

氏名	隅田 脩平
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第 8940 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Study on Ion Cyclotron Emission Driven by Fusion Product in Tokamak Plasma
(トカマクプラズマにおける核融合生成物に駆動されるイオンサイクロトロン放射に関する研究)

主査	筑波大学 教授	理学博士	坂本 瑞樹
副査	筑波大学 教授(連携大学院)	理学博士	井手 俊介
副査	筑波大学 准教授	博士(理学)	吉川 正志
副査	筑波大学 准教授(連携大学院)	博士(工学)	仲野 友英

論文の要旨

本論文は、DD 核融合により生成された高速 ^3He イオンが駆動すると考えられているイオンサイクロトロン放射[ICE(^3He)]の励起機構を、磁気音波型サイクロトロン不安定性(MCI)により励起される波の分散と高速 ^3He イオンの速度分布の観点から明らかにしている論文である。核融合炉では、核融合反応により生成された高エネルギーイオン(高速イオン)がプラズマ中のイオンや電子と衝突することにより、プラズマの加熱を担う。核融合生成高速イオンによる加熱は核融合炉の性能に直結するため、核融合生成高速イオンの振る舞いと、高速イオンのエネルギー損失を引き起こす波動-粒子相互作用を理解することは非常に重要である。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きている。この ICE は高速イオンとの波動-粒子相互作用の一種であり、高速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。これまでの理論研究から、ICE の励起機構の有力な候補として MCI により励起される波とその定在波が提案されてきている。しかし、励起された波動の分散関係と駆動源である高速イオン速度分布の両方の観点から ICE の実験結果と MCI を比較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い。

本論文では、トカマク装置 JT-60U 実験でのプラズマパラメータ環境下で高速イオンの軌道を計算し、その空間・速度分布を評価するために、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構で開発された軌道追跡モンテカルロコード OFMC を用いた計算スキームが確立されている。通常の OFMC では、プラズマ加熱に用いられる中性粒子ビーム(NB)入射に起因する高速 D イオンの軌道計算が行われているが、本論文では高速 ^3He イオンに着目しているため、以下の計算が可能のように計算スキームが新たに構築さ

れている。高速 ^3He イオンの軌道を計算するには、高速 ^3He イオンの生成時の空間・速度分布が初期条件として必要であるため、 ^3He イオンが生成される DD 核融合反応として、サーマル・サーマル反応(プラズマ中の D イオン同士の反応)とビーム・サーマル反応(NB 入射に起因する高速 D イオンとプラズマ中の D イオンとの反応)が考慮されている。一般にビーム・サーマル核融合反応の割合が高いため、OFMC を用いて NB 入射に起因する高速 D イオンの軌道計算が行われた。ここでの軌道計算の初期条件には、実験での NB 装置の入射位置・角度や入射電力・ビーム加速電圧が元を与えられている。この高速 D イオンの軌道計算結果から、ビーム・サーマル反応により生成される高速 ^3He イオンの生成時の空間・速度分布が評価されている。さらに、サーマル・サーマル反応による高速 ^3He イオンの生成時の分布が、実験で計測されたプラズマパラメータから評価されている。次に、得られた ^3He イオンの生成時の空間・速度分布を初期条件として与えて、OFMC を用いて高速 ^3He イオンの軌道が計算されている。そして、高速 ^3He イオンの軌道計算結果から、高速 ^3He イオンの速度分布が評価されている。

ICE(^3He)が観測された放電において、OFMC を用いて高速 ^3He イオン速度分布が評価され、ICE(^3He) が励起されると推測されている位置で評価された速度分布は非等方なピッチ角分布と bump-on tail 分布の両方の特徴を有することが明らかにされた。そこで、MCI により励起された波の分散を計算するために、非等方なピッチ角分布と bump-on tail 分布の両方の特徴を有する簡易速度分布モデルである、drifting-ring-type 速度分布関数を取り扱える分散式計算コードが新たに開発されている。この分散コードでは、drifting-ring-type 速度分布を持つ少数の高速 ^3He イオンを含む、一様な D プラズマの線形化された波動方程式を数値的に解くことができる。分散コードを用いて、少数の高速 ^3He イオンを含む D プラズマ中での線形成長率が最大になる時の MCI により励起された波の分散を求め、実験で観測された ICE(^3He)の周波数とトロイダル波数が比較され、観測された ICE(^3He)の周波数は MCI により励起された波の周波数とほとんど一致しており、トロイダル波数は $\pm 1 \text{ m}^{-1}$ の範囲で一致していることが明らかされている。

