

20pB1-8

物理学会第76回年次大会(オンライン実施) 2021年9月20日

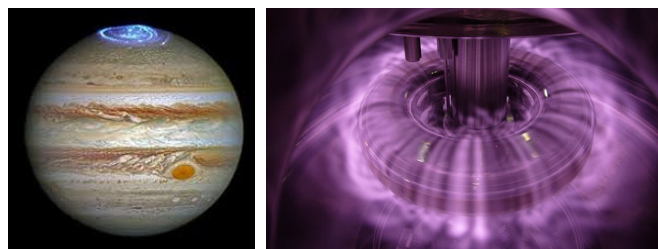
RT-1におけるホイッスラー揺動の間欠的発生と密度変動

東大新流域, 核融合研^A

齋藤晴彦, 西浦正樹^A, 上田研二, 森敬洋, 森川惇二, 釧持尚輝^A, 吉田善章^A

磁気浮上ダイポールによる高ベータプラズマと波動粒子相互作用

2/10



● 実験室に生成した人工磁気圏によるプラズマ研究

- 先進核融合を目指す超高ベータプラズマ平衡
- ジオスペース現象の実験室研究
- (反物質プラズマの実現とペアプラズマの物性解明)

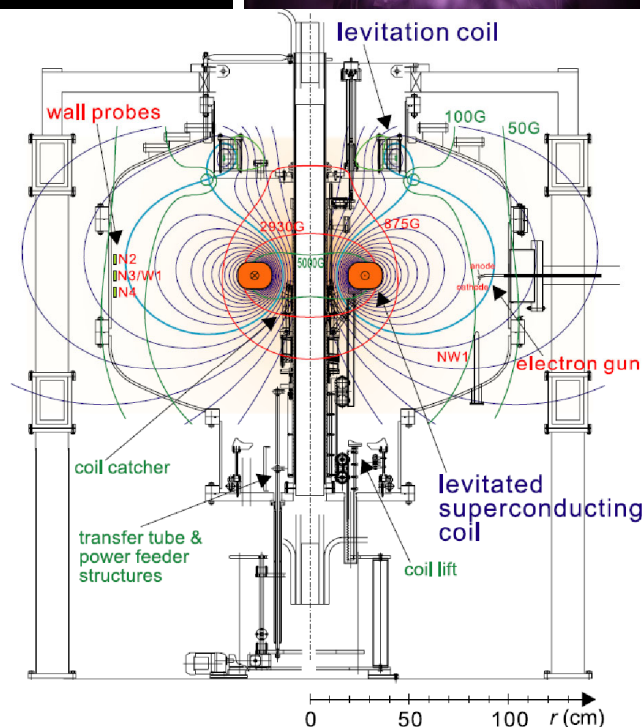
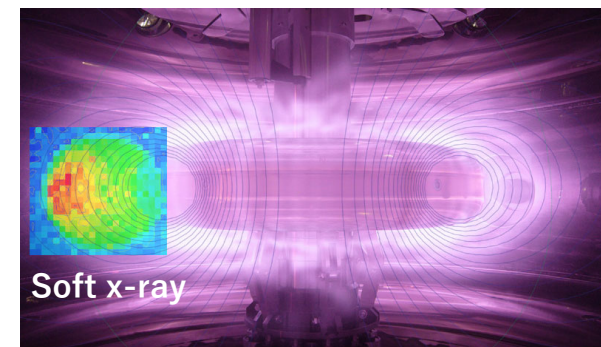
波動粒子相互作用による構造の自己組織化, 放射線帯を形成する相対論的加速等の揺動現象

● 高温電子高ベータプラズマのメタステート

100%に達する超高ベータ状態が安定に生成される.

低周波揺動*や, 温度非等方性が自由エネルギーとなる磁場揺動と同時に密度揺動が出現する.

2020 IAEA FEC Kenmochi+.



磁気浮上超伝導コイルによる人工磁気圏RT1

超高 β ($\sim 100\%$) プラズマの安定生成 ($> 1s$)

