

人工磁気圏における制御環境下での コーラス放射の実験室研究

東大新領域^A, 核融合研^B

齋藤晴彦^{A,B}, 三村洸生^A, 青柳進之介^A, 城越望^A, 上田研二^B, 西浦正樹^{B,A},
鈕持尚輝^B, 佐藤直木^B, 吉田善章^B

- ・ 研究背景: 磁気浮上ダイポールによるプラズマ研究の進展
先行研究とRT実験の概要(揺動現象と電子・陽電子プラズマ計画の現状)
- ・ RT-1におけるホイッスラーモード・コーラス放射実験
 - 高温電子高 β プラズマの生成と発生条件
 - コーラス放射の発生領域
 - 磁力線の曲率変化が揺動に与える効果の初期結果
- ・ まとめと今後の課題

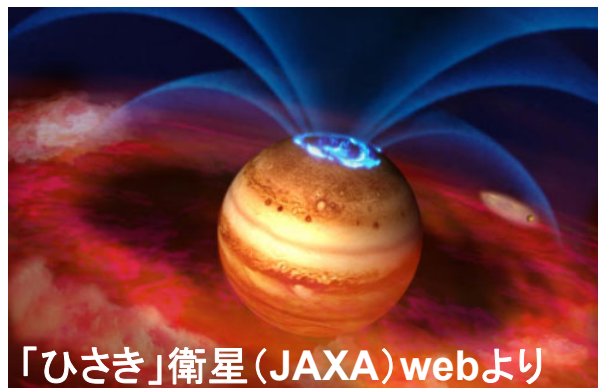


研究背景: 磁気浮上ダイポールによるプラズマ研究の進展

2

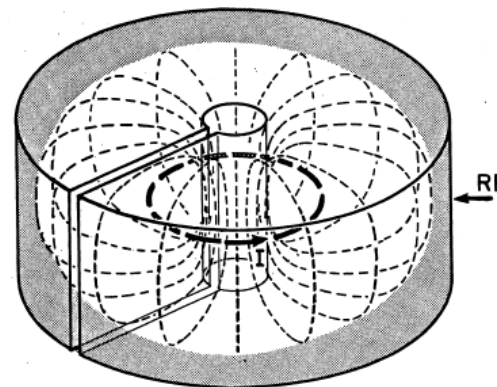
- 大域的に磁気圏と等価, 外部磁場のみで超高 β ($>100\%$) の安定生成 ($>秒$)
- 良好な閉じ込め (純電子プラズマを300秒以上) は反物質プラズマに適用可能

高速流を持つ高 β プラズマ



自然に学び, 先進核融合へ

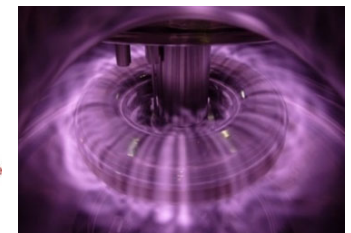
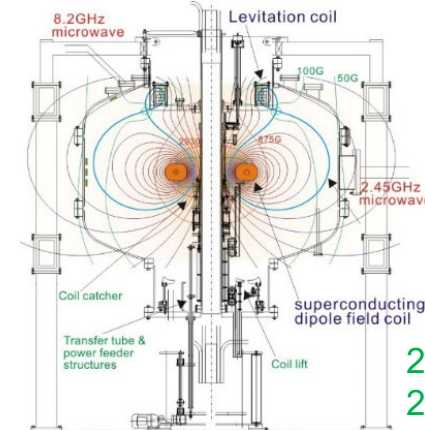
"Dipole Fusion" by A. Hasegawa



1987 Hasegawa CPPCF

内向き拡散・加熱: D-D or D- ^3He

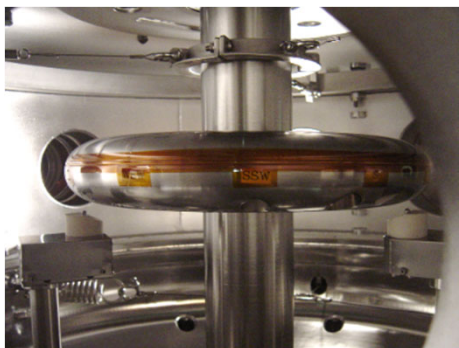
東大RT-1, MIT/Columbia LDX



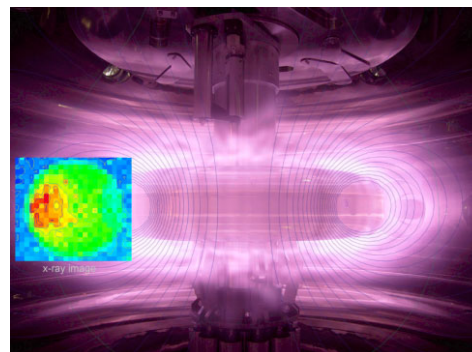
2013 Yoshida+ PPCF;
2010 Boxer+ Nat. Phys.

2002 Yoshida & Mahajan PRL

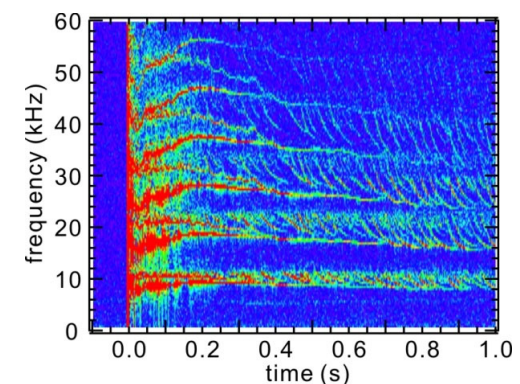
- 超伝導コイル磁気浮上
- 高温電子の高 β 状態 ($>100\%$)
- 波動粒子相互作用



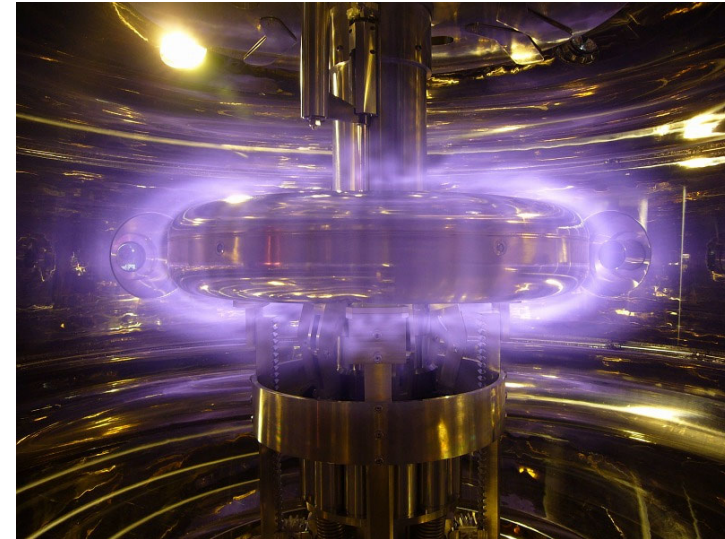
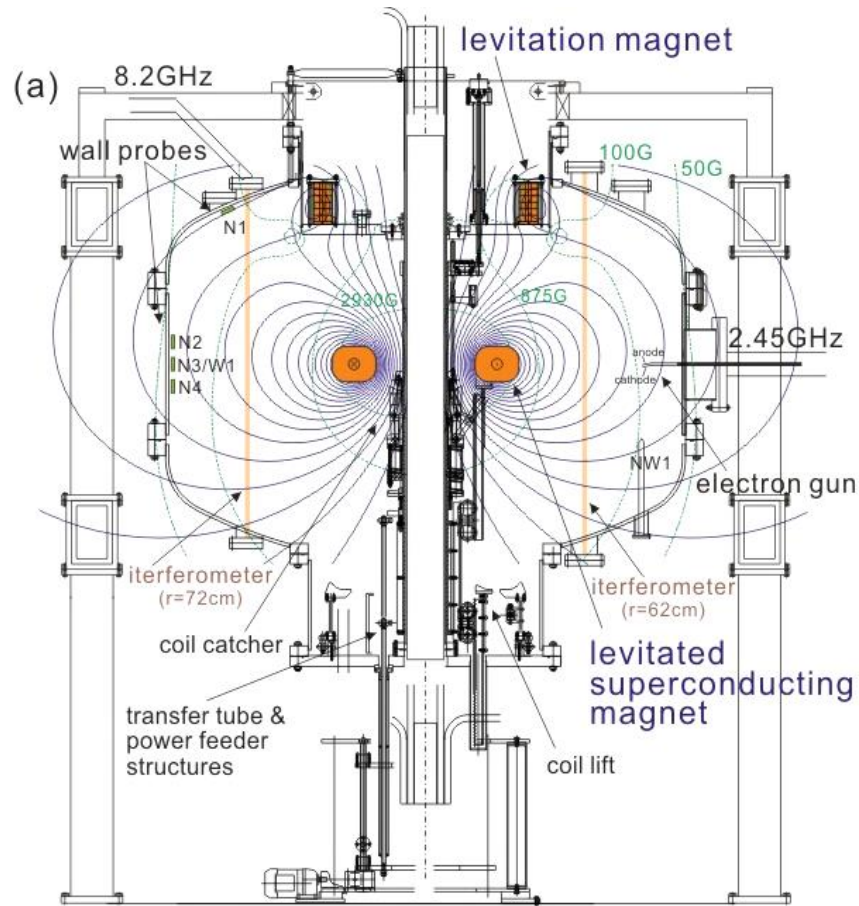
2013, 2016 Ogawa, Yanagi+ 低温工学



2015 Nishiura+ Nuclear Fusion
2022 Kenmochi+ Nuclear Fusion



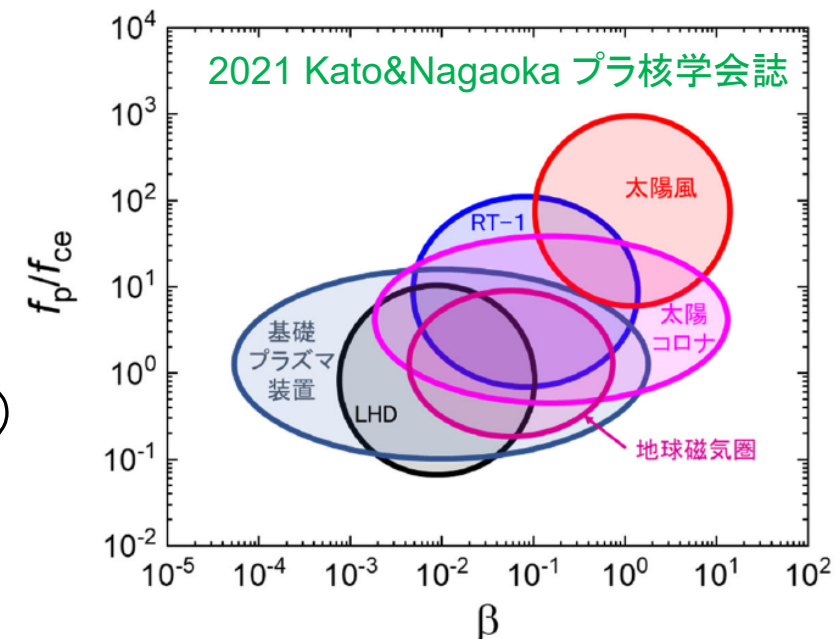
2010 Yoshida+ Phys. Rev. Lett.



