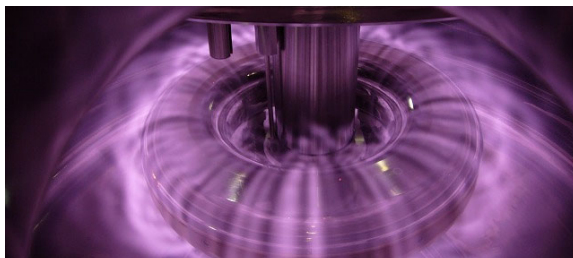


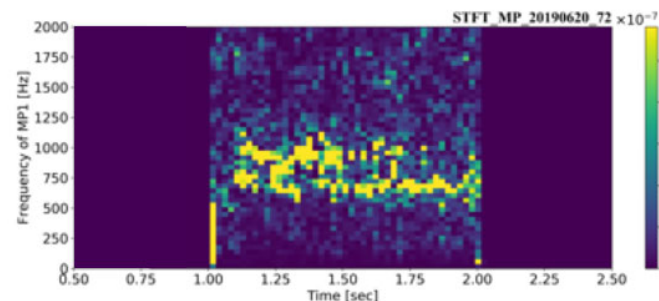
磁気圏型配位RT-1の高温電子高 β プラズマ における揺動現象

東京大学新領域創成科学研究科 (RT1実験グループ) 斎藤晴彦

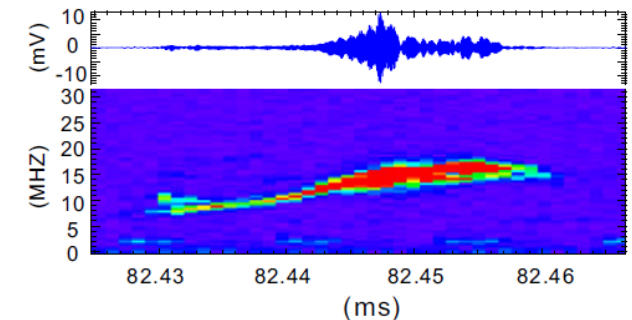
1. 温度非等方性を持つ高温電子による高 β の実現と揺動現象
2. 内向き輸送と関連する低周波揺動の観測
3. より高周波 ($\sim f_{ce}$) の揺動の観測
4. まとめと今後の課題



超伝導ダイポール磁場装置RT-1



内向き輸送を駆動する低周波揺動



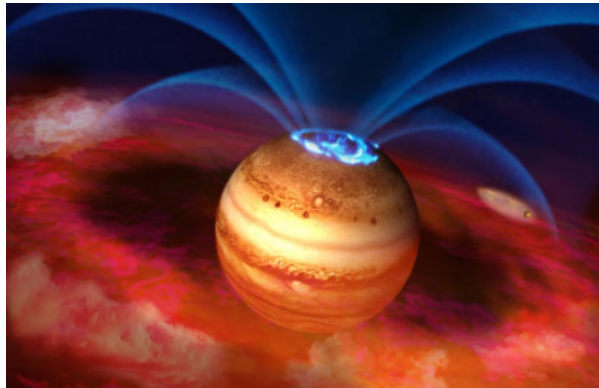
コーラス・ライジングトーンの再現

1. ダイポール磁場配位によるプラズマ実験研究の研究動機

1987 Hasegawa, Comm Plasma Phys. Contr. Fusion

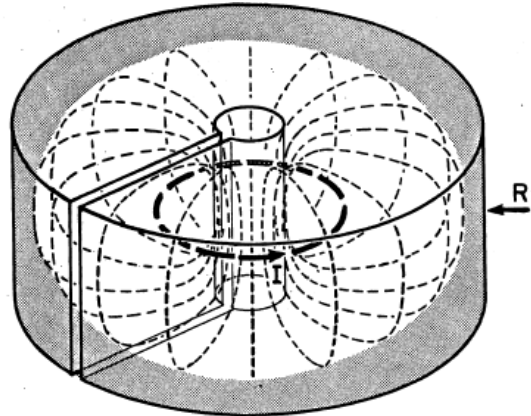
磁気浮上超伝導コイルにより, 惑星磁気圏と類似のプラズマ環境を実現

ひさき衛星(JAXA)webより



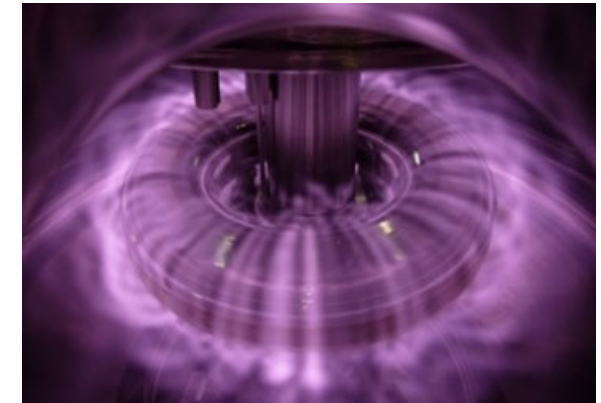
高速流を持つ高 β プラズマ

"Dipole Fusion" by Hasegawa



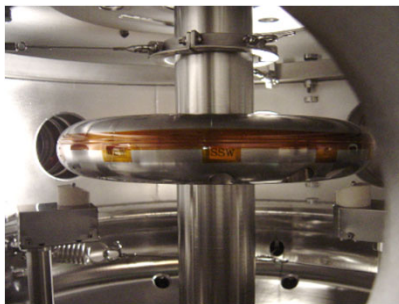
内向き拡散・加熱: D-D or D- 3 He

東大RT-1, MIT LDX



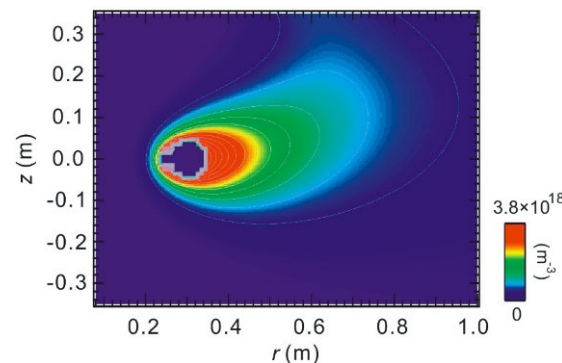
2013 Yoshida+ PPCF
2010 Boxer+ Nature Phys.

● 超伝導コイル磁気浮上



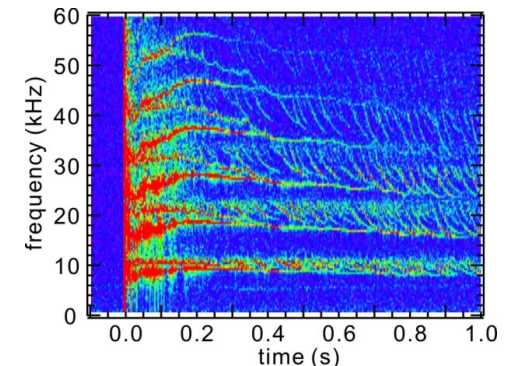
2013 Ogawa, Mito, Yanagi+ 低温工学
2006 Yoshida+ Plasma Fusion Res.

● 先進核融合/磁気圏現象



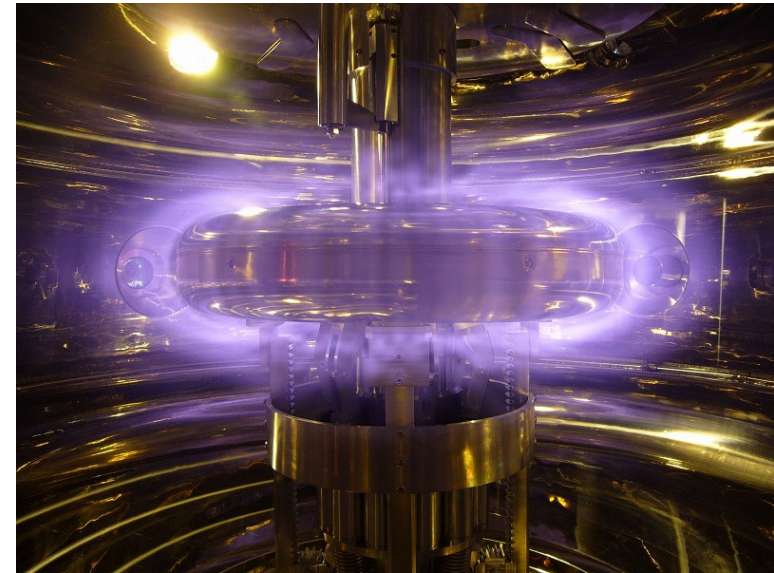
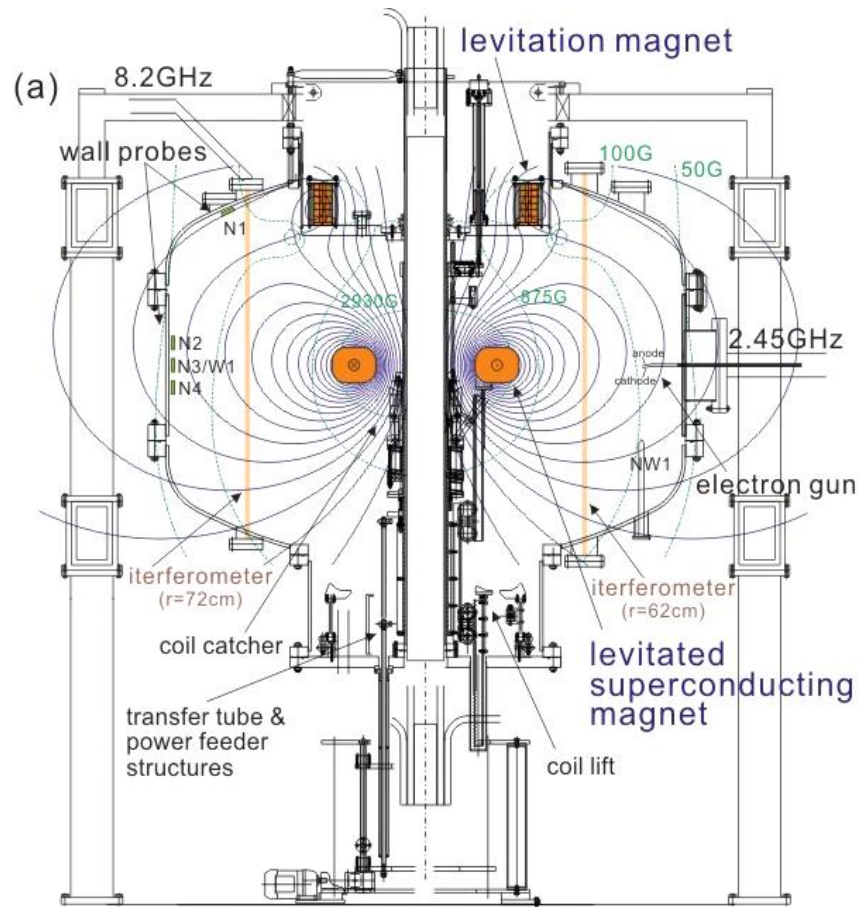
2022 Kenmochi, Nishiura+ Nucl. Fusion

