

# 電磁波(トポロジカル)による粒子集団応答:速度空間の物理(UT20でレビュー)

## 核融合としての課題

「プラズマ燃焼や自発現象など高時空間と速度空間の現象が複雑に絡み合うプラズマのダイナミクスの解明や, その予測・判断志向研究」→ **ユニット内外の連携(本ユニット, 軸3揺らぎ・乱流・輸送)**

従来の電磁波にトポロジカル電磁波(モード構造や渦性)の基本特性を加えた学理の体系化と, それを加熱・電流駆動や, プラズマ診断に利用する. 特に速度空間解析により自発現象の複雑なダイナミクスを解明する.

## レビューに提出

### 指摘事項

- 「順化」が不明. → **使わない**
- 角運動量の定量性. → **定量評価を実施したい.**

### その他

- 核融合科学を始めとして広い分野の発展に資すると評価する

## 3. テーマと研究内容の概要

従来の電磁波 (= 非トポロジカル電磁波) の基本特性を学術基盤とし, ユニットテーマに記載した新しい電磁波モード (= トポロジカル電磁波 #a) の基本特性を加えた学理の体系化とプラズマの応答から非定常から定常状態への遷移 (= 順化) 解明を目指し本テーマ名とした. ←

研究課題として非トポロジカル・トポロジカル電磁波に関し, 核融合炉心プラズマを見通せる予測可能な波動加熱・電流駆動と自己加熱の実験とそれらモデルの検証, 燃焼プラズマの輸送物理実験を掲げる. 核融合炉の $\alpha$ 粒子加熱と外部加熱による自立燃焼の維持は未知の領域で, 従来の加熱・電流駆動や輸送物理モデルの成立は自明とは言えない. そのために核融合研にジャイロトロン用 6T 超電導磁石を 2 台組み合わせ合わせて新規に加熱試験装置を構築し加熱・電流駆動の基礎実験を行い, Wendelstein 7-X, JT-60SA や国内装置ではその実証を行う. ←

# 電磁波(トポロジカル)による粒子集団応答:速度空間の物理

## 核融合としての課題

「プラズマ燃焼や自発現象など高時空間と速度空間の現象が複雑に絡み合うプラズマのダイナミクスの解明や, その予測・判断志向研究」→ **ユニット内外の連携(本ユニット, 軸3揺らぎ・乱流・輸送)**

従来の電磁波にトポロジカル電磁波(モード構造や渦性)の基本特性を加えた学理の体系化と, それを加熱・電流駆動や, プラズマ診断に利用する. 特に速度空間解析により自発現象の複雑なダイナミクスを解明する.

- 速度空間マニピュレーション
  - 波動加熱をノブとし生成されたプラズマの応答や自己加熱の物理に取り組む.
  - トポロジカル電磁波の特性を調べる.
- 診断(ミリ波散乱計測, 電子スケールの相関計測)
  - LHDで開発した協同トムソン散乱計測(CTS)と電子サイクロトロン輻射相関計測(CECE)をより高度化し速度空間解析, 揺動との関係に取り組む.
- 機械学習(データ駆動)を取り入れることで, 従来困難であった計測データの解析やプラズマ制御が可能になる. → **ユニット内の連携**

## 研究の焦点

- 核融合プラズマの燃焼維持とデモ炉にスケール可能な加熱と輸送物理の探求.
- デモ炉物理の国際競争力の向上もある意味, その波及効果と考える.

# 例えば

- 波動加熱は
  - プラズマ点火
  - プラズマ維持・制御
  - 電流駆動
  - 不安定性の抑制 (AE, NTM)
- ミリ波・サブミリ波によるプラズマ診断 (CECE, CTS)
  - 速度空間物理
  - 乱流
  - 輸送物理

