

京都大学	博士 (工 学)	氏名	小 路 真 史
論文題目	Computer Simulations of Nonlinear Wave Instabilities Driven by Ion Temperature Anisotropy in Space Plasmas (宇宙プラズマ中のイオン温度異方性による非線形波動不安定性の計算機実験)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、宇宙プラズマ中に頻繁に現れる温度異方性を持ったイオン速度分布によって引き起こされる波動不安定性の非線形発展について計算機実験による解析を行ったものであり、7章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景および目的について述べている。</p> <p>第2章は本研究で使用する多次元ハイブリッドコードのアルゴリズム、及びモデルの説明を行なっている。従来の研究で用いられていた3次元周期境界のハイブリッドコードを発展させて、修正マスキング法を用いた開放境界を搭載した3次元ハイブリッドコードの開発を行った。また、地球内部磁気圏の磁気赤道付近の磁場構造をモデルとして、円筒座標系の非一様背景磁場の効果を取り入れた上で、沿磁力線方向に伝搬する波動と粒子の相互作用を解くことのできるハイブリッドコードを開発した。</p> <p>第3章では地球マグネトシースにおけるミラー不安定性とLモード電磁イオンサイクロトロン(EMIC)不安定性との競合過程について解析を行った。これらの不安定性の競合過程を調べるために、2次元及び3次元の周期境界モデル内でシミュレーションを行った。結果として、ミラー不安定性が支配的に存在するために重要な次の4つの条件を示した。(i) 3次元波数空間においてミラーモード波がトラス状のスペクトルを形成するため、EMIC波よりも多くの体積を占め、成長率が小さいにも関わらず、多くのモードがエネルギーを奪う。(ii) 競合する不安定性は、初期擾乱及び線形成長率に関し、3次元効果が有効となるための条件を満たす。(iii) 太陽風中に存在する少数のヘリウムイオンがEMIC波によって加熱されるために、EMIC波の飽和レベルが下がる。(iv) EMIC波は非線形粒子加熱を引き起こし、急速にエネルギーを失う。一方でミラーモード波は磁場構造合体を起こすが、ほとんどエネルギーを失わない。</p> <p>第4章では非線形段階におけるミラーモード磁場構造の合体を詳細に調べるために、2次元、3次元の開放境界モデルにおけるシミュレーションを行った。磁気ピークおよび磁気ホールと呼ばれる、近年の衛星観測で注目されている磁場構造とミラー不安定性の関係について解析を行った。イオンベータ値に関するパラメータ解析を行った結果、高ベータ条件において2次元、3次元ともに磁気ピーク構造が現れた。低ベータにおいては、2次元モデルでは磁気ホールが、3次元モデルでは磁気ピークがそれぞれ得られた。高ベータ値の場合、より大きな振幅の波動が励起される。このとき平行方向に電場が発生し、粒子が加熱され、磁場に沿って粒子群が移動しやすくなる。これによって、高ベータにおいては、ミラーモードを形成する反磁性電流の合体が隣り合う者同士でよく起こる。その電流構造の合体に伴って磁場構造も合体していくため、磁気ホールは崩れる。残った磁場の強い領域が、磁気ピークとして存在することを示した。一方で低ベータの場合は、磁場の弱い領域に粒子が捕捉され続けることで、磁気ホール構造が安定して存在していることを示した。一方3次元モデルでは、粒子の運動の自由度が2次元モデルよりも多いために、粒子群の合体が促進される。従って2次元モデルで磁気ホールが出来るパラメータにおいても、磁気ピークが卓越する。</p> <p>第5章では、近年内部磁気圏観測において発見されたEMICトリガード放射と呼ばれ</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	小 路 真 史
<p>る電磁波放射現象をシミュレーションによって再現し、非線形波動粒子相互作用の解析を行った。内部磁気圏の磁気赤道近傍を再現したモデルを開発し、その中でトリガード放射の再現に成功した。また、観測及び先に提唱された非線形成長理論とよく一致していることを示した。トリガード放射によって多数の高エネルギープロトンが散乱され、その一部は地球磁場のロスコーンに落ちる。結果としてプロトンオーロラの一因となることを示唆した。さらに、一部の粒子は加速され、トリガード放射の減衰過程に寄与することを示した。</p> <p>第6章では複数のEMICトリガード放射の後に生じる別のタイプの単一周波数のEMIC波について議論している。複数のトリガード放射の後にヘリウムのサイクロトロン周波数より低い周波数を持つEMIC波が励起されていることが、シミュレーション内で発見された。さらに、衛星観測データ解析においても同様の放射が起きていることを確認した。複数回のトリガード放射との相互作用により、高エネルギープロトンの速度分布関数は強烈に歪められる。ピッチ角散乱によって分布関数上にEMIC波を励起するような密度傾斜が形成されることがわかった。結果的に、ヘリウムのサイクロトロン周波数以下のEMIC波が成長することを示した。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	小路真史
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、宇宙プラズマ中のイオン温度異方性によって起きるプラズマ波動不安定性の非線形過程に関する大規模多次元ハイブリッドシミュレーションを行い、得られた知見をまとめたものである。主な成果は以下の通りである。

(I) 地球マグネトシースにおける、Lモード電磁イオンサイクロトロン(EMIC)不安定性とミラー不安定性の競合過程について、主に(i)3次元空間における垂直方向の波数スペクトルの広がり、(ii)初期擾乱の影響、(iii)非線形発展の違い、(iv)重イオンの効果によって、EMIC不安定性が抑制され、ミラー不安定性が支配的になることを明らかにした。

(II) 地球マグネトシースにおける磁気ホール、磁気ピークと呼ばれる磁場構造が形成される過程を再現し、その必要条件を解明した。磁気ホールは2次元モデルでイオンが低ベータの場合にのみ現れ、磁気ピークは2次元高ベータモデルおよび全ての3次元モデルで現れる。特に磁場ピークは、個々のミラーモードを形成する反磁性電流が互いに引き合うために起きる磁場構造合体によって形成されることを示した。一方で磁気ホールが形成される場合は、粒子が磁場構造の内部に捕捉され、磁気ピーク構造よりも安定して存在していることを明らかにした。

(III) 地球内部磁気圏の赤道付近において観測されたEMICトリガード放射と呼ばれる周波数上昇を伴う電磁波放射現象を再現した。観測および非線形成長理論で得られた結果と比較し、よく一致していることを示した。また、磁気赤道付近の高エネルギープロトンを極めて効率よくピッチ角散乱し、プロトンオーロラを引き起こす粒子となっていることを示唆した。様々な場合におけるEMICトリガード放射の解析を行い、現時点では観測がなされていない種類のトリガード放射の存在を示した。

(IV) 複数のEMICトリガード放射が励起された後に、低周波側に二次的なEMIC波の放射が現れることをシミュレーションにより発見、実際の内部磁気圏で得られた衛星データにおいて、その存在を確認した。複数のトリガード放射によってプロトンの速度分布関数に変形され、二次的な放射が発生することを示した。

以上要するに本論文は、イオン温度異方性によって励起される二種類のプラズマ波動不安定性が地球周辺の電磁環境を変化させる素過程を大規模シミュレーションによって再現し、波動粒子相互作用による宇宙プラズマ環境の変動評価、観測される電磁波の発生機構の解明、更には将来の衛星観測計画への提言を行うものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。