

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03875

研究課題名（和文）低温高密度領域における2カラーQCDの相図と超流動性の解明

研究課題名（英文）Phase diagram and superfluidity of two-color QCD in the low-temperature high-density regime

研究代表者

伊藤 悦子 (Itou, Etsuko)

国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・上級研究員

研究者番号：50432464

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：2カラーQCDの有限密度系を格子シミュレーションを用いて調べ、QCD型理論の有限温度での新しい現象を発見した。特に研究が困難な低温高密度領域を中心に、まずその相図を調べた。密度を上げると、ハドロン相、ハドロニックマター相、超流動相が存在し、超流動相には「ボーズアインシュタイン凝縮相」と「BCS相」があることもわかった。また、グラディエントフロー法を用いてトポロジカル電荷を調べ、高密度領域でもトポロジカル感受率が比較的大きいという新しい結果を得た。さらに、熱力学量（エネルギーや圧力）の密度依存性も調べ、BCS相で音速がコンフォーマル極限の値( $c/\sqrt{3}$ )を超えるという新しい知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3カラーの低温高密度QCDは、中性子星の内部で実現されていると考えられており、その性質の解明は宇宙・原子核・素粒子分野において大きな課題となっている。また、そこではQCDの物質は、超流動状態になっていると考えられており、物性としても興味深い。しかしながら、理論的には格子QCDの第一原理計算が付合問題により実行不可能である。我々は、カラーの自由度を一つ落として符号問題の生じない理論で第一原理計算をおこなった。2カラーQCDは少なくともゼロ密度で3カラーと同じ性質を持つ。我々のいくつかの新しい結果は3カラーの高密度現象にさまざまな制限を与え、その理解への足掛かりとなった。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the finite-density regime of 2-color QCD using lattice simulations and discovered new phenomena in the finite-temperature regime of QCD-like theories. We focused on the challenging region of low-temperature and high-density and first examined its phase diagram. As the density increases, we found the existence of the hadron phase, hadronic-matter phase, and superfluid phase. Within the superfluid phase, we also identified the presence of the Bose-Einstein condensate phase and the BCS phase. Furthermore, by using the gradient flow method, we explored the topological charge and obtained novel results indicating a relatively large topological susceptibility even in high-density regions. Furthermore, we investigated the density dependence of thermodynamic quantities such as energy and pressure, revealing a new finding that the speed of sound exceeds the value of the conformal limit ( $c/\sqrt{3}$ ) in the BCS phase.

研究分野：素粒子理論

キーワード：有限密度QCD QCDの状態方程式 QCD相図 第一原理計算

## 1. 研究開始当初の背景

核力などの強い力が支配的な系のミクロな振る舞いを記述する量子色力学(QCD)は、第一原理計算である格子シミュレーションによる数値的研究により、現実のハドロン質量の再現や、有限温度相転移の定性的・定量的振る舞いの解明において成功をおさめてきた。この格子理論の手法は、知られている唯一の非摂動的かつゲージ不変な定式化であり、理論的研究と実験結果の強い架け橋ともなっている。

しかしながら、これらの成功は、物質が存在することによる有限密度効果を見捨てる場合に限られている。有限密度下における QCD の振る舞いは、中性子星や加速器実験における現実の物理系として存在しているにも関わらず、理論的な理解はもとより、現象論的にも未だよく分かっていない。その主な理由は、上記の第一原理計算である格子シミュレーションには、有限密度にすると「符号問題」という本質的な困難があり、未だに完全な定式がないためである。

## 2. 研究の目的

研究の目標は、現実の QCD を記述する SU(3)ゲージ理論の Toy Model である「SU(2)ゲージ理論 (2カラーQCD) の有限温度・有限密度系」を格子シミュレーションで調べ、その相図の決定、さらには各相における系の性質を解明し、現実の有限温度・有限密度 QCD に対する知見を得る事である。

