

位相空間乱流ユニットの 研究計画

位相空間乱流ユニット
小林達哉

Contents

- 位相空間乱流ユニットの紹介
 - ▷ 背景、核融合としての課題
 - ▷ ユニットの研究目標、アプローチ
 - ▷ 研究体制
- これまでの活動実績
 - ▷ 2022年度LHD実験
 - ▷ ITC31
 - ▷ UCLA訪問
- 今後の活動計画
 - ▷ アカデミックプラン
- まとめ

Contents

- 位相空間乱流ユニットの紹介
 - ▷ 背景、核融合としての課題
 - ▷ ユニットの研究目標、アプローチ
 - ▷ 研究体制
- これまでの活動実績
 - ▷ 2022年度LHD実験
 - ▷ ITC31
 - ▷ UCLA訪問
- 今後の活動計画
 - ▷ アカデミックプラン
- まとめ

核融合としての課題：乱流輸送

- 乱流輸送による閉じ込めの「パワーデグラデーション」問題

$$\tau_E^{\text{ITER89-P}} = 0.048 M^{0.5} I_p^{0.85} R^{1.2} a^{0.3} k^{0.5} n^{0.1} B^{0.2} \mathbf{P^{-0.5}}$$

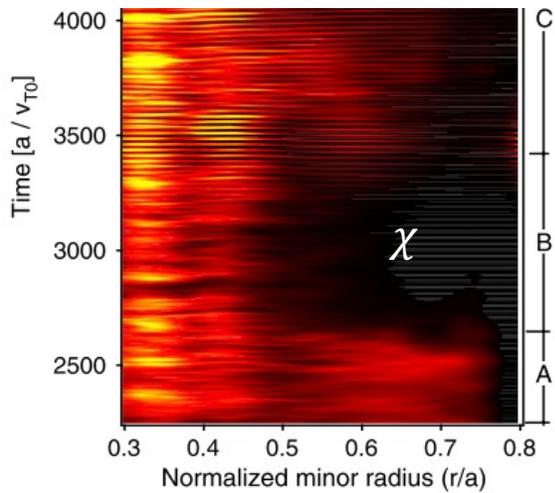
P. N. Yushmanov+, NF 30, 1999 (1990)

- 乱流輸送の理解：準線形・局所・拡散モデル

$$q_r = -\chi d\langle\Psi\rangle/dx \quad (\chi \sim \gamma/k^2 \text{ for most unstable mode})$$

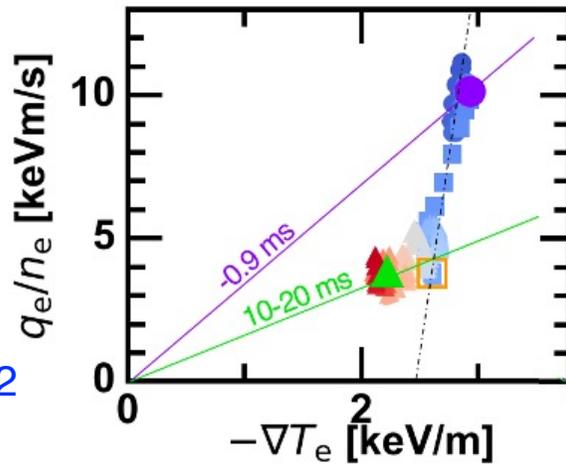
C. K. Kiefer+, NF 61, 066035 (2021)

- 乱流輸送の顕著な非線形性、非局所性、非拡散性が観測されている



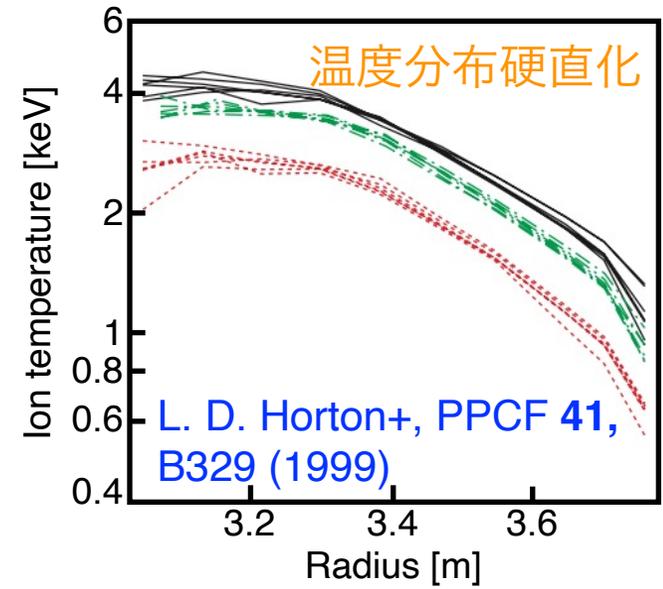
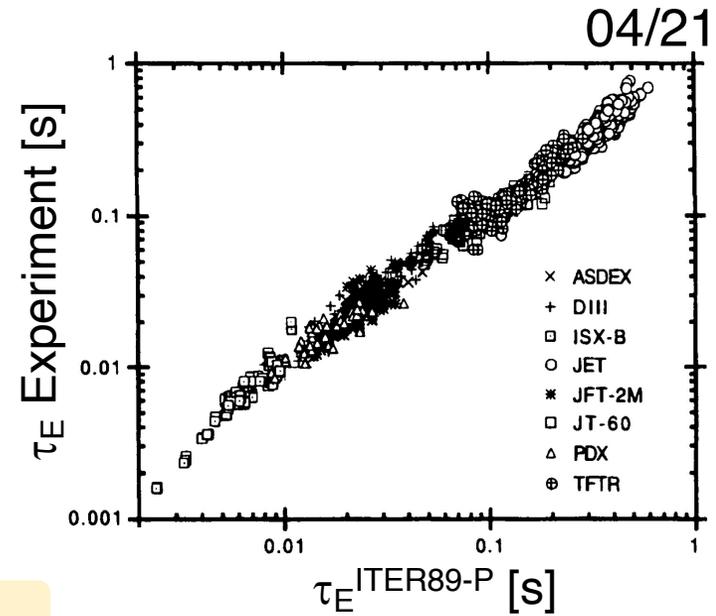
乱流伝播

D. Zarzoso+,
PRL 110, 125002
(2013)



限界勾配と
輸送瞬時伝播

T. Kobayashi+,
PoP 30, 032301
(2023)



L. D. Horton+, PPCF 41,
B329 (1999)

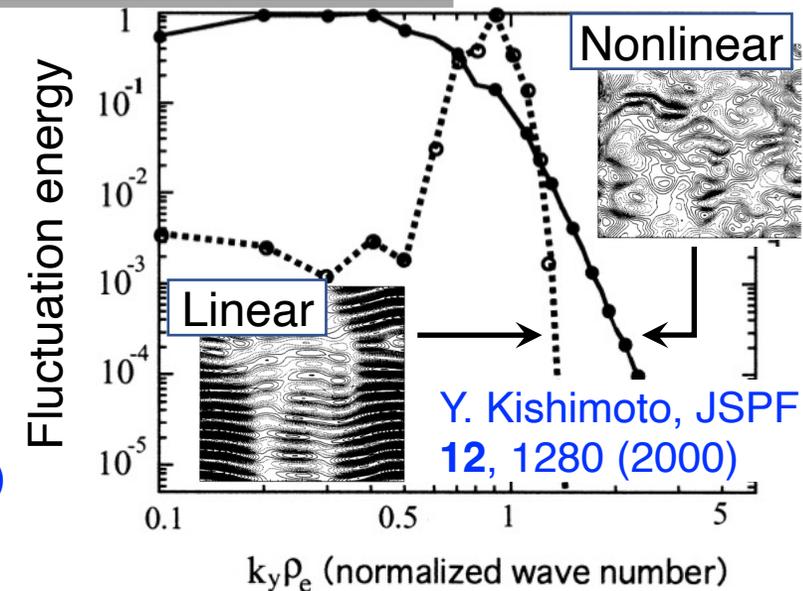
多様な輸送現象の起源：プラズマの高い運動の自由度

1. 揺動スケール方向の自由度

- 多様な固有モードと強い非線形性により、揺動の性質が線形予測と乖離

「マルチスケール相互作用」

S.-I & K. Itoh, PPCF **43**, 1055 (2001)
S. Maeyama+, PRL **114**, 255002 (2015)