2006 Yoshida+ PFR, 2019 M. Nishiura+ Nucl. Fusion.

高温電子プラズマ中でホイッスラーが顕在化する時の電子の挙動, 特に軌道の密度減少の効果を調べる

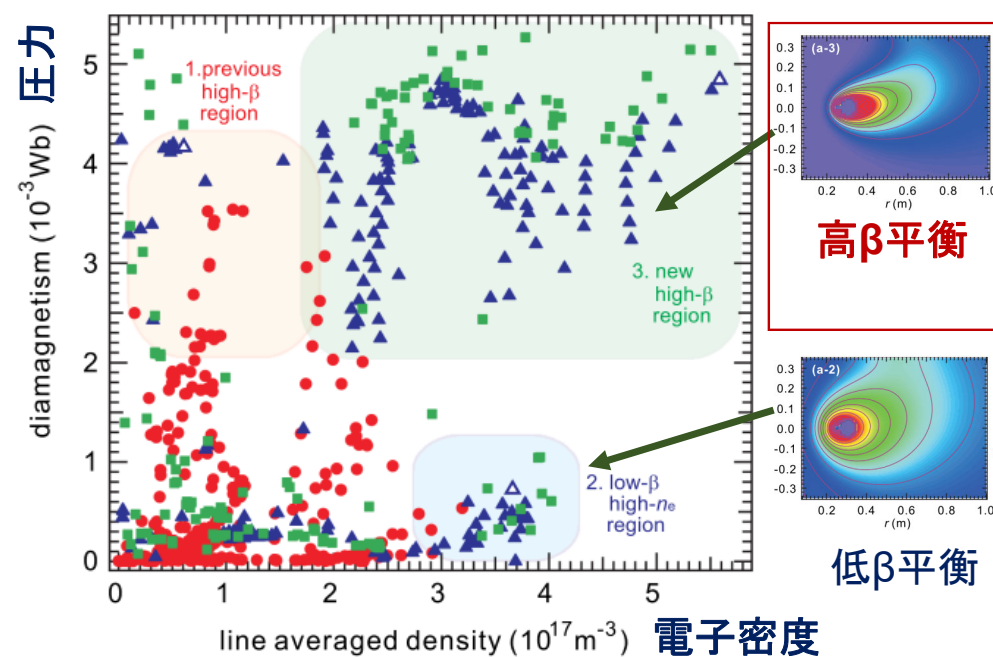
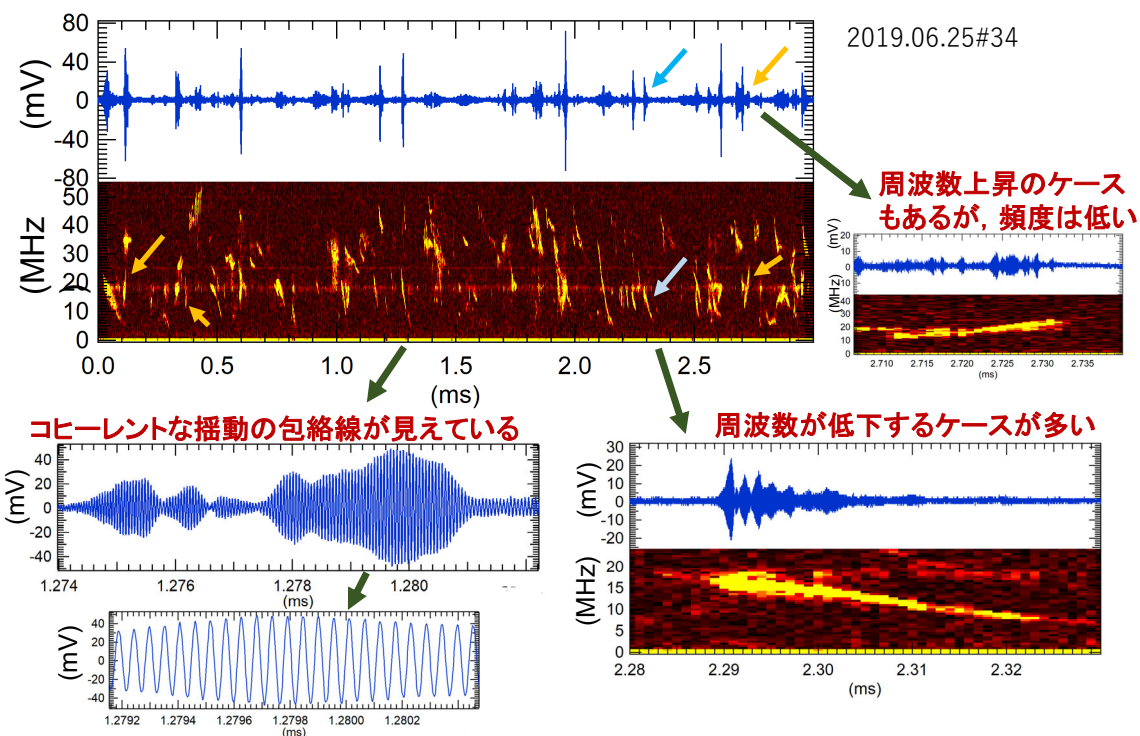
RT-1の高温電子高ベータプラズマが示すホイッスラー揺動

3/10

- 生成条件(ECHのマイクロ波電力と封入ガス圧力)により, 異なる平衡状態が実現される

- **高温電子による高ベータプラズマ平衡の場合**

電子サイクロトロン周波数の10%-90%程度の帯域にコヒーレントな電磁揺動が間欠的に発生する



揺動の典型的な持続時間は100 μs .

