

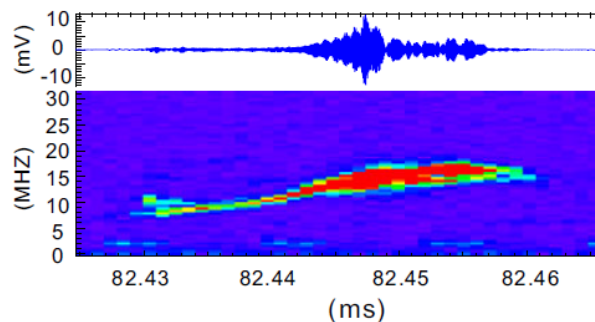
ダイポール磁場中の電子・陽電子プラズマ 生成計画と磁気圏現象の実験研究

東京大学新領域創成科学研究科(RT実験グループ) 齋藤晴彦

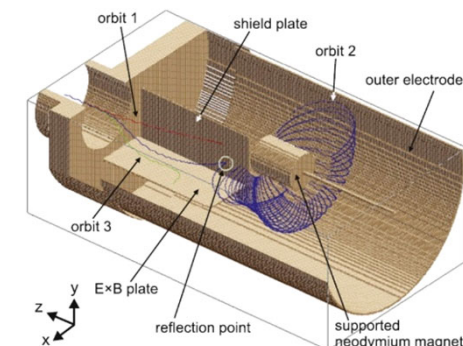
1. 研究背景: 「人工磁気圏」(磁気浮上ダイポール磁場装置)によるプラズマ実験
2. パルス陽電子源を活用した電子・陽電子ペアプラズマの生成と物性解明の計画
3. 内向き輸送と関わる低周波揺動と, 周波数変調を伴うホイッスラー波の自発励起
4. まとめと今後の課題



超伝導ダイポール実験装置



波動現象の実験室研究



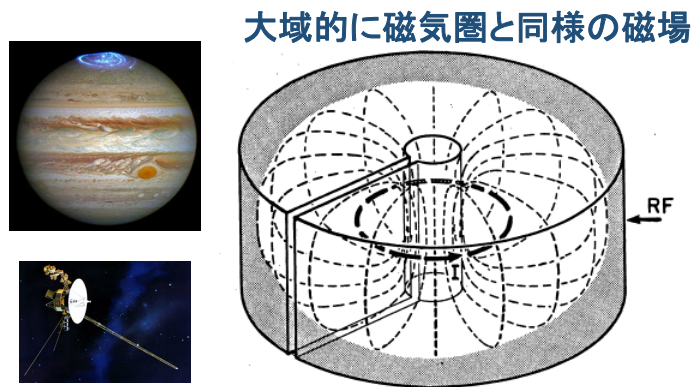
反物質プラズマの物性解明

1. 「人工磁気圏」による実験室プラズマ研究

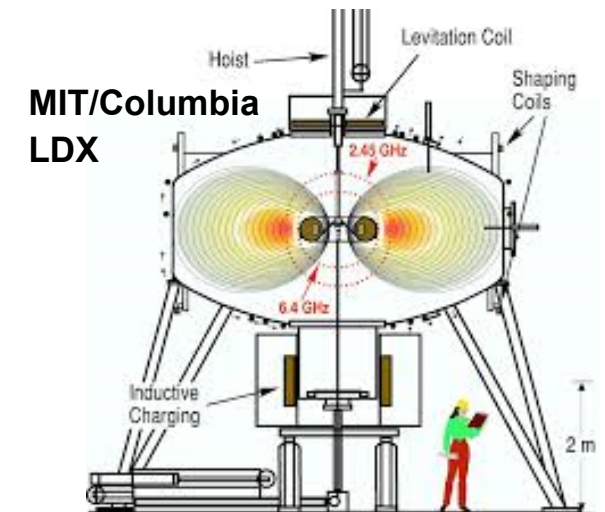
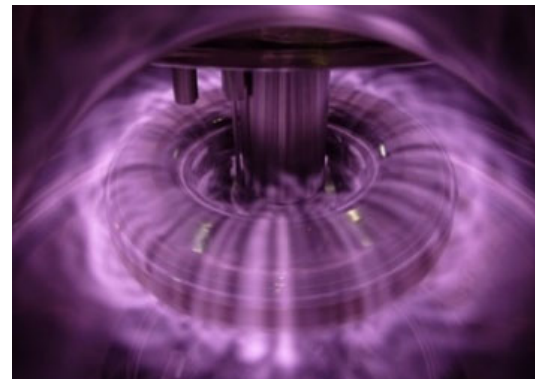
- 磁気浮上ダイポール：先進核融合に適した高 β プラズマ実現が本来の目的

1987 Hasegawa, Comm Plasma Phys. Contr. Fusion

"Dipole Fusion" inspired by plasma in Jovian magnetosphere



東京大学 RT-1



D-T $\Rightarrow$ D-D, D- ^3He 等の先進核融合

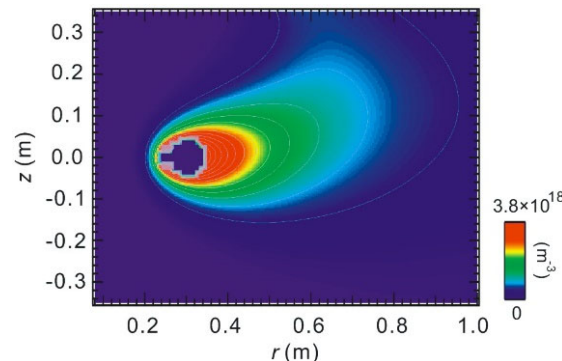
磁気浮上コイルによる人工磁気圏

2006 Yoshida+ Plasma Fusion Res.
2010 Boxer+ Nature Phys.

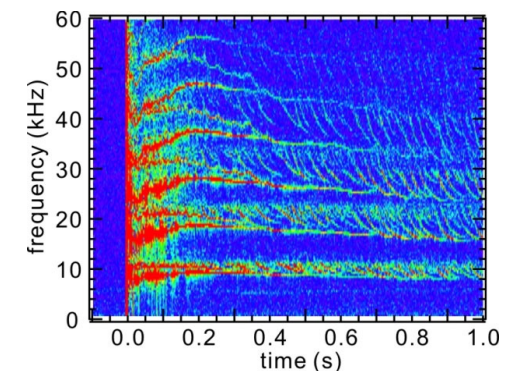
高温超伝導技術応用



- 核融合/ジオスペース現象
波動粒子相互作用, 緩和現象



- 非中性プラズマ・反物質
荷電粒子トラップ応用



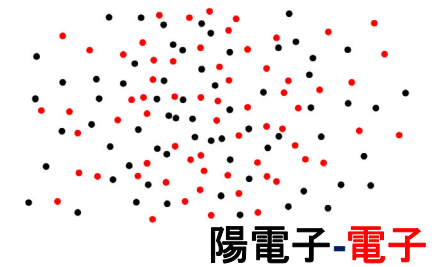
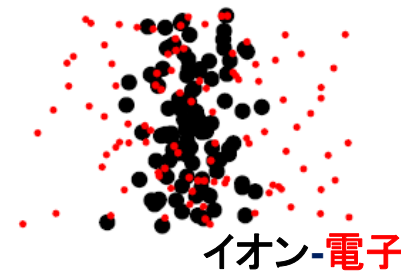
2013 Ogawa, Mito, Yanagi+ 低温工学

2022 Kenmochi, Nishiura+ Nuclear Fusion

2010 Yoshida+ Phys. Rev. Lett.

2. 磁場閉じ込めによる電子・陽電子ペアプラズマ生成計画

- 電子と陽電子の等質量のプラズマ
 - ・ ペアプラズマ, 天体現象との関連
 - ・ 大量の**低速**陽電子: ポジトロニウムのBEC, ガンマ線レーザ, 反水素実験等



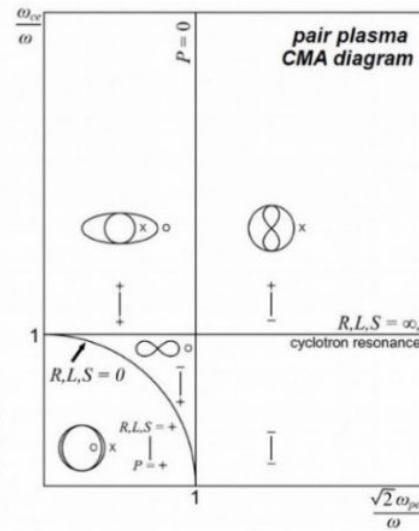
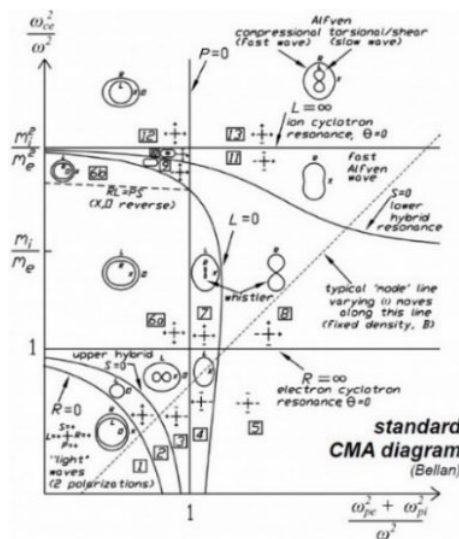
2020 Stoneking+ JPP
1978 Tsytovich+ CPPCF