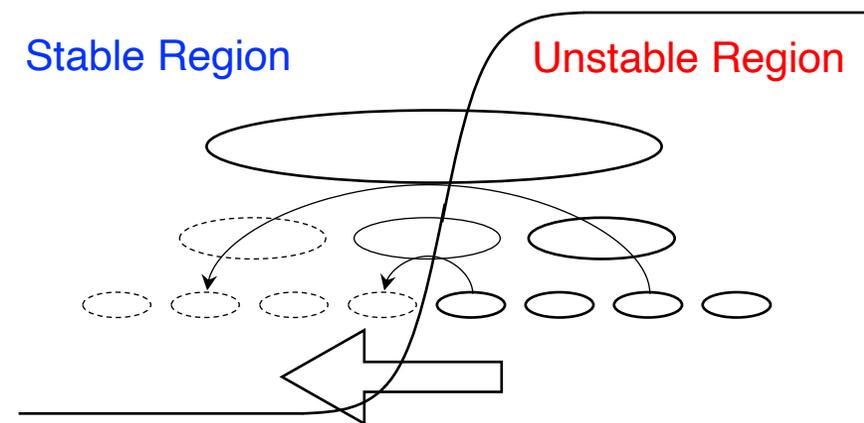


2. 実空間方向の自由度

- 揺動の安定領域への侵入により局所的描像が破綻

「非局所輸送現象」

Ö. D. Gürcan, PoP **14**, 055902 (2007)



3. 速度分布関数の自由度

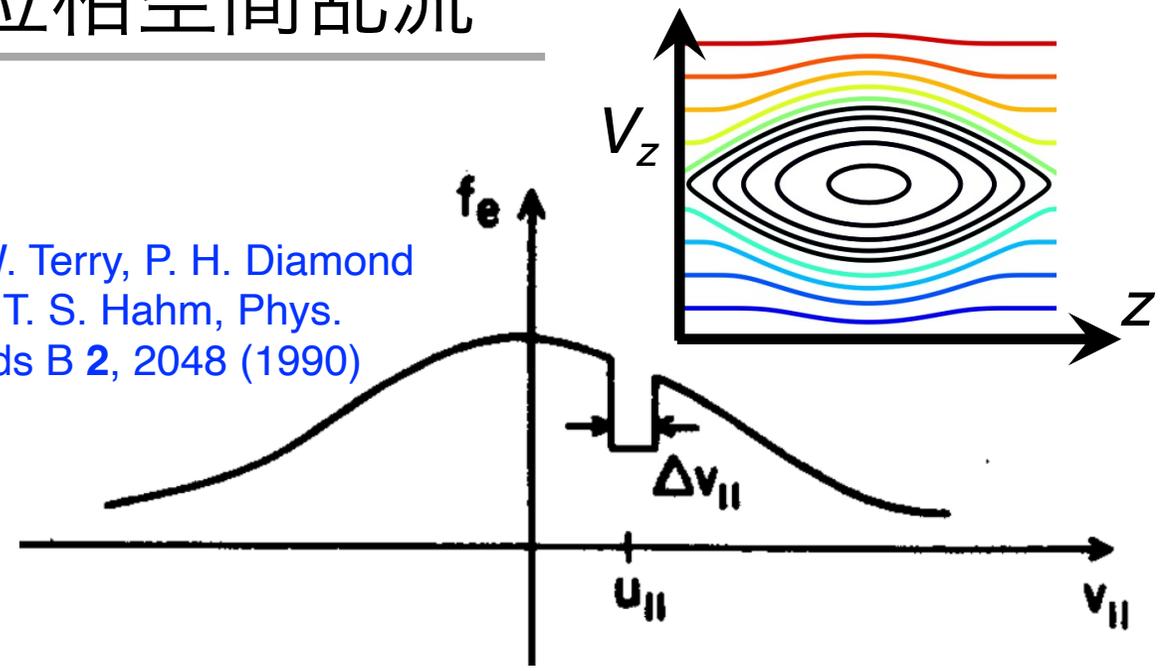
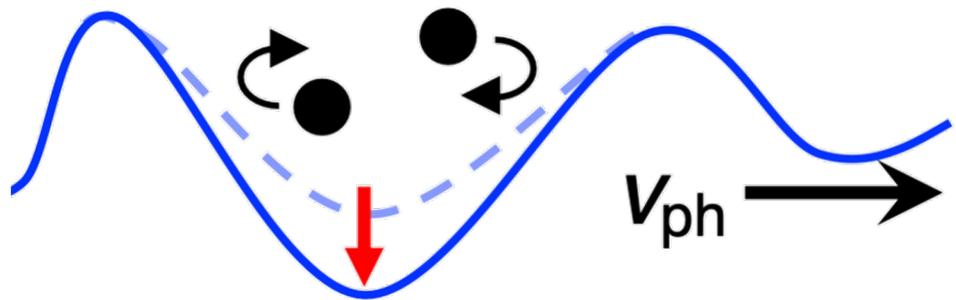
- 低衝突性により分布関数に構造が発生、輸送に寄与

速度分布関数の自由度がもたらす位相空間乱流

(衝突時間、粒子補足時間) < (波の相関時間)

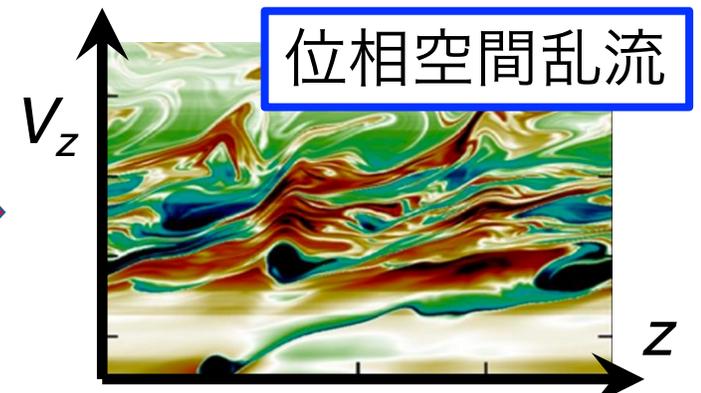
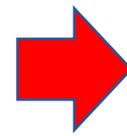
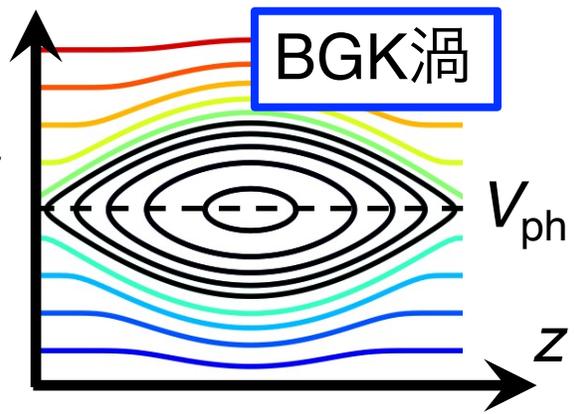
➤ 補足粒子と波が非線形相互作用