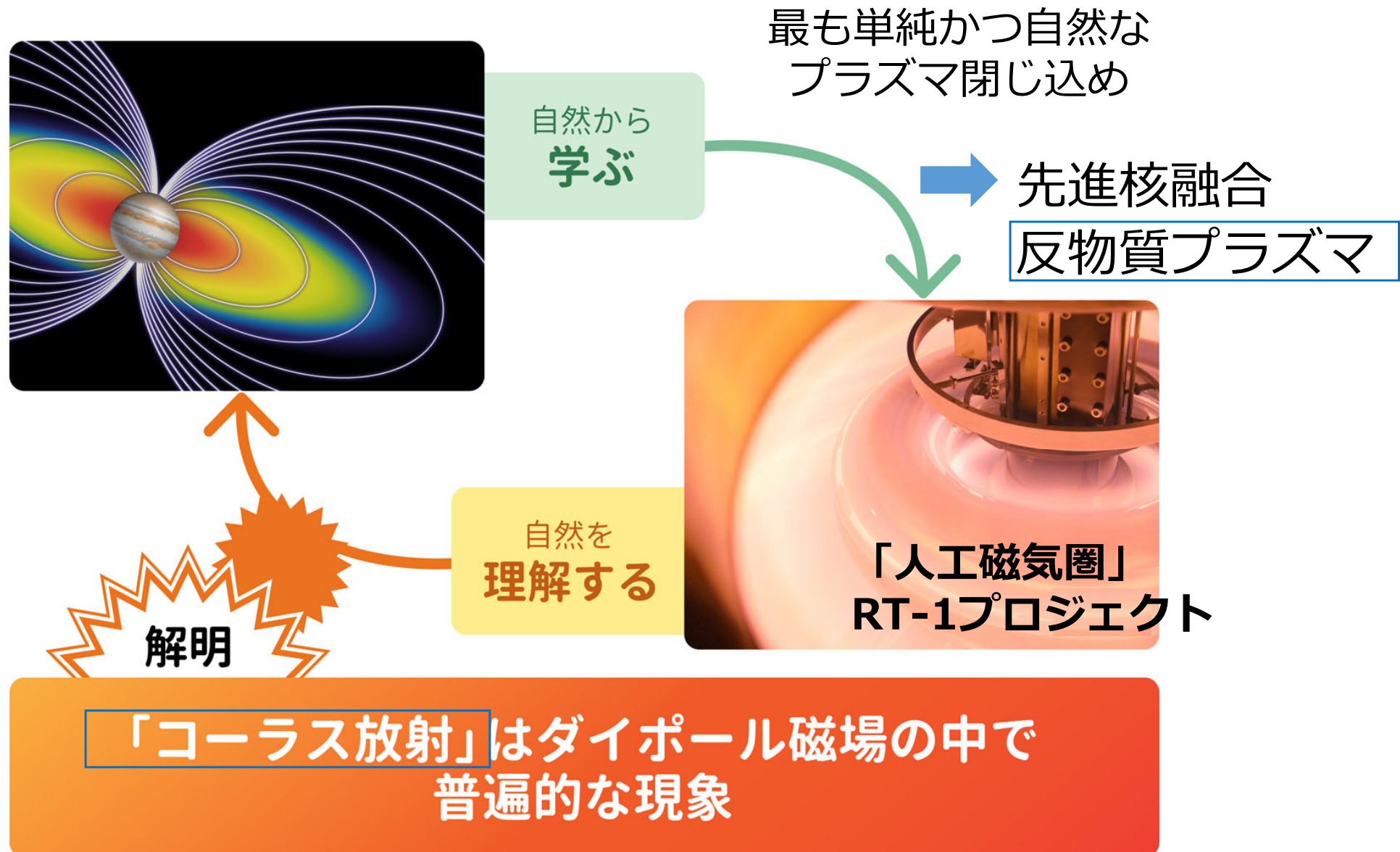
- 高温超伝導 (Bi-2223) コイルをフィードバック制御により磁気浮上, 約6時間の無冷却運転

Hot-electron high-beta plasma formation

- 高温電子高 β プラズマ (局所 $\beta \sim 100\%$, $\sim$ 秒)
- 先進核融合, 揺動による自己組織化, 反物質プラズマ



「自然（惑星磁気圏）に学び，先進核融合と反物質プラズマへ」 を目指すRT-1による実験室宇宙プラズマ研究



再現性と制御性に優れた実験室環境で
コーラス放射の性質を解明へ

● 電子・陽電子系のペアプラズマ計画



2022-科研費基盤S



産総研・リニアックベース陽電子源
2020 Higaki Michichio+ Appl. Phys. Exp.

パルス陽電子入射

$10^7 \text{ e}^+/\text{s}, 10 \text{ eV}$

リニアックベース
パルス陽電子ビーム

(既存)

バッファガス+超伝導トラップ

5Tトラップ製作

10^{10-11} e^+

$\sim 10 \mu\text{s}$ で
入射

磁気浮上ダイポール

冷却試験・装置製作

$>10^{10} \text{ e}^+$
 $10^{11-12} \text{ m}^{-3}$

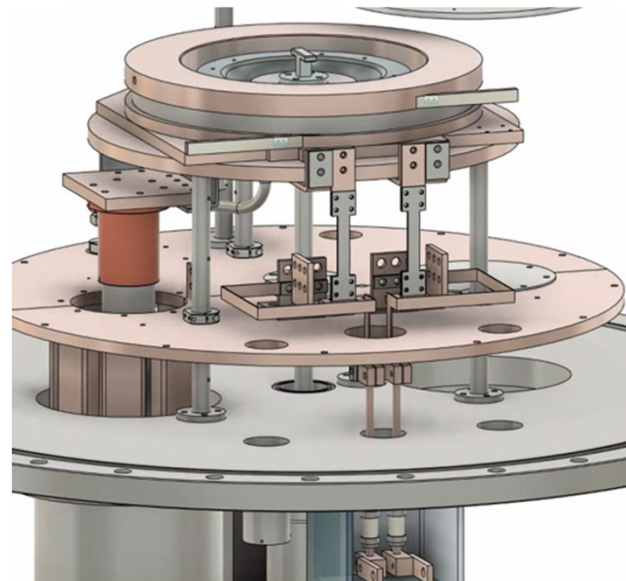
反物質ペア
プラズマ生成

物性解明:
分散関係, 安定性,
Ps生成, etc.

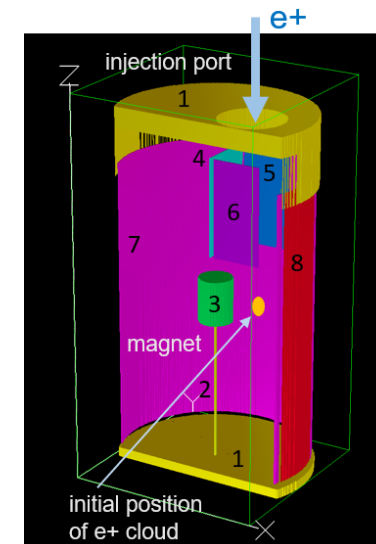
低エネルギー陽電子と電子の磁場閉じ込め実験の開発研究を進めている



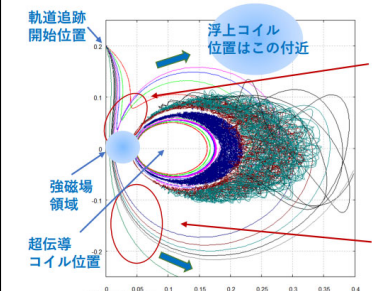
5Tマグネットによるトラップ



小型磁気浮上ダイポール



2015 Saitoh+ NJP
2024 Deller+ PRE

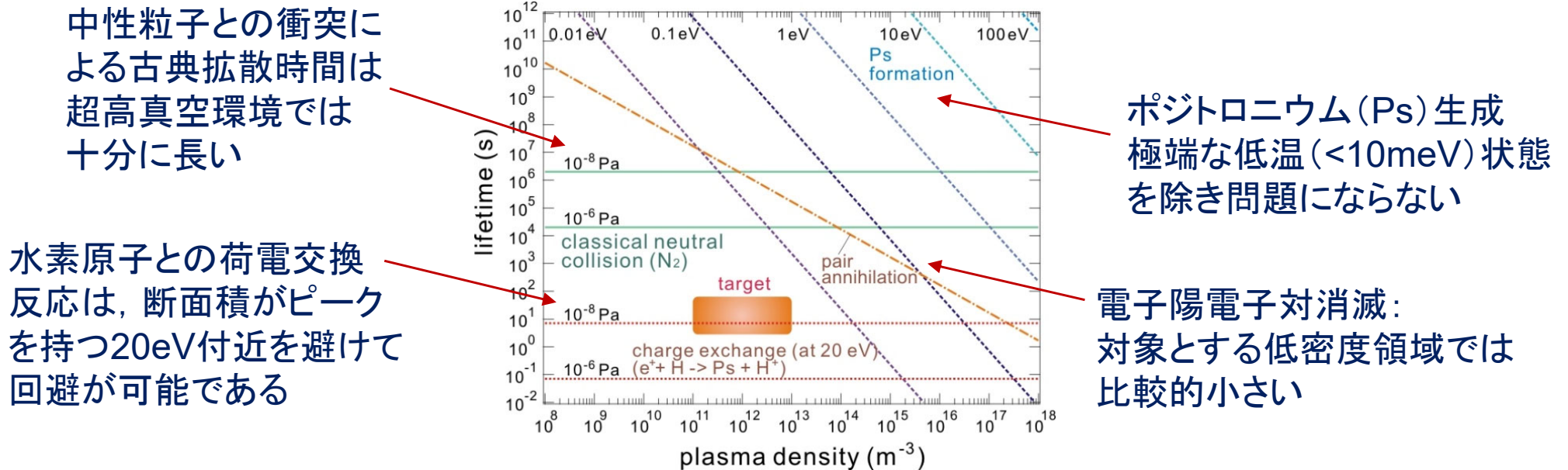


陽電子の高効率入射と、電子との
同時閉じ込めの実証, 入射最適化

電子・陽電子プラズマの目標パラメータと実現性

6

- 目標値: $n_{e^+/e^-} > \sim 10^{11-12} \text{ m}^{-3}$, $T_e \sim 1 \text{ eV}$ デバイ長 $\lambda_D \sim 2 \text{ cm} < \text{装置サイズ}$ を満たし、プラズマとしての集団現象が発現する



様々な密度の陽電子または電子・陽電子群のlife timeを決定する機構

荷電交換反応, ポジトロニウム生成, 対消滅による制約を超えて, 研究対象となる時間スケール(< ms)以上の時間, 電子・陽電子プラズマを保持可能

- 目標パラメータは, BGT+HFTによる陽電子蓄積とパルス入射で実現を目指す

- 閉じ込め体積 $V \sim 10 \text{ L}$ に対して, 最低でも $N \sim 10^9$ 個
- 定常入射では, これは実現困難: $N = \alpha \tau \Gamma$
- 10^9 個(目標)の陽電子を蓄積-> $\sim 10 \mu\text{s}$ で引き出しパルス入射を行い, 入射期と閉じ込め期を分離

α : 入射効率

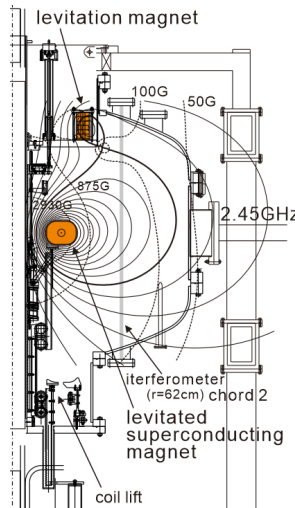
τ : 閉じ込め時間 (s)

Γ : ビーム強度 (/s) $\sim 10^{7-9}$ @NEPOMUC
 $\sim 10^7$ @AIST

定常では $\alpha=100\%$, 1~100s入射が必要

6

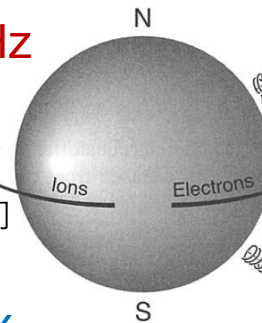
RT-1の粒子周期運動の時間スケールと，異なる周波数帯域に出現する揺動の分類



RT1:
50-3000
Gauss

$\Phi = \int B dS \sim P_\theta$
トロイダル方向
ドリフト運動
magnetic flux

$< \sim 10\text{kHz}$



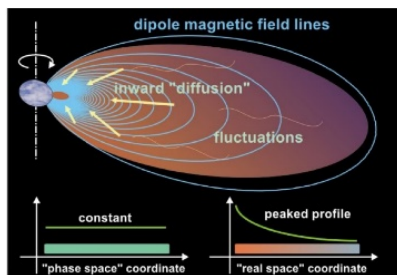
$\sim \text{MHz}$ action integral

磁力線に沿う
バウンス運動 $J = \int v_{||} ds$

100MHz ~ 1GHz

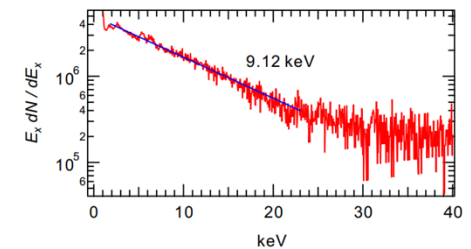
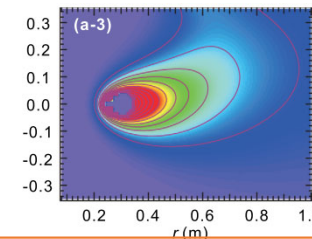
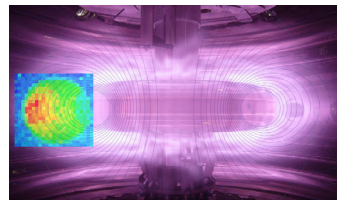
$\mu = v_{\perp}^2 / B$

