

# ユニット成果報告会 位相空間乱流ユニット

小林達哉

# アウトライン

1. 定型的な調査への回答

2. 2023年度研究成果の概要

3. 高エネルギー粒子の非等方性がプラズマ閉じ込めに  
与える影響に関する実験的研究 (西浦正樹)

45分 (内質疑10分)

25分 (内質疑5分)

# 1. 定型的な調査への回答

1. ユニット名 位相空間乱流ユニット
2. ユニットリーダー 小林達哉 (2023年度)、徳澤季彦 (2024年度)
3. ユニット戦略会議

議長： 西浦正樹

所内メンバー： 居田克巳、劔持尚輝、小林達哉、田村直樹、徳澤季彦、西浦正樹、矢内亮馬、山田一博、吉沼幹朗

所外メンバー： 江尻晶(東京大学)、海老原祐輔(京都大学)、川面洋平(東北大学)、佐々木真(日本大学)、田辺博士(東京大学)、西澤敬之(九州大学)、沼田龍介(兵庫県立大学)、藤澤彰英(九州大学)

※ 2023年度終了時

# 1. 定型的な調査への回答

## 4. ユニットの研究目的と目標

核融合プラズマにおける異常輸送研究の未解決問題に回答を与えるため、位相空間プラズマ揺動の実験研究を行う。近年進展の大きい理論・シミュレーション研究から指針を得て、速度分布関数を空間多点同時計測し、位相空間構造の観測を目指す。計測器の原理開発や最適化、位相空間マニピュレータとしての電磁波加熱の利用、実験研究実績のある基礎装置におけるプローブ計測も並行して行う。プラズマの粒子性が顕著になる他のプラズマ研究領域、例えばレーザー・プラズマ相互作用や磁気圏プラズマの挙動研究、との相補的な研究展開を行い、非平衡・非線形プラズマ物理の学理構築に寄与する。

## 5. アカデミックプラン

戦略：計測器の発展や解析技術の進歩、シミュレーションの大規模化が進んだ現在でも、プラズマ位相空間揺らぎの情報を得るための手法は限られている。ユニットでは位相空間揺らぎが顕著に現れ、かつ計測手段が想定されるケースをあげ、「アカデミックプラン」として共有している。これらの研究テーマに所内外のメンバーで協力して取り組み、成果をあげる。

1. センサフュージョンを活用した位相空間構造検出システム構築
2. 基礎プラズマ装置における位相空間ホール励起測定実験
3. オーロラ観測プロジェクト
4. 磁気リコネクション中のイオン・電子の位相空間構造計測
5. 磁気圏における運動論的アルフベン乱流加速
6. プラズマ燃焼物理実験~ $\alpha$ 粒子燃焼シナリオの検証

# 1. 定型的な調査への回答

## 6. 協力組織体制

アカデミックプランをベースにした個別の議論に加え、ユニット研究戦略会議などによる研究進展の共有を行う。

## 7. 特筆される成果と見込み

実験・シミュレーション・理論研究者が一堂に会する本ユニットでの研究連携により実験検出が系統的に行われることにより、これまで得られなかった新たな知見が得られることが見込まれる。

## 8. 思うようにいかない点、その原因分析と解決思案について

ユニット所内メンバーはプラズマ実験・計測の専門家で占められている一方、これまで位相空間の計測を専門で行なってきた研究者は多くない。新たな取り組みとして位相空間乱流計測に取り組む際に、知識や経験を得るための時間が必要であり、その間成果が出しにくいという問題点がある。大きな成果が出る前の段階でも、計測器に加えた軽微な工夫や改善に関する論文を小まめに執筆するなど、“つなぎ”の成果を得ることでこの問題が解決されると思案している。

## 9. ユニット評価委員会への要望

各メンバーは程度の差こそあれ専門とする物理・計測対象を変更している。成果が出るまでの間ある程度の時間がかかることが想定される。成果が出にくい期間がある程度続くことをご理解いただけるよう、要望する。

# 1. 定型的な調査への回答

論文：所内メンバーが筆頭著者

1. K. Ida, "Isotope effect of transport and key physics in the isotope mixture plasmas", *Reviews of Modern Plasma Physics* 7, 23 (2023)
2. T. Kobayashi, "Prospect for experimental investigation of phase-space turbulence in magnetically confined fusion plasmas", *Plasma and Fusion Research* 18, 2402059 (2023)
3. T. Kobayashi, et al., "A comparison of velocimetry algorithms: orthogonal dynamic programming based particle image velocimetry versus local correlation tracking", *Plasma and Fusion Research* 18, 1402058 (2023)
4. T. Kobayashi, et al., "Phase-space tomography in magnetically confined plasmas", *Physics of Plasmas* 30, 052303 (2023)
5. T. Kobayashi, et al., "Prompt core confinement improvement across the L–H transition in DIII-D: Profile stiffness, turbulence dynamics, and isotope effect", *Physics of Plasmas* 30, 032301 (2023)
6. T. Tokuzawa, et al., "New Q and V-band ECE radiometer for low magnetic field operation on LHD", *EPJ Web of Conferences* 277 03008 (2023)
7. R. Yanai, et al., "Multi-hole Coupling Power Monitor with Tapered Sub-waveguide for Dual-frequency High-power Gyrotron", *AIP Advances* 13, 095105 (2023)

# 1. 定型的な調査への回答

国内外の主要な研究集会における研究発表 (招待講演のみ) :

1. N. Kenmochi, Fast response of turbulence and heat pulses to thermal perturbations, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Japan, Nov. 2023
2. K. Ida, Experimental discoveries of a variety of turbulent states of magnetic fusion plasma, Subrahmanyam Chandrasekhar Prize of Plasma Physics Lecture, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Japan, Nov. 2023
3. K. Ida, Overview results from Large Helical Device deuterium campaigns on basic plasma physics for solving future issues in burning plasma, International Conference on Research and Application of Plasmas (Plasma 2023), Poland, Sep. 2023
4. K. Ida, Isotope effect of transport and key physics in the isotope mixture plasmas, 10-th Asia Pacific Transport Working Group 2023, Korea, Jun. 2023
5. T. Kobayashi, Experimental progresses on understanding for global nature of confinement transition in toroidal plasmas, 10-th Asia Pacific Transport Working Group, Korea, Jun. 2023
6. T. Kobayashi, Phase-space tomography as a tool for high-resolution phase-space measurement, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Japan, Nov. 2023
7. T. Nasu et al., Electron-scale turbulence characteristics in LHD plasma, IAEA-FEC, UK, Oct. 2023
8. N. Tamura, Study based on perturbations of plasma by TESPEL injections into magnetically confined high-temperature plasmas, International Conference on Research and Application of Plasmas (Plasma 2023), Poland, Sep. 2023
9. M. Nishiura, Core density profile control by energetic ion anisotropy in LHD, APS-DPP, Denver, CO, Nov, 2023

# 1. 定型的な調査への回答

セミナー実施：

1. 6月23日 海老原祐輔(京都大学)、ほか「オーロラ観測プロジェクト」研究会
2. 12月5日 Y. Andrew(Imperial Collage London, UK) Information Geometry Analysis of H-mode Transitions
3. 12月27日 Shi Zongbing (Southwestern Institute of Physics, China) "HL-3 tokamak and its diagnostics development"
4. 12月27日 Shaobo Gong (Southwestern Institute of Physics, China), "Progress of Thomson scattering diagnostics and PCI diagnostics"

ユニット研究戦略会議内セミナー(Tea time seminar)

1. 2月7日坂本隆一 NIFS「NIFSロードマップ関連の状況報告」
2. 3月6日星 健夫 NIFSプラズマ量子プロセスユニット 「富岳を用いた先端計測データ解析」
3. 4月3日齋藤幸碩 東北大学・理学研究科 D2 「地球磁気圏におけるKinetic Alfvén waveによる電子加速過程の理論・数値的考察」

※4月以降も月一回開催予定

# 1. 定型的な調査への回答

競争的資金獲得 (2023年度、2024年度新規分) :

1. 科研費 基盤研究(B)(課題番号：23H01160) 「高エネルギーイオン・揺動解析による自律燃焼プラズマの乱流輸送機構の解明」、西浦正樹
2. 科研費 基盤研究(B)(課題番号：23K25858) 「高温プラズマ中の突発現象の理解に向けた乱流場のエネルギーカスケード変化の可視化」、徳澤季彦
3. 科研費 国際共同研究加速基金(海外連携研究)(課題番号: 23KK0054) 「磁場閉じ込め高温プラズマの乱流輸送に及ぼす不純物の影響の定量的解明」、田村直樹
4. 科研費 基盤研究(C)(課題番号：24K07002) 「トムソン散乱計測の新しい展開」、山田一博
5. 科研費 基盤研究(B)(課題番号：24K00609) 「データ同化による核融合プラズマ予測制御手法の開発」、村上定義(京都大学) (分担: 劔持尚輝)
6. 科研費 基盤研究(C)(課題番号：24K06999) 「非局所輸送を活用した高速・高空間精度プラズマ制御手法の開拓」、劔持尚輝

## 2. 2023年度研究成果概要 アウトライン

1. 背景：プラズマ高温化への挑戦と、位相空間揺らぎ

問い：「核融合プラズマのマクロスコピックな性質への位相空間乱流の寄与は？」

2. 成果：

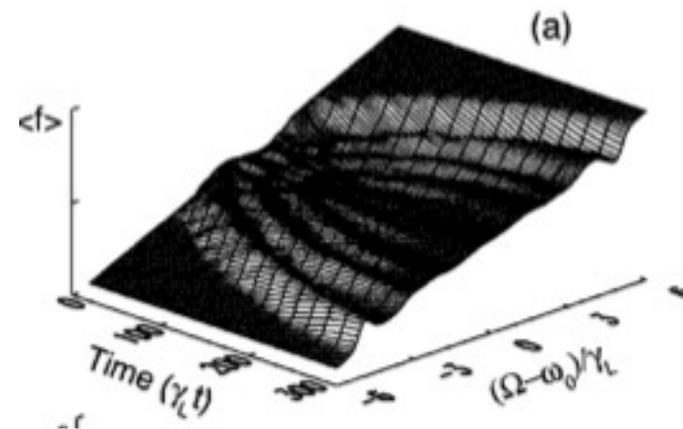
- ・位相空間揺動を計測する直接的アプローチ
- ・位相空間揺動の”フットプリント”を探索する間接的アプローチ
- ・位相空間物理研究の学際連携

