

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年 5月26日現在

機関番号： 82118
研究種目： 若手研究（S）
研究期間： 2009～2013
課題番号： 21674002
研究課題名（和文） 厳密なカイラル対称性を持つ格子理論による量子色力学のトポロジカルな真空構造の解明
研究課題名（英文） Study of topological vacuum structure of Quantum Chromodynamics using lattice theory with exact chiral symmetry
研究代表者
橋本 省二（Hashimoto, Shoji）
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号： 90280510
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 50,800,000 円、（間接経費） 15,240,000 円

研究成果の概要（和文）：量子色力学はクォークのダイナミクスを支配する基本法則である。非常に強い非線形性をもつため、理論を解いてその基底状態(=真空)を求めるには数値計算が不可欠である。真空ではクォークのもつカイラル対称性が自発的に破れて核子に質量を与える源になっていると考えられているが、本研究は、格子ゲージ理論の数値シミュレーション、特に格子上でカイラル対称性を保つ理論定式化を用いて、この性質を微視的に明らかにしようとするものである。カイラル凝縮の大きさを精密に求めたほか、カイラル有効理論の収束性を調べる解析、核子中のカイラル対称性の破れの解析、中性パイ中間子の量子異常を通じた崩壊振幅の計算などが得られた。

研究成果の概要（英文）：Quantum Chromodynamics is the fundamental law to govern the dynamics of quarks. It is strongly non-linear, and numerical methods are required to solve its ground state, which is the vacuum. It is expected that the chiral symmetry of quarks is spontaneously broken in the vacuum and leads to the finite mass of nucleon. This work is to understand this remarkable property using the numerical simulation of lattice gauge theory, the formulation having exact chiral symmetry in particular. We achieved precise calculation of chiral condensate, and performed a study of convergence of the chiral effective theory, an analysis of chiral symmetry breaking within nucleon, a calculation of the decay amplitude of neutral pion through the axial anomaly.

研究分野： 素粒子論

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： 格子ゲージ理論、カイラル対称性、トポロジー、量子色力学

1. 研究開始当初の背景

量子色力学（QCD）は、強い相互作用の基礎理論として知られ、高エネルギー領域での素粒子反応を非常によく再現する。一方で、この理論を「解く」、すなわち真空状態から始まる固有状態を基礎理論に基づいて計算して導くことは、低エネルギーでの理論の非線形性(あるいは非摂動的性質)のために未だに難しい問題である。

QCD を非摂動的に扱うもっとも有効な手法は、格子ゲージ理論の数値シミュレーションによるもので、これまでにハドロン質量や行列要素の計算などに威力を発揮してきた。しかしながら、この手法には一つの弱点がある。すなわち、クォークのもつカイラル

対称性を格子上で実現するのが難しい点である。この問題はゲージ場の理論における量子異常の存在とも関係する理論的にも重要なものだが、現実的にはQCDの真空を特徴付けるもっとも重要な性質であるカイラル対称性の自発的破れが、数値計算の上では容易には再現できないという問題につながる。

1990年代の終わりに、厳密なカイラル対称性をもつ格子理論が理論的に提唱され、その後その数値的応用も徐々に進められていた。ただし、非常に大きな計算コストを要するため大規模な数値シミュレーションを実行する段階には至っておらず、本研究計画がその端緒を拓くものとなった。

2. 研究の目的

本研究計画は、格子ゲージ理論の大規模数値シミュレーションを使って量子色力学(QCD)の真空構造を明らかにしようとするを目的として開始した。厳密なカイラル対称性をもつ格子フェルミオンを用いることで、ゲージ理論のトポロジーや量子異常という真空の構造を決める重要な性質を正しく保った非摂動計算が初めて可能になる。本研究では特に、カイラル対称性の自発的破れを特徴づけるカイラル凝縮、それをあたえる(トポロジカルな)疑似ゼロモードの寄与、真空のトポロジーに敏感なフレーバー1重項の物理、パイ中間子のループ効果、 θ 真空、有限温度相転移などの研究を進めるべく計画し、以下にあげるような多面的な研究を展開した。

3. 研究の方法

本研究の中心となるのは、厳密なカイラル対称性をもつ格子理論による量子色力学の大規模シミュレーションである。カイラル対称性を保つことはさまざまな物理解析において対称性の破れに伴う余計な寄与を心配しなくてもよいなど、多くの利点があるが、一方で数値計算のコストが非常に大きくなるため、他のグループでは行っていない。本研究では、さまざまな理論的および技術的な改善を積み重ねることでこれを可能にした。特にトポロジーを固定するシミュレーションという新たな理論的チャレンジが重要な役割を果たした。

シミュレーションの実行とともに、クォークの固有モードの解析を全面的に取り入れたことも本研究の特徴の一つである。クォークの低エネルギー固有モードは、自発的カイラル対称性の破れを含むQCD真空の情報を多く含むだけでなく、空間的な平均を容易に取れることもあって、さまざまな物理量の計算において統計精度を改善することもできる。

4. 研究成果

以下にあげる多面的な研究を展開し、成果を得た。

- QCD真空を特徴づけるカイラル凝縮には、クォークの疑似ゼロモードの寄与が重要になる。疑似ゼロモードは局所的なトポロジー励起(インスタントン)に付随するもので、カイラル対称性と密接に関連している。シミュレーションで得られたクォークの固有モードを解析することで、カイラル凝縮をクォーク固有モードから直接導くことに成功した。
- フレーバー1重項の寄与を含む物理量(たとえば η' 粒子の質量、核子中のストレンジクォーク成分、OZI(大久保-Zweig-飯

塚)則、 $\Delta I=1/2$ 則など)には真空のトポロジー構造が強く寄与すると考えられる。これらの物理量はいずれも非連結クォークループを含み、格子計算は簡単ではない。クォークの固有モードを使うことで非連結ループの寄与を正確に評価して、真空のトポロジー感受率や核子のストレンジクォーク成分を計算した。

- 軽いパイ中間子は自発的カイラル対称性の破れの直接の帰結である。したがってパイ中間子のループ効果は、カイラル対称性の破れに関する情報を含む。パイ中間子の崩壊定数や形状因子等において、ループ効果を同定し、これを含んだ物理解析を行った。
- 有限温度相転移はQCD真空のもつ大きな特徴の一つであり、初期宇宙や重イオン衝突実験で実現される。カイラル対称性の回復に伴う相転移では、対称性が臨界現象の性質を規定する。しかしながら、これまでの格子QCDでの有限温度シミュレーションは対称性の異なるスタッガード型フェルミオンによるものが主流であり、相転移の次数ですら厳密に求められているとは言い難い。本研究で開発した厳密なカイラル対称性をもつ格子シミュレーションを用いて有限温度シミュレーションを実行し、高温相での軸性U(1)対称性の回復の可能性を調べた。

研究期間の後半においては、本研究の発展として行うより大規模なシミュレーションに向けての準備的な研究も行った。厳密なカイラル対称性をもつ格子理論の欠点は、やはりその数値計算コストにある。より連続極限に近い(すなわち格子間隔の小さい)シミュレーションを実現するには、この点が大きな障害になる。このため、カイラル対称性をわずかに破ることを許容することで計算コストを大幅に削減する理論定式化を開発した。これを用いた本格的なシミュレーション研究は将来の課題となる。

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15件) ※すべて査読有り

1. R. Arthur, P. A. Boyle, S. Hashimoto, R. Hudspith, “A note on Rome-Southampton renormalization with smeared gauge fields,” *Physical Review D* 88 (2013) 114506. DOI: 10.1103/PhysRevD.88.114506
2. X. Feng, S. Hashimoto, G. Hotzel, K. Jansen, M. Petschlies, D. R. Renner, “Computing the hadronic vacuum

- polarization function by analytic continuation,” *Physical Review D* 88 (2013) 034505. DOI: 10.1103/PhysRevD.88.034505
3. G. Cossu, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, “Finite temperature study of the axial U(1) symmetry on the lattice with overlap fermion formulation,” *Physical Review D* 87 (2013) 114514. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.114514
 4. H. Ohki, K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, J. Noaki, “Nucleon strange quark content from Nf=2+1 lattice QCD with exact chiral symmetry,” *Physical Review D* 87 (2013) 034509. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.034509
 5. S. Aoki, T. W. Chiu, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, K. Takeda, “Simulation of quantum chromodynamics on the lattice with exactly chiral lattice fermions,” *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (2012) 01A106. DOI: 10.1093/ptep/pts006
 6. X. Feng, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, E. Shintani, “Two-photon decay of the neutral pion in lattice QCD,” *Physical Review Letters* 109 (2012) 182001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.182001
 7. C. Lehner, J. Block, S. Hashimoto, T. Wettig, “Geometry dependence of RMT-based methods to extract the low-energy constants Σ and F ,” *Journal of High Energy Physics*, 05 (2011) 115. DOI: 10.1007/JHEP05(2011)115
 8. H. Fukaya, S. Aoki, T. W. Chiu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, “Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice,” *Physical Review D* 83, 074501 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.83.074501
 9. K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, “Nucleon strange quark content from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry,” *Physical Review D* 83, 114506 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.83.114506
 10. C. Lehner, S. Hashimoto, T. Wettig, “The epsilon expansion at next-to-next-to-leading order with small imaginary chemical potential,” *Journal of High Energy Physics*, 06 (2010) 028. DOI: 10.1007/JHEP06(2010)028
 11. E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada, “Strong coupling constant from vacuum polarization functions in three-flavor lattice QCD with dynamical overlap fermions,” *Physical Review D* 82, 074505 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevD.82.074505
 12. H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, “Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD,” *Physical Review Letters* 104, 122002 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.159901, 10.1103/PhysRevLett.104.122002
 13. J. Noaki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, “Non-perturbative renormalization of bilinear operators with dynamical overlap fermions,” *Physical Review D* 81, 034502 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevD.81.034502
 14. S. Aoki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, “Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry,” *Physical Review D* 80, 034508 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevD.80.034508
 15. E. Shintani, S. Aoki, T. W. Chiu, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, “Lattice study of vacuum polarization function and determination of strong coupling constant,” *Physical Review D* 79 (2009) 074510. DOI: 10.1103/PhysRevD.79.074510
- [学会発表] (計 15 件)
1. S. Hashimoto, “Fine lattice simulations with chirally symmetric quarks” at German-Japanese seminar, Regensburg, November 6, 2013.
 2. 橋本省二、「格子 QCD で有限温度相転移はどこまでわかったか」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、招待シンポジウム講演、高知大学、2013 年 9 月 21 日。

3. S. Hashimoto, “Precision lattice QCD: challenges and prospects” an invited review talk at the American Physical Society Spring Meeting, Denver, April 13, 2013.
4. 橋本省二, 「一般化ドメインウォール・フェルミオンにおけるカイラル対称性の破れ」@日本物理学会第 68 回年次大会 (広島大)、2013 年 3 月 29 日。
5. S. Hashimoto, “Lattice QCD: Status and Prospects,” an invited plenary talk at the 7th Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM2012), Cincinnati, Sep 29, 2012.
6. 橋本省二, 「格子 QCD: QCD のダイナミクスから素粒子現象論まで」@京大基研研究会「素粒子物理学の進展 2012」、2012 年 7 月 18 日。
7. 橋本省二, 「量子色力学における自発的対称性の破れの微視的構造」、素核宇宙融合×新ハドロン・クロスオーバー研究会、理化学研究所計算科学研究機構、2011 年 6 月 23 日。
8. S. Hashimoto, “ $\pi^0 \rightarrow \gamma, \gamma$ ”, at the Workshop on the Hadronic Light-by-light contribution to the Muon Anomaly ($g-2$), Feb 28-Mar 4, 2011, Institute for Nuclear Theory, University of Washington, Seattle, USA.
9. S. Hashimoto, “ α_s from JLQCD,” at the Workshop on Precision Measurements of α_s , Feb 9-11, 2011, Munich, Germany.
10. 橋本省二, 「有限温度 QCD におけるディラック演算子固有値スペクトル」、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学、2010 年 9 月 12 日。
11. S. Hashimoto, “Dirac operator eigenvalues in QCD at zero and finite temperature,” at the Japanese-German Seminar 2010 “Lattice QCD confronts experiments,” Nov 4-6, 2010, Mishima, Japan.
12. S. Hashimoto, “Lattice QCD,” at the XXIX International Symposium “Physics in Collision,” Aug 30-Sep 2, 2009, Kobe University, Kobe, Japan.
13. S. Hashimoto, “Spontaneous chiral symmetry breaking on the lattice,” at the Sixth International Workshop on Chiral Dynamics, Jul 6-10, 2009, University of Bern, Bern, Switzerland.
14. S. Hashimoto, “Simulating the vacuum in the femto-scale,” at the Conference on Computational Physics 2009, Kaohsiung, Taiwan, Dec 15-19,

2009.

15. S. Hashimoto, “Topics from dynamical overlap fermion simulations by JLQCD/TWQCD,” at the Taipei Lattice Workshop, National Taiwan University, Taipei, Dec 13-14, 2009.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 省二 (HASHIMOTO, Shoji)
 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
 研究者番号：90280510

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：