magnetic moment
磁力線周囲のgyro運動



内向き輸送の
駆動・加熱

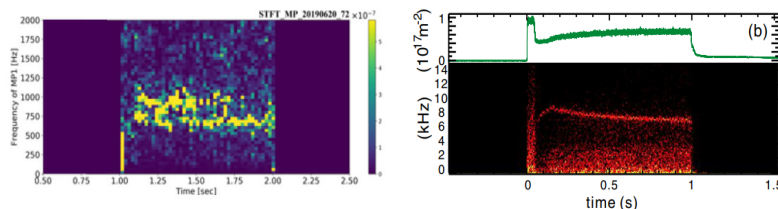
構造形成・位相空間における再構成



加速,
輸送

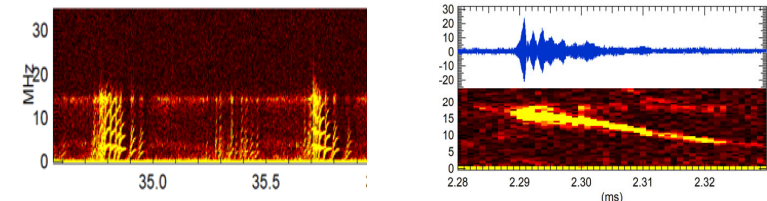
位相空間分布と
関わる揺動駆動

低周波揺動 kHz ~ 10kHz



構造形成時に出現, エントロピーモード

高周波揺動 MHz ~ 数100MHz

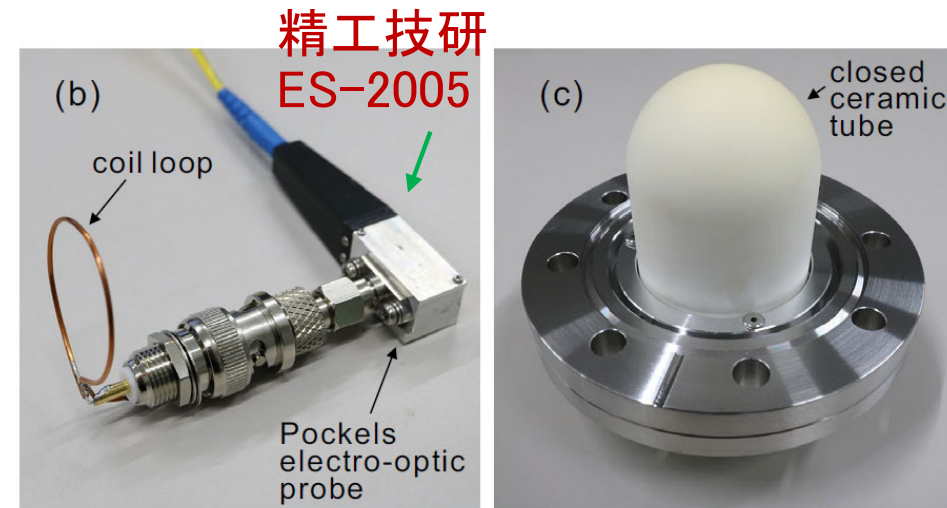
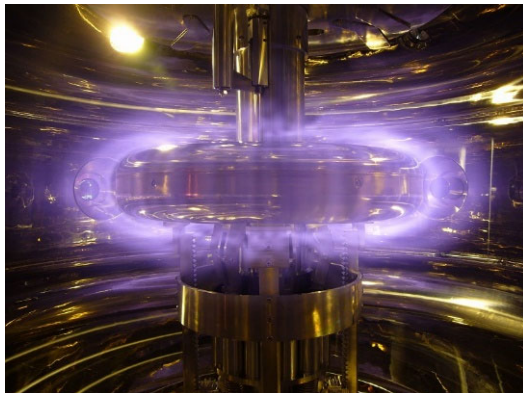
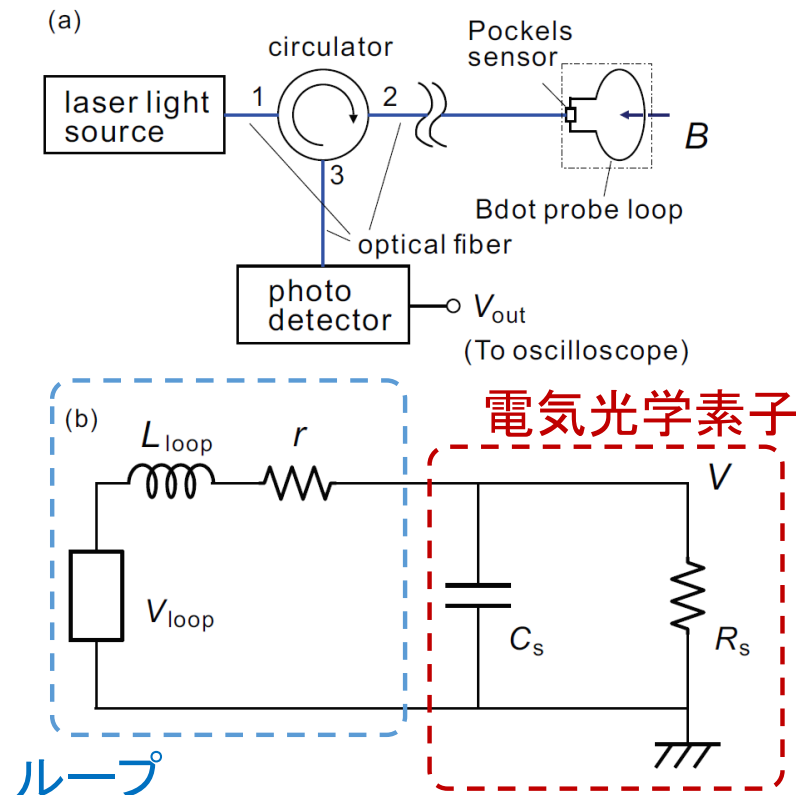


交換型(高温電子)

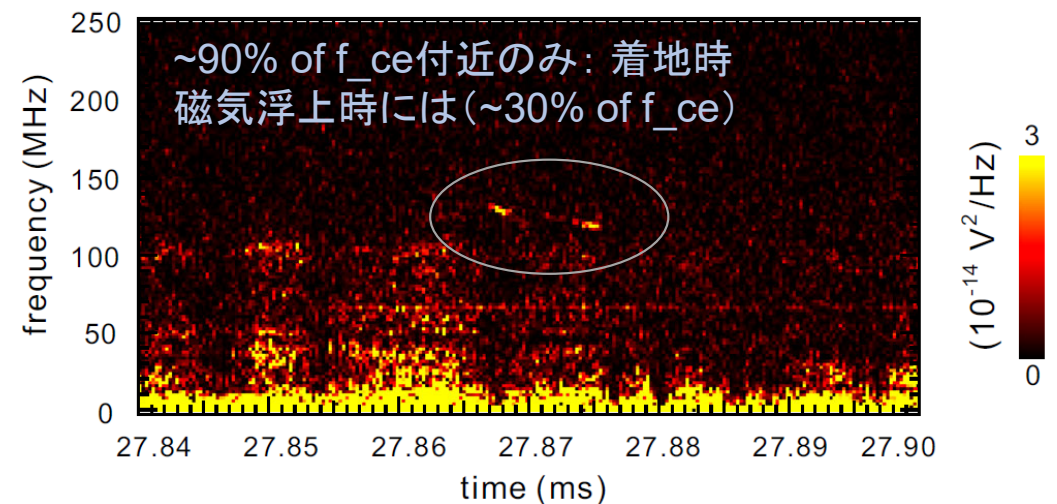
ホイッスラー

磁気プローブ(＋ポッケルス電場センサ)による揺動計測

8



同軸構造による静電シールドを持つ磁気プローブの構造と、セラミック保護管内部に配置したプローブの外観。



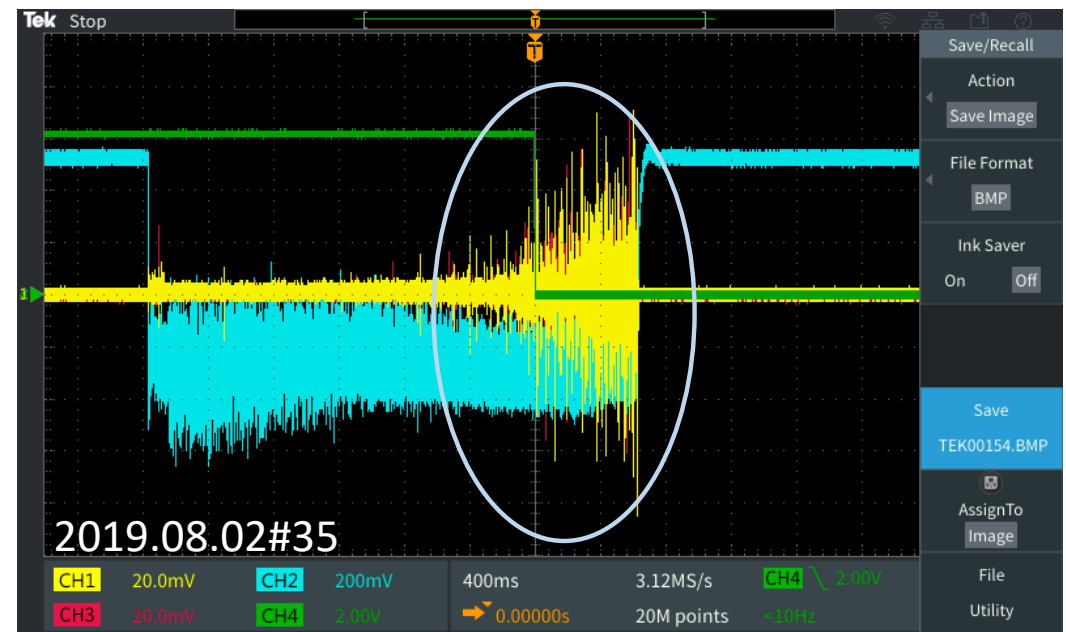
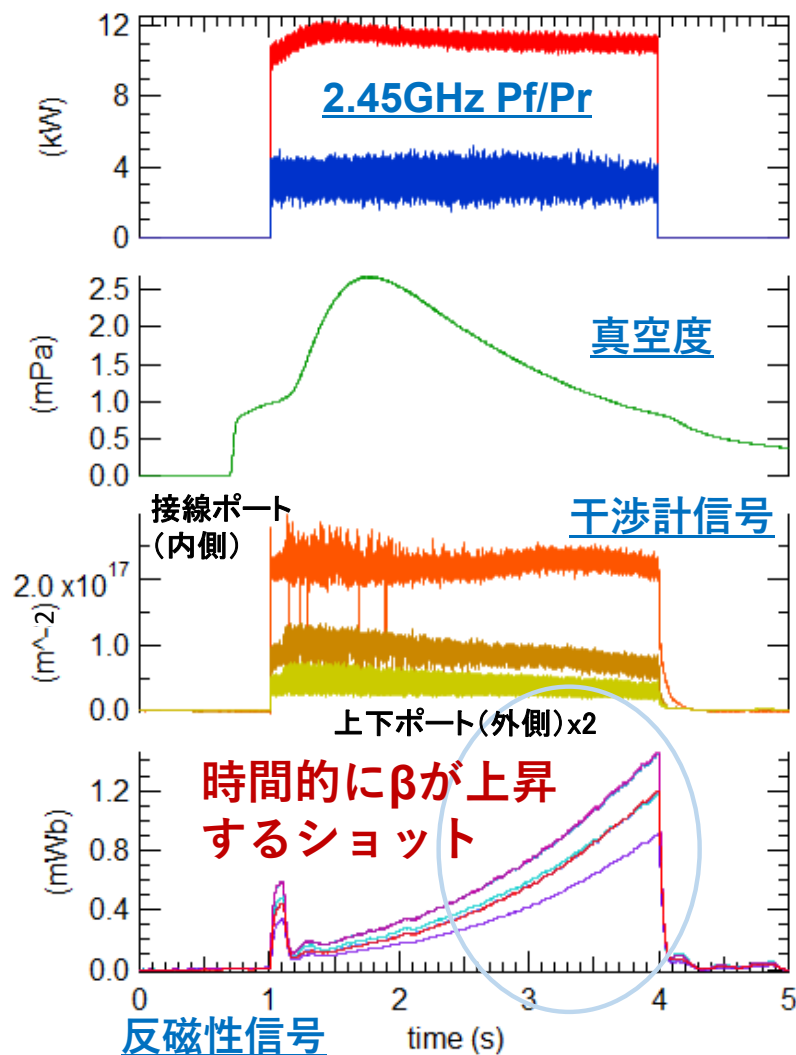
電気光学センサを利用した磁場計測:
通常のコーラスより高い130MHz付近に揺動

➡ 300MHz程度までの揺動をフラットな特性で計測可能, 電場と磁場を分離

電子サイクロトロン周波数帯域の揺動の間欠的な自発励起

9

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、～数十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

