

|         |  |
|---------|--|
| 氏 名     | 下 村 昇<br>しも むら のぼる   |
| 学位の種類   | 理 学 博 士  |
| 学位記番号   | 論 理 博 第 396 号  |
| 学位授与の日付 | 昭 和 47 年 7 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>Instabilities of Extraordinary Wave in a Collision-Dominated Plasma</b><br>(衝突が優勢なプラズマにおける異常波の不安定性) |
|         | (主 査)  |
| 論文調査委員  | 教 授 田 中 茂 利    教 授 巽 友 正    教 授 浅 井 健 次 郎  |

### 論 文 内 容 の 要 旨

プラズマ内を静磁場と直角方向に伝播し、磁場と直角方向の電場成分を持つ主として電子が関与する異常波は、静電近似のもとでは、いわゆる Bernstein 波といわれる静電波である。Maxwell 分布をもつ無衝突プラズマでは、Bernstein 波は Landau 減衰もサイクロトロン減衰もない特異な波であって、各サイクロトロン高調波のバンド内でその波数が零から無限大まで連続的に変る分散をもっている。それらの複雑な分散関係は実験室プラズマ・宇宙プラズマにおいて実験的に確かめられつつある。

現実のプラズマでは電子の衝突の効果を無視できないことが多いが、Bernstein 波の分散式は、非常に複雑なために衝突項を含めたこの波の研究は極めて少ない。申請論文は非 Maxwell 分布かつ衝突効果のあるプラズマで Bernstein 波の分散関係と微視的不安定性の励起の条件を詳細に検討したものである。

ここで用いられる主な仮定は、(1) 電子は無限に重い中性粒子と弾性衝突を行なう。(2) その衝突周波数  $\omega$  は電子の速さをとする  $v^h$  に比例する ( $h$ : 定数)。(3) 電子の零次の速度分布は速度空間でシェル状の分布をしている。(4) 波の屈折率は十分に大きいという条件のもとに解析を行なう。その方法は電子の分布に対する線型化された Boltzman-Vlasov 方程式を解き、Maxwell 方程式と結合して電導率テンソルを得、分散式を求める。ここで周波数を実部と虚部とに分け、波の分散関係と不安定性の条件、特に成長率を求める。

これにより得られた主な結論は次の通りである。(1) 無衝突プラズマでの Bernstein 波の分散は各バンド内で無限大の波長の領域まで存在しているが、速度依存のない一定の衝突周波数を考慮した Bernstein 波では、ある波数以上の波は遮断され、分散曲線は変ってくる。(2) 衝突周波数が速度依存をもつ時はサイクロトロン周波数よりも低い領域にも波が現われる。特に電子密度がある値をこえると分散曲線が閉曲線になることがあり、従って波の励起の条件をみたす周波数が同じで波数の異なる二つ波があることになる。(3) 波の生長率  $\gamma$  は、サイクロトロン周波数近傍において

$$r=v\left\{-1+\frac{h}{3}+\frac{5-h\left(\frac{kv}{\omega_c}\right)^2}{90}\right\}$$

第2高調波近傍において、

$$r=v\left\{-1+\frac{h}{5}+\frac{2h}{175}\left(\frac{kv}{\omega_c}\right)^2\right\}$$

となる。第1項は衝突による減衰を、第2項は衝突項が速度依存性を持つことによる不安定性、第3項は有限波長（或いは、電子の有限ラーマー半径）効果による不安定性への影響を表わす項である。これからサイクロトロン周波数では  $h>3$  の時、第2高調波では  $h>5$  の場合に不安定になること、また波数が大きくなると波の成長率も大きくなり、不安定性が増長されることが明らかになった。

参考論文1は、磁場と平行に進む縦波と横波、並びに磁場と直角に進む正常波と異状波について衝突項がある場合に長波長近似のもとで分散式と不安定性の条件などを求めたもので、主論文の出発点となっているものである。

