

令和元年6月9日現在

機関番号：13902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05346

研究課題名(和文) 強磁場によるカイラル時空結晶生成とその動的性質の解明

研究課題名(英文) Chiral density waves driven by strong magnetic field and their dynamic properties

研究代表者

阿武木 啓朗 (Abuki, Hiroaki)

愛知教育大学・教育学部・講師

研究者番号：70378933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：中性子星のコアは極高圧の状況下で、極めて高密度の物質が存在する。そこでは、中間子凝縮相、カラー超伝導など、多種の物質相が提案されている。本研究では、その可能性の1つであるカイラル結晶相に着目し、中性子星に存在する磁場など環境変数を含め、その発現条件について検討を行なった。具体的に実施したのは次の2つである。

- 1) 飽和核物質を再現するパリティ二重項核子モデルを採用し、低密度側からカイラル結晶相にアプローチし、標準核密度の5倍程度で結晶相への転移が起こることを示した。
- 2) QCDの三重臨界点からカイラル結晶相にアプローチし、任意強度の磁場によって双対カイラル密度波が安定化されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子星の内部で実現すると考えられている密度領域において、双対カイラル密度波がたしかに実現しうることを示したことで、この新奇な相の天文学的帰結を探索する動機を提供したという点で、学術的意義は大きい。また、クォークの質量がゼロという極限の仮想的状況においてQCD相図上に存在することが強く示唆されている三重臨界点の近傍に、磁場という触媒によって磁場誘起型双対カイラル密度波が安定化する領域が広がることが示されたことで、研究は原始中性子星や連星中性子星合体等の物理を探索する段階に入ったと言える。はっきりとした今後の研究の方向性を与えたという意味で学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Many exotic phases, including color superconductivity, condensations of mesons, and quarkyonic phases, have been proposed for the ground state of super dense matter such as realized in the core of neutron stars. In this study, we focus on one of them, namely the inhomogeneous chiral condensate. In particular, we include the effect of magnetic fields, and examine the possibility of several types of inhomogeneous chiral condensates and the conditions for their realizations. The main findings are the following.

- 1) Using a parity doublet model known to reproduce saturation properties of nuclear matter, we have shown that the onset of inhomogeneous chiral condensate is about five times the saturation density.
- 2) Adopting the Ginzburg-Landau action which should be valid in the vicinity of tricritical point of QCD in the chiral limit, we have shown that the dual chiral density wave should be stabilized in the presence of magnetic field at an arbitrary strength.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：QCD物性 カイラル結晶

## 1. 研究開始当初の背景

中性子星の内部で実現するような極めて高密度な環境で、カイラル凝縮が空間的な変調パターンをもつ物質相が実現する可能性が指摘されていた。本研究を開始する時点では、1次元実キルク結晶、カイラルスパイラル、歪キルク結晶等、種々の変調パターンが提案されており、様々なモデル計算により、1次元実キルク結晶が特に安定に存在し得ることが示唆されていた。しかし、磁場に対する応答や動的性質についてはほとんど解明されていなかった。また、クォークを基本自由度とするカイラル有効モデルによる解析が多く、これらの結晶状態および相転移が核子とメソンの多体系としてどのように実現し得るのか、また地上での原子核をどの程度圧縮することで相転移が起こりうるのかについては十分な解析が行われておらず、これらを明らかにすることが喫緊の課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究では次の2つを目的とする。

- (1) 磁場とカイラル結晶: 強い磁場を持つ中性子星(マグネター)の内部を念頭に、磁場がカイラル結晶に及ぼす影響を解明する。特に、カイラルスパイラルや歪キルク結晶といった新奇なカイラル秩序が磁場によって安定化する可能性を追求する。また、有限温度・密度の環境下でのカイラル秩序と磁場との相関に着目し、種々のカイラル結晶が実現する物理的機構を明らかにする。さらに、動的性質の解明に取り組み、中性子星の現象論への示唆を探る。
- (2) 核物質によるカイラル結晶の自発的生成: 真空に次ぐ最低密度状態である原子核内で実現している飽和核物質を、外圧(物理的には重力による圧力)によって圧縮していくときに、カイラル結晶状態が核子多体系としてどのように実現するか、またどの程度の密度で実現するかについて検証を行う。

