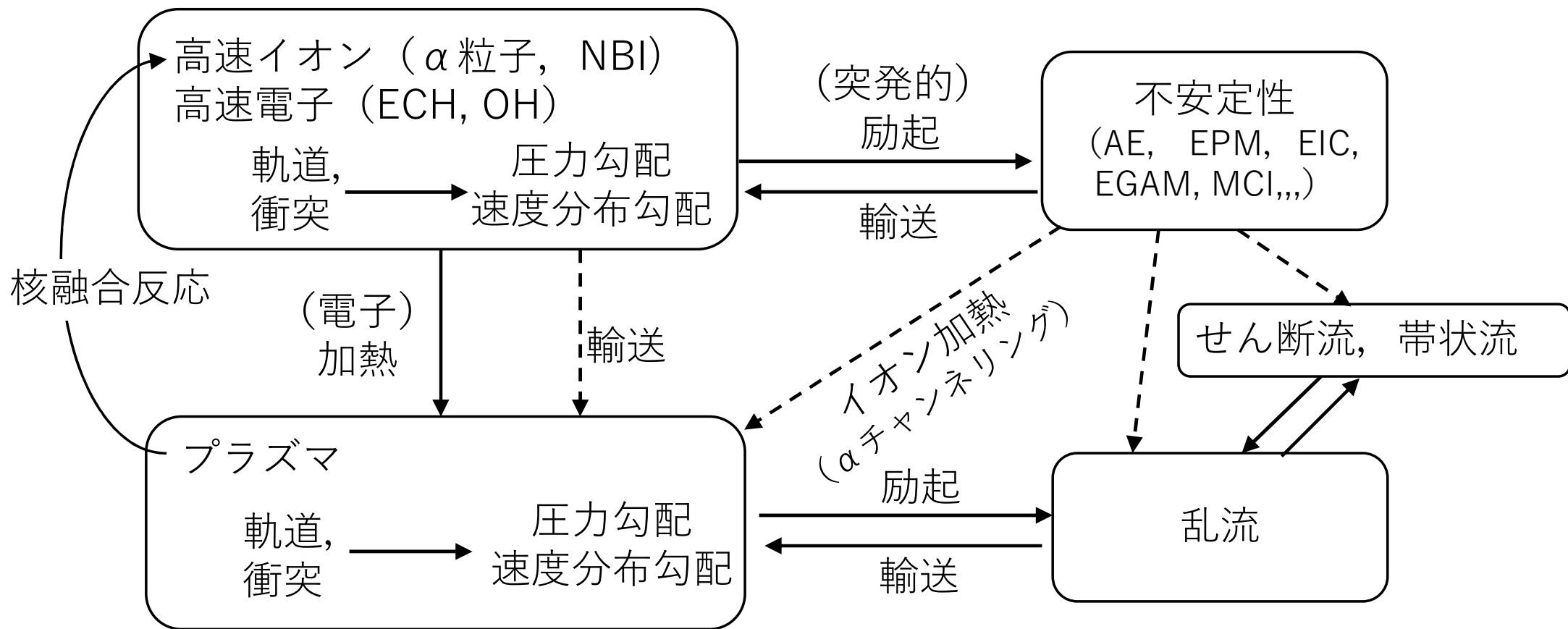


大型ヘリカル装置LHDプロジェクトが切り開いた プラズマ物理の地平

4. 高エネルギー粒子の物理

九州大学，核融合科学研究所
井戸 毅



□ 高エネルギー粒子の輸送、波動励起・波動一粒子相互作用

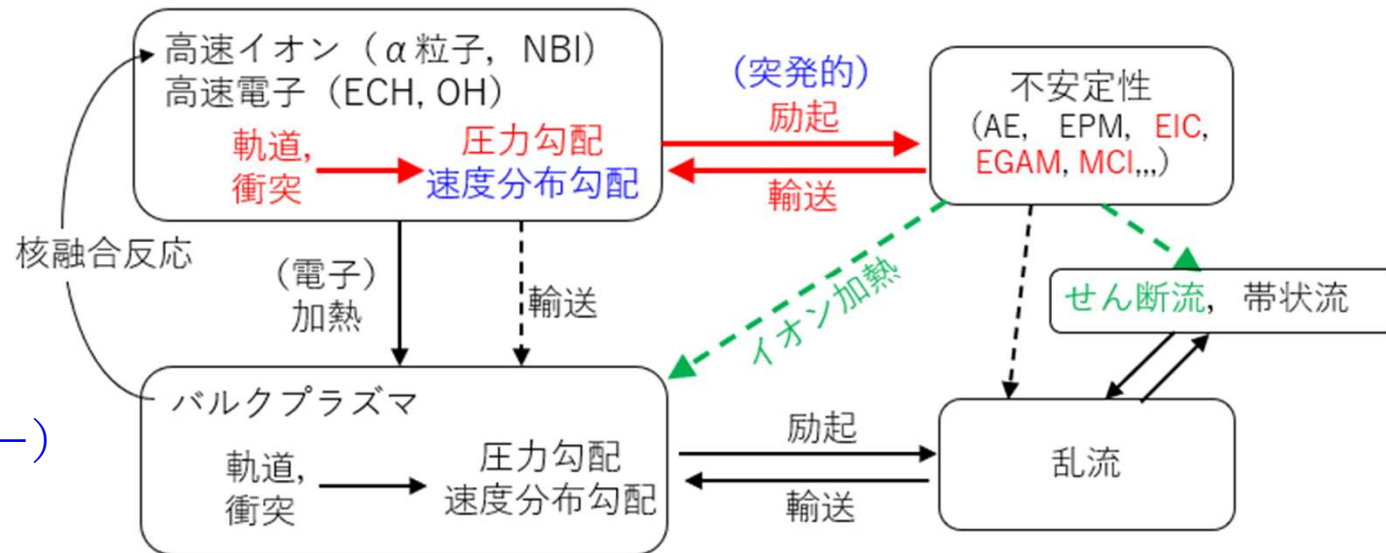
- NBI、放射線計測、解析コードの連携に基づく高エネルギー粒子の閉じ込め研究の精密化
- イオンサイクロトロン周波数帯の不安定性の解明

■ バルクプラズマへの影響

- イオン加熱
- シア流の生成

□ 新しい展開

- 突発現象（亜臨界不安定性、舌状構造(tongue)によるトリガー）
- 位相空間への拡張



LHDにおける高エネルギー粒子関連研究のまとめ

- K. Toi et al., "Energetic-ion-driven global instabilities in stellarator/helical plasmas and comparison with tokamak plasmas," Plasma Phys. Control. Fusion 53, 024008 (2011)
- K. Toi et al., "Observation of energetic-ion losses induced by various MHD instabilities in the Large Helical Device (LHD)," Nuclear Fusion 50, 084005 (2010)

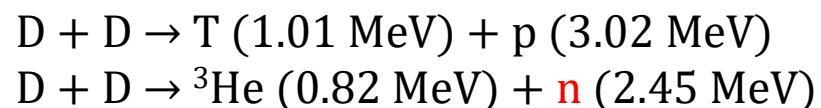
ヘリカル特有のAlfvén固有モードの同定

- Yamamoto et al., Phys. Rev. Lett. 91, 245001 (2003) "Observation of Helicity-Induced Alfvén Eigenmodes in Large-Helical-Device Plasmas Heated by Neutral-Beam Injection"

高エネルギー粒子の輸送, 波動励起

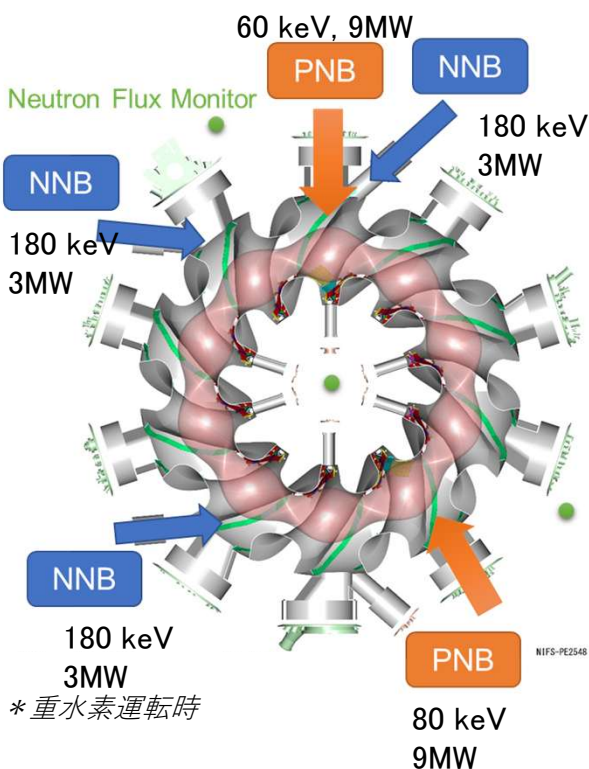
- 放射線計測に基づく高エネルギー粒子の閉じ込め研究の精密化
- イオンサイクロトロン周波数帯の不安定性の解明