多くの理論・数値計算による研究に対し, 実験研究例は少ない

➡ **低エネルギー陽電子の磁場閉じ込めによるペアプラズマ実現を計画**

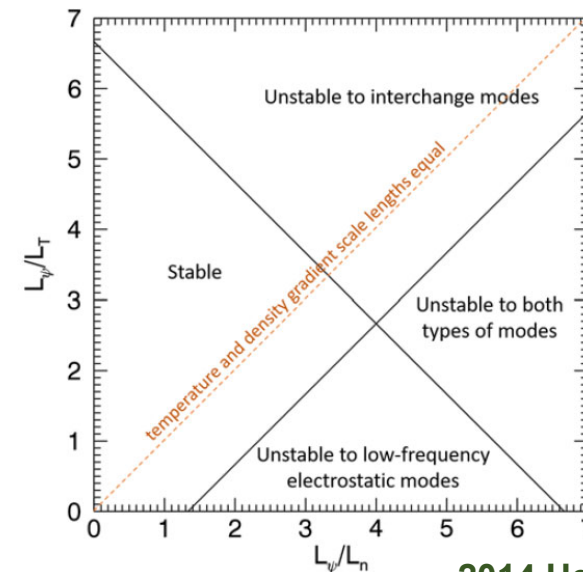
イオン・電子系

陽電子・電子系



2017 Stenson JPP

縮退した分散関係(波動特性)



2014 Helander PRL

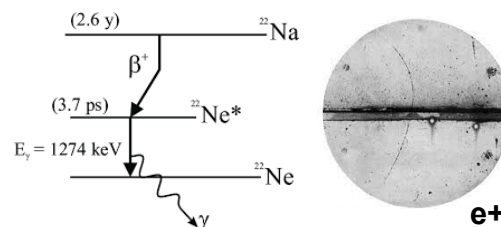
運動論による強靱な安定性の予言

電子・陽電子ペアプラズマ生成の困難さと解決方法

● プラズマ条件を満たすには

- 10^9 以上という大量の陽電子を集積し, 更に
- 同数の電子と同時捕獲することが挑戦的, 実験的に未踏の領域

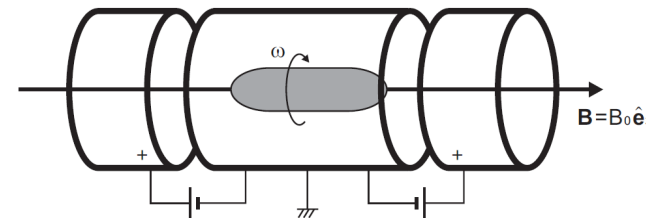
● 反物質科学



放射線源による低速陽電子
ビーム強度は 10^6 e+/s台が限度

大強度陽電子源と入射/捕獲技術が必要

● プラズマ物理 (非中性プラズマ)



標準的トラップ (直線型: 電場使用) では捕獲不可能

ペアプラズマ閉じ込め原理が未開拓

● 近年のこの分野における進展

1. 人工磁気圏による任意非中性度のプラズマ閉じ込め (核融合科学の応用)

1987 Hasegawa Comm. Plasma Phys. Cnt. Fusion, 2004 Saitoh+ Phys. Rev. Lett., 2010 Yoshida, Saitoh+ Phys. Rev. Lett.

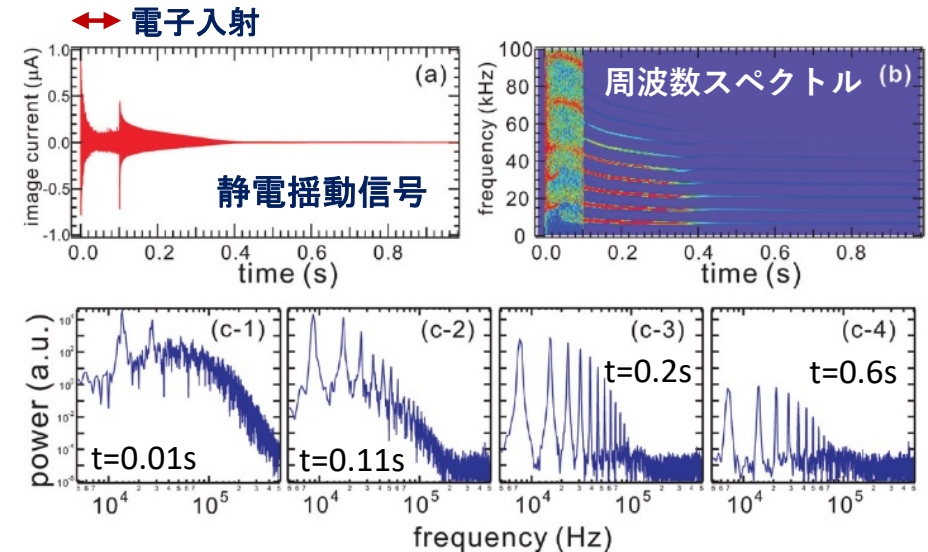
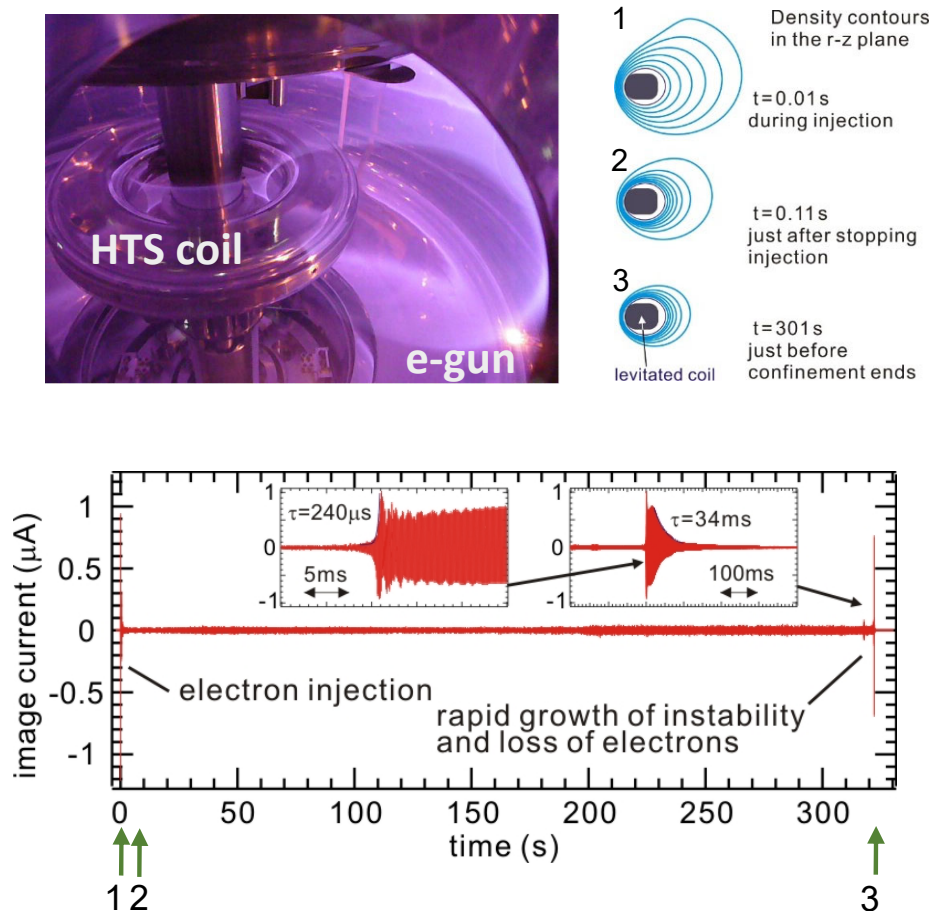
2. 陽電子の粒子線技術と蓄積法の進展, 人工磁気圏への入射と閉じ込め実証

