



JT-60Uにおけるイオンサイクロトロン放射の解析

研究背景

- イオンサイクロトロン放射ICE

これまでの実験結果

- ICRFアンテナ、典型的な放電における観測、分散関係

分散式計算コード

- 速度分布の設定、典型的なICE(^3He)とICE(T)の計算

考察

- ICE(^3He)2倍高調波単独励起

まとめ

2016年3月14日

第19回 若手科学者によるプラズマ研究会

「広い領域にわたるプラズマ物理の理解を目指した次世代の計測及び予測技術の展望」

那珂核融合研究所 JT-60制御棟2F 大会議室

筑波大学プラズマ研究センター

隅田 脩平, ジャン ソウオン

研究背景

研究背景

- イオンサイクロトロン放射ICE

これまでの実験結果

- ICRFアンテナ、典型的な放電における観測、分散関係

分散式計算コード

- 速度分布の設定、典型的なICE(^3He)とICE(T)の計算

考察

- ICE(^3He)2倍高調波単独励起

まとめ



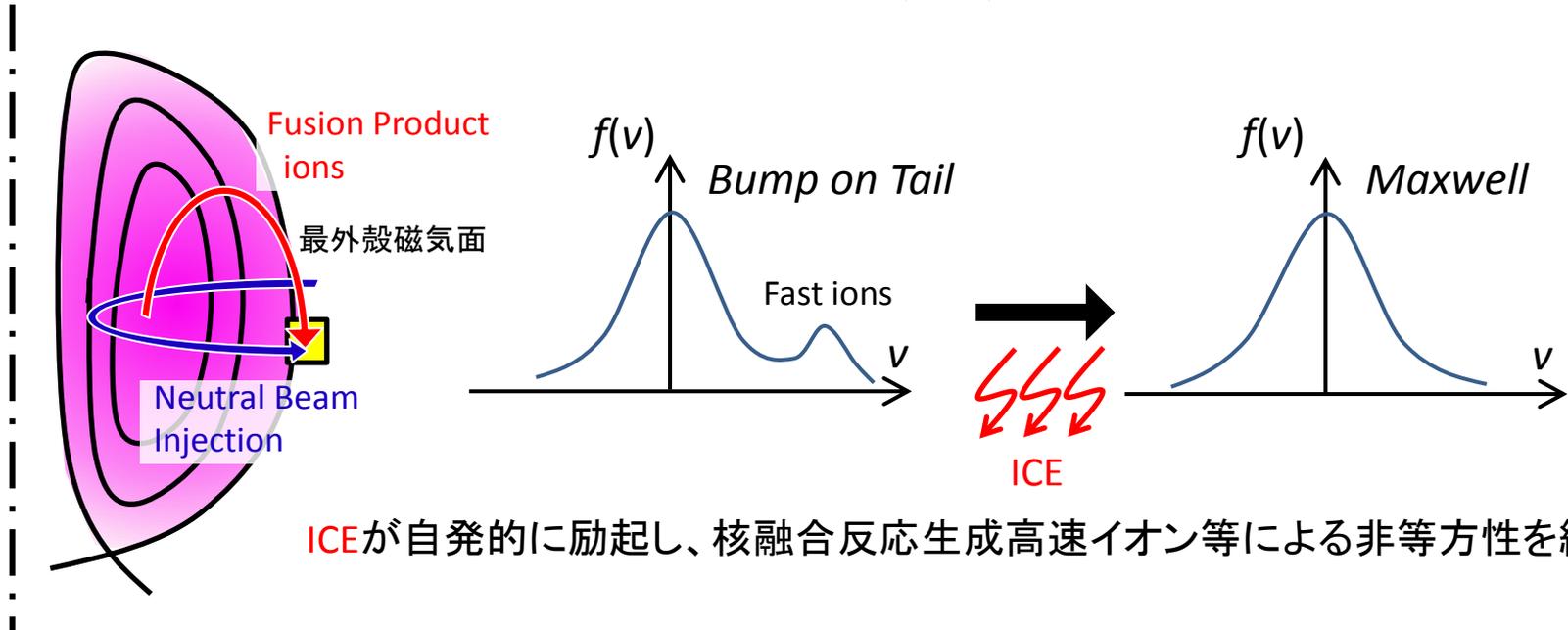
イオンサイクロトロン放射(ICE)

● プラズマ中における自発励起波動

等方からずれた速度分布を持つプラズマは、自発的に波動を励起し、その非等方性を緩和する。

イオンサイクロトロン放射(Ion Cyclotron Emission : ICE)

高速イオンによる非等方性を駆動力として、
イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)に自発的に励起する波動



