

報告番号 ※ 甲 第 750 号

主論文の要旨

題名 プラズマ中におけるイオン波の
線形および非線形分散特性に関する研究

氏名 高村 秀一

プラズマ中におけるイオン波の線形および非線形分散特性に関する研究

1940年代以後は、媒質中の物体の運動は個々別々の運動のみならず、集団的運動の側面を持つことがわかってきた。これは相互作用する多数の粒子系の問題、すなわち多体問題として一般に認識された。クーロン力という長距離力をもった荷電粒子系の統計力学的な取り扱いが研究され、その非平衡的性質から運動論が体系的にまとめられはじめた。

他方核融合によるエネルギー源の開発研究は1950年代より開始された。核融合装置に関する初期の困難な研究にもかわらず、プラズマ物性の基礎研究、プラズマ生成、プラズマ測定法の改良等が急速に発展し、核融合研究への基礎を与えた。

著者は基礎研究としてプラズマ中の最も代表的な協同現象の一つであるイオン波をとり上げて、線形および非線形分散特性に関する研究を中心にして、イオン波の諸性質を種々の角度から研究し、プラズマの運動論の体系化への寄与と実験的検証を行った。波と粒子との相互作用としてまとめられる種々の現象は気体プラズマに特有のものであり、新しいプラズマ物性論の中核をなす。その成果をまとめた論文「プラズマ中におけるイオン波の線形および非線形分散特性に関する研究」の要旨を以下に述べる。

第1章では、プラズマ物性工学の研究の背景とその目的を明きらかにし、著者の研究の位置づけを従来の、プラズマ中におけるイオン波の研究の流れの中で述べた。加えて今まで行われてきた、イオン波についての理

論的ならびに実験的研究の問題点を浮きぼりにし、それに対する著者の研究方針を各項目について記述した。

第2章では運動論に基づいてイオン波の線形および非線形の分散特性を、著者の数値計算を含めて、以下の章の実験や理論と比較対照しやすうように著者流にまとめ、変形したものを示した。著者の研究内容の中の用語の意味や定義を明確にしつつイオン波の物理像をも描いた。

具体的内容としては、最初に外部からの小振幅振動に対するプラズマの線形応答を求め、いわゆるイオン波の線形分散を導出した。次に波の運動論に基づいて崩壊過程と誘導散乱過程について説明し、高周波電磁場中のイオン波の非線形分散特性を、従来の論文を拡張して示した。

第3章ではイオン波の線形分散特性の検出に関係した、実験と理論を展開した。

従来、共鳴探針の実験に用いられていた後方振散形プラズマ源を水銀のみならず、種々のガスについて使い得るようにし、比較的低ガス圧で動作させるようにしたロート形プラズマ源の製作を行い、密度、ガス圧、電子温度、イオンビームエネルギー、電子電流の制御が可能であることを示した。動作条件を適当にすると、イオンビーム源となることも示した。このように研究の出発点は波動現象を調べるに適したプラズマ源の開発にあった。

イオンプラズマ周波数近傍のイオン波分散特性が実験的に調べられてきたが、イオン波を外部からワリット等で励起する場合、流体力学理論から予想される特性と異なり、イオンプラズマ周波数前後で周波数とともに位相速度

が上昇することが示されていた。他方プラズマ中に挿入されたグリッドにパルス電圧を印加することによってイオン・バーストが見出されていた。このイオン・バーストと Hirshfield の呈出した、プラズマの自由な流れの理論との間の関連を見つけ、イオン波分散にまつめる混迷を除去するために、連続波の弾道モードの観測に成功した。種々の性質を調べ、定性的には上記の理論を裏付けるものであった。ここで採用されたプラズマ源はロート形プラズマ源であって、電子温度の低いことと、密度を薄くできること、電子流を制御できることが実験を有利に導いている。

定量的段階においては、理論と実験とはくっきりと違いをみせている。理論の前提と実験条件が完全に一致していかないことに基づくことが判明し、具体的なグリッド機能をもって、電子計算機を用いて、イオンの加速の様子を数値的に算出し、定量的な検討を加えた結果、著者の観測したものは線形弾道モードの性質を具備した非線形弾道モードであることをはっきりさせた。さらにこれから問題となるであろう、イオン波と弾道モードの分離の方法として三項目具体的に提案し、その有用性を示した。