## 外部電流駆動比率 (ECCD+NBCD)

	External current drive fraction
JT-60SA	0.2-0.3
ITER	0.5
DEMO	0.2-0.3

従来の波動加熱モデルで説明可能か？

- バルクや高エネルギー粒子の存在
- 相対論的取り扱い
- 電子加熱
- 乱流の影響

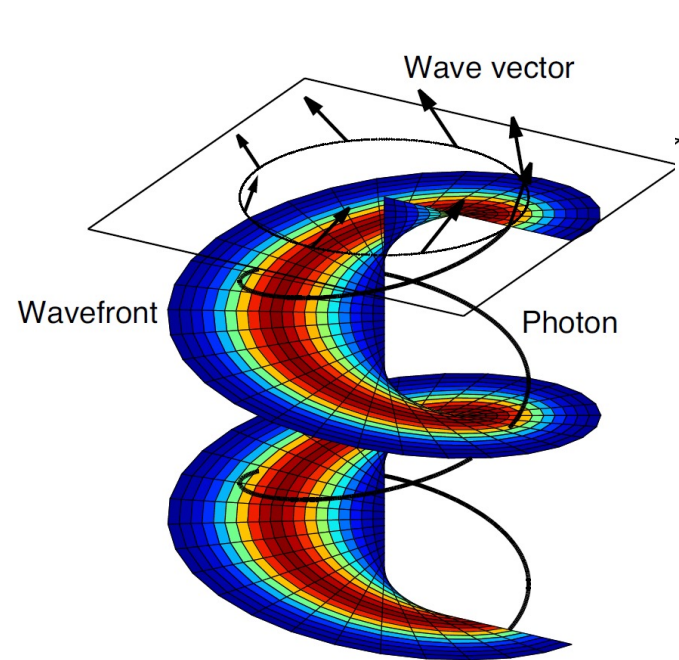
燃焼プラズマ計測から研究を進展させる

## 研究の方法

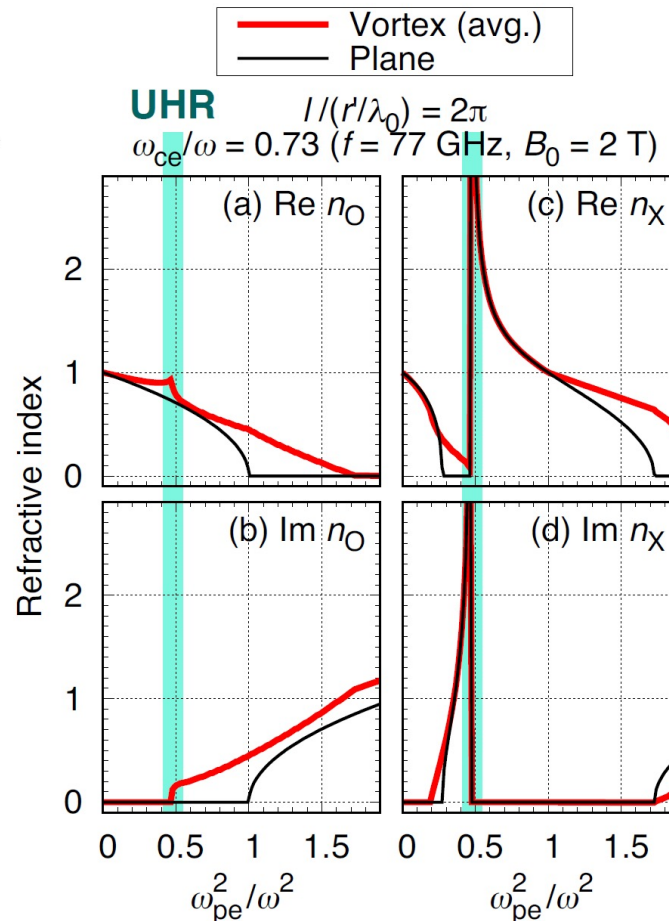
- リアクターグレードの装置 (LHD, JT-60SA, W7-X, ITER) で波動加熱物理と自己燃焼プラズマ物理の研究を実施する。
- JT-60SA で加熱, 計測用としてジャイロトロンを用いる。ECH を利用した ECE による相関計測や協同トムソン散乱計測を用いた物理実験を実施したい。その中には解析手法と物理モデルの構築も含まれる。
- 研究所や大学の装置で小回りの利いた実験も視野に入れている。