SU(2)ゲージ理論は、紫外領域では漸近的自由性があり、また(密度効果を見捨けた際の)低エネルギー領域では閉じ込めやカイラル対称性の自発的の破れという非摂動的性質を持つ。これは現実の QCD と同じである。一方で、有限密度 2 カラー QCD 理論は、前述の「符号問題」がないため、格子計算が実現可能である。近似を使わない**第一原理計算**を用いて相図の決定と各相における物理量の計算を行い、**相転移現象や各相の性質を解明することができる**。我々は、これに注目し**有限密度領域で物理量を調べる計算方法を発展させる**。特にこれまで研究が困難であった「**低温高密度領域**」を中心に調べ、そこで実現されていると思われる「**超流動相**」の**性質の解明**に挑む。

## 3. 研究の方法

前述のように、現実の QCD を記述する SU(3)ゲージ理論に対しては、有限密度下を実現する第一原理計算は符号問題が未だ完全には解決せず、広い温度と化学ポテンシャルの値での相構造に関する研究は実現不可能であるといえる。一方で、ゼロ化学ポテンシャルでは QCD と類似の非摂動的性質を持つ、SU(2)ゲージ理論にはこの符号問題がなく、第一原理計算が可能である。一方で、符号問題のない SU(2)ゲージ理論においても、低温高密度領域の第一原理計算は困難であることが知られている。その理由は、フェルミオンの化学ポテンシャル( $\mu$ )が最も軽いハドロンの質量( $m_{\text{PS}}$ )の半分を超えると、ダイナミカルにフェルミオン-反フェルミオンの対生成・対消滅が激しく起こり、シミュレーションが不安定になる事にある。

今回の研究では、連続極限に近くなるように改良された「岩崎ゲージ作用」と、「ウィルソン格子フェルミオン」を用いた格子作用を用いてシミュレーションを実行した。さらに、**高密度領域のシミュレーションの不安定性を回避するため、作用に「ダイクォーク源」の項を作用に導入した**。これによって、**超流動相の第一原理計算が実行可能となった**。ここまでが本研究期間の前に準備できていた。この方法で、**低温高密度領域まで格子 QCD の配位生成が可能となったので**、本研究期間中に、配位生成の計算を進めながら以下の物理について調べた。

### (1) 相図の決定

密度がほぼゼロの時にカイラル対称性の相転移温度を  $T_c$  とする。温度が  $T_c$  くらいの時と、 $T_c/2$  くらいの時の 2 つの温度で密度を変えた時の相構造を調べる。相を区別する秩序変数としては、閉じ込めの秩序変数としてポリヤコフープ、超流動性の秩序変数であるダイクォーク凝縮、BEC-BCS を区別するのにクォーク数密度演算子の期待値を調べる。

### (2) トポロジカル電荷の密度依存性

高密度極限では、クォーク同士が近いために漸近自由性からクォークは自由場のように振る舞うと期待されている。一方で、グルオン場の非摂動的性質はどうか見るのに、トポロジカル電荷(インスタントン電荷)を調べることにした。方法としては、グラディエントフロー法を用いて、グルオニックな定義で各配位のインスタントン電荷を計算する。

### (3) 温度スケールの決定

2カラーQCDでもカイラル対称性の自発的破れ(回復)が有限温度で起こることが知られている。この転移温度( $T_c$ )を物理的なレファレンススケールとするための研究が必要となる。そのため、我々の格子セットアップで $T_c$ を求め、さらに、異なる $\beta$ におけるシミュレーションにおいて、実際の格子サイズと温度の関係をつけるため、格子上の結合定数( $\beta$ )と格子間隔( $a$ )の間の対応(スケール設定関数)を求める。そのために、スケール設定関数を決めるためのレファレンススケールとしては、グラディエントフロー法を用いる。この手法では、質量次元 $-2$ を持つ仮想的なフロー時間( $t$ )と格子上でのエネルギー密度( $E$ )から無次元量 $t^2\langle E \rangle$ を測定し、これが一定となるフロー時間を各 $\beta$ に対して求める。 $t^2\langle E \rangle$ 一定のラインを与える $t/a^2$ の値の比から、格子間隔の比を求める。