● トロイダル非中性プラズマ



2010 Yoshida+ Phys. Rev. Lett.

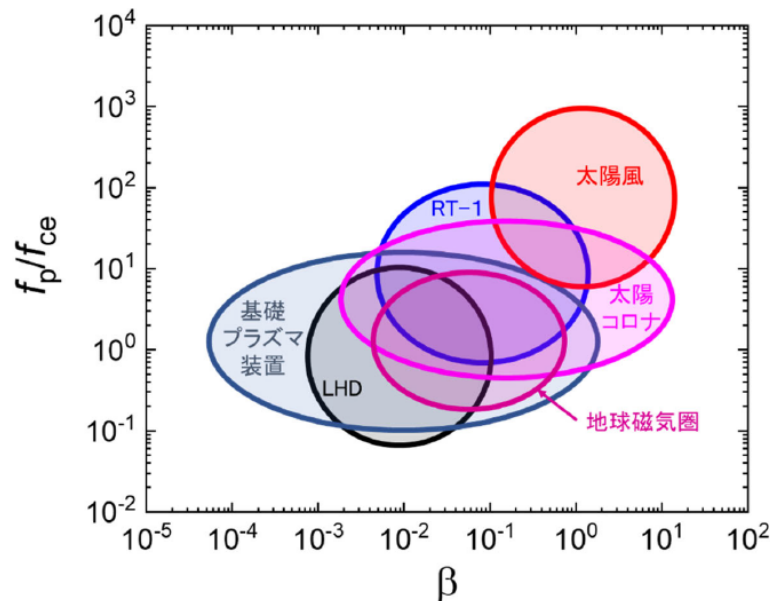
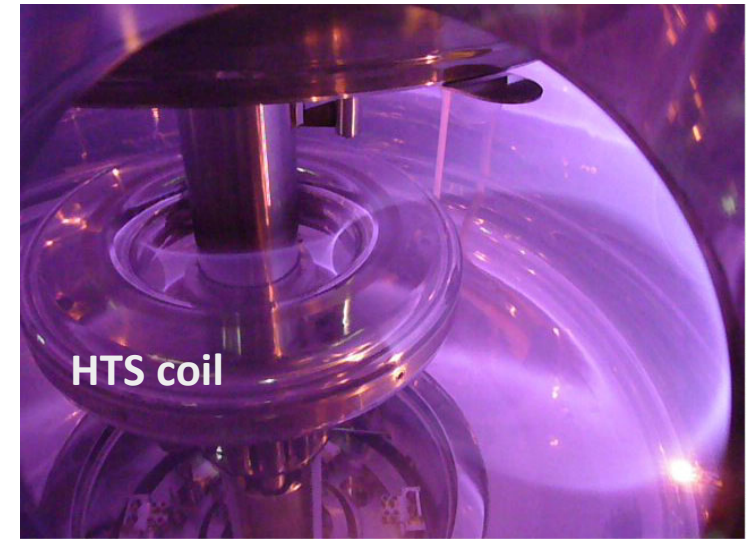
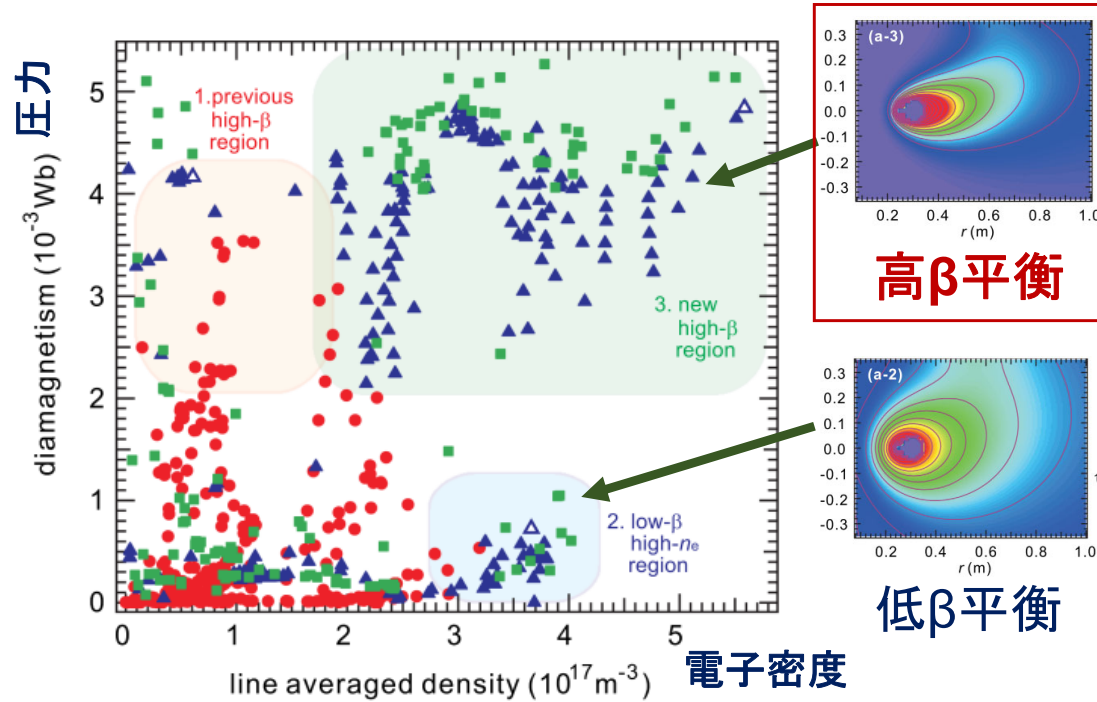
高温超伝導ダイポール磁場配位RT-1による「人工磁気圏」



- 高温超伝導 (Bi-2223) コイルをフィードバック制御により磁気浮上, 約6時間の無冷却運転
 - 2.45GHz/8.2GHzマイクロ波によるECH, ICH
 - 磁気計測, 分光, トムソン散乱, X線計測, コヒーレンスイメジング等の各種計測
-
- 主に電子が圧力を担う高 β プラズマ (局所 β 100%) が生成される (~秒)
 - 先進核融合を可能にする/磁気圏現象と共通するダイポールプラズマの閉じ込め, 波動粒子相互作用, プラズマの自己組織化が研究対象

RT-1の運転領域拡大とパラメータ領域 (宇宙プラズマとの共通性)

2015 Nishiura+ NF, 2017 Nishiura+ NF

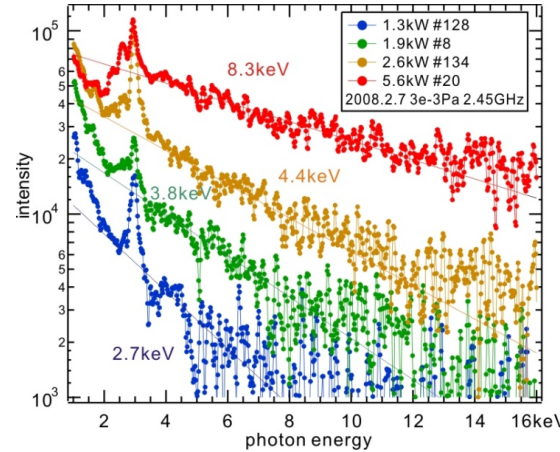
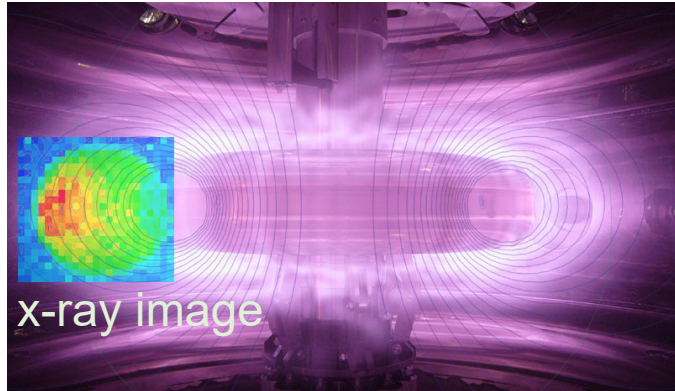


- 運転条件最適化により高 β 達成 (~秒)
- Local beta $\sim 100\%$, Ne $\sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$
- 1秒以上持続 (加熱の制限による)
- 高温電子 ($> \sim \text{keV}$) 高ベータプラズマ
- スペースのプラズマとの比較
high Ne, high B, but several similarities

高温電子が圧力を担うRT-1の高βプラズマ

2015 Kawazura+ PoP.

- 高温電子はECHと内向き輸送の効果により温度非等方性を持ちうる



X-ray emission from hot electrons of plasmas

Temperature anisotropy (perp>para) by ECH as well as by inward transport

2014 Furukawa PoP
2021 相原 修士論文

- ➔ 速度空間の分布はプラズマの波動励起を引き起こす
核融合プラズマ, スペースのプラズマに共通の波動粒子相互作用

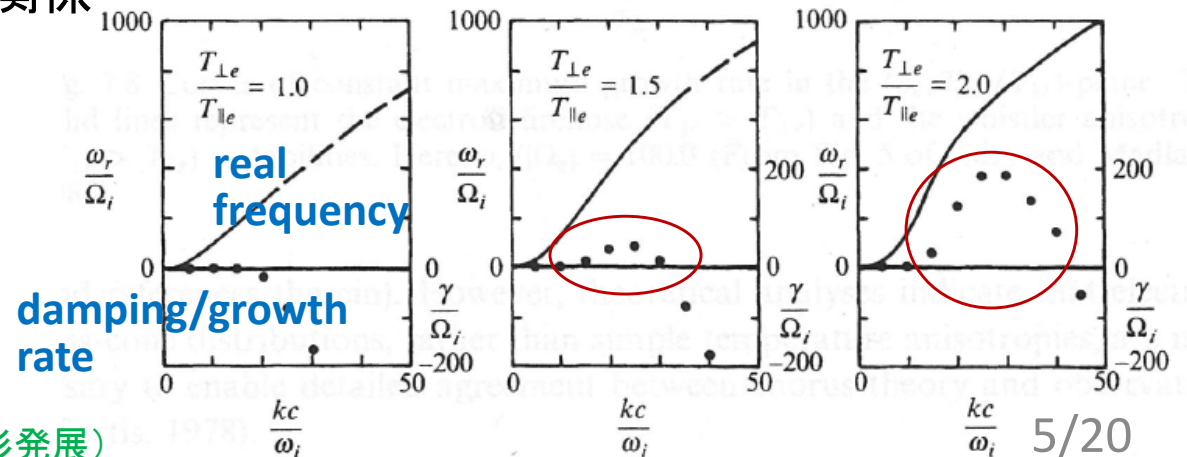
- 電子温度非等方性 ($T_{\perp e} > T_{\parallel e}$) によるホイッスラーの不安定化, 輸送
温度非等方性がある時のR波の分散関係

1966 Kennel Petschek

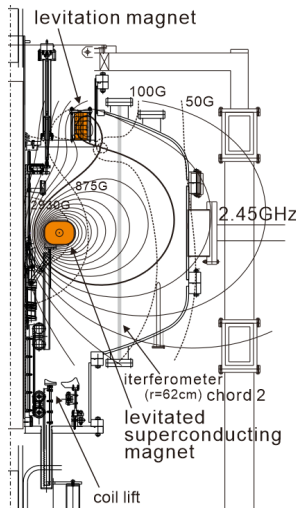
$$\omega_r \simeq k^2 c^2 \frac{\Omega_p}{\omega_p^2} \left[1 + \left(\frac{T_{\perp e}}{T_{\parallel e}} - 1 \right) \frac{\beta_e}{2} \right]$$

