

論文審査の結果の要旨

氏名 川面洋平

プラズマに現れる複雑な運動の法則性や構造の特徴を理解することは、宇宙・天体现象を理解するための礎として重要である。また、天体のエネルギー生産メカニズムである核融合を利用しようという核融合エネルギー開発においても、プラズマの非線形現象の理解が中心的な課題となっている。とりわけ「渦」の大規模構造が注目されている。プラズマ中に自己組織化される「帯状流」や「ストリーマー」は、渦のコヒーレント構造であり、これがプラズマ中のエネルギー輸送に大きな影響をおよぼす。本研究は、プラズマの渦構造生成において基本的な働きをする傾圧効果に関して、その物理的な基礎づけ、数理的構造の解析、数値シミュレーションをもちいた現象論的特徴づけ、さらに宇宙論やその基礎実験における定量的評価を行い、「渦」の生成メカニズムについての理論に新しい見地を拓いている。論文は五つの章で構成され、各章は以下の内容を記述している。

第1章は序論にあてられている。プラズマ中に生じる渦構造に関する概説と、逆カスケードの概念を中心とした理論モデルを紹介している。続いて傾圧効果による渦生成について解説し、傾圧効果が存在しているときは乱流が熱運動と結合し、従来の力学的な乱流駆動とは異なった、熱的乱流駆動のフレームワークが重要となることを指摘している。

第2章では、プラズマ乱流と自己組織化した渦構造の関係について、抽象的な熱力学理論を展開している。帯状流型とストリーマー型という二つの異なる渦構造を対比する熱機関モデルを定式化し、それぞれについて熱流束の境界条件と温度の境界条件を与えて解の分岐を調べている。いずれの場合も、熱流束あるいは温度が閾値を超えると渦構造の発現を意味する非線形解が分岐すること、またいずれにおいても非線形解が安定であることを示している。さらに、それぞれの非線形解についてエントロピー生成率を評価し、その最大・最小関

係が双対的に変化することを示している。この双対性を、Onsager の散逸関数を非線形に拡張した新たな熱力学ポテンシャル関数を導入することで説明している。次に、ヒステリシスについて考察している。帯状流モデルにおいて、乱流輸送効果を表わす係数に温度依存性がある場合にヒステリシスが生じる。その条件を、トカマク実験装置における L-H 遷移の実験データと比較して、モデルの妥当性を示している。

第 3 章では、前章で構築した抽象的熱力学モデルに対して、メカニズムを具体化する試みがなされている。トカマクを想定して、強磁場中における低周波の静電プラズマ乱流（ドリフト波乱流）を取り上げている。ドリフト乱流波の先行研究と異なり、温度の勾配長と密度の勾配長の 2 つをパラメタとしている。この 2 つのパラメタに依存して帯状流が生じるか否かが変わることを発見している。また帯状流の成長にともなって乱流エネルギーの逆カスケードが生じていることを観測している。次に、境界から乱流によってエネルギーが流入出すように境界条件を変化させ、熱的乱流駆動条件をモデル化したシミュレーションを行っている。境界から注入されたエネルギーからマクロな渦構造へのエネルギー変換が起きていることが現象論的に証明されている。

第 4 章では、相対論効果によって生じる傾圧効果に注目し、相対論的プラズマにおける渦生成の数値シミュレーションを行なっている。相対論効果による時空の歪みは、熱力学的傾圧効果が弱いときでも強力に渦を発生させるメカニズムとして働き、初期宇宙における磁場の起源を説明できるとされている。初期宇宙 (MeV era) のパラメタと、初期宇宙現象の模擬実験をめざすレーザー・プラズマ実験を想定したパラメタについて、それぞれのシミュレーション結果が示されている。初期宇宙のパラメタでの計算では、相対論効果は大きな空間スケールで有効に作用することを示している。また、実験パラメタのシミュレーションから、宇宙論的渦（磁場）生成の実験の可能性が示されている。

第 5 章では本論文における研究成果を結論としてまとめている。

以上を要するに、本論文は、プラズマにおける大規模渦構造の生成メカニズムについて理論と数値シミュレーションによって多角的に研究し、その核となる傾圧効果が核融合プラズマや宇宙プラズマといった非線形なマクロ開放系においてどのように機能するのかを明らかにしたものである。この成果は、宇宙・天体现象の理解のための礎となるのみならず、核融合エネルギー開発研究におけるプラズマの制御技術にも応用できる知見を与えることから、先端エネルギー

一工学、特にプラズマ物理学に資するところが大きい。

なお、本論文の第2章、第3章および第4章の成果は、吉田善章氏との共同研究によるものであるが、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(科学)の学位を授与できると認める。

以上1988字