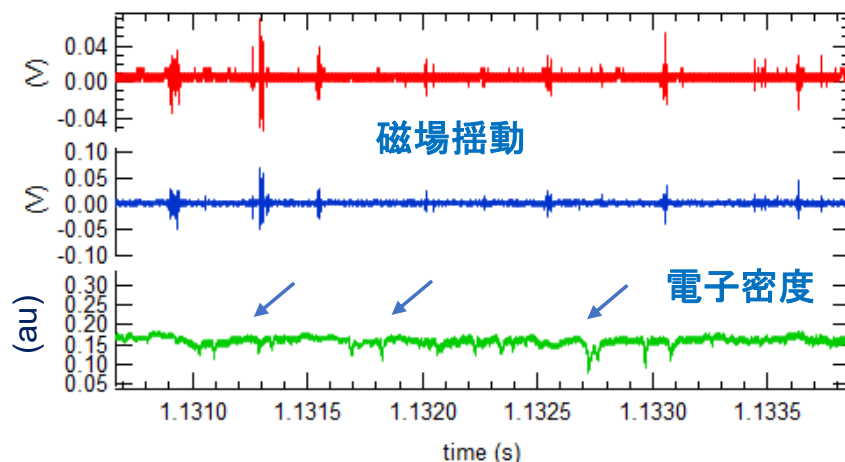
磁場強度にして 10^{-4} から 10^{-5}T 程度(環境磁場の0.1%のオーダー).

電磁揺動の場合, 電場強度は 3×10^4 - $3 \times 10^5 \text{ m/V}$ 程度.

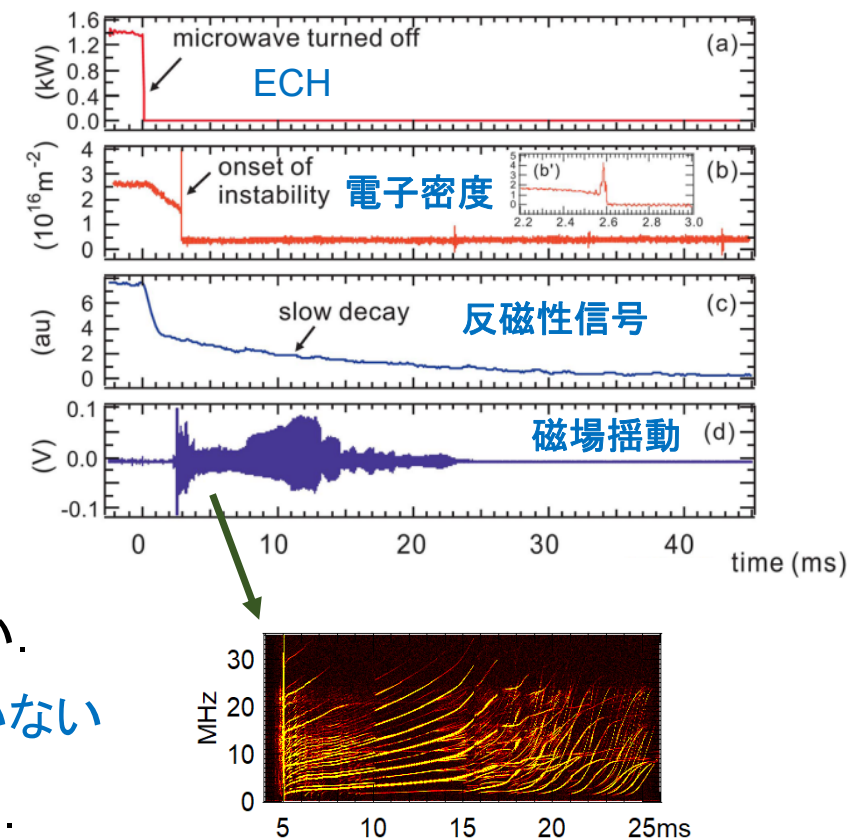
高温電子によるホイッスラー帯の揺動が活発な時に、電子密度の減少や不安定状態(電子密度の急減)への遷移が観測される

