

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05446

研究課題名(和文) Z3対称性に着目した有限密度での格子量子色力学の計算

研究課題名(英文) Lattice simulations of Z3 symmetric QCD at finite chemical potential

研究代表者

河野 宏明 (Kouno, Hiroaki)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：80234706

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、有限化学ポテンシャルにおいて、Z3対称な量子色力学(QCD)の格子シミュレーションを行った。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の非摂動的な計算方法として、計算機上に設定した離散的な格子空間でシミュレーションを行う方法が発展している。零温度や有限温度では格子QCDで成功をおさめている。しかし、有限密度の状況では、格子QCDは符号問題という難問のためにうまく計算できない。一方、Z3対称性があれば、符号問題は軽減されることが予測されている。この研究では、Z3対称なQCDにおいて位相クエンチ近似において有限化学ポテンシャルでの計算を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

格子QCDの計算は有限のクォーク化学ポテンシャルの状況においては符号問題と呼ばれる問題のためにうまく計算できていない。一方、通常のQCDにないZ3対称性があるようなQCDを考えると、符号問題が軽減されることがQCDの有効モデルなどから予測されている。そのようなZ3対称性があるQCDは零温度では通常のQCDに一致するので、低温におけるZ3対称なQCDの格子計算をする事で、原子核や中性子星などの零温度近傍のQCD物理を解明する事ができる。この研究では、位相クエンチ近似のもとであるが、Z3対称なQCDの格子シミュレーションを行う事に成功した。これは、世界でも初めての計算であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The Z3 symmetric QCD was studied at finite chemical potential using the lattice simulation under the phase quenched approximation. It is well known that the lattice QCD simulation is not feasible at finite quark chemical potential due to the well-known "sign problem". On the other hand, it was suggested that the sign problem may be milder in the Z3 symmetric QCD. The Z3 symmetric QCD approaches to the ordinary QCD in the low temperature limit. Therefore, the lattice simulation study of Z3 symmetric QCD is very important. In this study, the lattice QCD simulation of Z3 symmetric QCD was done at finite chemical potential using the phase quenched approximation.

研究分野：原子核理論(理論核物理)

キーワード：量子色力学 格子シミュレーション 有限温度 有限化学ポテンシャル Z3対称性 符号問題

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の素粒子物理学では、物質を構成する基本的な粒子はクォークであると考えられている。通常の状態では、クォークは陽子や中性子などのバリオンや中間子の中に閉じ込められており、単体で取り出す事はできない。これをクォークの閉じ込めと呼ぶ。これはクォークの間に強い相互作用が働き、クォークを単体で分離するためには、無限のエネルギーが必要になるためと考えられる。強い相互作用は、ゲージ粒子の一種であるグルーオンによって媒介され、その基本的な理論は量子色力学(QCD)である。クォークの閉じ込めは QCD の非摂動的な性質であると考えられている。また、クォークは、本来軽い粒子であるが、通常の状態では、クォークはバリオンの3分の1程度の素粒子としては大きな質量を持っている。この現象はカイラル対称性の自発的破れと呼ばれる。カイラル対称性の自発的破れも QCD の非摂動的な性質であると考えられている。これらの非摂動的な性質の説明には、場の理論でよく使われる摂動論は有効でない。

(2) QCD の非摂動的な計算を行う方法として、計算機上に離散的な格子空間を設定し、格子点上にクォークの場、格子辺上にグルーオンの場をおいて数値シミュレーションを行う格子 QCD の手法が発達している。格子 QCD は、零温度におけるクォークの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れを説明し、高温においてはクォークのハドロンからの開放(非閉じ込め転移)を预言する。そのような非閉じ込め転移は初期宇宙や超高エネルギーの原子核衝突実験で存在した(する)と考えられる。一方、クォークと反クォークの数にアンバランスが生じている有限化学ポテンシャルのある状態の QCD 物理は、原子核や中性子星内部などに対応すると考えられるが、この領域においては符号問題という計算上の難問のために信頼できる結果が得られていない。

(3) 通常の QCD では、純グルーオン理論で存在する Z3 対称性とよばれる対称性が失われている。この対称性は、クォークの閉じ込めに関係するとされるが、動的なクォークが存在すると明白に破れてしまう。近年、Z3 対称性を保つような QCD が提唱された [文献 ]。Z3 対称な QCD は、低温では通常の QCD に近づく。また、QCD の有効理論を使った研究から、Z3 対称な QCD では、符号問題がゆるやかになる事が予測され [文献 ]、Z3 対称性を保つ事により、低温における符号問題を回避する方法が提唱された [文献 ]。一方、零化学ポテンシャル領域において、Z3 対称な格子 QCD シミュレーションが実行され、有効モデルの結果と整合的な結果が得られた [文献 ]。