2015 Saitoh+ New J. Phys., 2018 Stenson+ Phys. Rev. Lett., 2018 Horn-Stanja+ Phys. Rev. Lett.

➡ 人工磁気圏と大強度陽電子源により, 電子・陽電子プラズマが実現可能

トロイダル系での非中性(純電子)プラズマの安定生成

- 人工磁気圏：端部を持たない(電場を使用しない)荷電粒子閉じ込めが可能



乱流揺動が選択的に減衰し、永続するゆらぎを示す強靱な構造が出現する。閉じ込め限度は真空度が規定(RT-1では300秒以上)。

2004 Saitoh+ Phys. Rev. Lett.

2010 Saitoh+ Phys. Plasmas

ダイポール磁場中では、強磁場領域への凝集はエントロピー増大を伴う「拡散」過程。

2018 Sato&Yoshida Phys. Rev. E

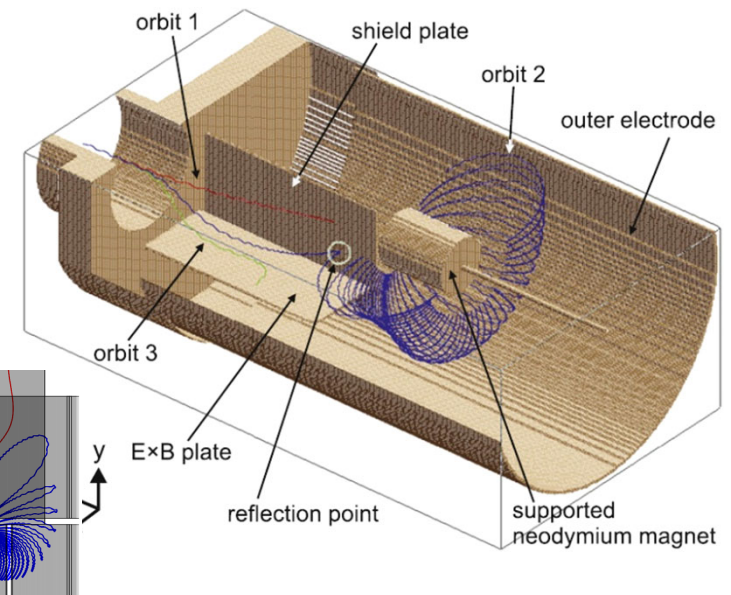
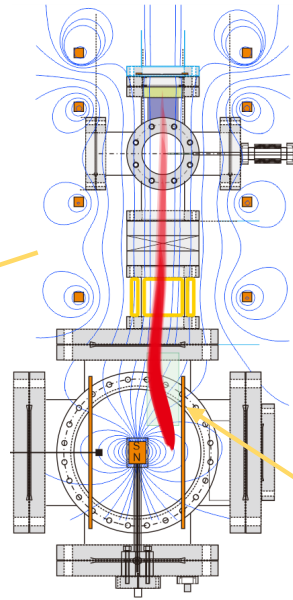
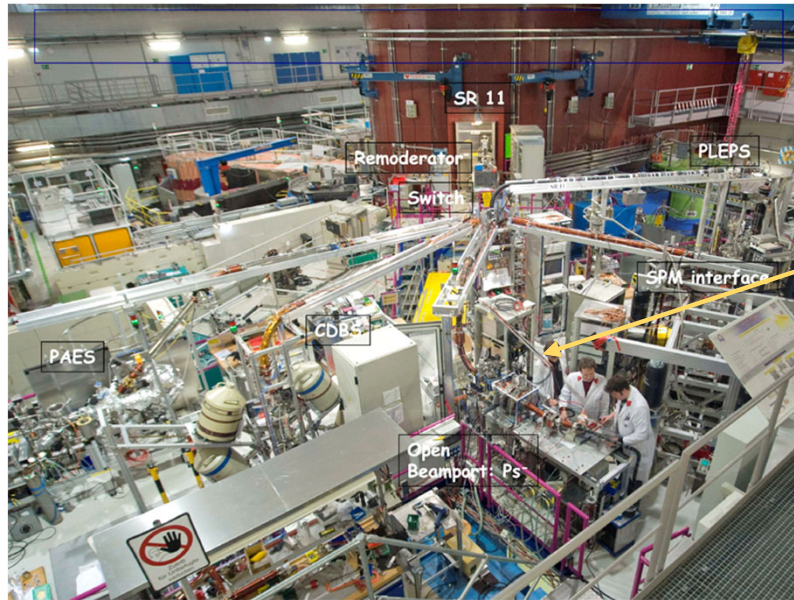
- 純電子プラズマの渦構造が安定に維持される(>300s)
- 原理的に純磁場閉じ込めは陽電子閉じ込めにも適用可能

➡ 陽電子と電子の同時閉じ込めによる反物質ペアプラズマ生成に活用

NEPOMUC陽電子源@ミュンヘン工科大学における入射実験

- ダイポール磁場中への陽電子ビームの高効率入射と閉じ込めの検証

原子炉(中性子源)による陽電子源: 放射線源より約2桁の強度向上 $\sim 10^9 \text{e}^+/\text{s}$



ミュンヘン工科大学FRM-II原子炉(20MW)のNEPOMUCビームラインと、構築した永久磁石によるダイポール磁場実験のプロトタイプ。

ダイポール磁場中へのドリフト入射による陽電子導入の数値計算による最適化と入射を実証。

2015 Saitoh+ New J. Phys.

- 反物質プラズマ生成の鍵となる、高効率のドリフト入射(効率100%)と長時間閉じ込め(1秒以上, 真空度が規定)を, 陽電子ビームで検証

2018 Stenson+ Phys. Rev. Lett.;
2018 Horn-Stanja+ Phys. Rev. Lett.

電子・陽電子プラズマに向けて必要なmile stones達成

目標とする電子・陽電子ペアプラズマのパラメータと実現方法



AIST
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

パルス陽電子源

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

リニアックベース
パルス陽電子ビーム

(既存)

10^{10-11} e+

バッファガス+超伝導トラップ

陽電子の前段蓄積,
高速パルス引き出し

$\sim 10\mu\text{s}$ で
入射

$>10^9 \text{ e+}$
 $10^{11-12} \text{ m}^{-3}$

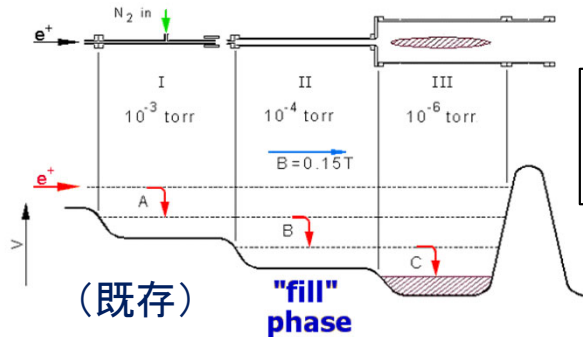
反物質ペア
プラズマ生成

磁気浮上ダイポール

物性解明
蓄積装置
として利用

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

- 大量陽電子の蓄積と引き出し
入射期と閉じ込め期の分離を実現



超伝導トラップ
への陽電子蓄積

(既存)

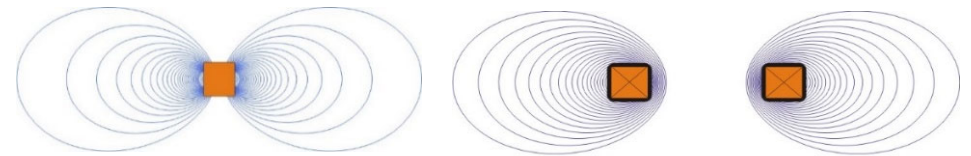
非弾性衝突を活用した減速・捕獲効率の改善

マックスプランク, UCSDグループとの連携研究

- 人工磁気圏での反物質プラズマ実現
電子と陽電子をプラズマとして同時閉じ込め

ダイポール開発

高速・パルス入射

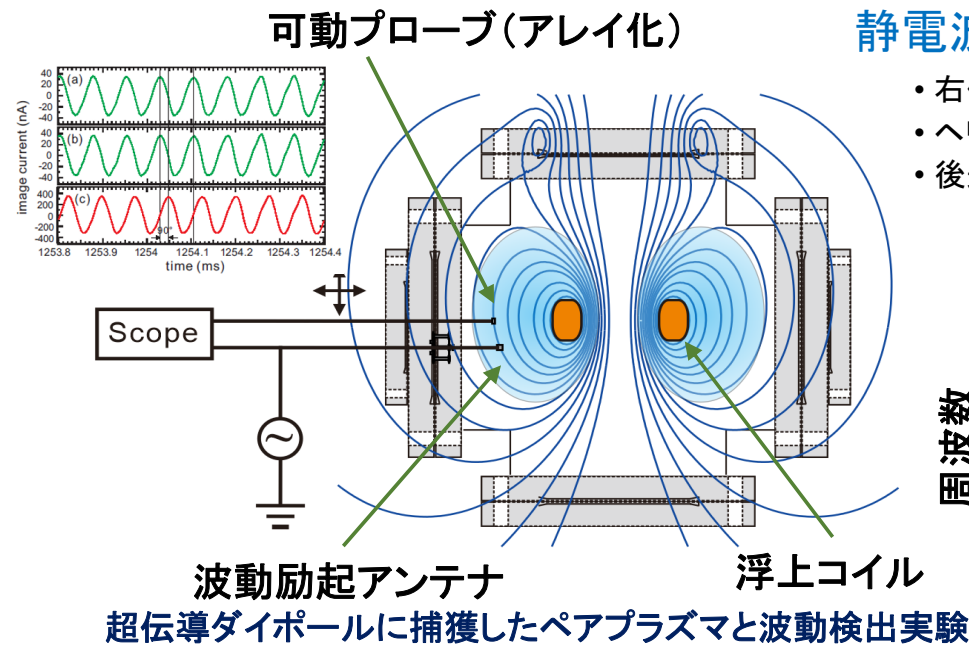


- プロトタイプダイポール (永久磁石による)
- 超伝導磁気浮上ダイポール「人工磁気圏」
閉じた磁気面による純磁場閉じ込め

(ここまでは「プラズマを作る」方法について)

ペアプラズマとしての物性解明の今後の研究課題

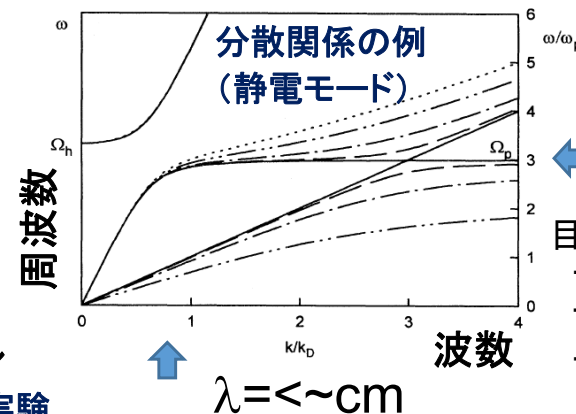
- 密度制御による**集団現象**発現と波動励起/揺動観測による**分散関係**解明



静電波・電磁波, 後進波を含む非線形波動特性の検証

- 右偏波と左偏波の分散関係が共通
- ヘリコン波, ホイッスラー波のブランチが消滅
- 後進波(位相速度と群速度が逆)の予想

1995 Zank Phys. Rev. E

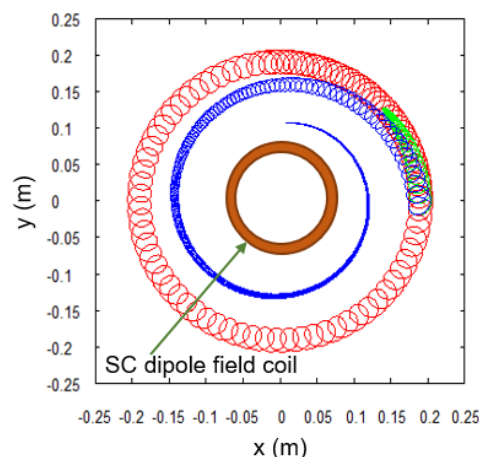


測定対象の多くのモードは
現実的な計測可能範囲内

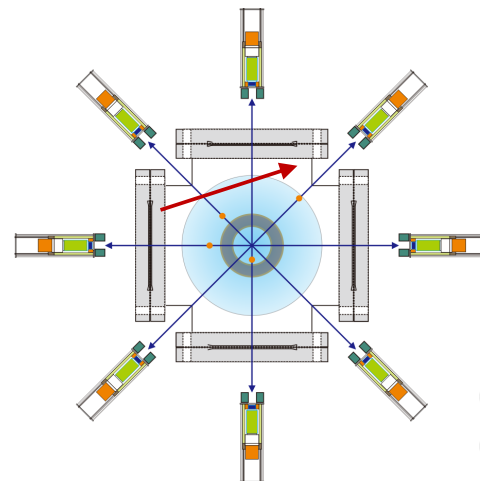
$f_p = 2.8 \text{ MHz}$

目標パラメータ $B = 0.01 \text{ T}$, $N_e = 10^{11} \text{ m}^{-3}$
サイクロトロン周波数 $f_{ce} = 280 \text{ MHz}$
プラズマ周波数 $f_p = 2.8 \text{ MHz}$
デバイ長 $L_d = 2.3 \text{ cm}$