放射線計測を利用した高エネルギー粒子の閉じ込め研究

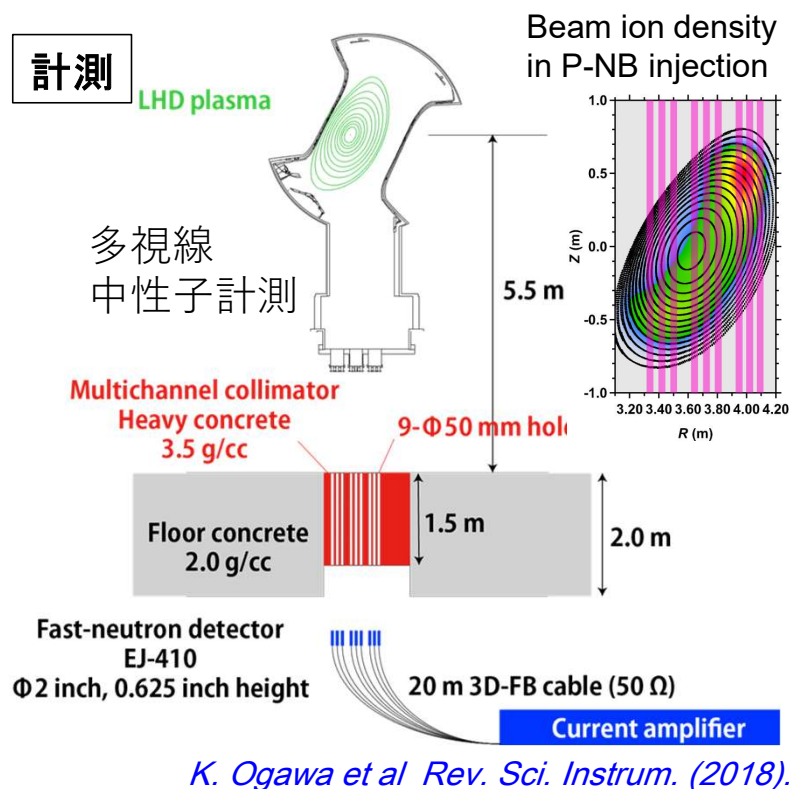


LHDにおける中性子の発生はNBI由来の高速イオンとバルクイオンとの衝突が支配的 $\Rightarrow$ **高速イオンの輸送研究**

高速イオンの生成・制御

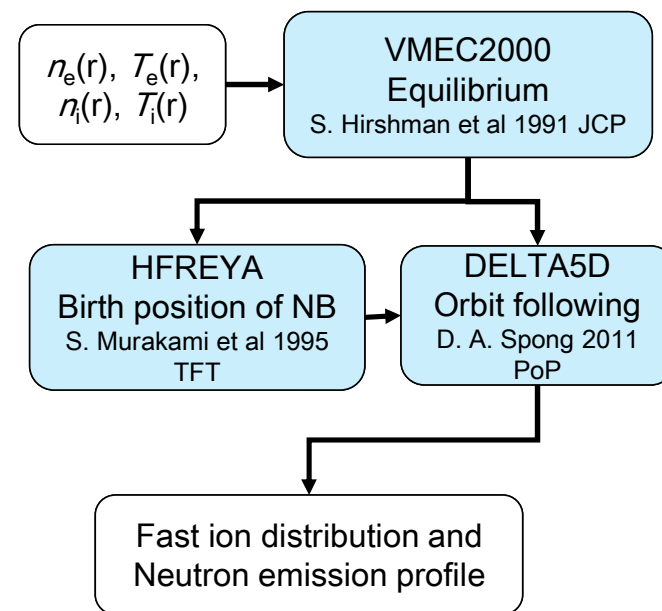


計測



K. Ogawa et al Rev. Sci. Instrum. (2018).

解析コード



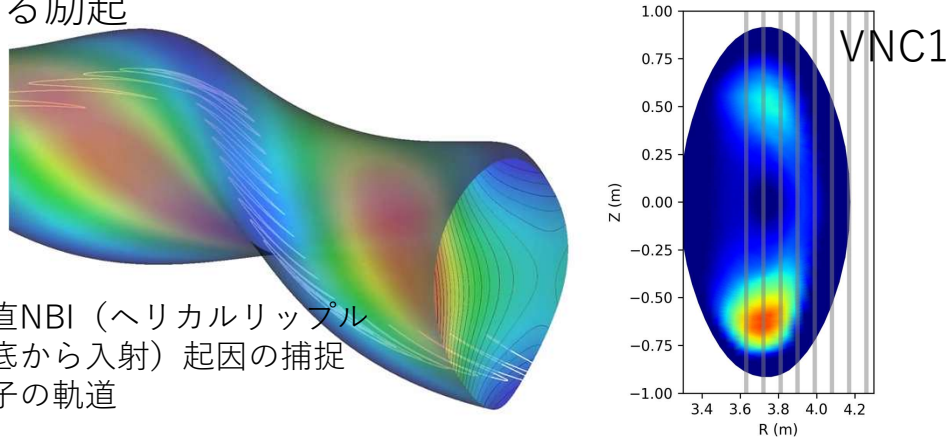
CONV_FIT3D

H. Nuga, Plasma Fusion Res. (2019)

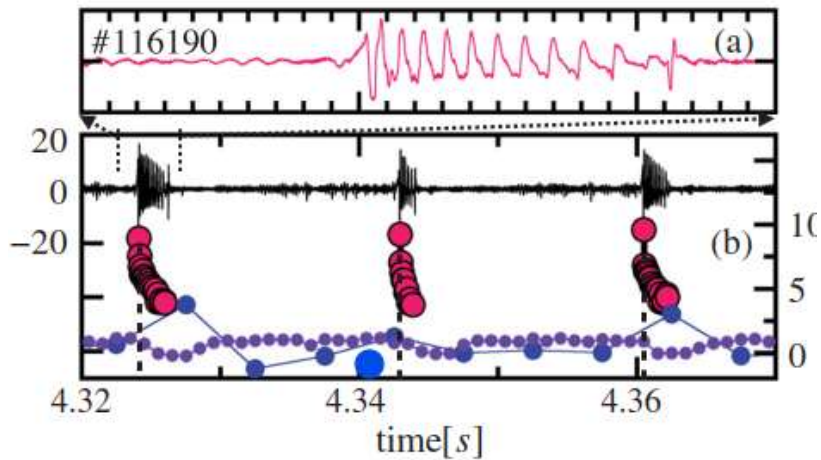
中性子計測および解析コードの開発により高エネルギー粒子の分布・輸送を高精度で評価

不安定性による高エネルギー粒子の輸送

EIC (Energetic ion driven resistive InterChange mode)
ヘリカルリップルに捕捉された高エネルギーイオンによる励起



