

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月10日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05357

研究課題名(和文) 中性子星から探る暗黒物質の物理

研究課題名(英文) Physics of dark matter in light of neutron star phenomena

研究代表者

橘基 (TACHIBANA, MOTOI)

佐賀大学・理工学部・准教授

研究者番号：30404122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：暗黒物質の正体とその性質の探求は、素粒子論から宇宙物理学にまでまたがる一大テーマであり、これまで様々な研究が行われてきているが未知の事柄が多いのが現状である。今回申請者は、自身が長年研究対象としてきた『中性子星』という切り口から暗黒物質の物理を探求することを提案し、中性子星の諸現象と暗黒物質との関係、中性子星内部の物質状態(クォーク超伝導や中性子超流動および渦)、さらには中性子星物質を理論的に解明する際に直面する困難(符号問題)に関わる研究などを行い、それらの成果を国内外の学会、研究会、セミナーや論文雑誌あるいは一般向けの講演の機会に発表をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「私たちの宇宙の構成要素の約95%は通常の原子以外のものでできている。」この驚くべき現代の宇宙観の中核に横たわるのが「暗黒物質(ダークマター)」とよばれる未知の物質である。申請者はこの未解明の物質の探求に迫るべく、新たな観点の提案をおこなった。それが「中性子星から探る暗黒物質の物理」である。中性子星とは宇宙でブラックホールに次いで密度の高い物体であり、その強い重力で物質を引きつける。暗黒物質もその例外ではない。さらに近年、中性子星は重力波天文学や重元素合成の分野にも重要な地位を占める。申請者の研究課題により、未知の物質の探求と未知の現象への理解が進むことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Elucidating properties of dark matter is an important subject, which is ranging from particle physics and cosmology. While there have been a lot of studies on the dark matter, little is known so far. For the purpose of studying the physics of dark matter, I proposed a new perspective from a viewpoint of neutron star (NS) physics, for which I have a long standing experience as a research subject. Concretely, I studied (1) cooling phenomena of NS in light of dark matter thermalization, (2) various possible states of matter inside NS such as neutron superfluidity/superfluid vortex and superconducting quarks and (3) QCD sign problem and its application to similar systems. I reported those research subjects in some conferences, workshops, meetings, seminars and public lectures as well as the science journals.

研究分野：中性子星とクォーク・ハドロン物理学

キーワード：中性子星 クォーク ハドロン 暗黒物質

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質の正体とその性質の探求は、素粒子論から宇宙物理学にまでまたがる一テーマである。これについてこれまで様々な研究が行われてきているが、未知の事柄が多いのが現状である。

そこで本研究課題では、申請者が長年研究対象としてきた『中性子星』という切り口から、暗黒物質の物理を探求することを提案する。以下に詳述するように、「宇宙における最も極限的な環境」である中性子星は、暗黒物質にとって、地上では実現不可能な格好の実験場を提供する。またここで得られる成果は、中性子星自身の物理量（質量や半径）や諸現象（冷却機構、高速回転機構など）の理解へと、フィードバックをはかることが期待される。

2. 研究の目的

今から約 80 年前、Zwicky によって予言された暗黒物質は、銀河の回転曲線や重力レンズ効果、宇宙背景放射(CMB)などの観測により、その存在は疑いようがないものとなっている。しかしその正体は未だに謎であり、国内外の多くの研究者により様々な角度から研究が行われている。一方、同じく約 80 年前に Baade と Zwicky により予言された中性子星は、その後 Bell と Hewish によってパルサーとして観測され、以来その諸性質の研究が行われている。中性子星の典型的な半径は 10km、質量は太陽質量の 1.4 倍程度であることから、この天体の内部は原子核の標準密度の数倍以上の超高密度で、そこでは中性子をはじめとするハドロンや、さらにはクォークが、多様な物性を形作っていると考えられている。地上の実験でこの密度領域に到達するのは極めて困難であり、その意味で中性子星は高密度物質研究の格好の実験場を提供している。

申請者はこれまで高密度クォーク・ハドロン物質の解明、特に QCD 相図とよばれる相構造の研究と、それを中性子星の物理に応用することを中心に行ってきた。そして今回の申請課題では、その知見を暗黒物質の性質の探求につなげようというものである。これはひとえに暗黒物質の特異な性質、つまり重力相互作用以外での反応が非常に弱いという特徴と、中性子星が強い重力場を有する天体であるという点に起因している。具体的に挙げる課題は以下の通りである。