- 高温電子の割合が非常に高い場合には、ECH後に密度急減が見られる

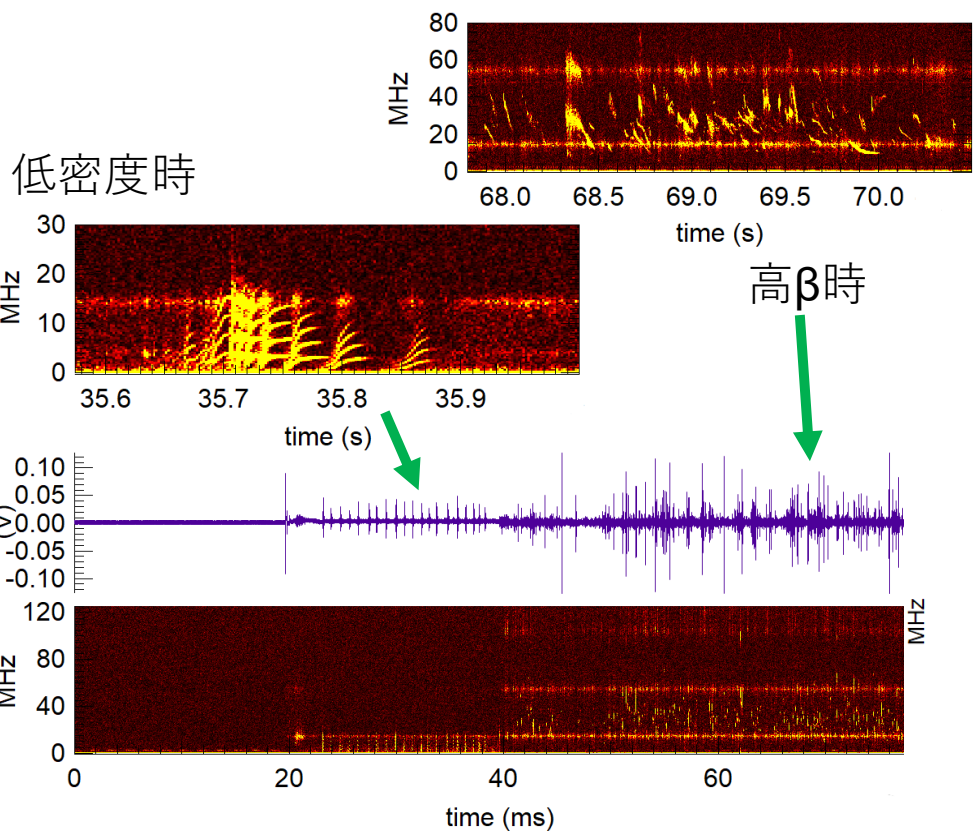
- 更に高温電子の割合が非常に高い場合には、ECH後に密度急減が見られる



- 電子密度の短時間の減少($\sim 10\%$)が間欠的に発生.
- 磁場揺動と同期する場合もあるが、同期しない方が多い.
- 干渉計の視線上をBdot probeは完全にはカバーしていない
- 発生頻度は、観測される最大強度の磁場揺動と同程度.

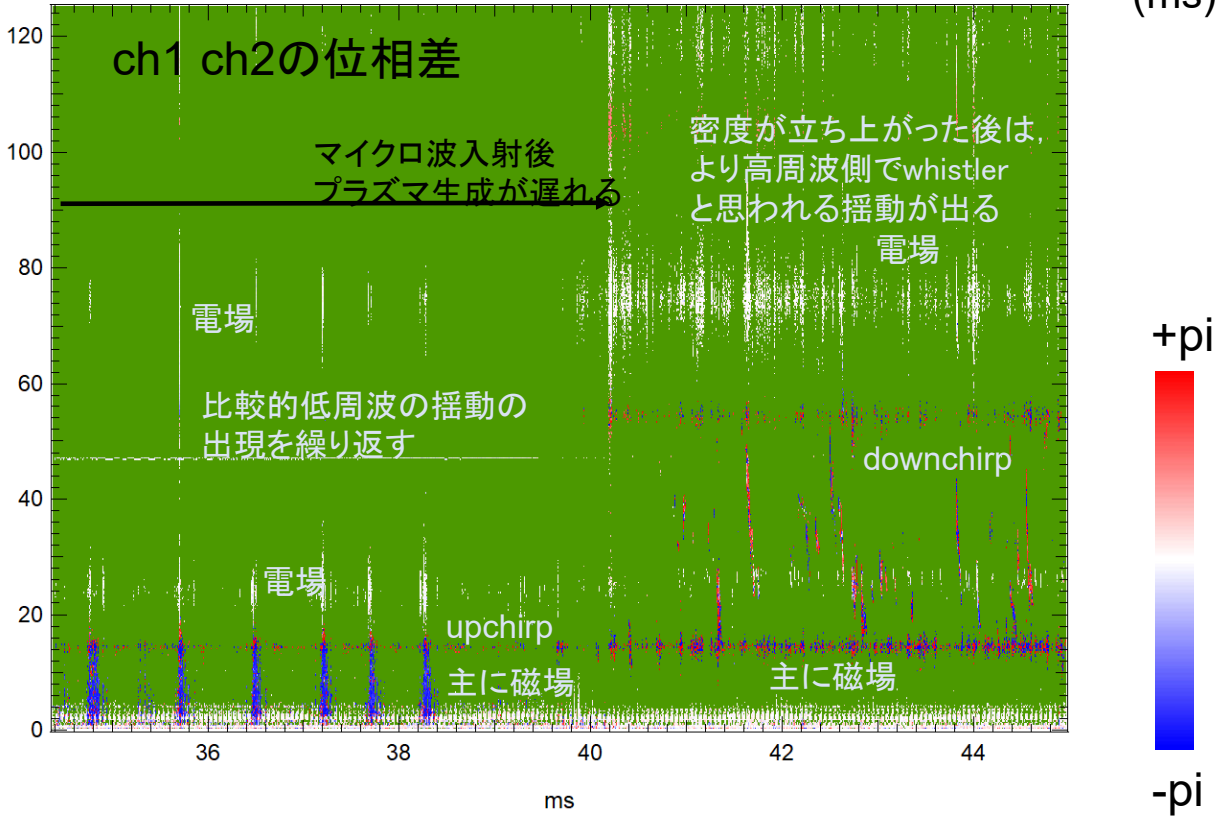
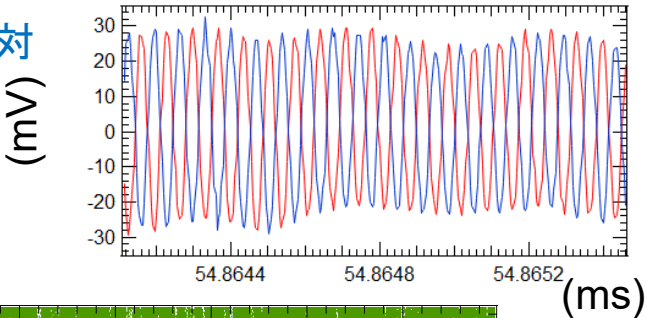