ICEが自発的に励起し、核融合反応生成高速イオン等による非等方性を緩和

ITERなどの高い放射線環境下でもICEは計測できるため、
核融合反応率等の受動的な核燃焼プラズマ診断の一つとして期待されている。

これまでの実験結果

研究背景

- イオンサイクロトロン放射ICE

これまでの実験結果

- ICRFアンテナ、典型的な放電における観測、分散関係

分散式計算コード

- 速度分布の設定、典型的なICE(^3He)とICE(T)の計算

考察

- ICE(^3He)2倍高調波単独励起

まとめ

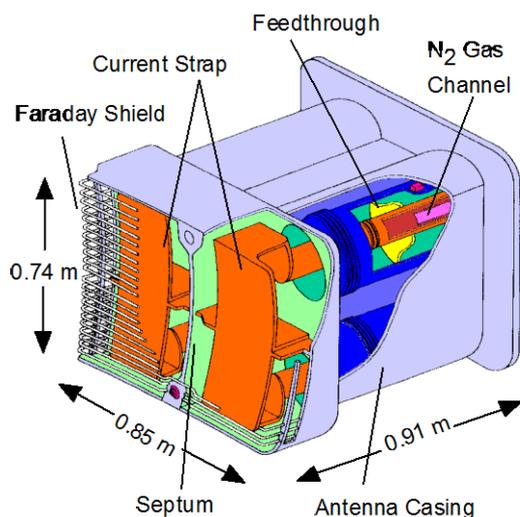
JT-60UにおけるICEの計測方法



ICRF : Ion Cyclotron Range of Frequency

● ICRF加熱用アンテナを磁気プローブとして計測

JT-60U ICRF heating system

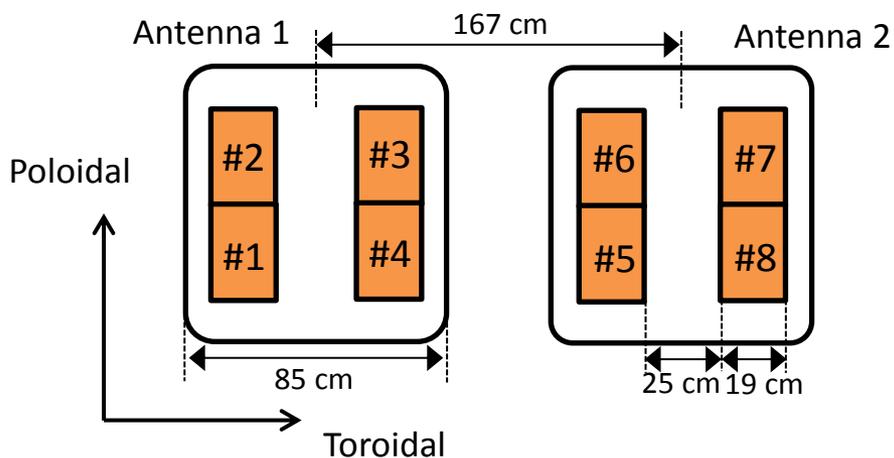


Frequency
102 - 131 MHz

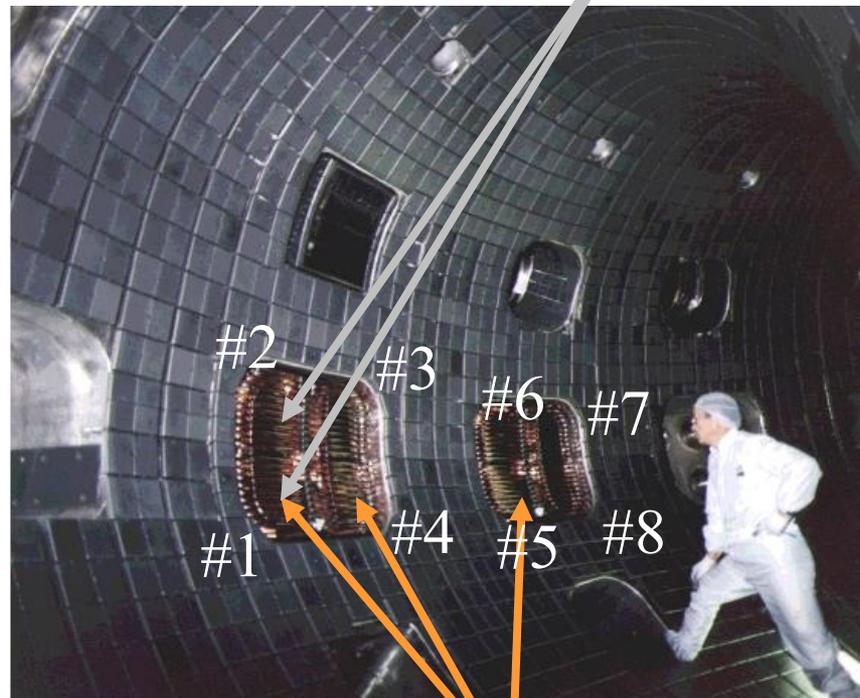
Generator power
10 MW for 3 sec
6MW for 10 sec
with 8 4CM2500KG