3. 結び

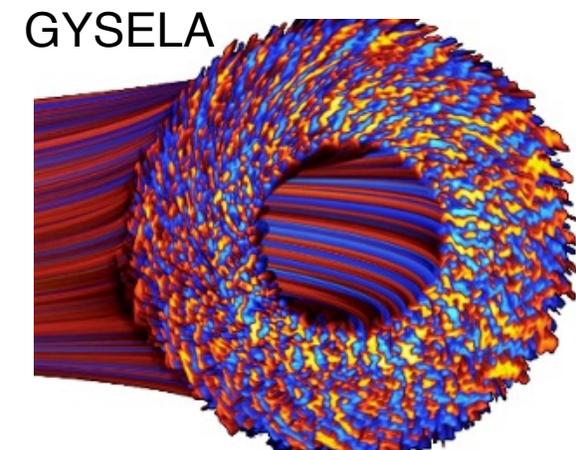
# 位相空間乱流の核融合へのインパクト

$$Q = \frac{P_{\text{OUT}}}{P_{\text{IN}}} = \frac{5P_{\alpha}}{\underbrace{P_{\text{loss}}}_{\text{Losses by transport}} - \underbrace{cP_{\alpha}}_{\alpha\text{-heating}}}$$

- 高いQ値を得るためには  $P_{\text{loss}}$  の抑制と  $cP_{\alpha}$  の増加が必須
- 位相空間揺らぎは輸送、加熱のどちらのプロセスにも重要
- 実験研究が少なく理論検証が不十分
- 観測が困難



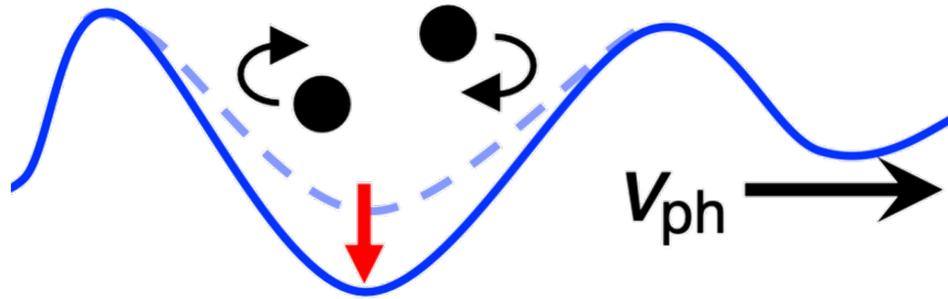
Berk et al PoP (1999)



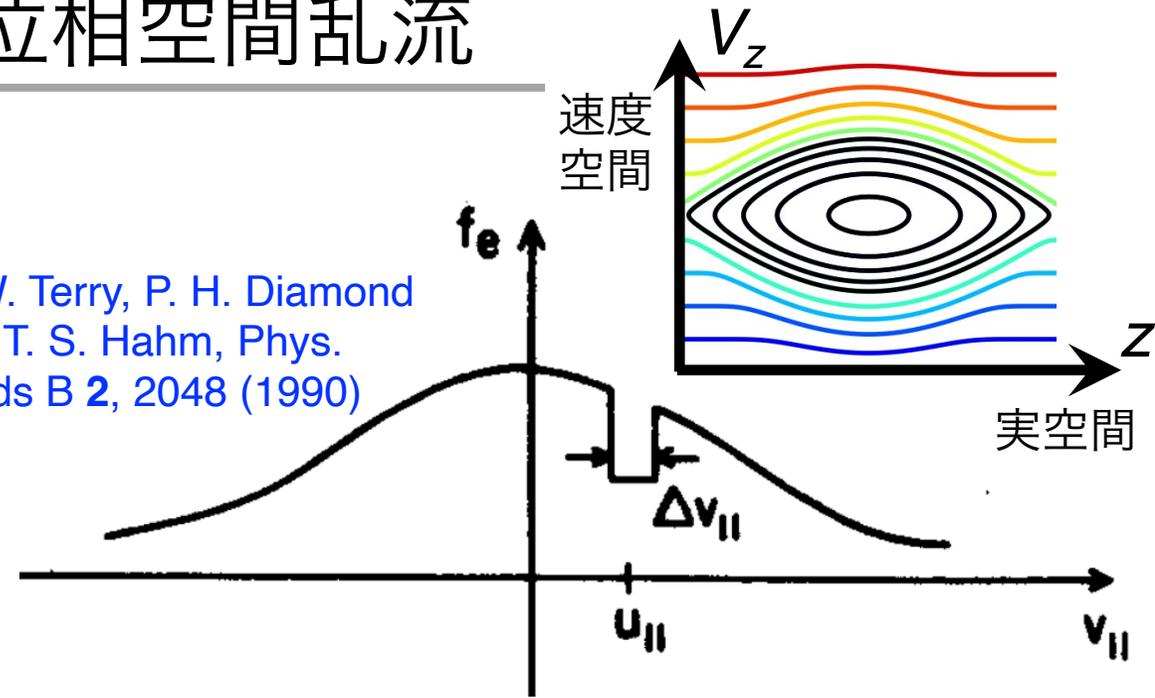
# 速度分布関数の自由度がもたらす位相空間乱流

(粒子補足時間) < (波の相関時間)

➤ 補足粒子と波が非線形相互作用

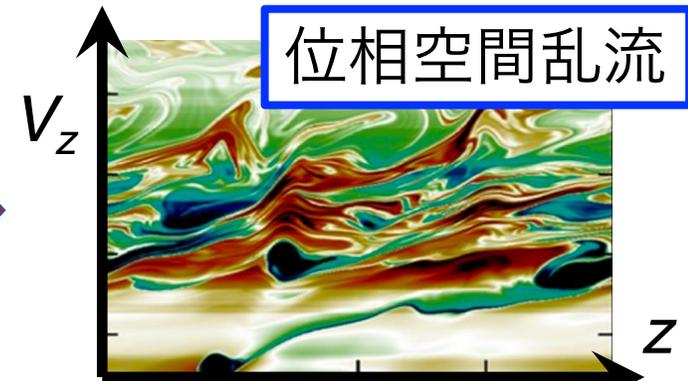
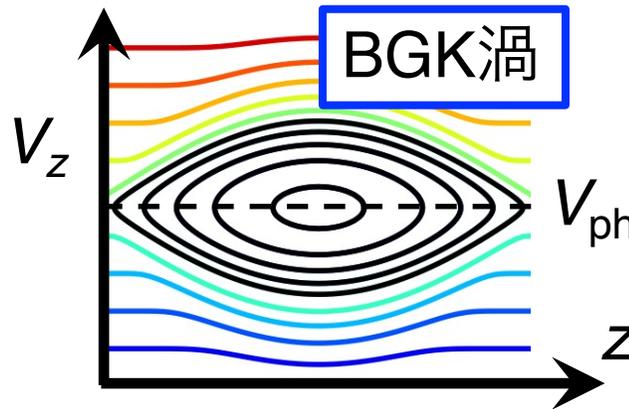


P. W. Terry, P. H. Diamond  
and T. S. Hahm, Phys.  
Fluids B 2, 2048 (1990)



位相空間渦 (BGK渦) は非線形発展して乱流状態に

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



M. Lesur+, PPCF 56, 075005 (2014)

# 波動粒子相互作用の例 (線形・非線形)

ブラソフ・ポアソン系

+

ラングミュア波動

線形的扱い

速度空間の摂動を考慮

$$f = f_0 + f_1 \exp(-i\omega t + ikx)$$

分散関係式は

$$\varepsilon(k, \omega) \equiv 1 + \frac{\omega_p^2}{k} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial f_0 / \partial v}{\omega - kv} dv = 0$$

$\omega/k \gg v$  でラングミュア波の分散  
関係式、 $\omega^2 = \omega_p^2 + 3k^2 v_t^2$

特異点の解析よりランダウ減衰

分布関数の変化は考えない

$$f = f_0 + f_1 \exp(-i\omega t + ikx) + \tilde{f}(v)$$

$u - \Delta v < v < u + \Delta v$ での位相空間  
ホールを考えると、分散関係は、

$$\varepsilon(k, \omega) = \omega_p^2 \tilde{f} \Delta v [(\omega - ku)^2 - k^2 \Delta v^2]^{-1}$$

