

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400279

研究課題名(和文) 格子量子色力学を使った中性子星内物質の研究

研究課題名(英文) Studies of matter in neutron stars by using lattice quantum chromodynamics

研究代表者

河野 宏明 (Kouno, Hiroaki)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80234706

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：クォーク物質は、中性子星などの高密度天体などにおいて存在あるいは存在したと考えられる。理論的には、クォーク物質の研究は、格子量子色力学(LQCD)という計算機上の離散的4次元時空(格子)上のシミュレーションで解析される。粒子と反粒子のアンバランスがない場合については、LQCDによる計算方法がほぼ確立している。しかし、アンバランスが大きい場合は、符号問題と呼ばれる問題のために、信頼できる計算はほとんどない。この研究では、現実の物理的状況に対応しないが理論的に計算可能である実数アイソピン密度と虚数クォーク数密度がある場合の計算を実行し、そこから現実の中性子星の情報を引き出す試みを行った。

研究成果の概要(英文)：Quark matter is expected to exist in neutron stars. Theoretically, quark matter is studied by using the lattice quantum chromodynamics on the 4-dimensional discrete lattice in computer. The method is called "lattice QCD (LQCD)". When there is no unbalance between particle and antiparticle, the method of LQCD is almost established. However, due to the so called "sign problem", LQCD is not feasible when the number of particle is much larger than that of antiparticles. In this research, we have done the LQCD simulations under the situation with the real isospin and imaginary quark (or baryon) number chemical potentials. The LQCD under the situation does not correspond to the situation in real physical world, but is feasible, since the sign problem is absent. From the results of the simulations, we have tried to get information of the situation which is realized in neutron stars.

研究分野：原子核理論(理論核物理)

キーワード：格子量子色力学 中性子星 バリオン数 アイソスピン 虚数化学ポテンシャル 現象論模型

## 1. 研究開始当初の背景

(1) クォーク物質は、宇宙初期や高エネルギー原子核衝突、中性子星の内部などに存在あるいは存在したと考えられ、その研究は非常に重要である。理論的にはクォーク物質はクォーク間に働く強い相互作用の基本理論である量子色力学(QCD)を計算機上の離散的4次元空間(格子)上でシミュレーションする格子QCDを用いて行われる。クォーク数(バリオン数)密度が零の場合は、格子QCDの計算方法が確立しており、クォーク物質の状態方程式について多くの知見が得られている。

(2) しかし、有限のクォーク数化学ポテンシャルがある場合は、シミュレーションに使用するモンテカルロ計算の際に、確率分布関数が複素数になりインポートランス・サンプリングができなくなる問題が発生し、計算ができなくなる。この問題は符号問題と呼ばれる。

(3) この問題を回避する方法として、符号問題がおこらない純虚数のクォーク数化学ポテンシャル領域で計算を行い、その結果を実数化学ポテンシャル領域に解析接続する方法が研究されてきた。しかし、この方法は、転移がクロスオーバーの連続転移であれば有効であるが、実数クォーク数化学ポテンシャル領域で相転移のような非連続的な現象が起こると使えない。本研究の研究代表者を含むグループは、虚数クォーク数化学ポテンシャル領域の格子QCD計算を使って現象論モデルのパラメータを決定することで、実数有限クォーク数化学ポテンシャル領域において相転移が起こる場合についてもその解析ができる方法を提案した[引用文献]。

(4) さらに、本研究の研究代表者を含む研究グループは、虚数クォーク数化学ポテンシャルだけでなく、実数のアイソスピン化学ポテンシャルが同時に存在する場合も格子QCD計算が可能である事を見出した[引用文献]。

## 2. 研究の目的

中性子星内部は、クォーク数化学ポテンシャルだけでなく、アイソスピン化学ポテンシャルも存在する状況に対応する。そこで本研究では、虚数のクォーク数化学ポテンシャルと実数のアイソスピン化学ポテンシャルが同時に存在する場合の格子QCD計算を行いそこから中性子星内部の状況に対応する実数のクォーク数・アイソスピン化学ポテンシャルがある場合の状態方程式を導出し、中性子星内部物質の情報を引き出す事を試みた。

