

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740168

研究課題名(和文) ウィルソンクォークを用いた現実クォーク質量でのQCD熱力学の研究

研究課題名(英文) QCD thermodynamics using Wilson-type quarks on the physical point

研究代表者

梅田 貴士 (Umeda, Takashi)

広島大学・教育学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40451679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では主に固定格子間隔アプローチを用いた状態方程式の計算を行った。まずはSU(3) gauge theory におけるテスト計算を行った。これにより固定格子間隔アプローチによって計算コストを抑えつつ従来と同程度の計算が行えることが確認できた。次にこの手法を非摂動改良されたウィルソンクォークによる Nf=2+1 QCD に応用した。この計算はウィルソンクォークを用いた世界で初めてのNf=2+1 QCD 状態方程式の結果となった。さらにPACS-CSによる物理点での有限温度配位生成を行った。共通コードBridge++を用いることによって奇数Ntまで含めた有限温度配位生成を行う事が出来た。

研究成果の概要(英文)：We have studied the equation of state on the lattice. We apply the T-integration method to nonperturbatively calculate the equation of state by the fixed-scale approach. First we demonstrated our approach in the SU(3) gauge theory. Second, we study the equation of state in 2+1 flavor QCD with nonperturbatively improved Wilson quarks coupled with the RG-improved Iwasaki glue. Although the light quark masses are heavier than the physical values yet, our equation of state is roughly consistent with results with highly improved staggered quarks at large Nt. Third, we just started to generate finite temperature configuration on the physical point which has investigated by PACS-CS. The QCD common code, Bridge++, is adopted to generate the configurations on KEK BlueGene computers.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：格子QCD クォークグルーオンプラズマ 状態方程式

1. 研究開始当初の背景

QCD の有限温度相転移は現実世界の宇宙が経験した最後の相転移であり、その相転移の性質は初期宇宙の進化を探る上でも重要な手がかりとなる。この相転移で現れる新しい物質状態はクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれ、重イオン衝突実験により生成が可能である。研究開始当初、RHIC 実験で QGP 状態が完全流体の性質を示すなど、当初の予想に反して、強い相互作用性を示す実験結果が多く発表された。この物質状態の性質の解明は、主にハドロン物理の分野では非常に精力的に研究されていて、新しい LHC 実験でのさらなる発見が期待されている。重イオン衝突実験における QGP 状態の理論研究は、主に流体モデルなどを用いて行われているが、モデルの初期条件として必要な基礎物理量はどうしても QCD の第一原理計算から求める必要がある。これら有限温度・密度 QCD の臨界現象に関係するような物理量の研究を非摂動的、定量的に行える方法は現在の所、格子 QCD による数値シミュレーションだけである。実際、格子 QCD は QCD 相図の決定、相転移温度、状態方程式の計算などで数多くの研究を発表し、流体モデルを含む現象論的な QGP 研究に重要な役割を果たしている。

しかし、これまでに行われた有限温度・密度での格子 QCD の計算はほとんどが KS クォークという格子上のクォーク場の定式化が採用されている。しかしながら、(アップ、ダウン、ストレンジクォークの真空偏極が重要になる) 現実世界の QCD 計算に対しては、KS クォークは作用の局所性が連続極限においても保証されていないなど、理論的な正当性の問題は現在でも議論の対象になっている (KS クォークの定式化の特性により、フレーバー数が 4 の倍数でのみ正当性が保証されている)。実際の格子 QCD 計算でも多くの問題が報告されており、ウィルソンクォークの様にフレーバー数によらず理論的な正当性が確保されている定式化を用いた計算結果が、格子 QCD の分野に限らず、重イオン衝突実験に係わる広い分野の研究者達から熱望されている。

こうした状況において、本研究代表者はウィルソンクォークを用いた現実クォーク質量での熱力学量、特に状態方程式の研究を目的とする。しかしながら、(KS クォークによる) 最先端の研究では当然になってきた現実クォーク質量の計算でウィルソンクォークを用いると計算コストが膨大になってしまう。実際、ウィルソンクォークを用いた数少ない研究は、そのほとんどが非現実的に重いクォ