分布関数の変化を考える

分散関係に摂動量  $\tilde{f}$  : 本質的に非線形

従来の枠組みで現れない輸送・流れ・  
電流駆動・加熱など

# 波動粒子相互作用の例 (線形・非線形)

ブラソフ・ポアソン系

+

ラングミュア波動

線形的扱い

速度空間の摂動を考慮

$$f = f_0 + f_1 \exp(-i\omega t + ikx)$$

分散関係式は

問い：

核融合プラズマのマクロスコピックな性質への位相空間乱流の寄与は？

$$f = f_0 + f_1 \exp(-i\omega t + ikx) + \tilde{f}(v)$$

$u - \Delta v < v < u + \Delta v$ での位相空間

ホールを考えると、分散関係は、

$\varepsilon(k, \omega) = \omega_p^2 / [\omega^2 - k^2 \Delta v^2]$

分布関数の変化を考える

特異点の解析よりランダウ減衰

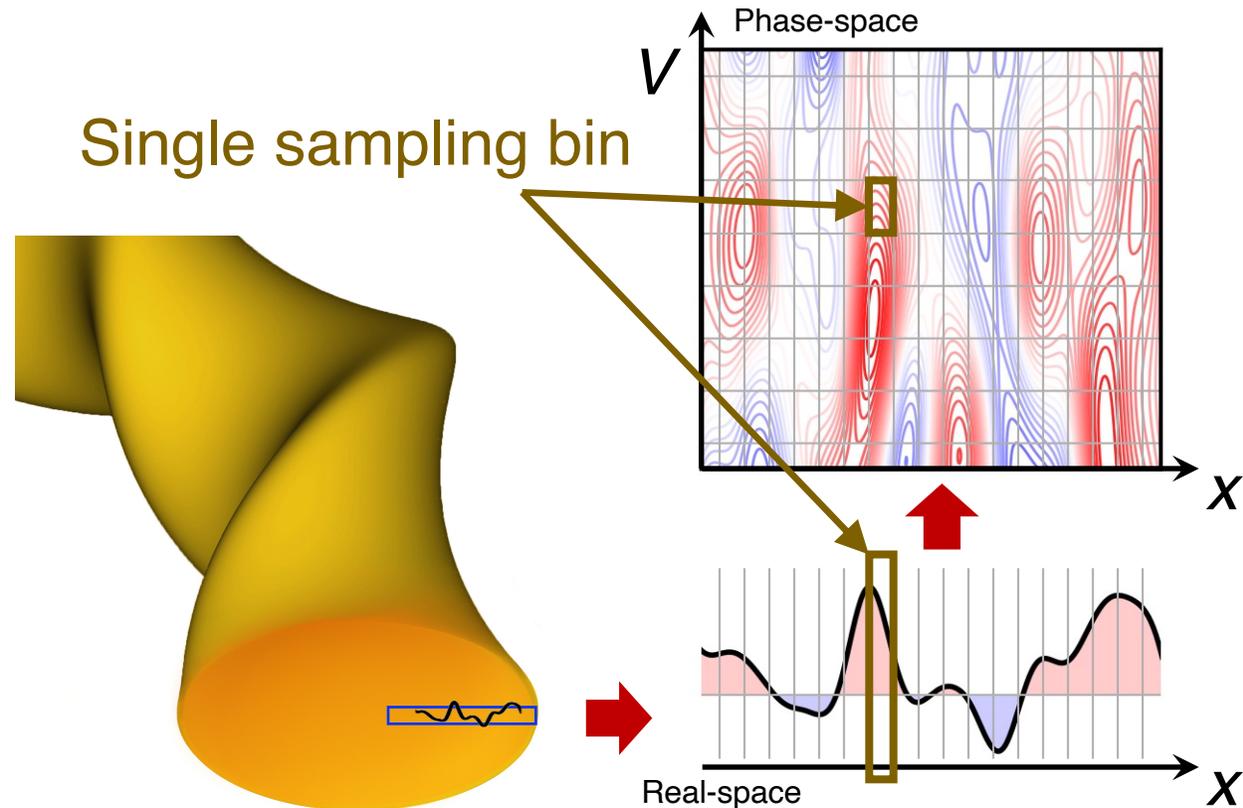
分布関数の変化は考えない

分散関係に摂動量  $\tilde{f}$  : 本質的に非線形

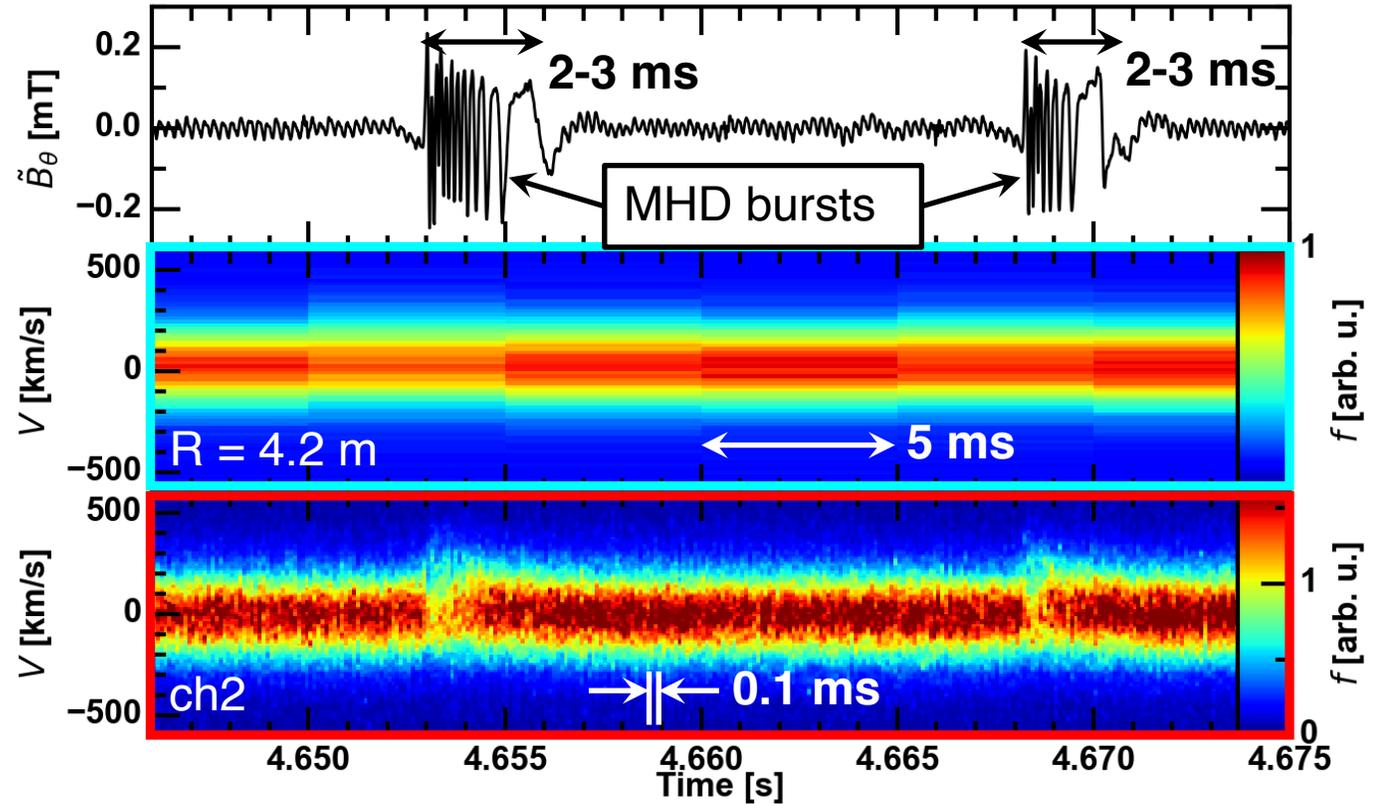
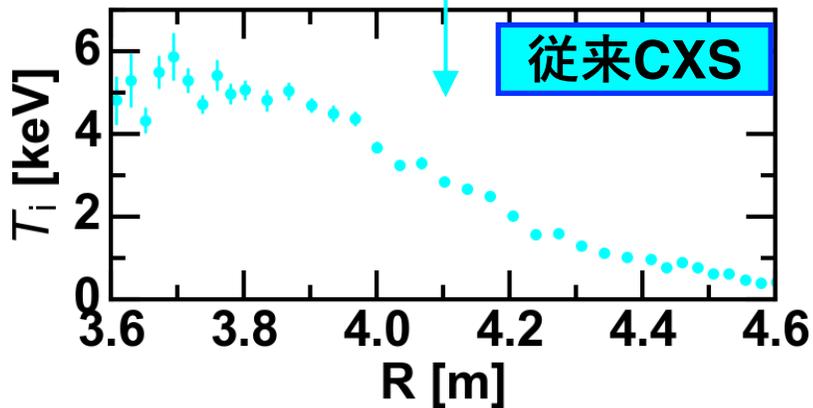
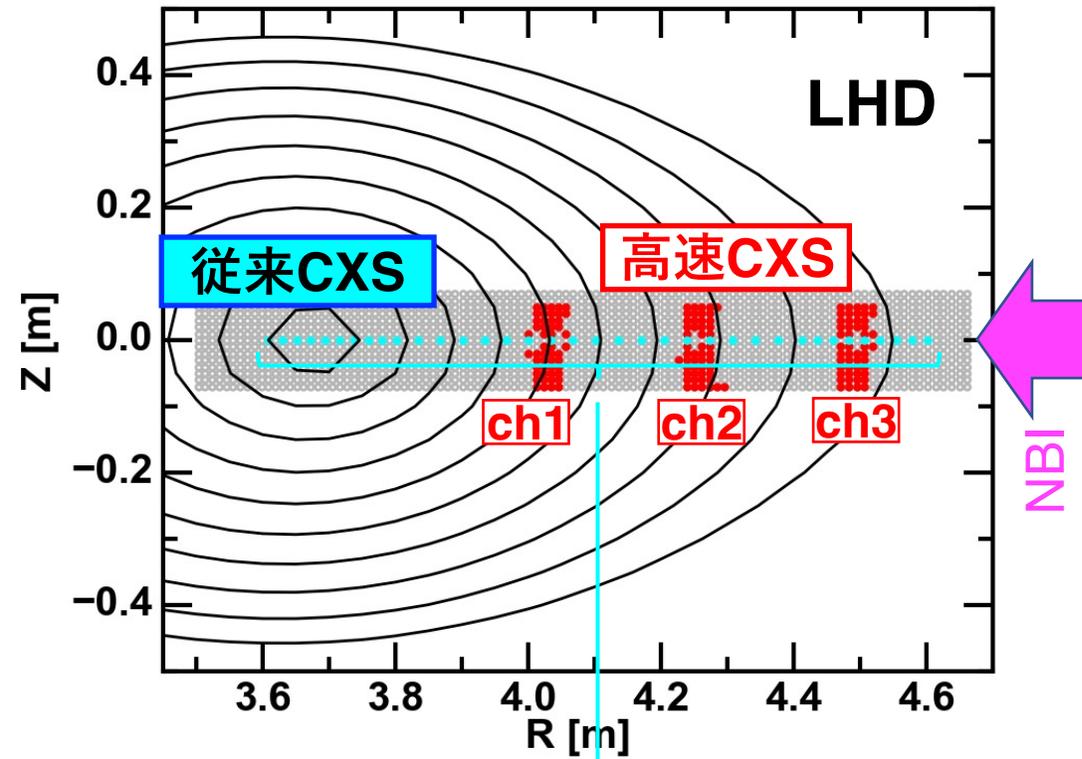
従来の枠組みで現れない輸送・流れ・電流駆動・加熱など

