

氏 名	ひ げ がき ひろ ゆき 檜 垣 浩 之
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人 博 第 22 号
学位授与の日付	平成 10 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科人間・環境学専攻
学位論文題目	Linear and Nonlinear Electrostatic Oscillations in Nonneutral Electron Plasmas 非中性電子プラズマにおける線形及び非線形静電振動
論文調査委員	(主 査) 教授 毛利明博 教授 林 哲介 教授 後藤喬雄 助教授 田中 仁

論 文 内 容 の 要 旨

低エネルギーの非中性プラズマは、プラズマ物理現象の種々の基礎実験の対象としてのみならず、反物質生成に供するための反物質プラズマや強結合プラズマ等とも関連して理論的、実験的に興味ある研究対象として注目されている。本学位申請論文は非中性プラズマ、特に電子プラズマの波動に関する実験とその結果を考察・解釈して論じたものである。

本論文の第 1 章では本研究の背景が、第 2 章では第 3 章以降の内容に関連する既存の理論の概要が述べられている。

第 3 章では本研究での実験方法について述べている。申請者はペニングトラップを改良した多重円環電極閉じ込め装置を製作して、電子プラズマの静電波の実験的研究を行った。この装置を用いることによって、従来よりも大容積で大きな長径対小径比(アスペクト比)をもつ回転楕円体形状の高密度非中性電子プラズマを閉じ込めることが可能になった。このようなプラズマでは境界上の鏡像電荷の効果や温度の効果が現れ易くなり、これらが以下の章での実験を容易にしている。

従来、低温の回転楕円体非中性プラズマに対しては境界が無限遠にあるという条件下で分散関係式が理論的に導かれている。しかし、現実のプラズマに対応する境界と温度の影響を共に含んだ分散関係式は導かれておらず、観測される静電波の周波数は上記の理論値と合わない。第 4 章と第 5 章では円筒境界をもつ回転楕円体非中性プラズマの静電波の固有振動数に関する上記至論との比較実験について述べられている。第 4 章では、ディオコトロン振動について導電性円筒境界の存在及びプラズマの形状による固有振動数の変動を実験から調べた結果とその考察を記している。申請者は、最低次のディオコトロン振動は、全電子数が小さくなって鏡像効果が現れにくいときは既存の回転楕円体非中性プラズマの分散式で与えられる振動数に漸近し、全電子数が大きくプラズマ長が大きくなる時は円筒導電境界内の無限長円柱の場合に与えられる Trivelpiece-Gould の分散関係に漸近するという結果を得た。また、プラズマ形状のみに依存する無次元形状依存因子を用いて、両極限状態の分散関係と実験的に得たプラズマの分散関係との対応関係をより明らかにしている。このようにあらかじめ分散関係を測定しておけば、ディオコトロン振動を用いた非破壊プラズマ診断が可能になるとし、反物質プラズマの非破壊測定への適用を提案している。

第 5 章では、回転楕円体電子プラズマの対称軸方向モード数が 2 及び 3 の静電プラズマ波について調べた実験結果を述べている。申請者はまず、室温プラズマでアスペクト比を一定に保ったまま全電子数を変えたときの固有振動数の既存の理論値からのずれを測定し、境界の効果の存在を明らかにした。また、電子プラズマを高周波で加熱して、固有振動数の温度依存性を調べ、振動数が温度の正の特性を持つことを観測した。この観測した温度依存性は、従来の理論の分散式をその中に含まれる誘電率テンソル要素に温度依存項を含めるように変形すると数値的に求められることを示した。円筒境界をもつ回転楕円体非中性プラズマの静電波について得られた上記の結果は、大量の荷電粒子をもち高密度の非中性プラズマでは、有限温度・境界の効果がその特性に重要な影響を与えることを示している。

第 6 章では有限長の円柱非中性プラズマでの非線形静電波の実験について述べている。中性プラズマではこれまでに様々な非線形相互作用が確認されているが、理論では、無限に広がったプラズマ中ではラングミュアー波(静電縦波)間の三波

相互作用が禁止されている。申請者は非中性電子プラズマに励起される高次のラングミュアー波は、波の振幅の閾値以下のときは単に減衰するが、その閾値を超えると非線形効果により他のモードへの遷移現象が起きる現象を新たに見出した。併せて、この閾値のプラズマ温度に対する依存性も測定した。また、観測した遷移現象が振動ポテンシャルに捕捉される粒子による側帯波の形成や非線形周波数シフトによって生じることも明らかにしている。この章で述べられている実験は円筒境界を持つ有限長の非中性プラズマではラングミュアー波のみの三波相互作用が可能であることを実証したものである。