- 分割電極を用いた回転電場による径方向輸送と構造形成



回転電場による径方向圧縮



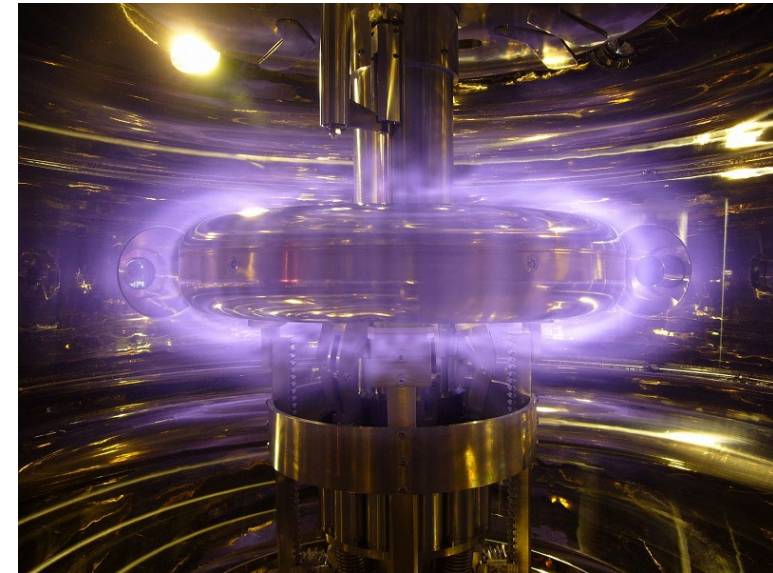
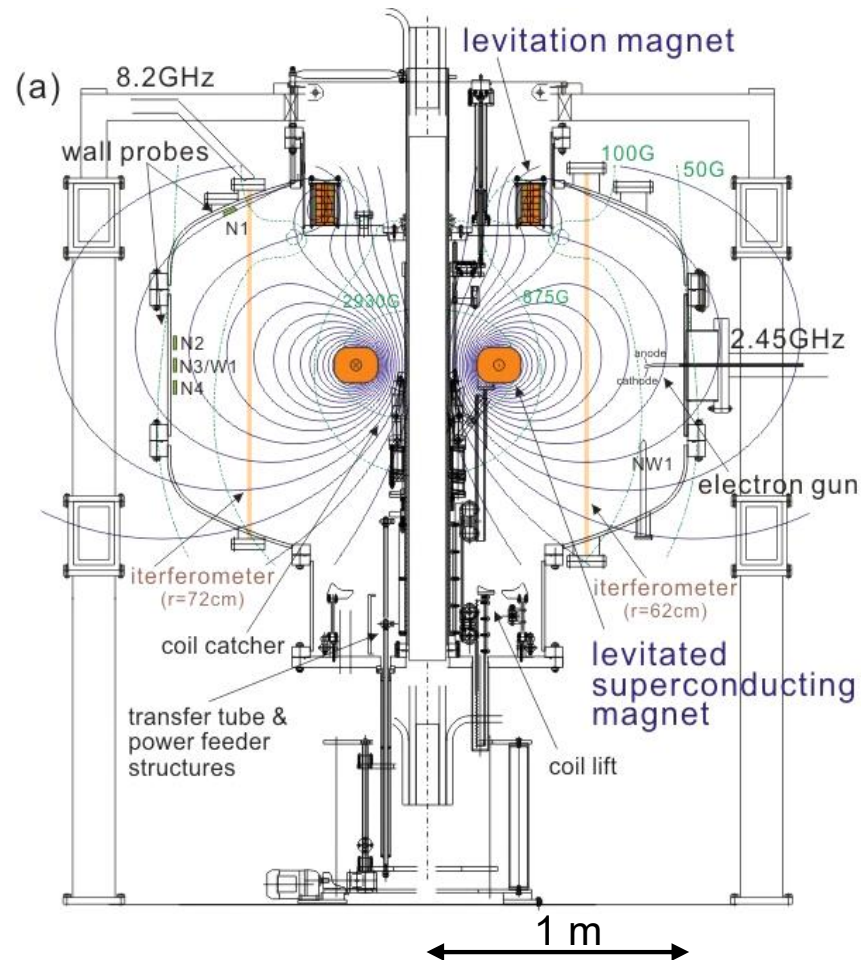
- 511keVガンマ線の計測による密度推定

- 残存中性粒子との消滅ガンマ線の計測
- ペレットの入射・飛翔による位置推定
- トモグラフィ手法による密度再構成

- イオン・電子系と異なる密度勾配限界を示すか?
- 不安定性の駆動は, 密度勾配を決定する主機構か?

3. 磁気圏型装置の高 β プラズマで観測される波動現象

● RT-1磁気浮上ダイポール装置

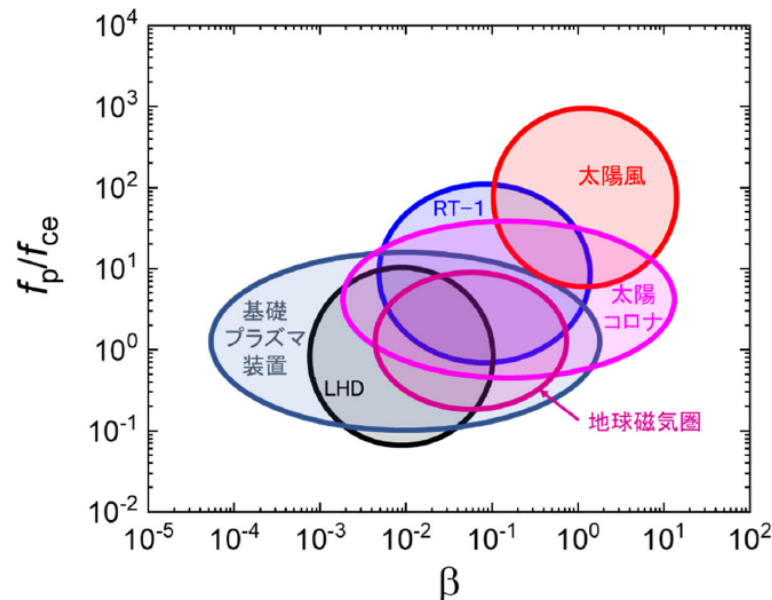
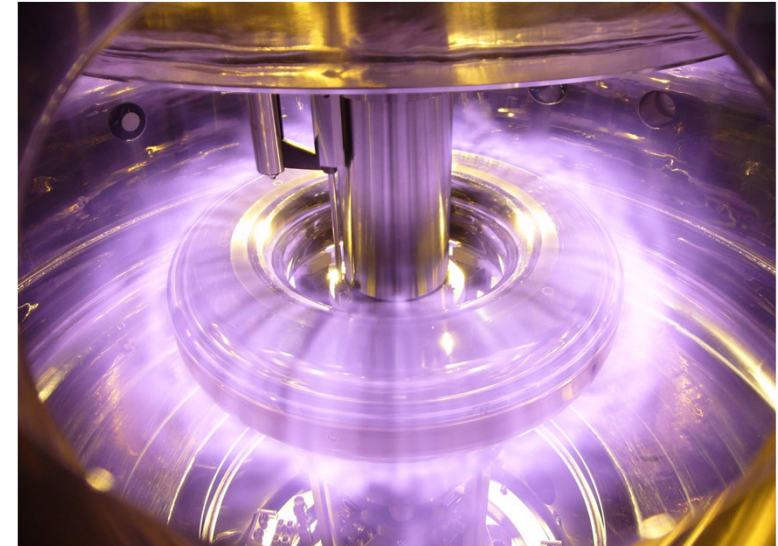
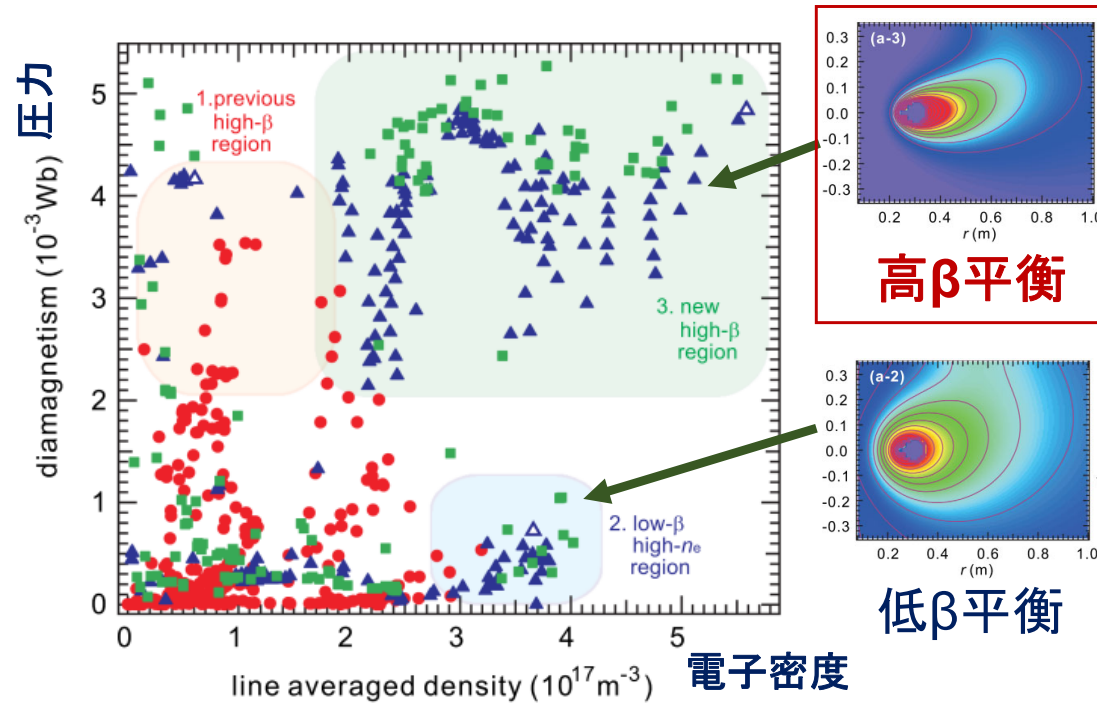


