

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400277

研究課題名(和文) 多重極限環境下で発現するクォーク・グルオン多粒子系の相構造並びに諸物性の研究

研究課題名(英文) The study of the phase structure and various properties of many quarks and gluons system in the extreme conditions

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理学部門・教授

研究者番号：10253337

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：高密度でのクォーク物質が示す可能な相を、量子色力学の有効模型としての南部・Jona-Lasinio模型を用いて考察し、クォーク間にテンソル型の4点相互作用が働く際には、カイラル凝縮相とは分離した温度・密度領域でクォークスピンの偏極したスピン偏極相が現れることを示し、クォーク対相関がある場合にもカラー超伝導相からクォークスピン偏極相への転移や共存領域の存在を明らかにした。また強磁場下での可能な相、及び自発磁化の存在可能性を示した。非一様カイラル凝縮相の基底状態、励起モードを考察し、分散関係や揺らぎの相関、凝縮相の安定性を明確にした。

研究成果の概要(英文)：Possible phases in the high density quark matter have been investigated by using the Nambu-Jona-Lasinio model with a tensor-type four-point interaction between quarks as an effective model of QCD. It has been shown that a quark-spin polarized phase appears apart from a region of the chiral condensed phase with zero and/or finite temperature and finite density. Even when there exist quark-pair correlations, it has been shown that the quark-spin polarized phase exists in a certain parameter region. Further, the mixed phase with color-superconducting gap and the quark-spin polarized condensate appears. Also, possible phases under a strong external magnetic field and a possibility of the spontaneous magnetization at high density are shown. In addition to the spin polarized phase, the ground state and excited modes on the inhomogeneous chiral condensed phase have been investigated and the dispersion relation and the correlation function of the quantum fluctuation have been clarified.

研究分野：理論核物理

キーワード：クォーク・グルオン多粒子系 QCD相構造 高密度クォーク物質 強磁場と自発磁化 クォークスピン偏極

## 1. 研究開始当初の背景

近年行われてきた相対論的重イオン衝突実験では、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、有限密度、あるいは重イオン衝突の際に生じる強磁場中で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ていた。近年の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2フレーバーカラー超伝導相やカラー・フレーバーロッキング相などの複数のカラー超伝導相やクォーク強磁性相など様々な相の存在可能性が示唆されてきていた。重イオン衝突の初期段階ではカラーガラス凝縮の可能性が指摘されているのをはじめ、有限温度・密度下でクォークイオン相やカイラル非一様相等の存在可能性も考えられており、強い相互作用が支配するクォーク・グルオン並びにハドロ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ている。我々も、低温・高密度ではクォークスピン偏極相が実現する可能性を指摘し、QCDにより支配される多粒子系の相構造ならびにQCD物性とも呼ばれる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た。クォーク・グルオン多体系あるいはハドロンの多体系を支配する強い相互作用で実現される相構造の全容は未だ完全に解明されてはならず、どのような相が発現し、どのような相転移が実現するのか、その相での粒子モードはいかなる性質を示すか、クォーク・グルオンあるいはハドロンの多体系が示す物性はどのようなものであるのかなど、多くの興味深く解明すべき重要な理論的課題が存在する。

## 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が、高温、高密度、強磁場など、多重にわたる極限環境下におかれた際に実現される相構造、その上での粒子励起モードや相転移の様相、及びこれらの多粒子系が各相で示す物性を解明することを主目的とした。多重極限環境下で生じるクォーク相とハドロンの相間の相転移の他に、特に様々な相の存在が示唆されている高密度領域で、クォーク多粒子系により発現が期待される多様な相構造、各相間の相転移の様相を明らかにする。また、グルオン多体系が示す物性や真空上に励起されるグルーボールの様相などを、主に平均場近似を超える理論的手法を用いて明らかにし、多重極限環境

下でのクォーク・グルオン物性を理解することを目指した。

## 3. 研究の方法

高温・高密度・強磁場などの多重極限環境下におかれた、強い相互作用をするクォーク・グルオン及びハドロンの多粒子系が示す相構造、励起モード、相転移、各相での諸物性を調べるために、1)南部・Jona-Lasinio (NJL) 模型等のQCD有効模型を用い、特にクォークスピン偏極相とクォーク強磁性相の存在可能性、スピン偏極相とカラー超伝導相との競合・共存や相転移の様相を明らかにすること、2)非一様カイラル凝縮相の存在可能性と他の相との関係や、非一様カイラル凝縮相中でのメソン励起モードの性質とその観測可能性を評価すること、3)グルーボール励起モードの性質をスクイーズ状態を用いた時間依存変分法により明らかにすること、を計画した。