### (4) 状態方程式

密度領域の状態方程式を決定する。我々は新たなfixed scale法を考えだした。基本的な熱力学量を得るために、内部エネルギー( $e$ )と圧力( $p$ )が必要となる。そのためにまずはベータ関数とエネルギー運動量テンソルのトレースで描かれる、トレースアノマリー( $e-3p$ )を求める。ここで、**ベータ関数も格子シミュレーションを使って非摂動的に行うのは、これまでどのグループもやっていないので、我々は(3)の研究を元に、ここを実行する。**さらに、圧力は十分平衡な無限体積極限で自由エネルギーと近似できることを使って、クォーク数密度の期待値の積分として計算する。この2つによって得られた、 $e$ と $p$ の密度依存性から最終的に状態方程式の一次微分係数に当たる、音速( $c_s^2/c^2 = \partial p / \partial e$ )を求め、状態方程式の微妙な振る舞いを精査する。

### (5) ハドロンの質量スペクトル

ゼロ密度のQCD(型)理論では、擬スカラーメソンであるパイオンが最も軽い。これはQCD不等式によって示すことができる。しかし、有限密度領域ではガンマ5エルミート性が破れるため、QCD不等式が成り立たず、擬スカラーメソンが最も軽い状態になるとは限らない。実際に、先行研究ではまだ格子サイズが小さかったり統計数が不十分で誤差が大きかったりするものの、高密度領域ではベクトルメソンやアイソスカラーダイクォークが、擬スカラーメソンより軽くなることが示唆されている。本研究では、 $32^4$ の配位を生成し、ハドロン(メソン、バリオン)の相関関数を測定する。そのスロープから各ハドロンの質量を読み取り、密度依存性を明らかにする。

### (6) フラックスチューブの密度依存性

閉じ込めに深く関係するカラーフラックスチューブの温度・密度依存性を調べる。具体的には、カラー源としてのクォーク・反クォークに対応するウィルソンループまたはポリヤコフループとプラケットの相関関数を測定する。これにより、低温における(3-2)の閉じ込めありの状態と、(3-3)の閉じ込めなしの状態が存在するか、またあるとすればその間は相転移をするのか、クロスオーバーなのかを明らかにする。

## 4. 研究成果

(1)相図の決定と(3)温度スケールの決定の研究から、温度( $T=0.79T_c$ と $T=0.39T_c$ )の相図として図1を得た。

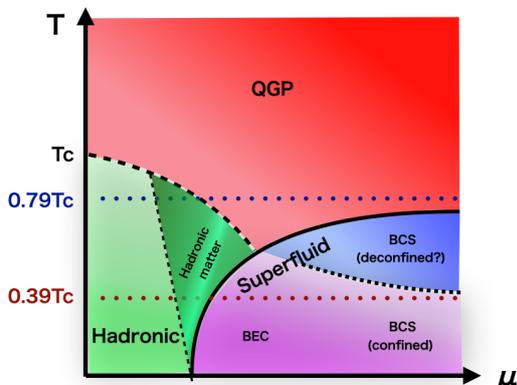


図1: 2カラーQCD相図  
(主に成果論文[1, 4]に基づく)

- ① 高温領域にはクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相
  - ② 低温低密度領域にはハドロン相、
  - ③ 低温高密度領域には超流動相、  
さらに、この超流動相には、中間密度領域にボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)相と、高密度領域にBCS相(閉じ込めあり)があると分かった。  
また、同じ時期に国外のいくつかの研究グループもこの相図を調べており、超流動相の少し高温領域には、閉じ込めのないBCS相もあることがわかってきている。
- 現実の3カラーQCDのQCD相図は未だ予想図でしかないが、2カラーQCDに関してはこの数年で第一原理計算による決定がされつつある。

また、格子シミュレーションが難しい、質量ゼロの2カラーQCDに対して、アノマリーマッチングから有限温度密度相図に対する制限を得た。それによると、超流動相/QGP 相転移の温度は、閉じ込め・非閉じ込めの温度以上になるべき、という条件が得られ、これは格子シミュレーションで得られた図1と無矛盾であることもわかった(成果論文[3])。

