

※資料の二次利用の際はお問い合わせ下さい

宇宙プラズマの波「コーラス放射」の 自発励起と発生条件の解明を実験室で実現

ー人工磁気圏RT-1による実験室と宇宙をつなぐプラズマ現象の理解ー

齋藤晴彦^{1,2}、西浦正樹^{2,1}、釦持尚輝^{2,3}、吉田善章^{2,1}

¹ 東京大学 大学院新領域創成科学研究科

² 自然科学研究機構 核融合科学研究所

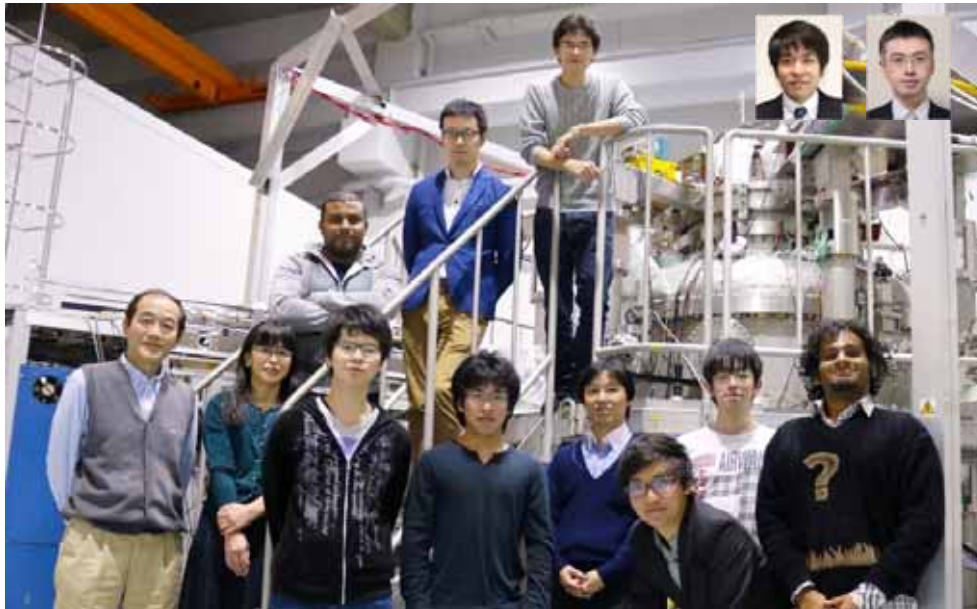
³ 総合研究大学院大学



大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
核融合科学研究所
National Institute for Fusion Science



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



nature communications



Article

<https://doi.org/10.1038/s41467-024-44977-x>

Experimental study on chorus emission in an artificial magnetosphere

Received: 15 March 2023

Accepted: 9 January 2024

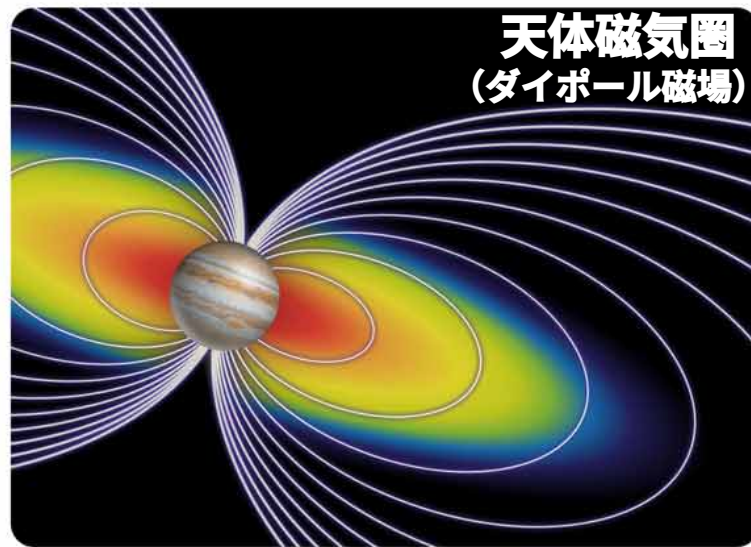
Published online: 15 February 2024

 Check for updates

Haruhiko Saitoh^{1,2} , Masaki Nishiura^{1,2}, Naoki Kenmochi^{2,3} & Zensho Yoshida^{1,2}

Wave particle interaction plays an important role in geospace and space weather phenomena. Whistler mode chorus emissions, characterized by non-linear growth and frequency chirping, are common in planetary magnetospheres. They are regarded as the origin of relativistic acceleration of particles in the radiation belts and pulsating aurora. Intensive theoretical investigations and spacecraft observations have revealed several important features of chorus emissions. However, there is a need to conduct high-resolution and reproducible controlled laboratory experiments to deepen the understanding of space weather. Here, we present the spontaneous excitation of chirping whistler waves in hot-electron high- β plasma (β is the ratio of the plasma pressure to the magnetic pressure) in an “artificial magnetosphere”, a levitated dipole experiment. These experiments suggest that the generation and non-linear growth of coherent chorus emissions are ubiquitous in dipole magnetic configuration. We anticipate that these experiments will accelerate the laboratory investigation of space weather phenomena.

- 天体磁気圏を模擬した「人工磁気圏」RT-1装置により、**コーラス放射**と呼ばれる宇宙プラズマの波の**実験室での研究**を実現
- **コーラス放射**が、**プラズマが自発的に発生する普遍的な現象**であることを実証し、**発生のための条件**を実験的に解明
- 英科学誌「ネイチャー・コミュニケーションズ」に2月15日に掲載



