
*
*
*
*
*

高知大学学位授与記録

本学は、次の者に博士（理学）の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）第8条の規定に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

目次

学位記番号	氏名	学位論文の題目	ページ
甲総科博第37号	平口 敦基	QCDモノポールによるクォーク閉じ込め機構とそのゲージ配位依存性について	1
甲総科博第38号	森本 雅智	南部・ヨナラシニオ模型を用いた高密度クォーク物質のスピンの偏極相の研究	4

ふりがな	ひらぐち あつき
氏名(本籍)	平口 敦基(愛知県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第37号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与年月日	令和3年3月23日
学位論文題目	QCDモノポールによるクォーク閉じ込め機構とそのゲージ配位依存性について
発表誌名	Physical Review D 102 , 114504 (2020)
	審査委員 主査 教授 飯田 圭 副査 教授 津江 保彦 副査 教授 諸澤 俊介

論文の内容の要旨

クォークの閉じ込め機構は未だに解明されていない難問である。クォークの閉じ込めとは低エネルギーの領域においてクォークが単独で存在しない現象である。この現象はクォーク及びその相互作用を媒介するグルーオンの運動を記述する量子色力学(QCD)において記述されると考えられ、格子QCD数値シミュレーションを用いて研究されている。この方法を用いてQCDから閉じ込め相でのクォーク間のポテンシャルやクォーク間のカラー電場の空間分布を得ることができており、クォーク間のカラー電場が一次元状に絞られたカラーフラックスチューブを形成していることが確かめられている。しかしながら、このカラーフラックスチューブがなぜ形成されるのかは未だに解明できていない。この問題のアイディアのひとつとして双対マイスナー効果がある。通常の超伝導ではクーパー対の凝縮により磁束が絞られフラックスチューブを形成するが、双対超伝導ではモノポールの凝縮により電束が絞られる。つまり、QCDの中にあるモノポールの自由度の凝縮によってカラーフラックスチューブが形成されることで閉じ込めが起こるというアイディアである。QCDでモノポールを定義することは難問であるが、先行研究ではQCDに対して部分的なゲージ固定を用いることでアーベリアンモノポールを定義し、そのモノポールの寄与が閉じ込めポテンシャルを与えているというモノポールドミナンスが確認されている。また最近の研究ではQCDで通常成り立つ非可換ビアンキ恒等式が破れることでアーベリアンモノポールをカラーごとに定義することができることがわかり、QCDの模型であるSU(2)ゲージ理論においてはこのモノポールが連続極限を持つことがモノポール密度の研究から確かめられてきている。

本論文の目的は、この非可換ビアンキ恒等式の破れによるモノポールが連続極限を持ちかつ閉じ込めに寄与するのかを調べることである。特に、これまでの先行研究では、新しく定義したアーベリアンゲージ場およびモノポールのカラー間の相関や、より現実に近い系であるSU(3)ゲージ理論

における双対マイスナー効果は調べられていない。本論文ではこれらの解明を行った。

はじめに $SU(2)$ ゲージ理論において、格子上に 3 色のモノポールを定義し、カラー電場およびモノポールの空間分布をカラーの等方性を保つ Maximal center gauge 固定 (MCG) で調べた。この空間分布はアーベリアンのウィルソンループとオペレータとのディスコネクト相関から計算される。カラー間の相関を測定するときは、異なるカラーのウィルソンループとオペレータの相関を測定した。結果として、MCG において結合定数 3 点で双対マイスナー効果を確認することができた。さらに、異なるカラーの間には相関がないことが明らかになった。これは、アーベリアンカラー電場は同じカラーのモノポールに絞られていることを意味しており、この描像を確認したのは初めてのことである。また DLCG、MAWL、MAU1 というゲージ固定を採用し、カラー電場の侵入長を計算しゲージ依存性がないことを示した。また MCG でモノポールドミナンスを結合定数 4 点で確認した。これらの結果は、非可換ビアンキ恒等式の破れによるモノポールの連続極限の存在を示している。また $SU(3)$ ゲージ理論において、格子上に 8 色のモノポールを定義し双対マイスナー効果をゲージ固定なしの有限温度系で調べており、ノンアーベリアンのポリヤコフループとアーベリアンのオペレータの相関から新しく定義したアーベリアンカラー電場の侵入長がノンアーベリアンの侵入長を再現していることを結合定数 1 点で明らかにした。さらに、この相関からモノポールの空間分布を調べるための定式化を行った。

