

# 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

# アウトライン

## 問題の定式化

1. 準線形・拡散モデルの課題
2. 新たな枠組みとしての位相空間乱流
3. 速度分布関数計測の現状
4. 10年間の見通し  
(理論・シミュレーション・実験・計測器開発)

# 1. 準線形・拡散モデルの課題

これまでの乱流輸送研究では、多くの場合で準線形・拡散的輸送モデルが用いられてきた

乱流揺動によるある物理量 $f$ の輸送の、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 $D$ の同定や運動論的シミュレーションを用いた背景物理の考察が行われている

- 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、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
- プラズマ輸送の定式化に関する研究はこれまでも多く行われてきたが、上記の課題に対する一般的な理解を与えるに至っていない

## 2. 新たな枠組みとしての位相空間乱流

プラズマの衝突周波数が下がると、揺動による粒子の捕捉が支配的になり、準線形・拡散近似が成り立たなくなることが理論的に予測されている

実空間と速度空間に張られる「位相空間」に様々な構造が形成され、輸送に寄与する

- 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（突発性）を励起する
- 亜臨界不安定性を励起する

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

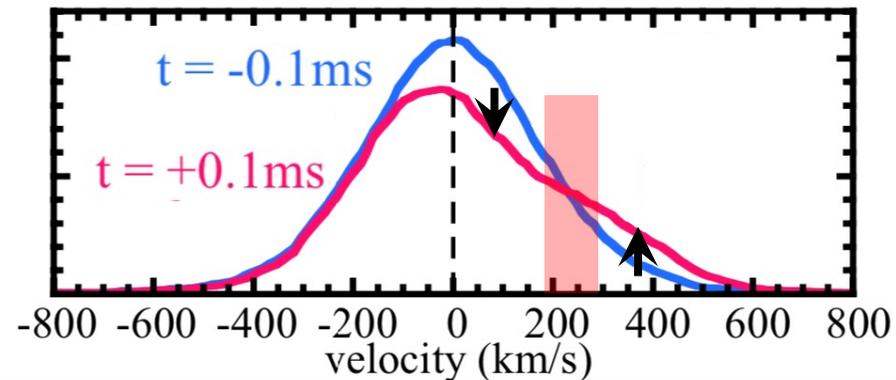
プラズマ乱流輸送の未解決課題に回答を与える鍵となりうると提案されている

### 3. 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、空間 $O(1-10)$  cm, 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、波長分解能、信号強度はトレードオフの関係



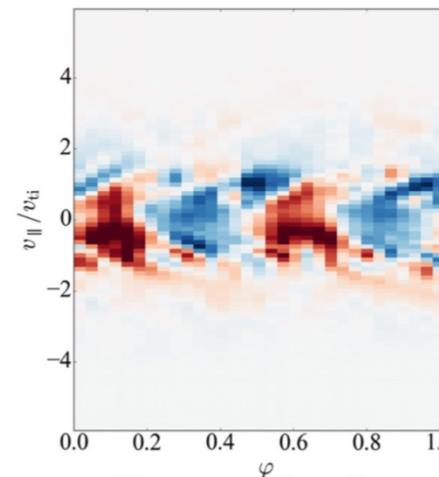
K. Ida+, submitted to Phys. Rev. Lett. (2021)

「究極の目標」である微小スケール位相空間乱流の詳細計測は現状難しい

# 4.10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

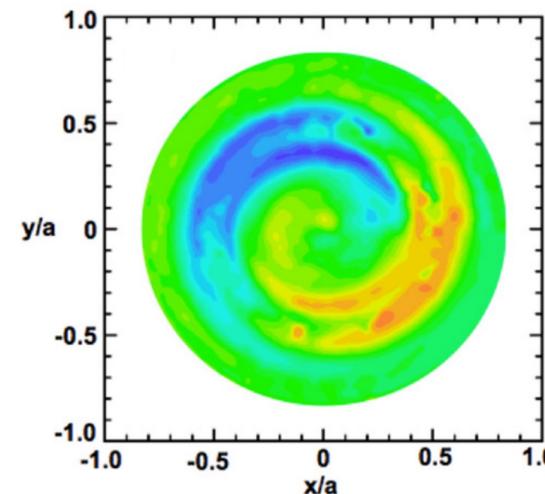
ジャイロ運動論で見られている位相空間構造に着目し、  
実空間・速度空間の実験計測器にどのように現れるか  
(フットプリント)を予測する  
実験実施の指針とする



