

氏 名	前 川 孝 まえ かわ たかし
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 523 号
学位授与の日付	昭 和 53 年 5 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 一 専 攻
学位論文題目	クロスフィールド電流による不安定性とプラズマのイオン加熱

(主 査)
論文調査委員 教 授 田 中 茂 利 教 授 巽 友 正 教 授 端 恒 夫

論 文 内 容 の 要 旨

静磁場中のプラズマに荷電粒子流が存在する時ビームはその自由エネルギーを波動を介して放出するが、その際に種々の不安定波動を励起し、異常に早いプラズマ粒子の輸送を生ずることが多い。それ故、ビームプラズマ系の不安定性の研究はプラズマの波動現象として興味あるのみならず、プラズマの閉じ込め、或いは加熱に関連して多くの研究者の関心をよぶ問題の一つである。

もっとも簡単に重要なビームプラズマ系はプラズマ内に磁場と平行な電子ビームが流れている場合であって、このとき電子ラングミュア波およびイオン波が励起されることは詳しく研究されている。他方の典型的なビームプラズマ系は磁場と垂直な荷電粒子流が存在する場合である。Mikhailovskii はこの系において、磁場と垂直に伝播する電子ベルンシュタイン波およびイオンベルンシュタイン波が励起されるドリフト不安定性の理論を述べたが、実験的には磁場と垂直な荷電粒子流を作ることは容易ではなく、このドリフト不安定性の系統的な研究は余り行われていない。

申請者は磁場中のプラズマを可成り低いガス圧力のもとで安定に生成した上で半径方向に直流電場を印加しうるように実験装置を工夫し、電子の EXB ドリフトによって磁場に垂直な電流、いわゆるクロスフィールド電流を発生することができ、これを人為的にコントロールして、系統的にクロスフィールド電流の作るドリフト不安定性とそれによるイオン加熱とを研究したものである。

まず数値解析によってドリフトする電子流に伴う波動が、背景のイオンが荷うイオンベルンシュタイン波と結合して不安定波動を励起すること、とくに電子流のドリフト速度がイオンの熱速度よりも小さい場合はイオンサイクロトロンドリフト不安定性が、逆にイオンの熱速度の方が電子のドリフト速度よりも大きい場合にはローハブリッドドリフト不安定性が励起されることを示した。

これに対応して実験においてはガス圧力が 10^{-8} トール台のプラズマでは外部から印加しうる直流電場、従って EXB ドリフト速度は余り大きくはなく、イオンサイクロトン周波数とその高調波に円周方向に伝播する不安定波動が観測された。さらにガス圧力が低く 10^{-4} トール領域のプラズマでは印加しうる直流電場は大きく、従って EXB ドリフト速度は前記の数倍に達し、強い不安定波動がローハブリッド共鳴

周波数に現われた。

何れの場合も波動は円周方向に EXB ドリフト方向で伝播し、そのモード数は整数であるが、半径方向には位相差はなく、軸方向にはプラズマ柱を半波長とする定在波が立っていて、この波動は磁場にほぼ直角に伝播していることが確かめられた。さらに波動の振巾は軸から離れた或る半径の値で最大であるような分布をしていて、この振巾最大の点で EXB ドリフトによる電子電流も最大であることが示された。この不安定波動に伴って著しいイオンの加熱と半径方向への電流の増加が観測された。とくにイオン加熱は不安定波動が基因するイオンの速度空間での拡散と考えられ、準線形理論による計算値と実験値との比較が行われ、定性的な一致をみた。

以上によって、実験で観測された不安定波動は電子の EXB ドリフトに基づくクロスフィールド電流によって励起されたイオンサイクロトロン並びにローハイブリッドドリフト不安定性に基づくものであり、その結果強いイオン加熱が伴うものであることが結論された。

なお参考論文 2, 3, 5 は本申請論文の予備的なものであるが、その 1, 4 は準中性電子ビームにおけるローハイブリッド不安定性を取扱ったものである。さらに、その 6 はトーラスプラズマの電子サイクロトロン加熱に関して新しい波動伝播の軌道と加熱法とを提案したものである。

