

# 磁気圏型配位RT-1における ホイッスラー波帯の磁場揺動の観測

東大新流域, 核融合研<sup>A</sup>

齋藤晴彦, 吉田善章, 鋸持尚輝, 西浦正樹<sup>A</sup>, 中村香織, 森敬洋, 横田侑己, 上田研二

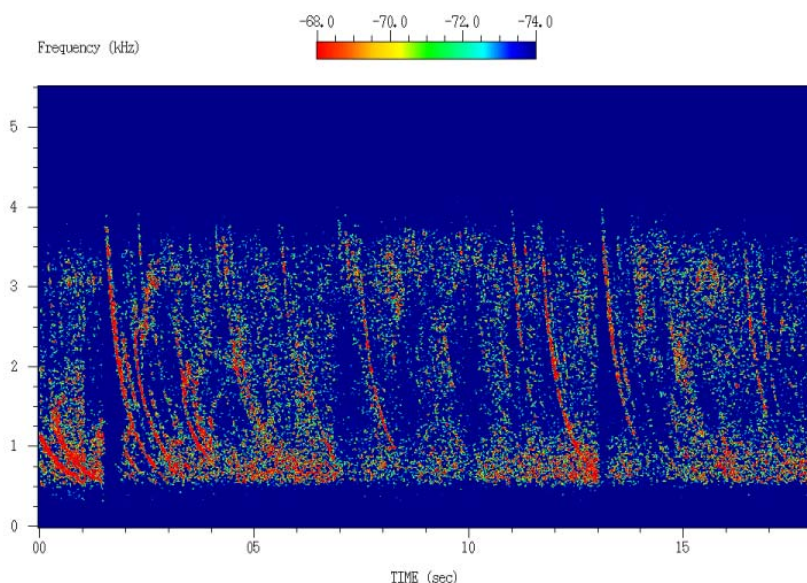
10pK22-2

物理学会2019年秋季大会, 岐阜大学 2019年9月10日

ホイッスラー(ヘリコン)波は磁気圏現象で様々な役割を果たし、  
また高密度プラズマを生成可能な性質を持つ興味深い波動である

- 元々は19世紀にVLF帯ノイズとして発見された。南(北)半球で発生した雷の電磁波が磁力線に沿って北(南)半球に伝わる際、分散によりdown chirpを示す(図)。木星磁気圏でも雷の発生に伴うwhistler波が観測される。
- 赤道域で発生するchorus mode(up chirp)等のwhistler現象の解明は磁気圏の理解に不可欠であり、探査機やシミュレーションによる研究が展開されている。
  - オーロラ現象とも関連する荷電粒子の相対論的な加速や輸送
  - 放射線帯の消失や再成長, サブストームとの関連, etc.
- 高密度プラズマ生成, 宇宙推進機としての応用(Trivelpiece-Gould波へのモード変換と高効率吸収)

2018 Shinohara & Koizumi+ Appl. Phys. Rev.  
2017 Abdelhamid & Yoshida PoP

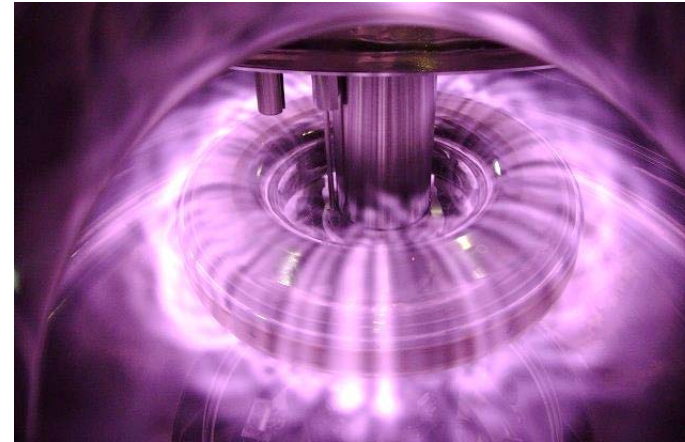
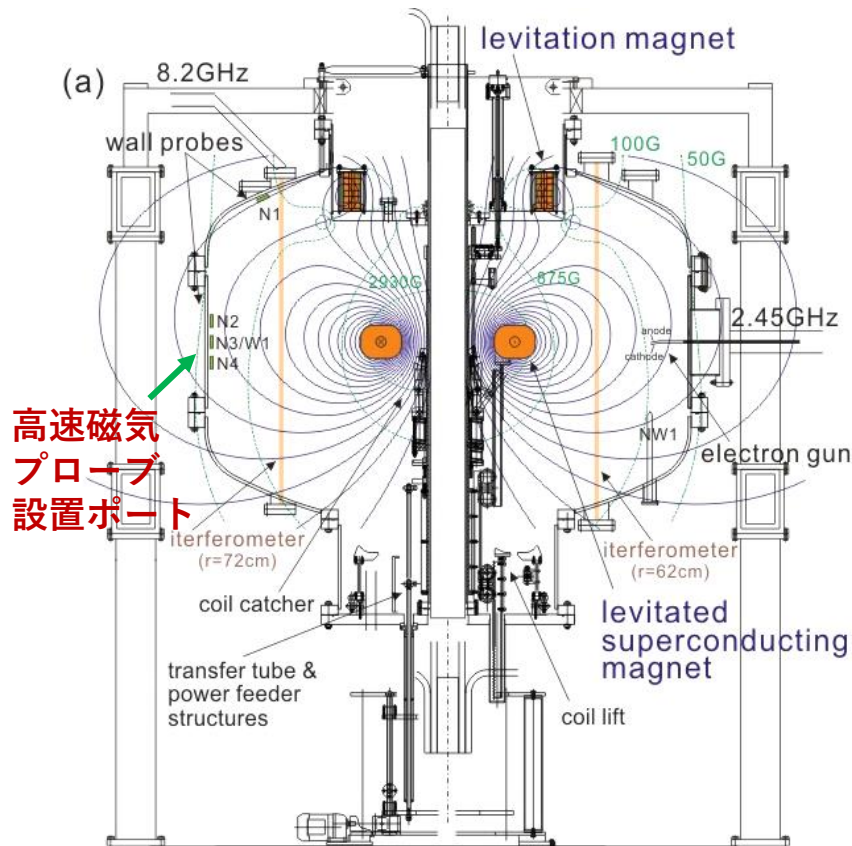