## 3. 研究の方法

- (1) 様々な解析によりカイラル極限の量子色力学の相図に存在することが示唆されている三重臨界点の近傍に焦点を当て、対称性に根ざした有効な手法であると同時に物理的機構が見やすいギンズブルグ・ランダウ作用を用いる。この枠組みでは、クォークの質量や磁場の効果を、次数ごとに系統的に取り込むことができるという利点がある。これを実行するにあたっては、臨界点のスケールよりも磁場の方が格段に小さいことから、磁場については最低次のみを考慮する。技術的には、クォークの伝搬関数を磁場について展開することで、ギンズブルグ・ランダウ結合係数において、全てのランダウレベルについて足しあげることが可能となる。最後に平均場近似により相図を決定する。
- (2) 核子・メソンなどのハドロンを自由度としてもち、原子核内での核物質の飽和性を再現し、有限核における巨大共鳴の実験等により課されている比圧縮率についての制限をクリアするパリティ二重項モデルを用いる。核子多体系においてメソン場の真空期待値がカイラルスパイラル型の空間変調パターンをもち結晶化することで、カイラル結晶状態が実現すると仮定する。メソン場が結晶化すると、メソン場を周期的ポテンシャルとして感じる核子の1粒子状態は、ブロッホの定理からバンド構造をもつことになる。ポゴリューボフ・ドジャンハミルトニアンを数値的に対角化することで核子のエネルギーバンド構造を解き、平均場近似により相図と状態方程式を決定する。

## 4. 研究成果

- (1) カイラル極限のQCD相図に存在することが期待されている三重臨界点からカイラル結晶にせまるアプローチとして、ギンズブルグ・ランダウ作用による解析を行なった。その結果、磁場がない場合には、実カイラルキルク結晶と呼ばれる状態がカイラル対称性の破れた相と回復相の間に出現すること、また、これが磁場の効果によって双対カイラル密度波(Dual Chiral Density Wave; DCDW)に取って代わられるということが明らかになった。DCDW型の凝縮は特定の方向の運動量を持ち、回転対称性という観点からはエネルギー的に不利であるが、磁場がある状況では磁場の方向と運動量とロックする項が、回転対称性に抵触しないことから自然に誘起され、この項によりDCDWの方がエネルギー的に有利になるということを突き止めた。ここで見られた、磁場により誘起されたDCDWをmDCDW(magnetically induced DCDW)と名付けた。図1に、磁場の強さとクォークの質量の比を変えながらシミュレーションにより得られた相図を示している。カイラル極限においては、mDCDWは特に安定化の傾向を示し、相図のトポロジーをも変えてしまう。この極限ではカイラル臨界点は相図から消え、mDCDWと対称性の回復した相を隔てるただ1つの2次相転移線しか存在しない。クォークの質量は、カイラル臨界点をmDCDWの浸食から保護する役割を果たし、実キルク結晶を安定化する。現実には、磁場とクォークの質量の競合により複雑な相図が実現すると考えられる。当初予定していたカイラル結晶の動的性質の解明の一部とその天文学的帰結については、現在研究を継続している段階にある。

