

研究責任者名 Name	松古 栄夫 MATSUFURU Hideo	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 14/15-22	研究課題名 Program title	SU(2) ゲージ理論のカイラルダイナミクスの数値的研究 Numerical study of chiral dynamics of SU(2) gauge theory

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)

SU(2)ゲージ理論はQCDとは異なるカイラル対称性の破れのパターンを示し、カイラルダイナミクスを理解する上で重要である。またウォーキング・テクニカラーモデルの候補となり得る理論であり、標準理論を超えた物理を探求するためにも興味深い。本研究では、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SU(2)格子ゲージ理論を数値的に解析し、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。格子上のフェルミオン作用としては、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。昨年度行った格子サイズ $16^3 \times 32$ 、フレーバー数2, 4, 6, 8の基本表現フェルミオンを含む動的場配位を用い、メソン崩壊定数の計算を行った。Nf=8では質量ゼロの極限でカイラル対称性の破れと矛盾する結果が得られた。統計精度が十分でない擬スカラーメソン以外のチャンネルのメソン相関関数を改良するため、Nf=2での統計向上、解析手法の改良を行った。また、随伴フェルミオンの動的シミュレーションを行うためのコードの改良を行った。

(英文)

The SU(2) gauge theory has a chiral symmetry breaking pattern different from that of QCD. It is also interesting as a candidate of walking Technicolor theory and to explore physics beyond the standard model. This work aims at numerical study of SU(2) gauge theory with fermion action that retains good chiral symmetry on the lattice to analyze the dynamics of spontaneous chiral symmetry breaking and its dependence on the number of flavors. As the fermion action, we adopt the domain-wall formulation. On the gauge configurations generated in the last research period with lattice size $16^3 \times 32$ and Nf (number of flavors)= 2, 4, 6, 8, we measured the meson decay constants. For Nf=8, the result implies that the massless limit is inconsistent with the chiral symmetry breaking. For the correlation functions other than pseudoscalar channel, the statistical errors are too large to extract sufficient signal. Thus for Nf=2 we have increased the statistical signal and improved the analysis procedure. We have also improved the simulation code for the dynamical simulation with adjoint fermions.

研究成果を公開しているホームページアドレス

事務局にて使用	論文 査読有	論文 査読無	講義・発表	招待講演	その他
	0	1	2	0	0

平成 26-27 年度 KEK 大型シミュレーション研究

実施報告書

SU(2) ゲージ理論のカイラルダイナミクスの数値的研究

scchiral グループ

研究期間 2014 年 10 月–2015 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

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

SU(2) ゲージ理論は、SU(3) ゲージ理論である量子色力学 (Quantum Chromodynamics, QCD) と同じくカイラル対称性の自発的破れ、閉じ込めといった非摂動的性質を持っている。しかしながら、カイラル対称性の破れのパターンは、QCD が $SU(N_f) \times SU(N_f) \rightarrow SU(N_f)$ (N_f はフレーバー数) であるのに対し、SU(2) 群が擬実であることから基本表現のフェルミオンについては $SU(2N_f) \rightarrow Sp(2N_f)$ と異なっている。また随伴表現のフェルミオンに対しては任意の SU(N) ゲージ群で $SU(2N_f) \rightarrow SO(2N_f)$ である。SU(2) ゲージ理論は、最近では素粒子標準模型の Higgs セクターを説明する候補である、ウォーキングテクニカラー模型の候補としても注目されている。その相構造や対称性の破れのフレーバー数依存性、複合粒子の質量や崩壊定数等の性質を理解することは、非可換ゲージ理論のカイラルダイナミクスと対称性の破れのパターンの関係という理論的観点だけでなく、標準理論を超えた物理探索のためにも重要である。テクニカラー模型の候補となる模型に対し実験と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, 3, 4]。

このような SU(2) ゲージ理論のカイラル対称性の破れの現象を、格子場の理論のシミュレーションによって解明するのが、本研究の目的である。そのためには、格子上でカイラル対称性を可能な限り保持するフェルミオン作用を用いることが重要である。本研究では格子上で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 [5] と、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 [6] を相補的に用いる。ドメインウォール・フェルミオンは、5 次元での定式化により、軽いモードがその 4 次元部分空間に現れるようにした理論であり、5 次元方向のサイズ無限大の極限がオーバーラップ・フェルミオンに対応する。

N_f	β	$m = 0.20$	Lattice spacing $a(r_0)$ [GeV]		
			0.10	0.05	0.03
2	0.85	0.2096(7)	0.1871(10)	0.1736(14)	
	0.90	0.1708(9)	0.1537(7)	0.1414(8)	
4	0.85	0.1727(13)	0.1382(17)	0.1165(25)	0.1009(13)
	0.90	0.1391(10)	0.1044(11)	0.0839(11)	
6	0.80	0.1994(10)	0.1442(13)	0.1012(17)	
	0.85	0.1445(9)	0.0949(12)	0.0583(25)	
	0.90	0.1064(11)	0.0749(10)	0.0463(22)	
8	0.80	0.1642(20)	0.1052(14)	0.0589(18)	
	0.85	0.1137(12)	0.0687(16)	0.0310(21)	

