

報告番号	※乙	第4871号
------	----	--------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 2種類イオンプラズマ中の非線形磁気音波と重イオン加速

氏 名 樋田 美栄子

論 文 内 容 の 要 旨

磁気音波は、外部磁場の中におかれたプラズマ中に存在する最も基本的な波の一つであり、核融合および宇宙のプラズマにおいて重要な役割を果たしている。このため、非線形磁気音波の伝播とそれに伴う粒子加速については、長年にわたり活発な研究が行なわれてきた。その結果、磁気音波の非線形の振る舞いが KdV 方程式で記述されること、大振幅磁気音波は一部のイオン粒子を反射し、それらにエネルギーを与えること等が明らかにされてきた。また、非線形磁気音波による加速は、太陽フレア時に発生する高エネルギー粒子の加速機構としても議論されてきた。

これらの、非線形磁気音波に関する理論および計算機シミュレーション研究は、主にイオンを1種類と仮定して進められてきた。しかし、実際のプラズマは、多くの場合、多種類のイオンを含んでいる。そして、このような多種類イオンの存在は、様々な興味深い課題を提供している。

この課題の一例として、太陽高エネルギー粒子の化学組成があげられる。その化学組成は、フレアごとに変動はあるが、平均すれば背景のコロナのそれとほぼ等しい。これは、重イオンが軽イオンとほぼ同じ割合だけ加速されたことを表している。太陽高エネルギー粒子の加速理論は、この性質を説明し得るものでなければならない。

多種類イオンプラズマ中を非線形磁気音波が伝播する場合、重イオンはほとんど反射されないものと理論的に予想される。したがって、反射によってのみ加速が起こると仮定すると、軽イオンは加速されるが、重イオンはほとんど加速されないということになり、上の観測結果とは矛盾してしまう。重イオンは、全く別のメカニズムで加速されるのであろうか。これを明らかにするためには、まず、多種類イオンの存在が非線形磁気音波に与える影響を考察し、その結果に基づいて、磁気音波中のそれぞれのイオンの運動を解析することが必要である。

本論文は、2種類のイオンと電子から構成されるプラズマ中を磁場に直角方向に伝播する磁気音波について、その非線形の振る舞いと、非線形波によるイオン加速を、理

論および計算機シミュレーションによって調べたものである。

まず、2種類のイオンと電子の3流体の方程式系を出発点とし、磁気音波の線形分散関係を詳しく調べ、それを基に非線形の振る舞いを記述する方程式を導出した。2種類のイオンが存在すると、磁気音波は低周波と高周波の二つのモードに分裂する。低周波モードは、長波長の極限 ($k \rightarrow 0$) で周波数がゼロ ($\omega \rightarrow 0$) であり、長波長領域の分散は弱い。そこで、低周波モードに対しては、従来の減速摂動法を適用し、長波長領域の振る舞いを記述する KdV 方程式を導出した。ただし、この KdV 方程式の適用範囲は非常に小振幅の場合に限られている。一方、高周波モードは $k \rightarrow 0$ で ω は 0 でない有限な値を取るが、 $k \sim 0$ の近傍を除くと、1種類イオンプラズマの場合の分散関係と良く似ている。このモードに対し、振幅に下限を設定して、比較的短波長の領域に焦点をあてる展開法を開発した。そして、高周波モードは有限なカットオフ周波数を持つにもかかわらず、低周波モードよりもずっと広い振幅領域の波について、その非線形の振る舞いが KdV 方程式で記述されることを明らかにした。この結果は、 $k \rightarrow 0$ で $\omega \rightarrow 0$ であることが、KdV 方程式が導出されるための必要条件ではなく、さらに多様な分散関係を持つ波に対して、KdV 方程式が得られる可能性があることを示している。

次に、宇宙プラズマと同様の、主成分を軽イオン、副成分を重イオンとするプラズマを仮定し、高周波モードの非線形波におけるイオンの運動を解析した。そして、重イオンは、軽イオンとは全く異なったメカニズムで、強く加速され得ることを明らかにした。磁気音波中には、縦電場と横電場が形成されるが、主成分の軽イオンは1種類イオンプラズマの場合と同様、一部の粒子が縦電場によって反射されエネルギーを得る。それに対し、本論文では、重イオンは全ての粒子が横電場によって加速され得ることを示し、加速された重イオンの速さを定量的に求めた。その速さは波の振幅に依存するが、大振幅波の場合は、重イオンをおよそ波の伝播速度にまで加速することが可能である。さらに、計算機シミュレーションを使って、非線形磁気音波の伝播と、イオンの加速を調べた。シミュレーションコードは、粒子モデルに基づくもので、2種類のイオンと電子の運動、およびそれらに伴う電磁場の変動を全て含んでいる。小振幅波を励起させた場合、孤立波の伝播が観測されたが、その構造は、高周波モードの KdV 方程式の孤立波解で説明されるものであった。大振幅波を励起させると衝撃波型のパルスが伝播し、それに伴って、軽イオンと重イオンが、ともに強く加速されることが観測された。そして、そのシミュレーション結果は、重イオンの加速機構は、軽イオンのそれとは全く異なったものであることをはっきりと示すものであった。また、いろいろな振幅について、加速された重イオンの速さを測定したところ、理論的な予測とよく一致した。