論文審査の結果の要旨

我々を構成している物質を細かく分解していくと、原子のなかに原子核があること、原子核は核子（陽子・中性子）から成ること、さらには、核子がクォークとよばれる素粒子から成り立っていることが知られている。通常的环境においては、クォークを核子から取り出すことができない。これをクォーク閉じ込めの問題という。一方、クォークと、クォーク間の相互作用をつかさどるゲージ場（グルーオン）の動力学を記述する基礎理論として、量子色力学 (QCD) が確立している。クォークが色（カラー）の自由度を有し、通常的环境においては全体として白色化されたクォークの集合体としてしか存在できないと考えることにより、クォーク閉じ込めの問題を QCD から解決できるはずだが、非アーベル性、即ちグルーオンの自己相互作用からくる非線形性により、数学的には難解な問題となる。そこで、この問題への一つのアプローチとして、時空を格子状に区切った上で大規模な数値シミュレーションを行うという手法が 40 年ほど前から頻りに用いられており、計算機の進歩とともに研究が蓄積されてきている。

平口敦基氏は、QCD より単純だが閉じ込めの本質を捉えられると期待できる $SU(2)$ ゲージ理論を主に用いて、閉じ込め機構の解決につながる可能性があるモノポールが、線の特異点がある場合に非アーベル的ビアンキ恒等式の破れによってもたらされるという連続理論に基づく知見を格子上の数値シミュレーションによって再現することを試みた。閉じ込めを特徴づける弦張力は、互いに十分離れた重たいクォーク・反クォーク間に働く距離に比例した引力ポテンシャルを与えるが、これはゲージ場の自己相互作用によってもたらされる。一方、ゲージ場の自己相互作用がない超伝導体との類推が成り立つように部分的ゲージ固定（アーベリアン射影）を行うことにより、ゲージ場の配位のうち、アーベル的な寄与どころか、カラーの磁荷を与えるモノポールからの寄与だけで弦張力を説明できることが知られている。ここでは、線の特異点がある場合に非アーベル的ビアンキ恒等

式の破れがカラーごとにアーベル的なモノポールカレントを導くという連続理論による新しい描像に着目し、上記のような特殊なゲージ固定に依存しない形でモノポールが弦張力を支配する可能性を探る。

本研究は、SU(2)ゲージ理論においては、ゲージ配位依存性、連続極限に留意しながら、格子上の数値シミュレーションにより、クォーク・反クォーク間においてカラーごとに電場が絞られ、またその周りにモノポールカレントが回っていることを長時間にわたる数値シミュレーションにより明確に示したものであり、また、SU(3)ゲージ理論においても、ゲージを固定せずにSU(3)とアーベリアンの場合の両方で同様の現象を数値的に確認することに成功した。クォーク閉じ込め問題について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者平口敦基氏は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。なお、以上の成果は、原著論文として、審査付の国際的学術雑誌1編(うち筆頭著者論文1編、共著者は、高知大学学術情報基盤図書館の石黒克也氏と金沢大学名誉教授の鈴木恒雄氏)としてまとめられている。

ふりがな	もりもと まさとし
氏名(本籍)	森本 雅智(高知県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第38号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与年月日	令和3年3月23日
学位論文題目	南部・ヨナラシニオ模型を用いた高密度クォーク物質のスピン偏極相の研究
発表誌名	Spin polarizations under a pseudovector interaction between quarks with the Kobayashi-Maskawa-'t Hooft term in high density quark matter M. Morimoto, Y. Tsue, J. da Providência, C. Providência and M. Yamamura, International Journal of Modern Physics E 29, Issue 01, 2050003 (2020).
	<p style="text-align: center;">審査委員 主査 教授 津江 保彦 副査 教授 福間 慶明 副査 准教授 仲野 英司</p>

論文の内容の要旨

陽子や中性子などの核子や、それらを構成するクォークの振る舞いは量子色力学(QCD)によって記述される。このQCDの課題として、温度-化学ポテンシャル(密度に相当する)平面の相図の解明が挙げられる。

零密度や低密度、高温の環境の解析には格子シミュレーションによる第一原理計算がよく行われているが、低温高密度領域は符号問題により格子シミュレーションによる計算は困難となっている。そのため、低温高密度領域の計算には有効模型を用いた解析が行われている。本研究はQCD相図の低温高密度領域の相構造および、そこで実現する高密度クォーク物質の性質を明らかにすることを目的としている。

高密度クォーク物質が出現するほどの高密度の環境は自然界ではコンパクト星と呼ばれる高密度の天体の内部などで実現する可能性がある。コンパクト星にはマグネターと呼ばれ、非常に強い磁場を有しているものもあるが、この磁場の起源は未だよく分かっていない。高密度クォーク物質中でスピン偏極が生じればこのコンパクト星の磁場の起源を説明できる可能性がある。上記の理由から、本研究では高密度クォーク物質のスピン偏極に着目し、QCD相図の零温度高密度領域について有効模型を用いた解析を行った。先行研究において、擬ベクトル型やテンソル型の相互作用項を含む南部-Jona-Lasinio(NJL)模型を用いた解析によってQCD相図の低温高密度領域にスピン偏極と解釈できる凝縮相が出現することが指摘されている。本研究では有効模型としてフレーバー