ーク質量でしか計算が行われていない。このような状況は、有限温度計算の基礎となるゼロ温度研究においても同様であったが、近年、アルゴリズムの改良などにより、現実クォーク質量でのウィルソンクォークによるゼロ温度格子 QCD 計算が可能になってきた。これにより、有限温度・密度格子 QCD においても、ウィルソンクォークを用いた現実クォーク質量での研究への可能性が見えてきた。

2. 研究の目的

これらの国内外の状況を踏まえて、本研究では、非摂動改良されたウィルソンクォークを用いて、現実世界と同じ質量のアップ、ダウン、さらにストレンジクォークの真空偏極の効果まで含めた、いわゆる現実クォーク質量での 2+1 フレーバー QCD の有限温度 QCD 計算を目標とする。特に QCD の状態方程式 (圧力、エネルギー密度、音速など) を相転移温度 (T_c) 以下の温度から $3T_c$ 程度まで計算する。この温度範囲は RHIC, LHC などの重イオン衝突実験における研究で重要な温度領域である。従来の手法に比べて、本研究では温度の低い相転移近傍での格子化誤差を抑えることが出来、低温領域でのレゾナンスガスモデルと格子 QCD 計算との比較を詳細に議論する事も可能になる。

このような前人未踏の計算を、現実的な計算資源の元で行うために、本研究代表者は新しい固定格子間隔アプローチによる QCD 熱力学量の計算を提唱している。このアプローチを用いることによって、有限温度格子 QCD の研究において、計算コストの大部分を占めるゼロ温度での計算 (物理一定パラメータの決定、赤外発散の繰り込み、関数の計算など) を大幅に省略することが可能になる。さらに、このアプローチで必要になるゼロ温度計算は既に PACS-CS グループによって計算された結果とゲージ配位 (ILDG によって公開中) を用いる事ができる。この固定格子間隔アプローチの利点によって計算コストを大幅に減らすことができ、従来の方法では困難だったウィルソンクォークを用いた有限温度・密度 QCD の計算が可能になると考えている。さらに、PACS-CS グループのパラメータを採用する事によって従来の計算より遙かに格子誤差を抑える事が出来る。この、我々の提唱した固定格子間隔アプローチにおける温度積分法という状態方程式の計算方法は、クォークの真空偏極を無視する近似 (クエンチ近似) でのテストを既に行っており従来の結果をほぼ再現することも確認している。このアプローチ自体は本研究代表者のこれまでの研究で既に採用しており、このアプローチの

利点を最大限に利用して研究を進めてきた。この研究を通して、このアプローチの問題点とその解決（回避）方法のノウハウを獲得してきた。ここで培った経験が本研究のアイデアの基礎となっている。

3. 研究の方法

有限温度場の理論では、温度は虚時間方向の周期長の逆数で定義される。有限温度格子QCDでは、通常、虚時間方向の格子点の数(Nt)を固定して、格子間隔(a)を変えて温度($T = 1/a Nt$)をコントロールする。本研究で採用する固定格子間隔アプローチでは逆に a を固定して Nt を変える。このアプローチでは各温度で格子間隔 a が共通な為、従来の方法で必要な膨大なゼロ温度(での準備)計算を大幅に省略することが可能になる。一方で、当然ながら温度の分解能が整数の逆数で制限されてしまう。さらに、これまでに確立している状態方程式の非摂動的計算法は固定格子間隔アプローチでは適用出来ない。しかしながら、本研究代表者らが温度積分法を開発した事により、このアプローチでも状態方程式の非摂動的計算が可能になった。この方法は、クエンチ近似におけるテストでは従来の結果をほぼ再現することも確認している。この様に、固定格子間隔アプローチは従来の方法とは特性が大きく異なり、計算可能な物理量も変わってくる。従ってどのような物理量であればこのアプローチで計算が可能かを探るのもこの研究の目的の一つといえる。