(2)トポロジカル電荷の密度依存性の研究から、 $T_c$ より低い2つの温度を調べると、温度により現れる相やトポロジカル感受率( $\chi Q$ )の密度依存性も異なると分かり、低温高密度領域の豊かな相構造を得た。特に $T=0.39T_c$ のハドロン $\rightarrow$ ハドロニックマター $\rightarrow$ BEC $\rightarrow$ BCS(閉じ込め)と相転移していく温度で、トポロジカル電荷の分布に顕著な密度依存性が見られない、という新しい知見を得た(成果論文[1])。この結果は、QGP相や、BCS(非閉じ込め)になる温度領域では見られなかった振る舞いで、より研究を深める必要がある。

#### (4)状態方程式

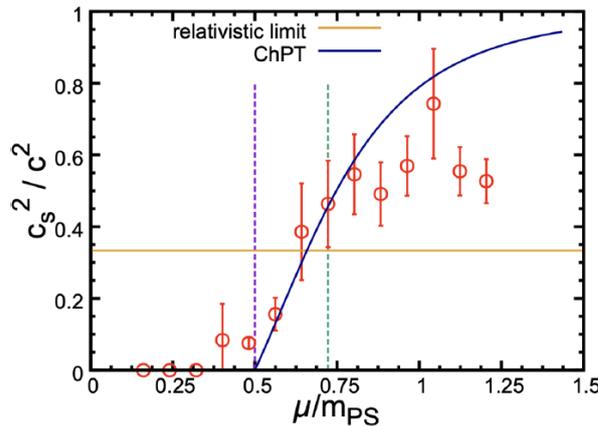


図2. 音速の自乗の  $\mu$  依存性。  
紫の実線はカイラル摂動論の結果。

内部エネルギー( $e$ )と圧力( $p$ )から音速( $c_s^2/c^2 = \partial p / \partial e$ )を計算した。その際、トレースアノマリーの計算に必要なベータ関数も格子シミュレーションを使って非摂動的に行ったのは、我々が世界で初めてである。この結果、得られた音速は、BCS相ではっきりとコンフォーマルバウンド( $c_s^2/c^2 \leq 1/3$ )を破ることがわかった(図2)。これは世界で初めてこのコンジェクチャーの反例を第一原理計算で見つけたことになる。また、超流動相 $\rightarrow$ 相転移してしばらくはカイラル摂動論の結果とよく一致することもわかった(成果論文[5, 7])。

#### (5)ハドロンの質量スペクトル

上記(1)-(4)の研究では、格子サイズ $16^4$ の配位を用いたが、研究期間中に新たに $32^4$ の配位を生成し、ハドロン(メソン、バリオン)の相関関数を測定した。そのスロープから各ハドロンの質量を読み取り、密度依存性を調べると大変面白いことがわかった。つまりバリオン(ダイクォーク)の2点関数は、虚時間反転に対して非対称になり、 $\mu=0$ では縮退していたダイクォークと反ダイクォークの質量がスプリットしていき、ダイクォークは密度と共に軽く、反ダイクォークは重くなっていくことがわかった。このプレリミナリーな結果は、2022年度のラティス国際会議で共同研究者の村上氏が講演し、査読付きプロシーディングも出版された(成果論文[10])。

また、これらの格子シミュレーションの結果を見た、末永氏が超流動相で同じ量子数を持った粒子の質量がスプリットしていくレベル反発のメカニズムを線形シグマ模型で調べ、格子データと合わせて解析を行った(成果論文[8])

#### (6)フラックスチューブの密度依存性

閉じ込めに深く関係するカラーフラックスチューブの温度・密度依存性を調べる。具体的には、カラー源としてのクォーク・反クォークに対応するウィルソンループまたはポリヤコフループとプラケットの相関関数を測定する。これにより、低温における閉じ込めありのBCS状態と、閉じ込めなしのBCS状態についてグルオニックな量からの知見を得た。 $T=0.39T_c$ での密度依存性を調べた結果、誤差は大きいもののカラー電場の侵入長には密度依存性が見られること、また高密度においても電場は絞られており、閉じ込め相と同様の性質を持っていることがわかった。(成果論文[6])