- 中性子星の冷却現象における暗黒物質の影響の考察
- 中性子星の暗黒物質捕獲におけるエキゾチックな相の効果の解析
- 中性子星の状態方程式に対する暗黒物質の影響の研究

3. 研究の方法

上記で述べた研究目的の内容ごとに方法を記していく。研究内容 については、標準的な中性子星の冷却方程式(cooling equation)に、暗黒物質捕獲による発熱(dark matter heating)の効果がどのような影響を及ぼすかを調べる。これは素粒子の模型に依存しない一般的な解析と、模型を定めた解析とがあるが両方について考察する。研究内容 については、これまでの標準的な中性子星内部の核物質(nuclear matter)以外のエキゾチックな物質状態、例えば中性子の超流動(neutron superfluidity)やクォークの超伝導(superconducting quarks)、あるいは中間子凝縮(meson condensation)といった場合における暗黒物質捕獲への影響を考察していく。最後に研究内容 については、中性子星の質量-半径関係や中性子星連星合体により放出される重力波などにおいて重要な役割を果たす中性子星物質の状態方程式に、暗黒物質の効果がどのような影響を及ぼすかについて考察する。

4. 研究成果

(1) 中性子星の暗黒物質による熱化
中性子星は超新星爆発からの誕生直後は数十 MeV (数百億ケルビン)と高温の状態で、その後初期の百万年は主としてニュートリノを放出することで冷却され、その後は星表面からの黒体放射によって冷えていくと考えられている。これは標準的冷却シナリオとよばれるものであり、観測された中性子星の多くはこの標準シナリオで説明されると考えられる。しかし中にはそれでは説明が困難な場合もあり、非標準的冷却の可能性も提案されている。暗黒物質が中性子星に捕獲されると、暗黒物質の模型によっては中性子星内部で対消滅(pair annihilation)を起こして中性子星を温める場合がある(dark matter heating)。これは新たな効果を与え、標準的冷却シナリオでは説明が困難な観測データの問題に解答を与えてくれると期待される。そこで申請者はこの問題を模型に依らない形で調べた。その結果、一般化された暗黒物質の熱化に対する制限を与えることに成功した。ここでの成果はアーカイブ(hep-ph)および日本物理学会九州

支部会(福岡大学, 2016年)において発表された(発表論文 および学会発表 および)

(2) QCDの符号問題

中性子星物質に対する暗黒物質の影響を調べるには、当然ながらもまず中性子星物質自身の性質を高い精度で理解しておく必要がある。中性子星物質の基本構成要素であるクォークを記述する基礎理論は量子色力学(QCD)であるが、これは「符号問題」(sign problem)という困難を持つ。この問題は古くからこの分野の研究者を悩ませてきたが、この数年新たな手法が脚光を浴びている。それが「Lefschetz thimble 法」である。これは元の物理量を複素化し、複素空間上で積分の実効値を求める方法である。先行研究では1次元の量子場の理論(すなわち量子力学系)への適用がなされてきたが、申請者らは2次元の量子場の理論である量子電磁力学(QED₂ 或いはシュウィンガー模型)にこの手法を適用し厳密解を得ることに成功した。これは世界で初めてのことである。この成果は国際雑誌に掲載された(発表論文)。

(3) 中性子星内部の超流動渦

中性子星内部には他で見られないエキゾチックな物質状態が存在していると考えられており、その代表的なものが中性子の超流動やクォークの超伝導または超流動状態である。超流動体を回転させると量子渦が発生することが知られているが、中性子星の中にはパルサーとよばれる高速回転するものがあるので、星内部に渦が発生していると考えるのは自然である。このとき異なる物質状態(相)で生じる渦同士はどのような関係にあるだろうか? 相境界で連続的につながっているだろうか、あるいは不連続であろうか? 申請者らはこの素朴な疑問に対して、Schafer と Wilczek によって提案された「クォーク・ハドロン連続説仮説」を元に考察をした。その結果、各相で生じた渦は一対一対応、つまり連続的につながることを見出した。これは従来の研究結果とは異なり、発表後国内外から大きな反響があった。この成果は国際雑誌に掲載された(発表論文 および学会発表 および)