自然から
学ぶ

最も自然で合理的な
プラズマ閉じ込め

→ 先進核融合



自然を
理解する

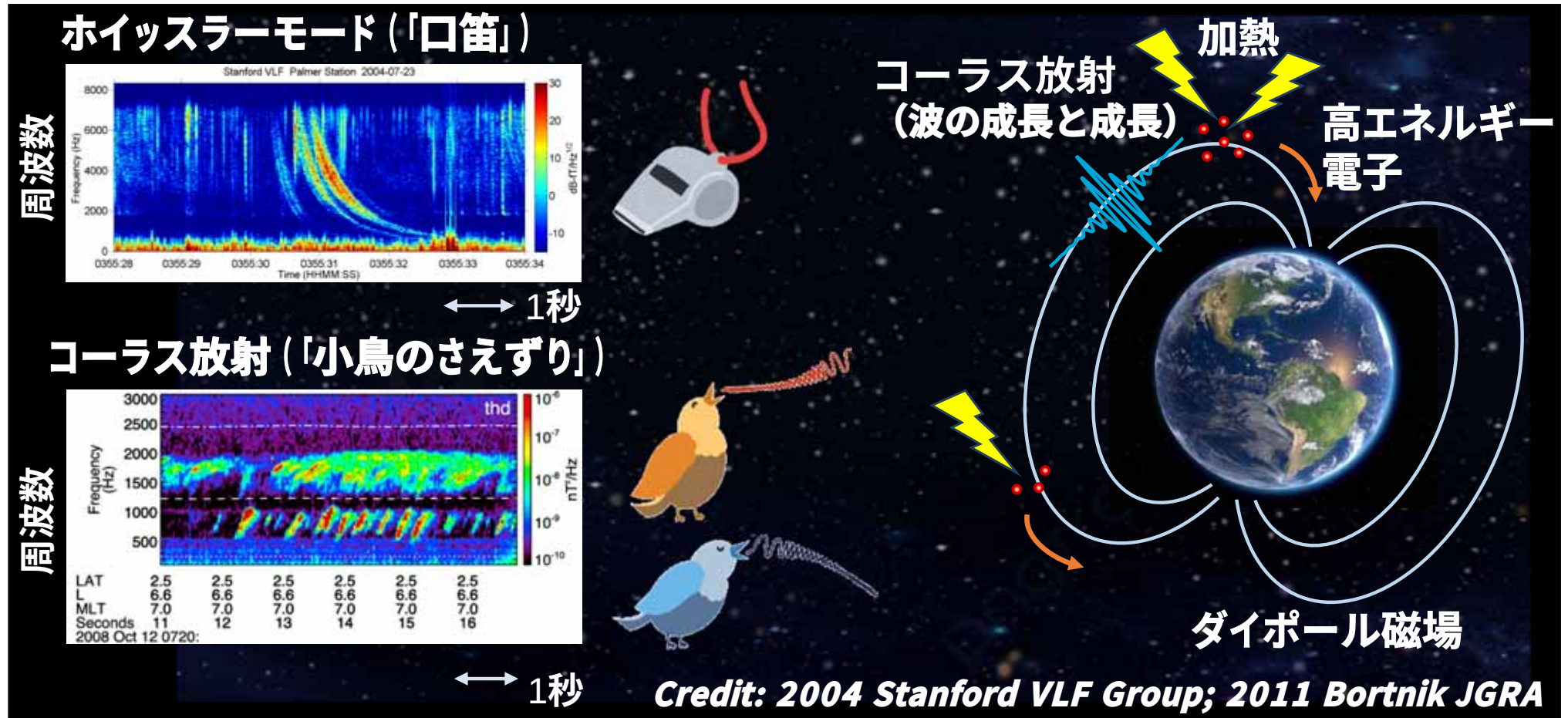
解明

「コーラス放射」はダイポール磁場の中で
普遍的な現象



Credit (太陽画像) : JAXA太陽観測衛星ようこう

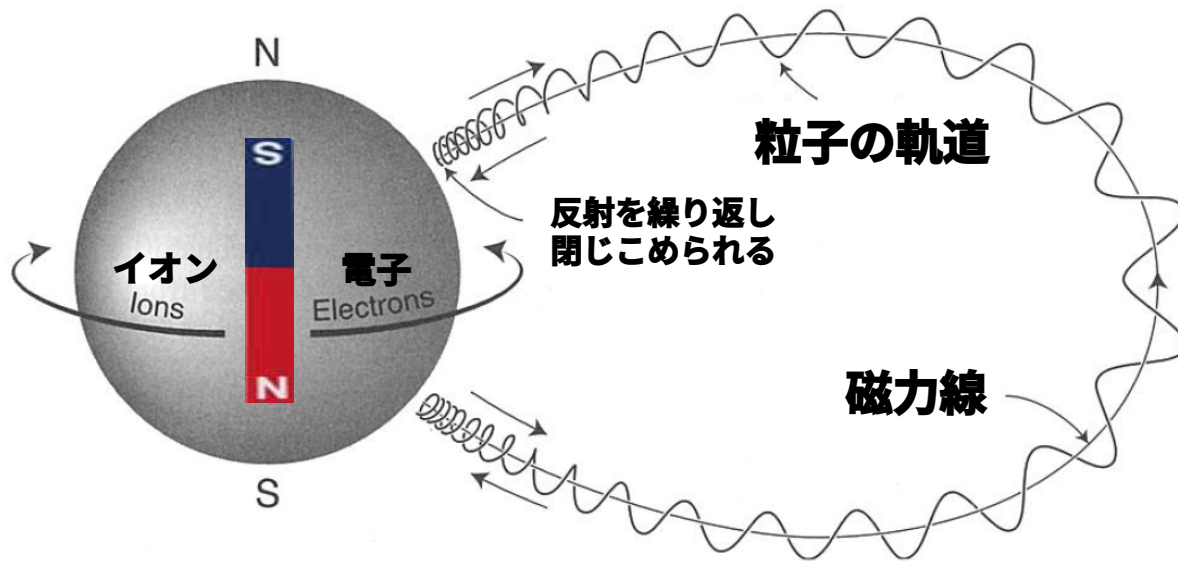
- 活発な太陽活動により、地球周辺の宇宙空間「ジオスペース」では磁気嵐が発生し、宇宙だけでなく地上でも電力や通信障害を引き起こす
- こうした一連の自然現象「宇宙天気」の研究は、重要さを増している



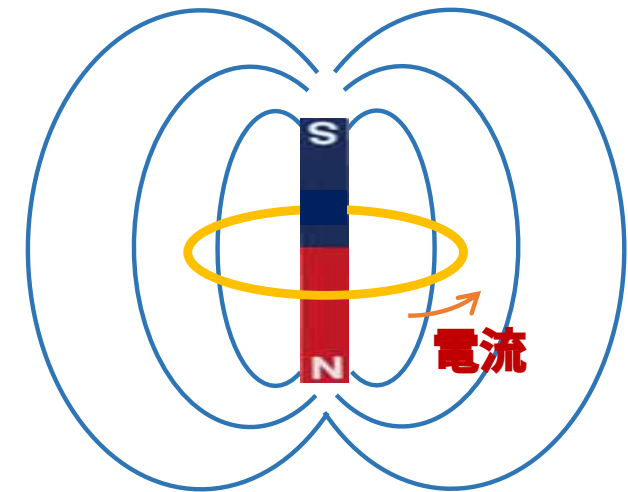
Credit: 2004 Stanford VLF Group; 2011 Bortnik JGRA

