

軌道追跡計算と波動分散計算を用いた JT-60U における ${}^3\text{He}$ イオンサイクロトロン放射の励起機構の解析

隅田脩平, 篠原孝司¹, 池添竜也², 市村 真, 坂本瑞樹, 平田真史, 井手俊介¹
筑波大プラズマ研,¹ 量研,² 九大応力研

トカマク装置において、イオンサイクロトロン放射(ICE)と呼ばれる波動の励起が観測されている。この ICE は高速イオンとの波動-粒子間相互作用の一種であり、イオンの速度分布の歪みにより駆動されると考えられている。これまでに理論研究から、ICE の励起機構の有力な候補として磁気音波型サイクロトロン不安定性(MCI)とその定在波が提案されてきた[1, 2]。しかし、高速イオン速度分布の実験解析結果に基づいて ICE の励起が MCI で説明できるか検証した研究はほとんど無く、ICE の励起機構の理解には至っていなかった。本研究の目的は、JT-60U において観測された DD 核融合生成高速 ${}^3\text{He}$ イオンが駆動すると考えられる ICE(${}^3\text{He}$) の励起機構を、実験プラズマパラメータ環境下での軌道追跡計算と波動分散計算を用いて明らかにすることである。まず、軌道追跡計算コード OFMC[3]を用いて JT-60U における高速 ${}^3\text{He}$ イオンの速度分布を評価することで、励起に必要な速度分布の特徴を調査した。次に、波動分散計算コードを用いてその速度分布の特徴が MCI の成長率に与える影響を調べた。

ICE(${}^3\text{He}$)の駆動に必要な高速 ${}^3\text{He}$ イオンの速度分布の特徴を特定するために、ICE(${}^3\text{He}$)が励起されると考えられる低磁場側最外殻磁気面近傍において、OFMCを用いて高速 ${}^3\text{He}$ イオンの速度分布を評価し、ICE(${}^3\text{He}$)の観測有無で速度分布を比較した。その結果、ICE(${}^3\text{He}$)が観測されるケースでは、速度分布中に急峻な bump-on tail 分布(反転したエネルギー分布)が形成されるのに対し、ICE(${}^3\text{He}$)が観測されないケースでは平坦に近い bump-on tail 分布、又は bump-on tail 分布が形成されていないことが明らかになった。そのため、ICE(${}^3\text{He}$)の励起には高速 ${}^3\text{He}$ イオンの急峻な bump-on tail 分布の形成が必要であることが示唆された[4]。

次に bump-on tail 分布の広がり MCI の成長率に与える影響を調べるために、任意の速度分布関数でも MCI の分散を計算できるような波動分散計算コードを開発した。この分散コードでは、プラズマのモデルは無限一様であり、波動の線形性を仮定している。そして、bump-on tail 分布の広がりを表現できる、以下の速度分布関数 f_b を高速 ${}^3\text{He}$ イオン速度分布として分散コードに導入した。

$$f_b = C_d \exp \left[-\frac{\{(v_{\parallel} - v_{0\parallel}) \cos \phi_0 + (v_{\perp} - v_{0\perp}) \sin \phi_0\}^2}{\delta v_E^2} \right] \\ \times \exp \left[-\frac{\{-(v_{\parallel} - v_{0\parallel}) \sin \phi_0 + (v_{\perp} - v_{0\perp}) \cos \phi_0\}^2}{\delta v_p^2} \right]$$

ここで、 C_d は速度分布の規格化定数、 $v_{0\parallel}$ と $v_{0\perp}$ はそれぞれ速度分布中心での磁力線に平行な速度と垂直な速度であり、 ϕ_0 は速度分布の中心でのピッチ角である。 δv_E と δv_p はそれぞれ速度分布のエネルギー方向とピッチ角方向の広がりを表す。 δv_E を小さくすると急峻な bump-on tail 分布を表現できる。図 1 に分散コードを用いて MCI の成長率を計算した結果を示す。bump-on tail 分布が急峻になるにつれて、MCI の成長率が急激に上昇することが分かった。この結果は、ICE(${}^3\text{He}$)の励起の有無が高速 ${}^3\text{He}$ イオンにより駆動される MCI の成長率で定性的に説明できることを意味している。本講演では、上記の軌道追跡計算と波動分散計算を用いた JT-60U における ICE(${}^3\text{He}$)の解析結果を詳細に報告する。

本研究成果は、日本原子力研究開発機構のスーパーコンピュータ「ICE X」を利用して得られたものである。

- [1] R. O. Dendy *et al.*, Phys. Plasmas **1**, 1918 (1994).
- [2] N. N. Gorelenkov and C. Z. Cheng, Phys. Plasmas **2**, 1961 (1995).
- [3] K. Tani *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **50**, 1726 (1981).
- [4] S. Sumida *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **61**, 025014 (2019).

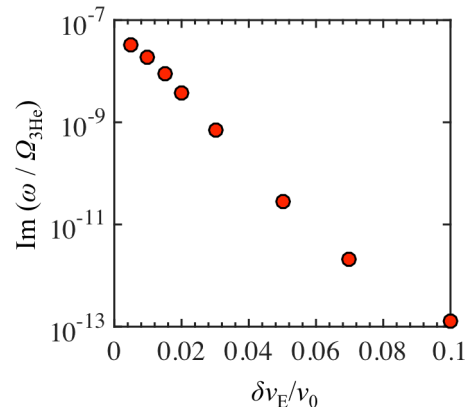


図 1. 分散コードを用いて計算された MCI の線形成長率 $\text{Im}(\omega / \Omega_{3\text{He}})$ の δv_E 依存性。ここで $\Omega_{3\text{He}}$ は ${}^3\text{He}$ イオンサイクロトロン角周波数である。