# トポロジカル電磁波の伝播特性

波面が螺旋状になることで、伝播特性が異なる。波動物理の基礎特性の解明，加熱・計測にも応用できる。

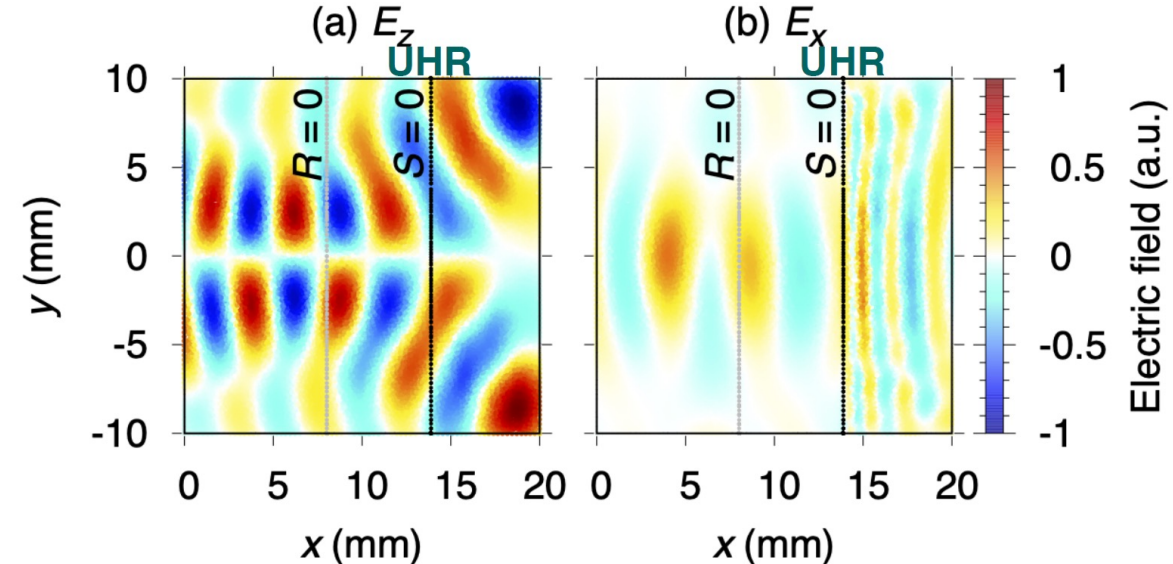


- How optical vortices propagate in plasma?
- Beneficial for heating?



プラズマ中の屈折率の変化  
 トポロジカル(光渦)と非トポロジカル  
 (ガウスビーム)で位相面が傾斜する  
 ため伝播特性が異なる。

$l = 1, x_R = 10$  mm,  $\omega_{ce}/\omega = 0.73$  ( $f = 77$  GHz,  $B_0 = 2$  T)



シミュレーションではUHR層でO-Xモード変換を確認している。

高密度加熱や加熱効率の向上が期待できるため、その調査を進める。

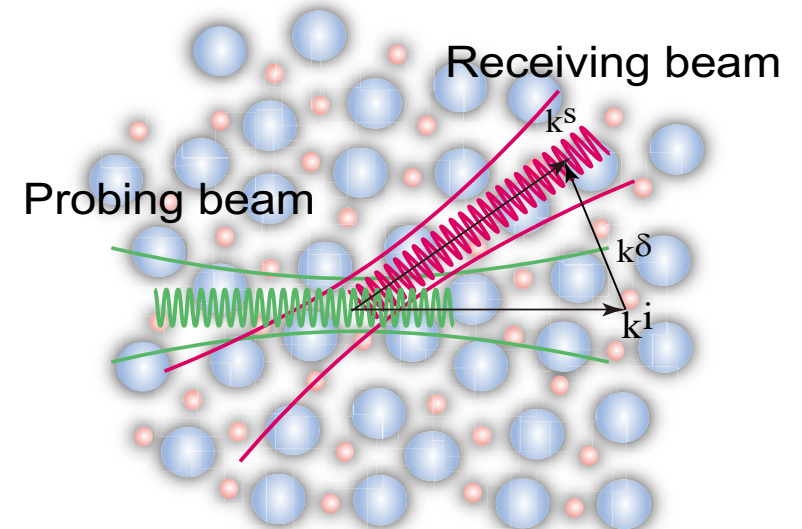


# Collective Thomson scattering(CTS) diagnostic

アルファ粒子の閉じ込めは核融合炉の自己加熱維持の鍵を握る。荷電粒子の内部状態を知ることは技術的に困難であるが、その課題解決のために、CTS計測とその解析手法の開発を進めてきた。