ICE(^3He)の駆動に必要な高速 ^3He イオンの速度分布の特徴を特定するために、ICE(^3He)の観測有無での高速 ^3He イオンの速度分布が評価され、それぞれの比較が行われている。ここでは、高速 ^3He イオン速度分布を更に定量的に評価するために、 ^3He イオンの生成時の速度分布に核融合反応の散乱角と高速 D イオン速度ベクトルが与える影響が新たに考慮されている。その結果、ICE(^3He)が観測されるケースでは、速度分布中に急峻な bump-on tail 分布が形成されるのに対し、ICE(^3He)が観測されないケースでは平坦に近い bump-on tail 分布、または bump-on tail 分布が形成されていないことを明らかにしている。また、この急峻な bump-on tail 分布は ICE(^3He)が励起すると推定される位置近傍にのみ形成されており、観測結果とも矛盾しないことが示されている。そして、これらの bump-on tail 分布は MCI の駆動源の一つであるため、この高速 ^3He イオン速度分布の解析結果により、ICE(^3He)の励起には高速 ^3He イオンの急峻な bump-on tail 分布の形成が必要であることが初めて示されている。

高速 ^3He イオンの速度分布の解析により ICE(^3He)の励起を左右すると示唆された 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 により励起された波の分散を計算できるように解析接続の手法を用いて分散コードが改良されている。そして、bump-on tail 分布の広がりを表現できる高速 ^3He イオンの速度分布モデルを分散コードに導入して MCI の成長率が計算されている。その結果、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を明らかにしている。この結果より、ICE(^3He)の励起の有無は高速 ^3He 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が示されている。このように、本論文では駆動源である高速 ${}^3\text{He}$ イオン速度分布と励起された波動の分散の両方の観点で ICE(${}^3\text{He}$)の励起は MCI に起因することを初めて明らかにしている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

核融合反応により生成された高速イオンの振る舞いと、高速イオンのエネルギー損失を引き起こす波動-粒子相互作用を理解することは重要な課題である。本論文では、高速イオンの軌道の計算とその空間・速度分布を評価するための軌道追跡モンテカルロコード OFMC を用いた計算スキームが確立され、ICE(${}^3\text{He}$)が励起されると考えられる位置で評価された速度分布は非等方なピッチ角分布と bump-on tail 分布の両方の特徴を有することを明らかにしている。さらに、非等方なピッチ角分布と bump-on tail 分布の両方の特徴を有する簡易速度分布モデルである drifting-ring-type 速度分布関数を取り扱える分散式計算コードが新たに開発され、実験で観測された ICE(${}^3\text{He}$)の周波数は MCI により励起された波の周波数とほとんど一致しており、トロイダル波数は $\pm 1 \text{ m}^{-1}$ の範囲で一致していることが明らかされている。 ${}^3\text{He}$ イオンの生成時の速度分布に核融合反応の散乱角と高速 D イオン速度ベクトルが与える影響が新たに考慮された高速 ${}^3\text{He}$ イオン速度分布の解析から、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初めて示されている。また、任意の速度分布関数でも MCI により励起された波の分散を計算できるように解析接続の手法を用いて分散コードが改良され、ICE(${}^3\text{He}$)の励起の有無は高速 ${}^3\text{He}$ 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が示された。これらの研究成果から、駆動源である高速 ${}^3\text{He}$ イオン速度分布と励起された波動の分散の両方の観点で ICE(${}^3\text{He}$)の励起は MCI に起因することを初めて明らかにしている。本論文は核融合プラズマ研究に対して重要な知見を与えるものであり、学位論文として十分価値のあるものであると評価された。また、学位論文審査における質問に対して的確な回答が得られた。

〔最終試験結果〕

平成 31 年 2 月 20 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。