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

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



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

位相空間乱流研究の重要性

- 非線形項により駆動されるため、線形不安定性と質的に異なる特徴を持つ

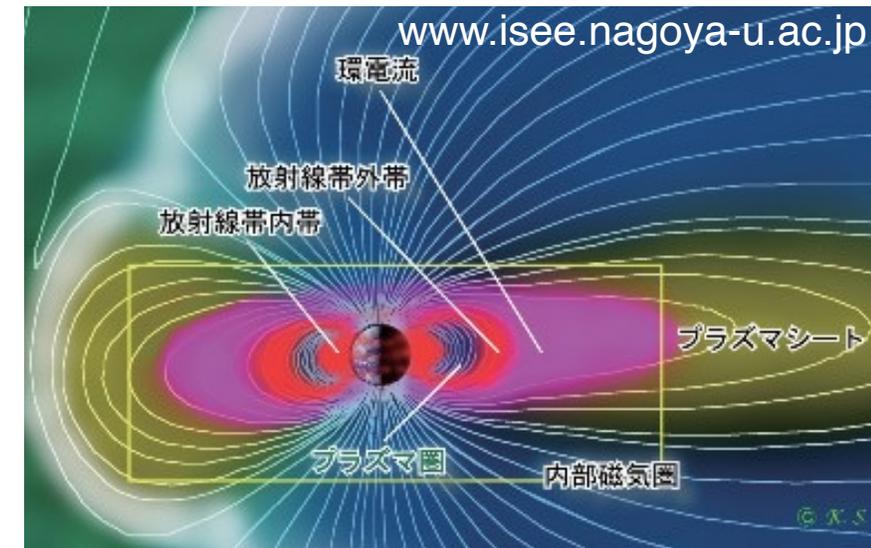
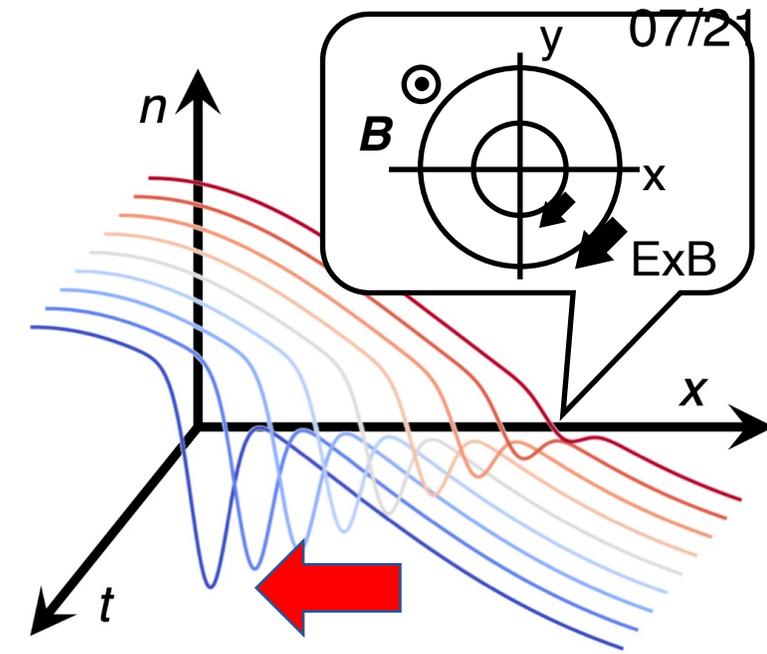
例：爆発的成長、亜臨界不安定性、長距離相関

- 核融合プラズマ輸送問題解決の鍵となり得る

Y. Kosuga+, PoP **21**, 102303 (2014),
S.-I. & K. Itoh NF **53**, 073035 (2013),
Y. Kishimoto+, PoP **3**, 1289 (1996)

- 学際研究への貢献

- ▷ 宇宙プラズマ物性モデリング (乱流粘性、伝導)
- ▷ 磁気圏プラズマの無衝突エネルギー移送
- ▷ 運動論的輸送
- ▷ レーザー航跡場加速における波動粒子相互作用
- ▷ 非平衡解放系における構造形成
- ▷ 分布関数を形成する多体系一般の諸問題



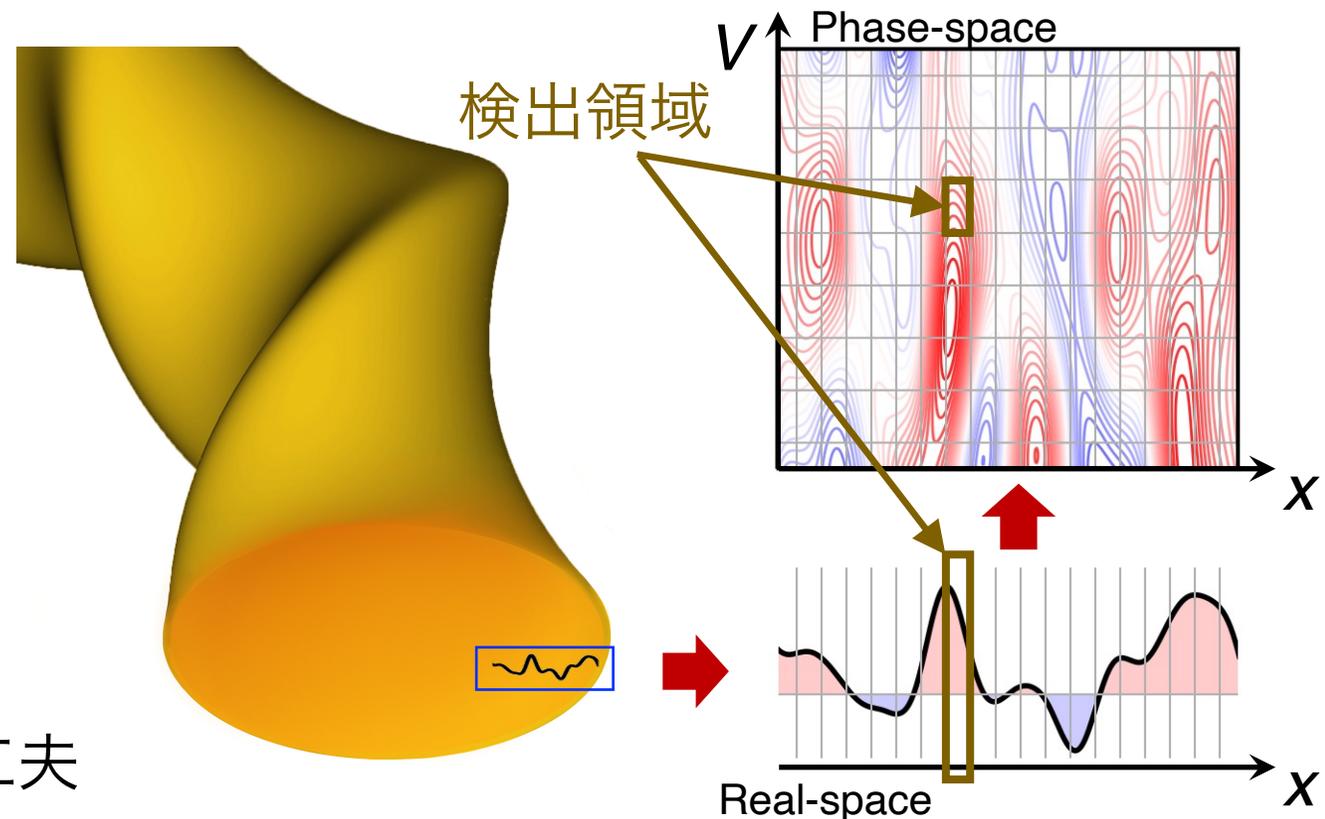
ユニットの研究目標、アプローチ、及び課題

問い：核融合プラズマの未解決輸送問題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

課題：位相空間の計測

- 実空間、速度空間、時間分解能と信号強度のトレードオフ
 - 検出チャンネル数の増加
 - 速度空間解像機構の制限
- 計測器・解析手法の改良、実験の工夫



研究体制 (ユニットメンバー)

所内 (9)

居田克巳
鈕持尚輝
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

所外戦略会議 (9)

江尻晶 (東大、プラズマ計測)
海老原祐輔 (京大、オーロラ研究)
大島慎介 (京大、プラズマ乱流実験)
川面洋平 (東北大、宇宙プラズマ)
佐々木真 (日大、プラズマ乱流理論)
田辺博士 (東大、リコネクション)
西澤敬之 (九大、プラズマ乱流実験)
沼田龍介 (兵庫県立大学、プラズマ
シミュレーション)
藤澤彰英 (九大、プラズマ乱流実験)

所外 (12)

井戸毅 (九州大学)
井通暁 (東京大学)
岡村昌宏 (ブルックヘブン国立研究所)
河内裕一 (京都工芸繊維大学)
久保伸 (中部大学)
小菅佑輔 (九州大学)
斎藤晴彦 (東京大学)
佐藤直木 (東京大学)
立松芳典 (福井大学)
永島芳彦 (九州大学)
西村征也 (量子科学技術研究開発機構)
福成雅史 (福井大学)

- 位相空間乱流ユニットの紹介
 - ▷ 背景、核融合としての課題
 - ▷ ユニットの研究目標、アプローチ
 - ▷ 研究体制
- これまでの活動実績
 - ▷ 2022年度LHD実験
 - ▷ ITC31
 - ▷ UCLA訪問
- 今後の活動計画
 - ▷ アカデミックプラン
- まとめ

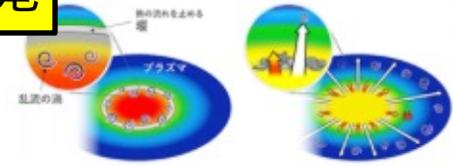


研究成果 (プレスリリース)

2022年9月29日

波がプラズマの熱を運ぶプロセスを世界で初めて観測 -核融合プラズマの自己加熱の研究が大幅に進展- (居田 克巳教授ら)

[More](#)