ホイッスラー成長の必要条件(線形)

$$\frac{T_{\perp e}}{T_{\parallel e}} - 1 > \frac{1}{|\Omega_e|/\omega_r - 1}$$



RT-1の周期運動の時間尺度と位相空間の構造形成を駆動する各種揺動現象の分類



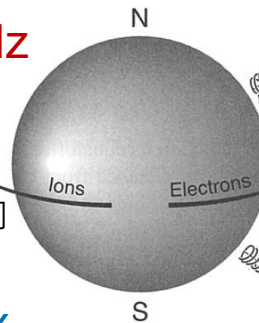
RT1:
50-3000
Gauss

$< \sim 10\text{kHz}$

$$\Phi = \int B dS \sim P_\theta$$

トロイダル方向
ドリフト運動

magnetic flux



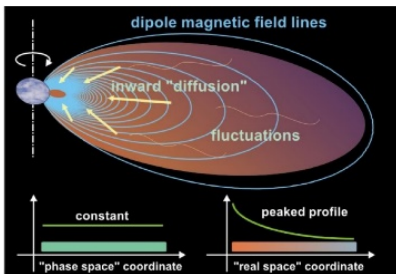
$\sim \text{MHz}$ action integral

磁力線に沿う
バウンス運動 $J = \int v_{||} ds$

100MHz ~ 1GHz

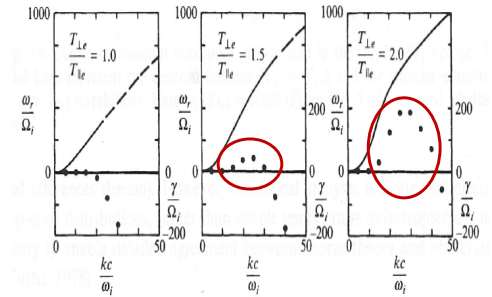
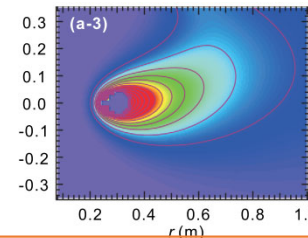
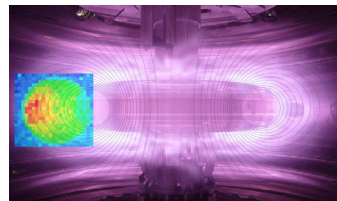
$$\mu = v_\perp^2 / B$$

magnetic moment
磁力線周囲のgyro運動



内向き輸送の
駆動・加熱

構造形成・位相空間における再構成

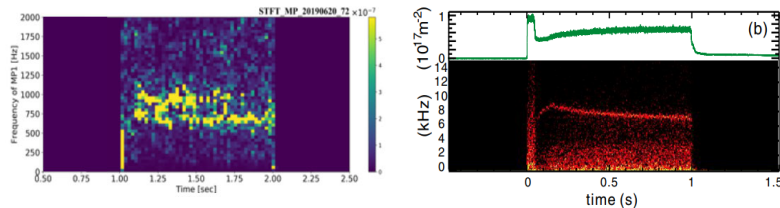


加速,
輸送

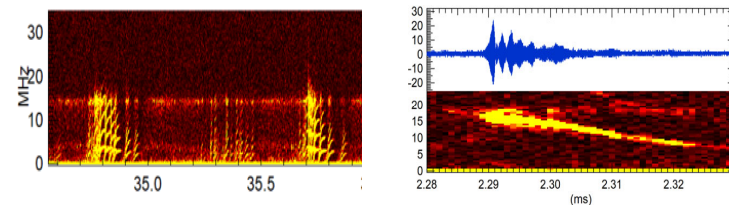
位相空間分布と
関わる揺動駆動

波動粒子
相互作用

低周波揺動 kHz ~ 10kHz

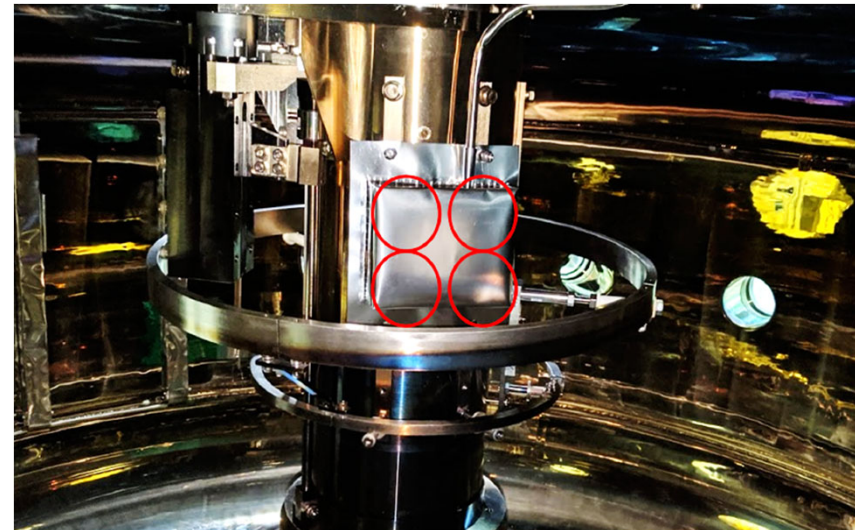
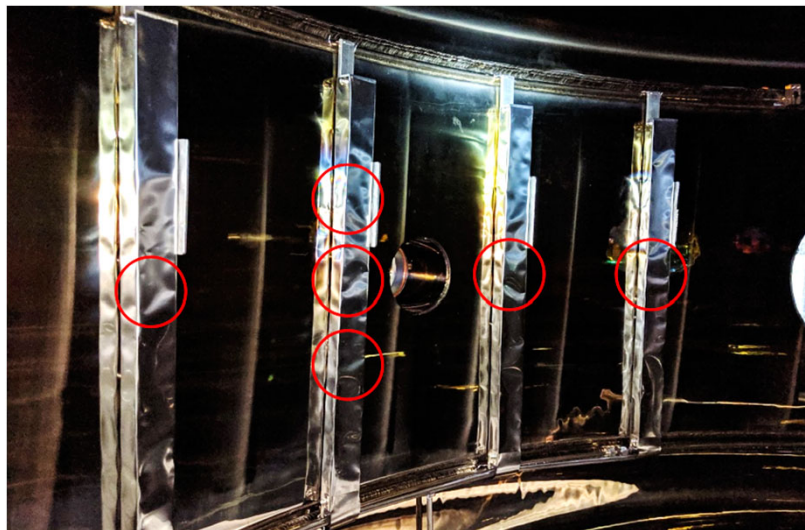
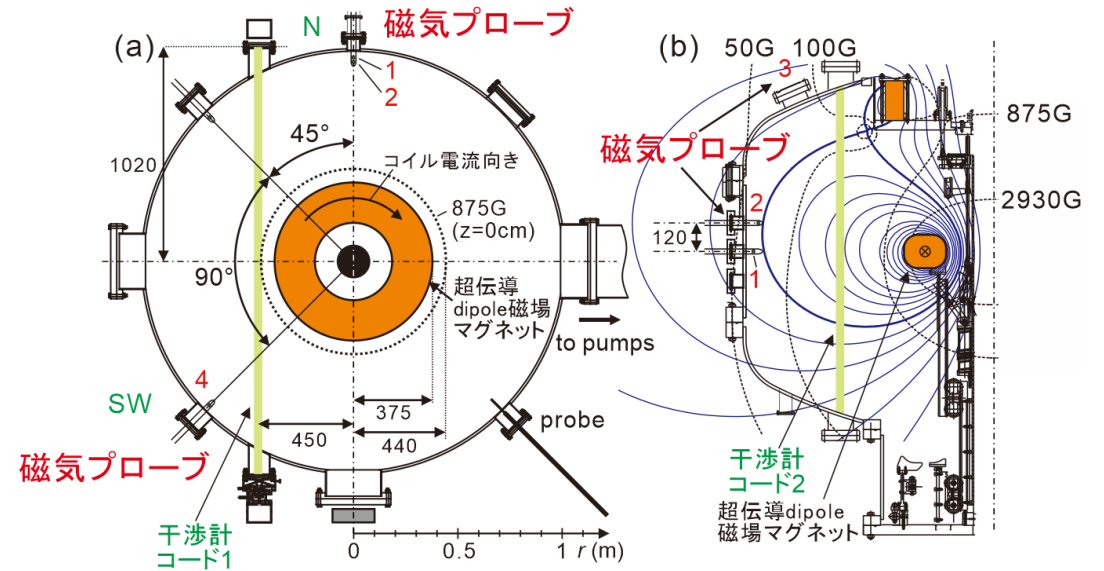
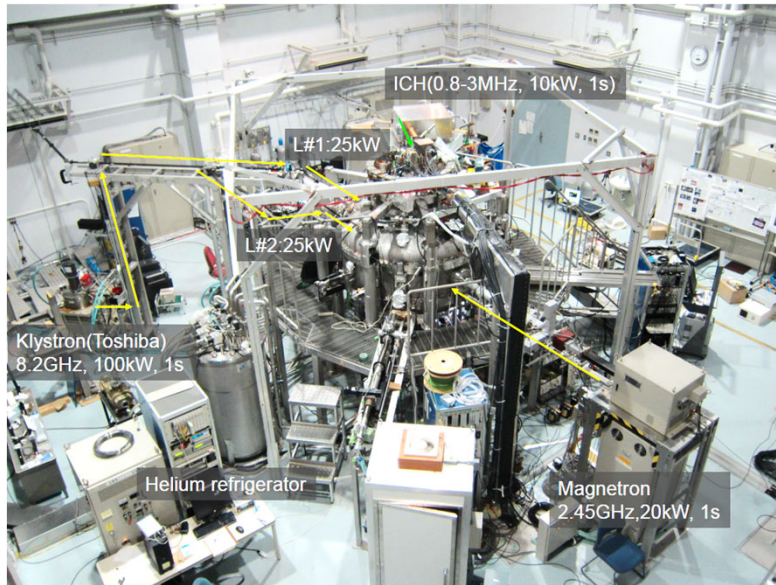


高周波揺動 MHz ~ 数100MHz



測定手段：既存の各種計測 + 磁場揺動の多点計測により揺動モード特定や伝搬方向等の特性解明が目標

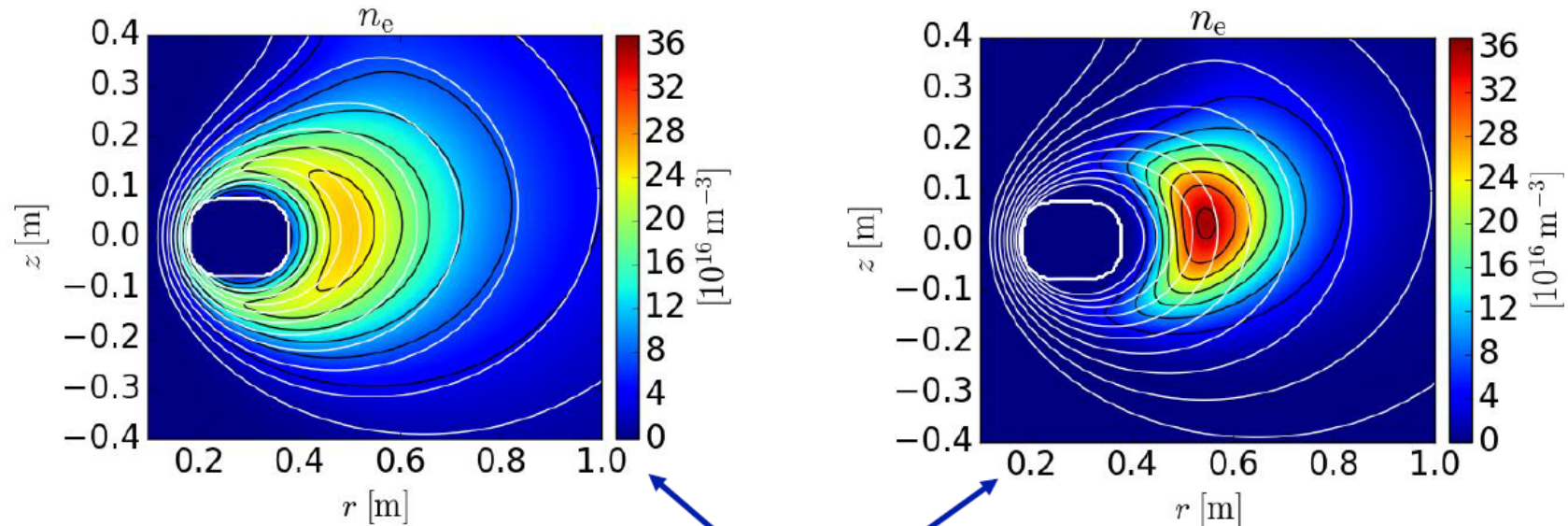
2019 Nishiura+ NF; 2022 Kenmochi+ NF
2021 横田 修士論文