Table 1: シミュレーションパラメータと格子スケール。 N_f はフレーバー数、 β はゲージ結合定数、 m は動的フェルミオン質量を表し、各アンサンブルで静的ポテンシャルから $r_0 = 0.49$ fm として決定した格子定数を示す。

本研究では、基本表現及び随伴表現のフェルミオンに対し、ドメインウォール・フェルミオンを動的に含む場の配位を生成し、その上でドメインウォール演算子とオーバーラップ演算子の固有値分布やフェルミオン伝搬関数から、カイラル対称性の破れや複合粒子の性質、有限温度での相構造などを調べることを目標としている。基本表現ではフレーバー数 $N_f = 2, 4, 6, 8$ でのシミュレーションを行い、物理量の N_f 依存性を明らかにする。フェルミオン演算子の固有値分布をランダム行列理論と比較することにより、対称性から予言される振る舞いを検証する。また、オーバーラップ作用とドメインウォール作用によるフェルミオン物理量の違いから、カイラル対称性の破れがどのように影響するかを調べ、ドメインウォール作用の改良の効果を評価する。随伴表現のフェルミオンを持つ $SU(2)$ ゲージ理論でも同様の研究を行う。

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において開始した。当初は、フェルミオン場に対しオーバーラップ演算子、ゲージ場に対し繰り込み群により改良された岩崎作用を採用し、これにトポロジー固定項を加えた作用でシミュレーションを行うことを目指し、準備的研究を行った [7, 8]。しかしこの手法では系統的な研究に大きな数値的コストがかかることが判明したため、まず基礎として、カイラル対称性は十分よく保っているが、より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。得られたゲージ配位上で、オーバーラップ演算子とドメインウォール演算子の性質を比較することにより、対称性の破れがダイナミクスにどのように影響しているかを調べることができる。

ドメインウォール・フェルミオンを動的に含む研究は平成 24-25 年度に開始した。シミュレーションコードの開発は Bridge++ プロジェクト [9] で開発されているコードをベースとし、これ

にSU(2) ゲージ群を可能にする変更を行った。ゲージ場に岩崎改良作用、フェルミオンに基本表現の標準的ドメインウォール作用を用い、5次元方向のサイズは16とした。配位生成アルゴリズムにはHybrid Monte Carlo法を使用した。フレーバー数 $N_f = 2$ において、動的配位生成を格子サイズ $8^3 \times 16$ 、 $12^3 \times 24$ 、 $16^3 \times 32$ で行い、静的ポテンシャルによる格子スケールの決定、メソン質量に対する有限サイズ効果の評価、ドメインウォール演算子とオーバーラップ演算子の固有値分布の比較など、今後行う予定の解析手法を準備した[10]。

平成25-26年度研究期間には、格子サイズ $16^3 \times 32$ において、基本表現のフレーバー数 $N_f = 2, 4, 6, 8$ に対し表1のようなパラメータにおいてゲージ配位を生成した。フェルミオン間の静的ポテンシャルより格子スケール r_0 (ポテンシャルから $r^2 \partial V(r)/\partial r|_{r_0} = 1.65$ で定義される) を決定し、 $a(r_0)$ のフレーバー数・フェルミオン質量依存性を調べた。これにより、フレーバー数が大きくなるに従い、フェルミオン質量依存性が大きくなり、特に $N_f = 8$ では質量ゼロに向かって閉じ込めの振る舞いが失われることが示唆された。フェルミオン相関関数より、ドメインウォール・フェルミオンの残留質量、メソン質量の測定を行った。有限のフェルミオン質量ではすべてのアンサンブルについてカイラル対称性の自発的破れを示す振る舞いが得られたが、ゼロ質量極限への外挿には系統誤差に注意した解析が必要であり、その方法を準備中である。

4 当該研究期間における実施の詳細

(1) メソン崩壊定数の測定

平成26-27年度に生成した配位の上で測定した相関関数より、メソン崩壊定数を決定し、そのフレーバー数依存性を調べた[11]。各 β , N_f , 動的フェルミオン質量の配位上で、相関関数の計算に用いたヴァレンス・フェルミオン質量を変えながら崩壊定数を測定した。図1は、格子スケール r_0 によって無次元化した擬スカラーメソンの崩壊定数をヴァレンス・フェルミオン質量 m_{val} に対しプロットしたものである。 N_f が大きくなるに従い、 m_{val} への依存性が動的質量 m によって大きく変化するようになる。特に $N_f = 8$ では、 $m_{val} = 0$ への外挿値が小さい m で消失することを示唆する結果が得られた。 $N_f = 6, 8$ では β , m によって格子スケールが大きく変化するため、解析には注意が必要であり、現在メソン質量と合わせて解析手法の改良を行なっている。

