

# 位相空間乱流ユニット

---

|                    |       |    |
|--------------------|-------|----|
| 2025 (R7)年度研究成果の概要 | 徳沢 季彦 | 15 |
|--------------------|-------|----|

|                                 |      |    |
|---------------------------------|------|----|
| 帯状流による乱流捕捉状態の遷移に関する理論的予測および実験検証 | 弥富 豪 | 15 |
|---------------------------------|------|----|

|                        |              |    |
|------------------------|--------------|----|
| 直線装置におけるサブイオンスケール乱流の観測 | 河内 祐一（名古屋大学） | 15 |
|------------------------|--------------|----|

|               |       |    |
|---------------|-------|----|
| ミクロ乱流間相互作用の研究 | 徳沢 季彦 | 10 |
|---------------|-------|----|

|      |  |   |
|------|--|---|
| 全体質疑 |  | 5 |
|------|--|---|

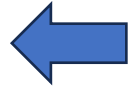
---

# メンバー(2025年度)

|          |                                                                                                                                 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 戦略会議メンバー | 居田克巳、上田研二、鈕持尚輝、小林達哉、徳沢季彦、西浦正樹、<br>西村大輝、弥富豪、矢内亮馬、山田一博、吉沼幹朗、Wang Chenxu                                                           |
|          | 岩本昌倫(神戸大学)、江尻晶(東京大学)、海老原祐輔(京都大学)、<br>河内 裕一(名古屋大大学)、川面洋平(宇都宮大学)、金 史良(京都大学)、<br>佐々木真(日本大学)、田辺博士(東京大学)、沼田龍介(兵庫県立大学)、<br>藤澤彰英(九州大学) |
| 所外メンバー   | 久保伸（中部大），井通暁（東大），小菅佑輔（九大），西村征也<br>（QST），斎藤晴彦（東大），永島芳彦（九大），井戸毅（九大），<br>立松芳典（福大），福成雅史（福大），岡村昌宏（BNL），西澤敬之<br>（九大）、田村直樹（IPP）        |

# ユニットの研究目的と目標

異常輸送研究  
の未解決問題



位相空間プラズマ揺動  
の実験的検証が鍵

- ・ 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

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

非平衡・非線形プラズマ物理の学理構築

プラズマの粒子性が顕著になる

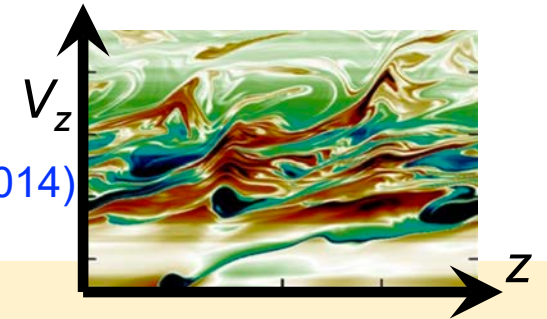
- ・ レーザー・プラズマ相互作用
- ・ 磁気圏プラズマの挙動研究 と相補的な研究展開

## アカデミックプラン

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。

位相空間乱流

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



### プロジェクト

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 -

# 磁気圏プラズマとの相補的研究展開

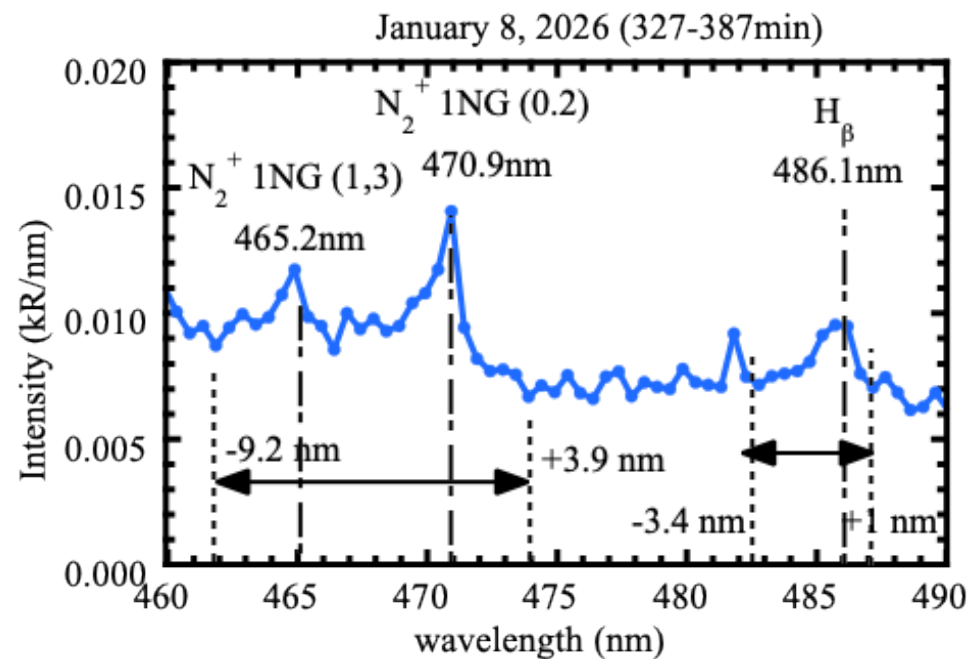
- 3. オーロラ観測プロジェクト
- 4. 磁気リコネクション中のイオン・電子の位相空間構造計測
- 5. 磁気圏における運動論的アルフベン乱流加速

# プロトンオーロラの位相空間分布の観測

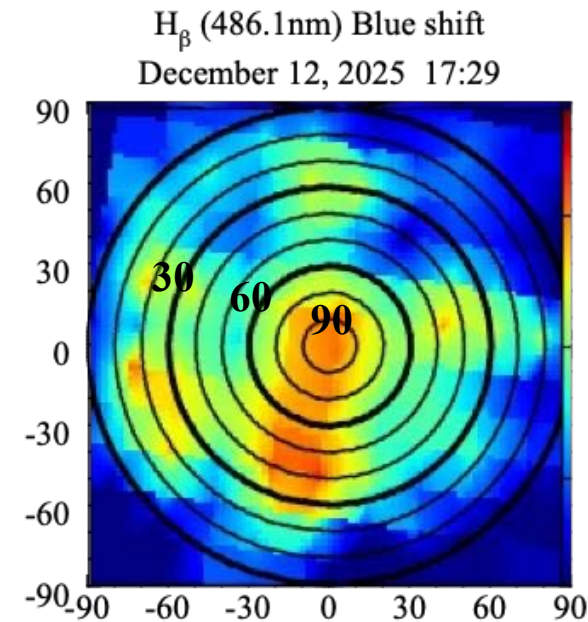
居田、吉沼

目的: スウェーデン・キルナに設置したハイパースペクトルカメラ(HySCAI)を使い、プロトンと大気との**荷電交換反応で発光するHベータ線**のスペクトルの二次元分布を観測、降り込みプロトンの速度分布と空間分布の時間発展からプロトンオーロラの発生メカニズムの解明する。

