

論文審査の結果の要旨

氏名 王 燦洋

本論文は宇宙空間において一般的に見られる磁場の極性が反転した電流層における磁気リコネクションに関する研究であり、7章で構成されている。第1章は本論文の主題である磁気リコネクションに関する一般的な導入である。宇宙空間では磁気エネルギーの形で蓄積された自由エネルギーが短時間のうちに爆発的に解放される現象が一般的に見られるが、その代表例として太陽フレアへの応用が議論されている。さらに磁気リコネクションの古典的な理論モデルや、本研究で着目したティアリング不安定性、さらに近年の大規模数値シミュレーションに基づく研究について述べられている。宇宙空間では一般に磁気リコネクションに必要な電気抵抗が極めて小さい高磁気レイノルズ数の状態にあるため、現実的な物理系に近づけるためには非常に高解像度の数値シミュレーションが必須となっている。従ってこれまでの多くの研究は2次元のシミュレーションに限られており、3次元の直接数値シミュレーションによる研究は始まったばかりの段階にある。特に2次元と3次元では乱流の性質が異なること、さらにこれまでに報告されている3次元シミュレーション結果が2次元と大きく異なることから、本研究で扱う3次元数値シミュレーションの重要性が述べられている。

第2章では3次元シミュレーションの初期条件として、ティアリング不安定性の理論的な固有関数を与えた場合の結果について議論されている。ティアリング不安定性はその波数ベクトルが磁場の反平行成分と平行な場合(2次元モード)に最も高い成長率を持ち、その固有関数は電流層中心部に局在化されることが線形理論から知られている。一方で、反平行磁場に垂直な成分(ガイド磁場)が存在する場合には、非線形シミュレーションの初期条件にランダムな摂動を与えるとガイド磁場方向に有限の波数を持った3次元モードが電流層の中心部から離れた層において強く発達することが知られている。この物理機構を明らかにするために、初期条件として3次元モードの固有関数を電流層の上下に与えた場合のシミュレーション結果が議論されている。その結果、上下の3次元モードが効率良くカップルすることによって、3次元モードの成長が促進され、2次元モードの成長が抑制されることが示された。

第3章では2章と同一のシミュレーションの長時間発展が議論されている。特に非線形モードカップリングが効率良く起こることで、初期の3次元モードに伴う揺らぎが徐々に電流層の中心部から離れた場所に移動することによって、非線形段階で電流層の中心部分では2次元モードの成長が促進されることが示された。さらに、生成された磁束ロープが合体することで長波長への逆カスケードが起こること、2章で見られたような3次元モード間のカップリングが十分乱流が発達した非線形段階においても普遍的に見られることが議論されている。

第4章では初期摂動をランダムにした場合の数値シミュレーションが議論され、対称性が崩れた系においても同様のカップリング機構が働くこと、また2次元に比べて非常

に速い時間発展と効率の良い磁気エネルギーの散逸が起こることが示された。

第 5 章ではパラメータサーベイの結果が示され、2 章で議論されたカップリングが効率良く起こるには 3 次元モードの発展する層と電流層の中心からの距離には最適値が存在することが確認された。また、これと関連して、ガイド磁場の強度が小さい場合には効率の良いカップリングが起こらないことも示されている。

第 6 章ではこれまでの結果がまとめられ、2 次元と 3 次元の磁気リコネクションの効率の違いや、観測で見られる速いエネルギー解放の時間スケール、2 次元的な磁束ロープの形成について、数値シミュレーションとの比較・議論が述べられている。さらに、理論的に提唱されている乱流を介した速い磁気リコネクションモデルと数値シミュレーション結果の関連性についても議論が展開され、将来展望が述べられている。

以上の結果を受けて、最後の第 7 章では本論文のまとめが簡潔に述べられている。

本論文は 3 次元におけるティアリング不安定性から発達する磁気リコネクションを詳細に議論したものであり、線形理論で予測される 2 次元モードのみならず、3 次元モードが系の非線形発展に大きな影響を与えることを明らかにした。この結果は線形理論に基づく古典的な理解が正しくないことを意味し、3 次元効果によって自発的に励起された乱流が磁気リコネクションにおいて重要な役割を果たすことを如実に示したものとして意義深い。なお、本論文は横山央明氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値シミュレーション及び解析、議論を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って、本審査委員会は本論文が博士学位論文として十分な内容を含んでいるものと判定し、論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。