# 実験アプローチとチャレンジ

- Diagnostic mission:
  - 衝突時間  $O(1\text{ms})$ での位相空間(実空間・速度空間)分解
  - 1つのサンプリング領域における信号強度が減少
  - 信号強度を補うためには、分解能を落とす必要：トレードオフ関係
- 検出器のチャンネル数、性能の制限
- 計測原理の制限



# 位相空間構造計測の例



- 露光時間を短縮 → 信号強度が下がって計測不可
- 空間50点を積分、露光時間を1/50に短縮しMHDバースト時の分布関数変化の観測に成功

# 2023年度研究成果

---

- 位相空間分解のためのハード的・ソフト的アプローチ

- ハード的アプローチ：荷電交換分光計測システムの改良
- ソフト的アプローチ：位相空間トモグラフィ
- 位相空間構造分岐

直接的

- 従来計測器を用いた位相空間揺らぎの”フットプリント”検出

- 電子スケール・イオンスケール揺動の同時計測
- 熱と乱流パルス伝播の非拡散的特性
- 高エネルギー粒子の非等方性による粒子輸送の抑制

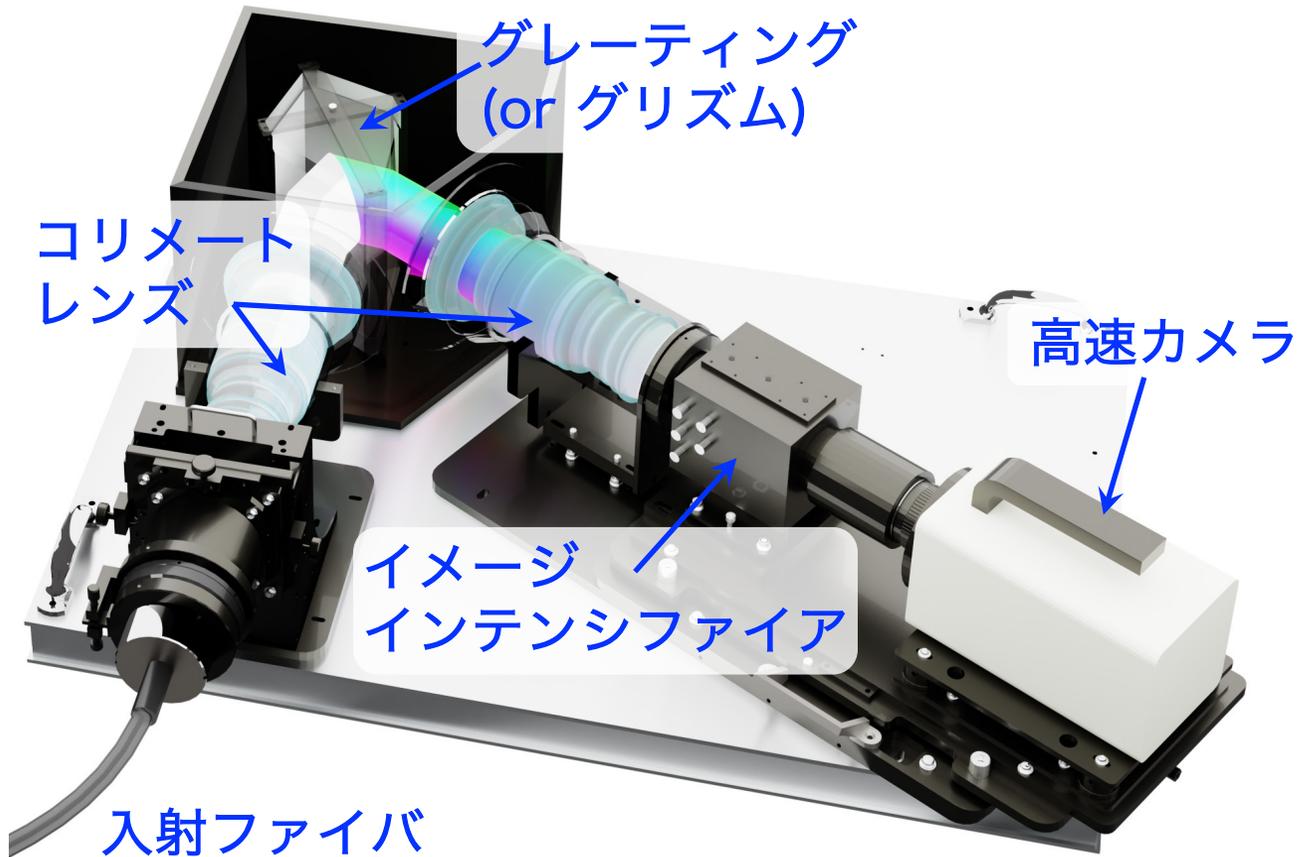
間接的

- 学際的研究展開

- オーロラ観測

# ハード的アプローチ：荷電交換分光計測システムの改良

## 従来システム



問題点：高速カメラが低感度

- イメージインテンシファイア導入 (S/N悪化)
- 50本ファイバビニング (空間分解悪化)

## 改善点

1. 第3世代イメージインテンシファイアの導入

量子効率

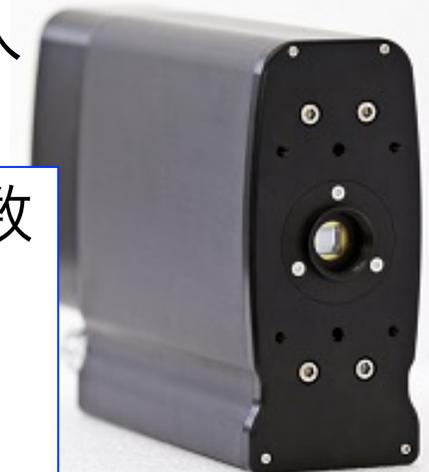
20% → **50%**



2. 高速EMCCDの導入

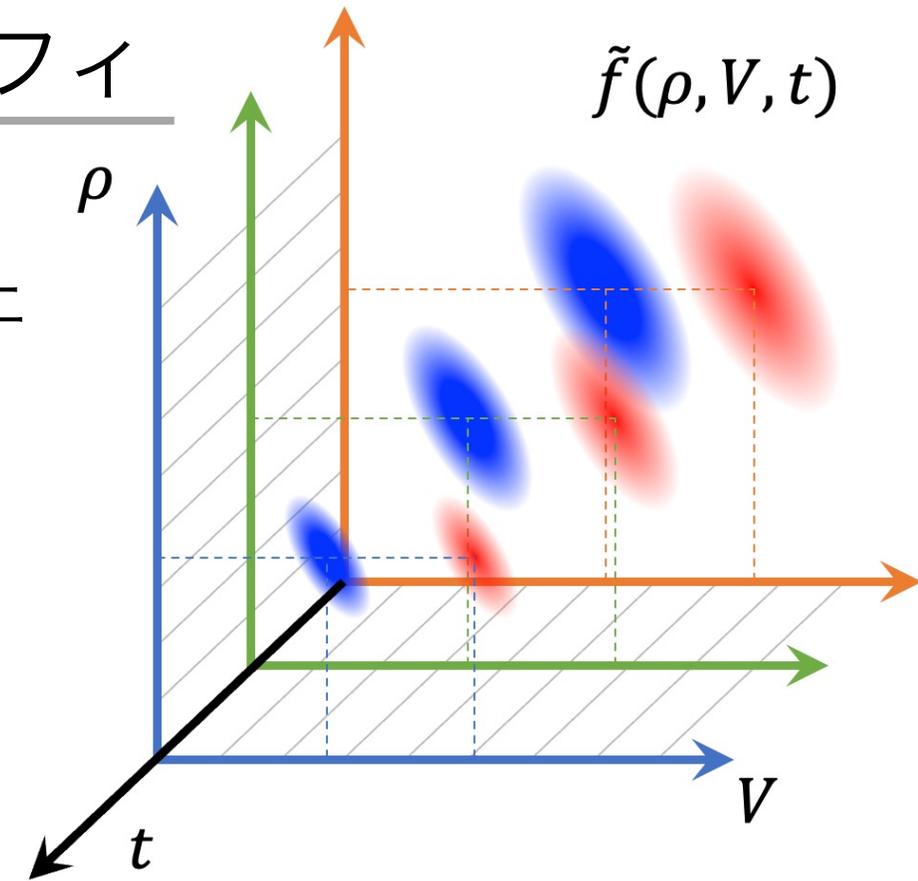
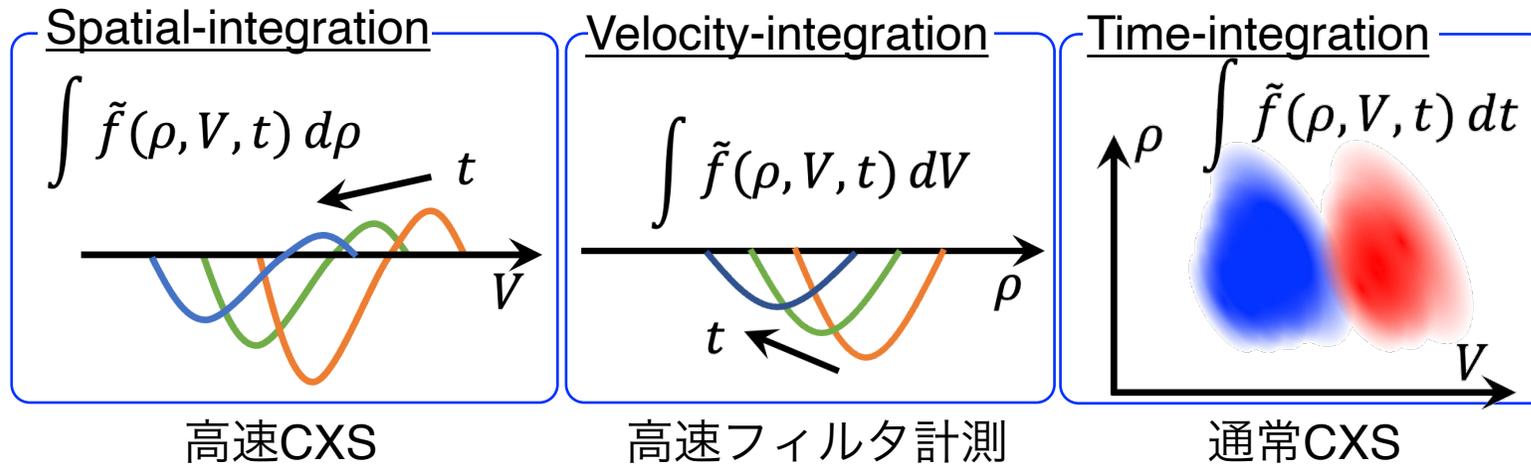
ファイバビニング本数  
(空間分解の逆数)

