

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540311

研究課題名(和文) 多重極限環境下での強い相互作用する多体系の真空構造、励起モード及び諸物性の研究

研究課題名(英文) Investigation of the phase structure and excited modes under extremum environment in the strong interaction

研究代表者

津江 保彦(Tsue, Yasuhiko)

高知大学・教育研究部自然科学系・教授

研究者番号：10253337

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：強い相互作用で重要となるカイラル対称性に着目した南部・Jona-Lasinio(NJL)モデルを用い、対称性が許されるクォーク間4点相互作用を考えると、高密度クォーク物質ではテンソル型のクォーク凝縮が起き、密度上昇に伴ってカラー超伝導相に引き続きスピン偏極相が現れることを示した。8点相互作用を持つ拡張されたNJLモデルを用い、有限密度・有限温度のある領域ではカイラル対称性は回復しているが素励起は核子となる相が存在することを示した。非可換ゲージ理論に対してガウス型波動関数近似を用いた時間依存変分法を構築し、スカラー・擬スカラーグルーボール質量を評価し、結合定数・スケールパラメータ依存性を与えた。

研究成果の概要(英文)：In the strong interaction governed by the quantum chromodynamics (QCD), it has been shown that the quark-spin polarization is realized at high baryon density by using the Nambu-Jana-Lasinio (NJL) model with the tensor-type four-point interaction between quarks. As the quark-number density is increasing, the spin-polarization occurs. Then, the two-flavor color superconductivity disappears. By using the extended NJL model which incorporates the eight-point interaction between quarks, it has been shown that there exists a new phase in this model in which the chiral symmetry recovers but the elementary excitation on the vacuum corresponds to nucleon. For the pure Yang-Mills gauge theory, the time-dependent variational method has been constructed within the Gaussian functional approximation. The scalar and pseudo scalar glueball masses have been given and the dependence of glueball masses on the QCD running coupling constant and QCD scale parameter has been clarified.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：高密度クォーク物質 QCD物性

1. 研究開始当初の背景

北米及びヨーロッパで行われてきた相対論的重イオン衝突実験で、強い相互作用(QCD)により支配されているクォーク・グルオン、あるいはハドロンの粒子集団が、有限温度などの環境下で互いに相互作用している状況が実現されているものと考えられ始めていた。以前にはQCDが許す相として、色の閉じ込めの観点からはクォーク・グルオンの閉じ込めが起きているハドロン相と、クォーク・グルオンが自由気体のように振舞うと考えられていたクォーク・グルオンプラズマ(QGP)相が想定されており、またQCDの持つカイラル対称性の観点からは、カイラル対称性が自発的に破れた相と、カイラル対称性が回復したカイラル対称相が想定されていた。しかしながら、QCDの分野における世界的に著しい研究の進展により、例えば有限密度の領域では二フレーバーカラー超伝導(2SC)相やカラー・フレーバーロッキング(CFL)相などの複数のカラー超伝導相、あるいはクォーク強磁性相など様々な相が存在するかもしれないことが示唆されてきていた。相対論的重イオン衝突の初期条件としてはあるがカラーガラス凝縮の可能性もあり、強い相互作用が支配するクォーク・グルオンの多体系においては極めて多様な物質相が存在すると期待されるような状況であった。また、QGP相においても、クォーク・グルオンが自由気体のように振舞うのではなく、ある種の流体のように振舞うことが理論的、実験的に示唆され、従来の単純な描像では捉えきれなくなってきた。また、カイラル対称性の自発的破れに関しても、カイラル相転移の動的過程の一形態として、異方カイラル凝縮体(Disoriented Chiral Condensate: DCC)の生成や準安定状態としてのその存在可能性が指摘されるなど、QCDにより支配される多粒子系の相構造、ならびに各相での多体系が示す諸性質に多大な興味を持たれている状況であった。このように、QCDが示す諸相は如何なるものか、また相間の転移の様相は如何なるものかが世界的な理論研究の関心であった。

2. 研究の目的

強い相互作用により支配されるクォーク・グルオン、及びハドロンの多体系により実現される相構造・相転移、及びこれらの多粒子系が各相で示す物性の一端を解明することを目的とした。クォーク・ハドロンの相転移、ならびにハドロンの相とカラー超伝導相間の相転移の過程、カイラル非対称相とカラー超伝導相の競合または共存の可能性、グルオン相が示す物性、媒質中でのグルーボールの性質とそれが相構造に与える影響などを、主に平均場近似とそれを越えるスキューズ状態を用いた時間依存変分法により理論的に明らかにすることを目的とした。(1)クォーク・ハドロンの相転移を考察するために、対相互作用するクォークモデルとしてボン・クォークモデルを取り上げ、ハドロンの相とカラー超伝導相間の相転移を調べる。このモデルはカラー超伝導状態の存在の認識以前に、クォーク3体から核子状態を実現することができるモデルとして提案されていたが、近年発展したカラー超伝導のモデルとして再検討することを目的とした。(2)カイラル対称性の観点から、上記のボン・クォークモデルとは相補的に、カイラル対称性を重視した南部・Jona-Lasinio(NJL)モデルを基礎にカイラル対称性を保持したままベクトル・スカラーの8点相互作用まで考慮する拡張されたNJLモデルを用いて、クォーク・ハドロンの相転移に関する議論を行うことを計画した。核物質の飽和性を再現しながら、このモデルで、有限温度・有限バリオン化学ポテンシャルのもとでハドロンの(核物質)相とクォーク相の圧力を計算・比較することにより、相構造・相転移の次数等の情報を得ることを目的とした。(3)研究代表者が考案したグルオン場に対する時間依存変分法では、外場の取り方を工夫することによって外場の応答から種々の粒子モードを構築することが可能である。グルオン場の束縛状態としてグルーボールを取り上げ、まずは真空中でのグルーボールの質量などの性質をこの変分法の枠組みで評価することを目的とし、研究計画を立案した。その後、有限温度、有限密度