### 2. 研究の目的

上述のように、零化学ポテンシャルにおいては、Z3 対称な QCD の格子シミュレーションがなされて、現象論モデルの予言と整合的な結果が得られているが、有限化学ポテンシャルのもとでは、シミュレーションは行われていない。そこで、この研究では、有限化学ポテンシャルのもとでの Z3 対称な QCD の格子シミュレーションを行い、この領域における QCD の性質を調べ、現象論的なモデルと比較することで、符号問題を解決する足掛かりとし、さらにそこから原子核や中性子星内部をさぐるための準備とする。

### 3. 研究の方法

(1) 格子 QCD のシミュレーションを行い、必要なゲージ配位を生成する。計算機上に 4 次元の格子空間を設定し、格子点上にクォーク場を、辺上にグルーオン(ゲージ)場を配置する。そこで統計力学の大正準分布の分配関数に対応するゲージ配位を生成する。ゲージ配位の生成は、ハイブリッド・モンテカルロ法を用いる [文献 ]。すなわち、クォーク場を積分した後、擬フェルミオン場で書き換え、擬フェルミオン場とグルーオン場の理論において、仮想時間についての発展方程式を作り、それを発展させてゲージ場を生成し、最後にモンテカルロ法を用いて配位受け入れの可否を判定する。

(2) 配位作成は、Z3 対称な格子 QCD とそれと比較対照する通常の格子 QCD に関して行う。通常の QCD に関しては、一般公開されている Lattice QCD Tool Kit [文献 ] のプログラムを使用し、Z3 対称な格子 QCD に関しては、Lattice QCD Tool Kit のプログラムを 3 重化して使うことにより、Z3 対称化して使用した。シミュレーションの数値計算には、大阪大学 CMC、RCNP の大型計算機 SX-ACE を使用した。

(3) 有限化学ポテンシャルの領域では、符号問題があるので、位相クエンチ近似を用いて、配位の生成を行う。

(4) 得られた配位をもとに、物理量の計算を行う。物理量としては、ゲージ場のブラケット、ポリヤコフープ、粒子数である。Lattice QCD Tool Kit では、格子 QCD のフェルミオン場として、Wilson fermion を使用している事、計算時間の関係から現実より重いクォーク質量を使っているなどの理由から、カイラル凝縮などの計算は行わなかった。

(5) 得られた結果は、現象論模型・有効模型の結果と逐次比較する。そのために、現象論模型・有効模型の研究・改良・精密化も研究する。また、格子計算の計算効率・速度の向上のための研究や得られたデータの解析方法についての研究も行う。

#### 4. 研究成果

(1) 大阪大学の大型計算機 SX-ACE 上で、零化学ポテンシャルの領域での格子 QCD の数値シミュレーションを実行し、ゲージ配位を生成した。格子の大きさは、空間方向が 8、時間方向が 4 である。Z3 対称な格子 QCD とそれと対比する通常の格子 QCD の計算を行った。温度  $T$  としては、零化学ポテンシャルでの擬臨界温度を  $T_c$  として、 $T/T_c=0.82 \sim 4.02$  のパラメータについて行った。得られた配位数は、それぞれのパラメータに対して 10000 から 40000 程度である。

(2) (1) で生成された配位を使って、ゲージ場のブラケットや、ポリヤコフループの計算を行った。得られた結果は、現象論模型・有効模型の予測や零化学ポテンシャルでの先行する Z3 対称な格子 QCD 計算と整合的である事が確かめられた。通常の QCD では、温度の増加にともなって、ポリヤコフループが連続的なクロスオーバー転移の形で増加し、低温の閉じ込め相から高温の閉じ込め相に移るが、Z3 対称な QCD の場合は、非連続な転移の形で閉じ込め相から非閉じ込め相に移る事がわかった。

(3) 大阪大学の大型計算機 SX-ACE 上で、有限化学ポテンシャルの領域での格子 QCD の数値シミュレーションを位相クエンチ近似のもとで実行し、ゲージ配位を生成した。格子の大きさは、空間方向が 8、時間方向が 4 である。Z3 対称な格子 QCD とそれと対比する通常の格子 QCD の計算を行った。温度としては、 $T/T_c=0.82 \sim 2.60$  のパラメータについて行った。化学ポテンシャル  $\mu$  の値の範囲は、 $\mu/T=0.5 \sim 4.0$  である。得られた配位数は、それぞれのパラメータに対して 10000 から 40000 程度である。

