

|             |                                                                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | 渡 邊 慎 介<br>わた なべ しん すけ                                                                                               |
| 学 位 の 種 類   | 理 学 博 士                                                                                                              |
| 学 位 記 番 号   | 論 理 博 第 445 号                                                                                                        |
| 学位授与の日付     | 昭 和 48 年 11 月 24 日                                                                                                   |
| 学位授与の要件     | 学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当                                                                                              |
| 学 位 論 文 題 目 | <b>Experimental Investigation of Current-Driven Ion Wave Turbulence in Plasma</b><br>(プラズマ中の電流によって誘起されるイオン波乱流の実験的研究) |
| 論文調査委員      | (主 査)<br>教 授 田 中 茂 利    教 授 巽   友 正    教 授 富 田 和 久                                                                   |

### 論 文 内 容 の 要 旨

プラズマ内に荷電粒子の流れがあるとその系は不安定となって、種々のプラズマ波が励起される。更に不安定が強くなると波と波、または波と粒子との非線型相互作用によりプラズマは乱流状態に達し、乱流スペクトルを生ずる。これらの現象はそれ自身プラズマ物理学にとって興味があるばかりでなく、実用的にも乱流加熱として急速な発展をとげつつある核融合のためのプラズマ加熱機構の解明にとっても重要な問題の一つである。

申請論文はプラズマ内を流れる電子電流によって励起されるイオン波について、発生の臨界状態から不安定によるイオン波の成長、非線型効果による振巾の飽和、乱流スペクトルに至るまでの性質を連続的、統一的に研究したものである。これは申請者がプラズマ内の電子電流を外部から任意にコントロールできるという独特の実験方法を考察して始めて研究が可能となったものである。

実験は水銀入りの放電管内で陰極とメッシュ陽極の間に直流放電を起し、この陽極の後方に拡散したプラズマの中でイオン波の測定を行った。イオン波の不安定をおこすための電流は拡散プラズマ中におかれた二枚のグリッド間に外部から直流電圧を印加し、プラズマ内に直流電場を作ることによって得られる。グリッドへの印加電圧が0~20ボルト程度の範囲では、この電圧に比例したドリフト速度をもつ電子流がえられるので、このドリフト速度を任意に設定してイオン波の不安定状態を制御できる。得られた実験結果の概要は次のようである。

(1) グリッド電圧を大凡1ボルト以上にするとドリフトする電子による Landau 成長がイオンの Landau 減衰と衝突減衰の和よりも大きくなって、イオン波が励起されることが観測される。イオン波の波長は二つのグリッドの間隔によってきまり、その周波数の測定から波の分散関係が求められ、線型理論のそれとはほぼ一致することが確かめられた。最初に不安定を起すイオン波の周波数、並びにその臨界ドリフト速度は一丸の理論とほぼ一致する。

(2) グリッド電圧を高く、従って電子のドリフト速度を大きくすると、イオン波の不安定領域は広がり、

波の振巾が増大すると同時にその振巾のピークは低周波側に移行する。この領域では不安定なイオン波のスペクトルは電子のドリフト速度に強く依存する。

(3) グリッド電圧を更に高くすると (10 ボルト以上) イオン波の振巾は 40~50 kHz に大きなピークを持ち、それより高い周波数では振巾  $\phi_0$  は  $\omega^{-2} \sim \omega^{-2.5}$  で減少する。このスペクトルはグリッド電圧に依存しない。

Kadomtsev の弱い乱れの理論によれば非線型 Landau 減衰によってイオン波のエネルギーは低い周波数側に移行し、乱流スペクトルでは  $\phi_0 \propto \omega^{-1.5}$  となり、かつイオンの衝突頻度附近に蓄積される。

実験で得られた乱流スペクトルは高い周波数側で理論よりも急激に減少するが、振巾のピークがイオンの衝突頻度附近にあることは一致している。

(4) 波の振巾は電子のドリフト速度と共に増大するが、振巾がある程度大きくなると電子のドリフト速度によらないで一定となる。この飽和時における振巾は水銀の蒸気圧によって定まり、圧力が高い程大きい。この現象は大振巾イオン波のポテンシャルの谷に電子が捕捉される結果、電子の Landau 成長が止まって、イオン波の振巾が飽和するという西川らの理論で定性的に説明される。