“Selected sound of space”より Earth Whistlers  
<http://www-pw.physics.uiowa.edu/space-audio/sounds/>

「人工磁気圏」RT-1において、ホイッスラー波や高エネルギー電子と関連が深い高周波の揺動現象に着目した実験研究を開始した

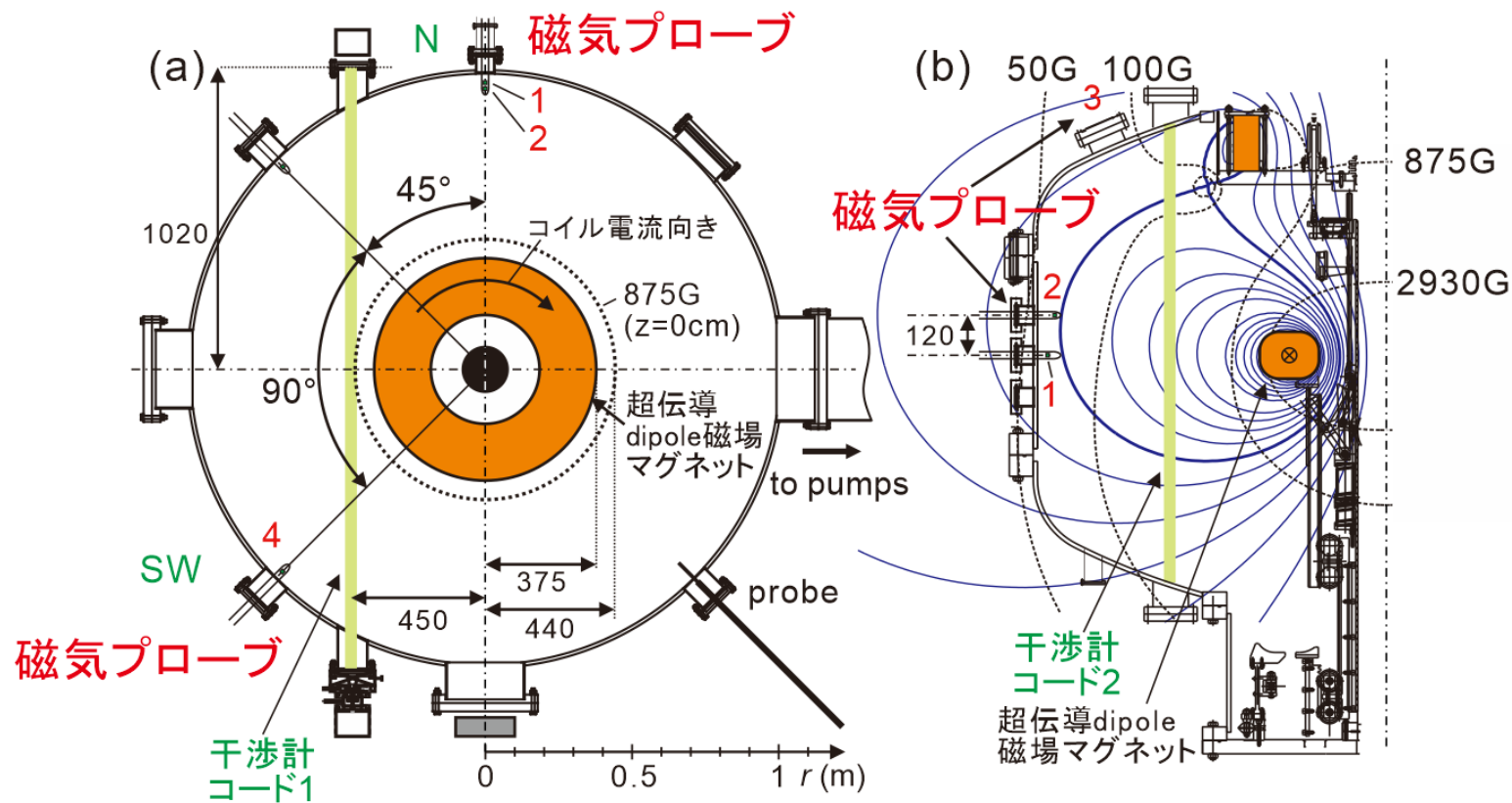
- **波動と粒子の相互作用**は、プラズマ加熱やエネルギー吸収、高速イオン損失、また粒子加速現象(放射線帯における相対論的電子の生成など)や輸送等に重要な役割を果たしており、その過程や機構には未解明な点が多い。
- 東大RT-1では、磁気浮上させた超伝導コイルによる**ダイポール磁場**中で**高温荷電粒子**(主に**電子**)が圧力を担う超高 $\beta$ プラズマの生成に成功している。
- ダイポール磁場では**低周波揺動**が駆動する内向き拡散による自己組織化が、普遍的に発生する現象として知られている。また、RT-1ではECHにより**電子の非Maxwell分布**や**温度非等方性**の存在が指摘されており、揺動や各種不安定性等の諸現象を駆動する自由エネルギーとなり得る。
- RT-1のダイポール磁場は、大域的には地球等の**惑星磁気圏**と等価な配位であり、**磁気圏現象とrelevantな研究**を実験室で実施出来る可能性がある。
- こうした経緯から、RT-1で**高温電子**が関連する現象として、ホイッスラー波等の比較的**高周波の磁場揺動**に着目した実験研究を開始した。