## • CTS計測から得られる物理量

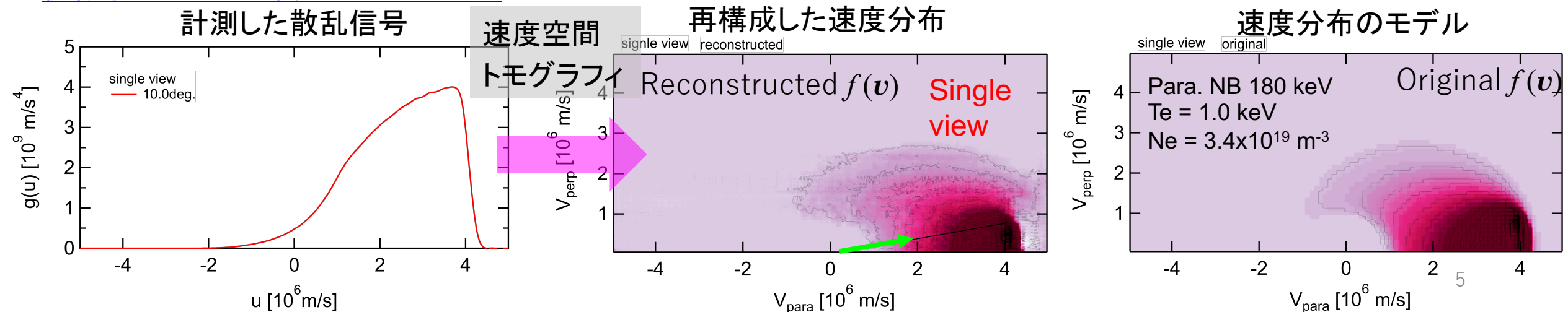
- ・ イオン温度,  $T_i$
- ・ イオンの速度分布関数,  $f(v)$  非熱化, 非対称速度分布
- ・ イオン比 (H/D ratio)



Wave number vectors of incident and scattered waves.

核融合プラズマでは非熱化, 非対称速度分布の計測が自発現象の理解に必須。

## 機械学習による速度空間トモグラフィ



# Collective Thomson scattering(CTS) diagnostic

アルファ粒子の閉じ込めは核融合炉の自己加熱維持の鍵を握る。荷電粒子の内部状態を知ることは技術的に困難であるが、その課題解決のために、CTS計測とその解析手法の開発を進めてきた。

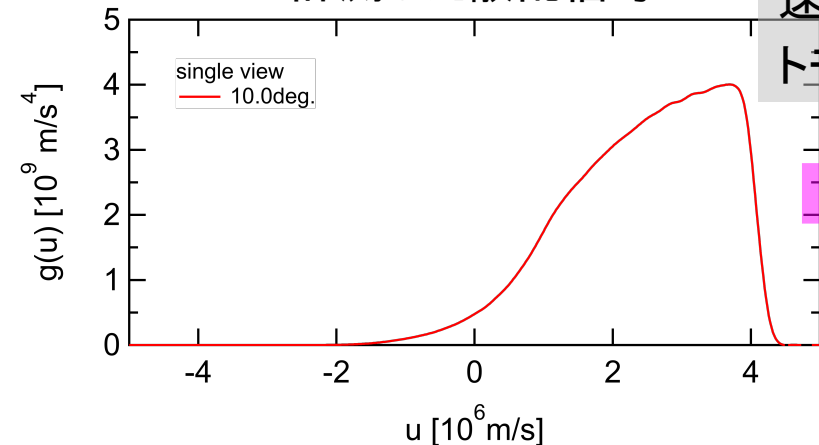
## • CTS計測から得られる物理量

- ・ イオン温度,  $T_i$
- ・ イオンの速度分布関数,  $f(v)$  非熱化, 非対称速度分布
- ・ イオン比 (H/D ratio)