次に弾道モードエコーがプラズマ波エコーと同様に作られることを理論的に示した。間隔だけ離れた二枚のグリッドで ω_A , ω_B なる周波数をもった弾道モードが励起されると、これらは位相混合して減衰してしまうが、その二次の効果であるエコーが第一番目のグリッドより $\omega_B / (\omega_B - \omega_A)$ だけ離れた点で生ずることを示すとともに、その波形も解析的に計算した。

さて振り出しに戻った研究の方向は分散特性の検出に向ったが、明確な測定が行われなかった。その原因

の一つは電子温度とイオン温度との比が小さくて、位相速度変化が小さいということと、もう一つはプラズマの体積が小さくて、測定が励起物体のごく近傍でしか行われなかったという点にある。

著者は以上の難点を克服して、低加圧で大容量の、温度比が50以上のプラズマを生成し、また電流を流して、イオン波の減衰を抑え、励起グリッドより十分離れた点で波の波形を描き得ることを示した。このことにより弾道モードを避けてイオン波を純粹に検出した。明確な位相速度の低下を観測した。フレネル干渉の結果と思われる振幅の空間的増減も観測された。

こうしてイオン波の分散や減衰の研究の進展は、これらをプラズマの診断に使える可能性を示した。著者は、半径方向へのイオン波の伝播の様子から、放電状態について推察を行った。すなわち両極性振散が問題になるよりもっと低加圧での円筒プラズマの諸量を半径方向へイオン波を伝播させ、その波長と振幅の空間依存性を調べた。各点でのイオンの巨視的速度がイオン波のドリフト・フロー効果より知られた。これは電離周波数と関連づけられ、全体が Free-fall 理論の枠の中で論じられた。同時に不均一性に由来する減衰効果も見い出された。この現象は波の持っている運動量が不均一性によって散逸することに依るらしい。なお流体力学的な形式にて、 WKB と厳密な数値計算の比較も行われた。

第4章ではイオン波の非線形分散特性に関する理論と実験を展開した。

不安定の動的制御の手段として高周波電磁界

が注目されており、一方ハウトリック現象や高周波導電率との関連から、低周波に対する高周波の応答は重要な意義を有する。従来動的制御やハウトリック現象の実験が行われてきたが、結果のみが議論され、内部の物理過程の定量的検討が欠けていたらしいがある。著者は性質のよく調べられつつあるイオン波を対象に選んで高周波電界との相互作用を分散特性を中心に理論的、実験的に調べた。

まず理論的には次のことを明らかにした。すなわち高周波電磁界下のイオン波の非線形分散特性は、線形分散特性に比較してイオン波の位相速度を増加させると予想させる。何故なら電子の等価的圧力を増大させるからである。AlievとSilinの理論もこのことを示していた。しかし実験結果に鑑み、理論の再構成を行い、高周波電界の周波数が電子プラズマ周波数よりも低い時には、イオン波で変調を受けた高周波成分が重要となり、この成分に由来する等価的圧力が電子の振動圧力と逆位相に存在した時は位相速度が減少することを発見した。

実験的な研究は次のようにして行われた。すなわち、通常高周波電界をプラズマに印加するとしても電子による遮蔽効果のため有効に電界が入らない。しかし共鳴探針の研究から明らかにされるように、いわゆるシースプラズマ直列共鳴周波数ではプラズマに有効に電界が入ることを応用した。イオン波の位相速度が高周波電界によって低下したところの非線形分散を測定し、上記の理論と定性的に一致した。

この実験と関連して、弱電離プラズマ中の

の高周波電界強度の測定も光強度から決定する方法を提起し、実際に測定を行って、他の方法とのクロスチェックを行った。この原理はHe原子の励起が、電子の分布関数を通して高周波電界の印加によって変化することに依拠している。

さて次に乱流過程と理論解析とのギャップの解消は、非線形素過程を一つ一つおさえてゆくことにより達成されるという観点と、非線形分散特性研究の立場から、二つのイオン波によってつくられた、イオン波の混成波の検出を行った。強度、波長、三次元的角度等について定量的に実験を行い、非等温性の強いイオン波の仮想状態の理論的予想との一致を得た。

非線形分散研究の最後として、ゆくりと変化する外周中で、イオン波のストークスがその測帯波について、非対称性を有することを見出し、予想される種々の可能性の中から、この現象は、イオンのドップラー効果による位相変調と、電子の流れによる振幅変調との合成であると結論した。この実験の中で、ビードモードの分散をも測定した。

第5章では、本論文の研究の総括がなされ、その成果を述べた。さらに将来の問題点を指摘して締めくくりにした。