(4) ホログラフィック原理によるクォーク物質の研究

ホログラフィック原理(AdS/CFT 対応)は、素粒子の運動を記述する場の量子論の強結合領域を、古典的重力場の理論を用いて解析する手段である。この原理が発見されてまもなく、クォークとグルーオンの多体系である量子色力学(QCD)の強結合領域の研究に適用され成功をおさめた。申請者らはこのホログラフィック原理を有限クォーク数密度のQCDに拡張した模型を用いて、高密度でクォークが対を形成して超伝導状態になる「カラー超伝導」を調べた。はじめにクォーク数のゲージ場の反作用(back-reaction)を無視する probe 近似で計算を行い、次に反作用の影響も考慮した。その結果、probe 近似の段階で現れていたカラー超伝導相が消失することが示された。これは先行研究とは異なるものであり興味深い。論文ではさらに時空次元や物質場の質量次元を変えた時の相図についても調べた。この成果は国際雑誌に掲載された(発表論文)

(5) 符号問題の他のシステムへの応用

(2)の課題で用いられた Lefschetz thimble 法は、符号問題を有する系全般に適用可能である。そういった系の代表的なものに、重力理論を量子化して波動関数を求める量子宇宙論(quantum cosmology)がある。申請者らは特に Freedman 宇宙に対応する量子宇宙論を考察し、それに thimble 法を適用して波動関数の計算をおこなった。計算の過程でこれまでとは異なるタイプの thimble 法の取り扱いを見出すことに成功した。この成果は国際雑誌に掲載された(発表論文 および学会発表)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5件)

K. Ghoroku, K. Kashiwa, Y. Nakano, M. Tachibana and F. Toyoda, Color superconductivity in a holographic model, Physical Review, 査読有, D99, Vol.10, 2019, 106011

DOI: 10.1103/PhysRevD.99.106011

M. G. Alford, G. Baym, K. Fukushima, T. Hatsuda and M. Tachibana, Continuity of vortices from the hadronic to the color-flavor-locked phase in dense matter, Physical Review, 査読有, D99, Vol.3, 2019, 036004

DOI: 10.1103/PhysRevD.99.036004

K. Ghoroku, Y. Nakano, M. Tachibana and F. Toyoda, Tunneling in quantum cosmology and holographic SYM theory, Physical Review, 査読有, D97, Vol.10, 2018, 066027

DOI: 10.1103/PhysRevD.97.066027

Y. Tanizaki and M. Tachibana, Multi-flavor massless QED₂ at finite densities via Lefschetz thimbles, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.2, 2017, 081

DOI: 10.1007/JHEP02(2017)081

Y. Sanematsu and M. Tachibana, Generalized thermalization time of dark matter captured by neutron stars, arXiv:1511.00249[hep-ph], 査読無

〔学会発表〕(計 6件)

Motoi Tachibana, Quark-hadron continuity under rotation, Gravity seminar, University of Southampton, UK, Mar. 21, 2019.

Motoi Tachibana, Quark-hadron continuity with vortices, UJ seminar, Jagiellonian University, Poland, Mar. 5, 2019

橋 基, 量子宇宙論におけるトンネリングとホログラフィック超ヤンミルズ理論, 日本物理学科秋季大会, 信州大学, 松本, 9月16日, 2018年

Motoi Tachibana, Capture of dark matter by neutron stars, Hokkaido University seminar, Hokkaido university, Sapporo, June 29, 2018

Motoi Tachibana, Quark-hadron continuity with vortices, Keio University seminar, Keio University, Hiyoshi, June 11, 2018

實松 勇佑, 橋 基, 中性子星による暗黒物質捕獲, 日本物理学会九州支部会, 福岡大学, 12月10日, 2016年

〔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

【アウトリーチ活動情報 計 7件】

橋 基, ホーキング博士の語った宇宙, 佐賀経済同友会セミナー, ホテルニューオータニ, 11月2日, 2018年

橋 基, 佐賀を創る大交流会, 佐賀大学, 10月28日, 2018年

橋 基, ホーキング博士の語った宇宙, サイエンスカフェ in SAGA, 佐賀市立図書館, 6月17日, 2018年

橋 基, マルチメッセンジャー天文学の幕開け, 佐賀大学市民講演会「重力波とその未来」, 佐賀大学, 1月6日, 2018年

橋 基, 宇宙に浮かぶ巨大な素粒子「ニュートロンスター」, JAAA2017, 佐賀バルーンミュージアム, 9月30日, 2017年

橋 基, 物理学者のボクからこれからのアナタへ, 佐賀大学講義「共通基礎(絵画)」, 佐賀大学, 5月26日, 2017年

橋 基, 星たちのささやき, サイエンスカフェ in SAGA, 佐賀県立宇宙科学館ゆめぎんが, 12月17日, 2016年

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 :

ローマ字氏名 :

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。