異なるメタステート間の遷移とホイッスラー揺動



低密度状態のコーラス状の信号も、「メタステート」状態の信号も、磁場信号であることを示している

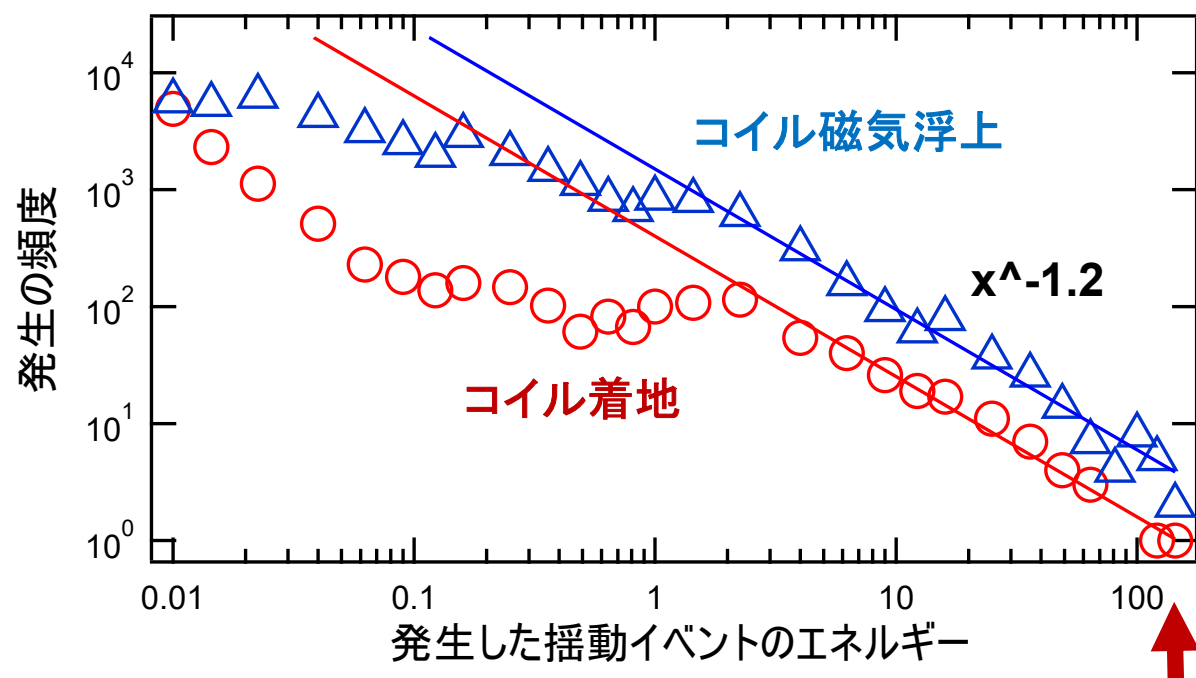
同一場所の逆巻ループ1対で位相差を観測.



RT-1で観測されるホイッスラー揺動の発生頻度

6/10

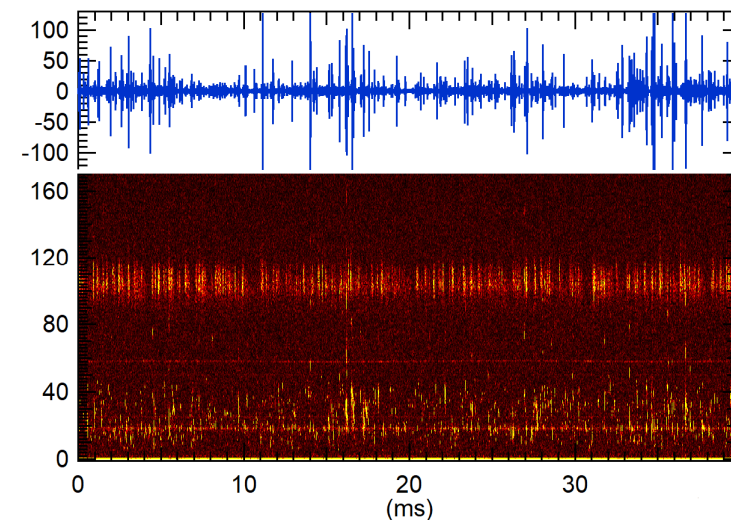
- 経験的に、小振幅の揺動は多数発生するが、大振幅の揺動イベントはあまり出現しない。