- 「ホイッスラーモード」は、プラズマの基本的な波の一つ
- 周波数が時間的に変化するホイッスラーモードが現れる「コーラス放射」は、宇宙天気と関わる重要な現象だが、未解明の点が多い
- これまで、探査機や理論・シミュレーションによるコーラス放射の研究が行われてきたが、ダイポール磁場中での実験は実現していなかった

- 惑星など天体の磁気圏はダイポール磁場をもつ



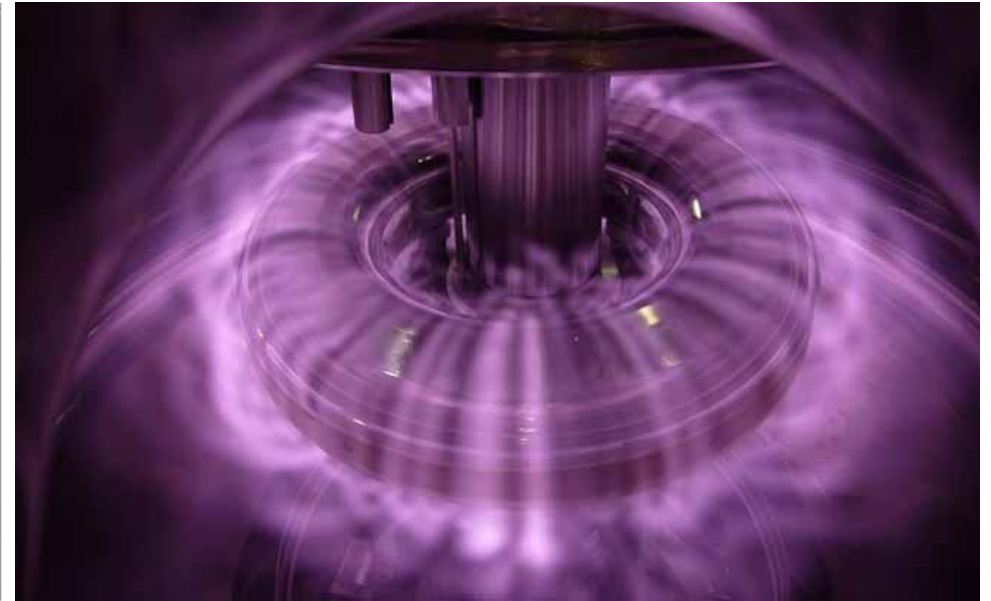
ダイ (=2つ) ポール (=極)



リング電流と磁石は等価

- 永久磁石やリング電流により、実験室で作ることができる

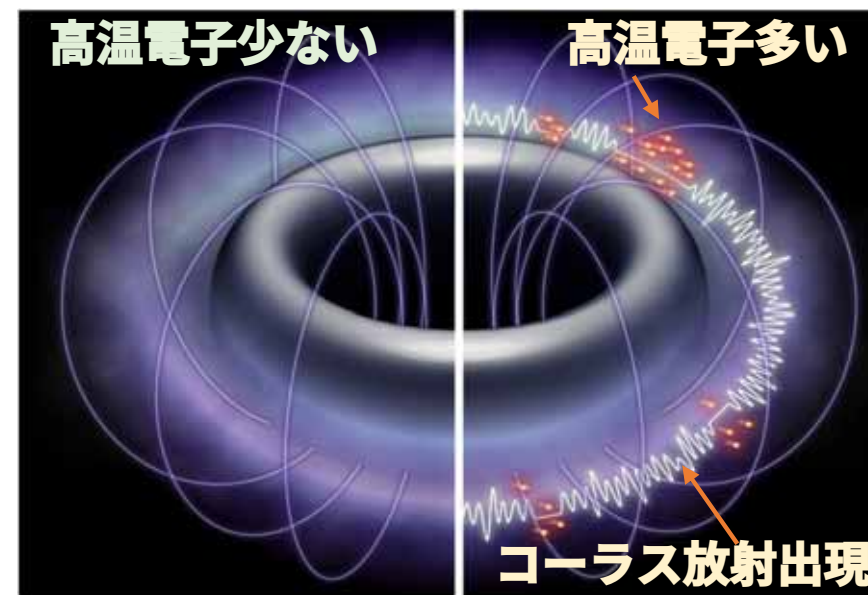
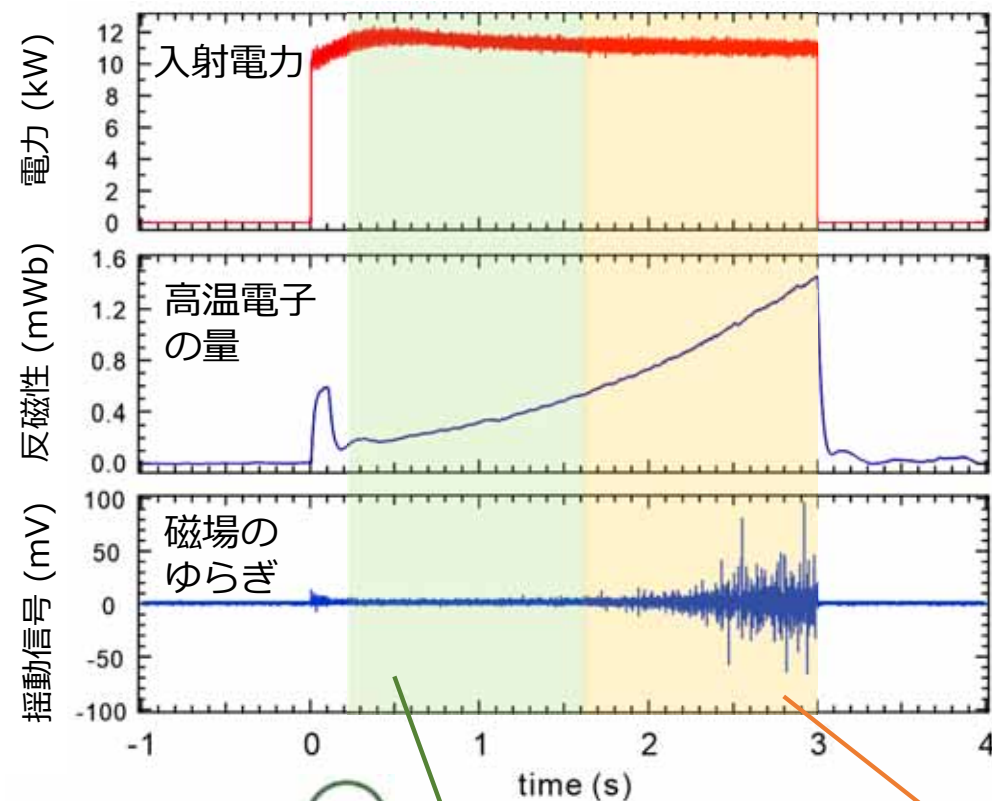
しかし、宇宙に浮かぶ惑星磁気圏と同じプラズマ実験環境を、重力のある地上の実験室で再現することは従来難しかった