Achieved coupled power to the plasma
7.0 MW for 1 sec
at 116MHz

Number of antennas
2



Poloidal mode structure



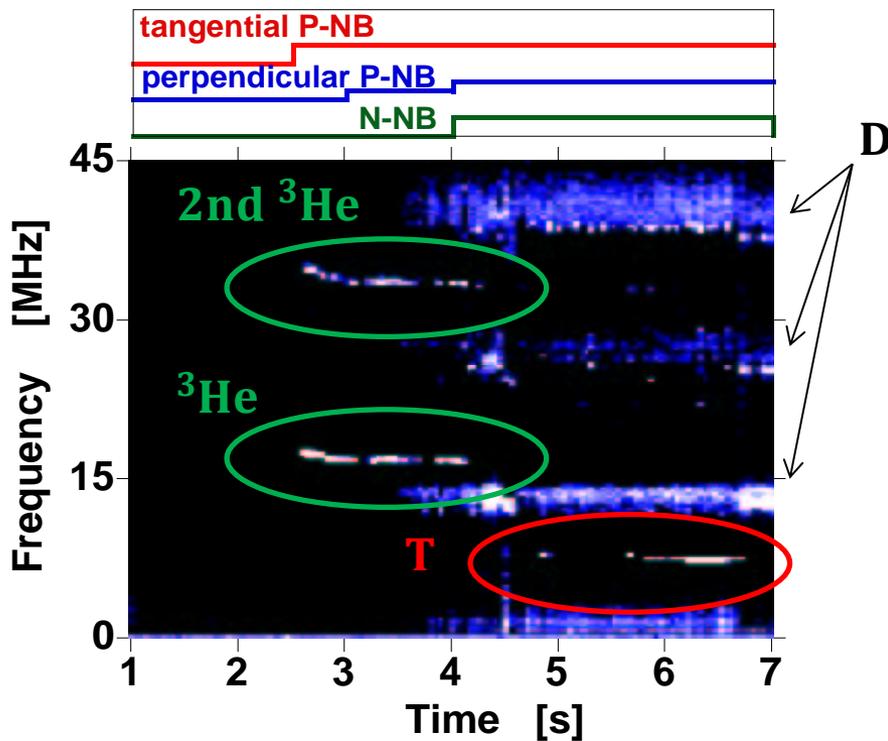
Toroidal mode structure

→ 励起波動の空間構造を実験的に計測可能

重水素プラズマ放電中のICEを観測



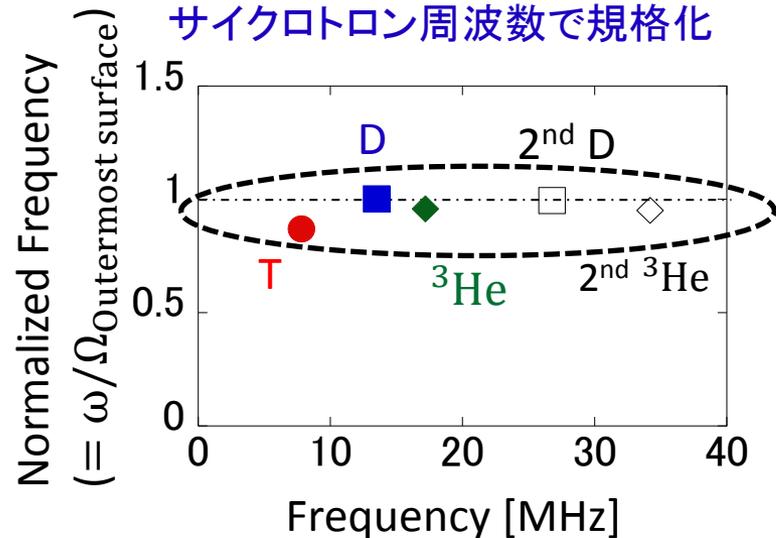
典型的な重水素プラズマ放電



$$\omega_T = \frac{qB}{\frac{3}{2}m} = \frac{2}{3}\omega_D$$

$$\omega_{{}^3\text{He}} = \frac{2qB}{\frac{3}{2}m} = \frac{4}{3}\omega_D$$

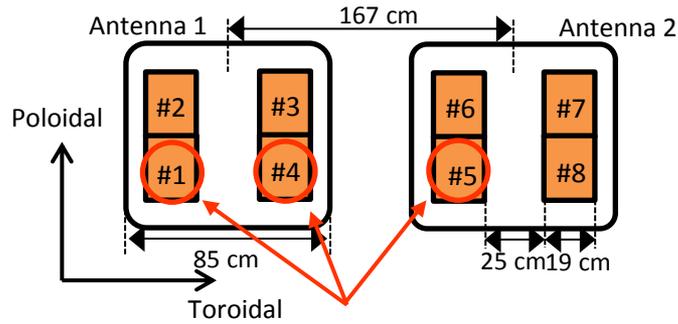
最外殻磁気面における各イオンのサイクロトン周波数で規格化



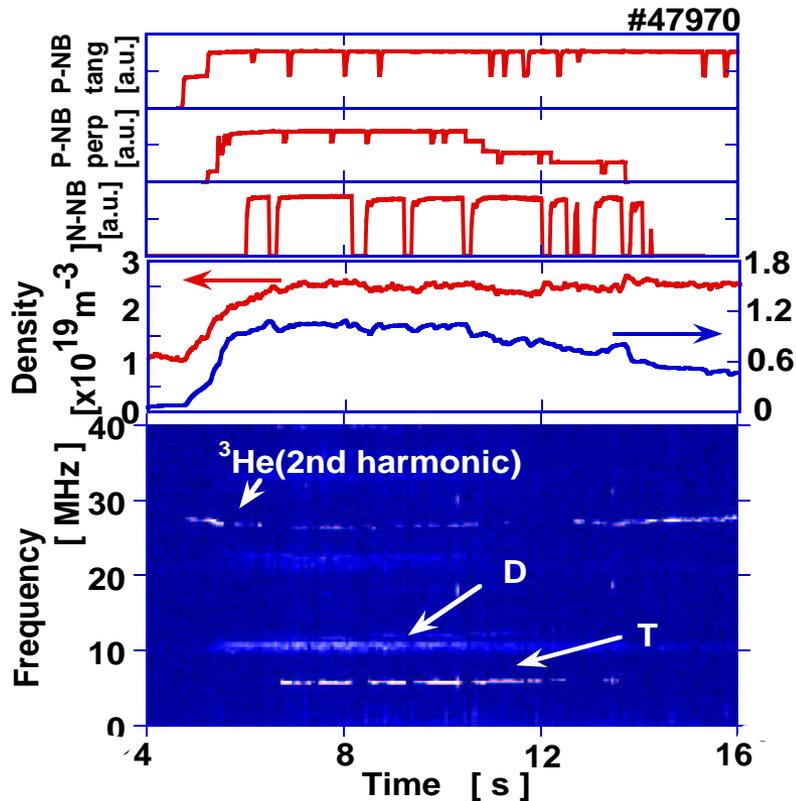
ICRFアンテナを用いて反応生成物やNBIに起因すると考えられるICEを観測



実験から得られるICEの分散関係



ICRFアンテナ(#1、#4、#5)により
トロイダル方向の位相差を計測

