

氏 名	水 野 勝 弘 みず の かつ ひろ
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理 博 第 304 号
学位授与の日付	昭 和 49 年 1 月 23 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	ビーム・プラズマ系における電子サイクロトロン高調波 不安定性と非線形相互作用
論文調査委員	(主 査) 教 授 田 中 茂 利 教 授 巽 友 正 教 授 端 恒 夫

論 文 内 容 の 要 旨

非平衡状態にあるプラズマには種々の不安定波動が励起される。電子ビームとプラズマとの系は速度空間での不安定性が純粋な形で生ずる最も簡単な系であって、プラズマの集団的性質、とくに不安定性の研究に有用であり、これに関して多くの研究が行われて来た。

申請者論文はビームプラズマ系における電子サイクロトロン高調波の線形領域における不安定性とその励起の機構を解明し、さらにこの不安定波動が成長して非線形領域へ移行した場合、その波の振巾飽和はビーム電子がこの波によって捕捉されることに基因することを実験的に検証したものである。これらの研究は、申請者がビームプラズマ系に単一波動と考えられるテスト波を外部から励起するという独特の実験手法を使って、不安定な単一波が存在するビームプラズマ系を作り出し、その波とビーム電子の両者の成長発展の過程を直接に観測することにより始めて解明されたものである。

実験は弱く冷たい電子ビームとプラズマの系にビーム変調により不安定な波を励起し、その波と共に電子ビームのエネルギー分布の成長発展の過程を空間的に可動なアンテナ、エネルギー分析器などを使って観測した。得られた結果の概要は次のようである。

(1) 磁場中のビームプラズマ系に自然励起された不安定な波は磁場に斜に伝わる電子サイクロトロン高調波であることを実験結果と理論的解析から確めた。さらにこの不安定な静電波は適当な条件のもとでは電子ビームを変調することによって強く励起できることを見出した。

(2) このテスト波について、干渉法により波の位相速度と電子ビームの速度との関係を求め、不安定性励起の機構を検べた。その結果この不安定性は電子ビームの負エネルギーの波とプラズマの電子サイクロトロン高調波との結合により励起されたもので、チェレンコフ、サイクロトロン励起（正常及び異常ドップラー効果）によることを検証した。

(3) この単一不安定波動は始めは指数関数的にビームに沿って増大するが、その振巾が大きくなるとビーム電子はその波のポテンシャルの谷に捕捉され、波の位相空間の中で回転し始める。この波に捕捉され

た電子は始めの速度バンチングから空間バンチング、そして速度バンチングへと位相空間内で回転し、その結果波の振巾は飽和レベルに達しながら振巾振動をするようになる。その飽和レベルは凡そ $\omega_B/\gamma_L \sim 1$ であった。ここに ω_B はバウンス周波数であって振巾振動の周期、振巾の絶対値の測定などから求められ、 γ_L は線形領域での波の成長率である。このような非線形成長過程は波の振巾の空間的变化と共にビーム電子のエネルギー分布を空間の各点で直接に測定し、両者を比較検討することによって得られた。この実験結果は Drummond ら、O'Neil らの理論と可成りよく一致することも確められた。

(4) 捕捉電子の空間バンチングの位相でプラズマ波の高調波のエネルギーが極大に達し、捕捉電子が速度バンチングされ乍ら空間的に広がっている位相ではそれが極小となる。第5高調波までのパワースパクトルが測定され、その大きさは高調波の次数 n と共に $n^{-5} \sim n^{-6}$ で減少した。これらの高調波はビームの軌道の非線形によるもので、そのスペクトルは $n^{-2.5} \sim n^{-3}$ と計算されている。

(5) ビーム電子が波に捕捉されると捕捉粒子不安定性が現われる。これは捕捉電子が波の位相空間内で半回転した頃から観測され、ビームに沿って指数関数的に増大した。この不安定性はテスト波の周波数からバウンス周波数だけ離れた上・下の側帯波として検出された。