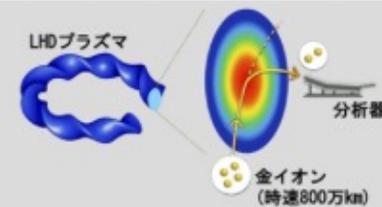


研究成果 (プレスリリース)

2022年5月19日

高速で移動するプラズマ乱流を世界で初めて発見 -核融合プラズマの乱流の理解に新たな知見- (綏持 尚輝助教授ら)

[More](#)

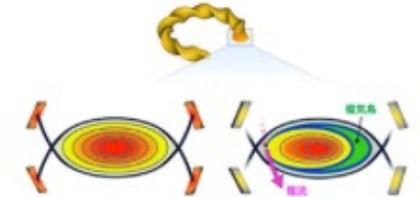


研究成果 (プレスリリース)

2022年4月27日

重水素を用いてプラズマ断熱層の高性能化に成功 -金イオンの高速ビームで流れの影響を明らかに- (小林 達哉助教ら)

[More](#)



研究成果 (プレスリリース)

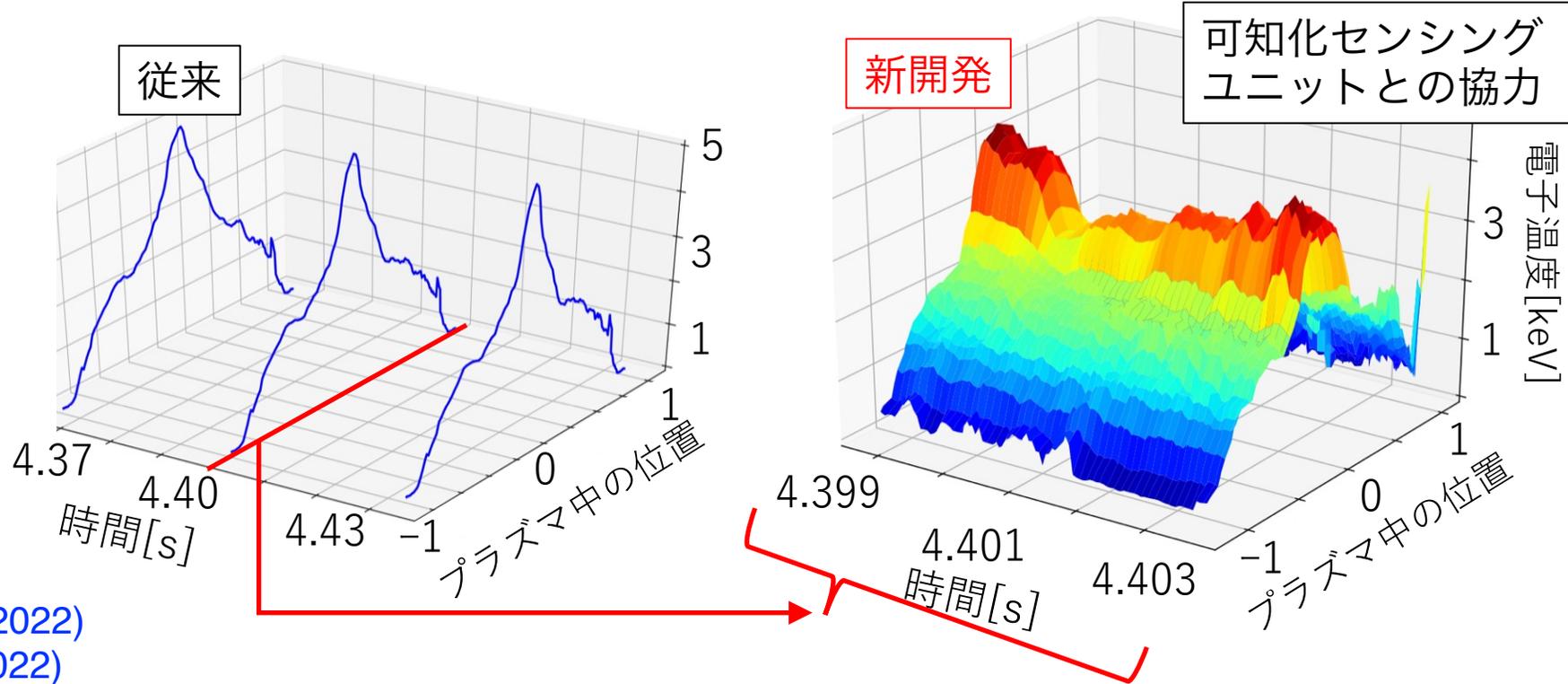
2022年2月18日

プラズマ中の「食べる食べられる」の関係 -生態学発の数理モデルで磁気島の脈動機構を解明- (小林 達哉助教ら)

[More](#)

電子分布関数計測：トムソン散乱計測の高速、高波長分解能化^{1/21}

- レーザー入射の高速化
- 時間分解能600倍以上
- 輸送障壁崩壊時の乱流の非局所伝播を観測



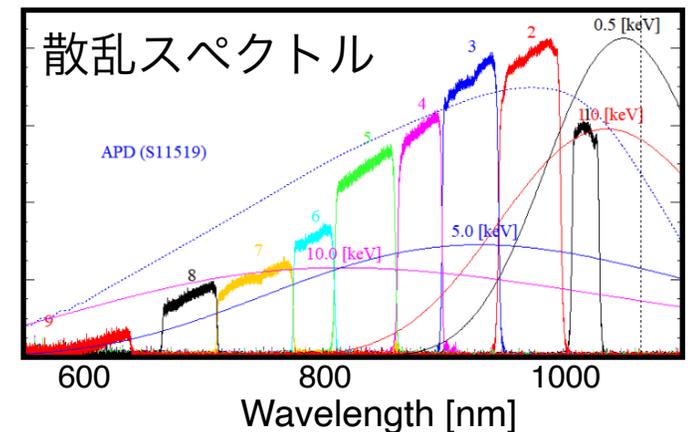
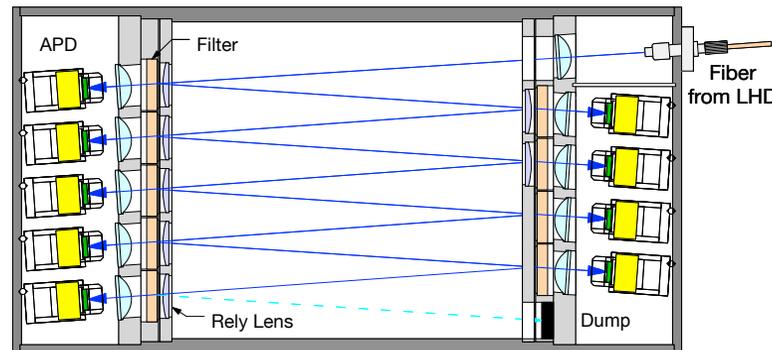
N. Kenmochi+, Sci. Rep., **12**, 6979 (2022)
 H. Funaba+, Sci. Rep., **12**, 15112 (2022)

- 波長分解能向上 (ポリクロメータの多チャンネル化)