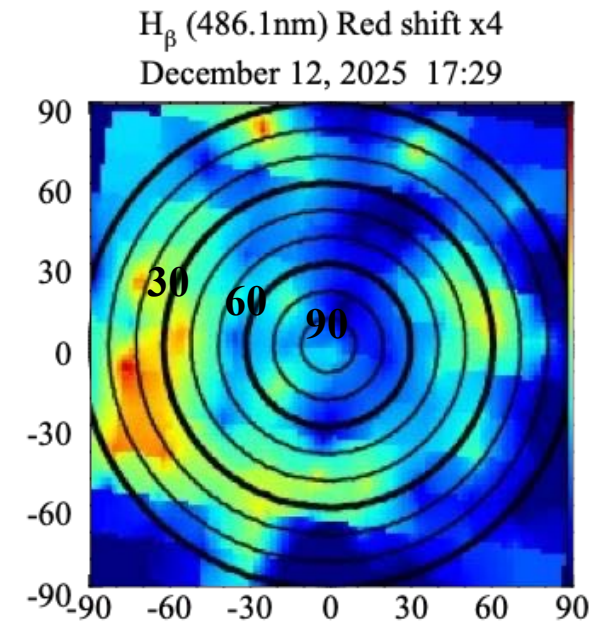
成果: 1 Hベータ線の赤方偏移成分と青方偏移成分の**2次元画像に大きな差**が観測された。  
2 視線と磁力線がほぼ平行となる**天頂近く(仰角90度)**では、青方偏移成分が卓越しておりプロトンの**降り込みエネルギーが20keV**まで伸びていることが明らかになった。  
3 視線と磁力線が垂直に近づく**仰角30度以下**では、プロトンのジャイロ運動のために、**赤方偏移成分が青方偏移成分と同程度まで強くなる**ことが明らかになった。(jpGU2026で発表)



窒素分子イオンとHベータ線のスペクトル



青方偏移成分の2次元画像



赤方偏移成分の2次元画像  
(強度を4倍にして表示)

# 磁気圏対流電場の形成と特性に関する研究

## ・目的

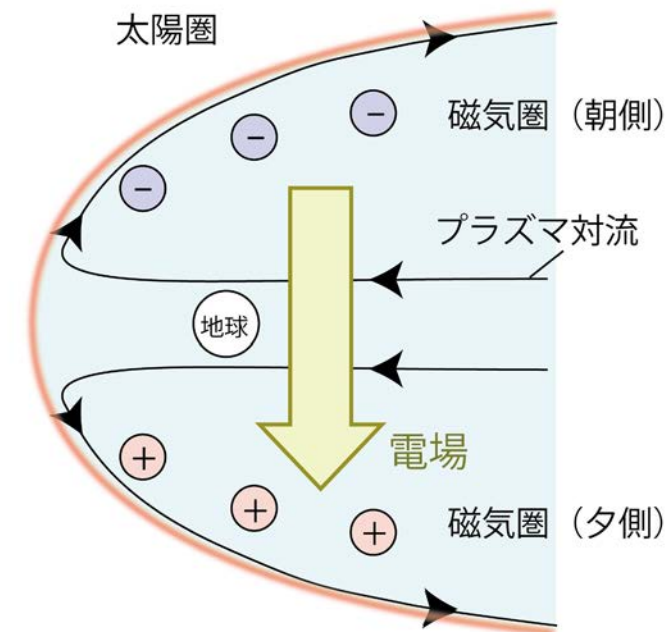
- ・ **磁気圏対流**は磁気圏プラズマの基本的な輸送モード  
(放射線帯を含む地球近傍の宇宙空間(内部磁気圏)の粒子環境を理解する上で重要)
- ・ **磁気流体シミュレーション**を用い、対流に付随する空間電荷とエネルギーの流れを明らかにする

## ・研究成果

- ・ **磁気赤道面では、朝側で(-)、夕側で(+)**の電荷が支配的。これは従来の予想と逆。プラズマ流が磁気圏電場を作り、その結果として空間電荷分布が生じると考えることで理解できる。
- ・ 磁場エネルギーは螺旋を描きながら電離圏に向かう。磁気圏対流は循環場ではなく、太陽風から電離圏に向かう一方通行の流れ。
- ・ 磁力線で接続された磁気圏赤道面と電離圏の間で、電場の対応関係は良くない。①誘導電場、②磁気赤道面外での外力、③アルベン波が磁気圏-電離圏を十分往復できないことが考えられる。

- ・ Ebihara, Y., M. Hirahara, and T. Tanaka, MHD simulation study on quasi-steady dawn-dusk convection electric field in Earth's magnetosphere, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2025 [doi:10.1029/2025JA033731](https://doi.org/10.1029/2025JA033731)
- ・ Ebihara, Y., M. Hirahara, and T. Tanaka, Testing field-line mapping of electric fields in Earth's magnetosphere, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2025 [doi:10.1029/2025JA034108](https://doi.org/10.1029/2025JA034108).

### シミュレーションの結果



対流 → 空間電荷



# 電子ベータ $\sim 1$ におけるヘリシティバリアの可能性

【目的】 太陽風では低周波なAlfvén乱流が支配的であることが観測から分かっている。また、乱流によってイオンが選択的に垂直加熱されていることも分かっている。これに対し近年、Alfvén乱流からイオンサイクロトロン加熱を生じさせることができるHelicity Barrier (HB) と呼ばれるメカニズムが提唱され注目を浴びている。しかし、これまでの研究は低ベータに限定されていたため、1AU近傍でHBが生じるかは明らかでない。申請者らは無衝突かつ電子ベータが $\beta_e \sim 1$ で有効となる簡約化Hall MHDを導出したが、このモデルからはイオンサイクロトロン乱流によってHBが抑制される可能性が示唆される。本研究では、このモデルの数値計算から、1AU近傍でのHBの可能性を探る。

【成果】 簡約化Hall MHD方程式から、Kinetic Alfvén Wave (KAW) とIon Cyclotron Wave (ICW) の2つのモードを分離する解析式を新たに導出した。この式をシミュレーションで検証したところ、Fig.1のようにKAWとICWのスペクトルが理論予測と合致することを確認できた。