RT-1は磁気浮上させた高温超伝導コイルによるダイポール磁場配位であり，実験室に人工磁気圏を作り出す



- 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，コヒーレンスイメージング等の各種計測
- 先進核融合を可能にする超高 $\beta$ プラズマの閉じ込め原理確立，流れを持つプラズマの自己組織化に関する研究を実施している
- ECHによる電子が圧力を担う高 $\beta$ プラズマ (局所 $\beta$ 100%) が生成される (~秒)

同一ポロイダル断面でz位置の異なるプローブと，トロイダル方向に位置の異なるプローブを用いて多点で計測を行った



磁気プローブNo.1,2,3: 同一ポロイダル断面内, No.4: 別断面

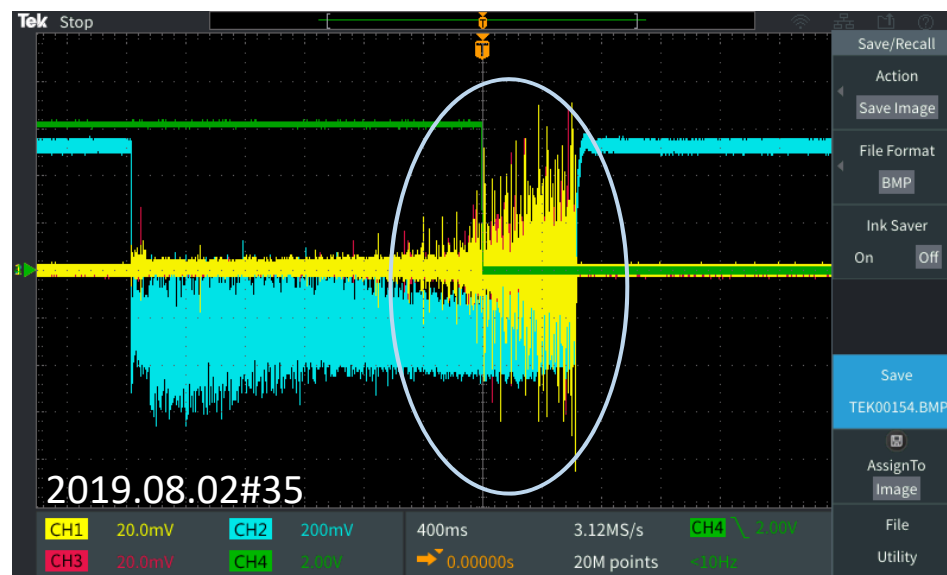
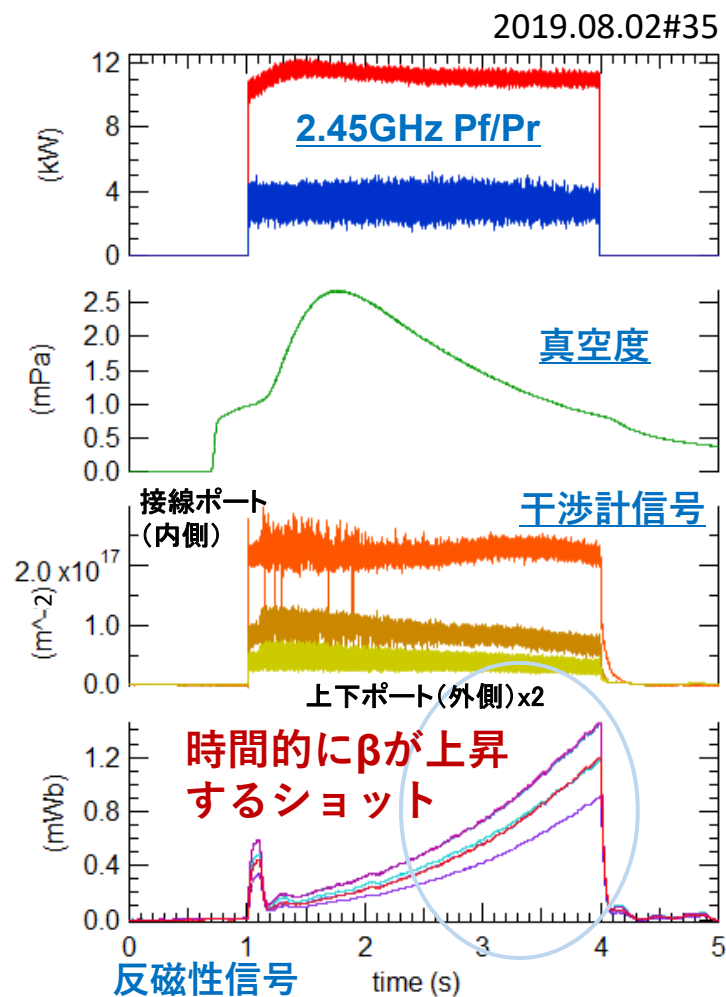
測定点の $B=5\text{mT}$ (実測値ではない)に対して  $f_{ce}=140\text{MHz}$   $f_{ci}=20\text{kHz}(\text{He}^+)$

