

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03868

研究課題名(和文)カイラル結晶状態の粘弾性と連星中性子星合体の物理

研究課題名(英文)Viscoelasticity of chiral crystals and neutron star phenomenology

研究代表者

阿武木 啓朗 (Abuki, Hiroaki)

愛知教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：70378933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高密度QCDにおいて実現が予想されているカイラル結晶状態の物性を明らかにするとともに、その中性子星の物理への帰結を探ることである。特にカイラル結晶の粘弾性体としての性質を明らかにすることと、特異な輸送性質を明らかにすることが目標である。いくつかの技術的困難があり、当初予定していた粘弾性についての解明には至らなかった。一方で、カイラル結晶状態の輸送問題については一定の成果を得ることができた。双対カイラル密度波(DCDW)と呼ばれる特殊なカイラル結晶が示すホール伝導についてその数理的構造を解明するとともに、中性子星の熱的進化への影響について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

100億-1000億テスラもの非常に強い磁場をもつマグネターと呼ばれる中性子星の種族が見つかっている。(市販のネオジム磁石の磁場は0.2テスラほどである。)マグネターは標準的な中性子星の冷却曲線から外れた領域に分布しており、特異な熱的進化が示唆されるが、磁場の起源も含め、包括的理解に至っていない。表面の磁気活動によるヒーティング効果のほか、中性子星を形成する物質相における電気伝導、熱伝導など輸送性質についての知見が必要である。本研究で取り組んだカイラル結晶状態が示す特異な輸送性質の解明は、強い磁場をもつ中性子星の熱的進化の理解に向けた第一歩になる。

研究成果の概要(英文)：The main aim of the research project is to clarify the viscoelastic/transport property of the chiral crystal phases and explore its implication to neutron star phenomenology. The chiral crystal is a class of phases of highly dense matter, which is theoretically predicted in QCD. Such phases may be realized in the deep core of compact stellar objects, such as neutron stars/magnetars. Due to unexpected difficulties, we could not achieve significant results for viscoelasticity. On the other hand, we investigated anomalous transport properties in the dual chiral density wave (DCDW), being expected to be the most favorable crystal pattern in the strongly magnetized dense quark matter. The phase exhibits the Hall effect which enables the electric current to flow in the direction perpendicular to an electric field. We analyzed the theoretical structure of the Hall effect in DCDW, and discussed possible implications to thermal evolution of neutron stars.

研究分野：ハドロン物理・高密度QCD

キーワード：クォーク物質 カイラル対称性 中性子星

## 1. 研究開始当初の背景

2017年8月17日に検出された中性子星の合体による重力波イベント GW170817 は、重力波のみならず全ての波長域での電磁波観測を伴い、宇宙論のみならず、重元素合成、高密度天体である中性子星内部の物質構造についても数々の新しい示唆をもたらした。マルチメッセンジャー天文学の幕開けであり、宇宙・天体・原子核物理の業界は興奮のなかであった。例えば、重力波のチャープ信号からは、2つの中間質量レンジにある中性子星は潮汐変形する間もなく合体に至ったことが分かり、中性子星の半径について上限が与えられた。これにより、中性子星は予想以上にコンパクトであり、大きな半径を与えるような硬い核物質の状態方程式は棄却された。また、重元素合成の証拠とされているキロノバの紫外～近赤外で輝度が予想外に大きかったことから、合体によって生じた熱い大質量中性子星は即座にブラックホールに重力崩壊したのではなく、一定の時間持ちこたえるだけの熱的圧力を維持した可能性が指摘された。一方、高密度天体の内部の物質構造については、基礎理論である量子色力学及びその対称性を反映した有効モデルにより、様々なエキゾチック状態をとる可能性が理論的に指摘されていた。例えば、クォークの質量を生成するカイラル凝縮体が空間的に特徴的パターンをもって整列するカイラル結晶状態はその一つである。カイラル結晶状態は時空の対称性とカイラル対称性の実現様式の観点から分類され、実カイラルソリトン結晶、複素カイラルスパイラル、双対カイラル密度波 (Dual Chiral Density Wave = DCDW) など様々な状態が理論的に提唱されており、観測からの知見とそれによるモデルの淘汰・精錬化が望まれる状況にあった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、カイラル結晶状態の弾性体としての静的・動的性質、強磁場下での電磁・熱応答を解明することである。中性子星のなかにはマグネターと呼ばれる  $10^{15}$  G というとても強い強磁場をもつ種族が見つかっている。強い磁場の生成機構や、その表面温度についてはまだ完全にはわかっていないが、通常の中性子星よりも高い表面温度をもち、標準的な冷却曲線から外れた領域に分布していることが分かっている。これは、強い磁場が中性子星の熱的進化になにかしらの影響を与えていることを示唆しており、強磁場下でのクォーク物質の熱伝導・熱輸送問題はこの点からも興味深い。もし中性子星の内部にカイラル結晶が存在するとすれば、強磁場下でそれが示す特異な輸送性質は、中性子星の熱的進化にユニークなフットプリントを提供する可能性があるからだ。また、弾性体としての性質は、中性子星の合体イベントの重力波信号に特徴的なシグナルを提供する可能性がある。これらを探ることで、理論的に様々な可能性が検討されている高密度クォーク物質の結晶状態について、観測面から制限を与えることを目指す。

