

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540280

研究課題名(和文) 中間バリオン数密度領域での相構造の統一的説明と中性子星物理への応用

研究課題名(英文) A unified study of the phase structure in the intermediate baryon density regime and its applications to neutron star physics

研究代表者

橘 基 (Tachibana, Motoi)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30404122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：中性子星は、その高い密度や強い磁場、高速回転などの特異な性質により、古くから多くの研究者の関心の対象となってきた。この天体の性質の理解は、超新星爆発のメカニズムや金などの重い元素の誕生、重力波の発生、高密度素粒子の状態の解明につながる重要テーマである。今回申請者は素粒子理論の立場からこの課題に取り組み、星の質量と半径を説明する方程式や、星の作る磁場とカイラル対称性とよばれる素粒子の性質の関係、さらには星に暗黒物質という未知の粒子が捕獲される現象などの研究を行い、これらの成果を国内外の研究会や論文雑誌、また一般講演などの機会に発表した。

研究成果の概要(英文)：Neutron star has been interesting to many physicists for a long time, since it has many interesting and unknown properties such as the rapid rotation and huge magnetic field as well as the high density profile. Moreover, the study of neutron stars is an essential research subject, which is related to the understanding of mechanism of the supernova explosion, creation of heavy elements like gold, the gravitational wave radiation and matter state at high density. I studied this issue mainly from particle physics side. I obtained several results such as the construction of equations describing the mass and radius of the star, the relation between huge magnetic field and chiral symmetry which is an important property for elementary particles, and dark matter capture in neutron stars. I reported these in various workshops, meetings and conferences as well as the scientific journals.

研究分野：中性子星とクォーク・ハドロン物理

キーワード：中性子星 クォーク 素粒子

1. 研究開始当初の背景

(1) 有限温度・バリオン数密度の原子核・クォーク物質の性質および構造の解明は、初期宇宙における熱史や、中性子星などの高密度天体における諸現象の理解、あるいは地上での重イオンを用いた衝突実験で生成された物質の性質を理解する上で大変重要な研究分野である。

(2) 課題申請者は特にこれまで、有限バリオン数密度領域に関する理論的研究を中心にやってきた。この領域は格子ゲージ理論を用いた数値計算が、「符合問題」とよばれる問題に直面するため、未だに実行困難であり、かつ加速器を用いた実験でも実現することが難しい。

2. 研究の目的

(1) 「研究の背景」で述べたように、中性子星などの高密度天体の理解には、有限バリオン数密度原子核・クォーク物質の性質の探求が不可欠である。これについてこれまで QCD 相図が盛んに研究されてきたが、非常に低密度や高密度の極限での知見に比べ、中性子星内部の密度であるいわゆる中間バリオン数密度領域については、今のところ未知の事柄が多い。そこで本研究課題では、これまでの課題申請者自身の研究に基づき、それをさらに深化させることで、中間密度領域の相構造の統一的理解を目指す。具体的に挙げる課題は以下の通りである。

平衡条件および電荷中性条件の考察
中間密度領域での状態方程式の考察
渦糸などのトポロジカルな励起の考察

(2) (1)で得られた成果を、中性子星の諸々の物理量や物理現象などの理解へと応用する。具体的に挙げる課題は以下の通りである。

中性子星の質量と半径
ニュートリノ放射による中性子星の冷却
中性子星の強磁場発生機構の考察

3. 研究の方法

以下、上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 1-1 については、ギンツブルグランダウ理論に基づく課題申請者らの先行研究の結果を、中性条件を含む形で拡張する。1-1 については QCD のように強結合場の理論の解析に威力を発揮する AdS/CFT 対応 (ホログラフィック原理) に基づく研究を行う。1-1 については、渦糸の形成と「相互摩擦」とよばれる現象の観点から、超流動中でのエネルギーの散逸を考察する。一方、2-1 は 1-1 で得られる結果と、星の質

量と半径の関係式であるトールマンオッペンハイマー方程式を組み合わせることで研究を遂行する。2-1 に関しては課題申請者が以前行った先行研究を拡張する形で考察を深めていく。最後に 2-1 については、強磁場中でのランダウ準位に着目して研究を進める。

