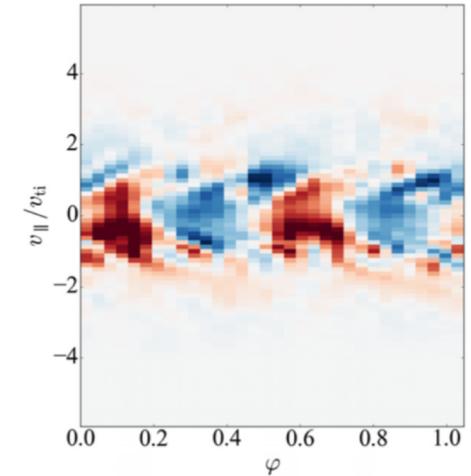
K. Ida+, submitted to Phys. Rev. Lett. (2021)

- 微小スケール位相空間乱流の詳細計測は現状難しい

10年間の見通し

今後10年で、分布関数歪みの計測から、位相空間”構造”の計測へと拡張する

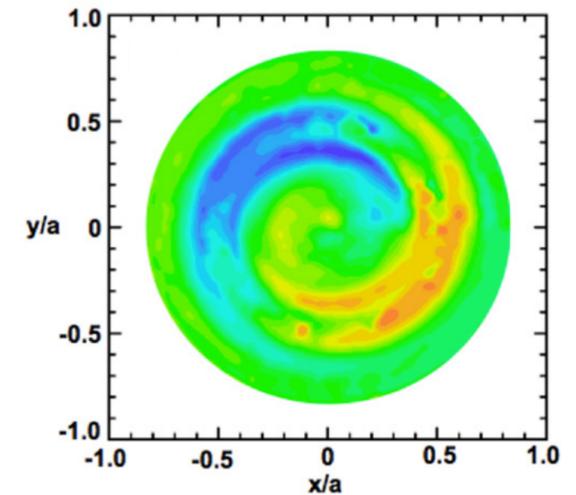
運動論シミュレーションで見られている位相空間構造に着目し、実空間・速度空間の実験計測器にどのように現れるか(フットプリント)を予測する
実験実施の指針とする



Y. Asahi+, *Phys. Plasmas* **28** 012304 (2021)

計測器のカバー領域に入る、低周波(<10kHz), メゾ・マクروسケール揺動が作る位相空間構造の実測を目指す

- ・マクروسケール揺動, 帯状流, ストリーマ, MHD揺動
- ・突発的輸送現象
- ・外部加熱駆動された瞬時輸送現象



S. Inagaki+, *Nucl. Fusion* **52** 023022 (2012)

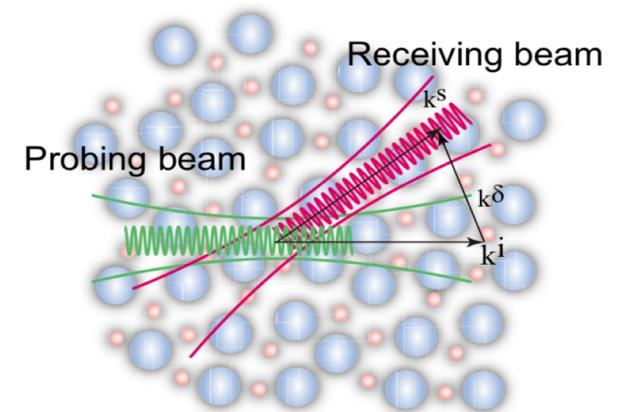
実験プラットフォームとして, LHD, JT-60SA, PLATO, CFQS, 及び基礎装置など

10年間の見通し

計測器開発：

位相空間構造を詳細に計測するための計測器の高性能化

- ✓ イオン速度分布関数計測として、LHD実験で利用されている計測原理（荷電交換分光や協同トムソン散乱計測）の高性能化
 - 最先端の超高速受光器や大口径光学系を活用した信号増強を行う
- ✓ 垂直ECE計測やレーザー散乱計測などの電子速度分布関数計測器の開発も行う
- ✓ 先端解析法（機械学習，条件付きサンプリング法，モーメント解析など）の活用で，位相空間相関解析や構造推定を行う



学術的展開

- 様々な系における低衝突乱流プラズマ輸送研究
 - 実験室・宇宙プラズマからの相補的なアプローチを行い，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を構築する。
- 位相空間乱流のスケーリング則の研究
 - 磁場閉じ込め低衝突プラズマで得られた位相空間乱流データを用いて，乱流理論モデルの実験的な検証を行う。

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
- 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との連携実績

まとめ

- 「位相空間乱流」ユニットを紹介した
- 非局所・瞬時輸送, 突発輸送などは未解決課題である
- 位相空間乱流は, 問題解決の候補
- 理論・シミュレーション・実験の統合的なアプローチにより, 位相空間乱流がプラズマ閉じ込めにもたらす影響を調査する
 - 理論・運動論シミュレーションによるフットプリントの探求
 - 低周波数, メゾ・マクロスケール揺動が作る位相空間構造の実測
 - 位相空間計測器の高性能化