核融合プラズマでは非熱化, 非対称速度分布の計測が自発現象の理解に必須。

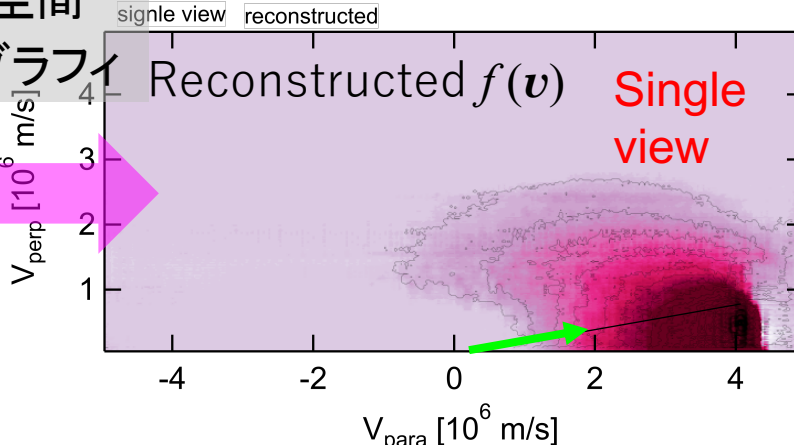
## 機械学習による速度空間トモグラフィ

計測した散乱信号



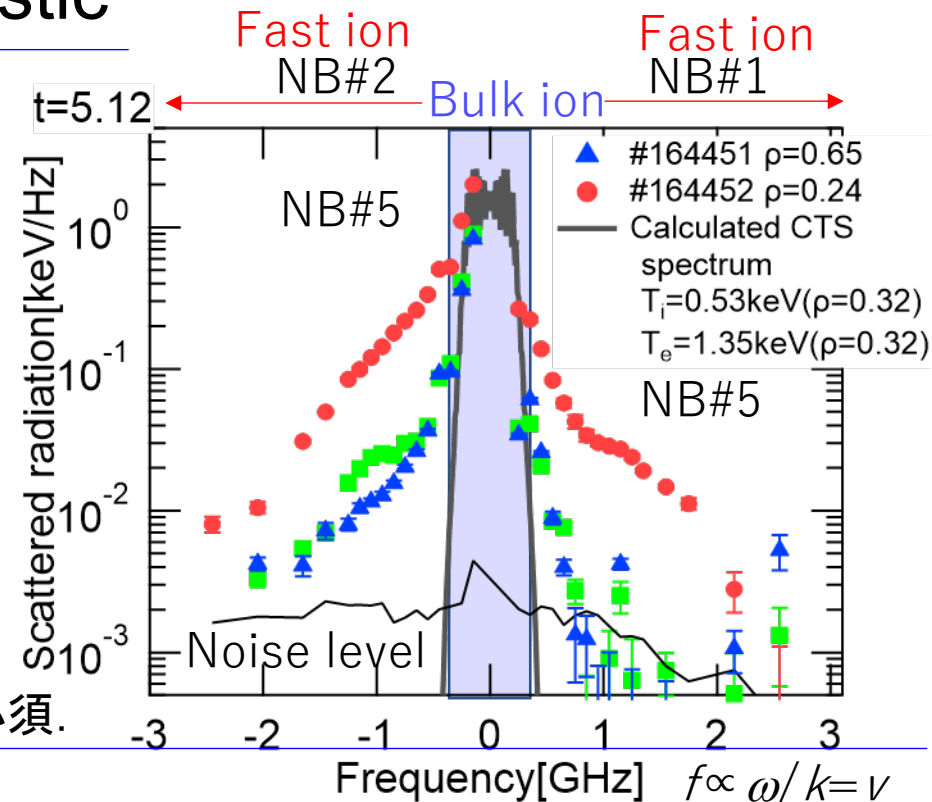
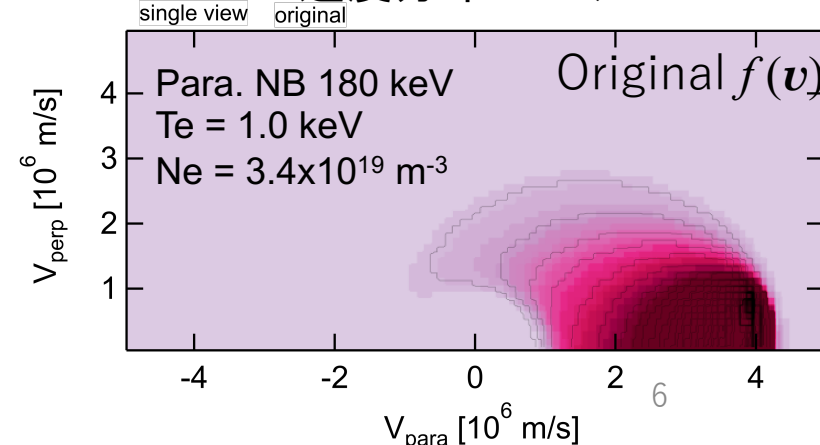
速度空間

