

氏 名 王 灝(WANG, Hao)

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 1545 号

学位授与の日付 平成24年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Simulation Study of Energetic Particle Driven Alfvén
Eigenmodes and Geodesic Acoustic Modes in Toroidal Plasmas

論文審査委員 主 査 教授 渡邊 智彦
教授 藤堂 泰
准教授 磯部 光孝
准教授 村上 定義 京都大学
研究主幹 篠原 孝司
日本原子力研究開発機構

論文内容の要旨

Energetic particle driven instabilities are important issues for fusion plasmas because they lead to energetic particle transport and losses. Especially for fusion burning plasmas, where the energetic alpha particles play the leading role in the fuel plasma heating, the energetic particle driven instabilities should be suppressed or mitigated for the better confinement of the energetic alpha particles. Then, the understanding of the fundamental properties of energetic particle driven instabilities will contribute to the successful operation of the future fusion reactors. In this dissertation, the linear properties and the nonlinear evolution of energetic particle driven Alfvén eigenmodes and geodesic acoustic modes (GAM) are investigated using a hybrid simulation code for magnetohydrodynamics (MHD) and energetic particles.

The interaction between energetic particles and Alfvén eigenmodes in reversed shear tokamak plasmas are investigated for different minimum safety-factor values. When the energetic particle distribution is isotropic in velocity space, it is demonstrated that the transition from low-frequency reversed shear Alfvén eigenmode (RSAE mode) to toroidal Alfvén eigenmode (TAE mode) takes place as the minimum safety-factor value decreases. The frequency rises up from a level above the GAM frequency to the TAE frequency. It is found that the energetic particles both co- and counter-going to the plasma current are transported by the TAE mode, whereas the co-going particles are primarily transported by the low-frequency RSAE mode. When only the co-passing particles are retained, the low-frequency RSAE modes are primarily destabilized. On the other hand, the high-frequency RSAE modes are destabilized when only the counter-passing particles are retained.

The linear properties and the nonlinear evolution of energetic particle driven GAM (EGAM) are explored for the Large Helical Device (LHD) plasmas. Since the kinetic GAM frequency in LHD is close to that in tokamaks, tokamak type equilibria are examined with concentric magnetic surfaces, and with the safety factor profiles and the aspect ratio similar to the LHD plasmas. For the linear properties, it is found that the EGAM is a global mode because the fluctuation frequency is spatially constant, whereas the conventional local GAM frequency constitutes a continuous spectrum that varies depending on the plasma temperature and the safety-factor. The frequency of the EGAM intersects with the GAM continuous spectrum. The EGAM frequency is lower for the higher energetic particle pressure. The poloidal mode numbers of poloidal velocity fluctuation, plasma density fluctuation, and magnetic fluctuation are $m=0$, 1, and 2, respectively. Good agreement is found between the LHD experiment and the simulation result in the EGAM frequency and the mode numbers. The EGAM spatial profile depends on the energetic particle spatial distribution and the equilibrium magnetic shear. The wider energetic particle spatial profile broadens the EGAM spatial profile. The EGAM spatial profile is wider for the reversed magnetic shear than for the normal shear.

The nonlinear evolution of EGAM is studied using the hybrid simulation code. The frequency chirping of EGAM has been observed in LHD and tokamaks. The frequency chirping up and down is found to take place in the simulation results. In order to understand the physics mechanism of the

frequency chirping, the energetic particle distribution function and the energy transfer rate from the particles to the wave are analyzed in 2-dimensional velocity space of energy and pitch angle variable. In the linearly growing phase of the instability, two resonant regions, one destabilizing and the other stabilizing the EGAM, are found in the velocity space. In the nonlinearly frequency chirping phase, a pair of hole and clump is created at each resonant region. A hole and a clump correspond to negative and positive fluctuation, respectively in the distribution function. Then, two pairs of hole and clump are created, one at the destabilizing region and the other at the stabilizing region. The transit frequencies of the holes and clumps are compared with the EGAM frequency. The transit frequencies of the holes and clumps are in good agreement with the two branches of the EGAM frequency, one chirping up and the other chirping down. This indicates that the holes and clumps are kept resonant with the EGAM and the frequency chirping can be attributed to the hole-clump pair creation. The hole-clump pair creation and the associated frequency chirping are known to take place when the system is close to the instability threshold for the inverse Landau damping. However, the direct numerical simulations have so far been limited to the hole-clump pair creation at the destabilizing region in 1-dimensional velocity space. The result presented in this dissertation is the first numerical demonstration of a) hole-clump pair creation and frequency chirping for EGAM, b) two pairs creation at the destabilizing and the stabilizing regions, and c) hole-clump pairs in 2-dimensional velocity space.