4. 研究成果

(1) クォーク物質における渦形成

現在、有限密度クォーク・ハドロン物質の理論研究により、中性子星内部で実現していると期待される密度領域において、多様な相構造が提案されている。その中でも、クォーク物質が超伝導状態となった、いわゆるカラー超伝導体は、通常の金属超伝導体にはない様々な特徴があり、理論的にも観測的にも興味深い対象である。課題申請者は、カラー超伝導状態のうち具体的にカラーフレーバロッキングとよばれる超伝導状態を考察し、その有効ラグランジアンを構成した上で、そこに発現する渦状態と準粒子との散乱断面積の見積もりを行った。これを行うことで、クォーク物質のエネルギーが渦の存在を通じてどのように拡散するかを知ることができ、ひいては中性子星中のエネルギー散逸の新たな機構の提案が可能となる。なおここでの成果はイタリアの国際研究会 QCD@Work2012 において発表され、後にプロシーディングスに収められた。

(2) 核物質の気相-液相転移

有限密度のクォーク・ハドロン物質の状態方程式を研究することは、中性子星の質量と半径の関係を理解する上で必須のものであり、近年では逆に中性子星の観測結果から、状態方程式に制限を設けるというアイデアが生まれている。有限温度においては、格子ゲージ理論を用いた数値計算が非常に有効で、状態方程式の研究に大きな進展をもたらされた。一方有限密度では「符合問題」の存在のため、格子ゲージ理論による解析は今のところ存在しない。その代わりに有効模型を用いた相図の解析が長年行われてきた。

そのような状況で、2000 年頃から AdS/CFT 対応 (ホログラフィック原理) を QCD に応用し、さまざまな強結合の計算を行う動きが活発化し、現在に至っている。しかしながら有限密度への応用はなかなかうまくいかず、例えば以前より実験的にその存在が示唆されている、核物質の気相から液相への一次転移を説明するホログラフィックな模型は存在しなかった。課題申請者は、福岡工業大学の郷六、豊田、九州大学の久保、田港との共同研究において、酒井-杉本模型とよばれるホログラフィック模型に現れるインスタント解を多粒子系に拡張し、そこでのエネルギー配位を調べることで、気相-液相転移に特有の密度の不連続な跳びを確かめることに成功した。これは課題申請者の知る限りでは

世界で初めての成果である。ここで得られた解を持つ状態方程式を、高密度領域に拡張することで、中性子星の質量や半径を求めることが今後の課題である。

(3) 中性子星の質量と半径

中性子星の質量と半径は、内部構造を理解する上で重要な観測量である。中でも 2010 年に発表された、太陽質量の 2 倍に近い質量を持つ中性子星の観測結果は大きなインパクトを持って研究者から迎えられた。これは以下の理由による。中性子星の標準的な質量は太陽質量の 1.4 倍程度である。一般に核物質がそれ以外の物質にある密度領域で相転移を起こした場合、その状態方程式はかならず「柔らかく」なり、そこから作られる中性子星の質量は小さくなる。したがって太陽質量の 2 倍の中性子星の存在は、星の内部の物質状態を強く制限する。

課題申請者は(2)で行った、核物質の気相-液相転移を再現する状態方程式を応用し、中性子星の質量と半径の計算を行った。ただし観測結果と整合する結論を得るには、特殊なパラメータの選択が必要であり、この点を改善することが今後の課題である。

(4) 強磁場のもとでのクォークの性質

中性子星は宇宙最強の磁石とも称され、その磁場の大きさは地球の一兆倍から千兆倍にもなると考えられている。現在のところ、そのような超巨大磁場発現のメカニズムは明らかにされていない。そこで課題申請者は発現メカニズムそのものではなく、もし発現したとしたら、中性子星を形成するクォークに一体どのような影響が及ぼされるかという観点から研究を行った。イタリアのカターニア大の Marco Ruggieri との共同研究で、強い磁場のもとでのクォークの性質、特にカイラル対称性とよばれるものへの影響を調べた。その結果、従来言われていた対称性の回復の転移は使用していたモデルの性質に由来する人工的效果であることが明らかにされた。この研究自身は有限温度でのものであるが、密度を含めた計算はすぐに Ruggieri のグループでなされ、我々の計算結果が本質的に変わらないことが示された。