## 3. 研究の方法

まず、QCD 臨界点近傍をモデルによらず普遍的にアプローチすることができる Ginzburg-Landau 作用の勾配展開法により、実現するカイラル結晶のタイプ、実現する物理的機構を抑える。磁場がある場合の勾配展開法を用いた解析によると、相図の広範な領域において時間反転対称性が破れた DCDW 相が実現することが予想される [1]。次に、NJL 模型、クォーク・メソン模型を用いて、よりカイラル結晶構造についての詳細な解析を行う。結晶構造と熱力学的なバルク性質を明らかにした後、引っ張りやずれに対する応力応答を調べ、弾性係数を引き出す。これは、中性子星の構造や、中性子星合体の物理に重要な示唆を与える可能性がある。さらに DCDW 相の熱・電磁応答を調べる。これは、マグネターなど強い磁場をもつ中性子星の熱的進化の解明に必要である。DCDW では時間反転対称性が破れているが、並進対称性はカイラル対称性と混合し、修正された形で残る。運動量空間におけるトポロジカルな構造は Weyl 半金属と類似しており、これが異常ホール伝導を生むことが分かっている。ホール効果とは電位差に対して垂直な方向に電流が流れる現象である。DCDW ではクォークの運動量空間での分散に一对の Weyl 点が現れるが、Berry 接続にはこれらを線状につなぐストリングが現れ、異常ホール効果を発現させる。一般に温度勾配が電流を駆動するゼーベック効果、電位差が熱流を駆動するペルチェ効果など、クロス応答があり、オンサーガーの相反定理により結びついているため、電気伝導とホール効果の理解は熱伝導の包括的理解にも欠かせない。マグネターなどの中性子星では、強磁場が外場として存在するため、通常ホール効果も存在する。すなわち、異常ホール効果と通常ホール効果の相関も重要になる。Kubo 公式に立脚した Streda の枠組みを用いることにより、定量的評価が可能である。

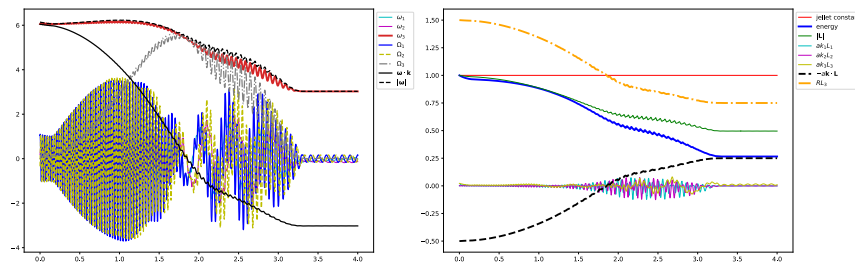
## 4. 研究成果

カイラル結晶の弾性係数の計算において予想しなかった技術的困難があり、これについては大きな成果が出せなかった。しかし、現在この困難を回避する方法をいくつか試している段階にある。

り、良い感触を得ている。一方、カイラル結晶の電磁応答については Středa の枠組みによりホール伝導度の計算を行なった[2, 3]。この枠組みは久保公式に立脚しており、ホール伝導度は古典的寄与 ( $\sigma_{xy}^I$ ) と量子的寄与 ( $\sigma_{xy}^{II}$ ) に分解される。ホール伝導度への古典的寄与 ( $\sigma_{xy}^I$ ) はクリーンな強磁場中の 2D 量子ホール系やトポロジカル絶縁体のように化学ポテンシャルがエネルギーギャップの中にある場合には消失するが、フェルミレベルでの状態密度が消えない場合には有限の寄与として残る。この寄与は対角伝導度に比例しており、古典的 Drude-Zener 関係を満たす。物理的には準粒子励起の散逸に起因する。一方、量子的寄与 ( $\sigma_{xy}^{II}$ ) は散逸がなくとも残る。この項は真空による寄与 ( $\sigma_{xy}^{II,Dirac}$ ) と、物質による寄与 ( $\sigma_{xy}^{II,Fermi}$ ) に分解できる。これらの評価には、クォークのスペクトル密度が重要になる。DCDW 相の状態密度  $N(E)$  を、真空中で残る異常項  $N_{ano}$  と物質による通常項  $N_{norm}(E)$  に分解したときに、異常項  $N_{ano}$  が異常ホール効果をもたらす。この異常項はクォークスペクトルの非対称性の指標である Atiyah-Potodi-Singer の  $\eta$  不変量と関係づいている。また、カイラル結晶背景場は量子軸性異常を通してクォークの密度演算子が磁場に結合する項を誘起し、これがまさに上記の異常項をもたらす。