- 高温超伝導(Bi-2223)コイルをフィードバック制御により磁気浮上, 約6時間の無冷却運転
- 2.45GHz/8.2GHzマイクロ波によるECH, ICH
- 磁気計測, 分光, トムソン散乱, X線計測, コヒーレンスイメジング等の各種計測

- 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
- 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と宇宙プラズマとの比較

2015 Nishiura+ NF, 2017 Nishiura+ NF

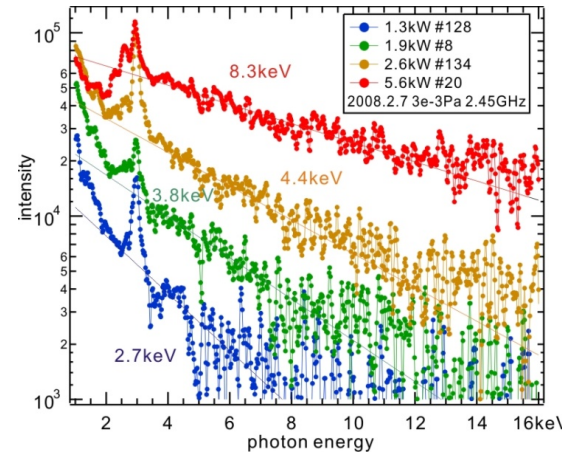
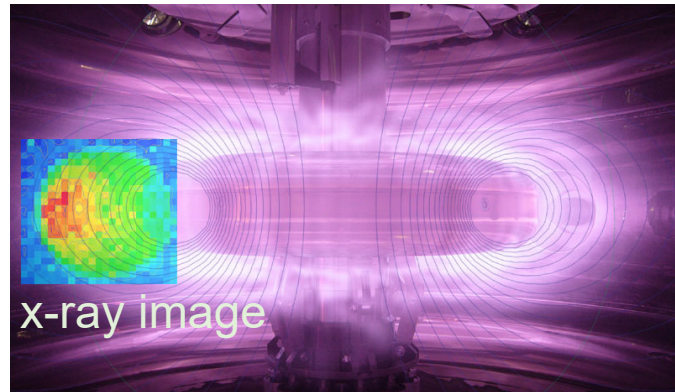


- 運転条件最適化により高 β 達成(~秒)
 - Local beta $\sim 100\%$, $n_e \sim 10^{17} \text{m}^{-3}$
 - 1秒以上持続(加熱の制限による)
 - 高温電子($> \sim \text{keV}$) 高ベータプラズマ
- スペースのプラズマとの比較
 - high Ne, high B, but several similarities

高温電子が圧力を担うRT-1の高 β プラズマ

2015 Kawazura+ PoP.

- 電子サイクロトロン共鳴加熱と内向き輸送 -> 温度非等方性を持つプラズマ



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

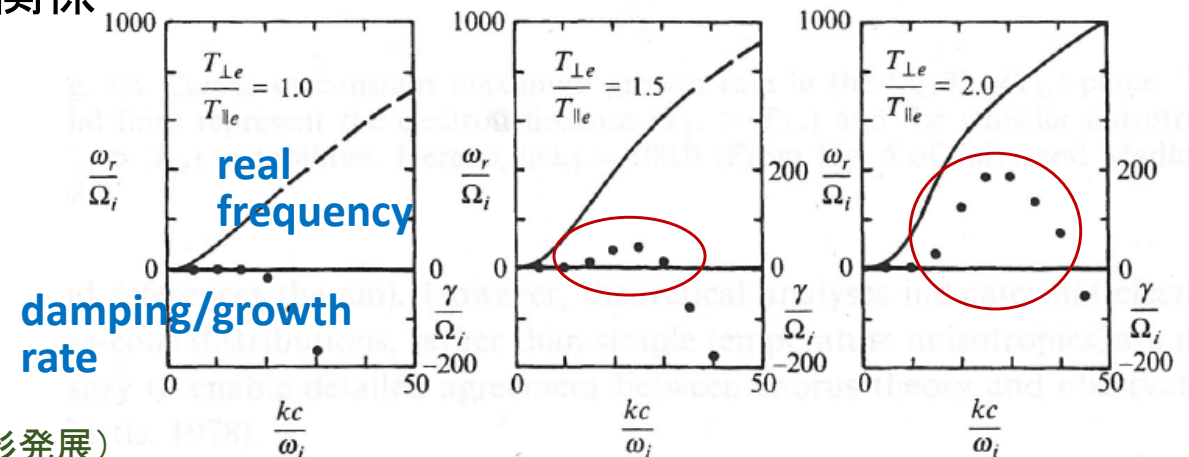
温度非等方性がある時のR波の分散関係

1966 Kennel Petschek

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

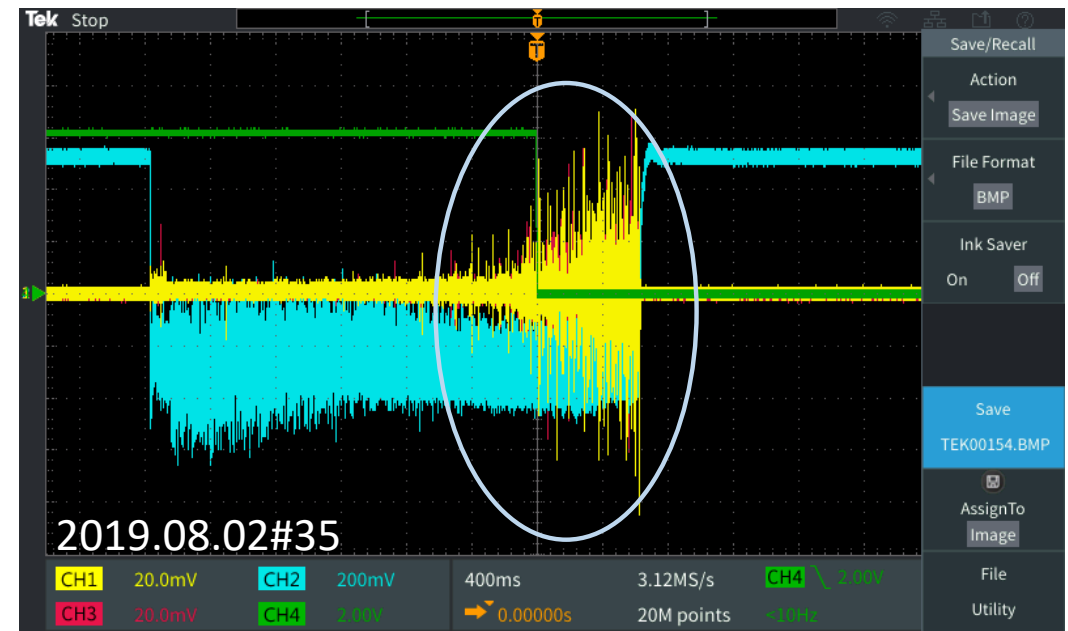
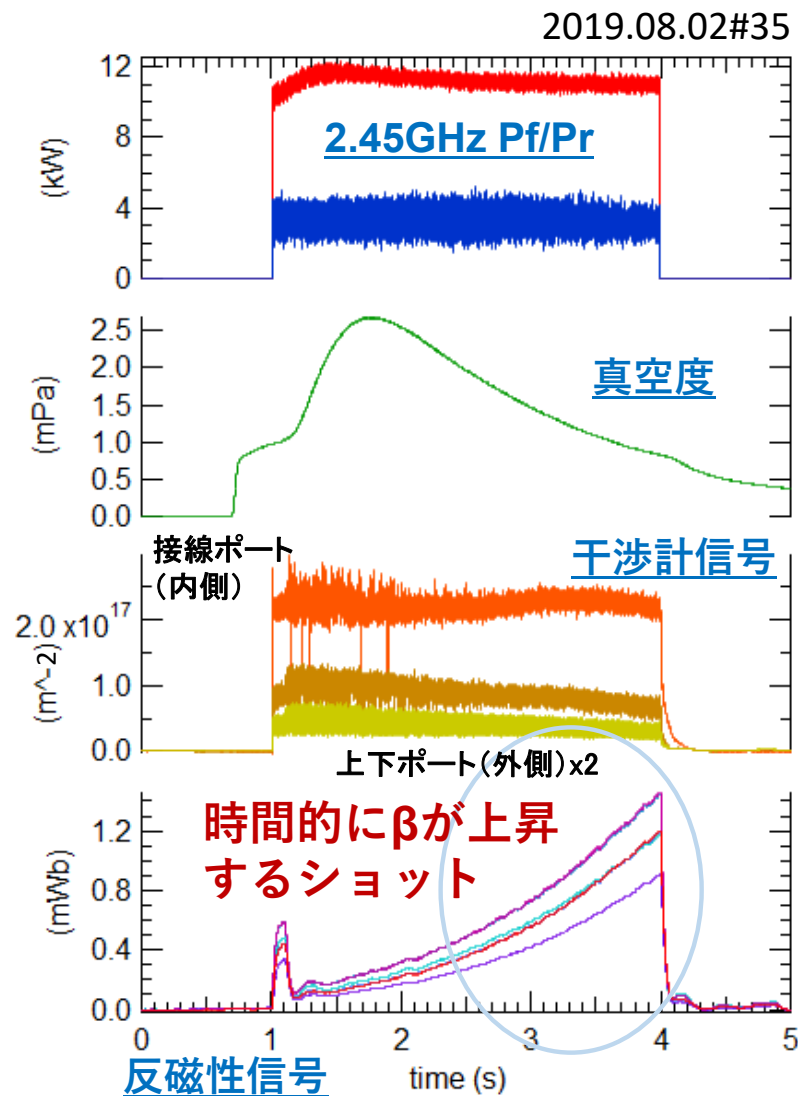
ホイッスラー成長の必要条件(線形)