(5) 乱流状態では低周波の領域に通常のイオン音波よりも位相速度の遅いイオン波が励起されることを見出した。これは乱流状態でのみ存在する新しいモードの波である。

参考論文は10編あって、何れも線型または非線型イオン波に関するものである。4編は主論文の予備的研究であるが、他は乱流スペクトルの相関時間を測定して波の寿命を理論と比較検討したもの、イオン波の分散と Landau 減衰を測定して理論と良い一致を示したもの、グリッドで励振した低周波は一般にイオン波とバリステックモードとが混在し、特にセシウムプラズマでは後者が優勢であることを示したものの及びイオン波を使ってプラズマ境界にできるイオンシースの厚さを測定してシースの理論と比較検討したもので、何れも興味ある研究成果である。

## 論文審査の結果の要旨

イオン波の不安定性およびイオン波乱流はプラズマ物理学の基礎的問題として興味あるのみならず、核融合プラズマの研究にとっても乱流加熱として解明を急がれている問題であり、理論的並びに実験的研究が盛んな分野の一つである。しかし、プラズマの実験は多くの現象が複雑にからみ合って、理論と対照しうる明確な実験は多いとは云えない。

申請者はプラズマ内の電子のドリフト速度を外部から人工的に広い範囲にわたって任意にコントロールすることが可能な、独特な、かつ特徴あるプラズマ実験を考案して、この電子電流によって励起されるイオン波を対象にして、その発生の臨界状態から不安定によるイオン波の成長、非線型効果による振巾の飽和、乱流状態に至るまでのイオン波の性質を明確に統一的に測定して、理論と比較検討できる優れた実験結果を得たのである。

従来、プラズマ中を流れる電流によって励起されるイオン波の不安定性、特にその臨界状態を求める実験においては荷電粒子のドリフト速度の人為的制御を行ない得ずに、他の間接的方法によっていた。例えば Coleman は、陽光柱プラズマの電子ドリフト速度は直流放電できまる一定の値をとるとして、それに

高周波電場を重畳して電子とイオンの温度比を変え、その結果イオンの Landau 減衰を減少させて、イオン波不安定の条件を作り出している。また藤原らは衝突減衰が圧倒的であるような陽光柱プラズマにおいて、イオン波不安定の臨界ドリフト速度がイオンの衝突頻度のみによってきまる条件を求めた。申請者の実験では電子とイオンの温度比の値から Landau 減衰と、イオンの衝突減衰の両者を考慮し、それよりもドリフトする電子流の Landau 成長が大きくなるとイオン波が不安定になることを電子のドリフト速度を直接に人為的に変化させて求め、その結果が一丸の臨界安定条件の理論的結果とよく一致することを確めた。

一方、イオン波乱流に関する実験は主として乱流加熱の分野でなされているが、それらはイオン加熱が目的であるために、乱流プラズマの基礎的研究は余り行なわれていない。最も興味ある内容を含む実験は Hamberger らによって行なわれたトーラスプラズマにおける研究である。彼らは過渡プラズマの各位相での乱流スペクトルと電子ドリフト速度とを同時に測定して、波の相関時間や波の散乱による異常電気抵抗などを観測している。彼らの得た乱流スペクトルはイオンプラズマ周波数に至るまで Kadomtsev の弱い乱流理論のそれに合っているが、低周波領域において乱流スペクトルのピークがイオンの衝突頻度の近傍に存在することは確められていない。

申請者の研究では、もともと直流電場が存在しない拡散プラズマを用いて、外部から直流電場を印加して電子ドリフト速度を高範囲にわたって人為的に制御できるという長所を利用して、イオン波を臨界状態から乱流状態に至るまで統一的に測定して、電流によって励起された波がイオン波であることを分散式によって直接に確認している。これは、従来はイオン波の認定は単に波の周波数領域から推定するに過ぎなかったことを考えると、現象を明確にするために重要な結果であると言える。

かくて申請者は、分散式で確認されたイオン波が乱流状態において示す乱流スペクトル、そのエネルギー分布、特にイオンの衝突頻度近傍に波のエネルギーが蓄積されること、波の振巾の飽和の機構が大振巾イオン波に電子が捕捉されることによることなど、多くの興味ある結果を得ている。また乱流状態でのみ存在しう新しいモードのイオン波を見出していることも評価される。

以上述べたように、主論文はプラズマ中を流れる電子電流のドリフト速度を人為的にコントロールすることにより、電流によって励起されるイオン波の臨界安定状態から乱流状態に至るまでの性質を明確に統一的に研究して、イオン波不安定性と乱流に関していくつかの新しい知見を加えたもので、この分野の発展に寄与する所が少なくない。参考論文10編もまた申請者のこの分野における豊富な知識とすぐれた研究能力とを示している。

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。