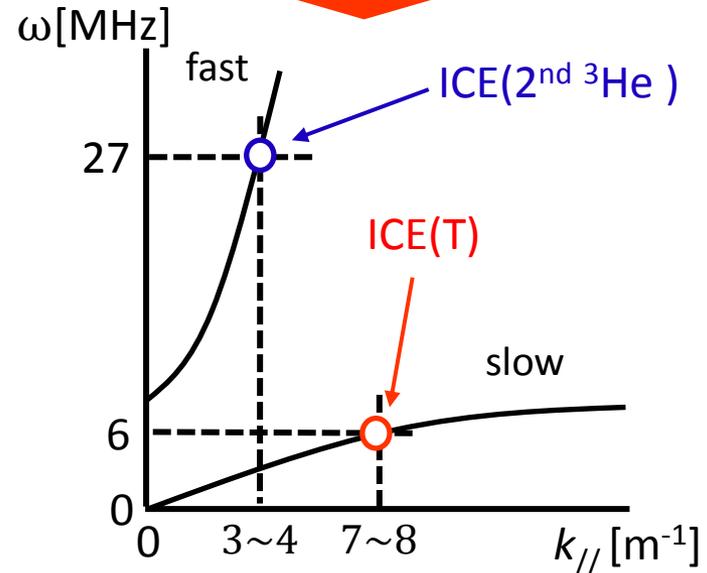


アンテナ間距離と位相差により
算出されたトロイダル方向波数

$$\left\{ \begin{array}{ll} k_{//} (2^{\text{nd}} \text{ } ^3\text{He}) & 3 \sim 4 \text{ m}^{-1} \quad (27 \text{ MHz}) \\ k_{//} (\text{T}) & 7 \sim 8 \text{ m}^{-1} \quad (6 \text{ MHz}) \end{array} \right.$$



分散関係



- ICE(³He) : fast wave (磁気音波不安定性)
→ JETやTFTRで観測されたICE(α)と同様
- ICE(T) : slow waveの可能性
→ 分散式を計算し、考察する

分散式計算コード

研究背景

- イオンサイクロトロン放射ICE

これまでの実験結果

- ICRFアンテナ、典型的な放電における観測、分散関係

分散式計算コード

- 速度分布の設定、典型的なICE(${}^3\text{He}$)とICE(T)の計算

考察

- ICE(${}^3\text{He}$)2倍高調波単独励起

まとめ

分散式計算コード

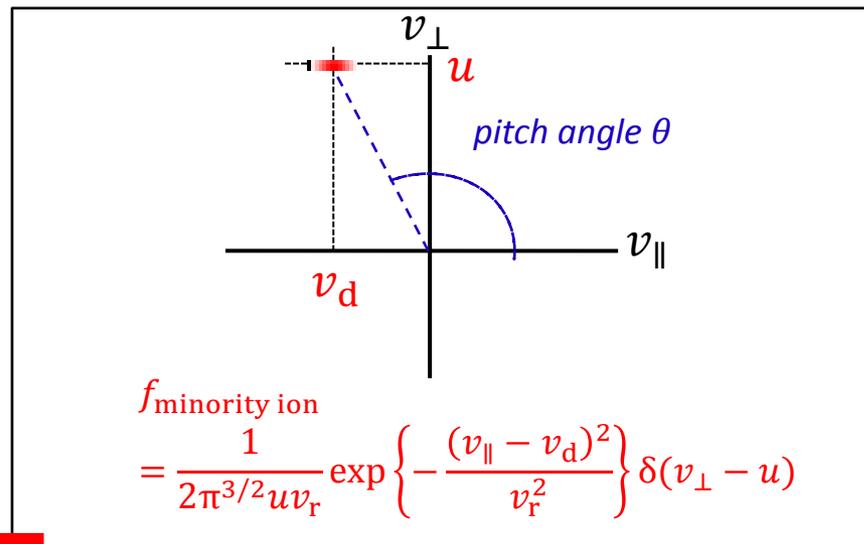
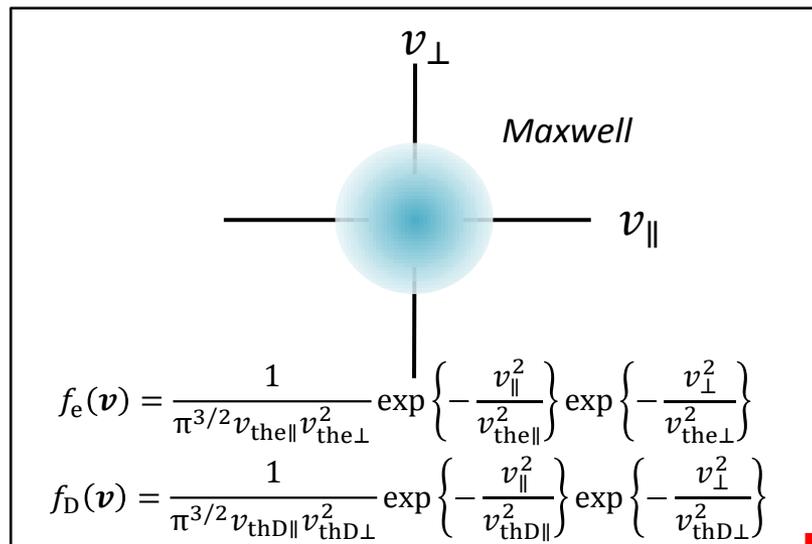