垂直NBI（ヘリカルリップルの底から入射）起因の捕捉粒子の軌道

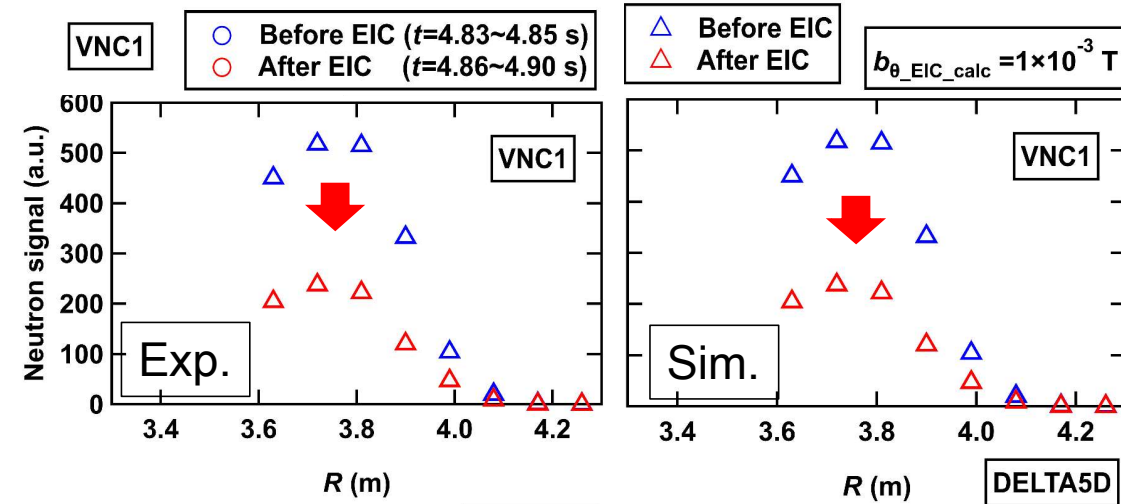


X. D. Du *et al.*, Phys. Rev. Lett. 114, 155003 (2015).

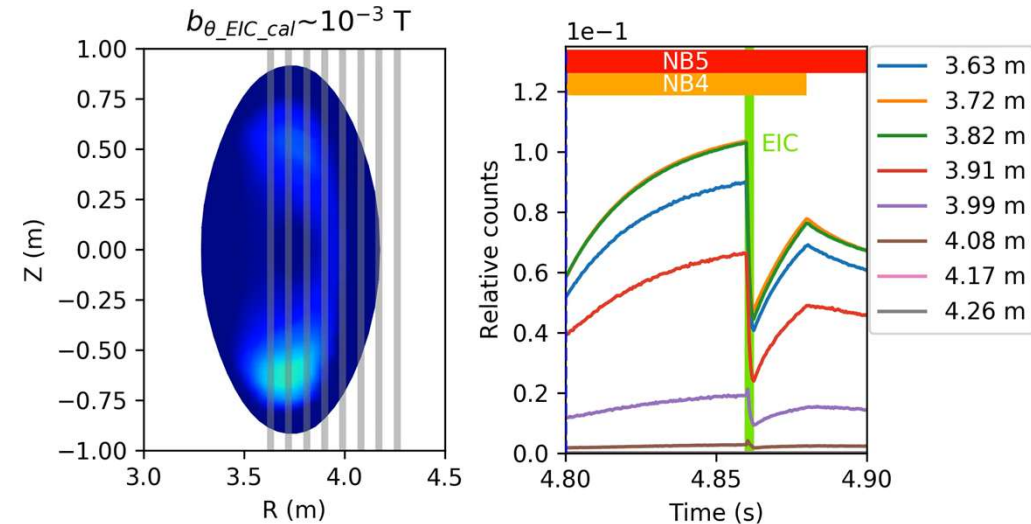
X. D. Du *et al.*, Nucl. Fusion 2016

K. Ogawa *et al.*, Nucl. Fusion (2020)

K. Ogawa *et al.*, Plasma Fusion Res. 2021

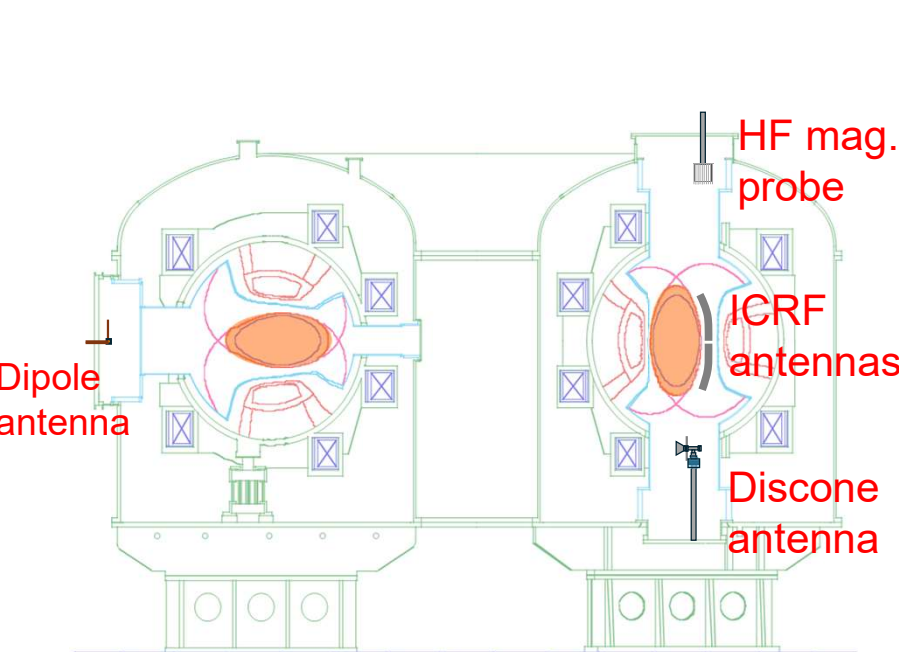


DELTA5Dコードによる中性子発生分布の時間発展の評価



時間発展を含め定量的に実験結果を再現

高エネルギー粒子によるイオンサイクロトロン周波数帯の波動励起



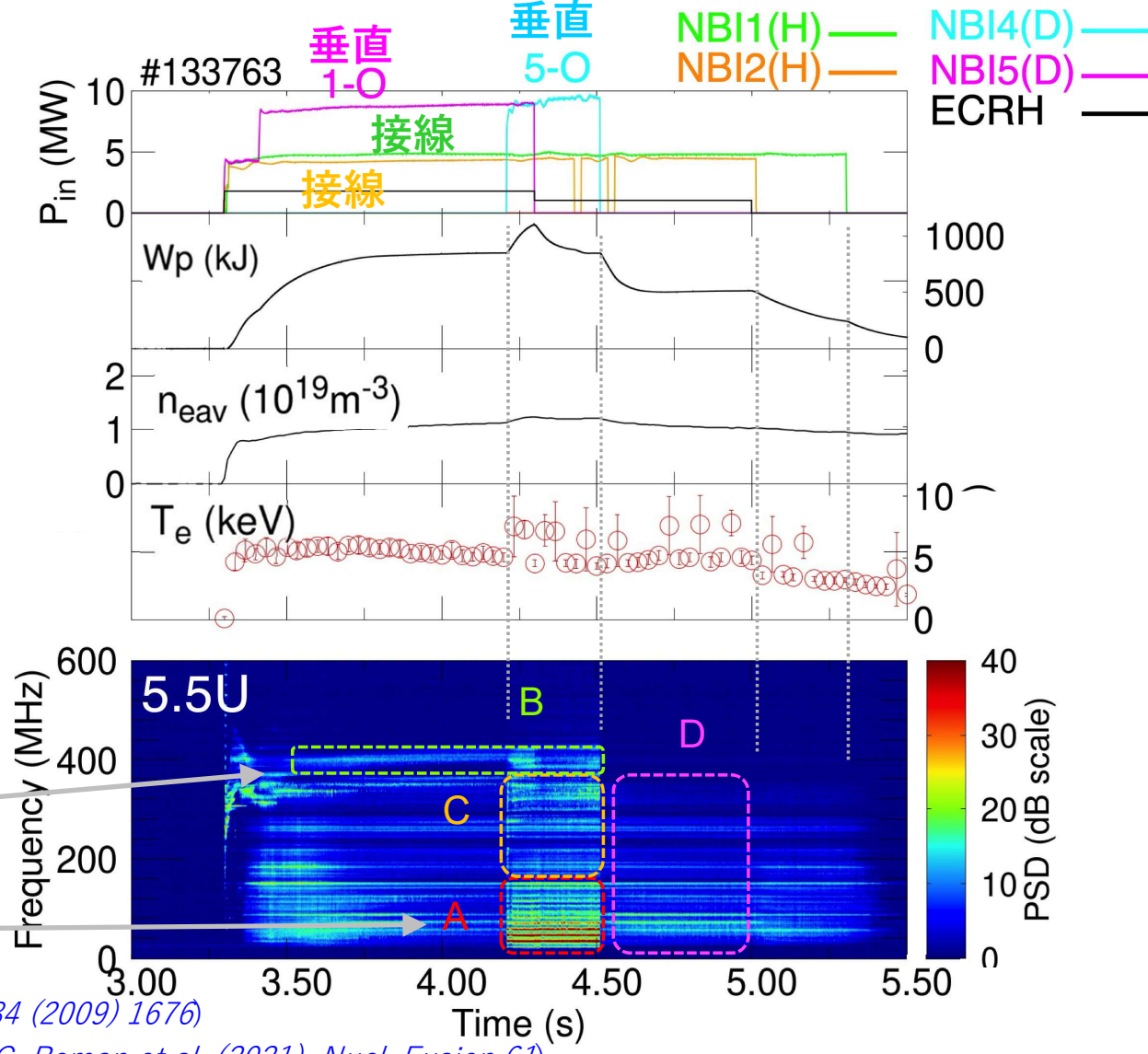
K. Saito et al, (2009) Fusion engineering and Design 84
 K. Saito et al, (2018) Plasma Fusion Res.
 H. Igami et al, submitting to JFE (2026)

磁気音波 $f \sim f_{LH}$

ICE (Ion Cyclotron Emission)

$f = f_{ci}(11.8) \times n \text{ MHz} \quad (2 \leq n \leq 10)$

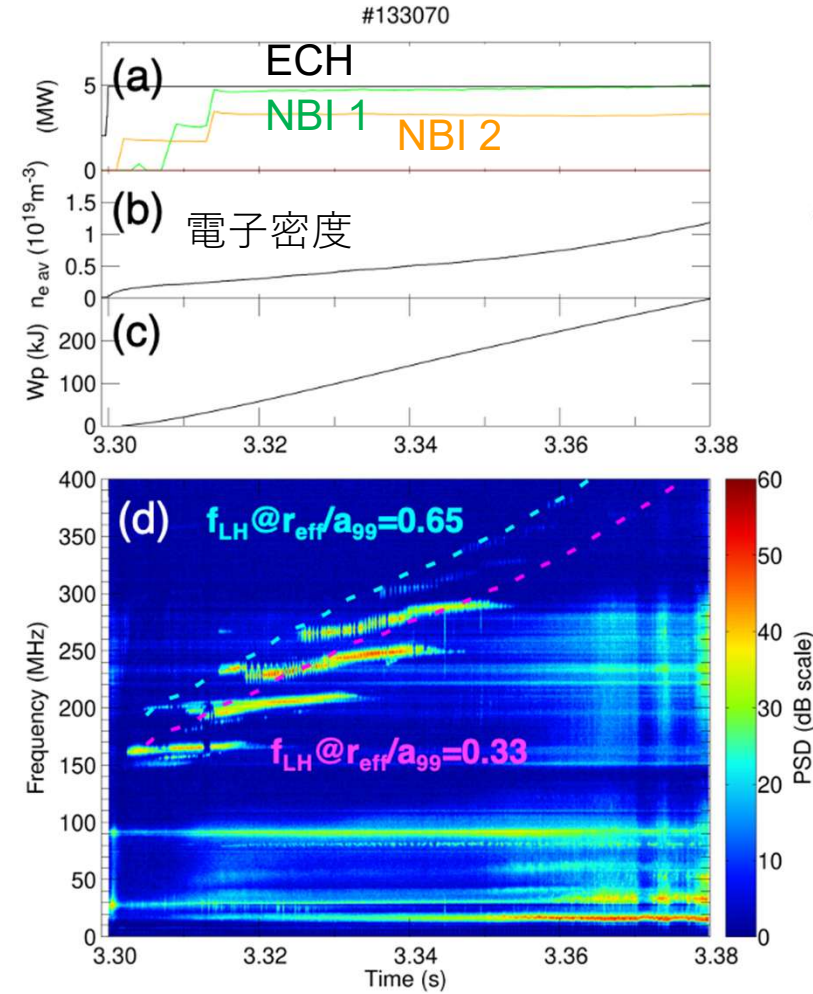
- 放射領域の推定 (K. Saito, Fusion Eng. Des. 84 (2009) 1676)
- v_{NB}/v_A 依存性(0.36 – 1.125)の検証 (B. C. G. Reman et al, (2021) Nucl. Fusion 61)



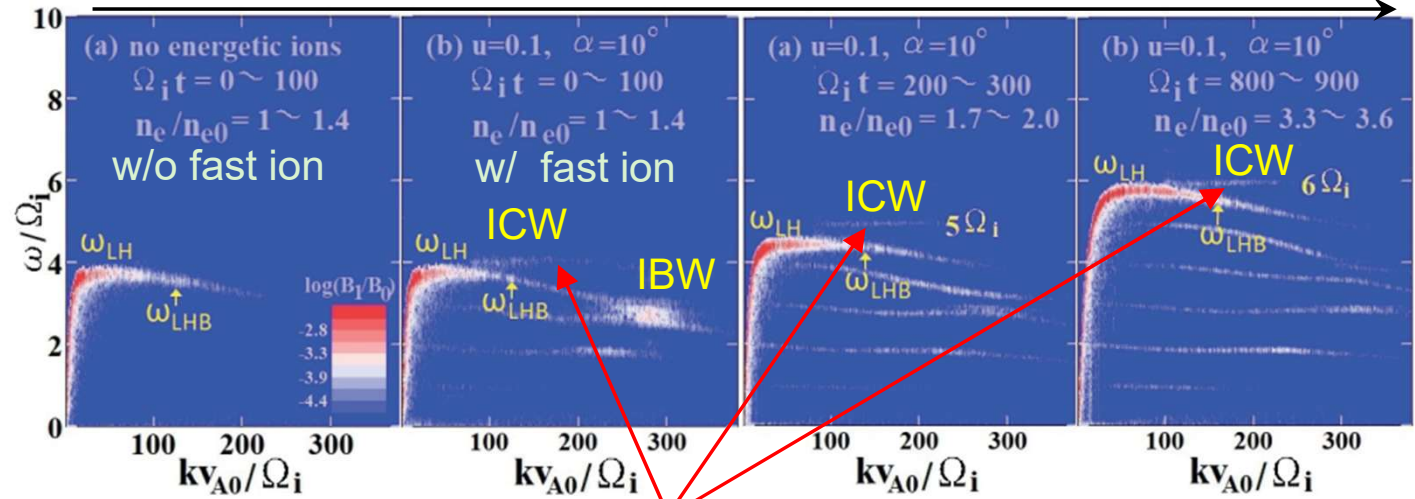
低域混成周波数帯における階段状に周波数が変化する波動の励起

M. Toida et al, Plasma Fusion Res. 14, 3401112(2019)

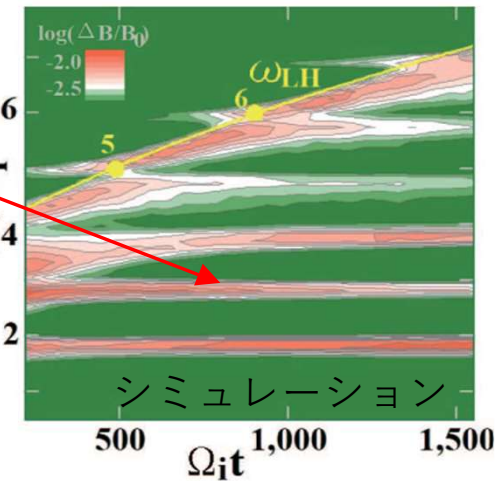
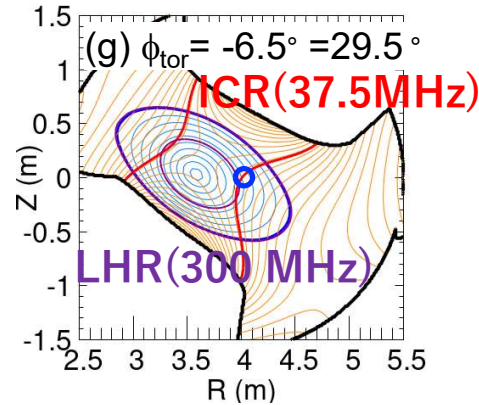
PICシミュレーションによる局所的な分散関係の時間発展