博士論文の審査結果の要旨

磁場閉じ込め核融合プラズマ中には、中性粒子ビーム入射や波動加熱によってつくられる高いエネルギーをもつ荷電粒子が存在する。これらの高エネルギー粒子をトーラス磁場中に効率良く閉じ込めることは、核融合反応によって生成される高エネルギー α 粒子がプラズマ加熱を担う将来の核燃焼プラズマの維持にも関わる重要な研究課題である。本博士論文で出願者は、核融合プラズマにおいて高エネルギー粒子が引き起こす磁気流体不安定性の計算機シミュレーションを実行し、不安定モードの線形および非線形挙動と高エネルギー粒子輸送に関する研究を行った。まず、磁場のねじれ具合を表す指標となる安全係数がトーラス小半径方向に極小値を持つ、いわゆる反転磁気シア配位のトカマク・プラズマに着目し、安全係数の極小値に応じて、高エネルギー粒子により励起されるアルヴェン固有モードの性質が変化することを示し、それにともない高エネルギー粒子の輸送特性が影響を受けることを明らかにした。次に、大型ヘリカル装置（LHD）を想定した安全係数分布を持つトーラス・プラズマにおいて、高エネルギー粒子が引き起こす軸対称の磁気流体的振動（測地的音響モード；いわゆるEGAM）の線形特性を詳細に解析した。さらに非線形シミュレーションによってEGAMの周波数変調現象を新たに見出し、LHD実験計測との良い一致を確認した。

論文の第1章では研究の背景と動機が述べられ、第2章では、高エネルギー粒子の運動論的挙動と背景プラズマの磁気流体力学的振る舞いを同時に扱うことのできるハイブリッド・シミュレーション手法の概要がまとめられている。

第3章では、高エネルギー粒子とアルヴェン固有モードの相互作用についての研究成果が述べられている。これまでのトカマク実験で観測されているように安全係数の極小値に依存してトーラス磁場中でのアルヴェン波の分散関係が変化し、これに伴い、高エネルギー粒子により励起されるモードが、反転磁気シア・アルヴェン固有モード（RSAE）からトロイダル・アルヴェン固有モード（TAE）へと遷移することがシミュレーションによって示された。さらに、RSAEが主にプラズマ電流と同方向に運動する高エネルギー粒子を輸送するのに対して、TAEは同方向運動粒子と反対方向運動粒子の双方を輸送することを、シミュレーションにより明らかにした。

第4章では、近年注目を集めているEGAMについて、LHDプラズマを対象とした包括的な研究成果がまとめられている。その前半部分では、不安定性を駆動する高エネルギー粒子の位相空間分布を明らかにするとともに、トーラス配位全体におよぶEGAMのモード構造や固有周波数・成長率が、プラズマ温度や高エネルギー粒子分布、安全係数分布にどのように依存するかを詳細に解析した。さらに第4章後半部分では、EGAMの周波数変調に関する非線形ハイブリッド・シミュレーションに初めて成功し、高エネルギー粒子分布関数に特徴的なhole-clump構造が現れること、hole-clump構造を構成する粒子の周回周波数はEGAM周波数と一致して変化し、これらの粒子がEGAM周波数の非線形変調に密接に関連していることを明らかにした。シミュレーションで見られた周波数変調と良く似た周波数特性を有するEGAMがLHD実験においても観測されており、本論文にまとめられた成果はその物理機構の理解に重要な貢献をなしている。

最後に、第5章では、全体のまとめと今後の課題が述べられている。

以上のように、本論文は、核燃焼プラズマ研究の重要課題である高エネルギー粒子とアルヴェン固有モードおよび測地的音響モードとの相互作用に関して新たな知見を与えるとともに、その理解を進展させるものであり、高エネルギー粒子閉じ込め改善に向けた今後の研究の発展に大きく寄与することが期待される。よって、本審査委員会は本論文が博士学位論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。