50本 → **13本**



# ソフト的アプローチ：位相空間トモグラフィ

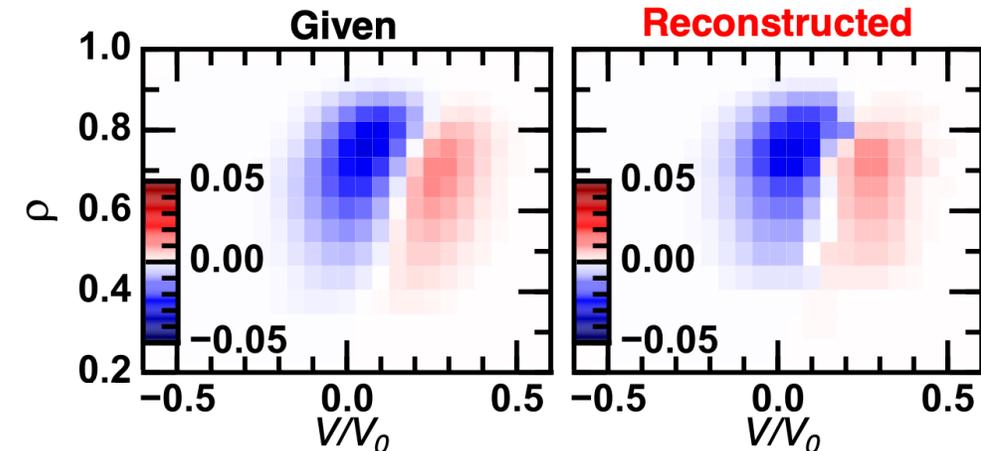
- 計測ターゲット  $\delta f(\rho, V, t)$ ：直接分解は困難
- 既存計測器の組み合わせ+トモグラフィで分解能向上



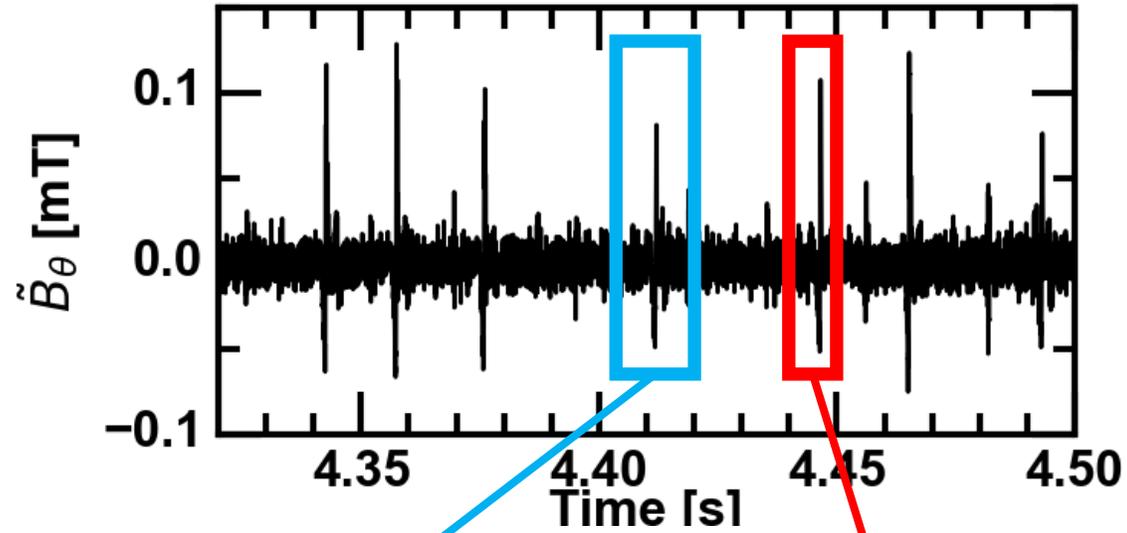
- テストデータを用いた手法の有用性確認

T. Kobayashi+, Phys. Plasmas **30**, 052303 (2023)

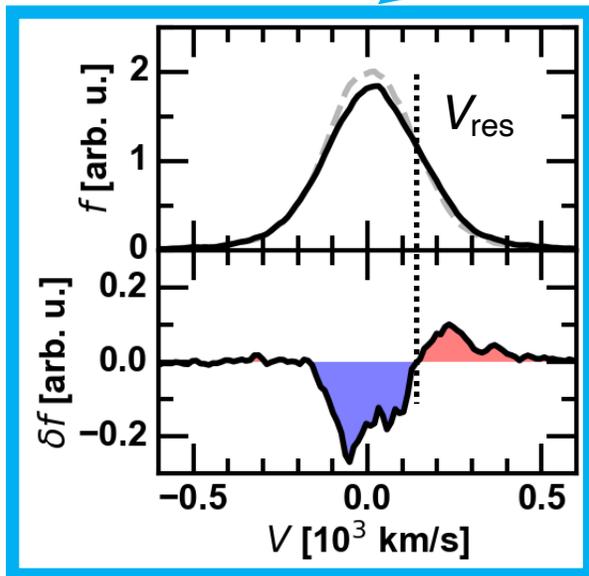
T. Kobayashi+, Plasma Fusion Res. **18**, 2402059 (2023)