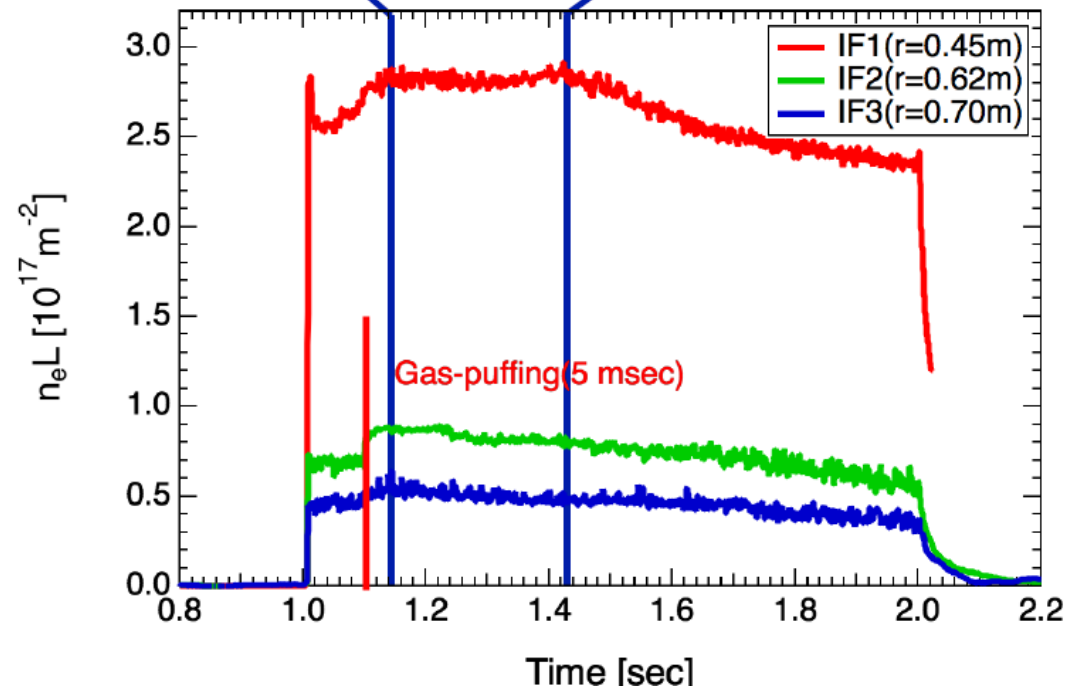
多点磁気計測の導入

2. 低周波揺動： ガスパフにより比較的平坦な密度を形成した後に揺動を伴う自己組織化によりピークした密度が形成される

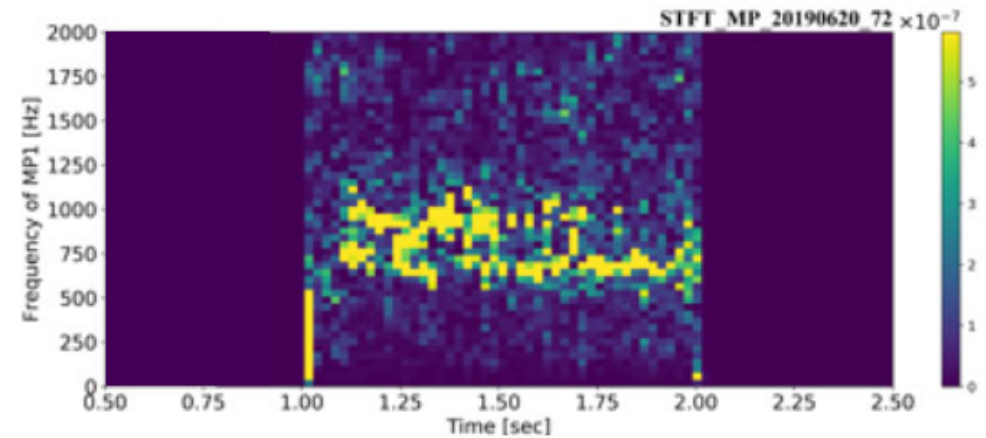
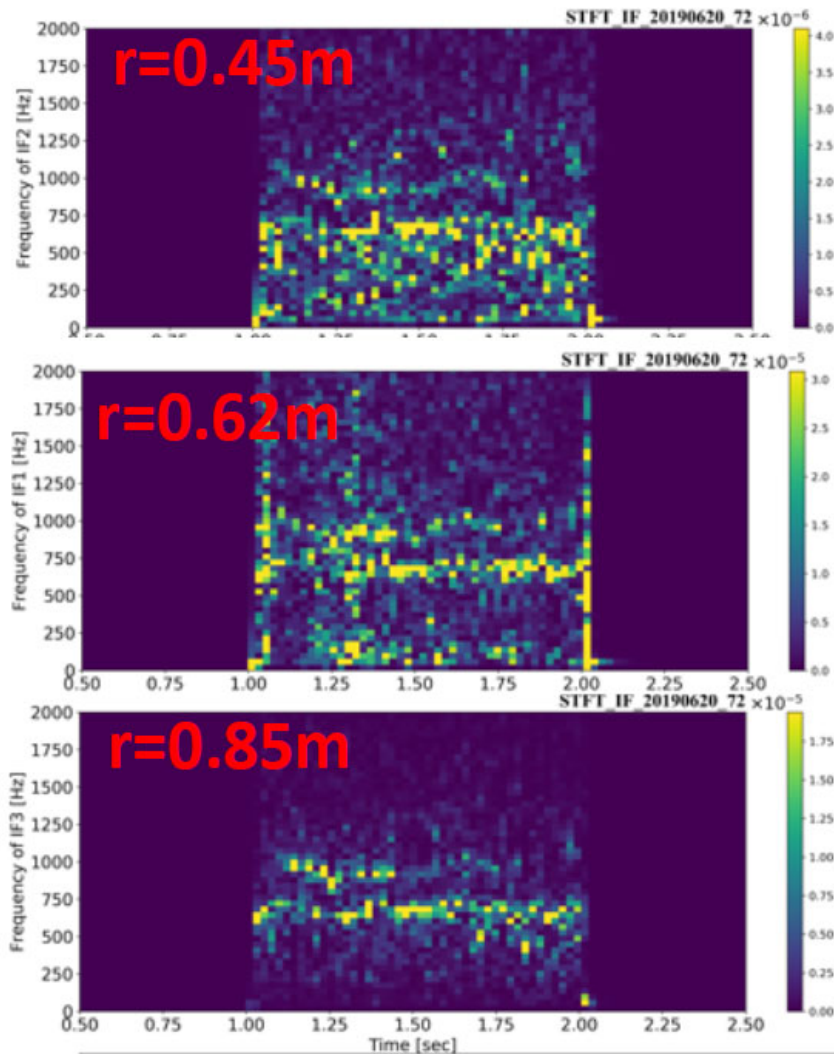
2019 Nishiura+ NF; 2022 Kenmochi+ NF



Peaking of n_e profile is observed with the lapse of time after the gas-puffing



自己組織化を駆動する低周波（～トロイダル周回周波数）揺動

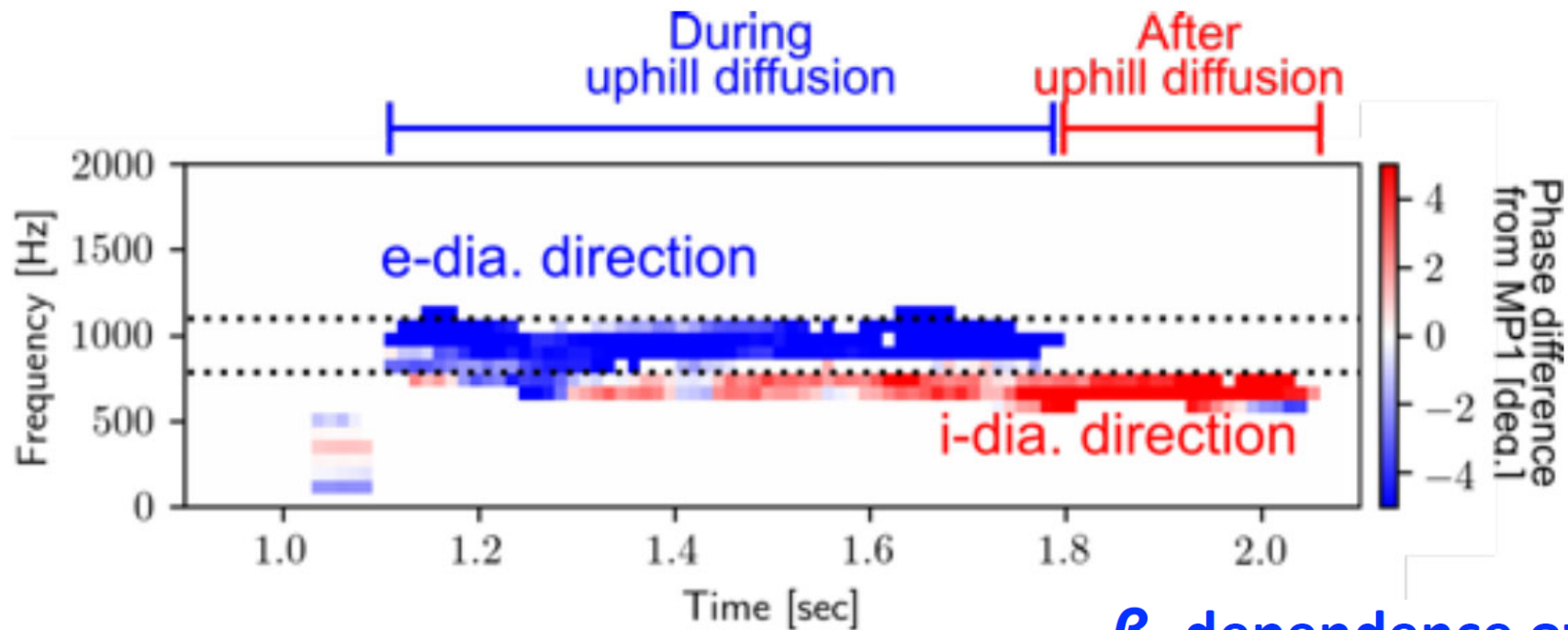


2022 N. Kenmochi+ Nucl. Fusion

- 電子密度(干渉計), 磁場(磁力線に平行方向のみ), 等に低周波(~1kHz)揺動が観測される
- コヒーレンス性の高い揺動が各種計測器に共通して見られる

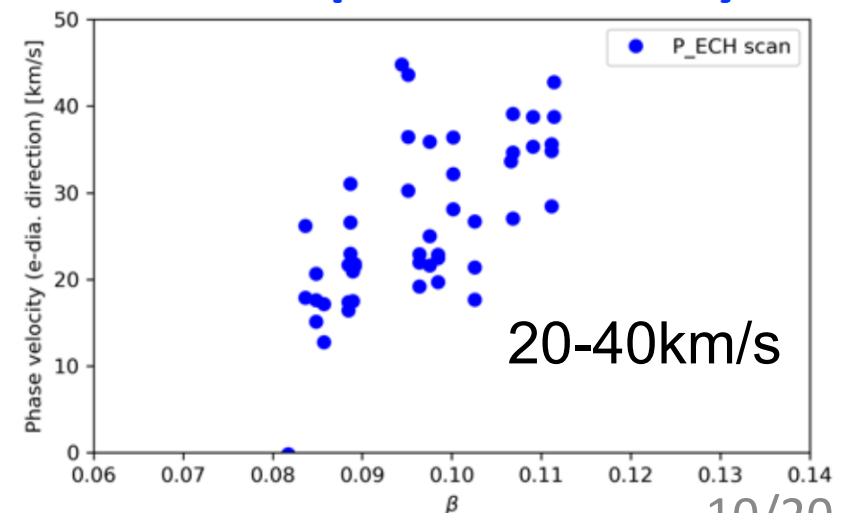
内向き輸送による自己組織化の進展中に低周波（トロイダル周回周波数程度）の磁場揺動が出現する

