

氏 名	池 村 勉 いけ むら つとむ
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 428 号
学位授与の日付	昭 和 52 年 1 月 24 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	Parametric Coupling of Two Langmuir Waves in an Inhomogeneous Plasma (不均一プラズマにおける二つのラングミュア波のパラメトリック結合)

(主 査)
論文調査委員 教 授 田 中 茂 利 教 授 巽 友 正 教 授 富 田 和 久

論 文 内 容 の 要 旨

プラズマに強い電磁波を印加して、プラズマパラメーターを励振したとき、このポンプ波と異なるプラズマ波動が励起されるパラメトリック不安定性は、プラズマ波動の非線形現象として、多大の興味をもたれると共にプラズマを高温度に加熱する可能性の一つとしても重大な関心をもたれてきた。例えば、磁場によって閉じ込められたプラズマの波動加熱、あるいはレーザーによる核融合プラズマにおいてはパラメトリック不安定性によってプラズマ中にさまざまな固有波動が励起され、それらの波動が衝突または無衝突減衰を受ける結果、プラズマ粒子が加熱されると考えられるからである。

ところで、パラメトリック不安定性においては空間的に均一であるプラズマに、均一なポンプ波が印加されたとき、同一種類の粒子の荷なり同種のプラズマ波動はそのポンプ波を通じてパラメトリック結合をすることはない。しかし、実験室プラズマではパラメーターの不均一性、とくに密度の不均一が存在するので、それがパラメトリック不安定性に及ぼす効果を吟味することは重要な問題である。実際このような場合に異種の粒子の荷なり固有プラズマ波動、例えば電子ラングミュア波とイオン音波とのパラメトリック結合が起ることが知られている。一方同種の波動のパラメトリック結合の可能性も考えられるが簡単な指摘がされているだけで、理論的検討は殆ど行われていない。

申請者は、参考論文 2 において、粒子密度勾配の存在に基づいてパラメトリック結合している同種の固有波動である二つの電子ラングミュア波のパラメトリック不安定性の物理的機構を明らかにし、そのふるまいを弱いポンプ波の場合について詳細に調べたが、申請論文においては、そのふるまいを強いポンプ波の場合にまで拡張して論じたものである。主な内容・結果は以下の如くである。

(1) 密度勾配の方向に伝わる二つの電子ラングミュア波のパラメトリック結合を記述する連立微分方程式を、流体近似方程式系から出発して、小さな展開パラメーター $\epsilon = \kappa_0 K_0 / 2$ による摂動展開を行い、コンシステントに導いた。その結果は密度勾配 κ_0 の方向に平行な電場成分をもつポンプ波による電子の振動振幅 K_0 と電子のデバイ長の比が 1 のオーダーになるような強電場に対しても有効なものである。また

この結果は非線形のポン德罗モーティブ力によって密度勾配がならされる効果も考慮されている。

(2) 上記の連立微分方程式を一次元の固有値問題として WKB 近似法に基づいて解き、密度勾配に基づいてパラメトリック結合している二つのラングミュア波の不安定性が、粒子密度が単調に増大あるいは減少しているプラズマにおいては捕捉される可能性は少いが、粒子密度がくぼみを持つプラズマにおいてはそのくぼみの中に形成される不安定領域にラングミュア波が捕捉されることを示した。

(3) 粒子密度のくぼみに捕捉された、密度勾配に基づくパラメトリック不安定性は、ポンプ波の電場強度に対して通常のしきい値 E_{0c} を持つと同時に、電場強度がある値を越すとその不安定性が逆に安定化されるような新しいしきい値 E_{0c}^+ (上側しきい値と名付けている) を持つことを示した。これは密度勾配が大きい方が強く不安定になるという、申請者の取り扱っているパラメトリック不安定性が、ポンプ波強度が大きくなって密度勾配がならされると安定化の傾向を示すからである。なお、 E_{0c}^+ に対する電子の振動振幅は大きくてデバイ波長のオーダーである。

(4) 上記の上側及び下側しきい値はそれぞれ、ラングミュア波の線形減衰率 ν 、密度不均一の尺度 L_0 、捕捉される領域の長さ d 、捕捉された波のモード数 n の関数として得られた。また成長率はポンプ波強度 E_0 、 ν 、 L_0 、 d などの関数として求められた。

なお、参考論文 1 では、プラズマ柱の中心領域に捕捉された磁場中の電子プラズマ振動の非線形高調波の実験的観測が、参考論文 3 は有限波数のポンプ波によるパラメトリック不安定性が、また、参考論文 4 では、不均一プラズマにおける非線形静電イオン・サイクロトロン波の振舞が論じられていて、いずれも興味ある非線形波動に関する研究である。