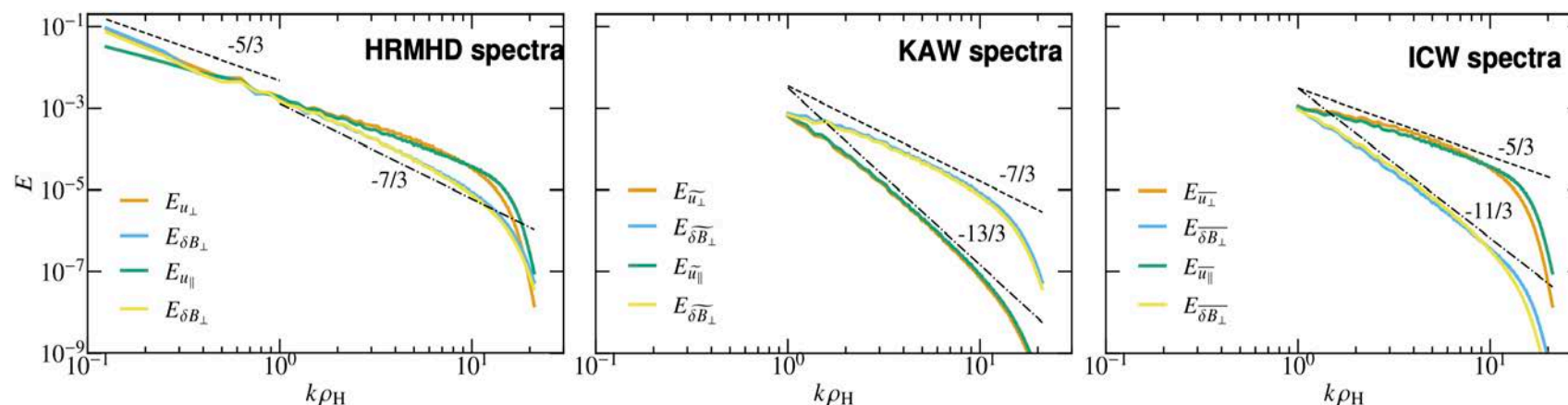


図1: KAW/ICW分離のテスト

## 磁気リコネクションを介した位相空間上の構造形成現象に関する研究

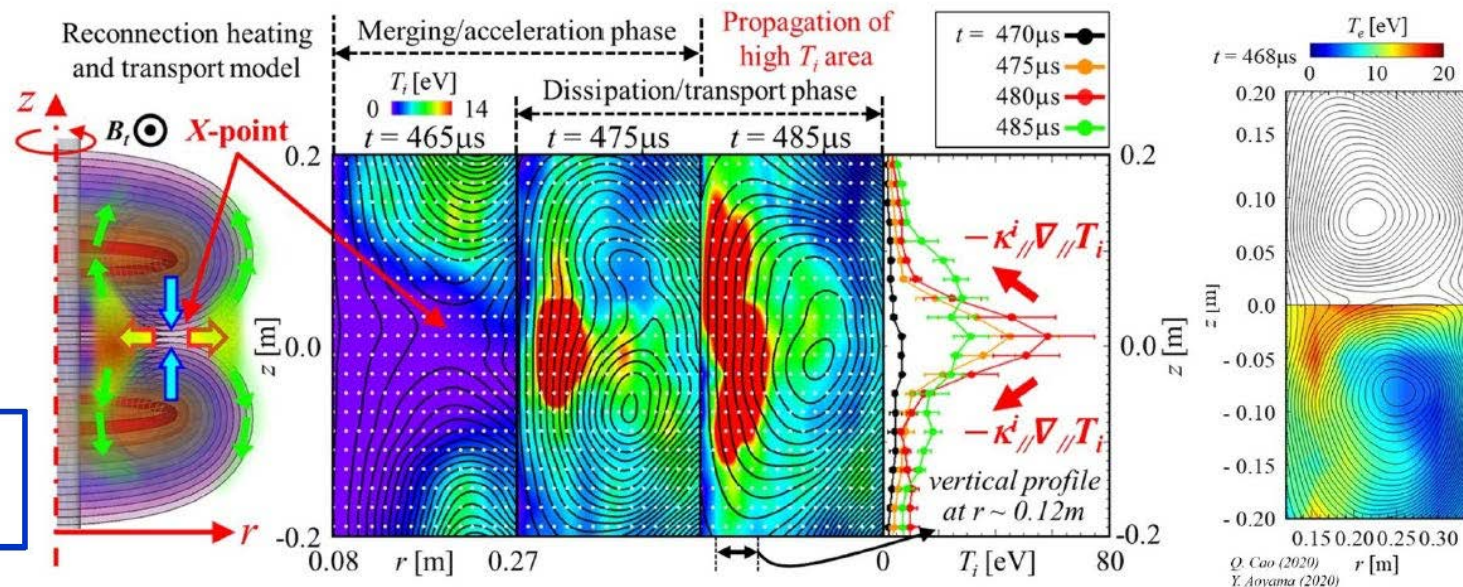
速度空間上に様々な特徴構造を形成することで知られている磁気リコネクション現象について、イオン系・電子系のそれぞれの特徴構造検出を目的とした実験研究を行っている。現在バルク量計測については、イオン系の320CHイオンドップラートモグラフィ計測や128CHのドップラープローブIDSPによるイオン温度・流速計測、電子系については121CHの2次元トムソン散乱計測が稼働を開始し、大学の単一研究室ながら東京大学TS-6実験では統合解析可能な実験環境が整いつつあり、同実験では最近では、電子系・イオン系ともに非熱的な特徴検出も狙った実験が進められている。

### イオン・電子ともに熱的な大域構造はおおむね解明 H. Tanabe et al., Nucl. Fusion 61, 106027 (2021)

(モデル図のようにイオンはアウトフロー領域で熱化・輸送、電子はX点近傍直接加熱およびイオンからのエネルギーゲイン)

磁気リコネクションを介した熱的・運動論的構造形成:X点近傍に出現する非熱的な挙動を示唆する特徴的現象

- ・イオン系の加速過程や速度分布関数直接観測：IDSPの開発
- ・静電プローブ／トムソン散乱／分光／SXR線イメージング  
(熱的挙動以外に、高速電子由来の挙動検出実験環境の整備を推進)