## 4. 研究成果

(1)クォーク間にテンソル型の相互作用が働く場合に、高密度でのクォーク物質ではスピンの偏極した相が存在可能であることを零温度での状況で示した。そこで引き続き、高密度クォーク物質が自発磁化を持つ可能性について、量子色力学(QCD)の有効模型として南部・Jona-Lasinio (NJL) 模型を用いて考察した。系に外部磁場を与え、その応答を調べる事でこのクォーク物質が自発磁化を持つか調べた。結果としてそのままでは自発磁化を持たないが、クォークの異常磁気率まで考慮すると自発磁化を示し、クォーク物質は高密度で強磁性相を示す可能性を指摘した。また、中性子星内部を考えると、 $10^{14} \sim 10^{15}$  G 程度の強磁場を与えうことを示唆した。得られた結果は学術論文として公表した。

(2)(1)と同様のNJL模型ではあるが、3フレーバーの場合に拡張し、クォークスピン偏極相が現れるか検討した。3フレーバーでは高密度で、カラー超伝導相であるカラー・フレーバー・ロック(CFL)相が現れることが期待されている。そこで、クォーク間にテンソル型相互作用とクォーク対相互作用を考慮して、零温度の範囲内ではあるが可能な相を検討した。密度の上昇とともにCFL相が現れるが、さらに密度を上げると、1次相転移を起こしてクォークスピン偏極相へ移行することを示し、学術論文として公表した。

(3)スピン偏極とカイラル凝縮の共存・競

合の問題を考察し、モデルの妥当と考えられるパラメータ領域の範囲内ではあるが、低密度領域ではカイラル凝縮のみが実現し、密度を上げていくと一旦カイラル対称性が回復した後、さらに高密度ではスピン偏極のみが現れることを明確にした。結果は学術論文として公表した。

(4) テンソル型相互作用に加えてクォーク対相関を取り入れ、カラー超伝導相とスピン偏極相との関係を調べた。テンソル相互作用の強さが弱い場合には、ある密度・温度領域で単独のカラー超伝導相が現れる。ところが密度の上昇でカラー超伝導ギャップとスピン偏極凝縮の両者が共存する領域が存在することを明らかにした。その状況で温度を上げるとスピン偏極相のみになり、やがてクォーク相になることを示した。テンソル相互作用の強さが強い場合には共存領域と単独のスピン偏極相のみが残ることを指摘した。結果は学術論文として公表した。

(5) NJL 模型にテンソル型相互作用、及び擬ベクトル型相互作用を入れ、それぞれのクォーク間相互作用が存在する場合に、強磁場下でのクォーク物質の相構造を零温度の場合に調べた。擬ベクトル型相互作用、テンソル型相互作用どちらの場合にもクォークスピン偏極相は現れやすくなり、またカイラル対称性の破れは増大することを示した。さらに、クォーク化学ポテンシャルの関数として、動的クォーク質量、クォークスピン偏極凝縮がどのように変化するかを明確にした。結果は学術論文として公表した。

(6) 非一様カイラル凝縮相の研究を行い、カイラル対称性、並進・回転対称性が破れる際の基底状態、励起モードを考察し、分散関係や揺らぎの相関を調べ、非一様カイラル凝縮相の励起モードの安定性を考察し、学術論文として公表した。

(7) 多体系を代数的に扱うモデルとして簡単な  $su(2)$  代数模型を取り上げ、新しいボソン実現を与える一般論を展開し、論文として公表した。また、 $su(n)$  代数模型に拡張し、任意のフェルミオン数のもとでの量子状態を、 $n=2, 3, 4, 5$  の場合に球面テンソルを用いて与え、学術論文として公表した。

(8) QCD に基づき、汎関数シュレーディンガー描像のガウス近似の範囲内で、グルーボールの質量を与える方法を考案し、 $0^+$ 、 $1^-$  のグルーボール質量を非摂動的な効果を含めて与えることができたので、 $2^+$  等のグルーボール質量を評価する方法の検討を行った。

(1) から (5) までの研究成果は、QCD の有効模型としての NJL 模型において、カイラル対称性で許される可能なクォーク間相互作用を取り入れた上での有限温度・密度・磁場下での研究と位置づけられる。特にテンソル型相互作用に着目して低温・高密度でクォークスピン偏極が現れることを一連の研究成果で示してきた我々の研究は、カラー超伝導や非一様カイラル凝縮研究が多く為されている現状において、国際的に見ても希少な成果であり、QCD 相構造の研究において一石を投じるインパクトのあるものであると期待している。また、擬ベクトル型相互作用でのクォークスピン偏極凝縮は、ユニタリ変換 (ワインバーグ変換) のもとで非一様カイラル凝縮に対応することを示し、成果 (5) の学術論文において公表している。こうして、クォークスピン偏極の研究と、研究成果 (6) との関連性が考えられ、今後、研究を展開していく予定である