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



電子サイクロトロン周波数帯域の揺動の間欠的励起

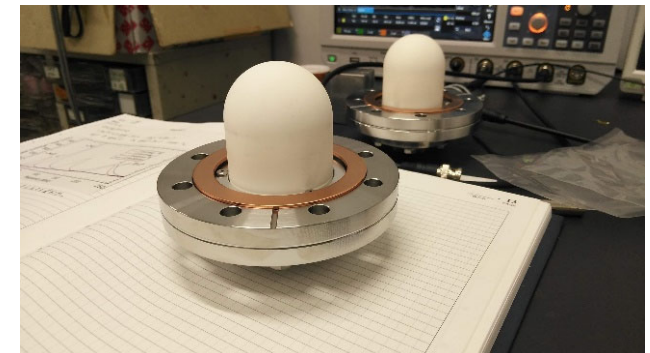
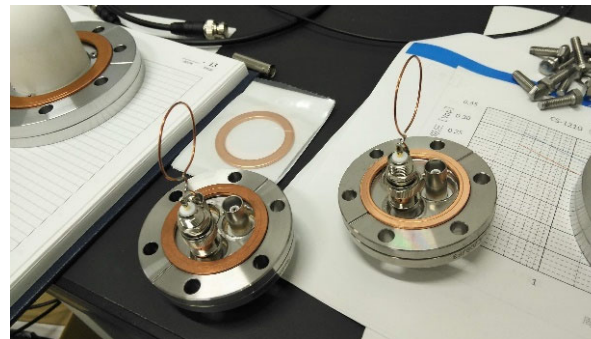
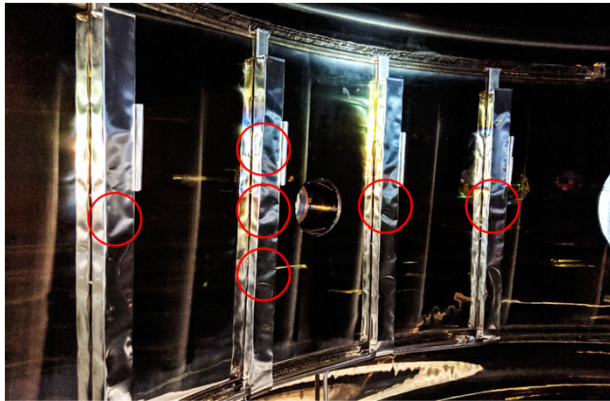
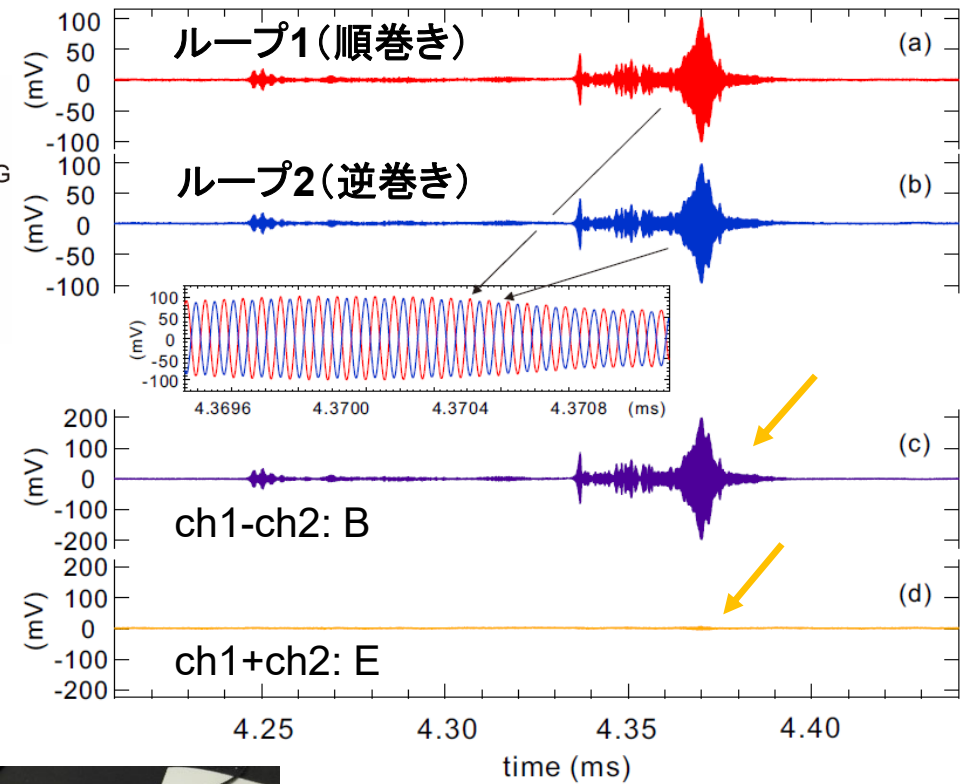
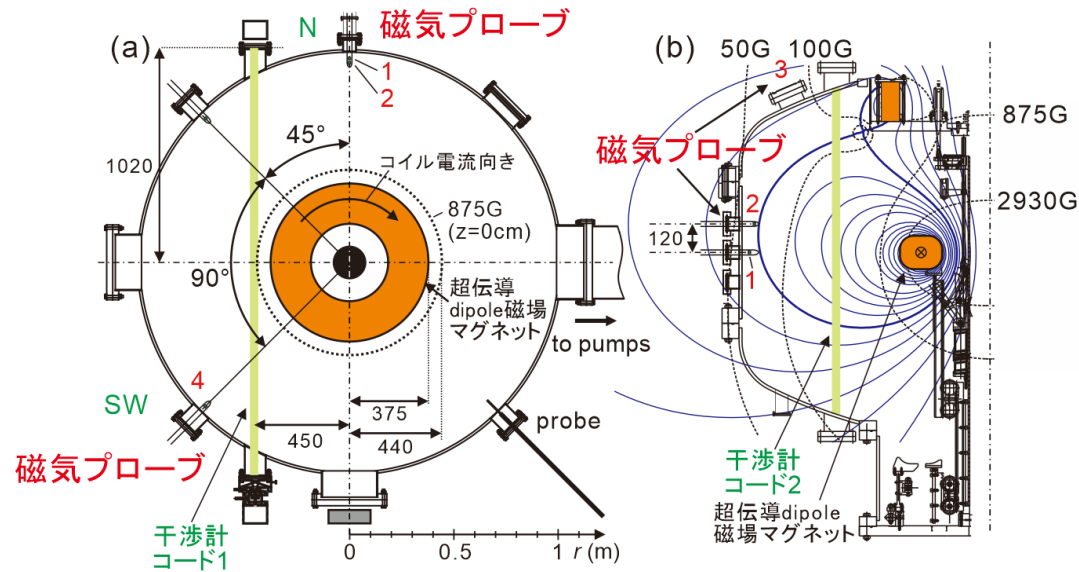
ECHにより高温電子成分が顕著になりプラズマ圧力（反磁性信号）が増大すると、 $\sim$ MHz帯域の磁場揺動が観測される