- コイルループによる磁気プローブ ( $B \cdot \text{dot}$  probe)
- 同一場所で逆巻2chにより磁場と静電信号を区別可能



ECHにより反磁性信号/プラズマ圧力が立ち上がり高温電子成分の割合が顕著になる際、比較的高周波の磁場揺動が観測された

- RT-1の周辺部での磁気プローブ計測によれば、2.45GHz ECHによる高 $\beta$ 時に中間周波数帯の磁場揺動が励起される

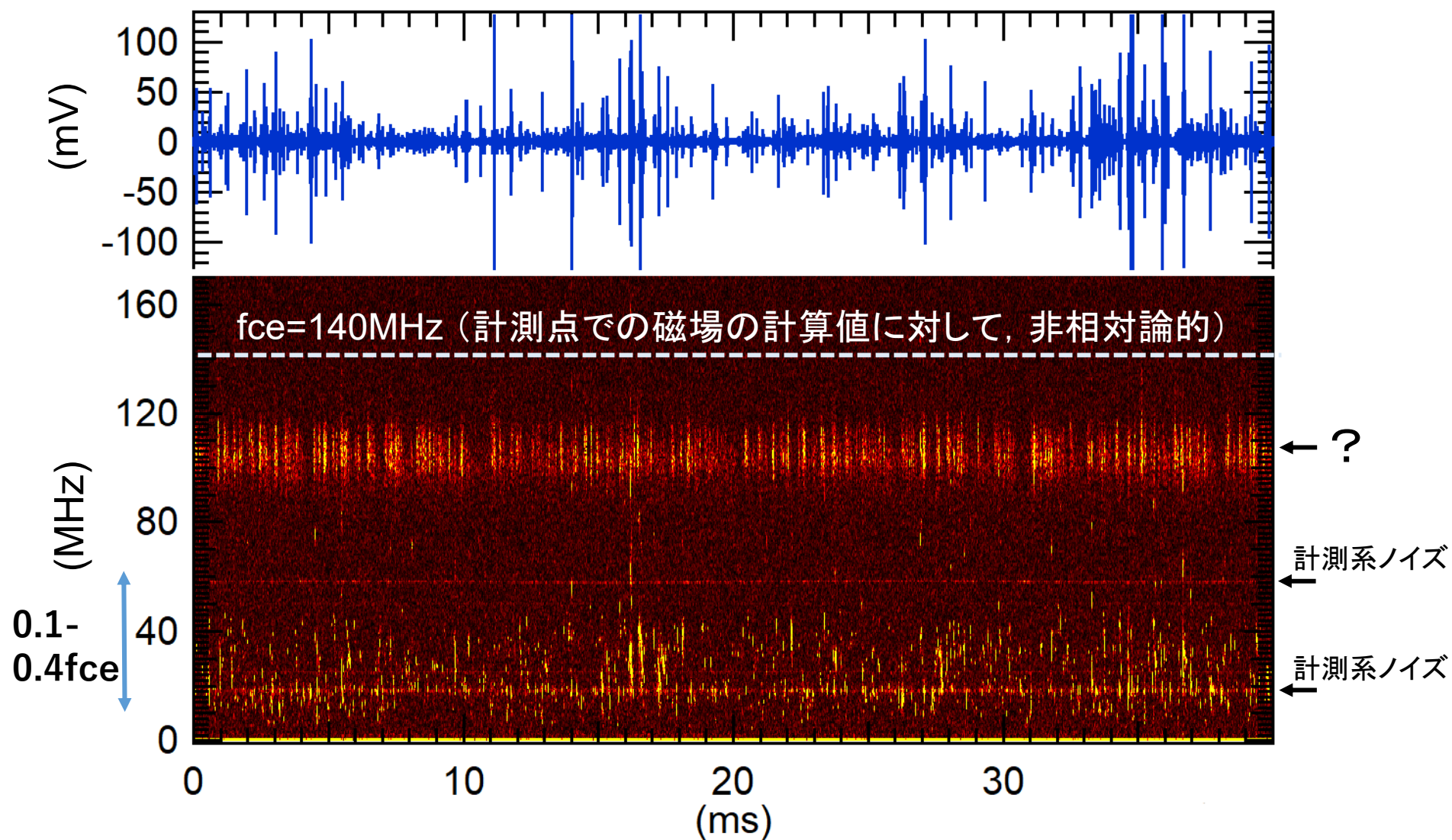


ch1: 磁気プローブ1, ch2: 干渉計, ch3: 磁気プローブ2

- 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
- スパイク状の磁場信号が繰り返し観測され、異なるプローブ間で同期を示す