H. Igami et al, Submitted to J. Fusion Energy (2026)



接線NBIのビームに沿って $f_{LH} = l f_{ci}$ が満たされたところで $l f_{ci}$ のICWが励起



計測と理論の進展を通じて、波動励起の物理や波動-粒子相互作用に関する新しい知見

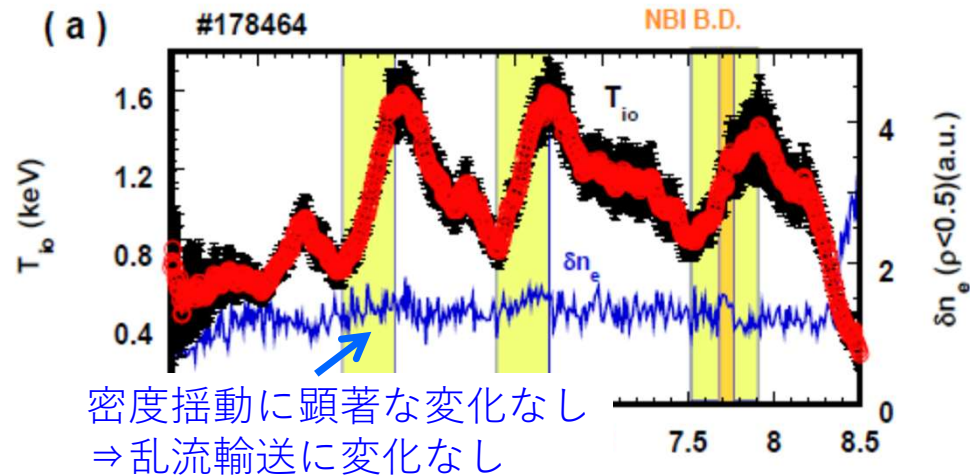
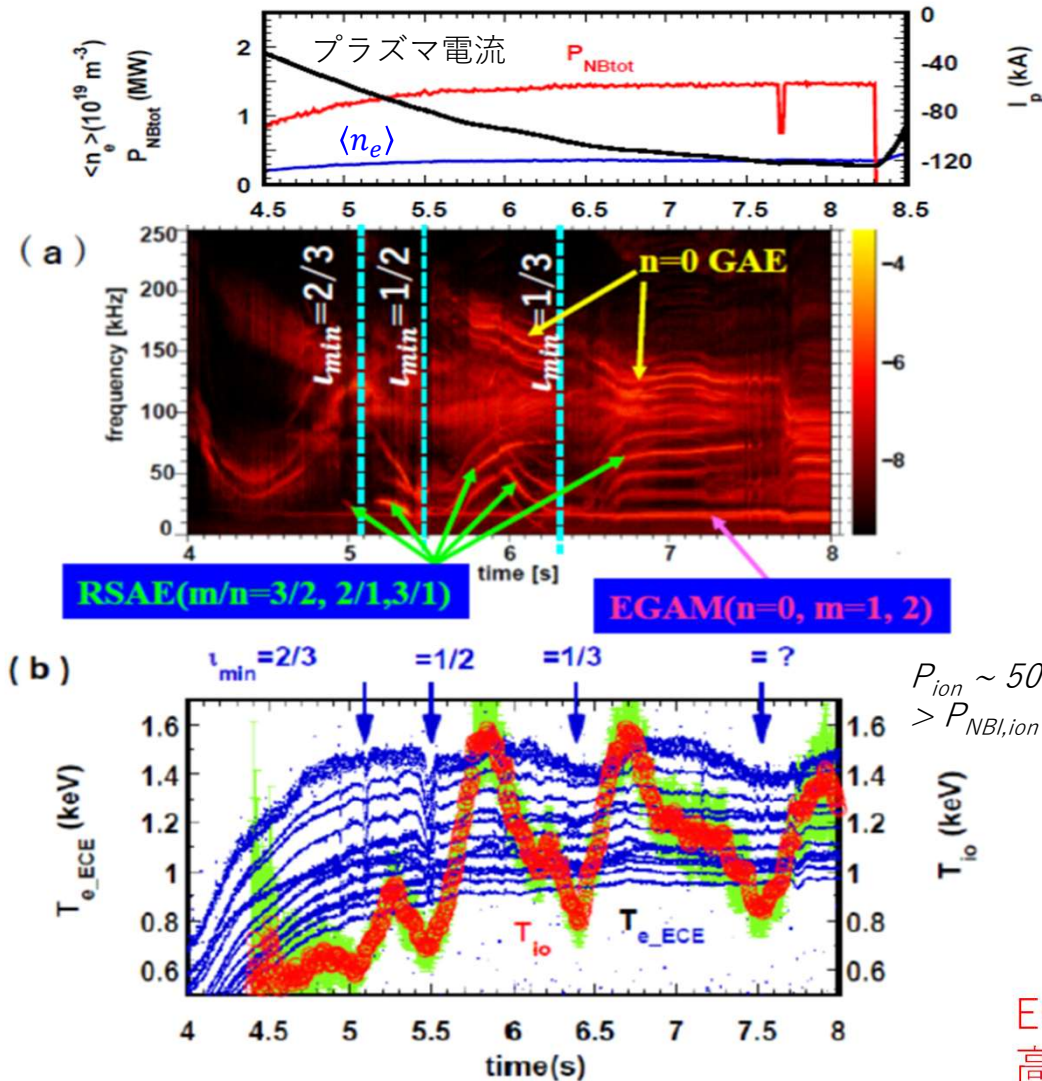
バルクプラズマへの影響

- イオン加熱（アルファチャネリング）
- せん断流の生成

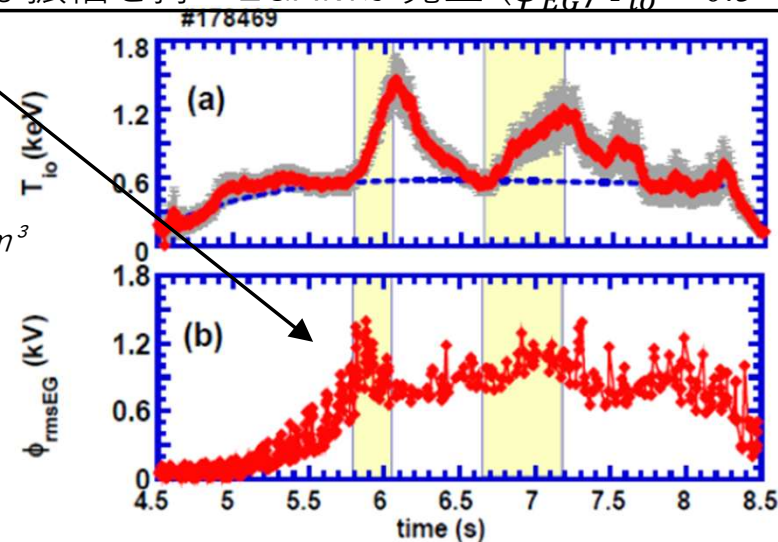
イオン加熱の可能性

NBCDによる反転磁気シア形成時にイオン温度が上昇

K. Toi, et al, Nucl. Fusion, accepted (2026)

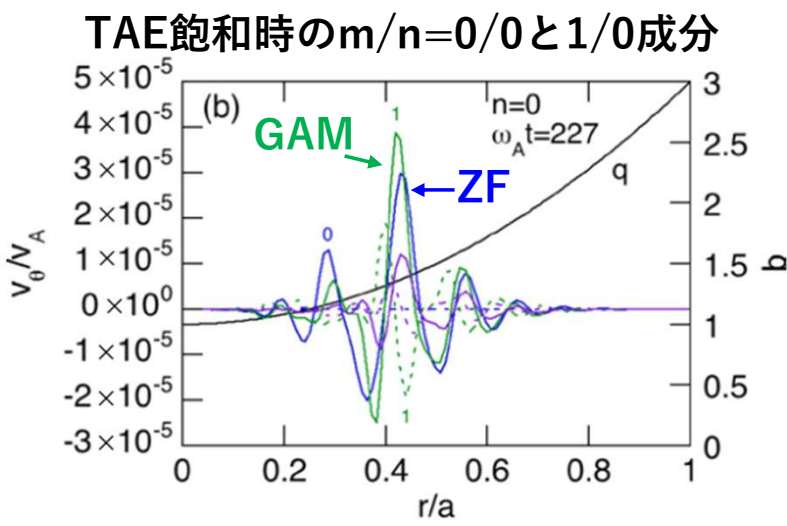
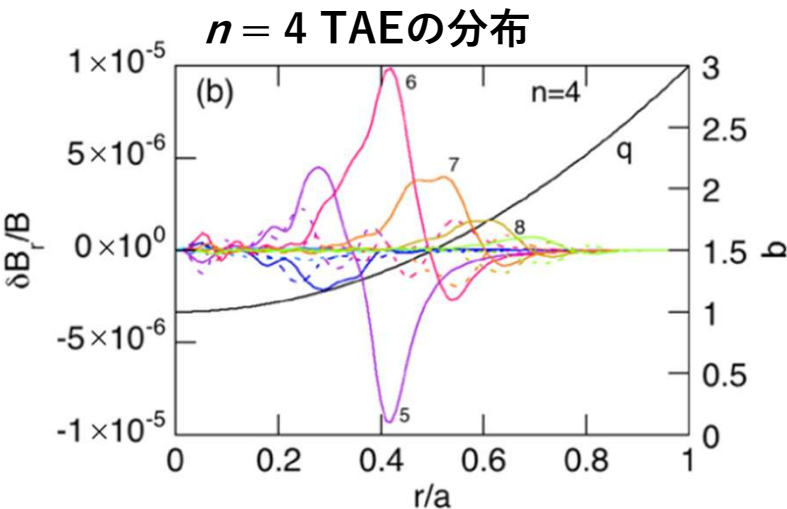