- RT-1は超伝導コイル※を磁気浮上させ「人工磁気圏」を作り出す
- 地上の実験室でありながら、ジオスペースに近い環境でのプラズマ実験の実施が可能となる

※ 超伝導とは低温で電気抵抗がゼロになる現象であり、RT-1では、無冷却状態の高温超伝導コイルに電流を流し続けて磁石として使う

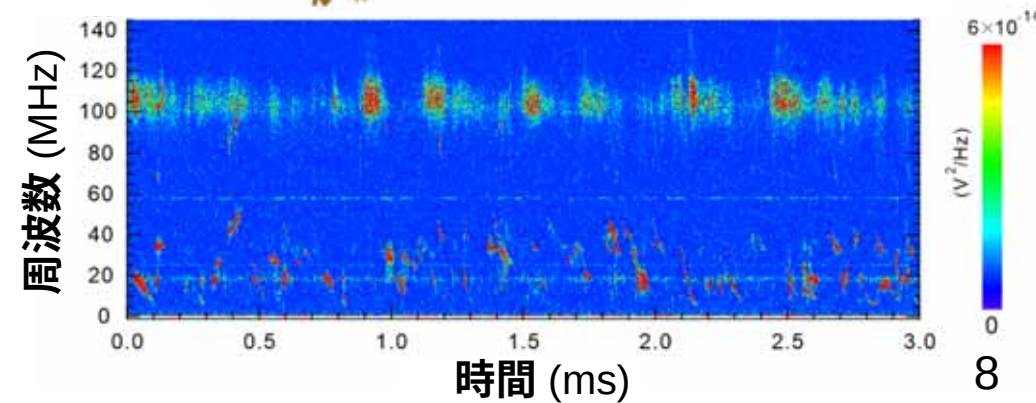
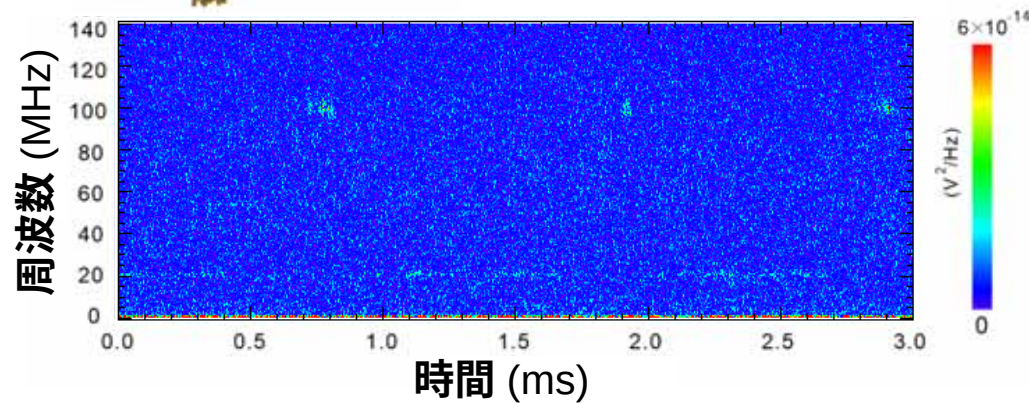
コーラス放射の自発励起



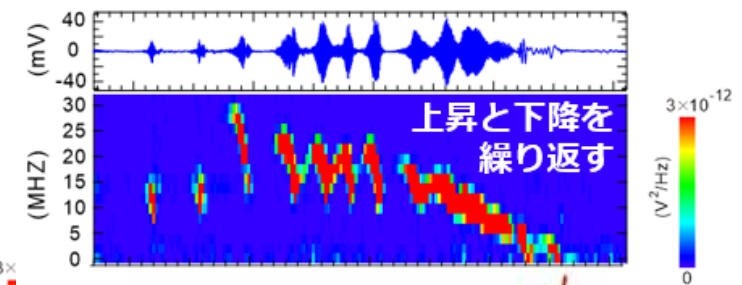
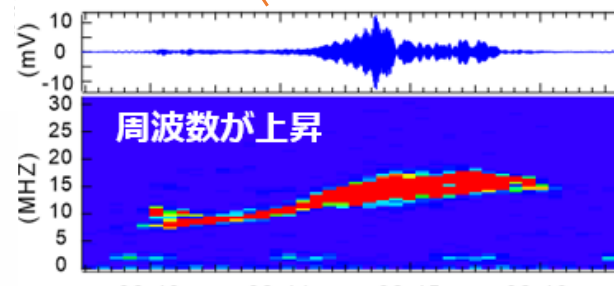
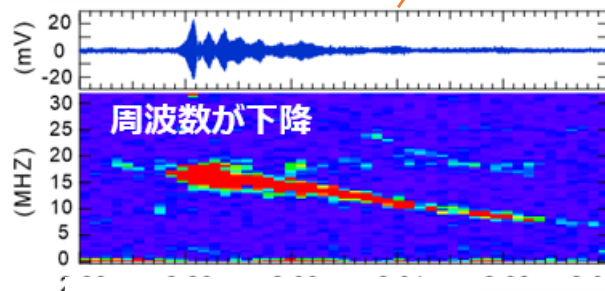
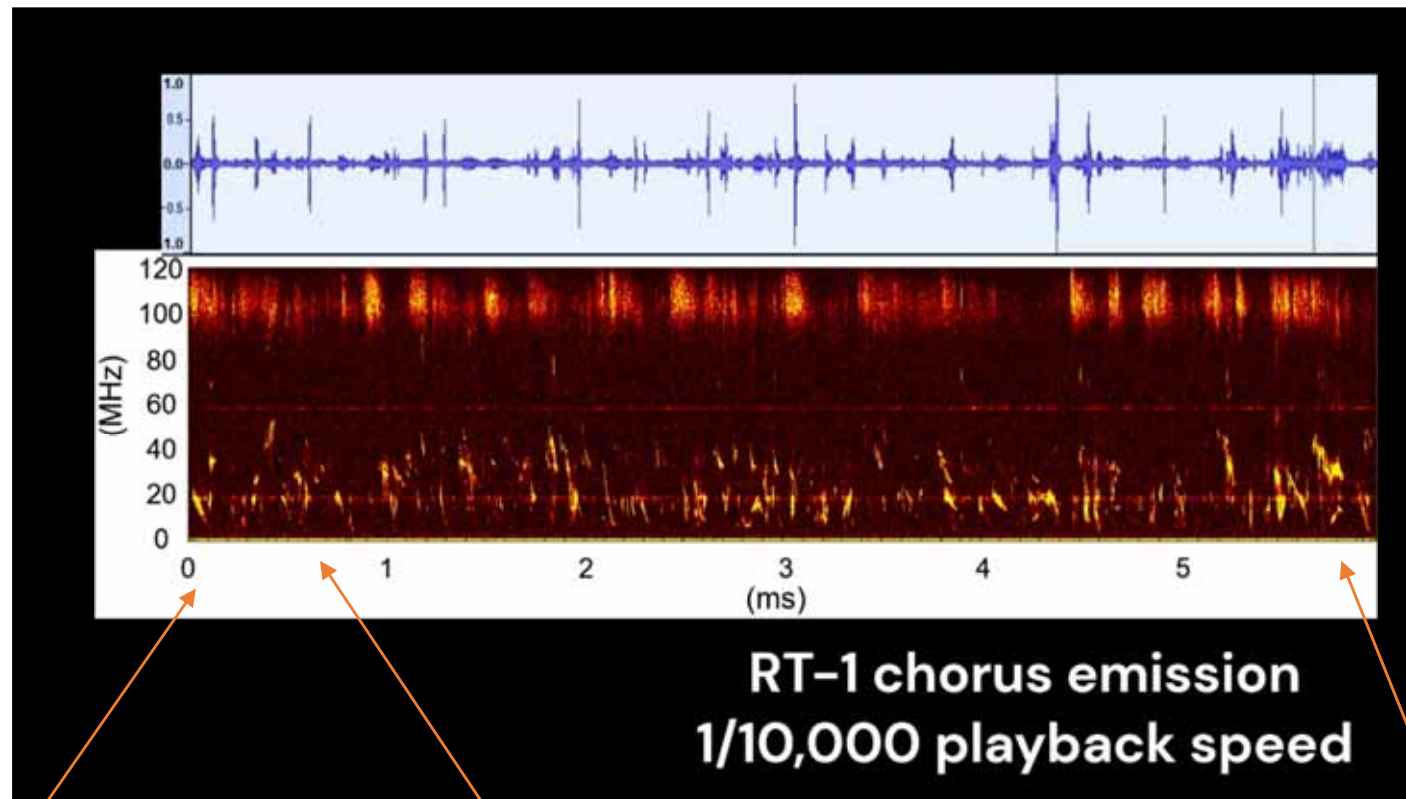
● 高温電子が
少ないとき