4. 研究成果

(1) クエンチ近似での温度積分法による状態方程式のさらに詳細な研究を行った。そして同じゲージ配位を用いて、ポリヤコフループの感受率の期待値の温度変化から相転移温度の見積もりを行い、固定講師間隔におけるオーダーパラメータの振る舞いを調べた。また、共同研究者によって静的クォークの自由エネルギーの計算が行われ、これらの計算をまとめた。

(2) 2+1 フレーバー QCD の試験的計算は WHOT-QCD グループとの共同研究として行った。グループで申請をしている KEK(高エネルギー)の計算機を用いて配位の生成を行った。このゲージ配位生成には、CP-PACS/JLQCD グループによって行われた非摂動改良したウィルソンフェルミオンを用いた 2+1 フレーバー QCD によるクォーク質量計算プロジェクトのパラメータを採用している。クォーク質量は比較的重いが、連続極限を取るために

格子間隔 3 点での結果が存在する。3 点の内もっとも細かい格子($\beta=2.05$)における有限温度配位において状態方程式を計算した。我々の提唱した温度積分法を用いると、トレースアノマリーの期待値の温度積分によって様々な状態方程式が計算できる。このトレースアノマリーの計算では CP-PACS/JLQCD グループのゼロ温度ゲージ配位を利用する。各温度(とゼロ温度)でのトレースアノマリーの計算には格子作用の値が必要になる。クォーク部分については(Z2) ノイズ法を用いて KEK における大型シミュレーションプロジェクトとして計算した。特にベータ関数の計算の改良と系統誤差の見積もりを行うことで、より定量的に結果の検討を行うことが出来た。さらに繰り込まれたポリヤコフループとその揺らぎ量を計算することによって相転移温度の見積もりも行った。ポリヤコフループの繰り込みは既に確立された手法であるが、固定格子間隔アプローチで 2+1 フレーバーの計算としては初めての物である。

(3) 現実クォーク質量でのシミュレーションへ向けた配位生成を進めた。共通コードプロジェクトで開発された配位生成プログラム(Bridge++コード)を採用し PACS-CS グループの研究により調べられた現実クォーク質量に相当するパラメータでの配位生成を開始した。多段質量前処理のアルゴリズムを用いて、高速化を図り、ほぼ初期条件の影響がない配位の生成まで行えた。さらに Bridge++コードのマルチスレッド化を行い、計算速度の向上を達成した。

(4) 状態方程式の計算に必要なベータ関数の計算の為に、再重み付け法による計算を計画している。この方法のテストのためにクエンチ近似における計算を行った。

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 19 件)

1. H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno and T. Umeda, Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density, Phys. Rev. D89, 034507 (2014). (査読有り)
2. T. Umeda et al. [WHOT-QCD Collab.], Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions, PoS LATTICE 2013, 450 (2013) (査読有り)

3. 梅田貴士, 有限温度・有限密度における格子 QCD シミュレーション, シミュレーション 32 巻(2013) p22-28. (査読有り)

4. T. Umeda et al. [WHOT-QCD Collab.], Equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, Phys. Rev. D85, 094508 (2012). (査読有り)

5. S. Ejiri et al. [WHOT-QCD Collab.], Ab initio study of QCD thermodynamics on the lattice at zero and finite densities, PTEP 2012, 01A104 (2012). (査読有り)

6. Y. Maezawa, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya and H. Ohno, Application of fixed scale approach to static quark free energies in quenched and 2+1 flavor lattice QCD with improved Wilson quark action, Prog. Theor. Phys. 128, 955 (2012). (査読有り)

7. Y. Nakagawa et al. [WHOT-QCD Collab.], Phase structure of finite density QCD with a histogram method, PoS LATTICE 2012, 092 (2012). (査読有り)

8. S. Ejiri et al. [WHOT-QCD Collab.], Probability distribution functions in the finite density lattice QCD, PoS LATTICE 2012, 089 (2012). (査読有り)

