

研究責任者名 Name	松古 栄夫 Hideo Matsufuru		所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization
受理番号 Proposal No.	大型 12/13-22	研究課題名 Program title	SU(2)カイラルゲージ理論のダイナミクスの数値的研究 Numerical study of dynamics of SU(2) chiral gauge	

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

標準理論とそれを超える物理の背後にある場のダイナミクスを探求するために、SU(2)格子ゲージ理論の数値的研究を、高いカイラル対称性を持つ格子ゲージ理論の枠組みを用いて行った。特に SU(2)ウォーキング・テクニカラーモデルの候補となり得るモデルについてシミュレーションを行い、カイラル対称性の自発的破れのフレーバー数依存性を検証することを目標としている。本研究期間には、格子上で良好なカイラル対称性を持つドメインウォール・フェルミオンを採用した。2 フレーバーの基本表現フェルミオンを含む動的シミュレーションを行い、メソン質量の体積依存性や、ドメインウォール演算子におけるカイラル対称性の破れの大きさを表す残留質量の測定を行った。また生成されたゲージ場配位上で、カイラル対称性を厳密に持つオーバーラップ演算子の固有モードを求め、残留質量ゼロの極限でオーバーラップ演算子に帰着するドメインウォール演算子の固有モードとの比較を行っている。これらは今後のフレーバー数依存性の研究に向けての基礎となる結果である。

(英文)

To clarify underlying dynamics of physics of/beyond the standard model, we performed numerical study of SU(2) gauge theory with highly chiral symmetric fermions. Our main goal is to carry out numerical simulations of SU(2) walking Technicolor model and to investigate its flavor dependence of the spontaneous chiral symmetry breaking. In this research period, we have started to investigate the domain-wall fermion formulation which highly retains the chiral symmetry on the lattice. Numerical simulation was performed with 2 flavors of dynamical domain-wall fermions in fundamental representation. We measured the meson masses to quantify the finite volume effect and the residual mass which represents the size of chiral symmetry breaking in this formulation. On the generated configurations, eigenmodes of the overlap operator are measured so as to compare to those of the domain-wall operator which approaches the former in the limit of vanishing residual mass. These results are basis for forthcoming simulations with larger numbers of flavors.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読付きの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	2	0	0	0

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program	
<p>1. H. Matsufuru (talker), Y.Kikukawa, N.Yamada, K-I. Nagai, “SU(2) gauge theory with chiral symmetric fermions”, International Symposium on Lattice Field Theory, 29 July--3 August 2013, Mainz, Germany</p> <p>2. 松古栄夫（講演者）、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 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 2-23 日、高知大学</p>	
<p>査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。</p> <p>Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)</p>	
1	著者名 Author
	タイトル title
	雑誌名 name of journal
	URL
2	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
<p>プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。</p> <p>International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)</p>	
1.	著者名 Author
	タイトル title
	雑誌名等 name of journal
	URL
2.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
<p>その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載)</p> <p>Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)</p>	
<p>1.</p> <p>2.</p>	
<p>特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。)</p> <p>Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)</p>	
<p>1.</p> <p>2.</p>	

平成 24-25 年度 KEK 大型シミュレーション研究

実施報告書

SU(2) カイラルゲージ理論のダイナミクスの数値的研究

scchiral グループ

研究期間 2012 年 10 月–2013 年 9 月

1 研究組織

松古栄夫 (高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター・助教) 全体の統括、コード開発・チューニング、解析

菊川芳夫 (東京大学大学院総合文化研究科・准教授) 解析、理論解析

山田憲和 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 KEK 理論センター・研究機関講師) 解析、理論解析