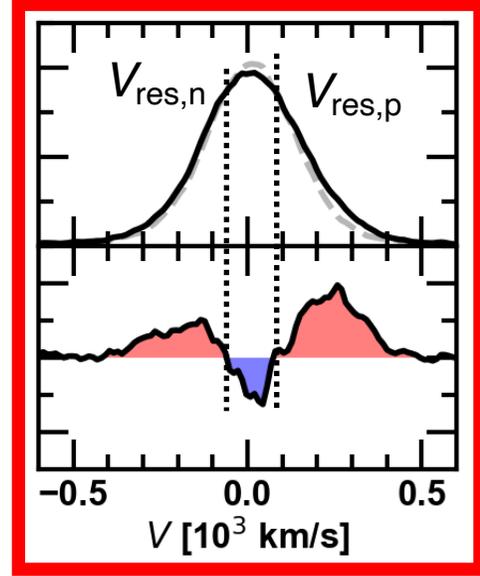
# 位相空間構造分岐の発見



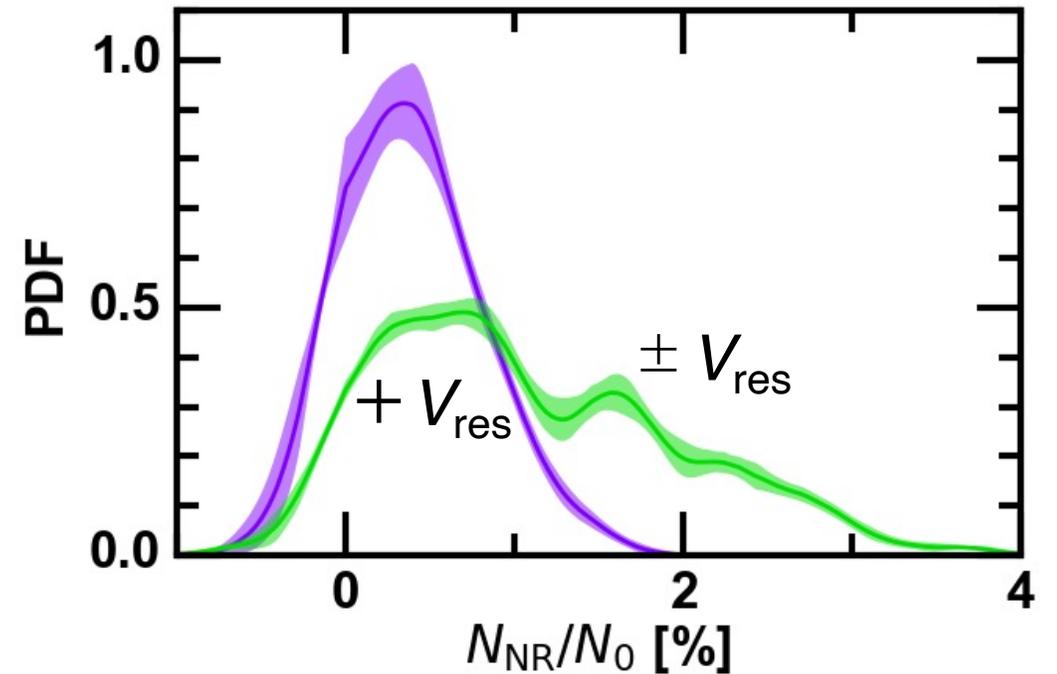
$t \sim 4.41\text{s}$



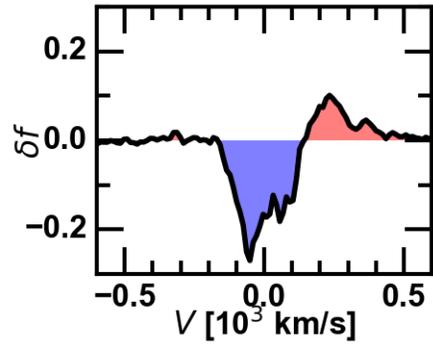
$t \sim 4.445\text{s}$



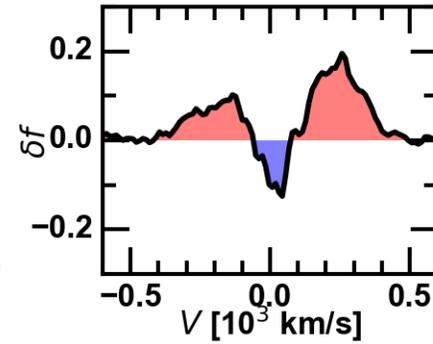
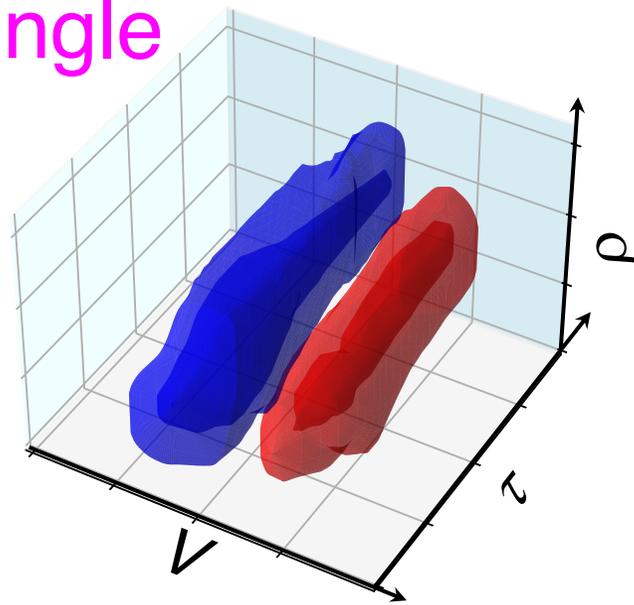
- 2種の分布関数摂動 ( $+V_{\text{res}}$ ,  $\pm V_{\text{res}}$ )
- それぞれに対応するPDFピーク
- 実験条件を変えるとシングルピーク



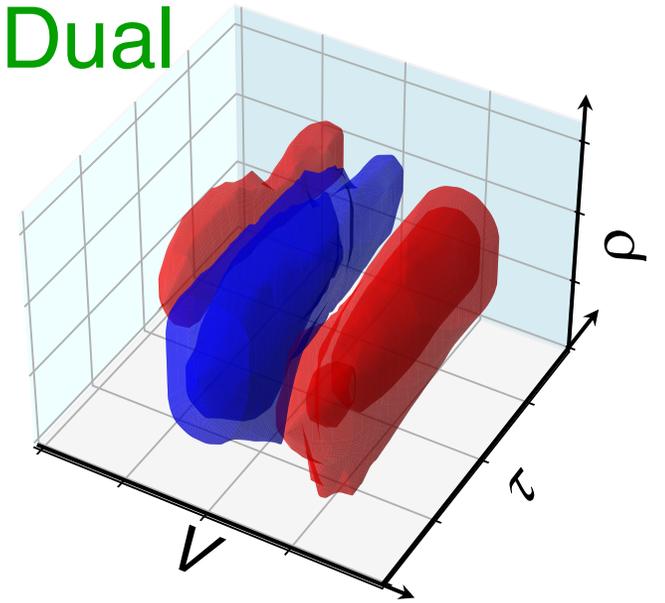
# 位相空間分岐の背景物理



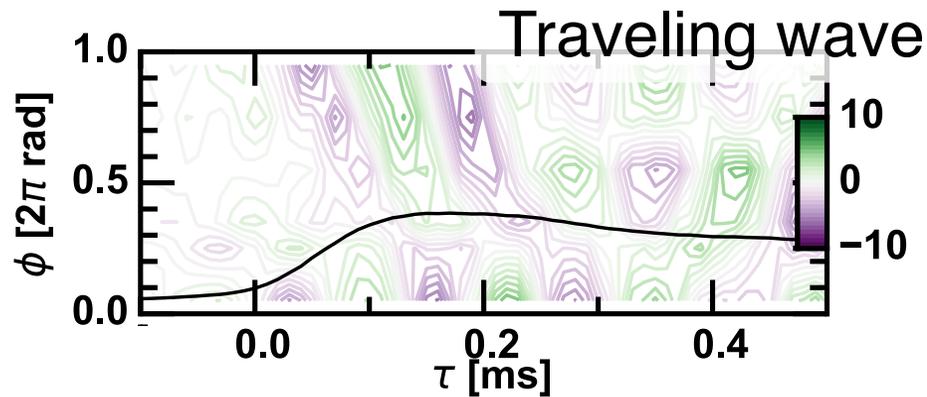
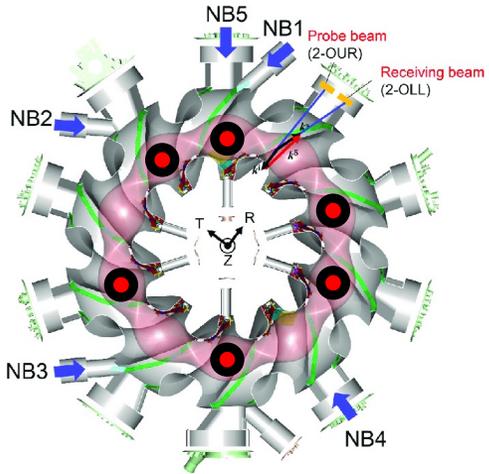
Single



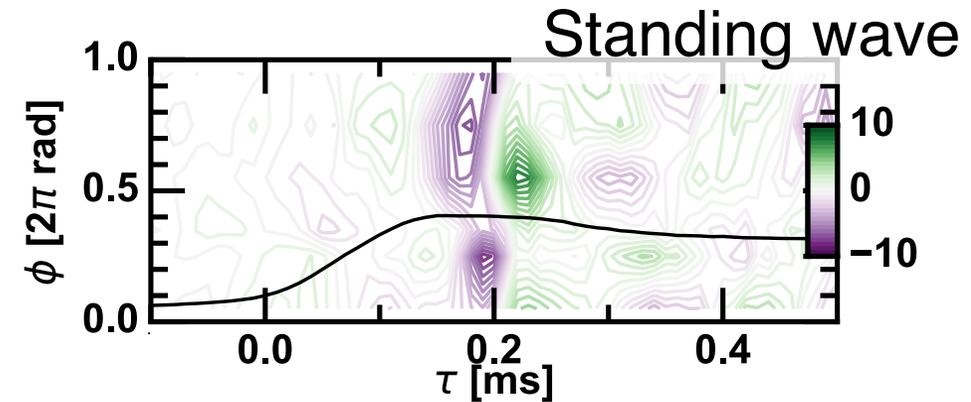
Dual



Magnetic field perturbation



Traveling wave



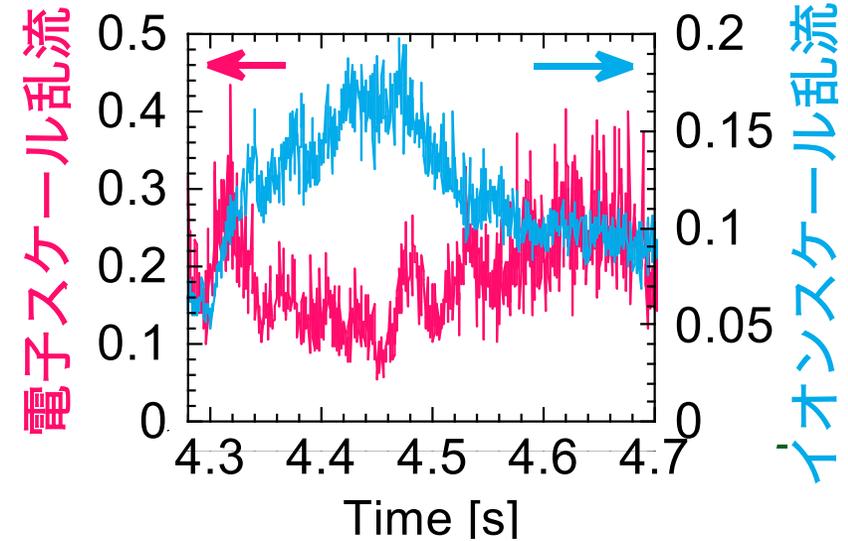
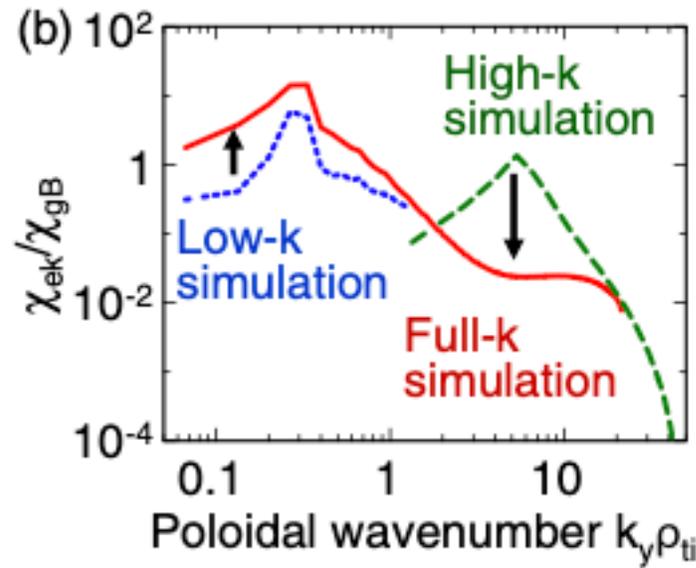
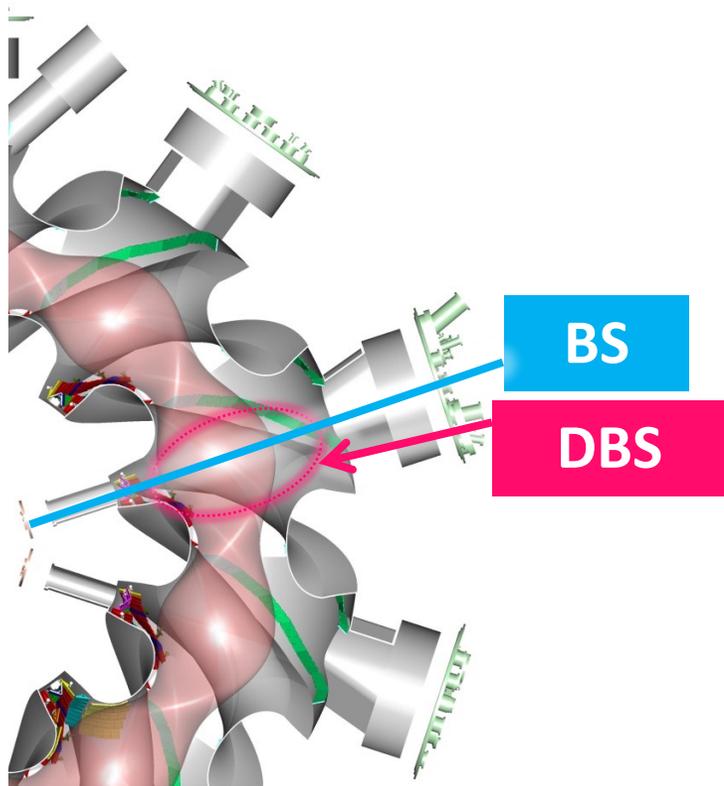
Standing wave