(6) このビームプラズマ系において自然励起された不安定波が存在する場合にも、その波の振巾飽和は本質的には粒子捕捉の効果であることが示された。

参考論文5編のうち1編は主論文の予備的研究であるが、他の4編は波と波との非線形相互作用とくに電子サイクロトロン高調波のパラメトリック励起に関する実験を述べたものである。プラズマの密度勾配がある場合、外部印加の電磁波がその半分の周波数をもつ二つの電子サイクロトロン高調波に崩壊されることを示し、その諸性質を調べたものである。

論文審査の結果の要旨

プラズマ内に定常な電子ビームが流れている系、いわゆる電子ビームプラズマ系におけるプラズマ波とビーム電子との線形および非線形相互作用の研究はプラズマ物理学におけるマイクロ不安定性の基本的問題として興味があるのみならず、核融合における加熱の素過程の研究としても重要な問題の一つであり多くの研究が行われている。しかしこの系で励起されるプラズマ波の多様さとビーム電子の複雑な振舞とがからみあって理論と対照しうる明確な実験は必ずしも多いとは云えない。

申請者は弱く、冷たい電子ビームとプラズマとの系において、電子ビームをプラズマ波の周波数で外部から変調することによってスペクトル巾の非常に狭い不安定波動を任意に励起することが可能であるという特徴ある実験方法を考案し、この励起されたテスト波を対象にして波と粒子との線形ならびに非線形相互作用を明確に系統的に研究して理論と比較検討できる優れた実験結果を得た。

従来、磁場中の電子ビームプラズマ系では多くの不安定波動が観測され、その分散関係が詳細に調べられているが、その機構をビーム電子との関連で検討し解明されているものは少ない。申請者は磁場と斜に伝播する電子サイクロトロン高調波不安定性をテスト波の方法によって観測し、ビームと波の伝播速度を正確に測定した。その結果この不安定性の機構は電子ビームの負エネルギーの波が、背景のプラズマのサイクロトロン高調波と結合し、チェレンコフ及びサイクロトロン励起によることを明らかにした。

さらにこの単一不安定波の振巾は線形領域はビームに沿って指数関数的に増大するが、遂にはその振巾は飽和レベルに達し乍ら振巾振動する非線形領域に達するのであるが、申請者はこの波とビーム電子との非線形な発展過程を直接に測定してこの不安定波の振巾飽和は本質的に捕捉粒子の効果によるものであることを明らかにした。

一般にビームプラズマ系での非線形現象はビーム電子の平均速度に対する速度分布の広がり（ビームの密度に対する電子ビームの密度の比）とビームの速度の広がりによって全く異なる2つの発展過程をたどることが知られている。ビーム電子の速度の広がりが大きい場合にはビーム電子は速度空間内で拡散し、その分布は平坦になると共に、巾広く励起されていた不安定波の成長は止る。これは準線形理論としてここ十年来詳細な研究が行われてきたものである。一方冷たいビームとプラズマとの系では励起された波のスペクトルは狭く、粒子は本質的にはこの単一波動と相互作用することになり、粒子捕捉の効果が非線形現象を支配することになる。理論的にはごく最近（1970年）Drummond ら、O'Neil らによってこのようなモデルが提唱され解析が行われた。実験的には1971年に Gentle らによって波の振巾の飽和にオーバーシュートが現われることが見出されているが、捕捉粒子を検出するには至っていない。

申請者の研究の特徴は不安定波の振巾変化と共に電子ビームのエネルギー分布を測定して Drummond らの理論を実験的に検証したことにある。この捕捉粒子の効果を抽出するためにはスペクトル巾の非常に狭い不安定波動を作り出す必要があり、申請者の考案したテスト波による単一不安定波動の励起の方法が本質的な役割をしている。すなわち線形領域で十分に増大した波の振巾が $\omega_B/\gamma_L \sim 1$ をみたすようなレベルに近づくと飽和し、振巾振動するようになると共に、この波に捕捉されたビーム電子が位相空間内で回転することをビーム電子のエネルギー分布の解析結果から示した。ビーム電子が回転を始めると共にそのエネルギーを波に供給しなくなり波の振巾飽和が生ずると共に両者のエネルギーの授受により振巾振動が起る過程を明らかにした。

以上述べたように主論文はテスト波の方法によりビームプラズマ系における波と粒子との相互作用を線形領域から非線形領域まで明確に系統的に研究し、波と粒子との相互作用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5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。