長井敬一 (名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構・特任助教) 解析、理論解析

2 研究目的

本研究課題では、素粒子標準模型の Higgs セクターの背後にある場のダイナミクスを探求するために、カイラル対称性の性質の良い格子フェルミオンを用いて、SU(2) 格子ゲージ理論の数値的な研究を行う。対象とする主なモデルとしては、SU(2) ウォーキングテクニカラーモデルを想定している。このようなモデルに対し、実験と理論の比較によって制限を与えるためには、非摂動的かつ定量的な手法が不可欠であり、格子ゲージ理論による数値シミュレーションが近年盛んに行われている [1, 2]。本研究では、カイラル対称性の破れのダイナミクスを通してこのようなモデルの性質を理解することを目指している。このため格子フェルミオン作用として、格子上のカイラル対称性を厳密に保つ、オーバーラップ演算子 [3]、もしくはカイラル対称性を十分良く持ち、その破れの効果をコントロールできるドメインウォール演算子 [8] を用いる。

本研究期間の当初の計画では、基本表現のオーバーラップ・フェルミオンについてフレーバー数 $N_f = 2-8$ での動的シミュレーションを行い、系のカイラル対称性の破れのフレーバー数依存性を調べることを目指していた。 ϵ -領域と呼ばれるパラメータ領域で、カイラル凝縮の値をオーバーラップ Dirac 演算子の固有値分布とランダム行列モデルとの比較から求め [4]、また南部-Goldstone ボソンの崩壊係数を相関関数から求めることにより、テクニカラーモデルの候補となり得るパラメータ領域を探る計画であった。しかしながら、このシミュレーション設定では次の章に述べるように解析上不定性の大きい点があることが判明した。このため、カイラル対称性は十分よく保っているがオーバーラップ・フェルミオンに比べると数値的コストが小さい、ドメインウォール・フェルミオンを用いた研究を行うことを決定した。本研究期間においては、本研究期間においては、このドメインウォール・フェルミオンを用いた本格的計算のための準備として、コードの開発と $N_f = 2$ での動的シミュレーションを実施した。

3 これまでの研究状況

本研究は、平成 22 年度大型シミュレーション研究より開始した。当初の計画としては、フェルミオン作用としてオーバーラップ演算子、ゲージ場作用に繰り込み群による改良された Iwasaki 作用を採用し、これにトポロジ固定項を加えたものを用いた。トポロジ固定項は、オーバーラップ演算子のカイラル対称性を悪化させる低周波モードを抑制する効果があり、物理的なフェルミオンの自由度としての役割は果たさないの、ゲージ場の一部として考えるべきものである。オーバーラップ演算子は $\text{sign}(H_W)$ (H_W は Hermite 化した Wilson 演算子) という項を含むが、 sign 関数の実装については Zolotarev による最適近似式を用い、 H_W の低周波モードによる改良を行なった。また 5 次元ソルバーによる改良アルゴリズムを利用した。これらのセットアップは、JLQCD Collaboration による QCD の研究 [5] にほぼ対応している。

前研究期間までに、基本表現と随伴表現のフェルミオンの動的シミュレーション・プログラムの開発、クエンチ近似におけるオーバーラップ演算子の性質の研究 [6, 7]、基本表現での $N_f = 4$ までのパラメータサーチを行った。本研究期間においては、この計算を $N_f \geq 6$ へ拡張し、より大きな格子サイズで本格的な計算を行うことを計画していた。しかしながら研究の進展に従って、解析を行う上でトポロジ固定項の導入などによる効果を系統的に評価する必要があり、また系が正則な振る舞いを示すパラメータ範囲を注意深く選ぶ必要があることが分かってきた。これらの効果とフレーバー数を変えた際の物理的性質の変化を区別する必要がある。そのためには、より単純なセットアップの系を比較対象として用意することが効果的であると考え、カイラル対称性は十分よく保っているが、オーバーラップ・フェルミオンに比べると数値的コストが小さいドメインウォール・フェルミオンを動的に用いた研究を行うことを決定した。

ドメインウォール・フェルミオンは 5 次元空間での定式化であり、その 4 次元境界上に通常の物理モードが現れる。5 次元方向のサイズ無限大でドメインウォール演算子はオーバーラップ演算子に一致し、そのカイラル対称性の破れの大きさは残留質量として評価できる。このため、カイラルダイナミクスを研究する上で十分良い性質を持つと同時に、数値的コストはオーバーラップ演算子に比べて $1/5$ 程度である。