ch1: 磁気プローブ1, ch2: 干渉計, ch3: 磁気プローブ2

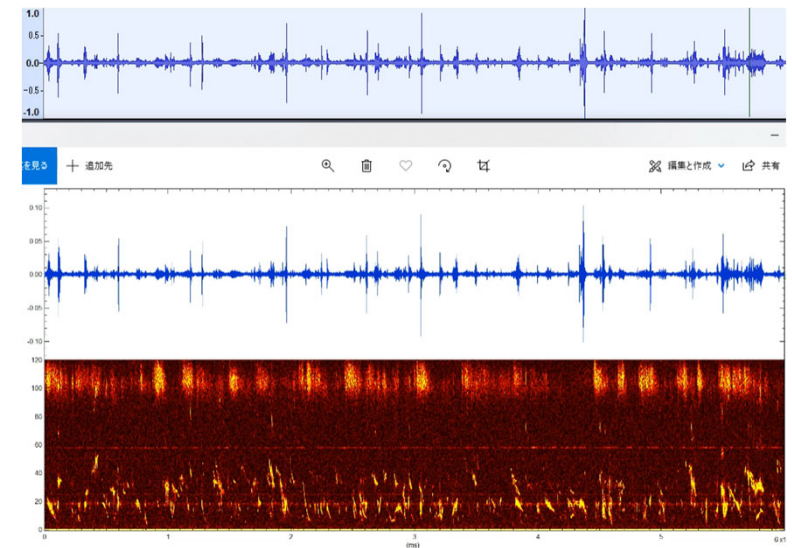
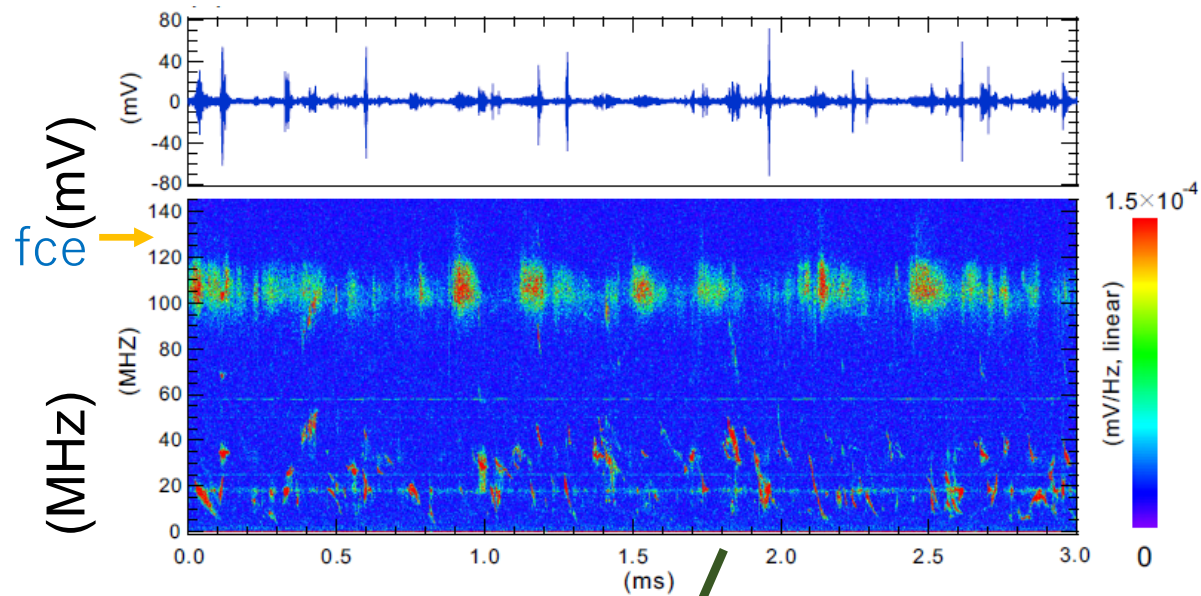
- 3秒間のマイクロ波入射で、時間的に中性粒子密度が低下しプラズマ圧力が立ち上がるショット
- プラズマ圧力は、温度非等方性を持つ高温電子によって支えられている

電子サイクロtron周波数帯域の電磁場揺動の間欠的励起



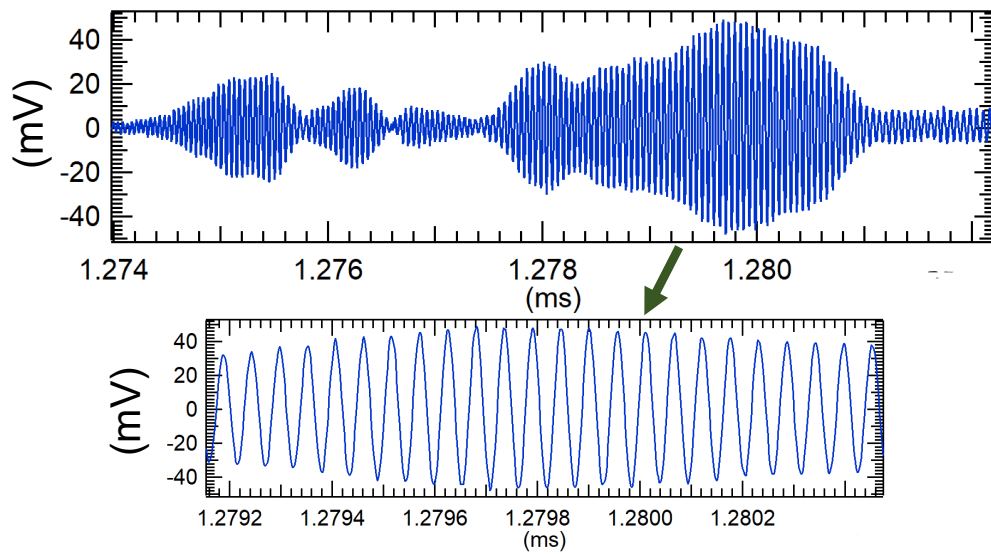
- コヒーレントな磁場揺動に加え, 弱い静電的成分も持つ

電子サイクロトロン周波数帯域の揺動の間欠的励起

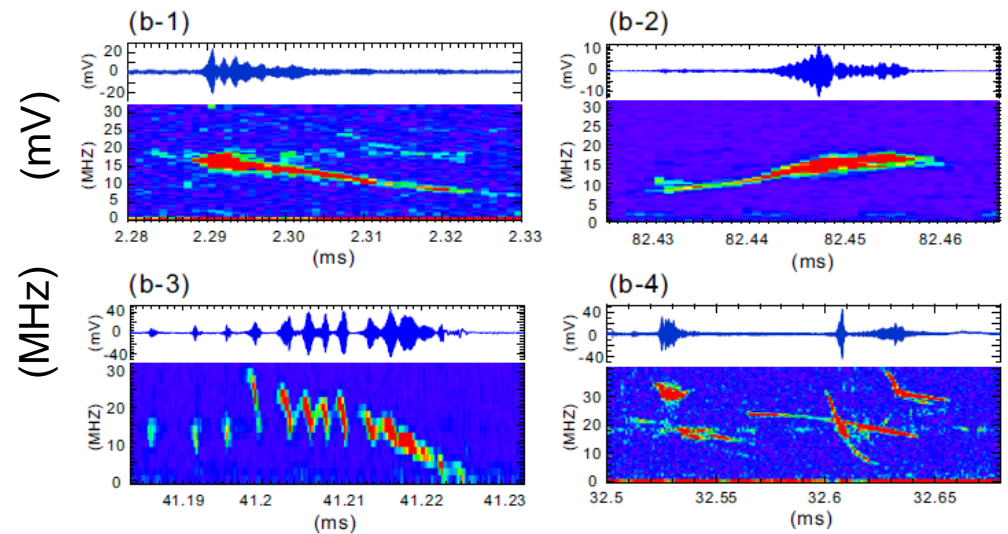


0.1f_{ce}~0.4f_{ce}, 0.6f_{ce}付近: B, f_{ce}付近: E

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



位相空間の分布非等方性と波動の分散関係は、ホイッスラーの特徴として矛盾しない

- 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

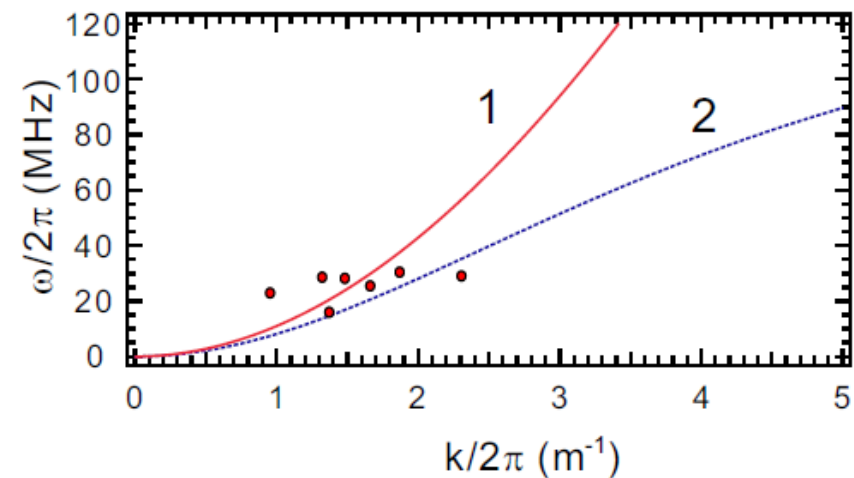
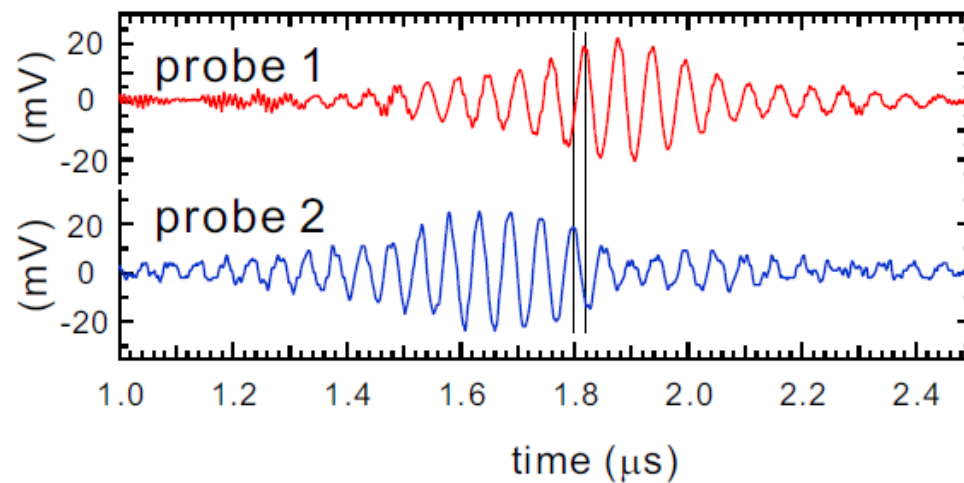
$$f < f_{ce} A / (A + 1)$$