## 3. 研究の方法

(1) 符号問題がない虚数のクォーク数化学ポテンシャルと実数のアイソスピン化学ポテンシャルがある場合の格子QCD計算を行い、ゲージ場の配位を生成する。

(2) 得られたゲージ配位を用いて物理量の計算を行う。物理量としては、プラケット、ポリヤコフープ、クォーク数密度、アイソスピン数密度などの計算を行う。ただし、クォーク数密度については、この領域では純虚数になる。

(3) (2)で得られた結果を現象論モデルなどの結果や他の先行研究の格子QCD計算の結果と比較して、物理的に不自然な結果が出ていないか検討する。同時に解析に用いる現象論モデルがどの程度有効であるかも吟味する。

(4) 以上の吟味を経て、虚数クォーク数化学ポテンシャルと実数アイソスピン化学ポテンシャルがある場合の領域において、現象論モデルのパラメータをできるだけ精密に決定する。得られたパラメータを用いた現象論モデルによって中性子星内部の物質の状況に対応する実数クォーク数化学ポテンシャルと実数アイソスピン化学ポテンシャルのある状況における状態方程式の情報を得る。

(5) (2)で得られた結果を、従来の方法のように、単純な解析関数を用いて実数のクォーク数化学ポテンシャル領域に解析接続する方法も試みる。

(6) 実数アイソスピン化学ポテンシャルがある程度大きい場合は、中間子凝縮が起こると予測されるが、これについても知見を得る事を試みる。

(7) 上記と並行して、格子QCDの計算結果の解析に使用する現象論モデルの有効性の吟味およびその改良を逐次行う。

## 4. 研究成果

(1) 平成26年度においては、まず、連携研究者の中村純氏らが作成した格子QCDのプログラムを虚数クォーク数化学ポテンシャルと実数アイソスピン化学ポテンシャルが同時に存在する状況で大規模な計算が行える形に改造した。作成されたプログラムをテストランして、いくつかのパラメータ設定で計算を行い、配位数の生成やプラケット、ポリヤコフープの計算を行った。その結果、アイソスピン化学ポテンシャルがあまり大きくない領域では計算が順調にいったが、ある程度大きい領域では、計算時間が膨大になる事が判明した。このため、まずは、アイソスピン化学ポテンシャルがあまり大きくない領域について、大規模な計算を行う事にした。また、クォーク数密度の計算を試験的に行った。なお、使用した格子の大きさは空間方向が12であり、時間方向は4である。

(2) 平成27年度においては、前年度の結果を受けて、主に実数アイソスピン化学ポテンシャルがあまり大きくない状況で、かつ高温

である状況の計算を行った。虚数クォーク数化学ポテンシャルについては、それが零の場合を含めて全体で 16 の値についてまとめて並列計算を行った。実数アイソスピン化学ポテンシャルについては、それが零の場合を含めて、3つのパラメータ設定で行ったが、中間値のアイソスピン化学ポテンシャルでは、零の場合とあまり変わらない結果となったため、零およびアイソスピンの化学ポテンシャルが温度の 0.4 倍の場合を主に計算した。まず、ゲージ配位の生成を行い、物理量としてプラケット、ポリヤコフープ、クォーク数密度、アイソスピン数密度を計算した。零アイソスピン化学ポテンシャルの結果は先行研究と整合的な結果である事が確認された。また、高温の結果は、発表雑誌論文で決定されたパラメータの Polyakov-loop 拡張された南部・ヨナ・ラシニオ (PNJL) 模型でよく再現できる事がわかった。

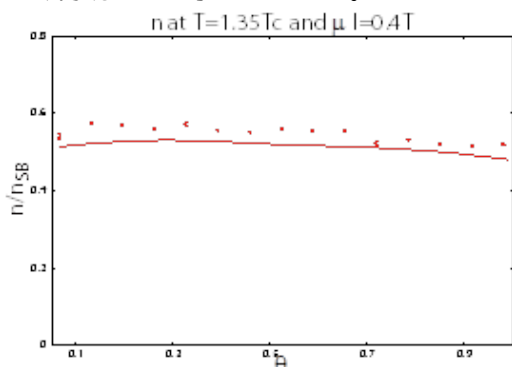


図 クォーク数密度の 依存性

は、無次元化された虚数クォーク数化学ポテンシャル。クォーク数密度もステファン・ボルツマン極限で規格化・無次元化されている。温度は  $T=1.35T_c$ 、アイソスピン化学ポテンシャルは  $\mu_1=0.54T_c$  で、非閉じ込め転移の擬臨界温度は  $T_c=171\text{MeV}$  である。点は格子 QCD の結果、線は PNJL 模型の結果。