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

研究の端緒を掴むため、計測器のカバー領域に入る、低周波(<10kHz), メゾ・マクロスケール揺動が作る位相空間構造を目標にする

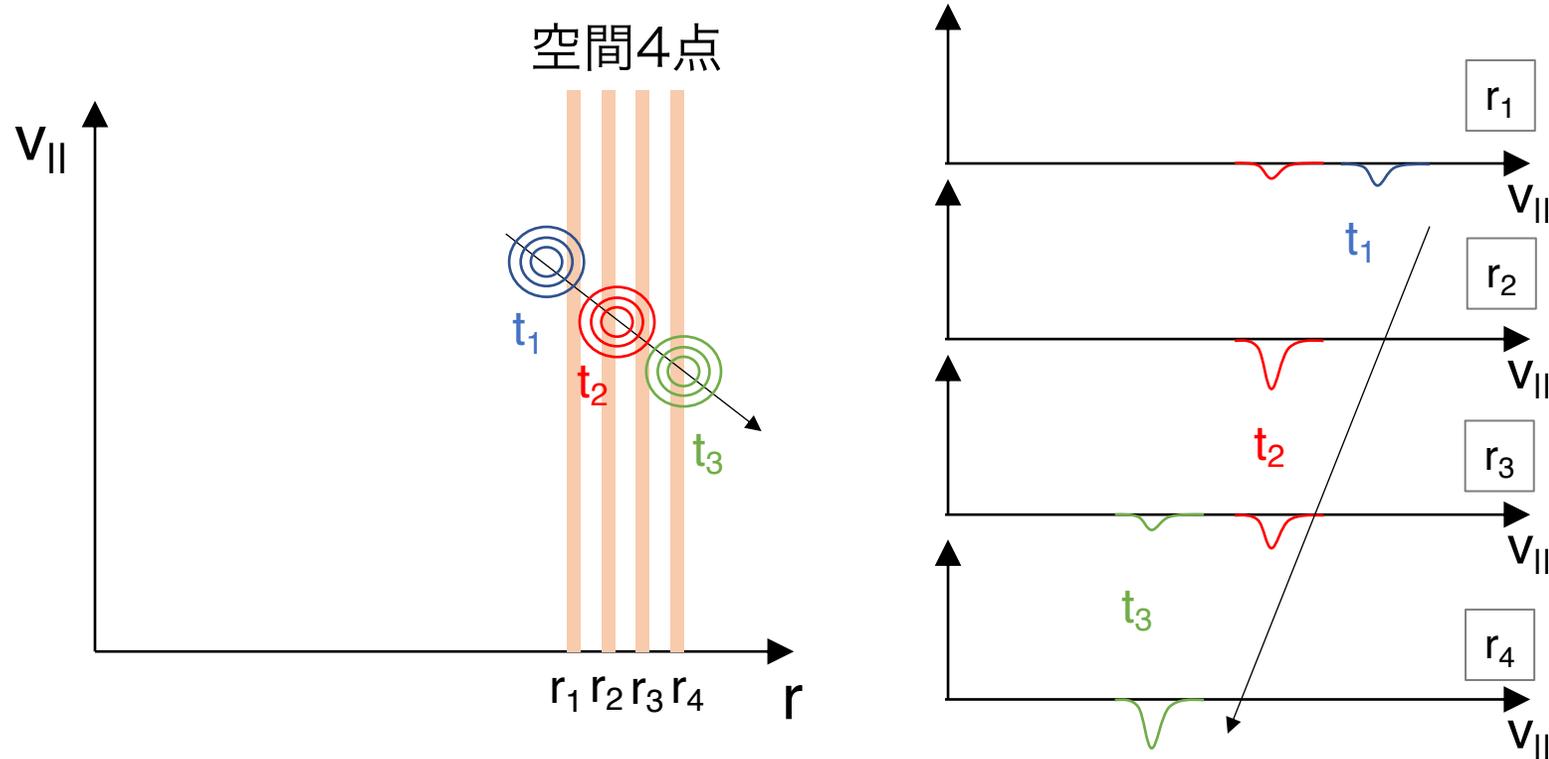
- マクロスケール揺動, 帯状流, ストリーマ, MHD揺動
- 突発的輸送現象
- 外部加熱駆動された瞬時輸送現象



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

# 4.10年間の見通し

実験計測の一例：位相空間ホールが実空間・速度空間を伝播する場合を考える



各空間チャンネルに，相関のある位相空間構造が現れることが期待される

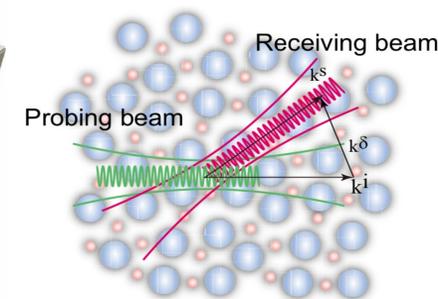
位相空間における相関解析で，位相空間構造を推定する

# 4.10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



# 4.10年間の見通し

- タイムチャート