● 高温電子が
多いとき

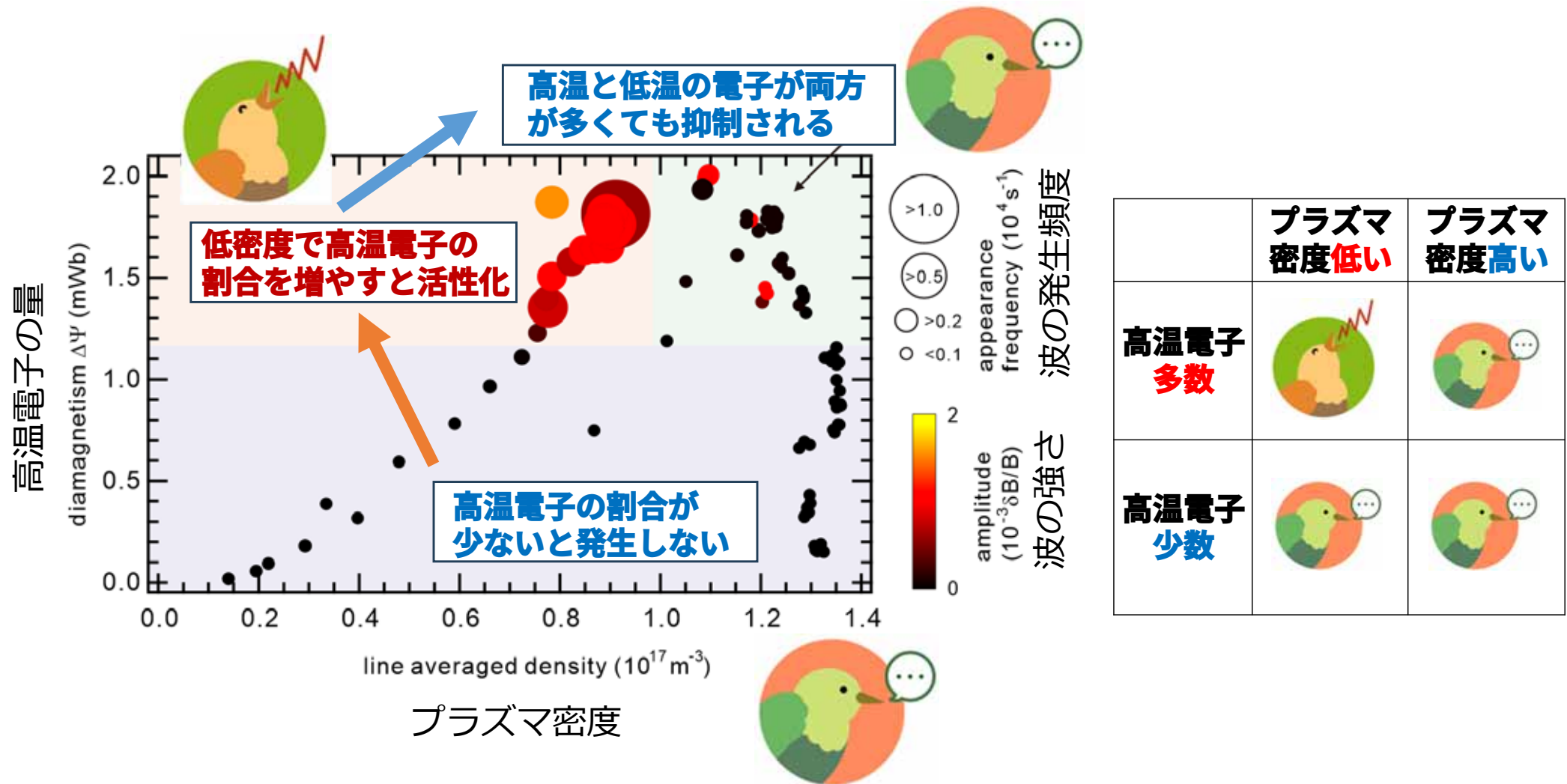


磁気圏同様のパターンを示すRT-1の「さえずり」



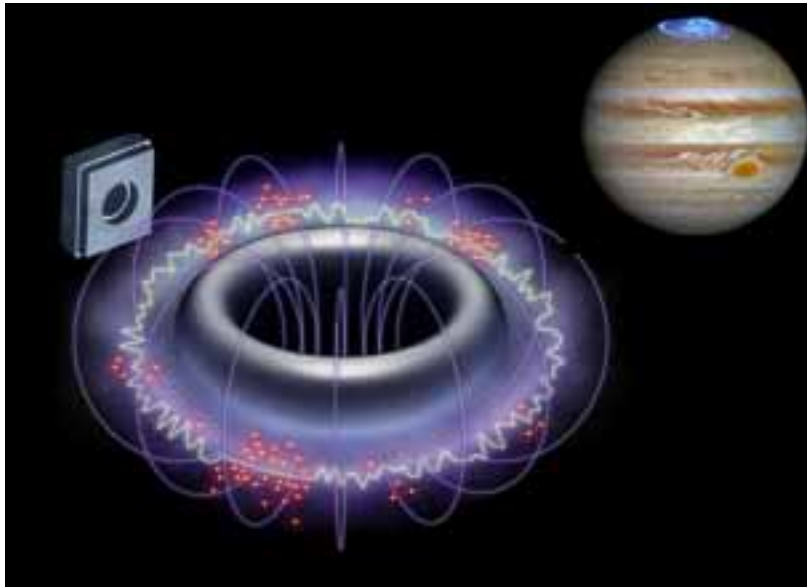
(磁気圏とRT-1で磁場強度と周波数が約1万倍異なり，人間の耳に聞こえるためにスロー再生) 9

コーラス放射の出現条件

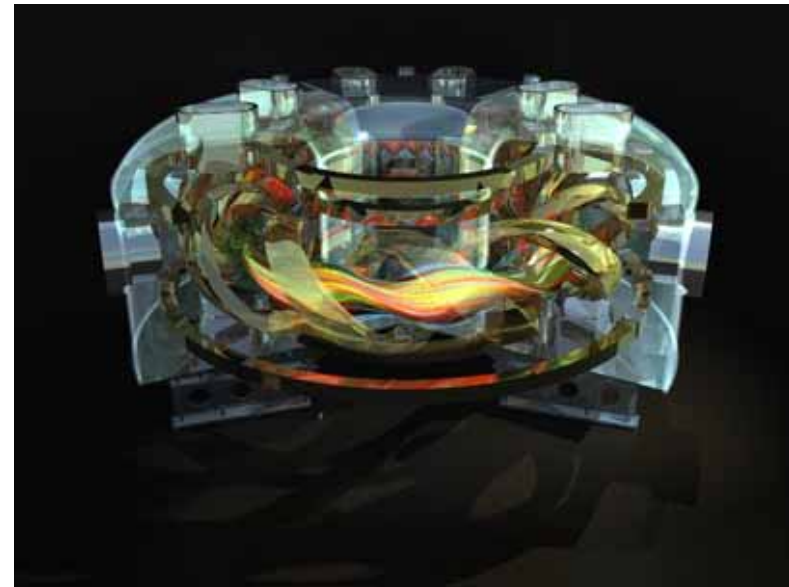


- 高温電子を持つプラズマがコーラス放射を自発励起
- 更に冷たい電子成分が増えるとコーラス放射は抑制される

コーラス放射が出現する条件は、理論予測と基本的に一致している



(人工) 磁気圏のプラズマ現象



核融合プラズマ実験 (NIFS LHD)

Credit: 森高 外征雄 博士

- コーラス放射の普遍性の発見と発生条件の解明は、ジオスペースにおける宇宙天気モデルの高精度化に貢献
- 粒子の加熱などコーラス放射と関わるメカニズムの解明や、また他の種類の波と関わる宇宙天気の実験室研究が可能になった
- 周波数変化を伴う波とプラズマの相互作用は、宇宙と核融合のプラズマに共通した研究課題であり、連携した研究が必要

- これまで探査機や理論・シミュレーションによる研究が主に行われてきた「ホイッスラーモード・コーラス放射」の実験室研究を可能にした