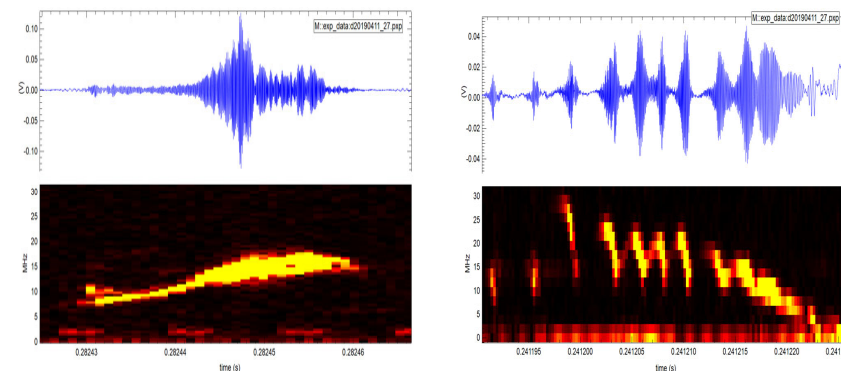
5760ms分の高速Bdot probeデータから抽出

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

- 揺動イベントのエネルギーが10倍上がると発生頻度は約16分の1に。
- 単純なベキ乗でなく谷があり、磁気浮上により谷は小さくなる。



放電は1s, Bdot probeは数十ms幅で観測しているが、非常に大きな揺動はショットにより出現しない。

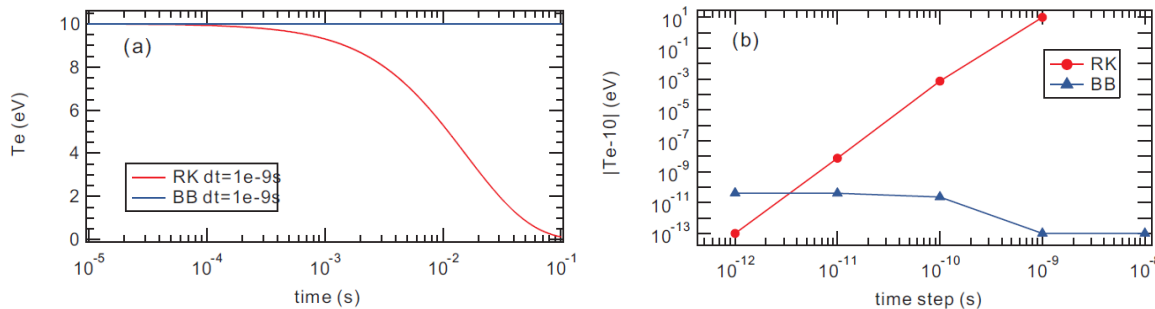


RT-1の磁場配位中のR波による電子の加速と軌道

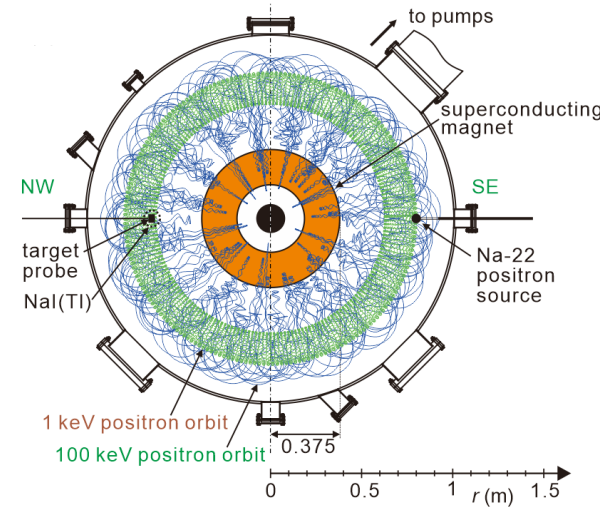
7/10

- 円偏波する電磁波(ダクトモードを仮定)の中で加速される電子の軌道を相対論的に計算.
- バルク電子温度の10eVを想定し, 出発点周辺でR波の電磁場の影響を考慮.

相対論的効果を含むBoris-Buneman法により
RT-1の磁場配位と電場を考慮して計算.



- 良好な保存性(左図:純磁場中でエネルギーの時間発展)
- 丸め誤差が蓄積しにくい(右図:時間ステップによる誤差の差)

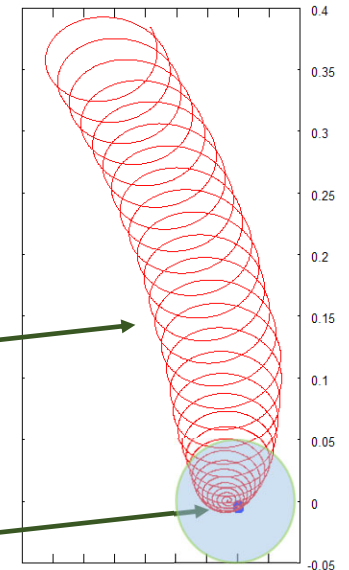


ダイポール磁場中の荷電粒子運動
(装置のtop view)

