

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Paul P. Hilscher
論文題目	Study of multi-scale interaction and dissipation based on gyro-kinetic model in fusion plasmas (核融合プラズマにおけるジャイロ運動論モデルに基づいたマルチスケール相互作用と散逸に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、核融合プラズマの閉じ込め性能を左右する乱流輸送において重要な役割を果たす異なったスケールを持った揺らぎ間の相互作用と、その過程において安定/減衰モードの役割と特性を明らかにすることを目的に、多階層プラズマのジャイロ運動論モデルに基づくブラソフ方程式の数値シミュレーションと固有値解析を行った研究成果をまとめたものであり、以下の7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、磁場閉じ込め核融合プラズマの一つである軸対称系のトカマクプラズマにおける巨視的および微視的な不安定性によって発生するプラズマの揺らぎ(乱流)と異常輸送現象の関係について簡潔に紹介している。また、ティアリングモードなどの典型的な電磁流体力学的(MHD)モードによって生成される磁気島を含む複数の揺らぎが共存したマルチスケール(多階層)のプラズマ乱流(以下、マルチスケール乱流として参照)がプラズマの輸送と閉じ込めに与える影響や役割について論じている。さらに、磁気島存在下における微視的な不安定性に関して解析したジャイロ流体モデルによる先行研究を紹介し、本論文の主題であるジャイロ運動論シミュレーションを用いてマルチスケール乱流の構造とダイナミクスを解明することの意義と目的について論じている。</p> <p>第2章では、微視的な不安定性およびそれと関連した異常輸送現象を研究するための基本的な枠組みとして、磁場閉じ込めプラズマにおける非正準 Lie 摂動論を用いたジャイロ運動論モデルを紹介している。また、局所近似によって得られる<math>\delta f</math>モデルや微視的な不安定性を解析する上で重要な役割を果たす有限ラーモア半径(FLR)効果などの物理的な基礎を議論するとともに、本論文の解析で用いるトカマクプラズマを近似した平板(スラブ)配位のシミュレーションモデルの説明を行っている。</p> <p>第3章では、第2章のジャイロ運動論モデルに基づいて、マルチスケール乱流の相互作用を研究することを目的に開発したジャイロ運動論的ブラソフコードについて概説している。本章では、特に、5次元位相空間に対してMPIとOpenMPによるハイブリッド並列を実装することで高い並列化効率が確保されていること、HDF-5と呼ばれるインターフェイスを導入することで大規模データセットの効率的な処理が可能であることなど、計算科学的な側面を強調して論じている。さらに、本コードによるシミュレーション結果が線形領域でトカマクプラズマの代表的な揺らぎであるイオン温度勾配(ITG)モード不安定性の理論的な分散関係と高い精度で一致していることを示し、コードの妥当性について論じている。</p> <p>第4章では、第3章で述べたジャイロ運動論的ブラソフコードを用いて、Landau理論では減衰が予測される安定なITGモードのダイナミクスについて解析しており、無衝突極限ではモードの減衰が有限時間で打ち切られる再帰現象の出現によりLandau減衰過</p>			

程が正しく再現されないこと、一定の衝突効果の導入によりLandau減衰過程が正しく再現されることを明らかにしている。この結果を理解するため、シミュレーションと同等に速度空間を離散化した系に対する固有値解析を行い、無衝突極限ではCase-van-Kampen (CvK) モードと呼ばれる安定な連続スペクトルが出現し、これらの位相混合によってシミュレーションと同様の再帰現象が再現されること、衝突効果の導入することによりCvKモードは急速に減衰し、その減衰率がLandau減衰値を上回ると連続スペクトルの中から点スペクトルが出現し、それがLandau減衰理論で予測される固有状態に対応することを明らかにしている。この固有状態が出現する衝突周波数( $\beta$ )を臨界衝突周波数( $\beta_c$ )として定義し、 $\beta_c$ を上回る衝突を導入することにより( $\beta > \beta_c$ )、シミュレーションにおける再帰現象を丸め誤差の範囲で回避できることを示している。

第5章では、上述のITGモードより短波長であり乱流輸送に影響を与える可能性がある短波長ITGモードの存在が指摘されているが、この短波長ITGモードの線形成長率に対するイオン温度勾配や磁気シア、電子応答の差異の効果などを調べるための固有値解析を行い、これらの結果について論述している。