トモグラフィ



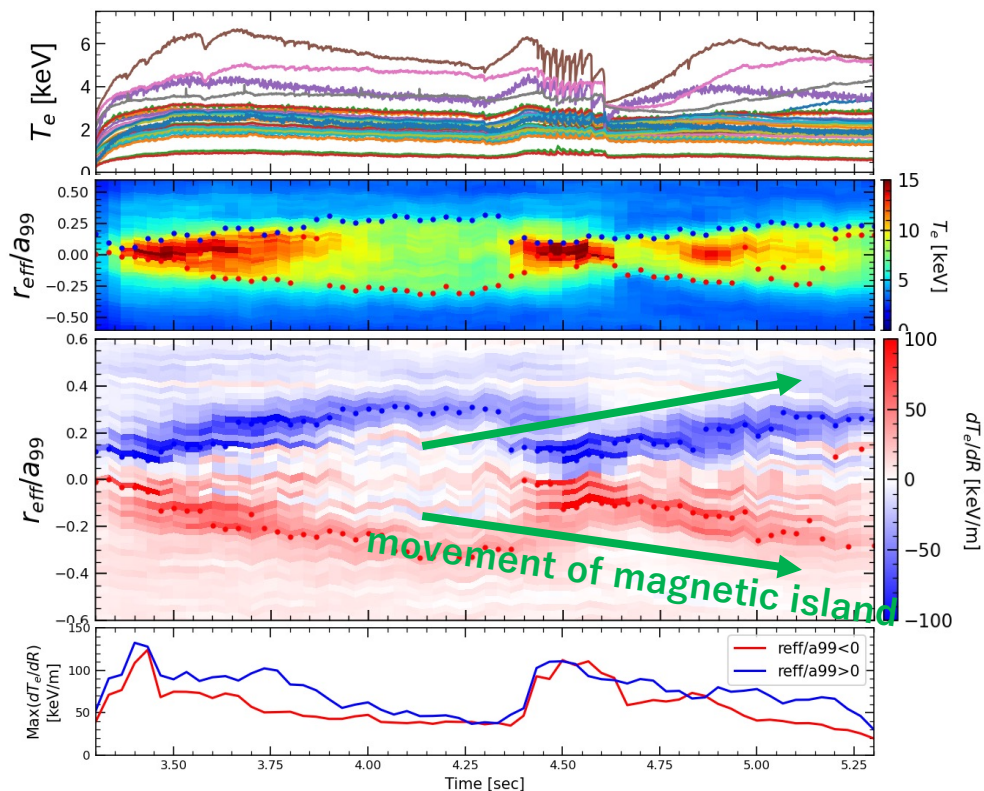
再構成した速度分布

速度分布のモデル

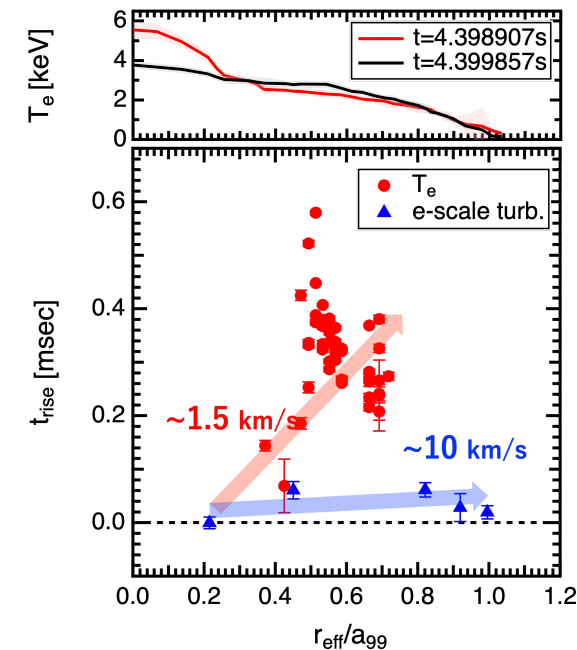
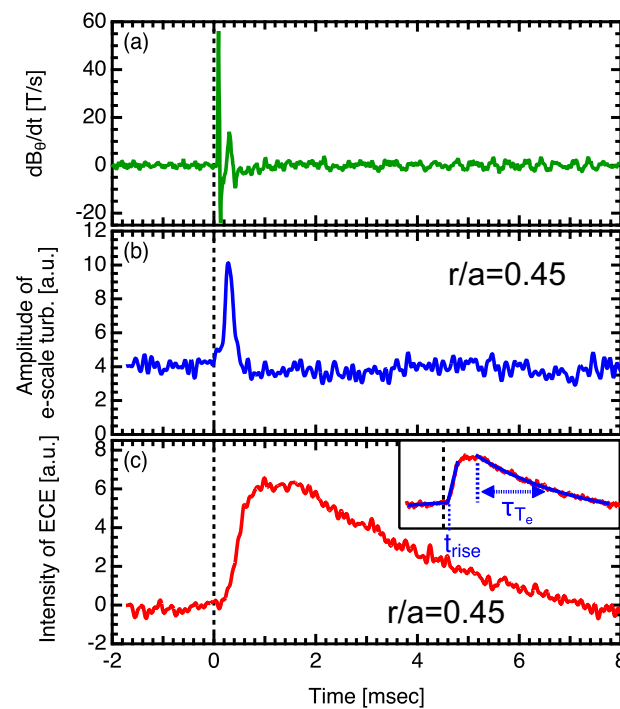