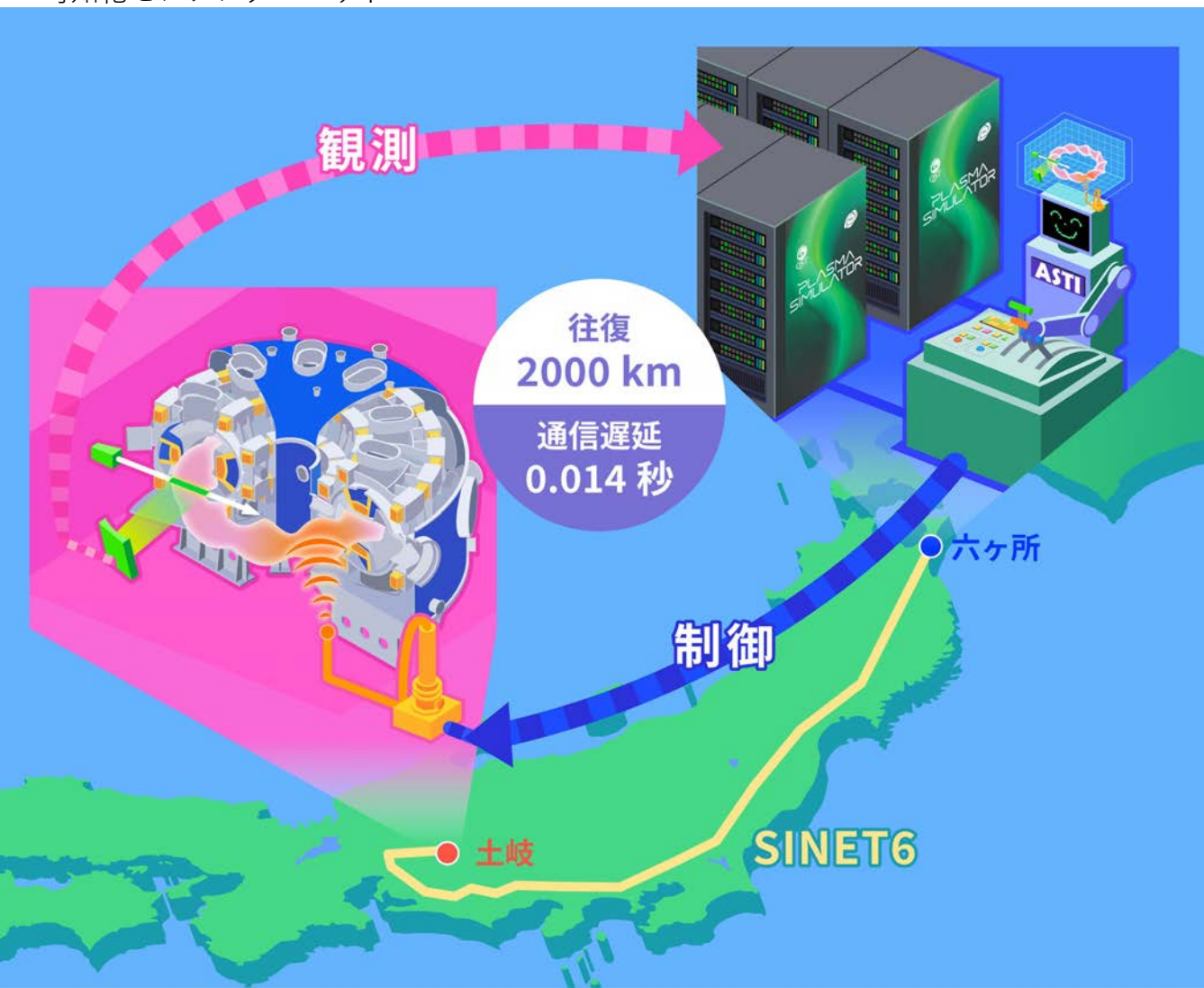
# データ駆動科学・情報学技術の活用

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  
ODATE-SE

# 核融合プラズマの遠隔リアルタイム予測制御を実証

ユニット連携成果（LHD成果報告(15:20-)にて森下さんから詳細報告あり）

構造形成・持続性ユニット  
位相空間乱流ユニット  
プラズマ量子プロセスユニット  
可知化センシングユニット



- ✓ データ同化と呼ばれる数理的技術を応用して、リアルタイムの計測情報に基づいて予測モデルを最適化することで予測精度を向上すると共に、その高速予測をもとに推定したプラズマの最適制御を行うシステムを開発してきた。
- ✓ 大型ヘリカル装置（LHD）と、新スーパーコンピュータ“プラズマシミュレータ”（青森県六ヶ所村）を、高品質・広帯域の学術情報ネットワークSINET6で接続。
- ✓ 2万コアの占有計算と処理遅延の最小化により、LHDにおける遠隔地スパコンを介したプラズマのリアルタイム予測制御を実現した。
- ✓ 大規模実験施設と大規模計算機を往復2,000 kmのネットワークで結ぶこの方式は、核融合に限らず幅広い分野のリアルタイム制御の基盤となることが期待される。

■ 論文：Y. Morishita *et al.*, “Development of Data Assimilation System for Temperature and Density Control in Helical Plasmas”, *Plasma and Fusion Research*, 20 (2025) 1403034

■ 2025年12月19日NIFS-QST-京大-統数研共同記者会見

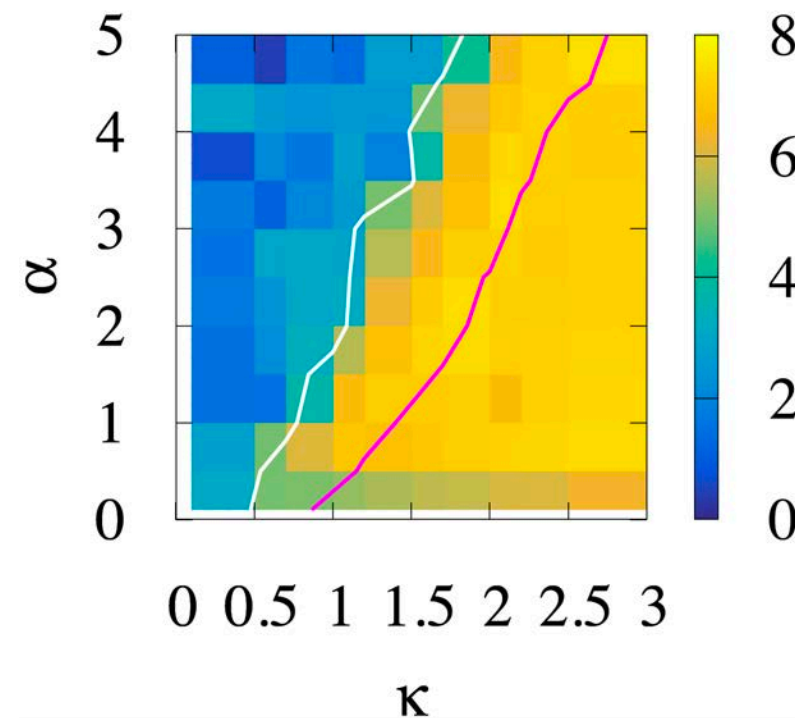
# 弥富: 情報エントロピーによる乱流状態遷移の同定

**目的:** 多成分乱流をデータ駆動+情報理論によって新たに捉え直す解析手法を構築

“先入観のない” 基底関数で乱流を分解することで、今まで着目されていなかった性質が明らかに

## 研究成果

- 関連しあった複数の乱流場を統一的にモード分解する手法としての **多重場特異値分解** を構築し、フラックスの正負の分離や捕捉渦列による非線形相互作用など乱流場の性質の理解を深めた。
- 量子状態との類似性に着想を得て、多重場特異値分解によって乱流場に対する **情報エントロピー** を新たに考案した。  
その結果、**非自明な乱流遷移** が発見された。
- SVD+vNEを運動論的乱流に適用し、**位相空間構造の複雑性** が情報エントロピーで正しく捉えられることを示した。



エントロピーによる乱流状態の分類

cf. Yatomi & Nakata, Phys. Rev. Res., 7, 023212 (2025)  
プレスリリース「もつれ合うプラズマの渦と流を『情報』で読み解く」

# 荷電交換分光計測による速度分布関数のベイズ推定

小林達哉

## 背景・目的

- 荷電交換分光による速度分布関数推定、10 kHzを超える高速計測  
M. Yoshinuma+, Plasma Fusion Res. 19, 1402037 (2024)
- 速度分布関数 $f(v)$ のプロキシとしてスペクトル $E(\lambda)$ を利用、ただし $E(\lambda) \neq f(v)$
- スペクトルから速度分布関数を推定する手法を開発したい