大きな振幅を持つEGAMが発生 ($\tilde{\phi}_{EG}/T_{io} \sim 0.5 - 2$)



EGAMのLandau減衰によるイオン加熱の可能性
高エネルギーイオン $\Rightarrow$ 波動 (EGAM) $\Rightarrow$ バルクイオン

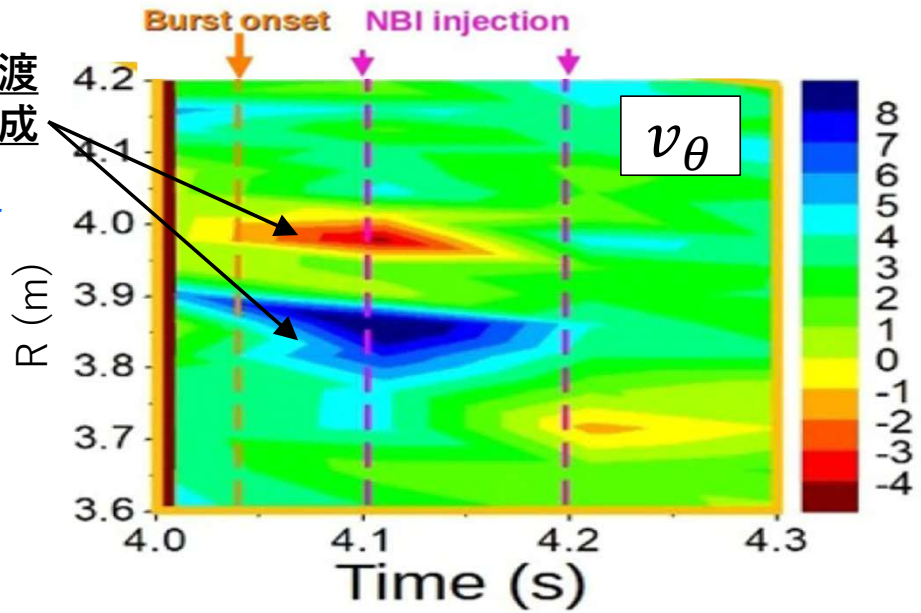
带状流・せん断流の生成



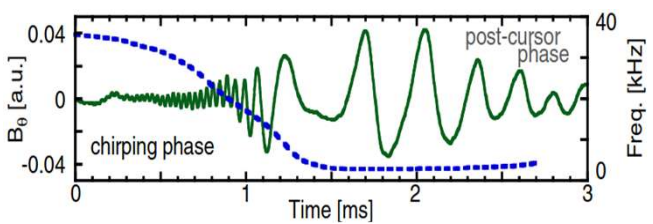
Y. Todo, et al, Nucl. Fusion 50 (2010) 084016

バースト発生時に過渡的にシアフローが形成

J. Varela et al, Nucl. Fusion 65 026002 (2025)

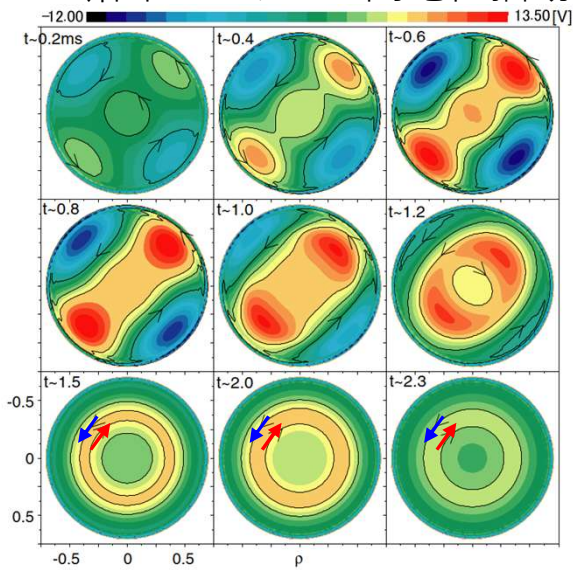


CHSの結果



S. Ohshima, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 49 (2007) 1945

ポロイダル断面における空間電位揺動の構造



高エネルギー粒子研究からの新しい展開

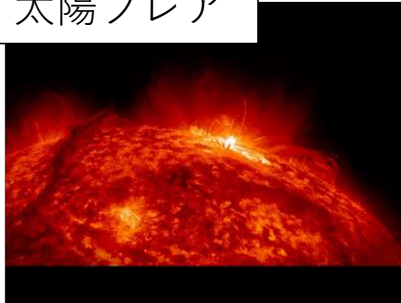
- 突発現象（亜臨界不安定性、舌状構造(tongue)によるトリガー）
- 位相空間への展開

突発現象

ディスラプション

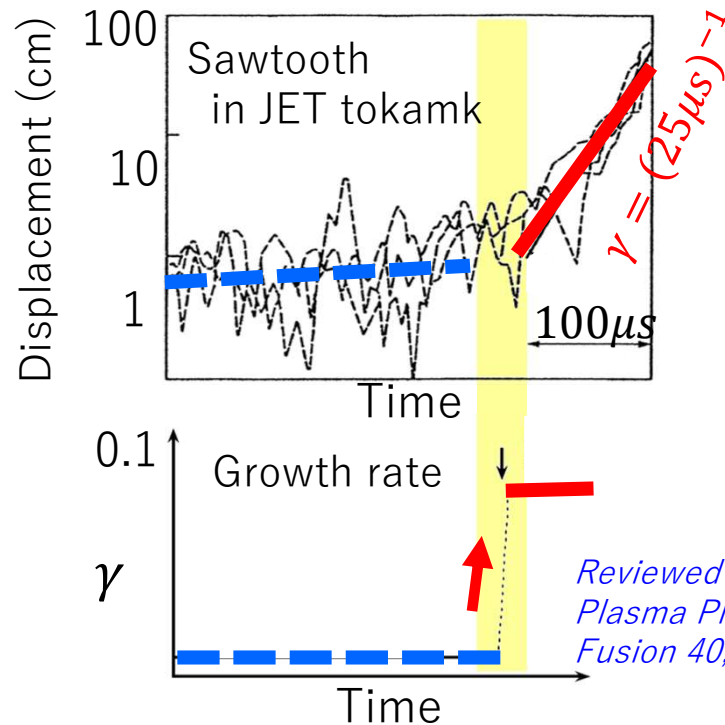


太陽フレア



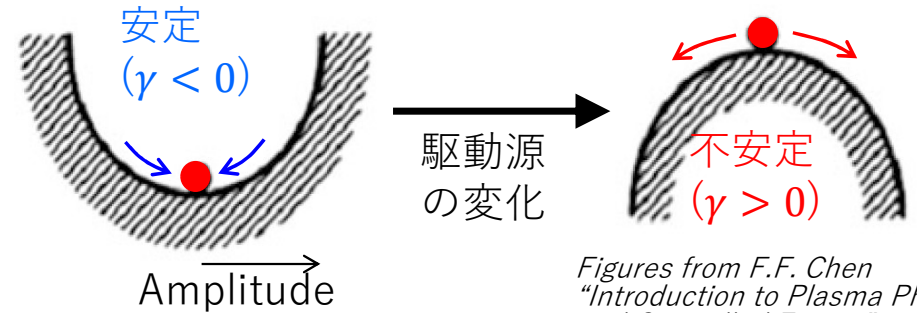
<https://www.youtube.com/watch?v=CUfR819hIDg>

http://www.nasa.gov/downloadable/videos/nasa_twisting_solar_eruption_and_flare.mp4



線形不安定性

$$\frac{du}{dt} = \gamma u \quad [u: \text{variation}]$$



Figures from F.F. Chen
"Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion"

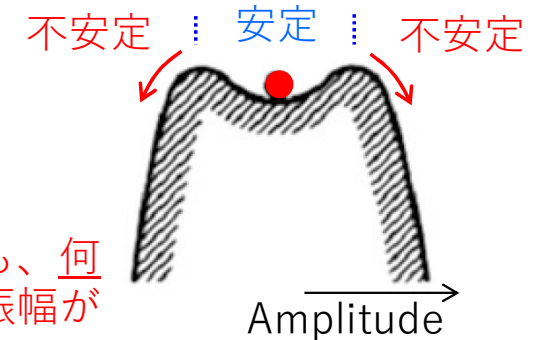
$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial \gamma}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\partial \gamma}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial t} + \dots$$