→ 詳細な分布関数情報

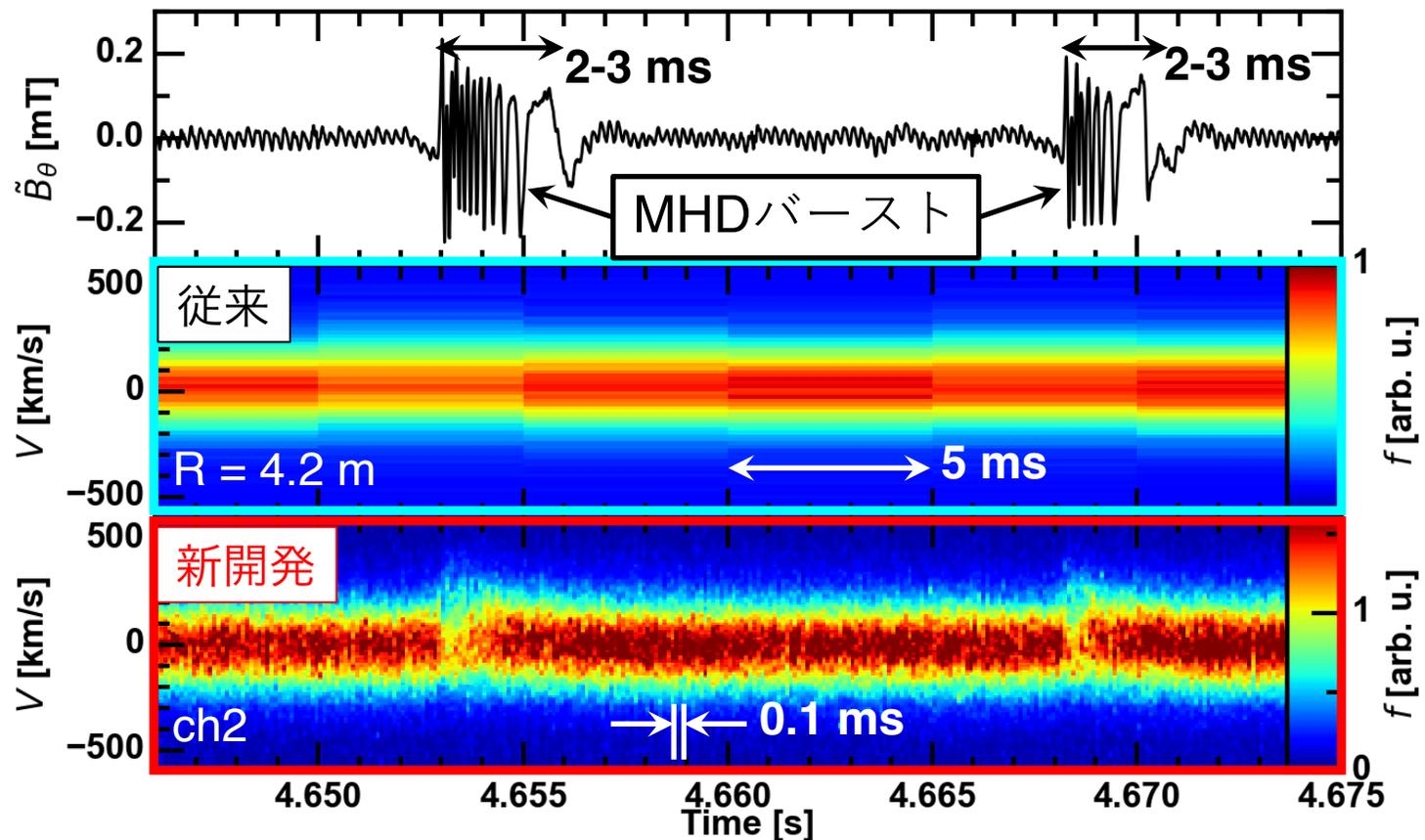
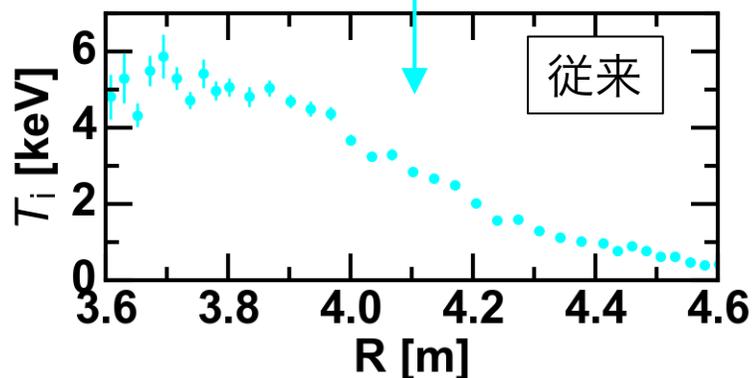
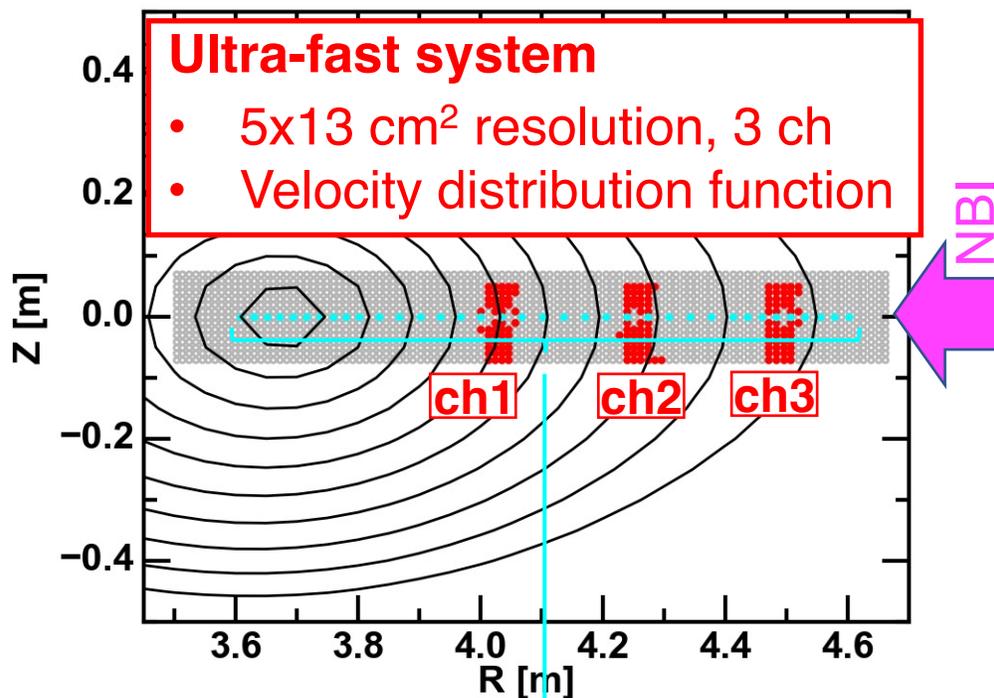
I. Yamada+ (2022)

ポリクロメータ



イオン分布関数計測：荷電交換分光計測の高速化

- 空間積分により信号強度を増強 → 50倍の高速サンプリング

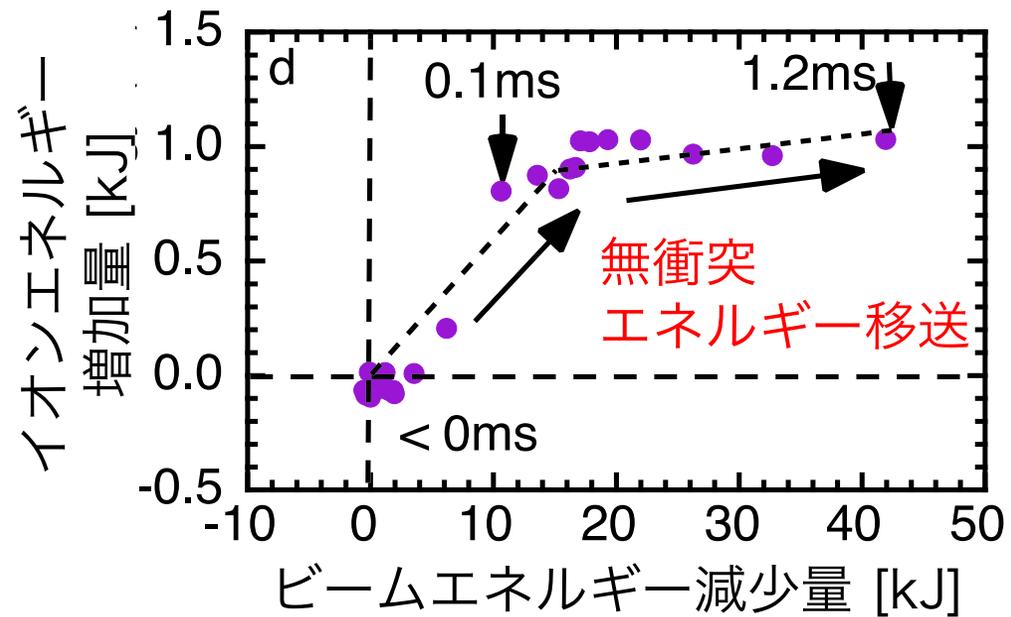
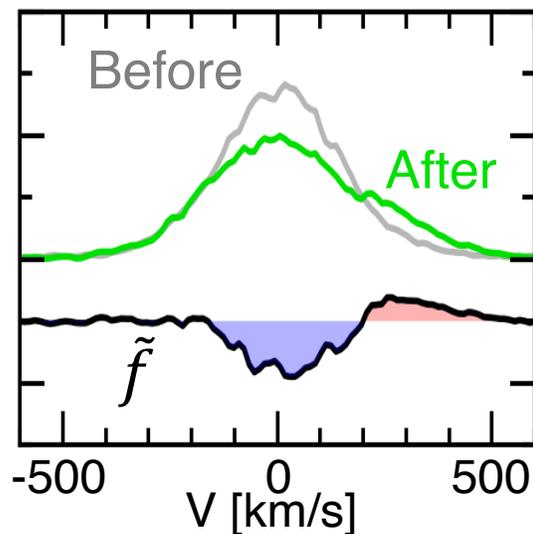