## アプローチ

- 計測モデリング、ベイズ推定を用いた確率密度関数の直接推定

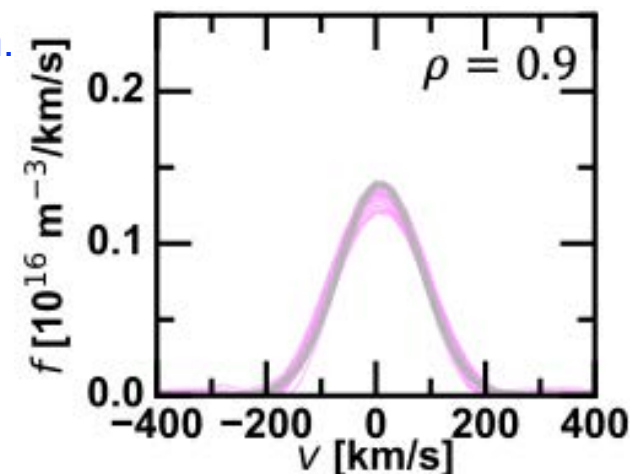
$$\text{事後確率分布 } P(X|D) = \frac{\text{尤度関数 } P(D|X) \times \text{事前分布 } P(X)}{P(D)}$$

## 研究成果

- マルコフ連鎖モンテカルロ法によるイオン温度分布のパラメトリック推定

T. Kobayashi+, Rev. Sci. Instrum. in press (2026)

- ガウス過程を用いた速度分布関数の直接推定
- NBI分布の推定





# 拡散モデルを用いたベイズ的プラズマ診断解析手法の開発

**目的：**限られた計測情報からプラズマ内部の物理量を推定する逆問題に対し，拡散モデルを事前分布として用いるベイズ的解析手法を開発する。

**研究成果：**拡散モデルと観測モデルを組み合わせたベイズ的逆問題解析手法を構築した。**協同トムソン散乱（CTS）計測**を想定した数値実験により，多変量パラメータの同時推定と不確かさ評価を実証した[1]。

**拡散モデル：**もっともらしい物理量を生成

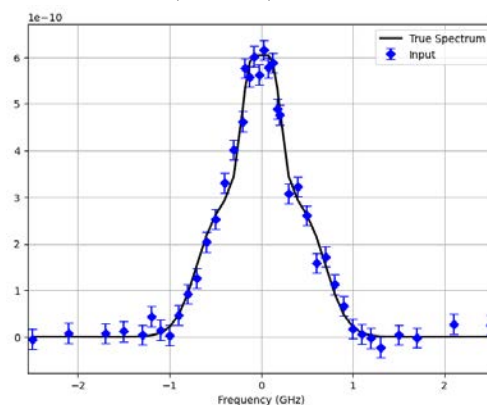


**観測モデル：**計測と矛盾しない解を選別

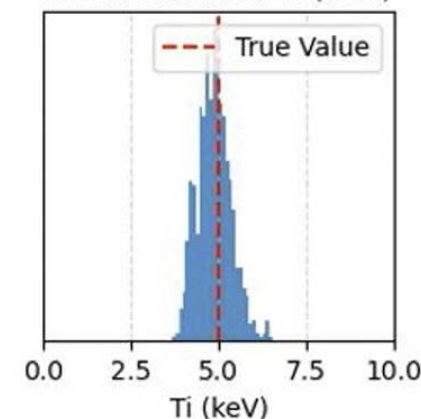


**事後分布：**物理量と不確かさを推定

入力（計測）データ



Distribution of Ti (keV)



CTSモデルに対する多変量パラメータの同時ベイズ推定結果の例

[1]第42回プラズマ・核融合学会， 上田研二， 西浦正樹「生成AI拡散モデルによる多変量逆問題解析： LHD協同トムソン散乱計測への応用」 令和7年12月1日

[2]第28回若手科学者によるプラズマ研究会， 上田研二「プラズマ診断のための拡散モデルを用いた逆問題解析」 令和8年3月12日

# CHDの電子サイクロトロン放射計測による温度分布推定

## 目的

- CHDのECE計測に関する事前検討

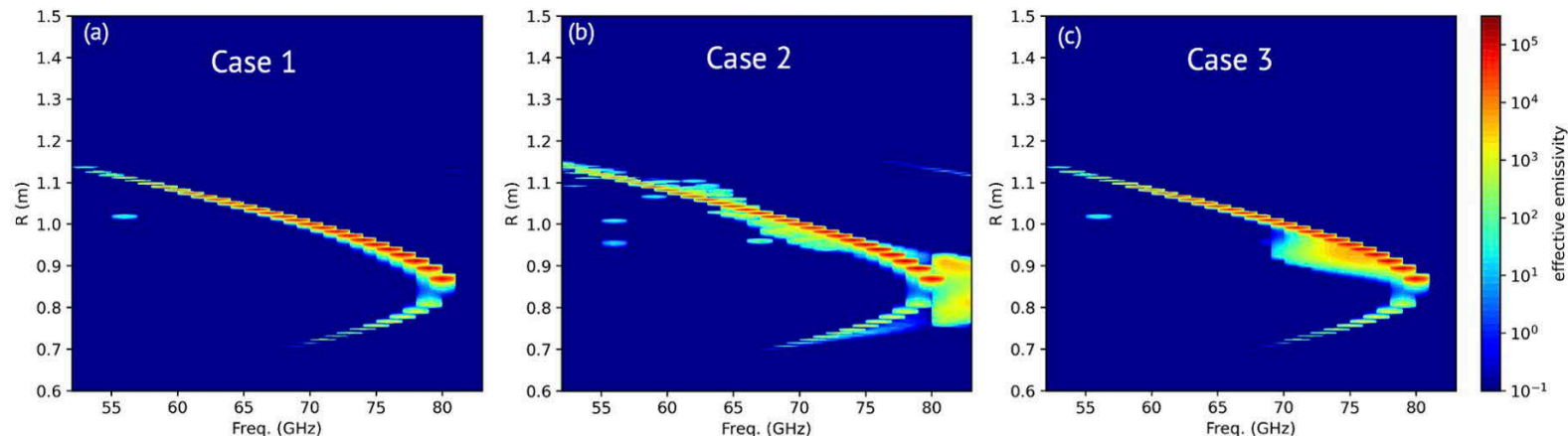
## 成果

- CHDのECE計測に関して光線追跡コードTRAVISを用いてfeasible studyを行い、ベイズ推定のアプローチにより電子温度分布を推定するフレームワークを開発した
- 成果はPFR論文に掲載された. F. Kin et al., PFR 2026

case 1: radiation from bulk electrons;

case 2: including wall reflection;

case 3: including energetic electrons  
via the bi-Maxwell distribution.