- 「人工磁気圏」RT-1装置による一連の研究により,
 - コーラス放射が、条件を満たすプラズマが自発的に励起する、宇宙と実験室に共通の普遍的な波であることを示した
 - また、コーラス放射が励起されるための条件を明らかにした
- ジオospaceにおけるコーラス放射など波が介在するプラズマの現象、特に宇宙天気モデルの高精度化への寄与が期待される
- 核融合と宇宙の分野で重要なプラズマ現象には多くの共通点があり、両分野が協力を深めながら研究が進むことが期待される

宇宙天気（太陽嵐）の過去の主なイベント

- 2022年2月
太陽フレアの影響でスペースX社の通信衛星が40機程度、大気圏に落下.
- 2012年7月
キャリントン・イベントに匹敵する太陽フレアが発生したが、運良く地球の反対側方向に向かったため影響は小さかった.
- 1989年3月
キャリントン・イベントの半分程度。北米で発電機の破壊と停電が発生.
- 1859年 キャリントン・イベント
記録に残る最も大きな太陽フレアが観測された。
ハワイでオーロラが出現，電報システムが停止し電報用紙が自然発火。
（もし現代に発生すれば，社会に甚大な影響が予想される）
- 775年の宇宙線飛来
キャリントン・イベントの約10倍の規模と推定されている。
アングロサクソン年代記に「空に赤い十字架と見事な大蛇が現れた」