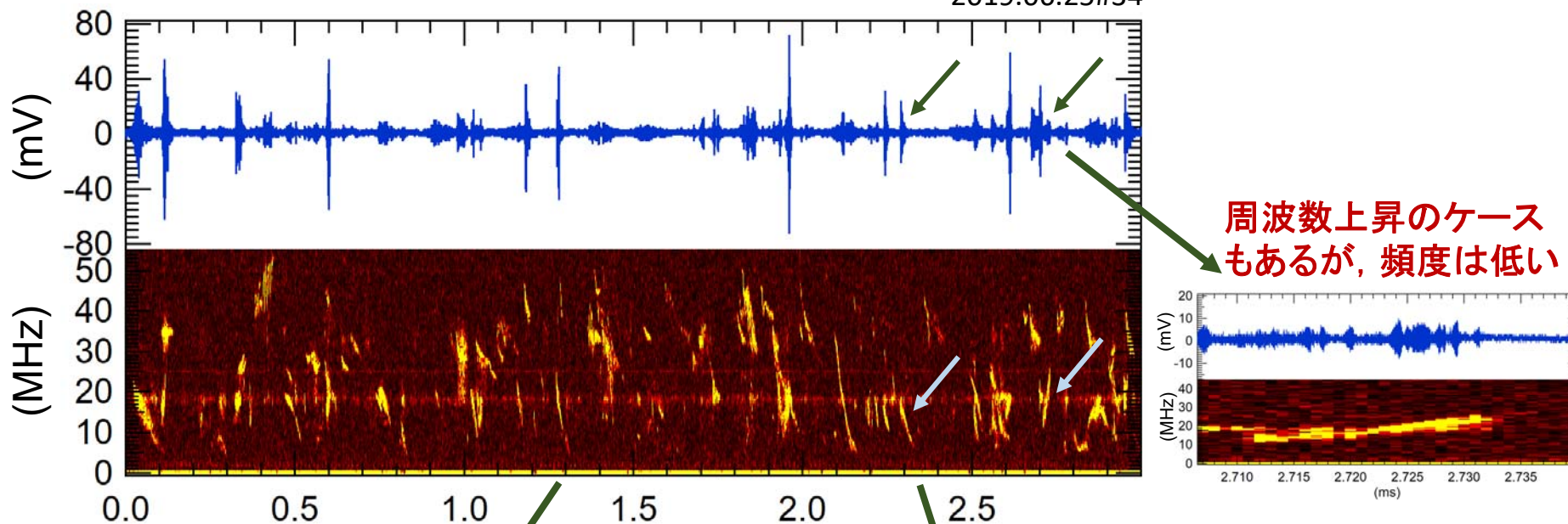
電子サイクロトロン周波数 $f_{ce}$ に対して $\sim 0.1-0.4f_{ce}$ 付近で  
間欠的なスパイク状の信号が繰り返し発生している

2019.06.25#34 高 $\beta$ 状態が比較的定常的に生成されるショット

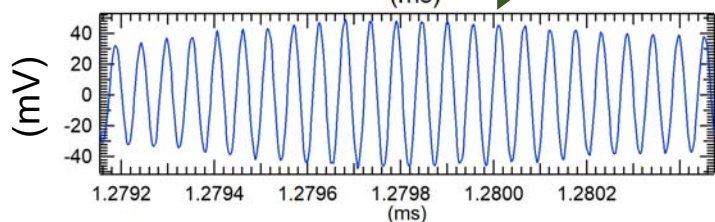
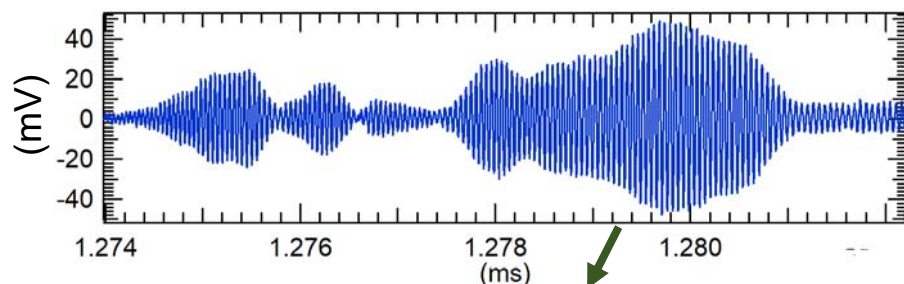