# プラズマ計測技術の進展

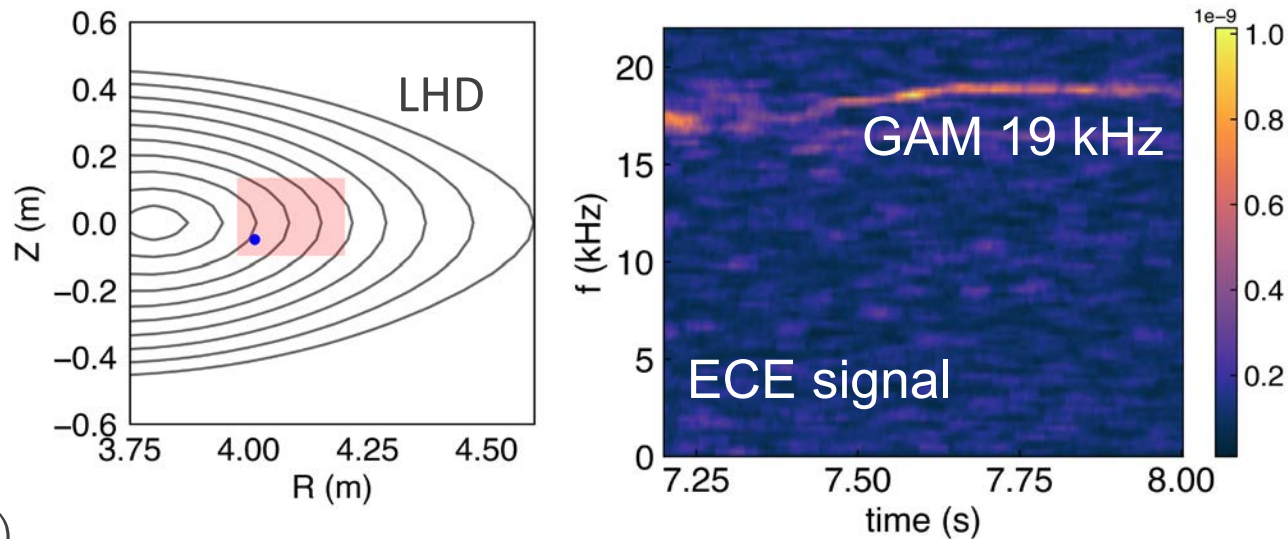
- 電子温度揺動計測
- 位相空間変動
- 予測制御

# ECE イメージングによる測地線音波(GAM)の温度揺動構造の観測

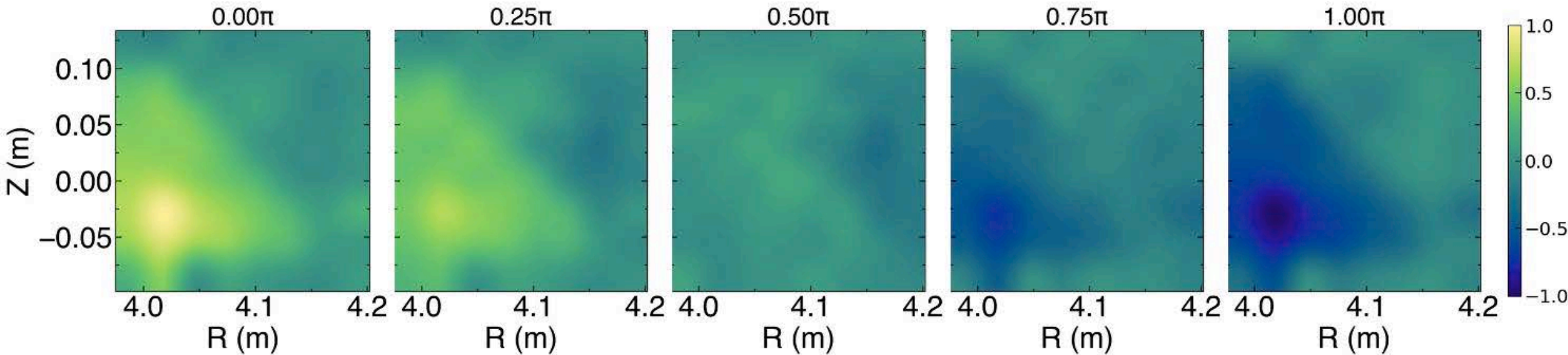
D. Nishimura et al., J. Fusion Energy, 45 3 (2026)

目的: ECEIでGAMに伴う  
電子温度揺動構造を調べる

成果: 高エネルギー粒子駆動GAMの  
観測に成功。  
定在波的な構造が示唆された。



得られた空間構造 (クロススペクトルの実部)

