

Chiral-Transport-Induced Collective Modes in Strong Magnetic Fields and Their Implications for Neutron Star Phenomenology

February 2026

Sota Hanai

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	花井 奏太
主 論 文 題 名： Chiral-Transport-Induced Collective Modes in Strong Magnetic Fields and Their Implications for Neutron Star Phenomenology (強磁場中のカイラル輸送に誘起された集団モードと中性子星現象論への示唆)				
(内容の要旨) 中性子星は高密度な環境と強磁場を併せ持つコンパクト天体であり、その内部構造を解明することは、素粒子物理、原子核物理、宇宙物理にまたがる重要な問題である。近年、中性子星連星合体からの重力波が検出されたことを契機に、中性子星内部を探る手段として星震学が注目されている。星震学では、星震や重力波は、その物理的な起源に応じていくつかの振動モードに分類される。一方、素粒子・原子核物理の文脈では、相対論的なフェルミオンのカイラリティに由来するカイラル輸送現象が生じることが知られている。その代表例が、磁場方向に電流が誘起されるカイラル磁気効果である。これはさらに、カイラル磁気波と呼ばれる磁場方向の密度波を引き起こす。 本博士論文では、まず強磁場の存在する中性子星内部のクォーク物質、および回転する超新星コアのニュートリノ物質が相対論的なフェルミオン多体系であることに着目し、カイラル輸送を星震学に初めて導入した解析を行った。これにより、それぞれの場合において新たな振動モードの星震および重力波が生じることを理論的に予言した。特に、クォーク物質から放出される重力波の振動数には中性子星内部の磁場の情報が反映されるため、これまで観測的な情報が乏しい内部磁場を探る重要なプローブとなり得ることを示した。また、クォークは有限の質量を持つため、カイラル輸送を抑制するカイラリティフリッピングが生じる。そこで、運動論を用いてカイラリティフリッピングによる星震の減衰率を求め、観測可能な振動数の範囲を評価した。 次に、磁場中の相対論的無衝突プラズマにおいて、動的な電磁場による応答を調べた。カイラルアノマリーの効果を適切に取り入れるため、弱磁場極限ではカイラル運動論を、強磁場極限においては最低 Landau 準位近似を用いて、集団モードの分散関係を導出した。その結果、従来の Landau 減衰とは異なる量子論的な動的遮蔽が生じることを明らかにした。さらに、緩和時間のパラメータ依存性が磁場強度によって異なること、および動的な磁場が部分的に遮蔽されることを示した。前者に伴い、粘性係数の温度や磁場の依存性も変化する。そして中間磁場領域では、中性子星の星震が重力波放出で不安定化する r モード不安定性がより生じやすくなる可能性を提示した。				

Thesis Abstract

No. _____			
Registration Number	☒ “KOU” ☐ “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	Sota Hanai
Thesis Title Chiral-Transport-Induced Collective Modes in Strong Magnetic Fields and Their Implications for Neutron Star Phenomenology			
Thesis Summary Neutron stars are compact objects with both a high-density environment and strong magnetic fields, and elucidating their internal structure remains an important problem spanning particle physics, nuclear physics, and astrophysics. In recent years, motivated by detections of gravitational waves from binary neutron star mergers, asteroseismology has attracted attention as a probe of neutron star interiors. In asteroseismology, seismic oscillations and gravitational waves are classified according to their physical origins. Meanwhile, in the context of particle and nuclear physics, it is known that the chirality of relativistic fermions leads to chiral transport phenomena. One of the prototypical examples is the chiral magnetic effect, in which electric currents are generated along a magnetic field. This further induces a density wave propagating along the field called the chiral magnetic wave. In this Ph.D. thesis, noting that quark matter inside strongly magnetized neutron stars and neutrino matter inside rotating supernova cores are many-body systems of relativistic fermions, we introduce chiral transport into asteroseismology for the first time and analyze its implications. From this, we theoretically predict the emergence of new types of seismic oscillations and gravitational waves in each system. In particular, the frequency of the gravitational wave from quark matter reflects the information on internal magnetic fields of neutron stars, providing an important probe of the poorly constrained internal field. Also, finite quark masses cause the chirality flipping, which suppresses the chiral transport. Using kinetic theory, we derive the damping rate of the seismic oscillations and evaluate the observationally possible range of the frequency. Second, we study the response of a magnetized relativistic collisionless plasma to dynamical electromagnetic fields. To properly incorporate the chiral anomaly, we derive the dispersion relation of the collective mode using the chiral kinetic theory in the weak magnetic field limit and employing the lowest Landau level approximation in the strong magnetic field limit. As a result, we find that a dynamical screening distinct from the conventional Landau damping appears. Furthermore, we show that the relaxation time parametrically varies with the magnetic field strength and that dynamical magnetic fields are partially screened. The former modifies the temperature and magnetic field dependence of the shear viscosity. We then suggest that in the intermediate magnetic field region, the r-mode instability driven by gravitational wave emission from neutron star seismic oscillations may be more likely to occur.			