0.1fce~0.4fceに現れる間欠的に見える信号はコヒーレントな揺動から構成されており，多くが周波数の時間的変化を示す

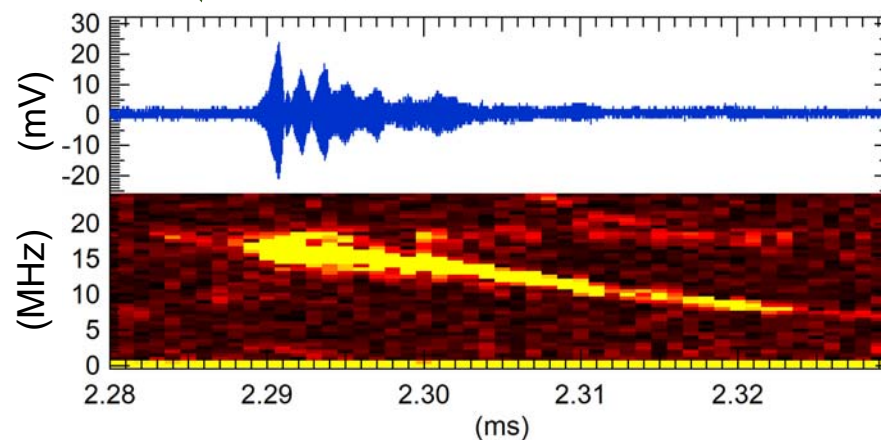
2019.06.25#34



コヒーレントな揺動の包絡線が見えている



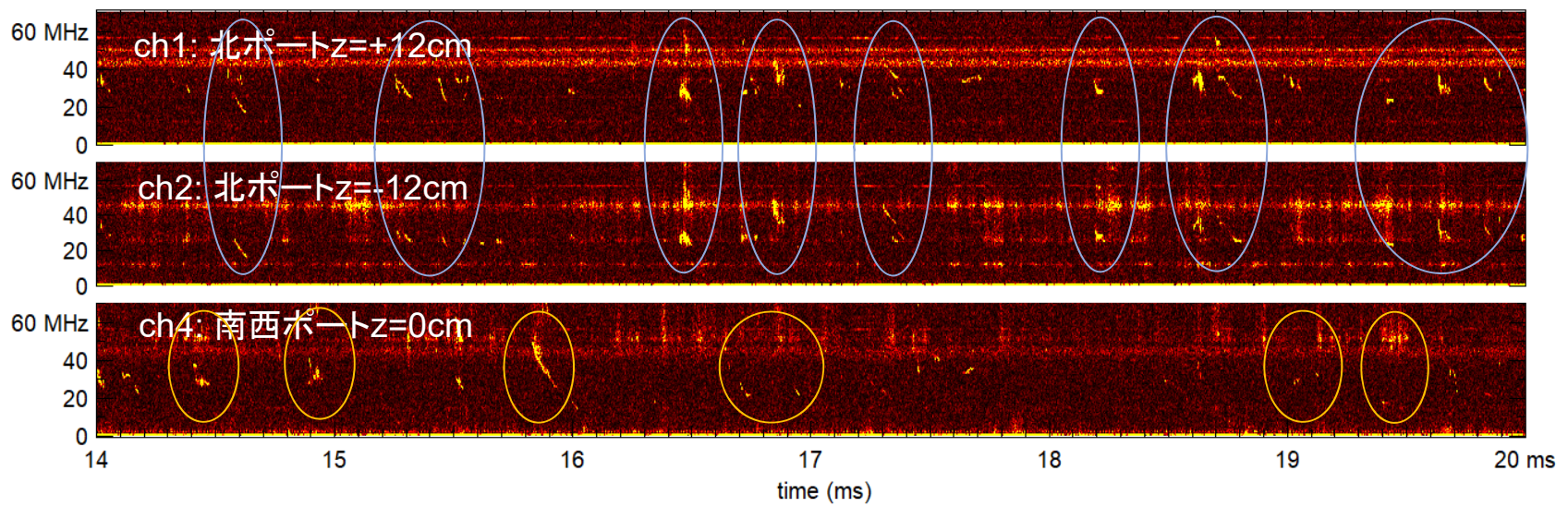
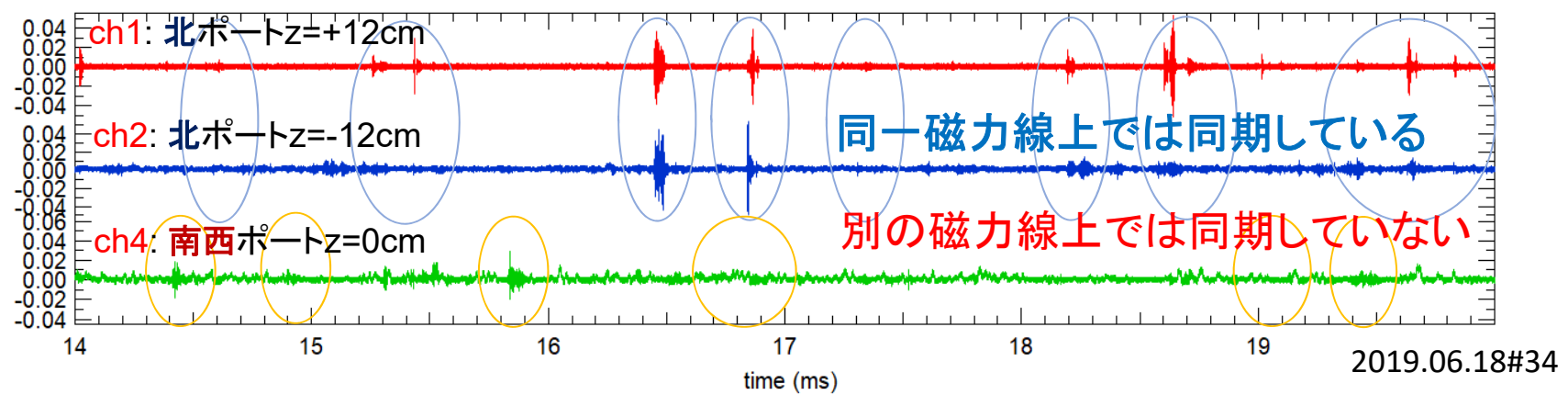
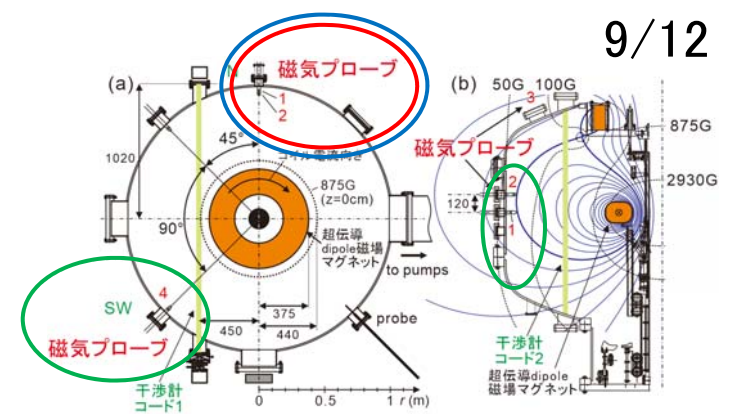
周波数が低下するケースが多い