- MHDバースト時の分布関数変化を計測
- 空間分解能悪化、空間点数減少 (3点)

分布関数高速計測がもたらした物理成果

- イオン粒子共鳴とエネルギーの非熱的增加を観測
- 無衝突エネルギー移送を分布関数計測により同定

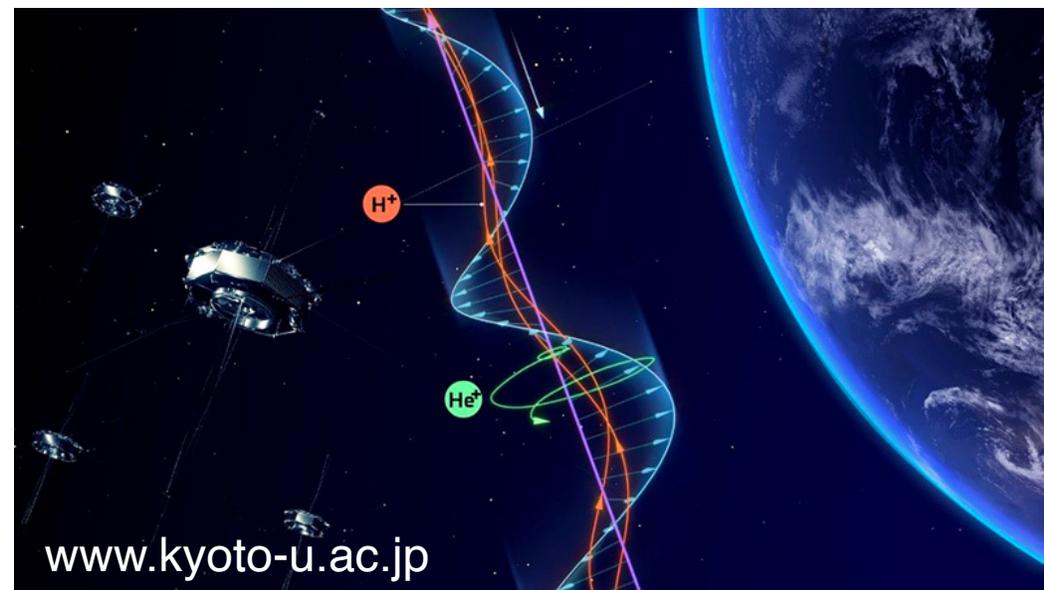
K. Ida, T. Kobayashi+, *Communi. Phys.* **5**, 228 (2022)



- 磁気圏プラズマにおける粒子加速機構として注目されている

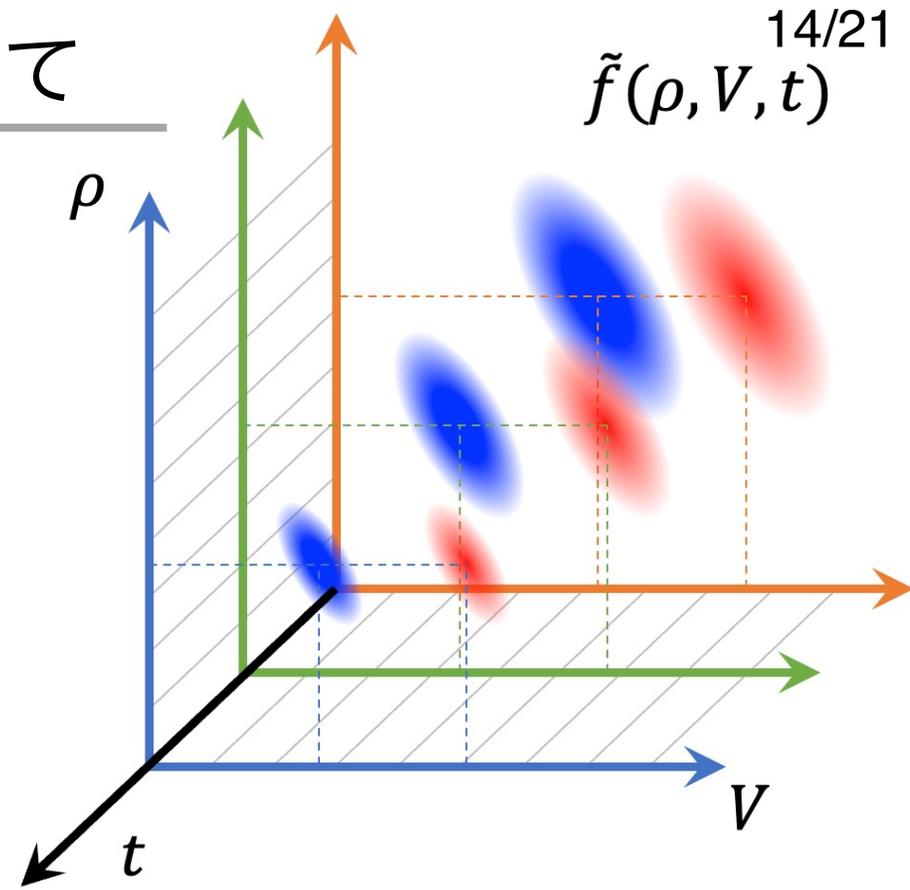
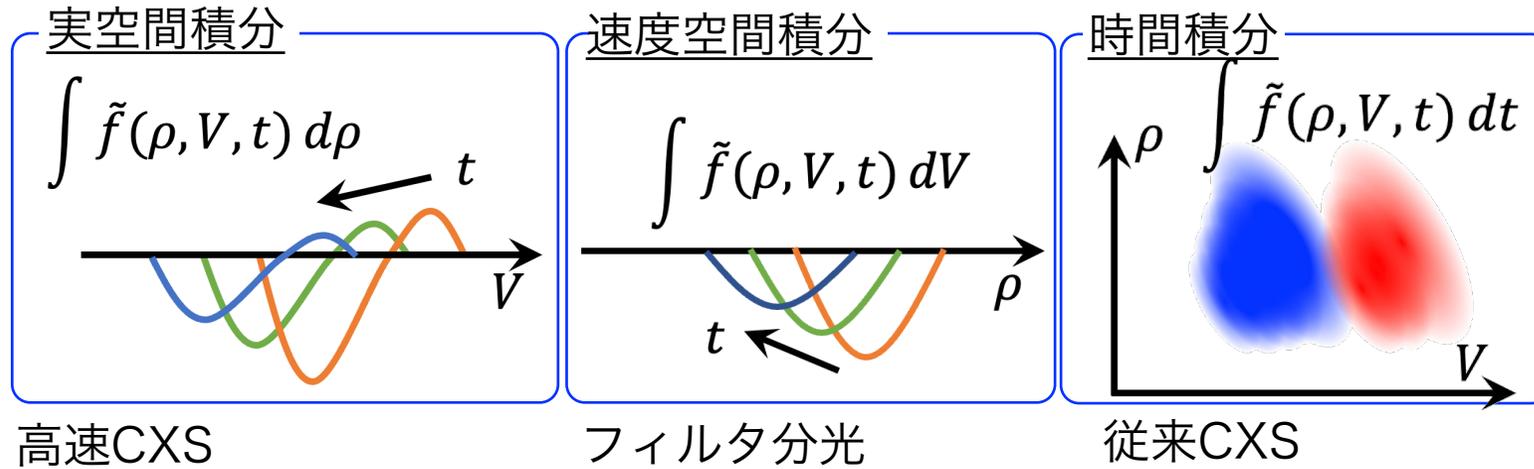
N. Kitamura+, *Science* **361**, 1000 (2018)