#### 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 11 件)

H. Matsuoka, Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia and M. Yamamura, Spin polarization and color superconductivity in the Nambu-Jona-Lasinio model at finite temperature, *Physical Review D* 95, Issue 5, 2017, 054025 (9 pages), 査読有  
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.054025>

Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia, M. Yamamura and H. Bohr, Spin polarization in high density quark matter under a strong external magnetic field, *International Journal of Modern Physics E* 25, No.12, 2016, 1650106 (18 pages), 査読有  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0218301316501068>

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura, A possible framework of the Lipkin model obeying the  $SU(n)$  algebra in arbitrary fermion number. II : Two subalgebras in the  $SU(n)$  Lipkin model and an approach to the construction of a linearly independent basis, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2016, Issue 8, 2016,

083D04 (22 pages), 査読有

DOI: 10.1093/ptep/ptw102

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura, A possible framework of the Lipkin model obeying the  $SU(n)$  algebra in arbitrary fermion number. I : The  $SU(2)$  algebras extended from the conventional fermion pair and determination of the minimum weight states, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2016, Issue 8, 2016, 083D03 (26 pages), 査読有

DOI: 10.1093/ptep/ptw101

H. Matsuoka, Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia, M. Yamamura and H. Bohr, Spin-polarized versus chiral condensate in quark matter at finite temperature and density, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2016, Issue 5, 2016, 053D02 (23 pages), 査読有

DOI: 10.1093/ptep/ptw055

Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia, M. Yamamura and H. Bohr, Spontaneous magnetization in high-density quark matter, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2015, Issue 10, 2015, 103D01 (18 pages), 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptv135>

T-G Lee, E. Nakano, Y. Tsue, T. Tatsumi and B. Friman, Landau-Peierls instability in a Fulde-Ferrell type inhomogeneous chiral condensed phase, Physical Review D 92, Issue 3, 2015, 034024 (14 pages), 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.034024>

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura, New boson realization of the Lipkin model obeying the  $su(2)$ -algebra, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2015, Issue 1, 2015, 063D01 (17 pages), 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptv069>

Y. Tsue, C. Providencia, J. da Providencia and M. Yamamura, Beyond the Schwinger boson representation of the  $su(2)$ -algebra, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2015, Issue 4, 2015, 043D01 (43 pages), 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptv003>

Y. Tsue, J. da Providencia, C.

Providencia, M. Yamamura and H. Bohr, A Possibility of Quark Spin Polarized Phase in High Density Quark Matter, Acta Astronomica Sinica 56, 2015, 76-78, 査読有 <http://www.phy.pku.edu.cn/~xurenxin/Proceedings/qcs.pdf>

Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia and M. Yamamura, Quark spin polarization in high density quark matter, EPJ Web of Conferences 66, 2014, 04029 (4 pages), 査読有

DOI:10.1051/epjconf/20146604029

〔学会発表〕(計 8 件)

松岡宏哲、津江保彦、有限温度におけるスピン偏極とカラー超伝導、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学(大阪)

H. Matsuoka and Y. Tsue, Spin polarization and color superconductivity in the Nambu-Jona-Lasinio model at finite temperature, Quarks and Compact Stars 2017, 2017 年 2 月 21 日, Kyoto University (京都)

津江保彦、J. da Providencia, C. Providencia, 山村正俊, H. Bohr, 高密度クォーク物質におけるクォークスピン偏極と自発磁化、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 23 日、宮崎大学(宮崎)

松岡宏哲、津江保彦、有限密度・温度におけるクォーク物質中でのカイラル凝縮とスピン偏極の関係、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 23 日、宮崎大学(宮崎)

Y. Tsue, J. da Providencia, C. Providencia, H. Matsuoka, M. Yamamura and H. Bohr, Quark spin polarization and spontaneous magnetization in high density quark matter, International Nuclear Physics Conference 2016, 2016 年 9 月 14 日、アデレード(オーストラリア)

津江保彦、J. da Providencia, C. Providencia, 山村正俊、H. Bohr, 高密度クォーク物質におけるクォークスピン偏極相の存在可能性、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 24 日、早稲田大学(東京)

李東奎、B. Friman、仲野英司、津江保彦、巽敏隆、DCDW 相での揺らぎに対する安定性、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 24 日、早稲田大学(東京)

Y. Tsue, A possibility of quark spin polarized phase in high density quark

matter, Quarks and Compact Stars 2014,  
2014年10月21日、北京(中華人民共和国)

〔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 (TSUE, Yasuhiko )  
高知大学・教育研究部理学部門・教授  
研究者番号：10253337

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

ジョアン ダ プロビデンシア  
(da Providencia, Joao )  
コインブラ大学・理学部・名誉教授

コンスタンサ プロビデンシア  
(Providencia, Constanca)  
コインブラ大学・理学部・教授