第6章では、第4章および第5章で得られた知見を基に、MHDモードによって形成されるマクロな磁気島がマイクロなITGモードに与える影響を解析した結果についてまとめている。有限な磁気島幅の効果によって大域化したITGモードの成長率はFLRやLandau減衰による散逸過程を経て一度安定化されるが、磁気島が大きくなると新たに形成される有理面によって上述の短波長ITGモードが駆動され、逆に不安定化が促進されることを見出した。この結果は、ジャイロ流体モデルでは再現できない短波長ITGモードが磁気島が大きい領域で支配的になることを意味しており、ジャイロ運動論モデルを用いることの重要性を示唆している。

さらに、この系を単純化した不安定なITGモードと安定なITGモード、および、磁気島が駆動する渦流の3モード結合系のジャイロ運動論モデルに基づく固有値解析を行い、渦流を通じた不安定モードに対する安定モードのエネルギー散逸効果について詳細に解析している。その結果、無衝突(あるいは $\beta < \beta_c$ の弱衝突)状態においても渦流を介した不安定モードの安定化効果があること、この安定化効果は、臨界衝突周波数( $\beta_c$ )に依存することなく広い衝突周波数領域で正しく作用することを明らかにしている。この結果は、これまでのジャイロ運動論シミュレーションにおいて、無衝突状態でも安定/減衰モードによるエネルギー散逸効果が正しく記述されていることを意味している。

第7章では、スケールの異なった磁気島とITGモード間の相互作用とその過程における減衰モードの役割について解析した主な成果を要約するとともに、核融合プラズマの高性能化の観点から今後の乱流輸送研究の課題について述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合プラズマの閉じ込め性能を支配する乱流輸送のエネルギー散逸過程に重要な影響を及ぼす安定/減衰モードの役割と特性を明らかにすることを目的に、複数の時空間スケールを持つ揺らぎが共存する多階層プラズマのジャイロ運動論モデルに基づくブラソフ方程式の数値シミュレーションおよび固有値解析を行った研究成果をまとめたものであり、以下に示す重要な結論を得た。

1) 多階層プラズマを高精度で再現する位相空間まで含めた多次元領域分割の5次元ジャイロ運動論コードを開発した。これによるイオン温度勾配(ITG)モードの数値シミュレーションを行い、Landau理論では減衰が予測される安定なITGモードのダイナミックスの詳細を調べた。その結果、無衝突極限ではモードの減衰が有限時間で打ち切られる再帰現象の出現によりLandau減衰過程が長時間に渡って正しく再現されないこと、しかし、一定の衝突効果を導入することによりLandau減衰過程が丸め誤差の範囲内で正しく再現されることを明らかにした。

2) 上記1)の結果を理解するため、速度空間を離散化した系に対する固有値解析を行い、無衝突極限ではCase-van-Kampen(CvK)モードと呼ばれる安定な連続スペクトルが出現し、これらの位相混合によってシミュレーションと同様の再帰現象が再現されること、衝突効果の導入とともにCvKモードは急速に減衰し、その減衰率がLandau理論のそれを上回ると連続スペクトルから点スペクトルが出現し、それがLandau理論で予測される固有状態に対応することを明らかにした。この固有状態が出現する衝突周波数( $\beta$ )を臨界衝突周波数( $\beta_c$ )として定義し、 $\beta_c$ を上回る衝突効果を導入することにより( $\beta > \beta_c$ )、シミュレーションで現出する再帰現象を回避できることを示した。

3) 上記1)2)の観点から、近年重要性が指摘されている大域的な電磁流体力学(MHD)モードによって形成されるマクロな磁気島が存在する場合のマイクロなITG乱流輸送のジャイロ流体シミュレーション研究の妥当性を明らかにするため、この系を単純化した不安定なITGモードと安定なITGモード、および、磁気島形成に関連したMHD的な渦流の3モード結合系のジャイロ運動論モデルに基づく固有値解析を行い、渦流を通じた不安定モードに対する安定モードのエネルギー散逸効果の有無を調べた。その結果、位相混合に伴う再帰現象のためモードの減衰が見かけ上正しく再現できない無衝突(あるいは $\beta < \beta_c$ の弱衝突)状態においても渦流を介した不安定モードの安定化効果があること、この安定化効果は臨界衝突周波数( $\beta_c$ )に依存することなく、広い衝突周波数領域で正しく作用することを明らかにした。この結果は、これまでのジャイロ運動論シミュレーションにおいて、無衝突極限でも安定/減衰モードによるエネルギー散逸効果が正しく記述されていることを示すものである。

以上の研究は、様々な時空間スケールの揺らぎが混在する核融合プラズマにおけるジャイロ運動論シミュレーションの妥当性を証明するものであり、乱流輸送研究の進展に貢献するものである。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認められる。また、平成25年8月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認められた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降