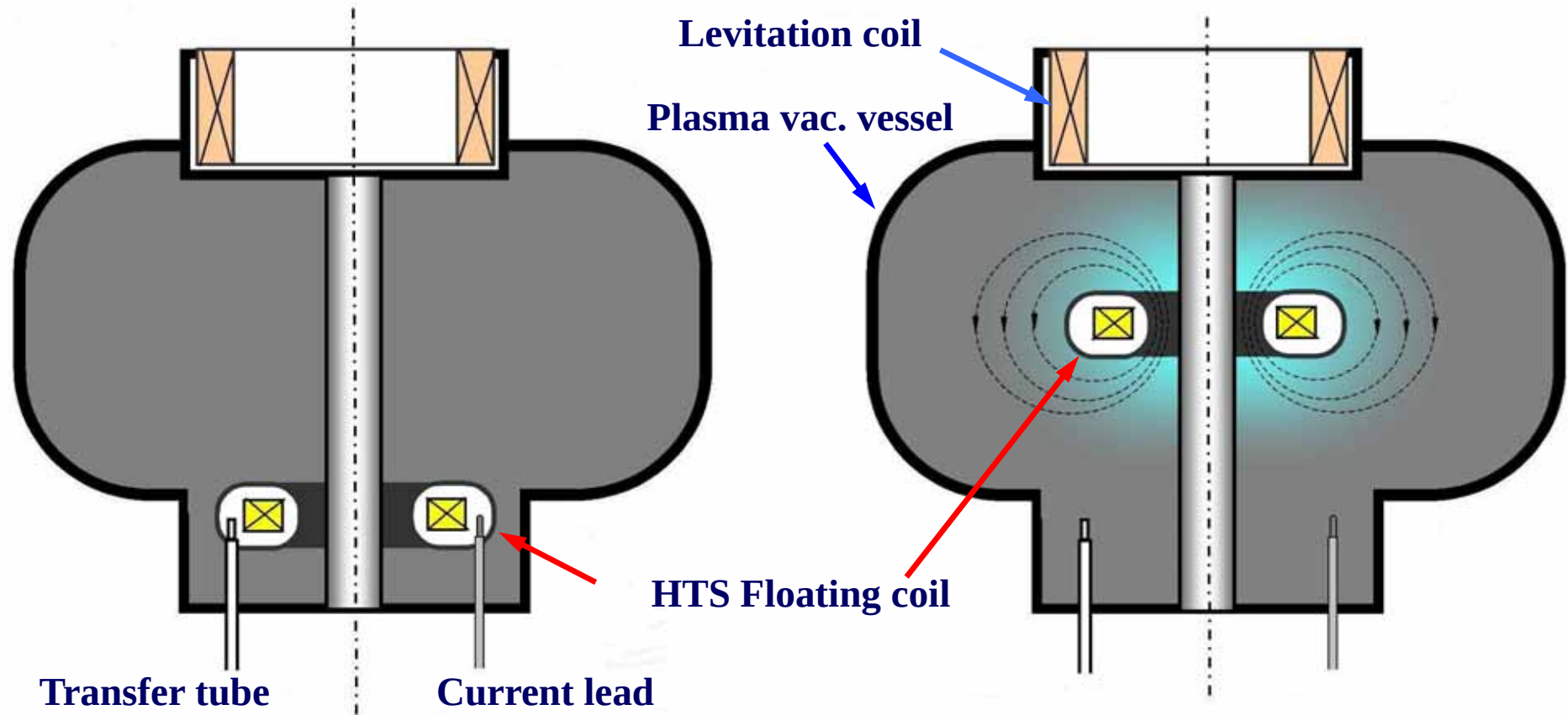
1859年のキャリントン・イベント (記録に残る最も活発な太陽嵐)



ハワイでもオーロラが出現，電信線で火花が散り電報システムが停止し，電報用紙は自然発火。
(現代社会で同じような太陽嵐が発生すれば，社会に甚大な影響が予想される)

- 宇宙天気現象の解明は，強靱な現代社会を実現するために非常に重要
- コーラス放射などプラズマの波の物理は，相対論的な高エネルギー電子の生成など，宇宙天気現象の要となるメカニズムをにぎる

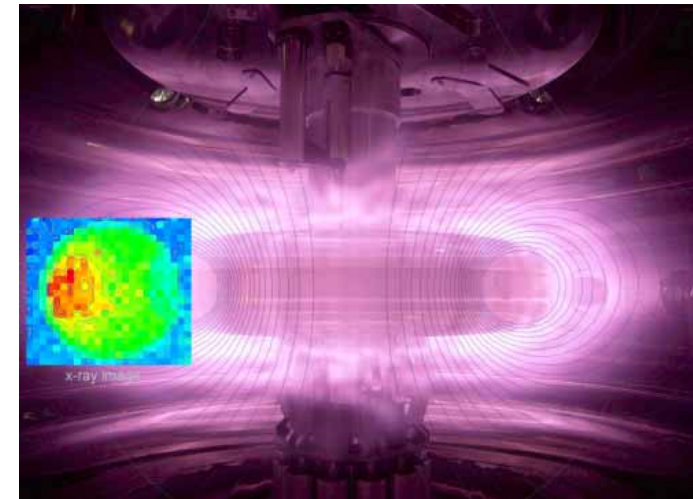
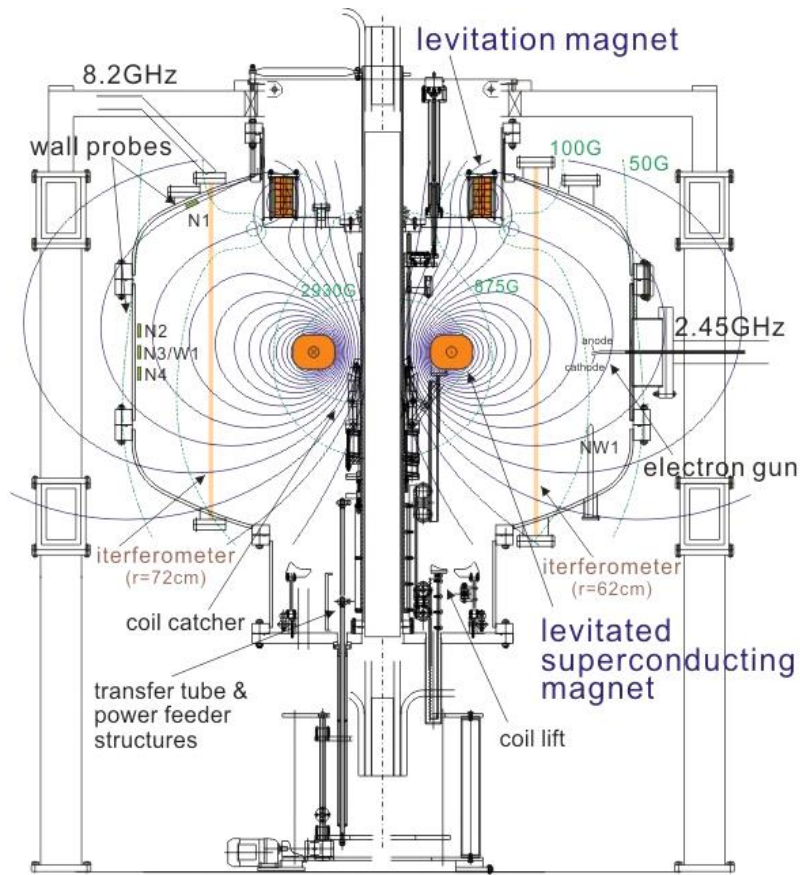
RT-1の装置運転の概念図