有限なピッチ角分布を持つ少数の高エネルギーイオンが存在する、

プラズマ中の分散式を解く

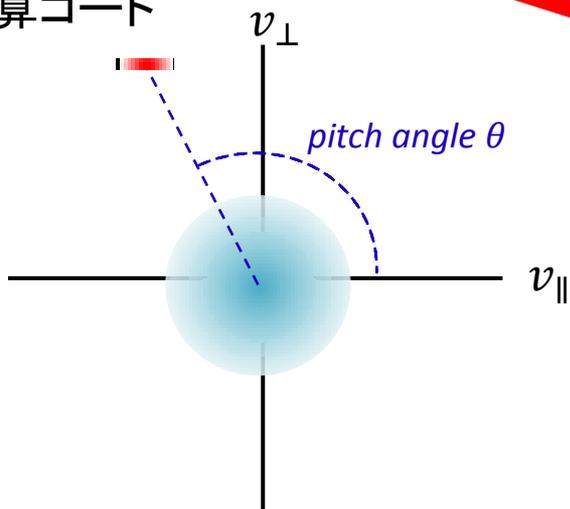
少数の高エネルギーイオン(${}^3\text{He}$, Tなど)

バルクプラズマ (D,e)



v_d : 磁力線に平行方向の速さ、 u : 垂直方向の速さ、
 v_r : 磁力線方向の速度の広がり

ICE分散式計算コード



バルクプラズマ (D,e)

+

少数の高エネルギーイオン(${}^3\text{He}$ 、Tなど)

故・渡辺二太名誉教授 (NIFS) が開発された
熱いプラズマの分散式計算コードを改良

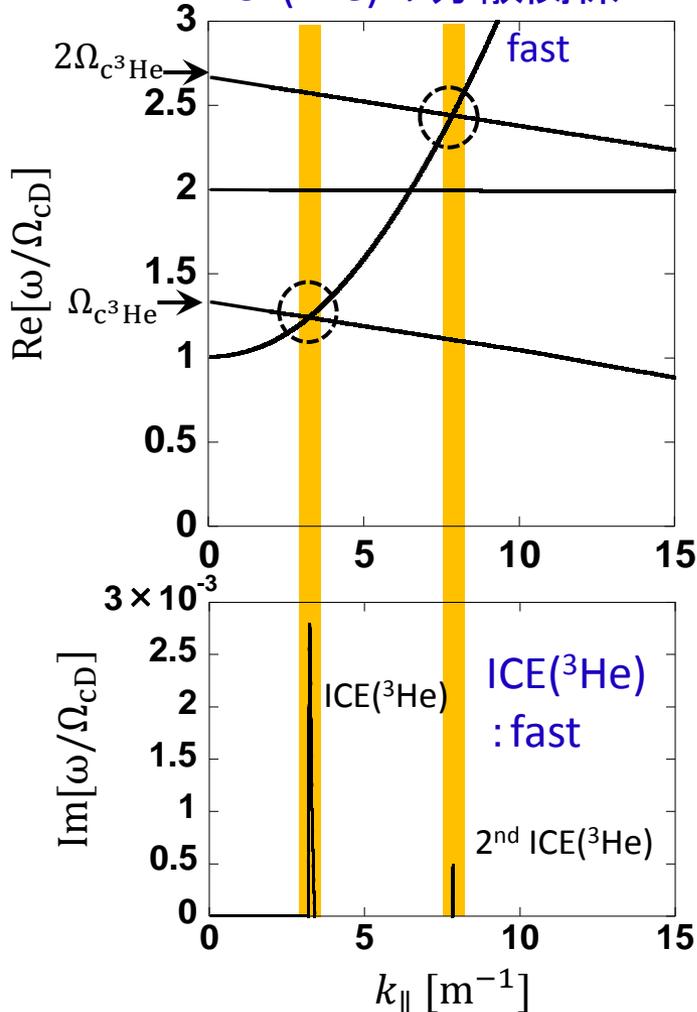
典型的なプラズマパラメータを用いてICE(^3He)とICE(T)を計算



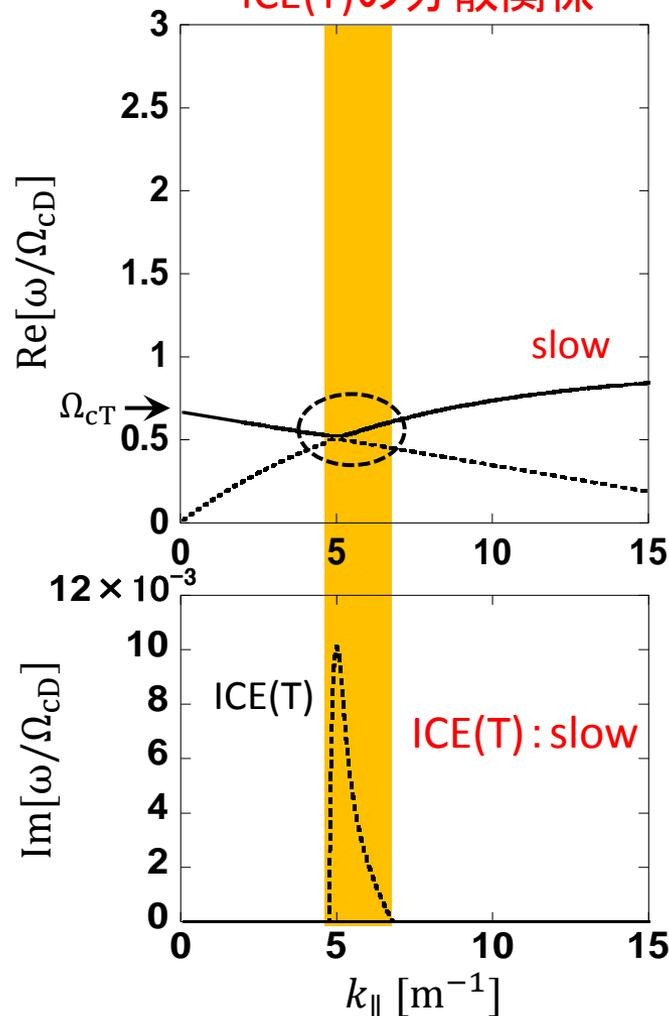
●典型的なプラズマパラメータ

バルクイオン:D、少数イオン: ^3He or T、バルク密度: $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、密度比:0.01 %、
 磁場:1.8 T、電子温度:500 eV、イオン温度:500 eV、少数イオンのピッチ角: 110°