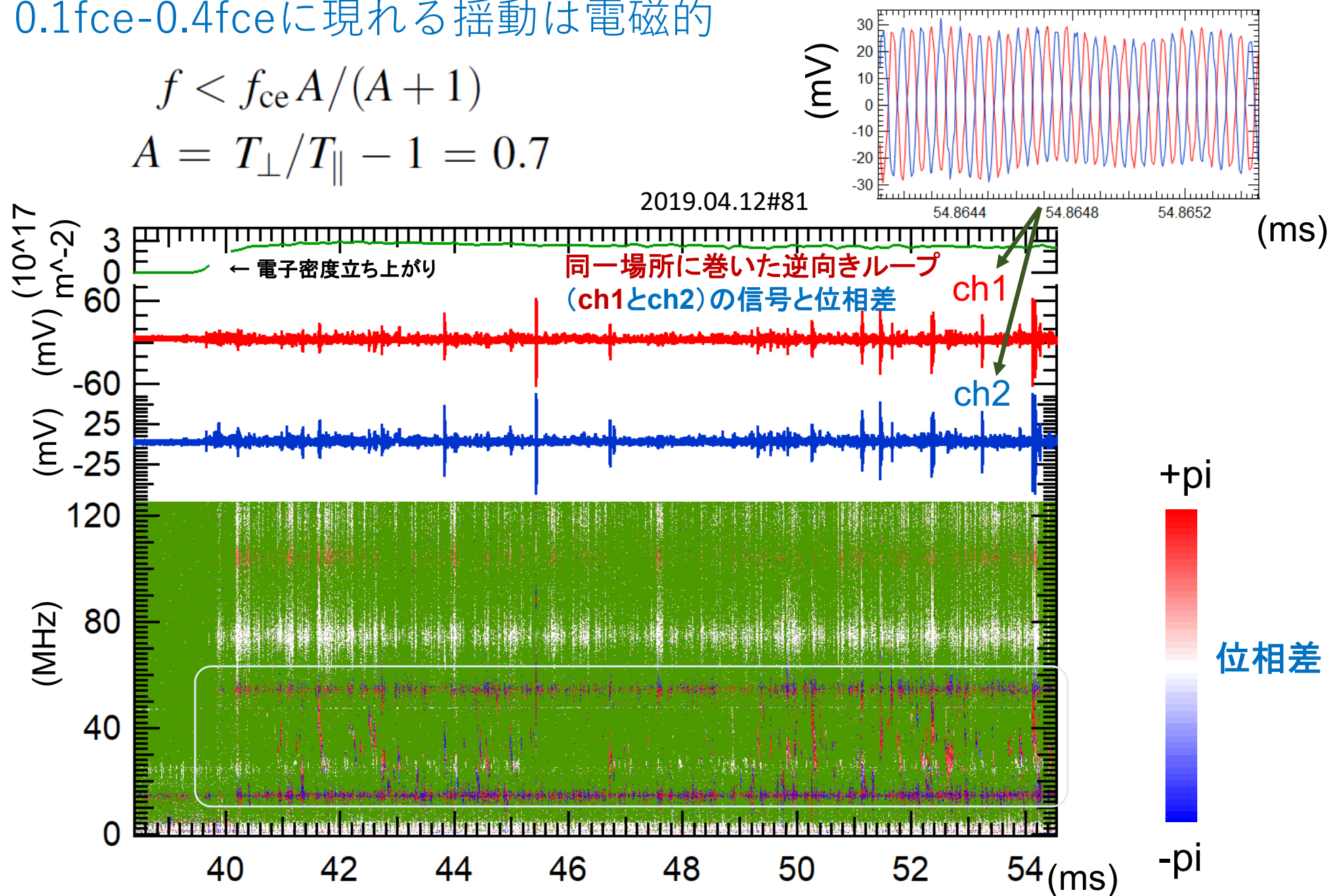
揺動の電磁波モードと静電モードの分離計測

Separated detection of electromagnetic and electrostatic modes

0.1f_{ce}-0.4f_{ce}に現れる揺動は電磁的

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

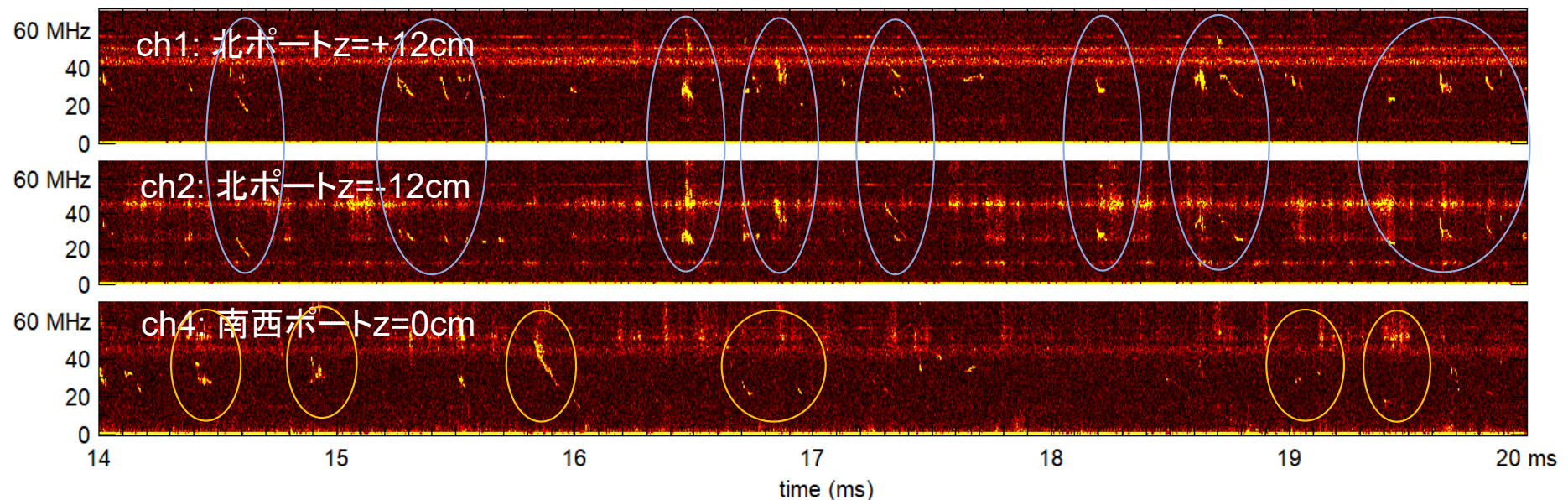
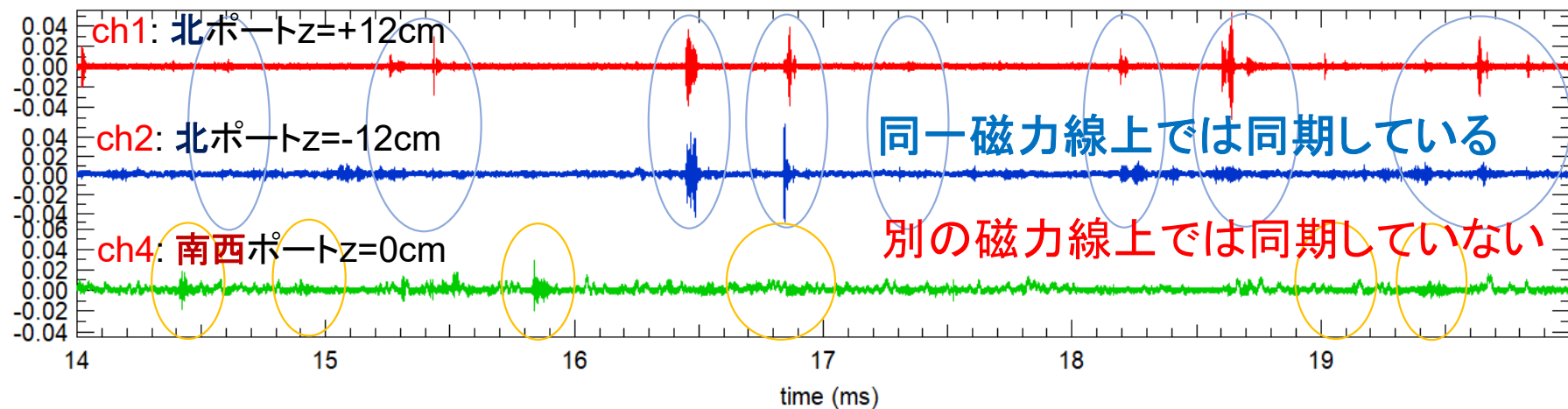
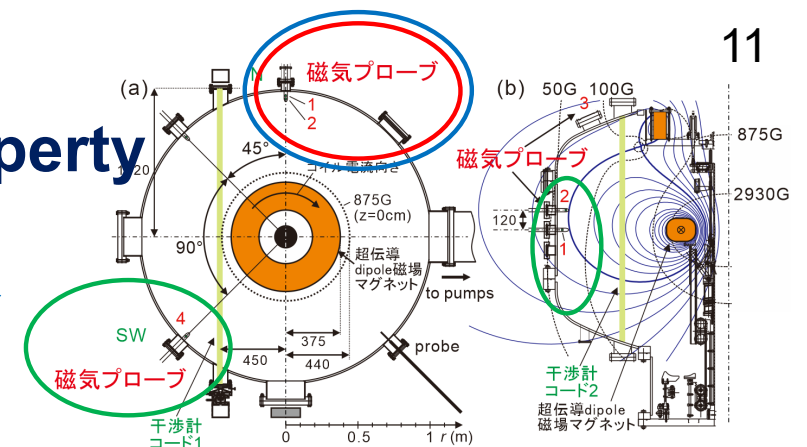
$$A = T_{\perp} / T_{\parallel} - 1 = 0.7$$