(5) 中性子星における暗黒物質の捕獲

研究課題について遂行していくうちに、新たな挑戦的課題に遭遇した。それが中性子星における暗黒物質(ダークマター)の捕獲とブラックホール形成というテーマである。よく知られているように、暗黒物質は宇宙のエネルギー密度の約 4 分の 1 を占めると考えられる未知の物質であり、この素粒子の発見や性質の解明は現代物理学最大の課題の一つである。

暗黒物質は宇宙のいたるところに存在すると考えられているが、もしそれが中性子星の近傍にあったとすると、その強い重力によ

り、星の内部に引っ張られる。このとき、暗黒物質がいわゆる weakly interacting massive particle (WIMP) であるとする、星の中の核子(陽子、中性子)と散乱しエネルギーを失う。中性子星の脱出速度は光速の 70% 近くもあるため、散乱した暗黒物質のほとんどは星の中に捕獲される。その後、核子との衝突を繰り返しながら熱平衡状態になり、時間が経つとやがてチャンドラセカール限界を超えて重力的に不安定になる。この重力不安定性の時間スケールは、暗黒物質の物理量(質量や暗黒物質と核子との散乱断面積)に依存する。一方、中性子星の観測から、現時点で中性子星の重力崩壊は観測されていないことから、暗黒物質の物理量に制限が与えられると期待される。

これまでの先行研究では、中性子星の内部構造を簡略化し、多体効果やエキゾチックな相の可能性を考慮しない計算が行われていた。これに対し課題申請者はこれまでの研究成果を生かし、クォーク物質が存在する場合の、暗黒物質捕獲への影響を世界に先駆けて発表した。これは現在の継続中の課題である。

(6) カイラル対称性ととじこめの研究

ゲージ/重力対応(ホログラフィック原理)を用いて、クォーク・ハドロン物質を調べた。特にここではクォークの 2 つの重要な特徴である「とじこめ」と「カイラル対称性」に着目し、その相転移の構造を詳細に研究した。その結果、格子ゲージ理論や他の有効モデルとは異なる、新しい相構造を発見した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

K. Ghoroku, K. Kubo, M. Tachibana and F. Toyoda, Holographic cold nuclear matter and neutron star, International Journal of Modern Physics A, 査読有, Vol. 29, 2014, 1450060
DOI: 10.1142/S027751X4500602

M. Ruggieri and M. Tachibana, Renormalized vs. nonrenormalized chiral transition in a magnetic background, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.7 2013, 165
DOI: 10.1007/JHEP07(2013)165

M. Tachibana, Mutual friction in color-flavor locked quark matter, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1492, 2012, 269
DOI: 10.1063/1.4763530

K. Ghoroku, K. Kubo, M. Tachibana, T. Taminato and F. Toyoda, Holographic cold

nuclear matter as dilute instanton gas, Physical Review, 査読有, D87, Vol. 6, 2013, 066006
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.066006

〔学会発表〕(計 14 件)

橘 基, Dark matter capture in neutron stars with exotic phases, The INT workshop “Nuclear Aspects of Dark Matter Searches”, 2014 年 12 月 12 日、シアトル(米国)

橘 基, Dark matter capture in neutron stars with exotic phases, Quarks and Compact Stars, 2014 年 10 月 20 日、北京(中国)

橘 基, Dark matter capture in neutron stars with exotic phases, International Conference, Baryons2013, 2013 年 6 月 28 日、グラスゴー(英国)

橘 基, Mutual friction in color-flavor locked quark matter, International workshop, QCD@Work2012, 2012 年 6 月 18 日、レッツェ(イタリア)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
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】

夢ナビライブ：

<http://yumenavi.info/lecture.aspx?GNKCD=g005962&0raSeq=6083231&ProId=WNA002&SerKbn=c&SearchMod=3&Page=1&Keyword=佐賀大学>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橘 基 (TACHIBANA, Motoi)
佐賀大学・工学系研究科・准教授
研究者番号：30404122

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：