(4) (3) で生成された配位を使って、ゲージ場のブラケットや、ポリヤコフループの計算を位相クエンチ近似のもとで行った。得られた結果は、現象論模型・有効模型の予測と整合的である事が確かめられた。通常の QCD では、 $\mu=T$  程度であれば、温度の増加にともなって、ポリヤコフループが連続的なクロスオーバー転移の形で増加するが、Z3 対称な QCD の場合は、図のように零化学ポテンシャルの時と同様にポリヤコフループの絶対値が温度の増加と共に急激に大きくなる事がわかった。

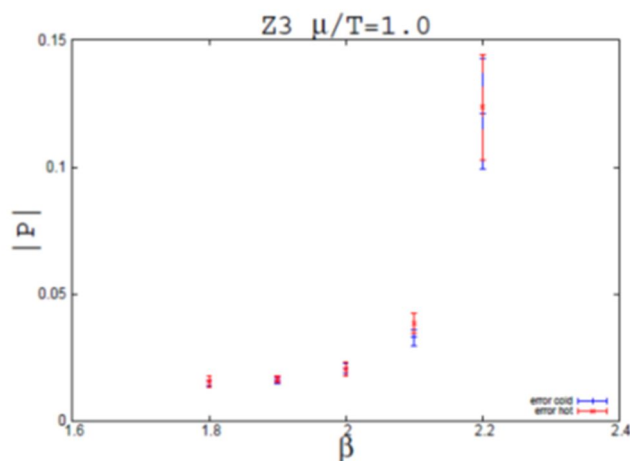


図  $\mu=T$  におけるポリヤコフループの絶対値の温度依存性。  $\beta$  は温度と関連するパラメータ。  $\beta$  が増加すると温度が増加する。Z3 対称な格子 QCD の結果。

(5) (3) で生成された配位を使って、粒子数密度の計算を位相クエンチ近似のもとで行った。同じ温度で化学ポテンシャルがある値を超えて増加すると、粒子数密度が急激に増加する事がわかった。この計算は位相クエンチ近似の計算であり、上記の粒子密度はクォーク数密度というより、アイソスピン密度と同様のものとなっているが、Z3 対称な QCD では、作用の虚部が小さいので、クォーク数密度でも似たような傾向があると考えられる。今後は、再重み法による計算を進展させたい。

(6) これらの格子 QCD 計算と並行して、それと比較対照させる現象論模型・有効模型の研究・改良も行った。また、格子計算の計算効率・速度の向上のための研究や得られたデータの解析方法についての研究も行った。

以上の結果は、報告書に記載している学術論文・学会等で逐次発表した。また、まだ未整理の計算結果については、今後学術論文や学会で発表していく予定である。

(7) 今後の展望。今後は、再重み法による再重み法因子の計算や、物理量の計算により、符号問題が具体的にどの程度改善できるかを解析したい。また、得られた結果を、原子核・中性子星の内部物質などに適用していく方法を検討していきたい。

<引用文献>

Hiroaki Kouno, Yuji Sakai, Takahiro Makiyama, Kouhei Tokunaga, Takahiro Sasaki and Masanobu Yahiro, Quark-gluon thermodynamics with the Z<sub>Nc</sub> symmetry, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 39 巻, 2012, 85010(21pages).

Hiroaki Kouno, Kouji Kashiwa, Junichi Takahashi, Tatsuhiro Misumi and Masanobu Yahiro, Understanding QCD at high density from a Z<sub>3</sub>-symmetric QCD-like theory, Physical Review D, 93 巻, 2016, 056009(10pages).

Takehiro Hirakida, Hiroaki Kouno, Junichi Takahashi and Masanobu Yahiro, Interplay between sign problem and Z<sub>3</sub> symmetry in three-dimensional Potts models, Physical Review D, 94 巻, 2016, 014011(13pages)

Takumi Iritani, Etsuko Itou, Tatsuhiro Misumi, Lattice study on QCD-like theory with exact center symmetry, Journal of High Energy Physics, 11 巻, 2015, 159(22pages).