(3) 平成 28 年度においては、主に中間密度以下の格子 QCD 計算を行った。低温においては、ゲージ配位の生成が高温にくらべると時間がかからないので、いくつかの温度パラメータでの計算を行った。物理量としては、前年度に引き続きプラケット、ポリヤコフープ、クォーク数密度、アイソスピン数密度の計算を行った。得られた結果を現象論模型の結果と比較したが、中間温度・低温では現在の PNJL 模型では結果をうまく再現できなかった。しかし、これは格子 QCD 計算に問題があるというより、現在の PNJL 模型にはバリオンの自由度が取り込まれていない事によると考えられる。発表雑誌論文でその有効性を吟味したハイブリッド型の模型が必要と考えられる。ただし、現状のハイブリッド模型では高密度領域の拡張に限界があるので、現象論模型のさらなる改良を進める必要がある。また、発表雑誌論文でその有効性

を吟味したような 2 相型の模型も有用である。また、特に前年度の高温の結果において、計算値にややふらつきがあり、単純な解析関数による解析接続が行えなかったため、配位数をさらに増やす追加の計算を行った。

(4) [まとめ] 虚数クォーク数化学ポテンシャルと実数アイソスピン化学ポテンシャルが同時に存在する場合の格子 QCD 計算を行った。これは研究代表者が知る限りにおいては世界で初めての計算結果である。高温の結果は現状の現象論模型 (PNJL 模型) によってうまく再現できる。しかし、中間温度以下については、同じ模型ではうまく説明ができないため、現象論模型の改良が必要である。しかし、現状でも高温がうまく説明ができたので、発表雑誌論文で使用したような 2 相模型を用いた中性子星の解析はかなりの程度有効であると考えられる。これらの結果については、「5. 主な発表論文等」で示すように、雑誌論文、学会発表等で適宜発表を行ってきた。未発表の結果についても、データの整理が終わり次第逐次発表を行う予定である。

(5) [今後の展望] 今後は、QCD 相図の広い範囲で使用できる現象論模型を構築し、そのパラメータを格子 QCD 計算によってできるだけ精密に決定していく事が必要となる。また、現状では、アイソスピン化学ポテンシャルが大きい場合出現する 中間子凝縮の解析はできなかった。この問題の解析には、プログラムや計算方法を根本から大幅に改良する必要があると思われる。また、現状の格子 QCD 計算はウィルソン・フェルミオンを使用しているため、カイラル凝縮については信頼のおける結果が得られないので、カイラル対称性の回復についての議論は行わなかった。この方面の解析についてもプログラムの大幅改善が必要である。単純な解析関数による解析接続については、配位数の増加作業が終わり次第行う予定である。

#### <引用文献>

Y. Sakai et al., Phys. Rev. D **79**, (2009), 096001.

H. Kouno et al, Phys. Rev. D **85**, (2012) 016001.

#### 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 8 件)

宮原 昌久、鳥越 悠平、河野 宏明、八尋 正信、Equation of state and transition temperatures in the quark-hadron hybrid model, Physical Review D、査読有、94 巻、No.1、2016、016003(1)-016003(10)

DOI:10.1103/PhysRevD.94.016003

菅野 淳平、河野 宏明、八尋 正信、  
Determination of hadron-quark phase  
transition line from lattice QCD and  
two-solar-mass neutron star observations,  
Physical Review D、査読有、94 巻、No.1、  
2016、014024(1)-014024(9)

DOI:10.1103/PhysRevD.94.014024

開田 寛文、河野 宏明、高橋 純一、  
八尋 正信、Interplay between sign problem  
and  $Z_3$  symmetry in three dimensional Potts  
models、Physical Review D、査読有、94 巻、  
No.1、2016、014011(1)-014011(13)

DOI:10.1103/PhysRevD.94.014011

河野 宏明、柏 浩司、高橋 純一、三  
角 樹弘、八尋 正信、Understanding QCD at  
high density from a  $Z_3$ -symmetric QCD-like  
theory、Physical Review D、査読有、93 巻、  
No.5、2016、056009(1)-056009(10)

