

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400284

研究課題名(和文) 厳密なカイラル対称性を持つ格子フェルミオンによるカイラルダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Study of chiral dynamics of lattice fermions with exact chiral symmetry

研究代表者

松古 栄夫 (Matsufuru, Hideo)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・助教

研究者番号：10373185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：クォークを記述する量子色力学(QCD)の特徴として、カイラル対称性の自発的破れという現象がある。本研究は格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションによって、ゲージ群(SU(3)の場合がQCDに対応)、フェルミオン表現、フレーバー数を変えた場合のカイラルダイナミクスを解明することが目標である。格子上で良いカイラル対称性を持つフェルミオン作用を用いた動的シミュレーションを行い、主にSU(2)ゲージ理論に対して、相関関数や固有値モード等の解析によって系の動的性質を調べた。基本表現のフェルミオンに対し相構造のフレーバー数依存性を、随伴表現のフェルミオンに対して格子特有の相構造を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The spontaneous breaking of chiral symmetry is an important feature of QCD that describes interaction among quarks. This study focus on the chiral dynamics of gauge theories with changing the gauge group (SU(3) corresponds to QCD), fermion representation, and number of flavors. Performing numerical simulations with dynamical fermions that hold good chiral symmetry on the lattice, we have investigated the dynamics of the system through observables such as the meson correlation functions and the eigenmodes of the fermion matrix, mainly for SU(2) gauge theory. We have determined the phase structure against the number of flavors for the fermions in the fundamental representation. For the adjoint fermions, phase structure specific to a lattice theory has been investigated.

研究分野：素粒子論、計算物理

キーワード：格子ゲージ理論 シミュレーション物理 素粒子物理

1. 研究開始当初の背景

クォークの間に働く相互作用は QCD(量子色力学、Quantum Chromodynamics)によって記述され、電弱理論とともに素粒子の標準模型を構成している。QCD の著しい特徴として、クォークに有効質量を与えている「カイラル対称性の自発的破れ」がある。この機構は南部博士により提唱され、陽子や中性子の持つ質量の 98%を与えるとともパイ中間子が他の粒子に比べて著しく軽いことを説明する。これらは解析的手法である摂動論が適用できない、QCD の低エネルギー領域での現象である。

格子上の場の理論に基づく数値シミュレーションは、非摂動的に場の理論を研究する一般的な手法であり、コンピュータの高速化と相まって、非常に強力な方法となっている。4 次元立方格子上に場を定義し、経路積分によって量子化することにより、モンテカルロ法による数値シミュレーションが可能になる。格子 QCD 計算によって、QCD の様々な非摂動的性質が解明されてきた。格子上でカイラル対称性を保つフェルミオン作用の定式化は難しい問題であったが、近年理論的發展により解決され、ドメインウォール・フェルミオンやオーバーラップ・フェルミオンなどが提唱された。これらはカイラル対称性の観点からは非常に良い性質を持つが、一方で数値的コストが大きく、特に真空におけるクォーク偏極効果を含む動的シミュレーションは、最近の高速なコンピュータの発達によって初めて可能になった。

格子上の厳密なカイラル対称性を持つオーバーラップ・フェルミオンによる大規模シミュレーションは、KEK を中心とする JLQCD コラボレーションによって 2006 年より行われ、標準理論の検証やそれを超えた物理の探索に必要なハドロン遷移過程の計算等に大きな成果を上げて来た。本申請者もこのプロジェクトに参加し、コードの作成と高速化、アルゴリズムの改良、配位生成などに貢献した。本申請で用いる手法は、これらの経験を基にしている。

格子ゲージ理論のシミュレーションは、QCD だけでなく、様々な物理系に応用できる。近年、標準理論を越えた物理の候補となる理論の非摂動的性質を格子シミュレーションによって解明する研究が盛んになっている。特にヒッグス粒子を複合粒子として記述する、テクニカラー理論については、QCD と類似したダイナミクスが本質的であるため、格子シミュレーションによって精力的に研究されている。本研究で扱う理論もテクニカラー理論の候補であり、特にフレイバー数に対する相構造を解明することによって、新しい物理の探索にも寄与できる。またある種の超対称性理論を研究する基礎としての重要性も持つ。