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

- 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

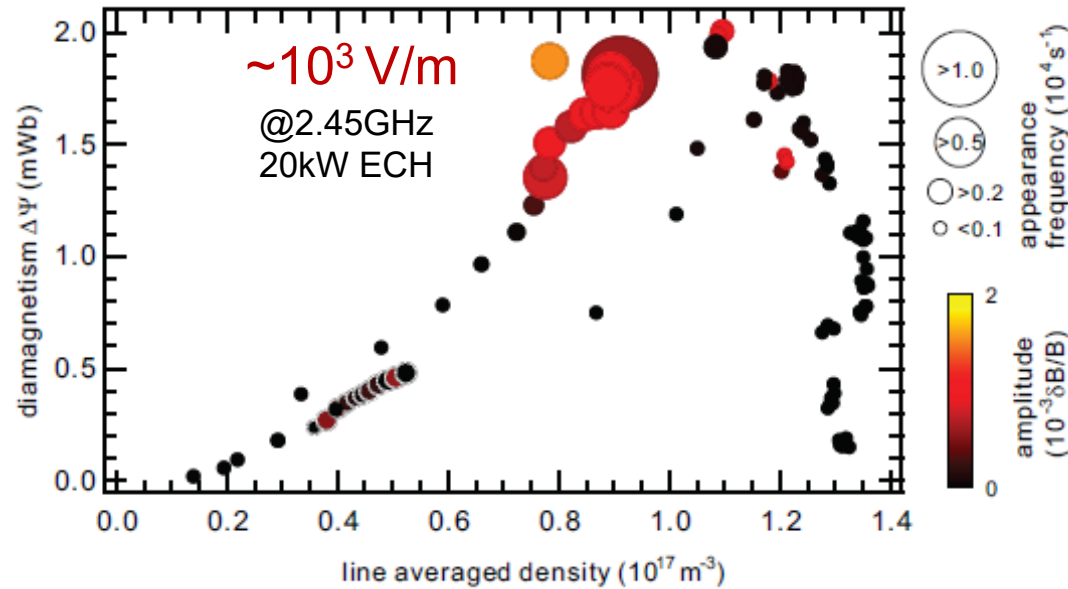
- 分散関係 (初期データ)

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

R波による電子の効果的加熱と軌道のカオス化の可能性



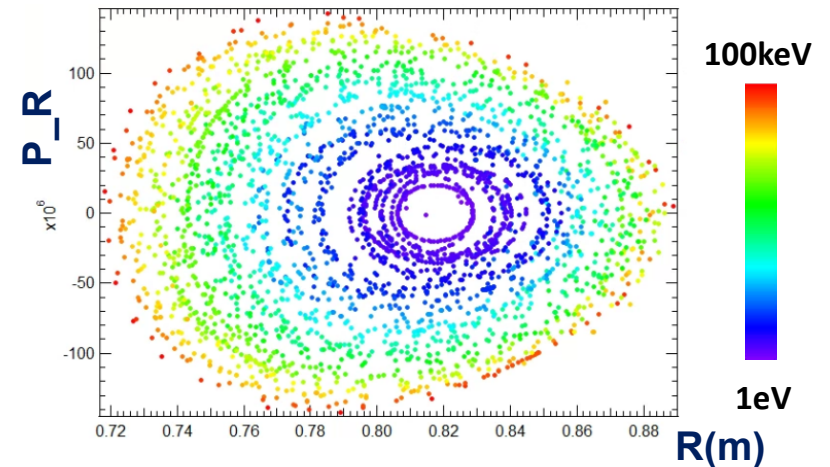
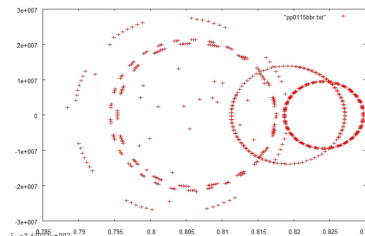
$$H = \mu\omega_c + J\omega_b + \Psi\omega_d + \boxed{N_c}$$

1990 Murakami, Sato, Hasegawa, PoF; 2016 Saitoh+ PRE

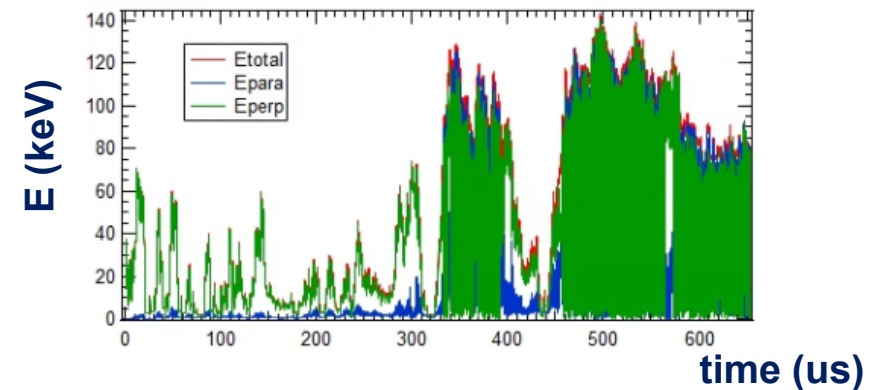
軸対称なダイポール系で保存する断熱不変量は、
様々な原因(低周波揺動, 非対称性, モード結合,
粒子加速)により非保存となる。

- 電子はR波により効果的に加熱され, その後, カオス的挙動(エネルギーの交換, 軌道の不規則化)を示す。

初期の10eV(周期的)から加速が進むにつれ準周期的を経てカオスになる。
ミラートラップされない軌道が出現する。



電子軌道のポアンカレプロット(最初の100us)

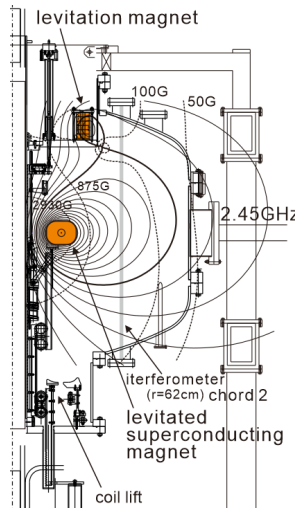


2×10^4 V/m (観測された揺動の10倍程度)
のR波を印加した場合のテスト粒子計算

- R波による効率的な加熱と粒子損失の可能性

RT-1の粒子運動の時間スケールと、揺動の分類と関連

- 周期運動と対応する作用(断熱不変量)

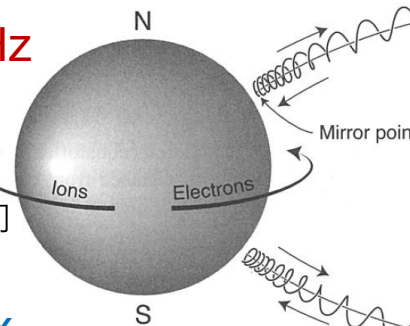


RT1:
50-3000
Gauss

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

トロイダル方向
ドリフト運動

magnetic flux



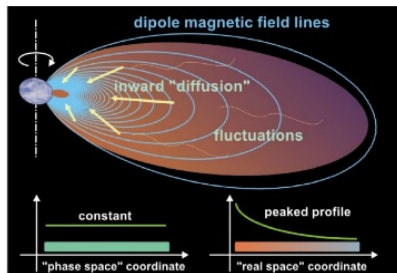
~ MHz action integral

磁力線に沿う
バウンス運動 $J = \int v_{||} ds$

100MHz ~ 1GHz

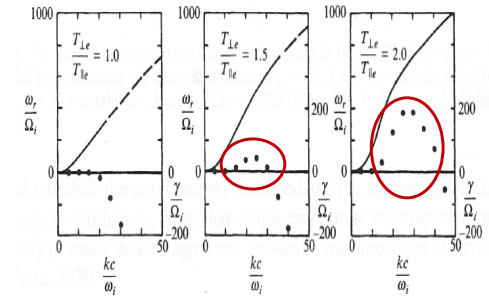
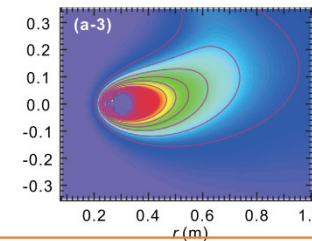
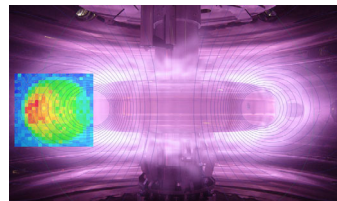
$$\mu = v_\perp^2 / B$$

magnetic moment
磁力線周囲のgyro運動



内向き輸送の
駆動・加熱

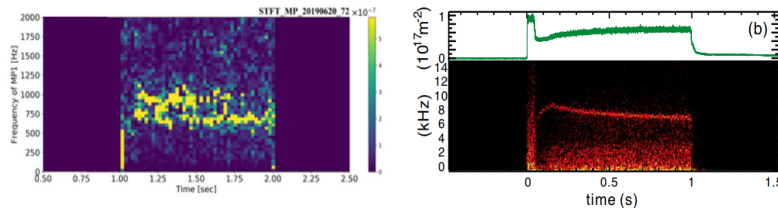
構造形成・位相空間における再構成



加速,
輸送

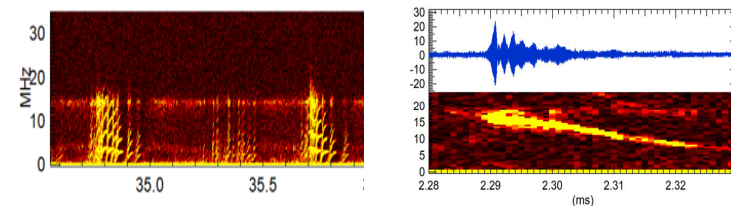
位相空間分布と
関わる揺動駆動

低周波揺動 kHz ~ 10kHz



波動粒子
相互作用

高周波揺動 MHz ~ 数100MHz



4. まとめと今後の課題

- 磁気浮上ダイポール(人工磁気圏)を活用した研究課題について報告した.
- 非中性(純電子)プラズマの安定閉じ込め(>300s)と, 陽電子ビームの
高効率入射の実現を経て, 電子・陽電子プラズマ計画を進めている.
- バッファガストラップと蓄積装置による大量の低速陽電子捕獲, 電子
との同時閉じ込めによる, 磁場閉じ込めによるアプローチ.
- 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,
 $f \sim 0.1-0.4f_{ce}$, $0.6-0.8f_{ce}$ (共にチャープを示す), f_{ce} 付近の間欠的な揺動発生.
- 多くの揺動モードはコヒーレントな磁場揺動であり, 磁力線に沿い伝搬する.
- 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,
R波として矛盾しない分散関係を示す: ホイッスラーの自発励起
- 磁力線上の発生場所の特定, 発生条件, 加速の検出などが今後の課題.