9. S. Ejiri et al. [WHOT-QCD Collab.], Numerical study of QCD phase diagram at high temperature and density by a histogram method, Central Eur. J. Phys. 10, 1322 (2012). (査読有り)

10. T. Umeda et al. [WHOT-QCD Collab.], Thermodynamics in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, PoS LATTICE 2012, 074 (2012). (査読有り)

11. Y. Nakagawa et al. [WHOT-QCD Collab.], Histogram method in finite density QCD with phase quenched simulations, PoS LATTICE 2011, 208 (2011). (査読有り)

12. H. Saito et al. [WHOT-QCD Collab.], Phase structure of finite temperature QCD in the heavy quark region, Phys. Rev. D84, 054502 (2011). [Erratum-ibid. D85, 079902 (2012)]. (査読有り)

13. H. Ohno et al. [WHOT-QCD Collab.], Charmonium spectral functions with the variational method in zero and finite temperature lattice QCD, Phys. Rev. D84, 094504 (2011). (査読有り)

14. H. Saito et al. [WHOT-QCD Collab.], The order of the deconfinement phase transition in a heavy quark mass region, PoS LATTICE 2010, 212 (2010). (査読有り)

15. T. Umeda et al. [WHOT-QCD Collab.], EOS

in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed-scale approach, PoS LATTICE 2010, 218 (2010). (査読有り)

16. H. Ohno et al. [WHOT-QCD Collab.], An application of the variational analysis to calculate the meson spectral functions, PoS LATTICE 2010, 209 (2010). (査読有り)

17. K. Kanaya et al. [WHOT-QCD Collab.], QCD thermodynamics at zero and finite densities with improved Wilson quarks, Prog. Theor. Phys. Suppl. 186, 556 (2010). (査読有り)

18. Y. Maezawa et al. [WHOT-QCD Collab.], Electric and Magnetic Screening Masses at Finite Temperature from Generalized Polyakov Line Correlations in Two flavor Lattice QCD, Phys. Rev. D81, 091501 (2010). (査読有り)

19. S. Ejiri et al. [WHOT-QCD Collab.], Equation of State and Heavy-Quark Free Energy at Finite Temperature and Density in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action, Phys. Rev. D82, 014508 (2010). (査読有り)

[学会発表](計 10 件)

1. T. Umeda, Thermodynamics in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, Lattice QCD at finite temperature and density(招待講演), KEK, Ibaraki, 2014.01.21.

2. 梅田貴士, 偏移境界条件を用いた有限温度格子 QCD の研究, 2013 年 日本物理学会 第 69 回年次大会, 東海大学, 神奈川, 2014.03.28.

3. T. Umeda, Thermodynamics in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, The XXX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012), Cairns, Australia, 2012.06.25

4. 齋藤華 他, 2012 年 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大学, 広島, 2013.03.27.

5. 梅田貴士, 固定格子間隔での有限温度格子 QCD の研究, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 西宮市, 兵庫県, 2012.03.26.

6. T. Umeda, EOS in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, Lattice 2010, Sardina, Italy, 2010.07.12.

7. 梅田貴士, Equation of State in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks, 基研研究会「熱場の理論とその応用」, 京大

学基礎物理学研究所，京都市，京都府，
2010.08.31.

8. 梅田貴士，ウィルソンクォークを用いた
Nf=2+1QCD の状態方程式の研究，日本物理学
会秋季大会，九州工業大学，福岡市，福岡
県，2010.09.13.

9. T. Umeda, Heavy Quarkonium in QGP on the
Lattice, ATHIC 2010 (招待講演), Huazhong
Normal University, Wuhan, China,
2010.10.20.

10. T. Umeda, EoS in 2+1 flavor QCD with
improved Wilson fermion, Nonperturbative
aspects of QCD at finite temperature and
density (招待講演), Tsukuba Univ.,
Ibaraki, Japan, 2010.11.09.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

梅田 貴士 (UMEDA TAKASHI)

広島大学・大学院教育学研究科・准教授

研究者番号：40451679

(2)研究分担者

(3)連携研究者