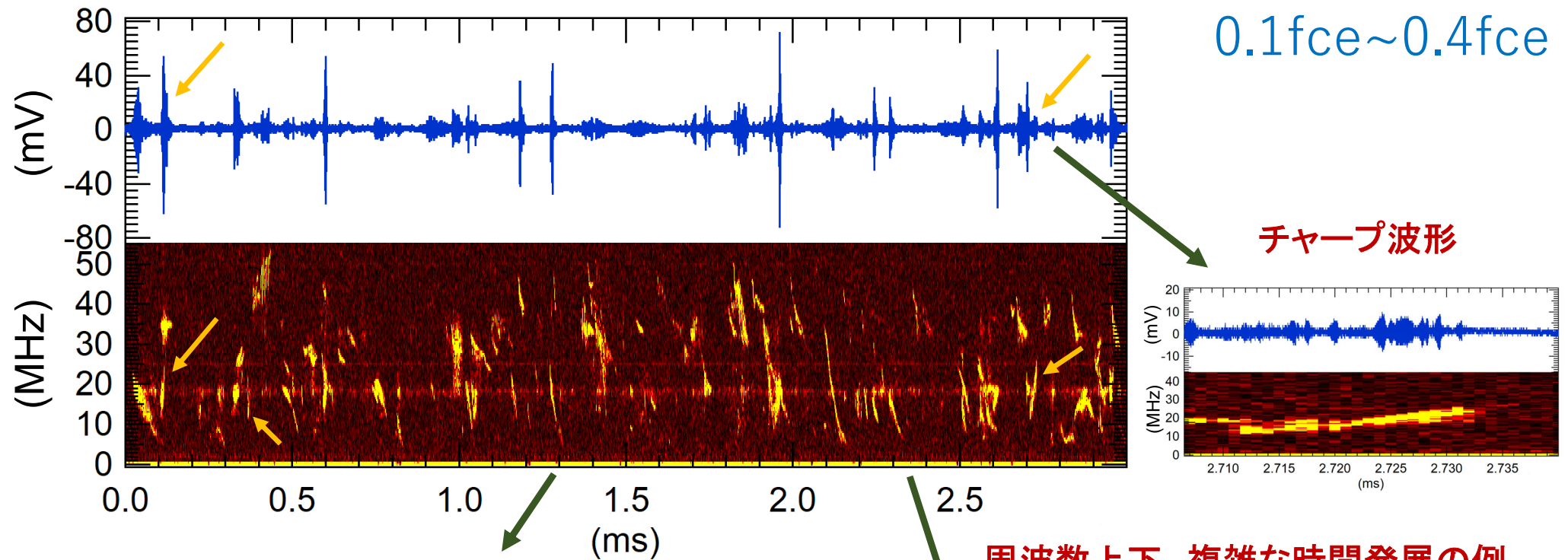
揺動の伝搬方向と揺動現象の局所性

Propagation direction "localization" property

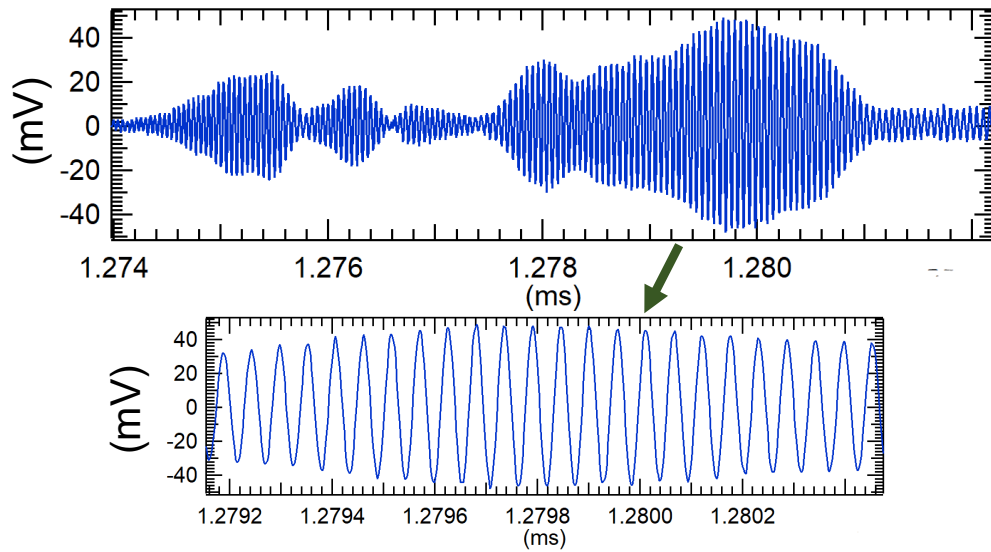
多点計測：波動がダイポール磁場の磁力線に沿って伝搬するローカルな現象



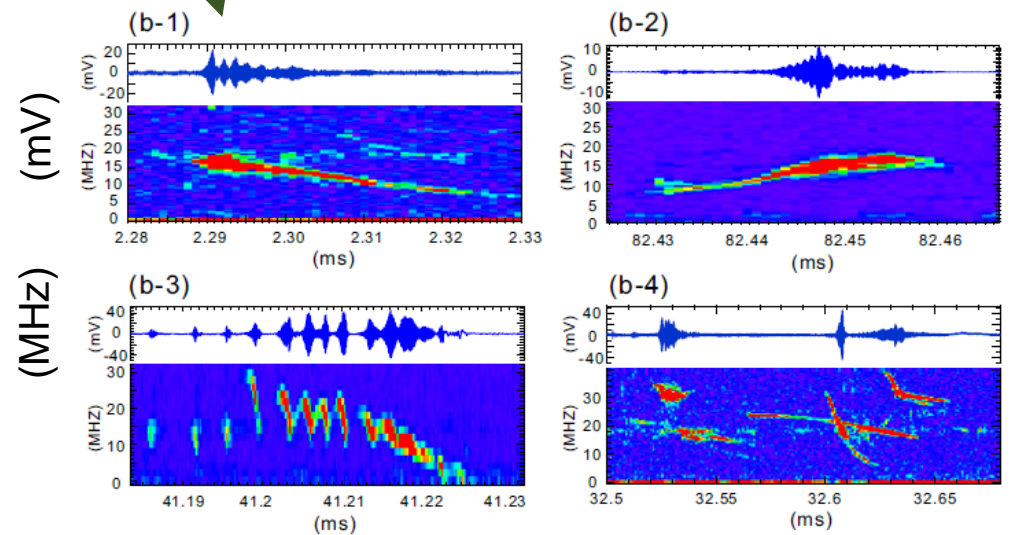
フォーリング/ライジングトーンを示すコヒーレントな揺動である 12



コヒーレントな揺動の包絡線が見えている

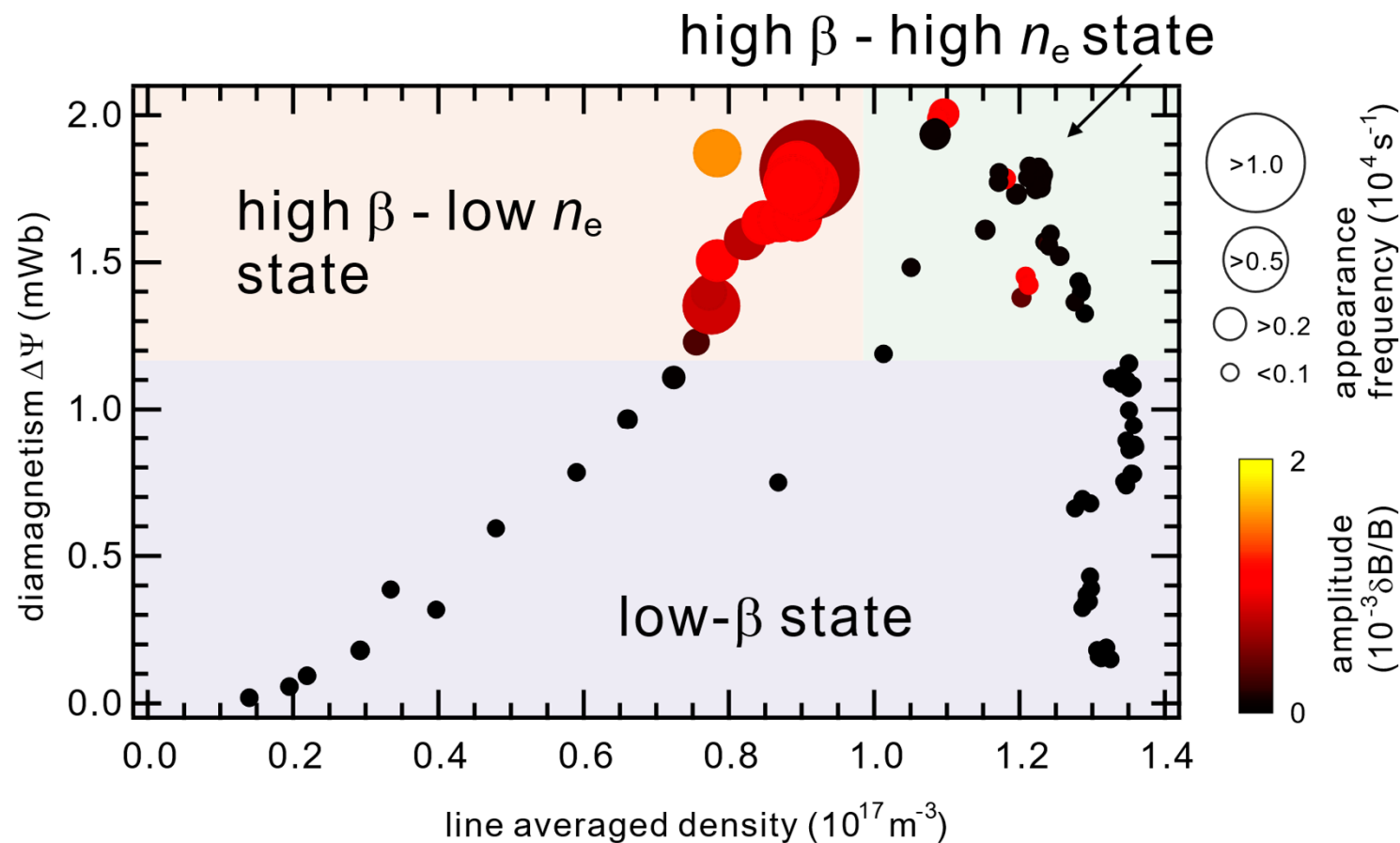


周波数上下, 複雑な時間発展の例



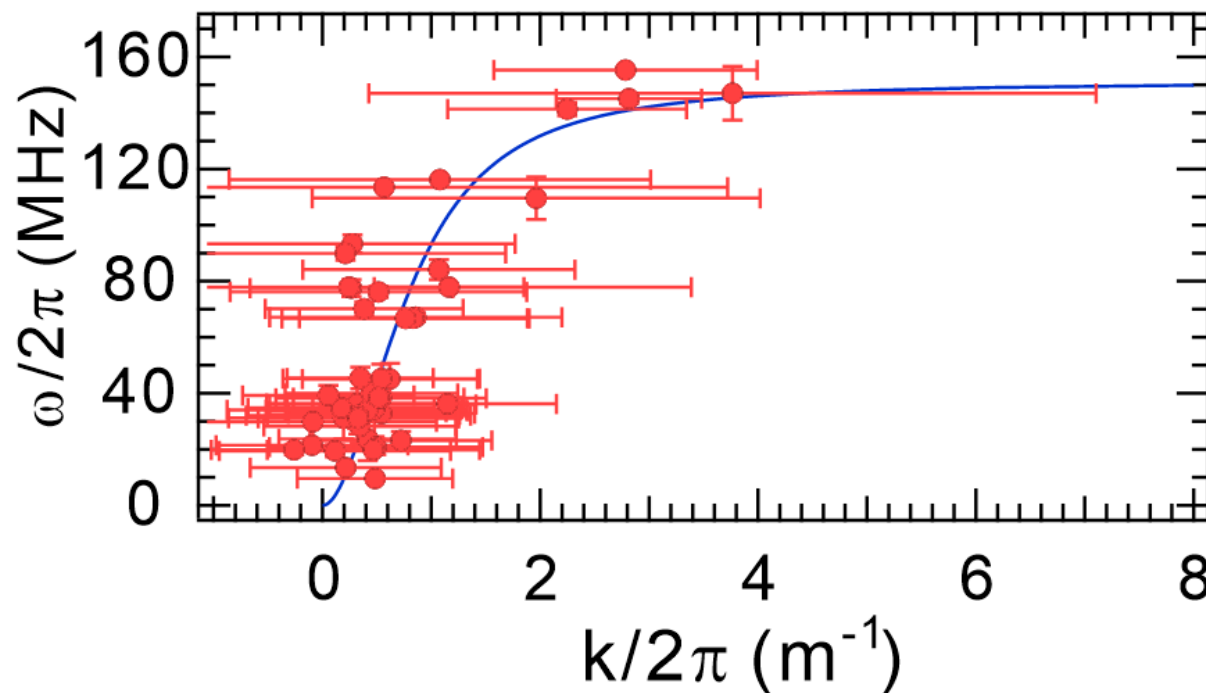
発生頻度はプラズマ圧力増大により増加し(しきい値的な β の存在)
低温電子成分の増加により安定化が見られる

13



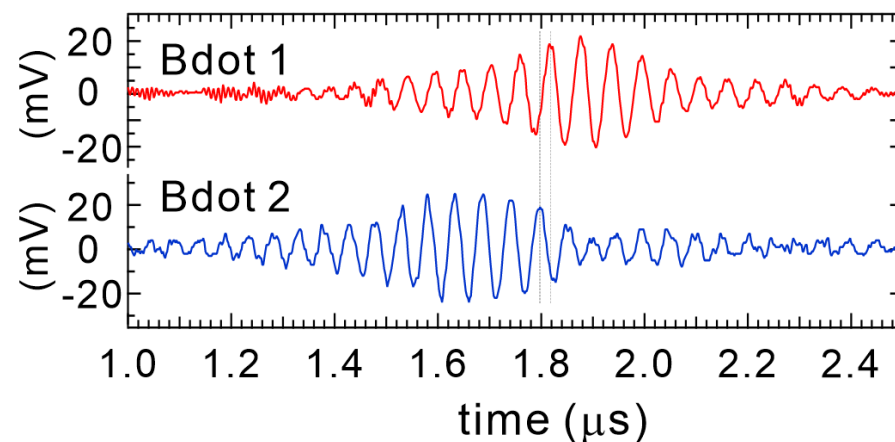
- 線平均電子密度とプラズマ圧力に対する依存性:
高温電子成分による揺動励起と低温電子成分の増大による安定化

- 密度分布に応じて計測間隔を最適化して得られた分散関係



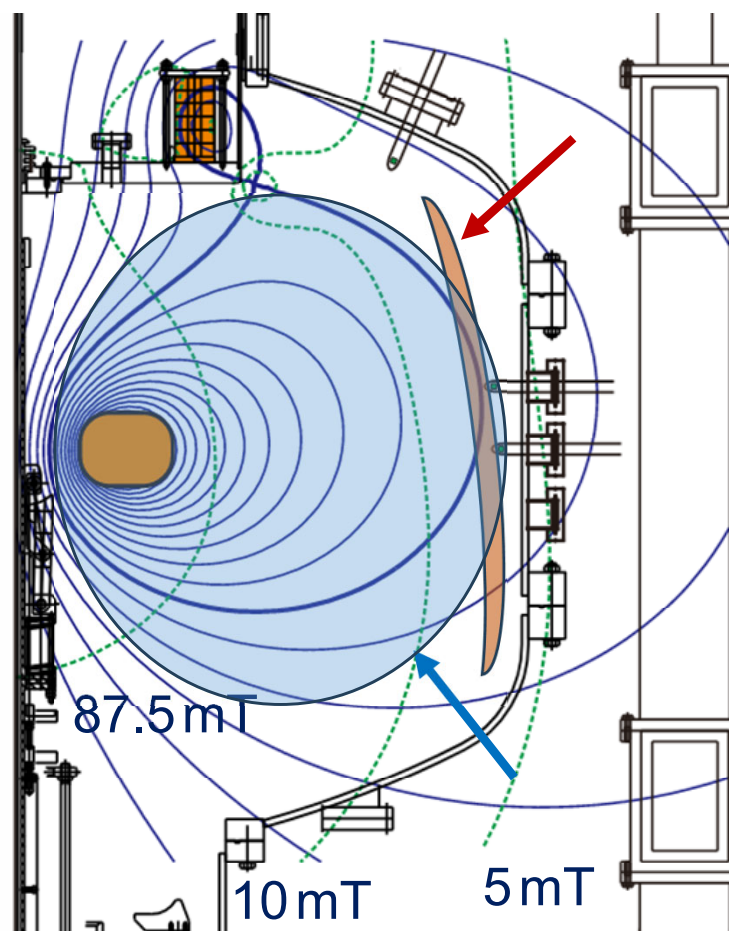
測定点における
 $f_{ce} = 150\text{MHz}$

- 磁気プローブを配置した周辺部の
 $B = 5.4\text{mT}$, $n_e = 6.3 \times 10^{14}\text{m}^{-3}$
に対するR波の分散関係(上図の青)
と分散関係の測定結果(赤)は矛盾しない
- 磁力線方向に沿った伝搬が主となる



- 観測される周波数の上限が、計測点の磁場強度に対する f_{ce} とほぼ一致
- 一方、揺動計測を行った周辺部の磁力線は強磁場領域までつながっている

(コーラス放射は $\sim 90\%$ of f_{ce} 程度まで出現)