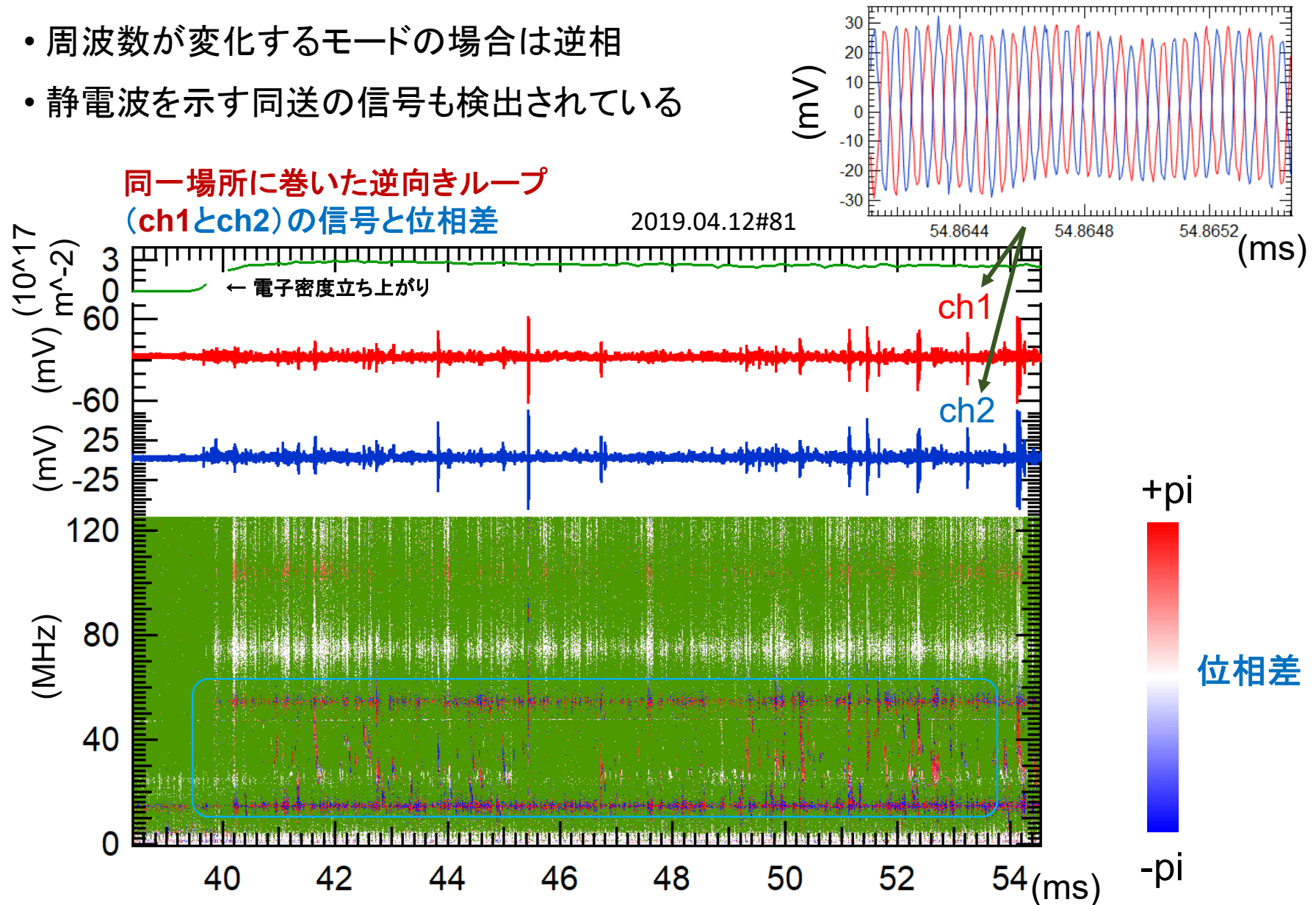
多点計測結果は、波動がダイポール磁場の磁力線に沿って伝搬する事を示している

- 同じポロイダル断面の同一磁力線上のプローブでは類似のイベントが観測されるが、トロイダル方向に異なる位置へは波動は伝わっていない



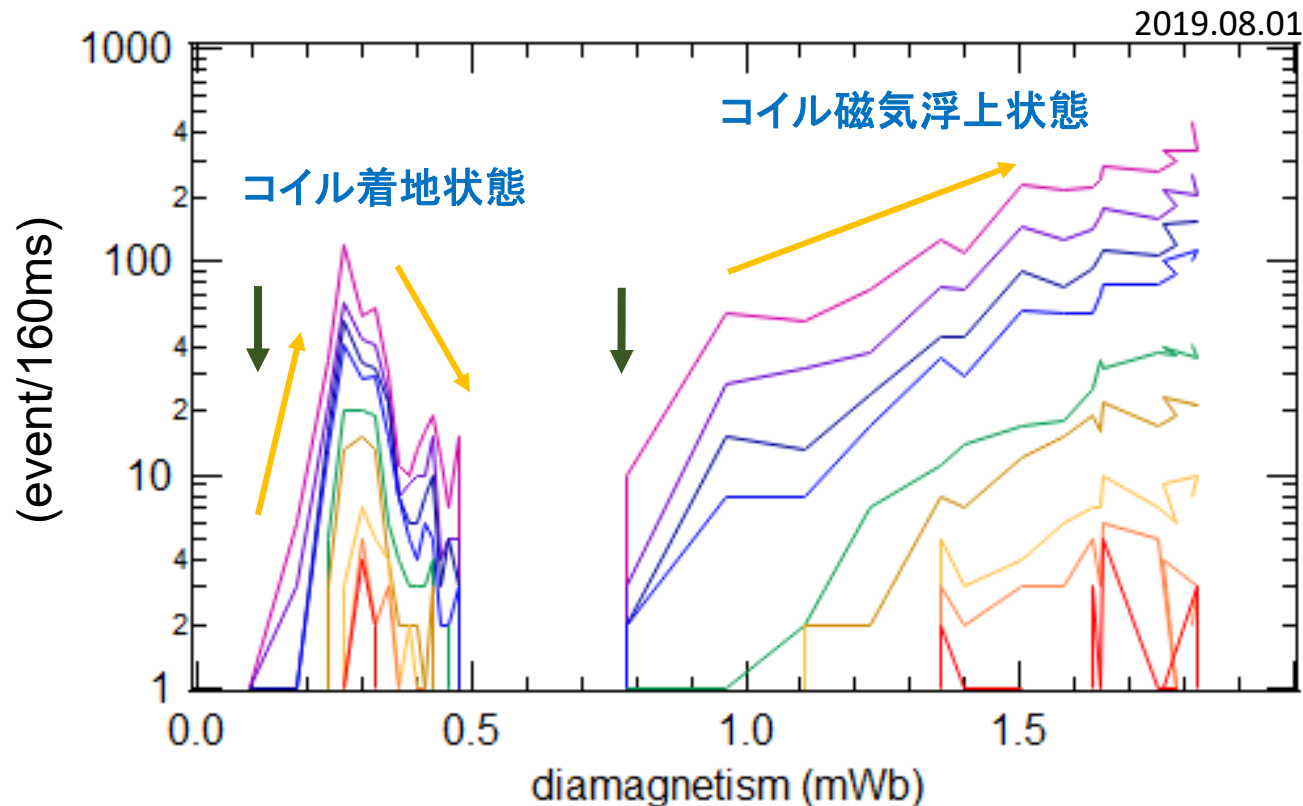
0.1fce~0.4fceに現れる揺動信号に静電的な成分の混入は少なく,<sup>10/12</sup>  
観測された揺動は磁力線に沿って伝播する電磁的な波である

- 周波数が増えるモードの場合は逆相
- 静電波を示す同送の信号も検出されている



揺動信号の出現頻度は反磁性信号の強度と強い相関を示すが、それ以外のパラメータへの依存性も重要である事が伺える

- 出現する揺動の振幅に応じた出現頻度(赤: 出現した最大振幅)。



- 静穏状態から揺動が出現する状態に転ずる閾値が存在する(黒矢印)
- プラズマ圧力が低くとも、コイル着地状態でも揺動は出現する  
圧力/電子温度非等方性やロスコーンの影響等の可能性がある

- 磁気圏型配位RT-1において、低周波揺動に加えて、高エネルギー電子が関連する比較的高周波の磁場揺動に着目した研究を開始した。
- ECHによる高温電子が圧力を担う高 $\beta$ プラズマ中で、 $f \sim 0.1-0.4f_{ce}$ 程度の中間周波数帯 ( $f_{ci} \ll f < f_{ce}$ ) で間欠的に出現する揺動を観測した。
- 揺動はコヒーレントな磁場揺動であり、磁力線に沿って伝搬している。
- 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、強い分散を持つ電磁的なモードである事が伺える。
- これらの観測結果は、ホイッスラー波の励起を強く示唆している。
- こうした波動が、ダイポール磁場配位における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)発生する事が明らかになった。
- 分散関係や駆動条件に着目して発生機構を詳細に明らかにする必要がある。
- 静電的な電子サイクロトロン波の不安定性を含め、全体的な理解が必要。