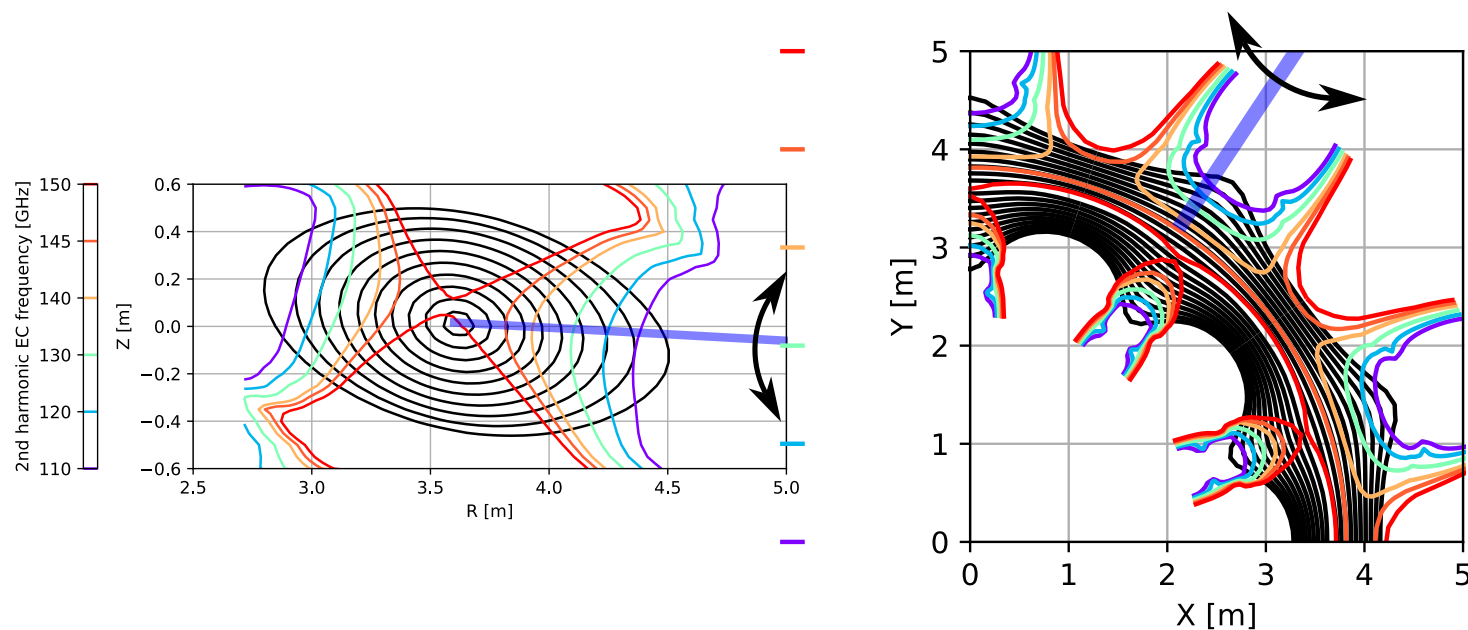




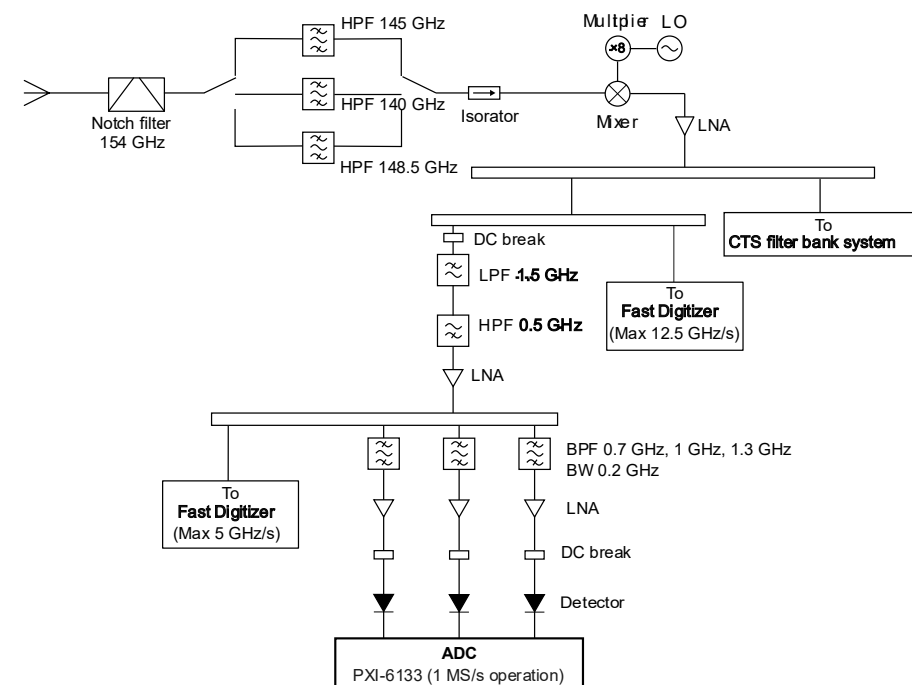
# ECHアンテナを利用したcorrelation ECE (CECE) systemの開発

電子温度揺動の特性を調査することは、乱流による熱輸送の理解に不可欠であり、LHDでは9-OにYIGフィルターを使用したcorrelation ECE計測が設置されている。

電子温度揺動の特性についての理解を深めるために、ECHの可動アンテナを使用し、計測視線をスキャンできる新たなCECEシステムを開発した。



ECHアンテナによるECEの計測視線の概念図



CECEの計測回路

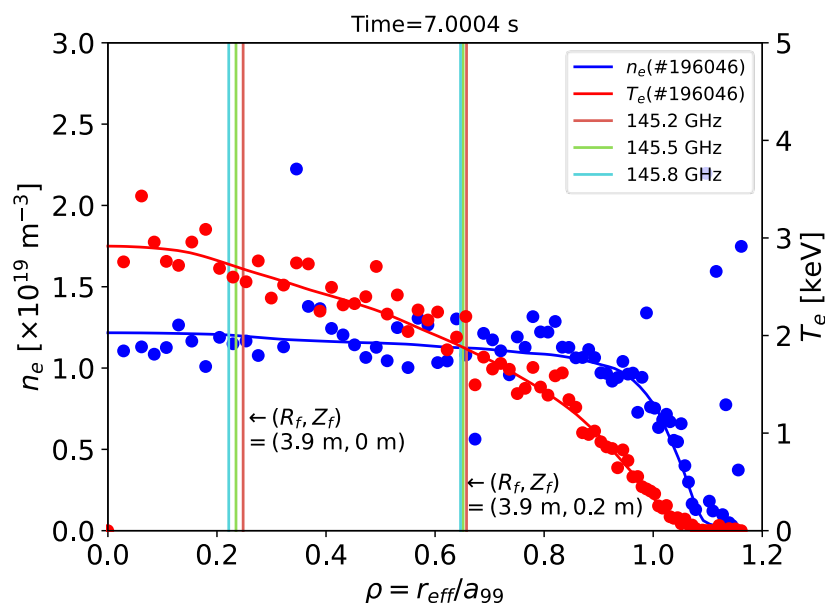
# ECHアンテナを利用したcorrelation ECE (CECE) systemの開発

アンテナを動かし、計測視線方向を変更し、同様の加熱条件のプラズマでの計測を行った。

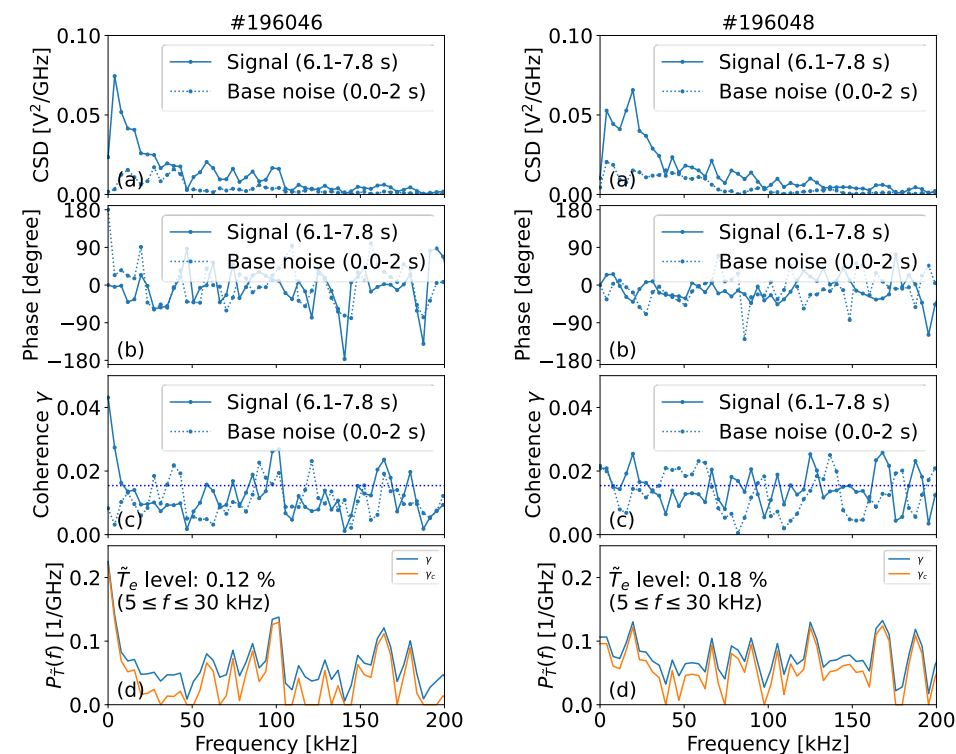
計測位置を  $\rho \sim 0.23$  と  $\rho \sim 0.65$  で比較すると異なる電子温度揺動のスペクトルと揺動レベルが確認された。