論文審査の結果の要旨

ビーム・プラズマ系の不安定性の実験はプラズマの波動、非線形現象及び輸送現象などに関連して多くの研究が行われた。とくに磁場と平行な電子ビームとプラズマ系では電子ラングミュア波、イオン波の励起、大振巾波動による粒子の捕捉或いは乱流加熱などと広範囲の研究が行われてきた。

一方、それと同様に基本的な配位である磁場と直角なビームとプラズマの系における不安定性の実験は磁場と直角なビームを得ることが困難なために、積極的に直角方向のビームを入射して不安定性を励起した実験は殆んど行われていない。むしろ米国オークリジ国立研究所の Burnout V 装置に見られるように生成したプラズマ内に磁場と直角な半径方向の強い電場が発生し、この強磁場中の電子とイオンの EXB ドリフトの差から生ずるクロスフィールド電流がローハイブリッド不安定性を励起し、イオン加熱をもたらすものと推測されていた。

申請者は磁場と直角なビームを電子の EXB ドリフトのみによって発生し、それを外部から人為的にコントロールできるように実験装置に工夫をこらし、これによって始めて、クロスフィールド不安定性を系統的に研究し、それに伴うイオン加熱の機構を検べたもので、その成果は高く評価されよう。

申請者はこのクロスフィールド不安定性を EXB ドリフトする電子ビームが運ぶ負エネルギーの波と背景のイオンが支える正エネルギーの波とが共鳴結合して起す不安定であるという解釈のもとでその近似解を求め、それが Mikhailovskii の厳密な解とほぼ一致することを示した。かくて電子のドリフト速度とイオンの熱速度との大小関係によってイオンサイクロトロン並びにローハイブリッドドリフト不安定性が励起されることを示した。この解析はドリフト不安定性を直観的に理解するのに役立つと共に実験パラメータの設定に有効であった。

実験では TPD 型プラズマ装置によって低いガス圧力 (10^{-4} トール) のもとで生成したプラズマ柱に半

径方向の直流電圧を印加して強い直流電場を安定に発生させ、この電場を変えて電子の EXB ドリフト速度をコントロールすることが出来るように実験装置に工夫が加えられた。このときガス圧力が低いほど強い半径方向の電場が印加でき、電子のドリフト速度が大きく、ローハイブリッド共鳴周波数の波動が観測されるが、やや高いガス圧力では電場が弱く、電子のドリフト速度も小さく、イオンサイクロトロン高調波で波動が観測された。同時にプローブによりクロスフィールド電流の存在とその大きさ、速度を測定し、それが主に電子の EXB ドリフトによることを示した。かくてこれらの波動はクロスフィールド電子電流によって励起されたローハイブリッド並びにイオンサイクロトロンドリフト不安定性に基くものであることを示し、2つの不安定性とその関係を系統的に調べることができたのである。

さらに不安定波動の振巾がどの程度で飽和するかはプラズマの非線形現象及び輸送現象を考える場合に重要であるが、申請者は波動の振巾を実測し、これが直流電場の半分程度にも達することを示した。この大振巾がイオンの速度空間での準線形的な拡散を支配し、イオン加熱を生ずると共に磁場を横切る電子の拡散が異常に増して、半径方向の電流を増大させるという結果も興味深いものである。

以上、本論文で述べられたクロスフィールド電子電流によるローハイブリッド及びイオンサイクロトロンドリフト不安定性の実験はビーム・プラズマ系の不安定性の研究のみならず、プラズマ加熱の分野にも新たな知見を加えた興味ある業績であるといえる。参考論文6編は、いずれもプラズマ波動に関するもので、論文1～5はビーム・プラズマ系の不安定波動を、論文6はプラズマ波動による加熱を取扱ったものである。これらの参考論文は、本論文と合わせて、申請者のこの方面の研究への寄与を証するに足るものと言える。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。