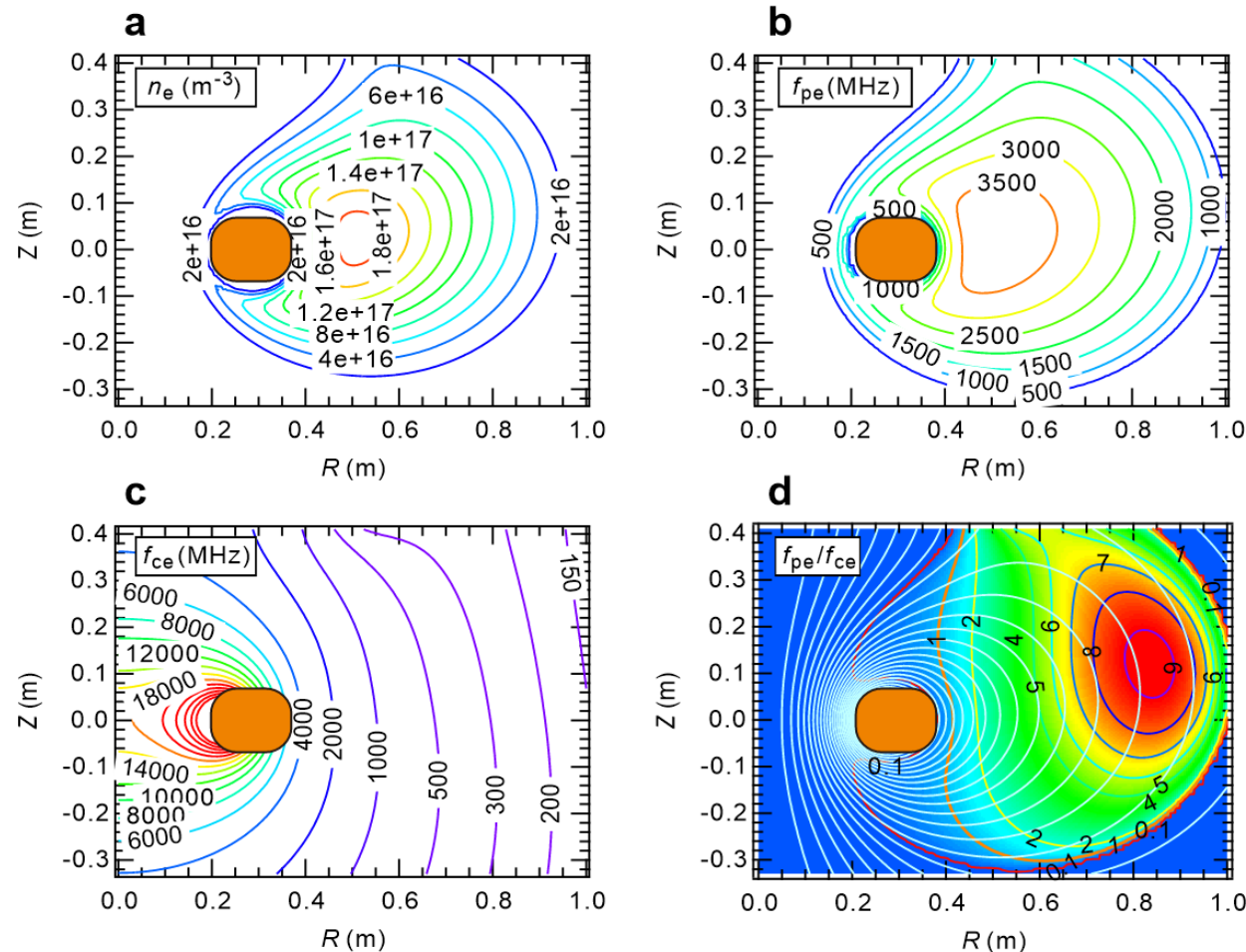


- 考えられる状況として...

- ① コーラスの発生領域は周辺部に局在する
- ② 発生自体は広い範囲で起こるが、計測点までの途中に伝搬不可能な領域がある ($f_p/f_c < 1$ の領域では伝搬しない)

RT-1の高温電子は広い範囲に分布しており、温度非等方性によるホイッスラーの不安定性 (コーラス放射の種) の発生場所は自明でない

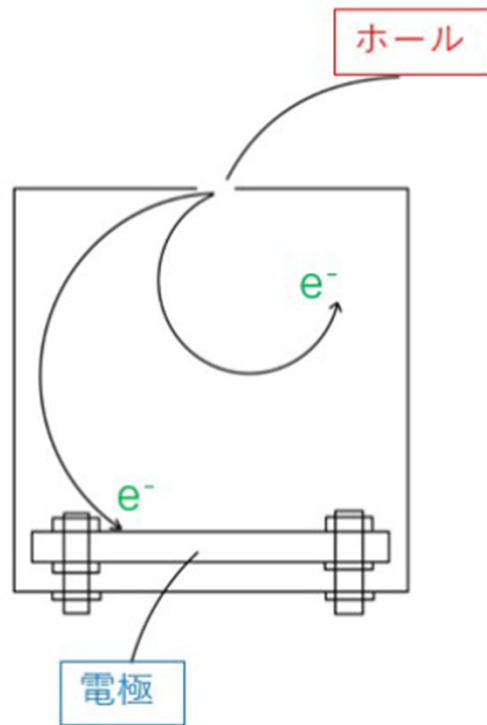
- 主にコア部分を計測する干渉計に加え周辺部情報を追加した密度再構成



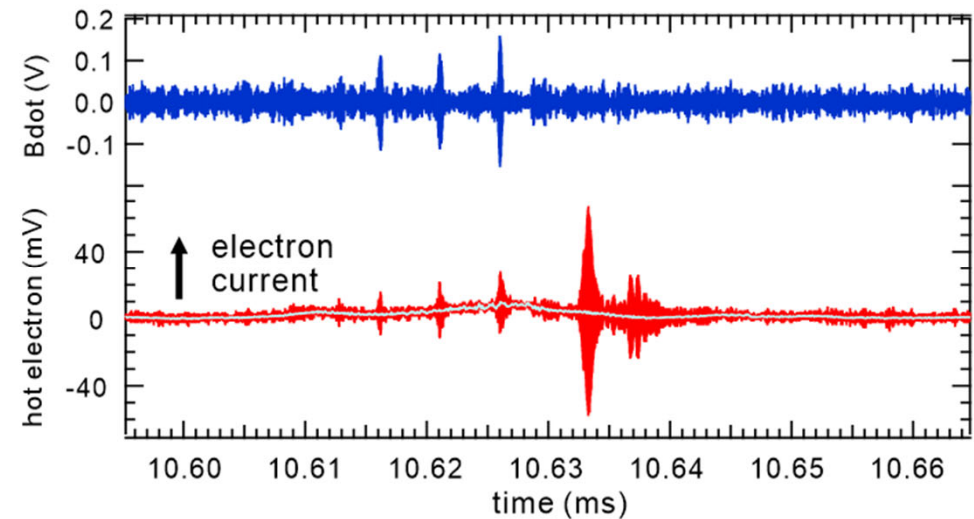
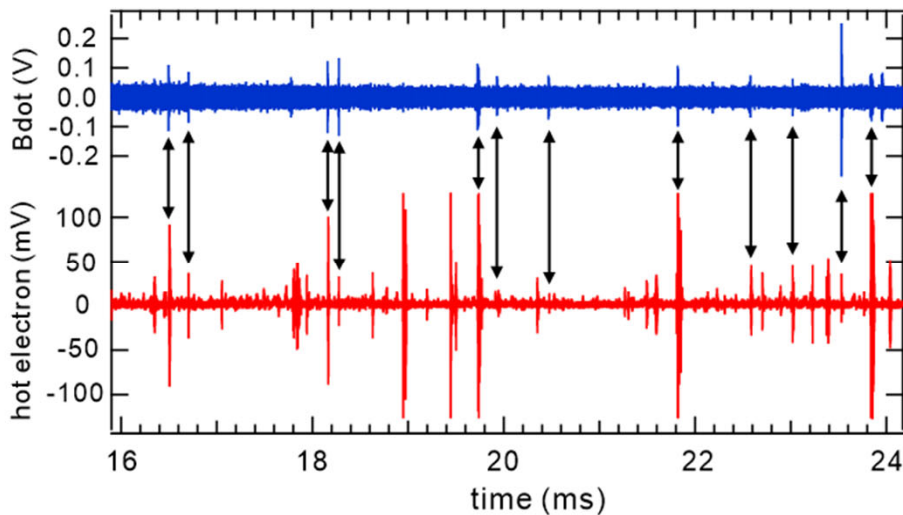
RT-1のプラズマでは
磁気圏と同様に広い範囲
で $f_p/f_c > 1$ であり
ホイッスラーは伝搬可能

可能な解釈として考えた2つの可能性のうち、

- ① RT-1ダイポールのコーラス放射は、弱磁場の周辺部に局在して発生するを支持する結果であり、強磁場領域ではホイッスラーは不安定化しない



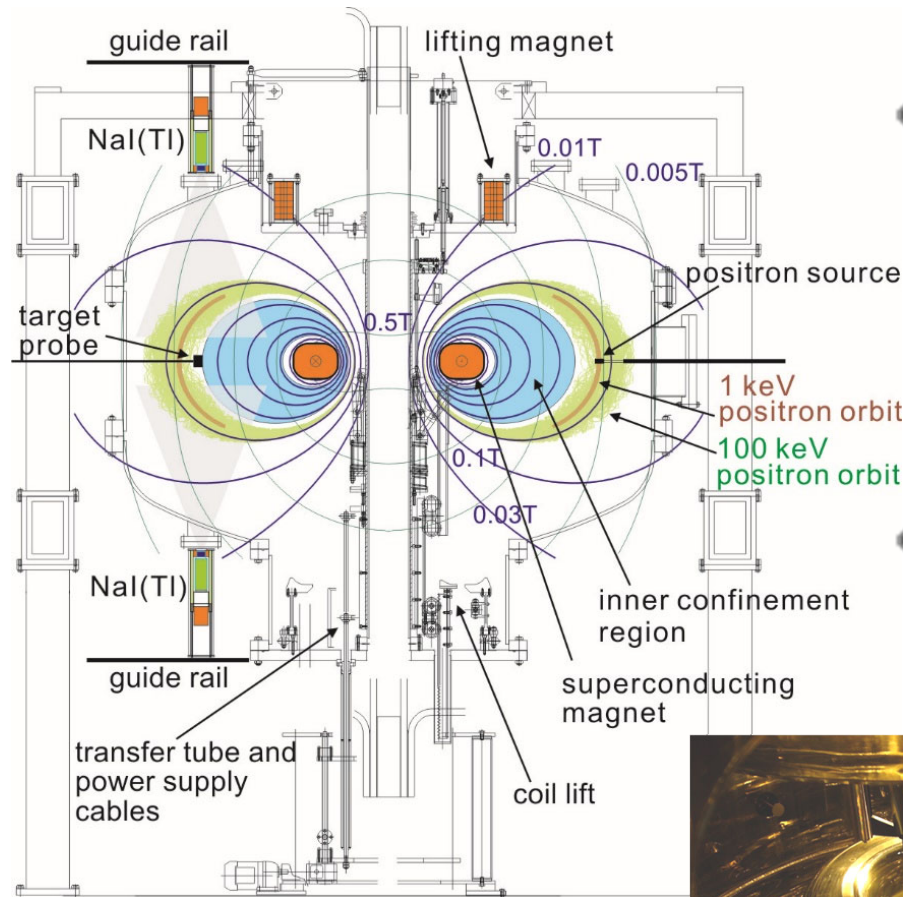
およそ3keV以上の電子を選択的に検出可能な簡易的なプローブ（Faraday cup）を導入



間欠的な磁場揺動イベントの発生と同期した損失電子電流を検出

- Positrons are injected from a Na-22 source located at the edge of the confinement region of RT1

2016 Saitoh+, PRE



RT1 (Ring Trap 1), superconducting levitated dipole of Uni. Tokyo, Japan

- In a dipole field generated by a ring current of 250kA ($R=0.25\text{m}$), orbit is calculated by numerically integrating