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



R波による電子のenergizationと軌道のカオス化

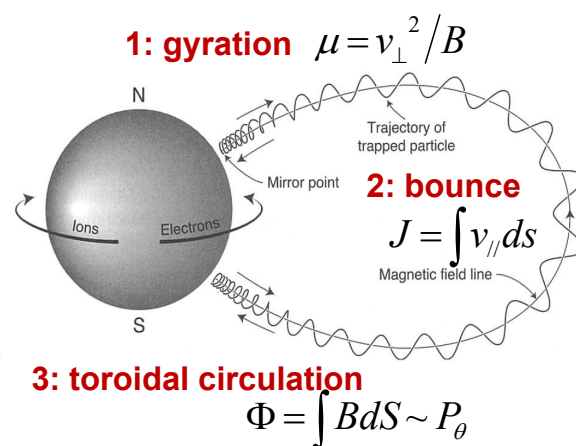
8/10

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

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

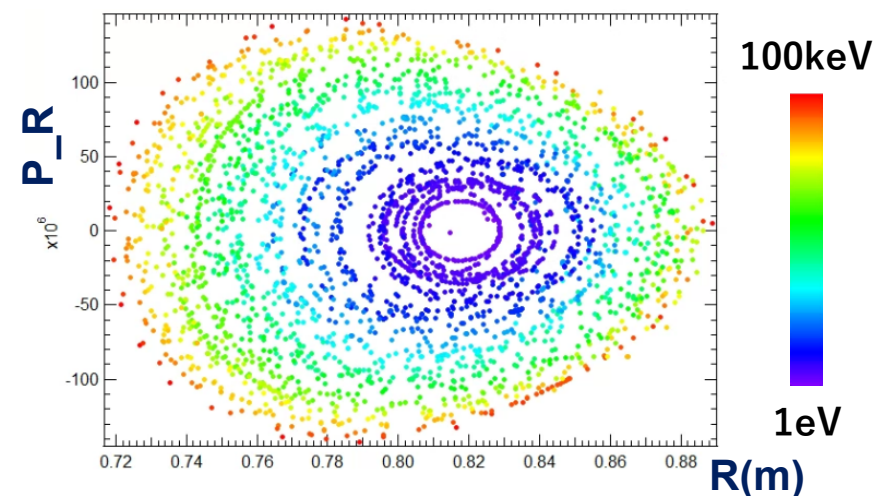
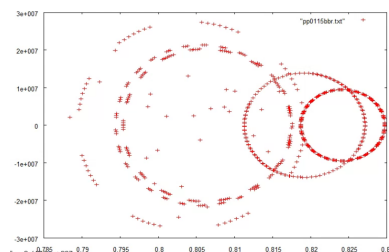
1990 Murakami, Sato, Hasegawa, PoF

断熱不変量は軸対称な系で保存するが、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.

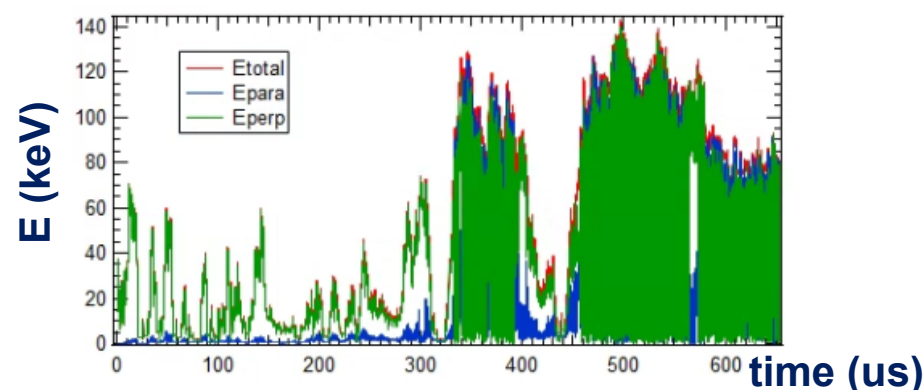


- 電子はR波により効果的に加熱され、その後、カオスの挙動(エネルギーの交換, 軌道の不規則化)を示す.

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)