また、基礎物理学研究所の国際研究会として「2カラーQCDの低温高密度物質の物理の探索(YITP-W-20-16)」と、「場の理論の量子計算(YITP-W-20-17)」を主催し、QCDにおける符号問題に関する最近の研究の情報収集と議論を促進した。

主な成果リスト:

論文[1]

Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density

Kei Iida, Etsuko Itou, Tong-Gyu Lee

Journal of High Energy Physics 2020(1) 2020年1月29日

論文[2]

Sparse modeling approach to obtaining the shear viscosity from smeared correlation functions

Etsuko Itou, Yuki Nagai

Journal of High Energy Physics 2020(7) 2020年7月1日

論文[3]

Finite-density massless two-color QCD at the isospin Roberge-Weiss point and the 't Hooft anomaly

Takuya Furusawa, Yuya Tanizaki, Etsuko Itou

Physical Review Research 2(3) 2020年8月14日

論文[4]

Relative scale setting for two-color QCD with  $N_f=2$  Wilson fermions

Kei Iida, Etsuko Itou, Tong-Gyu Lee

Progress of Theoretical and Experimental Physics 2021(1) 2020年12月4日

論文[5]

QCD viscosity by combining the gradient flow and sparse modeling methods

Etsuko Itou, Yuki Nagai

Proceeding of Science LATTICE2021 214 2021年10月26日

論文[6]

Flux tube profiles in two-color QCD at low temperature and high density

Katsuya Ishiguro, Kei Iida, Etsuko Itou

Proceeding of Science LATTICE2021 063 2021年11月25日

論文[7]

Velocity of sound beyond the high-density relativistic limit from lattice simulation of dense two-color QCD

Kei Iida, Etsuko Itou

Progress of Theoretical and Experimental Physics 2022(11) 2022年10月21日

論文[8]

Probing the hadron mass spectrum in dense two-color QCD with the linear sigma model

Daiki Suenaga, Kotaro Murakami, Etsuko Itou, Kei Iida

Physical Review D 107(5) 2023年3月1日

論文[9]

Bump of sound velocity in dense 2-color QCD

Etsuko Itou, Kei Iida

PoS LATTICE2022 (2023) 151 2023年4月6日

論文[10]