トロイダル方向に伝搬の位相速度が異なる波が共存しており、内向き輸送の過程で卓越するモードが観測される



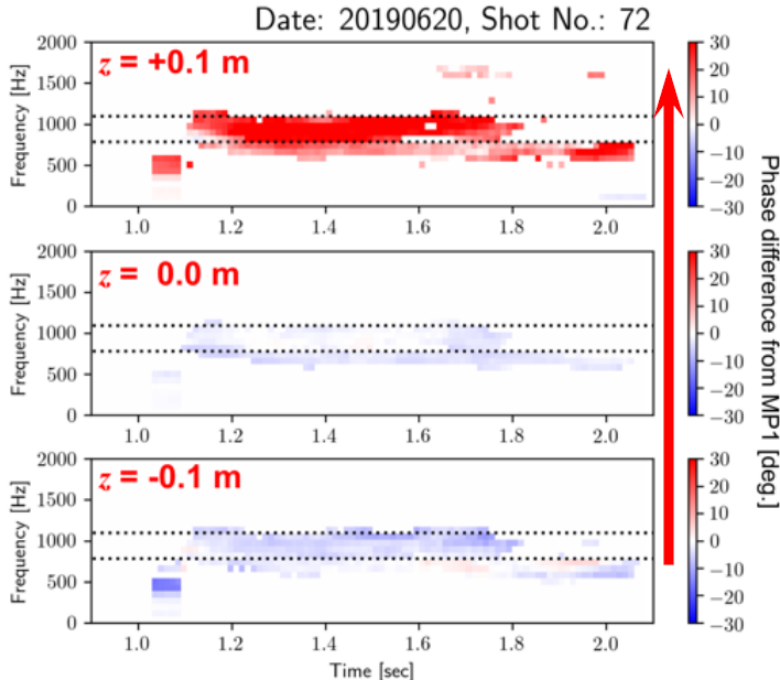
- 内向き拡散中には、 $\sim 1\text{kHz}$ の揺動が電子の反磁性方向に伝搬する
- 内向き拡散の完了後、 $\sim 0.7\text{kHz}$ のイオン反磁性方向に伝搬する揺動が卓越する

β_e dependence of toroidal phase velocity

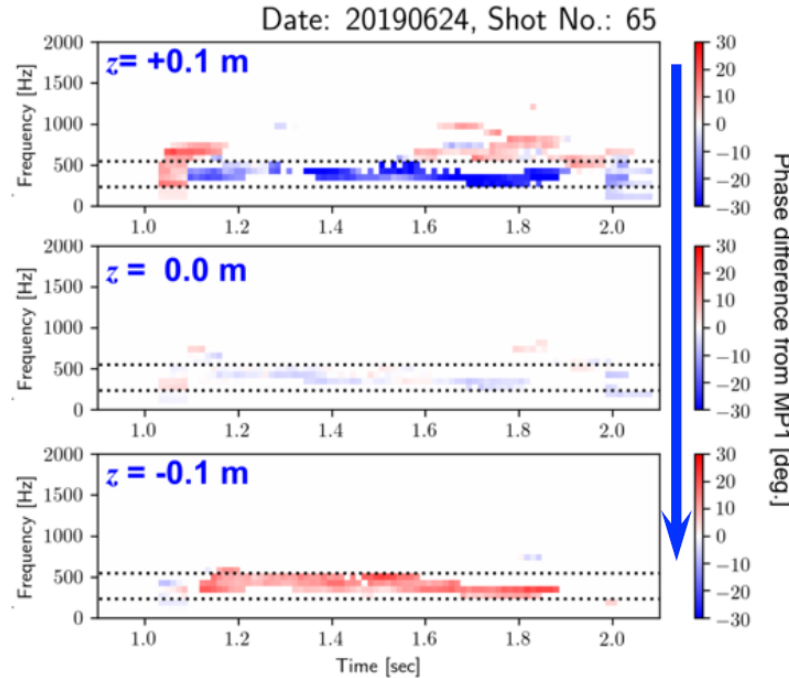


揺動はZ方向に（磁力線に沿って）も伝搬しており，損失源に向かう方向に伝搬している

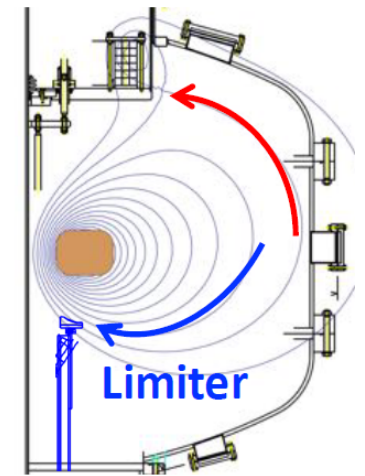
w/o limiter



w/ limiter



mass flow
w/ and w/o limiter

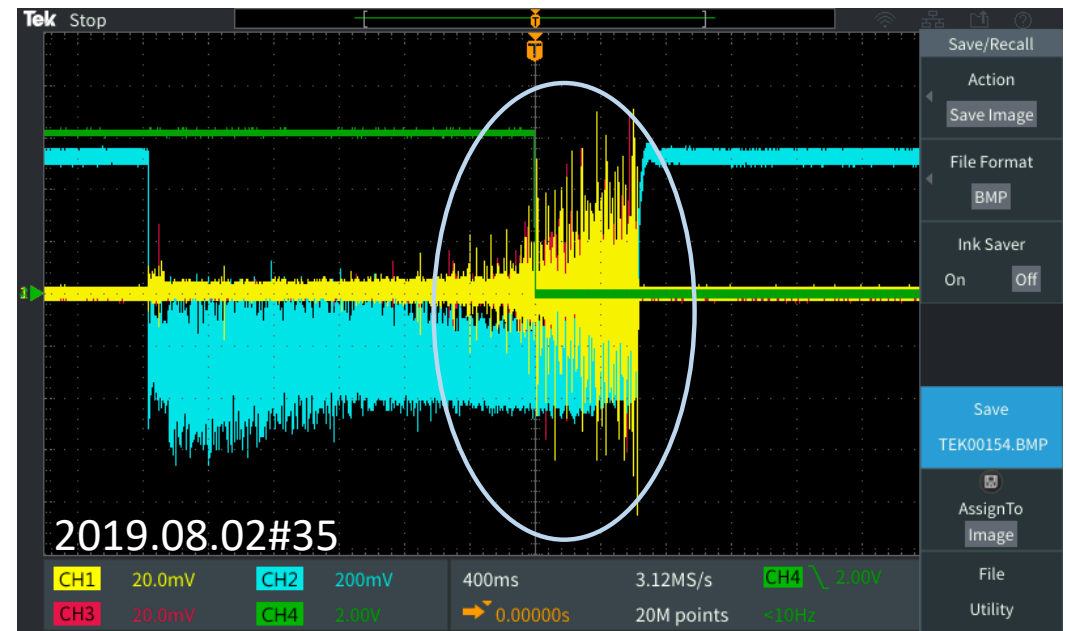
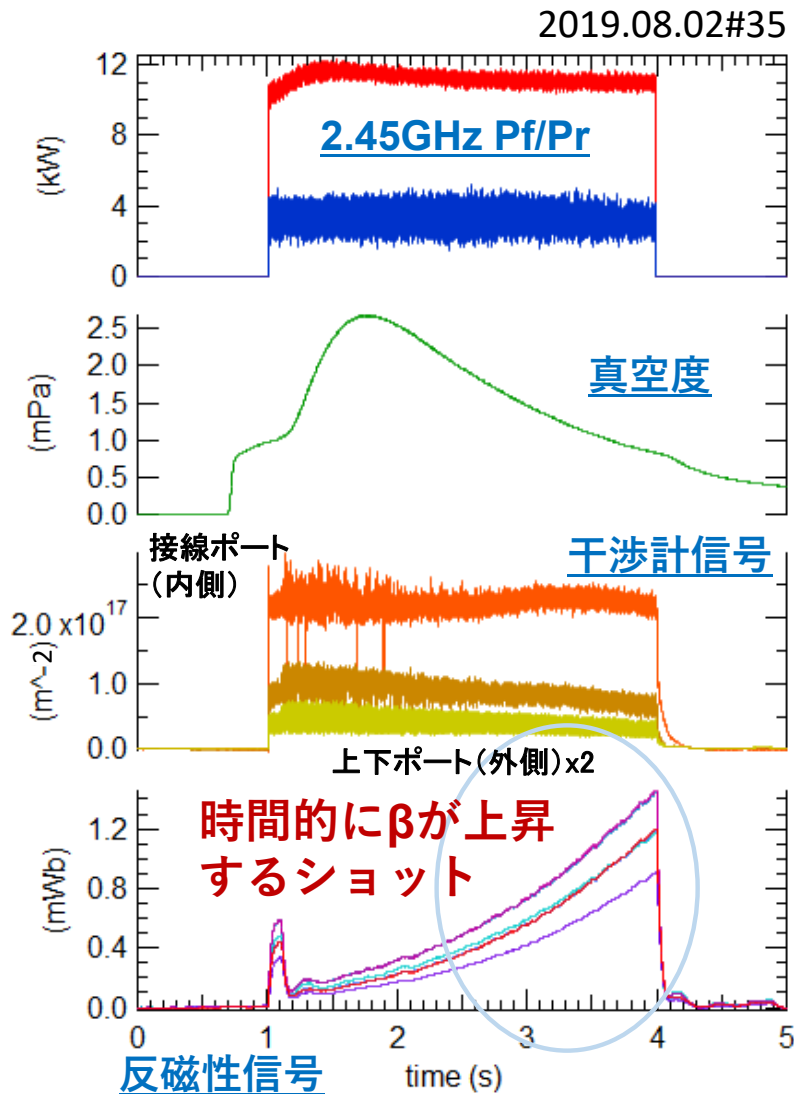


1.5-2.5 km/s

- 低周波波動は，セパトリクス（リミタ無し時）及びリミタ（導入時）へと向かっており，位相速度はトロイダル方向の10%程度
- 密度揺らぎのドリフトによる輸送（「エントロピーモード」）が高ベータで磁場変動を示す揺動か： 空間構造の詳細理解等が今後の課題