DOI:10.1103/PhysRevD.93.056009

石井 優大、米村 浩司、高橋 純一、  
河野 宏明、八尋 正信、Determination of  
 $U(1)_A$  restoration from pion and  $a_0$ -meson  
screening masses: Toward the chiral regime、  
Physical Review D、査読有、93 巻、No.1、  
2016、016002(1)-016002(11)

DOI:10.1103/PhysRevD.93.016002

牧山 隆洋、境 祐二、斎藤 卓也、石  
井 優大、高橋 純一、柏 浩司、河野 宏  
明、中村 純、八尋 正信、Phase structure  
of two-color QCD at real and imaginary  
chemical potentials: Lattice simulations  
and model analyses、Physical Review D、  
査読有、93 巻、No.1、2016、  
014505(1)-014505(18)

DOI:10.1103/PhysRevD.93.014505

高橋 純一、河野 宏明、八尋 正信、  
Quark number densities at imaginary  
chemical potential in  $N_f=2$  lattice QCD  
with Wilson fermions and its model  
analyses、Physical Review D、査読有、91  
巻、No.1、2015、014501(1)-014501(11)

DOI:10.1103/PhysRevD.91.014501

菅野 淳平、高橋 純一、石井 優大、  
河野 宏明、八尋 正信、Determination of  
the strength of the vector-type four quark  
interaction in the entanglement  
Polyakov-loop extended Nambu-  
Jona-Lasinio model、Physical Review D、  
査読有、90 巻、No.3、2014、  
037901(1)-037901(5)

DOI:10.1103/PhysRevD.90.037901

〔学会発表〕(計 8 件)

河野 宏明、虚数化学ポテンシャルと実  
数アイソスピン化学ポテンシャルが存在す  
る場合の格子 QCD 計算、平成 28 年度  
SX-ACE@RCNP 成果報告・進捗状況報告会、2016  
年 3 月 21 日、大阪大学核物理研究センター  
(大阪府吹田市)

河野 宏明、格子量子色力学を使った高  
密度物質の研究、平成 28 年度 公募型利用  
制度成果報告会、2016 年 3 月 15 日、大阪大  
学サイバーメディアセンター(大阪市吹田  
市)

河野 宏明、高橋 純一、石井 優大、  
菅野 淳平、宮原 昌久、八尋 正信、中村  
純、格子 QCD を使った中性子星内物質の探求  
II、第 122 回日本物理学会九州支部例会、2016  
年 12 月 10 日、福岡大学(福岡県福岡市)

河野 宏明、高橋 純一、石井 優大、  
菅野 淳平、宮原 昌久、八尋 正信、中村  
純、格子 QCD を用いた非対称有限密度物質の  
研究 III、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016  
年 9 月 23 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)

河野 宏明、高橋 純一、石井 優大、  
菅野 淳平、宮原 昌久、八尋 正信、中村  
純、格子 QCD を用いた非対称有限密度物質の  
研究 II、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015  
年 9 月 26 日、大阪市立大学(大阪府大阪市)

河野 宏明、高橋 純一、石井 優大、  
菅野 淳平、米村 浩司、宮原 昌久、八尋  
正信、中村 純、格子 QCD を用いた非対称有  
限密度物質の研究、日本物理学会第 70 回年  
次大会、2015 年 3 月 24 日、早稲大学(東京  
都新宿区)

河野 宏明、高橋 純一、米村 浩司、  
石井 優大、菅野 淳平、八尋 正信、中村  
純、格子 QCD を使った中性子星内物質の探求、  
第 120 回日本物理学会九州支部例会、2014 年  
12 月 6 日、崇城大学(熊本県熊本市)

河野 宏明、高橋 純一、石井 優大、  
菅野 淳平、米村 浩司、八尋 正信、中村  
純、実数アイソスピン数密度化学ポテンシ  
アルかつ虚数バリオン数密度化学ポテンシ  
アル領域における格子 QCD 計算、日本物理学会  
2014 年秋季大会、2014 年 9 月 20 日、佐賀大  
学(佐賀県佐賀市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河野 宏明 (Kouno, Hiroaki)  
佐賀大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 80234706

(3)連携研究者

八尋正信 (Yahiro, Masanobu)

九州大学理学研究科・教授

研究者番号：40300537

中村 純 (Nakamura, Atsushi)

大阪大学核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：30130876