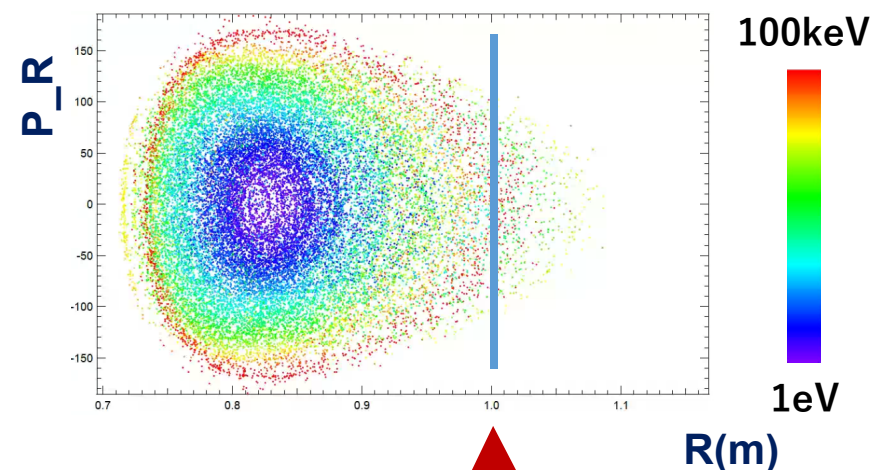
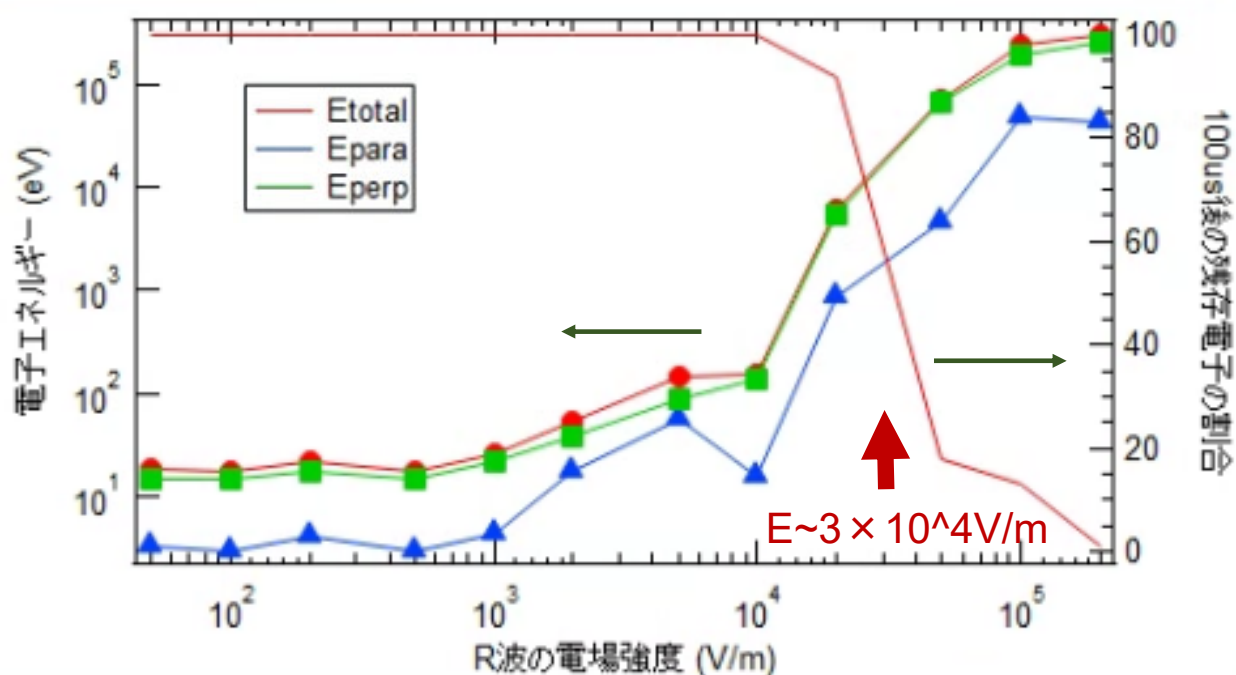


観測された磁場揺動に対応する $2 \times 10^4 \text{ V/m}$ のR波を印加した場合のテスト粒子計算

軌道がカオス化した高エネルギー電子はRT-1の磁場では補足されず 主として弱磁場の真空容器壁で損失する

9/10

- テスト粒子100個の軌道を追跡し、500 μ s経過後の平均エネルギーと残存割合を計算した。



- Bdotプローブで観測される最大強度程度以上の揺動に対応する電場を持つR波が存在する時、有意な割合の電子が損失する。
- RT-1で観測される密度変動の原因である可能性。

- 磁気圏型装置RT-1のダイポール磁場中のECHプラズマには複数のメタステートが存在し、高ベータプラズマではホイッスラー等の自発励起が観測される.
- 高温電子高ベータプラズマは基本的に安定な平衡であるが、高温電子が過多となる場合には密度の変動や急減少が観測される場合がある.
- Bdotプローブ計測によれば、ホイッスラー帯域の磁場揺動の発生頻度はベキ乗則に近い傾向を見せる(超伝導コイルの磁気浮上時, よりベキ乗に近付く).
- RT-1の磁場中でR波中の軌道計算によれば、ダイポール磁場中で幅広い初期エネルギーの電子は容易に100keV程度以上に加熱され、有意な割合の電子がカオス的軌道を持ち損失しており、観測される電子密度減少の一つの原因と考えられる.
- 今後は、状態間の遷移と揺動の効果の関係、各種揺動が駆動する輸送や構造形成、計測面では分散関係や非等方性の直接計測(損失イオンプローブ型)を計画している.