3. 高周波揺動: 電子サイクロトロン周波数帯域の揺動の間欠的励起

ECHにより高温電子成分が顕著になりプラズマ圧力（反磁性信号）が増大すると、 \sim MHz帯域の磁場揺動が観測される



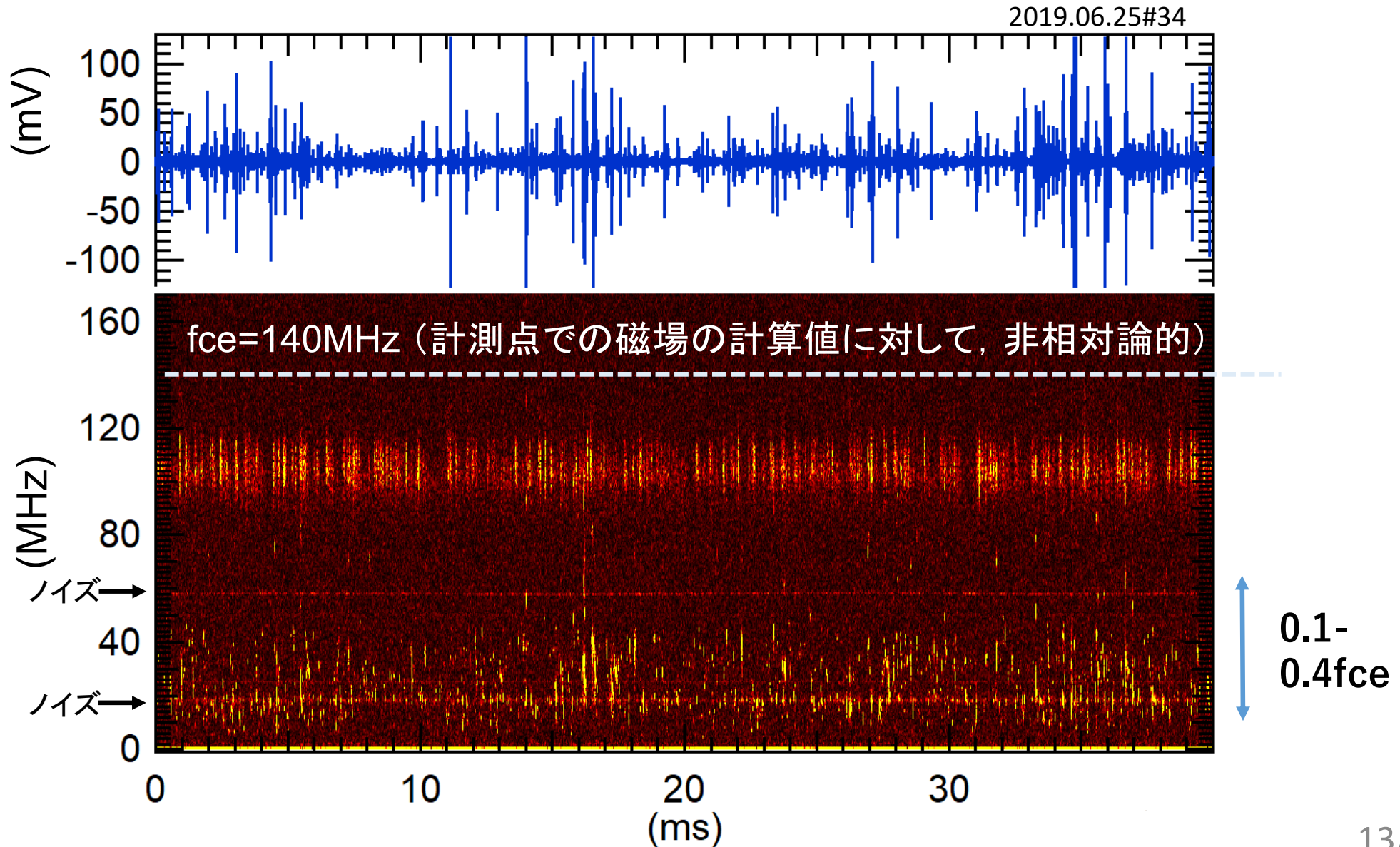
ch1: 磁気プローブ1, ch2: 干渉計, ch3: 磁気プローブ2

- 3秒間のマイクロ波入射で、時間的に中性粒子密度が低下しプラズマ圧力が立ち上がるショット
- プラズマ圧力は、温度非等方性を持つ高温電子によって支えられている

揺動の出現頻度が高い周波数帯域と、各帯域の揺動の特徴

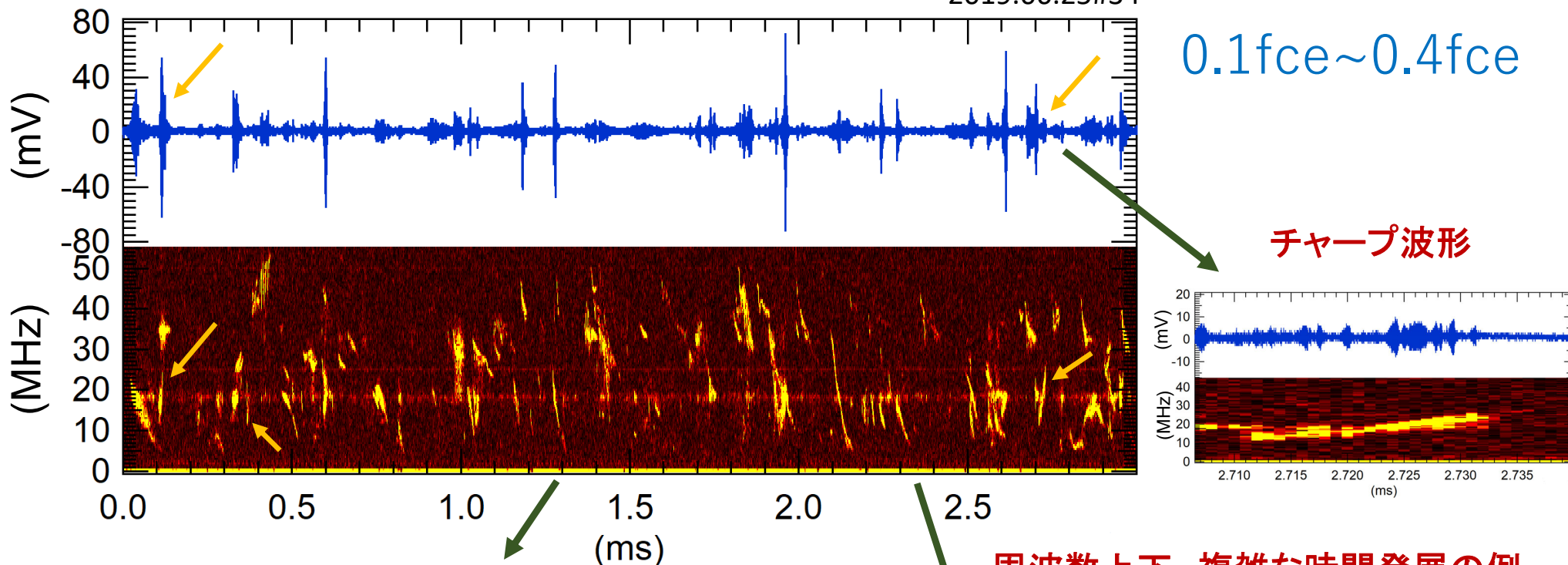
Frequency range and characteristics of several fluctuation modes

0.1-0.4f_{ce}付近が最も活動的で、10 μ s程度持続する揺動が間欠的発生。
0.5-0.7f_{ce}にも、頻度は低いダウンチャープする信号。更に~f_{ce}.

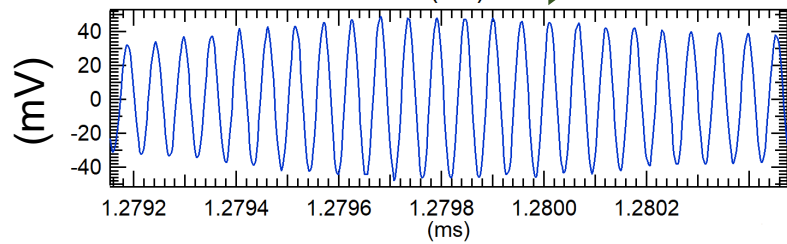
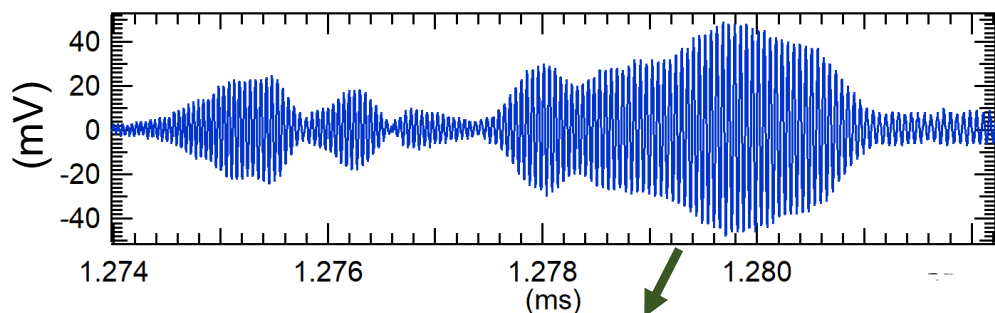