2. 研究の目的

クォークを記述する量子色力学(QCD) の特徴としてカイラル対称性の自発的破れがあるが、クォークの閉じ込め現象との関係など、その性質はまだ完全には解明されていない。この研究では、格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションを用い、ゲージ群、フェルミオン表現、フレイバー数を変えた場合のカイラル・ダイナミクスの変化を通して、QCD を特徴づける性質を明らかにすることを目指す。格子上の厳密なカイラル対称性を持つ作用を用い、SU(2)、SU(3) ゲージ群、基本表現、随伴表現のフェルミオンを動的に含むシミュレーションを、フレイバー数を変えながら行い、ハドロンスペクトル、固有値分布などを通してカイラル対称性の破れの機構を調べ、閉じ込め現象との関係を議論する。

3. 研究の方法

格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションを、ゲージ群とフェルミオン表現、フレイバー数を変えながら行う。ゼロ温度および有限温度において、フェルミオンの真空偏極を含むゲージ場配位を生成し、その上でハドロン相関関数、フェルミオン演算子の固有値分布、相転移のオーダーパラメータの測定を行い、対称性の破れのパターンとの関係を議論する。

格子上のフェルミオン作用については、厳密なカイラル対称性をオーバーラップ・フェルミオンが候補であるが、この作用は計算コストが大きいため、厳密ではないが良好な対称性をもつドメインウォール演算子を用いた動的シミュレーションを初めに行う。オーバーラップ演算子は生成した配位の上で観測量に対して適用し、ドメインウォール演算子との違いを議論する。

研究推進にあたってはアルゴリズムの改良と計算コードの高速化が決定的な重要性を持つ。研究の推進と合わせて、コードの高速化、アルゴリズムの改良、高速なプロセッサへの移植、アーキテクチャに合わせた高速化を進める。

4. 研究成果

(1) シミュレーションコードと解析手法の準備。本研究は格子ゲージ理論の数値シミュレーションを手法として用いるため、そのための計算コードと解析手法を準備する必要がある。計算コードは研究代表者が開発に参加している Bridge++プロジェクトのコードをベースに作成した。本研究で必要となった SU(2)ゲージ理論に関するコードを含め、開発したコードは Bridge++にフィードバックし、公開版にも反映されている。また後述するように高速化のための改良も行った。

解析手法としてはメソン相関関数やフェルミオン演算子の固有値モードの解析方法を整備した。後者についてはランダム行列模型との比較を通してカイラル対称性の破れの検証を行った。メソン相関関数の計算にお

いては、SU(2)ゲージ群が擬実である特殊性を利用して、計算コストを半分にする手法を開発した。静的クォーク間のポテンシャルの解析を通して系が閉じ込め相にあるかどうかを調べ、そのフレーバー数依存性を明らかにした。

(2) 基本表現フェルミオンを持つ SU(2)ゲージ理論の研究。基本表現のフェルミオンに対しては、格子上で良いカイラル対称性を持つドメインウォール演算子と呼ばれる作用を用いた研究を行った。フレーバー数 2, 4, 6, 8 の動的フェルミオンを含むシミュレーションを行い、生成したゲージ場配位の上でメソン質量と崩壊定数、静的クォーク間のポテンシャルを求めた。これらのゲージ結合、フェルミオン質量、フレーバー数への依存性から、フレーバー数 8 の場合にカイラル対称性の破れと矛盾するという結論が得られた。このフレーバー数では、質量ゼロの場合にはコンフォーマル相と呼ばれる状態になっていることを示唆している。これはテクニカラー理論の候補を探すという動機で行われている他の研究とも矛盾しない結果である。

フレーバー数 6 の場合は過渡的なふるまいであり、カイラル対称性が自派的に破れているかどうかを正確に知るためにはフェルミオン質量がゼロの近傍で計算を行う必要がある。しかしながらここまでの研究で用いた作用ではフェルミオン質量を十分小さく取ることが難しいことが判明したため、フェルミオン作用の改良を行うことにした。