青木慎也、格子上の場の理論、第 12 章、シュプリンガー・フェアークラーク東京株式会社、2005 年。

S. Choe, 中村純、野中千穂、室谷心、Lattice QCD Tool Kit in Fortran90, 素粒子論研究、108 巻、2003、1-43.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirakida T, Itou E, Kouno H	4. 巻 2019
2. 論文標題 Thermodynamics for pure SU(2) gauge theory using gradient flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033B01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hirakida T, Itou E, Kouno H	4. 巻 2018
2. 論文標題 Thermodynamics for SU(2) pure gauge theory using gradient flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory-LATTICE2018	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Junpei Sugano, Hiraoki Kouno, Masanobu Yahiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Properties of 2+1 flavor QCD in the imaginary chemical potential region: A model approach	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014028-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.014028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takehiro Hirakida, Junpei Sugano, Hiroaki Kouno, Junichi Takahashi, Masanobu Yahiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Sign problem in a Z3-symmetric effective Polyakov-line model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074031-1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.074031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyahara Akihisa, Ishii Masahiro, Kouno Hiroaki, Yahiro Masanobu	4. 巻 32
2. 論文標題 Crossover-model approach to QCD phase diagram, equation of state and susceptibilities in the 2+1 and 2+1+1 flavor systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 1750205(1~24)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X17502050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Masahiro, Miyahara Akihisa, Kouno Hiroaki, Yahiro Masanobu	4. 巻 99
2. 論文標題 Extrapolation for meson screening masses from imaginary to real chemical potential	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114010 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.114010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kashiwa Kouji, Kouno Hiroaki	4. 巻 100
2. 論文標題 Roberge-Weiss periodicity, canonical sector, and modified Polyakov loop	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 094023 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.094023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroaki Kouno	4. 巻 48
2. 論文標題 Z3-symmetric lattice QCD simulations at finite chemical potential	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 佐賀大学理工学部集報	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyahara Akihisa, Ishii Masahiro, Kouno Hiroaki, Yahiro Masanobu	4. 巻 101
2. 論文標題 Hadron-quark hybrid model reliable for equations of state with $\mu_B < 400 \text{ MeV}$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 076011 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.076011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirakida Takehiro, Kashiwa Kouji, Sugano Junpei, Takahashi Junichi, Kouno Hiroaki, Yahiro Masanobu	4. 巻 35
2. 論文標題 Persistent homology analysis of deconfinement transition in effective Polyakov-line model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 2050049 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X20500499	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 河野宏明、開田丈寛、菅野淳平
2. 発表標題 Z3対称性のある格子QCD計算と現象論模型
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会、大分大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河野宏明
2. 発表標題 Z3対称な量子色力学における格子シミュレーション
3. 学会等名 平成30年度公募型利用制度成果報告会、大阪大学サイバーメディアセンター
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野宏明、開田丈寛、管野淳平
2. 発表標題 Z3対称性と格子QCD計算
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会、九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 開田丈寛、柏浩司、河野宏明、管野淳平、高橋純一、八尋正信
2. 発表標題 Persistent homologyを用いた閉じ込め相と非閉じ込め相の解析
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会、大分大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 開田丈寛、大野晃、管野淳平、高橋純一、柏浩司、河野宏明、八尋正信
2. 発表標題 純SU(3)ゲージにおけるpersistent homology解析
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会、九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野晃、開田丈寛、管野淳平、柏浩司、河野宏明
2. 発表標題 純ゲージ理論におけるPolyakov loopのパーシステントホモロジー解析
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会、大分大学
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 河野宏明
2. 発表標題 中心対称性と符号問題
3. 学会等名 Kyoto Meeting 2017 summer、京都大学
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 開田丈寛、管野淳平、河野宏明、高橋純一、八尋正信
2. 発表標題 Effective Polyakov-line modelにおける符号問題
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会、宇都宮大学
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河野宏明、開田丈寛、管野淳平、高橋純一、八尋正信
2. 発表標題 ランダムウォーク理論を使った符号問題の解析
3. 学会等名 第123回日本物理学会九州支部例会、鹿児島大学
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河野宏明
2. 発表標題 虚は実なり-虚数化学ポテンシャルの世界-
3. 学会等名 研究会「これまでの原子核物理学の潮流と今後の展望」、九州大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 開田丈寛、河野宏明、高橋純一、八尋正信
2. 発表標題 有限密度におけるZ3-QCDの格子計算
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会、山形大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永良訓人、河野宏明
2. 発表標題 QCD転移を記述する有効模型
3. 学会等名 第125回日本物理学会九州支部例会、佐賀大学
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	中村 純  (Nakamura Atsushi)  (30130876)	大阪大学・核物理研究センター・協同研究員   (14401)	
連携研究者	八尋 正信  (Yahiro Masanobu)  (40300537)	九州大学・理学(系)研究科(研究院)・教授   (17102)	