

氏 名	梅 田 隆 行 うめ たか ゆき
学位の種類	博 士 (情 報 学)
学位記番号	情 博 第 104 号
学位授与の日付	平 成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	情 報 学 研 究 科 通 信 情 報 シ ス テ ム 専 攻
学位論文題目	Study on Nonlinear Processes of Electron Beam Instabilities via Computer Simulations (計算機実験による電子ビーム不安定性の非線形過程に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 松 本 紘 教 授 橋 本 弘 藏 教 授 大 村 善 治

論 文 内 容 の 要 旨

電子ビーム不安定性は、宇宙プラズマ中において静電波動の励起や粒子の加速・加熱に重要な役割を果たしている。本論文は、その非線形過程の研究を大規模な計算機実験を行い、宇宙プラズマ中に存在する静電孤立波やラングミュア高調波の励起機構や特性について得られた知見をまとめた英文論文である。

本論文は6章より構成されており、第1章の序論では、電子ビーム不安定性の非線形過程について、これまでに行われた科学衛星による観測や計算機実験および理論研究についてまとめ、本論文の目的を示した。

第2章において、電磁粒子シミュレーションコードにおいて電流密度計算を高速に行うための電荷保存法及び、高効率な吸収境界条件である改良マスキング法を開発した。また、これらの手法を導入した一次元から三次元までの高効率なコードを新たに作成した。

第3章において、従来一様周期モデルにおいて行われていた電子ビーム不安定性の計算機実験を、開放系モデルを用いて行った。まず一次元モデルにおいて電子ビームを境界より入射させることにより、従来の周期系において時間発展として捉えられていた物理過程が開放系では空間発展としてあらわれることを明らかにした。さらに二次元モデルに拡張し、これまでの周期系において一様に起こっていた静電孤立波と低域混成波の競合過程が、開放系では静電孤立波の発生領域に局所的に起こることを示し、電子ビームの速度と波動の群速度との違いによって、周期系と開放系が異なる非線形発展をすることを明らかにした。また、静電孤立波のポテンシャル構造が、発生領域からの距離に依存して二次元構造から一次元構造へと発展することを明らかにした。この特性は、プラズマ波動観測データから静電孤立波の発生領域を特定する上で重要な情報となり得る。

第4章において、従来電磁界を無視した静電粒子コードを用いて行われていた電子ビーム不安定性の計算機実験を、世界に先駆けて電磁粒子モデルへ拡張した。背景磁場と二次元構造を持つ静電孤立波の磁場に垂直な電界を受けて電子が $E \times B$ ドリフトすることにより二次元静電孤立波の垂直方向の端において電流が生じ、二次元静電孤立波の周辺に電磁界が励起することを明らかにした。また、計算機実験結果がオーロラ領域で観測されている静電孤立波に伴った電磁界成分の特性とよく一致していることを示した。さらに、孤立した静電ポテンシャル内において形成された電流構造が電磁波の放射源となり得るという新しい物理過程について明らかにした。これは、従来の電子ビームや連続的な波動からの直接的な電磁放射とは全く異なる物理過程であり、宇宙プラズマ物理のみならず、実験室プラズマや天体プラズマへの適応が可能な新たな電磁放射過程である。

第5章において、一次元静電ブラゾフシミュレーションコードを新たに開発し、ラングミュア高調波の非線形理論との比較研究を行った。粒子コードを用いて同様の計算機実験を行った場合、粒子モデル特有の熱雑音によりラングミュア波の第2高調波までしか励起しないのに対して、ブラゾフコードを用いた計算機実験では第20次以上の高調波励起を確認した。これは、背景電子に対して0.1%という非常に弱い電子ビームを仮定したモデルにおいて、熱雑音を完全に除去できるブラゾ

フコードの有用性を示している。また、シミュレーション結果が非線形理論と非常によく一致していることを示し、ラングミュア高調波の非線形分散関係式を世界に先駆けて証明した。これは、非線形波動-波動相互作用の項を含めたブラゾフ-ポアソン方程式を解くことにより、プラズマ中における非線形静電波動の分散関係式を導くという新しい非線形理論の有用性を示している。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめた。

論文審査の結果の要旨

本論文は宇宙プラズマ中においてプラズマ波動励起や粒子の加速・加熱に重要な役割を果たしている電子ビーム不安定性の非線形過程の研究を大規模な計算機実験で行い、宇宙プラズマ中に存在する静電孤立波やラングミュア高調波の励起機構や特性について研究し、得られた知見をまとめたものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 電流密度計算法、電荷保存法および高効率な吸収境界条件の改良マスキング法など汎用性の高い新しいプラズマシミュレーション技法を新たに開発した。これによって従来よりも1桁以上速い計算方法が確立された。
2. 開放系モデルを開発し、その空間・時間の両方の非線形発展が追えるようにした。この方法は科学衛星GEOTAILが発見した宇宙プラズマ中の静電孤立波（ESW）の物理特性のシミュレーション解析をより現実的にすると評価できる。
3. シミュレーションモデルを二次元に拡張し、ESWのポテンシャル構造が、発生領域からの距離に依存して二次元構造から一次元構造へと発展することを明らかにした。この特性は、プラズマ波動観測データから静電孤立波の発生領域を特定する上で重要な情報と評価できる。
4. ESWのシミュレーションを世界で最初に電磁粒子モデルで行った。その結果、二次元ESWの周辺に電磁界成分を持つ波動が励起されることを明らかにした。このことは、孤立した静電ポテンシャル内において形成された電流構造が電磁波の放射源となり得るという新しい物理過程を示唆するもので、今後の新しい研究領域を切り開くものと高く評価できる。
5. ラングミュア高調波の非線形理論との比較研究を行うために、本研究では一次元静電ブラゾフシミュレーションコードを新たに開発し、第20次以上のラングミュア高調波励起を確認した。シミュレーション結果は非線形理論と非常によく一致しラングミュア高調波の非線形分散関係式を証明した。

以上要するに本論文は、より高精度、高速の計算機シミュレーション研究を行い、宇宙空間で普遍的に存在する電子ビームの非線形挙動を明らかにし、静電孤立波の空間構造、時間発展を解析したものであり、学術上きわめて大きい貢献をなすものである。また開発したプラズマ物理現象シミュレーションコードは非常に高速・高効率で、かつ低数値雑音を達成したもので、実際上も寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年1月23日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。