でグルーボールの性質がどのように変化するか、あるいはグルーボール多体系の物性、グルーボールがクォーク・グルオン、またはハドロン多体系に及ぼす効果を検討していくことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) QCDの有効模型を用い、クォーク、ハドロン多体系が示す相構造、相転移を調べる。ボン・クォーク模型は $su(4)$ の動的対称性を持つが、原子核理論で発展したElliottの方法を用いてカラー $su(3)$ 対称性のみを維持するような粒子・空孔対相互作用を導入し、さらにボソン写像の方法を援用してボソン表現を用いてこのモデルの厳密解を構成し、この模型においてクォーク・ハドロン相間の様相を明らかにする。カイラル対称性を保持したまま、クォーク8点相互作用を持ち込んだ拡張されたNJL模型を用い、ハドロン側では核子を基本粒子と考え、核物質の飽和性を満たすモデルを構築し、クォーク側では8点相互作用の効果により通常の4点相互作用のみを持つNJL模型のモデルパラメータに密度依存性を持ち込んだ形のモデルを導入する。このモデルを用いて、有限温度、有限密度でのクォーク・ハドロン相構造を考察し、可能な相、相転移の様相を調べる。テンソル型の4点相互作用を持つNJL模型を考えると、高密度でクォークスピンの揃うクォーク・スピン偏極相が実現するかを、有効作用の方法、及びカラー超伝導相との競合を考える場合にはBCS理論を用いて検討する。(2)グルオン場のみの純ゲージ理論に対して、ガウス型波動関数近似を用いた時間依存変分法を構築する。この理論的枠組みで、グルオンの束縛状態と同じ構造を持つ外場を考え、この外場の応答を考えることにより、グルオンの束縛状態としてのグルーボールの性質を調べる。具体的にはグルーボールの伝播関数を場の理論的手法で計算し、その極の位置からグルーボールの質量スペクトルを求める。

4. 研究成果

(1) ボン・クォーク模型により、クォーク間の相互作用の強弱により、クォーク多体系が3体の核子として核物質として振る舞う状況から、強い対相互作用によりクォーク・ペアリングが起きてクォーク物質へと相変化することを示した。(2) 8点相互作用まで考慮した拡張されたNJL模型では、予想通り、低温・低密度ではハドロン相が実現し、高温・高密度ではクォーク相が実現する。しかしながら、クォーク・ハドロン相転移とカイラル相転移は一致せず、ある温度・密度領域ではカイラル対称性は回復しているが、素励起は核子である相が存在することを示した。(3) テンソル型の4点相互作用を持つNJL模型では、高密度でクォークスピンの揃うクォーク・スピン偏極相が実現することを、2フレーバーの場合に有効ポテンシャルを評価することで初めて示した。高密度ではカラー超伝導相が実現することが理論的に予想されているので、引き続き、2フレーバーの場合に、カラー超伝導相とクォーク・スピン偏極相との共存・競合を検討した。その結果、まずはカラー超伝導が実現するが、クォーク数密度の上昇とともにカラー超伝導ギャップとクォーク・スピンの秩序変数が共存し、やがてカラー超伝導は消えてクォーク・スピン偏極相へ相転移することを示した。(4) グルオン場のみの系において、ガウス型波動関数近似を用いた時間依存変分法を構築し、グルーボールに対応する外場の応答を調べることでスカラー及び擬スカラーのグルーボール質量を与え、これらのグルーボール質量のQCD結合定数とQCDスケールパラメータ依存性を与えた。

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 15 件)

(1) Quark spin polarization in high density quark matter,
Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia and M. Yamamura,
EPJ Web of Conferences 66, (2014), 04029-1-4 (査読有)
DOI:10.1051/epjconf/20146604029

(2) A pseudo $su(1,1)$ -algebraic deformation of the Cooper pair in the $su(2)$ -algebraic many-fermion model,

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura,

Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013 October 18 (2013) 103D04-1-45 (査読有)
DOI:10.1093/ptep/ptt074

(3) Interplay between spin polarization and color superconductivity in high density quark matter,

Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia, M. Yamamura and H. Bohr,

Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013 October 1 (2013) 103D01-1-20 (査読有)
DOI:10.1093/ptep/ptt076

(4) Quark-hadron phase transition in an extended Nambu-Jona-Lasinio model with scalar-vector interaction:

Finite temperature and baryon chemical potential case,

T.G.-Lee, Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia and M. Yamamura,

Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013 January 6 (2013) 013D02-1-14 (査読有)
DOI:10.1093/ptep/pts055

(5) A Role of the Quasiparticle in the Conservation of the Fermion Number --- An Example Illustrative of the Deformation of the Cooper Pair ---,

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 128, No.4 (2012) 717-726. (査読有)

(6) The BCS-Bogoliubov and the $su(2)$ -Algebraic Approach to the Pairing Model in Many-Fermion System --- The Quasiparticle in the Conservation of the Fermion Number ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 128, No.4 (2012) 693-715. (査読有)

(7) Effective Potential Approach to Quark Ferromagnetization in High Density Quark Matter

Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 128, No.3 (2012) 507-522. (査読有)

(8) Scalar and Pseudoscalar Glueball Masses within a Gaussian Wavefunctional Approximation

Y. Tsue

Progress of Theoretical Physics 128, No.2 (2012) 373-396. (査読有)

(9) Color-Singlet Three-Quark States in the $su(4)$ -Algebraic Many-Quark Model --- An Example of the $su(4) \otimes su(4)$ -Model ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 127, No.4 (2012) 769-779. (査読有)

(10) Re-formation of Many-Quark Model with the $su(4)$ -Algebraic Structure in the Schwinger Boson Realization --- Reconsideration in the Original Fermion Space ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 127, No.4 (2012) 751-768. (査読有)

(11) Note on the Minimum Weight States in the $su(2)$ -Algebraic Many-Fermion Model --- Extension of the Role of the Auxiliary $su(2)$ -Algebra ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 127, No.2 (2012) 303-314. (査読有)

(12) Background of the $su(2)$ -Algebraic Many-Fermion Models in the Boson Realization --- Construction of Minimum Weight States by Means of an Auxiliary $su(2)$ -Algebra and Its Related Problems ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 127, No.1 (2012) 117-143. (査読有)

(13) On the Color-Singlet States in Many-Quark Model with the $su(4)$ -Algebraic Structure. III --- Transition from the Quark-Triplet to the Quark-Pair Phase ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 126, No.2 (2011) 313-330. (査読有)

(14) On the Color-Singlet States in Many-Quark Model with the $su(4)$ -Algebraic Structure. II --- Determination of Ground-State Energies ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia

and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 126, No.2
(2011) 293-311. (査読有)

(15) On the Color-Singlet States in Many-Quark Model with the $su(4)$ -Algebraic Structure. I --- Color-Symmetric Form ---

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura

Progress of Theoretical Physics 126, No.1
(2011) 115-134. (査読有)

〔学会発表〕(計 10 件)

(1) 津江保彦, “ガウス型波動汎関数近似によるスカラー・擬スカラー・グルーボール質量”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/30, 東海大学湘南キャンパス

(2) 李東奎, 仲野英司, 津江保彦, 巽敏隆, 丸山敏毅, “二重カイラル密度波上での NG モード”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/28, 東海大学湘南キャンパス

(3) 李東奎, 仲野英司, 津江保彦, 巽敏隆, 丸山敏毅, “非一様相における低エネルギー有効理論”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/23, 高知大学朝倉キャンパス

(4) 津江保彦, J. da Providencia, C. Providencia, 山村正俊, “高密度クォーク物質でのクォークスピン偏極”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013/3/27, 広島大学

(5) 李東奎, 津江保彦, “拡張された NJL モデルでの相図とそのスカラー・ベクトルカップリング依存性”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012/9/14, 京都産業大学

(6) 李東奎, 津江保彦, “拡張された NJL モデルでの有限温度・密度相の解析”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012/3/25, 関西学院大学

(7) 津江保彦, C. Providencia, J. da Providencia, 山村正俊, “ $su(4)$ 代数構造を持つ対相互作用するクォークモデルの相変化”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/9/18, 弘前大学

(8) 関口昂臣, 石黒克也, 津江保彦, “有限温度 $SU(2)$ 格子 QCD における spatial string tension のゲージ依存性について”, 日本物理学会中国支部・四国支部 2011 年度支部学術講演会, 2011/7/30, 鳥取大学

(9) 李東奎, 津江保彦, “拡張された NJL モデルによる有限温度・密度クォーク・ハドロン相転移”, 日本物理学会中国支部・四国支部 2011 年度支部学術講演会, 2011/7/30, 鳥取大学

(10) 三鍋登宏, 津江保彦, “線形シグマ模型によるカイラル対称性の回復における部分的構造”, 日本物理学会中国支部・四国支部 2011 年度支部学術講演会, 2011/7/30, 鳥取大学

〔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:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
津江 保彦 (Yasuhiko TSUE)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号: 10253337

(2) 研究分担者
なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者
なし ()

研究者番号: