

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01216

研究課題名(和文)ドメインウォールフェルミオン作用で探るQCDのトポロジー

研究課題名(英文) Investigating topology of QCD with domain-wall fermion action

研究代表者

深谷 英則 (Fukaya, Hidenori)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：70435676

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：温度165MeV以上の高温格子QCDのシミュレーションの結果、トポロジー励起がカイラル対称性を損なう手法の従来の研究に比べて、有意に抑制されていることが確認できた。axial U(1)感受率、中間子、バリオン2点相関関数の計算も実行、複数の異なる観測量のカイラル極限が、軸性U(1)アノマリーの消失と統計誤差の範囲で無矛盾であることを確認した。この研究成果はPhysical Review D誌に掲載、また、2020年度HPCI利用研究課題優秀成果賞を受賞した。また、カイラル感受率を軸性U(1)の破れとそれ以外に分解して解析することに成功、その寄与が90%に達するという驚くべき結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの格子QCDシミュレーション、特に有限温度QCDシミュレーションでは、計算コストの問題があるために格子上でカイラル対称性を壊す理論定式化が使われてきた。この手法では、自発的カイラル対称性の破れが不明確になるばかりでなく、カイラル対称性と密接に関係する、ゲージ場のトポロジカルな性質も損なわれる。私たちの研究成果は、精密なカイラル対称性をもつ格子QCDシミュレーションで行われた世界初の試みであり、宇宙初期に起こったQCD相転移に対するトポロジカルな励起の効果を定量的に見積もることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Simulating finite temperature lattice QCD at temperatures higher than 165MeV, we have found a strong suppression of the topological excitation or the effect of the axial U(1) anomaly. We computed the axial U(1) susceptibility as well as meson/baryon two point correlation functions and found a good consistency with the disappearance of the axial U(1) anomaly in the chiral limit. This results were published in Physical Review D and we received the HPCI Excellent Achievement Award in 2020. Also, we achieved a clean separation of the chiral susceptibility into the axial U(1) breaking contributions from others and found the effect of the anomaly dominates the signal by 90%.

研究分野：素粒子論

キーワード：格子ゲージ理論 トポロジー 量子色力学

1. 研究開始当初の背景

これまでの格子 QCD シミュレーション、特に有限温度 QCD シミュレーションでは、計算コストの問題があるために格子上でカイラル対称性を壊す理論定式化が使われてきた。この手法では、自発的カイラル対称性の破れが不明確になるばかりでなく、カイラル対称性と密接に関係する、ゲージ場のトポロジカルな性質も損なわれる。実際、申請者らのこれまでの研究によって、クォークの低エネルギー固有モードは格子化によって壊れたカイラル対称性の影響を強く受けることが明らかになっており、この問題を調べるには精密なカイラル対称性をもつ格子 QCD シミュレーションが不可欠である。

申請者の属する JLQCD 共同研究グループでは、過去 10 年にわたって格子上でカイラル対称性を精密に保つフェルミオン定式化を用いた QCD シミュレーションを推進し、ゼロ温度でのカイラル対称性の自発的破れの検証(2008 年日本物理学会若手奨励賞、2017 年西宮湯川記念賞受賞、業績)をはじめ、低エネルギーハドロン物理の理論計算を進めてきた。本研究では、有限温度 QCD のシミュレーションに切りこみ、ゲージ場のもつカイラル対称性およびトポロジーの微視的な性質を明らかにする。これにより、「カイラルアノマリーおよびそのトポロジカルな性質は高温 QCD でどうなるのか?」という問いに定量的に答える。計算コストは大きいものの理論的にクリーンなこの手法を用いることで、上記の問題に初めて意味のある進展をもたらすことができると考えている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、カイラル対称性を保つフェルミオン作用を用いた格子 QCD シミュレーションを行い、QCD のトポロジー励起の詳細を高精度で定量評価することである。これにより、有限温度 QCD に知られていなかった 1 次相転移を確認できる可能性があり、その場合は宇宙初期の相転移シナリオにも影響を与える。さらに高温領域の結果はアクシオン暗黒物質の残存量にも制限を与える。厳密なカイラル対称性を保つ作用を用いて有限温度 QCD のトポロジーを探るのは世界初の試みであり、対称性を損なう形で行われてきた従来の研究とは異なる、この問題への明確な答えが引き出せるはずである。

3. 研究の方法

本研究では、カイラル対称性を精密に保つフェルミオン定式化にもとづく高温の格子 QCD シミュレーションを実行し、ゲージ場の持つトポロジカルな性質を定量的に明らかにする。温度 200--400MeV の範囲で有限温度格子 QCD シミュレーションを実行、2 フレーバー QCD の高温相でのトポロジー感受率を計算する。温度とクォーク質量の関数として求め、特に物理的クォーク質量近傍を重点的に調べる。カイラル対称性を精密に保つドメインウォール・フェルミオン定式化を用いて生成したシミュレーション・データを、さらに再重み付け法でオーバーラップフェルミオンの行列式に補正することで「厳密な」カイラル対称性をもつ計算を実現する。トポロジー荷電を複数の定義により計算し、離散化誤差を評価する。

格子 QCD 計算において経路積分の再重み付けは一般的な手法になっている。ただし、再重み付け前後の定式化・パラメタが非常に近い場合以外は再重み付け因子の揺らぎが大きくなりすぎて有効でなくなる。ドメインウォールとオーバーラップ・フェルミオンの違いは小さいが、(時間グリッド 8 の)粗い格子ではこの揺らぎが無視できず、格子体積が大きいときにはさらに顕著になる。この問題を避けるには時間グリッド 12 の精細格子を使うのが有効であることがこれまでの研究で明らかになっており、本研究課題では時間グリッド 12 以上の計算に集中する。

生成した格子データ上でトポロジー荷電をそれぞれ計算する。格子上でのトポロジー荷電は、背景ゲージ場が十分に滑らかなとき以外は一意に定まらない。この研究課題では、勾配流の手法を使ってゲージ場を滑らかにした後にトポロジー荷電を計算する手法を取る。さらにオーバーラップ Dirac 演算子の指数とも整合性を確認する。高温領域では、モンテカルロ法によるサンプル生成の過程でトポロジー荷電が変化しなくなる問題が知られている。特に、もともとトポロジー荷電が小さいと想定されるときは、系全体のトポロジー荷電がゼロにはりついたまま動かなくなる。こうした場合でも局所的なトポロジー励起を測定する手法を用いればトポロジー感受率を計算できることをこれまでの研究で確認した。本研究課題でもこの手法を適用する。

全体の計算を、転移温度周辺で温度 5 点、それぞれの温度ごとにクォーク質量 4-5 点で実行す

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Fukaya Hidenori, Hashimoto Shoji, Kaneko Takashi, Ohki Hiroshi	4. 巻 102
2. 論文標題 Towards fully nonperturbative computations of inelastic IN scattering cross sections from lattice QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114516
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.114516	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 Aoki S., Aoki Y., Cossu G., Fukaya H., Hashimoto S., Kaneko T., Rohrhofer C., Suzuki K., JLQCD collaboration	4. 巻 103
2. 論文標題 Study of the axial U(1) anomaly at high temperature with lattice chiral fermions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 74506
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.103.074506	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 Fukaya Hidenori, Kawai Naoki, Matsuki Yoshiyuki, Mori Makito, Nakayama Katsumasa, Onogi Tetsuya, Yamaguchi Satoshi	4. 巻 2020
2. 論文標題 The Atiyah-Patodi-Singer index on a lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1,11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa031	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 Fukaya Hidenori, Furuta Mikio, Matsuo Shinichiroh, Onogi Tetsuya, Yamaguchi Satoshi, Yamashita Mayuko	4. 巻 380
2. 論文標題 The Atiyah-Patodi-Singer Index and Domain-Wall Fermion Dirac Operators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 1295 ~ 1311
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00220-020-03806-0	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 Kaneko Takashi, Aoki Yasumichi, Colquhoun Brian, Fukaya Hidenori, Hashimoto Shoji, JLQCD Collaboration	4. 巻 1
2. 論文標題 B to $D^{(*)}$ ℓ ν form factors from $N_f=2+1$ QCD with Mobius domain-wall quarks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2018	6. 最初と最後の頁 1,7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.334.0311	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 Suzuki Kei, Aoki Sinya, Aoki Yasumichi, Cossu Guido, Fukaya Hidenori, Hashimoto Shoji, JLQCD Collaboration	4. 巻 1
2. 論文標題 Axial $U(1)$ symmetry and Dirac spectra in high-temperature phase of $N_f=2$ lattice QCD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2018	6. 最初と最後の頁 1,7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.334.0152	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 Rohrhofer Christian, Aoki Yasumichi, Cossu Guido, Fukaya Hidenori, Glozman Leonid, Hashimoto Shoji, Lang Christian B., Prelovsek Sasa	4. 巻 982
2. 論文標題 Observation of approximate $SU(2)$ and $SU(2n)$ symmetries in high temperature lattice QCD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 207 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2018.10.037	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 該当する

1. 著者名 Rohrhofer C., Aoki Y., Cossu G., Fukaya H., Gattringer C., Glozman L. Ya., Hashimoto S., Lang C.B., Prelovsek S.	4. 巻 100
2. 論文標題 Symmetries of spatial meson correlators in high temperature QCD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1,13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.014502	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 該当する

1. 著者名 Fukaya Hidenori, Onogi Tetsuya, Yamaguchi Satoshi, Wu Xi	4. 巻 101
2. 論文標題 Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs formula for a general Hamiltonian	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1, 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.074507	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20件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Christian Rohrhofer
2. 発表標題 A new perspective to hadronic excitations above T_c
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 金森逸作
2. 発表標題 Axial $U(1)$ anomaly in 2+1 flavor QCD at high temperature
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 深谷英則
2. 発表標題 Axial $U(1)$ anomaly in 2+1-flavor lattice QCD at high temperature near the physical point
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hidenori Fukaya
2. 発表標題 What is chiral susceptibility probing?
3. 学会等名 FunQCD: from first principles to effective theories (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hidenori Fukaya
2. 発表標題 What is chiral susceptibility probing?
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 深谷英則
2. 発表標題 カイラル感受率とU(1)量子異常
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidenori Fukaya
2. 発表標題 Topological excitation in high temperature phase of Quantum Chromodynamics
3. 学会等名 筑波大学CCS International Symposium 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidenori Fukaya
2. 発表標題 量子色力学の高温相におけるトポロジー励起
3. 学会等名 第7回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 AXIAL U(1) SYMMETRY IN LATTICE QCD AT HIGH TEMPERATURE
3. 学会等名 YKIS2018b Symposium "Recent Developments in Quark-Hadron Sciences"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 A physicist-friendly reformulation of the Atiyah-Patodi-Singer index theorem
3. 学会等名 AVENUES OF QUANTUM FIELD THEORY IN CURVED SPACETIME（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 A physicist-friendly reformulation of the Atiyah-Patodi-Singer index theorem
3. 学会等名 東北大学 workshop "PROGRESS IN THE MATHEMATICS OF TOPOLOGICAL STATES OF MATTER"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 Axial U(1) Anomaly at High Temperature
3. 学会等名 Quantum Chromodynamics and Its Symmetries (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 "Why is domain-wall fermion mathematically interesting?"
3. 学会等名 国際研究会Frontiers in Lattice QCD and related topics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 "Domain-wall fermion and Atiyah-Patodi-Singer index"
3. 学会等名 Lattice 2019 at Wuhan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 "Domain-wall fermion and Atiyah-Patodi-Singer index"
3. 学会等名 Workshop "RMT in Sub-Atomic Physics and Beyond" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 "Mathematical proof for "physicist-friendly" reformulation of Atiyah- Patodi-Singer index".
3. 学会等名 Workshop Strings and Fields 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深谷英則
2. 発表標題 Nf=2格子QCDにおける高温領域の対称性
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 Domain-wall fermion and Atiyah-Patodi-Singer index
3. 学会等名 Workshop: Mathematical approach for topological physics (II) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深谷英則
2. 発表標題 "Topology in lattice gauge theory"
3. 学会等名 基研研究会「場の量子論における非摂動論的手法と素粒子物理学への応用」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fukaya
2. 発表標題 A physicist-friendly reformulation of the Atiyah-Patodi-Singer index theorem (on a lattice)
3. 学会等名 研究会「トポロジカル表面状態、ブレーンとソリトン、指数定理」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究成果については以下のウェブサイトでも公開している。
<http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~hfukaya/study.html>

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0件

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