Measurement of hadron masses in 2-color finite density QCD

Kotaro Murakami, Daiki Suenaga, Kei Iida, Etsuko Itou

PoS LATTICE2022 (2023) 154 2023年4月6日

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Honda Masazumi, Itou Etsuko, Kikuchi Yuta, Nagano Lento, Okuda Takuya	4. 巻 105
2. 論文標題 Classically emulated digital quantum simulation for screening and confinement in the Schwinger model with a topological term	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 14504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.105.014504	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 該当する
1. 著者名 Honda Masazumi, Itou Etsuko, Kikuchi Yuta, Tanizaki Yuya	4. 巻 2022
2. 論文標題 Negative string tension of a higher-charge Schwinger model via digital quantum simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 ptac007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac007	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 該当する
1. 著者名 Katsuya Ishiguro, Kei Iida, Etsuko Itou	4. 巻 LATTICE2021
2. 論文標題 Flux tube profiles in two-color QCD at low temperature and high density	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceeding of Science	6. 最初と最後の頁 63
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 Etsuko Itou and Yuki Nagai	4. 巻 LATTICE2021
2. 論文標題 QCD viscosity by combining the gradient flow and sparse modeling methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceeding of Science	6. 最初と最後の頁 214
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 Itou Etsuko, Nagai Yuki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Sparse modeling approach to obtaining the shear viscosity from smeared correlation functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2020)007	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 Furusawa Takuya, Tanizaki Yuya, Itou Etsuko	4. 巻 2
2. 論文標題 Finite-density massless two-color QCD at the isospin Roberge-Weiss point and the 't Hooft anomaly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033253	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 Fujimori Toshiaki, Itou Etsuko, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke	4. 巻 2020
2. 論文標題 Lattice CP(N-1) model with N twisted boundary condition: bions, adiabatic continuity and pseudo-entropy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2020)011	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 Iida Kei, Itou Etsuko, Lee Tong-Gyu	4. 巻 2021
2. 論文標題 Relative scale setting for two-color QCD with $N_f=2$ Wilson fermions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013B05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa170	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 Fujimori Toshiaki, Itou Etsuko, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke	4. 巻 100
2. 論文標題 Confinement-deconfinement crossover in the lattice CP(N-1) model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 94506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.094506	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 Iida Kei, Itou Etsuko, Lee Tong-Gyu	4. 巻 2020
2. 論文標題 Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)181	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 Etsuko Itou	4. 巻 Lattice
2. 論文標題 Resurgence and fractional instanton of the SU(3) gauge theory in weak coupling regime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2019 014	6. 最初と最後の頁 14
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 Tatsuhiro Misumi, Toshiaki Fujimori, Etsuko Itou, Muneto Nitta, Norisuke Sakai	4. 巻 Lattice
2. 論文標題 Lattice study on the twisted CP(N-1) models on $R \times S^1$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2019 015	6. 最初と最後の頁 15
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 Iida Kei, Itou Etsuko	4. 巻 2022
2. 論文標題 Velocity of sound beyond the high-density relativistic limit from lattice simulation of dense two-color QCD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 111B01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac137	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 Honda Masazumi, Itou Etsuko, Tanizaki Yuya	4. 巻 2022
2. 論文標題 DMRG study of the higher-charge Schwinger model and its 't Hooft anomaly	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/jhep11(2022)141	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 Suenaga Daiki, Murakami Kotaro, Itou Etsuko, Iida Kei	4. 巻 107
2. 論文標題 Probing the hadron mass spectrum in dense two-color QCD with the linear sigma model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 54001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.107.054001	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 Etsuko Itou, Kei Iida	4. 巻 2022
2. 論文標題 Bump of sound velocity in dense 2-color QCD	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2022	6. 最初と最後の頁 151
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 Kotaro Murakami, Daiki Suenaga, Kei Iida, Etsuko Itou	4. 巻 2022
2. 論文標題 Measurement of hadron masses in 2-color finite density QCD	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2022	6. 最初と最後の頁 154
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 -