4 当該研究期間における実施の詳細

本研究期間においては、上記のドメインウォールフェルミオンを用いた研究のための準備と $N_f = 2$ での動的シミュレーションを実施した。

本研究期間においては、主に以下のような研究を行った。

(1) プログラムの準備

ドメインウォール・フェルミオンを含むシミュレーションのためのコードは、Bridge++ プロジェクト [9] で開発しているコードをベースとし、 $SU(2)$ ゲージ群を可能にする変更を行った。本研究期間中の実行性能はシステム A (1 ノード) でピーク性能の 3%、システム B (32 ノード) で 1.5% 程度と、まだ十分な性能となっていないが、引き続き高速化を行なっているところである。

(2) $N_f = 2$ での動的配位生成

システム A では格子サイズ $8^3 \times 16$ 及び $12^3 \times 24$ 、システム B では格子サイズ $16^3 \times 32$ の

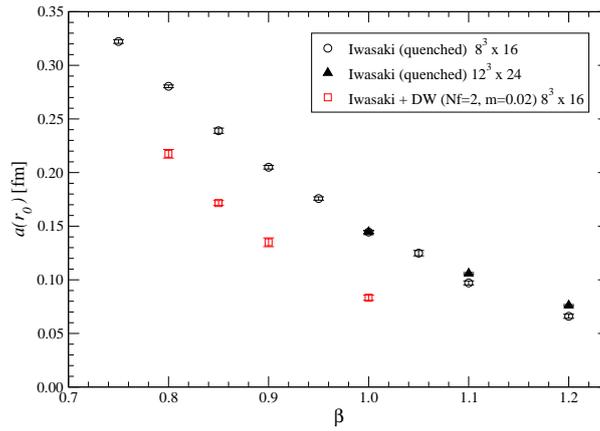


Figure 1: フェルミオン間の静的ポテンシャルから求めた格子定数の β 依存性。特徴的スケールの評価のため QCD 換算で格子定数を定義した。

格子サイズで、ドメインウォール・フェルミオンを動的に含む配位の生成を行った。5次元方向のサイズは16とし、ゲージ場の作用に岩崎改良作用を用いた。図2に、フェルミオン間の静的ポテンシャルを用い、QCDの場合に用いられる Sommer によるハドロン半径 $r_0 = 0.5 fm$ によって定義した格子定数のゲージ場の結合 β に対する依存性を示す。本研究は SU(2) ゲージ理論であり直接の物理的意味はないが、特徴的なスケールを評価するのに便利である。我々が用いる格子サイズでは、系の体積を十分に取るために $a \sim 0.5$ 付近の格子定数が適当であるので、 $\beta = 0.85, 0.90$ で本格的なシミュレーションを行うこととし、それぞれの格子サイズで、フェルミオン質量 $m = 0.05, 0.10, 0.20$ での動的シミュレーションによってゲージ場配位を生成した。

(3) 生成した配位上でのドメインウォール演算子による解析

$\beta = 0.85, 0.90$ において、有限サイズ効果を評価するため、3つの格子サイズでゲージ場配位の生成を行った。図2は動的フェルミオン質量 $m = 0.05$ での擬スカラー及びベクトルメソンの質量の、フェルミオンのヴァレンス質量 (配位上の測定で設定した質量) m_V に対する依存性である。 m_{PS}^2 がゼロまで外挿した場合の m_V の値が、残留質量の符号を変えたものに対応する。この結果より、 $\beta = 0.85$ では $12^3 \times 24$ より大きい格子では有限サイズ効果は十分小さいことが分かったが、 $\beta = 0.90$ では現在生成中の $12^3 \times 24$ 格子での結果を含めて検討する必要がある。他の量子数に対応するメソンは統計誤差が大きく、高統計もしくは何らかのシグナルを改良する手法が必要である。