# 乱流・輸送物理に根ざした核融合プラズマの制御

磁気島位置制御による温度分布の制御



ITB崩壊時に観測される  
磁場揺動と熱・乱流パルスから乱流輸送研究を展開



磁場構造や乱流輸送の物理理解に基づくプラズマ分布制御を行う

プラズマの圧力分布を加熱入力で制御





# テーマのイメージ

プラズマ機能発現・創出  
Function onset and creation

加熱物理を再定義

核融合プラズマ

プラズマの自発性と  
自立性を促す研究

制御

国内との連携

海外との連携

関連課題

加熱は有効なknob

物理課題

物理の診える化

既存  
ミリ波・サブミリ波・RF帯

JT-60SA

ミリ波加熱診断

電子サイクロトロン帯  
物理

W7-X

ITER

高密度加熱

高効率化

加熱効率

モード変換

Parametric  
decay

新加熱

不安定モード  
励起

イオンサイクロトロン帯  
物理

熱粒子輸送研究

定常電流駆動

定常研究

RFヘリコン波

コア自立燃焼  
定常維持

$\alpha$ 粒子計測

$\alpha$ 粒子加熱物理

光渦

ECR正・負イオン源

ITER, 加速器, プロセス  
プラズマ, 推進機

ミリ波・サブミリ波  
コンポーネント  
システム開発

太陽風でAlfvenic  
fluctuationが観測

自己組織化, 高ベータ

非中性プラズマ

時間スケール

2021

2026

2031

2035

JT-60SA  
Operation 2, 3

ITER first plasma

ITER DT  
Judge to DEMO

- リアクターグレードのプラズマを対象とした波動物理研究.
- 物理実験とモデリングの協業による予測精度の追求が必要.
- JT-60SAでのDD実験から, DT実験や原型炉への橋渡しができる学術基盤の構築.

# 電磁波(トポロジカル)による粒子集団応答:速度空間の物理

## 核融合としての課題

「プラズマ燃焼や自発現象など高時空間と速度空間の現象が複雑に絡み合うプラズマのダイナミクスの解明や, その予測・判断志向研究」→ **ユニット内外の連携(本ユニット, 軸3)**

従来の電磁波にトポロジカル電磁波(モード構造や渦性)の基本特性を加えた学理の体系化と, それを加熱・電流駆動や, プラズマ診断に利用する. 特に速度空間解析により自発現象の複雑なダイナミクスを解明する.

## レビューに提出

### 指摘事項

- 「順化」が不明. → **使わない**
- 角運動量の定量性. → **定量評価を実施したい.**

### その他

- 核融合科学を始めとして広い分野の発展に資すると評価する

## 4. 位置づけ

トカマク型核融合炉の運転シナリオは外部加熱入力により定常プラズマを維持・制御する. 電子サイクロトロン(EC)波による電流駆動がその一端を担うが, 非等方・非平衡な速度分布粒子に対し, プラズマの不安定性を抑制した加熱・電流駆動が行えるかは未知の領域である.

中略

トポロジカル電磁波は全く新しい研究領域に位置付けられ, プラズマ加熱に利用した場合, 電場や位相構造及びそれらの対称性が媒質の新しい性質を発現させ, 結果として粒子の特異な応答を示すことが考えられる. 計測に利用した場合は, 位相情報を活用した新しい乱流計測器と乱流輸送研究への展開が期待できる. 得られる知見の学術的意義は大きい. ミリ波は通信機器, レーダー機器, 医療機器への波及効果も期待できる.