成長率の変化率は駆動源（圧力勾配や電流分布など）の変化率によって決まる。

→ 突発現象のような成長率の急変を説明することが難しい。

非線形不安定性

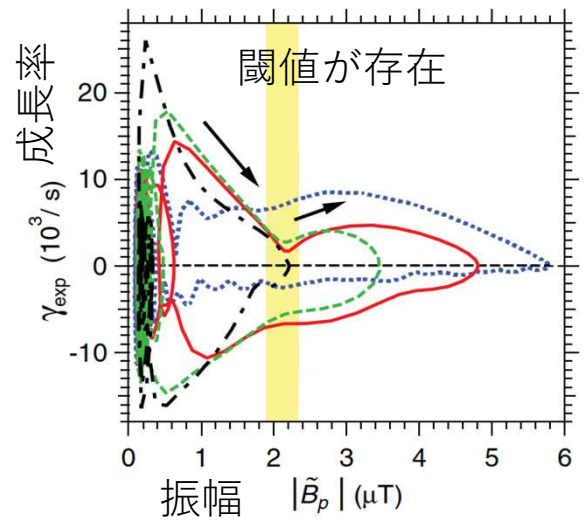
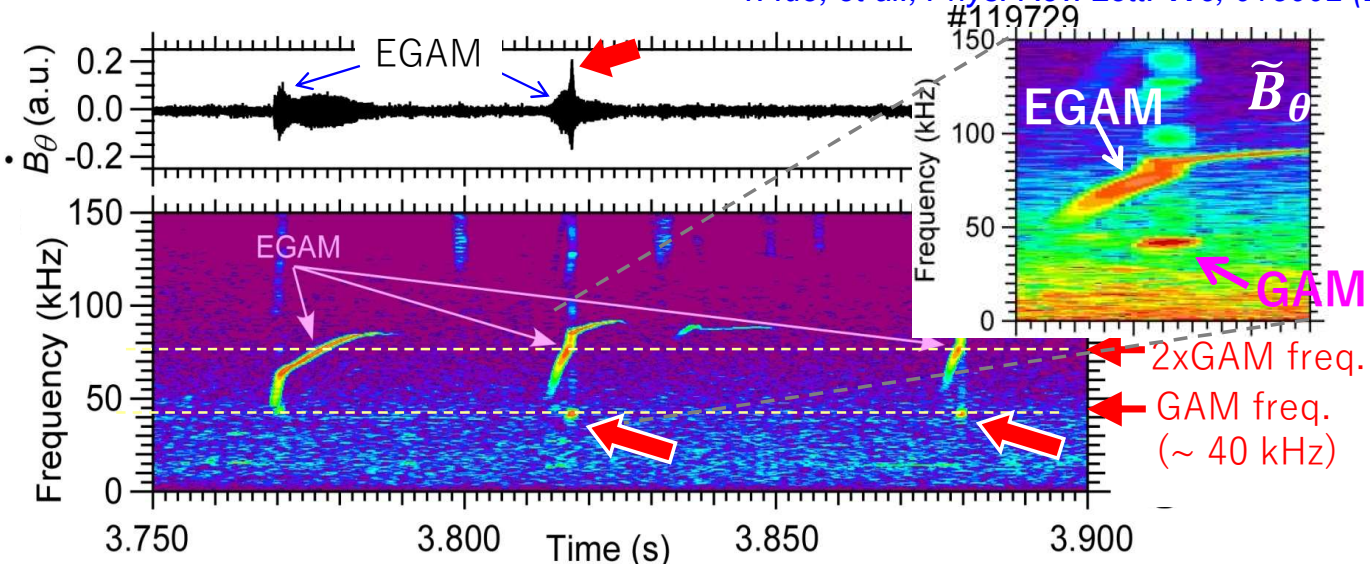
$$\frac{du}{dt} = \gamma u + l u^3 \quad (\gamma < 0, l > 0)$$



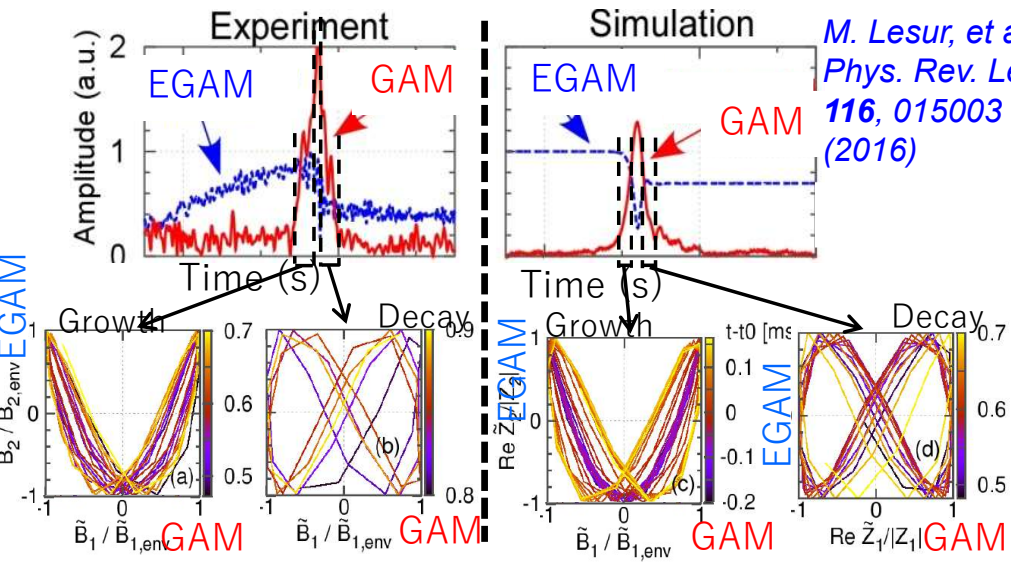
駆動源が変わらなくても、何らかのきっかけにより振幅が閾値を超えると不安定化

GAMの突発励起

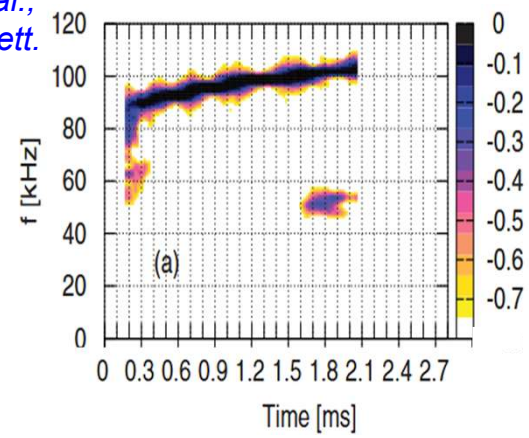
T. Ido, et al., Phys. Rev. Lett. 116, 015002 (2016)



EGAMとGAMは特定の位相関係を持っている

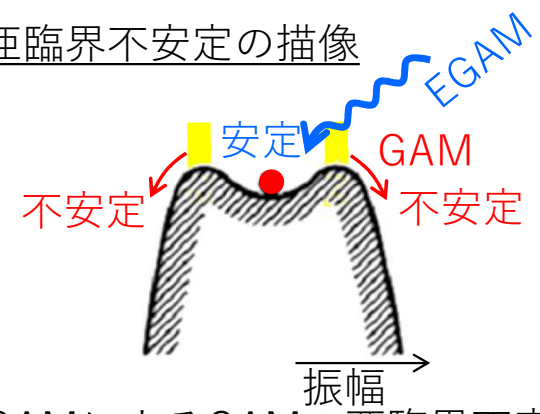


MEGAによる再現



H. Wang, et al., Phys. Rev. Lett. 120, 175001 (2018)

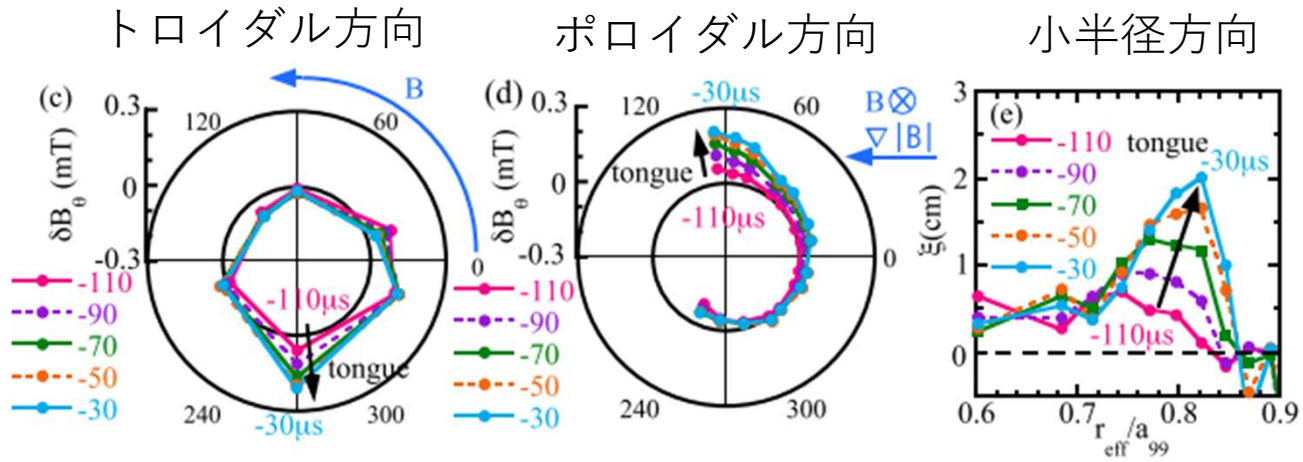
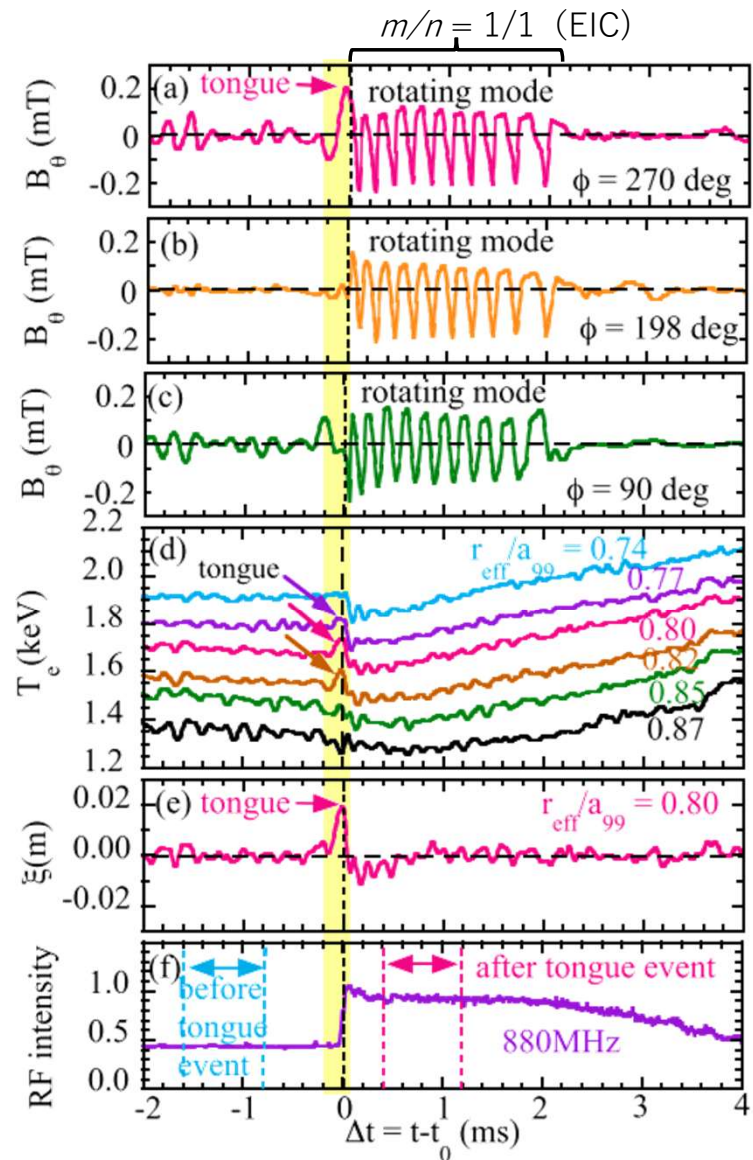
亜臨界不安定の描像