SU(3)の NJL 模型に擬ベクトル型やテンソル型の四点相互作用をそれぞれ追加した模型を採用し、零温度有限密度領域でのスピン偏極相の振るまいについて解析を行った。フレーバーSU(3)の NJL 模型とフレーバーSU(2)の NJL 模型の定性的な違いとして、フレーバー混合を引き起こす小林-益川-t'Hooft 相互作用と呼ばれる行列式型の六点相互作用の存在がある。本研究ではこの相互作用が擬ベクトル型やテンソル型の凝縮相にどのような効果を与えるかにも注目して解析を行った。

解析の結果、擬ベクトル型とテンソル型のいずれの相互作用を追加した模型においても、QCD 相図の零温度有限密度領域にスピン偏極相が生じることや、擬ベクトル型に起因するスピン偏極とテンソル型に起因するスピン偏極でそれぞれ振る舞いが異なる事が確かめられた。テンソル型の相互作用を追加した模型については電気的中性と β 平衡の条件を考慮し、核内部に高密度クォーク物質を持つコンパクト星の内部構造、特にテンソル型相互作用に起因するスピン偏極が星の半径と質量に与える影響に注目した計算も行った。観測データとして、およそ太陽質量の 2 倍程度の質量を持ったコンパクト星の存在が確認されているため、2 倍の太陽質量を持つコンパクト星を理論計算で構成できるかというのは一つの課題である。本研究は、テンソル型相互作用を追加したフレーバーSU(3)の NJL 模型を用いて天体の構造を計算する事により、模型の範囲内で 2 倍に近い太陽質量を持つコンパクト星が構成されうることを示した。また、今回の計算で考慮しなかった斥力型の相互作用を考慮することで、2 倍の太陽質量を有する天体が構成されうることもこの結果は示唆している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、零温度・有限密度のクォーク物質で実現可能な相として、クォーク物質のスピン偏極をもたらすと期待されるクォーク・反クォーク擬ベクトル型凝縮相及びテンソル型凝縮相の存在可能性と、それがもたらすコンパクト天体への影響を明確にしようとする目的のもとでなされた研究である。クォーク間の強い相互作用は量子色力学 (QCD) により支配されているが、有限密度領域では QCD から直接クォーク多体系を解析することは困難であるので、QCD の有効模型である南部・Jona-Lasinio (NJL) 模型を用いて考察している。本研究では u 、 d 、 s クォークの 3 フレーバーを考慮し、3 フレーバー特有のフレーバー混合の効果を解析している。第 1 に、QCD が持つ対称性のもとで NJL 模型に擬ベクトル型のクォーク間 4 点相互作用を導入し、カイラル対称性の破れの秩序変数であるカイラル凝縮と擬ベクトル凝縮を同時に扱い、零温度・有限密度の領域での実現可能な相の洞察を与えている。ある相互作用定数の値では、動的クォーク質量が減少するところで軽いクォークの擬ベクトル凝縮が現れ、より高密度では s クォークに関する擬ベクトル凝縮のみが残ることを、フレーバー混合の影響の分析を与えながら議論している。第 2 に、テンソル型のクォーク間 4 点相互作用を導入し、零温度・有限密度の領域での実現可能な相を考察している。軽いクォークに関するテンソル凝縮と、 s クォークに関するテンソル凝縮の現れ方を分析し、相互作用定数の大きさにより u 、 d 、 s テンソル凝縮の共存・非共存等、相構造が異なることを初めて示した。また、カイラル凝縮とは共存せず、低密度ではカイラル凝縮相、中程度の密度ではカイラル対称性は回復、高密度では再び対称性が破れ、テンソル凝縮相が存在し得ることをモデルの範囲内ではあるが示した。第 3 に、高密度で現れることが期待されたテンソル凝縮相の存在が、中性子星などの現実のコンパクト星に与える影響について検討している。現実的な星に適用する前提として荷電中性と β 平衡の両条件を課した下で、コンパクト星の内部はクォーク物質、ある密度にまで下がっ

た後は核物質となるハイブリッド星を想定し、Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程式を数値的に解くことで、ハイブリッド星の質量 - 半径の関係を導いた。星内部のクォーク物質にテンソル凝縮相が存在する場合は状態方程式が柔らかくなり、コンパクト星の質量は2倍の太陽質量を支えるまでには至らないという結果を得ている。以上の研究成果は3編の査読付き国際誌に掲載されているとともに、2018年11月に開催された国際会議「8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics」において発表されているのはじめ、その他学会等で7回報告されている。

以上のことから、本研究は、零温度・高密度での3フレーバークォーク物質について擬ベクトル及びテンソル凝縮相の存在可能性を研究したものであり、従来のカラー超伝導相に加えて他の凝縮相が存在する可能性、フレーバー混合が種々のクォーク凝縮の発現に与える影響、テンソル凝縮相の存在の下でのハイブリッド星の質量 - 半径の関係について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者、森本雅智氏は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。