(3) 基本表現フェルミオンを持つ SU(2)ゲージ理論の格子作用の改良。ドメインウォール作用ではカイラル対称性の小さな破れ(動的な自発的破れではなく作用における非厳密性)が存在するため、残留質量と呼ばれるフェルミオン質量が存在する。相互作用の強さによってはこの残留質量のために十分小さな質量領域を調べることが難しい。この状況の改善のため、フェルミオン演算子に対しリンク・スミアリングと呼ばれる手法を導入することにより、作用の改良を行った。フレーバー数 2 の場合に対し、改良作用で実際にシミュレーションを行い、これまでより数倍小さいフェルミオン質量を扱うことが可能であることを示した。引き続きフレーバー数 4 以上の場合への適用を行っているところである。

(4) SU(2)随伴表現フェルミオンの研究。随伴表現のフェルミオンに対しては、そのカイラル対称性が格子上でどのような性質を持つかという研究を行った。ドメインウォール演算子は 5 次元に拡張した定式化であるが、その 4 次元部分にウィルソン演算子と呼ばれる演算子を含む。このウィルソン演算子の固有値の性質が、カイラル対称性のダイナミクスに関係するため、まずウィルソン演算子の

性質を調べることが重要となる。

ウィルソン演算子については、格子作用特有の青木相と呼ばれる相が現れるが、その相構造を特定し、青木相から十分離れたパラメータでドメインウォール演算子を構成することが重要である。我々はフレーバー数 2 のウィルソン作用でのシミュレーションを行い、青木相の位置を特定した。応用として、トポロジを固定するためにゲージ場部分にウィルソン作用を付加する手法を適用する場合には、高周波数モードを打ち消すツイストされたウィルソン作用のボソンを付加するが、随伴表現の場合には特に注意深くパラメータを選ぶ必要があることが明らかになった。

(5) SU(3)ゲージ理論(QCD)の研究。SU(3)ゲージ群の場合にはカイラル対称性を厳密に持つオーバーラップ・フェルミオン作用による研究を行っている。これは JLQCD コラボレーションに参加して行っている計算であり、本課題を申請する以前から継続して行っている研究である。この研究に関しては、パイ中間子のコンプトン波長が系のサイズより長い、領域と呼ばれる系において、パイ中間子の電磁氣的形状因子の計算が完了した。

(6) シミュレーションコードの高速化。本研究では動的フェルミオンを含むシミュレーションを行っているが、この計算はコストが大きいので高速化が不可欠である。本研究では Bridge++ コードを用いているが、本研究で用いた日立 SR16000 及び IBM Blue Gene/Q での高速化を行った。また、近年性能向上が著しい GPU などの演算加速器を用いるコードを開発した。これには OpenCL 及び OpenACC を用い、それらをプログラムデザインの観点から比較した。最近開発され低消費電力で注目されている Pezy-SC プロセッサも演算加速器の一つであり、このプロセッサへのコード移植と高速化を行った。

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 12 件)

H. Matsufuru and N. Yamada, Simulation of SU(2) gauge theory with improved domain-wall fermions, PoS (LATTICE2016) 385 (6 pages), 査読無 https://pos.sissa.it/archive/conferences/256/385/LATTICE2016_385.pdf

T. Aoyama, K.-I. Ishikawa, Y. Kimura, H. Matsufuru, A. Sato, T. Suzuki, S. Torii, First Application of Lattice QCD to Pezy-SC Processor, Procedia

Computer Science 80 (2016) 1418-1427, 査読有
doi:10.1016/j.procs.2016.05.457

H. Matsufuru, K.-i. Nagai, and N. Yamada, SU(2) gauge theory with domain-wall fermions in fundamental and adjoint representations, PoS (LATTICE 2015) 054 (7 pages), 査読無
http://pos.sissa.it/archive/conferences/251/054/LATTICE%202015_054.pdf

S. Motoki 他 10 名, (H. Matsufuru 5 番目), Lattice QCD code set Bridge++ on arithmetic accelerators, PoS (LATTICE 2015) 040 (7 pages), 査読無
http://pos.sissa.it/archive/conferences/251/054/LATTICE%202015_054.pdf