今後、シミュレーションとの比較など詳細な解析を進めていく。

LHDで計測された電子温度揺動は比較的小さいものが多く、ノイズの影響を大きく受けるため、**LHDでの知見をCHDのCECE計測に活かし、精度の良い計測器開発に努めたい。**



径方向の電子温度、密度分布とECE計測位置



ECE信号のクロススペクトル、位相差、コヒーレンス、電子温度揺動スペクトル (左:  $\rho \sim 0.23$ 、右:  $\rho \sim 0.65$ )

# Experimental study on the electron temperature anisotropy and non-Maxwellian distribution by Thomson scattering diagnostics

Ichihiro Yamada

In Thomson scattering diagnostics,  $T_e$  is usually determined under the two assumptions, “1) Electron motion is completely isotropic” and “2) Velocity distribution is pure single Maxwell distribution”.

For verifying the two fundamental assumptions by Thomson scattering diagnostics, new 9-CH and 12-CH polychromators have been developed and applied in LHD campaigns.

1) We found an electron temperature anisotropy in pure ECH plasmas in the 26th LHD campaign. (to be presented at EPS 2026)

2) Several results showing non-Maxwellian distribution have been also obtained in the LHD campaigns. (to be presented at SOFT 2026)

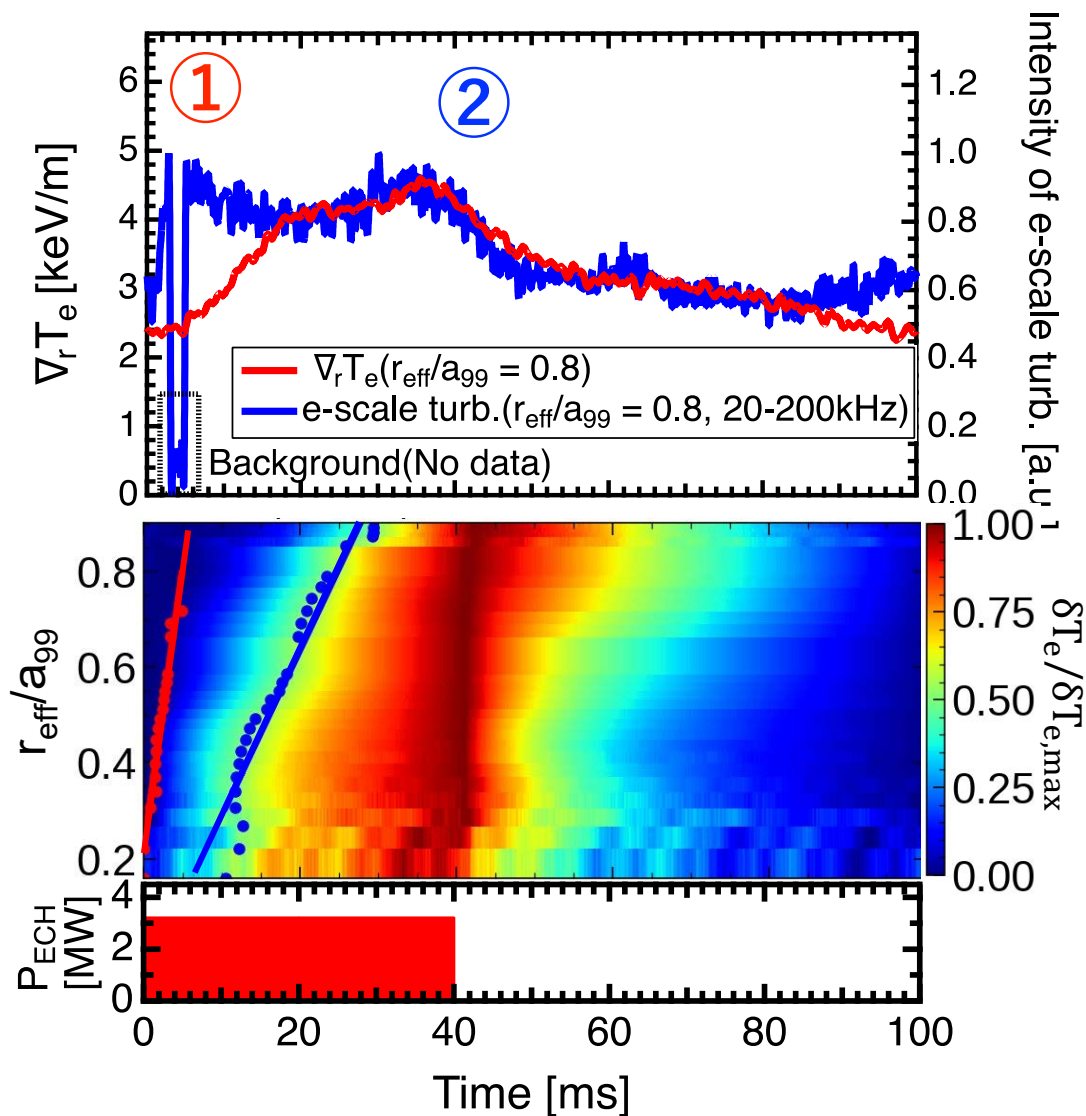
学術論文: I. Yamada *et al.*, “LHD Thomson scattering diagnostics,” *Journal of Fusion Energy*, Vol.44, 54 (2025).

国際会議: I. Yamada *et al.*, “Initial Results of New 9-Channel and 12-Channel Polychromators of the LHD Thomson Scattering System”, ECPD2025, Prague, Czech (2025).

外部資金: 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

共同研究: 日韓協力 (KFE KSTAR)、日中協力 (SWIP HL-3)

# プラズマ乱流が担う「熱輸送」と「非局所結合」の二つの役割を実験的に解明



- ✓ 大型ヘリカル装置 (LHD) において、プラズマ中の乱流が熱輸送において果たす二つの異なる役割を実験的に明らかにした。
- ✓ 高時間・高空間分解能計測により、乱流が熱を実際に輸送する**局所成分**と、離れた領域を瞬時に結びつける**非局所成分**として同時に存在することを直接観測した。
- ✓ 特に、短時間加熱により励起される非局所乱流が、プラズマ全体の高速な熱応答を媒介することを示した。
- ✓ 本成果は、非局所熱輸送の物理機構を明確化するとともに、将来の核融合炉における広域熱制御の基盤となる重要な知見を提供する。

- 論文: N. Kenmochi *et al.*, “Direct observation of coexisting local and nonlocal turbulence in a magnetically confined plasma”, Communications Physics 8 (2025) 492
- 受賞: 鈺持尚輝, AAPPS-DPP Young Researcher Award(2025) “understanding of the mechanism of nonlocal transport through advanced multiscale diagnostic instrument in magnetic fusion”
- 2025年12月10日NIFS記者会見