参考論文2は、磁場に直角に進む波の中、特に正常波について、その分散式と不安定性が有限波長の効果によってどう変るかを検討したもので、主論文と対をなすものである。

参考論文5は、プラズマからのマイクロ波輻射に関するもので、Maxwell プラズマにおいて少数の速い電子と共に多数の遅い電子の放射する波が全体のスペクトルをきめるのに重要であることを示したものである。

## 論文審査の結果の要旨

電子及びイオンがMaxwell 分布をもつ無衝突プラズマではプラズマ波動は Landau 及びサイクロトロン減衰をする安定な波であるが、非 Maxwell 分布プラズマ内では、これらの波は不安定になることが多い。併し、荷電粒子のラーマー回転半径或いは波の有限波長の効果を考慮すると不安定な波は安定化され、或いは逆に安定な波が不安定になる場合もありうるものが幾つかの例について調べられている。これらの微視的不安定とその有限ラーマー回転半径効果の研究は、プラズマの閉じ込めや加熱、プラズマからの電磁波輻射などに関連してプラズマ物理学の重要な分野の一つである。

ところで、荷電粒子の衝突の効果は一般には不安定なプラズマ波を安定化する方向に働くが、例えば、ドリフト波などにおいては不安定性を増大する方向に働くことがある。申請論文は、プラズマ内を磁場と直角に伝播し、電子が関与する静電波（Bernstein 波）について、電子が速度空間内でシェルの分布をしている場合に、電子の衝突項並びに波の有限波長の効果が、波の不安定性にどのように効くかを理論的に検討したものである。実験室プラズマでは電子の衝突の効果を見逃すことが多いが、Bernstein 波の分散式は非常に複雑なため衝突項を含めたこの波の研究は極めて少ない。而も、ここで取扱われた不安定性はラムザウエル効果などを持つ弱電離プラズマにおいて実験的に見出されている負吸収現象や、衝突周波数の電子エネルギー依存性が非常に大きい水銀プラズマにおけるサイクロトロン高調波近傍での異常輻射などの現象と関連して重要であり、幾つかの興味ある結果を得ているものである。

すなわち、分散関係においては無衝突プラズマでは各サイクロトロン高調波のバンド内に零から無限大までの波長の波が連続的に存在するのであるが、衝突周波数を含めた Bernstein 波では分散曲線の形が変

り、電子の速度より遅い位相速度を持つ波は遮断されることが示された。また電子密度がある値以上では分散曲線が閉曲線になり、周波数が同じで波数の異なる2つの不安定な波があることになる。これは実験室プラズマで観測される異常輻射と関連していると思われる。

次にサイクロトロン周波数と第2高調波近傍において不安定な波の成長率を波数の2次までの近似において解析的に求めることに成功している。第1項は通常の衝突による波の減衰を表わし、第2項は衝突周波数が電子の速度依存性を持つことによる不安定性への寄与を意味する。そしてサイクロトロン周波数では  $h > 3$ 、第2高調波では  $h > 5$  の場合に衝突による減衰に打ち勝って波が成長することを示す。第3項は有限波長効果或いは電子の有限ラーマー半径効果がこの波の不安定にどう寄与するかを明確に示したものであって、波数とラーマー半径の積の2乗の形で不安定を増大する方向に働くという興味深い結論を得ている。一方、鈴木氏は同様な仮定のもとに磁場方向に平行に進む電子サイクロトロン波の不安定性について、有限ラーマー半径の効果を数値計算で求めたが、そこでは安定化の方向に働くことが示されていて、この効果は申請者による Bernstein 波のそれとは逆の方向に働くことになる。更に完全電離プラズマでは衝突はクーロン衝突であって、衝突の速度依存性を表わす項は  $h = -3$  であるから、この項は波を減衰する方向に働き、通常の衝突効果以上に早く減衰することが予想される。これは実験的に検討する価値のある面白い問題であろう。

以上述べたように、主論文はシュル状の速度分布を持つ電子プラズマ内を伝播する Bernstein 波の不安定性に及ぼす電子の衝突の効果と有限波長の効果について新たないくつかの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8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。