

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	小谷 翼
論文題目	Understanding non-linear development of lower hybrid waves and ion acceleration driven by energetic ion injection through particle-in-cell simulation (電磁粒子シミュレーションによる高速イオン注入に伴う低域混成波の非線形発展及びイオン加速の理解)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文では、宇宙空間プラズマや核融合プラズマで見られるリング状の高速のイオンが低域混成波をどのように駆動して発達させているのかを、イオンと電子のダイナミクスを完全に考慮した電磁粒子シミュレーション (particle-in-cell シミュレーション) を通して明らかにすることを目的としている。</p> <p>まず、第1章では、プラズマの基礎理論、低域混成波の性質、イオンリング不安定性の理論について説明し、それらをふまえて本研究の目的を述べている。</p> <p>第2章では、particle-in-cell シミュレーションの基本的なアルゴリズムと、本研究で用いたシミュレーションの設定について説明している。</p> <p>第3章では、高速イオンの連続注入によって引き起こされるイオンリングの不安定性について調べている。関連するこれまでのシミュレーション研究の多くは、初期の時間ステップのみに高速イオンを設定し、その後の時間発展について調べていた。それをふまえて本研究では、高速イオンを連続的に徐々にプラズマ内に注入するモデルを構築し、そのモデルの詳細を記述している。シミュレーションを実施し、高速イオンの連続注入によって、幅広い波数帯で大振幅の低域混成波が励起され、低域混成波の乱れを通して背景イオンが加速されていることを明らかにしている。</p> <p>第4章では、リング状の高速イオンによって駆動される低域混成波の高調波構造、すなわち、低域混成波の周波数の整数倍の周波数を持つ高調波について、その励起機構を調べている。このような高調波構造が生じていることは、これまで宇宙空間プラズマと核融合プラズマの研究の双方で報告されてきたが、その励起機構はまだ十分には理解されていなかった。電子のサイクロトロン周波数がプラズマ周波数よりも大きいような比較的強い磁場中のプラズマでは、高速イオンが直接励起した低域混成波が非線形波動間結合することによって、高調波が数多く励起されることを示している。</p> <p>第5章では、地球磁気圏の極域の高度4000 kmにおいて過去に観測された低域混成波の高調波構造を取り上げている。その高度に存在しているリング状の高速イオンが、実際に低域混成波の高調波構造を生み出すことが可能であることを示し、過去の観測結果が説明できることを示している。さらに、低域混成波の高調波がより強く励起されると背景イオンがより強く加速されることも示し、低域混成波の高調波構造が、極域からのイオン流出加速に関わっている可能性を指摘している。</p> <p>最後の第6章では、この研究から得られた結果をまとめ、全体的な結論を述べている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

宇宙空間プラズマや核融合プラズマにおいて、速度空間でリング分布を持つ高速イオンが低域混成波を駆動することは、これまでの研究から知られているが、実際に地球の磁気圏で観測されるような一定期間にわたって連続的に高速イオンが注入される状況で、どのように低域混成波が発展するのかは十分に理解されていなかった。本論文では、高速イオンの連続的な注入過程を組み入れた particle-in-cell シミュレーションを通して、低域混成波の非線形発展と、それに関わる背景イオンの加速機構を明らかにしようとしている。

申請者は、まず、高速イオンの注入過程を組み込んだ空間 1 次元速度 3 次元のシミュレーションモデルを構築した。これまでの多くのシミュレーションでは、初期の時間ステップのみに高速イオンを設定し、その後の低域混成波の時間発展を調べていたが、申請者の研究を通して、これまでの研究では見られなかった波の励起フェーズが存在していることが明らかになった。そのフェーズにおいては、幅広い波数帯で大振幅の低域混成波が励起されており、そこでは背景のイオンが加速されている。また、このイオン加速は、低域混成波による乱流加速によるものであることも指摘している。高速イオンの注入過程を組み込んだ独自のシミュレーションモデルを通して、高速イオンの連続的な注入が作り出す低域混成波の特徴を明らかにし、それが背景イオンの加速をも引き起こしていることを明確にしたことは、高速イオンの連続注入過程が実際に観測される低域混成波を理解する上で極めて重要な要素であることを示すものであり学術的価値が高い。

次いで申請者は、リング状の高速イオンによって駆動される低域混成波の高調波構造の励起機構について調べている。低域混成波の周波数の整数倍の周波数を持つ高調波は、これまで、宇宙空間プラズマと核融合プラズマの研究の双方で観測例が報告されていたが、その詳細な励起機構はよく分かっていなかった。申請者は、様々なパラメータについてシミュレーションを実行し、その結果、電子のサイクロトロン周波数がプラズマ周波数よりも大きいような比較的強い磁場中のプラズマでは、高速イオンが直接励起した低域混成波が非線形波動間結合することによって、高調波が数多く励起されることを明らかにしている。低域混成波の高調波構造の励起機構を明らかにした学術的価値は非常に高い。

さらに、申請者は、過去に地球磁気圏の極域の高度4000kmで観測された低域混成波の高調波構造の解明に取り組んでいる。低域混成波の高調波がこの場所でどのようにして励起されるのかは長い間不明であったが、申請者は、その高度での実際の観測量と整合する値を持つパラメータを用いたシミュレーションを実行し、観測結果が説明できることを示している。また、高調波が強く励起されると背景のイオンがより強く加速されることも見いだしており、低域混成波の高調波が、未だ原因がはっきりしていない極域からのイオン流出加速にも密接に関わっているという新たな可能性を指摘している。

以上のように、独自のシミュレーションを構築し、それを通して、これまで十分に理解されていなかった現象の生成機構を明らかにした本論文の意義は極めて大きい。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降