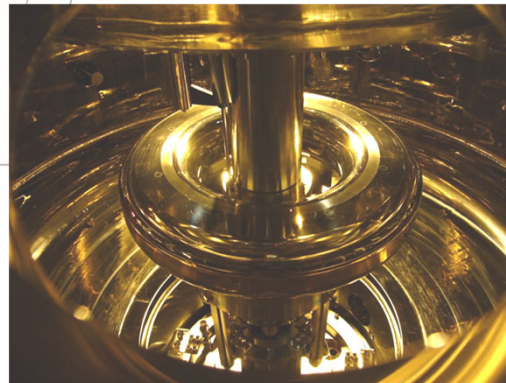
$$\frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- Relativistic adiabatic invariants:

$$\mu = \int \gamma v_{\perp} dl = \int \frac{\gamma^2 v_{\perp}^2}{B} dt$$

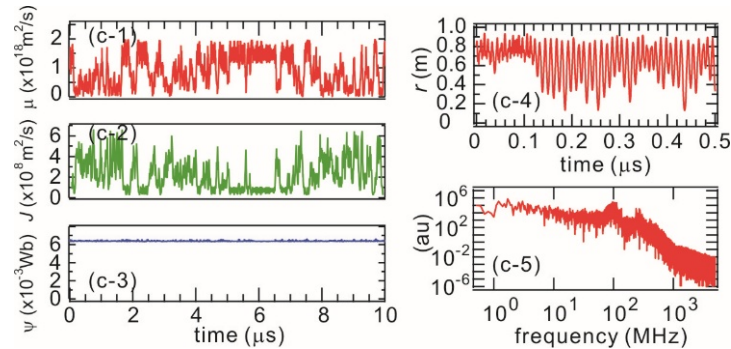
$$J = \int \gamma v_{\parallel} ds$$

$$\Psi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$



2006 Yoshida+ PFR, 2010 Yoshida+ PRL

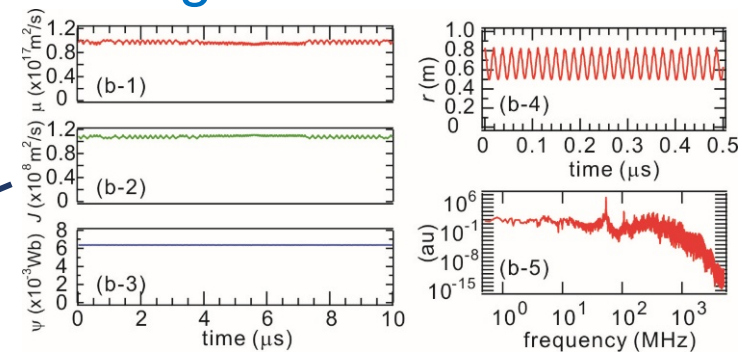
μ and J are not conserved



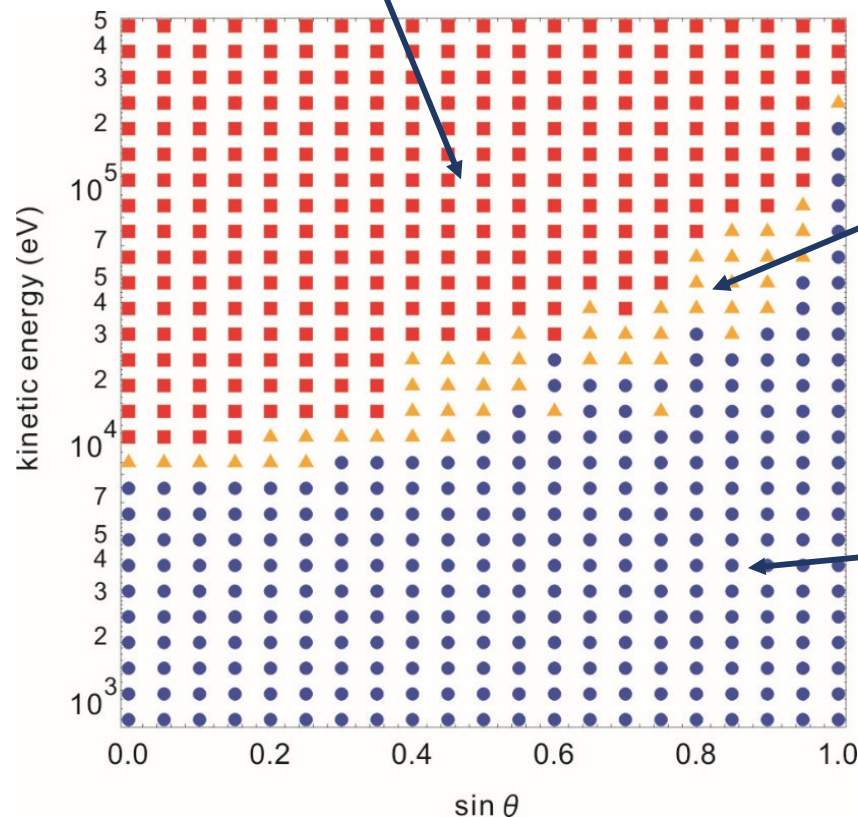
100 keV

- adiabatic invariants μ , J , Ψ
- radial position and power spectrum

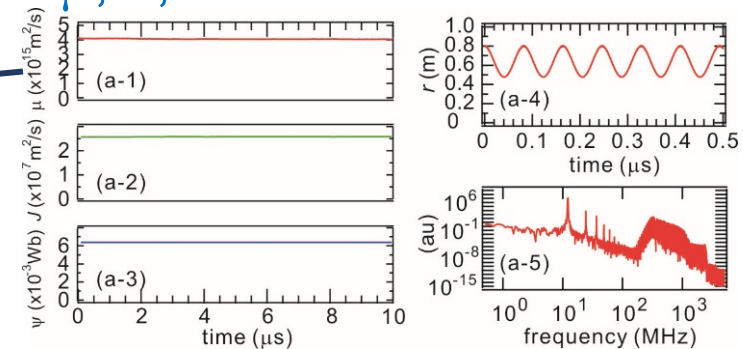
marginal



20 keV



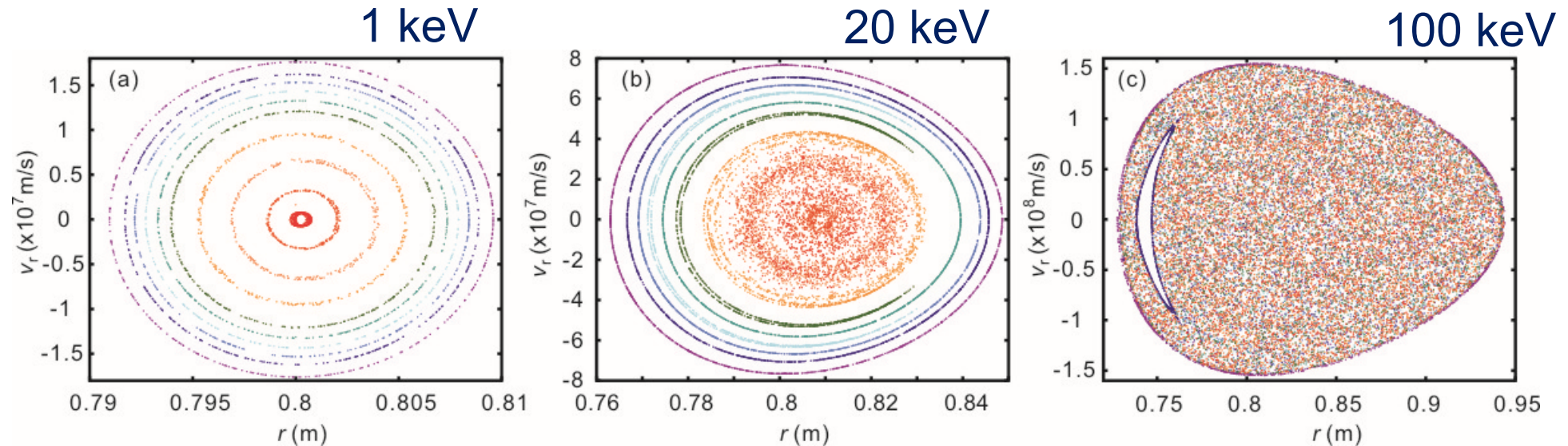
μ , J , and Ψ are conserved



1 keV

μ と J が保存しない場合, 保存量は2つ(エネルギーと Ψ)<系の自由度となりカオス軌道が出現する

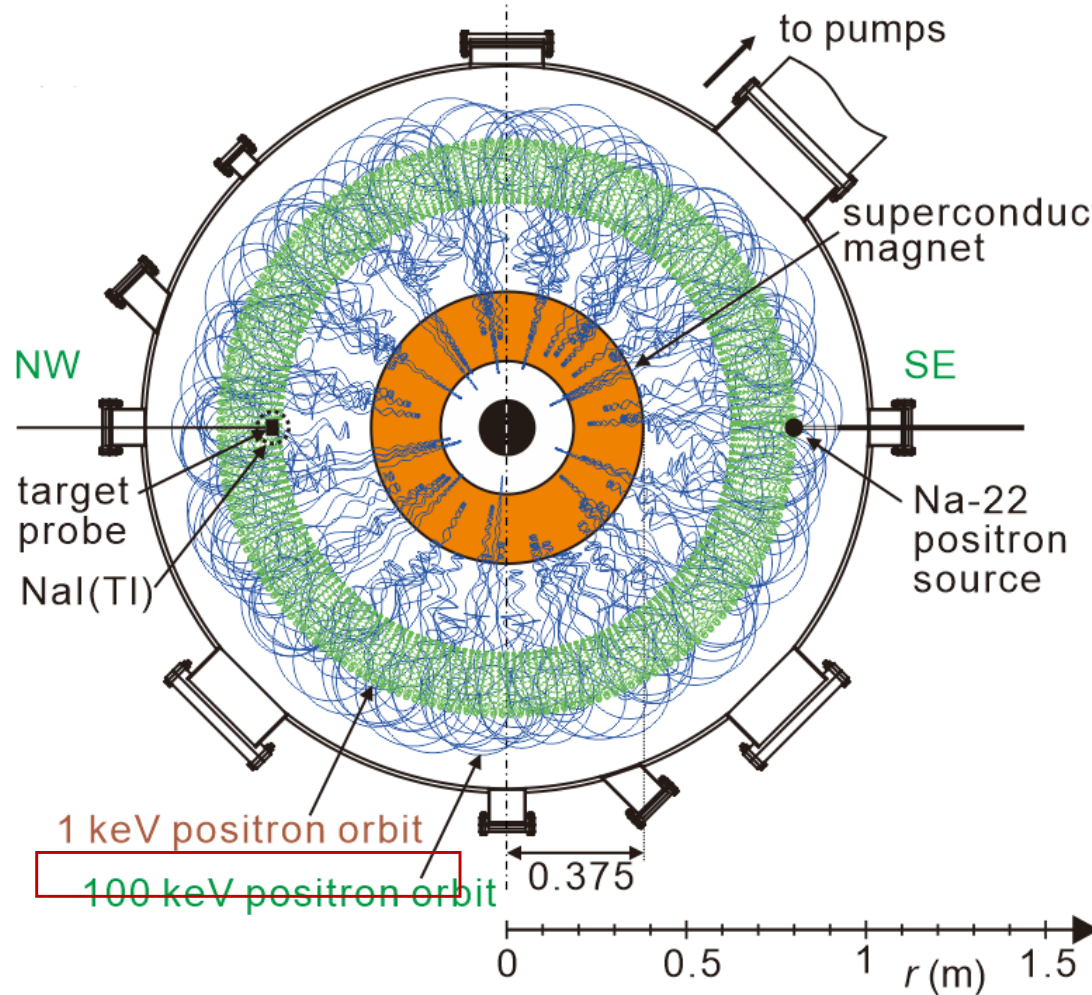
20



Poincaré plot of orbit in the phase space for different pitch angles for positrons of kinetic energy 1, 20, and 100 keV

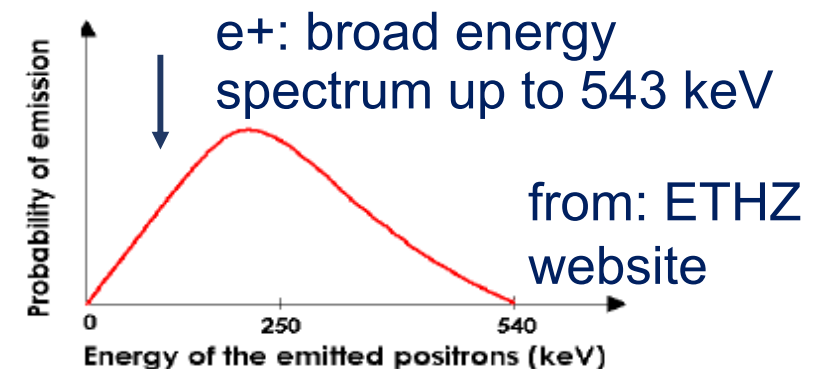
- Considerable ratio of positrons from Na-22 source exhibits chaos in the geometry of the RT1 levitated dipole
- Such particles may have long orbit (i.e., long trapping time) in RT1 before annihilation by recombination at the source

陽電子の運動エネルギーやピッチ角により, 周期的/カオス的に 見える軌道が出現する 21

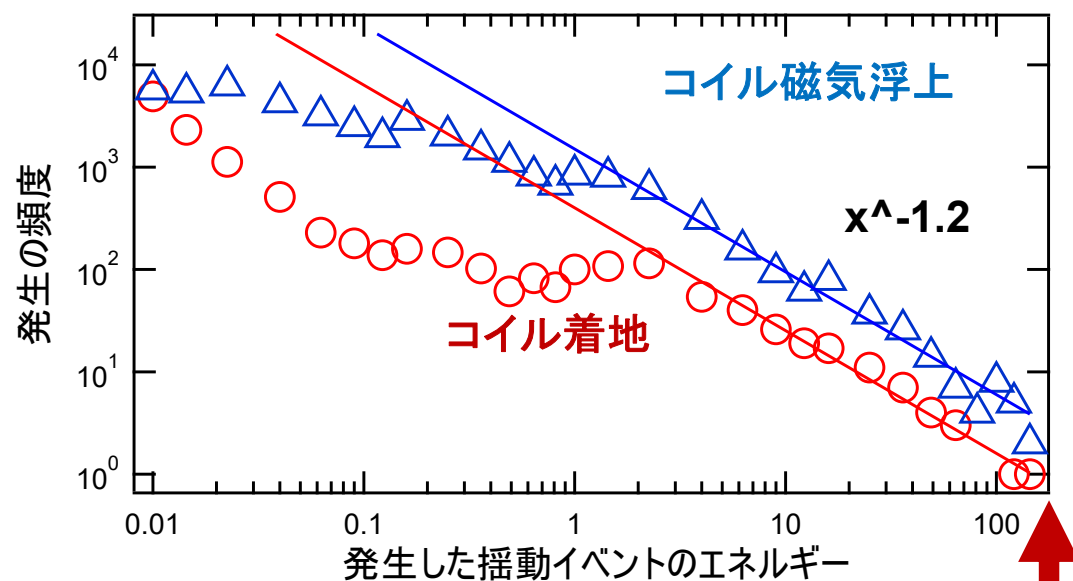


Top view of RT1, including typical orbits of positrons injected from Na-22 source