- プラズマ・波動相互作用素過程研究への実験室プラズマ活用の一例

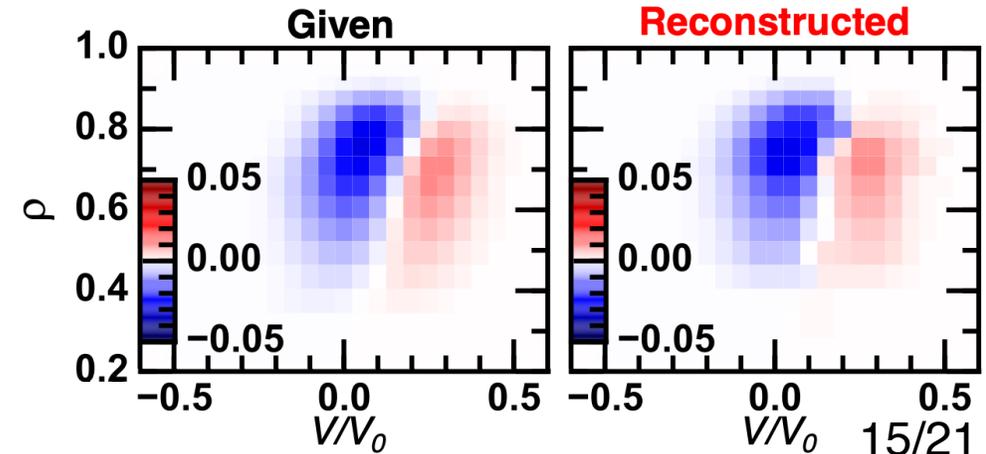


分解能-信号強度トレードオフ克服に向けて

- 異なる次元への積分データを組み合わせ、
トモグラフィ手法を用いて元の構造を推定



- テストデータを用いて手法の有用性を確認
[T. Kobayashi+, submitted to Phys. Plasmas \(2023\)](#)
- 2022年度LHDキャンペーンでデータ取得



ITC31でのオーガナイズドセッション

- ユニットの研究目標、研究計画、学際展開プランなどを議論

- **Research plan of phase-space turbulence unit (Tatsuya Kobayashi, NIFS)**

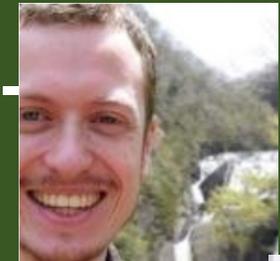
[T. Kobayashi+](#), submitted to Plasma Fusion Res. (2023)



- **Development plan and status of phase-space diagnostics in high temperature plasma (Tokihiko Tokuzawa, NIFS)**



- **Nonlinear kinetics: from isolated hole-clump pairs to phase-space turbulence (Maxime Lesur, Université de Lorraine)**



scholar.google.com

- **Strong plasma wave excitation by an intense, short laser pulse and challenge to high-energy and high-brightness electron beams (Masaki Kando, QST, KPSI)**



www.sanken.osaka-u.ac.jp

UCLA訪問: 位相空間ホール実測に向けた基礎実験の始動^{16/21}

- 磁気圏プラズマ模擬のための直線装置実験で、電子ビームによる位相空間ホールの能動的励起と、プローブを用いた詳細計測の知見が蓄積されている
B. Lefebvre+, PRL **105**, 115001 (2010)
- 自発励起した位相空間乱流の直接計測は困難、能動励起が鍵を握る
- UCLAのグループとの共同研究を開始、3月に渡米、装置見学とMagNetUSへの実験プロポーザル方針の議論を実施
NINS 戦略的国際研究交流加速事業, PI: 西浦正樹
- 2023年11月のAAPPS-DPPでのオーガナイズドセッションへの参加を打診

“Experimental and theoretical challenges on phase-space turbulence detection”

Yusuke Kosuga (Kyushu University)

Guilhem Dif-Pradalier (CEA Cadarache)

Walter Gekelman (UCLA)

Tatsuya Kobayashi (NIFS)



Contents

- 位相空間乱流ユニットの紹介

- ▷ 背景、核融合としての意義
- ▷ ユニットの研究目標、方針
- ▷ 研究体制

- これまでの活動実績

- ▷ 2022年度LHD実験
- ▷ ITC31
- ▷ UCLA訪問

- 今後の活動計画

- ▷ アカデミックプラン

- まとめ

核融合科学研究所ユニット運営規則

第4条 ユニットの **ユニット研究戦略会議** (以下「研究戦略会議」という。)を置く。
 2 研究戦略会議は、当該ユニットにおける **研究教育の戦略、予算及び人材のアカデミックプラン** について審議する。

...

- 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
- 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
- オーロラ観測プロジェクト

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

1. 研究課題

核融合科学の問題

低衝突プラズマにおいて、準線形・拡散的輸送モデルで表すことのできない輸送現象に、**位相空間乱流**が寄与し得ると指摘されている。この予測の妥当性は実験的に検証されていない。

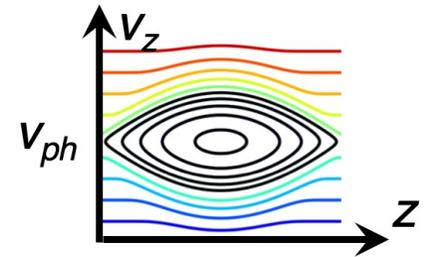
学術的問い

揺動により捕捉された粒子は、位相空間に渦構造を励起する。更にこの渦構造は**実空間勾配**と**相互作用**し、自由エネルギーを得て爆発的(非線形的)に成長する。励起された構造は熱や粒子の非拡散的輸送チャンネルを作る。この基礎プロセスが実測されるか否かが問いである。

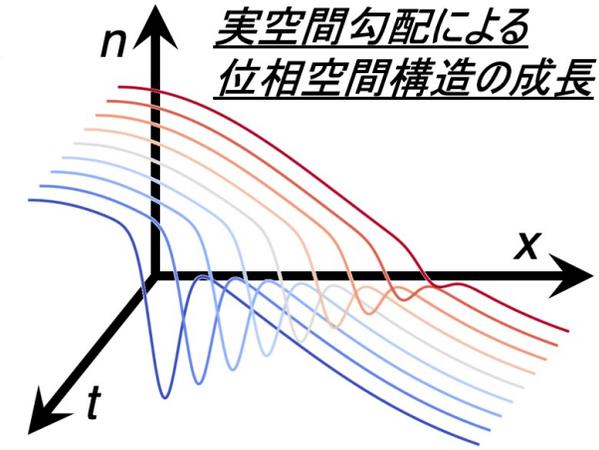
揺動による粒子捕捉



位相空間構造

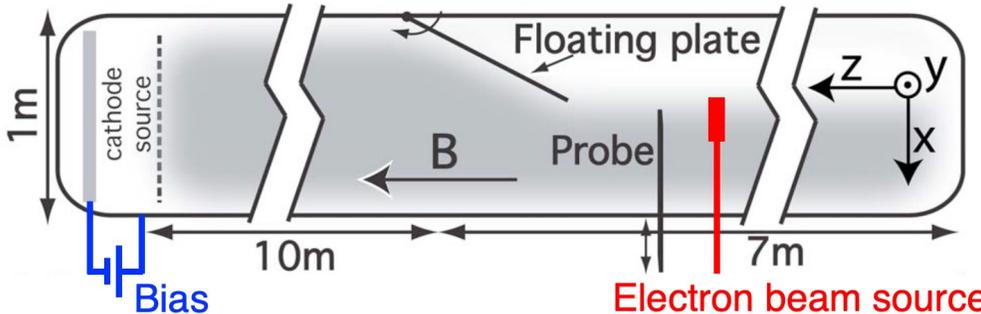


実空間勾配による位相空間構造の成長



2. 研究方法

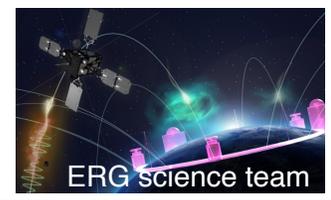
- 磁気圏プラズマ模擬実験で確立された、電子ビームによる電子ホール励起実験をイオンスケール(ドリフトホール)に拡張
- プローブ固定バイアス法と条件付き平均による位相空間構造分解計測を行う
- スケール長の異なる密度勾配上でホールを形成し、相互作用が起こるか観察



- プラットフォームは、LAPD、HYPER-I、RT-1?、CHS?など
- B. Lefebvre+, Phys. Rev. Lett. **105**, 115001 (2010),

3. 期待される結果、波及効果

- 位相空間乱流を考慮する必要があるプラズマ領域が断定される
 - 核融合プラズマがその領域に含まれる場合、輸送モデル再考の必要性を主張
 - 実空間-速度空間結合という新たな不安定性プロセスの実験実証となる
- 電子ホールが頻繁に観測される磁気圏への波及が期待される