物質による寄与  $\sigma_{xy}^{II,Fermi}$  については、外磁場が強い場合と弱い場合に分けて半解析的評価を行った。強磁場においては最低ランダウ準位のみ寄与し、フレーバーごとに  $e_f n_f / B$  の寄与を与える。すなわち、ホール伝導度の  $1/B$  スケーリングは古典的寄与  $\sigma_{xy}^{I,Fermi}$  ではなく量子的寄与  $\sigma_{xy}^{II,Fermi}$  から現れる。それにも関わらず、中性子星の熱的進化についての多くの文献では、古典的 Drude-Zener 関係に基づく議論がされている。量子的寄与を取り入れた熱的進化の解析が必要である。一方、弱磁場領域では、 $\sigma_{xy}^{II,Fermi} = a_{-1}/B + a_0 + a_1 B + \dots$  と展開し、展開係数  $a_{-1}$ ,  $a_0$ ,  $a_1$  について評価した。 $a_{-1}$  は恒等的にゼロとなることが言える。従って弱磁場の極限では、ホール伝導度の  $1/B$  スケーリングは量子的寄与の中にはない。しかし、伝導キャリアが存在する物質の熱的平衡・定常状態ではキャリア加速がないという条件により、ホール伝導度が  $1/B$  スケーリングを示すこと自体は自然な要請である。従って、弱磁場極限では  $1/B$  スケーリング古典的寄与  $\sigma_{xy}^{I,Fermi}$  から生じることが推測される。 $a_0$  は物質からの異常ホール効果への寄与である。数値的な評価により、クォーク密度に対して非単調な依存性を示し、密度が大きくなると、真空からの異常ホール効果と逆符号の寄与を与え、真空からの寄与をキャンセルする傾向があることが分かった。ホール伝導度の量子的寄与を正しく取り入れた星の熱的進化モデルの構築は今後の課題である。

また、当初の研究計画に加え、散逸のある回転系での保存量とそれが果たす役割についての考察を行った。重要な身近な例として逆立ちコマがある。重心が幾何学的中心からずれた球体の一点に摩擦力が加わると重心が重力に抗して上昇するが、この現象には Jellett の力学量 (角運動量と重心・接点の情報をもつ) という保存量が重要な役割を果たす。このようにミクロな局所的熱的散逸がマクロな系の運動の不安定性を引き起こすことがある。簡単なシミュレーションにより、力学的不安定性を経由して倒立状態に至る過渡状態の力学系構造を探るとともに、中性子星の回転状態の時間変化の解明、天体物理への応用可能性の検討に着手した。身近な物理の天体現象への応用という新しい研究の芽を見出すことができた。



**Figure 1:** 滑り摩擦を受ける逆立ちコマのモデルシミュレーション。(左) 種々の力学量の時間変化。  $\omega \cdot k$  は軸方向の固有スピン、  $\Omega$  は軸の歳差運動スピン。(右) エネルギー、Jellett の力学量、角運動量の時間変化。摩擦により回転に不安定性が生じる。力学的エネルギーは摩擦により熱として失われるが、Jellett の力学量は厳密に保存する。

<引用文献>

[1] “Chiral Crystallization in an external magnetic background”, H. Abuki, Phys. Rev. D 98 (2018) 5, 054006  
 [2] “Transport properties in magnetized compact stars”, T. Tatsumi, H. Abuki, Particle 4 (2021) 1, 63-64  
 [3] “Transport Properties in Dense QCD Matter”, T. Tatsumi, H. Abuki, Symmetry 12 (2020) 3, 366

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Tatsumi Toshitaka, Abuki Hiroaki                  | 4. 巻<br>4             |
| 2. 論文標題<br>Transport Properties in Magnetized Compact Stars | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Particles   | 6. 最初と最後の頁<br>63 ~ 74 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/particles4010009        | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                      | 国際共著<br>-             |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Tatsumi Toshitaka, Abuki Hiroaki          | 4. 巻<br>12              |
| 2. 論文標題<br>Transport Properties in Dense QCD Matter | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Symmetry                                  | 6. 最初と最後の頁<br>366 ~ 366 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/sym12030366     | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)              | 国際共著<br>-               |

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Abuki Hiroaki                                    |
| 2. 発表標題<br>Inhomogeneous chiral condensates in quark matter |
| 3. 学会等名<br>Quarks and Compact Stars 2019 (国際学会)             |
| 4. 発表年<br>2019年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|