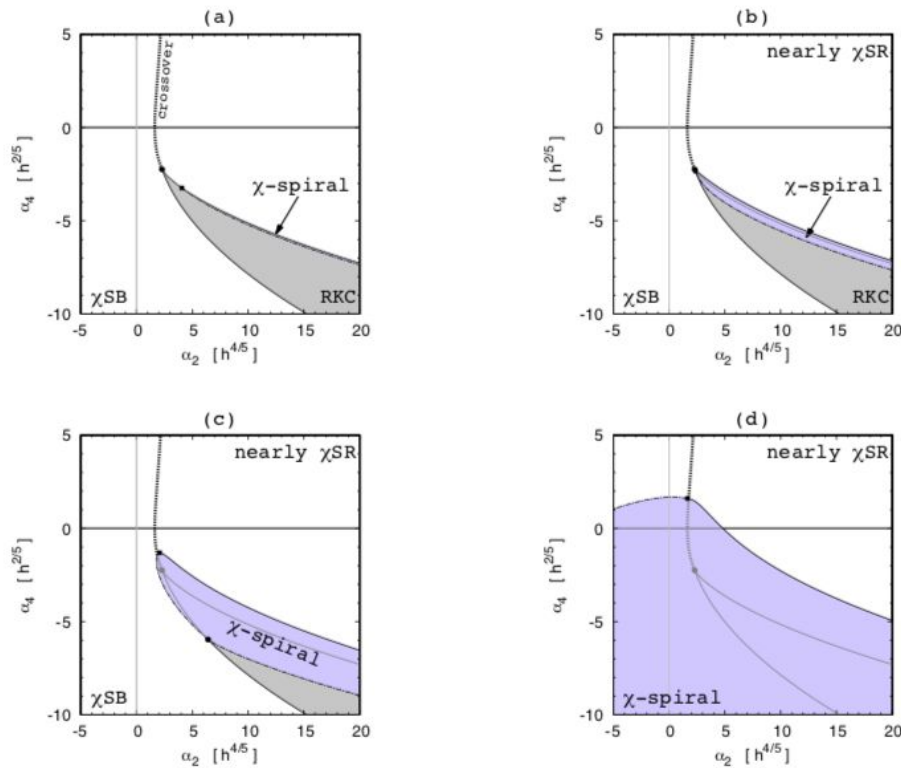


図 1 磁場の強さに応じたギンズブルグ-ランダウパラメータ空間での相図。

(a), (b), (c), (d)の順に磁場は強くなる。

(2) カイラル結晶に低密度側からせまるアプローチとして、原子核の飽和性を再現するパリティ二重項モデルを採用し解析を行なった。まず、DCDW をメソン場の平均場として記述し、ボゴリューボフ・ドジャンハミルトニアンを対角化することで核子のバンドエネルギーを得た。これらのタワーにより有効ポテンシャルを構築し、乱雑位相近似により実現する状態を決定した。その結果、標準核密度の約 5 倍程度という比較的低密度領域において、カイラル結晶への一次相転移が起こることが分かった。また、飽和核物質のバルクな性質だけでは決定されず、ただ 1 つフリーパラメータとして残る「カイラル不変質量」を変えながらシミュレーションを行うと、ある臨界点を下回ると低密度側に第 2 の DCDW が出現することがわかった。この第 2 の DCDW 状態をカイラル平面での軌跡として表現すると、振幅よりもスカラー密度方向へのずれが大きいという点で通常の DCDW とは異なる。我々は、この新奇な DCDW を sDCDW (shifted DCDW) と名付けた。

残念ながら、この sDCDW は飽和核物質よりも安定化し、現実世界との整合性がとれないことから、この単純化されたモデルの範囲では人工物と言わざるを得ない。すなわち、このモデルの範囲では、sDCDW が出現する臨界点がカイラル不変質量の下限値を与えることになる。しかし、カイラル不変質量については、カイラル極限における QCD のスケール不変性の破れに伴う南部・ゴールドストーンボゾンであるディラトン場とその起源を求める立場もあり、そのような立場をとった場合にはカイラル不変質量の大きさが密度に依存するため、sDCDW が飽和核物質を浸食せず、中間密度領域にのみ出現する可能性もあり、今後のさらなる研究が必要である。また、中性子星内部に存在する磁場により、臨界密度がどの程度下がるのかについて明らかにすることも課題である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

【査読有り】H. Abuki, “Chiral Crystallization in an external magnetic background”, Phys. Rev. D98, (2018)054006

【査読有り】Y. Takeda, H. Abuki, M. Harada, “Novel dual chiral density Wave in nuclear matter based on a parity doublet structure”, Phys. Rev. D97, (2018) 094032

[学会発表](計 12 件)

H. Abuki, “Chiral density waves in QCD” at High-Density Meeting (NAOJ), 2018

【招待セミナー】 H. Abuki, “ Inhomogeneous phases in QCD ” (Lanzhou Univ.), 2018  
【招待セミナー】 H. Abuki, “ Inhomogeneous phases in QCD ” (IMP Lanzhou), 2018  
【招待レクチャー】 H. Abuki, “ Introduction to Neutron Star Physics ” (Lanzhou Univ), 2018  
【招待講演】 H. Abuki, Chiral Inhomogeneous phases in dense quark and hadronic matter ” at Dense Matter from Chiral Effective Theories 2018, 2018  
【招待レクチャー】 H. Abuki, “ Introduction to Neutron Star Physics ” (IHEP Beijing), 2018  
【招待セミナー】 H. Abuki, “ Inhomogeneous phases in QCD ” (IHEP Beijing), 2018  
H. Abuki, “ Chiral inhomogeneous phases in dense matter ” at QCD@work 2018, 2018  
阿武木啓朗 「磁場中での非一様カイラル凝縮」日本物理学会 2017年9月13日  
阿武木啓朗 “ inhomogeneous chiral phases in a strong magnetic field ”, 名古屋大学 H 研夏の学校, 2017  
H. Abuki, “ Ginzburg-Landau Phase diagram under magnetic field ” at Quarks and Compact Stars 2017  
H. Abuki, “ Chiral spiral induced by a strong magnetic field ” at QCD@work 2016, 2016

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：仲野 英司

ローマ字氏名：Nakano, Eiji

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。