ICE(^3He)の分散関係



ICE(T)の分散関係



考察

研究背景

- イオンサイクロトロン放射ICE

これまでの実験結果

- ICRFアンテナ、典型的な放電における観測、分散関係

分散式計算コード

- 速度分布の設定、典型的なICE(^3He)とICE(T)の計算

考察

- ICE(^3He)2倍高調波単独励起

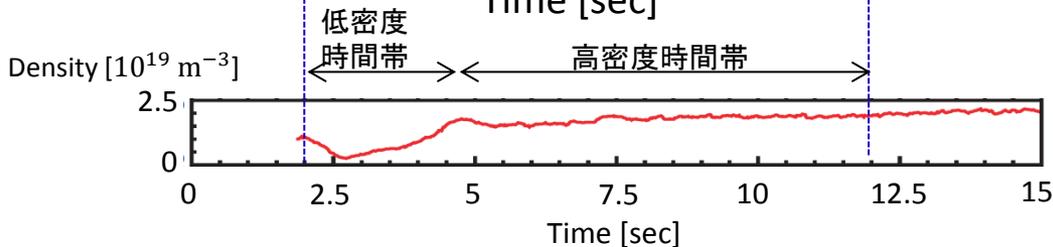
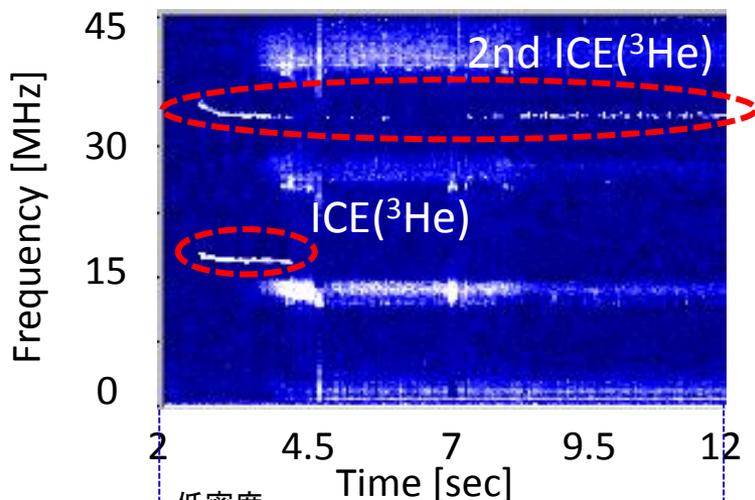
まとめ