EGAMによるGAMの亜臨界不安定励起と考えられる

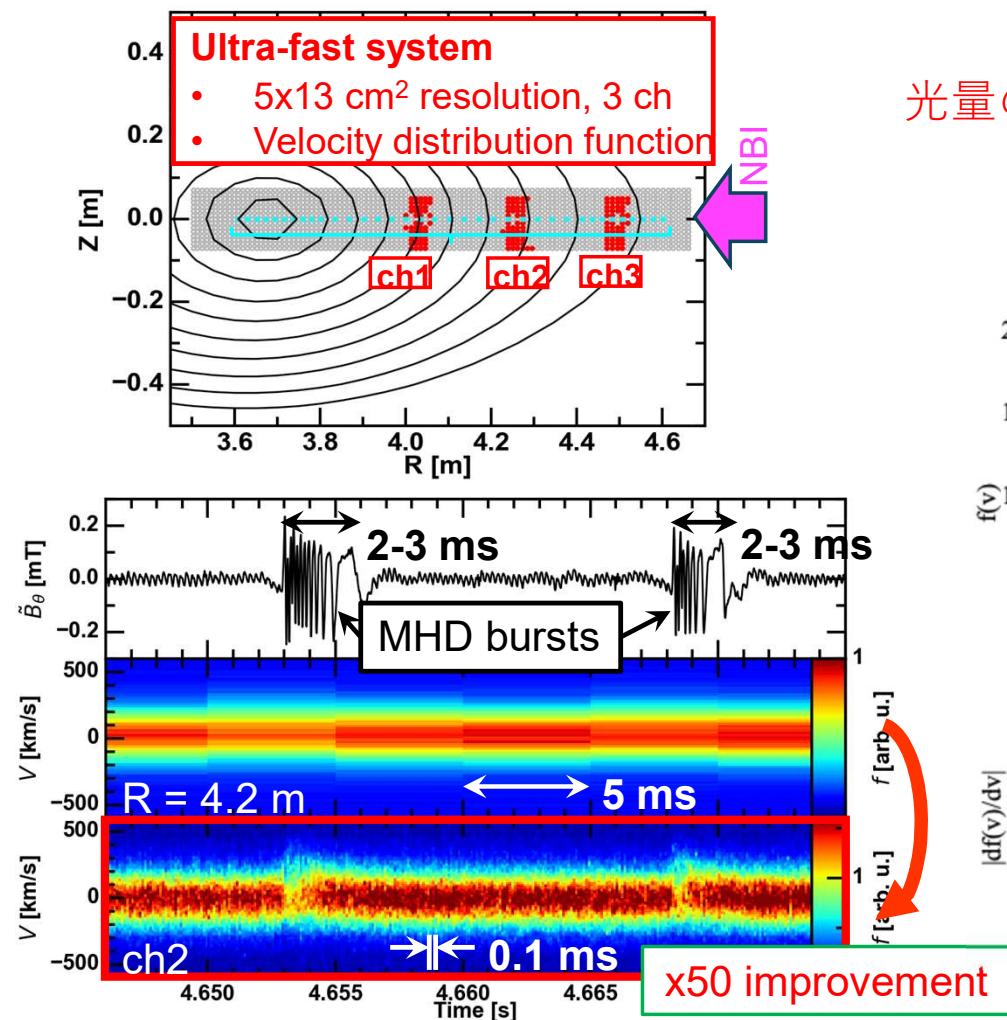
舌状構造(tongue)によるモードのトリガー

K. Ida, et al., Sci Rep 6, 36217 (2016)



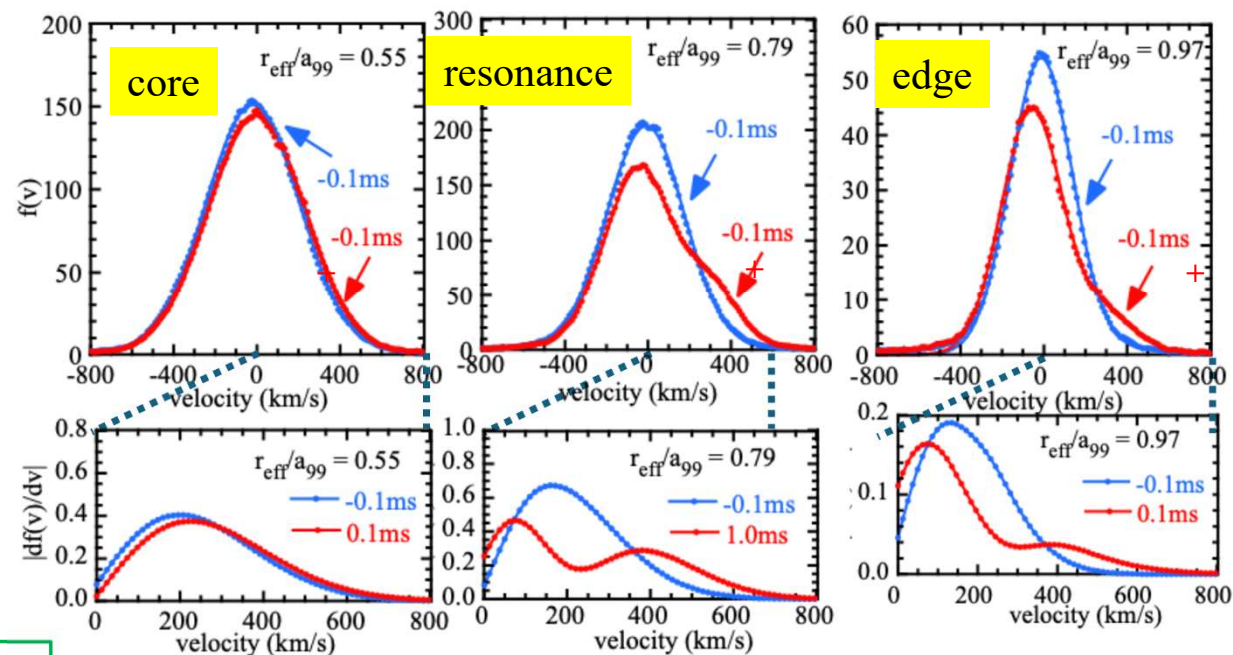
EICと考えられるn/m=1/1モードの直前に、トロイダル方向及びポロイダル方向に局在した構造(tongue)が現れる。
 ➤ tongue構造がn/m=1/1モードを高速に励起するトリガー

位相空間への展開：高速荷電交換分光法の開発による速度分布関数の計測



光量の増加により時間分解能を50倍改善 $\Rightarrow$ 10 kHz

バースト発生領域における速度分布関数の変化



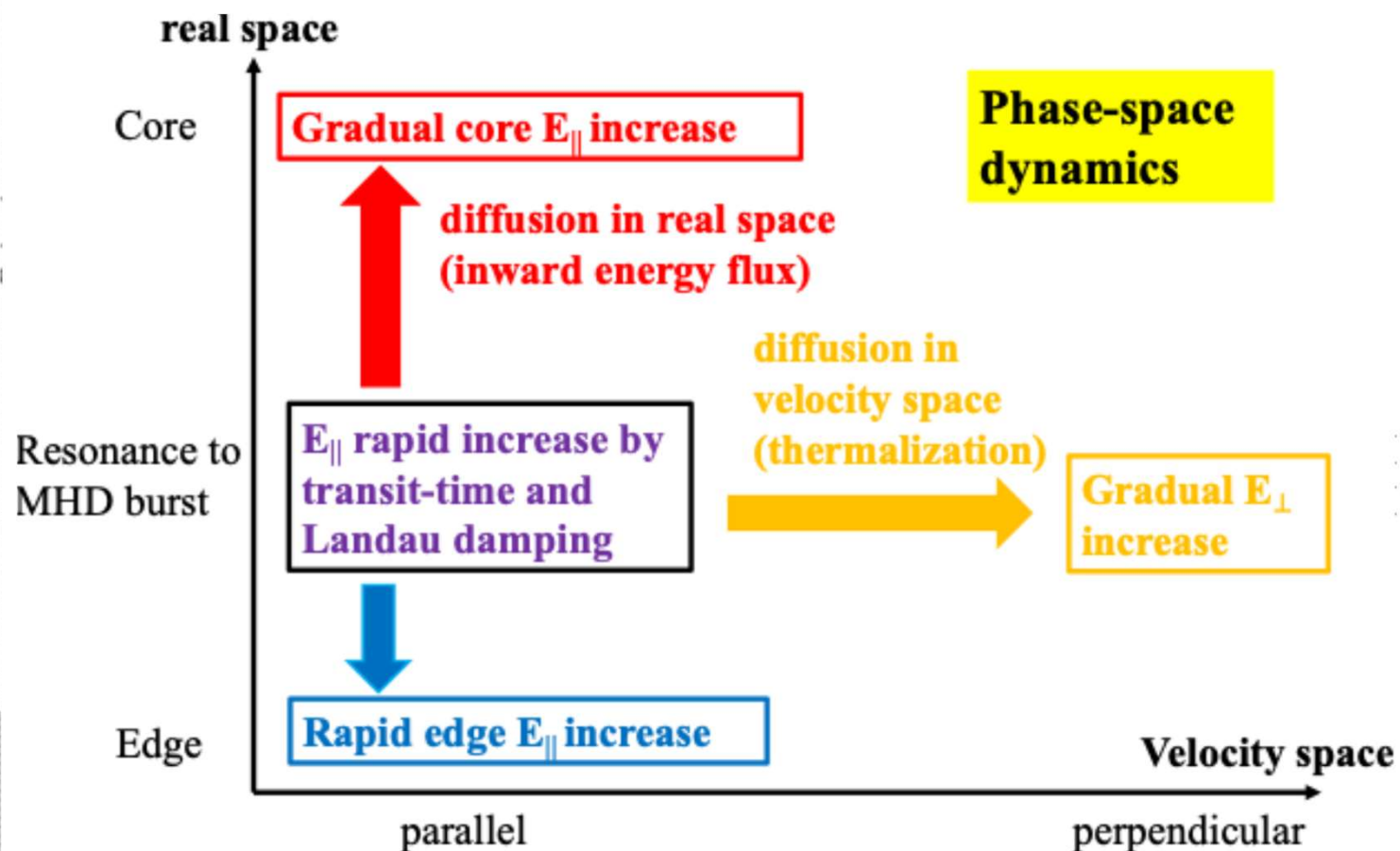
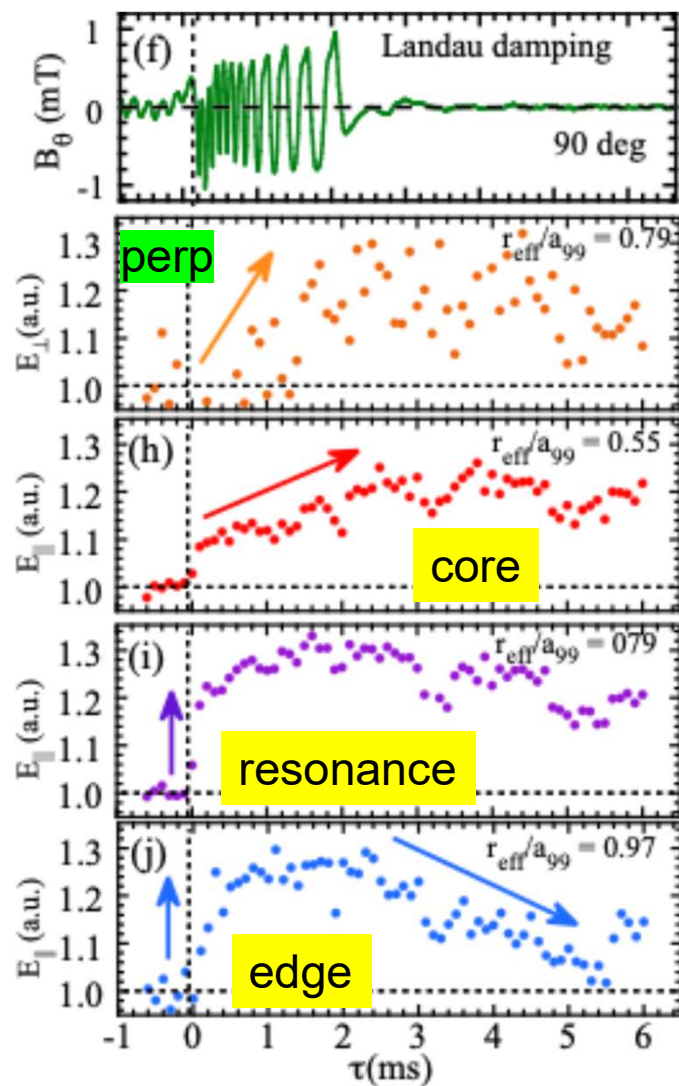
K. Ida, et al., Commun Phys 5, 228 (2022)