〔学会発表〕 計42件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 伊藤悦子, 飯田圭
2. 発表標題 2カラーQCDの低温高密度領域における状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤悦子
2. 発表標題 量子計算の場の理論への応用
3. 学会等名 金沢大学研究会「2022 計算物理学の発展」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤悦子
2. 発表標題 物理点におけるハドロン間力の計算に向けて-格子QCDの配位生成-
3. 学会等名 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤悦子
2. 発表標題 Classical and quantum calculation methods for quantum field theories with the sign problem
3. 学会等名 JSTさきがけ[量子情報処理] 革新的な量子情報処理技術基盤の創出 第5回領域会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤悦子, 飯田圭
2. 発表標題 2カラー-QCDの低温高密度相における状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤悦子, 本多正純, 菊池勇太, 谷崎佑弥
2. 発表標題 量子計算でみる負のストリングテンションの出現
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Sparse modeling approach to obtaining the QCD shear viscosity from smeared correlation functions
3. 学会等名 ECT* online workshop :Tackling The Real-Time Challenge In Strongly Correlated Systems: Spectral Properties From Euclidean Path Integrals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Digital quantum simulation for screening and confinement in gauge theory with a topological term
3. 学会等名 RIKEN-Vancouver Joint Workshop on Quantum Computing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Etsuko Itou, Yuki Nagai
2. 発表標題 Sparse modeling approach to obtaining the shear viscosity from smeared correlation functions
3. 学会等名 The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Etsuko Itou, Yuki Nagai
2. 発表標題 Sparse modeling approach to obtaining the shear viscosity from smeared correlation functions
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Fractional instanton of the SU(3) gauge theory on the lattice
3. 学会等名 国際モレキュール型プログラム Potential Toolkit to Attack Nonperturbative Aspects of QFT; Resurgence and related topics- (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iida Kei, Itou Etsuko, Lee Tong-Gyu
2. 発表標題 2カラーQCDの低温高密度領域における物理
3. 学会等名 素粒子物理学の進展2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 スパースモデリングによるQCD粘性の推定--格子QCDでの第一原理計算から--
3. 学会等名 第7回 階層性を横断する会(量子流体の粘性率) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iida Kei, Itou Etsuko, Lee Tong-Gyu
2. 発表標題 2カラーQCDの低温高密度相におけるハドロンスペクトル
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Etsuko Itou, Yuki Nagai
2. 発表標題 スパースモデリング法によるスメアされた相関関数からスペクトル関数の推定
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Sparse modeling approach to obtaining the shear viscosity from smeared correlation functions
3. 学会等名 Online Seminar, Brookhaven National Laboratory (USA) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density
3. 学会等名 第5回クラスター階層領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density
3. 学会等名 セミナー, 京都大学 基礎物理学研究所 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density
3. 学会等名 YITP workshop Probing the physics of high-density and low-temperature matter with ab initio calculations in 2-color QCD (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Resurgence and fractional instanton of the SU(3) gauge theory in weak coupling regime
3. 学会等名 The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Topological susceptibility of two-color QCD at low temperature and high density
3. 学会等名 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (xQCD) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 高密度領域まで適用可能なモンテカルロ法の開発と 有限密度 2 カラー-QCDの相図の決定
3. 学会等名 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN) 第11回シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 ヤンミルズ理論における 分数インスタントン
3. 学会等名 セミナー、京都大学 理学部 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Lattice study for the CP(N - 1) models on $R \times S^1$
3. 学会等名 Topological solitons, Nonperturbative Gauge Dynamics and Confinement 2 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 ヤンミルズ理論における分数インスタントン
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展 2 0 1 9
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤悦子, 飯田圭, 李東奎
2. 発表標題 2カラーQCDの低温高密度相におけるトポロジー
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤悦子, 永井佑紀
2. 発表標題 スパスモデリング法によるQCD粘性の決定
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Two-color QCD phases and the topology at low temperature and high density
3. 学会等名 Seminar @ KEK theory center
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Lattice Monte Carlo study on the model in low dimensions
3. 学会等名 CPAN model: recent developments and future directions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 QCD型理論の低温高密度領域の物理
3. 学会等名 立教大学 セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 ヤンミルズ理論における分数インスタントン
3. 学会等名 北里大学 理学部 セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 悦子, 永井佑紀
2. 発表標題 スパースモデリング法によるQCD スペクトル関数の推定
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Equation of state of the finite density region in two-color QCD
3. 学会等名 Joint RIKEN-Tohoku workshop
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Bump of sound velocity in dense 2-color QCD
3. 学会等名 The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 テンソルネットワーク法でみる 't Hooft anomaly
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Sound velocity beyond the High-Density Relativistic Limit from Lattice Simulation of Dense Two-Color QCD
3. 学会等名 The 9th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 有限密度2カラーQCDの 第一原理計算で見る音速のピーク
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 実機計算機による シミュレーション
3. 学会等名 場の理論の新しい計算方法 -2022量子計算とテンソルネットワークに関するサマースクール-, (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 有限密度 2 カラーQCD 第一原理計算による音速のピーク
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Quantum computation and tensor network analyses on the Schwinger model
3. 学会等名 YITP workshop: Quantum extreme universe from quantum information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Etsuko Itou
2. 発表標題 Velocity of Sound beyond the High- Density Relativistic Limit from Lattice Simulation of Dense Two-Color QCD
3. 学会等名 Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields. R-CCS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 悦子
2. 発表標題 量子の世界を計算する
3. 学会等名 TJR workshop: "Connecting the hierarchies: from cosmos to life" (招待講演)
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計2件

国際研究集会 2カラーQCDの低温高密度物質の物理の探索	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 場の理論の量子計算	開催年 2021年～2021年

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------