H. Matsufuru, 他 9 名 (Bridge++ Project), OpenCL vs OpenACC: Lessons from Development of Lattice QCD Simulation Code, Procedia Computer Science 51 (2015) 1313-1322, 査読有
doi: 10.1016/j.procs.2015.05.316

JLQCD Collaboration: H. Fukaya 他 5 名 (H. Matsufuru 5 番目), Computation of the electromagnetic pion form factor from lattice QCD in the epsilon regime, Phys. Rev. D90 (2014) 034506 (8 pages). DOI: 10.1103/PhysRevD.90.034506

S. Ueda 他 9 名 (H. Matsufuru 5 番目), Lattice QCD code Bridge++ on multi-thread and many core accelerators, PoS (LATTICE2014) (2014) 036 (7 pages), 査読無
http://pos.sissa.it/archive/conferences/214/036/LATTICE2014_036.pdf

H. Matsufuru, K.-i. Nagai, N. Yamada, SU(2) gauge theory with many flavors of domain-wall fermions, PoS (LATTICE2014) (2014) 241 (7 pages), 査読無
http://pos.sissa.it/archive/conferences/214/241/LATTICE2014_241.pdf

S. Motoki 他 9 名 (H. Matsufuru 5 番目), Development of Lattice QCD Simulation Code Set on Accelerators, Procedia Computer Science 29 (2014) 1701-1710, 査読有
DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.155

H. Matsufuru, Y. Kikukawa, K.-i. Nagai, and N. Yamada, Lattice simulation of SU(2) gauge theory with chirally symmetric fermions, PoS (LATTICE 2013)

123 (7 pages), 査読無
http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/123/LATTICE%202013_123.pdf

S. Ueda 他 9 名 (H. Matsufuru 5 番目), Bridge++: an object-oriented C++ code for lattice simulations, PoS(LATTICE 2013) 412 (7 pages), 査読無
http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/412/LATTICE%202013_412.pdf

S. Ueda 他 9 名 (H. Matsufuru 5 番目), Development of an object oriented lattice QCD code ``Bridge++'', J.Phys.Conf.Ser. 523 (2014) 012046 (8 pages), 査読有
DOI: 10.1088/1742-6596/523/1/012046

[学会発表](計 8 件)

H. Matsufuru and N. Yamada, Simulation of SU(2) gauge theory with improved domain-wall fermions (poster), the 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016), 2016.06.24-30, サウザンプトン (イギリス)

H. Matsufuru (for Bridge++ project), OpenCL vs OpenACC: lessons from development of lattice QCD simulation code, International Conference on Computational Science, 2015.06.01-03, レイキャピク (アイスランド)

H. Matsufuru, K.-i. Nagai and N. Yamada, SU(2) gauge theory with domain-wall fermions in fundamental and adjoint representation (poster), the 33th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015), 2015.07.14-18, 神戸国際会議場 (神戸市)

H. Matsufuru, K.-i. Nagai, and N. Yamada, SU(2) lattice gauge theory with many flavors of domain-wall fermions, Sakata Memorial KMI Workshop on "Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories" (SCGT15), 2015.03.03-06, 名古屋大学(名古屋市)

H. Matsufuru, K.-i. Nagai, and N. Yamada, SU(2) gauge theory with many flavors of domain-wall fermions, the 32th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014), 2014.06.23-28, ニューヨーク(アメリカ)

松古栄夫、菊川芳夫、長井敬一、山田憲和、SU(2)格子ゲージ理論のカイラル対称なフェルミオンによる数値的研究、日本物理学会第69回年次大会、2014.03.24-27、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

松古栄夫、菊川芳夫、長井敬一、山田憲和、SU(2)格子ゲージ理論のカイラル対称なフェルミオンによる数値的研究、日本物理学会秋季大会、2013.09.20-23、高知大学朝倉キャンパス(高知市)

H. Matsufuru, Y. Kikukawa, K.-i. Nagai, N. Yamada, Lattice simulation of SU(2) gauge theory with chirally symmetric fermions, the 31th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013), 2013.07.29-08.03, マインツ(ドイツ)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
Bridge++ project:
<http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松古 栄夫 (MATSUFURU, Hideo)
高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・助教
研究者番号: 10373185

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者

山田 憲和 (YAMADA, Norikazu)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師