- Particle motion consists of gyro + bounce + toroidal drift
- Toroidal motion is realized by the curvature and grad-B drift
- Orbit properties are different according to particle energy
 - 1keV: periodic, return to Na-22 source after one circulation
 - 100keV: non-periodic motion



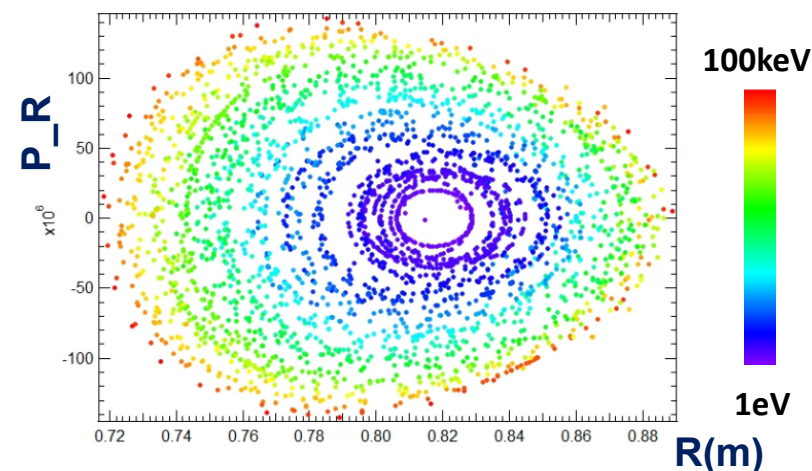
揺動の発生頻度と大強度のR波中の電子の加速



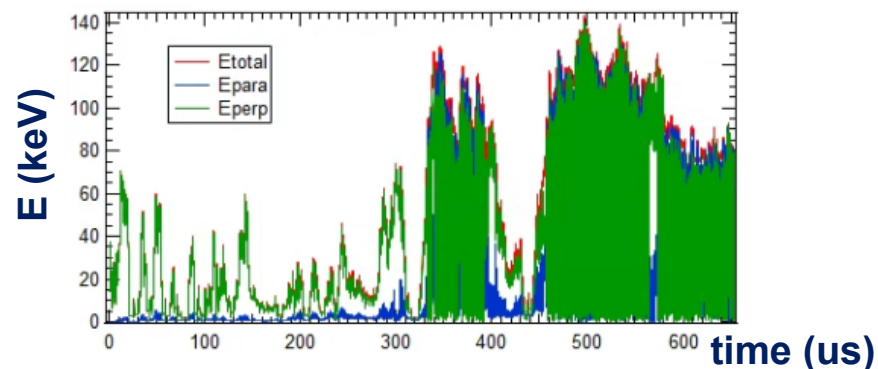
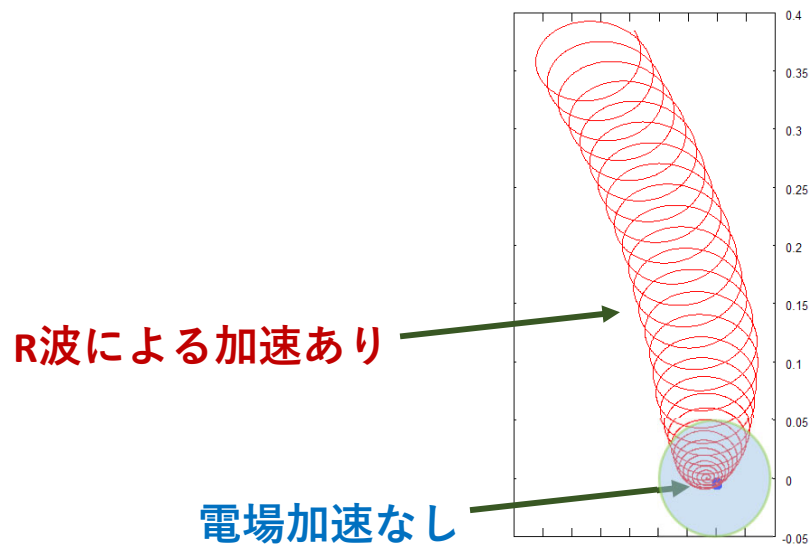
5760ms分の高速Bdot probeデータから抽出

$E \sim 3 \times 10^4$ 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し, RT-1の磁場に捕獲されない



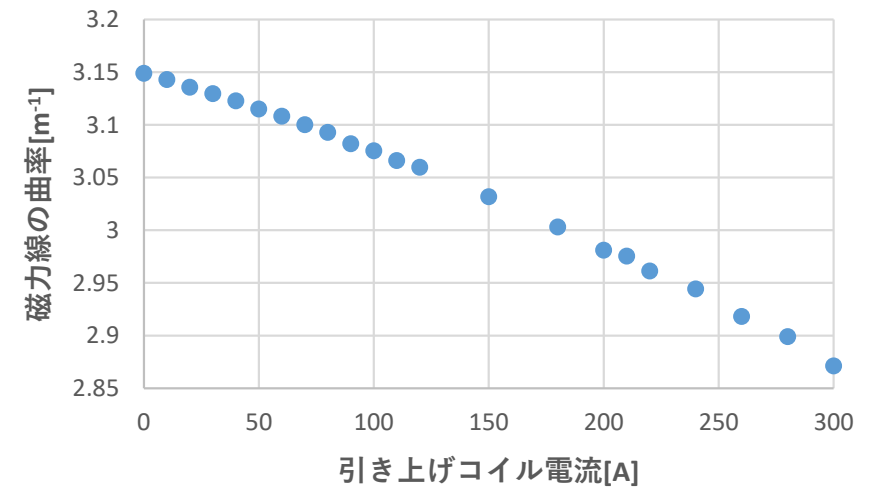
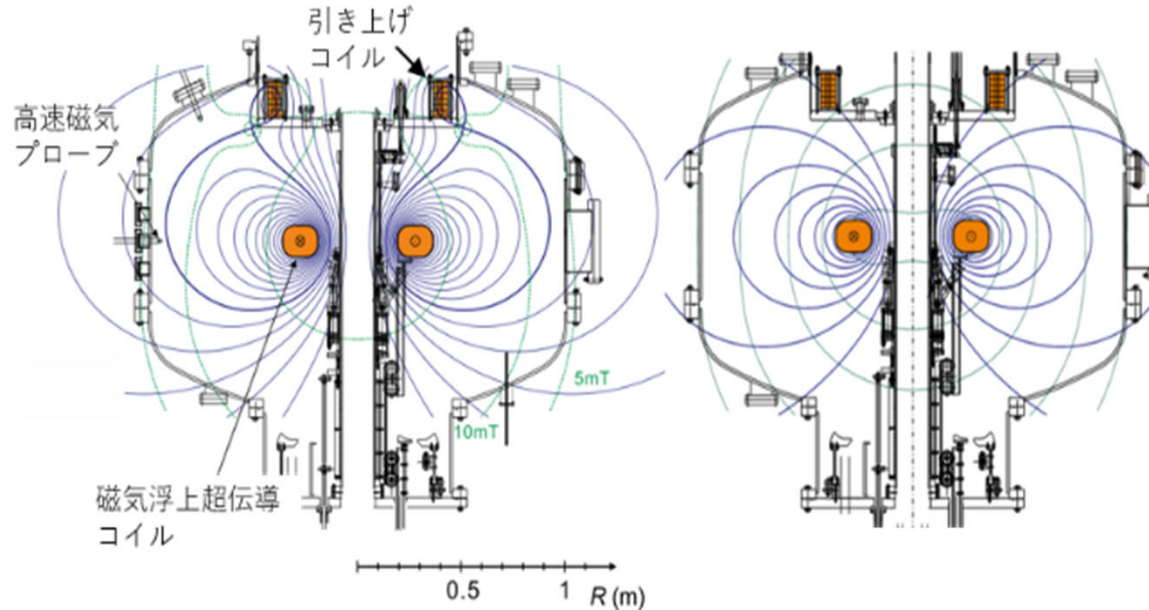
電子軌道のポアンカレプロット(最初の100us)



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

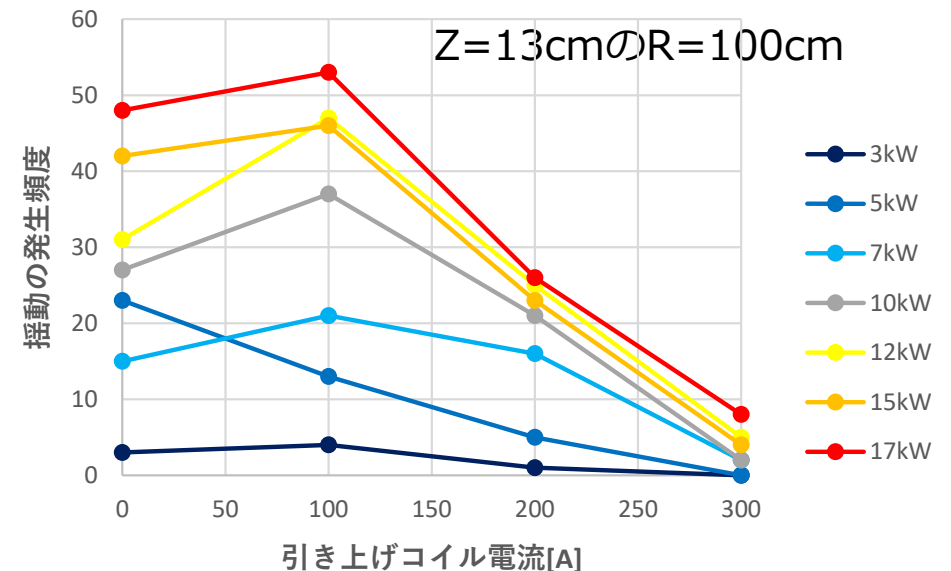
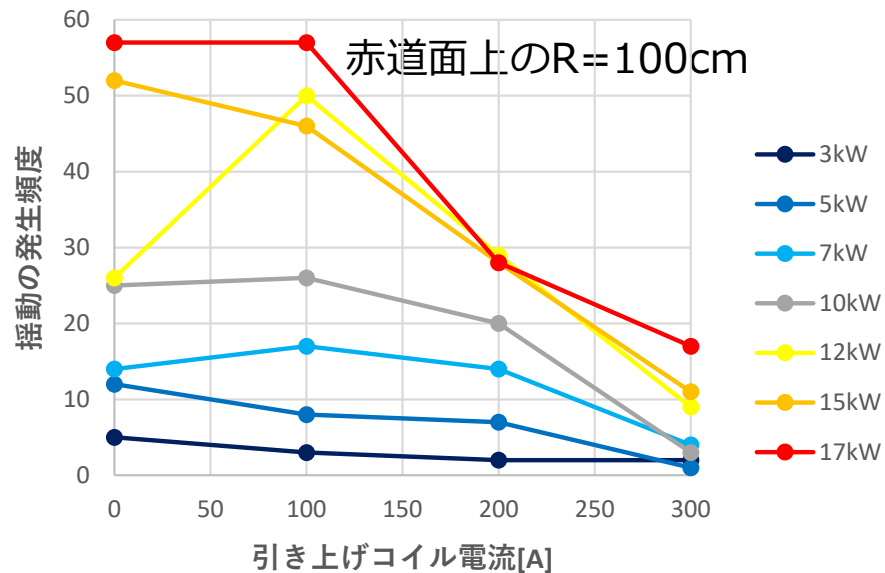
磁力線の曲率を小さく（ミラー効果を大きく）した際の発生頻度 23

青柳進之介



RT-1の引き上げコイルと磁力線の変化(左:引き上げコイル電流あり/右:電流なし)

引き上げコイル電流に対する磁力線の曲率の変化



各加熱電力での、引き上げコイル電流に対する揺動の発生頻度の変化

- 磁気浮上ダイポールRTによる実験研究の状況(先進核融合, 電子・陽電子, ホイッスラー)と進行中の課題について説明した
- 揺動計測や密度分布の再構成によれば, ホイッスラー波が不安定化してコーラス放射に成長するのは弱磁場の周辺部と思われる
- コーラス放射と同期した高エネルギー電子の掃き出しらしき信号を観測した
- 軌道計算によれば, 装置の周辺で10keVを上回る電子の軌道はカオス的となり, RT-1の磁場中で補足が不可能となる
- ホイッスラー波による加速で電子は短時間で10keV以上に達し, 観測された高エネルギー電子の信号は, コーラス放射による加速由来の可能性がある
- より長期的な課題として, 不安定化が発生するための速度空間情報や粒子の加速を検証することを目標としている