- 位相空間分岐は共鳴波動の選択的分岐による

T. Kobayashi+, AAPPS-DPP (2023)

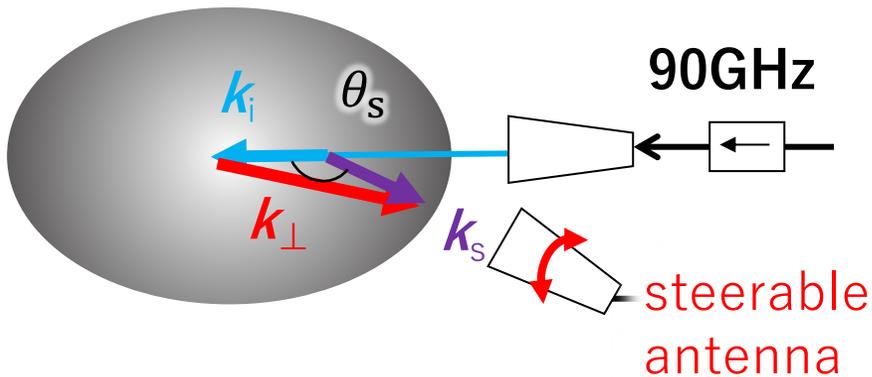
T. Kobayashi+, submitted

# 電子スケール・イオンスケール揺動の同時計測



S. Maeyama+, PRL **114**, 255002 (2015)

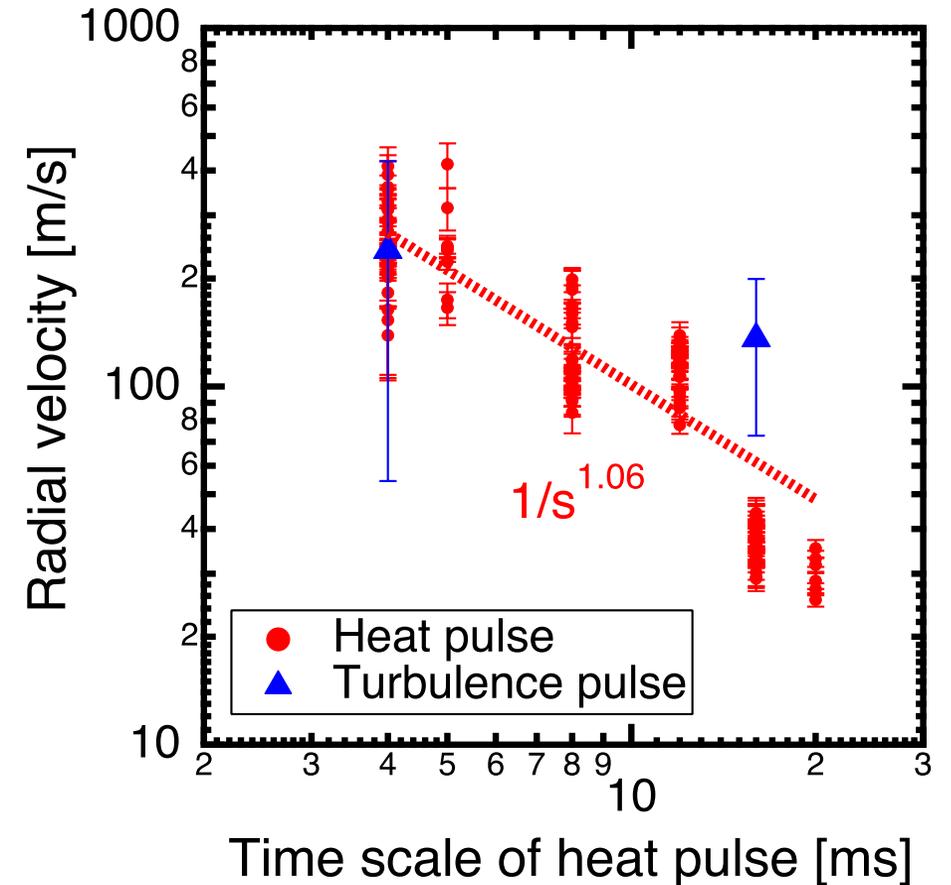
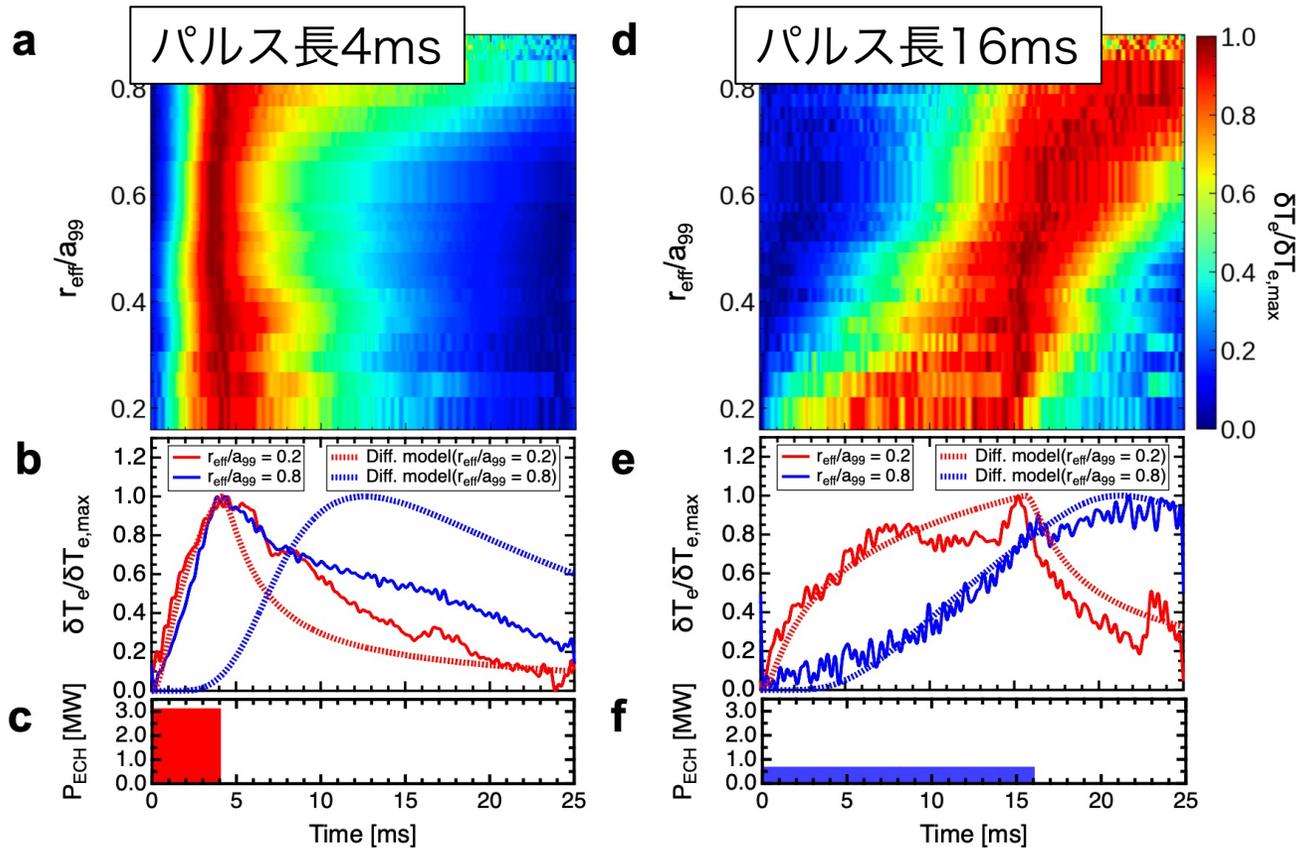
- シミュレーションで予測されたイオン・電子スケール乱流の非線形相互作用の観測のため、同位置観測を実施