(2) $N_f = 2$ 配位の高統計化と解析手法の改良

テクニカラーモデルの解析には、擬スカラー中間子以外にも、ベクトル、軸性ベクトル中間子の質量と崩壊定数も重要な量であるが、これまでの統計(1000配位)と解析手法では十分な精度が得られなかった。このため、まず $N_f = 2$ において統計数を2500配位に増加し、既に測定した局所的演算子の相関関数にスメアリングを適用した演算子の相関関数を追加することによる解析手法を改良を行なった。

(3) 随伴表現のフェルミオンに対するシミュレーションコードの改良

随伴表現のフェルミオンに対しては、これまで主に青木相の解析を名古屋大素粒子宇宙起源研究機構の計算機を用いて行ってきたが、今後のドメインウォール作用を用いた計算ではより大きな計算コストが必要となるため、KEKシステム及びGPUを利用するための計算コードの開発・改良を行った。コードの準備はほぼ完了し、今後の計算のための準備

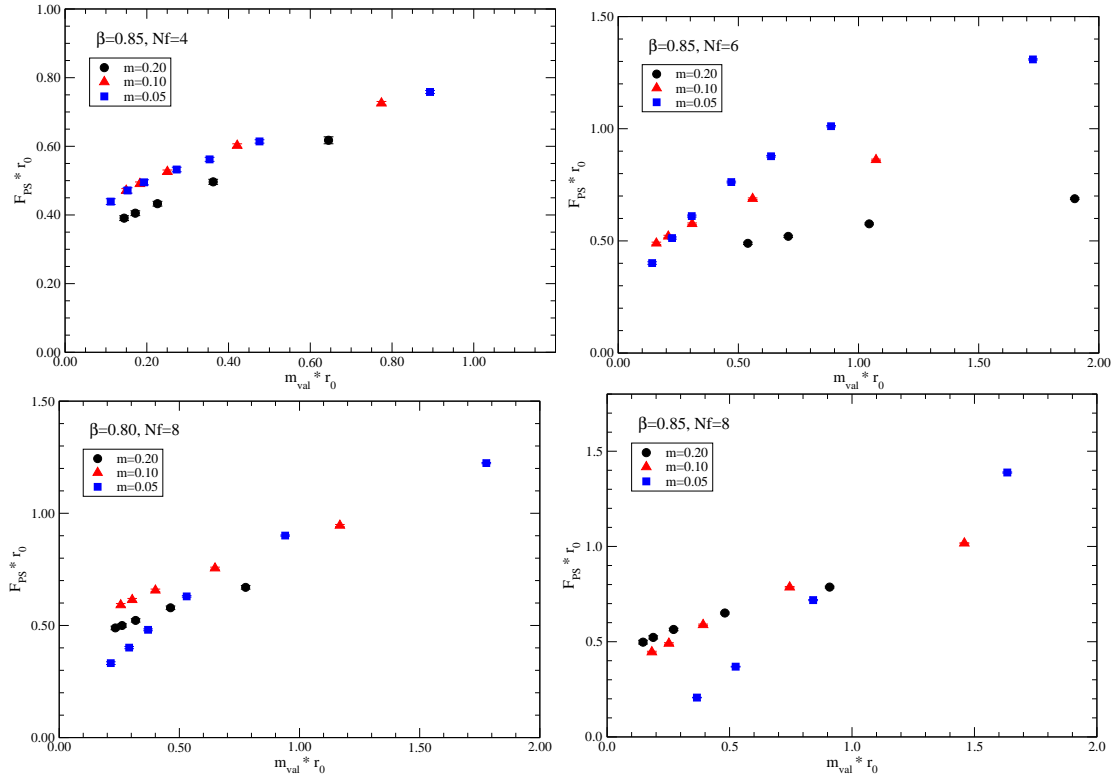


Figure 1: 格子スケール r_0) でスケールしたメソン崩壊定数のヴァレンス・フェルミオン質量に対するプロット。

を行なっているところである。

研究は平成 27-28 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、上記の研究には主に KEK スーパーコンピューターシステムを利用した。

References

- [1] J. Kuti, PoS LATTICE **2013** (2014) 004.
- [2] J. Giedt, PoS LATTICE **2012** (2012) 006.
- [3] E. T. Neil, PoS LATTICE **2011** (2011) 009 [arXiv:1205.4706 [hep-lat]].
- [4] L. Del Debbio, PoS LATTICE **2010** (2010) 004.
- [5] H. Neuberger, Phys. Lett. B **417** (1998) 141 [arXiv:hep-lat/9707022]; H. Neuberger, Phys. Lett. B **427** (1998) 353 [arXiv:hep-lat/9801031].
- [6] 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].

- [7] H. Matsufuru, Y. Kikukawa and N. Yamada, PoS **LAT2009** (2009) 064.
- [8] H. Matsufuru, Y. Kikukawa, K. I. Nagai and N. Yamada, PoS **LATTICE2010** (2010) 090.
- [9] Bridge++ project: <http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>.
- [10] H. Matsufuru, Y. Kikukawa, K. i. Nagai and N. Yamada, PoS **LATTICE 2013** (2014) 123 [arXiv:1401.6655 [hep-lat]].
- [11] H. Matsufuru, K. i. Nagai and N. Yamada, PoS **LATTICE 2014** (2014) 241.