K. Ida, IAEA FEC (2025)

M. Yoshinuma+, Plasma Fusion Res. 19, 1402037 (2024)

T. Kobayashi+, Rev. Sci. Instrum. 96, 033502 (2025)

位相空間におけるダイナミクスの可視化



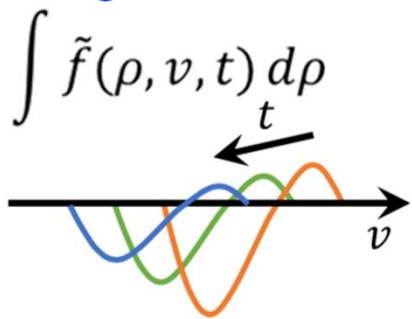
解析技術の進展：位相空間トモグラフィー

実空間の線積分値 $\Rightarrow$ 実空間の局所量



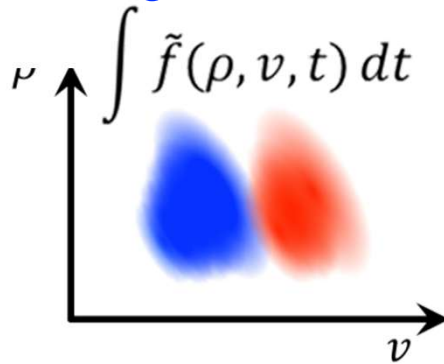
速度空間・時間に拡張 $\Rightarrow$ 位相空間の局所量の時間発展

Real-space
integration



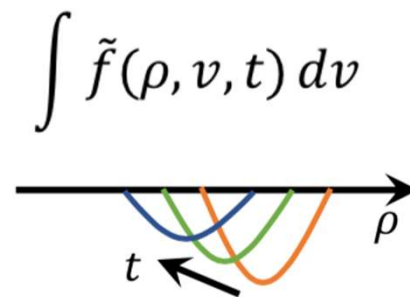
Fast CXS

Time
integration

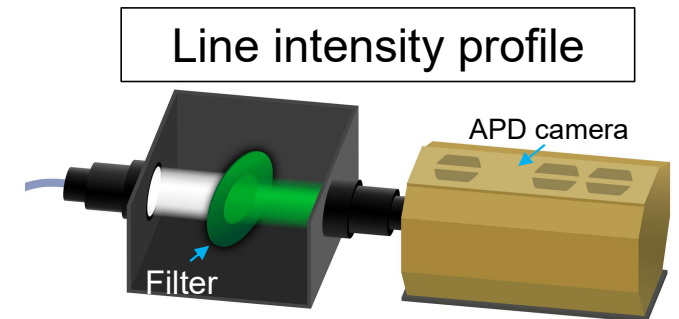
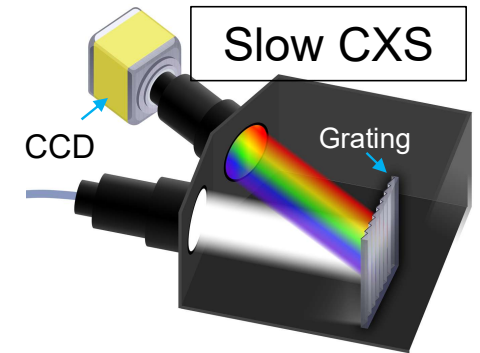
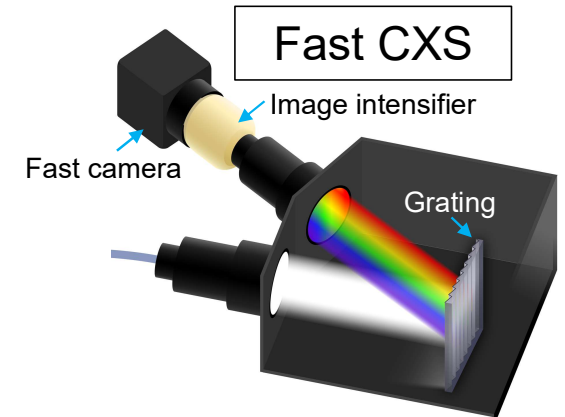


Slow CXS

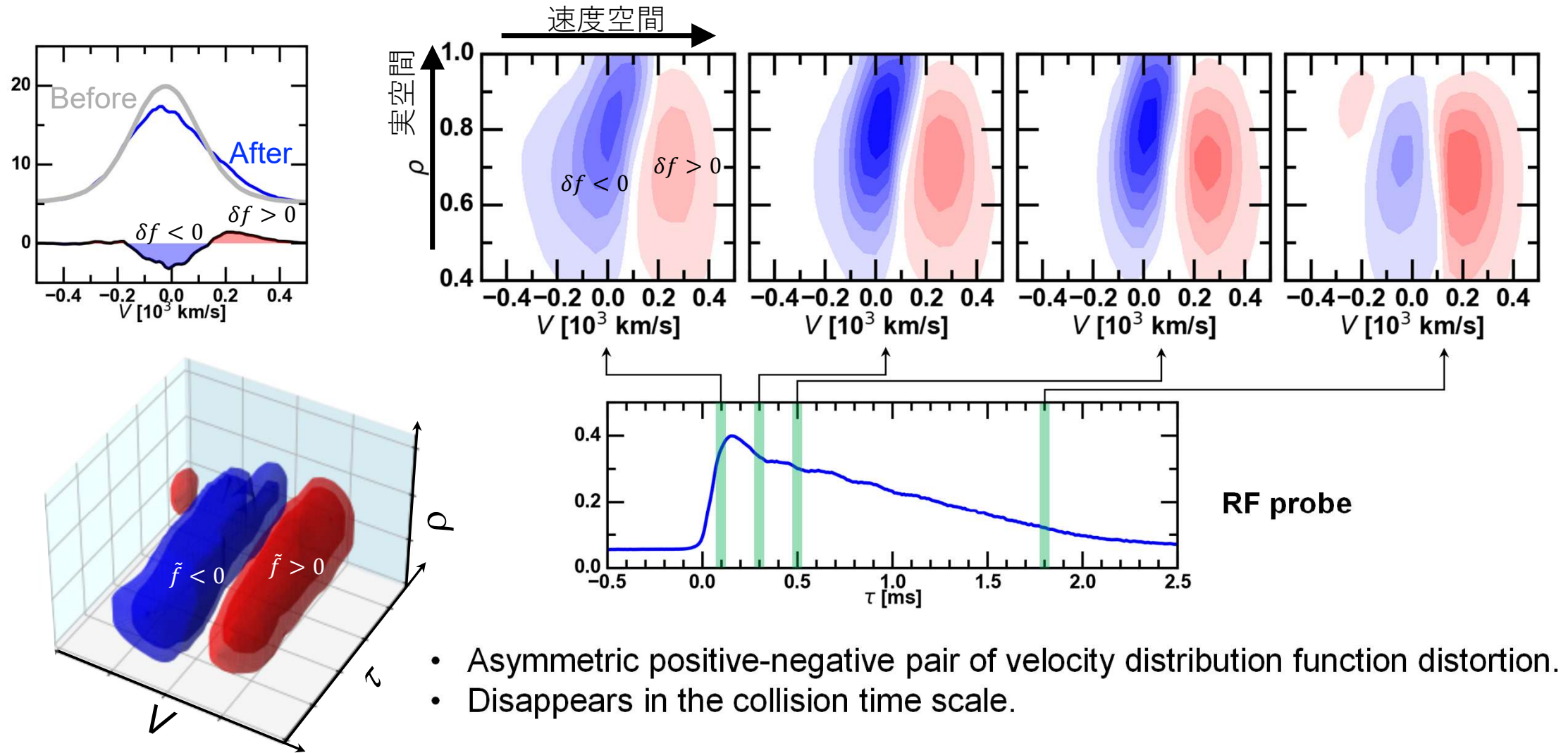
Velocity-space
integration



Line intensity
profile



位相空間トモグラフィーにより再構成された位相空間における分布関数の時間発展



まとめ

- 高速イオン分布制御・計測・解析・理論の進展と連携による高速イオン輸送研究、波動励起物理・波動一粒子相互作用研究の精密化
 - 放射線計測に基づく高エネルギー粒子の閉じ込め研究の精密化
 - イオンサイクロトロン周波数帯の不安定性の解明
- バルクプラズマへの影響に関する研究
 - イオン温度の上昇（アルファチャンネリング）
 - シアフローの形成の観測
- 突発現象の理解
 - トリガーの重要性
- 速度分布計測手法の開発による位相空間研究
 - 速度分布の可視化。不安定性に対する応答の計測