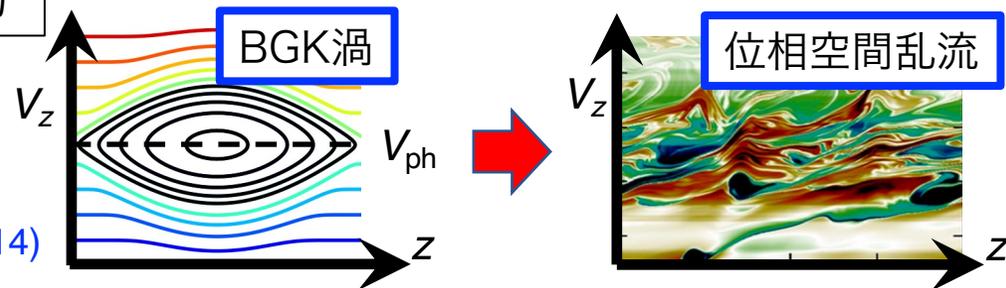
センサフュージョンを活用した位相空間構造検出システム構築

1. 研究課題

可知化センシングユニットとの協力

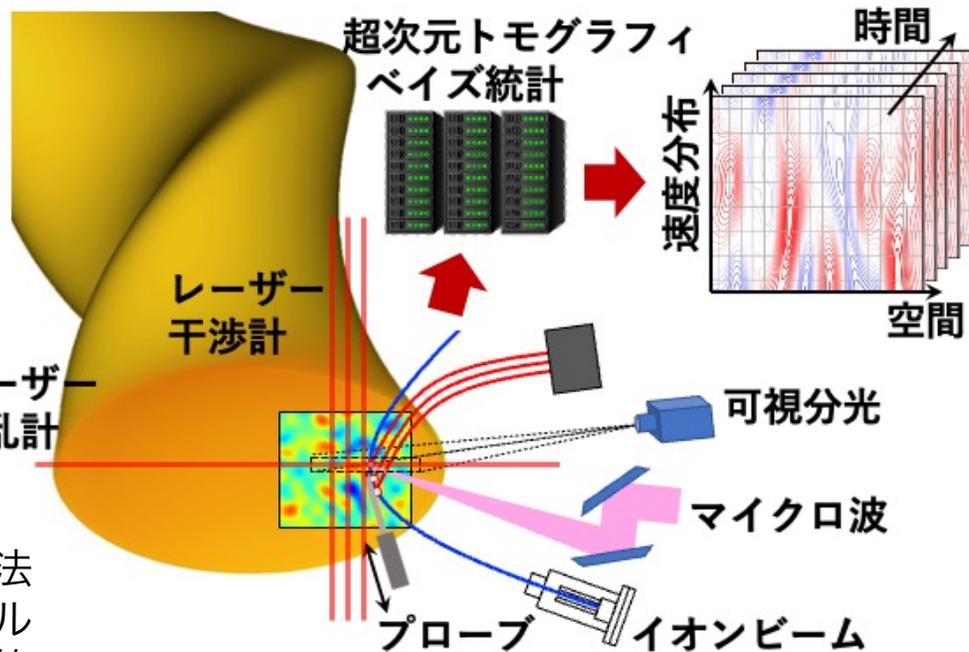
位相空間乱流がプラズマのマクロスコピックな性質にどのような寄与をするかは未解決の課題である。位相空間乱流の直接計測は困難であり、その輸送や構造形成への影響を定量化するシステムの構築が望まれている。

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



2. 研究方法

- 異種計測器連携(センサフュージョン)を実現し、位相空間乱流を異なる側面から観察
- データサイエンスを駆使して計測データを統合し、散乱計元の構造を推定
- 計測器の最適連携方法の探索のためデジタルツイン実験装置を構築
- 帰納的アプローチで未解明実験データを解釈

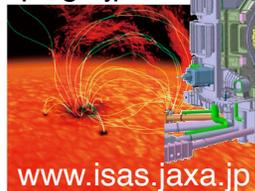


MEXTロードマップ2023申請課題の一部

3. 期待される結果、波及効果

大型実験・観測

www.fusion.qst.go.jp



理論・計算



大きな隔たり

- 大型装置・実地観測と、理論・計算研究の大きな隔たりを埋めるフレームワーク
- 長時間平均しない速度分布関数の計測を行い、波と粒子の相互作用を直接計測
- 実空間・速度空間自由エネルギーの解放機構とそれによる動的物性の定量化
- 核融合プラズマの異常輸送の起源の解明、宇宙プラズマの運動論的物性値の決定

オーロラ観測プロジェクト

メタ階層ダイナミクス
ユニットとの協力

20/21

先端学術領域
オーロラ観測プロジェクト



研究課題

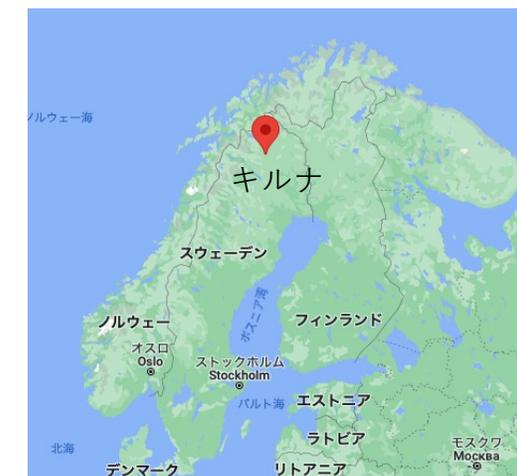
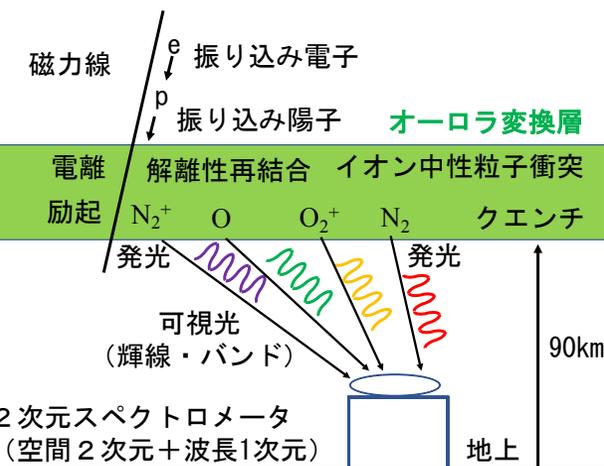
「オーロラ変換層」では電離・解離性再結合・イオン中性粒子相互作用・準安定種クエンチ等のプロセスを経て別の原子や分子が励起される。
観測したスペクトルの時空間発展から降り込み粒子の挙動を明らかし、**磁気圏で起こっている位相空間揺らぎ**（速度と空間の揺らぎ）を研究する

研究方法

空間2次元+波長のデータを取得できる**2次元スペクトロメータ**と、輝線の偏光を観測できる**偏光液晶フィルタカメラ**を、スウェーデンの**キルナ**（北緯67度51分）に設置して、**常時観測**を行う。プロジェクトのメンバーは、
位相空間乱流ユニット：居田克巳、吉沼幹朗、小林達哉、海老原祐輔（京大）
メタ階層ダイナミクスユニット：後藤基志、川手朋子、永岡賢一、加藤雄人（東北大）

期待される結果、波及効果

波長**スペクトル**の画像や**偏光**の画像という今まで計測されていなかった物理量を計測することで、降り込み粒子のエネルギーや方向を推測することが可能となり、新たな研究法の発展が期待できる。



まとめ

- ・ 位相空間乱流ユニットの紹介

- (衝突時間、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、乱流化 → **多様な輸送現象を励起**

問い：核融合プラズマの未解決輸送問題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

- ・ これまでの活動実績

- 電子分布関数計測：トムソン散乱計測の高速、高波長分解能化

- イオン分布関数計測：荷電交換分光計測の高速化

- 分解能-信号強度トレードオフ克服に向けた位相空間トモグラフィの開発

- ・ 今後の活動計画

- 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

- 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

- オーロラ観測プロジェクト

科学目標、目指す達成水準の一例（荷電交換分光を例にとって）

- これまでの達成水準
時間分解 10 kHz、空間分解 10 cm、空間点 3-4 点、速度分解能 100 km/s

➤ 無衝突エネルギー移送を定量評価



- CHSでの目標
時間分解 10 kHz、空間分解 1 cm、空間点 20 点、速度分解能 20 km/s

- 非局所輸送の物理機構解明
- GAM/AEチャンネルリングの同定
- ドリフトホール伝播の観測