ICE(³He)の2倍高調波が単独で観測

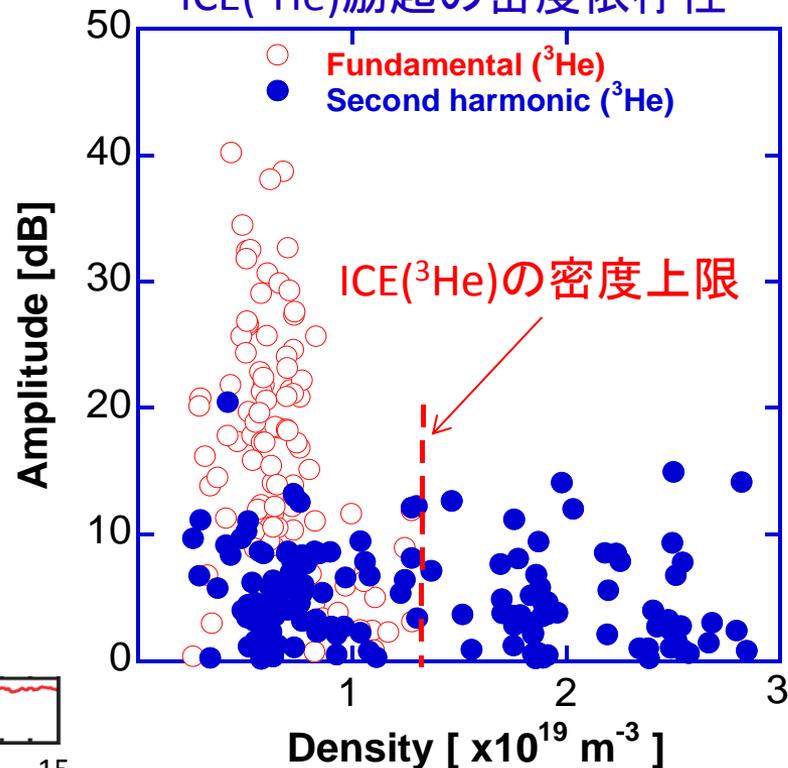


放電途中から2倍高調波のみ

#45410



ICE(³He)励起の密度依存性



ICE(³He) の励起に関して密度依存性がある。

→ 分散式計算コードによりICE(³He) の成長率を評価する

一般的な分散式

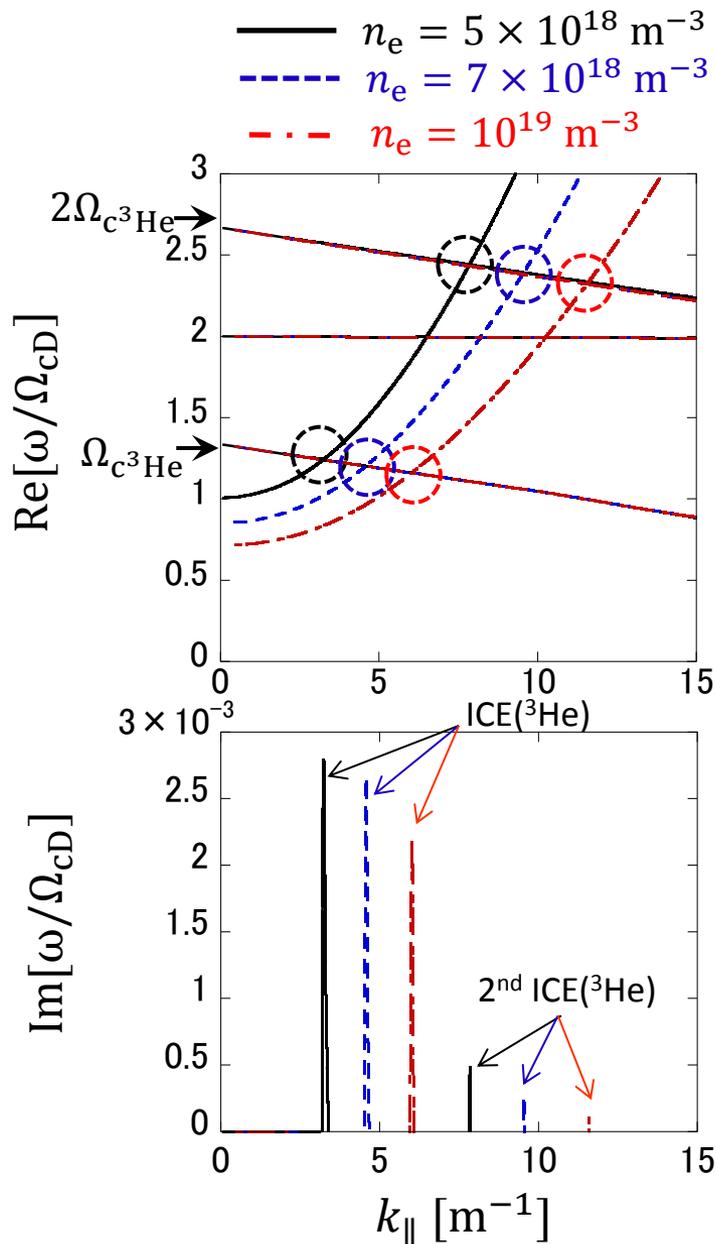
$$\frac{\omega}{k} = \frac{c}{N}$$

k : 波数

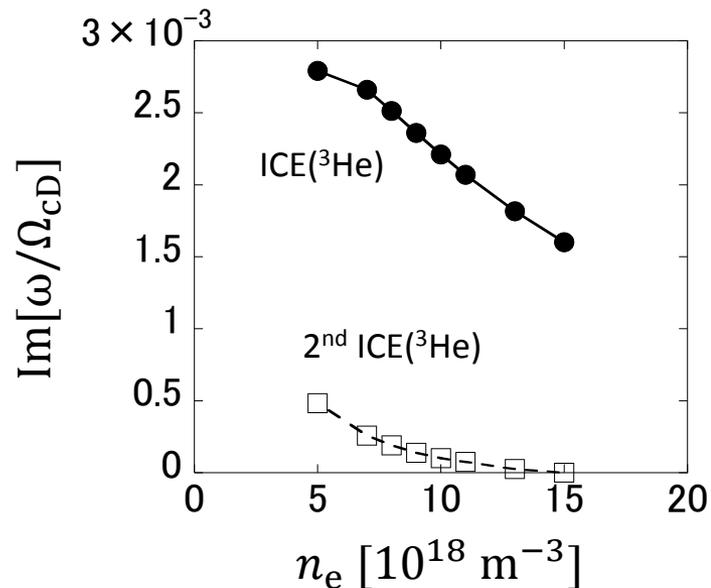
N : 屈折率 = $N(n, \dots)$

密度

ICE(³He)の密度に対する依存性 ($k_{\perp} = \text{Const.}$)