- 乱流振幅のパラメタ依存性を整理した結果、線形理論と大きく異なる観測

T. Nasu, T. Tokuzawa+, IAEA FEC (2023)  
T. Nasu, T. Tokuzawa+, submitted

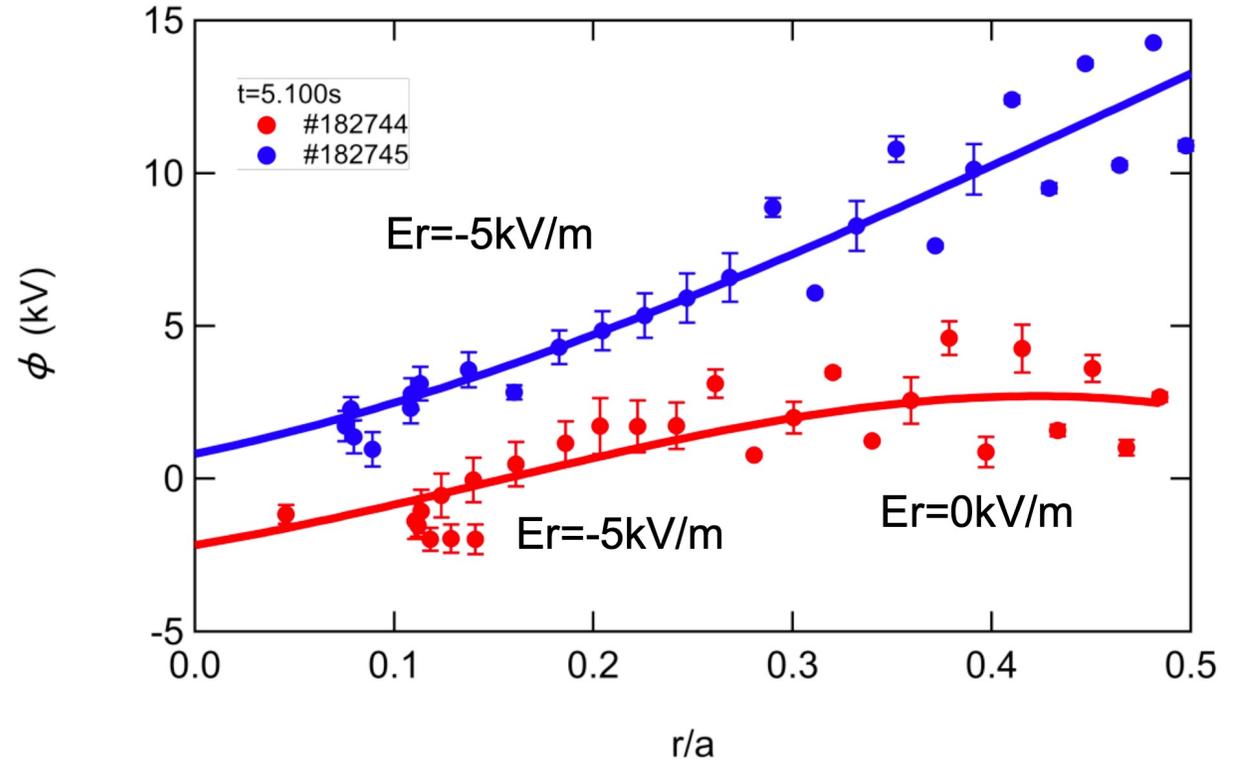
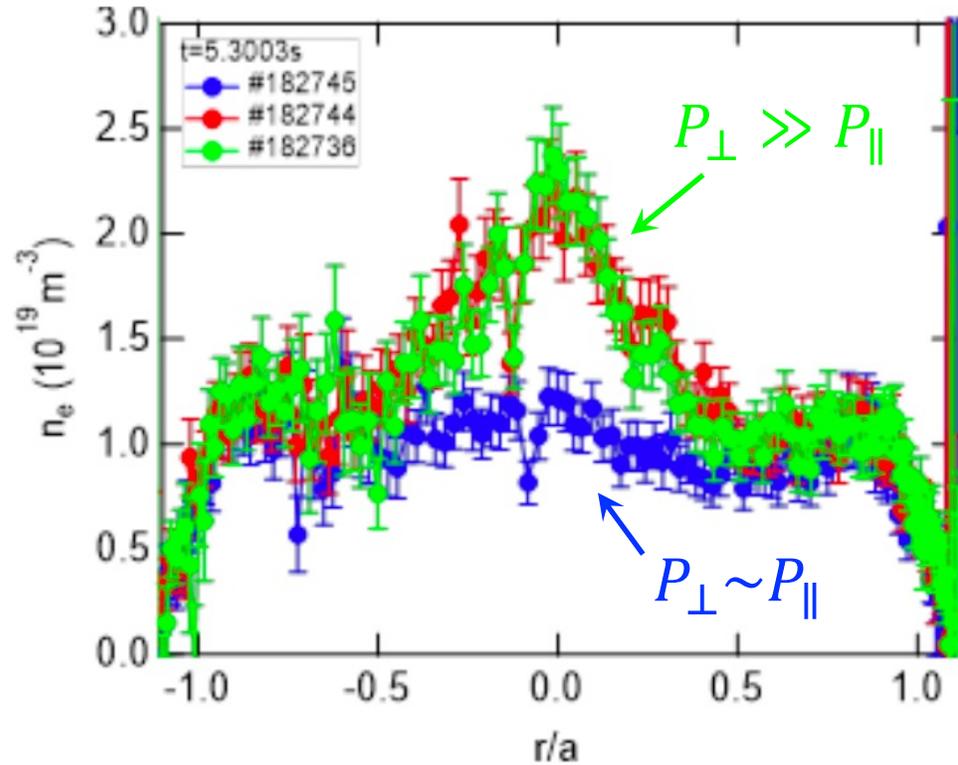
# 熱と乱流パルス伝播の非拡散的特性



熱パルスの伝播特性：

- パルスが長い場合は拡散・対流モデルに従う
- パルスが短い場合、非局所的
- パルスの長短は平衡からのずれの大小と解釈される
- 2つの領域は冪則で繋がる

# 高エネルギー粒子の非等方性による粒子輸送の制御



- NBIにより供給される高エネルギー粒子の非等方性を、垂直・接線NBIビームパワー比で制御
- 垂直高エネルギー粒子成分を増加させると内向き粒子輸送が増加、密度分布がピーク
- 垂直高エネルギー粒子成分の増加と共に負電場がゼロ電場に
- 高エネルギー粒子非等方性を用いた密度分布制御の可能性を示唆

詳細は後続くトークで

# オーロラ観測

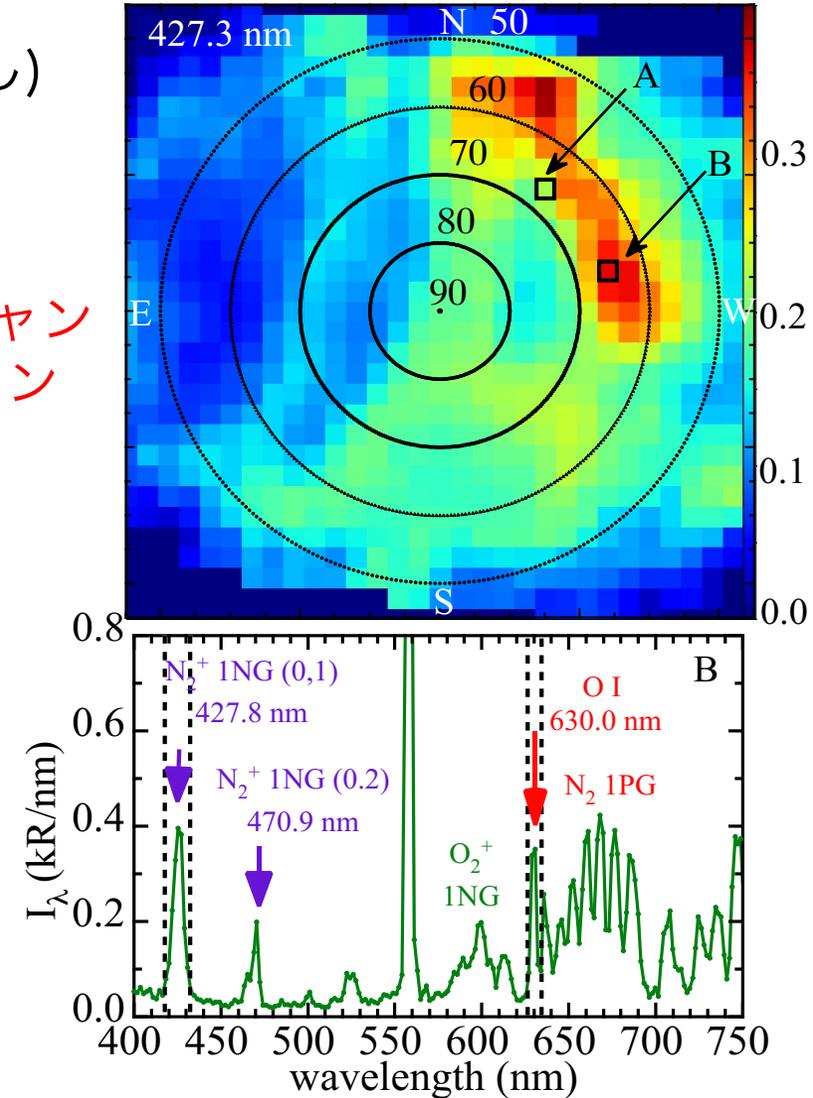


- 従来の計測：  
フィルタによる全天計測(波長分解なし)  
1次元分光計測 (2次元像なし)

- 新規計測：  
2次元分光器による時間的に空間スキャン  
液晶フィルタによる時間的波長スキャン  
(波長分解・空間分解両立)



- 分子発光線による振り込み電子の平均エネルギー計測
- プロトン速度分布関数計測
- エネルギーの変化から不安定性やリコネクションによる粒子加速メカニズムの議論



# 結言

---

## ・位相空間乱流ユニットの紹介

- プラズマ輸送、プラズマ加熱どちらにも重要な寄与をする位相空間乱流の実験的研究は必須
- (粒子補足時間) < (波の相関時間) : 補足粒子と波が非線形相互作用
- 波動の分散関係に非線形寄与、輸送、加熱、電流駆動など

問い：核融合プラズマのマクロスコピックな性質への位相空間乱流の寄与は？  
アプローチ：最先端計測システム・データ科学による実験観測

## ・2023年度の研究成果

- 荷電交換分光計測システムの改良
- 位相空間トモグラフィ、位相空間構造分岐
- 電子スケール・イオンスケール揺動の同時計測
- 熱と乱流パルス伝播の非拡散的特性
- 高エネルギー粒子の非等方性による粒子輸送の抑制
- オーロラ観測