コヒーレントな揺動であり，フォーリング/ライジングトーンを示す

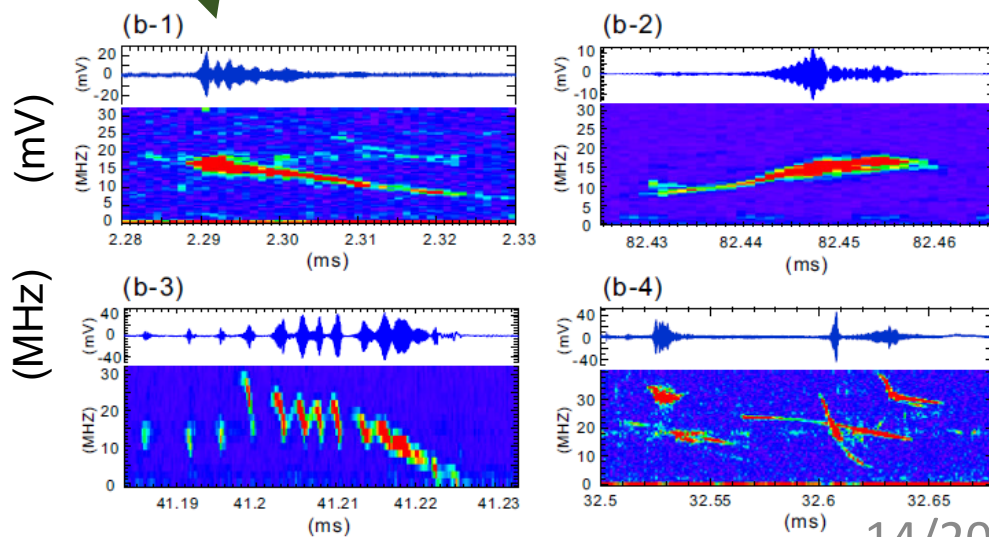
2019.06.25#34



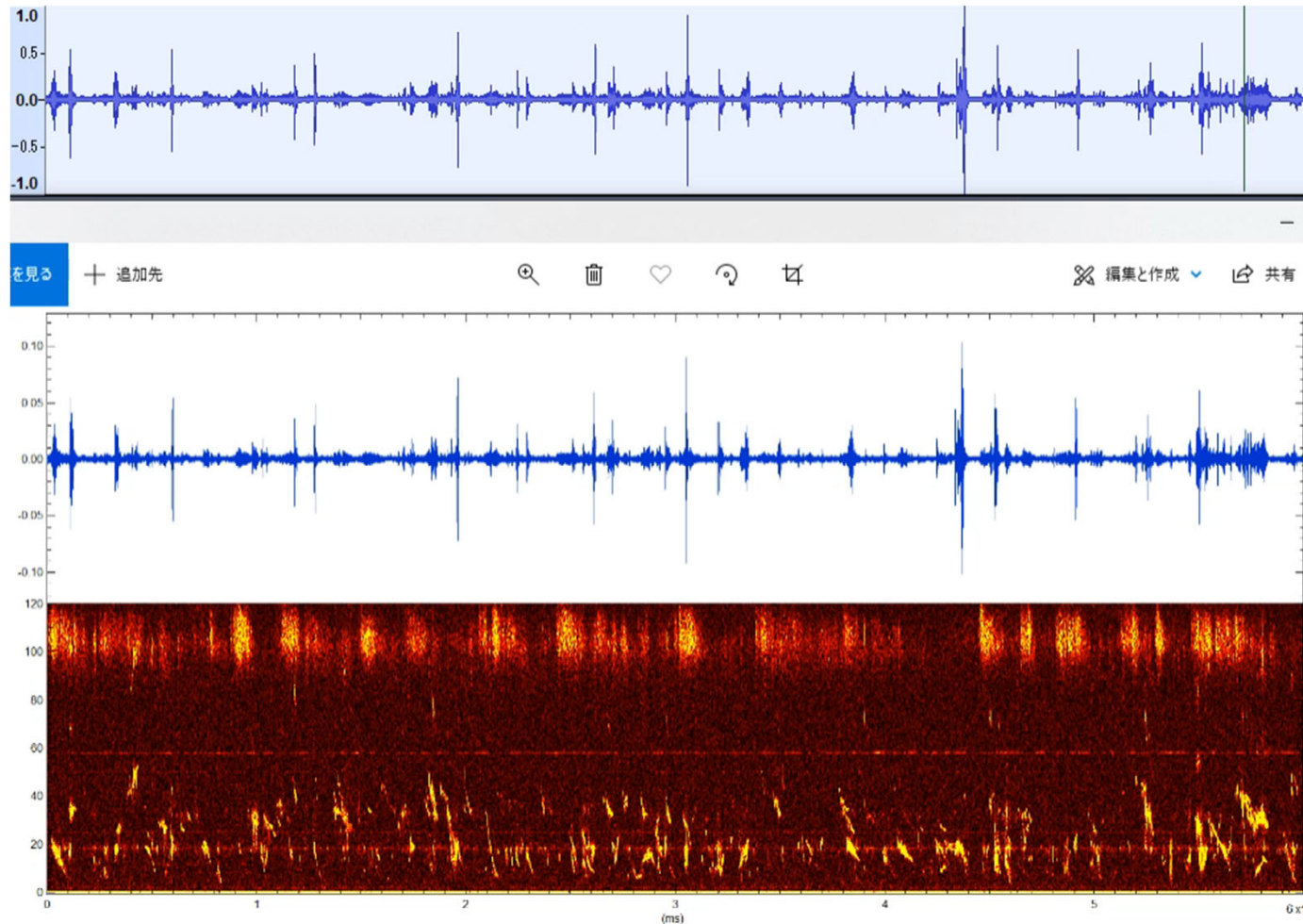
コヒーレントな揺動の包絡線が見えている



周波数上下，複雑な時間発展の例



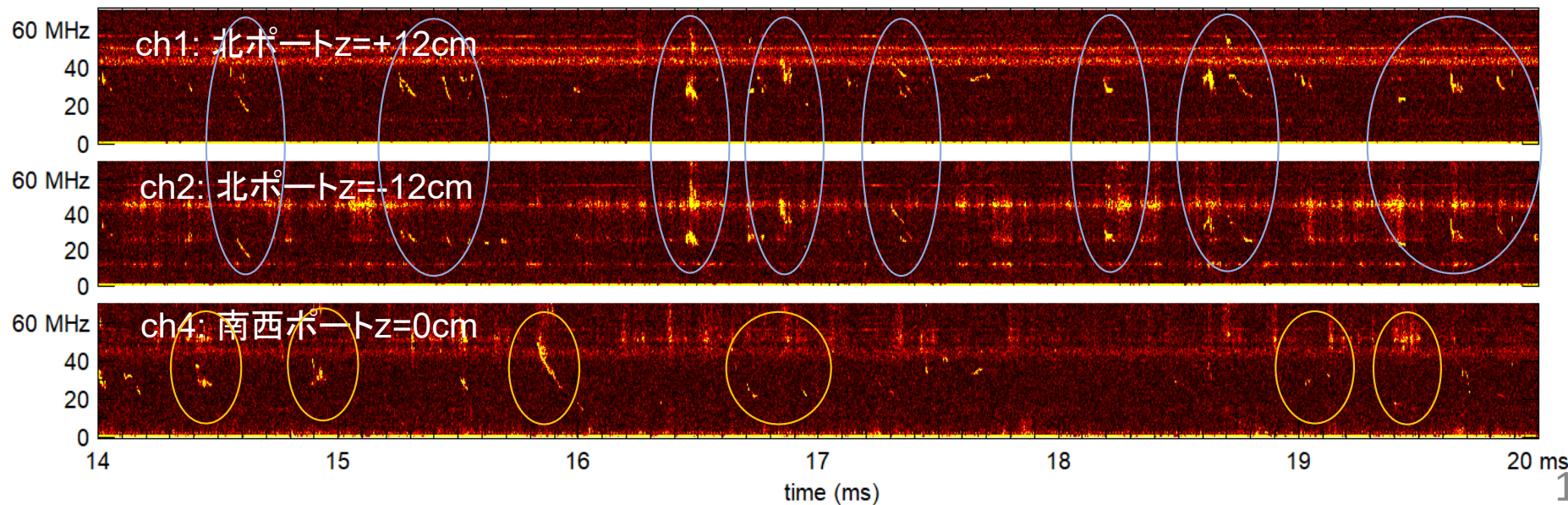
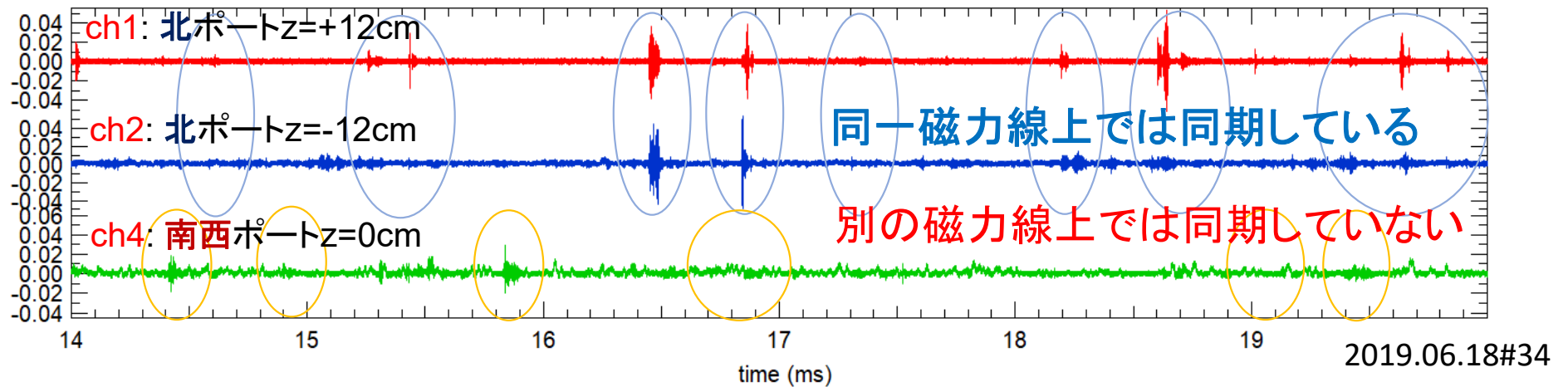
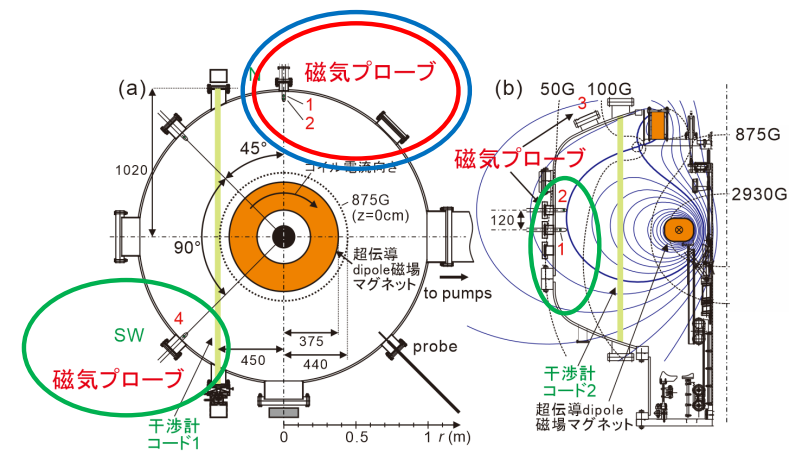
揺動の音声ファイル（1/10,000 倍速で可聴域に変換）



