

# 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 3 月–2012 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・助教) 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、カイラル対称性を明白に保つ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] を用いる。

フェルミオンはまず基本表現のものを考え、フレーバー数  $N_f = 2, 4, 6, 8$  の場合について、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。カイラル凝縮を、 $\epsilon$ -領域において、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の結果を比較することで求め [4]、南部-Goldstone ボソンの崩壊係数を相関関数から求める。これらの研究によって、カイラル対称性の破れのダイナミクスを解明し、そのフレーバー数依存性を通して、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。特に  $N_f = 8$  については、赤外固定点を持つ可能性があるため、注意深い解析が必要であるため、それより小さいフレーバー数において、系の性質を十分理解し、手法を確立しておくことが不可欠である。更に以上の手法を、随伴表現のフェルミオンを持つ SU(2) ゲージ理論へも応用していきたい。

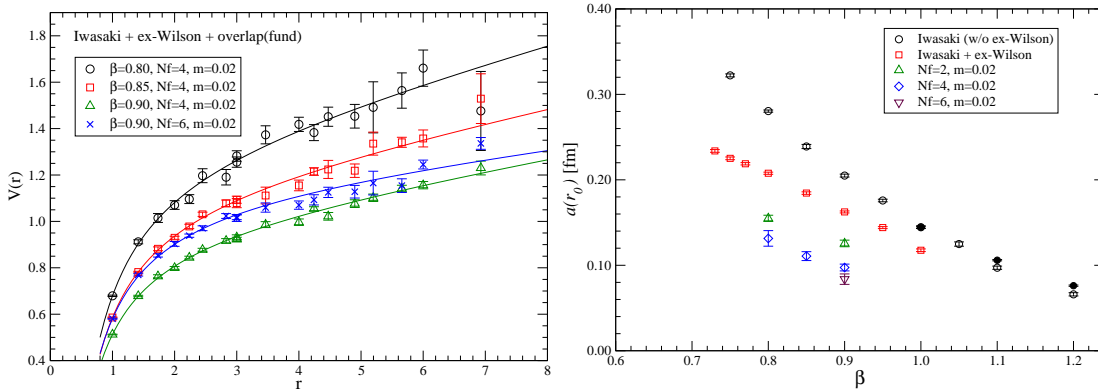


Figure 1: フェルミオン間の静的ポテンシャル (左図) と、QCD 換算で求めた格子定数の  $\beta$  依存性 (右図)。

### 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。格子作用としては、フェルミオンに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、これにトポロジー固定項を加えたものを用いる。トポロジー固定項は、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、 $\text{sign}$  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ている。また 5 次元ソルバーによる改良アルゴリズムを利用している。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。

既にシミュレーション・プログラムの開発は完了し、基本表現、随伴表現のフェルミオンを持つ動的な計算が可能となっている。これまでに、クエンチ近似において、オーバーラップ演算子が持つべき局所性を保証するパラメータ領域の策定が終了している [6, 7]。また基本表現では、 $N_f = 4$  までのフレーバー数に対し、実際に動的計算によってパラメータサーチを行った。図 1 は、これらの準備的研究において行った、フェルミオン-反フェルミオン間の静的ポテンシャルの計算と、そこから決めた格子定数の  $\beta$  (結合を表すパラメータ) 依存性である。ただし、通常は格子定数をシミュレーションで測定した量を物理量と比較して定めるが、現在扱っている理論では比較すべき物理量がないため、QCD(SU(3), 2+1 フレーバー) の場合に対応するように換算した。これは、閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れが起こる特徴的なスケールに対し、QCD の場合を参考に示唆を得るためである。これらのデータから、 $N_f = 4$  までについて、どのようなパラメータ領域でシミュレーションを行えば  $\epsilon$ -領域を実現できるかを判断できる。この結果に基づいて、動的な配位の生成をより大きな格子サイズで行っている。また、 $N_f = 6$  についても、ポテンシャルの振る舞いから、閉じ込め相 (QCD の場合はカイラル対称性が破れた相に対応) が存在することを示唆する結果が得られている。

尚このプロジェクトの一部は、名古屋大学素粒子宇宙研究機構における  $\phi$  計算機も利用して行なっている。

## 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、主に以下のような研究を行った。

### (1) プログラムの準備

オーバーラップ演算子を動的に含むシミュレーションのためのコードは既に前システム上で開発済みであるが、本システムで実際に実行するための動作確認、実行環境の整備、ノード分割など実行パラメーターの策定を行った。実行性能は、配位生成のためのコードについて、システム A の 1 ノードクラスで 20.8GFlops (ピーク性能の 2.1%), システム B の 32 ノードクラスでノードあたり 10.3GFlops(ピーク性能の 5.0%) 程度である。実行性能はまだ十分とは言えないため、チューニングを進めているところである。現在は各コアに MPI ノードを割り当てているが、格子サイズ  $8^3 \times 16$  から  $16^3 \times 32$  までが本研究でメインに使う計算規模であり、マルチスレッドに対応したコードに改良することで性能改善が望めると考えられる。Wilson ループの測定、メソン相関関数の測定、オーバーラップ演算子の固有値測定のためのプログラムについても、準備を行った。

### (2) 準備的研究のための配位生成

システム A では格子サイズ  $8^3 \times 16$  で  $N_f = 6, 8$  の場合の準備的研究のための配位生成を行った。現在、1 ノードクラスで  $N_f = 6$  の場合に、1 トラジェクトリあたり 3 時間強の時間がかかっている。 $N_f$  が大きくなるに従って、急速に配位生成の時間が増大する傾向があることがわかった。これを改善するために、ブロック Krylov 法と呼ばれる線形方程式解法の加速法を導入することを検討している。また、トポロジー固定項のパラメーター依存性を調べるための配位の生成も  $N_f = 2, 4$  において開始した。これらの配位の上で、現在静的ポテンシャル、相関関数、フェルミオン演算子の固有値分布について測定を進めているところである。

### (3) 大格子サイズにおける配位生成

システム B では  $12^3 \times 32$  及び  $16^3 \times 32$  の格子サイズにおいて、 $N_f = 2, 4$  での本格的配位生成を開始した。通常のフェルミオン質量の領域に加えて、擬スカラーメソンの Compton 波長が系より大きい  $\epsilon$ -領域を想定した配位の生成を行なっている。現在の配位データ生成のペースは、1 日に数トラジェクトリであり、1000 トラジェクトリ程度の統計が最低限必要であるため、プログラム的高速化とアルゴリズムの改良を進めている。配位アンサンブルが熱平衡状態に達し次第、相関関数などの性質を調べるため、準備を進めているところである。

以上の研究は、平成 24-25 年度大型シミュレーション研究において継続中である。

## 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.