論文審査の結果の要旨

電子ラングミュア波はプラズマ波動の最も基本的なものであり、その線形及び非線形現象は十分に解明する必要がある。加えて磁場で閉じ込めたプラズマの波動加熱、或いはレーザー核融合における加熱には強いプラズマ波動とプラズマ粒子、すなわち電子及びイオンの非線形相互作用が本質的な役割を果たすと考えられる。とくに強いポンプ波によってプラズマ内に励起するパラメトリック不安定性はプラズマの加熱と閉じ込めに重大な影響を及ぼすと考えられ、数多くの研究が行われている。

申請者は電子ラングミュア波のパラメトリック不安定性が実験室プラズマでは粒子密度の空間的不均一性のため、また強いポンプ波の不均一性のため従来の理論では記述されなかった新しい振舞を示すことを明らかにした。すなわち空間的に均一とみなせる双極子場のポンプ波を不均一プラズマに印加すると空間的不均一をもつようになる結果、二つの電子ラングミュア波のパラメトリック不安定性を励起しうることを示した。さらにポンプ波強度を通常のしきい値 E_{0c} を越えて極端に強くするとき、ある値以上ではこの不安定性が逆に安定化されるという新しいしきい値 E_{0c}^+ を見出し、これを上側しきい値と名付けた。この現象は不均一なポンプ波が存在するとき始めて有効性を発揮するポン德罗モーティブ力によってパラメトリック不安定性を荷う粒子密度勾配がならされて安定化の方向に向かうからである。もちろん不安定性が成長し始める、通常の意味のしきい値 E_{0c} も求められているので、ポンプ波の強度を徐々に大きくすると、不安定性は E_{0c} と E_{0c}^+ との間で起り、その成長率は両者の値の間で最大となる。このような特性はプ

ラズマ密度が $\omega_{pe} = \omega/2$ (ω : ポンプ波の角周波数) をみたす点の近傍で励起されたラングミュア波 ω_{pe} のパラメトリック不安定性においても (局所解), また粒子密度のくぼみ, いわゆる密度キャビティに捕捉されている不安定性においても (固有解) 現われる。さらに上側及び下側のしきい値, 成長率などがラングミュア波の線形減衰率, 密度勾配, 波を捕捉する不安定領域の大きさ, 捕捉された波のモード数 (固有値) などのパラメーターの関数として求められており, それらは直観的にも理解できる性質を示している。

不均一プラズマにおけるラングミュア波のパラメトリック不安定性を検べた論文は多い。しかし多くの著者は Jackson が始めたように有限波数をもつポンプ波の周期的不均一性に基づく均一プラズマ内のパラメトリック不安定性を検べている。これに対し, 申請者はプラズマ粒子密度の非週期的不均一性に基づいて起るパラメトリック不安定性を, ポンプ波が著しく強い電場の場合をも含めて論じていて, このような論文は他に見当たらない。たとえば Perkins らは均一ポンプ波を不均一プラズマに照射して起るパラメトリック不安定性を取り扱っているが, ポンデロモータイプ力による密度勾配の変化はもちろん, プラズマ内で, ポンプ波自体が不均一になることも考慮に入れていない。また彼等はパラメトリック結合している一対のプラズマ波動として電子とイオンが荷う異種の波動, 電子ラングミュア波とイオン音波を考えている。さらに Lee らは不均一プラズマにおける 2 つのラングミュア波のパラメトリック不安定性の捕捉の可能性を調べたが, 彼等のパラメトリック結合の物理的機構はポンプ波の有限波数に基づくものである。これは Jackson の理論に粒子密度の不均一性の効果を取り入れた場合に相当する。またポンプ波の電場の向きと励起されたラングミュア波の波数ベクトルの向きが垂直であるのに対して, 申請者の場合は平行である。他にもプラズマの空間的不均一性を考慮した論文は数多くあるが, 申請者の考えている電子ラングミュア波間の不安定性を扱ったものは見当たらない。

以上に述べたように主論文は空間的に不均一な電場の作る非線形な力を包含する連立微分方程式を導き, 解析的に解いた結果, 密度の不均一性に基いてパラメトリック結合している 2 つの電子ラングミュア波の不安定性が空間的に捕捉される可能性と, 非常に強いポンプ波で不安定が安定化されるという新しいしきい値を見出し, プラズマ波動の非線形現象に関して幾つかの知見を加えたもので, この分野の発展に寄与するところが少なくない。参考論文 4 編もまた申請者のこの分野における豊富な知識と優れた研究能力を有することを示している。

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。