装置下部で超伝導コイルを20Kまで冷却（ヘリウムガス循環）後，116Aの永久電流を励起してマグネット化

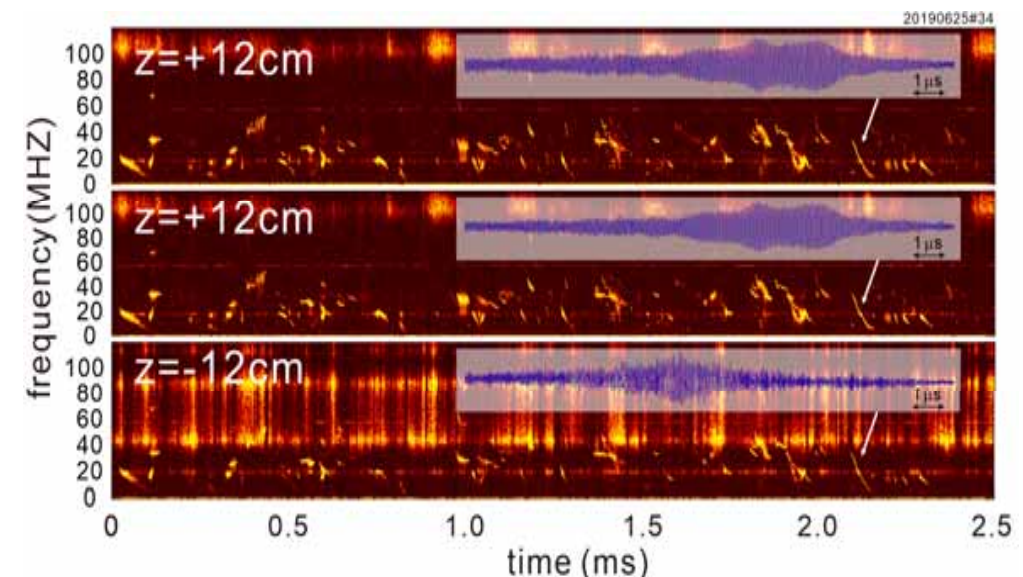
超伝導コイルを実験位置で浮上させ，コイルが暖まる（30Kが上限）前に6時間程度のプラズマ実験が可能

背景: RT-1の高温電子プラズマでは, 内向き輸送を駆動する低周波揺動以外にも, 電子サイクロトロン周波数付近の揺動が観測される



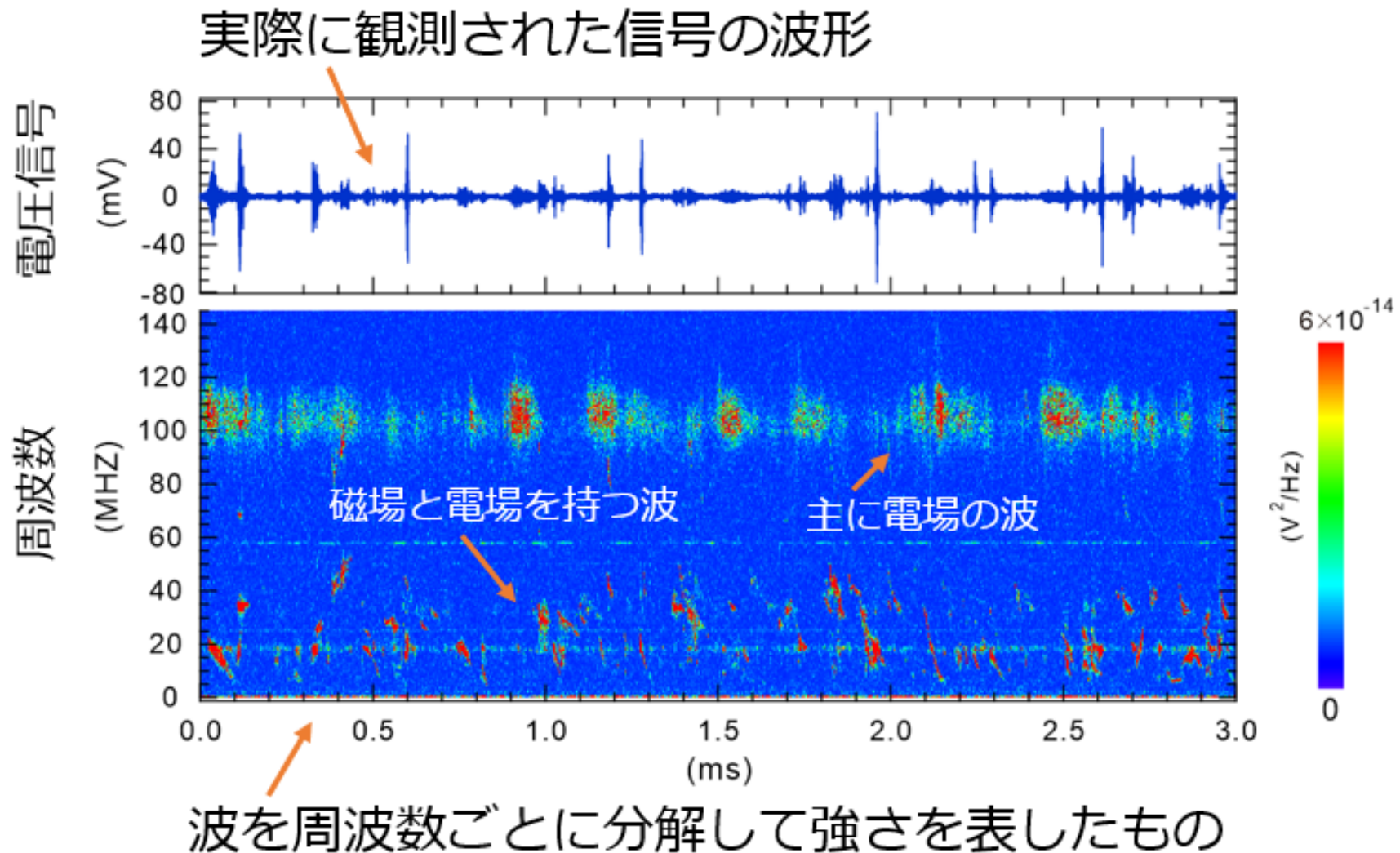
高温電子(10keV以上) による高 β 状態

- 「惑星磁気圏型」ダイポール磁場配位
- 高温超伝導コイルの磁気浮上
- Local $\beta \sim 100\%$, $N_e \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$
- 揺動現象 (低周波, 高周波)



ホイッスラー波の自発励起 ($f_{ce} \sim 140 \text{ MHz}$)
これまで主に磁気浮上時のプラズマで観測

コーラス放射の自発励起



RT-1のプラズマの中に高いエネルギーを持つ高温電子が存在する時、自発的にコーラス放射状のホイッスラー波が発生する