- 0.1fce~0.4fce付近のdown chirpに時々up chirpも存在
- より高周波に周波数変化しない波（一部は低周波の波と相関）

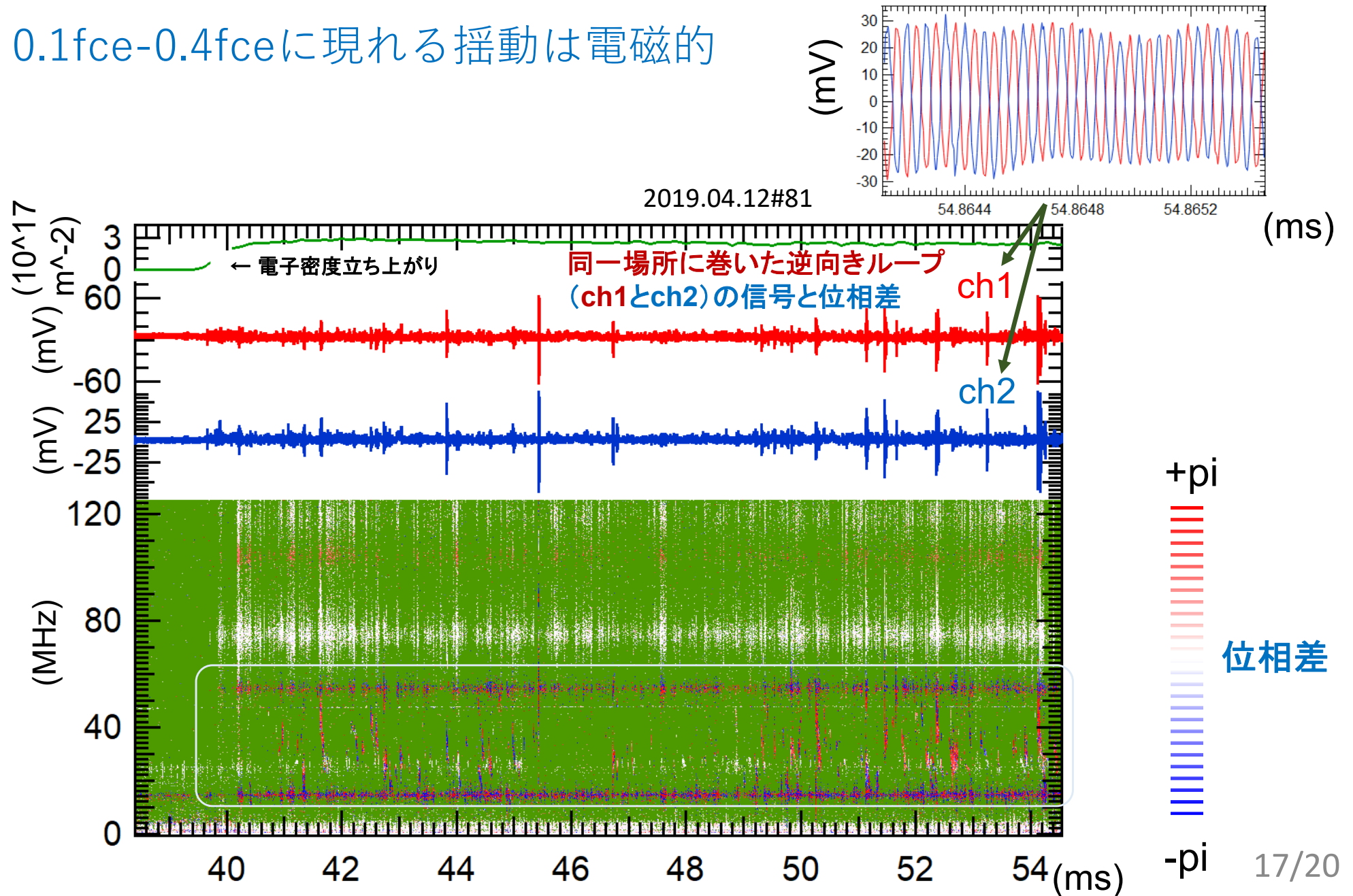
揺動の伝搬方向と揺動現象の局所性

多点計測：波動がダイポール磁場の磁力線に沿って伝搬するローカルな現象



揺動の磁場成分と電場成分の分離計測は、チャープする揺動が電磁的であることを示している

0.1fce-0.4fceに現れる揺動は電磁的



ホイッスラーの特徴として推定されること： 位相空間の分布非等方性と波動の分散関係

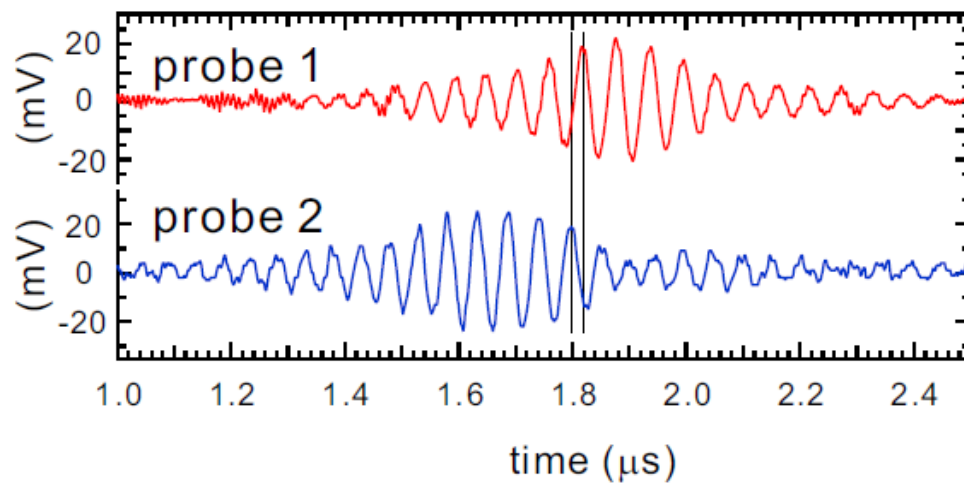
- 観測された揺動周波数の上限から予測される温度非等方性

$$f < f_{ce} A / (A + 1)$$

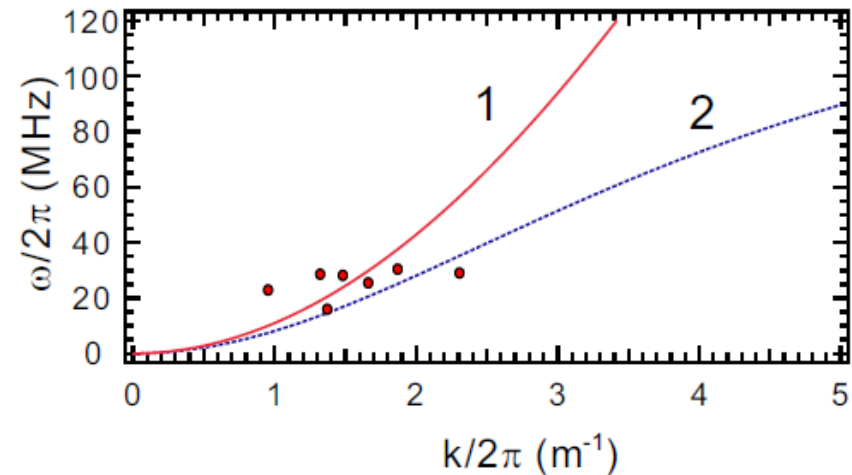
$$A = T_{\perp} / T_{\parallel} - 1 = 0.7$$

- 線形安定性(1966 Kennel Petschek)から
- 傾向 $T_{\perp} > T_{\parallel}$ は, ECHと内向き輸送の効果による位相空間分布と矛盾しない

- 分散関係(初期データ)

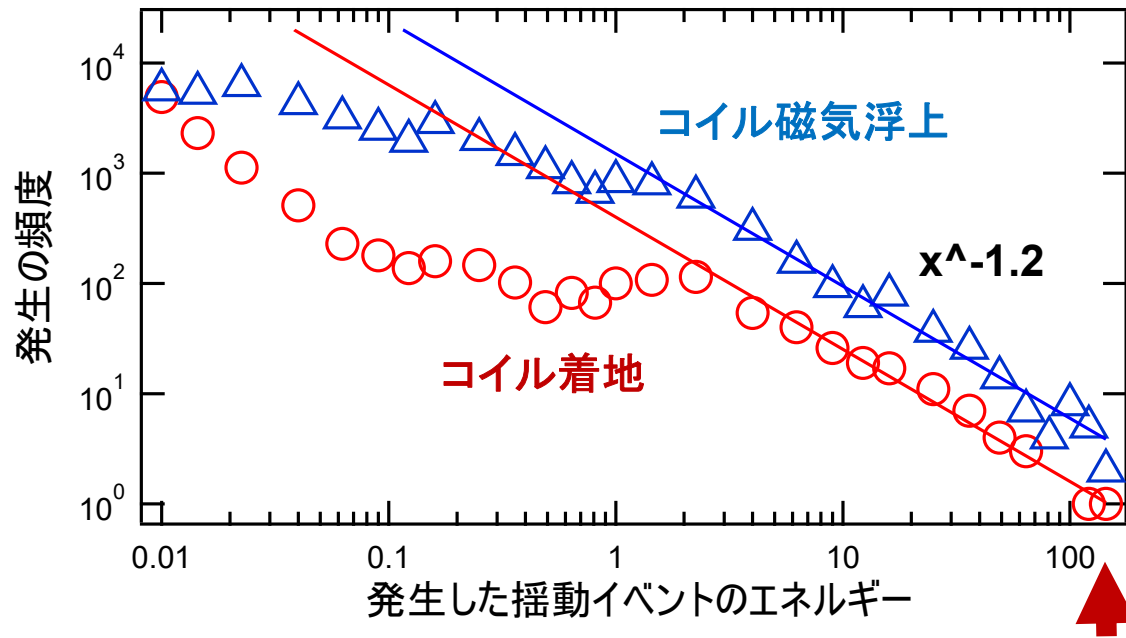


For parameters of 1. edge and
2. averaged over confinement region



- Envelopが伝搬するケースの場合, パラメータからの分散関係と矛盾しない
- 揺動の発生場所がプローブ間の様々な位置であるものが混ざっている

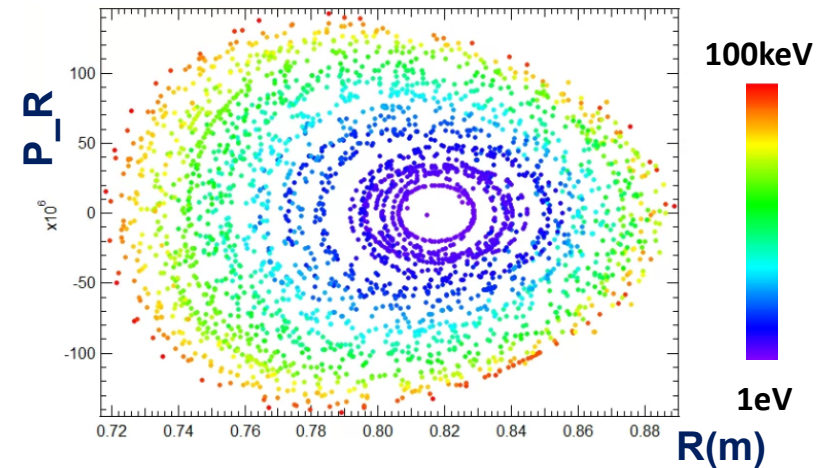
揺動の発生頻度と大強度のR波中の電子の挙動



5760ms分の高速Bdot probeデータから抽出

$E \sim 3 \times 10^4 \text{ V/m}$

- 発生頻度はべき乗分布に近い
- 観測される最大強度の電場付近では、R波で加速された相対論的電子の軌道はカオス化する

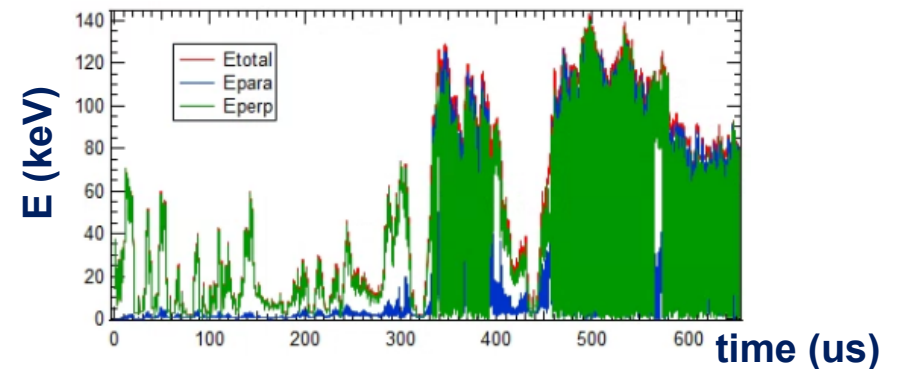
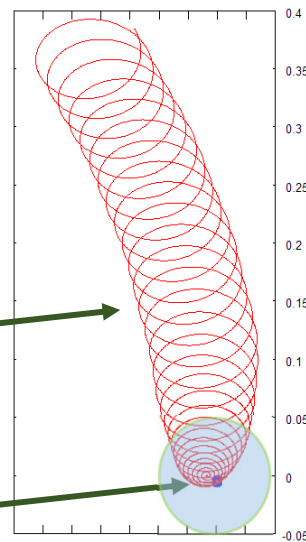


電子軌道のポアンカレプロット(最初の100us)

初期位置から半径5cm, 磁力線に沿って10cmの範囲で円偏波の電場を想定して計算する

R波による加速あり

電場加速なし



観測された磁場揺動に対応する $2 \times 10^4 \text{ V/m}$ のR波を印加した場合のテスト粒子計算

4. まとめと今後の課題

- 磁気圏型配位RT-1では, 位相空間分布に着目して, 低周波($\sim f_{\text{toroidal}}$)と高周波($\sim f_{\text{ce}}$)の磁場揺動が観測される.
- 低周波揺動はプラズマの自己組織化と関わる波であり, エントロピーモードとの類似性が見られる. 構造の詳細理解や輸送の直接計測が今後の課題.
- 位相空間分布の非等方性を持つ高温電子による高 β プラズマ中で, $f \sim 0.1-0.4f_{\text{ce}}, 0.6-0.8f_{\text{ce}}$ (チャープを示す), f_{ce} 付近の間欠的な揺動発生.
- $\sim 0.1-0.4f_{\text{ce}}$ の揺動はコヒーレントな磁場揺動であり, 磁力線に沿い伝搬.
- 周波数の時間的な変化(多くは周波数低下)が観測される場合が多く, 分散を持つ電磁的なモードである
- ホイッスラー/コーラス状の揺動が, 実験室のダイポール磁場配位プラズマ中で自発的に(外部から波動励起を行わなくとも)発生する.
- 発生場所や粒子加速, 分布関数の計測が実験的な課題.