ICE(³He)成長率の密度に対する依存性

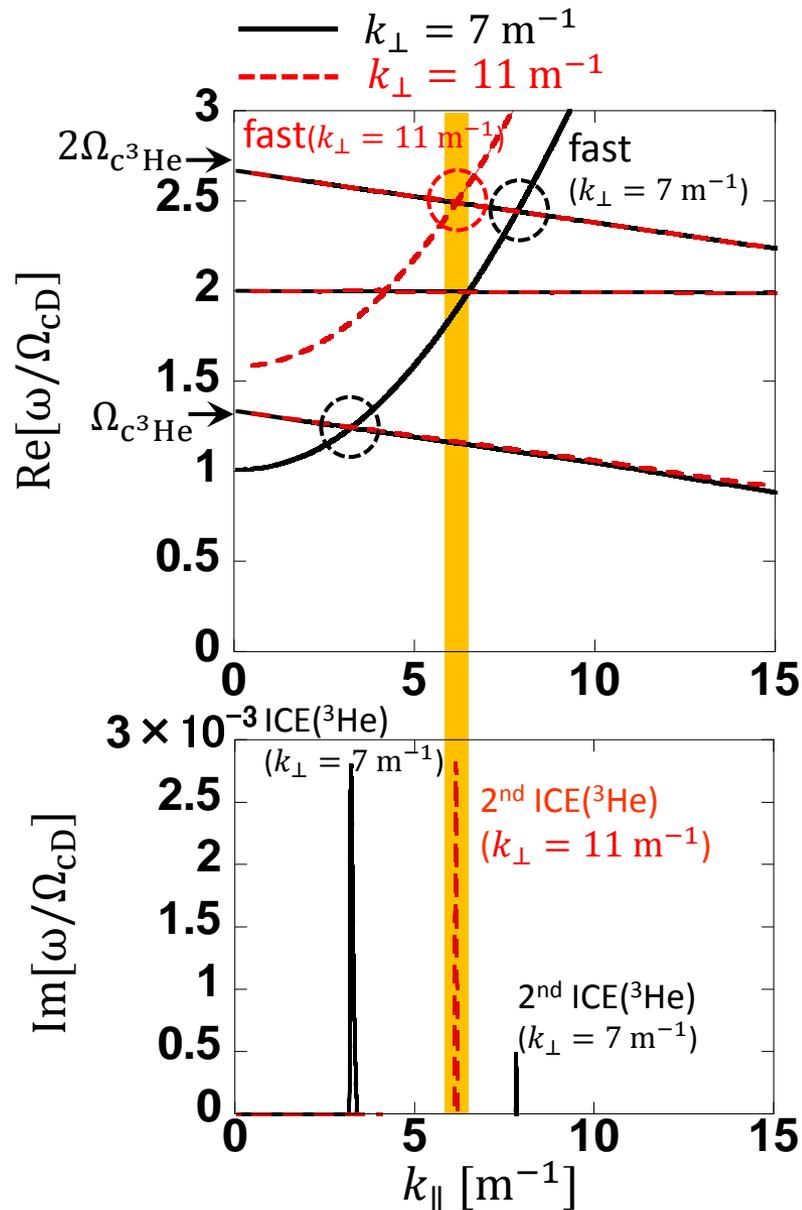


密度が上昇しても
ICE(³He)は不安定のままである。

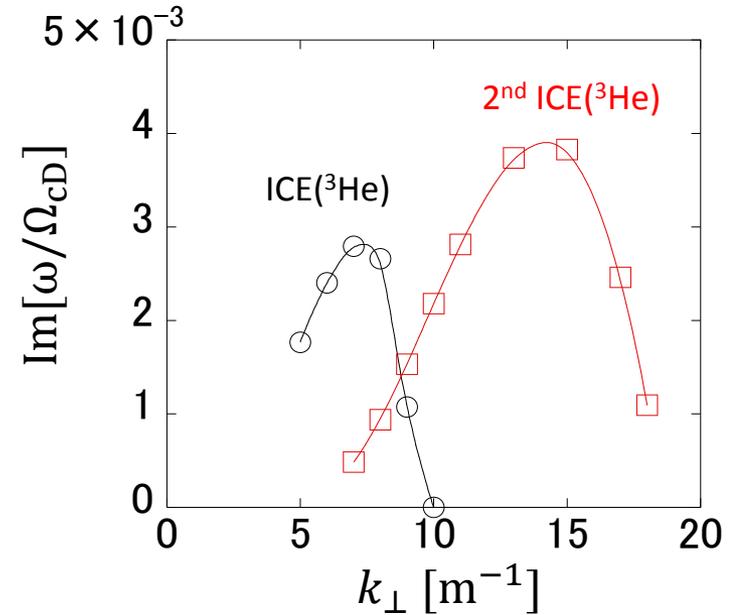
→ 次に密度上昇により
 k_{\perp} が大きくなると考える。

ICE(³He)の k_{\perp} に対する依存性

(密度=Const.)



ICE(³He)成長率の k_{\perp} に対する依存性



$k_{\perp} > 10 \text{ m}^{-1}$ では $2^{\text{nd}} \text{ ICE}({}^3\text{He})$ のみ不安定

● 一つの解釈

密度上昇により波数 k_{\perp} が大きくなり、ICE(³He)の基本波が励起されなくなる。

まとめ

研究背景

- イオンサイクロトロン放射ICE

これまでの実験結果

- ICRFアンテナ、典型的な放電における観測、分散関係

分散式計算コード

- 速度分布の設定、典型的なICE(^3He)とICE(T)の計算

考察

- ICE(^3He)2倍高調波単独励起

まとめ



核融合反応率等の受動的な核燃焼プラズマ診断の一つとして期待されている、イオンサイクロトロン放射(ICE)の分散関係に関する解析を行った。

これまでの実験結果

- トロイダル位置が異なる複数のアンテナを用いて、波動の位相差を測定することで、ICEのトロイダル方向波数を算出した。ICE(${}^3\text{He}$)はJETやTFTRのDTプラズマ実験で観測されたICE(α)と同様にアルベン速波に属すること、また、ICE(T)はアルベン遅波に属する波動である事が示唆された。

分散式計算コード

- ICEの励起機構をより詳細に議論するために、有限なピッチ角を持つ少数の高エネルギーイオンが存在するプラズマ中に励起される波動の分散式を解くコードを開発した。
- JT-60Uの最外殻磁気面付近の典型的なパラメータを代入して計算することで、ICE(${}^3\text{He}$)とICE(T)はそれぞれアルベン速波とアルベン遅波として不安定になることが明らかとなった。

考察

- 分散式計算コードを用いた解析により、ICE(${}^3\text{He}$)の基本波が励起されなくなる要因の一つの解釈として、密度上昇により k_{\perp} が大きくなったと示唆される。