論文審査の結果の要旨

単一種の荷電粒子のみでも構成できる非中性プラズマはプラズマの基本的な性質を研究する上で理想的な対象として注目されている。非中性プラズマを安定な状態で閉じ込めるものにペニングトラップがある。このトラップは非中性プラズマの実験を可能にするばかりでなく、反水素の生成をめざす実験においても大量の反陽子群と陽電子群を高密度で閉じ込める手段として期待されている。しかし、従来のペニングトラップでは大量の粒子群を安定に閉じ込めることができないので、大量粒子群を閉じ込められるペニングトラップを開発すると同時に、その物性を明らかにしていくことが要請されている。

本学位申請者は、ペニングトラップの改良型として多重円環電極トラップを製作し、この方法で従来よりもはるかに大量の粒子を楕円アスペクト比が大きく密度の高い回転楕円体プラズマとして閉じ込めることが可能であることを示した。この実験装置を使って境界や温度の効果が無視できなくなる電子プラズマの状態をつくり、その静電波の特性を明らかにする研究を行った。

低温の回転楕円体非中性プラズマに対しては境界が無遠にあるという条件下での静電波の分散関係式はすでに理論的には導かれているが、現実の有限温度の大粒子数プラズマに関して必要な境界と温度の効果を共に含んだ分散関係式は導かれていない。理論から求めた静電波の振動数は測定値とずれる。申請者は、多重円環電極閉じ込め装置内での回転楕円体非中性電子プラズマの非軸対称モードに関して、その方位角方向モード数=1のディオコトロン振動の分散関係を実験的に決定した。観測した分散関係は、アスペクト比が小さく低密度のプラズマでは無境界回転楕円体プラズマの理論に漸近し、他方、密度が高くアスペクト比が大きくなると境界条件を含めた無限長円柱プラズマに適用される Trivelpiece-Gould の分散関係に漸近することを明らかにした。この観測した分散関係を無次元の形状依存因子を用いて整理し、両極限の場合に適用される理論との対応を明確にした。ここで得た成果は、現実の回転楕円体非中性プラズマのディオコトロン振動と無境界の分散関係との関連を明らかにし、非破壊の計測方法開発に寄与するものである。

申請者は、電子プラズマの軸対称静電波固有振動に関して、軸方向モード数=2, 3の波の固有振動数が境界と温度の効果で変動する現象を観測した。境界に生じる鏡像電荷の影響で振動数は無境界の場合に理論で与えられる値に比べて高周波側にずれ、低温の場合の理論とは異なって温度上昇によっても固有振動数が増加することを観測した。この原因がプラズマの誘電率テンソル要素の温度変化依存によることで説明できることを示した。その結果、従来計算機シミュレーションでしか得られなかった変動値を、申請者の見出した温度依存を考慮した分散式を用いて比較的高い温度まで計算で求められることになった。ここで得た結果は、非破壊で計測せざるをえない反物質プラズマの密度・形状を波動励起で診断する場合にきわめて有用である。

申請者は、円柱非中性プラズマ中でのラングミュアー波についても実験を行った。従来、無限プラズマ中ではラングミュアー波のみの3種類のモード間の相互作用は生じないことが理論的に知られていたが、申請者は有限長の円柱非中性プラズマでは分散関係が異なるためラングミュアー波のみの3波相互作用が可能になることを示した。この非線形相互作用の要因に波動電場ポテンシャルに捕捉される粒子に起因する側帯波の発生と波の非線形振動数シフトが介在することも実験的に明らかにしている。さらに、申請者はこの非線形相互作用には閾値が存在し、これはプラズマ温度に依存することも明らかにした。閉じ込められた非中性電子プラズマでのラングミュアー波の非線形相互作用に対する実験的報告はなく、申請者の実験は非中性プラズマの波にモード間遷移が存在することを実証した一つの先駆的研究として評価できる。

以上の申請者の得た研究成果は、人間・環境学におけるエネルギー形態の研究として、プラズマの新しい現象を見出したことにある。また、この成果は今後の反物質生成に関する研究にも寄与するものである。

よって本論文は博士(人間・環境学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成9年11月25日、論文内容とそ

れに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。