(4) 生成した配位上でのオーバーラップ演算子による解析

生成した配位の上でオーバーラップ演算子の固有ベクトルを測定することにより、系のトポロジカル・チャージの測定、ランダム行列理論との比較などを行う。この測定には、前研究期間までに開発したプログラムを用いた。ドメインウォール演算子は残留質量ゼロの極限でオーバーラップ演算子に帰着するので、これら二つの演算子の固有ベクトルを比較することで、低周波数モードにカイラル対称性の破れがどのように影響しているかを調べることも可能となる。これらの測定結果については、現在解析を行なっているところである。

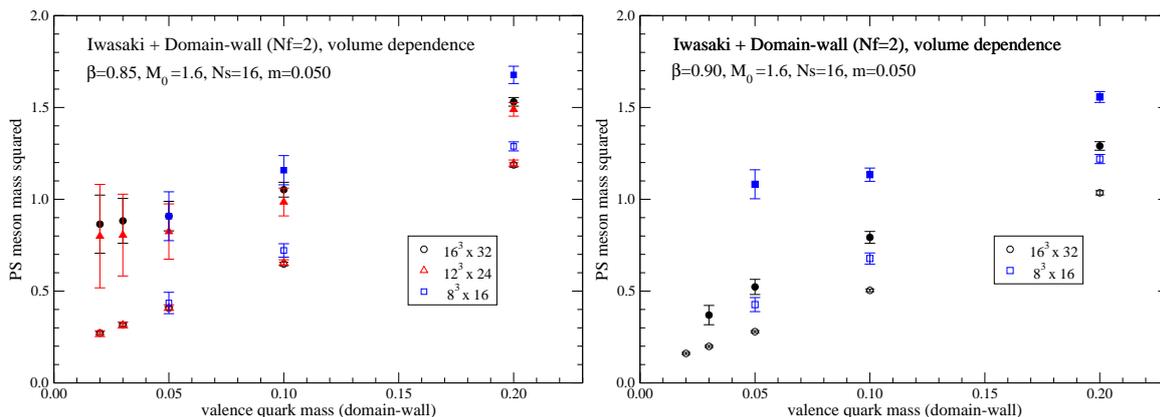


Figure 2: The finite size effect on the masses of PS and V mesons at $\beta = 0.85$ (left panel) and 0.90 (right) and $m = 0.050$.

以上の研究は、平成 25-26 年度大型シミュレーション研究において継続中である。尚このプロジェクトの一部には、名古屋大学素粒子宇宙研究機構における φ 計算機も利用しているが、ここに述べた結果は主に KEK スーパーコンピューターシステムを利用して行った。

References

- [1] E. T. Neil, PoS LATTICE **2011** (2011) 009 [arXiv:1205.4706 [hep-lat]].
- [2] L. Del Debbio, PoS LATTICE **2010** (2010) 004.
- [3] H. Neuberger, Phys. Lett. B **417** (1998) 141 [arXiv:hep-lat/9707022]; H. Neuberger, Phys. Lett. B **427** (1998) 353 [arXiv:hep-lat/9801031].
- [4] H. Fukaya *et al.* [JLQCD Collaboration], Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 172001 [arXiv:hep-lat/0702003].
- [5] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], Phys. Rev. D **78** (2008) 014508 [arXiv:0803.3197 [hep-lat]].
- [6] H. Matsufuru, Y. Kikukawa and N. Yamada, PoS **LAT2009** (2009) 064.
- [7] H. Matsufuru, Y. Kikukawa, K. I. Nagai and N. Yamada, PoS **LATTICE2010** (2010) 090.
- [8] Y. Shamir, Nucl. Phys. B **406** (1993) 90 [hep-lat/9303005]; V. Furman and Y. Shamir, Nucl. Phys. B **439** (1995) 54 [hep-lat/9405004].
- [9] Bridge++ project: <http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>.